

居住区公共开敞空间使用模式 测度与模拟方法研究

(申请清华大学工学博士学位论文)

培养单位：建筑学院

学 科：城乡规划学

研 究 生：侯静轩

指导教师：龙 瀛 副教授

二〇二二年十月

居住区公共开敞空间使用模式测度与模拟方法研究

侯静轩

Measurement and Simulation of Public Open Space Usage Patterns in Residential Communities

Dissertation Submitted to

Tsinghua University

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Doctor of Philosophy

in

Urban and Rural Planning

by

Hou Jingxuan

Dissertation Supervisor: Associate Professor Long Ying

October, 2022

学位论文指导小组、公开评阅人和答辩委员会名单

指导小组名单

公开评阅人名单

答辩委员会名单

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：

(1) 已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；(2) 为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容；(3) 根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》及上级教育主管部门具体要求，向国家图书馆报送相应的学位论文。

本人保证遵守上述规定。

(保密的论文在解密后遵守此规定)

作者签名： _____

导师签名： _____

日 期： _____

日 期： _____

摘要

当前城市发展进入存量更新时代，基于定量分析的城市更新及精细化治理成为城市建成环境领域的重要议题。居住区公共开敞空间作为人们日常活动最频繁的空间对居民身心健康及城市可持续发展具有重要意义。然而，由于缺少长时间精细尺度居民活动的测度方法，相关研究难以获得高精度活动分布，限制行为模拟的模型及参数选择，以及公共开敞空间的优化。本研究立足于居住区公共开敞空间使用模式测度与模拟方法的既有局限，从宏观及微观两个尺度，提出使用模式测度与模拟的方法，并通过实证研究探索各方法的有效性及其在支持设计及更新改造的应用潜力。具体研究主要分为居住区公共开敞空间使用模式测度（研究一）、使用模式模拟（研究二）、基于使用模式测度与模拟的空间优化（研究三）三个部分。其中研究一测度的数据能够支撑研究二的模拟，研究一与研究二的结果共同支撑研究三的空间优化。

研究一使用模式测度研究根据不同尺度不同活动的空间偏好差异提出相应的测度方法。宏观尺度测度方面，研究提出根据人次与人数数据差异区分交通与休闲行为的方法，并通过在紫荆雅园与 751 园区分别布置 12 台与 19 台 Wi-Fi 探针设备长时间监测获取数据验证方法有效性。微观尺度测度方面，研究提出基于图像数据的行人识别与分析方法，区分行人的穿行及停留行为，并在紫荆雅园 5 个空间进行三次的单日视频数据采集及水磨社区 3 个空间连续一月的图片数据采集验证方法有效性。

研究二使用模式模拟研究基于研究一测度获取的数据探索行为与空间的关系，并构建用于使用模式模拟的模型。宏观尺度模拟根据已有理论提出关注道路连接关系的交通行为与空间句法线段模型更相关，强调视觉要素的休闲行为与视域模型相关性更高，并根据研究一宏观使用模式测度结果建立紫荆雅园的模拟模型以验证模型有效性。微观尺度模拟将穿行行为视为交通行为的微观表现，停留行为视为休闲行为在微观尺度的代表，将视觉要素划为可能影响人停留的各类设施，并根据微观使用模式测度结果分析穿行行为及停留行为与空间形态及设施布局的相关性，以验证模型的有效性。

研究三为基于使用模式测度与模拟的空间优化研究，综合环境行为学理论、“前策划-后评估”的定量模拟及评估方法及行为-空间互动理论，提出针对不同居住区的基于使用模式测度及模拟的公共开敞空间优化方法。针对老旧小区更新，研究提出基于使用模式测度的问题识别方法，评估设施布局及空间形态的合理性，支持小规模更新实践，并将方法应用于紫荆雅园和水磨社区中；针对新建居住区，研究提出基于使用模式模拟的设计方案比选方法，用以评价不同设计方案的活动效益，支持大规模更新或新建区域的设计实践，并将方法应用于杨坨中区公共开敞空间设计方案优化中。

本研究的方法及模型可支持精细尺度环境行为学研究及居住区公共开敞空间优化。

关键词：居住区；公共开敞空间；使用模式测度；使用模式模拟；空间优化

Abstract

As urban development enters a new era, urban regeneration and refined management based on quantitative analysis have become essential topics in the field of the urban built environment. The public open space in residential communities, as the most frequently used space for residents, has shown great importance to residents' physical and mental health and the sustainable development of cities. However, due to the lack of appropriate methods to measure residents' activities at a fine scale for a long period, state-of-art studies fail to obtain high-precision activity distribution, which limits the choice of models and parameters for behavioral simulation and the optimization of public open spaces in residential communities. To address the research gap in methods for measurement and simulation of public open space usage patterns in residential communities, this study proposes several approaches to measuring and modeling public open space usage at both macro and micro scales and explores the applicability of each method and its potential application in supporting the design and renovation of public open spaces in residential communities through empirical studies. The main body of this study consists of three parts: measurement of public open space usage patterns (Part 1), simulation of public open space usage patterns (Part 2), and spatial optimization based on the measurement and simulation of public open space usage patterns (Part 3). The data collected in Part 1 is used to support the simulation in Part 2, and the results in Part 1 and Part 2 are the basis of Part 3 to help the spatial optimization.

Part 1 proposes the measurement of usage patterns according to the differentiated spatial preference of diversified activities at different scales. In terms of macro-scale measurement, this study proposes a method to distinguish transport and recreational behaviors based on the difference in the number of pedestrians and traffic counts, and verifies the applicability of the method by arranging 12 and 19 Wi-Fi probes in a gated residential community-Zijingyayuan, and 751 D-PARK respectively for long-term monitoring and obtaining pedestrian data. For micro-scale measurement, this study identifies the pedestrians and distinguishes pedestrians' passing-by and staying behaviors through image data with deep learning algorithm. Five public open spaces in Zijingyayuan and three ones in Shuimo Community are monitored to collect data (three times * two angles * 15 minutes in Zijingyayuan and one-month duration in Shuimo Community) and to verify the effectiveness of the method.

Part 2, simulation of usage patterns, explores the relationship between behavior and the built environment based on the data obtained from Part 1 and builds a model for usage pattern simulation. Rooted in existing findings, macro-scale simulations suggest that transport behaviors that focus on road connections are more relevant to the results in the segment model, and recreational behaviors that emphasize visual elements and guidance are more associated with the results in visual graph analysis. The simulation model of Zijingyayuan is used to compare with results collected from Part 1 to verify the accuracy of the model. The micro-scale simulation considers passing-by behavior as a representation of transport behavior and the staying behavior as a representative one of recreational activities at the micro-scale. The relationship between passing-by behavior and spatial form, and between staying behavior and facility layout are analyzed to verify the applicability of the model.

Part 3 is the spatial optimization for different residential communities based on the measurement and simulation of public open space usage patterns, referring to Environmental Behavior theory, and the quantitative simulation and evaluation methods in the “Programming - Post Occupancy Evaluation”, and Space-Behavior Interaction theory. For the renewal of old residential communities, this study proposes a problem identification method based on the measurement of usage patterns to evaluate the rationality of facility layout and spatial form, and applies the method to Zijingyayuan and Shuimo Community, thus supporting small-scale renewal practices. For new communities, this study helps select design schemes based on simulation results to evaluate the activity benefits of different design schemes, and applies the method to public spaces in Yangtuo Zhongqu, thus improving the design and practice of large-scale regeneration of old communities or new communities.

The measurements methods and simulation models of public open space usage patterns in this study could support fine-scale environmental behavior studies and the spatial optimization of public open spaces in residential communities.

Keywords: residential community; public open space; measurement of usage pattern; simulation of usage pattern; spatial optimization

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	城市更新是精细化治理的重要抓手	1
1.1.2	居住区是城市更新的主要载体	2
1.1.3	公共开敞空间是居住区更新改造的重点	3
1.1.4	使用模式的测度与模拟是居住区公共开敞空间优化的重要支撑	4
1.2	研究问题	4
1.3	研究目的	5
1.4	研究意义	5
1.5	概念界定	6
1.6	论文组织结构	7
第 2 章	文献综述	9
2.1	居住区公共开敞空间使用模式研究背景	9
2.1.1	公共开敞空间研究进展	9
2.1.2	居住区公共开敞空间研究进展	10
2.1.3	居住区公共开敞空间使用模式研究进展	12
2.2	居住区公共开敞空间使用模式测度方法	12
2.2.1	居住区公共开敞空间使用模式数据收集方法	13
2.2.2	居住区公共开敞空间使用模式数据处理及分析方法	18
2.3	居住区公共开敞空间使用模式模拟方法	24
2.3.1	基于空间二分网络的使用模式模拟方法	24
2.3.2	基于空间网络的自上而下模拟方法	25
2.3.3	基于行为规则的自下而上模拟方法	30
2.4	基于使用模式测度与模拟的居住区公共开敞空间优化理论及方法	31
2.4.1	环境行为学理论	32
2.4.2	前策划-后评估理论	33
2.4.3	空间-行为互动理论	34
2.5	本章小结	35
2.5.1	居住区公共开敞空间使用模式测度小结	35
2.5.2	居住区公共开敞空间使用模式模拟小结	36
2.5.3	居住区公共开敞空间优化理论与方法小结	36

第 3 章	研究框架与实验设计.....	37
3.1	研究框架	37
3.1.1	使用模式测度方法研究	37
3.1.2	使用模式模拟方法研究	38
3.1.3	基于使用模式测度与模拟的空间优化研究	39
3.2	实验设计	39
3.3	本章小结	42
第 4 章	居住区公共开敞空间使用模式测度方法.....	44
4.1	居住区公共开敞空间使用模式测度方法研究	44
4.2	居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法研究	45
4.2.1	已有研究局限及解决思路	45
4.2.2	居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法研究框架	45
4.2.3	使用模式数据收集方法	46
4.2.4	使用模式数据处理方法	47
4.2.5	居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法有效性检验	48
4.3	居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法研究	64
4.3.1	已有研究局限及解决思路	64
4.3.2	居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法研究框架	64
4.3.3	居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法	65
4.3.4	居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法有效性检验	74
4.4	本章小结	79
第 5 章	居住区公共开敞空间使用模式模拟方法.....	80
5.1	居住区公共开敞空间使用模式模拟方法研究	80
5.2	居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟方法研究	80
5.2.1	已有研究局限及解决思路	80
5.2.2	居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟框架	81
5.2.3	居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟方法	82
5.2.4	居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟方法有效性检验	84
5.3	居住区公共开敞空间微观使用模式模拟方法研究	93
5.3.1	已有研究局限及解决思路	93
5.3.2	居住区公共开敞空间微观使用模式模拟框架	93
5.2.2	居住区公共开敞空间微观使用模式模拟方法	94
5.2.3	居住区公共开敞空间微观使用模式模拟有效性检验	96
5.4	本章小结	103

第 6 章	基于使用模式测度与模拟的居住区公共开敞空间优化.....	104
6.1	居住区公共开敞空间优化	104
6.1.1	已有研究局限及解决思路	104
6.1.2	居住区公共开敞空间优化框架	105
6.2	基于使用模式测度的居住区公共开敞空间优化	106
6.2.1	基于宏观使用模式测度的居住区公共开敞空间优化	106
6.2.2	基于微观使用模式测度的居住区公共开敞空间优化	116
6.3	基于使用模式模拟的居住区公共开敞空间空间优化	136
6.3.1	基于使用模式模拟的居住区公共开敞空间空间优化方法	136
6.3.2	基于宏观使用模式模拟的居住区公共开敞空间优化	137
6.3.3	基于微观使用模式模拟的居住区公共开敞空间优化	140
6.4	本章小结.....	141
第 7 章	总结与讨论.....	143
7.1	研究总结	143
7.1.1	居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法研究总结	143
7.1.2	居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法研究总结	144
7.1.3	居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟方法研究总结	145
7.1.4	居住区公共开敞空间微观使用模式模拟方法研究总结	145
7.1.5	居住区公共开敞空间优化研究总结	146
7.2	主要创新	147
7.2.1	理论验证——行为偏好的定量实证检验	147
7.2.2	方法创新——高精度多维度的空间使用模式测度及模拟	148
7.2.3	实践应用——低成本、灵活的活动监测与评估支持多路径空间优化 ..	149
7.3	研究局限与未来展望	149
参考文献	151
附录 A	图像中最上方分析单元下边缘与上边缘夹角计算方法.....	164
附录 B	附图.....	167
附录 C	附表.....	220
致 谢	222
声 明	223
个人简历、在学期间完成的相关学术成果	224

插图清单

图 1-1 2012-2021 年城市更新相关政策数量变化	1
图 1-2 2020 至 2030 年老旧小区总量预计（亿平方米）	2
图 1-3 1990-2021 年 Web of Science 收录居住区公共开敞空间相关文献发表量变化	3
图 1-4 1984-2020 年知网收录居住区公共开敞空间相关文献发表及引用量变化	3
图 1-5 论文组织框架	8
图 2-1 二分网络及其耦合方式	24
图 2-2 公共开敞空间使用模式模拟的两类模型	25
图 2-3 区域、城市与人本尺度空间网络结构示意图	27
图 2-4 线段模型整合度（左）与选择度（右）计算方法示意图	29
图 2-5 视域模型整合度计算方法示意图	30
图 2-6 环境行为学关注的居住区公共开敞空间尺度及要素	32
图 2-7 前策划-后评估中的定量模拟与评估方法（资料来源：庄惟敏, 等, 2019）	34
图 2-8 空间-行为互动理论框架（资料来源：柴彦威等, 2017）	34
图 2-9 居住区公共开敞空间使用模式测度方法现存问题	35
图 3-1 研究内容与实验范围	40
图 3-2 研究一实验范围及设备安装	41
图 3-3 研究二实验范围	42
图 3-4 研究框架	43
图 4-1 宏观及微观尺度公共开敞空间示意图	44
图 4-2 居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法研究框架	46
图 4-3 交通步行行为（左）与休闲步行行为（右）示意图	47
图 4-4 Wi-Fi 探针数据中提取人次与人数方法示例	48
图 4-5 紫荆雅园 Wi-Fi 探针设备安装情况	49
图 4-6 751 园区 Wi-Fi 探针设备安装情况	51
图 4-7 各 Wi-Fi 探针设备所记录月间人次（左）与人数（右）数据自相关分析矩阵	52
图 4-8 各 Wi-Fi 探针设备所记录周间人次（左）与人数（右）数据自相关分析矩阵	53
图 4-9 紫荆雅园日均使用人数与人次空间分布	54
图 4-10 751 园区日均使用人数与人次空间分布	55
图 4-11 紫荆雅园各公共开敞空间工作日与周末人数（上）与人次（下）分布	56
图 4-12 751 园区内各公共开敞空间工作日与周末人数（上）与人次（下）分布	57
图 4-13 紫荆雅园公共开敞空间各小时人数（上）与人均人次（下）比较	58

图 4-14 751 园区公共开敞空间各小时人数（上）与人均人次（下）比较	59
图 4-15 层次聚类算法原理示例	60
图 4-16 各空间工作日（上）与周末（下）人数与人次一致性比较	61
图 4-17 现场观察位置与视角	62
图 4-18 各空间日均人数与人次	63
图 4-19 各空间 Wi-Fi 数据获得的休闲活动指数与现场观察休闲活动比例相关性	63
图 4-20 居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法研究框架	65
图 4-21 居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法框架示例	66
图 4-22 视频数据转换为图像数据的方法	68
图 4-23 Faster R-CNN 目标识别原理示例	69
图 4-24 行为轨迹识别原理示意	69
图 4-25 为轨迹识别结果示意图	70
图 4-26 停留行为识别方法示意	71
图 4-27 居住区公共开敞空间微观尺度人群位置获取方法框架	72
图 4-28 行人空间位置提取方法示意	73
图 4-29 视频拍摄位置	75
图 4-30 低位（左）与高位（右）视频拍摄设备位置示意图	75
图 4-31 视频拍摄结果示意图	76
图 4-32 红外感应相机图像拍摄位置	77
图 4-33 红外感应相机图像拍摄位置	77
图 5-1 居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟方法研究框架	81
图 5-2 线段（上）与视域（下）网络模型建立方法	82
图 5-3 线段模型全局整合度计算结果	85
图 5-4 视域模型全局整合度计算结果	85
图 5-5 空间模型与 Wi-Fi 探针数据匹配范围	86
图 5-6 空间使用模式与网络模型回归分析结果	87
图 5-7 不同匹配半径对应空间范围	88
图 5-8 不同匹配半径线段模型与人次及人数数据回归分析结果	89
图 5-9 不同匹配半径视域模型与人次及人数数据回归分析结果	90
图 5-10 不同网格边长视域模型分析单元示意图	90
图 5-11 不同网格边长视域模型与 Wi-Fi 探针设备记录数据的回归分析结果	91
图 5-12 不同范围视域模型与 Wi-Fi 探针设备记录数据的回归分析结果	92
图 5-13 居住区公共开敞空间微观使用模式模拟框架	94
图 5-14 居住区公共开敞空间穿行行为微观使用模式模拟结果	95

图 5-15 居住区各公共开敞空间微观使用模式与模拟结果对比	96
图 5-16 水磨社区公共开敞空间设施位置	98
图 5-17 水磨社区公共开敞累积穿行行为次数与空间设施位	99
图 5-18 水磨社区公共开敞累积停留行为次数与空间设施位置	100
图 5-19 穿行与停留行为设施回归分析自变量自相关矩阵	101
图 6-1 居住区公共开敞空间使用模式研究支撑空间优化的路径	104
图 6-2 基于居住区公共开敞空间使用模式测度的评估方法	105
图 6-3 居住区各空间不同星期数交通与休闲行为使用模式	107
图 6-4 空间使用联系性测度方法示例	109
图 6-5 工作日与周末空间使用联系性与空间净出入人流量	110
图 6-6 空间可步行面积占比评估结果	113
图 6-7 空间步行设施连续性评估结果	114
图 6-8 空间休闲设施丰富度评估结果	115
图 6-9 交通与休闲活动均衡性后评估	116
图 6-10 红外感应相机拍摄结果示例	117
图 6-11 工作日与周末穿行行为空间微观使用模式	119
图 6-12 日与周末穿行行为空间微观使用模式与空间对应关系	120
图 6-13 工作日与周末停留行为空间微观使用模式	121
图 6-14 工作日与周末停留行为空间微观使用模式与空间对应关系	122
图 6-15 工作日与周末穿行行为空间微观使用模式一致性分析	124
图 6-16 工作日与周末停留行为空间微观使用模式一致性分析	125
图 6-17 基于微观使用模式测度的居住区林荫大道公共开敞空间设计优化	127
图 6-18 基于微观使用模式测度的居住区商业综合体旁公共开敞空间设计优化	128
图 6-19 基于微观使用模式测度的居住区绿廊公共开敞空间设计优化	129
图 6-20 基于微观使用模式测度的居住区东南出入口公共开敞空间设计优化	130
图 6-21 基于微观使用模式测度的居住区中部活动空间设计优化	131
图 6-22 基于微观使用模式测度的居住区北部商业空间设计优化	133
图 6-23 基于微观使用模式测度的居住区南部入口公共开敞空间设计优化	134
图 6-24 基于微观使用模式测度的居住区东部公共开敞空间设计优化	135
图 6-25 可选公共开敞空间面积调整范围	137
图 6-26 方案评估结果	138
图 6-27 优化方案宏观使用模式模拟结果	138
图 6-28 基于宏观使用模式模拟的空间优化结果	139
图 6-29 优化方案微观使用模式模拟结果	140

图 6-30 基于微观使用模式模拟的空间优化结果142

附表清单

表 2-1 居住区公共开敞空间与其他城市公共开敞空间的比较	10
表 2-2 居住区公共开敞空间的研究内容与侧重点	11
表 2-3 基于人工数据收集的使用模式测度方法	13
表 2-4 基于传感器收集数据的使用模式测度方法	15
表 2-5 居住区公共开敞空间交通与休闲使用模式特征	19
表 2-6 行为数据统计方法	22
表 2-7 居住区公共开敞空间使用模式空间位置提取方法	23
表 4-1 各空间 Wi-Fi 数据获得的休闲活动指数与现场观察休闲活动记录数据	64
表 4-2 常用机器学习目标检测模型速度与准确率对比图	78
表 4-3 穿行行为与停留行为识别准确率检验	79
表 5-1 宏观使用模式模拟模型及参数	87
表 5-2 紫荆雅园穿行行为回归分析	97
表 5-3 水磨社区穿行行为回归分析	102
表 5-4 水磨社区停留行为回归分析	103
表 6-1 居住区公共开敞空间属性与使用模式得分表	112
表 6-2 典型布置方案结果对比	136

第1章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 城市更新是精细化治理的重要抓手

随着中国社会经济发展模式由追求高速增长转变为追求高质量发展，城市建设也从以往追求快速满足人们生产、生活的空间容量需求，进入以增加城市空间品质、提升居民生活质量为目标的新阶段。以此为背景，国家对城市发展的方向和水平也提出了更高的要求，并将加强城市规划、建设、管理、更新等多个方面以人为本的精细化考量作为城市发展的抓手。城市规划与建设方面，2015年底召开的中央城市工作会议将“推动以人为核心的新型城镇化”作为工作重点后，2020年底国务院发布的文件再次强调“以人为核心”的工作重心。城市管理方面，习总书记于2017年指出城市管理应该像绣花一样精细。城市精细化治理和建设离不开对以人为核心的城市空间使用模式以及人与建成环境交互关系的认知，因此相关研究在城乡规划专业的重要性正日益凸显（附表1）。

随着中国城镇化率的提高，城市发展从大规模建设进入存量更新时代，其具体可分为针对城镇中的危旧住房改造的“棚改”阶段，针对旧城镇、旧农庄、旧厂房的“旧改”阶段，以及针对工业区、商业设施、居民小区、城中村等的“城市更新”阶段。其中全面“棚改”阶段开始于2013年7月，“旧改”阶段开始于2020年7月，而“城市更新”自2021年全国两会首次出现于政府工作报告后，于2021年3月被编入《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中。城市更新相关政策近年来呈上升趋势（图1-1）。整体而言，相关政策表明“城市更新”将成为推动城市空间优化和品质提升的抓手，且已升级为国家战略。

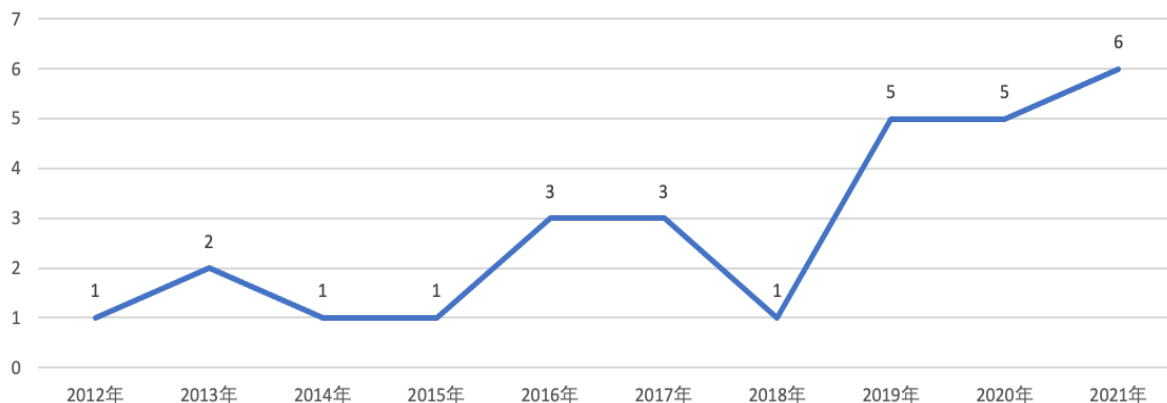


图 1-1 2012-2021 年城市更新相关政策数量变化

1.1.2 居住区是城市更新的主要载体

居住区（Residential Community）作为城市中住宅建筑分布相对集中的地区，是居民日常生活的重要载体，并具有使用周期长、人口聚集程度高、拆迁难度大的特点。其中建成年代较早、使用时长超过 20 年、存在房屋及基础设施老旧、公共空间不足等方面问题的居住区被定义为老旧小区。北京市住房和城乡建设委员会与北京市住房和城乡建设委员会印发的《北京市“十四五”时期老旧小区改造规划》将“建设标准较低、基础设施老化、配套设施不完善、未建立长效管理机制的居住小区”定义为老旧小区。随着中国城镇化发展进入存量更新时代，存量老旧小区数量呈现逐年上升的趋势（图 1-2）。因此，居住区作为城市更新的重要对象之一，在国家层面的发展目标中得到重点强调。居住区更新改造作为一项推动城市更新的系统工程，具有规模大、范围广的特征，同时具有一系列重点以及难点。

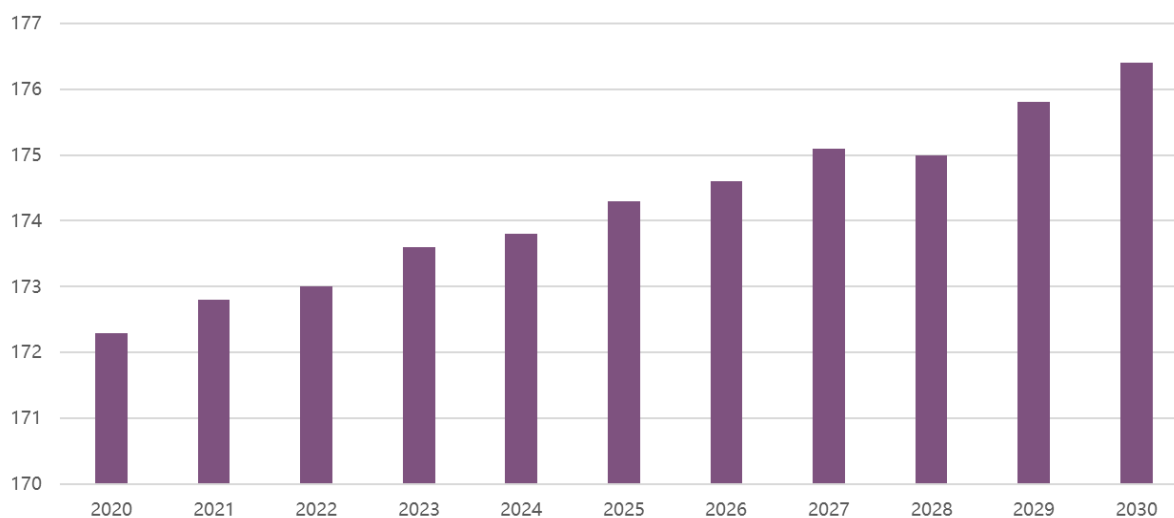


图 1-2 2020 至 2030 年老旧小区总量预计（亿平方米）

（数据来源：国家统计局，2020）

根据《关于全面推进城镇老旧小区改造工作的指导意见》，以老旧小区为代表的居住区更新改造重点主要可分为基础类、改善类与提升类三类。其中基础类包含配套基础设施改造以及建筑物公共部位维修（屋面、外墙与楼梯等），以满足居民基本生活对于功能及安全的需求，主要干预对象为建筑及基础设施；完善类包含对环境绿化以及配套设施（适老设施、无障碍、停车、文化休闲、体育健身设施）的改造，以满足居民对生活品质与质量的需求，使居民的生理与心理健康得到保障，主要干预对象为居住区公共开敞空间；提升类包含居住区内以及周边的公共服务设施（社区综合服务卫生站、幼儿园与综合服务站等），以满足居民生活便捷性需求，从而塑造高质量的居住区环境，以提升居民生活的愉悦感，主要干预对象为公共服务设施。

1.1.3 公共开敞空间是居住区更新改造的重点

在居住区内，由于人的活动半径和感知范围有限，其内部的公共开敞空间（Public Open Space）中每平方米的空间对居民的生活品质都具有极为重要的意义（Gehl, 1987）。具体而言，公共开敞空间的整体布局及不同空间之间的连接方式，会影响居民对公共开敞空间的使用，从而作用于居民在公共开敞空间中的安全感、方向感，以及居民对居住区的整体印象（Marcus, Francis, 1997）。同时，居住区公共开敞空间作为承载人们日常生活的重要场所，对人身心理健康具有重要意义（Kerr, et al., 2012; du Toit, et al., 2007）。因此对居住区公共开敞空间的研究能够对人本尺度城市研究的深度和细致程度进行有效的补充（Long, Ye, 2019）。国际相关文献 2000 年以来包含关键词“居住区（Residential Community）”与“公共开敞空间/公共空间（Public Open Space / Public Space）”的发表量迎来大幅增长（图 1-3），国内相关文献（含“居住区”与“公共开敞空间/公共空间”）的引用量也自 2010 年后有较大增加（图 1-4）。

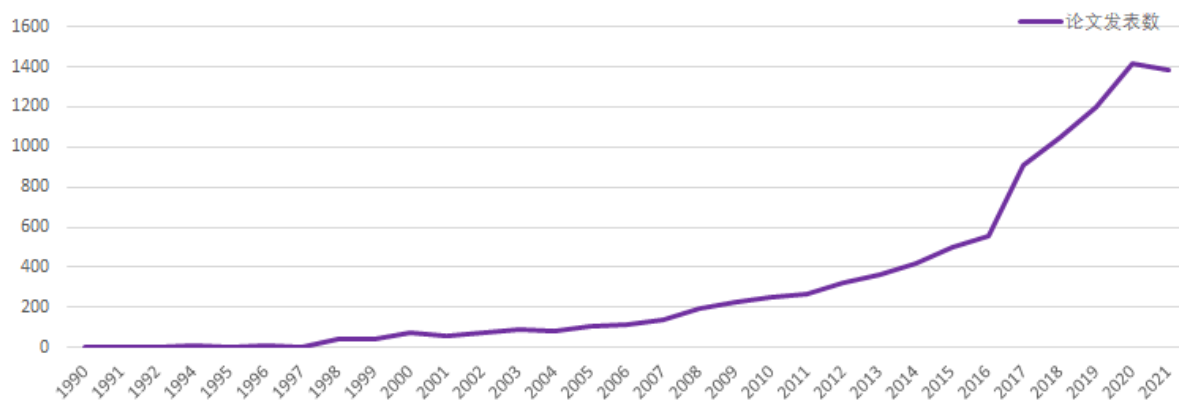


图 1-3 1990-2021 年 Web of Science 收录居住区公共开敞空间相关文献发表量变化
（关键词：Residential Community & Public Open Space / Public Space）

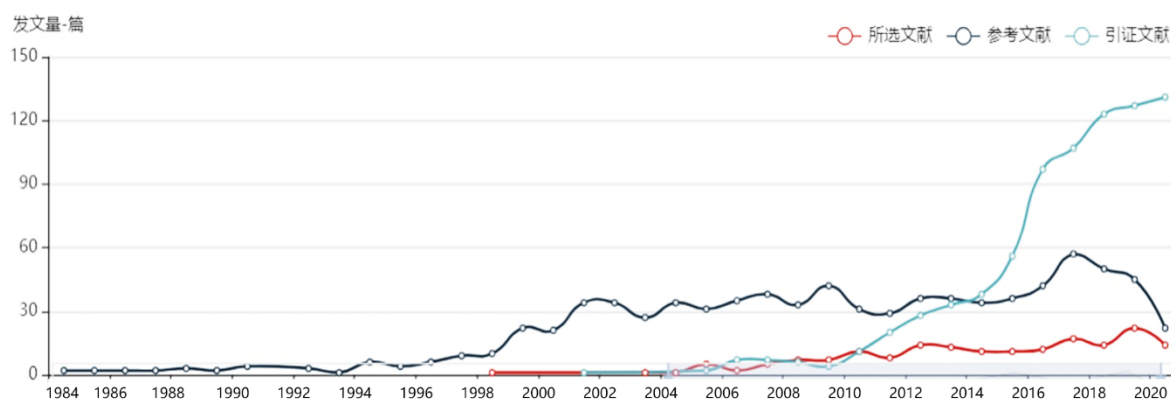


图 1-4 1984-2020 年知网收录居住区公共开敞空间相关文献发表及引用量变化
（关键词：居住区 & 公共开敞空间/公共空间）

然而在过去以快速满足“量”的需求的粗放式城市建设过程中，居住区规划及建设更重视住宅楼的设计和布局，居住区公共开敞空间通常以满足建筑通风、日照间距、交通出行等需求而被动产生，并没有得到设计的充分重视。目前居住区公共开敞空间普遍存在数量不足、功能单一、零散孤立、质量参差、管理不当、与人的需求不匹配等方面的问题（史飞, 鲍家声, 2005; 陈晨, 2010）。随着我国城镇化发展进入新的阶段，城市更新更加重视人作为空间使用主体对空间的需求。城市更新的老旧小区改造中“改善类”所对应的空间载体即为居住区内的公共开敞空间，其包含小区环境（如绿化）和各类基础设施（文化休闲、体育健身、适老化等），使居住区公共开敞空间开始成为居住区更新的重要空间对象。

1.1.4 使用模式的测度与模拟是居住区公共开敞空间优化的重要支撑

居住区公共开敞空间的使用后评估作为评估设计意图满足情况，衡量设施供给与需求匹配程度，以及分析居民满意度和活动特征的主要手段，一直以来是城市规划及设计者关注的内容。其中，分析居民在居住区公共开敞空间中的使用模式及其与建成环境要素及品质的关系具有重要意义。居住区公共开敞空间相较于其他公共空间而言，既具有开放性又具有一定的私密性，并且由于是居民日常活动最频繁的区域，既承担居民的日常休闲活动又承担居民出入居住区的交通活动，因此具有更加复杂的空间使用模式。然而，已有研究更多侧重对公园、广场、街道等城市公共开敞空间的研究，针对居住区公共开敞空间的定量研究相对较少，且无法定量地刻画其中各种行为类型的比例以及对应的空间使用模式，并进一步约束了针对居住区开敞空间使用模式的模拟及空间优化。因此针对居住区公共开敞空间的研究对认识公共开敞空间的行为特征、支持居住区更新改造具有重要意义。

1.2 研究问题

本研究聚焦居住区公共开敞空间，围绕居住区公共开敞空间使用模式测度与模拟方法，旨在回答以下三个维度的研究问题：

一、居住区公共开敞空间的居民行为规律是什么？如何定量测度居住区公共开敞空间的使用模式？

二、居住区公共开敞空间的使用模式如何受建成环境形态及要素的影响？如何模拟居住区公共开敞空间的使用模式？

三、如何将定量分析与模拟结果应用于基于使用模式测度与模拟的居住区公共开敞空间设计优化中？

1.3 研究目的

为回答以上三个维度的研究问题，本研究将从“文献综述-方法研发-案例实践”的路径展开，旨在梳理已有居住区公共开敞空间使用模式测度与模拟方法以及空间优化的路径，厘清居住区公共开敞空间使用模式测度与模拟及基于二者的空间优化方法中存在的局限，提出针对居住区公共开敞空间不同尺度与活动类型的定量测度与模拟方法，并结合案例区域的实践分析验证方法及模型的有效性，并提出基于现状测度与方案模拟的规划设计优化方法，旨在为居住区公共开敞空间的完善与更新提供理论、方法及实践支持，为增加对居住区公共开敞空间这一特殊且广泛存在的公共空间的行为认识提供参考与可拓展实验的方法工具。具体而言，本研究的目的是分为三个层面：居住区公共开敞空间使用模式测度（研究一）、居住区公共开敞空间使用模式模拟（研究二）以及基于使用模式测度与模拟的居住区公共开敞空间设计及更新优化（研究三）。

为回答研究问题一，研究一提出居住区公共开敞空间使用模式测度方法，旨在提出能够高效且准确区分居住区公共开敞空间中不同使用模式的数据收集及处理方法，以解决现有测度方法在难以识别空间中不同活动类型以及活动空间位置分辨率低的问题，并在实验区域对测度方法有效性进行检验，从而实现了对居住区居民不同行为的定量测度，识别居住区公共开敞空间不同行为的时空规律。研究结果将进一步应用于使用模式模拟研究中。

为回答研究问题二，研究二通过分析使用模式与建成环境形态及要素之间的关系，构建基于建成环境的使用模式模拟模型，根据研究一的测度结果对不同模拟方法的有效性进行评估，以明确不同模拟方法的适用范围，进一步根据回归分析结果获得适宜的模型参数以建立不同类型使用模式的模拟模型，并在实验区域对模拟方法有效性进行检验。

为回答研究问题三，研究三旨在完善基于居住区公共开敞空间使用模式测度与模拟的空间优化路径，并在研究一测度与研究二模拟方法的实验分析结果基础上提出适用于不同居住区和更新情景的空间优化方案。

1.4 研究意义

本研究的研究意义分为理论探索意义、方法研发意义及工程实践支持意义三方面。

一、理论探索意义：本研究通过案例区域的实践分析，能够初步得出居民在居住区公共开敞空间的使用规律，并与已有定性与定量研究结果进行比较，增加规划设计及管理人员对居住区公共开敞空间使用模式的理解，进一步提升对人本尺度人群活动的时空特征的认知。此外，本研究还将探讨传统以供给导向的居住区公共空间设计与基于定量分析的以需求导向的空间优化与更新之间的差异。

二、方法研发意义：本研究研发的居住区公共开敞空间使用模式测度及模拟方法为精细尺度研究居民的活动模式和空间规律提供工具支持。此外，该方法的应用不局限于居住区公共开敞空间，可推广应用于其他类型公共开敞空间，如公园、绿地、广场等，为大规模精细尺度环境行为学研究提供实证研究工具，降低人工成本的同时也为横向对比不同空间的行为规律、研究人在不同尺度空间的活动特征提供方法支持。

三、工程实践支持意义：本研究旨在研发低成本、可快速应用拓展到其他居住区的能够实现数据自动化处理与定量分析的居住区开敞空间使用模式测度与模拟的方法及工具。因此，本研究的方法可应用到大规模、长时间对居住区公共开敞空间的监测与使用模式模拟，可用于支持居住区公共开敞空间“前策划”及“后评估”的工作，支持设计方案的比选，以及更新改造工作。考虑居住区公共开敞空间在使用对象、空间权属与管理等方面的特殊性，本研究也将进一步讨论本研究方法的适用范围和条件。

1.5 概念界定

本研究涉及三个核心概念，分别为居住区、公共开敞空间、使用模式。本研究将分别对这三个概念进行界定和阐述。

居住区是不同居住人口规模的居住生活聚居地，是居民日常活动的主要载体，特指“被城市干道或自然分界线所围合，并与居住人口规模（3000-50000人）相对应，配建有一整套较完善的、能满足该区居民物质与文化生活所需的公共服务设施的居住生活聚居地”（中华人民共和国住房和城乡建设部，2016）。在《城市居住区规划设计标准（GB50180—2018）》中，居住区的概念从人口规模的概念，转变为一个基于居民出行的时空概念，因此居住区包含十五分钟生活圈居住区、十分钟生活圈居住区、五分钟生活圈居住区及居住街坊（中华人民共和国住房和城乡建设部，2018）。其中十五分钟及十分钟生活圈居住区对应原规范中的“居住区”，五分钟生活圈居住区对应“居住小区”，居住街坊对应“居住组团”的概念。本研究所指的居住区更多是广义的居住区概念，即城市中一定地域范围内，具有一定规模的有明确空间范围的集中居住区域，包含新标准中所有层级的居住区也包含城中村等非正规居住区域，不强调具体的规模大小和用地功能，并在部分研究引入非居住区进行对比研究。

公共开敞空间广义上指一切人们可以到达的，可以承载公共活动的建筑外部空间，具有多样性、包容性、公共性、开放性的特征，包含城市绿地、公园、广场等（Lynch, 1960）。相较于公共空间既包含室内公共空间又包含室外公共空间，公共开敞空间更多指室外公共空间。本研究关注的是居住区公共开敞空间，是城市公共开敞空间的子集，指居住区内用于居民日常活动的室外公共空间，包括居住区公园、小区公园、居住区内各类户外场地、组团绿地等（林瑛，2012）。

使用模式指人在空间中的时空间行为模式，包含空间分布特征及时间分布特征。相较于行为地理学关注个体的时空间行为特征（柴彦威, 塔娜, 2013），本研究更聚焦空间内发生的活动情况。前者以个体为单元，分析个体在不同时间的活动空间特征，后者则以空间为单元，分析空间承载的活动的的时间特征及空间差异。因此，本研究所涉及的使用模式是一种在空间中汇总的，反映空间被所有/部分人群使用的情况，具体包括活动的总量、密度、类型、轨迹等特征。

1.6 论文组织结构

本章在城市更新与精细化治理的国家方针背景下介绍了居住区公共开敞空间作为城市更新中居住区更新的主要对象之一具有精细研究的重要意义，并提出了已有研究的局限，引出本研究的三个问题，进一步根据三个问题分别提出研究目的及意义，并对本研究的三个关键词做了概念界定。

本文将在接下来的第二章中对居住区公共开敞空间研究进展、使用模式测度与模拟方法及空间优化方法进行综述，并对现有研究方法存在的问题和局限进行梳理与总结。其中居住区公共开敞空间使用模式研究进展综述主要包含对公共开敞空间的研究进展、居住区公共开敞空间的研究内容及方法的介绍。居住区公共开敞空间使用模式测度方法综述梳理不同的数据收集以及数据处理方法，并分析现有方法在支持空间优化方面存在的不足之处。居住区公共开敞空间使用模式模拟方法研究综述梳理不同维度和尺度的空间使用模式模拟模型，讨论了支持不同空间优化内容所需的模拟模型的优势与局限，并分析现有模拟方法存在的问题。第二章最后综述了与空间优化相关的理论及方法，为本研究的空間优化路径提供参考。

本文在第三章将介绍具体的研究框架，其中包含解决居住区公共开敞空间使用模式测度与模拟方法中存在的问题的解决思路以及支撑空间优化的具体路径。第三章还提出实验设计以验证本研究提出的测度及模拟的方法及模型，包括实验的区域及数据收集方法。第四至第六章为本文的主体内容。其中第四章及第五章为使用模式测度及模拟的方法研发与实证研究内容。研究分别从宏观及微观尺度提出针对不同行为的测度及模拟方法，并通过在第三章提出的实验区域进行实证研究，以检验测度与模拟方法的有效性。第四章的测度结果为第五章的模拟提供数据基础。第六章在第四章及第五章的基础上，提出基于测度和模拟的空间优化方法，并将测度与模拟结果用于不同类型居住区及不同尺度的空间优化方案中。本文最后一章为总结与讨论，对本研究涉及的居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法、微观使用模式测度方法、宏观使用模式模拟方法、微观使用模式模拟方法及空间优化方法进行了总结，并从理论验证、方法创新、实践应用三个维度总结了本研究的主要创新点，最后讨论了本研究的局限与未来展望（图 1-5）。

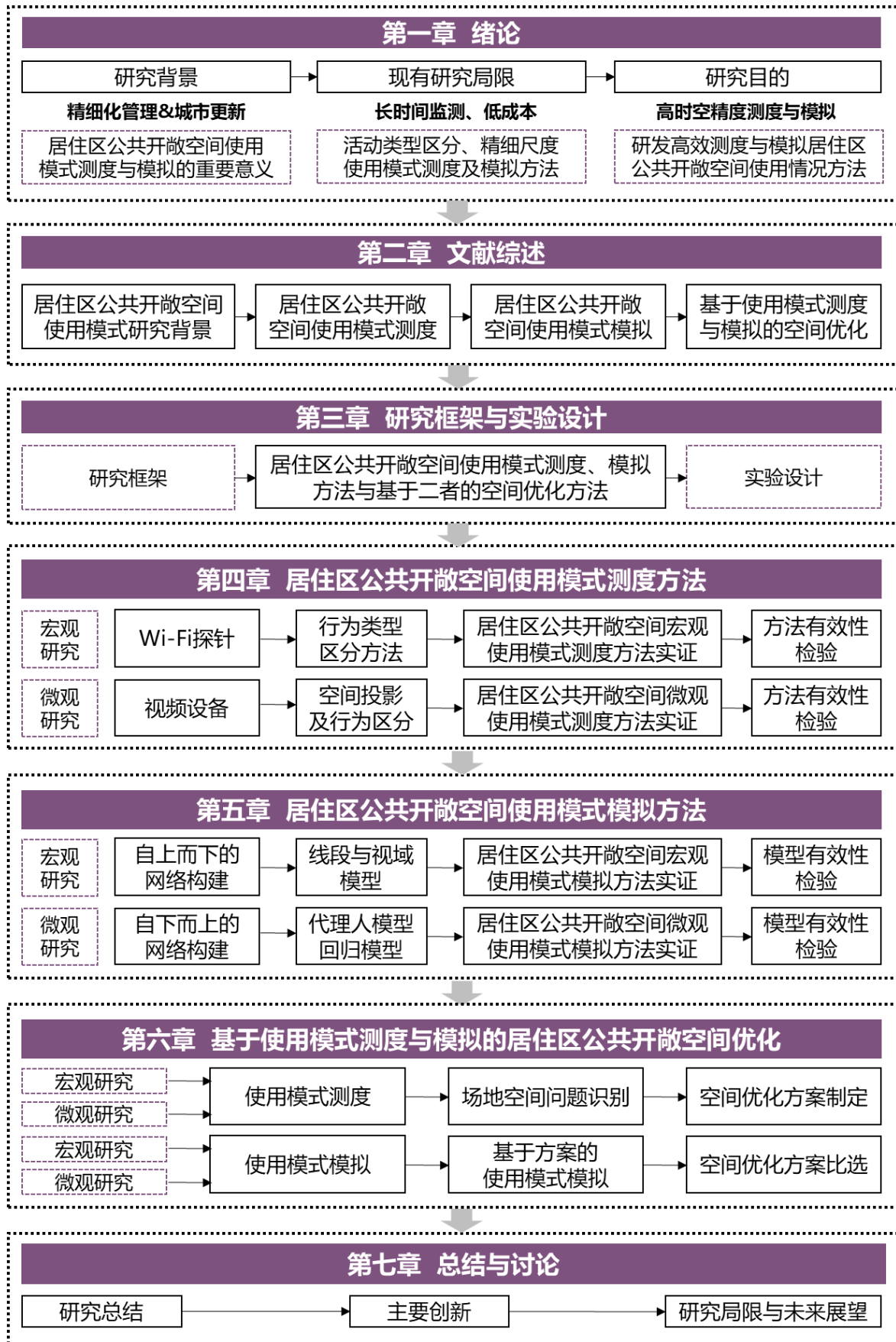


图 1-5 论文组织框架

第2章 文献综述

2.1 居住区公共开敞空间使用模式研究背景

2.1.1 公共开敞空间研究进展

城市公共开敞空间是指供城市居民日常生活,开展社会交往、休闲娱乐、运动健身等公共活动的建筑外部空间,包含街道、广场、居住区户外场地、公园、体育场地等(李德华,2001),具有开放性、可达性、大众性及功能性的特征(王建国,2004)。城市公共开敞空间作为城市公共活动的重要组成部分,具有较大的公共福利性,承担了交通与休闲活动等多方面的城市功能,对人们的生活质量及生理、心理健康具有重要的影响(Kaczynski, Henderson, 2007; Koohsari, et al., 2014)。针对城市公共开敞空间的研究始于二十世纪六十年代一系列城市研究先驱对于现代城市规划与设计的反思(Jacobs, 1961; Lefebvre, 1962),并首次对公共开敞空间的功能、形态及其产生的社会与文化层面的正外部性进行了描述(Lynch, 1984; Gehl, 1987)。相关研究主要关注公共开敞空间与人群活动/感知/行为之间的关系,并从中提取可以引导人群活动,提升城市空间活力的规划/设计导则或要素,如关注街道活力,提出可以促进街道活动的四项要素(Jacobs, 1961);明确城市公共开敞空间中人群活动的概念,对空间结构与人群活动,尤其与活动中人群聚集情况的关系进行了探索性分析(Gehl, 1976);通过在屋顶架设摄像机等方法将人本尺度空间中人群聚集及其在空间中的活动范围进行定量分析(Whyte, 1980)。接下来,对公共开敞空间及其对人群活动影响的客观记录和研究开始大量涌现,并在九十年代后期将空间环境品质评估引入研究体系中(Smit, et al., 1997; Montgomery, 1998; Ewing, Clemente, 2013)。

近年来,信息通信技术及计算机科学的发展为进一步推进相关研究以服务于城市规划、城市建造、城市运营管理及城市更新等实践提供了重要的理论基础以及具有可操作性的技术策略(Zhou, Long, 2016; Ye, Liu, 2018),使测度不可测度(measure the unmeasurable)成为可能(Ewing, Handy, 2009)。一些研究通过眼动仪、VR等设备检验凯文·林奇的城市意象在数字时代的重要性和价值(Meenar, et al., 2019; Morello, Ratti, 2009)。同时,也有一些研究通过各类城市感知数据与建成环境数据检验简·雅各布斯提出的城市设计理论(Sung, et al., 2015)。此外,一些来自计算机领域的学者将深度学习方法引入到杨·盖尔公共生活-公共空间的研究方法中(Yoshimura, et al., 2021)。这些研究通过量化的方法重新认识传统城市公共开敞空间的理论及人本尺度城市形态(Human-scale Urban Form)(Long, Ye, 2019),同时也为补充和拓展数字时代新的环境与行为关系的理论提供了方法与工具支持。

2.1.2 居住区公共开敞空间研究进展

居住区公共开敞空间指居住区内的公共开敞空间，是城市公共开敞空间中活动频次最高、与人们日常生活最密切，且存在最广泛的一类公共开敞空间。不同于其他公共开敞空间（如街道、公园、广场、绿地与口袋公园等），居住区公共开敞空间主要服务于居住区内的居民。由于居住区公共开敞空间是居民尤其是老人及小孩日常活动频率最高的场所，其对居民体力活动、社会交往及身心健康具有重要意义（吕元，等，2021）。居住区公共开敞空间既不同于街道这类以交通行为为主的线性空间，也不同于广场、绿地、公园等以休闲行为为主的面状空间，其既包含线性的交通空间也包含面状的活动空间，其尺度也通常小于城市公园和广场，可承载休闲及交通等综合且复杂的居民活动（表 2-1）。

表 2-1 居住区公共开敞空间与其他城市公共开敞空间的比较

空间类型	形态	主要功能	数量	尺度	活动频次	人群
居住区公共开敞空间	线\面	休闲\交通	普遍存在	较小	极高	居住区居民
街道	线	休闲\交通	普遍存在	较小	极高	周边居民
公园	线\面	休闲	数量较少	不同等级	一般	市民
广场	面	休闲	数量较少	不同等级	一般	市民
绿地	面	休闲	普遍存在	不同等级	较少	市民
口袋公园	线\面	休闲\交通	逐渐增多	较小	较高	周边居民

随着快速城镇化发展逐渐解决了城市空间及功能的有无问题，城市精细化治理则对提升人民生活品质提出新的要求。因此，相关研究开始关注居住区公共开敞空间，并关注其品质和活动。针对居住区公共开敞空间的研究与其他类型公共开敞空间的研究类似，既关注建成环境要素又关注人群活动，还关注活动与空间的互动关系，包括居住区公共开敞空间的可达性（Giles-Corti, et al., 1996; Giles-Corti, et al., 2005; Safari, Moridani, 2017）、场地面积、绿化率（Astell-Burt, et al., 2014; Ye, et al., 2019）、视域（刘正莹, 杨东峰, 2016）、设施功能（陈义勇, 刘卫斌, 2015; 义勇, 刘涛, 2016）等空间要素，以及年龄、健康状况（Schipperjin, et al., 2010）等公共开敞空间使用者的个体特征。

具体而言，居住区公共开敞空间的研究内容分为满意度评估、环境认知评价、使用模式评估、环境效能评价与环境质量评价五个维度。其中满意度研究及环境认知评价侧重于人的主观感知，因此，依赖于研究者与居民的深入交流和观察。尽管近年来发展的线上问卷及访谈、心理实验和设备为这些研究提供了便捷，但仍依赖于居民的参与热情和较高的研究人员精力及时间投入。环境效能评价及环境质量评价侧重于对建成环境要素的直接客观刻画，虚拟审计、深度学习等方法为以往研究者的在地观察提供了远程及大规模测度的替代方案。而使用模式研究则致力于通过定量分析研究人对空间的使用偏好或探索建成环境对人群活动的影响，各类穿戴式设备如全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）追踪器、穿戴式相机等为此类研究提供了长时间监测的机遇，但与满意度评价及环境认知评价的主观感知不同，使用模式评估是基于空间的行为观察，而非基于个体的活动监测，因此基于穿戴式设备的研究不能完全反映居住区公共开敞空间的活动情况（表 2-2）。

表 2-2 居住区公共开敞空间的研究内容与侧重点

研究内容	具体内容	侧重点	典型案例
满意度	研究居民对公共开敞空间中的物质要素及其布局的喜爱和满意程度，包含对住宅外观、公共开敞空间、交通、设施、绿化等的满意度评估等。	仅为感知 / 活动	于文婷, 等, 2020; 陈肖月, 2015; Deuble, de Dear, 2012
环境认知	评估环境要素的特征及其给人的多方面的感受，如对空间的连贯性、易识别性、丰富度、神秘性、安全感等进行主观评价。	侧重感知 / 活动	Lynch, 1960; 徐磊青, 等, 2019
使用模式	针对人在空间中的活动类型及其时空特征（如交通与休闲行为，穿行与停留行为等）的刻画，从而分析建成环境对人群活动的影响。	建成环境与感知 / 活动兼顾	Joseph, Zimring, 2007; Kaczynski, Glover, 2012; 曾琳, 吴承照, 2007; Kiellar et al., 2016
环境效能	对建成环境的外部性（如社会效能、经济效能、生态效能等）进行定性或定量评价。	侧重建成环境	Zhang, et al., 2020
环境质量	对空间形态及设施（如适老化设施、无障碍设施、景观设施、交通设施、环卫设施等）的布局及品质的评估。	仅为建成环境	张幸颖, 2020; 牟燕川, 等, 2020

2.1.3 居住区公共开敞空间使用模式研究进展

居住区公共开敞空间的使用模式反映个体或群体在居住区公共开敞空间中的活动类型及其时空分布，强调居民行为与建成环境要素的关系。近年来，随着城市经济社会的发展，人们日常活动最密切的居住区受到更多的重视，城市更新相关举措也开始加大对居住区公共开敞空间的改造、完善与品质提升。与此同时，以人为本的思想促进了以往以“空间/设施供给-居民适应”的空间设计模式，逐渐向“居民需求识别-空间/设施供给匹配”模式转变。因此，针对居住区公共开敞空间的使用模式测度以及基于空间形态与设施对使用模式的模拟是认识居住区公共开敞空间特征，优化与更新居住区公共开敞空间设计的重要前提，也是居住区公共开敞空间使用模式研究的重点。

鉴于居住区公共开敞空间在引导居民体力活动、促进居民生理与心理健康方面的重要作用，目前行为地理、城市规划与公共健康领域的专家、学者已开始分析居民在居住区中的时空间行为特征，探索建成环境要素对居住区公共开敞空间内活动尤其是步行活动为代表的体力活动的影响（du Toit, et al., 2007; Joseph, Zimring, 2007）。研究结果揭示出不同目的的行为（交通目的或休闲目的）具有不同的空间选择偏好与活动特征，并表明在各类能够对居住区公共开敞空间内行为产生影响的的城市设计要素中，城市形态如道路设计或道路的整合与连接度、空间区位如宏观及微观区位、功能要素（重要兴趣点）及各类设施如停留设施、照明设施等与居民行为具有显著的相关性（Galpern, et al., 2018; Joseph, Zimring, 2007）。

总体而言，针对公共开敞空间使用模式的研究主要通过为对空间中人群活动进行定性或定量测度，并以此为基础研究空间中使用模式的时间及空间规律，并将其与建成环境要素进行关联分析，总结和提取促进公共活动、提升空间活力和吸引力的空间要素，评估空间与设施利用的效率，进而支持城市规划或设计。本研究将通过 2.2、2.3 及 2.4 三个小节具体回顾和综述居住区公共开敞空间使用模式测度与模拟方法，以及基于这些方法优化居住区公共开敞空间的理论及方法。

2.2 居住区公共开敞空间使用模式测度方法

居住区公共开敞空间使用模式的测度从使用“公共空间—公共生活调研法”（Public Space & Public Life Survey, PSPL），通过地图标记法、现场计数法、实地考察法和访谈法四种方法从定性与定量的角度分析不同人群在不同时间的活动，评估公共空间品质（Gehl, 2013），逐渐发展为通过摄像头与倾斜摄影的方式定量记录人的活动分布，分析活动的空间特征（Whyte, 1980）。近年来，随着各类传感器的发展，基于人的传感器如穿戴式相机、手表、手环、GNSS 设备等，以及基于空间的传感器如 Wi-Fi、蓝牙、摄像头等会自动跟踪场地中的人并获得具有高分辨率的地理空间信息或轨迹，从而支持长期观测和细粒度的空间分析。不同方法的差异主要体现在数据收集

与数据处理两个方面。其中数据收集为对现场居民活动情况进行观察及记录的过程，数据处理为将数据收集的结果转化为量化的空间评估指标或建立模拟模型的过程。因此，本文将围绕这两个部分分析不同方法的差异及优劣势。

2.2.1 居住区公共开敞空间使用模式数据收集方法

针对居住区公共开敞空间使用模式测度的数据收集方法可分为使用者生理数据收集与使用者行为数据收集。使用者生理数据收集指使用心理学的方法，通过数据分析或控制变量实验来研究人们使用公共开敞空间时的心理变化从而分析行为特征。以往此种方法需要为受试者佩戴皮电等传感器定量获取其使用空间时的情绪或其他生理指征，从而识别受试者心理指征的变化，因此样本收集较为困难。且由于人的心理活动所受影响因素较为复杂，此类研究仍处于较为初级的阶段。使用者行为数据收集主要基于观察者或固定传感器收集数据并分析空间的具体使用模式。其中传统的人工数据收集方法为基于研究人员的观察和记录的数据收集、记录与审计。近年来，信息通讯技术与计算机科学的发展为公共开敞空间基于环境行为视角的行为模式研究提供了机遇和条件，因此诞生了基于各类移动及固定传感器的数据收集方法。

2.2.1.1 基于观察、自我报告及评价的人工数据收集方法

基于人工数据收集的居住区公共开敞空间使用模式数据收集方法中，使用最为广泛的方法为主观评价法，即基于研究者的观察、访谈和问卷的方法收集受访者的观点、态度及活动评价，以获得人群主观认知中的空间使用模式。具体可分现场调查与观察、认知地图与自我报告以及使用后评价等三种方法（Lynch, 1960, Wilson, 1962; Jacobs, 1995; Gehl, 2011）（表 2-3）。

表 2-3 基于人工数据收集的使用模式测度方法

测度方法	数据形式	结论精度	代表性研究
现场调查与观察	统计图表	定量为主	Gehl, et al, 2011; Whyte, 1980
认知地图	图像地图	定性为主	Lynch, 1960
使用后评价	调查问卷	定性为主	徐磊青, 等, 2004
	访谈结果		Deuble, de Dear, 2012
	自我报告	定性为主	陈梓烽, 等, 2015; Cerin et al., 2006

现场调查与观察法指实验人员在干涉被观察者的前提下记录人们在特定公共开敞空间中的活动，获取客观的空间使用模式的研究方法。可采用网格记录的方法使用图像设备记录空间使用模式，并通过统计研究空间中按网格划分的研究单元中的使用人次进行量化分析，以记录人详细的活动类型和过程或研究人的使用感受与空间偏好。其精度可以达到米级，在传统研究方法中空间精度相对较高。在基于现场调查与观察法的研究中，空间使用模式测度多由研究者实地调查公共开敞空间的使用模式，如统计人流量、绘制活动轨迹等，其可将空间使用模式的人工记录或视频作为研究数据基础（Gehl, Gemzøe, 1996）。如威廉·怀特（Whyte, 1980）曾通过在可俯视研究空间的建筑屋顶架设摄像机的方式，对铺设方形地砖的广场上人群进行拍摄，定量地记录空间使用模式（Winkel, Sasanoff, 1976）。认知地图法指由空间使用者根据记忆绘制空间中的元素并标注出空间不同区域使用的频次，最终研究结果呈现为认知地图的形式，或者使用者根据自我生活习惯绘制的活动轨迹，报告使用频率较高的区域（Lynch, 1960）。使用后评价法指研究者通过调查问卷、访谈或自我报告形式获取空间使用者对于建成环境的认知，以及活动的情景及满意度，以评价公共开敞空间的使用模式。使用后评价法的研究以定性为主，其最终结果体现为调查与访谈报告（Deuble, de Dear, 2012; Hess, et al., 2017）。

总体而言，基于人工数据收集的使用模式测度方法依靠大量人工工作。尽管在线问卷、访谈等方法能减少部分人工工作量，但深入的沟通与交流仍需要大量的人力投入。但另一方面，使用者的主观感受是评价公共开敞空间质量的必不可少的指标，因此在测度居住区公共开敞空间工作中仍旧具有不可替代的重要意义。三种基于人工收集数据的使用模式测度方法中，认知地图与使用后评价方法由于使用者对空间使用模式的回忆有可能存在系统性的误差，结论精度较低。现场调查与观察更加全面而客观，并能够定量刻画居住区公共开敞空间使用模式（Ashibra, 1983; Jabareen, 2006）。然而在以往研究中此方法不能用于无法标记网格位置的公共开敞空间的研究中，因此研究的时间及空间范围受到较大限制（Jiang, et al., 2014; Simpson, et al., 2019）。

2.2.1.2 基于移动及固定设备的传感器数据收集方法

随着信息通讯技术、传感器技术与计算机科学的发展，获取空间中人群活动数据的方法变得愈发多元。相关研究者开始通过嵌入式传感设备以及影像设备等主动收集数据并开展居住区公共开敞空间使用模式研究（Sung, et al., 2015）。此类方法依赖于各式各样的传感器，按照收集方式可分为移动传感器与固定传感器两类（de Nadai, et al., 2016）（表 2-4）。相比于传统研究方法，新数据驱动的方法能够支持高时空精度的定量研究，使人们能够对于人本尺度城市空间的使用模式产生更加深刻的认识，并为进一步为使用模式的影响因素分析与模拟提供了数据基础（Tang, et al., 2018）。

表 2-4 基于传感器收集数据的使用模式测度方法

传感器类型	测度方法	研究内容	代表性研究
移动传感器	VR 虚拟实验	活动路径和视线	Ericson, et al., 2020
	可穿戴设备	活动心理与空间偏好	Rathore, et al., 2016
	GNSS 定位	居民活动的活跃度	柴彦威, 等, 2016 Kielar, et al., 2016
固定传感器	视频数据	居民游客分布	Straumann, et al., 2014
	蓝牙设备	居民活动情况	Yoshimura, et al., 2017
	红外定位	到访及距离	Al-Anbuky, et al., 2015
	Wi-Fi 探针设备	人群环境行为	黄蔚欣, 等, 2017 Hu, et al., 2020
	UWB	室内活动	Li, et al., 2021

基于移动传感器的数据收集方法指使用嵌入式传感器为代表的移动传感器，特别是可穿戴设备如手表、手环、相机等，度量与可视化人们在公共开敞空间中的活动方式、活动时的心理与生理状态及空间使用偏好，具有较高的空间覆盖范围（Rathore, et al., 2016; Duchowny, et al., 2019; Engelniederhanner, et al., 2019）。使用 GNSS 定位的研究需被试者携带相关设备，因此大规模开展具有一定难度，故主要用于个案研究，如研究特殊人群的空间使用偏好（柴彦威, 等, 2016; Kielar, et al., 2016）。此外，相关研究也可以通过 VR、AR 虚拟实验进行空间使用模式的模拟研究实验（Ericson, et al., 2020）。总体而言，此类方法以被试者为核心，研究者通过观察不同被试者在不同情境下的活动模式，汇总不同人群在空间活动的差异和共性。然而，受被试者意愿、实验成本、实验空间等的限制，该方法在大规模研究中具有一定的局限性。

基于固定传感器的数据收集方法指将传感器（如视频设备、蓝牙设备、红外定位设备、Wi-Fi 探针设备、超宽带无线通信设备（Ultra Wide Band, UWB）等）固定在特定的空间载体上如树、电线杆、建筑物等对周边空间进行监测，从而获取人群空间使用模式。视频数据获取可结合社区监控摄像头，因此适用范围较广。其中具有代表性的研究为从监控摄像头或自行架设的摄影设备中获取空间长时间的使用模式或交通流线（Verma, et al., 2019; Straumann, et al., 2014）。蓝牙设备（Yoshimura, et al., 2017）与

红外设备 (Al-Anbuky, et al., 2015) 可进行居住区公共开敞空间使用模式测度, 并可以与智能路灯杆等结合, 布置于居民较多或有特殊用途的公共开敞空间中。Wi-Fi 探针由于可用于分析室外人口分布和轨迹特征, 能够获取较高的空间分辨率和时间频率的活动数据 (精度约为 30 米) (Abedi, et al., 2015; Traunmueller, et al., 2018), 且使用差分 Wi-Fi 三边测量技术能使进一步提高数据精度 (甚至达到米级), 因此成为常用的固定传感器 (Retscher, Tatschl, 2017)。超宽带无线通信设备则更适用于人流量较少的室内空间研究中, 能够获取高空间精度的人群活动数据 (Li, et al., 2021)。总体而言, 基于固定传感器的数据收集方法以空间为核心, 收集研究空间内的所有活动情况, 且不受被试者得知实验情境下的活动差异的影响, 具有大规模可拓展性研究的优势, 因此常被应用在各类公共开敞空间的研究中。

2.2.1.3 数据收集方法对比及小结

研究通过采样率、空间分辨率与时间跨度三个维度对不同数据收集方法进行对比和分析, 为居住区公共开敞空间使用模式测度与模拟研究中数据收集方法的选择提供参考。其中采样率指不同数据收集方法所记录的空间使用者与实际使用者数量的比例; 空间分辨率指不同数据收集方法所记录位置的空间精度; 时间跨度指不同数据收集方法所能连续记录使用模式的时间跨度。

采样率对比方面, 基于人工数据收集的方法中观察与制图法需要尽量多地记录空间中行人的空间位置, 因此当空间中行人数量较多且行人移动速度较快时, 数据采集的采样率将大幅降低。对于调查与自我报告法, 收集数据需要空间使用者的主动配合, 因此采样率较低。基于传感器设备的数据收集方法中, GNSS 设备法仅能收集到佩戴 GNSS 的使用者的空间信息, 因此其采样率较低。对于蓝牙设备、红外定位、UWB 设备和 Wi-Fi 探针而言, 空间中携带移动通讯设备并开启蓝牙、Wi-Fi 或其他对应信号接收功能的使用者的位置能够被设备所记录, 因此此类方法具有相对较高的采样率。然而, 基于 Wi-Fi、蓝牙等设备收集的数据主要来自于青年和中年等手机使用率较高的人群, 而较少来自儿童与老年人等手机使用较少的人群, 导致所获得数据可能存在一定程度的有偏性。基于摄像设备的数据收集方法能够对空间内大部分位置进行拍摄, 因此能记录大部分空间使用者的位置信息。

空间分辨率对比方面, 基于人工数据收集的方法中观察与制图法需要有一定的空间参照物才能比较准确地判断行人位置, 因此尽管所记录数据具有一定的空间分辨率, 但并非特别准确。调查与自我报告法需要空间使用者对空间使用模式进行回忆和抽象, 因而通常难以有较为准确的空间位置信息, 此外由于被调查者的回忆结果与真实使用模式也常存在一定差异, 因此, 此方法所记录的行人信息的空间分辨率整体较低。对于基于传感器设备的数据收集方法, 摄像设备所记录的行人活动图像中通常包含空间

中的参照物，因此其数据的空间分辨率可达到米级以内。蓝牙设备与 Wi-Fi 探针设备的空间分辨率分为单一设备与设备阵列两种。单一设备的空间分辨率由所布设蓝牙或 Wi-Fi 探针设备的探测范围决定，而设备阵列能使用三点定位等方法根据探测是所记录的信号强度推导出更行人在空间中更准确的位置，总体而言空间分辨率较高。此外使用四点或更多设备组成的矩阵能够识别出三维空间位置。但设备矩阵测度空间位置的准确率可能会受空间中的障碍物影响。GNSS 设备所记录数据的空间精度由服务商决定，通常具有中等的空间分辨率。

时间跨度对比方面，基于人工数据收集的测度方法存在着空间分辨率和采样率方面的限制，但较易实施且能灵活调整。基于传感器设备的数据收集方法的测度，数据收集、储存和处理均具有一定的难度。采用 GNSS 设备的研究存在采样率较低及数据收集时间跨度低的问题。采用蓝牙设备和 Wi-Fi 探针设备的研究的优点在于时间跨度大，而缺点在于数据产生者在不同空间中占全部使用者的比例不完全相同。基于摄像设备的测度方法的数据空间分辨率、采样率与时间跨度均较高，但问题在于图像本身不具有行人的位置信息，因此需要进行更多的图片处理。近年来随着深度卷积神经网络的发展，识别图像中行人的个人特征及行为的模型越发成熟（Huang, et al., 2020），为统计公共开敞空间使用模式（Xing, et al., 2011）或记录行人流线/轨迹（Celik, et al., 2006）提供了基础，但获取图像中行人位置后仍需要将其转换至真实平面空间中，将其与空间要素进行匹配才能进行深入的分析。

总体而言，基于人工数据收集的方法成本较高，且难以实现对居住区公共开敞空间使用模式的长时间监测（Kang, et al., 2017），因此无法为居住区公共开敞空间使用模式测度与模拟提供较高空间精度与较长时间跨度的基础数据。基于传感器收集的方法中基于穿戴式设备等移动传感器的数据收集方法的分析受限于设备成本和志愿者招募范围难以扩展到大规模的居住区实践中（Zhang, et al., 2019），从而限制了大规模的使用模式测度实验的开展。基于视频数据、Wi-Fi 探针等固定传感器的数据收集方法，虽然在提取空间信息及活动类型方面也存在一些问题需要解决，但其基本具备获取高空间分辨率及长时间跨度的公共开敞空间使用模式数据的潜力（Liu, et al., 2015），因此将此类方法应用到居住区公共开敞空间使用模式测度工作中，可获得较好支持空间使用模式模拟及空间优化的数据。

2.2.2 居住区公共开敞空间使用模式数据处理及分析方法

居住区公共开敞空间使用模式数据处理（Data Processing）的目的为区分空间中不同的活动类型、识别空间使用模式、提取使用者特征并将使用模式平面化和可视化。

2.2.2.1 行为类型划分

行为类型方面，居住区公共开敞空间相较于其他公共开敞空间而言，在宏观尺度更加关注交通与休闲行为的综合性，在微观尺度则同样关注居民的停留及穿行行为。

（1）宏观尺度：交通与休闲行为

在居住区公共开敞空间使用模式测度过程中，所收集的数据为不同类型使用模式的综合累积结果，而不同空间中使用模式的类型与比例均可能具有差异，因此需要在数据收集的基础上进行数据处理，以区分不同类型的空间使用模式。与其他类型公共开敞空间相比，针对居住区公共开敞空间的研究更强调步行活动作为一种体力活动（Physical Activity）的重要意义，并强调对活动的交通目的与休闲目的区分。其中交通目的出行（Transport Walking）是一项活动的副产品，在该活动中步行不是该行为的目的，而是到达特定目的的连接行为；休闲步行（Recreational Walking）旨在娱乐、消遣、锻炼、改善健康等不以到达目的地为最主要目的的行为，步行本身就是活动的目的（Joseph, Zimring, 2007）。

现有研究已揭示出具有不同目的的步行行为具有不同的行为模式和空间偏好，包括以交通等实用性活动为目的的行为与以休闲等非实用性行为为目的的行为（Tudor-Locke, et al., 2005; Kang, et al., 2017; Learnihan, et al., 2011; Joseph, Zimring, 2007; Spinney, et al., 2012）。其中以交通为目的的步行行为具有明确的目的地，且相比于以休闲为目的的步行行为持续时间通常更短、步速更快、总体发生频率亦更高（Kang, et al., 2017; Spinney, et al., 2012）。而以休闲为目的的步行行为虽然总发生频率较低，但在居住区附近的发生频率更高，且与周边环境的设计要素关系更紧密（Kang, et al., 2017; Zhao, Wan, 2020）。

此外，研究发现交通行为在单日内对同一空间使用次数较少，其使用模式的影响因素与路网连接情况相关，而与设计要素相关性较低或呈现负相关性（Berry, et al., 2017; Cerin, et al. 2006; Joseph, Zimring, 2007）；而休闲行为对于相同空间使用次数更高、更加频繁，且与设施、视觉要素、空间品质等更加相关，而与路网结构等空间相关属性或要素相关性较低（Kaczynski, Glover, 2012; Kang, et al., 2017; Li, et al., 2019）（表 2-5）。

表 2-5 居住区公共开敞空间交通与休闲使用模式特征

交通行为	休闲行为	数据来源	相关研究
仅内部区域和外部区域的交通步行次数较少。这种交通步行的差异在男性和女性中都可以看到	只有偏远/非常偏远的居民步行娱乐的时间较低。这种差异仅在男性身上观察到	4004 名成人 (18 岁以上) 问卷	Berry, et al., 2017
目的地多样性、住宅密度、步行基础设施、美学、交通安全和犯罪的因素/尺度与步行交通正相关	美学、混合目的地和居住密度与步行休闲有关	步行街区的 1286 名成年人 问卷	Cerin, et al., 2006
交通步行的路径使用与路径网络中连接良好的路径段以及沿它们的特定目的地有关	用于休闲步行的路径段更长, 连接良好, 没有台阶, 具有迷人的校园景观	三个校园的 114 名居民的 问卷调查与路径评估	Joseph, Zimring, 2007
交通步行的持续时间比休闲步行比短 45%, 速度快 9%。交通步行发生在住宅、就业和街道密度较高、住宅物业价值较低、混合用途社区目的地的百分比较高、公园/步道百分比较低以及平均地形坡度低于休闲步行的地区	休闲步行更频繁地发生在家庭社区, 并且与休闲用地无关	651 名居民, 佩戴加速度计和 GNSS 装置, 并填写了 7 天的旅行日记	Kang, et al., 2017
城市形态与步行交通之间存在很强的正相关关系	城市形态在任何尺度上都没有发现与休闲步行的关系	在三个地理尺度收集参与者步行 15 分钟的社区活动问卷	Learnihan, et al., 2011
社区感与休闲步行呈负相关, 与步行作为交通工具呈正相关	对建成环境的良好认知和社区参与都对休闲步行产生了积极影响	调查样本量为 270	Li, et al., 2019
结果表明, 交通步行每天平均步行 3.1 次, 每次平均持续 8 分钟	平均持续 39 分钟的 1.4 次休闲步行	1971 名随机选择的成年人的时间使用数据	Spinney, et al., 2012
步行交通, 尤其是通勤步行, 与社区设计元素的相关性较低	对步行持积极态度或对步行环境有居住偏好的人走得更多	基于 TPB 模型概念框架的 3748 份问卷	Zhao, Wan, 2020

(2) 微观尺度：穿行与停留行为

居住区公共开敞空间中宏观尺度的交通与休闲行为的微观尺度表现为穿行及停留行为。其中穿行行为反映人们通过一个空间的行为，通常具有明确的穿行目的，受微观尺度的空间形态的影响。与此同时，穿行行为可能会周边要素及周边人群的影响，从而产生短暂停顿或停留行为（Gehl, 2011）。

停留行为，定义为特定目的的长时间停留行为，如对话、观察、阅读、下棋等，可被视为评估城市或居住区公共开敞空间质量的最重要因素（Gehl, 2011; Gehl, Svarre, 2013）。因此，公共开敞空间中人的停留偏好受到了城市设计师和建筑师的极大关注（Whyte, 1980; Zapata, Honey-Rosés, 2020）。相关研究成果可用于支持公共开敞空间中的细部设计或街道设施的布置，以增强公共开敞空间的活力（Friedmann, 2010; Schlebusch, 2015）。

已有研究强调公共开敞空间对人们停留更长时间的吸引力，而不是人们仅仅路过或做短暂的停留，例如等待红灯停车、系鞋带等（Gehl, 2011）。与此同时，学者们揭示了边界（建筑立面和空间边界）、街角、树木覆盖和良好视野、橱窗（Alexander, 1977）以及公共座椅、路灯、物理支撑（Mehta, Bosson, 2021）以及商业设施（Chen, et al., 2016）等城市街道家具及设施对吸引人停留行为的积极作用。此外，一些研究还阐述了其他影响因素，如天气（Walton, et al., 2007）、使用者密度、社会驱动因素（Mehta, Bosson, 2021）、行人年龄或所处生命阶段（Broberg, et al., 2013）以及对安全和犯罪的看法（Gifford, Peacock, 1979）等对人们在公共开敞空间中停留行为偏好的影响（Khosravi, et al., 2020）。因此，这些要素往往在新建区或城市更新过程中被纳入到小尺度的城市设计和街道家具布局中，以激发公共开敞空间的活力，使街道和居住区更具“粘性”（Toderian, 2014）。

已有研究识别穿行及停留行为主要通过观察记录法（Whyte, 1980; Gehl, 2011）和框架式及现场实验（Meng, Kang, 2016; Zapata, Honey-Rosés, 2020）。研究人员根据实地观察或摄影视频记录具体的穿行轨迹及停留位置及具体行为。此外，智能手机（Zahedi, Shafahi, 2018）、Wi-Fi 探针（Hu, et al., 2020）、蓝牙设备（Yoshimura, et al., 2017）和相机/摄影视频（Hou, et al., 2020）等使研究人员能够更有效地收集行人数据，并通过更准确的时空信息研究公共开敞空间穿行及停留行为的特征（Han, et al., 2022）。这些设备会自动跟踪行人并获得具有高精度的地理位置数据或轨迹，支持长时间观测和细粒度的空间分析。

2.2.2.2 使用模式识别

使用模式识别方面，目前对于交通与休闲行为、穿行与停留行为的区分主要基于调查问卷、现场观察等可以直接获取居民出行目的的依靠人工收集的方法进行。已有

研究发现，此两类活动具有显著的活动时空偏好差异，且互相之间存在较为显著的影响，具有传递转换的潜力。此外两类活动受空间形态因素影响的方式亦有一定差异，然而具体空间的影响与作用机制仍未能明确（Learnihan, et al., 2011; Spinney, et al., 2012; Zhao, Wan, 2020）。对交通与休闲行为的空间特征进行分析，并采用合适的方法对研究过程收集的数据进行拆分和提取，将能获取不同类型活动的空间使用模式。因此，本研究对目前相关研究中所使用的数据类型进行比较分析，为本研究的行为区分提供参考。

目前，不同测量方法统计的行人流量数据可归纳为以下几种：门数（Gate Count）、点计数（Spot Count）、占用数（Occupancy Number）与运动轨迹（Movement Trace）（Dalton, 2001）（表 2-6）。此类流量数据包含的信息维度可分为人数信息与人次信息两类基础信息类型。其中门数、点计数和占用数主要反映截面流量数据，体现出人次的变化情况，而运动轨迹包含个人信息，可从中提取出空间使用人数的变化情况。通过将所获取的数据整合为人次与人数两个信息维度，能够反映不同步行行为的空间模式的主要特征。不同空间使用模式数据收集方法所能记录的信息维度也有所差异。其中基于人工收集的方法中，现场调查与观察法收集的收据以人次为主，而其他方法对于人次与人数的记录均准确率较低；基于传感器收集的方法中，移动传感器收集的数据以人数信息为主，而人次信息受采样率影响偏差较大；而基于固定传感器数据收集方法中，基于蓝牙、UWB 与 Wi-Fi 探针设备的方法均包含明确的人次与人数维度的信息，基于红外设备的方法仅包含人次信息，而基于摄像设备的方法虽然原始数据不包含明确的人次与人数信息，但通过使用深度学习模型对获取的图像数据进行分析，也能够识别图像中的行人从而获取人次信息乃至人数信息。

图像数据使研究人员能够提取各种细节，以描绘停留活动、步行活动与建成环境要素之间的关联。最近基于图像或视频数据的研究主要集中在识别行人的轨迹（Niu, et al., 2022）和活动密度上，但主要在具有各种精心设计的设备和严格的环境控制的室内实验室中进行（Seer, et al., 2014）。此外，尽管一些研究可以使用深度学习算法基于身体活动外观和骨骼表示来识别站立、坐、躺、行走、跑步和骑自行车等一系列动作和行为（Chun, et al., 2008; Gao, et al., 2021; Yuan, et al., 2022），但拍摄角度、距离和持续摄影时间等要求以及检测到的剧烈物理运动的特征限制了居住区公共开敞空间中不同类型穿行与停留行为的识别和分析。基于深度学习方法的最新研究尚未被用于在居住区公共开敞空间中识别精细尺度不同类型的步行与停留行为偏好的空间，从而难以支持相关的建成环境要素对各行为影响的分析，因此难以在城市更新过程中支持居住区公共开敞空间等小尺度城市设计和城市家具布局。

总体而言，通过蓝牙、UWB、Wi-Fi 探针与视频设备等固定传感器获取的居住区公共开敞空间使用模式数据所包含的信息维度更多，具备刻画交通与休闲两种行为以

及区分穿行与停留行为的能力，因此更适用于支持居住区公共开敞空间使用模式测度与模拟工作。

表 2-6 行为数据统计方法

统计维度	指标含义	信息维度
门数	在给定时间范围内经过指定‘阈值’的累计人数。	人次
点计数	在给定时刻在任何房间或空间中出现的所有人的大概位置。	人次
占用数	一天中特定时间间隔内单个空间/房间中的总人数。	人数
运动轨迹	行人穿越某个空间时所走路径的草图近似值。	人数

2.2.2.3 居民年龄性别特征提取

居住区公共开敞空间在居民生活的身心健康方面具有重要作用，因此提取空间使用者的个人特征，有助于识别老年人、妇女和儿童等敏感人群的居住区公共开敞空间使用模式。在各居住区公共开敞空间使用模式数据收集方法中，基于人工收集数据的方法中现场调查与观察、认知地图与使用后评价均可以通过访谈问卷的方式获取空间使用者的个人特征，其中现场调查与观察法可以根据数据收集研究人员的个人认知进行判断。基于移动传感器的数据收集方法由于需要空间使用者佩戴传感器，因此可通过访谈的方式获知空间使用者的个人信息。使用固定传感器进行数据收集的方法中，红外设备需通过步行速度等信息进行年龄和性别的推测，准确度较低；蓝牙、Wi-Fi 探针和 UWB 设备可获得使用者所携带移动设备的 mac 地址，其中包含设备品牌等信息，可用于识别携带老年手机的老年人，但对其他个人特征的识别能力较弱，且难以检测不携带移动通讯设备的老年与儿童。

使用视频设备收集的数据不包含直接的空间使用者信息，但可使用深度学习等方式对其中的使用者及其个人特征进行识别。其方法基于 MORPH、UTKFace、亚洲人脸数据集（Asian Face Age Dataset, AFAD）等数据库，根据其中带有年龄与性别标注的人脸图像训练卷积神经网络模型。常用的年龄与性别预测模型包含 AlexNet、VGGNet、GoogLeNet 等。然而此方法在应用于居住区公共开敞空间使用模式测度时存在诸多限制。首先，为保证空间中各使用者的位置均可被测度，视频设备通常被安装于较高的位置并采用俯拍方式进行数据收集，且每个行人面部像素数量较少。而训练年龄检测模型的数据库为多像素数的平视面部的图像，与所采集视频数据存在偏差，导致预测结果准确率较低。所收集数据经常出现面部不完整或不可视的情况，使此方法的适用性进一步降低。此外，通过视频数据获取个人年龄及性别信息可能存在伦理风险。

2.2.2.4 空间位置提取方法

不同类型的居住区公共开敞空间使用模式数据收集方法对应的空间位置提取方式亦有所不同（表 2-7）。基于人工收集的数据方法中，空间位置基于数据收集人员在平面图中的标注。此类方法的空间位置与各空间要素匹配较好，但准确度较低，且无法长时间获取。基于传感器收集的方法中，通过红外定位可根据信号方向与反射时间获得使用者距传感器的角度与距离，但此方法探测距离较短且使用者之间存在互相阻挡的问题，难以大规模应用。单个 Wi-Fi、蓝牙与 UWB 设备可根据信号强度在空间中的衰减程度判断使用者距传感器的距离，但无法判断其方向。而通过三个及以上分布在检测范围内的同类型设备可建立检测矩阵，以通过三点定位获得使用者在空间中的精度二维、乃至三维坐标。而此方法也会受到空间中障碍物的影响，使信号衰减程度无法准确的反映使用者至传感器距离。使用视频设备获取使用者空间位置需要首先通过目标识别获得图像中使用者位置，并使用图像坐标转换将其转换为平面中的坐标。目前使用较多的为单应性矩阵（Homography Matrix），用以通过透视变换，实现图像从倾斜摄影视图转变为立面或平面视图（Ueshiba, Tomita, 2003）。

通过基于卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）的深度学习（Deep Learning）模型可采用目标检测（Object Detection）方法识别图像中行人。其中具代表性的是基于区域的卷积神经网络（R-CNN）的识别方法，主要分为基于区域提名（Region Proposal，即二阶检测算法）的和端到端（End-to-End，即一阶检测算法）两种计算方法。基于区域提名的算法的基本方法为：首先生成可能包含物体的候选区域，然后对候选区域再做进一步的分类和校准，得到最终的检测结果，其代表性的模型为 R-CNN、Fast R-CNN 和 Faster R-CNN 等。端到端的算法的基本方法为：将图切成 $S \times S$ 的网格，针对目标中心点所在的格子进行行人检测，并以每个网格预测数个边框及其置信度的方式识别图像中的目标，其代表性的模型为 Yolo（You Look Only Once）和 SSD（Single Shot Multibox Detector）。目前基于区域提名的算法在准确度上具有一定优势，而端到端的方法在识别速度具有一定优势。

表 2-7 居住区公共开敞空间使用模式空间位置提取方法

数据收集方法类别	数据收集方法/设备	空间位置提取方法
基于人工收集	现场调查与观察	平面图中标注
	红外定位	距传感器距离
基于传感器收集	Wi-Fi、蓝牙、UWB 设备	距传感器距离
		三点定位
	视频设备	目标识别与图像坐标转换

2.3 居住区公共开敞空间使用模式模拟方法

2.3.1 基于空间二分网络的使用模式模拟方法

公共开敞空间使用模式模拟主要关注空间形态/要素对人活动的影响。其中，人在空间中的活动可看作“流网络（Flow）”，约束和引导人在空间中活动的城市物理空间形态为“空间网络（Network）”，两者共同构成“二分网络”（Kivelä, et al., 2014）（图 2-1）。对于居住区公共开敞空间而言，空间网络为人可主动设计或改造的空间对象，而流网络为空间网络基础上受其影响的自下而上生成的居民对于空间的使用模式。因此通过对流网络进行分析可以对空间网络模型进行建立与改进，能够较好地实现在设计前与使用后评估阶段对居住区公共开敞空间使用模式的模拟。

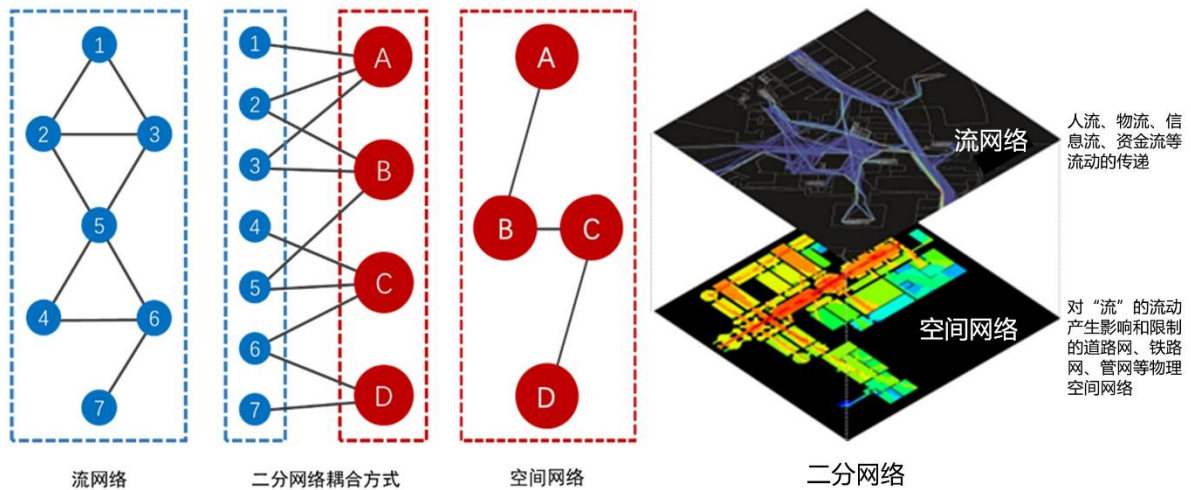


图 2-1 二分网络及其耦合方式

公共开敞空间使用模式模拟的方法主要分为自上而下及自下而上两类。以网络模型、空间句法为代表的自上而下模型（Hillier, et al., 1976; Batty, 2013），通过认知及构建二分网络中流网络与空间网络的关系，实现基于空间网络的流网络模拟。以代理人模型（Agent-based Model, ABM）为基础发展出的多智能体系统（Multi-agent System, MAS）（龙瀛, 2011）、集群智能-蚁群优化算法（Ant Colony Optimization, ACO）（马婕和成玉宁, 2021）、基于空间句法的代理人模拟（Space Syntax Based Agent Simulation）（Penn, Turner, 2001）是自下而上模型，主要研究微观尺度的流网络形成规则及其与空间网络的互动关系以模拟流网络（图 2-2）。自上而下模型反映空间网络对流网络整体影响的确定性，自下而上模型则体现微观个体在每次行为选择中的个体及时间随机性差异。因此，自上而下模型的模拟结果是确定的，而自下而上模型的模拟结果在每次模拟中会有一些的随意性差异。此外，由于模拟流网络机制的差异，两类模型关注的要素及构建基础不同：前者更注重对空间网络的抽象形式，后者更关注个体活动的选择性特征。本文将对两类模拟方法的代表性模型进行综述、分析与比较。

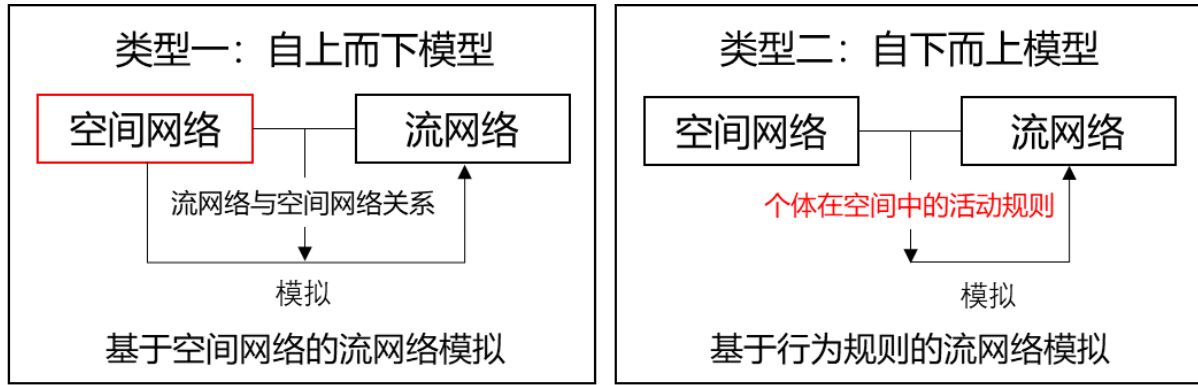


图 2-2 公共开敞空间使用模式模拟的两类模型

2.3.2 基于空间网络的自上而下模拟方法

2.3.2.1 城市空间网络的基本概念

自上而下的模型基于网络科学的基本原理，认为网络中各节点之间的链接关系决定了“流”在网络中的分布情况，因此分析空间网络的网络结构，能够对其中“流”的分布进行解释和预测。相关研究经过近几十年的发展，经历了空间句法等独立发展出的分析方法（Hillier, Hanson, 1984）到统合为复杂性网络科学的演变过程。随着近年无标度网络研究的发展，研究者发现通过将网络科学与分形几何相结合能够较好的解释城市空间的使用模式（Wolfram, 2002），从而为理解作为复杂系统的城市空间提供恰当的方法，因此能较好地指导城市的规划设计等实践工作（Batty, 2007）。从网络科学视角下的城市空间要素并非仅仅具有空间中的位置属性，而将其视为各类流要素如人、货物和信息等互动和流动的载体，并呈现出一定的网络结构（Castells, 1996; Batty, 2007）。通过将城市视为相互作用、沟通、关系、流和网络的集合，空间网络的拓扑结构与城市间的“流”相互耦合，形成了多层级的网络系统（Boccaletti, et al., 2014; Kivelä, et al., 2014）。

刻画网络的数学模型已成为用来描述和检查城市之间以及城内部“流”的大规模互动（Haggett, et al., 1977; Neal, 2013; Barthelemy, 2017）的基本工具，从而使构成城市系统的对象之间的网络关系能够更加清晰地呈现出来（Bettencourt, 2014; West, 2017）。网络科学视角下的城市空间分析往往关注网络的节点与链接、度分布、枢纽节点、集聚性、度相关性等基本属性，并将其用于网络的演化研究。各领域的学者进行相关研究时则考虑不同的侧重点，应用不同的研究方法。城市研究通常将空间单元定义为节点，并从网络科学的视角观察城市空间，从而将其主要属性视为其与网络中其他节点的链接关系作用下产生的结果，通过对节点度的分布进行分析，可研究所分析的城市空间网络是随机网络还是无标度网络，根据空间网络中的度可识别出网络中的最具有影响力的枢纽节点，以及分析节点之间的集聚性与度之间的相关性。

在城市研究中，当从网络与地理或关系空间的联系角度来讨论城市空间网络，通常使用流理论以及图形理论将城市空间中的各要素表达为节点和弧线、枢纽和连接，以及顶点和边缘等。其中节点与链接是网络科学的最基础概念，也是构成网络的基本要素。其中“度”是节点的一个关键属性，表示该节点和其他节点之间的链接个数。网络科学视角下节点在网络中的链接关系决定了节点在网络中的属性（如度大小的改变等），而节点属性的变化是因为网络是自上而下发展的系统而新节点的链入改变了原有网络的结构所导致。度分布表示“网络中随机选出的一个节点其度为”的概率。城市研究中节点，尤其是不同度的节点在空间中的分布情况是相当重要的研究方向，可用于识别城市的功能区，以及解释城市经济中心的形成、规模效应等宏观问题以及居民的空间活动偏好等微观问题。

2.3.2.2 不同尺度的城市空间网络

自分形的概念提出以来（Mandelbrot, 1982），人们越来越认识到城市存在分形结构的特征，即在不同尺度范围内具有相似的结构特征，但每种尺度之间又存在一定的差别（Batty, 1996）。因此在应用网络科学的城市研究中，一方面会在不同尺度中分析相似的空间结构，另一方面则会考虑不同尺度中网络研究的特殊性（Salat, 2011）。由于不同尺度视角下城市研究将空间抽象为空间网络的方法不同，分形与研究尺度成为此领域的重要研究课题。因此，基于空间网络的流网络模拟注重对城市物理空间形态的抽象和建模。

已有研究通常将城市空间网络研究分为三个尺度：区域尺度、城市尺度与人本尺度，其差异在于不同方法在空间网络化过程中对物理空间的抽象程度的差异（Salat, 2011; Long, Ye, 2019）。“区域尺度研究”指针对城市群和城市圈等多个城市组成的空间系统的研究，其特点为将每座城市视为一个统一的整体并重视城市之间的关系，因此相关研究通常将城市间的关系视为点与点的互相作用并进行分析。区域尺度研究中应用的网络模型的基本单元为城市间的连线，忽略城市间公路、铁路系统的拓扑结构，而采用简单的链接关系。“城市尺度研究”指将具有物理或行政边界城市或其中某区域作为分析范围的研究，如将城市的地块或建筑物作为基础的研究单元，其特点为将根据物理或行政边界将城市空间分解节点，并研究不同节点之间的关系。由于城市内部各单元间的物质流通常通过道路或管网完成，因此城市尺度研究的网络模型通常与城市中道路或管网高度重合，其网络链接与道路或位置的拓扑结构均有较大一致性。“人本尺度研究”通常为高空间精度的网络研究，如分析某具体公共开敞空间内部物质流动的特征，因此相关研究常将被研究的公共开敞空间划分为米级的等大栅格或以类似的精细空间颗粒度的空间单元作为网络节点，并以栅格间的连通关系作为网络链接（侯静轩, 等, 2021）（图 2-3）。

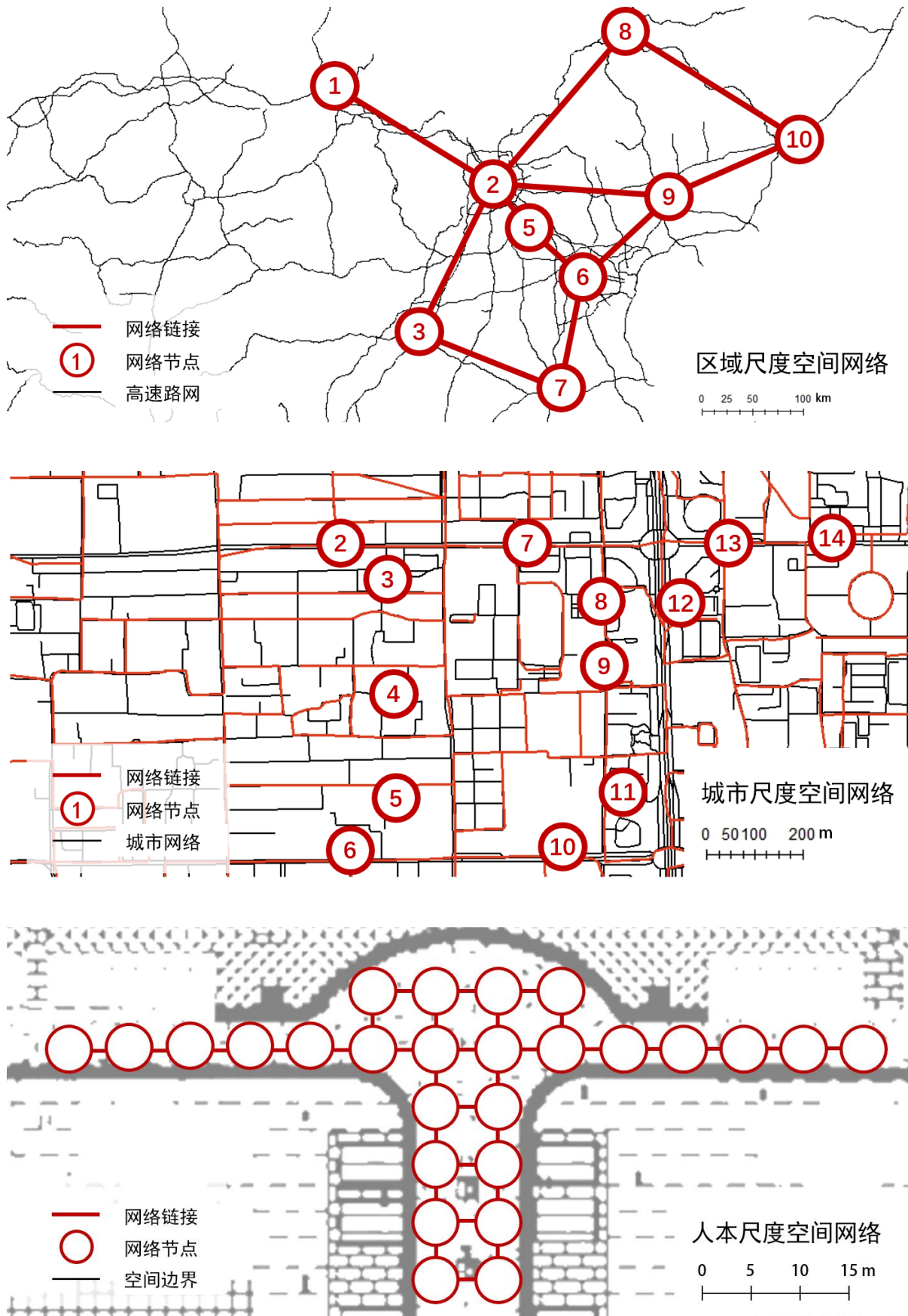


图 2-3 区域、城市与人本尺度空间网络结构示意图

2.3.2.3 基于城市空间网络的流网络模拟方法

由于城市空间系统属于复杂性系统，具有“分形”的特性，因此不同尺度的城市中“流”的分布规律有所差异，采用的分析及模拟方法亦不完全相同。越大尺度研究所建立的空间网络模型越抽象、越倾向于仅保留空间网络的拓扑关系；越小尺度研究采用的模型则与现实空间越贴合、越大概率记录角度、距离等维度的具体信息。相较其他进行网络分析的领域，城市研究中的网络分析具有独特的针对物理空间的网络分析模型，其作用为通过网络化的视角认识空间，对网络中空间的节点属性进行测度（Mora, et al., 2014; Desyllas, Duxbury, 2001）。目前城市研究中最被广泛采用的是基于空间句法的空间网络分析模型（Turner, 2001; Turner, 2003）。

空间句法诞生于研究城市形态和结构的城市形态学（Hillier, 1999），其特点在于与分形几何学结合，能够对城市“自下而上”有机生长产生的网络结构进行解释（Batty, 2001）。由于空间句法模型基于城市道路或空间形状，具有建模相对简单的优势，在过去近40年中被广泛应用于规划研究及实践中，并取得了较大的成果（Bafna, 2003）。随着网络科学的发展更加完善，空间句法模型已被完全纳入网络分析方法中。作为空间网络分析的先驱，希利尔于1980年代提出了基于网络拓扑关系的轴线模型，并在此基础上发展出基于网络角度关系的线段模型，而后人在亦其启发下发展出基于栅格的视域模型。

目前用于分析网络属性的模型按照度量的量纲可分为拓扑模型、角度模型与以栅格作为分析单元的距离模型三种（Hillier, et al., 1976）。其中拓扑模型对空间有较大简化，因此主要用于区域尺度的研究，如模拟城市规划实施对城市交通的影响（Hillier, et al., 1996）和优化宏观尺度空间结构促进社会以及经济活动的研究（Newman, 2001; Watts, 2002）。

线段模型对城市内人流量的模拟具有较高的准确度，因此是城市尺度空间网络研究中最被广泛采用的模型，如研究城市道路网络与地铁网络耦合关系对地铁流量的影响（盛强, 等, 2015），并亦可用于人本尺度研究，如进行街道空间中人流量模拟与分析（Piaget, 1971）。

距离模型的使用条件较为特殊，多数情境下用于基于栅格化空间的网络分析，对人的视觉认知情况进行模拟，通常用于人本尺度中步行行为的空间机制研究（Batty, 1994），而由于角度模型分析所需计算量较大，其在区域尺度与城市尺度中应用较少。对于居住区公共开敞空间而言，轴线模型对空间抽象程度过高，因此通常采用线段及视域模型对目标空间进行分析。

(1) 基于道路网的空间网络抽象模型

空间句法中线段模型测度空间属性的主要方法为整合度与选择度，其中整合度可近似视为某道路段到其他所有道路段的总拓扑距离的倒数，而选择度代表路网任意两个街道段间最短路径穿过某街道段的次数。线段模型的整合度与选择度计算方法方面，以某由 9 条街道段组成的路网为例，街道段 A（由图中蓝色字表示）与街道段 B（由图中绿色字表示）至其他街道段的最短拓扑距离和分别为 15 与 14，说明街道段 A 的整合度略小于街道段 B。选择度方面，街道段 A 与 B 位于其他街道段间最短路径的次数分别为 7 和 14 次，说明街道段 A 的选择度远小于 B。不同空间要素的整合度与选择度具有一定相关性但又不完全相同，反映出不同的空间属性（图 2-4）。

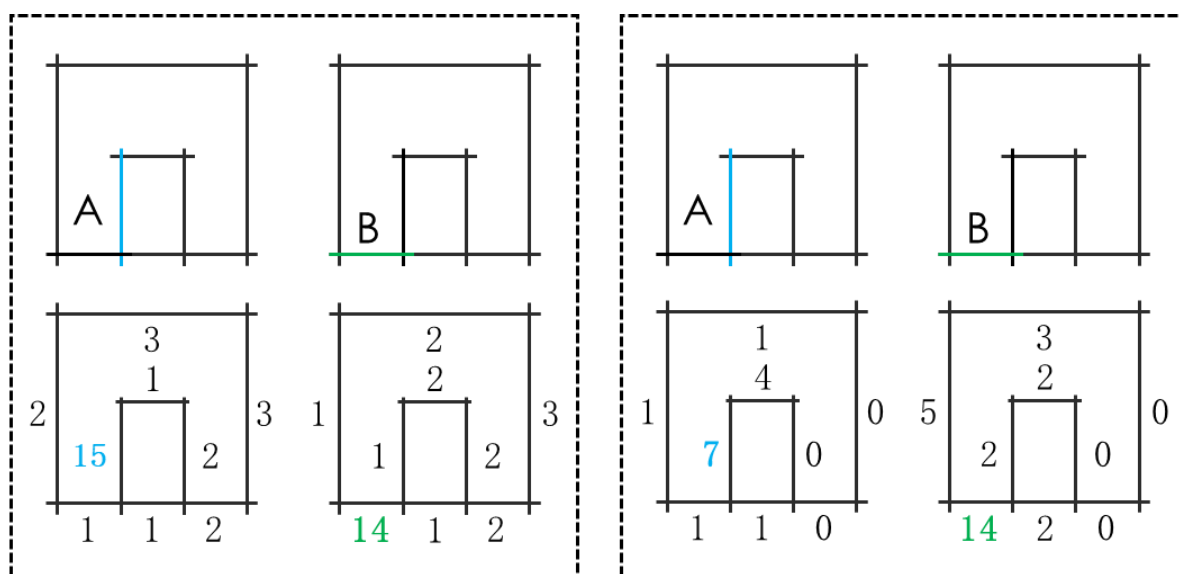


图 2-4 线段模型整合度（左）与选择度（右）计算方法示意图

(2) 基于空间栅格的空间网络抽象模型

空间句法视域模型根据空间的“图像可见性”生成：通过将网格叠加在空间的自顶向下视图中，可以使用拓扑方法计算每个网格单元的邻近性和可视性。视域模型常用于研究空间结构对人类行为的影响。人本尺度城市空间网络分析主要使用的空间测度方法为视域模型中的整合度值，其通过计算某单元到指定拓扑距离内相邻单元的平均深度得到。单元格视域整合度的从高到低反映了其从位于视线最中心至位于视线最边缘。以某方形广场空间为例，计算视域整合度前需要将其划分为合适大小的分析单元，视域整合度则由相邻单元平均拓扑深度计算得出。对于划分为 3 行 3 列的正方形空间，整合度分为三个级别。其中空间最中心的分析单元整合度最高，位于四角的分析单元整合度最低，而其余分析单元整合度为二者之间（图 2-5）。

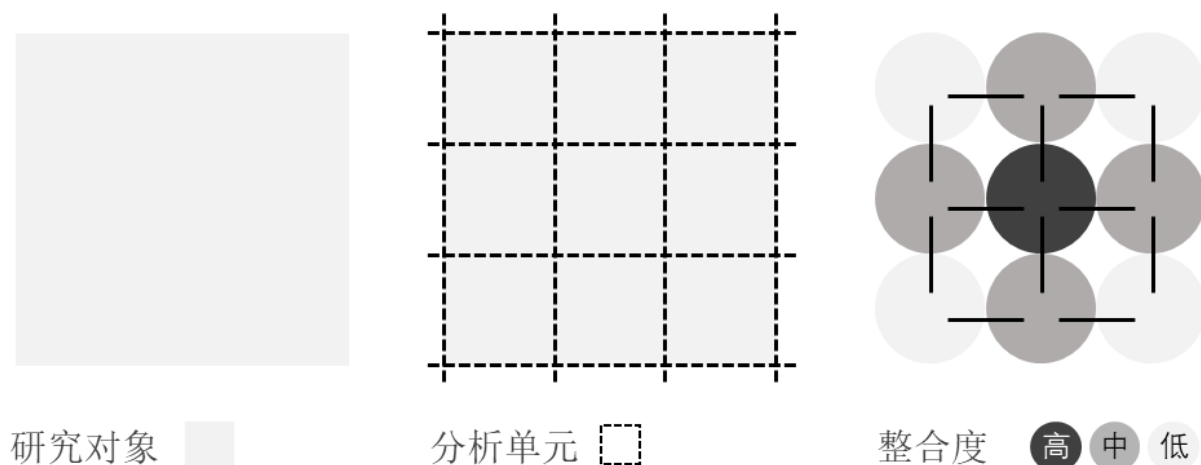


图 2-5 视域模型整合度计算方法示意图

总体而言，居住区公共开敞空间既可将居住区内道路之间的关系构建为空间网络，又可将一个区域内不同尺度栅格之间的关系构建为空间网络，因此，在具体的模拟方法中，相关研究由于空间抽象方式的差异选择不同的模拟模型。其中两种模型在模拟居住区公共开敞空间活动时对空间网络抽象的差异反映不同的行为模式假设。基于道路网的空间网络抽象模型更强调居民行为受道路的链接关系、转角方向等要素的影响，基于空间栅格的空间网络抽象模型由于栅格较小，因此反映出人的视线及活动范围对居民活动及路径选择的影响。

2.3.3 基于行为规则的自下而上模拟方法

基于行为规则的自下而上模拟方法关注构成流网络的个体/群体在空间活动的规则制定。此类模型以代理人模型为基础，通过了解系统中个体的行为规律来模拟群体形成的流网络的结果，能够模拟复杂系统下不同尺度的活动差异。典型的自下而上的模拟方法包括：代理人模型、集群智能、基于空间句法的代理人模拟。

2.3.3.1 代理人模型

代理人模型（Agent-Based Modeling）是一种使研究人员能够创建、分析和试验由在环境中交互的代理人组成的模型（Gilbert, 2007）。代理人模型作为社会科学重要的计算模拟模型，能够直接生成单个的代理人实体以及对应的行为逻辑，并基于个体行为对一定时间内某数量个体的行为路径进行模拟和记录，从而生成空间的使用模式。研究可通过多次相似实验保证实验结果的一致性。与基于变量的回归模型相比，代理人模拟提供了对个体异质性进行建模的可能性，从而帮助研究者分析不同个体规则下地理等空间单元上涌现出的空间使用模式，并具有在不同尺度空间进行模拟的可拓展性。基于代理人模型衍生出集群智能-蚁群优化算法和基于空间句法的代理人模拟等模型。

2.3.3.2 集群智能

集群智能 (Swarm Intelligence) 为代理人模拟中侧重于对分析代理人模型中不同个体行为互相影响下进行空间过程中形成的具有规律性的空间使用特征的模拟模型, 其包含环境认知、行为特征记忆、与周围个体交互方式等行为规则 (马婕, 成玉宁, 2021)。集群智能的模拟算法包括蚁群算法、微粒群算法与人工蜂群算法等, 均能通过一段时间的模拟使被模拟的群体获得相似的行为规律, 从而揭示被模拟对象对于空间认知和生成使用模式特征的过程, 也能用于对人群行为的预测。然而此种方法所生成的个体规则与宏观空间使用特征无法进行进一步的解析与阐释, 限制了模拟结果在不同空间中的可推广性。

2.3.3.3 基于空间句法的代理人模拟

基于空间句法的代理人模型 (Space Syntax Based Agent Model) 是基于空间句法视域模型的自下而上的空间使用模式模拟方法 (Penn, Turner, 2001)。基于空间句法的代理人在模型空间中设置代理人以代表空间中的使用者, 并根据视域模型计算出的各空间单元视线连接度决定其在空间中运动的空间转向选择的概率, 从而模拟出行人在更微观空间的使用模式。基于空间句法的代理人模拟能够弥补空间句法模型分析结果较为宏观, 而不能更准确反映居民在空间中的微观使用模式的问题。

2.4 基于使用模式测度与模拟的居住区公共开敞空间优化理论及方法

居住区公共开敞空间在设计与建造阶段往往以供给为导向, 根据设计导则自上而下地设计公共开敞空间的大小及位置、形状及边界与绿植及场地设施等空间属性。然而不同时期不同区域的居民活动偏好有所差异, 基于普遍导则的设计方法不能完全适应人的需求, 因而人在较长的时间周期里适应设计, 并自下而上地改造空间。近年来, 越来越多的学者开始从需求端出发, 通过监测、观察和研究居民的活动规律和需求, 对居住区公共开敞空间进行优化更新 (韩亚楠, 等, 2021)。研究通常尝试通过改善空间的步行性以引导居民进行更多的物理活动 (Ribeiro, Hoffmann, 2018)。研究揭示出步行行为时间与需求的增加与步行范围内可达目的地的多样性呈正相关 (Zhao, et al., 2019); 充足的功能设施 (如座椅、健身器材等) 对步行行为有正面的促进作用 (Etman, et al., 2014; Jahns, et al., 2014); 居住与其他城市功能的密度及多样性亦能增加步行活动的数量 (Zhao, et al., 2019; Zhao, Wan, 2020; Tsai, 2014; Kang, et al., 2017)。因此, 相关实践则可增加周边的公共服务设施、基础设施等促进居民的活动。

基于居住区公共开敞空间研究内容的可用于居住区公共开敞空间优化的理论及方法主要分为三类。一是公共开敞空间尺度的环境行为学, 旨在研究行为与环境的关系, 通过两者关系的构建, 指导和优化设计方案 (任凯, 徐磊青, 2017)。二是建筑尺度的

“前策划 (Programming) -后评估 (Post Occupancy Evaluation, POE)”，主要关注前策划-后评估优化设计流程和设计成果的科学化，目前从建筑领域逐渐扩展到公共开敞空间领域 (庄惟敏, 等, 2019)。三是微观个体尺度的基于行为主义地理学及时间地理学的空间-行为互动理论，注重研究个体在空间中的时空间行为规律及其与健康等其他个体结果之间的关系 (柴彦威, 等, 2017)。

2.4.1 环境行为学理论

环境行为学 (Environmental Behavior) 研究通过分析公共开敞空间中人与环境的互动关系，支持空间设计与绿植、设施布局 (任凯, 徐磊青, 2017)。相关研究在居住区公共开敞空间中关注不同尺度的活动类型及空间要素，具体可划分为“宏观”与“微观”两个层面，“宏观”尺度将居住区各公共开敞空间视为一个点，研究关注居住区各公共开敞空间的大小及位置对居民使用模式的影响；“微观”尺度将公共开敞空间视为一个面，研究关注空间的边界、形状、设施等设计因素对空间使用模式的影响 (Marcus, Francis, 1997)。宏观尺度研究不同位置、大小的公共开敞空间的使用模式差异，其主要关注不同的行为目的：交通目的与休闲目的的行为对空间的使用模式，进而调整空间的交通与活动空间，既促进交通行为对休闲行为的激发，又避免交通与休闲行为的过度相互干扰。微观尺度研究既关注空间内部形状对居民在空间中的穿行行为位置及轨迹的影响；又关注不同设施类型与配置情况对居民在空间中的活动与停留位置的影响。前者有助于调整步道及空间边界 (植被、绿地、水系等软边界或铺装、栅栏等硬边界)，后者有助于辅助空间中休闲、娱乐、健身、座椅等配套设施的布局优化 (图 2-6)。

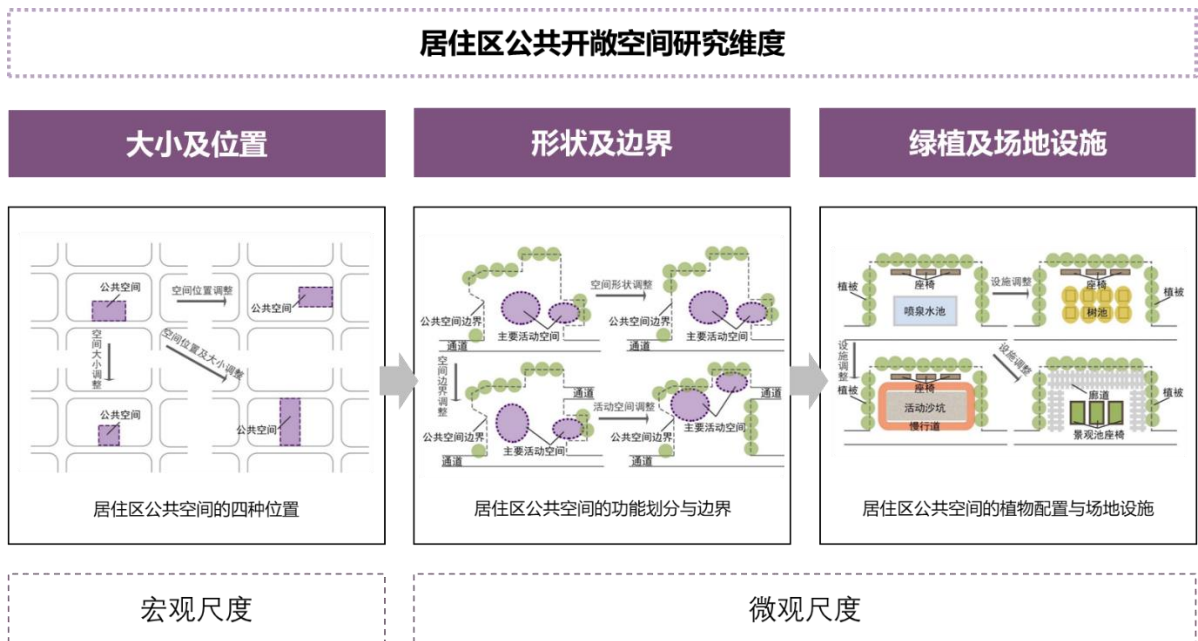


图 2-6 环境行为学关注的居住区公共开敞空间尺度及要素

2.4.2 前策划-后评估理论

“前策划-后评估”理论直接指导居住区公共开敞空间的设计与更新，是针对居住区公共开敞空间更新最有效的方法。其中“前策划”指根据总体规划目标的设定，不仅依赖经验和规范，更以实证研究为基础，运用计算机等近现代科技手段对研究目标进行客观分析，最终定量得出实现既定目标方案的研究工作，其应遵循地方法及程序，并以“合理性”为判断基准；“后评估”指以人类行为和需求为出发点，对设计与性能之间关系的研究，旨在研究设计空间是否满足使用者的需求，及其可能带来的影响，具体分为描述式后评估、调查式后评估及诊断式后评估（庄惟敏，等，2021；庄惟敏，等，2019；梁思思，2021；梁思思，张维，2019）。建成环境的“前策划-后评估”从需求端分析建成环境使用者的使用模式，量化评估现有空间中存在的问题，其流程主要分为计划准备、数据收集、数据分析与建模等步骤，通过梳理居住区公共开敞空间使用模式研究的内容，能够更准确地把握具体研究问题，支撑更有针对性的实践开展，以弥补考虑供给端而生产的空间设计方法存在的不足。

研究尺度方面，“前策划-后评估”既可以针对建筑内部空间，也可应用于建筑外的公共开敞空间中，如居住区公共开敞空间。研究内容方面，“前策划-后评估”既关注空间自身的品质，也强调其产生的生态、经济与社会等效能，因此需对空间的使用模式进行分析。研究方法方面，“前策划”中包含基于对空间使用模式的模拟，其可按照模拟模型构建方法分为物理模型模拟法与理论模型模拟法。前者通过对按比例尺缩小的实态空间进行模拟实验获取空间使用模式，而后者根据理论公式与流程框图设定支撑模型构建。“后评估”则主要基于调查与实证研究，可分为定性和定量两个层面。定性分析调查居民对空间的实际需求，如对空间使用的文化、环境品质与便利舒适度评价等。定量分析通过多元数据对空间意向或现象进行刻画，获取空间中行为特征、城市意向等特征，对公共开敞空间的品质及存在的问题进行全面而准确的评价，从指导城市空间的规划与建设。

具体而言，基于“后评估”的设计改造通过对居住区公共开敞空间的空间使用模式进行测度，能够发现其中存在的问题，并用于空间形态及设施布局合理性的评估，从而为空间的设计改造提供思路。此种方法主要适用于在现有空间主体结构无法大规模改变的空间中进行较小规模的空间更新。而基于“前策划”的设计则通过构建设计方案的空间使用模式模拟模型，对设计方案进行评估。此方法亦基于对现实空间使用模式的测度，并在此基础上构建建成环境与行为活动之间关系的模型，从而实现了对设计方案的空间使用模式模拟。此方法主要适用于针对实施前的设计方案以及具有大规模空间更新条件的改造方案的评估，以评估其是否能够达成设计目标、提升设计方案的科学性。

总体而言，居住区公共开敞空间使用模式研究的可以支撑基于“前策划-后评估”的居住区公共开敞空间的空间优化。由于居民在居住区中的行为活动会受到公共开敞空间建成环境的空间形态和设施布局等因素的影响，通过对居民的空间使用模式进行测度和评估能够厘清居住区公共开敞空间设计与改造的需求（图 2-7）。

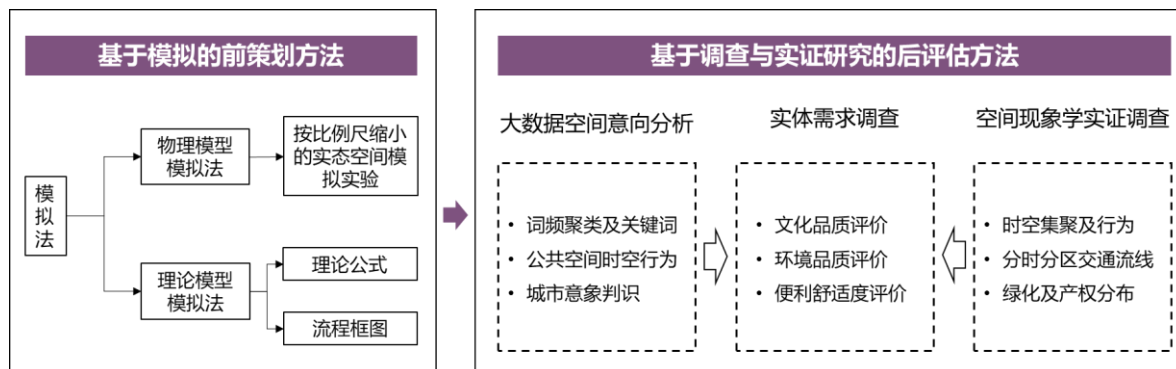


图 2-7 前策划-后评估中的定量模拟与评估方法（资料来源：庄惟敏, 等, 2019）

2.4.3 空间-行为互动理论

空间-行为互动理论（Space-Behavior Interaction）是以行为学派社会理论中的时间地理学与行为主义地理学为理论基础，采用活动分析法，从空间对于人行为的作用与人行为对于空间的作用两个角度出发构建的理论，以期从时间尺度、空间尺度以及不同行为类型尺度等角度进行理论的验证与完善（柴彦威, 等, 2017）。空间-行为互动理论的研究范式为结合基于空间（Place-Based）与基于人（Person-Based）两种不同的研究范式，将以人为视角的研究与以空间为视角的研究加以整合，从而对人的时空间行为在空间上进行汇总，以有效的认知和透视城市空间并识别城市空间对人的影响，能够为分析与解决公共开敞空间中存在的问题，并提供新的解决思路与方法（图 2-8）。

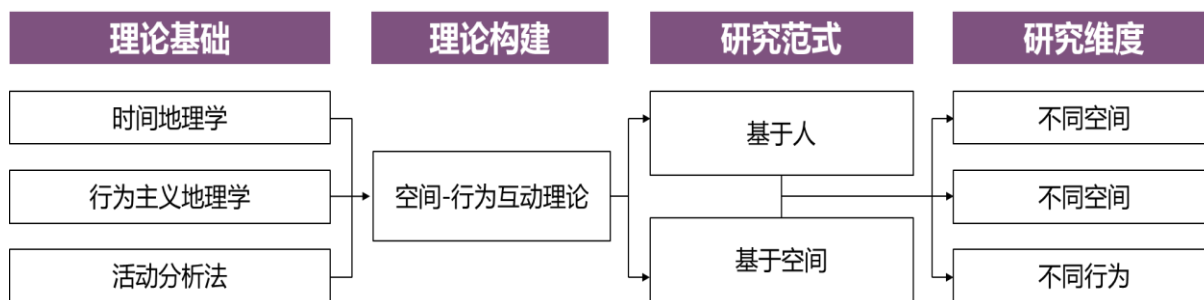


图 2-8 空间-行为互动理论框架（资料来源：柴彦威等, 2017）

2.5 本章小结

居住区公共开敞空间具有特殊性，承载交通与休闲综合活动、涉及宏观布局和微观设计、相关研究既关注人的主观感受、建成环境品质及人在空间的使用模式等。其中，居住区公共开敞空间中的空间使用模式是空间价值与质量的最直观体现，而相关研究的核心问题可概括为：居住区公共开敞空间内人群活动的模式是什么、其受什么因素影响以及相关因素如何影响等。

2.5.1 居住区公共开敞空间使用模式测度小结

为测度居住区公共开敞空间内人群活动的时空分布特征，主要包括停留及步行（交通及休闲目的）行为，涉及活动的人数、人次、密度、轨迹等方面的信息。相关测度方法逐渐从以主观评价法、系统观察法为主的人工数据收集法逐渐发展为基于移动及固定传感器的数据收集方法。空间分析及深度学习算法等方法为定量刻画居住区公共开敞空间的使用模式提供了重要支撑。相关研究已揭示出空间形态因素、景观设施因素、功能因素及社会因素在影响居民在公共开敞空间不同类型活动使用模式的重要作用。

然而，居住区公共开敞空间研究中的定量测度方法仍存在一定局限性：时间维度方面，人工收集数据的方法难以长实践监测，而基于人自我报告和调研的研究时间精度较低；空间维度方面，目前基于传感器的数据精度不足难以做精细化的使用模式的测度，而基于人观察和记录的研究空间覆盖面低；行为维度方面，基于人观察的研究缺少行为的时空维度记录，且基于人报告的研究样本量较低且成本较高，而基于传感器数据的研究难以区分不同类型的行为（图 2-9）。从网络分析的角度，使用模式测度存在与空间网络的空间分辨率匹配的流网络测度方法不足和对不同流类型进行区分的分析方法不足等问题。

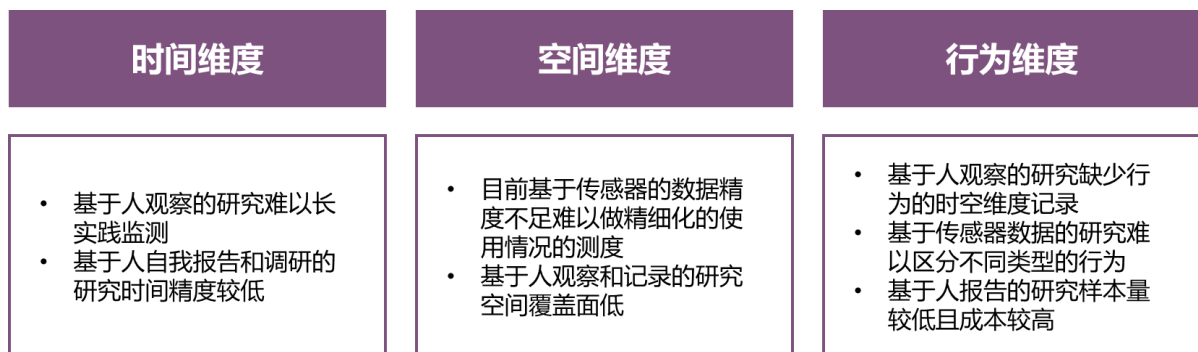


图 2-9 居住区公共开敞空间使用模式测度方法现存问题

2.5.2 居住区公共开敞空间使用模式模拟小结

城市现象往往是由不同的城市系统间互相耦合、相互作用产生的综合结果。网络视角下，空间网络的结构影响了人对空间的使用模式，即影响流网络的结构。因此通过将人本尺度城市空间视为“流网络”与“空间网络”构成的“二分网络”，能模拟其中活动的分布情况。目前公共开敞空间的流网络模拟主要分为自上而下及自下而上两种模式。前者以网络分析、空间句法为代表，后者以代理人模型、集群智能、基于空间句法的代理人模拟为代表。无论是自上而下模型还是自下而上模型，都依赖于对流网络（及空间使用模式）的精确测度，进而研究分析其与空间网络的关系或流网络自身的特征。使用模式模拟方法的问题方面，现在存在空间网络建构缺乏针对各流类型所对应的不同空间网络且空间网络建模过程中合适的参数难以确定，流网络与空间网络作用关系过程中不同网络模型与不同流类型的流网络间的作用关系尚未经过详细分析。因此需要分别对居住区公共开敞空间使用模式测度与模拟方法进行进一步拓展，以满足城市更新的现实需求。

2.5.3 居住区公共开敞空间优化理论与方法小结

支持居住区公共开敞空间优化的理论与方法主要有环境行为学理论、前策划-后评估理论以及空间-行为互动理论及方法。其中环境行为学理论立足于公共开敞空间，关注不同建成环境要素与群体的互动关系，并强调通过这种互动关系支持环境要素的布局与改造。前策划-后评估方法源于建筑学，并从建筑尺度逐渐扩展到公共空间尺度，强调基于定性与定量分析的空间问题诊断与使用模式模拟，用以支持空间设计及更新优化。空间-行为互动理论关注个体层面的时空间行为活动及其与空间的互动关系。然而，目前以上三种理论及方法在应用于居住区公共开敞空间研究于实践中存在以下局限性：对人群活动受空间形态影响的认知尚不充分，缺乏在施工前对设计方案进行模拟以预测方案实施后空间中人群活动模式的方法，难以支撑详细的规划与设计实践，导致很多人本尺度城市公共开敞空间使用模式与设计预期不符，造成经济和人工成本的无效浪费。另一方面，人本尺度城市公共开敞空间在建设完成后亦缺乏人群活动情况的认知方法，不能针对性的发现现有空间中存在的问题以引导城市更新与改建，导致居住区公共开敞空间不能完全发挥其应有的社会作用。

上述问题产生的主要原因是当前分析人本尺度城市空间中人群活动的方法（主要为宏观与微观尺度测度与模拟方法）存在一定的限制，相关实验开展数量与规模有限，难以积累足够的案例。如果能够改进当前的人本尺度城市空间使用模式测度与模拟方法，将能有效提升研究开展的可行性。即通过对各公共开敞空间内穿行与停留行为进行测度，能够评估其形状与设施布局的效能。且此评估能够直接进行总结，并用于指导所测度空间的更新方案设计。

第3章 研究框架与实验设计

3.1 研究框架

本研究立足于精细化治理与城市更新对居住区公共开敞空间优化的改造需求，借鉴空间-行为互动理论对个体活动的刻画，前策划-后评估对行为及空间的测度、评估及模拟，以及环境行为学对行为与空间互动关系的研究等，在已有研究方法的基础上，进一步研发基于居住区公共开敞空间形式及行为特殊性的使用模式测度与模拟方法。具体来讲，研究分为使用模式测度方法研究、使用模式模拟方法研究以及基于测度与模拟的空间优化研究三个部分。

其中测度方法研究部分考虑到居住区公共开敞空间结构与层次的多样性，将其进一步划分为宏观使用模式测度及微观使用模式测度，前者将居住区内各个公共开敞空间视为不同的节点，考虑居住区内各公共开敞空间之间的网络结构关系，后者将各个公共开敞空间视为活动面状场地，关注各公共开敞空间内部活动的偏好及差异。在此基础上，模拟方法部分也将进一步分为宏观使用模式模拟及微观使用模式模拟两个部分。对于空间优化而言，研究考虑前两个部分的内容，针对不同建设时期的空间采用不同的设计优化方法。其中公共开敞空间使用模式测度用于已建区域的更新改造，通过对空间使用行为的精准测度实现对公共开敞空间的评估；公共开敞空间使用模式模拟用于未建区域的设计评估，通过实证研究得到的使用模式模拟方法可用于模拟及比选设计方案。

研究框架中提出针对居住区公共开敞空间使用模式测度、模拟及空间优化三个主要研究内容，并进行对应的实验以检验方法有效性。其中使用模式的测度及模拟是本研究的核心内容。研究中分别针对宏观及微观使用模式测度及模拟的四个研究选择实验地点，制定实验设计。

3.1.1 使用模式测度方法研究

居住区公共开敞空间使用模式测度分为宏观及微观两个尺度。其中宏观尺度测度可用于评估居住区内各空间位置与大小的合理性，而微观尺度测度则用于比较各公共开敞空间形状及空间内设施布置的合理性。

宏观使用模式测度方面，其核心在于区分以交通或休闲为目的的步行行为，并研究其空间偏好。已有研究证明居住区内居民步行行为受交通或休闲目的的影响，在空间偏好上呈现显著的差异。然而，目前区分交通与休闲步行的研究通常以受访者的自我报告为研究数据，受限于数据获取的时间及精力成本，该方法难以拓展到更多的实验场地用以支持居住区改造及更新设计。本研究试图利用 Wi-Fi 探针获取行人手机

MAC 地址的特性，将获取的数据拆解为人次及人数数据，并通过两个数据的差异区分交通与步行行为。研究以通州市紫荆雅园为研究对象，以 751 创新园区为对照，分析不同数据的时空特征，并通过人工现场观察记录验证研究假设，并在识别交通与休闲步行的基础上，进一步比较同空间不同时间的使用模式，以及不同空间同一时间的活动特征，以及对比两种步行行为在两个实验场地的表现差异。

微观使用模式测度方面，其需要测度公共开敞空间内部各区域的活动情况，因此需要高精度活动数据的获取。然而已有研究所用的数据要么识别精度不足，要么在室外监测易受干扰而准确度降低。本研究提出基于计算机视觉及透视几何的高空间分辨率的行为测度方法，主要识别微观尺度研究中主要关注的穿行及停留行为。为对比不同的数据收集方法，研究以紫荆雅园为穿行活动的主要实验场地，通过连续摄影识别行人的整体活动特征及穿行流线，以水磨社区为停留行为的主要实验场地，通过打猎相机的间隔拍摄，获取停留时间较长的活动地点。研究通过人工审计，检验识别结果的准确性，并在识别整体活动特征、穿行行为及停留行为的基础上，进一步分析活动与空间形状、设施布局之间的关系。

3.1.2 使用模式模拟方法研究

针对空间使用模式的模拟仍然涉及两个尺度。已有研究通常使用自上而下的空间句法模型或自下而上的代理人模型模拟居住区公共开敞空间中的活动情况。然而由于已有研究缺少精细测度的活动数据，在建模过程中的模型及参数选择通常依赖于经验，且模型受限于数据精度通常以模拟总体活动流量的宏观尺度模型为主。已有研究揭示了不同出行目的及活动类型的活动空间偏好的差异，以总体流量为基准的模型构建忽略了居住区不同公共开敞空间的不同活动占比的差异。因此，本研究将区分宏观及微观两个尺度的模拟。

宏观尺度模拟方面，研究将各公共开敞空间视为网络链接与节点的组合，将空间中产生的行为视为交通与休闲流的混合。研究根据已有研究对交通与休闲步行的空间偏好特征，提出研究假设：即交通步行更依赖以拓扑关系为主导的空间网络结构，休闲步行更受以视域范围的影响。研究以紫荆雅园为研究对象，通过研究一中的宏观测度结果通过自上而下的空间句法线段模型及视域模型验证空间网络结构与交通步行的关系以及空间可视性与休闲步行的关系。

微观尺度模拟方面，研究关注空间内各区域活动的模拟。从微观使用模式角度，公共开敞空间的形状及边界设计、绿植配置及场地设施布局仍能影响空间中不同位置地使用频率。因此，微观尺度模拟将空间划分为网格，并通过网格之间的邻接关系构建网络，将每个网格中产生的穿行及停留活动视为流。研究以紫荆雅园为穿行的模拟实验场地，以水磨社区为停留的模拟试验场地，通过空间句法的代理人模型及线性回归模型，验证空间形态及周边要素与微观尺度整体与停留流的关系。

3.1.3 基于使用模式测度与模拟的空间优化研究

根据前策划-后评估的方法，空间及设计优化可在“前策划”及“后评估”两个阶段进行。本研究借鉴后评估基于测度的问题识别，以及前策划基于模拟的方案比选提出基于公共开敞空间使用模式测度与模拟的空间优化方法。然而，已有研究受限于行为测度数据的空间精度及时间跨度，难以准确自动评估待更新区域的使用模式，并进一步限制了精确模拟模型及参数的选择。因此，本研究旨在将前两个研究中获得的数据及模型应用到空间问题识别与使用模式模拟中。

基于使用模式测度的空间问题识别与优化方面，由于针对已建区域宏观尺度的公共开敞空间的结构及大小难以调整，因此研究只关注微观尺度的问题识别及设计改造。研究通过研究中长时间观察可自由停留空间中行人的穿行及停留活动情况，对紫荆雅园及水磨社区中的空间利用效率进行分析，从而评估各公共开敞空间形状与设施布局的设计与建设合理性。研究在识别问题的基础上，提出空间优化设计改造示意。基于使用模式模拟的方案比选及设计优化方面，根据研究中构建的可用于宏观模拟交通与休闲行为的空间网络模型——空间句法线段及视域模型，根据设计方案中的公共开敞空间位置与大小预测其中的交通与休闲行为分布，并根据构建的微观模拟的代理人模型，模拟设施建设与空间形状对穿行及停留行为的影响。最终，研究在综合宏观及微观模拟的结果在未建的杨坨中区的多个设计方案中选择社会效益最大的方案。

3.2 实验设计

研究中宏观使用模式测度主要通过紫荆雅园及751园区布置Wi-Fi探针设备获取人的行为，并通过居住区平面图进行空间布局可视化。微观使用模式测度则通过在紫荆雅园布置视频设备以及在水磨社区中布置红外感应触发相机，分别获取连续视频数据及非连续的图像数据，并根据空间布局图对研究结果进行可视化。研究中，研究基于实验空间的平面图，利用紫荆雅园的宏观尺度测度结果构建宏观尺度使用模式模拟的模型，利用紫荆雅园宏观尺度及微观尺度的测度结果以及水磨社区的测度结果构建微观尺度模拟的模型。研究中，研究根据研究的测度结果识别对应的空间问题并提出空间优化策略，并将研究的模型模拟应用到杨坨中区的宏观及微观使用模式模拟中（图3-1）。

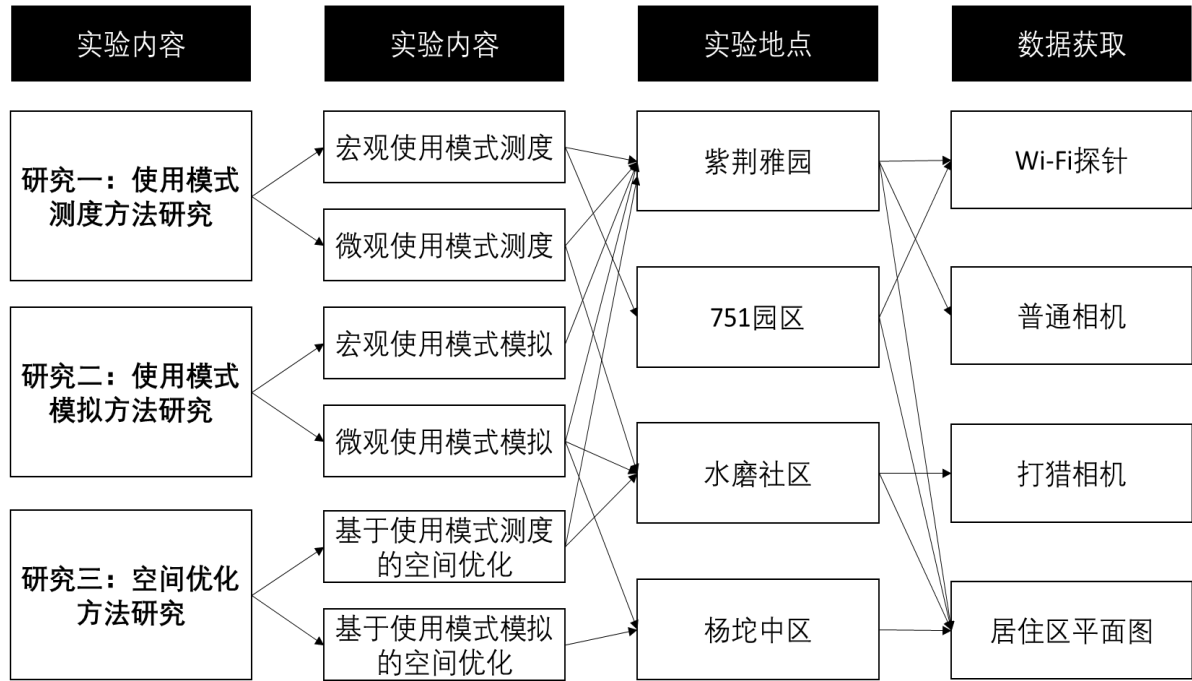


图 3-1 研究内容与实验范围

本研究中研究一的实验范围包括紫荆雅园与 751 园区。其中紫荆雅园位于北京市副中心，占地 12 万平方米，居民总数约为 3000 人。住宅小区南邻主干道，北邻沿江线性公园，东西两侧邻近另外两个住宅小区。此居住区具备较为便利的 Wi-Fi 探针设备安装条件，因此通过在其出入口及主要公共开敞空间布置 Wi-Fi 探针设备可以较为全面地掌握进入小区居民的活动情况。为检验居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法的有效性，研究选择位于北京市朝阳区的 751 园区为对照实验，其占地 36 万平方米，是在北京正东电子动力集团有限公司（原 751 厂）退出生产的厂房基础上改建成的创新中心，因此其空间中主要以工作人员及观光访客为主。751 园区周边东、南、北三个方向为办公场所，西与 798 艺术中心相邻。研究在 751 园区布设 Wi-Fi 探针设备、收集使用模式数据并进行分析（图 3-2）。

实验使用的 Wi-Fi 探针设备由两部分组成：采集手机数据的路由器以及为路由提供保护的适宜工作环境的设备箱。其中设备箱应为非金属材质，以保证路由器能有效接受电磁信号。而考虑到路由器对工作环境较为敏感，设备箱亦应有较好的防水性、恒温性，同时能够便于开启检修。设备箱安装高度需要考虑以下几个因素：电源、电线布置难易程度、手机 Wi-Fi 信号强弱（1.2m 处最强）、环境稳定性（温度、湿度）、检修难易程度、安全程度（是否能避免人群日常活动造成的破坏）。综合考虑上述因素，研究中将设备箱安装在距地面 2 米处能够同时兼顾设备运行稳定性和手机 Wi-Fi 信号强度。

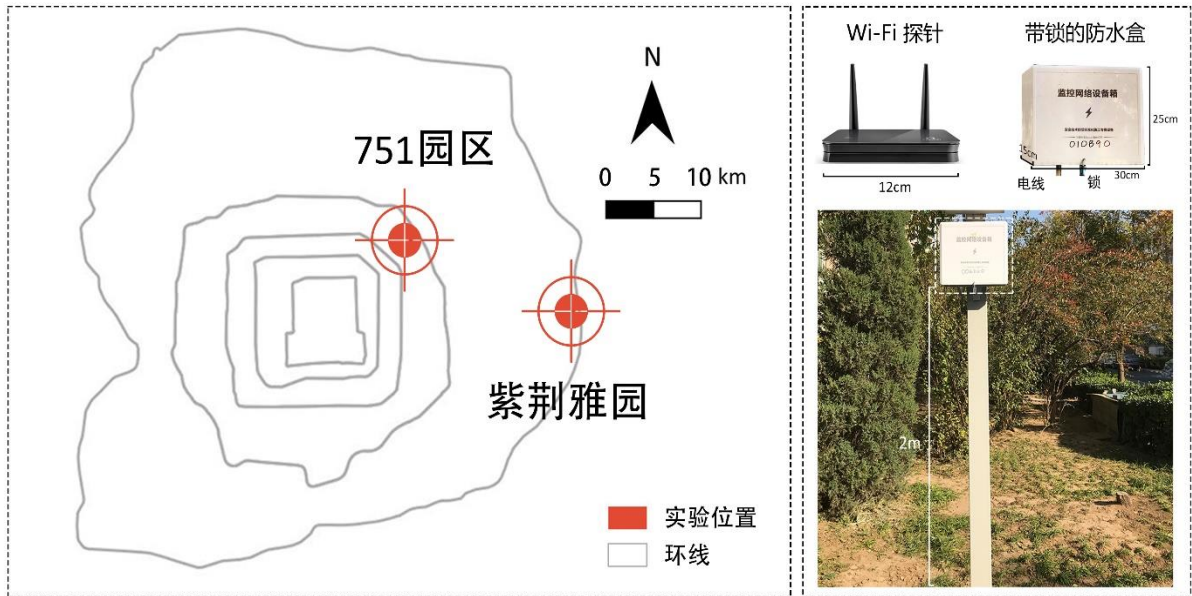


图 3-2 研究一实验范围及设备安装

用于微观使用模式测度与模拟的居住区包括紫荆雅园和水磨社区。水磨社区是一个自下而上形成的居住区。其占地 25 万平方米，东侧为城市主干道，西侧为大学园区。居住区内有一条连接 5 个入口及区域内所有支路的环形主道，内部主要为步行空间。在长期自下而上的自建过程中，原住户不断占用支路公共空间，临时搭建额外的临时建筑（如非正式包间、卫生间），以吸引更多租户。因此，建筑物之间的一些现有公共空间变得越来越狭窄，只剩下靠近入口和主要道路的公共空间（图 3-3）。

在紫荆雅园中布置的普通相机的视频的拍摄位置可分为“高位”以及“低位”两种。其中“低位”拍摄位置指将拍摄高度为 3-5 米。“高位”拍摄指设备距地面较远，拍摄高度在 5 米以上。由于视频拍摄过程中需要尽量识别公共开敞空间中行人的完整形态，故两种拍摄位置均高于地面 3 米。在水磨社区的实验选择红外触发相机 Suntek H882 收集行人信息，因为其可支持 32GB 数字存储卡而具有存储至少 12,000 张高分辨率图像的潜力。由于红外触发相机最初是为野生动物监测而设计的，考虑其到对低频活动进行长期灵活户外监测的优点，本研究将其应用于停留行为的监测。该相机由超过 8 节 AA 电池供电，并配备外置太阳能电池板。此外，这款红外触发相机上的防水保护装置使其能够在各种天气情况下工作，红外模式可用于监测白天和晚上的移动物体。考虑到红外触发相机白天的最大触发距离是 50 米，晚上 30 米，超过这个距离的区域应布置更多的相机。在本研究大多数小型公共开敞空间中，一个打猎相机足以收集每个公共开敞空间的行人数据。在安装打猎相机之前，研究人员应检查电池和存储卡，校准时间，然后将相机设置为红外模式，并设置好时间间隔。此外，相机应固定在离地至少三米的固定位置（例如树或墙上）。红外触发相机的镜头应朝向街道并倾斜设置，并应检查图像中每个公共位置的可见性。

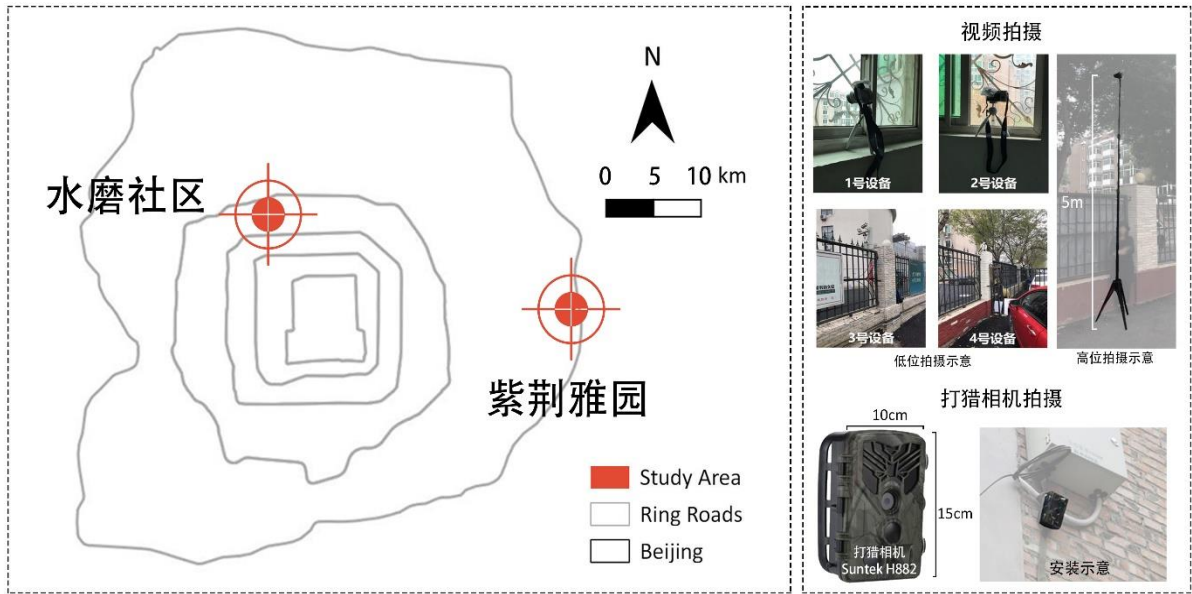


图 3-3 研究二实验范围

此外，研究中尝试将上述获得的居住区公共开敞空间宏观与微观使用模式模拟模型应用于未建成的方案中，以预测方案中的宏观与微观空间使用模式，并进行空间优化工作。研究中进行空间优化的实验地点选取北京城市副中心杨坨中区一未建成的居住区，其中各公共开敞空间主要铺设透水铺装或为下凹式绿地，与建立模拟模型的居住区具有类似的基础设施、气候与水文条件，具有进行模型迁移的条件。

在紫荆雅园及水磨社区实验的相关监测设备的选址、安装及数据收集得到了通州紫荆雅园物业、水磨社区居委会社区和派出所的许可。751 园区的 Wi-Fi 数据与主办方合作获取。

3.3 本章小结

本章主要介绍了全文整体的研究框架，从“使用模式测度-使用模式模拟-空间优化”三个方面展开。其中“研究一使用模式测度”是“研究二使用模式模拟”的重要数据支撑，研究一与研究二是研究三空间优化两个路径的基础。三个章节的研究内容均考虑居住区公共开敞空间的层级，从宏观及微观两个尺度测度、模拟及优化空间使用模式。与此同时，研究考虑居住区公共开敞空间中活动的复杂性和混合性，聚焦宏观交通行为（微观穿行行为）与休闲行为（微观停留行为）的活动偏好及特征差异，通过不同尺度研究的方法创新实现对不同行为的识别与分析。研究通过在北京市紫荆雅园、751 园区及水磨社区的实验检验方法的有效性（图 3-4）。

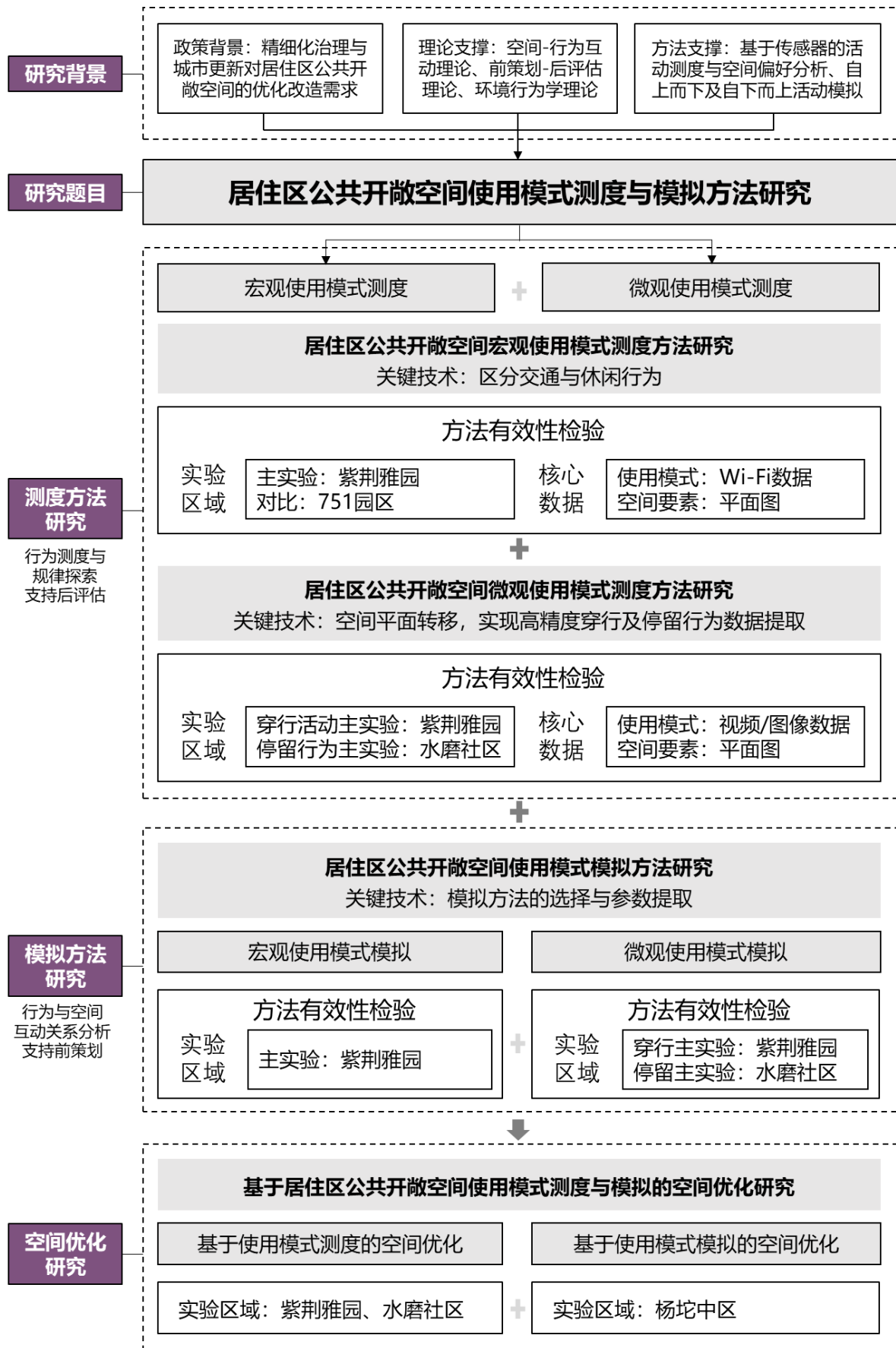


图 3-4 研究框架

第4章 居住区公共开敞空间使用模式测度方法

4.1 居住区公共开敞空间使用模式测度方法研究

居住区公共开敞空间使用模式测度分为宏观测度及微观测度两部分。其中宏观测度将居住区内各公共开敞空间视为节点，关注节点之间的网络关系对节点内整体活动量的影响，因此前者测度公共空间内部整体流量，每个空间获得一个数值。微观测度则聚焦公共开敞空间内部活动的分布，关注空间形态及设施对活动布局的影响，因此需要更细尺度的数据刻画人在不同区域的活动，每个分析网格一个数值（图 4-1）。

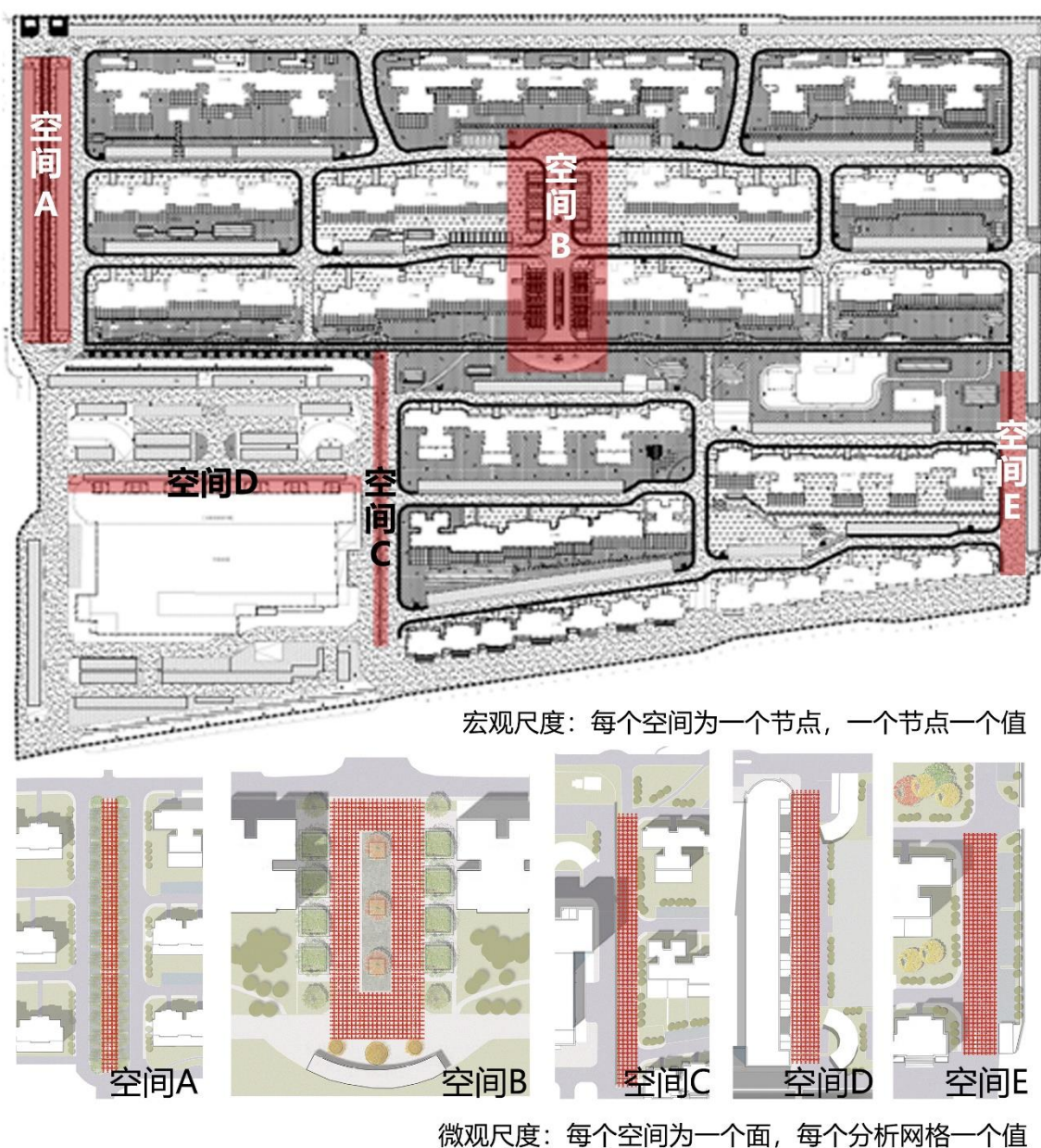


图 4-1 宏观及微观尺度公共开敞空间示意图

然而，已有针对公共开敞空间的测度更关注公园、广场等城市公共空间，居住区公共开敞空间作为人们日常活动最频繁，尤其是对老人、小孩更重要的活动空间却容易被忽略。尽管针对公园、广场等公共开敞空间的方法在居住区公共开敞空间研究中仍具有一定的适用性，但考虑到居住区内活动的复杂性，居住区结构的层次性，已有方法在具体研究及实践中仍具有一定的限制。因此，本研究旨在基于已有研究的局限，提出适用于居住区公共开敞空间使用模式测度的方法，并通过“方法构建-方法有效性检验”的步骤，将提出的解决思路拆解为具体的实现步骤，并进行案例区域的实验，根据数据反映的活动的时空特征及规律、不同类型区域的比较，不同数据收集方法的对比以及部分人工审计验证检验使用模式测度方法的有效性。本章将通过4.2及4.3，分别详细阐述居住区公共开敞空间宏观及微观使用模式测度的方法及实验结果。

4.2 居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法研究

4.2.1 已有研究局限及解决思路

已有研究的空缺/挑战为：针对居住区公共开敞空间活动的研究主要关注的交通与休闲活动的获取主要依赖于访谈问卷、自我报告等，缺少定量测度工具，或者基于研究者观察和记录、被访者手持GPS+报告等方式研究成本较高。而已有通过定量测度分析居住区内活动的研究通常只关注整体的活动流量，缺少对两种不同目的出行活动的区分与比较。因此本研究的解决思路为：基于休闲与交通活动在速度、路径等方面的差异，提出拆离两种行为的方法。具体来讲，由于人们在开展休闲步行/活动时通常是慢速移动且在同一空间中反复遛弯或停留，因此同一时间及空间范围内人次及人数数据差异较大；而人们在开展交通步行/活动时通常由于具有明确的目的移动速度较快且在特定时间及空间内出现次数较低，因此人次及人数数据差异较小。基于以上假设，本研究可利用能够收集和拆离人次及人数数据的工具收集人的活动数据，并通过比较不同空间及时间两者的变化情况验证研究假设。

4.2.2 居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法研究框架

居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法研究主要分为方法提出与方法有效性检验两个部分。前者主要包括数据收集、处理及分析三个步骤，主要阐述数据收集的方法及原因，根据研究假设提取数据的方法以及如何基于获取的数据表征居住区公共开敞空间研究关注的交通及休闲步行活动；后者由研究区域、具体实验及有效性检验三个维度构成。研究以紫荆雅园居住区为主实验区域，以751创新中心为对照实验，旨在通过实验比较两种不同功能空间的活动差异，从而突出居住区公共开敞空间的特殊性，并通过人工审计、数据分布特征等验证研究提出的方法假设（图4-2）。

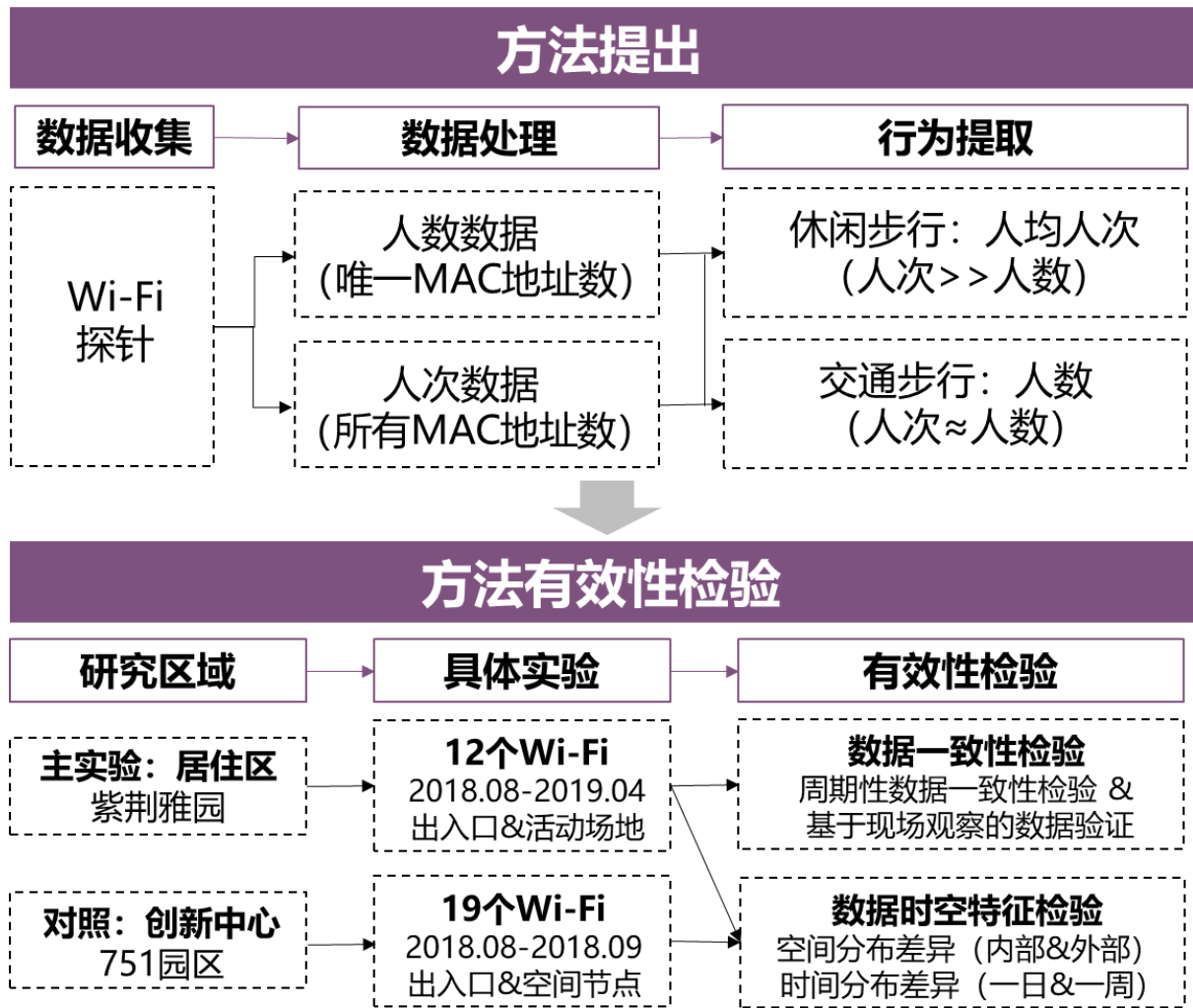


图 4-2 居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法研究框架

4.2.3 使用模式数据收集方法

为验证研究提出的方法，本研究需获取空间中行人的人次及人数数据。以往的研究文献以及实践结果表明，人工收集数据的方法均存在采样率低、空间分辨率低且数据维度不全的问题。在基于传感器收集数据的方法中，视频数据具有最高的采样率和空间分辨率，但其获取的数据主要集中于人次维度，出于个人隐私问题的考虑难以跨视频设备对个人进行追踪，因而缺少人数维度的信息。使用 GNSS 设备收集数据的方法空间分辨率中等，但采样率较低。使用 Wi-Fi 探针与蓝牙设备收集数据的方法均有较高的空间分辨率及采样率。二者相比，由于信号范围不同，蓝牙设备布设的密度是 Wi-Fi 设备的数倍，且由于 Wi-Fi 可与社区公共网络等基础设施结合有更高的应用潜力。综上所述，Wi-Fi 探针可用于本研究宏观尺度测度研究的人次及人数数据获取，从而能够提取交通与休闲行为的时空分布规律。

4.2.4 使用模式数据处理方法

4.2.4.1 交通与休闲步行行为区分方法

为对人本尺度公共开敞空间功能定位进行更加准确的分析，本研究拟通过对空间使用模式数据进行分析以对不同行为的流加以区分，从而生成体现不同类型流的流网络数据。本研究所分析的人群活动主要指人本尺度公共开敞空间中的步行行为，其已被相关研究者视为一种混合活动。不同种类的空间中步行行为的混合程度有所区别，但在邻里空间或社区内，研究者通过收集步行路径数据并对行人的目的进行访谈，发现步行行为可按照出行目的分为交通行为与休闲行为，且行人对于这两类步行行为有不同的空间偏好（Cerin, et al., 2006; Saelens, et al., 2003）。其中交通行为包括为上下班、接送孩子上下学、处理日常事务、购物娱乐与访友聚会等活动产生的步行行为，而休闲行为包括散步、赏景与锻炼等活动。

尽管目前的技术手段无法直接识别人的出行目的，但可获取的步行数据中人数与人次信息能够一定程度上分别交通与休闲行为。交通行为目的明确、行走速度相对较快，而休闲行为目的性不明确、行为速度相对较慢，走走停停。通过对比交通步行与休闲步行行为在一定空间及时间范围内的人次及人数差异，可发现某研究区域内的交通行为所产生的人次与人次数据将较为接近，而对于休闲步行行为，由于活动的无目的性，通常会反复穿越同一区域，因而人次数量将远大于人数数量，故空间中人次相比人数越高则休闲活动比例越高，而人次与人数越接近说明空间交通活动比例越高（图4-2）。因此可推断出以交通步行行为为主的居住区公共开敞空间日均人次与人数的比值为2，而休闲行为比例越高则人次与人数的比值也将越高。

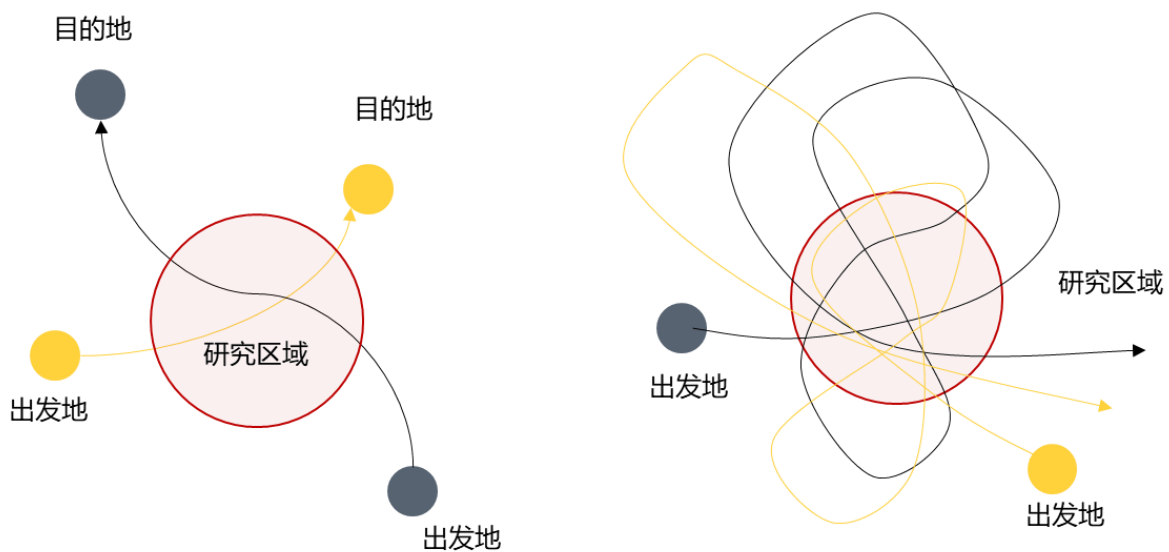


图4-3 交通步行行为（左）与休闲步行行为（右）示意图

4.2.4.2 Wi-Fi 探针数据处理方法

Wi-Fi 探针设备收集到的数据主要包括 Wi-Fi 探针设备接受数据所依靠的路由器的编码、数据接收时间以及发送数据的客户端 MAC (Media Access Control Address) 地址。其中路由器编码为各 Wi-Fi 探针六位数的 16 进制代号；数据接收时间为 Wi-Fi 探针进行数据收集的时刻，本实验设置的 Wi-Fi 每五秒钟采集一次数据，因此数据接收时间通常间隔五秒钟；客户端 MAC 地址为被 Wi-Fi 探针搜索到的移动通信设备的 MAC 地址，其中每部移动通信设备均具有独特的 MAC 地址，且不会随时间变化，因此可用于判断不同 Wi-Fi 探针所记录的数据是否由同一设备产生。

数据处理方法上，通过统计各 Wi-Fi 探针数据获取日均数据条数，从中获取对应公共开敞空间内的总人次数据，并通过统计各 Wi-Fi 探针获取的日均客户端 MAC 地址的数量，能够获取监控空间内的使用人数数据。由此可推断出反映空间累计使用次数的人次数据相较人数数据而言更多可表示公共开敞空间内由个体多次穿越同一空间产生数次数据的休闲行为占比越大，而反映研究时间内所通过的人的数量的人数数据与人次数据接近时，交通步行行为占比更多（图 4-4）。

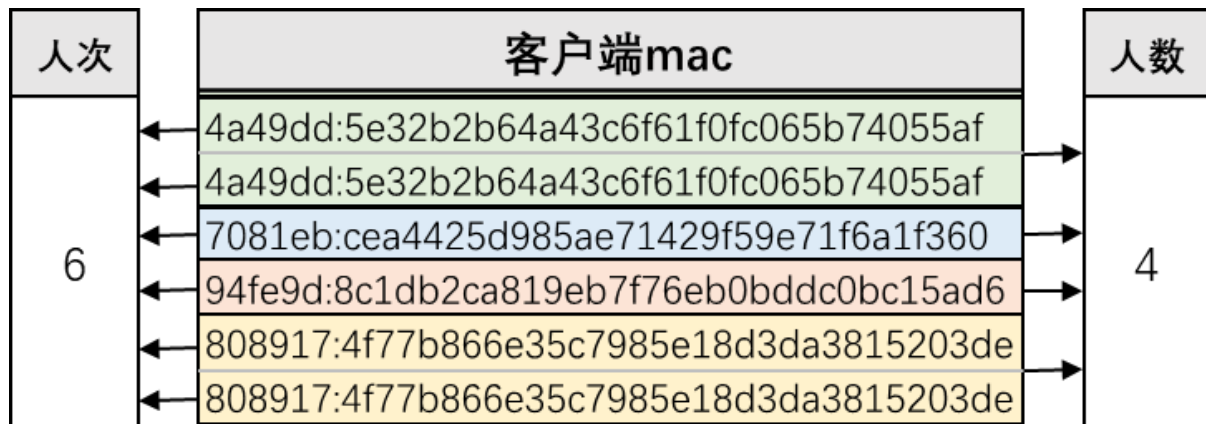


图 4-4 Wi-Fi 探针数据中提取人次与人数方法示例

4.2.5 居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法有效性检验

4.2.5.1 居住区公共开敞空间宏观使用模式测度数据收集

(1) 紫荆雅园数据收集

Wi-Fi 探针数据获取方面，研究针对研究范围内居住区不同形状与类型的公共开敞空间，通过架设 Wi-Fi 探针设备对其中居民的使用模式进行数据收集。研究共安装 Wi-Fi 探针设备共计 12 台，其中 1 号至 5 号设备监测居住小区西北角的条状公共开敞空间，6 号与 7 号设备覆盖小区中部矩形公共开敞空间，8 号设备覆盖小区中部内部道路交叉口，而 10 号与 11 号设备覆盖小区西南角居住区北侧作为停车场的公共开敞空间，覆盖了居住区内出道路外的主要公共开敞空间。此外研究中在居住区各出入口处亦布置

了 Wi-Fi 探针设备，以保证对居住区内居民进出活动进行较为全面的了解，因此通过 1 号、9 号与 12 号设备覆盖紫荆雅园居住区西北、西南与东南居全部三个主要行人出入口（图 4-5）。



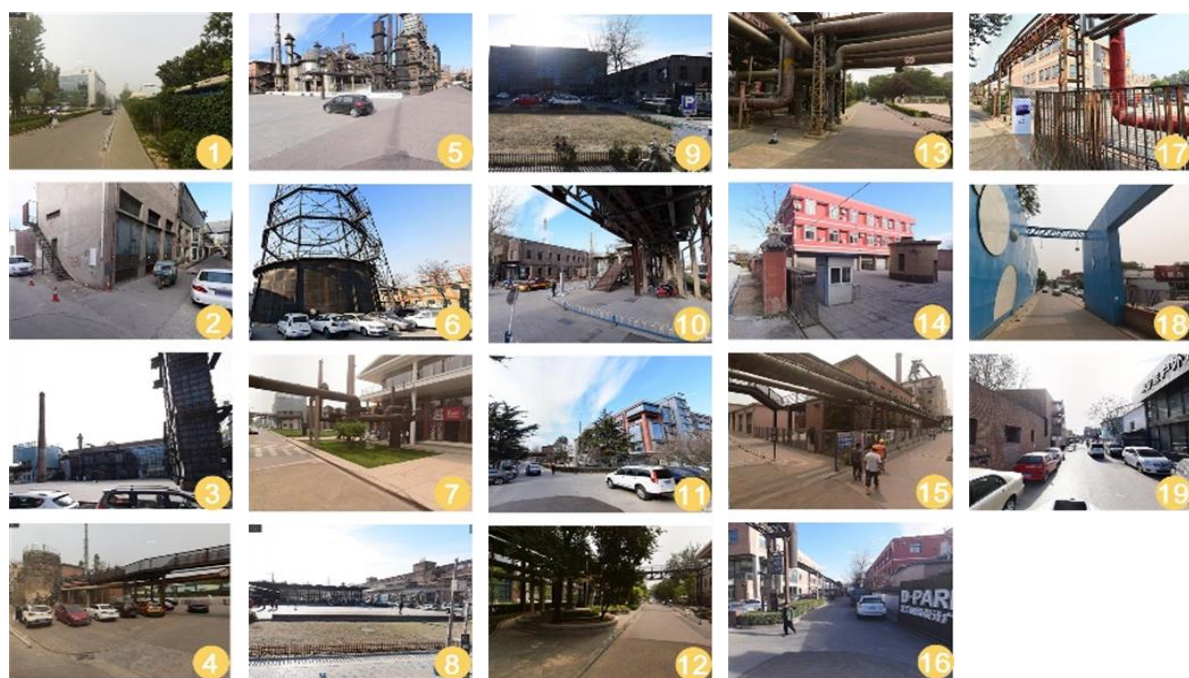
图 4-5 紫荆雅园 Wi-Fi 探针设备安装情况

本研究的数据收集时间为 2018 年 8 月 1 日至 2019 年 4 月 30 日，时间跨度为 9 个月，总计约 270 天，包含不同季节。期间收集了移动通讯设备的相关信息。此研究过程中不涉及移动通讯设备使用者的个人信息以及用户画像，以保护居民个人的数据隐私。Wi-Fi 探针获取的使用模式数据可根据数据处理方法对不同使用模式进行划分。其中日均数据条数数据为人次数据，统计各 Wi-Fi 探针获取的日均客户端的唯一 MAC 地址的数量即人数数据，两者差异能够反映研究范围中交通与休闲活动情况。

(2) 751 园区数据收集

居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法的基本假设为居民区中居民的步行行为较为复杂，有休闲行为与交通行为两种行为类型，因此需要通过布设 Wi-Fi 探针测度公共开敞空间宏观使用模式，以对两种行为进行区分，从而实现对空间使用模式的准确评估。而如果采用相同的数据收集与处理方法对非居住区公共开敞空间进行使用模式测度，若所有空间呈现相似的特征即表现为同一类活动特征，则可验证居住区步行活动存在的特殊性，从而从侧面证明研究中提出的居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法的有效性。

研究在 751 园区内布设 Wi-Fi 探针设备 19 台，分别位于南部出入口；751 新文化艺术中心南侧、西北侧与东北侧；老炉区广场西南侧与东南侧；南部储气罐东南侧；西南出入口所连接东西向主要道路（按等间距布设 4 台）；设计师大楼西侧、西北侧与东北侧；北京时尚广场 A 座西南侧与东南侧；北京时尚广场 A 座东南侧 30 米处的公共开敞空间；西北与东北出入口旁等 751 园区内的主要公共开敞空间中，以保证数据采集的空间全面性（图 4-6）。研究中数据收集时间为 2018 年 8 月 26 日至 2018 年 9 月 9 日，共计 14 天，以收集包含工作日及周末等不同时间段的公共开敞空间使用模式。



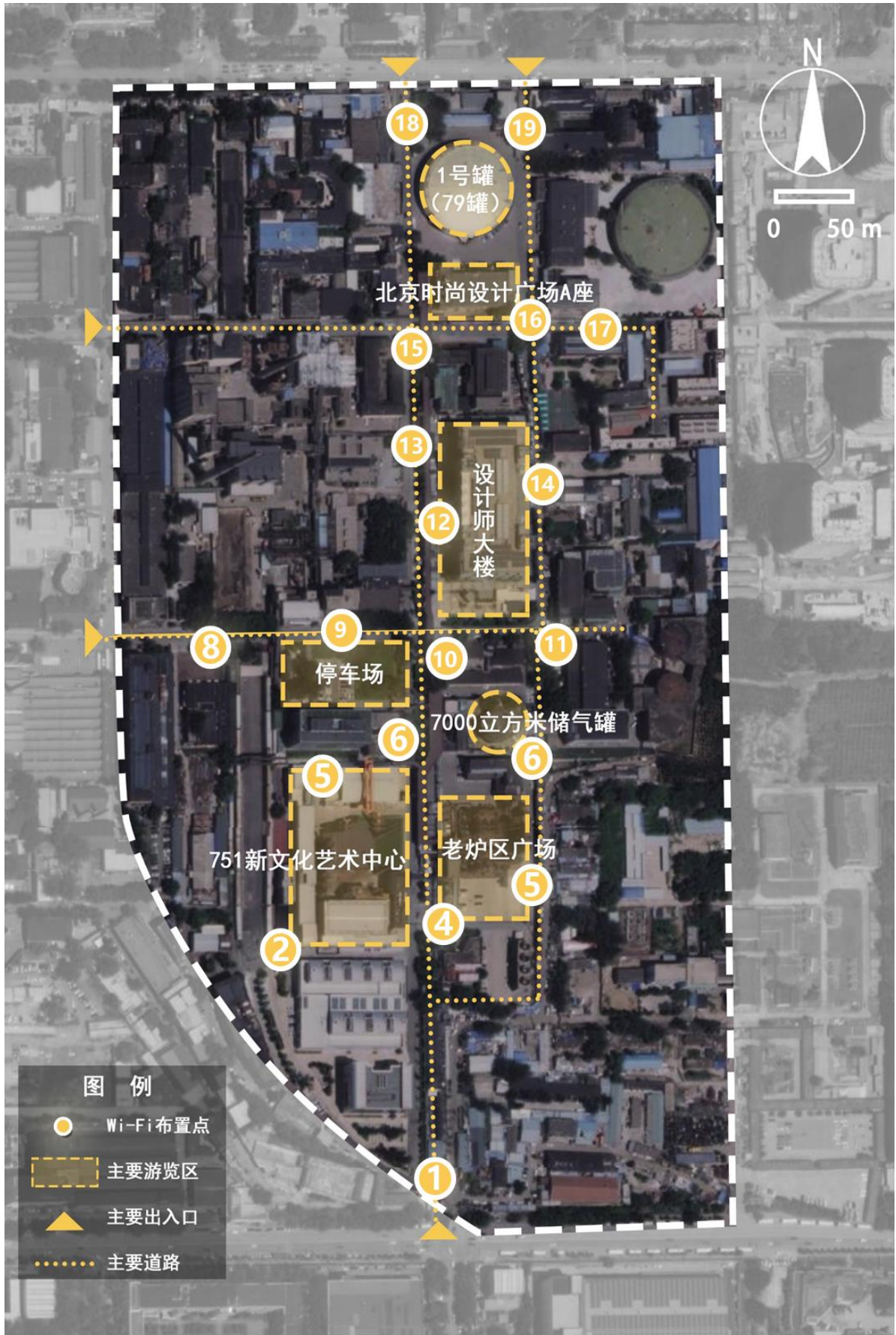


图 4-6 751 园区 Wi-Fi 探针设备安装情况

4.2.5.2 Wi-Fi 探针收集数据的一致性检验

由于居住区公共开敞空间中的活动具有周期性，由 Wi-Fi 探针获取的数据在相似周期（如每月或每周）间的差异应较小。尽管本研究在安装 Wi-Fi 探针过程中充分考虑了户外环境可能对数据收集产生的影响，采取了防水保护箱、供电等相应的措施，但 Wi-Fi 探针仍可能受其他要素的影响而不能准确获取行人信息。为检验 Wi-Fi 探针数据收集的准确性，本研究对不同时段内的数据做了相关性分析，验证数据的一致性。研究中使用皮尔逊相关系数（Pearson Correlation）衡量不同时段收集数据的一致性，用以检验数据收集的稳定性。

皮尔逊相关系数的计算方法为：

$$Pearson = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

其中 x_i 与 y_i 为不同分组的人次或人数数值， \bar{x} 与 \bar{y} 为人次或人数的平均值。皮尔逊相关系数的计算结果为两空间使用模式的协方差与标准差的商值。

(1) 每月数据一致性检验

通过将数据按收集的月份进行划分，Wi-Fi 探针设备在紫荆雅园所记录的数据可分为 2018 年 8 月至 2019 年 4 月共 9 部分。通过对这 9 组数据进行自相关分析（图 4-7），研究发现人次数据与人数数据在不同数据组间相关系数均普遍大于 0.8，说明在各月份之间 Wi-Fi 探针所记录的人次与人数规律具有一致性。

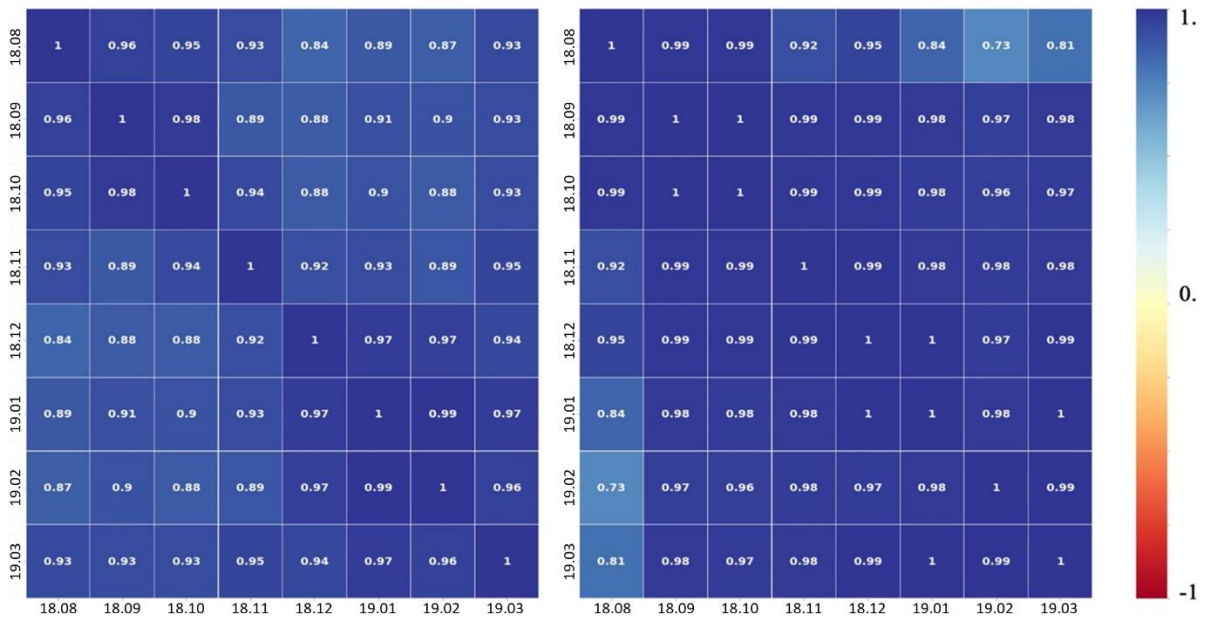


图 4-7 各 Wi-Fi 探针设备所记录月间人次（左）与人数（右）数据自相关分析矩阵

(2) 每周数据一致性检验

本研究亦对 Wi-Fi 探针设备所记录数据的周间一致性进行了检验。通过将数据按收集的周进行划分,可分为 42 部分。通过对这 42 组数据进行自相关分析检验,发现人次数据与人数数据在不同数据组间相关系数均普遍大于 0.8。虽然相比按月划分,按周进行数据自相关检验时相关系数有所降低,但各组间人数与人次相关系数超过 0.8 的数量仍占整体自相关矩阵的 87% 及 96%,说明在各周之间 Wi-Fi 探针所记录的人次与人数规律具有一致性,即居住区公共开敞空间的使用模式在不同时间段内具有一致性,可支撑后续的分析工作(图 4-8)。

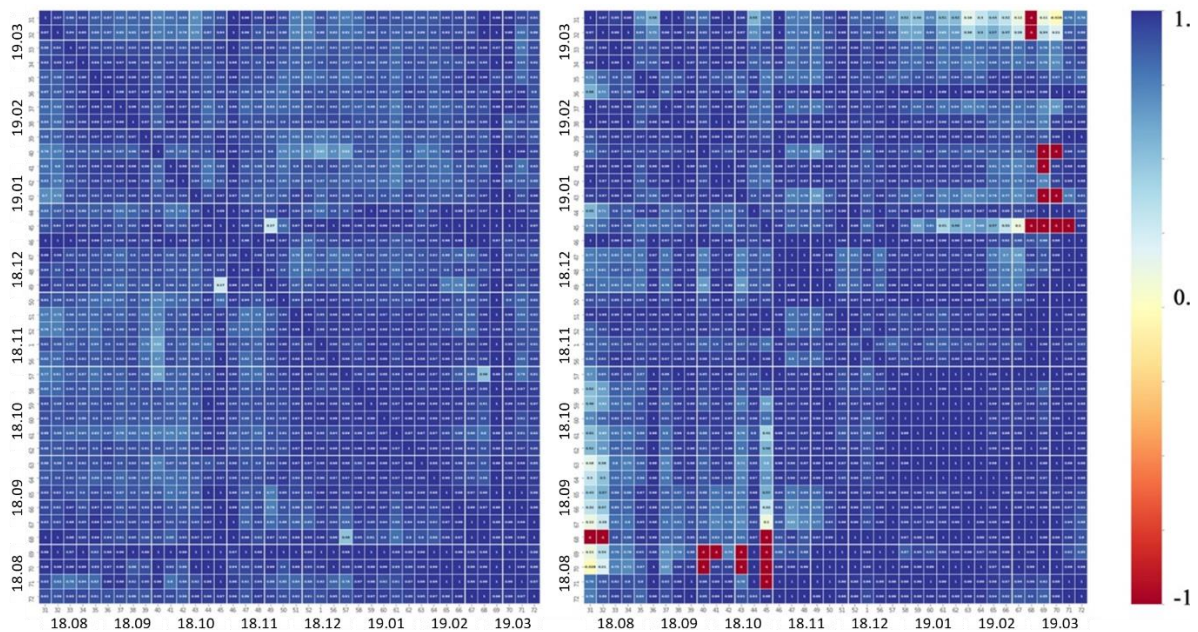


图 4-8 各 Wi-Fi 探针设备所记录周间人次(左)与人数(右)数据自相关分析矩阵

4.2.5.3 数据时空特征检验：空间分布差异

在紫荆雅园中,每个 Wi-Fi 探针的平均每日行人人数数值在 500 到 3,000 之间,人次数值在 3000 到 7,000 之间,人次与人数数据的差异较大。对于不同 Wi-Fi 探针而言,平均每日人次与人数数值之间的关联并不显著,这表明不同空间中交通与休闲行为的占比差异较大。因此,平均人数和人次数值差异的空间格局可以反映公共开敞空间的主要功能。居住区入口空间(5、9、12 号设备)的人数数值较大,而人均人次数数据相对较少,尤其是居住区东南出入口最低,比值为 2,恰好与理论计算的人均进出两次的结果相同。这种现象可以解释为社区入口附近的区域有更多的交通步行,并一定程度上阻碍了人们进行更多的休闲活动。研究结果还显示人们更倾向于在居住区内部的公共开敞空间展开休闲活动,因此,相关空间(2-3、6-8 号设备)人次数数据远高于人数数据,即人均人次数值较高,甚至超过 6,反映显著的休闲活动的特征(图 3-a),此结果符合人们真实的活动场景。在休闲活动方面,居住区出入口因为人员往来嘈杂

的休闲行为相对比例最低，高层住宅楼旁公共开敞空间因为日照交叉且常有机动车通过因此休闲行为比例次之，而居住区中部活动空间环境优美且宽敞故休闲行为比例较高，居住区林荫大道则因为毗邻北部公园与位于两居住区中间故休闲行为比例为各开敞空间中最高。在交通活动方面，居住区出入口空间的交通行为最高，而距出入口较近的空间次之，住宅楼附近的公共空间交通行为则更低，而具有良好环境和休闲活动设施的空间的交通行为则最低（图 4-9）。

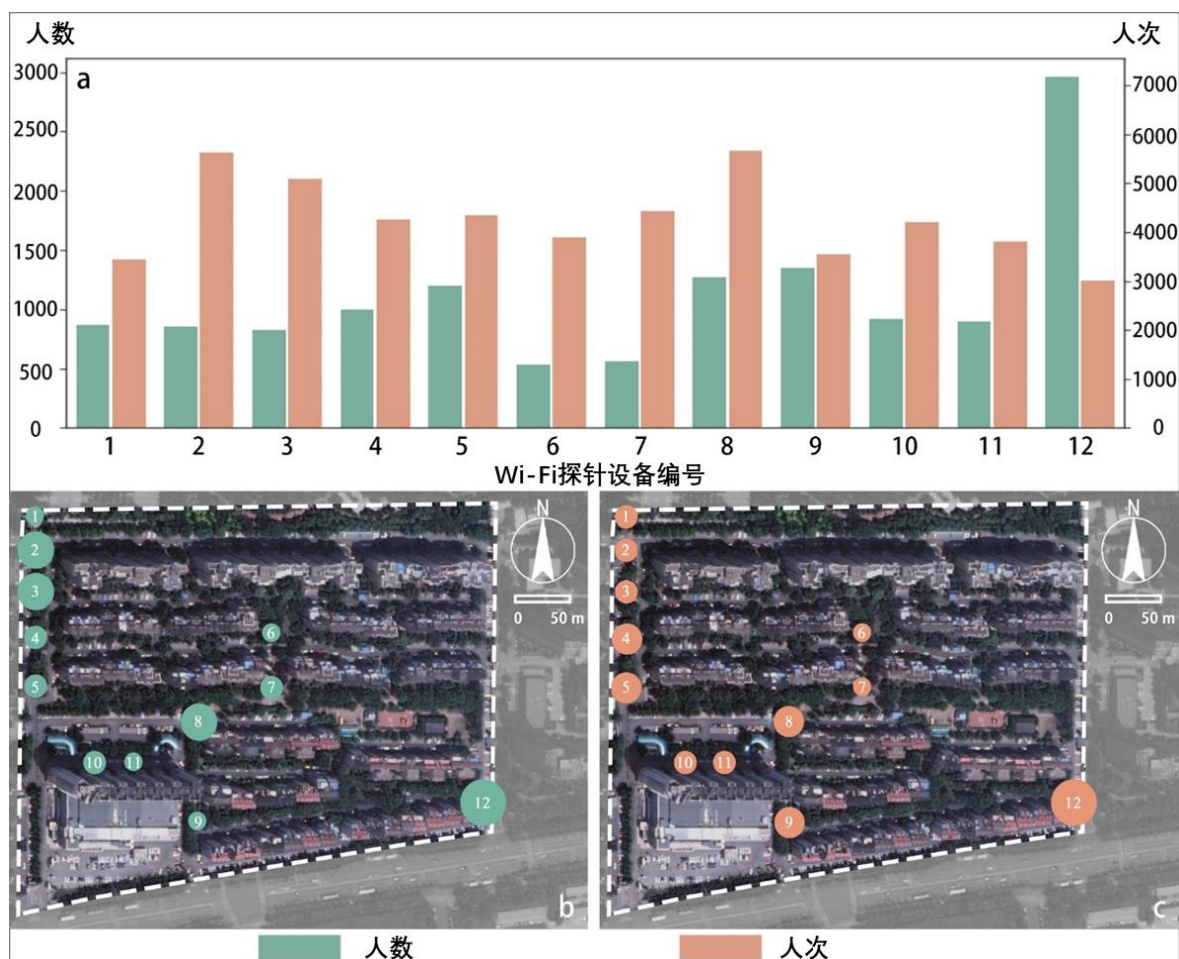


图 4-9 紫荆雅园日均使用人数与人次空间分布

在 751 园区中，Wi-Fi 探针检测到的日均行人人数在 200 到 16,000 之间，平均人次的取值范围在 200 到 17,500 之间，人次及人数数据差异较小，表明 751 园区中的公共开敞空间主要承担交通行为。南北入口（1、18-19 号设备）的行人较多，而大部分公共开敞空间中人均人次数值较低，表明游客更喜欢路过而不是停留或徘徊在这些区域（图 4-10）。结果表明，751 园区中的公共开敞空间主要作为各种建筑之间的连接，形成交通网络，而非人们室外活动的场所。这意味着人们穿过这些区域旨在到达其他地方或建筑物。这个结果具有一定的合理性，因为 751 园区是一个由工厂改造成的由各种建筑组成的创意中心，是室内设计活动和展览的主要场所。因此，在 751 园区的

公共开敞空间中行走的行人有明确的目的，因此与紫荆雅园代表的居住区相比，人们在公共开敞空间中停留和徘徊的次数和时间更少。

紫荆雅园与 751 园区之间的结果差异符合两个场所的活动空间分布规律，表明本研究提出的方法可以反映交通和休闲步行的特点。结果还表明，居住区的人次及人数之间的较大差异表明居住区的休闲步行占比较 751 园区更多。因此，交通和休闲步行比例的差异有助于了解整个区域和每个公共空间的主导功能。

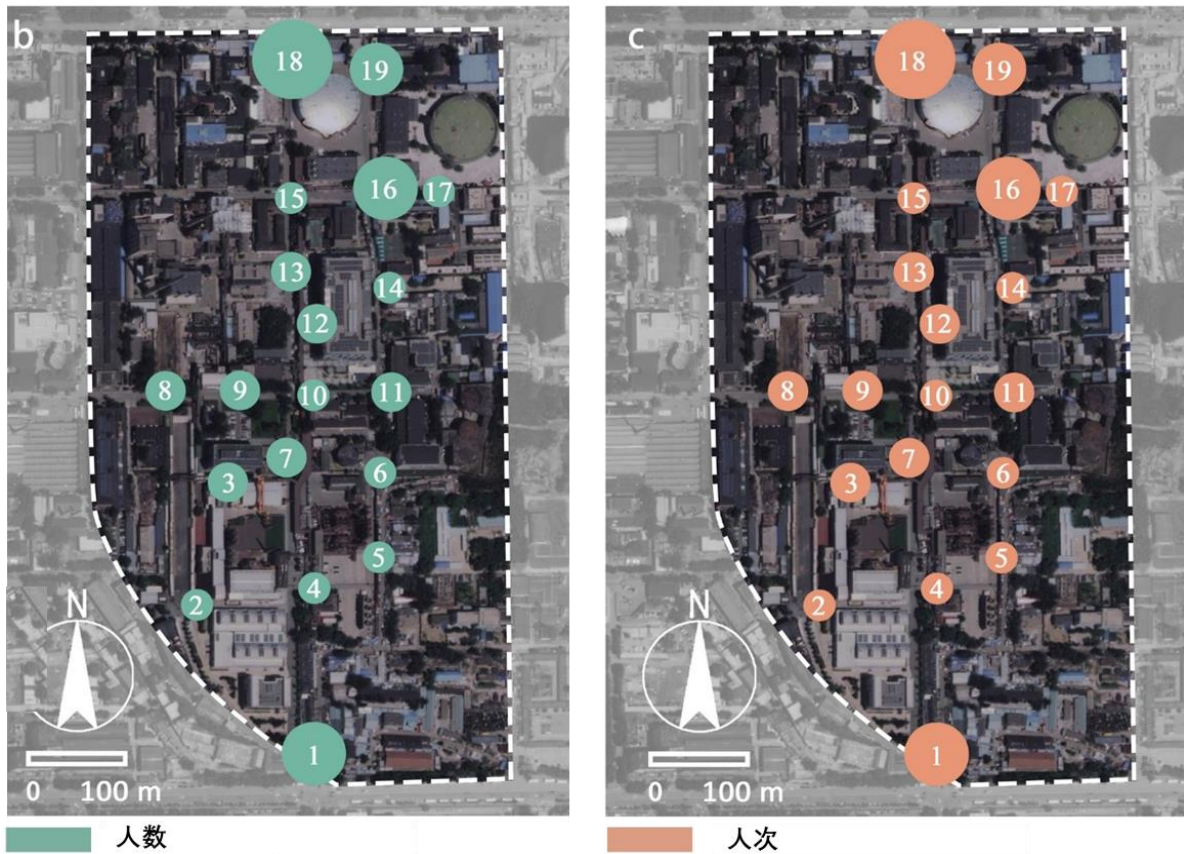
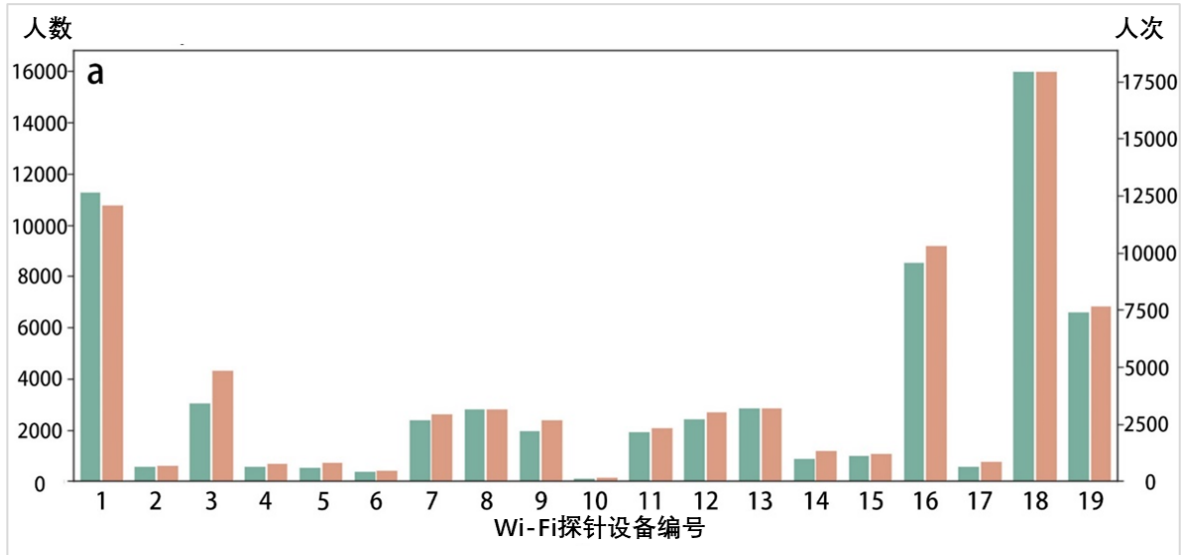


图 4-10 751 园区日均使用人数与人次空间分布

4.2.5.4 数据时空特征检验：时间分布差异

(1) 工作日与周末差异

对于紫荆雅园，在周末与工作日对比方面：居住区西北角条形公共开敞空间（1-5号设备）工作日的人次高于周末，而居住区南部条形公共开敞空间（8-9号设备）、中部矩形公共开敞空间（6-7号设备）与西部矩形公共开敞空间均为周末的人次高于工作日。此外，居住区东南入口（12号设备）的人数显著高于其他空间，且在工作日的数值相较周末更高。居住区南部入口、南部道路（8-9号设备）以及居住区与毗邻居住区交叉空间（5号设备）次之，但工作日的人数低于周末。居住区西北角条形公共开敞空间（1-4号设备）与西部矩形公共开敞空间（10-11号设备）的人数相对较低，而居住区中部矩形公共开敞空间（6-7号设备）的人数最低。图 4-11）。此结果显示出人次与人数数据在工作日与周末的分布特征能够较好的匹配人们的休闲行为与交通行为的时空特征。

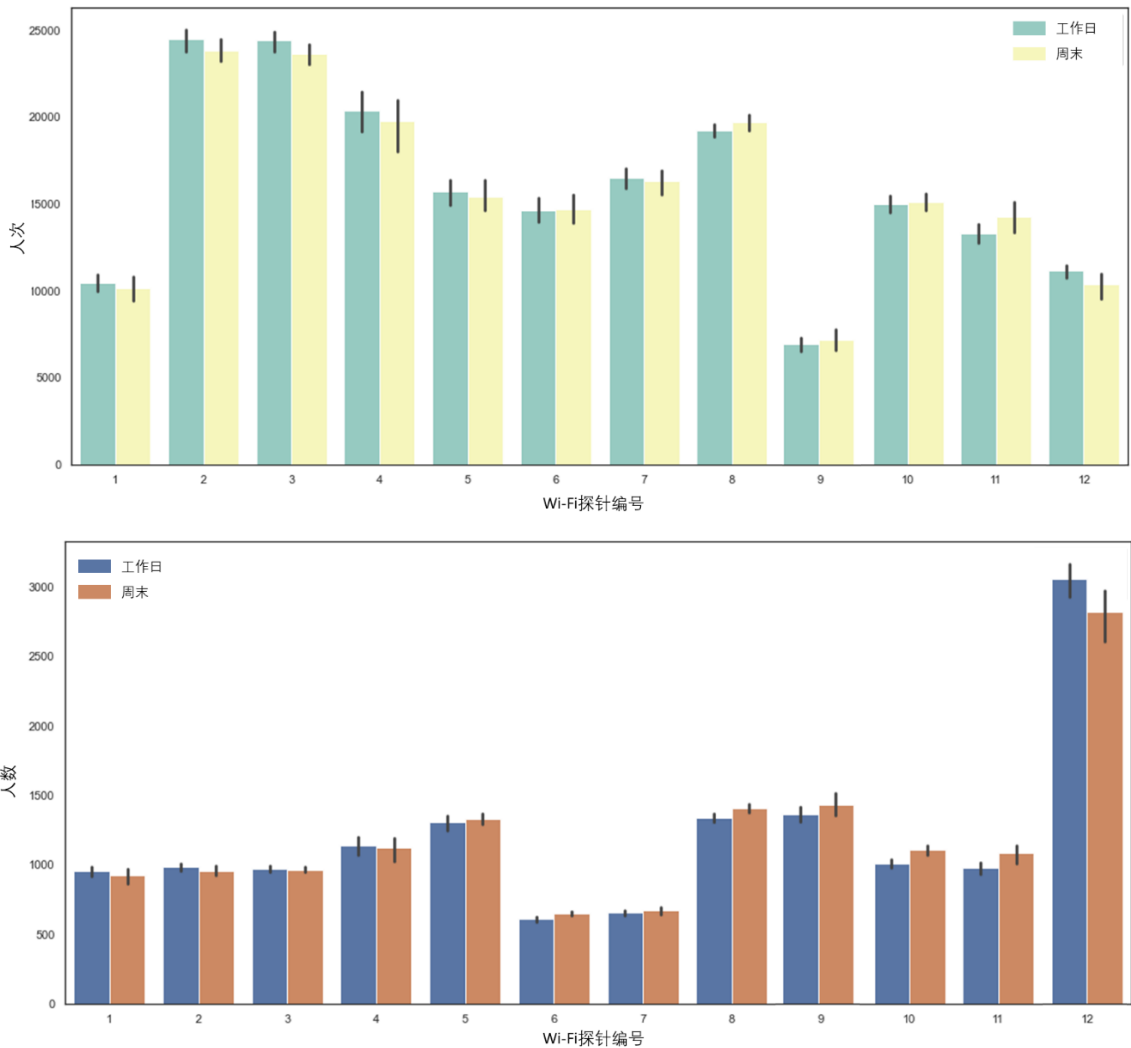


图 4-11 紫荆雅园各公共开敞空间工作日与周末人数（上）与人次（下）分布

对于 751 园区在周末与工作日人次与人数对比方面：工作日 751 园区西北门（18 号设备）人数与人次均最高，751 园区南北、东北门与东北门南部北京时尚设计广场 A 座东南角道路交叉口（1、16、19 号设备）次之，而园区内部空间人数较低（2-4、9 号设备）。751 园区中人次的分布特征与人数相似，都呈现交通空间高、非交通空间低的空间规律。对比 751 园区内各公共开敞空间的累积总人次与人数可以发现，各空间内二者差距普遍较小，且绝大多数空间二者的差异均在 1.5 倍以内。周末 751 园区内各公共开敞空间大都呈现出小于工作日的特征。而分布方差方面，各空间都呈现出周末人数与人次方差高于工作日的现象。且此现象符合此空间的办公与文旅属性所具有的时空使用特征，即工作日人次与人数均普遍较高，但周末在特殊时间段的最高值更高，反映出相关方法区分交通与休闲空间的有效性（图 4-12）。

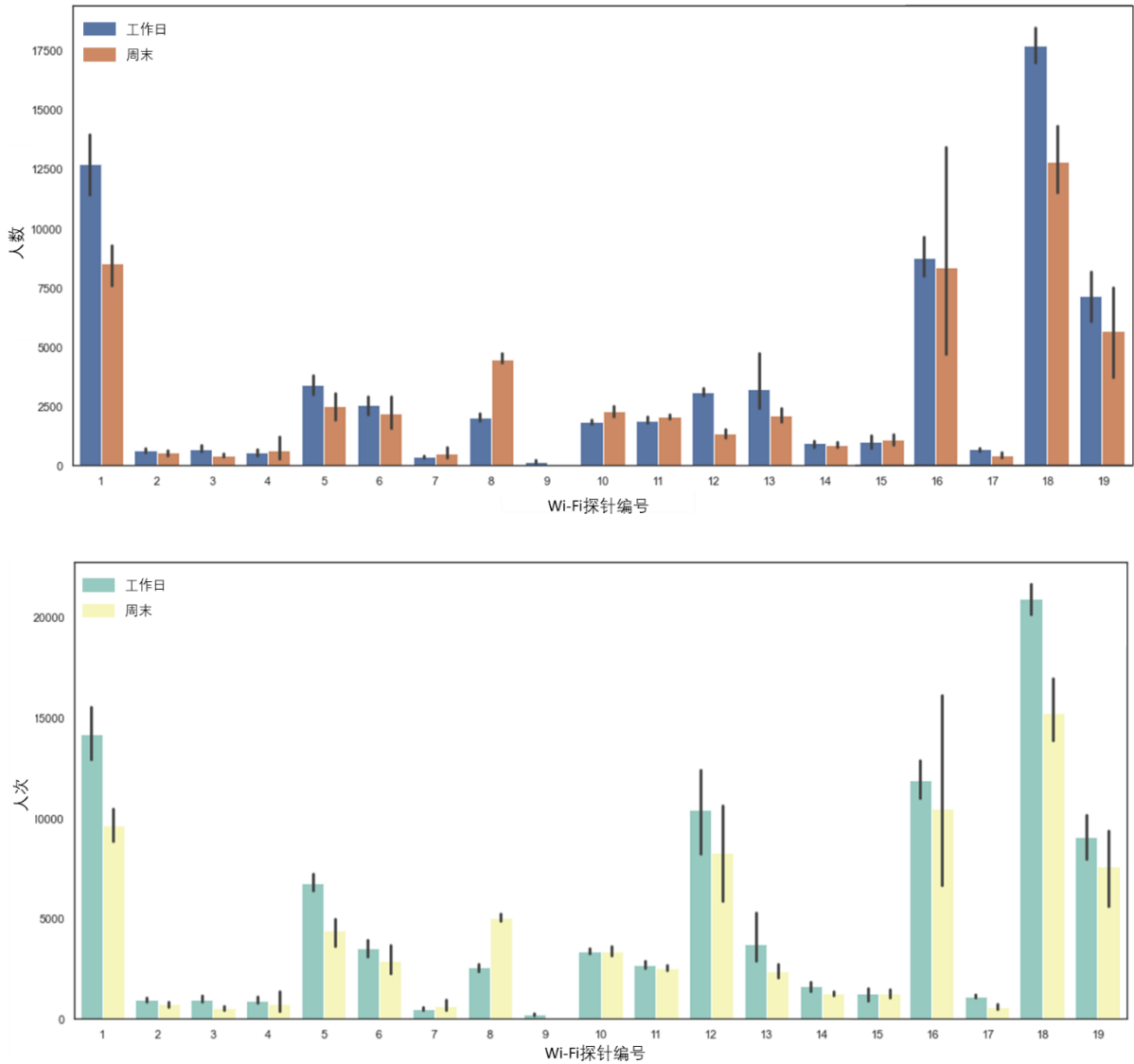


图 4-12 751 园区内各公共开敞空间工作日与周末人数（上）与人次（下）分布

(2) 各小时差异

在人次与人数差异的分析上，通过研究各小时人数与人均人次的差异能够更加直观的验证区分交通与休闲行为方法的有效性。研究中获取了紫荆雅园工作日和周末各公共开敞空间的人数及人均人次数据（图 4-13），其中人数于工作日早上 8:00 达到高峰，而周末 11:00 达到高峰，此现象与周末上午出现交通流较晚相符合。此外，周末早上和晚上的人均人次高于工作日，下午则低于工作日。此现象亦与周末居民早晚休闲行为比工作日更频繁的模式相符合。

对于 751 园区，人们在周末可能一整天都在 751 园区内活动，而在大多数工作日，人们只参加半天的活动，因此会在中午出现明显的高峰。此现象也与工作日和周末人数与人均人次的差异相符合（图 4-14）。此外，751 园区不同时间段的人均人次均相似，接近 1.0，也与园区内无论是工作日还是周末都以交通为主要步行目的现象具有相同的特征。

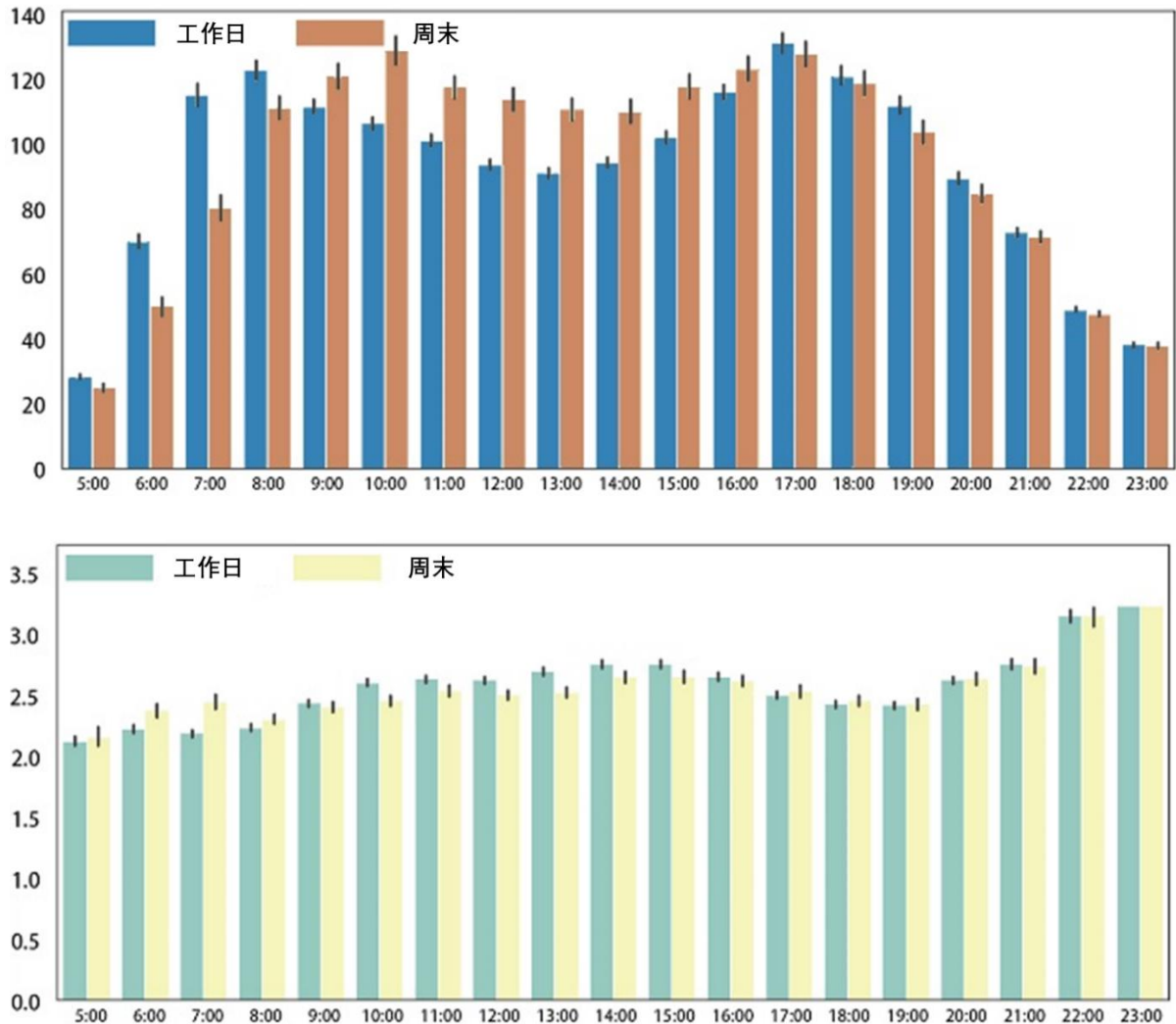


图 4-13 紫荆雅园公共开敞空间各小时人数（上）与人均人次（下）比较

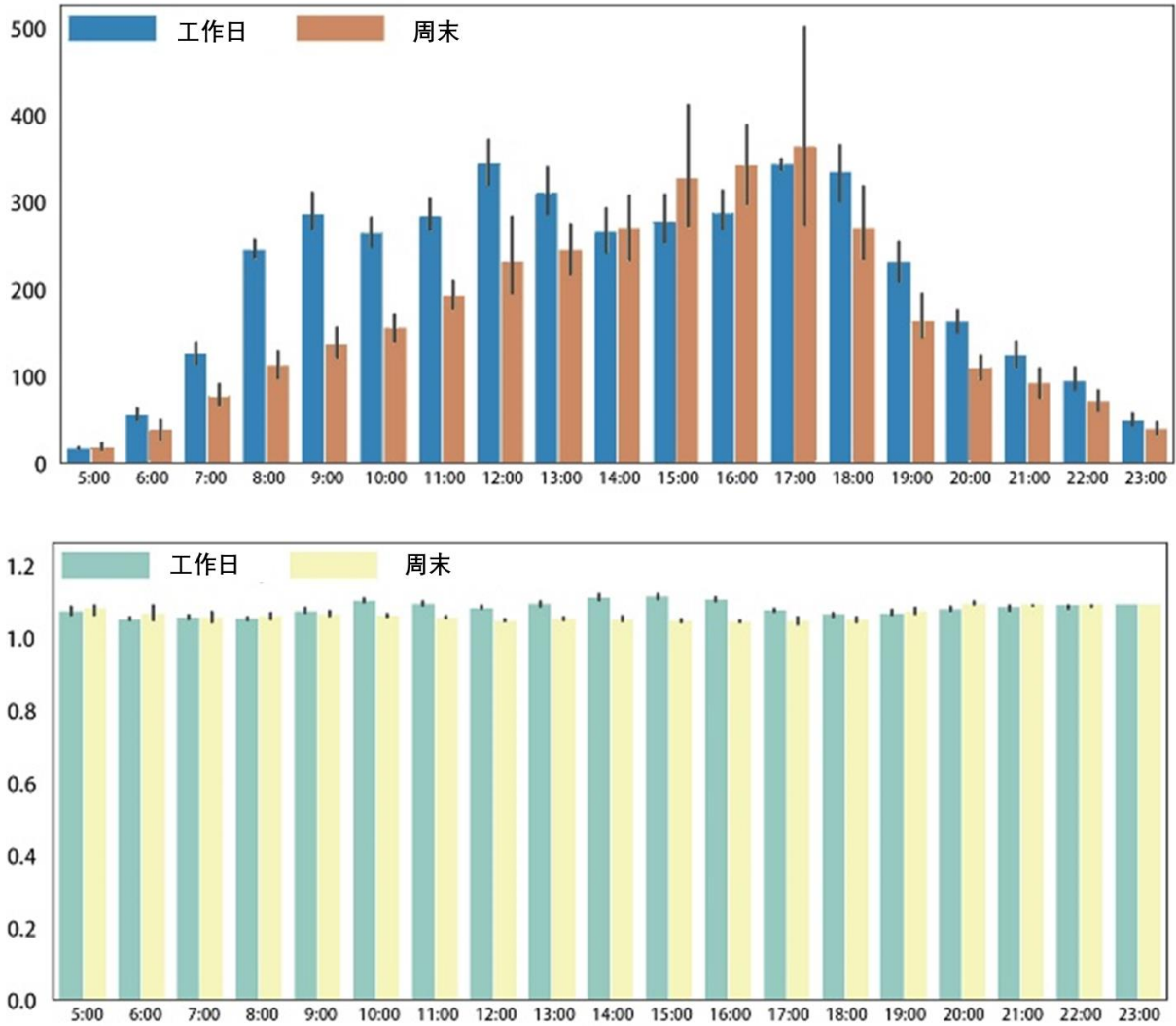


图 4-14 751 园区公共开敞空间各小时人数（上）与人均人次（下）比较

(3) 基于工作日与周末各小时数值的空间聚类

除了进行居住区公共开敞空间人数与人次的时间分布特征分析，研究中亦通过比较不同空间的人数与人次分布一致性对方法有效性进行检验。具体而言，研究中将各 Wi-Fi 探针所收集到的人次及人数数据按工作日与周末进行区分并按小时进行汇总，作为反映 Wi-Fi 探针所对应空间的使用模式的数据指征。通过建立自相关矩阵，可比较各空间的人次与人数分布的一致性，从而了解不同空间的使用模式之间的关系紧密程度，并与休闲与交通行为特征进行比较。研究中为对比不同空间之间的自相关性，按照层次聚类算法（Hierarchy Clustering Algorithm）对各空间进行分组。层次聚类算法的基本方法为：计算不同数列簇间数值的相似程度，将超过相似阈值的最相似两个数列簇合并为新簇；之后重复上述流程，直至所有从初始数列簇都被合并为同一簇中，从而对各空间进行分组（图 4-15）。

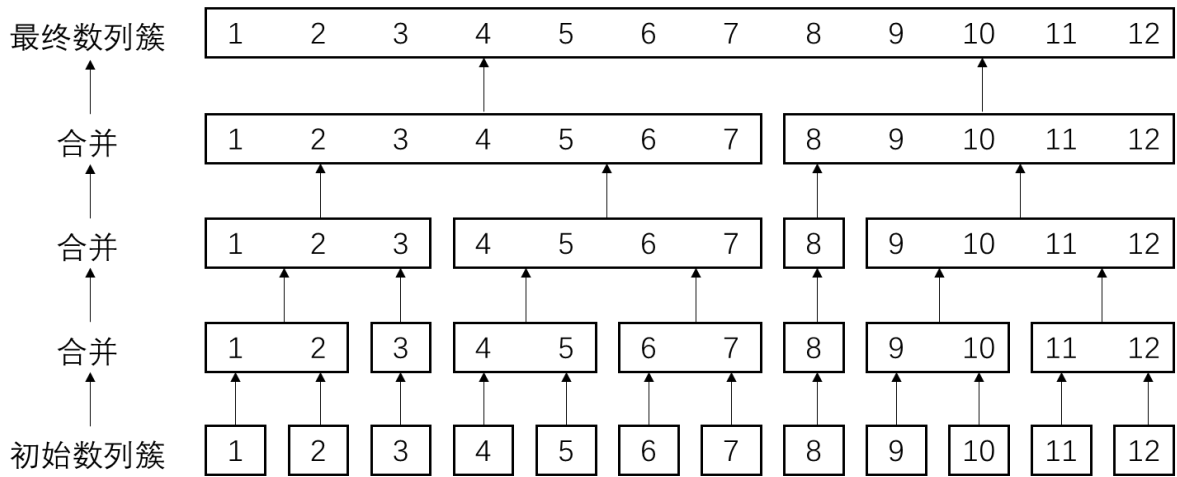


图 4-15 层次聚类算法原理示例

通过研究各紫荆雅园空间工作日与周末交通行为使用强度一致性自相关矩阵和分组情况可以发现，分组情况方面，在工作日和周末时段各空间均可分为三个主要组别中。其中居住区中部公共开敞空间（6 号设备）由于人次在中午相对较高，与其他空间早上、晚上两个高峰而中午低谷的模式差异较大，因此单独作为一组。而居住区西北部条状公共开敞空间（2-5 号设备）人次随时间变化情况较为类似因此被分为一组，其他空间则共同分为另外一组中。此结果与居住区中部公共开敞空间中午休闲行为相对较多以及西北部条状公共开敞空间休闲行为各时段均较多一致。

各组内部具体自相关分布差异方面，在工作日，第三组内的居住区出入口及其附近空间（1、8、12 号设备）的人次数数据随时间变化规律较为相似，而居住区西南公共开敞空间和东南出入口（9-11 号设备）的人次数数据随时间变化规律更为相似。此类空间均位于通勤路线上，因此与交通行为特征一致。在周末期间，第三组内的人次数数据随时间变化均较为相似。而第二组内各空间在工作日与周末均与自己最邻近的空间具有最强的自相关性。在周末各空间人数数据随时变化的自相关性略大于工作日，但差异较为有限，而二者的变化模式分组情况具有较大差异。在工作日，居住区西北部公共开敞空间中部（2-3 号设备）构成一个组别，而其他空间（1、4-5、8-11 号设备）构成另一个主要的组别。第二组的明显特征为位于居住区出入口公共开敞空间或与之距离较近。此现象与不同类型活动空间的使用模式具有差异的特征较为一致。在周末，则有 8 号至 12 号设备构成一个特征非常相似的小组别，而除 2 号与 6 号设备外则构成一个大组别，其空间特征较为不明显。

通过比较各空间工作日与周末休闲行为使用强度一致性自相关矩阵和分组情况可以发现，各空间休闲行为在周末时的自相关性整体高于工作日时段，这与周末时段居住区居民在各空间进行休闲行为的强度变化特征较为一致，而在工作日各空间人次特征变化与休闲行为随时间变化的差异更加显著的特征亦相同（图 4-15）。

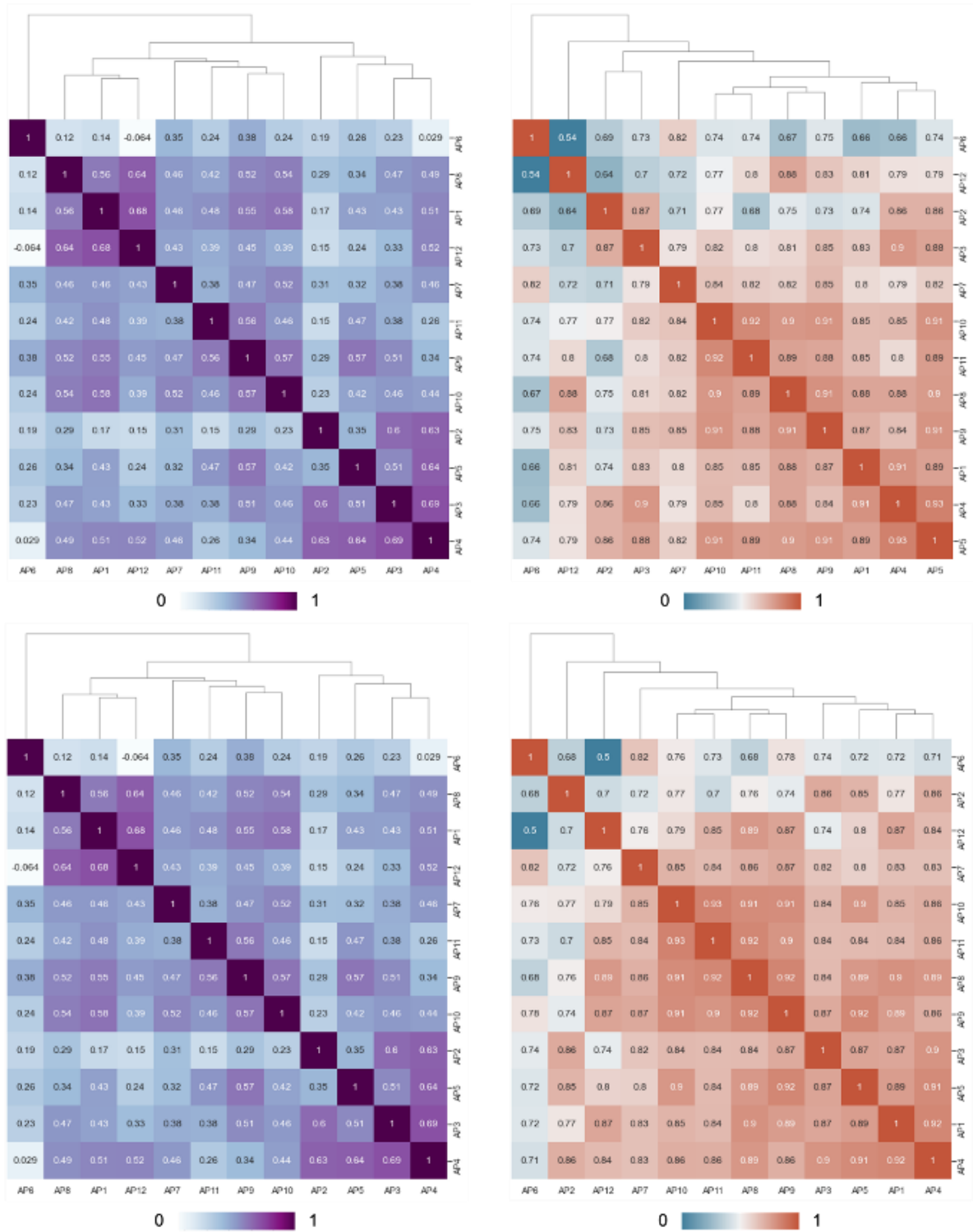


图 4-16 各空间工作日（上）与周末（下）人数与人次一致性比较

综上所述，通过对紫荆雅园与 751 园区公共开敞空间的使用模式进行测度，研究中提出的宏观使用模式测度方法的有效性能够得到一定程度的验证。此结果能够一定程度证明研究假设中使用 Wi-Fi 探针设备收集数据并通过人次与人数数据的差异从而区分交通与休闲行为的有效性。

4.2.5.5 基于现场观察的一致性检验

研究中为进一步检验使用 Wi-Fi 探针设备通过记录的人次与人数数据的差异区分休闲与交通行为方法的有效性，在紫荆雅园布置 Wi-Fi 探针设备的 5 处主要空间中于 2019 年 5 月进行了各为期 30 分钟的视频数据记录，并人工统计视频中在空间中活动的总人数以及其中进行休闲活动（例如停留、玩耍、聊天、闲逛等）的比例（图 4-17）。其中空间 A 覆盖 1 号至 5 号 Wi-Fi 探针设备所收集数据的居住区西北林荫大道区域，空间 B 覆盖 6 号至 7 号 Wi-Fi 探针设备所收集数据的中部活动空间区域，空间 C 覆盖 8 号与 9 号 Wi-Fi 探针设备所收集数据的居住区西南入口及附近区域，空间 D 覆盖 10 号与 11 号 Wi-Fi 探针设备所收集数据的高层住宅楼北侧区域，空间 E 覆盖 12 号 Wi-Fi 探针设备所收集数据的居住区东南入口及附近区域。研究中根据各空间所覆盖的 Wi-Fi 探针设备，对其所记录的日均人次与人数数据取平均值，最终空间 A 日均使用人次最多而空间 E 日均使用人数最多。如果人次与人数的差异即人均人次数据代表的休闲活动指数能够反映出休闲活动比例，则其与观察到的各空间休闲活动比例应呈现出较明显的正相关性。



图 4-17 现场观察位置与视角

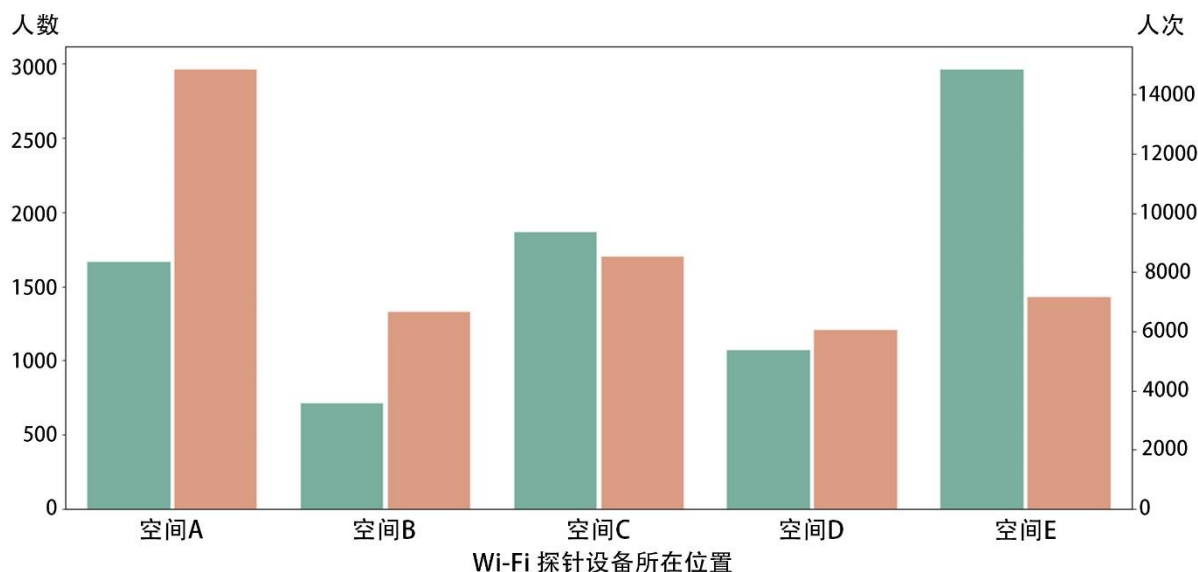


图 4-18 各空间日均人数与人次

研究统计了由 Wi-Fi 探针设备记录的 5 个空间的日均人数与人次，以及对应空间人工观察与记录到的步行居民人数以及进行休闲活动的居民人数，并比较二者比例的相关性（表 4-1）。结果显示，Wi-Fi 探针获得的休闲活动指数（各空间人次与人数的比值）与人工观察与记录的各空间进行休闲活动的比例呈现较强的正相关性（图 4-19）。其中空间 A 与空间 B 的休闲活动指数与进行休闲活动的居民比例均较高，空间 C 与空间 D 的休闲活动指数与进行休闲活动的居民比例均居中，而空间 E 的休闲活动指数与进行休闲活动的居民比例均较低。上述结果说明人工观察反映出的直接居民连续活动时进行的休闲活动，如玩耍等，与研究中提出的基于人次、人数比值的间接测度的休闲活动比例较为一致，从而进一步佐证了相关居住区公共空间宏观使用模式测度方法的有效性。

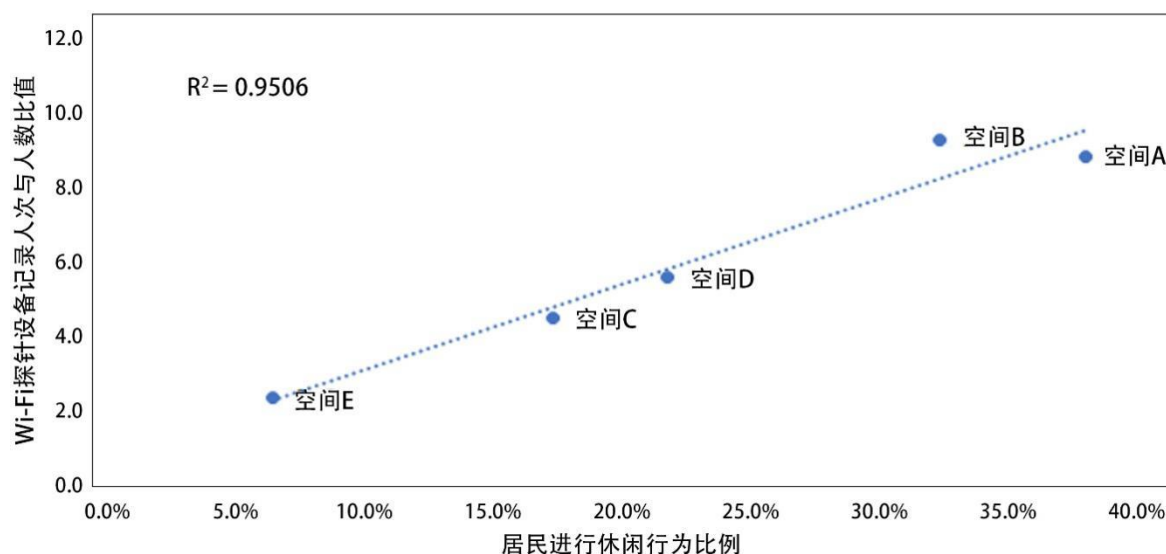


图 4-19 各空间 Wi-Fi 数据获得的休闲活动指数与现场观察休闲活动比例相关性

表 4-1 各空间 Wi-Fi 数据获得的休闲活动指数与现场观察休闲活动记录数据

	空间 A	空间 B	空间 C	空间 D	空间 E
步行居民人数	42	40	221	354	87
进行休闲活动居民人数	16	13	39	78	6
进行休闲活动居民比例	38.1%	32.5%	17.6%	22.0%	6.9%
休闲活动指数	8.93	9.37	4.57	5.67	2.42

4.3 居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法研究

4.3.1 已有研究局限及解决思路

已有研究的空缺/挑战为：已有研究通常使用 Wi-Fi、蓝牙、手持/内置 GNSS 等设备获取居住区公共开敞空间使用模式的数据，然而这些数据的精度相对较低，且易受周边植物、建筑等要素的影响。尽管部分研究能通过视频/图片数据获取人在场地内的活动情况，但通常只识别活动类型本身而不将活动与空间位置结合，因此，尽管视频/图像数据理论上能获取的行为数据的空间精度较高，但已有研究通常只识别图像中存在的活动，或只识别活动的整体空间布局，亦或只在图像中获取人的轨迹或活动密度，缺少具体活动与空间平面的匹配，从而限制了对行为活动与空间要素互动关系的研究。

因此本研究的解决思路为：通过选择合适的深度学习算法，识别图像中的行人，并结合透视原理，通过几何算法与矩阵原理将图片转为平面，在已有方法基础上进一步提升图像数据的平面转换精度，从而研发识别整体活动密度、穿行行为与停留行为的方法。研究通过对多种形态空间的多角度、多范围、多时段、多场景以及多种设备（多种摄像机及红外触发相机）的影像/图片数据收集及分析，验证方法的可靠性。

4.3.2 居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法研究框架

居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法研究主要分为方法提出与方法有效性检验两个部分。其中方法提出部分主要包括数据收集、处理及行为分类三个步骤。其中数据收集部分，研究将通过两种方式收集图像数据，在选择深度学习算法模型及研发空间平面投影方法的基础上，根据两种数据收集方法的特征，分别提出识别穿行行为与停留行为的方法，并比较其与整体活动密度的差异。方法有效性检验部分由研究区域、具体实验及有效性检验三个维度构成。研究以紫荆雅园为穿行行为的主实验区域通过视频摄影获取连续影像数据，以水磨社区为停留行为的主实验通过红外触发相机获取间断图像数据。研究将通过相似模型及方法的人工审计比较验证数据处理的有效性，并通过人工审计分别计算穿行行为与停留行为的识别有效性（图 4-20）。

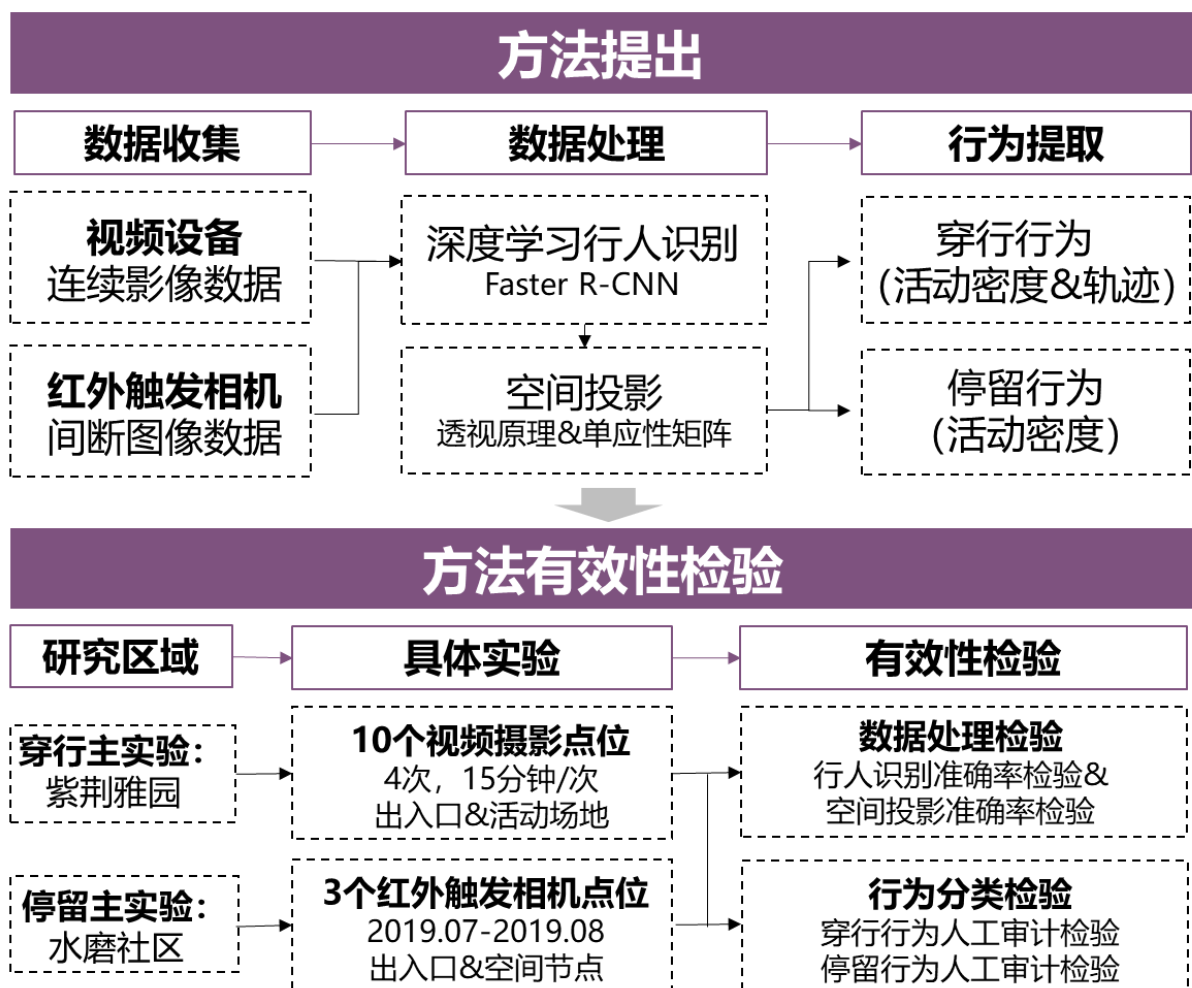


图 4-20 居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法研究框架

4.3.3 居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法

4.3.3.1 居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法研究体系

居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法框架主要分为居住区公共开敞空间微观使用模式数据获取以及微观使用模式数据分析两方面内容。其中观使用模式数据获取包含架设录像设备进行连续图像获取以及使用打猎相机等基于红外运动感应传感器触发的摄像设备获取仅有居民活动时图像两类。前者对应需要刻画居民活动轨迹的研究，而后者则可以针对停留行为等依靠公共开敞空间中设施的活动。及微观使用模式数据分析则包含图像中人群检测、人群活动信息获取（停留行为或活动轨迹）、人群位置转换以及结果可视化等步骤（图 4-21）。具体而言，首先获取待分析空间视频或图像数据，之后利用深度学习模型对获取每张图像进行目标检测、行为判别、并使用透视几何算法获取平面图或俯视图中各个行人的位置坐标、对不同设备所拍摄的同一空间使用模式进行合成等流程，以获得最终的不同行为类型的居住区公共开敞空间微观使用模式结果。

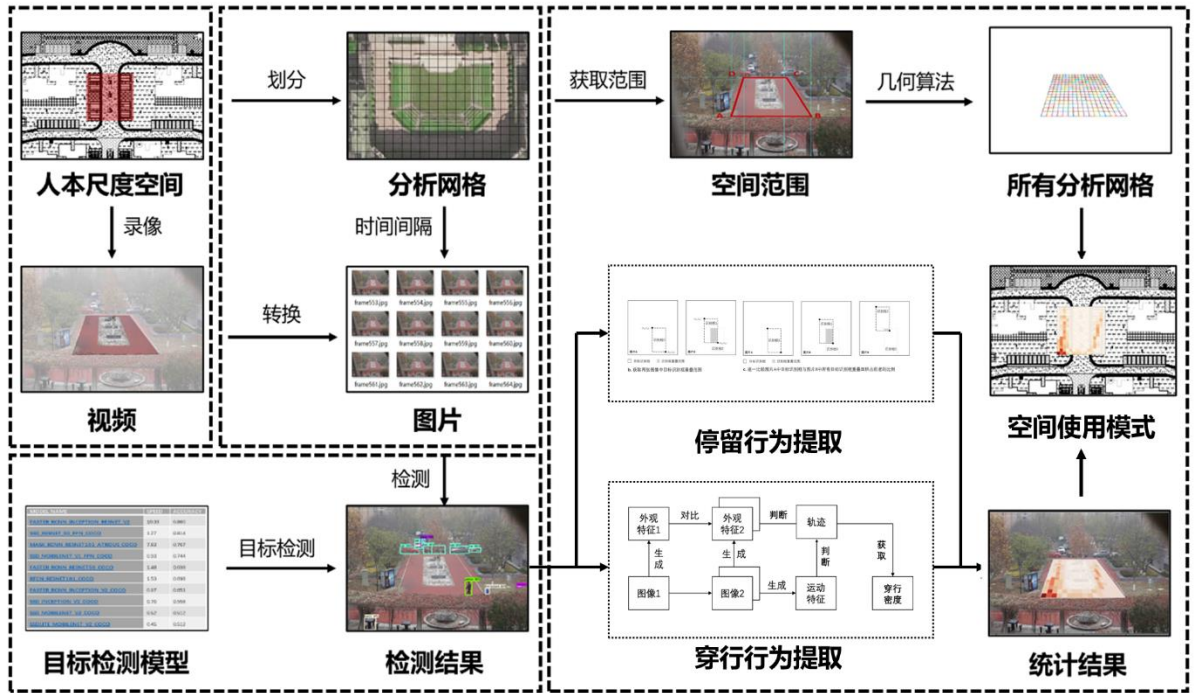


图 4-21 居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法框架示例

4.3.3.2 数据收集方法

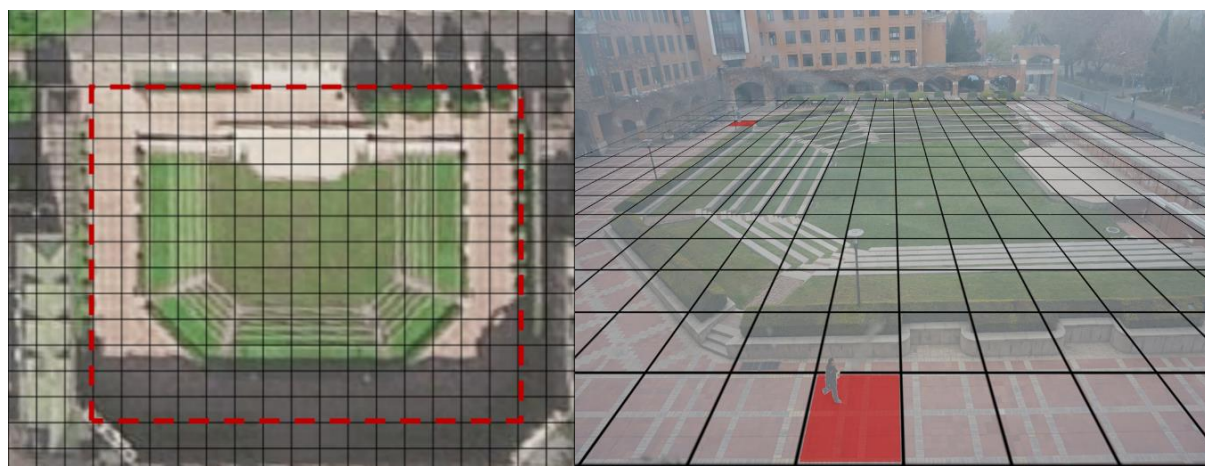
现有研究中以获取居住区公共开敞空间等人本尺度城市公共开敞空间微观使用模式主要通过 GNSS 或视频数据，其中 GNSS 数据需要所有空间使用者佩戴设备，因此难以开展大规模、低成本的数据采集实验。而随着信息技术领域和深度学习技术的发展，为大规模的数据处理提供了条件，使得从常见的录影设备中获得的数据，如照片、视频等，有了新的分析手段。利用视频分析人群行为可以帮助我们更直观地理解人群的行为特征，解读图像中蕴藏的环境特征和人群行为信息。为对于居住区公共开敞空间微观使用模式的分析，可通过获取基于空间网络的视频中人群所在的空间位置实现，并将极大的提升城市空间分析的精度和效率。

根据研究的具体需求，可在专业延时摄影设备与一般录像设备中选择。专业延时摄影设备指可以设置延时摄影拍摄间隔并自动拍照的设备（如 GoPro 和红外感应触发相机等）。此种设备的优点是可将获得图片直接用于分析，并可进行较长时间的监测。一般录像设备的优点是价格较低，并可以根据研究需求控制截取图像的时间间隔。缺点是截取图像需要编程能力，以及监测时间受设备电池电量限制较大。其中红外感应触发相机等延时摄影设备适用于不具备长期拍摄条件的空间，其具备一定的恶劣天气及夜间拍摄功能，且可设定拍摄间隔阈值，保证近一个月无需充电的连续拍摄。一般录像设备适用于有条件安装监控摄像头的空间，其优点在于可长时间录制视频以获取更多的空间使用信息，但需要长时间空间以及进行及时的数据导出。

拍摄位置选择通常受场地条件限制较大，但仍要充分考虑进行空间活力监测的具体需求。根据监测空间的大小，摄影拍摄位置可分为“高位”以及“低位”两种。其中“低位”拍摄位置指将设备放置于平房屋顶等距地面较矮处。“高位”拍摄指设备距地面较远（5米以上），通常与楼道会房顶上进行拍摄。拍摄位置选定后需要考虑的是拍摄范围控制的相关问题。当选择“低位”拍摄位置进行拍摄时，通常仅能进行小范围取景，以监测某节点的人、车流量，或某线状空间的使用模式。当监测线状空间时，需要确保监测范围内的识别度。进行“高位”拍摄位置的摄影时，可选择大范围取景。此时所受限制较少，保证被拍摄空间的可识别性即可。此外遮盖物在三维上的遮挡也需要注意。此外可以布置摄像设备矩阵，保障空间各位置使用模式均能够被拍摄，并通过后期拼接获得完整使用模式。

4.3.3.3 视频转换为图像数据的方法

进行延时摄影前，需要对延时参数进行设置。参数选定时最重要的考虑因素是前后两张延时摄影影像能否反应出监测目标的运动路径。其中首先要做的是选区适宜的影像分析网格。根据研究区域的平面图，可计算尺度等数值，从而精确的划定研究范围。根据研究范围和研究的精细程度能够确定分析网格的大小，从而在平面上进行绘制，以作为实际影像分析的参考。此外也应该考虑的研究空间的设施问题。划定分析网格时最好将网格边界与设施边界进行匹配，并根据研究需求设定分析方法的空间分辨率。倘若影像中连续运动的最大识别距离是7.5米，监测空间中较快的目标运动速度是1.5米/秒，而空间网格边长大小为1米，则延时摄像频率不应少于5秒一次。或从视频中抽取图片的频率应不小于每1张/5秒。因此研究中使用Open-CV2图像分析库，将视频设备所拍摄的视频按照图像抽取频率转换为图像数据（图4-22）。



空间分析网格示例

行人在空间分析网格中的位置示例



视频转换为图像示例

图 4-22 视频数据转换为图像数据的方法

4.3.3.4 图像数据中提取行人位置的方法

基于区域提名目标检测识别方法中具有代表性的方法之一为 Faster R-CNN，其基本原理为：将图像输入卷积神经网络（CNN），并进行特征提取，从而建立以提供信息为目的并且非冗余的派生值；之后将获得的特征值输入候选区域网络（Region Proposal Network, RPN），以生成锚框（Anchor Boxes），再根据锚框裁剪并过滤图像，并通过归一化指数函数（Softmax）判断锚框属于前景（Foreground）即包含物体或后景（Background）即不包含物体；另一方面，通过对锚框进行边框回归（Bounding Box Regression），即使用 3x3 大小的滑动窗口（Slide Window）遍历特征图，并在此过程中以窗口中心按照比例和尺寸分别为 1: 2、1: 1、2: 1 的比例生成 9 个锚框，再利用全连接对每个锚框进行二分类，判断其为包含物体的前景或是不包含物体的背景，并进行初步边框回归，最后输出比较精确的 300 个兴趣面（Region of Interests, ROI），以修正锚框以生成更为准确的候选区域；将上述步骤获得的候选区域与特征图（Feature Maps）输入至兴趣面池（ROI Pooling）中，综合二者的信息使每个兴趣面生成固定大小的特征图，从而提取候选特征图（Proposal Feature Maps）并将结果送入后续全连接层；利用探测分类概率和探测边框回归对分类概率和边框回归进行联合训练，并能够最终判定对应目标锚框所识别的物体的类别及其代号（Classification）（图 4-23）。

总体而言，基于深度学习的目标检测模型中 Faster R-CNN 对于行人识别具有较强的准确率优势，因此在本研究中选择为识别图像中居民的模型。而基于卷积神经网络的不同目标检测模型在识别不同视角与光环境下行人速度与准确率上有所差异，且由于研究中使用视频数据拍摄自较高的位置，与模型通常采取的训练模型的平视图像数据不完全相同，因此需要在后续的方法有效性检验过程中进行计算速度与准确率的实验，以检验本研究中选择的 Faster R-CNN 模型是否为测度居住区公共开敞空间微观使用模式的最佳模型。

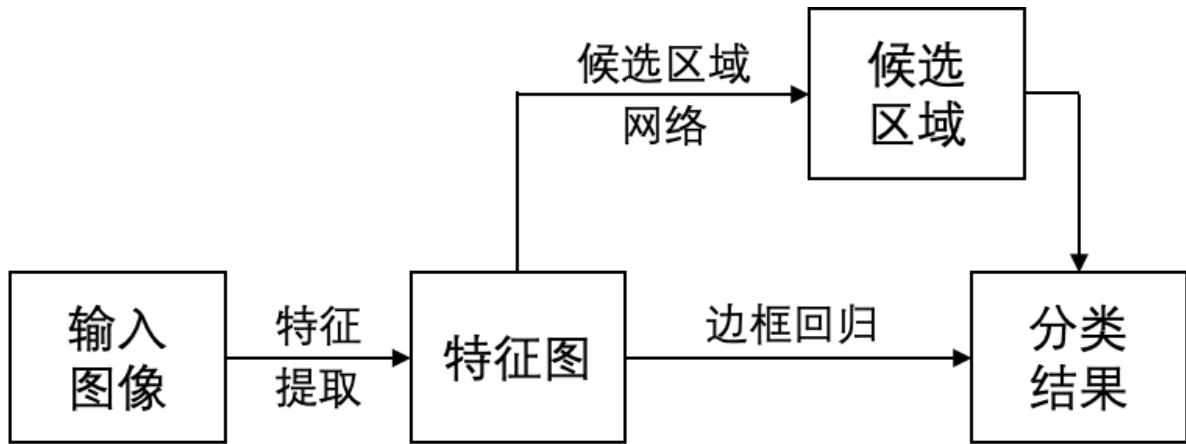


图 4-23 Faster R-CNN 目标识别原理示例

4.3.3.5 穿行行为提取方法

研究对穿行行为的分析主要基于两种数据，一是排除了停留活动的整体活动密度，以网格为研究单元，二是行为轨迹数据。研究中为获取居住区公共开敞空间微观使用模式视频数据中居民的行动轨迹，采用多目标追踪方法（Multiple Object Tracking, MOT）对所获视频进行处理，以通过目标识别结果中各行人位置的变化，将不同行人进行区分并赋予每个个体单独的身份标签，从而实现记录各行人轨迹的目的。研究使用的多目标追踪方法为深度简单在线实时追踪（DeepSORT）算法，其基础为基于 Faster R-CNN 目标检测算法的简单在线实时追踪算法（Simple Online and Realtime Tracking, SORT）。其中简单在线实时追踪算法通过匈牙利算法（Hungarian Algorithm）实现不同图片间目标的匹配，并在获得分组后的目标框口使用卡尔曼滤波算法（Kalman Filtering）实现目标轨迹的更新，以实现视频中目标的跟踪。而深度简单在线实时追踪在简单在线实时追踪算法上，增加了联级匹配算法（Matching Cascade），以解决目标被长时间遮挡的情况下对轨迹的误判问题，从而提升轨迹准确率（图 4-24）。

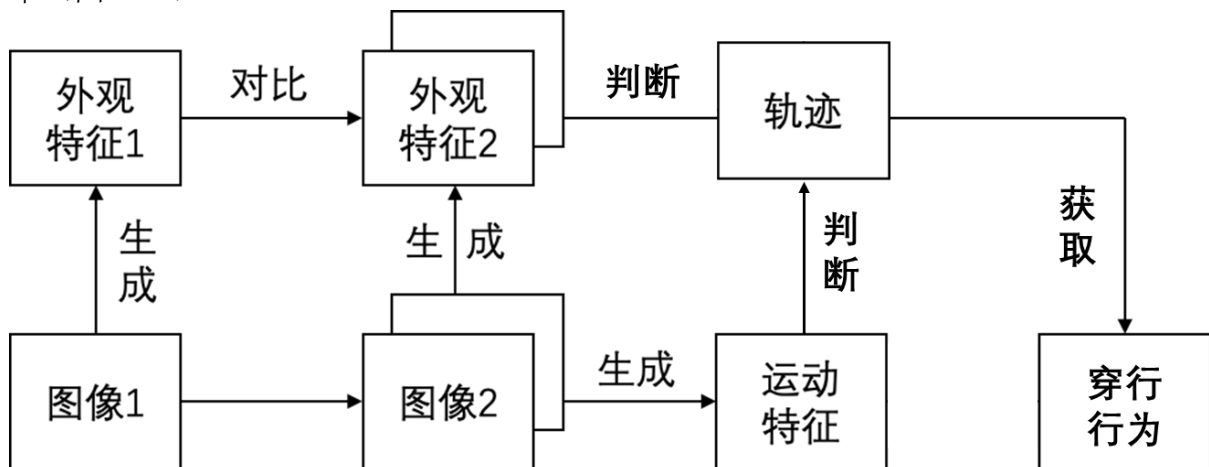


图 4-24 行为轨迹识别原理示意

其中卡尔曼滤波算法的目的为根据视频中前一帧图像里各行人的位置，分析下一帧图像中各行行为认为分别为上一帧某行人的下一个位置的概率，并将误差最小的估计值作为预测结果，从而在不同图像中构建居住区公共开敞空间中行人的运动轨迹。深度简单在线实时追踪模型中使用的卡尔曼滤波算法为匀速模型，其输入值为相邻帧的图像间各目标识别框中心点横坐标的变化速度、中心点纵坐标的变化速度、目标识别框大小的变化速度以及目标识别框长宽比的变化速度。此方法便是简单在线实时追踪算法建立人群活动轨迹的核心方法。

但仅使用卡尔曼滤波算法在居住区公共开敞空间微观使用模式视频中遇到遮挡和目标检测遗漏等情况。为解决此问题，深度简单在线实时追踪模型中独立记录了每个目标检测框的外观特征，并在建立不同帧图像目标框联系的过程中计算当前被检测目标的外观特征与上一帧中个目标特征的相似度。此外观相似与卡尔曼滤波中获取的运动特征共同判断不同图像之间的目标是否为同一人。具体而言，在度简单在线实时追踪模型中，如果一个目标检测框无法与之前记录的轨迹进行关联，则从此帧开始将其作为一个新的备选轨迹点；如果一个目备选轨迹点在此前三帧中均被成功识别并建立了关联，则此备选轨迹点将作为正是轨迹被记录在模型中；如果某个轨迹连续没有关联到新轨迹点的时间超过了设定的最大保存时间，说明此行人离开了视频画面，则此轨迹视为完结（图 4-25）。

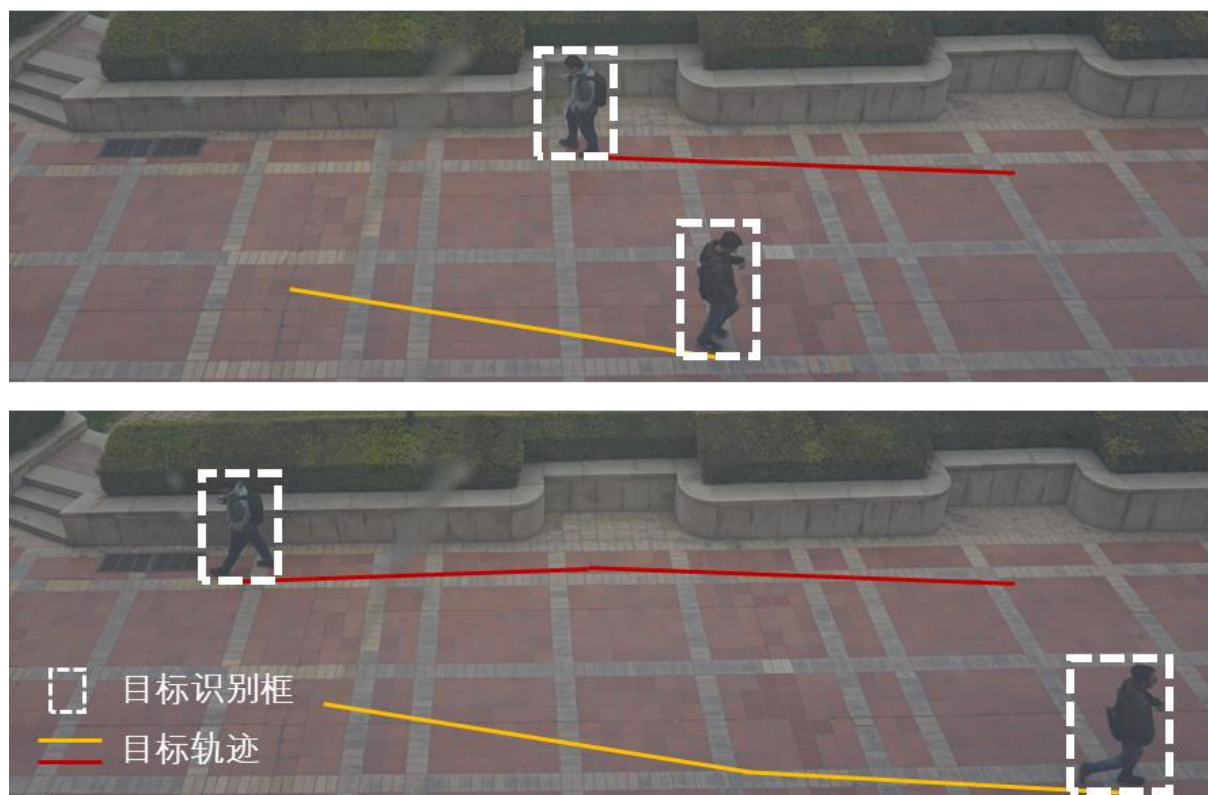


图 4-25 为轨迹识别结果示意图

4.3.3.6 停留行为识别方法

而针对研究中采用红外感应触发相机记录的图像数据，由于不同帧图像间间隔的时间较长（15 秒），无法较准确的构建居住区公共开敞空间内行人的轨迹以识别不同人的停留行为，因此需要建立单独的停留行为识别方法。研究中采用的方法参照视频数据中识别人群轨迹的方法中利用卡尔曼滤波判断运动连续性的方法识别红外感应触发相机中所识别行人是否在进行停留行为。

具体的判断方法为，将红外感应触发相机获取的图像数据按时间顺序排列，并将其拍摄时间间隔为 15 秒的图像组成序列，从而保证每个序列中的图像都持续有居民在公共开敞空间中活动。之后在每个图像序列的相邻两张图像中分别标注各行人的目标检测框，并计算后一张图像中所有目标检测框与前一张中所有目标检测框重叠面积占前者的比例，如果超过 80% 则说明后一张图像中对应目标检测框中的居民在进行停留活动（图 4-26）。

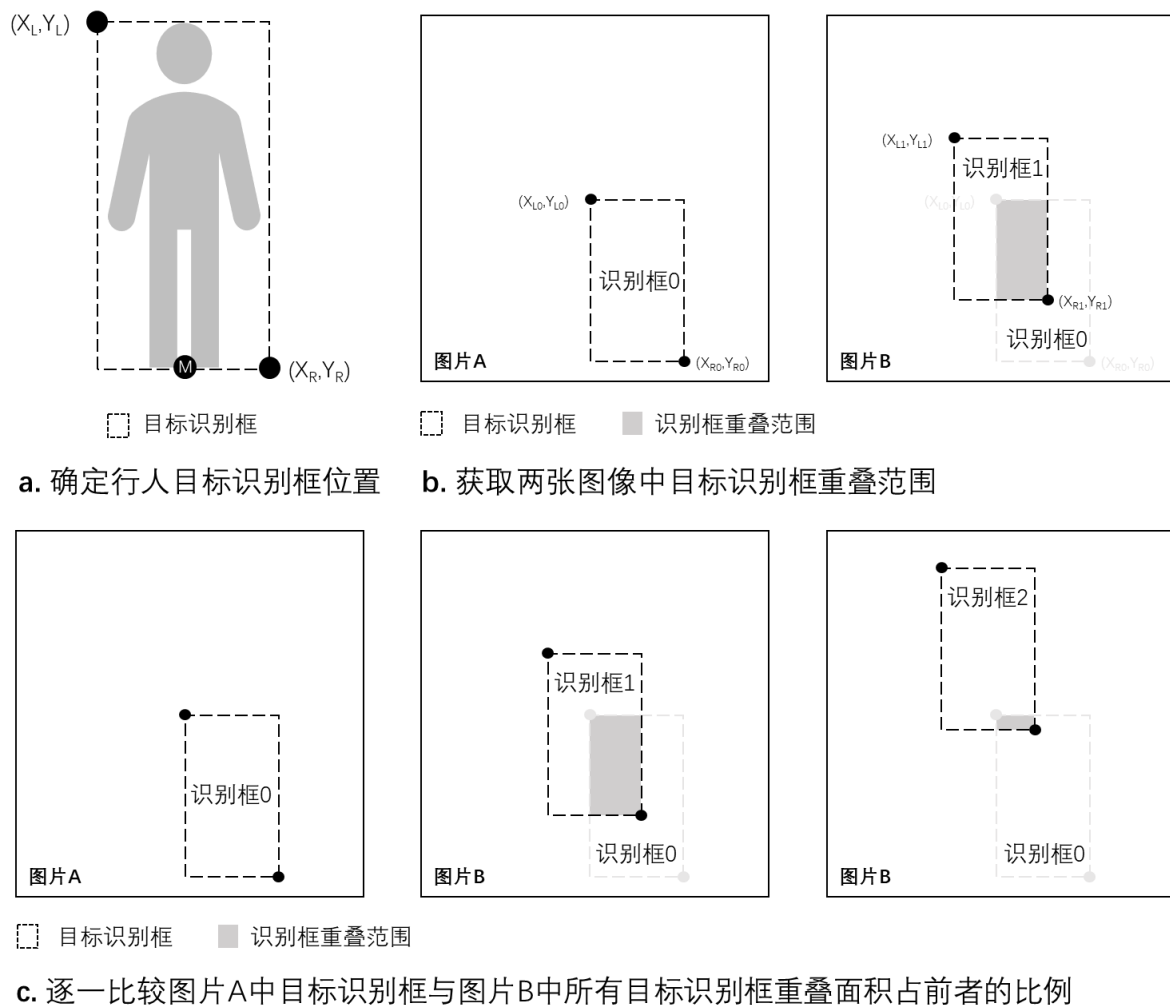


图 4-26 停留行为识别方法示意

4.3.3.7 行为活动的平面位置获取方法

目前相关研究中更侧重于分析图像中人群位置及人群活动，而居住区公共开敞空间优化所需要的人群信息均是依托于平面中的使用模式信息，因此只有获取图像或视频中人群在空间中的准确位置，才能有效支撑相关工作。因此本研究在方法上需要解决目前居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法中存在的问题，即根据居住区公共开敞空间的平面图和现场视频求解出给定空间分辨率下各空间位置的不同行为（如全部的步行行为以及其中的）的微观使用模式，以支持居住区公共开敞空间微观使用模式测度以及相关的居住区更新所需要的后评估工作。其工作重点为在不具有摄像设备参数的情况下仅视频图像中的空间特征赋予其空间地理信息，以满足对其中的空间及居民进行空间定位。

其中行人的位置信息通过图像识别框储存，仅能够反映图像中行人的位置而无法构建出其与空间中实际位置的映射关系。因此研究中需要提出行人空间位置提取方法，即通过透视几何原理，将研究中获取的图像经两点透视形成的位置信息，还原为空间的平面信息。根据平面坐标信息，便可获取人群在空间中的具体活动情况，以及空间规律（图 4-27）。

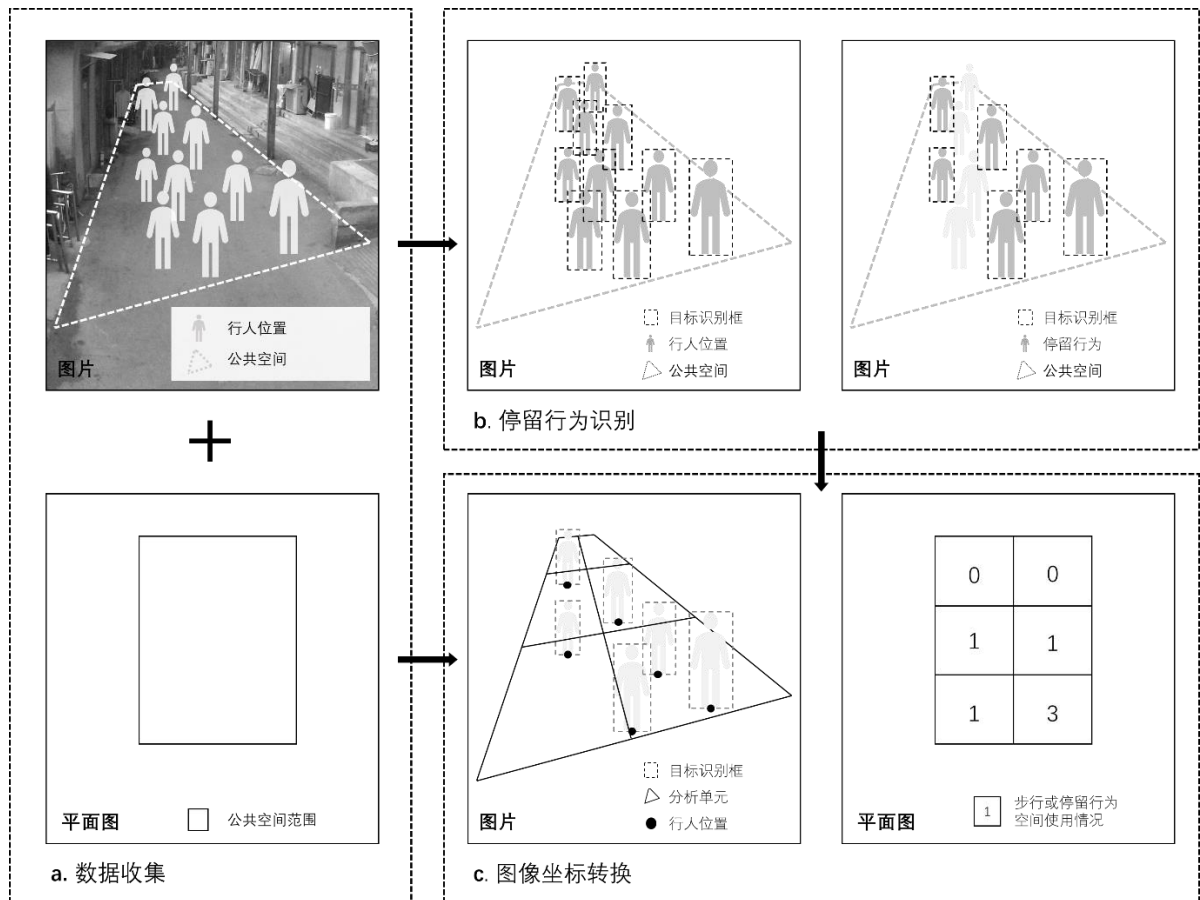


图 4-27 居住区公共开敞空间微观尺度人群位置获取方法框架

在获取各图像中行为位置或轨迹点位置后，要求其其在对应空间中的具体坐标以进行居住区公共开敞空间微观使用模式分析，因此需要将图像中人群位置转换为空间如平面图中的位置（图 4-28a）。本研究中进行行人空间位置提取方法为：根据图像中已知的空间范围以及其在平面中实际的形状及面积，按照分析精度将平面中空间划分为适宜大小的分析单元（图 4-28b），之后识别图像中对应给分析单元的位置。本研究中采用的方法为，根据图像中透视情况，先识别平面中 n 个分析单元中最上方（离灭点最近）分析单元（图 4-28c）。

此问题可转换为根据已知图像中研究空间形状，求对应分析单元 1 的下边缘与研究空间上边缘加夹 Ω 的问题。而根据所获得的计算方法，通过同样的方法将第 2 至 n 分析单元视为 $(n-1)$ 个分析单元，则通过计算最上方者下边缘与研究空间的夹角，可获得第二个分析单元下边缘位置（图 4-28d）。以此类推可最终获得垂直方向上所有分析单元的边缘位置（图 4-28e）。而使用同样的方法在此进行递归运算则可获得水平方向上所有分析单元的边缘位置，从而确定所有分析单元在图像中的位置，其结果表达为分析单元顶点的坐标（图 4-28f）。

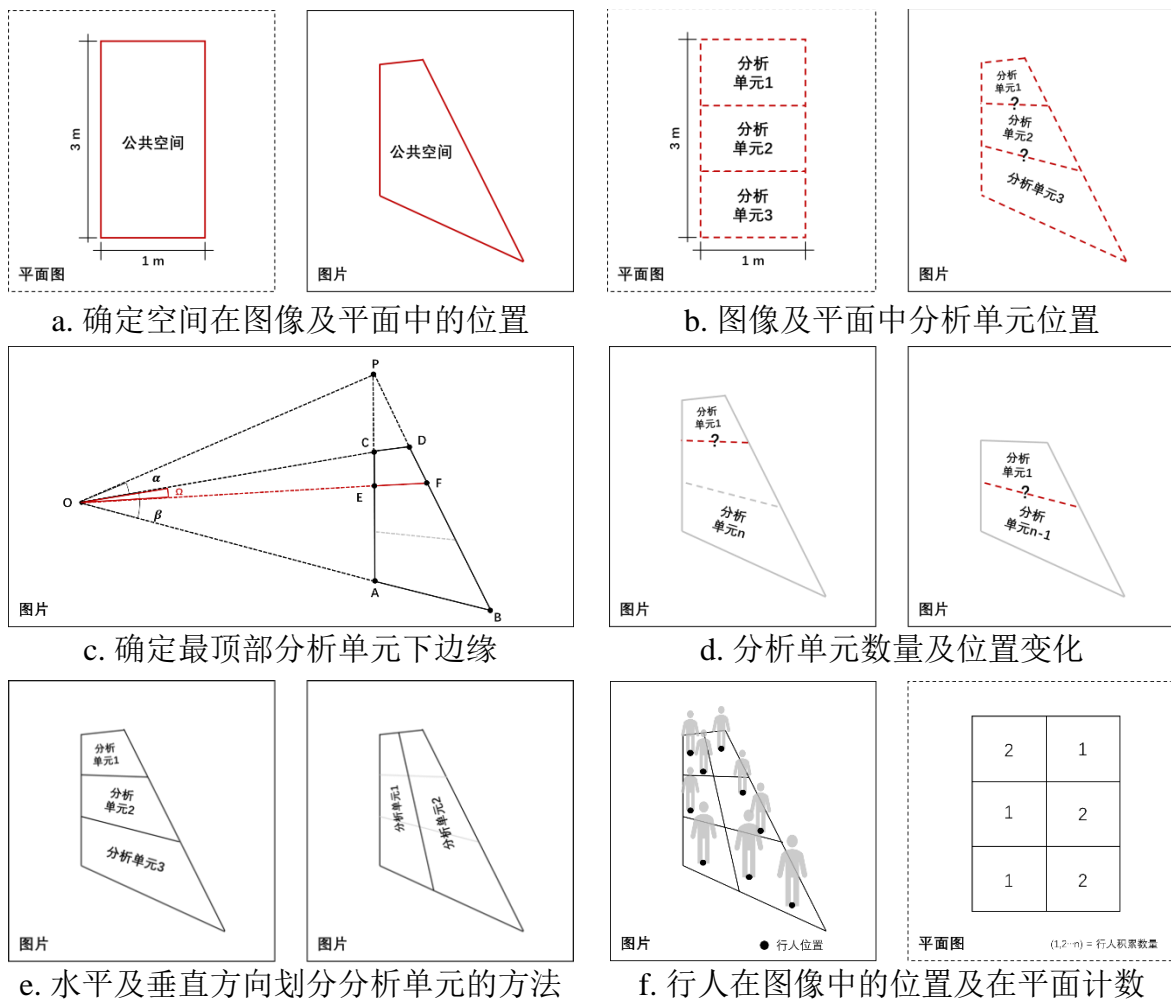


图 4-28 行人空间位置提取方法示意

此过程中最重要的一步为获取夹角 Ω 的计算方法。研究中确定夹角 Ω 位置的方法为根据研究空间四边形 $ABCD$ 的顶点位置,分别延长 AC 、 BD 与 BA 、 DC 交于透视灭点 P 、 O ,可获得 PO 与 CD 的夹角 α 以及 OD 与 AB 的夹角 β 。则对于将研究空间分为 n 个分析单元时离灭点最近的分析单元1下边缘与 CD 的夹角 Ω ,可通过计算其正切值从而求出夹角 Ω ,以此类推可获得所有分析单元在图像中的位置。其中夹角 Ω 的正切值的计算方法为(证明过程详见附录):

$$\tan \Omega = \frac{\tan \alpha * \tan \beta}{n * \tan \alpha + (n - 1) * \tan \beta} \quad (2)$$

通过对图像中垂直方向的分析单元进行划分则采用类似方法,即将距离左灭点最近的分析单元视为最上方分析单元,采用与水平方法分析单元划分的相同方法,求得 m 个分析单元中最上方分析单元下边缘的位置,之后将第二个分析单元作为 $(m-1)$ 个分析单元中最上方的分析单元并求得其下边缘的位置,以此类推进行递归运算,最终获得所有分析单元位置。之后统计图像中行人在一定时间内通过各分析单元的数量,并将统计结果汇总的对应的平面图中的分析单元上,可以最终获得平面上的空间使用模式用以进行居住区公共开敞空间微观使用模式测度。

此外,本研究中提出的提取居住区公共开敞空间微观使用模式行为特征的方法可以对研究中步行与停留行为进行识别,以评估空间实施使用模式。而将环境要素纳入研究,可分析停留行为受环境影响的因素及具体作用关系。研究不足方面,本研究机器学习结果基于图像识别框中置信度。目前置信度阈值为统一的0.6,而不同拍摄条件下适宜阈值可能有所区别。可进行进一步检验。识别停留行为时使用的面积重叠阈值为统一的0.8,但不同停留行为如站立和坐姿等阈值可能有所区别。可进一步通过停留行为阈值研究区分不同的活动类型。

4.3.4 居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法有效性检验

4.3.4.1 居住区公共开敞空间微观使用模式测度数据收集

(1) 紫荆雅园数据收集

视频数据获取范围位于前文中进行实验的北京城市副中心某居住小区内,所选取的拍摄空间包括居住区西北部林荫大道空间、中部的矩形主要活动公共开敞空间、居住区东南出入口空间、居住区西南角商业综合体旁公共开敞空间及其东边的绿廊公共开敞空间(图4-29)。研究根据3.2实验设计的设备安装要求,对于各空间从不同方向对空间的使用模式进行拍摄(图4-30)。

研究中分别于 2018 年 10 月与 2019 年 5 月至各拍摄空间分别进行 15 分钟的“低位”和“高位”有效视频拍摄，并以拍摄结果作为研究数据来源。其中“高位”拍摄时设备放置于自行组装的 5 米长杆具上进行拍摄。据收集方法与空间利用效率分析方法类似，通过在研究范围内 5 个主要公共开敞空间布设摄像设备进行视频录制获取人本尺度城市空间中人群活动情况。为保证数据质量，视频采用的空间利用效率分析方法研究于 2018 年 10 月至 2019 年 5 月，每个空间拍摄 3-4 次，每次拍摄 30 分钟。收集的数据为由高位及低摄像设备所拍摄的视频数据，每个空间共进行三次不同角度的拍摄，其中每段视频有效时长约为 30 分钟（图 4-31）。

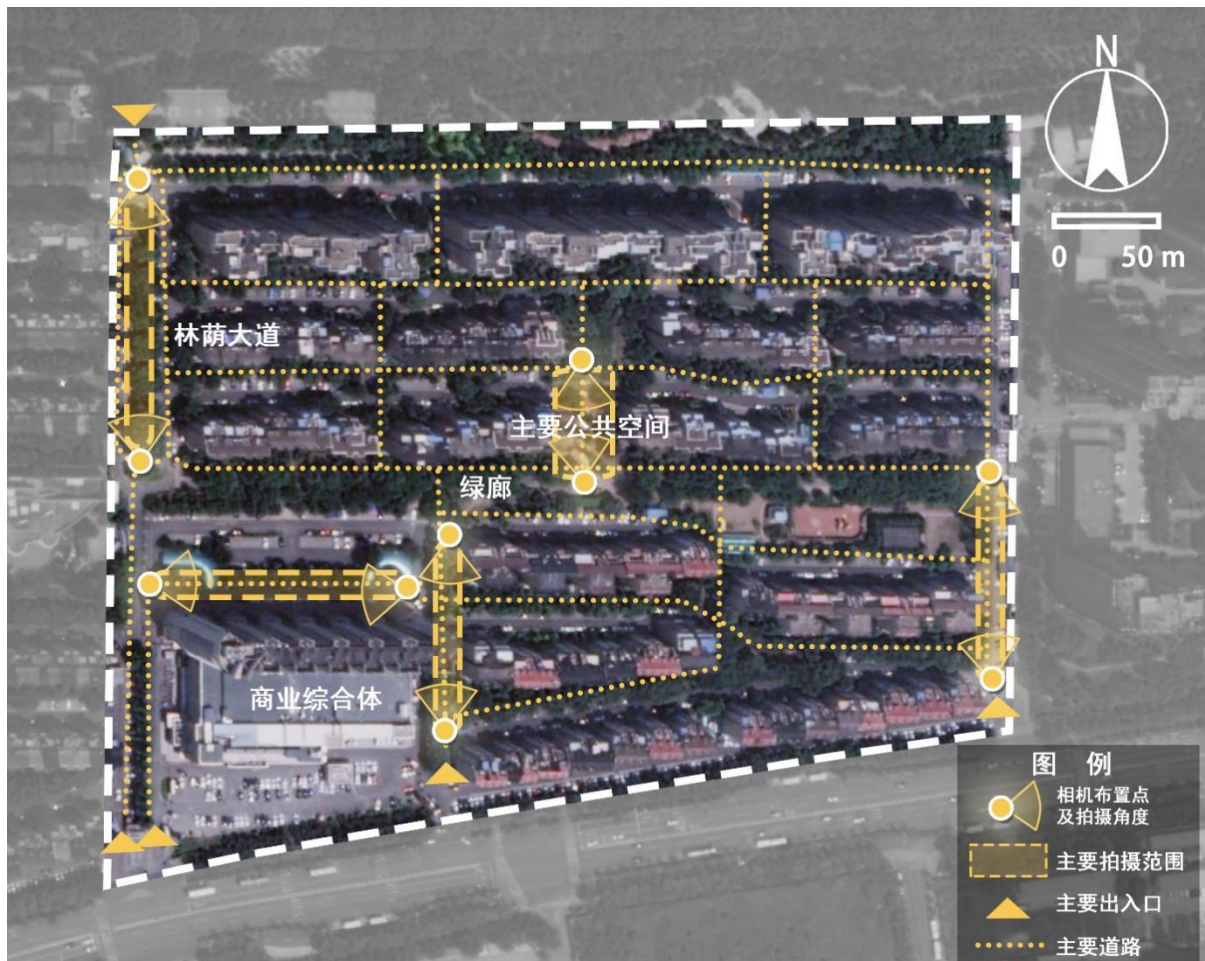


图 4-29 视频拍摄位置



图 4-30 低位（左）与高位（右）视频拍摄设备位置示意图



林荫大道拍摄结果



商业综合体北侧拍摄结果



绿廊拍摄结果



东南出入口拍摄结果



中部公共开敞空间拍摄结果

图 4-31 视频拍摄结果示意图

(2) 水磨社区数据收集

停留行为发生的频次远小于一般的穿行行为，因此短时间视频拍摄难以获取较为准确的停留行为发生位置。因此研究中在 2019 年 7 月至 8 月于某居住小区三处公共开敞空间中布设红外摄像设备进行持续拍摄，并将拍摄数据用于检验主实验中研究方法与研究结论的可靠性（图 4-32）。为解决主研究中拍摄时间过短的问题，研究中使用红外触发式相机记录空间使用数据，其保证相机在 50 米范围内有散发与人体温热量相同的物体时才进行拍摄，从而减少了相机连续工作的时间。研究中将拍摄最小间隔设定为 15 秒，保证停留行为能够被识别且不过多占用相机储存空间，以增加研究方法在不同空间应用的可行性（图 4-33）。

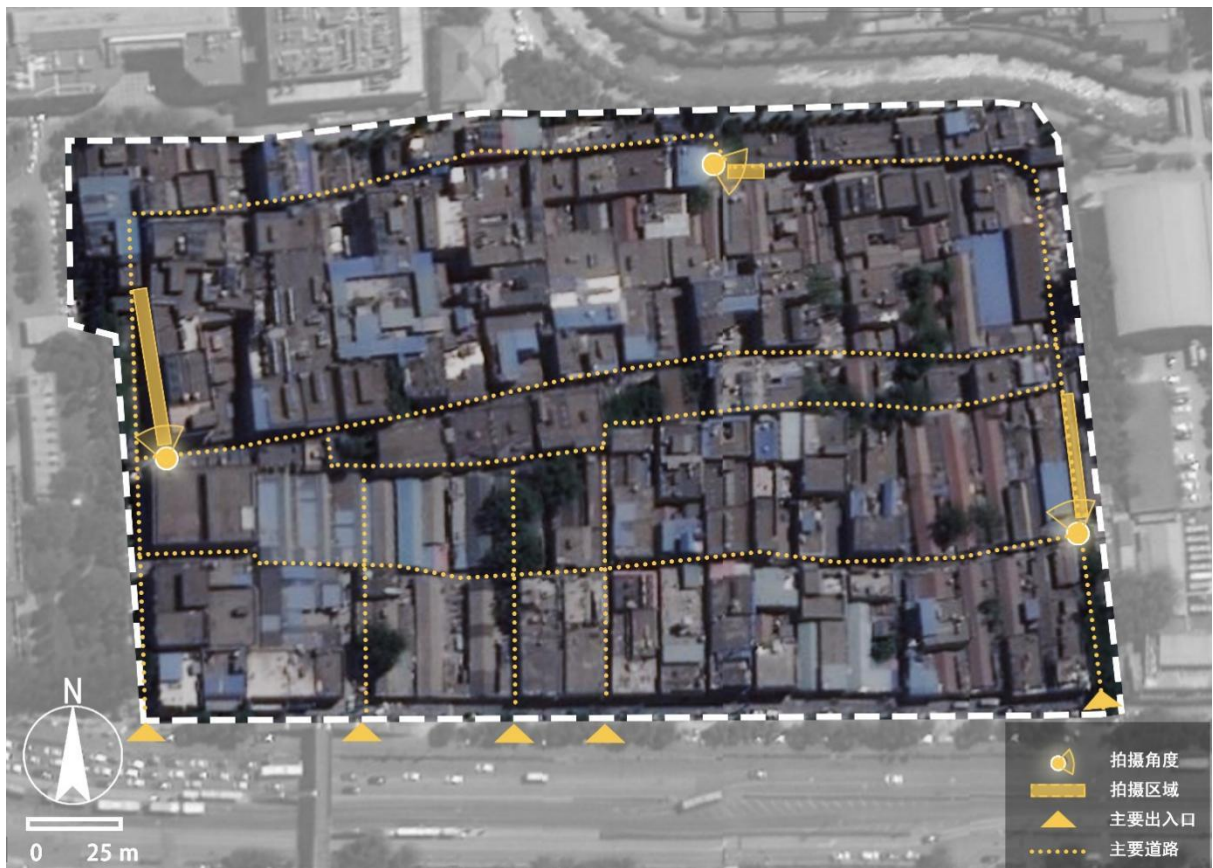


图 4-32 红外感应相机图像拍摄位置



图 4-33 红外感应相机图像拍摄位置

4.3.4.2 目标检测模型有效性检验

研究中选取了 10 种常用的基于卷积神经网络的模型，并从图像数据中随机抽取了 100 张图像，使用上述模型分别进行图像识别行人识别速度和准确率的比较。研究结果显示 Faster R-CNN 模型对俯拍图像中行人识别的准确率超过 85%，与其他模型相差较大具有一定优势。识别速度方面，Faster R-CNN 的识别较慢，对于每张图片的分析时间超过 10 秒，但由于研究中用于分析的图像数据样本量并非特别巨大，因此研究中使用 Faster R-CNN 进行图像的行人识别工作，以保证能尽量准确的提取居住区公共开放空间图像数据中活动的行人（表 4-2）。

表 4-2 常用机器学习目标检测模型速度与准确率对比图

模型名称	卷积网络类型	识别速度 (张/秒)	准确率 (%)	数据集
Faster R-CNN	INCEPTION RESNET V2	10.33	86.0	COCO
	RESNET50	1.48	69.8	
	INCEPTION V2	0.97	65.1	
SSD	RESNET 50 FPN	1.27	81.4	
	MOBILENET V1 FPN	0.93	74.4	
	INCEPTION V2	0.70	55.8	
	MOBILENET V2	0.52	51.2	
Mask R-CNN	RESNET101 ATROUS	7.83	76.7	
RFCN	RESNET101	1.53	69.8	
SSDLITE	MOBILENET V2	0.45	51.2	

4.3.4.3 不同行为识别准确率检验

研究中提出的方法与以往研究方法有所区别。以往研究中使用的数据收集方法受到场地的限制，视频拍摄效果不够理想。本研究中已改进拍摄形式，通过组建低位与高位拍摄装置，可直接从不同高度与角度对一般场地进行拍摄，并收集视频素材用于研究中的空间使用模式分析。此外用于识别图像中行人的机器学习模型也替换为准确率更高的 Faster R-CNN 模型。而由于拍摄高度与机器学习模型的改变，此方法的准确率尚需要检验。后续研究中需要抽取不同高度、不同空间拍摄图像的行人结果，人工对准确率进行检查，以保证相关方法的有效性。对于穿行行为，所有时间的召回率均大于 90%，准确率均大于 80%，表明该方法已成功检测到 90% 以上的行人，而近 20% 的检测框不是行人（表 4-3）。

为保证停留行为识别方法的有效性，研究中从辅助实验 3 台摄像设备所记录图像中各随机挑选了 100 张图像，人工统计所识别停留行为位置的准确性，并将其与人工统计的所有行人的位置识别准确性进行比对。对于停留的行人来说，所有时间的召回率和准确度值都高于 85%，这意味着大多数停留的行人都被这种方法正确地检测到了。白天记录的图像中，召回率和准确率均高于 90%，而夜间记录的图像，准确率仍高于 90%，但召回率已降至 74%。这一结果表明，超过四分之一的夜间停留的行人没有被深度学习方法检测到，而对于被检测到的行人来说，停留的行人更能够被正确识别。比较所有行人和停留行人的结果，他们的召回率相似，但停留行人的识别准确率远高于所有行人，这表明大多数识别错误的检测框未被识别为停留行人。总体而言，停留行为识别准确率结果表明本研究中提出的方法可以有效地测量居住区公共开敞空间等人本尺度公共开敞空间中的停留行为（表 4-3）。

表 4-3 穿行行为与停留行为识别准确率检验

类别	穿行行为行人			停留行为行人		
	召回率	精确率	F1 分数	召回率	精确率	F1 分数
日间	96.68%	86.22%	0.9115	92.92%	98.98%	0.9585
夜间	79.17%	75.45%	0.7727	74.44%	98.51%	0.8480
全天	91.34%	83.09%	0.8702	87.42%	98.86%	0.9279

4.4 本章小结

本章聚焦研究一：居住区公共开敞空间使用模式测度方法的研究，通过梳理已有研究的局限提出问题解决思路，并进一步从“方法提出”与“方法有效性”检验两个步骤提出本章的研究框架，最终在宏观及微观两个尺度均通过两个案例的对比分析和实证研究验证测度方法的有效性。研究创新点方面，居住区公共开敞空间宏观使用模式测度的创新点是通过 Wi-Fi 探针监测获取的数据对居住区公共开敞空间中行为活动（交通与休闲）的拆离，并通过实验从数据时空特征及人工观察比对检验方法的有效性，以及对比居住区与创新园区的实验结果揭示出居住区公共开敞空间活动的复杂性。居住区公共开敞空间微观使用模式测度的创新点是提出基于图像数据的两套不同的行为活动监测方案，并比较两种方案在行为类型识别、设施布局灵活性、在工程实践的可拓展性等方面的特色和差异。研究通过方法比选与人工审计选择准确率最高的方法以及对应的参数，并验证方法的有效性。本章中获取的宏观及微观使用模式的数据将用于第 5 章使用模式模拟的模型及参数选择。

第5章 居住区公共开敞空间使用模式模拟方法

5.1 居住区公共开敞空间使用模式模拟方法研究

居住区公共开敞空间使用模式模拟也分为宏观测度及微观测度两部分。其中宏观模拟主要通过自上而下的模型模拟各公共开敞空间内的交通与休闲活动总量。微观模拟主要通过自下而上的模型模拟各公共空间内穿行于停留活动的空间布局。已有模型通常模拟整体的活动流量，忽略不同尺度不同活动在空间选择方面的差异。且居住区公共开敞空间与其他类型公共开敞空间不同，具有复杂混合的活动类型，单一模型的模拟结果准确度会受场地内不同活动占比的影响。然而以往研究受限于测度维度及数据精度，难以对居住区公共开敞空间不同尺度的不同类型活动进行精细模拟。

因此，本研究在已有研究结论基础上，基于不同尺度不同活动的空间偏好特征，提出不同尺度不同活动的模拟假设，并选择能够实现对不同假设模拟的模型，通过“模型构建-模型有效性检验”步骤，在使用模式测度的基础上，分析验证本研究提出假设的可靠性及模型选择的合理性。本章将通过 5.2 及 5.3，分别详细阐述居住区公共开敞空间宏观及微观使用模式模拟的方法及准确度。

5.2 居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟方法研究

5.2.1 已有研究局限及解决思路

已有研究的空缺/挑战为：空间句法线段模型常用于城市尺度交通流量的模拟，视域模型常用于展览馆、博物馆、医院等建筑物内部人流活动的模拟。但居住区公共开敞空间处于两者之间，且活动类型相较于城市尺度的交通流以及建筑内部的休闲类活动流而言更加混合、复杂，因此其适用的模型尚未确定。此外，视域模型受网格单元大小（网络节点抽样尺度）及搜索半径等参数影响，已有研究缺少居住区公共开敞空间的使用模式测度数据，因此难以确定该尺度的模型参数。

针对以上局限，本研究的解决思路为：根据文献中强调交通行为更注重空间的连接情况，即空间的拓扑关系，休闲行为更关注视觉要素，因此受视线的影响，本研究提出研究假设：即交通行为的流数据与线段模型结果更相关，休闲行为的流数据与视域模型结果更相关。因此可用宏观尺度使用模式测度的交通与休闲行为数据分别为线段与视域模型匹配，验证研究假设，并通过变换参数选择构建最适宜的宏观使用模式模拟模型。

5.2.2 居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟框架

居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟方法研究主要分为模型构建与模型有效性检验两个部分。其中模型构建部分，研究根据已有研究中揭示的交通及休闲步行两种行为的空间偏好差异，选择不同的模型。其中交通步行被认为与空间网络的连接关系密切相关，因此研究选择空间句法线段模型用以更好地衡量公共开敞空间之间的拓扑关系和距离。休闲步行则更强调视觉要素及视觉引导，因此研究选择空间句法视域模型，通过栅格网络的构建模拟活动的分布。

在此基础上，研究针对不同模型选择不同的网络度量方式和参数。基于构建的宏观使用模式模拟模型，研究以紫荆雅园为例，利用第四章中宏观使用模式测度的数据对模型结果进行回归分析，分别用交通步行数据与线段模型回归，用休闲步行数据与视域模型回归。研究通过调整测度结果的汇总方式以及网络构建的参数验证研究提出的假设（图 5-1）。

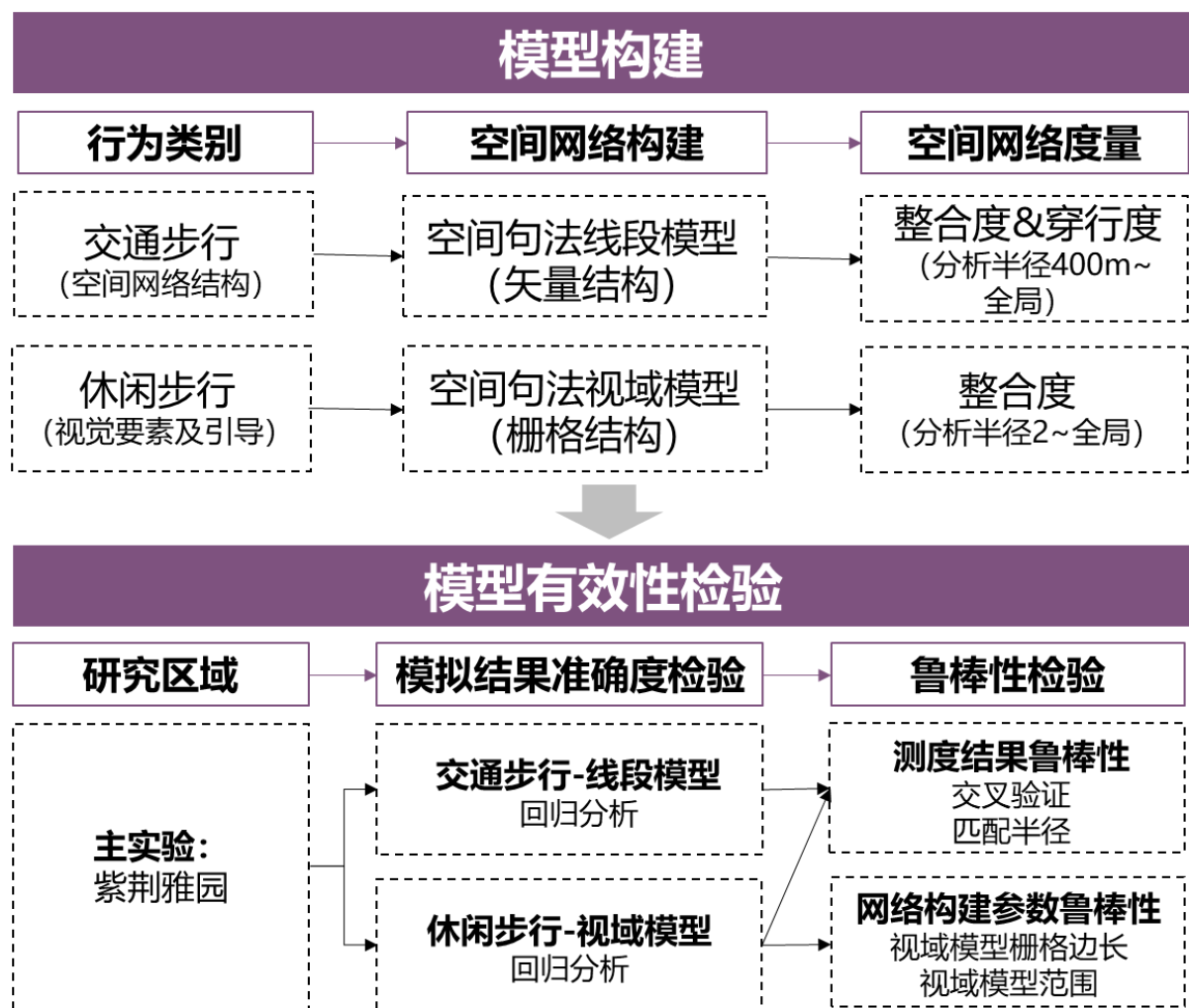


图 5-1 居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟方法研究框架

5.2.3 居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟方法

5.2.3.1 空间网络构建方法

前文 2.3.2 部分提出城市尺度的自上而下模型分为区域尺度、城市尺度与人本尺度，其中人本尺度城市空间网络分析的模型分为以等大的栅格空间单元作为网络节点的模型与以道路等矢量空间单元作为网络节点的模型，前者以视域模型为代表，而后者以线段模型为代表。

本研究建立线段模型等矢量空间单元网络模型时，以分析的人本尺度城市空间内部及周边道路作为网络的节点，而以道路之间的连接作为网络中的链接。道路网络的拓扑关系方面，其中度最高的道路段为路网上下居中的道路段，而非空间中央的道路段。此类模型亦可以角度关系等进行度量，而各节点属性会随度量方式产生变化。建立视域模型等栅格空间单元网络模型时，本研究将分析的人本尺度城市空间内部及周边空间划分为等大的方形网格，并以此作为基本的网络节点，而将空间上网格的连接情况作为网络的链接。与矢量空间单元网络模型不同，其网格的节点与链接是空间中的客观存在，因此模型建立过程中受人主观影响较小。栅格空间单元网络模型受建立时选取的空间网格单元大小的影响较大，即不同的网格单元大小将导致空间产生不同的网络结构（图 5-2）。

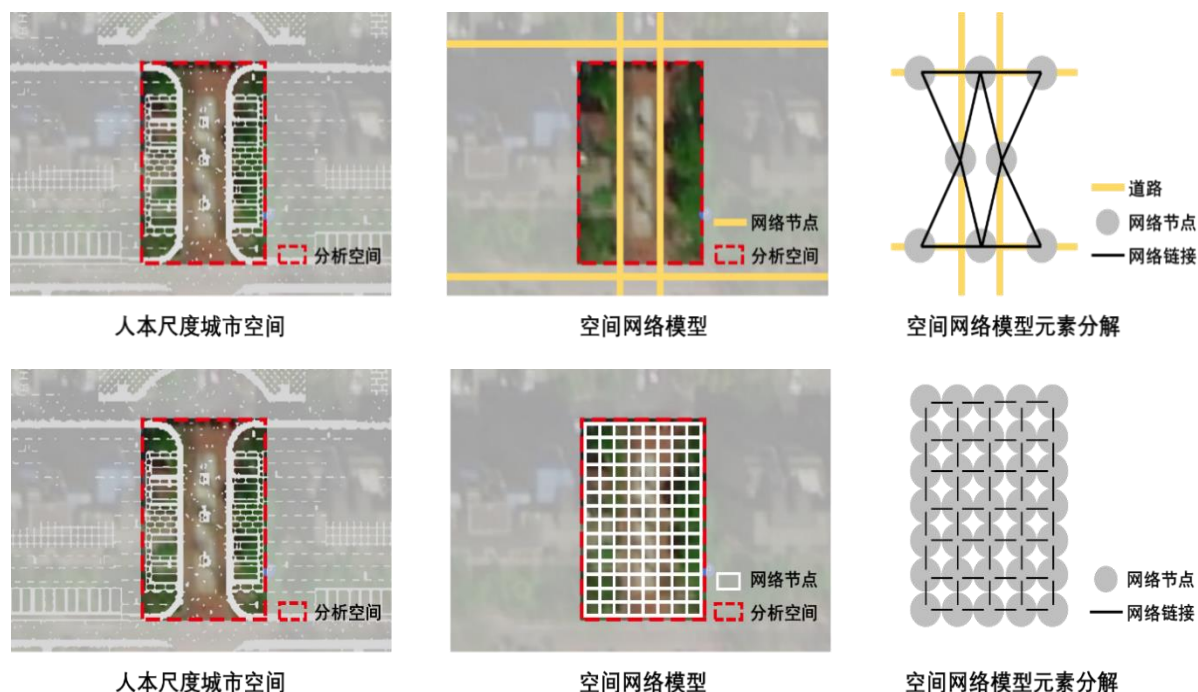


图 5-2 线段（上）与视域（下）网络模型建立方法

5.2.3.2 空间网络测度方法

模型建立方法与计算方法方面，对于矢量空间单元网络模型，人本尺度城市研究中常选择空间句法中的轴线模型与线段模型。拓扑模型中测度空间属性的主要方法为整合度（Integration）与选择度（Choice），其中整合度可近似视为某道路段到其他所有道路段的总拓扑距离的倒，代表路网任意两个街道段间最短路径穿过某街道段的次数。基于线段模型的空间网络角度计算，则在整合度与选择度的基础上发展出了标准化角度整合度（Normalized Angular Integration）与标准化角度选择度（Normalized Angular Choice），进一步优化了空间网络属性的计算方法，以更好地拟合人群活动的空间偏好。因此，本研究对交通行为模拟过程中使用的线段模型计算了整合度和选择度的数值。

对于栅格空间单元网络模型，在人本尺度城市研究中主要使用空间句法的视域模型并进行以等大空间网格为研究单元的视域分析（Visibility Graph Analysis）。视域模型根据空间的“图像可见性”生成：通过将网格叠加在空间的自顶向下视图中，可以使用拓扑方法计算每个网格单元的邻近性和可视性用的空间分析方法为视域模型中的整合度值，其通过计算某单元到指定拓扑距离内相邻单元的平均深度得到，而单元格视域整合度的从高到低反映了其从位于视线最中心至最边缘。视域模型在基于空间几何属性的前提下增加了对于人视觉行为的考虑，且分析单元与使用模式更加贴近，因此对其具有更高的解释能力。因此，本研究对休闲行为模拟过程中使用的视域模型选择了整合度指标。

5.2.3.3 使用模式模拟模型参数选择方法

为确定能模拟不同空间使用模式的空间模型以及模型对应的参数，研究中使用基于最小二乘法（Ordinary Least Square）的线性回归（Linear Regression Analysis）比较了不同参数下的空间句法线段与视域模型与休闲行为与交通行为的相关性。其具体计算方法为：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (3)$$

其中因变量 y 是 Wi-Fi 探针所记录的人数与人次数据，因变量 x 是空间句法模型对应的计算指标。对于空间句法线段模型，整合度与选择度相关参数均涉及计算半径的选择，即可以不考虑全部网络，而仅对节点某范围内的网络进行分析，以模拟人对空间的真实认知方式。不同地域、行为方式中拟合程度最好的计算半径也有所差异，因此通常需要分别建立多种计算半径下的网络模型并与空间使用模式数据进行比对，以确认最佳计算半径。之后根据以往研究经验以全局及 400 米、800 米、1200 米和 2400 米为半径的角度整合度与穿行度作为线段模型的自变量。对于空间句法视域模型，亦需要确定整合度的计算半径。

具体而言，由于每个分析单元为等大的栅格，因此采用欧式距离作为计算半径的单位会导致计算结果的误差增大，因此本研究参照以往研究将拓扑深度作为设定计算半径的基本单位。两个栅格间的拓扑深度由连接两者的最简折线的线段数，如两个栅格之前的拓扑深度为 2，则二者间无法通过直线在空间中连接，但最少可使用两个折线进行连接。根据以往研究经验，本研究分别获取计算半径分别为拓扑深度 2、4、6 及全局的视域模型分析结果作为回归分析的自变量。此外，使用模式与空间模型回归分析中涉及二者的匹配问题。

由于 Wi-Fi 探针监测到的步行流量可能不只来自于一条道路，因此研究中将 Wi-Fi 探针与周围 10 米半径内角度模型及视域模型的分析单元进行匹配。由于角度模型的研究单元为长度较长的道路段，其与 Wi-Fi 探针相交的空间仅占其总体长度的一部分，因此对角度模型与 Wi-Fi 探针周边范围的研究单元进行求和计算将过高估计其空间中心性。而对于视域模型，其研究单元远小于 Wi-Fi 探针周边 10 米半径范围，因此对其整合度进行求和能较好反映其控件属性。

研究中计算出角度模型各条线段的整合度及穿行度，并将位于 Wi-Fi 探针范围的线段的整合度及穿行度取平均值，并根据可视范围计算视域整合度并去除步行不可达的区域后，通过 Wi-Fi 探针数据收集范围计算出每台监测设备覆盖的空间中的视域整合度之和。

5.2.4 居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟方法有效性检验

5.2.4.1 测度结果回归分析有效性检验

为检验模拟方法的有效性，研究中通过项目合作获得的所研究小区的平面图作为基础数据，并高分辨率遥感影像对空间的实际位置与距离信息进行校准建立空间网格。本研究中绘制了 Wi-Fi 探针设备布设实验小区及周边数公里的区域内的路网，并据此建立了空间句法拓扑模型，从而计算出模型的全局及 400 米、800 米、1200 米和 2400 米为半径的角度整合度与穿行度，用于提取 12 台 Wi-Fi 探针所对应空间的平均线段整合度与穿行度，以用于与居住区公共开敞空间宏观使用模式进行回归分析的线段模型的自变量（图 5-3）。

此外，本研究中对 Wi-Fi 探针设备周边步行可达区域建立了视域模型，并计算视域整合度，用于对居住区公共开敞空间宏观使用模式进行分析。此外由于设备布设的居住小区西边与另一居住小区相连且具有共同的公共开敞空间，因此视域模型范围也包含另一居住小区，以保证研究范围西部的两小区相交处空间的视域模型的计算结果具有一定的准确性，并最终以及累积的分析半径为 2、4、6 和全局的视域整合度作为回归分析中的自变量（图 5-4）。

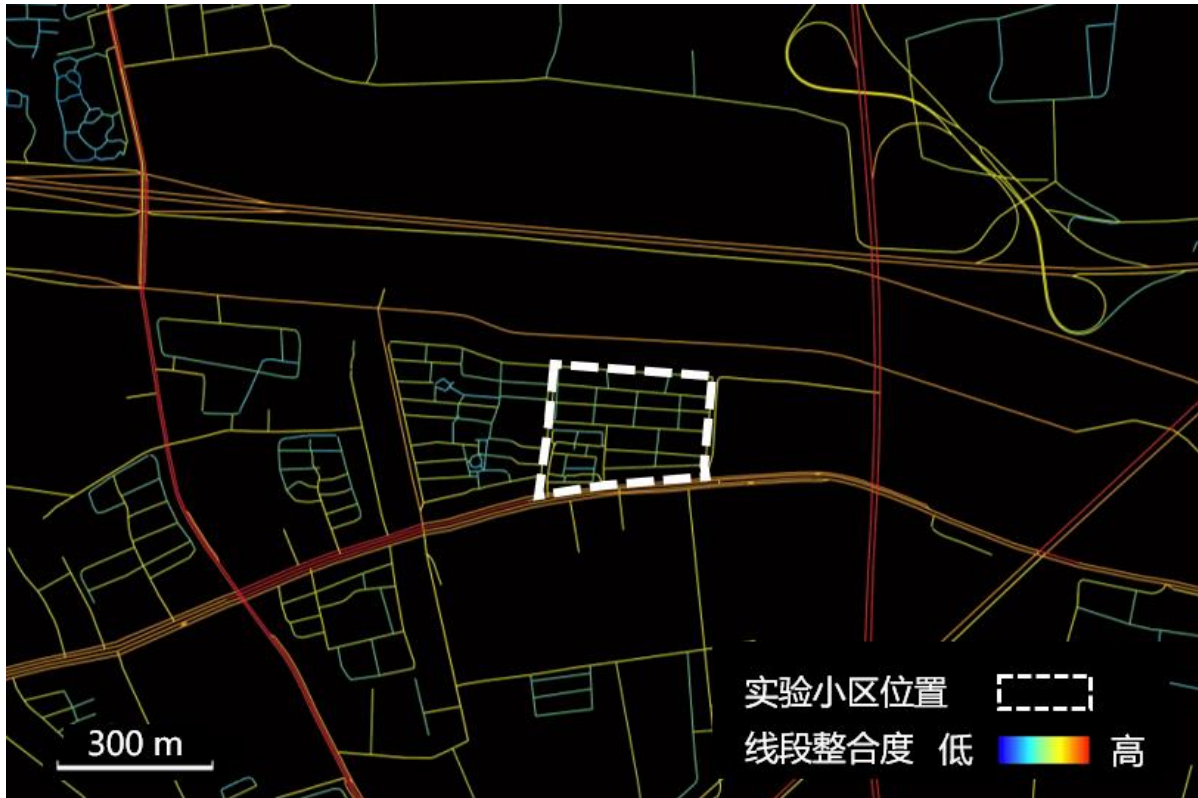


图 5-3 线段模型全局整合度计算结果

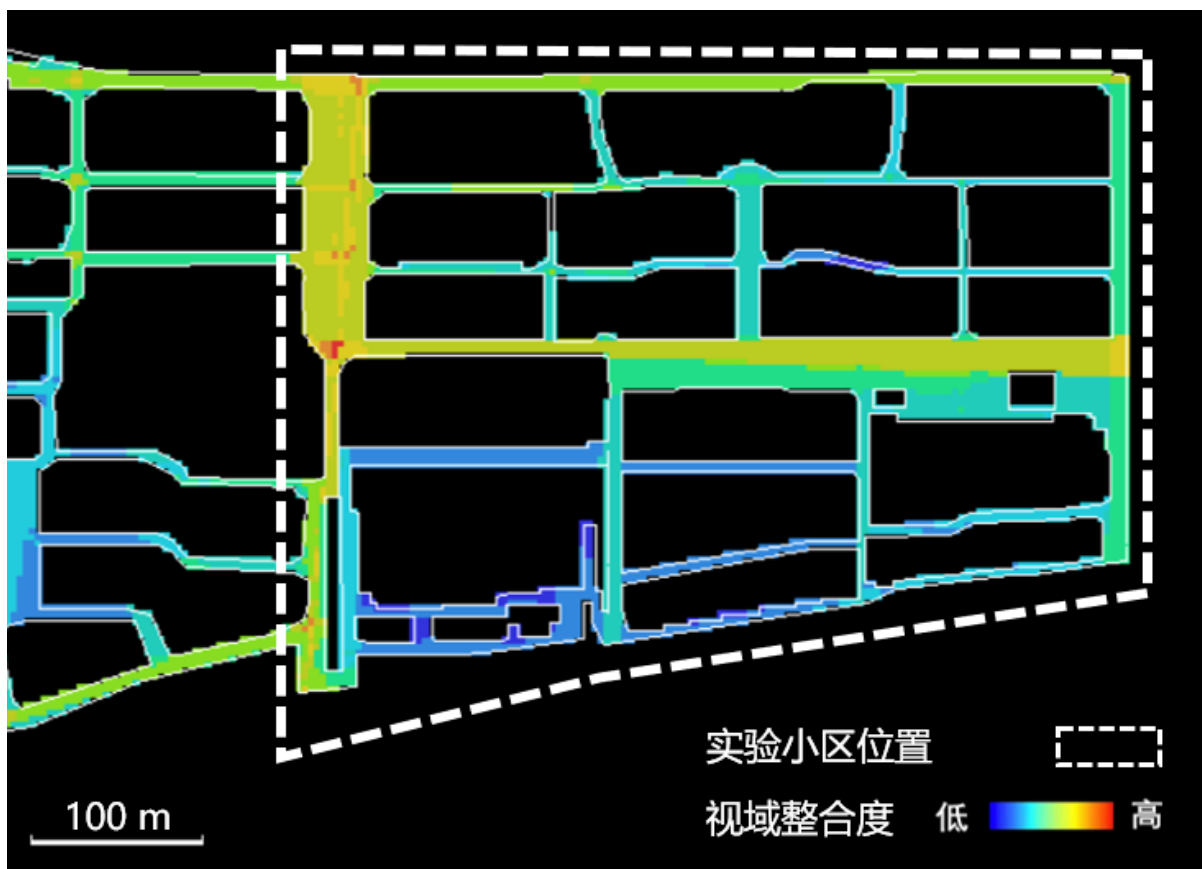
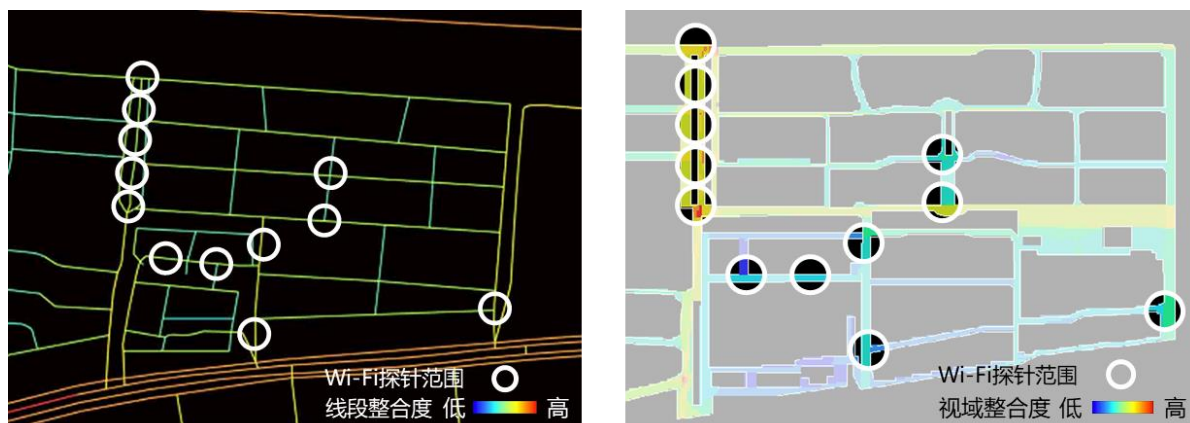


图 5-4 视域模型全局整合度计算结果

本研究通过架设 Wi-Fi 监测设备收集某居住小区 12 处公共开敞空间内手机的 MAC 地址信息，并将获取的数据拆为两部分：总人次数据与使用人数数据，并根据空间的路网和平面信息建立空间句法线段和视域模型，计算不同分析半径的整合度与选择度数值，之后将居住区内各 Wi-Fi 探针位置半径 10 米内的空间句法线段与视域模型的空间单元与 Wi-Fi 探针收集的人次数据与人数数据进行匹配，以计算不同模型不同分析单元的整合度与穿行度数值与对应空间所收集到的人次、人数的相关性，以选择出能够模拟不同使用模式的模型并确定其参数（图 5-5）。



Wi-Fi 探针与线段模型匹配范围

Wi-Fi 探针与视域模型匹配范围

图 5-5 空间模型与 Wi-Fi 探针数据匹配范围

由于以往研究中发现行人的交通行为过程中空间的选择以尽快到达目的地为主要依据，因此往往选择总拓扑距离较小的路径，而这一特征又能够通过路网的空间整合度与穿行度所反映；而休闲行为过程中，行人更多是受所处空间的视觉要素影响，因此可能与视域模型体现的空间属性更具相关性，因此研究中通过回归分析对此研究假设进行了分析。

研究中通过将 12 台 Wi-Fi 探针监测范围内获得的步行人次与人数数据与对应空间内线段模型不同统计半径下的平均标准角度整合度（NAIN）与标准角度选择度（NACH）进行回归分析，并将其与对应空间内视域模型不同统计半径下的累积整合度进行回归分析，之后统计各回归分析中的可决系数（ R^2 ）。由于部分回归相关系数为负值，为了区分将对负相关的回归结果中的可决系数取负数。

结果显示，不同统计半径下线段模型的整合度与穿行度均与步行人次呈现显著负相关性，而与步行人数呈现显著正相关性。而不同统计半径下视域模型的整合度均与步行人次呈现显著正相关性，而与步行人数呈现显著负相关性，即视域模型相关性分析的结果与线段模型相反（图 5-6）。

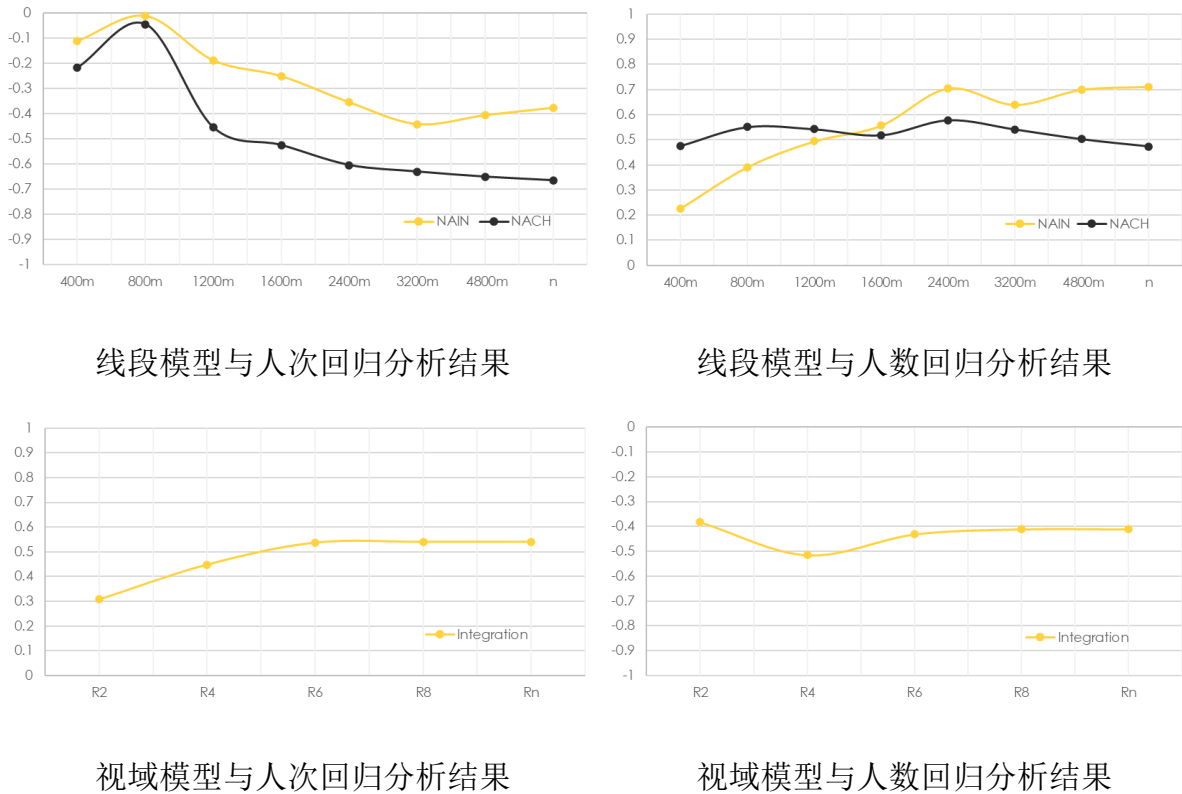


图 5-6 空间使用模式与网络模型回归分析结果

研究结果显示，通过将步行行为拆分为截面流量与空间使用人数，使拓扑模型模拟步行行为的准确度极大提升。而两者对于步行行为所对应不同流量的模拟准确度差异，能够揭示两个模型的机制：总人数反映的交通行为作为必须的出行行为，其目的性更强，更依赖于空间的拓扑性。线段模型中角度整合度就是网络结构自身拓扑属性的反映，因此对总人数模拟准确率较高。而由总人次数据反映的综合行为既包括了必要的交通行为，也包括了目的性较弱的休闲行为，因此更受视觉引导的影响，因此模拟截面流量准确率较高。

此外虽然线段模型及视域模型与总人次及总人数数据均有一定程度上的相关性，但正相关的可决系数的最大绝对值均大于负相关的可决系数的最大绝对值。此结果一定程度上说明正相关性是主要作用因素，而负相关性可能是交通行为与休闲行为二者的空间偏好存在一定互斥性所导致（表 5-1）。

表 5-1 宏观使用模式模拟模型及参数

使用模式类型	空间网络模型	调整后 R ²	p-value
休闲行为	视域模型	0.544	0.004
交通行为	线段模型	0.675	0.001

5.2.4.2 匹配半径鲁棒性检验

为保证模拟研究的有效性以及检验相关参数是否能支撑最佳的模拟结果，研究中针对不同构建空间模型的参数以及回归分析中相关参数进行了鲁棒性检验。研究中首先检验了空间句法模型与使用模式回归分析中二者匹配半径的鲁棒性。研究中选择将 Wi-Fi 探针数据与其周边半径 10 范围内的空间进行匹配，但此范围亦有可以调整的空间。通常 Wi-Fi 探针周边 15 米半径范围内的移动设备均有可能被探测到，因此半径的选择有可能对研究结果产生影响。

为检验研究结果的对于不同栅格大小的网络模型鲁棒性以及参数选择的合理性，研究中分别以 Wi-Fi 探针周边 7.5 米、10 米、12.5 米和 15 米范围进行空间匹配，从而对 Wi-Fi 探针数据与空间句法角度及视域模型进行回归分析（图 5-7）。不同的匹配半径下，与 Wi-Fi 探针设备记录的人数与人次数据的空间网络的分析单元数量会有所区别，从而影响回归分析的结果。

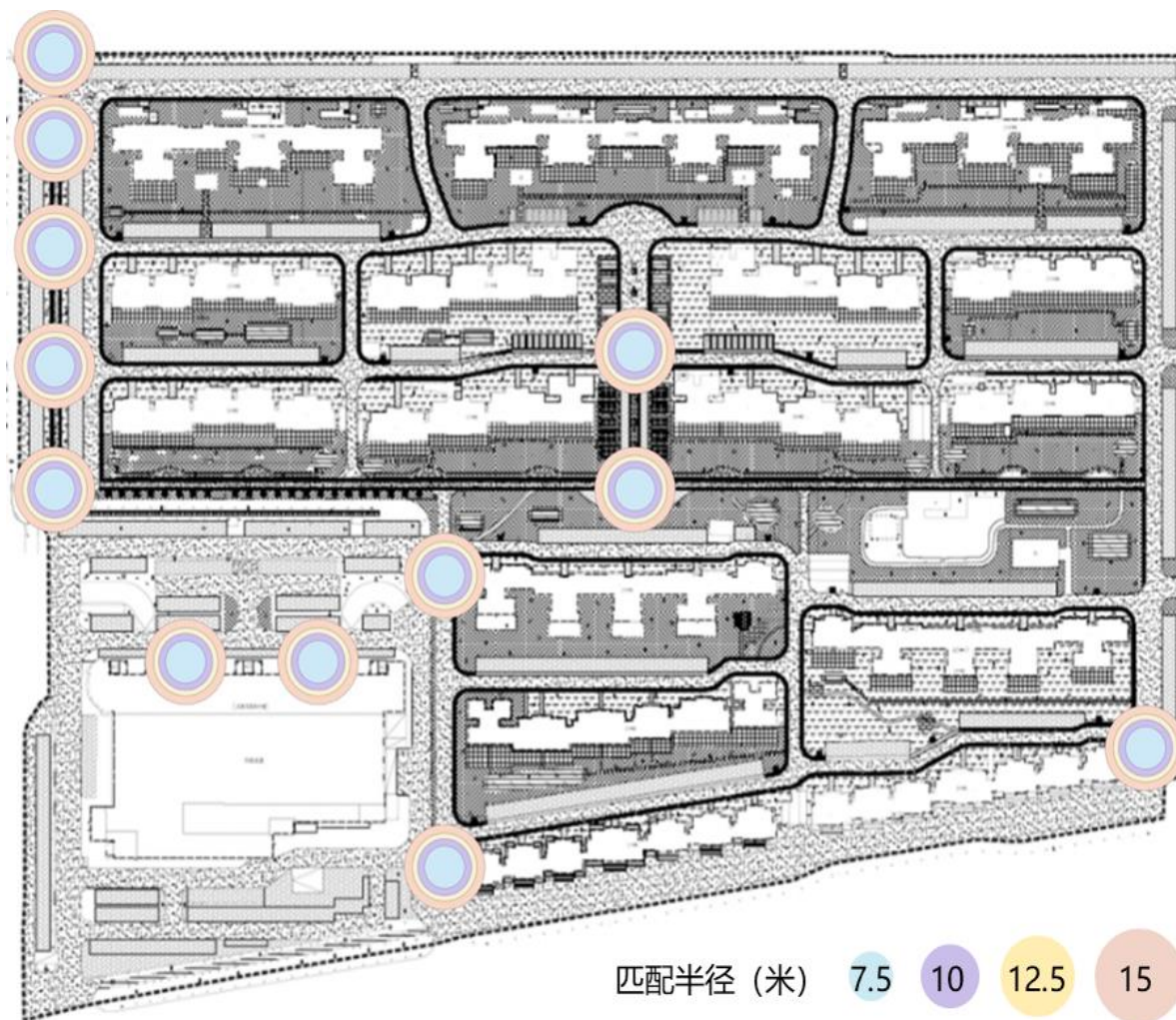
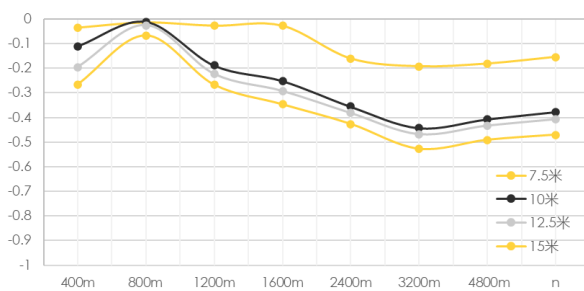
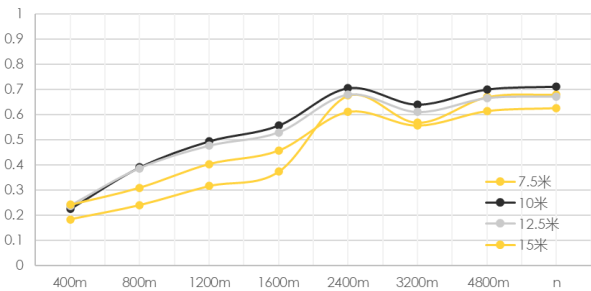


图 5-7 不同匹配半径对应空间范围

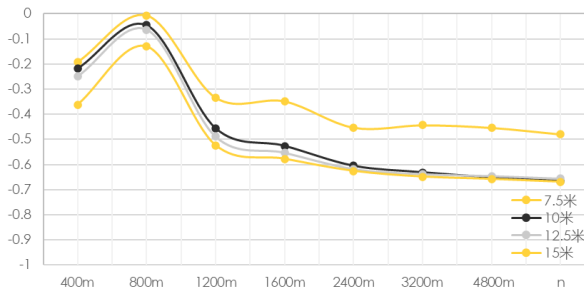
不同匹配半径角度线段模型与人次及人数数据回归分析的研究结果显示，不同匹配半径下均显示出不同统计半径下线段模型的整合度与穿行度均与步行人次呈现显著负相关性，而与步行人数呈现显著正相关性（图 5-8）。其中角度模型整合度及穿行度与各不同半径人数回归分析可决系数均变化较小。相对而言，当统计半径为 7.5 米时，角度模型整合度及穿行度与其他统计半径人次回归分析可决系数差异较大。此结果可以根据前文交通行为与休闲行为活动的互斥性进行解释，即角度模型与人数所代表的的交通行为具有直接相关性，因此对于匹配半径变化具有较强鲁棒性，而其与人次所代表的休闲活动的相关性来源于休闲活动与交通活动的互斥性，而非具有直接的负相关性，因此相关性在匹配半径变化时鲁棒性较低。



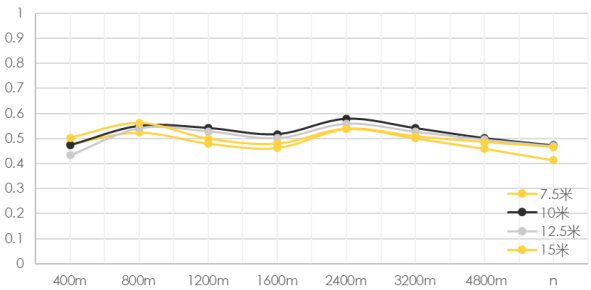
线段模型整合度与人次回归分析结果



线段模型整合度与人数回归分析结果



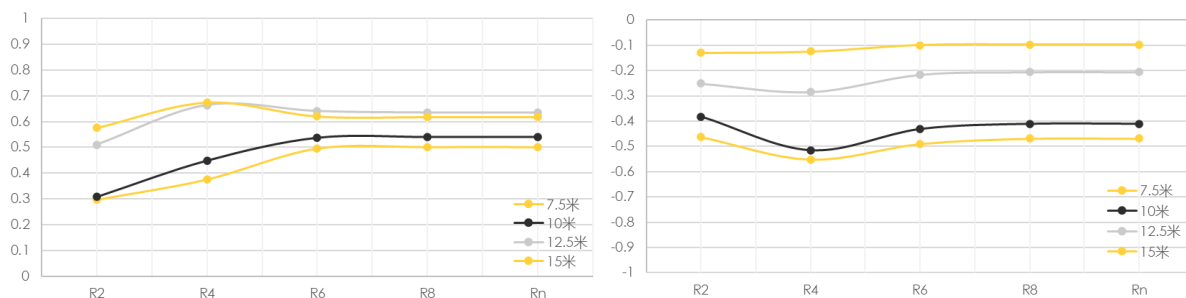
线段模型穿行度与人次回归分析结果



线段模型穿行度与人数回归分析结果

图 5-8 不同匹配半径线段模型与人次及人数数据回归分析结果

不同匹配半径视域模型与人次及人数数据回归分析的研究结果显示，不同统计半径下视域模型的整合度均与步行人次呈现显著正相关性，而与步行人数呈现显著负相关性（图 5-9）。相对而言，视域模型受匹配半径影响所统计的研究单元的变化程度更大，因此其在匹配半径变化时相关性变化较大。但总体而言，不同匹配半径下 Wi-Fi 探针数据与线段模型及视域模型的回归分析仍呈现相似的结果。这种现象可以用交通与休闲行为存在一定相斥解释，且不影响回归分析的结果。



视域模型整合度与人次回归分析结果

视域模型整合度与人数回归分析结果

图 5-9 不同匹配半径视域模型与人次及人数数据回归分析结果

5.2.4.3 视域模型栅格边长鲁棒性检验

研究中根据已有研究检验以及现场实验结果，视域模型采用的栅格为边长 2 米的正方形网格。而由于栅格大小有可能影响视域模型与步行数据回归分析结果，因此通过将栅格设置为边长 1 米、1.5 米、2 米、2.5 米和 3 米的正方形网格（图 5-10），并分别进行视域模型计算并与步行数据进行回归分析，以检验研究结果的鲁棒性，并确保 2 米边长的分析网格能够提供最准确的空间使用情模拟结果。当作为分析网格的栅格的边长变化时，对应物理情景是人对空间的视觉感知模式的变化。虽然已有研究从环境行为学的角度能够对人自体感知的尺度有较充分的认知，但基于视觉尺度的研究尚处于起步阶段，因此栅格边长的最佳取值无法确定，而栅格边长具体测试范围则由相关研究的经验值确定。

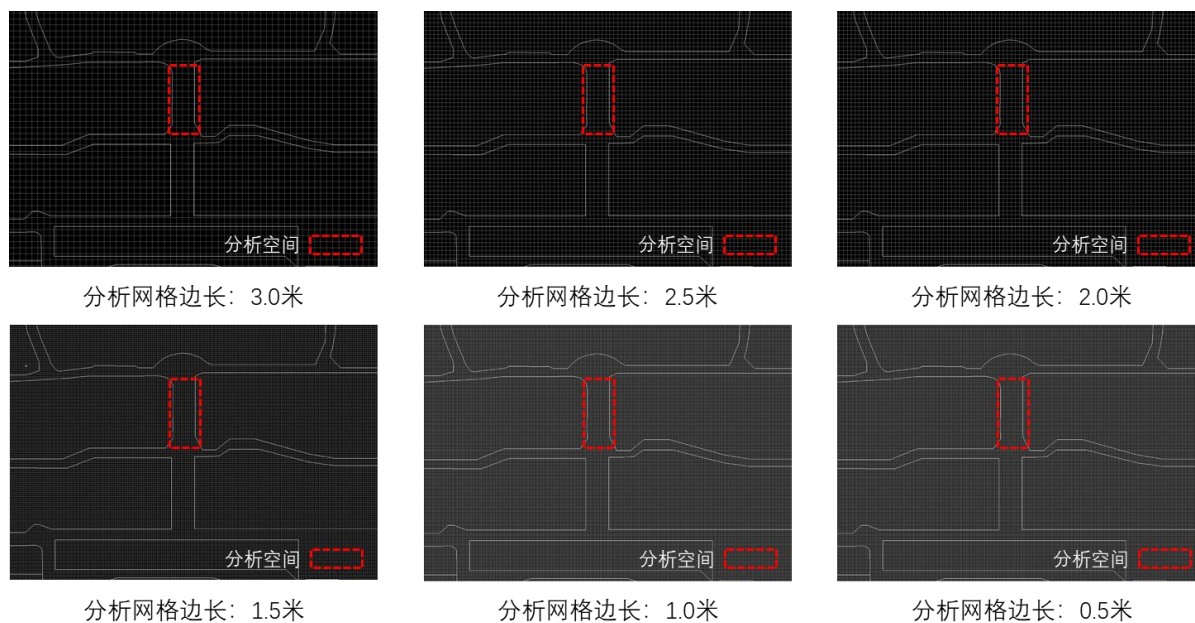
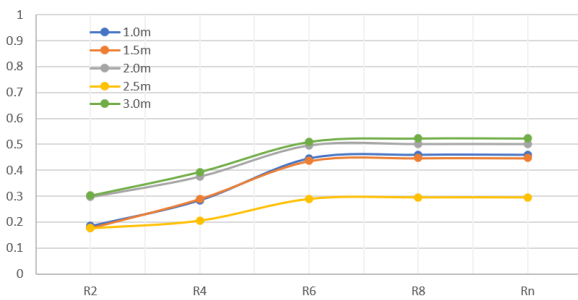
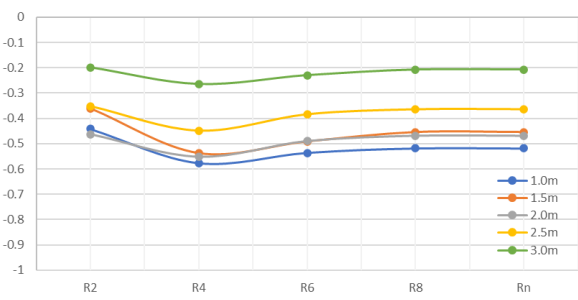


图 5-10 不同网格边长视域模型分析单元示意图

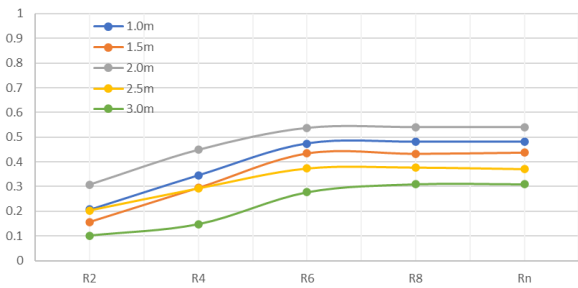
研究结果显示，不同统计半径下视域模型的整合度均与人次呈现显著正相关性，而与人数呈现显著负相关性。但不同统计半径下相关性最高的栅格半径有所不同。当统计半径为 15 米时，栅格边长为 2 米和 3 米时视域整合度与人次相关性最高，而栅格边长为 1 米和 2 米时视域整合度与人数相关性最高；当统计半径为 20 米时，栅格边长为 2 米时视域整合度与人次相关性最高，而栅格边长为 1 米时视域整合度与人数相关性最高；当统计半径为 25 米时，栅格边长为 1 米至 2 米时视域整合度与人次相关性最高，而栅格边长为 1 米至 3 米时视域整合度与人数相关性最高。总体而言，当栅格边长改变时整体规律差别并不显著，可以说明分析结果在栅格面积改变时具有一定的鲁棒性（图 5-11）。



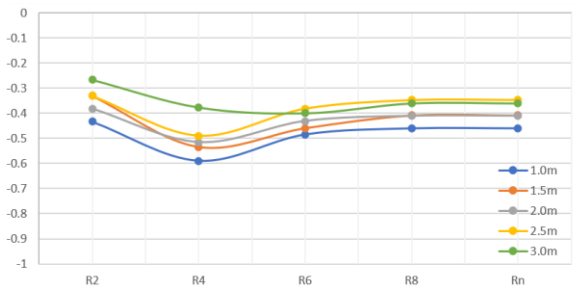
15 米半径视域整合度与人次回归分析



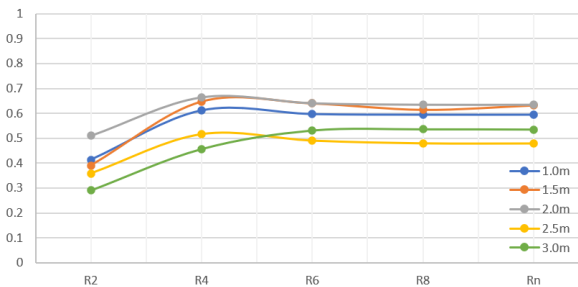
15 米半径视域整合度与人数回归分析



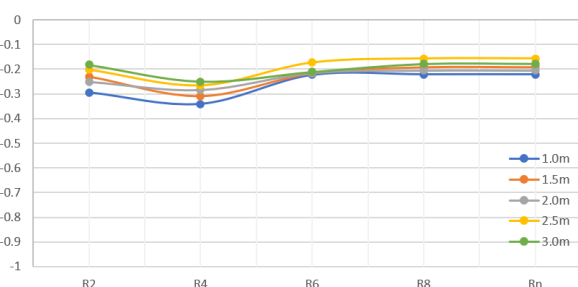
20 米半径视域整合度与人次回归分析



20 米半径视域整合度与人数回归分析



25 米半径视域整合度与人次回归分析



25 米半径视域整合度与人数回归分析

图 5-11 不同网格边长视域模型与 Wi-Fi 探针设备记录数据的回归分析结果

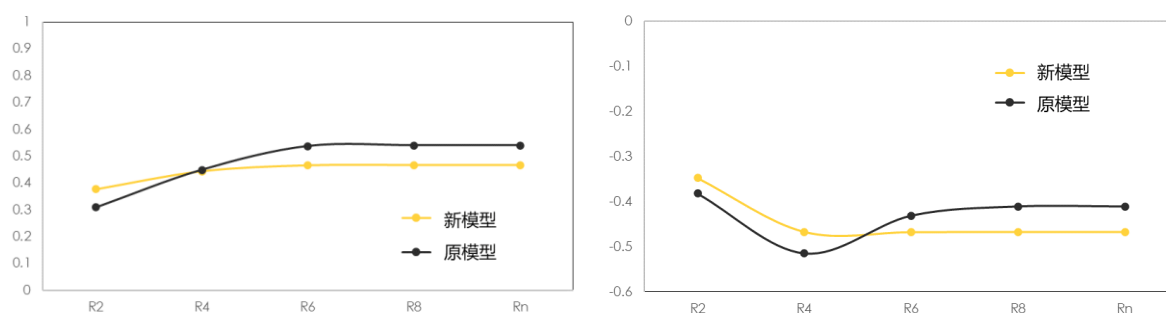
5.2.4.4 视域模型范围鲁棒性检验

有可能影响回归分析结果的另一个原因是视域模型建立的空间范围。部分学者认为封闭社区内活动的分布特征为距居住社区中心越近使用人数越多，而距居住社区边缘越近使用人数越少。以所研究居住小区及西边居住小区的范围建立的视域模型确实表现出两小区交界出的整合度较高的现象，交界处 Wi-Fi 探针设备记录的人次数据较高，符合上述假说。但另一方面，本研究中将空间使用模式划分为交通行为与休闲行为两种，采用上述假说仅能一定程度上解释休闲行为的分布特征而无法解释人数分布较多位于居住小区边缘入口的交通行为。

因此需要进行视域模型建立范围的鲁棒性检验，以研究验证假说的合理性。研究中以居住小区为范围再次建立了视域模型，其模型范围为原模型的 50%。导致不同模型间各研究空间距模型中心点距离不同。之后研究研究中按照原模型的参数计算了新模型不同分析半径的整合度值。

具体而言，研究中将新建立的空间模型不同分析半径的整合度值作为自变量，将 Wi-Fi 探针设备记录的人次与人数数据作为因变量进行回归分析，并将相关性结果与采用原范围建立的模型与空间使用模式的回归分析结果进行比较（图 5-12）。其中新模型与原模型视域整合度与人次及人数回归分析的结果显示，当分析半径为 6 时，两模型结果与人次相关性均最高；当分析半径为 n 时新模型与人数相关性最高，而当分析半径为 4 时原模型与人数相关性最高。

对比两次回归分析结果可发现视域模型范围的变化对相关性结果影响较小，视域模型整合度均是与人次数数据有较强的正相关性而与人数数据有较强的负相关性。由于新建立的模型全局整合度最高的区域为居住小区中部东西向道路，与原模型有一定差异，因此相关性更多是二分网络的作用关系导致，而不能仅距社区中心距离解释回归分析的结果。



视域整合度与人次回归分析

视域整合度与人数回归分析

图 5-12 不同范围视域模型与 Wi-Fi 探针设备记录数据的回归分析结果

5.3 居住区公共开敞空间微观使用模式模拟方法研究

5.3.1 已有研究局限及解决思路

已有研究的空缺/挑战为：微观尺度的使用模式模拟缺少精细尺度的测度数据，因此难以确定该尺度模型和参数的选择。此外，已有研究通过代理人模型模拟所有的活动密度忽略了不同活动类型的差异，居住区作为停留与穿行行为均多且混合的空间，其整体的活动密度可能受不同公共开敞空间功能和活动比例的影响。以往针对微观尺度代理人模型模拟准确度的判断通常基于更大尺度整体活动数据的汇总，难以针对不同活动选择合适的模型。

针对以上局限，本研究的解决思路为：与宏观使用模式模拟类似，居住区公共开敞空间的微观使用模式仍然存在交通与休闲两个类别的区分。其中宏观的交通行为对应微观的穿行行为，宏观的休闲对应微观的停留行为。值得注意的是，在宏观尺度中，一个人可能反复穿行一个空间会被认为是休闲行为，而在微观尺度，一个人穿过该空间即使在一定时间内会返回，但对于这个空间内部各个区域而言仍被定义为穿行行为。已有研究揭示出交通步行与空间结构的关系在微观尺度可转化为穿行行为与空间形态的关系，与此类似，休闲步行与视觉要素的关系在微观尺度可转化为停留行为与周边要素的关系。因此，在微观尺度使用模式模拟中，研究为两种不同的行为分别提取不同的空间要素，并选择不同的模型分析行为与空间的关系。

5.3.2 居住区公共开敞空间微观使用模式模拟框架

居住区公共开敞空间微观使用模式模拟同样区分交通与休闲行为，其中交通以穿行行为为代表，休闲以停留行为为核心。研究根据空间形态和结构对穿行行为的影响，选择自下而上的空间句法代理人模型，通过对人活动偏好参数的设置，通过代理人在空间中的流动模拟人的穿行行为。与此同时，研究根据周边设施对停留行为的影响，选择可能影响停留的空间要素，并通过空间分析与线性回归模型，探索周边要素与停留行为的关系。

在模型构建的基础上，研究选取紫荆雅园为穿行行为模型验证的实验区域，水磨社区为停留行为模型验证的实验区域。研究通过将模型结果与第四章中微观使用模式测度的结果进行对比回归，并将回归结果及与已有研究结论的对比，以验证研究假设与模型的可靠性（图 5-13）。

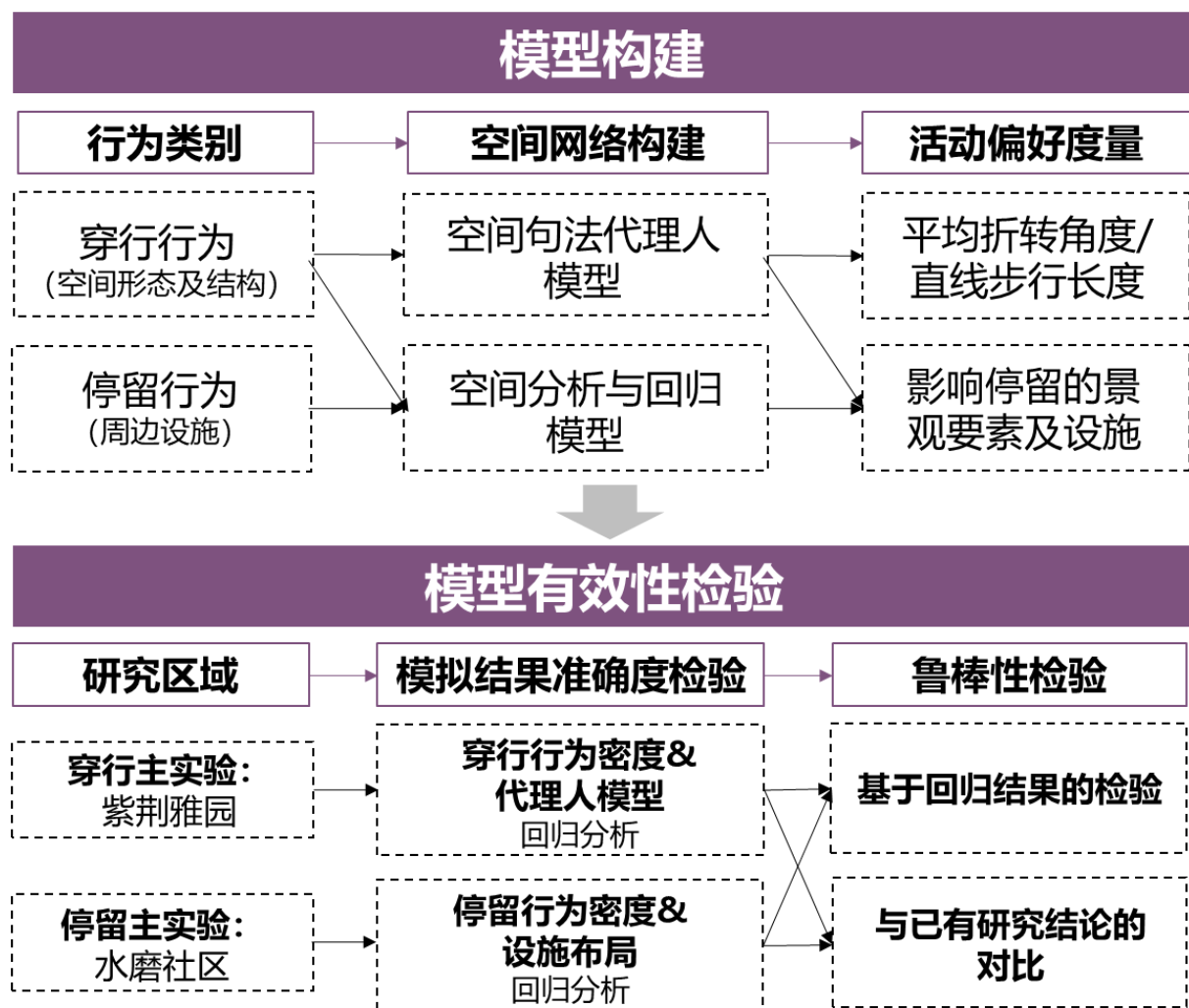


图 5-13 居住区公共开敞空间微观使用模式模拟框架

5.2.2 居住区公共开敞空间微观使用模式模拟方法

微观尺度使用模式的模拟是微观尺度穿行及停留行为的汇总。其中穿行行为是宏观尺度交通活动的微观体现，停留行为是休闲活动在微观尺度的重要表征。研究中在使用空间句法线段与视域模型进行宏观使用模式模拟，其结果能较好反映各空间使用模式的平均值。然而此模拟结果在每个空间内部的分析单元的差异性小于实际的空间使用模式，因此研究中在宏观使用模式模拟的基础上，使用基于空间句法的代理人模拟细化在更精细尺度上的空间使用模式预测，以更加准确的预测出相同空间内各局部区域的使用模式差异。基于空间句法的代理人模拟在视域模型的基础上需要输入视野范围、直线路径平均距离、代理人出发地、空间吸引点等参数。其中视野范围、直线路径平均距离、代理人出发地参数与行人的穿行行为规律相关，空间吸引点则为可能吸引行人的停留或前往的要素。因此，本研究根据第六章在紫荆雅园及水磨社区中获取的微观尺度使用模式测度数据验证并构建穿行行为模型，并通过分析停留行为的相关设施的探索构建空间吸引点。

(1) 穿行行为模拟

根据前文所述，基于视域模型的代理人模拟结果更能体现出视域空间模型无法模拟的在微观尺度空间的居民使用模式。因此使用基于空间句法模型的代理人模拟获得的微观空间使用模式可用于在方案前策划阶段对现有方案进行优化，以提升空间利用效率，并避免可能存在的空间设计问题对居民的不利影响。模拟所需输入的参数方面，代理人模拟中路径折转频率的判断来自于穿行行为测度结果得到的参数，空间吸引点来自于停留行为的测度结果，而代理人出发点来自于穿行行为测度的结果，以更为准确的模拟居民的微观使用结果（图 5-14）。

(2) 停留行为模拟

根据环境行为学的基础理论，停留行为是在穿行行为过程中受室外座椅、功能建筑、台阶、设施等设施影响产生的，其中座椅与功能建筑的与停留行为发生概率呈正相关，而台阶与设施与停留行为发生概率呈负相关。因此研究中停留行为的空间使用模式模拟模型在穿行行为的基础上通过添加外座椅、功能建筑、台阶、设施等设施而生成。

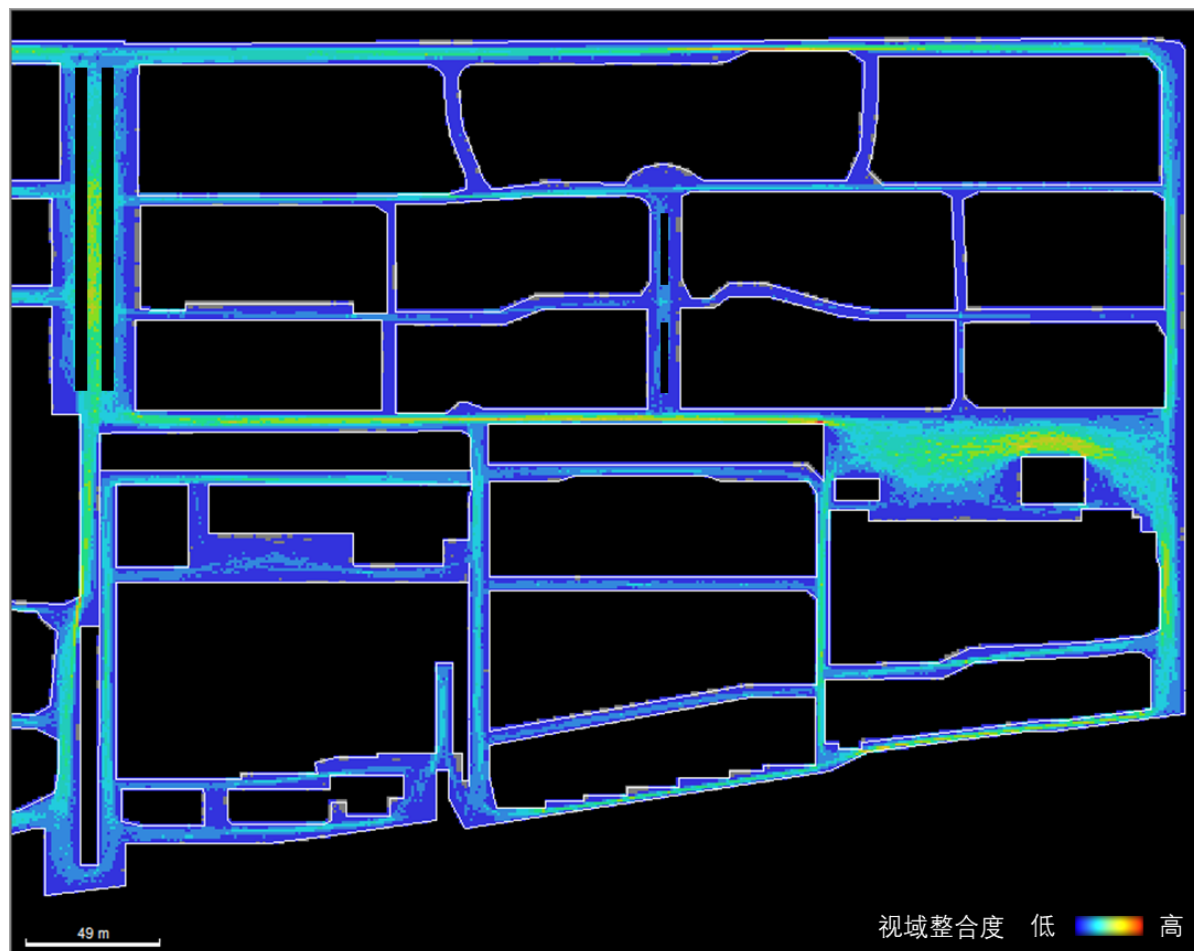


图 5-14 居住区公共开敞空间穿行行为微观使用模式模拟结果

5.2.3 居住区公共开敞空间微观使用模式模拟有效性检验

(1) 穿行行为微观使用模式模拟有效性检验

研究中基于公共开敞空间宏观使用模式模拟获得的视域模型与整合度分析半径，以及微观使用模式测度结果，对居住区公共开敞空间微观使用模式进行了模拟。根据居住区公共开敞空间微观使用模式测度中获得的统计值，研究中以步深为 6 的视域模型作为基础，将直线路径平均距离设为 3（取值于视域模型分析半径的一半），以全局可视范围作为代理人出发地进行模型。

研究中人工从定性的角度对比了居住区 5 处主要公共开敞空间微观使用模式与模拟结果，可以发现各空间中的微观使用模式均能够体现在代理人模拟结果中，如绿荫大道空间南侧使用强度较高而在于其他道路相邻处行人减少、商业综合体旁空间行人倾向使用机动车道、绿廊与东南出入口空间居民集中于西侧、中心公共开敞空间两侧使用不均匀等，验证了居住区公共开敞空间穿行行为微观使用模式模拟方法的有效性（图 5-15）。

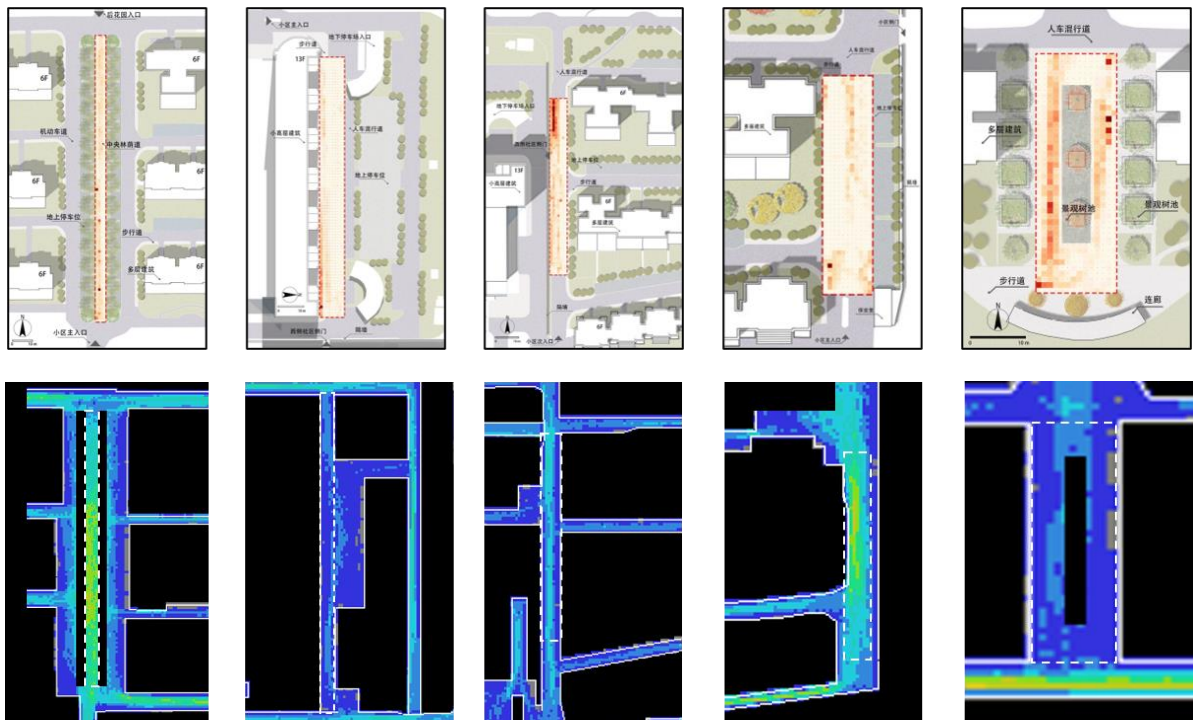


图 5-15 居住区各公共开敞空间微观使用模式与模拟结果对比

研究在定性分析的基础上使用回归分析的方法对居住区各公共开敞空间穿行行为的微观使用模式模拟的有效性进行了检验。回归模型中的自变量为视域模型中计算得出的步深为 6 的视域整合度值与代理人模拟中获得的各空间网络的累积值代理人门数（Agent Gate Count），因变量为微观使用情况测度结果中获得的各空间网络的穿行行为累积值。其中视域整合度为控制变量。

研究结果显示（表 5-2），除绿廊空间外的居住区四个主要公共空间（林荫大道、商业综合体北侧空间、东南出入口空间和中部公共开敞空间）回归分析结果中，代理人门数的 p-value 值均小于 0.001，且 β 值均为 10 至 20 之间，说明在不同空间代理人模拟的结果均能较好的反映实际的穿行行为的空间偏好特征。绿廊空间方面，其中人行空间被停放的机动车所挤占，因此居民的穿行行为受到的较大限制，可以用于解释此空间代理人门数与穿行行为数量的相关性不显著的现象。作为控制变量的视域整合度，在四个空间中仅在中部公共开敞空间中 p-value 值小于 0.001，而在其他空间中 p-value 值均大于 0.001，且 β 值在不同空间中变化较大，反映出其数值与穿行行为没有显著的相关性。上述结果说明，研究中穿行行为微观使用模式模拟方法能够较好的模拟实际空间使用模式。

表 5-2 紫荆雅园穿行行为回归分析

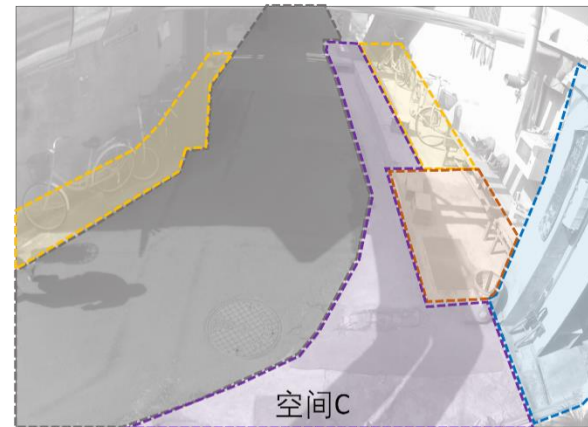
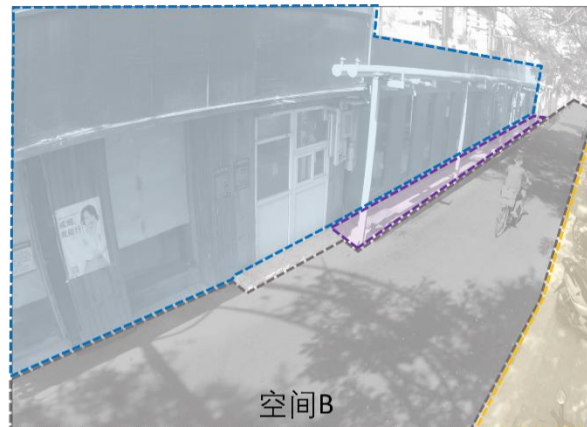
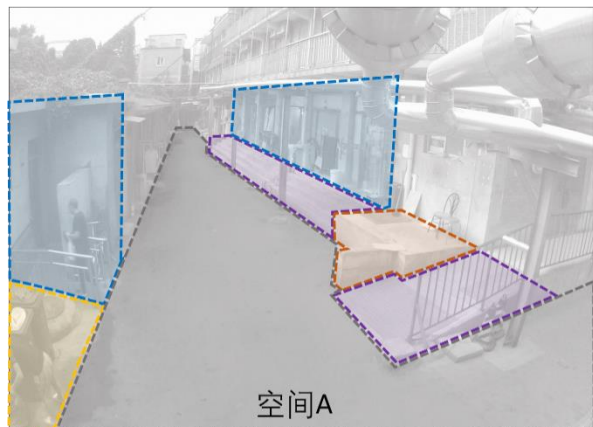
研究范围	视域整合度		代理人门数	
	β	p-value	β	p-value
林荫大道	-145.4622	0.057	19.9701	0.000
商业综合体北侧空间	80.6148	0.158	19.5544	0.000
绿廊	52.8558	0.242	-2.3596	0.210
东南出入口空间	-22.2915	0.002	19.7431	0.000
中部公共开敞空间	-13.6714	0.000	14.3604	0.000

（2）停留行为微观使用模式模拟有效性检验

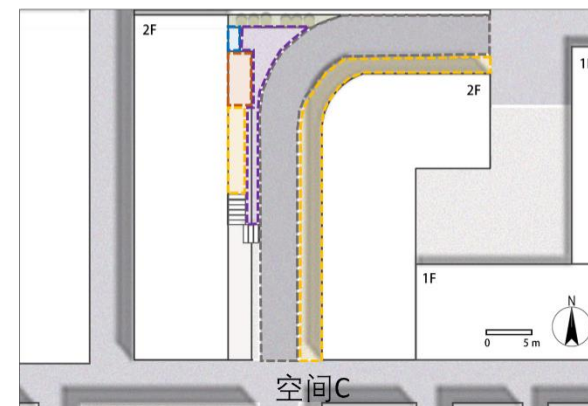
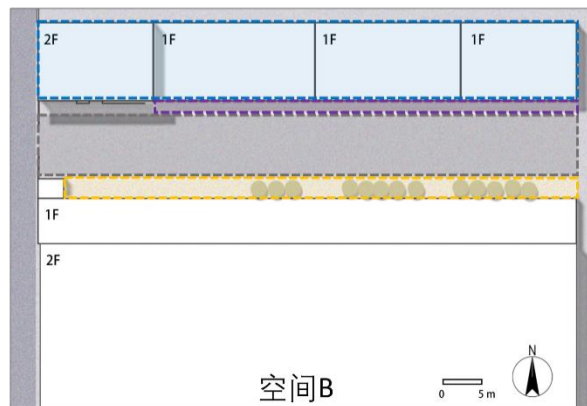
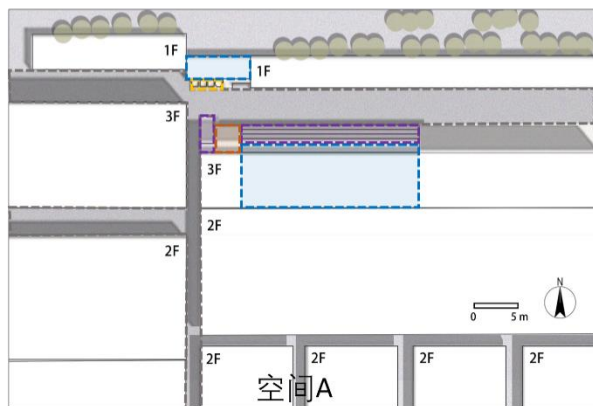
研究中为验证停留行为微观使用模式模拟过中将不同设施纳入模拟模型中的有效性，对空间中不同设施对停留行为与穿行行为的影响通过相关性分析加以检验。研究中选取水磨社区三处主要公共开敞空间作为研究对象，根据现场调研绘制出其中功能性建筑（包含对穿行行为有吸引力的商铺截面与墙面）、室外座椅、台阶与设施（垃圾桶、公共厕所等）（图 5-15）。

通过应用研究中提出的穿行行为与停留行为微观使用模式测度方法，研究中获取了各空间 1 平方米空间颗粒度分析单元中的累积的穿行行为数量（图 5-17）与停留行为数量（图 5-18），并将穿行行为数量与停留行为数量的差值——穿行行为数量与停留行为数量作为回归分析的因变量。而回归分析的自变量为统计获得的各分析单元与 5 种不同设施的最近距离。此外研究中分析了自变量的自相关性，并以自相关系数小于 0.8 的自变量作为最终回归分析中使用的自变量（图 5-19）。其中空间 A、B、C 的设施相关自变量数量分别为 2、3、5 个。

图像中设施位置



平面中设施位置



- 功能性建筑
- 室外座椅
- 台阶
- 设施
- 道路

图 5-16 水磨社区公共开敞空间设施位置

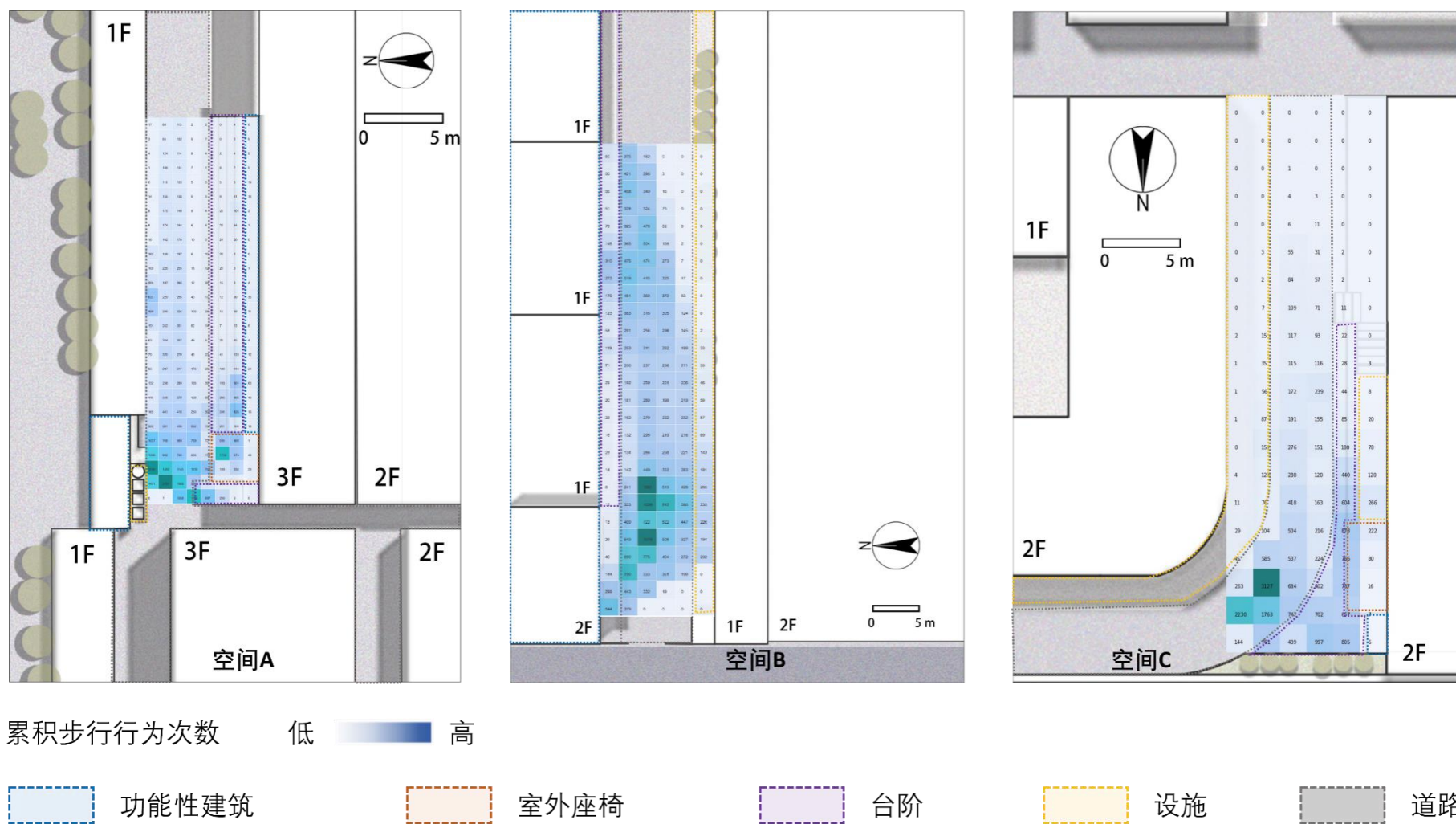


图 5-17 水磨社区公共开敞累积穿行行为次数与空间设施位

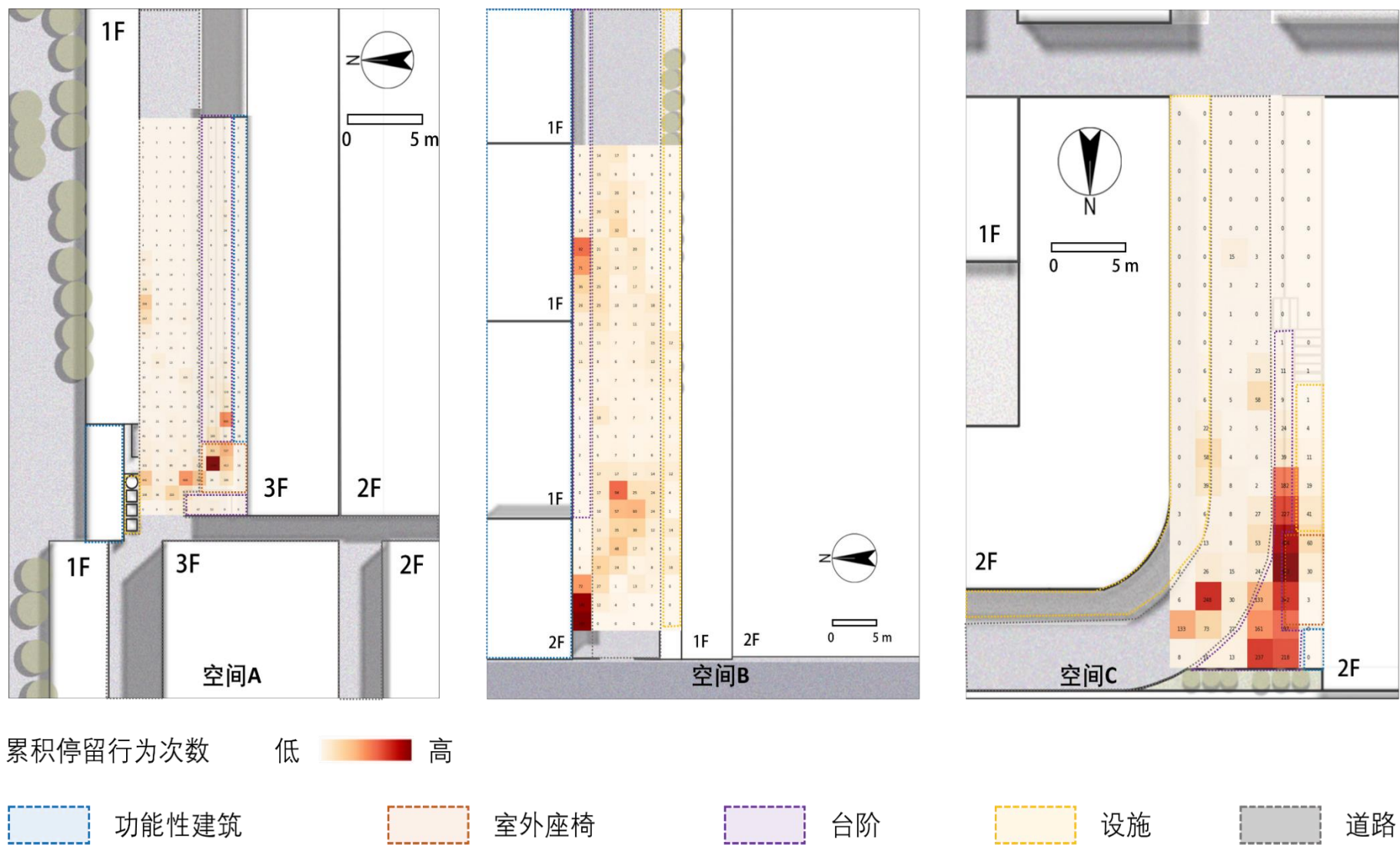


图 5-18 水磨社区公共开敞累积停留行为次数与空间设施位置

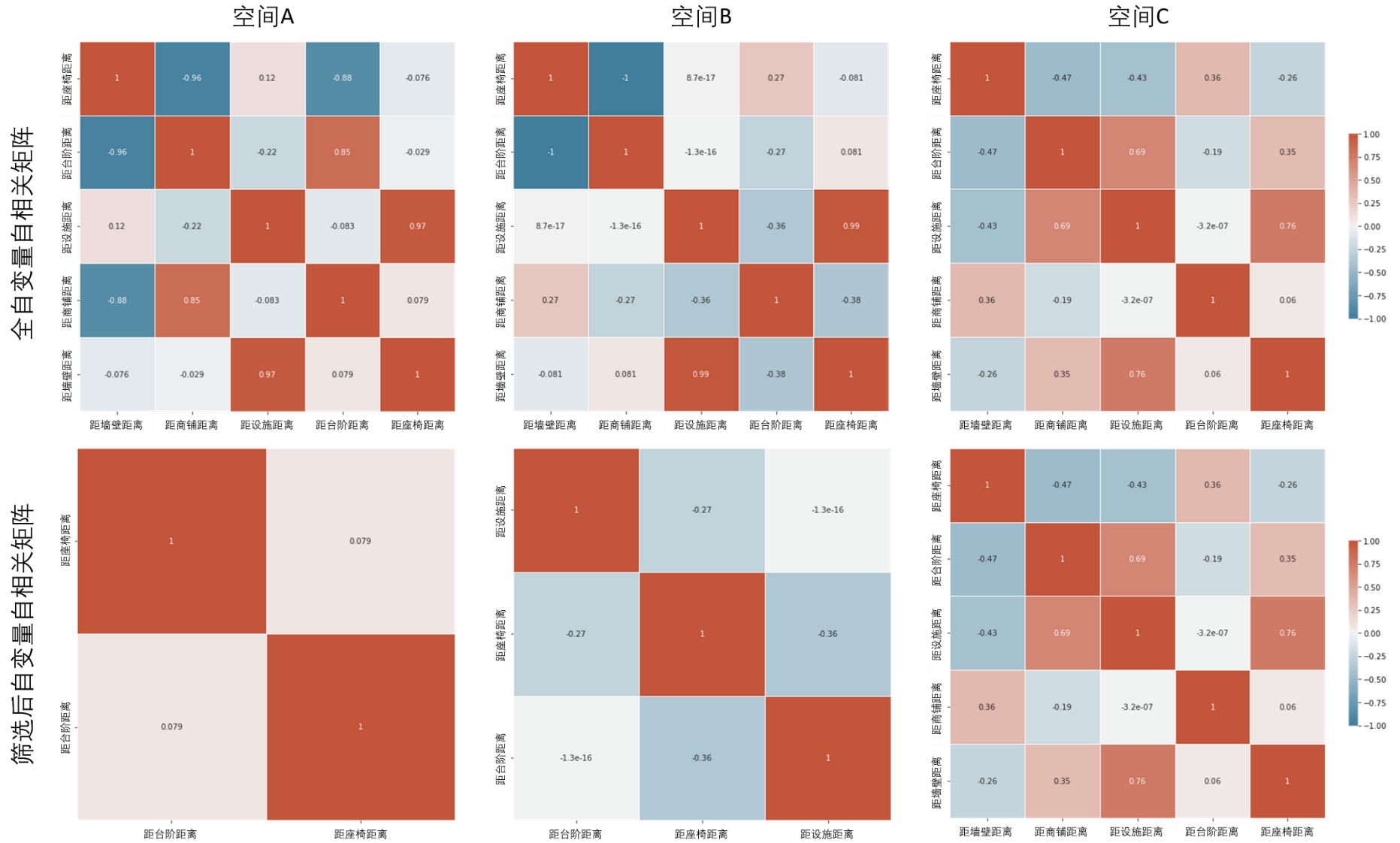


图 5-19 穿行与停留行为设施回归分析自变量自相关矩阵

研究中分别对三个空间中的穿行行为与停留行为构建了回归模型。其中穿行行为的回归模型自变量为分析单元距各设施距离。回归分析结果显示（表 5-3），三处空间的穿行行为均与距台阶距离成正相关，且与座椅距离成负相关，即距离台阶越远、距座椅距离越近累积穿行行为数量越高。而对于空间 C，距墙体距离也是穿行行为的重要影响因素，其结果为较高的正相关，即距离墙体越远累积穿行行为的数量越高。此结论能够较好的通过环境行为学理论进行解释。

而对于停留行为，其使用穿行行为进行过程中产生的行为，因此对其进行空间要素回归分析中添加了累积穿行行为数量作为因变量。为保证回归分析的可靠性，研究检验了停留行为与穿行行为的自相关性，发现各空间二者的自相关系数均小于 0.8，因此可用于进行回归分析。回归分析结果显示（表 5-4），各空间停留行为均受穿行行为影响较大，即穿行行为数量越多的空间停留行为数量也越多。这一点与环境行为学观察结果相符合。而不同类型空间的停留行为受空间要素的影响方式有所差异。对于休闲比例较高的空间 A 和空间 C，距座椅距离均成一定的负相关性，即座椅周边穿行行为多的地区容易使人停留，但交通行为为主的空间 B 座椅对停留行为的影响较小。此外同类型的空间 A 和空间 C，由于前者的台阶为多阶且宽度较窄，对停留行为影响较少，而空间 C 的台阶仅为一阶且较宽，因此对停留行为有较强的负相关性。上述分析结果显示空间要素确实在穿行行为的基础上对停留行为具有较强的影响力，从而验证了将空间要素添加入居住区公共开敞空间停留行为微观模拟模型的有效性，并能够提升模型的准确率。

表 5-3 水磨社区穿行行为回归分析

研究范围	调整后 R ²	自变量名称	β	p-value
空间 A	0.442	距台阶距离	0.3285	0.000
		距座椅距离	-0.4383	0.000
空间 B	0.145	距商铺距离	-0.2206	0.001
		距台阶距离	0.3230	0.008
		距设施距离	0.0466	0.553
空间 C	0.717	距墙体距离	0.4885	0.000
		距设施距离	-0.0817	0.417
		距台阶距离	0.1952	0.002
		距座椅距离	-0.2429	0.005
		距商铺距离	0.0474	0.604

表 5-4 水磨社区停留行为回归分析

研究范围	调整后 R ²	自变量名称	β	p-value
空间 A	0.663	距台阶距离	-0.0274	0.377
		距座椅距离	-0.2209	0.000
		累积穿行行为	0.5909	0.000
空间 B	0.635	距商铺距离	-0.0818	0.036
		距座椅距离	0.0611	0.379
		距设施距离	0.0440	0.317
		累积穿行行为	0.6384	0.000
空间 C	0.754	距墙体距离	-0.3328	0.002
		距设施距离	0.1088	0.364
		距台阶距离	-0.3078	0.000
		距座椅距离	-0.2867	0.009
		距商铺距离	0.0754	0.488
		累积穿行行为	1.3522	0.000

5.4 本章小结

本章通过研究与分析空间网络与流网络之间的关系，提出居住区公共开敞空间在宏观及微观尺度的使用模式模拟方法。具体来讲，本章针对已有模型忽略不同行为的空间偏好及其在不同空间占比的差异，以及由于缺少精细尺度测度数据支撑难以明确模型及参数选择的问题，根据已有研究揭示的活动空间偏好特征，提出针对不同尺度不同行为的模型假设，并通过在两个实验区域研究，分析模型结果与测度结果的相关性，从而验证研究提出模型的有效性。居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟的创新点是基于已有研究提出的交通行为更在意道路的连接关系，休闲行为更重视视觉要素及视线引导的活动差异及特征，提出研究假设：交通行为测度数据与空间句法线段模型模拟结果有较强相关性，同时休闲行为测度数据与视域模型模拟结构更加相关。

研究通过紫荆雅园的实验和回归结果验证了这一假设。居住区公共开敞空间微观使用模式模拟的创新点在于进一步考虑不同行为在微观尺度的表征，并提取微观尺度能够影响穿行及停留的要素，在第4章测度结果的基础上，通过空间句法代理人模型及空间分析实现对模型结果可靠性的验证。研究揭示出不同尺度不同行为的空间偏好差异，回应已有定性及行为研究的结论的同时进一步通过鲁棒性检验选择合适的模型及模型参数，可用于其他居住区公共开敞空间使用模式的模型。

第6章 基于使用模式测度与模拟的居住区公共开敞空间优化

6.1 居住区公共开敞空间优化

6.1.1 已有研究局限及解决思路

已有研究的空缺/挑战为：以往居住区公共开敞空间作为居住建筑的附属存在，往往被规划设计及建筑设计者忽视，因此设计通常是以供给为导向的，居民只能被动适应建设结果并在较长的自下而上的互动中改变空间的功能、形态及要素。近年来，建筑领域的“前策划-后评估”方法被应用到居住区公共开敞空间中，强调设计前的策划与方案模拟，以及建设使用后的评估改造。然而，受限于已有研究测度数据的精度和成本，相关定量分析与模拟方法在应用到具体实践中仍面临诸多问题，如难以长时间评估、观测与评估对象的灵活性不足、设计与更新改造的研究支撑不足等。

针对以上局限，本研究的解决思路为：将“前策划-后评估”的流程性工作拆解为针对不同建设时期的居住区公共开敞空间的空间优化方法。具体来讲，空间优化路径分为适用于小规模更新的基于“后评估”的设计改造与适用于新建或大规模更新的基于“前策划”的设计模拟两条路径。“前策划”中的模拟方法可应用于新建居住区设计方案的模拟及比选；“后评估”中的居住使用模式评估可应用于老旧小区的问题识别与更新改造方案建议。因此，研究将第4章使用模式测度的结果应用于老旧小区的空间优化，将第5章使用模式模拟的结果应用于新建居住区的方案比选。

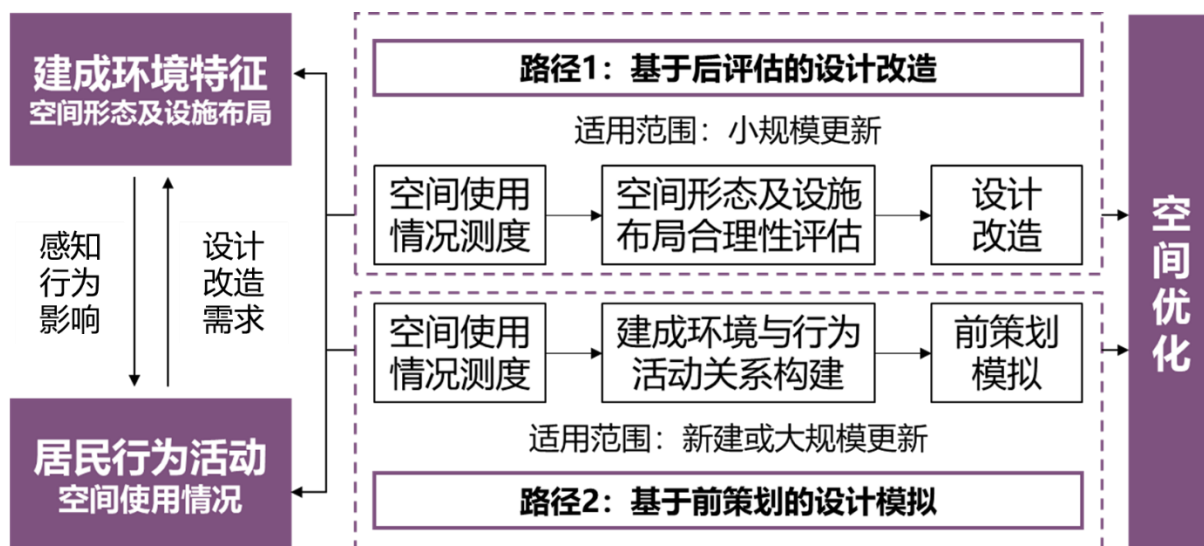


图 6-1 居住区公共开敞空间使用模式研究支撑空间优化的路径

6.1.2 居住区公共开敞空间优化框架

研究提出两个空间优化路径：路径 1 针对老旧小区，可通过对居住区内公共开敞空间的使用模式的测度判断空间使用的主要功能、评估空间布局及形态及相应设施的合理性、监测异常活动，识别空间问题，从而支撑居住区公共开敞空间的更新改造；路径 2 针对新建居住区，可通过第 5 章构建的模拟模型及参数模拟设计方案的社会活动效益，并根据模拟结果进行方案比选。由于两种路径方法的差异，前者通常用于小规模更新中，用于支持空间边界的调整和设施布局的优化。后者则可用于新建或大规模更新中，用于支持公共开敞空间的布局及大小设计。研究以紫荆雅园及水磨社区为例示意路径 1 基于使用模式测度的空间优化过程及结果，以杨坨中区社区为例示意路径 2 基于使用模式模拟的空间优化过程及结果（图 6-2）。



图 6-2 基于居住区公共开敞空间使用模式测度的评估方法

6.2 基于使用模式测度的居住区公共开敞空间优化

6.2.1 基于宏观使用模式测度的居住区公共开敞空间优化

6.2.1.1 居住区公共开敞空间宏观使用模式测度结果

居住区公共开敞空间宏观使用模式测度的维度主要从时间、空间与活动类型三方面展开。其中活动类型分为交通行为与休闲行为这两种居住区公共开敞空间中占主导性且空间偏好有较大差异的行为。时空间类型方面，不同时间比较的后评估主要针对同空间不同时间使用强度，不同空间比较的后评估主要针对不同空间同时间的使用强度比较，而不同时间与空间比较主要针对不同时间与空间使用强度一致性比较与空间联系性。时间属性方面，同空间不同时间使用强度比较分为按工作日与周末以及按小时两种类型；不同空间同时间的使用强度比较亦主要分为按工作日与周末以及按小时两种类型；不同时间与空间比较主要针对不同时间与空间使用强度一致性比较则分为按工作日与周末以及按时段两种类型，以整合具有类似使用模式的按小时划分的时间段；而空间联系性分析仅针对全时段这一种时间维度。

(1) 基于人次与人数差异的空间主要功能判断

研究中通过将各空间的人次及人数数据均一化至 0-1，使二者具有可比性（附图 1）。研究结果显示居住区主要及次要出入口（9、12 号设备）的交通行为占比更高，说明这两个空间以交通为主要功能，西北出入口（1 号设备）的休闲活动占比也相对较低，同样符合出入口的主要功能。而林荫大道（2-4 号设备）及中央空间（6-7 号设备）具有更显著的人次高于人数的特征，即反映出空间以休闲为主要功能。紧邻出入口且位于道路节点处的空间（5、8、10-11 号设备），因此呈现休闲活动略高于交通活动的特征，即反映出空间以交通与休闲活动混合的主要功能（图 6-3）。

(2) 基于活动强度时间分布的空间功能聚类

研究在比较各空间的人次及人数占比差异基础上，进一步分析了各空间在早高峰（6:00-9:00）、日间（10:00-15:00）、晚高峰（16:00-19:00）及夜间（20:00-23:00）时间段的休闲与交通活动强度的相关性。聚类分析结果显示，绝大多数交通活动情境下小区两个主要南侧出入口空间（5、12 号设备）处在同一聚类结果中，其结果符合空间布局特征，均为交通流相对集中的区域。结果还揭示出多数休闲活动情境下 1 号、8 号、9 号设备所在空间也呈现相似特征，表明这些空间都具有相似的休闲活动特征。6 号空间通常与其他所有空间呈现不同的特征，由于其位于居住区中心，其拥有较低的交通活动但由于位于中心花园，又有较高的休闲活动。研究进一步补充了基于人次及人数差异识别的空间主要功能，识别具有相似活动规律的公共开敞空间（附图 2 和附图 3）。

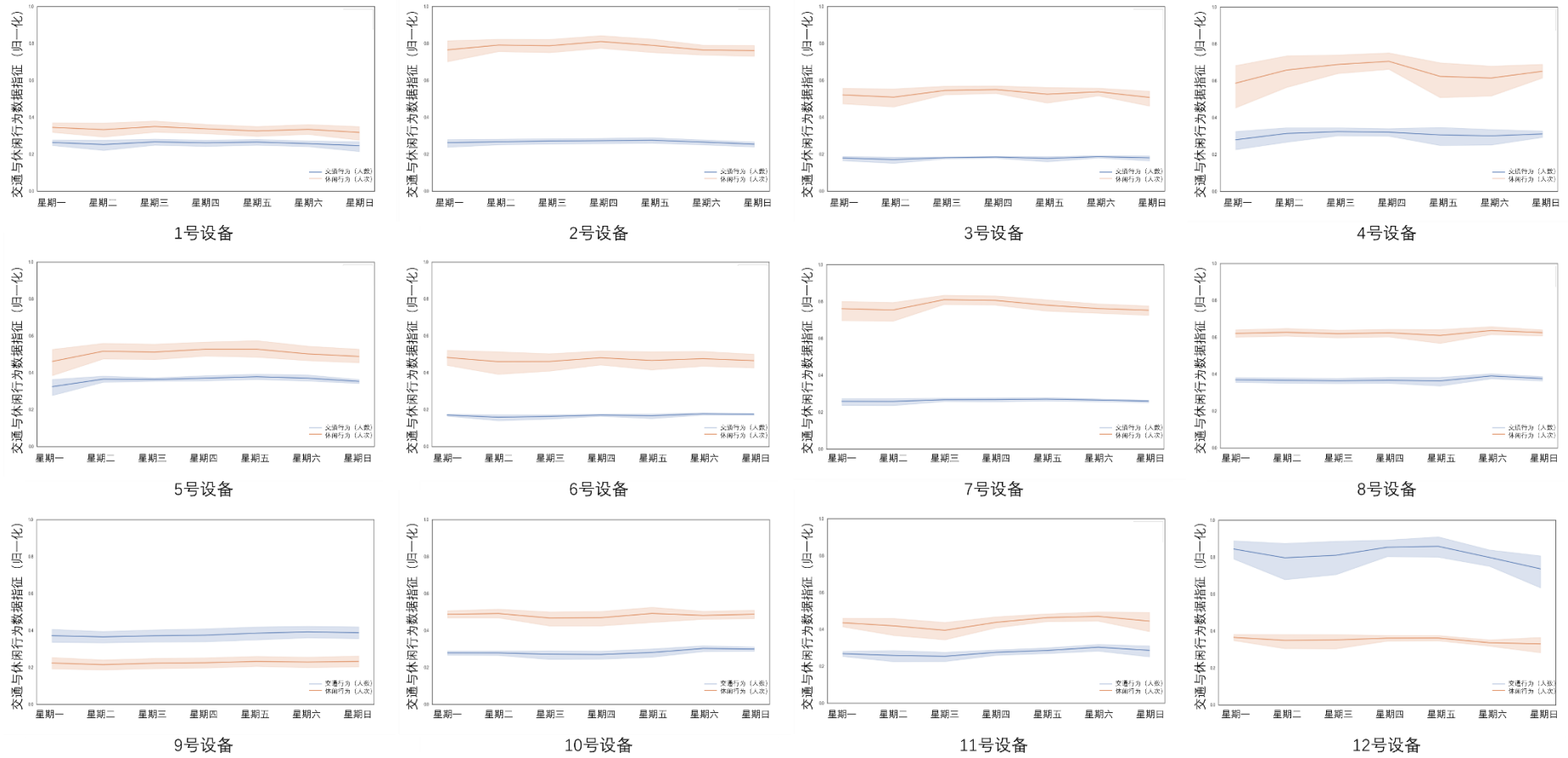


图 6-3 居住区各空间不同星期数交通与休闲行为使用模式

(3) 基于活动强度的各空间活动时间特征识别

研究根据各设备记录的休闲及交通行为强度在不同小时的分布特征分析居住区内居民在不同空间活动的时间规律。研究揭示出休闲行为的波峰相对平缓,而交通行为具有较为显著的潮汐效应(附图4和附图5)。对比各空间交通及休闲行为的活动强度可知,5号及12号设备所在的居住区入口空间具有更显著的交通活动波峰,且在工作日的交通行为强度随时间变化比周末更剧烈。而设备6、7设备位于中部空间,以休闲活动为主,因此在活动的时间分布更加平缓。设备2、3、4所在的西北林荫大道的休闲活动最高,反映出相较于中部空间或其他区域,居民更愿意在此处进行休闲活动,这也反映出已有研究揭示出的休闲活动是交通活动基础上展开的活动,因此一定的交通流量可以激发更多的休闲活动,而交通活动较低的9、6、7号设备所在空间也拥有较低的休闲活动(附图6和附图7)。

(4) 基于空间使用联系性的活动空间特征识别

研究中根据Wi-Fi探针设备亦可获取各居民使用不同居住区公共开敞空间的顺序,从而获知各空间的活动联系性,揭示居住区内居民使用空间的空间规律。具体方法为:将Wi-Fi探针数据按照收集日期进行分组;按照代表数据来源居民的MAC地址进行分组并根据数据收集的时间从早至晚进行排序;统计前后两个时间点其对应空间位置的变化,并汇总为路径信息,而居民在两空间之间移动一次即视为两空间的联系度加一(图6-4a);将居民在一日内不同空间之间移动的路径结果汇总至空间联系性矩阵中;重复上述过程,将获得数据收集全周期内累积空间使用联系性的汇总矩阵(图6-4b);根据空间使用联系性矩阵及各公共开敞空间在居住区中的位置,绘制各空间之间的连线,并根据线宽反映不同空间之间的使用联系性,以进行空间使用联系性的可视化(图6-4c)。而通过对数据收集时间段和日期进行筛选,此方法也可用于分析不同时间范围(如每日不同时间段或工作日与周末)的空间使用联系性。

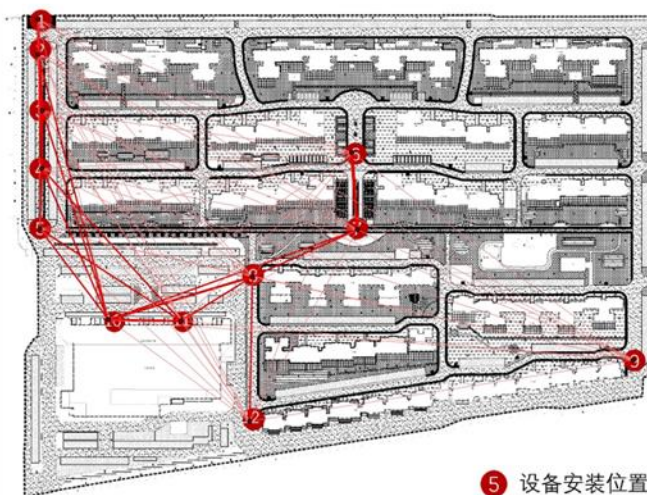
全时段各空间使用联系性比较方面,研究对象呈现出比较明显的四个空间组团,分别为居住区西北公共开敞空间、居住区西部高层住宅旁的公共开敞空间、居住区中部公共开敞空间以及居住区东南出入口空间。其中居住区西北公共开敞空间内部联系较为紧密,并与居住区西部高层旁的空间有一定的联系性,而后者与居住区中部空间具有较强联系性;居住区东南出入口亦主要与居住区中部公共开敞空间有一定的联系性。居住区整体呈现西北至西中部与西部至东南部两组空间联系带,且呈现出居住区西部各空间之间联系性较强而东部空间联系性较弱的结果。而居住区中部的6、7号空间与其他空间联系性均较低,反映出居民常用穿行路线中不包括此空间。空间组团内部联系度方面,西北空间内互相联系度较高,而西南空间内部联系度与外部联系度没有显著差异,体现出空间使用模式的差异。

Mac地址	日期	路径
009c2b9fd	2018/8/29	Origin
009c2b9fd	2018/8/29	10-10
009c2b9fd	2018/8/29	10-11
009c2b9fd	2018/8/29	11-11
009c2b9fd	2018/8/29	11-8
009c2b9fd	2018/8/29	8-11
009c2b9fd	2018/8/29	11-10
009c2b9fd	2018/8/29	10-8
010d64115	2018/8/29	Origin
010d64115	2018/8/29	12-8
01f5ea7b3b	2018/8/29	Origin
01f5ea7b3b	2018/8/29	8-8
01f5ea7b3b	2018/8/29	8-12
01f5ea7b3b	2018/8/29	12-12
01f8a17cd4	2018/8/29	Origin
01f8a17cd4	2018/8/29	3-8
01f8a17cd4	2018/8/29	8-3
022ef46c58	2018/8/29	Origin
022ef46c58	2018/8/29	3-5
022ef46c58	2018/8/29	5-5
024f9a50b	2018/8/29	Origin
024f9a50b	2018/8/29	10-6

a. 居民空间移动路径

空间	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	9号	10号	11号	12号
1号		263276	207211	41753	53923	333	888	3665	765	16198	12634	717
2号	263353		838489	201407	132003	3621	828	17472	587	34615	24878	703
3号	204982	834290		324320	231550	1155	1012	39626	536	106362	83031	496
4号	41916	204285	320232		119853	923	1314	35691	304	112988	47007	680
5号	94527	131426	230514	119662		831	2160	29690	509	136015	132023	2217
6号	465	3797	1108	1044	831		36068	2723	514	2802	937	498
7号	1072	847	1015	1335	2235	35972		69108	860	149152	40415	1447
8号	3734	17301	39201	35527	30332	2976	69715		2257	261854	191994	257753
9号	813	515	417	264	512	549	739	2009		416	274	2112
10号	15978	34184	105939	112861	135966	2693	149084	262108	446		278539	6652
11号	12274	24672	83163	46795	131436	982	40534	192333	295	278221		6461
12号	647	581	328	594	1955	497	1323	260272	2010	6467	6395	

b. 空间使用联系性矩阵



c. 空间使用联系性可视化结果

图 6-4 空间使用联系性测度方法示例

各空间的联系性不仅体现在联系性上，也可以通过不同空间净出入人流量反映（附图 8）。研究中各空间净出入人流量的计算方法为两空间互相联系数量的差值。此种方法考虑了步行行为的流向，即区分出度与入度的差异。在全时段空间使用联系性差异方面，居住区西北空间内部联系性差异较大，具体为 2 号至 3 号空间、3 号至 4 号空间的空间联系性比反向高，而 4 号至 2 号空间联系性亦比反向高，反映出居民在西北空间组团从北向南的空间移动更为集中，而从南向北活动方式更为分散。除各空间组团内部外，不同空间组团间以后一定的空间联系性差异。其中居住区中部组团至东南出入口空间的空间联系性差异也有此特征，即居民从居住区中部空间向东南出入口移动的空间路径更为集中，而反向移动的路径更为分散。而居住区西北空间组团至西南与中部的空间联系性亦高于反之，说明居民整体进行从西北向东南移动的空间路径更为统一，而从东南向西北移动的路径更为分散。

此外研究对比了工作日与周末全时段各空间使用联系性以及工作日与周末不同时段各空间使用联系性。总体而言工作日与周末不同空间的使用联系性具有较强一致性，而工作日与周末各时间段内的空间使用联系性也有较强一致性，均呈现居住区西北至西南以及西部至东南的空间联系带，其区别主要在于工作日与夜间各空间组团之间的

联系度有所降低，反映出此时间段内居民的活动范围有所缩减，且跨组团活动频次有所降低。相比于汇总的空间使用联系，工作日与周末空间净出入人流量差异更为明显。在工作日西北空间组团的内部空间净出入人流量仍呈现北向南较高的特征，但差异性有所降低，而在周末二者差异较高，说明该居住区居民在周末于西北组团内的活动路线在两个方向差异更大，此面体现出其在交通通勤外承担了更多样的休闲活动，且此类活动在工作日与周末的空间使用模式有所不同。而居住区西南空间组团中，在工作日 10 号与 11 号空间联系性差异较弱，但在周末有明显的 10 号至 11 号空间联系性强于反向的特征，反映出在周末居住区西南组团从西向东的移动路径比从东向西的反向路径更为集中的特征（图 6-5）。

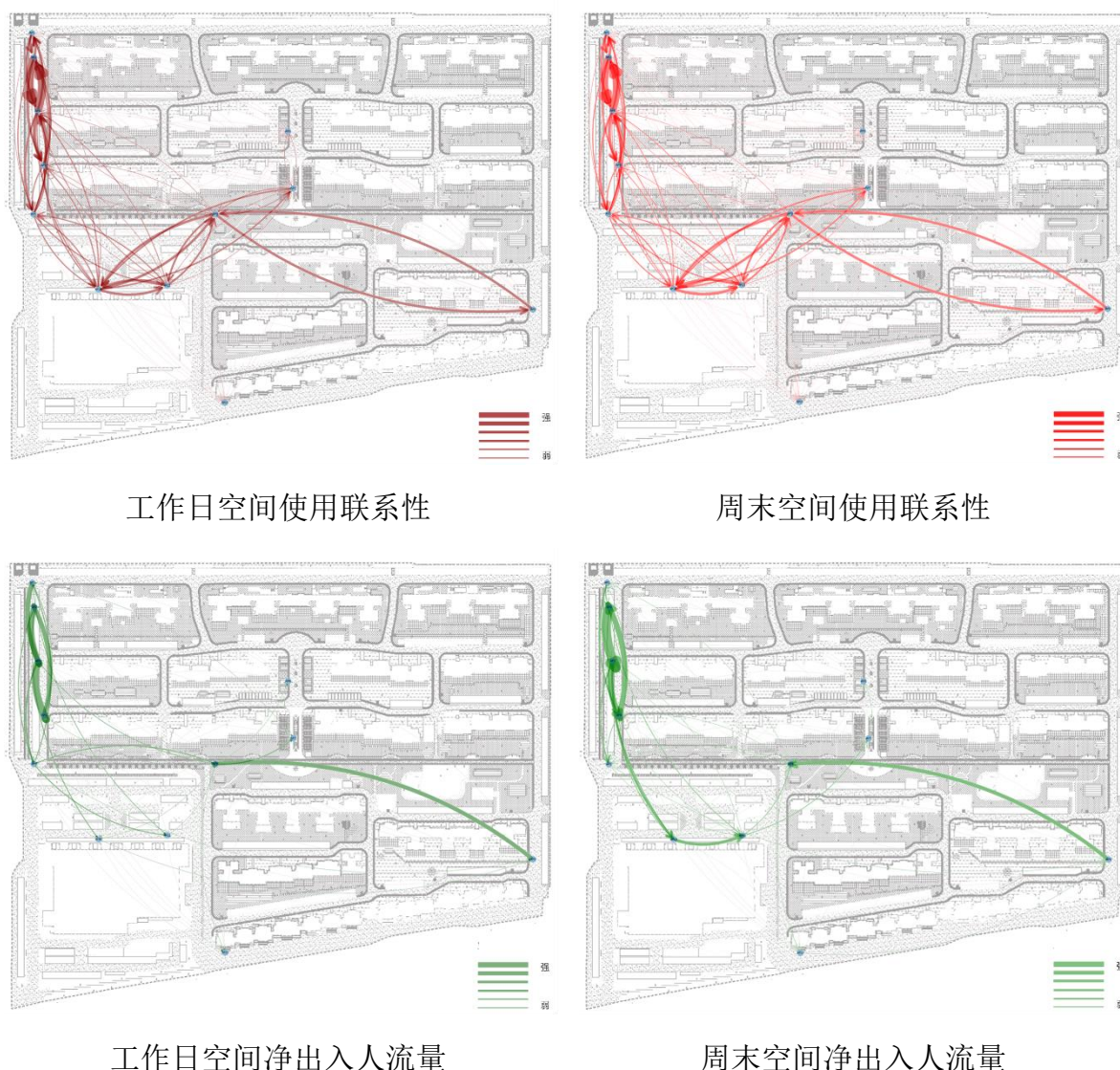


图 6-5 工作日与周末空间使用联系性与空间净出入人流量

不同空间组团之间的空间净出入人流量差异方面，工作日居住区西北组团与西南和中部组团有一定联系性差异，但总体较弱，而在周末则呈现出较强的西北向西南空间使用联系性高于反向的情况。结合西北与西南空间组团内部的差异，体现出在周末该居住区居民有从西北向南方向集中移动而从南向西北移动较为分散的特征。而对于中部空间与社区西南出入口的空间使用联系性，无论工作日与周末均呈现出从西向东南移动的路径集中程度高于东南向西移动的特征。说明此类行为在工作日与周末等不同时间广泛存在（附图9和附图10）。

6.2.1.2 基于宏观使用模式测度的居住区公共开敞空间评估与优化建议

（1）基于宏观使用模式测度的居住区公共开敞空间评估方法

本研究根据居住区公共开敞空间宏观使用模式测度结果量化刻画居民的空间使用需求，并根据各空间休闲行为与交通行为的使用模式对空间进行打分。休闲行为使用模式评分标准为根据各空间的日均人次等距分为五组，并又低到高记为1-5分。其中2、3号空间为5分，4、7-8号空间为4分，5-6、10-11号空间为3分，1、9号空间为2分，12号空间为1分（附图11）。交通行为使用模式评分标准与休闲行为类似，以日均人数作为打分标准。其中9号空间为5分，而由于其与其他空间日均人数差异较大，故没有空间为4分，因此次一级的5、8、12号空间为3分，1-4、10-11号空间为2分，6-7号空间为1分（附图12）。

评估内容方面，基于宏观使用模式测度的居住区公共开敞空间后评估主要分为以下几个层面：根据交通与休闲行为的空间使用强度，评估各公共开敞空间空间可步行面积占比的适宜性；根据交通行为的空间使用强度，评估步行设施连续性情况；根据休闲行为的空间使用强度，评估活动设施丰富度；根据交通与休闲行为均衡情况，评估现有公共开敞空间存在的问题。研究中通过将评估内所对应指标两两对比，并将其与基准线进行比较，获取最终评估结果。

空间大小的得分标准为，可步行空间在Wi-Fi探针所收集数据范围内占比越高则分值越高，其中1、6-7、9、12号空间为5分，10-11号空间为4分，5号空间为3分，2-4号空间为2分，8号空间为1分。步行设施连续性的打分标准为：空间中具不可穿行的完整步道为5分，空间中步道完整但可以横穿的为4分，空间中具有一定完整步道但不覆盖所有可步行位置的为3分，空间中步道不完整导致必须进行部分人车混行的为2分，空间中无步道的为1分。其中6-7号空间为5分，2-4、8号空间为4分，5、10-11号空间为3分，12号空间2分，1号空间为1分。休闲设施打分方面，研究中基于居民使用模式将设施分为植物景观、座椅、塑胶步道、绿荫四类，每种类别为1分，如果某空间上述设施均有则为5分，均无则为1分。其中2-4号空间为5分，6-7号空间为4分，5、8号空间为3分，10-12号空间为2分，1、9号空间为1分（表6-1）。

表 6-1 居住区公共开敞空间属性与使用模式得分表

评估维度	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	9号	10号	11号	12号
休闲行为使用模式	2	5	5	4	3	3	4	4	2	3	3	1
交通行为使用模式	2	2	2	2	3	1	1	3	5	2	2	3
可步行空间面积占比	5	2	2	2	3	5	5	1	5	4	4	5
步行设施连续性	1	4	4	4	3	5	5	4	2	3	3	2
休闲设施丰富度	1	5	5	5	3	4	4	3	1	2	2	2

(2) 居住区公共开敞空间活动空间面积适宜性评估及空间优化

研究中分析了各空间交通行为与休闲行为的空间使用强度以及对应空间的可活动面积，其中空间面积级别指数为空间大小得分，而综合行为强度为交通与休闲行为使用模式得分之和，即将两类行为的权重均设为 1。各空间面积比指数范围为 1 至 5，而综合行为强度指数为 4 至 7。由于空间面积级别应与综合行为强度对应，故理想空间的数值应分布在以 (1, 1) 为起点，(5, 7) 为终点的基准线上。各空间面积评估结果为：除 9 号设备对应的居住区东南入口外，居住区内各公共开敞空间可活动面积与使用强度呈现了一定程度的倒挂，即综合行为强度较大的空间中可使用的步行空间占比较低。面积级别相对于综合行为强度过大的空间为 10、11、7、1、6、12 号设备对应空间。其中 10 号与 11 号空间对应的居住区西南高层住宅北侧的公共开敞空间面积略大于综合行为强度。但由于其范围包含居住区的停部分车场空间，因此不需要进行大规模的设计改造。

而 1 号与 12 号设备对应的居住区西北与西南出入口空间需要保障紧急情况下的车辆进出，因此虽然空间面积级别均大于综合行为强度，但设计调整空间有限。6 号与 7 号设备对应的居住区中部公共开敞空间面积级别较大，但综合行为强度较低，说明其在超量设计的问题，其空间规模应进行一定的缩减，以提升空间的利用效率。而 2、3、4、5 号设备对应的居住区西北公共开敞空间均存在可活动空间面积级别不足的问题，应进行一定的空间设计优化，增加居民可活动范围。8 号设备对应的居住区中部公共开敞空间此问题更严重，应进行设计干预（图 6-6）。

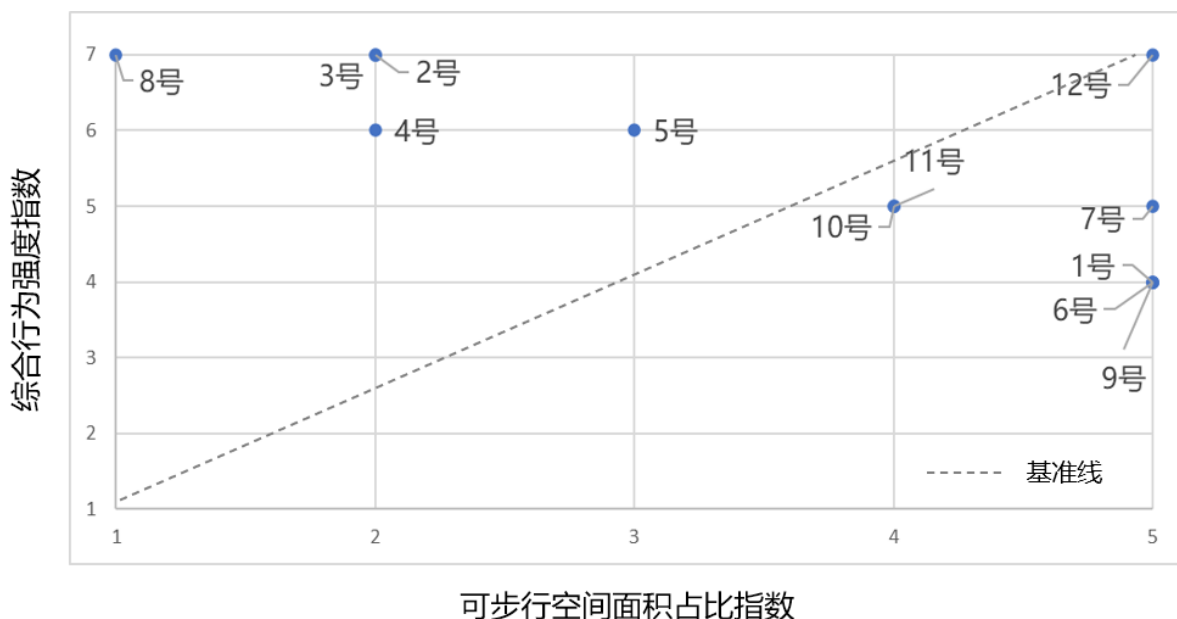


图 6-6 空间可步行面积占比评估结果

(3) 居住区公共开敞空间步行交通设施连续性评估及空间优化

研究中分析了各空间交通行为的空间使用强度以及对应空间的步行设施连续性。各空间步行设施连续性指数与交通行为空间使用模式指数均为1至5。由于空间步行设施连续性与交通行为空间使用模式对应，故理想空间的数值应分布在以(1, 1)为起点，(5, 5)为终点的基准线上，即交通行为使用强度越高的空间所具有的步行设施的连续性也越高。各空间面积评估结果为：除5号设备对应的居住区西北空间南端外，居住区各空间的步行设施连续性均存在与交通行为空间使用强度不匹配的问题，反映出基础设施的不完善。

然而虽然2、3、4号设备对应的居住区西北空间，6、7号设备对应的居住区中部空间，10号、11号设备对应的居住区西南部空间与8号设备对应的居住区西部空间存在步行设施连续性相对较高的现象，但由于优良的步行设施自身维护成本较低，且作为基础设施其品质越高对于居民的步行行为越有利，因此不需要进行大规模的设计改造。而1号、9号和12号设备对应的空间存在步行交通设施质量不足的问题。此三处空间作为居住区西北、东南与南部主要出入口，交通行为使用模式虽有差距但均存在步行设施连续性不足的问题。

其中1号空间为行人主要使用的空间，没有专供行人使用的步行设施；12号空间虽有步行设施，但仅在空间的一侧，且并不连续；9号空间的交通行为使用模式指数数值最高，但与12号空间一样在连续空间没有步道，需要进行空间设计优化以提升居民步行行为的安全性（图6-7）。

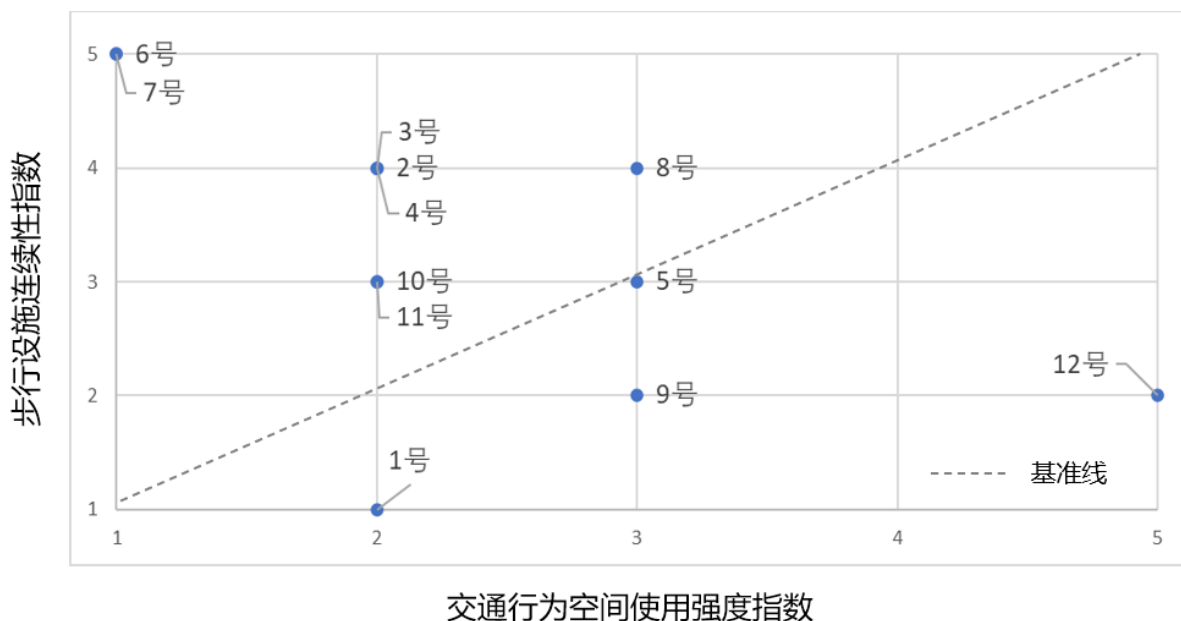


图 6-7 空间步行设施连续性评估结果

(4) 居住区公共开敞空间步行休闲设施丰富度评估及空间优化

研究中分析了各空间休闲行为的空间使用强度以及对应空间的休闲设施丰富度。各空间休闲设施丰富度指数与休闲行为空间使用模式指数均为1至5。由于空间休闲设施丰富度与休闲行为空间使用模式对应，故理想空间的数值应分布在以(1, 1)为起点，(5, 5)为终点的基准线上，即休闲行为使用强度越高的空间所具有的休闲设施的丰富度也越高。

各空间面积评估结果为：各空间休闲设施丰富度均与休闲行为使用模式指数呈现出较强的正相关性。其中2、3、5、7号设备对应空间的休闲行为使用模式均与休闲设施丰富度有好的匹配，因此不需要进行空间设计优化。4、6、12号设备对应的居住区西北公共开敞空间、居住区中部公共开敞空间与居住区南入口休闲设施丰富度略高于休闲行为使用模式，但差异较小，亦不需要大规模的空间设计优化。

1、8、9、10、11号设备对应的居住区西北出入口、居住区东南出入口、居住区西南高层住宅旁的公共开敞空间、居住区南部公共开敞空间，休闲设施丰富度略低于休闲行为使用模式指数，因此可以通过增加休闲设施的种类以提升居民在对应空间的休闲活动质量。其中1、8、9号设备对应空间可以适当增加座椅满足居民停留歇息与长时间交流的需求；10、11号设备对应空间可以适当增加植物景观，以进行微气候调节并改善居民心情；1、9号设备对应空间亦可以适当增加绿荫，使居民在居住区出入口附近活动时能够减少过量的日晒与雨淋情况（图6-8）。

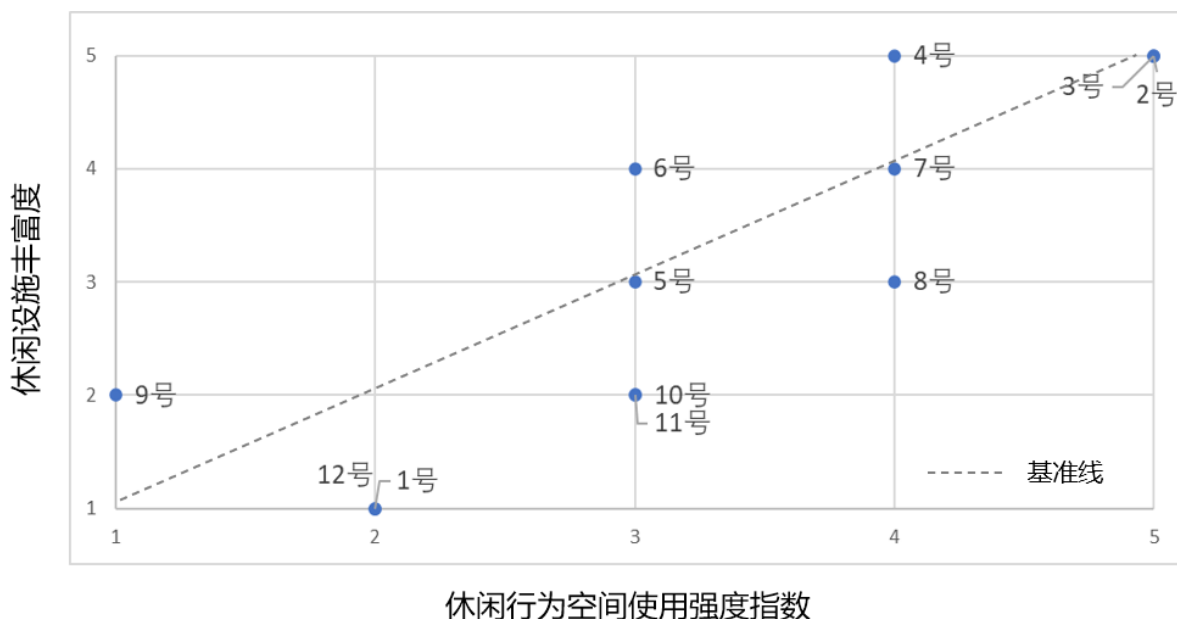


图 6-8 空间休闲设施丰富度评估结果

(5) 居住区公共开敞空间交通与休闲活动均衡性评估及空间优化

已有研究中认为交通行为是休闲行为重要的来源，因此二者应该具有一定匹配性。交通行为空间使用强度高而休闲行为低，则应设置供休闲行为的设施。反之则为空间浪费。研究中分析了各空间休闲行为的空间使用强度以及对应空间的交通行为的空间使用强度。各空间交通行为的空间使用强度与休闲行为空间使用模式指数均为 1 至 5。由于理想情况下居住区公共开敞空间中的休闲行为与交通行为空间使用模式呈现一定相关性，故各空间的交通与休闲空间使用模式指数的数值应分布在以 (1, 1) 为起点，(5, 5) 为终点的基准线上，即休闲行为使用强度越高的空间的交通行为使用强度也应当越高，以使二者达到均衡。

各空间面积评估结果为：各空间交通与休闲行为使用模式指数呈现出一定的不匹配性，主要原因为大部分空间休闲行为使用模式指数相对较低。居住区各公共开敞空间中，1、5 号设备对应空间的交通行为与休闲行为使用模式指数能够较高匹配，而 9、12 号设备对应的居住区东南与西南出入口的休闲行为使用模式相对较低，反映出此两处空间没有能够将交通行为转换为休闲行为，存在一定的空间浪费情况，应进行空间优化设计，以促进居民的休闲行为。2、3、4、8、10、11 号设备对应的空间交通活动使用模式相对较低，但与休闲行为较为接近，因此不需要大规模空间优化设计。6、7 号设备对应空间的交通行为明显较低，需要通过居住区内路网调整等方式增强其中的交通行为，以提升空间利用效率（图 6-9）。

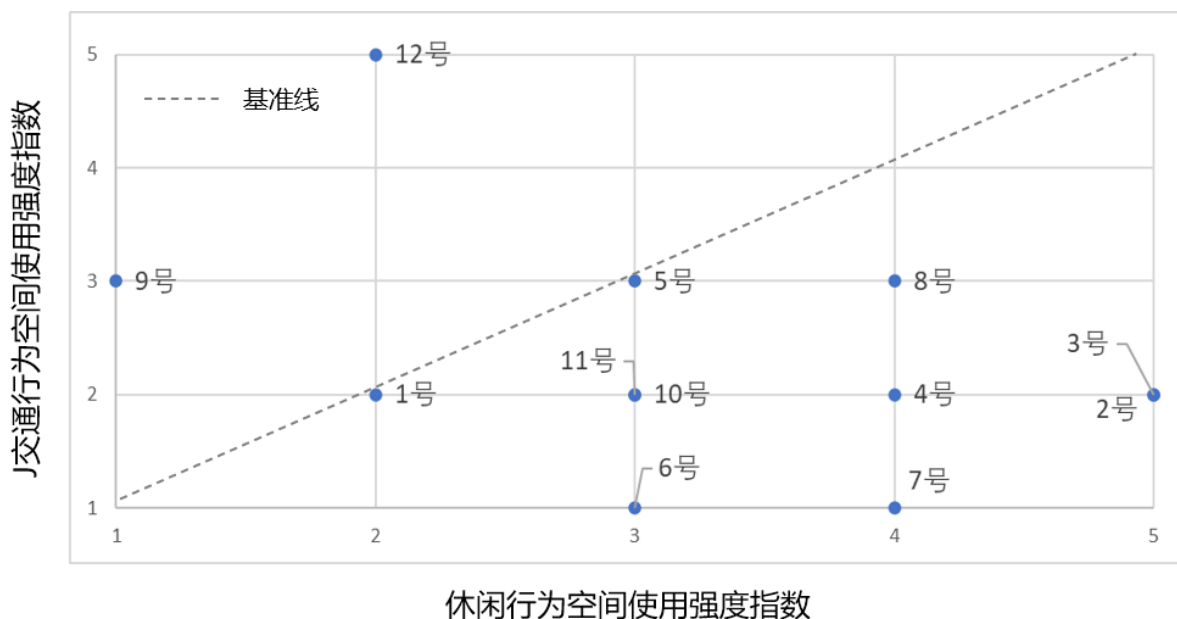


图 6-9 交通与休闲活动均衡性后评估

6.2.2 基于微观使用模式测度的居住区公共开敞空间优化

6.2.2.1 居住区公共开敞空间微观使用模式测度结果

(1) 基于视频数据的微观使用模式测度结果

通过观察居住区林荫大道空间的步行行为微观使用模式（附图 13）与穿行行为微观使用模式（附图 14）可以发现，居民在林荫大道南部倾向于更多使用空间西侧，而在林荫大道南部更倾向于使用空间东侧，而在林荫大道中部则更多使用中部空间。由于居民自北向南与自南向北的路径情况皆存在，因而此现象不是穿行行为是靠右行导致。此外在此空间西部及东北部与机动车道相邻的空间为居民自南向北与自北向南活动大幅减少的空间位置，说明一定数量的居民在此两处位置离开了该空间。

通过观察居住区商业综合体北侧公共开敞空间的穿行行为微观使用模式（附图 15）与穿行行为微观使用模式（附图 16）可以发现，该公共开敞空间东侧的步行空间不足，居民很多穿行行为发生在机动车道上。而此处为居住区地下停车库的出口，因此很有可能发生人车混行，造成安全隐患。而地上停车场各个行人出入口处均有指向步行道路的大量路径，但均需横穿机动车道且没有任何配到步行设施，进一步增加了步行行为的不安全性，并降低了空间使用效率。

通过观察居住区绿廊空间的步行行为微观使用模式（附图 17）与穿行行为微观使用模式（附图 18）可以发现，空间东侧的步行道路因其旁边大量停放机动车而可达性降低而几乎无人使用，因此居民的穿行行为几乎完全集中在西侧的机动车道上。此外很多居民的路径结束在绿廊中部西侧的出入口处，但此处无任何配套步行设施，并因与机动车混行存在安全隐患。

通过观察居住区东南出入口空间的步行行为微观使用模式（附图 19）与穿行行为微观使用模式（附图 20）可以发现，空间中南部的步行道路不连续，因此很多步行行为发生在机动车道上，并造成了交通安全隐患。而空间北部的东侧为停车空间，但距离住宅楼较远，故使用率偏低。而居民从东南向西北进行步行活动时没有步行设施，因此大量步行行为发生于停车场旁的机动车道上。

通过观察居住区中部公共开敞空间的步行行为微观使用模式（附图 21）与穿行行为微观使用模式（附图 22）可以发现，空间西侧沿花池步行行为角度，而沿西侧树池步行行为较少，而空间东侧此现象更为明显。总体而言，居住区中部公共开敞空间使用效率较低，步行行为集中在部分地区且被中部花池隔断，而空间中的很多其他位置几乎不被使用，存在一定的空间浪费。

（2）基于红外感应触发相机图像数据的微观使用模式测度结果

红外感应触发相机图像数据收集过程中，相机拍摄时间为2019年7月26日至2019年8月28日，各相机所拍摄图像分别为13131、12987和13606张，拍摄位置为水磨社区北部商业空间、南部入口空间与东部活动空间，拍摄时间大于主实验中各相机所拍摄的含有行人的图像数量，且包含不同的时间段，能够验证当不具备布设监控摄像头条件下进行数据收集的可行性，且可弥补视频拍摄过程中识别停留行为时间跨度不够的问题（图 6-10）。



北部商业空间

南部入口空间

东部活动空间

图 6-10 红外感应相机拍摄结果示例

居住区公共开敞空间微观使用模式测度的维度主要从时间、空间与活动类型三方面展开。其中活动类型分为穿行与停留行为等居住区公共开敞空间中占主导性且空间偏好有一定差异的行为，对应宏观的交通与休闲行为。时空间类型方面，不同时间比较的后评估主要针对同空间不同时间使用强度，不同空间空间比较的后评估主要针对不同空间同时间的使用强度比较，而不同时间与空间比较主要针对不同时间与空间使用强度一致性比较与空间联系性。时间属性方面，同空间不同时间使用强度比较分为

按工作日与周末以及按小时两种类型；不同空间同时间的使用强度比较亦主要分为按工作日与周末以及按小时两种类型；不同时间与空间比较主要针对不同时间与空间使用强度一致性比较则分为按工作日与周末以及按时段两种类型，以整合具有类似使用模式的按小时划分的时间段。

通过观察居住区北部商业空间的穿行行为微观使用模式与停留行为微观使用模式（附图 23）可以发现，居民的穿行行为大量集中在商业空间西北的道路交叉口区域。此空间具有垃圾桶和卫生间等基础设施，因此吸引了大量居民在此活动。但垃圾桶和卫生间均为卫生条件较差的区域，因此居民在此空间活动具有一定的健康隐患。停留行为方面（附图 24），此空间最主要的停留区域为垃圾桶和卫生间南侧的无障碍设施及平台。由于无障碍设施的坡道对商业店铺旁的台阶进行了切割，形成了不同高度的可作为座椅的空间，使很多因需要倒垃圾或入侧而来此区域活动的居民转为在此处进行停留行为。然而此空间可以直视进出卫生间的居民，一定程度上不利于保护个人隐私，且距离垃圾桶和卫生间较近，有一定健康风险，因此不是作为理想的停留场所。商业街空间内部，居民主要沿没有台阶的北侧活动，而南侧则铺满了台阶通向各家商铺，导致居民可活动空间不足，而商业街南部空间也没有得到充分利用，需要进行空间优化以提升空间的利用效率。

通过观察居住区南部入口空间的穿行行为微观使用模式（附图 25）与停留行为微观使用模式（附图 26）可以发现，穿行行为主要集中在人车混行道中部，且分布比较均匀，而停留行为主要分布在在西北角贴近出入口的位置以及北部商业空间一侧，然而此两处均没有足够的停留设施，导致西北角空间中需要居民自己携带板凳以满足自己的停留行为需求。应通过增加停留设施与留出停留行为使用的空间以满足当地居民的需求。另一方面，紧贴商业一侧的空间因设计问题导致居民无法使用，造成了一定的空间浪费，因进行空间优化设计与改造。

通过观察居住区东部公共开敞空间的穿行行为微观使用模式（附图 27）与停留行为微观使用模式（附图 28）可以发现，居民的穿行行为主要集中在公共开敞空间东北部的转角空间中。这是一方面是由于此位置视线收到遮挡，且存在人车混行情况，故居民在此位置使步行速度降低，导致的使用强度增加；另一方面是由于此空间缺少停放自行车的空间，故居住在西北侧居民楼的居民只能穿行至东北侧的建筑旁停放自行车，这进一步增加了此空间位置的使用强度。当总体而言这两种行为均为是居民不得已而为之，应通过空间优化减少居民横穿人车混行道的需要，以提升居民步行活动的安全性。停留行为方面，居民主要在东北侧居民楼前停留，并倾向与把台阶当做座椅。这说明居民缺乏适当的停留设施，且紧贴居民楼一侧的空间堆放了自行车以及杂物使居民无法使用，从而产生了空间浪费。

研究中对使用红外感应触发相机获取的工作日与周末居住区公共开敞空间微观使用模式测度结果进行了分析和可视化（图 6-11）。可以看出，不同空间工作日与周末的穿行行为微观空间使用模式有一定区别（图 6-12）。对于北部商业空间，工作日期间居民在空间拐角处公共卫生间旁以及对面的休闲平台进行的穿行行为更加密集，而在周末期间，居民在公共卫生间前的空间使用强度有所降低，而在商业街对面空间的使用强度有所提升，说明居民的穿行行为具有工作日集中在交通节点而周末集中在商业空间附近的特征。对于居住区的南部入口公共开敞空间，穿行行为在工作日及周末均存在一东一西两个使用强度较高的区域，且此两处区域均在商业店铺门口，说明居住区的居民部分工作日与周末的存在于店铺门口空间使用强度较高的特征。对于居住区东部公共开敞空间，在工作日与周末穿行行为空间使用强度最高的位置均位于空间的转角处，但在周末其居民楼前的空间使用强度更高。

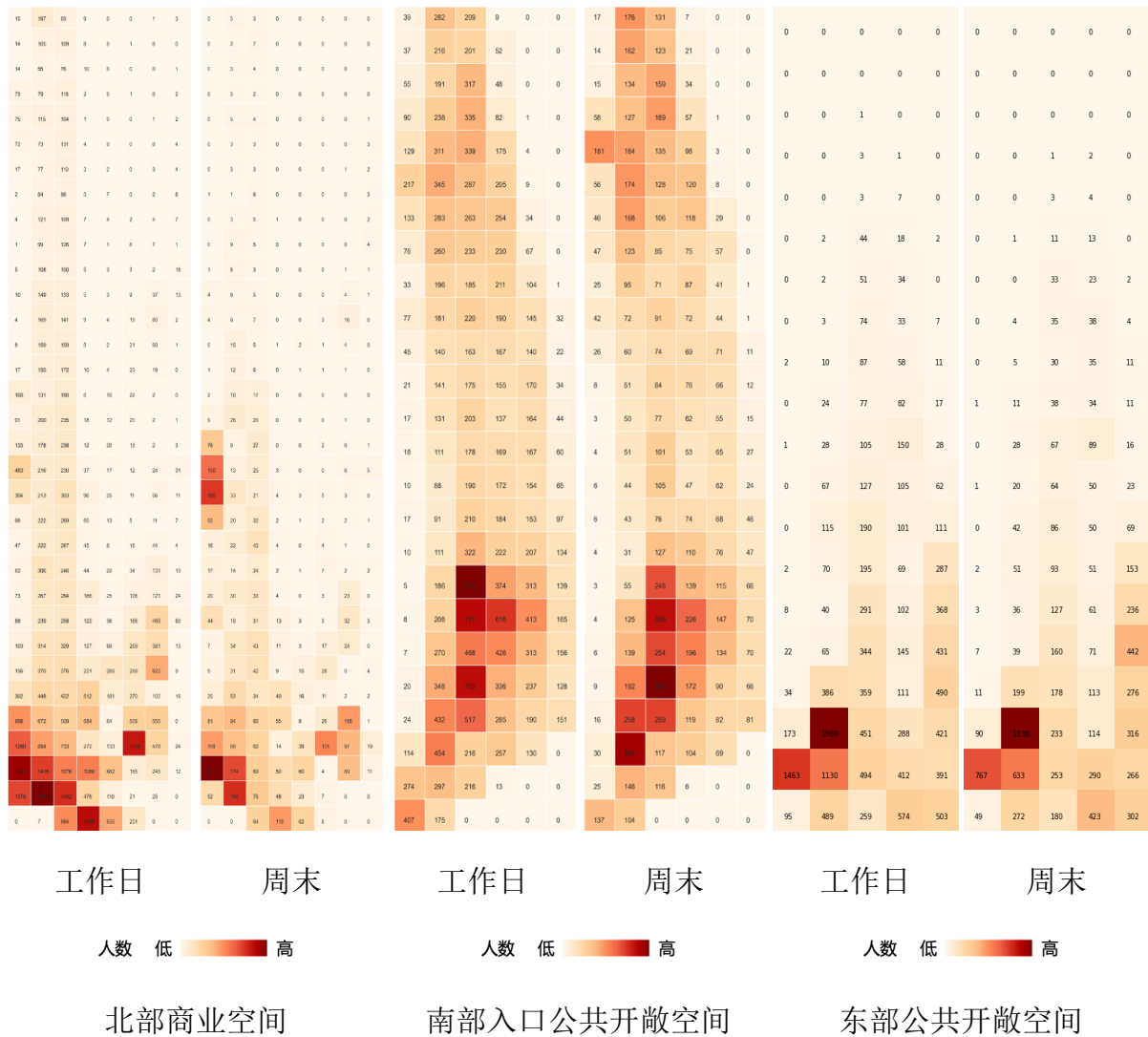
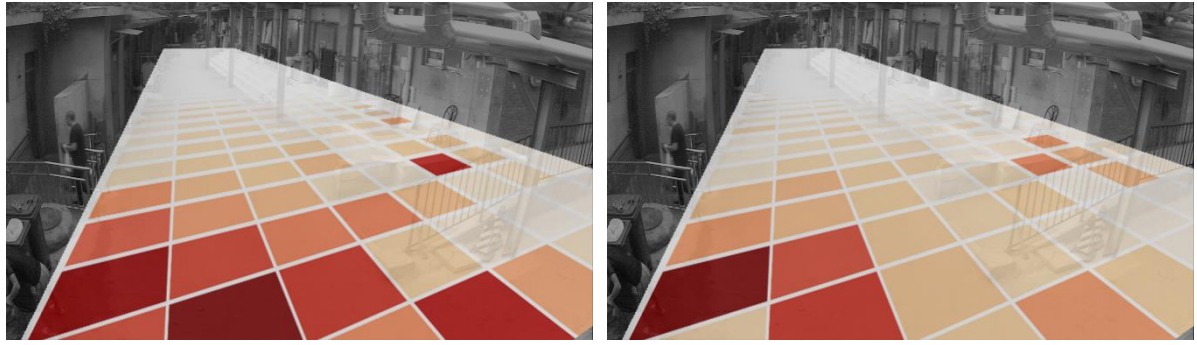


图 6-11 工作日与周末穿行行为空间微观使用模式



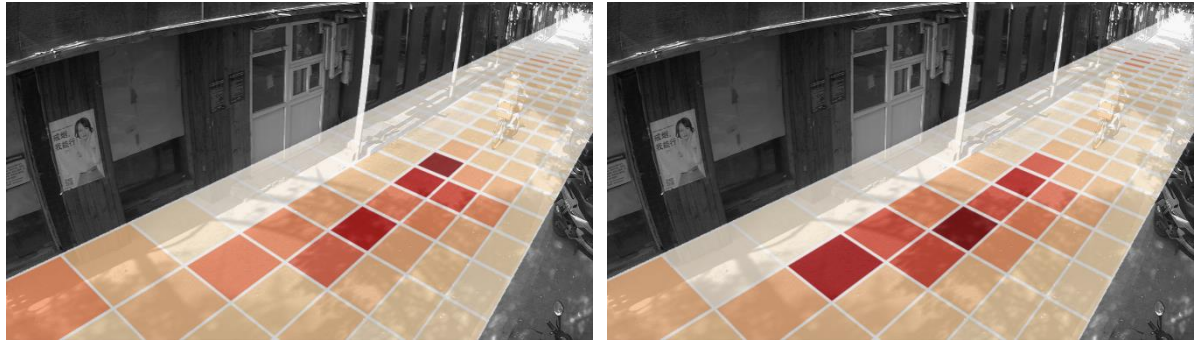
人数 低 高

工作日

人数 低 高

周末

北部商业空间空间使用模式



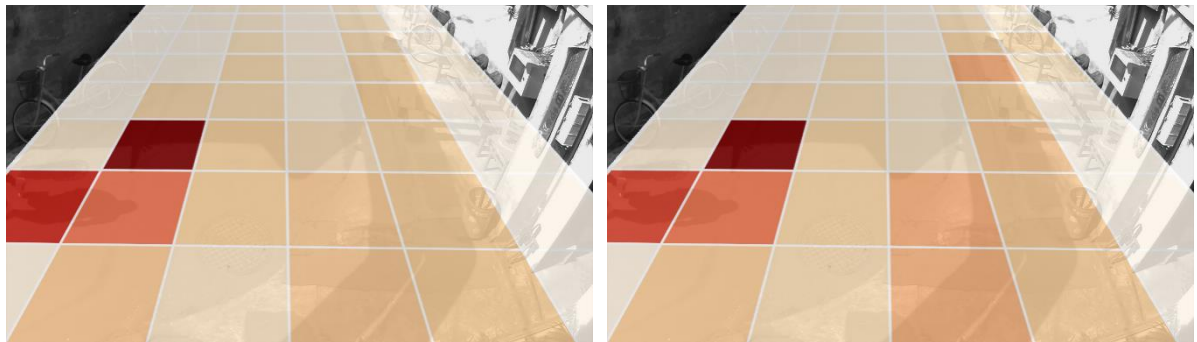
人数 低 高

工作日

人数 低 高

周末

南部入口公共开敞空间使用模式



人数 低 高

工作日

人数 低 高

周末

东部公共开敞空间使用模式

图 6-12 日与周末穿行行为空间微观使用模式与空间对应关系

研究中对使用红外感应触发相机获取的工作日与周末居住区公共开敞空间停留行为微观使用模式测度结果进行了分析和可视化。可以看出，不同空间工作日与周末的停留行为微观空间使用模式虽有一定区别，但差异小于穿行行为（图 6-13）。对于北部商业空间，工作日与周末居民均倾向于在空间拐角处对面的休闲平台进行停留行为且使用强度较为相似。而在周末居民在商业空间对面的停留行为有所增加，但差异总体较小。对于居住区的南部入口公共开敞空间，工作日期间停留行为最集中的区域并非东西临近商业店铺门口的空间，而是临近入口的空间。通过检查图像数据发现，此处有安保人员自行携带座椅在此停留，说明此处有居民进行停留行为的需求但没有足够的停留设施供居民使用。而周末停留行为较集中的区域仍为两处商业店铺门口。对于居住区东部公共开敞空间，在工作日与周末停留行为空间使用强度最高的位置均位于居民楼前的公共开敞空间，但此处仅有非正式的居民自行携带的板凳座椅，而没有适宜的公共设施供居民使用（图 6-14）。

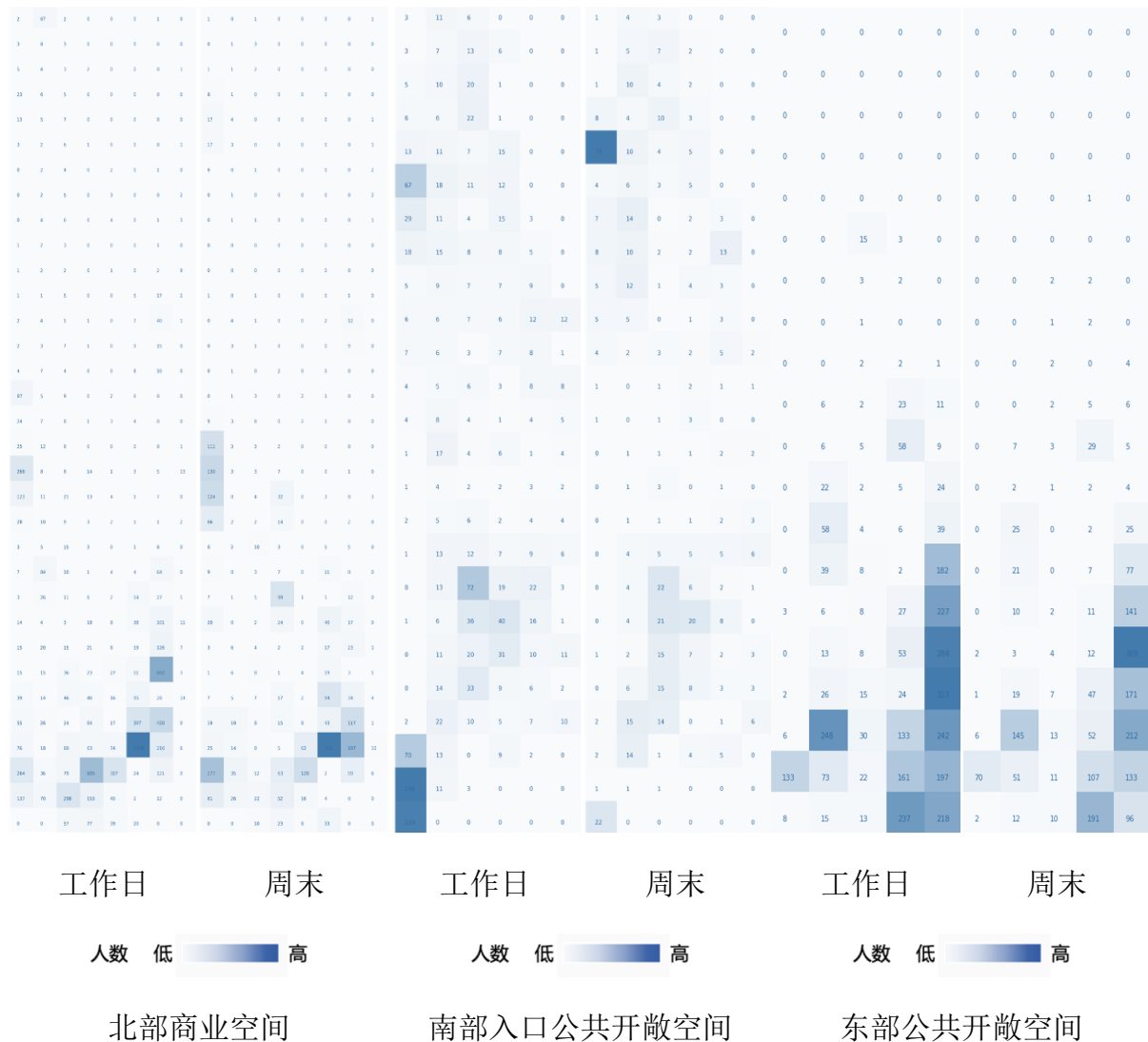
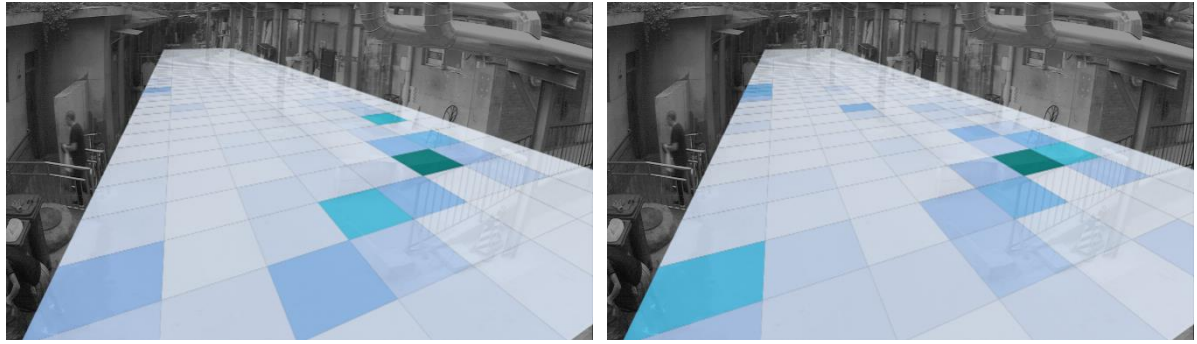


图 6-13 工作日与周末停留行为空间微观使用模式



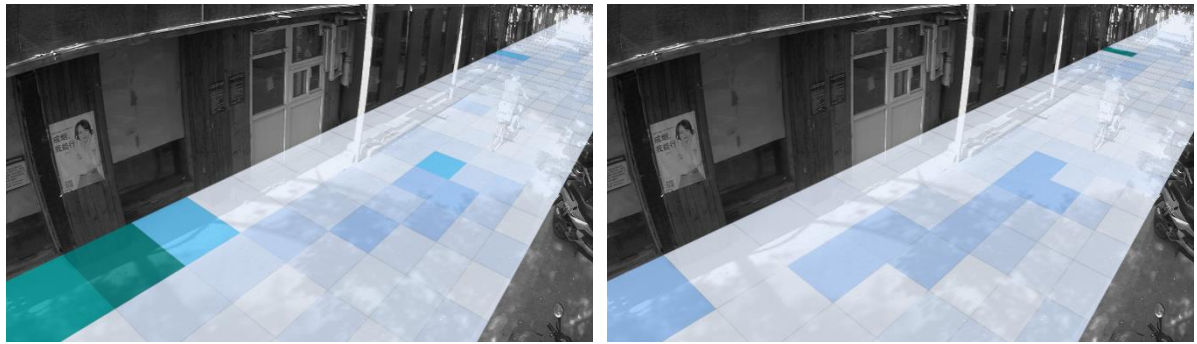
人数 低 高

人数 低 高

工作日

周末

北部商业空间使用模式



人数 低 高

人数 低 高

工作日

周末

南部入口公共开敞空间使用模式



人数 低 高

人数 低 高

工作日

周末

东部公共开敞空间使用模式

图 6-14 工作日与周末停留行为空间微观使用模式与空间对应关系

研究中统计了研究范围内各公共开敞空间每个 1 米边长的分析单元在每日各小时的穿行行为人数与停留行为人数，并将其作为每小时空间使用模式的指征，并按分析单元进行人数统计以及可视化处理，以分析各时段穿行与停留行为微观使用模式的一致性（附图 39 至附图 50）。

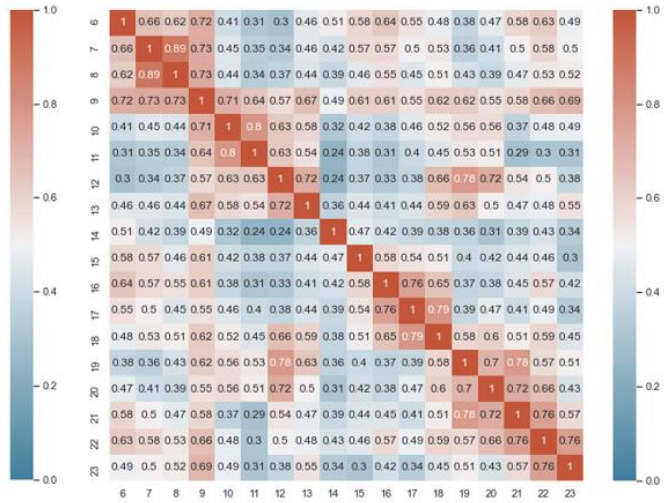
研究结果显示，工作日期间北部空间的穿行行为在 6 点至 9 点、9 点至 13 点、13 点至 18 点、17 点至 21 点、21 点至 23 点间具有较强的一致性，此特点与居民日常交通行为的出行规律较为相似。而周末期间，北部商业空间的穿行行为在上的 6 点至 9 点、9 点至 13 点仍具有一定一致性，但下午则为 16 点至 18 点、19 点至 21 点、21 点至 23 点有较强一致性，且整体一致性均大幅弱于工作日，说明周末日间居民在此空间的使用方式更为多元。对于南部入口公共开敞空间，工作日 6 点至 15 点、16 点至 18 点、19 点至 23 点使用模式均有较强一致性。结合观察红外感应触发相机获得的图像获得的结果，可以发现此空间以通过性交通行为为主，仅在晚高峰时期由于交通流量较大具有较为不同的空间使用模式，而在其他时间段空间使用模式保持高度一至，与交通行为为主的空間特征相似。

在周末，南部出入口空间在 6 点至 18 点、19 点与 23 点间使用模式具有较强一致性，反映出在没有工作日通勤情况下，此空间的使用模式仅在日间和夜间有所差异，且空间使用模式一致性仅略弱于工作日。对于东部公共开敞空间，其穿行行为使用模式 7 点至 10 点、11 点至 19 点、19 点至 23 点具有较强一致性。与上述两空间不同，东部公共开敞空间的时间使用一致性与居民早间、日间和晚间休闲行为活动的时间周期较为一致，且受到通勤高峰时间段的影响较小。周末期间东部公共开敞空间在 6 点至 10 点、11 至 14 点、17 至 20 点具有较强的空间使用一致性，且一致性程度与工作日相似，并具有类似的休闲行为的空間使用时间特征（图 6-15）。

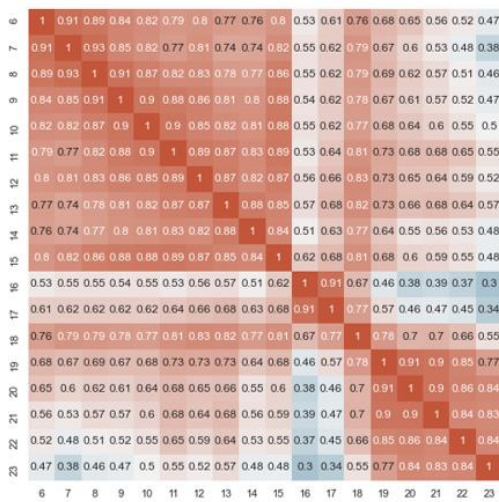
停留行为方面，北部商业空间在工作日时段的 6 点至 11 点、11 点至 13 点、19 点至 21 点的空间使用模式具有一定一致性，但各时段仅与相邻时段有较高的空间使用一致性。由于停留行为主要为休闲行为，因此北部商业空间的使用模式一致性总体较低。在周末期间，北部商业空间在 9 点至 12 点、16 点至 18 点有较强的空间使用一致性，反映出其在周末的日间具有一定的休闲活动，从而能反映在停留行为的时空间特征上。对于南部入口空间，由于其以交通行为为主，休闲行为频率较低且不规律，在工作日与周末的停留行为的使用模式特征均不明显，仅在周末的晨间、工作日与周末的 16 点至 18 点时段具有一定的空间使用一致性。对于东部公共开敞空间，其以休闲行为为主，因此其停留行为的使用模式一致性较高，在工作日及周末的晨间、下午与晚间时段均有类似的空間使用特征（图 6-16）



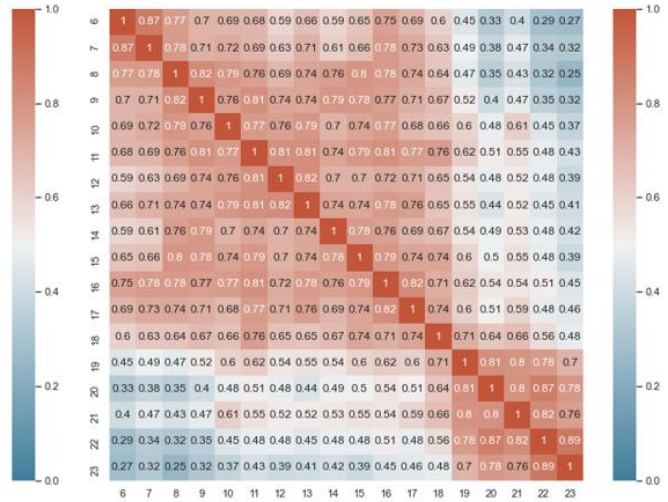
工作日北部商业空间空间穿行行为



周末北部商业空间穿行行为



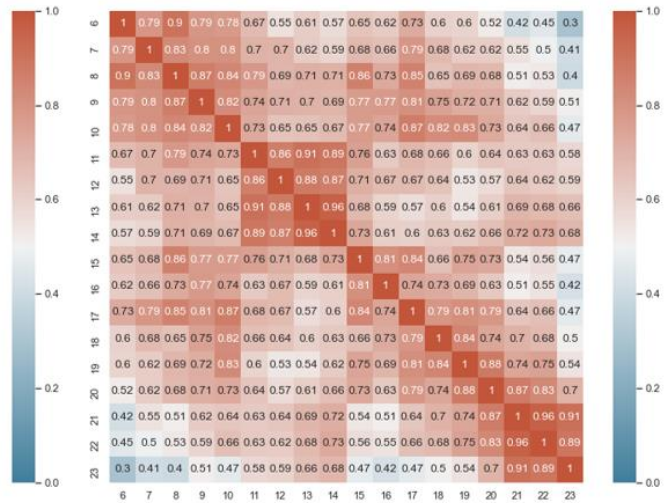
工作日南部入口公共开敞空间穿行行为



周末南部入口公共开敞空间穿行行为

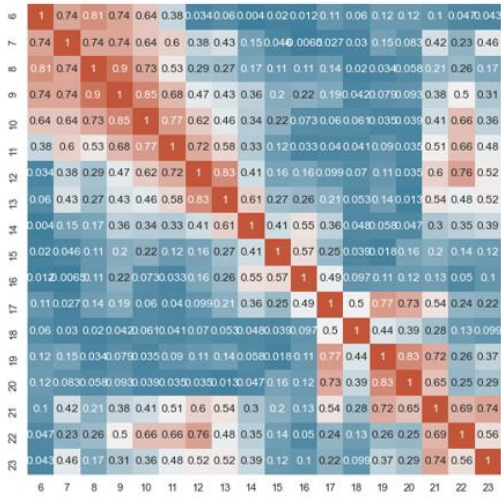


工作日东部公共开敞空间穿行行为

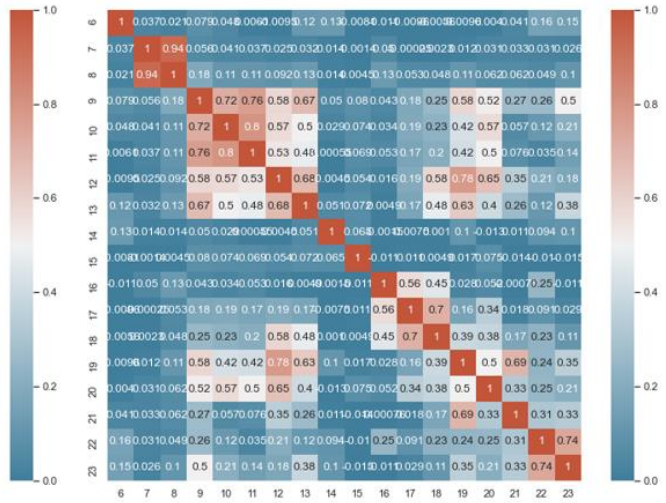


周末东部公共开敞空间穿行行为

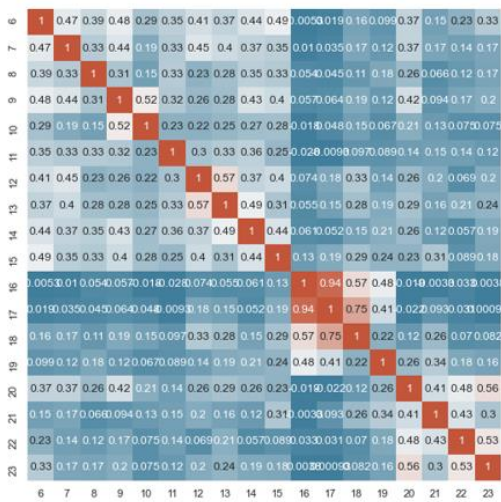
图 6-15 工作日与周末穿行行为空间微观使用模式一致性分析



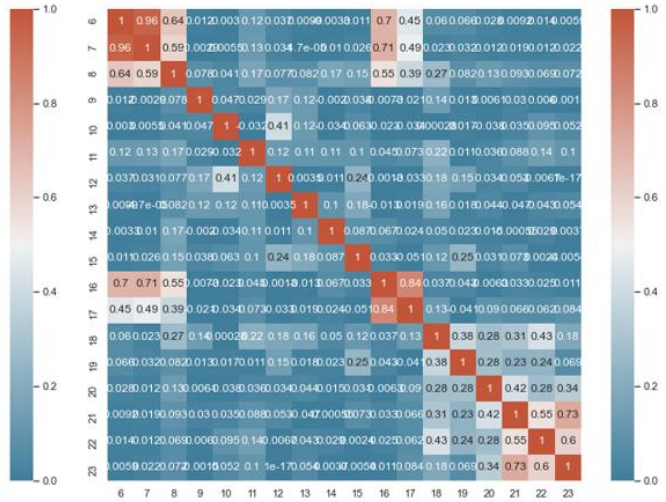
北部商业空间工作日停留行为



北部商业空间周末停留行为



南部入口公共开敞空间工作日停留行为



6.2.2.2 基于微观使用模式测度的居住区公共开敞空间评估与优化建议

(1) 基于步行行为和穿行行为测度的居住区公共开敞空间评估及空间优化

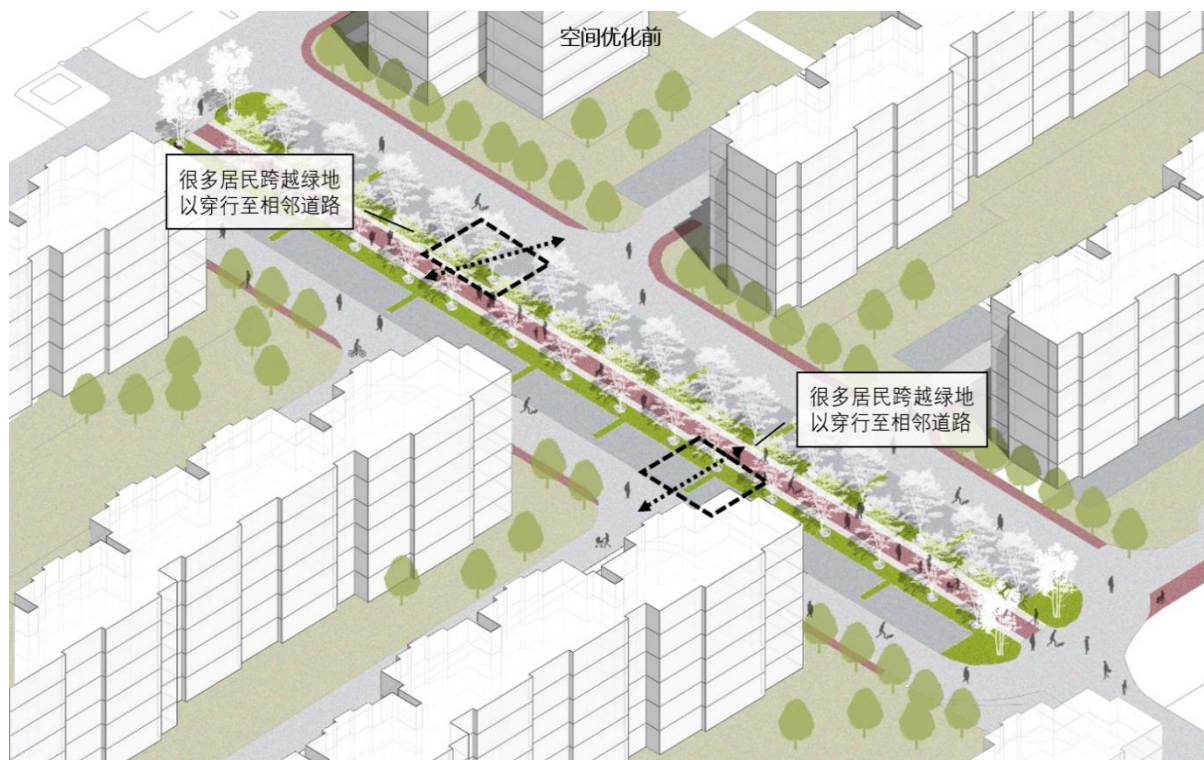
研究中在对步行行为和穿行行为微观使用模式测度的基础上对居住区公共开敞空间进行了后评估及空间优化工作（附图 29 至附图 38）。对于居住区的林荫大道区域，其主要的问题是居民有从其南部向西进入道路以及从其北部向东进入道路的需求，而现有空间无法满足。因此空间优化过程中打通了其南北侧分别通向西部和东部道路的出入口，并铺设了铺装、配置了绿植，以使居民能够较好的从林荫大道区域抵达居住区其他空间位置。而铺设道路的空间原为停车位空间，在具有数十个停车位的空间中减少 1-2 个车位对空间功能影响较小（图 6-17）。

对于居住区的商业综合体旁公共开敞空间，通过微观使用模式测度揭示出的现存主要问题是供行人使用的空间有限，使行人大量使用机动车车道，造成人车混行的情况。因此空间优化过程中在保证机动车车道必要宽度的前提下扩展了商业综合体北侧步道的宽度，为居民提供了更多的活动空间。此外空间优化方案在沿商业综合体一侧的空间中设置了绿植，以解决现在此空间中的绿植都在停车场北侧行人较少使用区域的问题，使居民能够更接近绿色植被（图 6-18）。

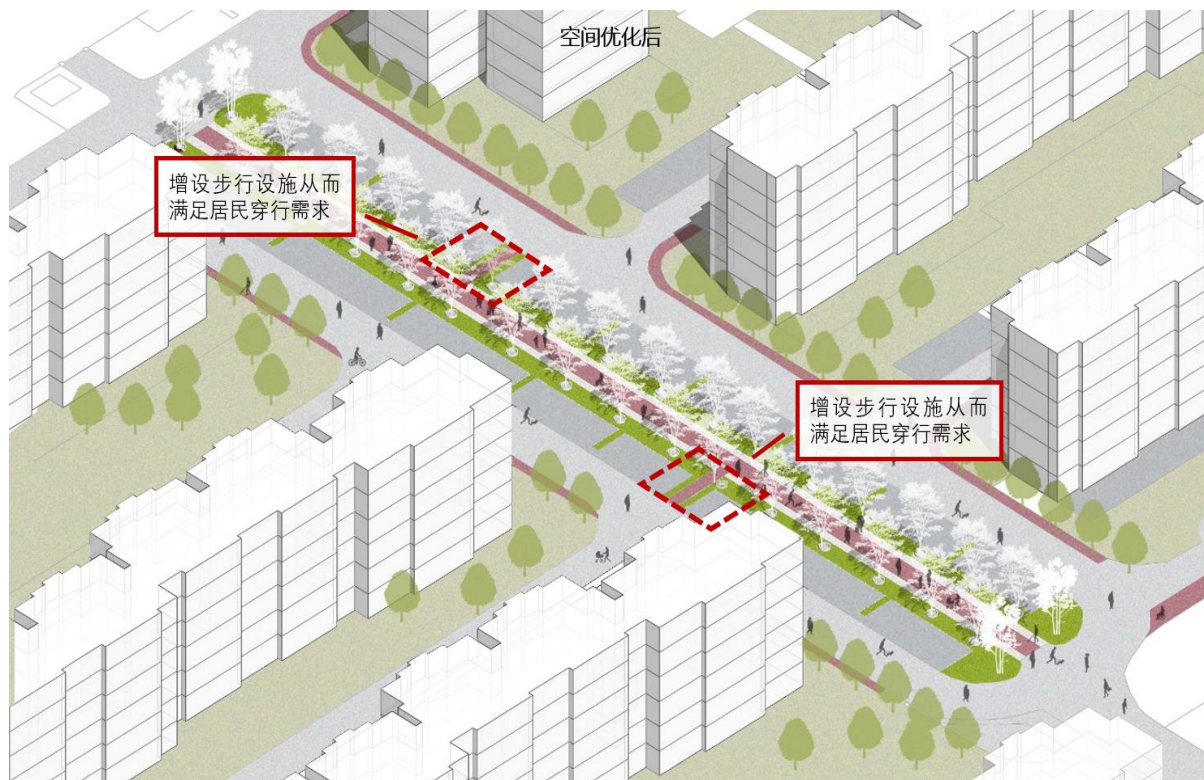
对于居住区的绿廊公共开敞空间，通过微观使用模式测度揭示出的现存主要问题为居民倾向于在空间西侧进行穿行行为而步道仅位于空间东侧，且由于缺乏停车空间导致停车挤占步道空间等问题。因此空间优化过程中在空间西侧加设了步道设施，以保障居民在进行步行行为能够人车分流。而为了解决停车空间不足导致挤占步道的问题，空间优化方案中拓宽了绿廊空间与商业综合体北侧空间出入口，使原停放于绿廊空间的机动车能够停放于正规停车场中（图 6-19）。

对于居住区的东南出入口公共开敞空间，通过微观使用模式测度揭示出的现存主要问题为步道空间不足且不连续，导致居民需要频繁在机动车道上进行步行行为。因此空间优化过程中加宽了东南出入口相邻的步道宽度，并使之与最北侧地块的东边缘对齐，以增加步道设施的连续性。设计中对空间中部的地块已进行相似改造，使此区域内三个空间都具有连续、宽敞的步道空间供居民使用，使居民可以避免与机动车流线进行交叉（图 6-20）。

对于居住区的中部活动空间，通过微观使用模式测度揭示出的现存主要问题为此空间的使用效率较低，存在较为明显的空间浪费现象。因此空间优化过程中将东西两侧铺装及座椅设施改为绿地，以将较少被使用的空间改为提供环境及景观效益的绿地空间。之后拆除中部阻碍步行的花坛，并将树池边缘改造座椅，使空间具有紧凑且宜人的尺度，供居民最大化的利用其社会价值，并增加空间的整合度，促进空间对居民的潜在吸引力（图 6-21）。

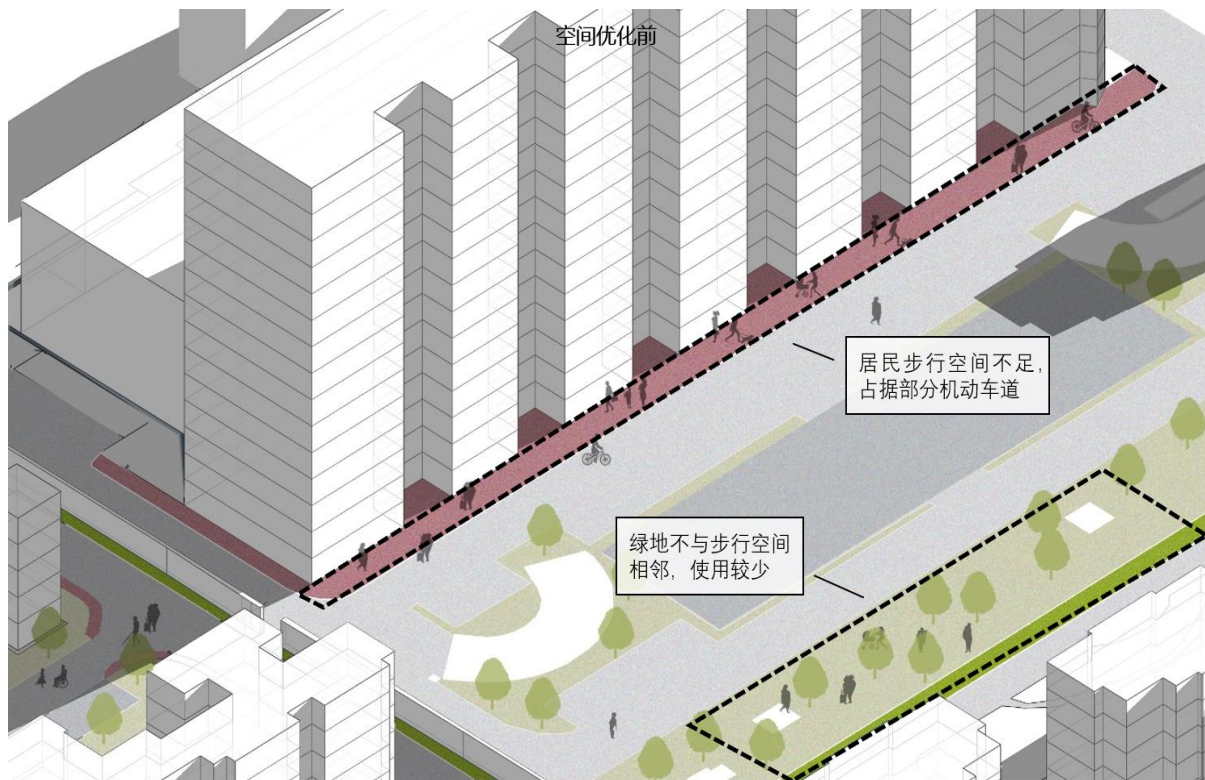


居住区公共开敞空间现状

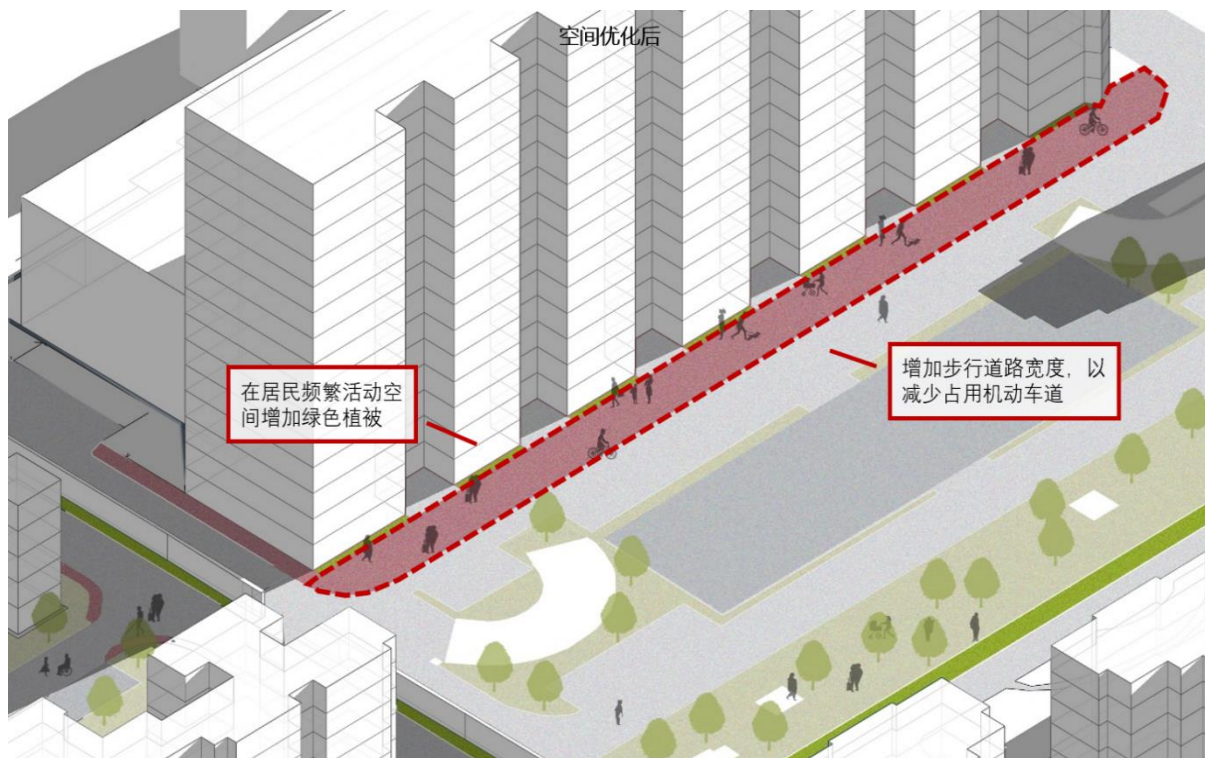


居住区公共开敞空间优化后结果

图 6-17 基于微观使用模式测度的居住区林荫大道公共开敞空间设计优化

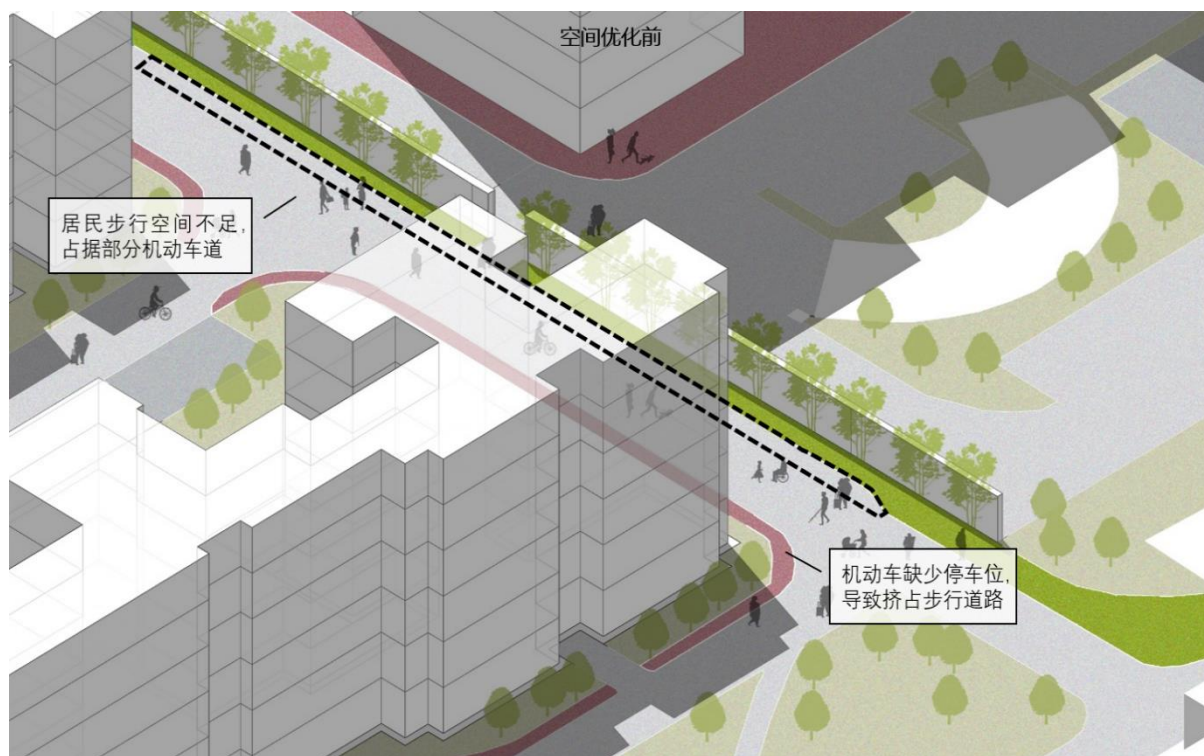


居住区公共开敞空间现状

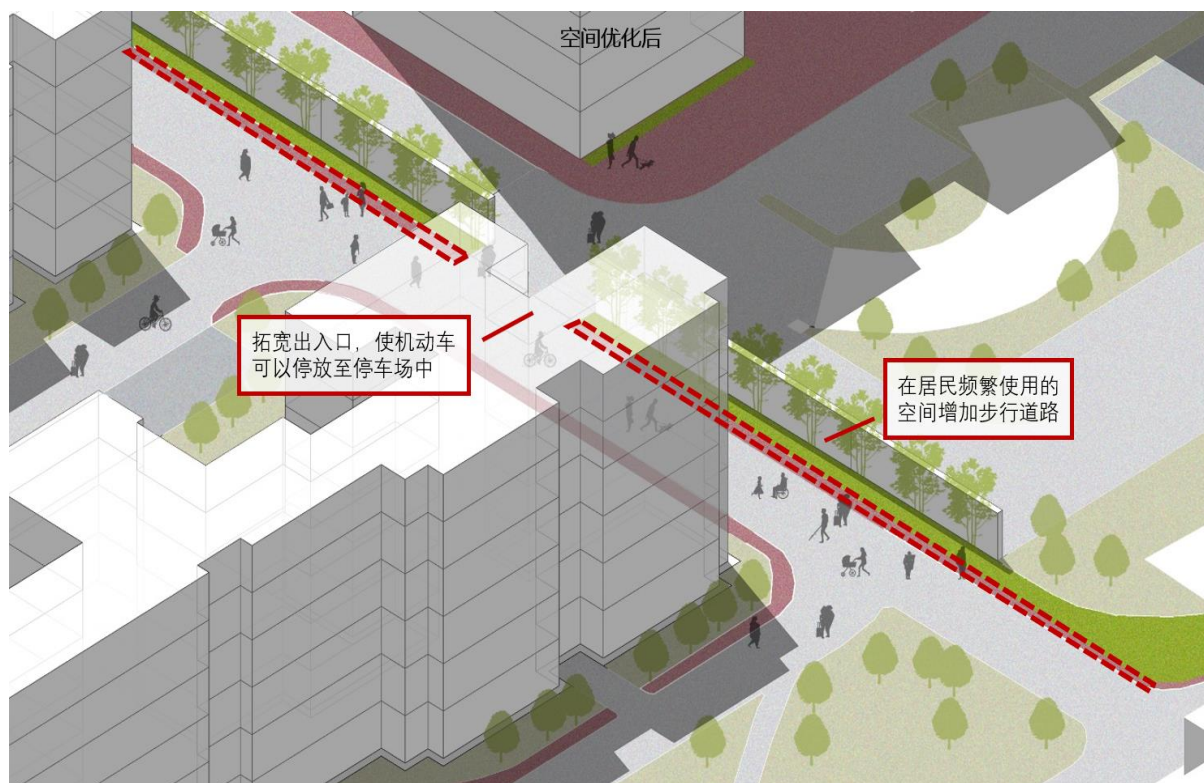


居住区公共开敞空间优化后结果

图 6-18 基于微观使用模式测度的居住区商业综合体旁公共开敞空间设计优化

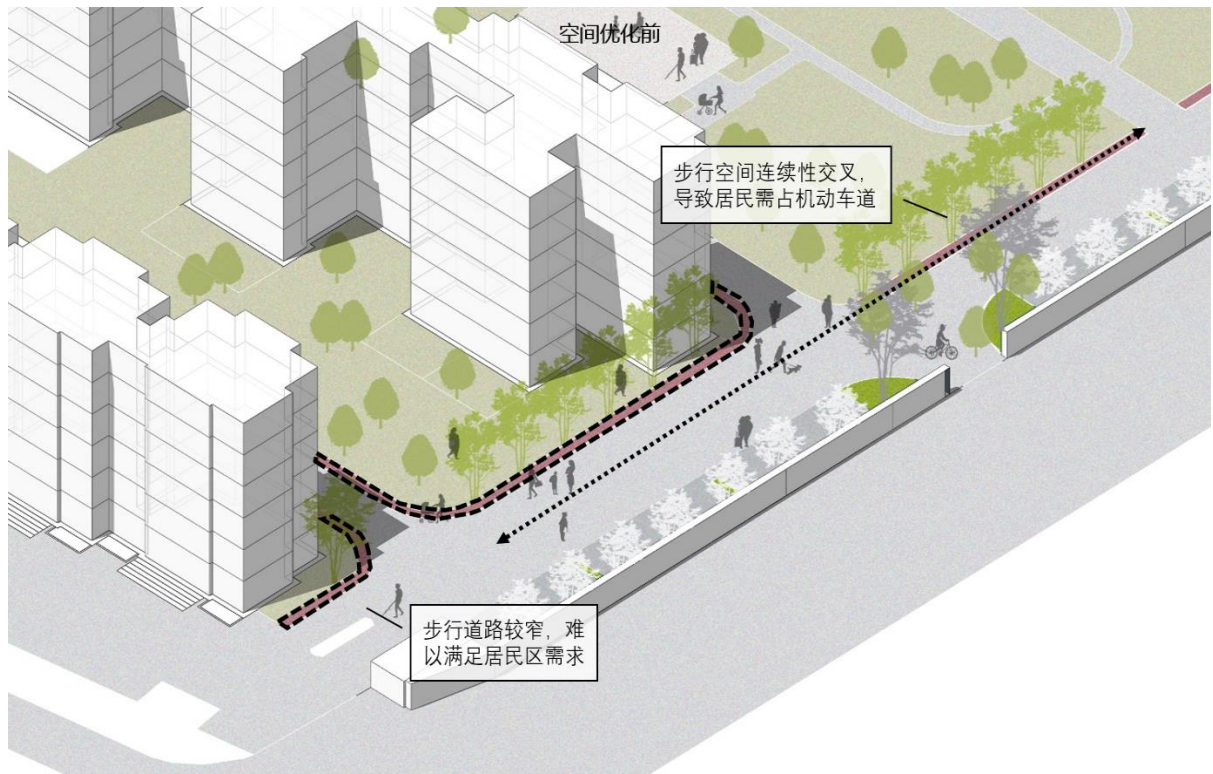


居住区公共开敞空间现状

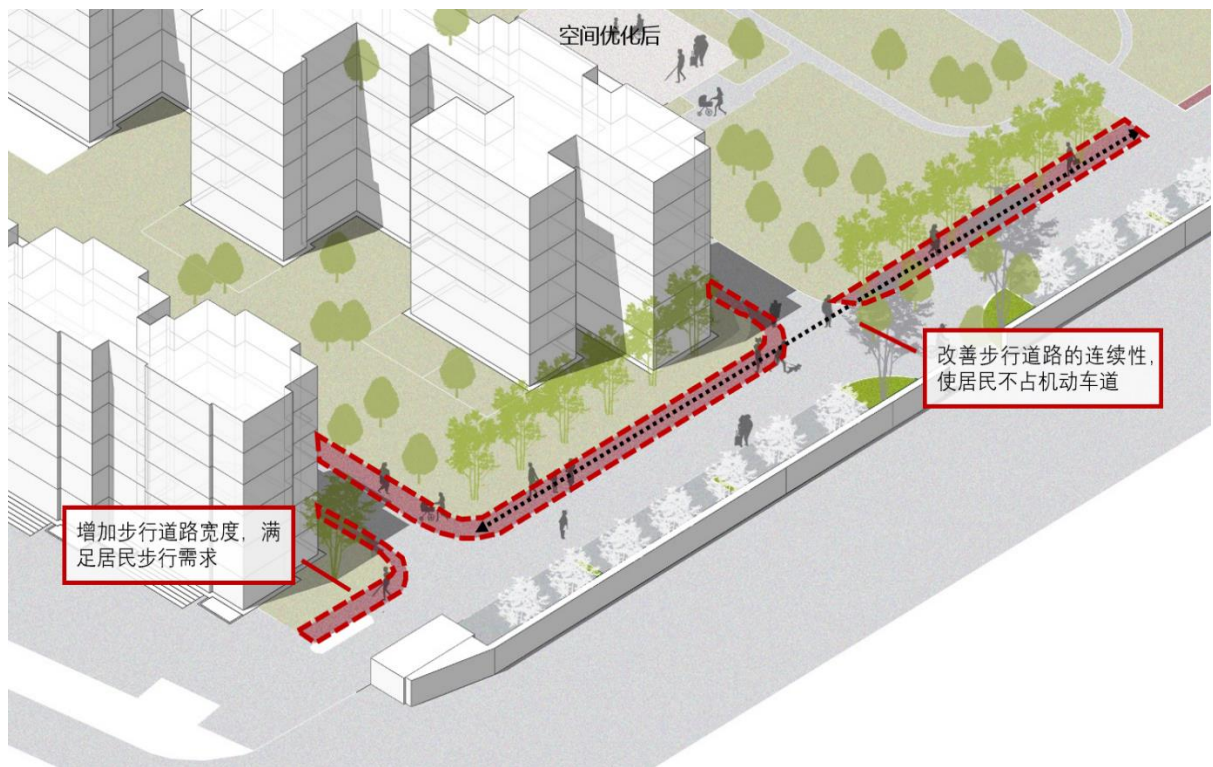


居住区公共开敞空间优化后结果

图 6-19 基于微观使用模式测度的居住区绿廊公共开敞空间设计优化

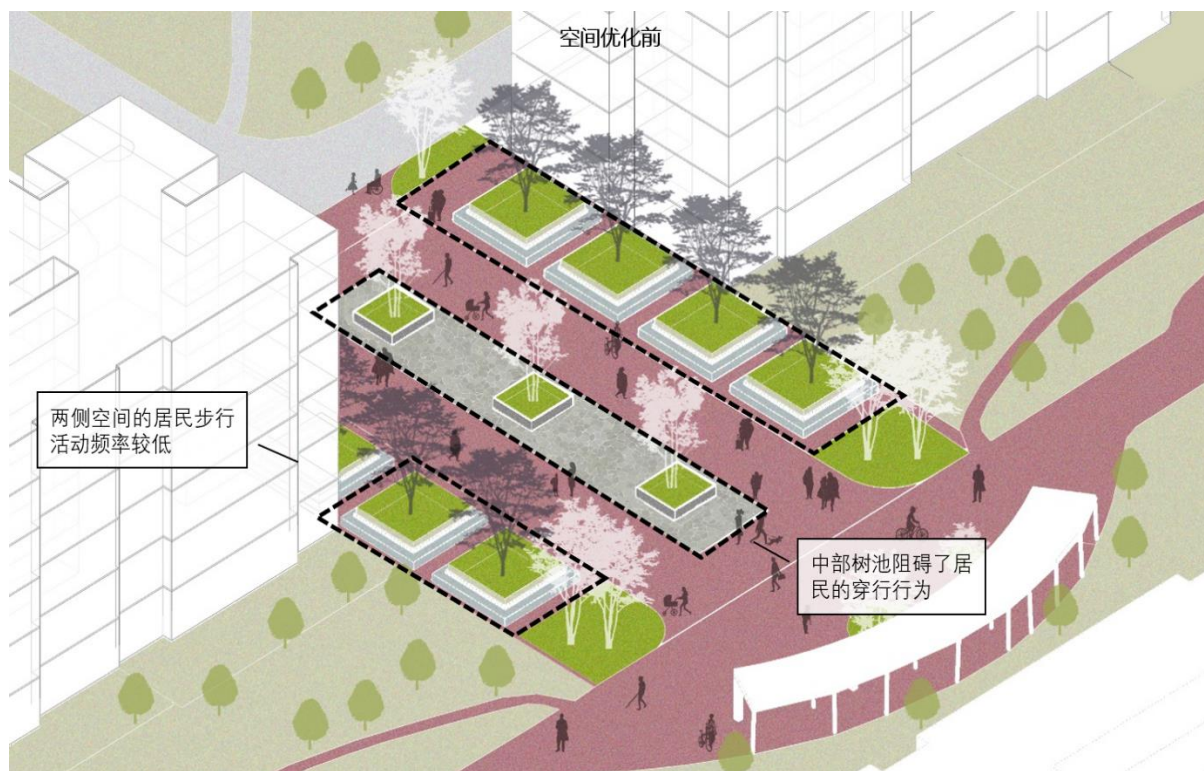


居住区公共开敞空间现状

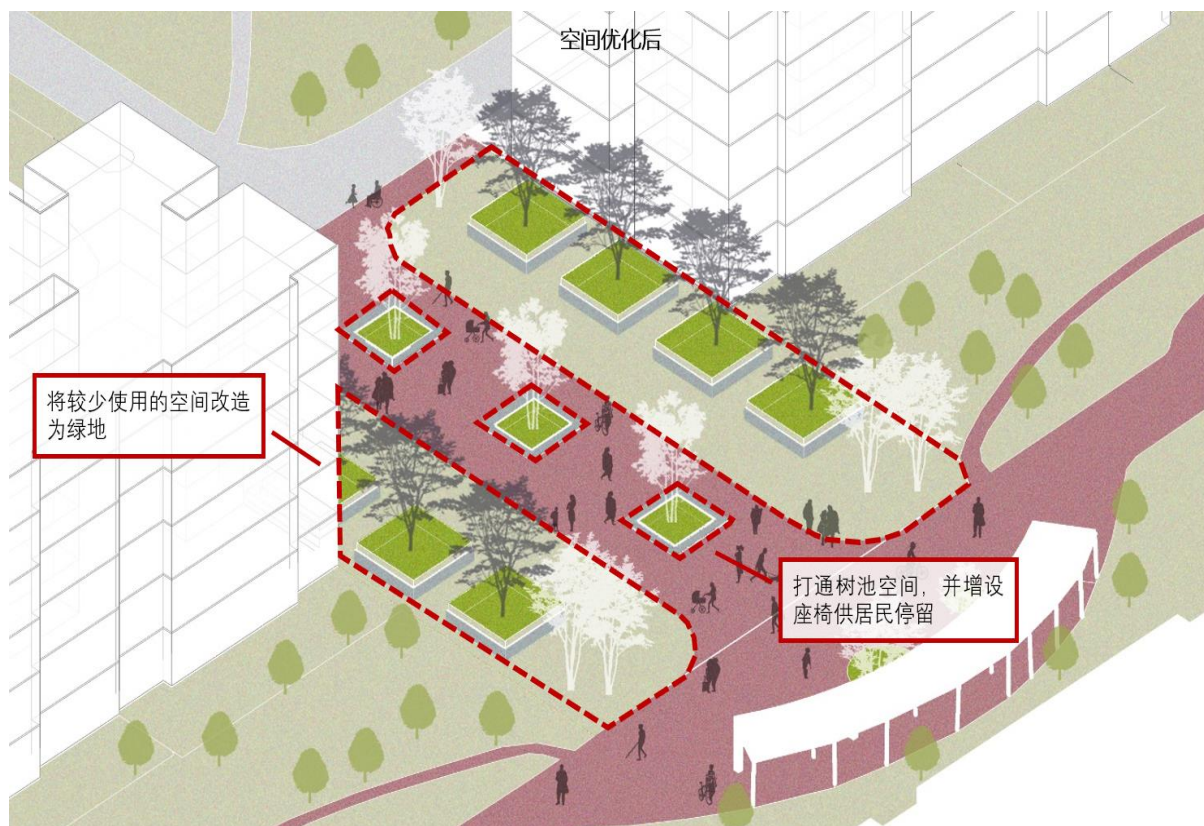


居住区公共开敞空间优化后结果

图 6-20 基于微观使用模式测度的居住区东南出入口公共开敞空间设计优化



居住区公共开敞空间现状



居住区公共开敞空间优化后结果

图 6-21 基于微观使用模式测度的居住区中部活动空间设计优化

(2) 基于穿行行为和停留行为测度的居住区公共开敞空间评估及空间优化

研究中在对穿行行为和停留行为微观使用模式测度的基础上对居住区公共开敞空间进行了后评估及空间优化工作（附图 51 至附图 56）。对于居住区北部商业空间，通过微观使用模式测度揭示出的现存主要问题为穿行与停留空间的缺乏以及通向商业店铺的宽的宽阔台阶可活动对空间的浪费。因此空间优化中首先着眼于对垃圾桶及公共卫生间对面停留活动平台的改造。空间优化设计中将平台上面向卫生间的坡道改为墙体，而空间的进入方式改为从西侧道路通过增设的台阶抵达或通过东侧原仅用于通向商业店铺的台阶绕行抵达，并增加其宽度，以提供更多的活动空间。

此外将平台面向卫生间一侧假设窄花池，并在花池背面设置座椅，以隔绝居民在平台上俯瞰卫生间的视线，从而保证使用卫生间的居民的隐私，并通过座椅为居民提供更示意的停留设施。此外空间优化设计中也对通向商业店铺的台阶进行了改造，将部分台阶空间改为面向道路的座椅，以为居民提供更多的活动及停留空间，提升空间的利用效率。同时座椅等停留设施吸引的居民亦能转化为到店铺进行消费的顾客，增加店铺的潜在客源（图 6-22）。

对于居住区南部入口公共开敞空间，通过微观使用模式测度揭示出的现存主要问题为缺少停留空间导致居民或安保人员需要自行携带座椅停留在出入口旁，但此种行为有进一步阻碍了交通空间，增加了道路的风险因素。此外商业店铺一侧存在搭棚，占据了一定的空间，导致居民无法使用。因此空间优化过程中通过对部分搭棚进行拆除，并在新增加的空间中设备座椅以满足居民在商铺前等位或观察出入口使用模式的空间需求。此外优化方案中在出入口旁设置了小型花池，以防止居民携带座椅在出入口旁停留造成交通隐患（图 6-23）。

对于居住区东部公共开敞空间，通过微观使用模式测度揭示出的现存主要问题为因为停放自行车空间不足，当地居民需要横穿道路在转角空间处停放自行车，造成交通效率的下降以及交通安全隐患的增加。此外，居民楼一侧堆放杂物导致居民只能沿马路进行停留活动，进一步增加了交通风险。因此空间优化过程中居民楼一侧楼梯下方空置的空间，将其改造成垂直于墙面的自行车停车空间，从而大幅增加该空间自行车停放效率，并避免了非必要的道路穿行行为。

此外，空间优化方案中沿居民楼两侧设施了停留设施，使居民不必坐在路沿。而对于减少的绿植，方案中将其转移至自行车与停留空间中间、楼梯下不可使用的空间以及居民楼单元门一侧的花池中，使绿植总量不变的情况下释放更多的供居民活动的空间，并使绿植起到浪费空间再利用以及空间隔断的作用，从而提升居民在公共开敞空间中的生活质量（图 6-24）。

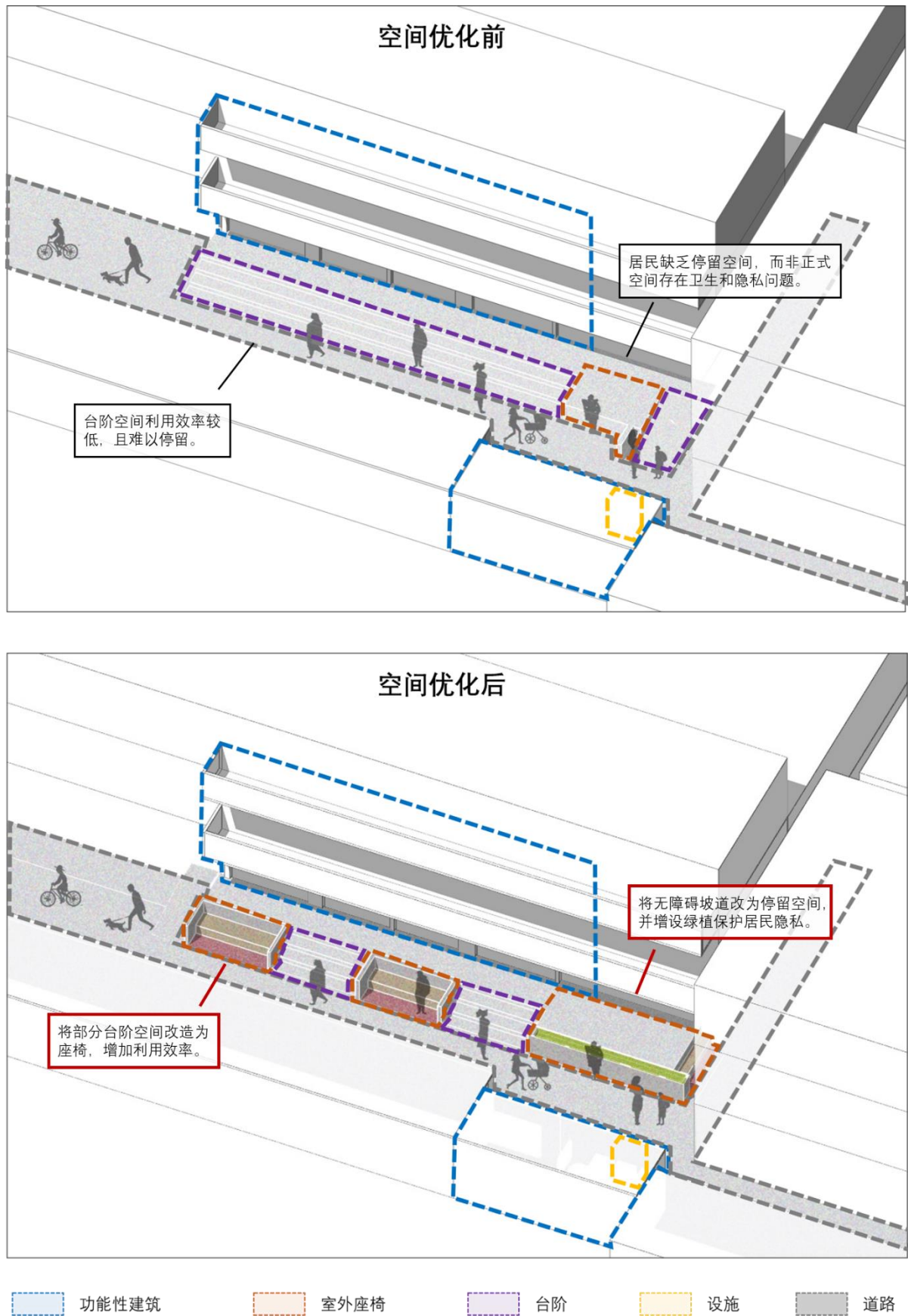


图 6-22 基于微观使用模式测度的居住区北部商业空间设计优化

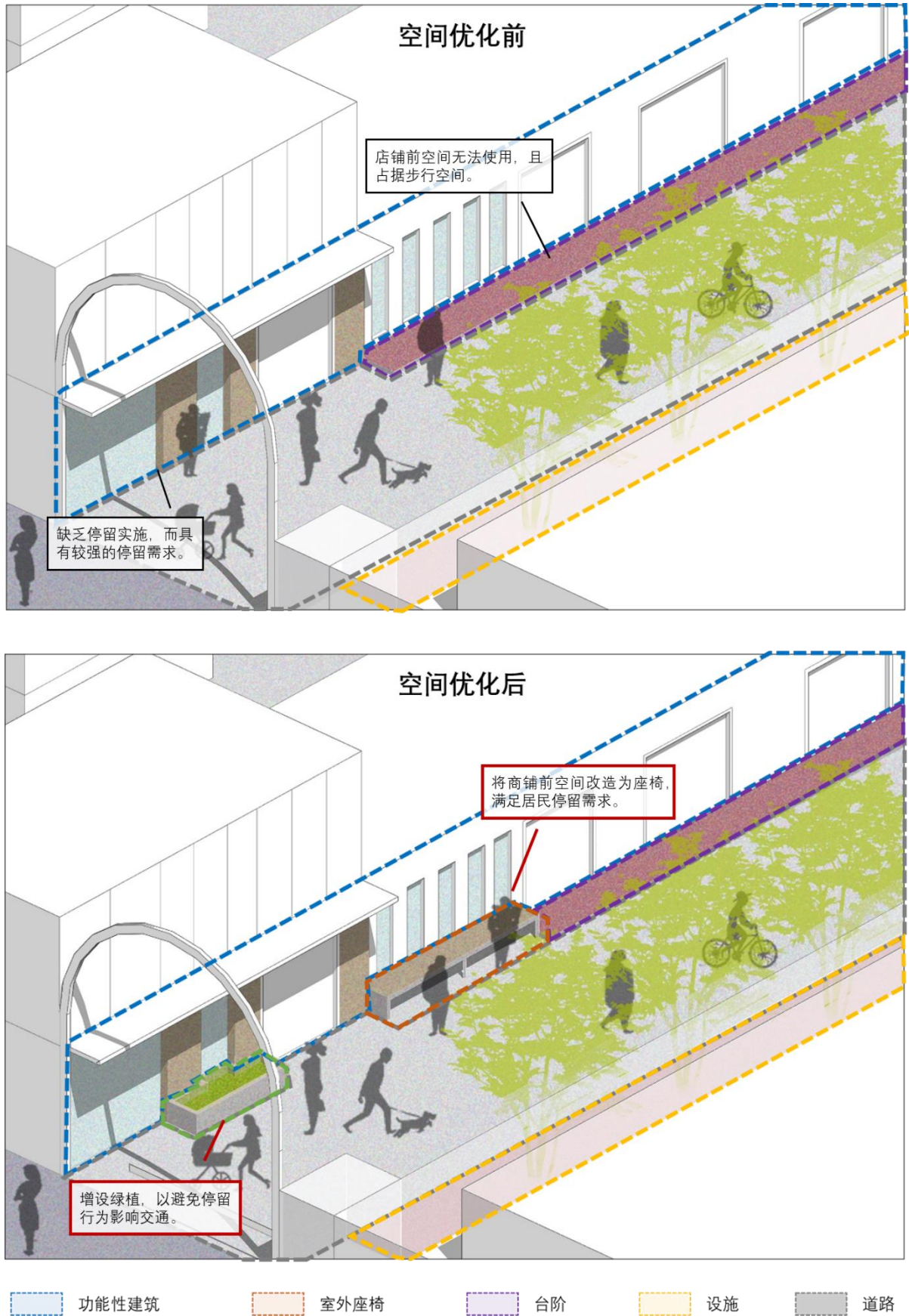


图 6-23 基于微观使用模式测度的居住区南部入口公共开敞空间设计优化

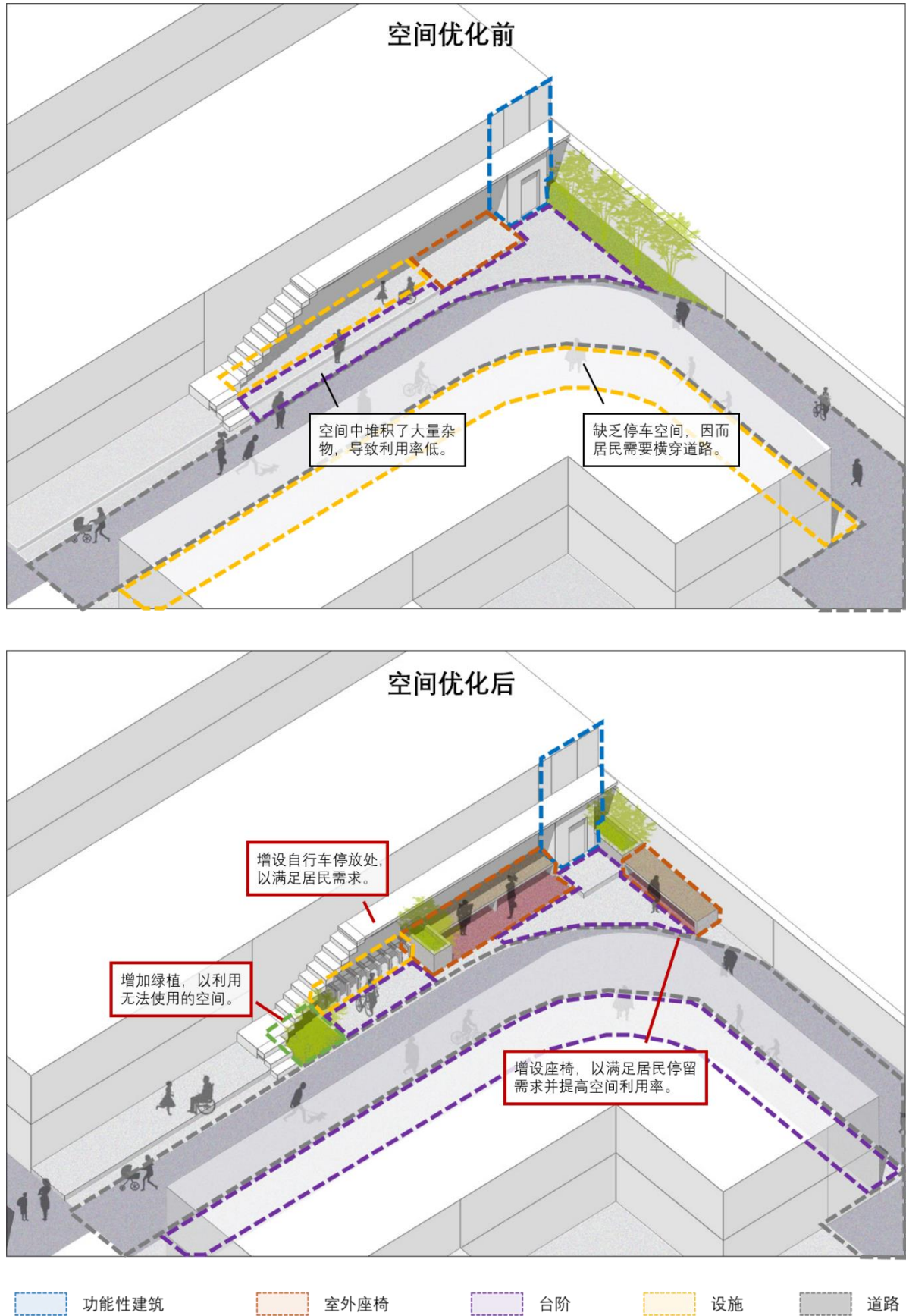


图 6-24 基于微观使用模式测度的居住区东部公共开敞空间设计优化

6.3 基于使用模式模拟的居住区公共开敞空间空间优化

6.3.1 基于使用模式模拟的居住区公共开敞空间空间优化方法

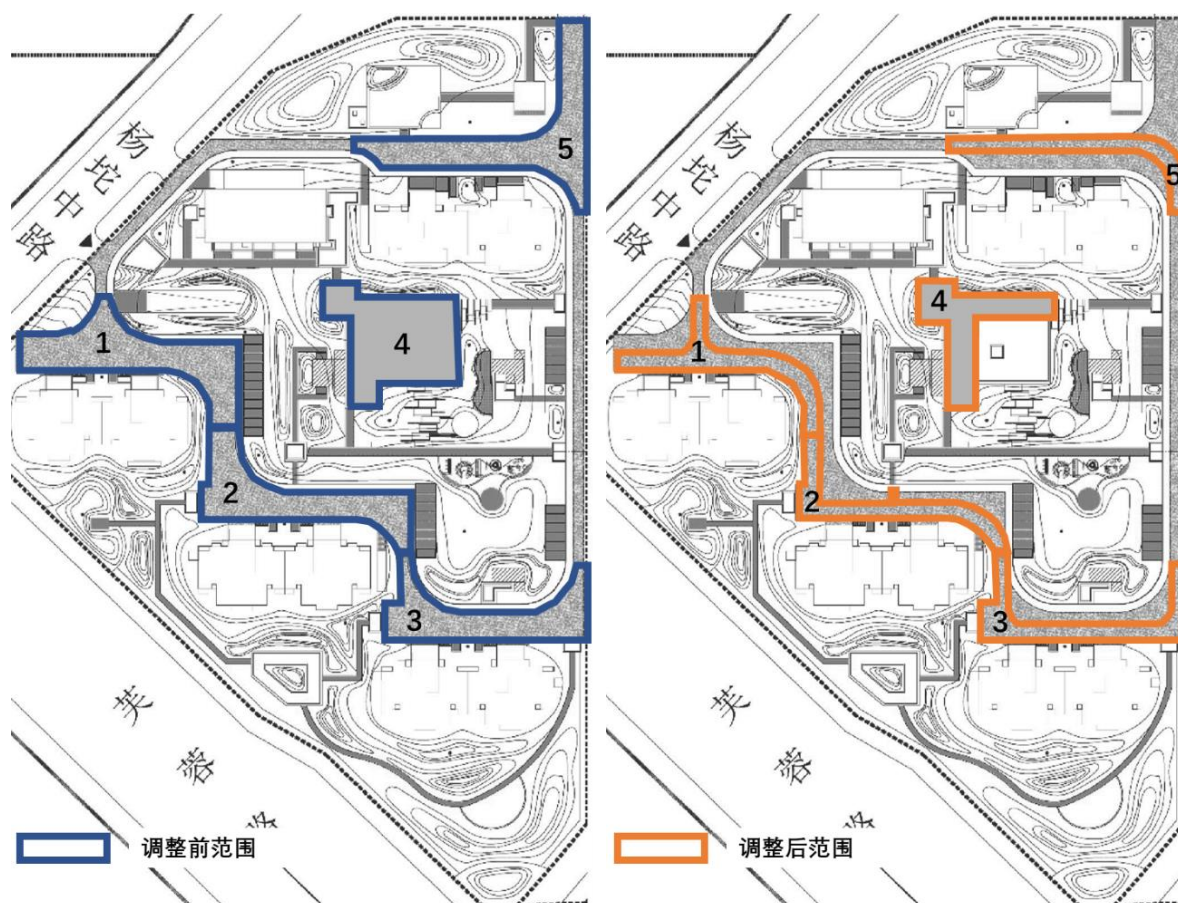
本研究以北京副中心海绵设施建设作为居住区公共开敞空间前策划的研究背景。海绵设施建设以增加环境效益为核心目标，但同时兼顾经济成本，以及希望能通过海绵设施建设增加空间的社会效益。在海绵设施建设与居住区公共开敞空间关系方面，海绵城市试点建设中将居住区公共开敞空间视为海绵设施载体。然而在相关基于居住区公共开敞空间设计的海绵设施规划中存在超量规划的问题。以某海绵设施试点小区为例，当按 50% 规模进行海绵设施规划建设时，按一年一遇降雨计算径流空置率仍能达到 86% 以上，污染物去除率等达到 29% 以上，与按 100% 规模建设仅有 2% 和 10% 的差异（表 6-2）。故需要从环境和经济效益两方面对已有方案进行优化，以在保持环境效益的基础上保持经济成本最低。已有的优化方案通过非支配遗传算法，可获得承载海绵的居住区公共开敞空间设施建设面积最优曲面，但无法获得最优方案，因此本研究通过对不同方案的空间使用模式进行模拟，并基于模拟结果尝试选取基于社会效益最大的最优方案。

表 6-2 典型布置方案结果对比

模拟结果	未规划		100% 规模规划		50% 规模规划	
	一年一遇	2016 年	一年一遇	2016 年	一年一遇	2016 年
成本	0 万元		653.74 万元		326.87 万元	
径流空置率	67.80%	73.74%	86.01%	88.64%	81.71%	86.52%
污染物去除率	0.00%	0.00%	45.89%	39.30%	30.44%	29.56%

优化方案中经济与环境最优曲面中对于社会效益存在最大可能影响的方案为针对居住区中最大面积的 5 个公共开敞空间进行优化的空间方案，其中每个公共开敞空间都存在根据优化方案结果均存在调整前与调整后两种空间范围。而各优化方案中至多仅调整了 5 个空间中 2 个空间的面积，且各方案调整前后的居住区公共开敞空间总面积均相同，以使各种不同的海绵设施方案具有可比性。因此本研究通过对不同空间调整组合对应的总共 10 个方案进行宏观使用模式模拟，能够对各方案的总社会效益进行模拟，并从中筛选出合适的方案（附图 57）。

之后研究中通过对居住区微观使用模式进行模拟，能够进一步优化空间中的设计方案，实现海绵设施设计方案优化，从而使海绵城市建设在经济和环境效益平衡的基础上达到社会效益最大化的目标（图 6-25）。



空间优化组合：方案 1-2、1-3、1-4、1-5、2-3、2-4、2-5、3-4、3-5、4-5

图 6-25 可选公共开敞空间面积调整范围

6.3.2 基于宏观使用模式模拟的居住区公共开敞空间优化

研究中根据居住区公共开敞空间宏观使用模拟方法，建立了不同优化方案的休闲行为与交通行为模拟模型，其中休闲行为模拟模型为分析半径为 4 的空间句法视域模型，而交通行为模拟模型为分析半径为 2400 米的空间句法线段模型。之后研究中对不同方案中反映休闲与交通行为空间使用模式的人次与人数在空间中的分布情况进行统计，并汇总为取值范围为 0-1 的总人数与总人次归一化指数，以对比不同方案模拟的宏观空间使用模式。

对比结果显示，方案 1-2（即对 1 号与 2 号公共开敞空间范围进行调整的方案）总人数归一化指数为各方案第 2、总人次归一化指数为各方案第 1，因此其总人数与总人次归一化指数之和为各方案中最高，即此方案中居住区各公共开敞空间的总交通行为与休闲行为之和比其他方案更高，说明此方案比其他方案更能促进居民的交通行为与休闲行为，即可将方案 1-2 视为社会效益最高的方案（图 6-26 和图 6-27）。研究中根据优化方案结果进行了空间平面设计改进，以落实优化方案的结果（图 6-28）。

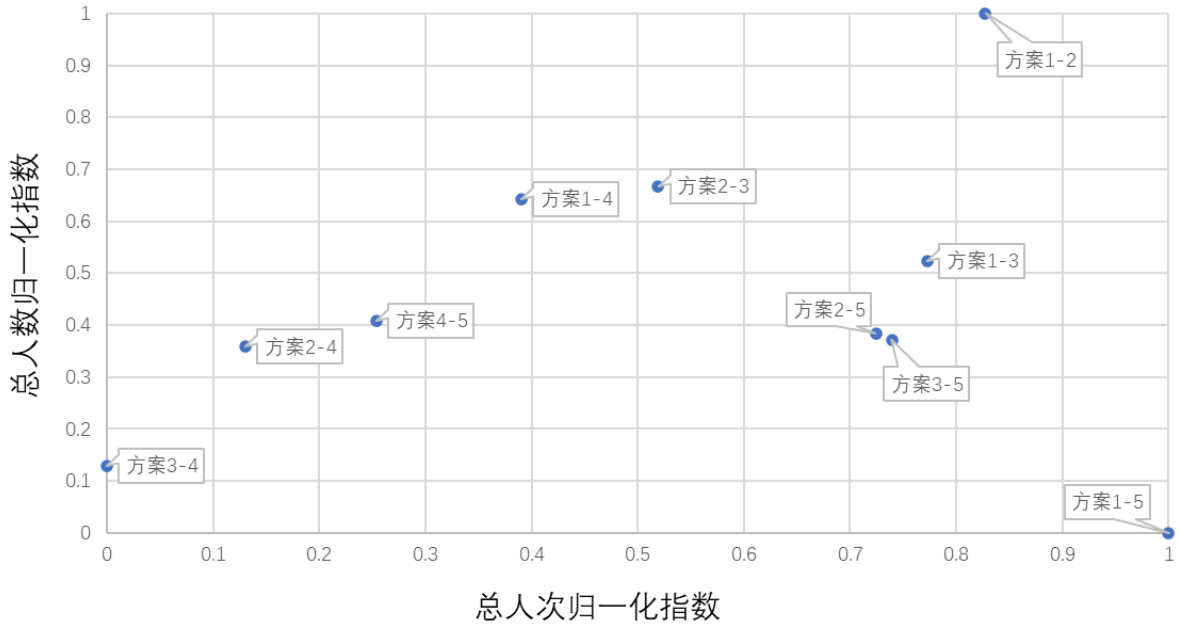
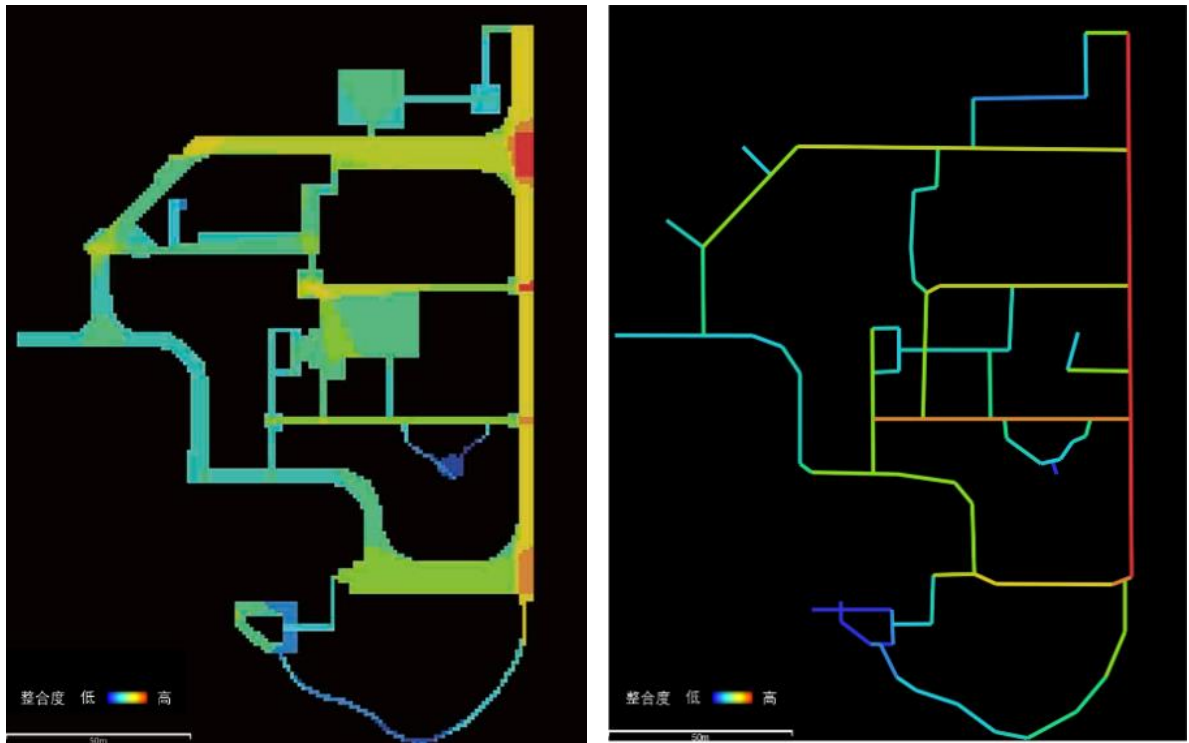


图 6-26 方案评估结果



休闲行为模拟结果

交通行为模拟结果

图 6-27 优化方案宏观使用模式模拟结果

6.3.3 基于微观使用模式模拟的居住区公共开敞空间优化

研究中在基于宏观使用模式模拟的方案筛选后又进行了微观使用模式模拟，以进行进一步的设计方案优化。微观使用模式模拟结果显示，5个主要公共开敞空间中居民使用较多的位置为1号空间西部与南部、2号空间南部、3号空间南部与中部、4号空间中中部与5号空间西部（图6-29）。而现有方案中铺有红色透水铺装的可供行人使用的步道空间围绕居住区中部绿地一圈，并不覆盖居民具有较大活动潜力的区域，因此研究中尝试对居住区内的步道位置进行设计改进。



图 6-29 优化方案微观使用模式模拟结果

具体而言，在 1 号空间中空间优化方案将原贴近公共开敞空间东北的步道延伸至居民楼前，并从此处开始沿居民楼所在居住区南侧地块向下延伸，以覆盖南部模拟结果中居民使用频次较高的空间。此外 1 号空间西侧的空间由于也具有较高的累积使用人数结果，且位于尽端路，故改建为供居民停留活动的场所，并在其中铺设红色透水铺装类的海绵设施。对于 2 号空间，将铺设透水铺装的步道继续沿空间南侧延伸，以同 1 号空间一样覆盖拟结果中居民使用频次较高的空间。对于 3 号空间，由于步道已改外路南侧，因此将原位于空间东北角的地上停车空间移至正对居民楼的北侧，以减少人车混行的可能。此外步道延伸至南侧后能够与西南角的连廊空间相连，使居民能更方便的使用此空间。对于 5 号空间，空间优化方法主要为提升对空间东北角模拟结果中居民使用频次较高的空间的利用效率，将此处从车行需求较少的尽端路空间改为在铺设透水铺装等海绵设施使居民能够进行停留的活动空间。综合上述空间优化设计改进措施，研究中提出了最终的空间优化方案，以最大化提升此居住区中海绵设施的社会效益（图 6-30）。

6.4 本章小结

本章在第 4 章居住区公共开敞空间使用模式测度及第 5 章居住区公共开敞空间使用模式模拟的基础上，借鉴“前策划-后评估”的定量研究、评估及方案比选方法，提出针对老旧小区基于使用模式测度的空间优化方法以及针对新建社区或大规模更新改造社区的基于使用模式模拟的空间优化方法。研究通过在两个老旧小区的实验识别居住区公共开敞空间使用存在的问题，并提出针对空间边界调整及设施布局的优化改进建议。此外，研究通过对新建居住区不同设计方案的模拟，筛选在经济及生态效益相似的方案中社会效益更高的方案。总体而言，研究通过将空间优化方法应用到对应类型的居住区公共开敞空间中，展示居住区公共开敞空间使用模式测度及模拟在工程实践过程支持空间更新改造及设计优化比选的积极作用和实践意义。

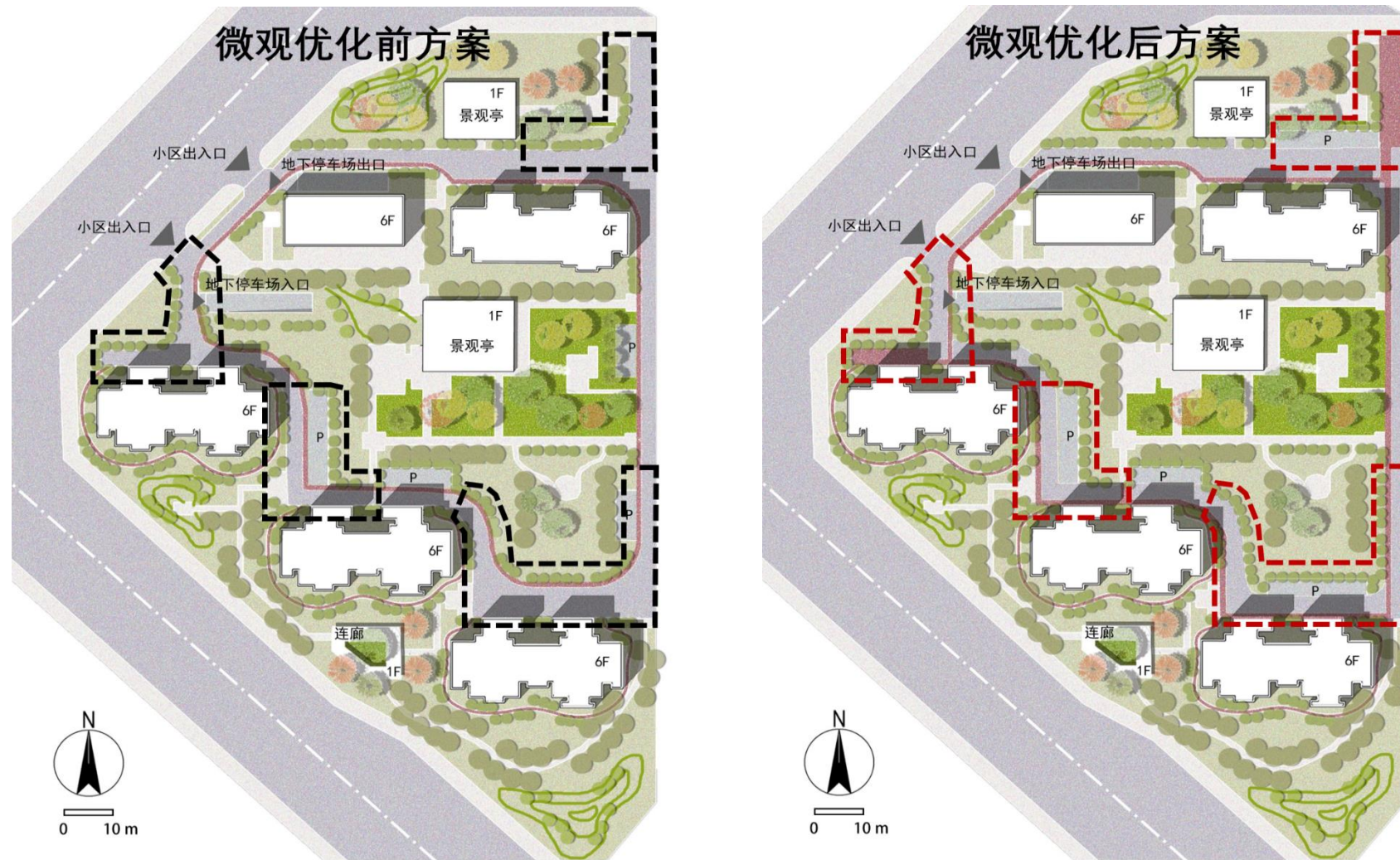


图 6-30 基于微观使用模式模拟的空间优化结果

第7章 总结与讨论

7.1 研究总结

本研究基于居住区公共开敞空间存在的问题及在空间优化过程中面临的使用模式测度与评估的方法局限,从宏观及微观两个尺度,测度和模拟两个视角,关注交通/穿行与休闲/停留两类活动,提出对应的使用模式定量测度及模拟的方法,并通过实证研究检验了各方法的适用性,讨论了其在支持居住区公共开敞空间设计及更新改造的应用潜力。

7.1.1 居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法研究总结

本研究旨在解决前沿公共开敞空间使用模式测度方法在测度居住区公共开敞空间宏观使用模式的局限性问题,即由于研究对象的差异,已有研究主要通过安装 GNSS、蓝牙、Wi-Fi 等设备在商场、景区、住宅等场地的研究尚未考虑居住区尺度研究关注的交通与休闲行为的差异,因此没有对整体流量中交通与休闲行为进行拆离,难以测度不同空间的使用属性,基于整体流量的空间评估不能完全反映不同空间功能差异的特征。

本研究根据已有针对社区的交通与休闲步行的定性描述特征及研究结论,提出基于人次及人数数据的行人活动流量的拆解方法,并选择 Wi-Fi 这一可与社区基础设施结合的,具有较好探测精度的设备获取 MAC 地址数据,并根据 MAC 地址的记录次数和唯一值对数据进行拆分,将 MAC 地址记录次数代表的人次数据反映休闲行为,MAC 地址唯一值数量代表的人数数据反映交通行为。

研究通过在以北京通州副中心门禁小区紫荆雅园为代表的居住区内各关键公共开敞空间节点布设 12 个 Wi-Fi 探针开展为期 9 个月的监测实验,用以验证本研究提出的方法假设和方法的适用性。研究结果表明人次数据与人数数据的差异符合 Wi-Fi 探针布置的位置所对应的功能差异,并且人次及人数数据在各点反映出的一天 24 小时、早高峰与晚高峰、工作日与周末等不同时段的差异也符合已有研究结论中对交通与休闲行为的时间分布特征的描述。此外,为验证交通与休闲行为的区分及差异在居住区公共开敞空间的重要意义,本研究还选取了以办公、旅游观光为主要功能的北京朝阳 751 创新园区作为对照实验。研究通过在 751 园区内不同节点布设 19 个 Wi-Fi 探针分析其在交通与休闲行为的差异。研究结果显示,751 园区中人次与人数数据的差异相较于居住区结果而言差异较小,且不同空间节点在人次和人数数据的分布差异具有较强的一致性,不同于居住区内各节点由于位置和功能的不同表现出的显著的人次与人

数数据分布差异，研究结果显示出 751 园区内人们对各节点的使用更倾向于交通目的，即反映出为到达各活动节点而产生的被动出行活动。

总体而言，两个不同属性研究对象的实验结果差异既验证了本研究提出的对于居住区宏观使用模式而言交通与休闲行为的显著差异，反映出居住区公共开敞空间使用模式测度方法相较于其他公共开敞空间的独特性，又验证了本研究提出的提取交通与休闲行为的方法假设和利用 Wi-Fi 探针实现该方法应用的合理性和适用性。

7.1.2 居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法研究总结

相较于居住区公共开敞空间宏观尺度使用模式研究将各公共开敞空间视为不同节点，从而分析各节点的布局 and 结构问题，居住区公共开敞空间微观使用模式研究将各公共开敞空间视为一个面，具体分析空间内各区域的使用模式。本研究针对已有定量研究数据精度不足、图像与实际空间不匹配、忽略行为差异、长时间监测成本及灵活性等局限，提出两种数据采集及分析方法，分别识别穿行及停留行为，并将影像数据转换为平面投影数据提升图片数据精度，实现对居住区公共开敞空间微观使用模式的精细化测度。

本研究根据透视几何原理，将倾斜视角下图片中具有透视特征的空间转换为平面，并结合深度学习的目标识别算法识别图片中的行人，并将其转换到平面空间的对应位置，从而实现米级的人物活动位置识别精度。在平面投影的基础上，结合微观尺度研究关注的活动类型，本研究进一步区分微观尺度的穿行活动轨迹和停留行为：（1）结合图片轨迹识别算法，将图片中的轨迹提取到对应的平面空间中，从而实现平面轨迹数据的获取；（2）根据目标识别原理中目标识别框的在连续照片中的变化幅度，提出识别图片中停留行为的方法。

研究考虑了不同摄影设备在场地微观尺度使用模式测度的独特性，采取了两种不同的数据获取方案进行对照实验。方案一通过连续影像收集的摄像设备进行数据收集，所获取的数据具有时间连续性，可以用于整体活动情况及活动轨迹方法的验证，但由于连续摄影设备的影像录制时间受限于供电情况，且由于录制视频中存在大量空镜，数据处理量较大，更适用于与居住区监控摄像头结合的居住区更新改造实践。方案二则使用轻量级的红外触发相机，由于其在探测到生物时才触发摄像头，其数据不具有时间连续性，但能够记录所有有人活动的场景，且由于不处在长时间连续录制状态，红外相机工作时间更长，因而具备更灵活的布局形式，更适用于大规模监测的实验性的工作，且适用于没有监控摄像头的居住区和不能满足供电条件的区域。

为验证两种摄像方式在测度居住区公共开敞空间微观使用模式、评估空间设计合理性方面的有效性，本研究选择副中心紫荆雅园及海淀区水磨社区两个居住区分别进行方案一连续影像数据收集及方案二红外触发相机数据收集的方法实验。其中在紫荆雅园中选择五个区域、在水磨社区中选取三个区域进行数据采集。研究从深度学习算

法比对、摄影机架设高度比对、监测数据视角转换、数据收集的时段/天气等方面对实验中数据收集方法进行了多维度的比较、选择和验证。

研究结果显示此方法可以获取更高精度的平面活动数据测度空间整体使用模式的同时,也能较好地识别和区分穿行和停留行为。研究方法实现了对威廉·怀特的广场网格计数法的场地拓展和自动化,也能获取公共开敞空间研究领域关注的穿行和停留行为。实验结果符合已有研究对穿行及停留行为空间偏好的结论。

7.1.3 居住区公共开敞空间宏观使用模式模拟方法研究总结

针对居住区公共开敞空间处于城市及建筑尺度之间的尺度,在模拟空间活动情况选择相应模型时由于已有研究缺少该尺度的定量数据积累而导致的模型选择和参数选择困难,且科学性不足的问题,本研究根据已有研究结论揭示的休闲行为偏好视觉要素,交通行为偏好空间结构和连接的特征,提出宏观尺度空间使用模式模拟的研究假设,即交通行为更符合空间句法线段模型的模拟机制,休闲行为更倾向于空间句法视域模型的模拟场景,此假设解释了城市尺度研究常使用线段模型,建筑内部尺度研究常使用视域模型的原因。而居住区公共开敞空间处于城市及建筑内部两个尺度之间,具有复杂的交通与休闲活动的融合,因此对该尺度公共开敞空间使用模式的模拟应结合两种行为所对应的模型。研究应用宏观及微观尺度使用测度获取的数据,验证研究假设,并基于实验结果得出模型合适的参数以此支持居住区公共开敞空间设计的“前策划”中的模拟工作。

为验证本研究提出的居住区公共开敞空间使用模式模拟的方法假设,本研究对模拟交通与休闲行为的空间网络采取不同的网络构建模式。其中交通行为重视的空间连接情况和折转角度的特征用线段模型进行空间网络结构提取,将每个空间视为节点,将空间之间的连接关系视为链接。休闲行为关注的视觉要素特征则用视域模型的网格对空间网络结构进行提取,每个网格为一个节点,网络之间的邻接关系视为链接。然后将基于宏观使用模式测度所获取的流网络数据与研究假设推导出的模拟方法所模拟的结果进行相关性分析,并通过调整不同的空间句法模型构建方法和模型分析参数,检验模型参数的敏感性。总体而言,宏观模拟结果显示基于空间网络的线段模型与视域模型的模拟结果能够分别解释交通与休闲行为构成的流网络,并揭示出两种活动之间存在一定的互斥性。研究结果验证研究假设合理性的同时,也为最佳模拟参数的选择提供支持。

7.1.4 居住区公共开敞空间微观使用模式模拟方法研究总结

微观尺度使用模式模拟方面,由于人的活动具有自下而上的特征,但受空间约束仍体现出一定的偏好特征。然而已有针对微观尺度活动规律的研究通常基于定性分析,难以实现对空间内活动规律的精细化识别,从而约束了该尺度模型可靠性的验证及模

型参数的选择。本研究对基于居住区公共开敞空间微观使用模式测度结果提取停留和穿行行为偏好的特征,从而验证已有模型的准确度及相关定性研究结论的可靠性。具体来讲,微观尺度穿行行为对应宏观的交通行为,因此受空间形态所表现出的区域之间的关系影响更加显著,而微观尺度的停留行为与宏观的休闲行为类似,更受视觉要素及视线引导的影响,具体表现在对周边设施远近的感知中。因此,研究分别对两种行为进行建模,并通过定性及定量的方式对模型可靠性进行检验,从而支撑微观尺度模拟模型的优化和模型参数选择。

对于穿行行为而言,研究选择反映自下而上活动的空间句法代理人模型来模拟空间中活动的分布,并根据不同结果与实际测度结果的差异,选择最适宜的模型参数。对于停留行为而言,研究根据已有研究提出的停留行为空间偏好提取可能影响停留行为的边界、设施等要素,通过空间分析及回归分析验证已有研究结论的同时,提取合适的模型参数。

整体而言,微观模拟结果显示,代理人模型能够较好识别微观尺度空间的穿行活动偏好,回归模型能够反映空间要素对停留行为吸引与排斥的关系,两者均符合微观空间使用模式测度的空间模式及特征,为空间整体的行为活动偏好的模拟提供支撑。

7.1.5 居住区公共开敞空间优化研究总结

本研究在对居住区公共开敞空间使用模式测度及模拟研究工作的基础上,结合“前策划-后评估”的定量模拟及评估工具,提出针对不同时期居住区公共开敞空间优化的路径。

其一是针对老旧小区内部公共开敞空间使用模式评估以支持微更新改造。本研究在居住区公共开敞空间宏观使用模式测度方法验证的基础上,进一步对实验居住区各节点的大小及设施布置情况进行评估,展示该方法在评估空间使用功能是否符合前策划的功能布局以及判断不同空间设计面积和设施布局是否满足居民的使用需求等方面的适用性。研究在根据各节点交通与休闲行为比重的差异判断各空间主要使用功能的基础上,结合交通或休闲流量的数值比较,评估各空间在满足该空间功能过程中的面积适宜性,并针对交通属性空间的步行交通设施的连续性及休闲属性空间的步行休闲设施的丰富度进行了评估,将其与真实的两种活动的流量反映的空间使用整体情况进行比对,从而发现过度设计和设计不足的区域,提出对应的更新设计策略。研究还根据已有研究提出的交通与休闲行为之间复杂的互动转换关系,从两者活动的均衡性评估各空间活动丰富度和活动转换的潜力。同时,研究在居住区公共开敞空间微观使用模式测度方法验证的基础上,进一步探索了在该尺度不同测度方法在评估空间形状及边界、设施布局合理性等方面的实践应用方法。具体来讲,通过连续摄影数据获取的空间各区域整体流量及活动轨迹数据有利于判断人的活动是否在设计的步行道中,以及是否满足人们对不同空间的使用模式预期,诊断空间使用的均衡性,从而支持步行

道的拓宽和收窄、步行系统与机动车系统的调整及优化等方面的更新改造。通过红外触发相机获取的空间整体流量和停留数据有利于判断空间不同时段的空间活动模式，识别人们自发形成的停留空间和需求，从而支持停留设施（如座椅及周边绿化）的建设和调整优化。由于此方法所识别的活动也适用于其他类型的公共开敞空间，因此，基于空间投影和影像数据的微观尺度空间使用模式测度和空间边界和设施布局评估的方法也可以推广应用到其他类型的公共开敞空间中，如口袋公园、街角公园、商业广场等区域。

其二是针对未建或需要大规模更新改造的居住的使用模式模拟以支持设计方案的比选，提升空间的利用效率和使用合理性。本研究结合实际工程中的海绵设施社会效益评价与方案比选情景，对上述模拟方法进行应用，探索该模拟方法在“前策划”阶段进行方案比选与优化的应用方式。研究选择北京副中心某海绵设施建设点为研究对象，旨在实现在保持环境效益及经济成本的基础上社会效益最大化。研究在已有通过非支配遗传算法的居住区公共开敞空间设施建设面积最优曲面的基础上，通过宏观尺度模拟不同方案的社会效益（公共开敞空间综合使用模式），对研究小区中不同方案中透水铺装、透水沥青与雨水花园等三项海绵城市低影响开发措施的空间位置的使用模式进行模拟，选择社会效益最高的方案，并根据微观尺度模拟结果对方案中不同设施铺设情况进行优化。然而，本模拟的模型和参数选择仅依赖于同在通州副中心的另一社区，相关模型和参数的敏感性和拓展性还有待更多基于宏观及微观使用模式测度的研究结果。本研究的模型和参数选择思路可以拓展到类似前策划模拟场景中。

7.2 主要创新

本研究面向居住区公共开敞空间优化的实践需求，基于已有研究针对不同行为规律的研究结论，研发了宏观及微观尺度的测度方法，并构建了居住区公共开敞空间的模拟方法体系，本研究的创新点在于：

7.2.1 理论验证——行为偏好的定量实证检验

本研究基于已有研究揭示出的不同行为的行为模式及空间偏好差异提出针对不同行为的测度及模拟方法。相关研究结果也进一步验证已有研究的结论。

宏观尺度测度与模拟研究的基础是已有研究揭示的居住区内交通与休闲活动混合度较高，且具有显著的活动模式及空间偏好差异。本研究在宏观尺度使用模式测度及模拟的方法及模型验证过程中通过实证研究验证了已有定性研究对两种行为特征地发现。具体来讲，（1）研究通过实验结果与人工现场记录的对比，验证了已有研究提出的休闲活动相较交通活动而言速度更慢、走走停停时间更长、且在空间中反复遛弯的特征；（2）研究通过对比居住区及创新园区的实验结果验证了居住相较于其他以建筑

为核心的园区而言，各公共开敞空间中交通与休闲活动的混合的复杂性更高的特征；

(3) 研究通过分析交通与休闲行为与空间句法线段与视域模型模拟结果的关系，验证了已有研究提出的交通行为更依赖空间的连接关系，休闲行为更关注视觉要素及视线引导的结论。

微观尺度测度与模拟研究的基础是已有研究提出的穿行及停留行为规律及空间偏好。本研究在微观尺度使用模式测度及模拟的方法及模型验证过程中通过实证研究验证了已有定性研究对两种行为的规律总结。具体来讲，(1) 研究通过实验结果与人工审计结果的对比，验证了停留行为相较于穿行行为而言，在特定空间驻足的时间更长、移动范围更小的特征；(2) 研究通过分析自下而上的代理人模型模拟结果与穿行行为的关系验证代理人模型在模拟微观尺度步行行为的可靠性，且揭示出空间形态对穿行行为的影响，验证交通步行受空间连接关系影响的结论；(3) 研究通过分析停留行为与周边要素之间的相关关系，验证了已有研究提出的场地边界、墙面、停留设施等要素对人停留行为引导的积极作用。

总而言之，本研究通过研发定量测度及模拟工具，通过定量分析验证了已有基于访谈问卷、自我报告、现场观察等定性研究针对不同行为活动特征及空间偏好的发现。

7.2.2 方法创新——高精度多维度的空间使用模式测度及模拟

本研究的方法创新主要体现在以下两个方面：(1) 实现基于居住区公共开敞空间特殊性的行为数据获取与区分，(2) 实现基于图像数据的高精度活动密度与轨迹的综合性使用模式测度。

(1) 实现基于居住区公共开敞空间特殊性的行为数据获取与区分。本研究关注到居住区公共开敞空间相较于已有研究中其他公共开敞空间而言，具有显著的交通与休闲行为融合特征，并受到社区尺度公共健康研究领域的重视。然而，已有公共开敞空间使用模式测度方法由于应用场景的差异，并未试图区分这两种行为。本研究结合两种行为在使用模式上的差异，提出提取两种行为的思路，并充分利用 Wi-Fi 数据可以获得 MAC 地址数的特征，将数据进行拆分，分别匹配交通与休闲行为，研究结果显示此方法符合文献中对两种行为的定性研究描述。研究也通过在其他类型园区应用中的结果差异验证了居住区交通与休闲行为充分融合的特殊性。

(2) 实现基于图像数据的高精度活动密度与轨迹的综合性使用模式测度。本研究面对居住区公共开敞空间每一平米用地都具有重要意义却缺少能够测度该精度空间使用模式的方法和数据的问题，研发了更轻便、灵活性较高的空间投影技术，实现对视频/图片数据的平面转换，从而获得高精度空间使用模式数据。相较于计算机学科关注对图片透视的矫正算法，本研究将图片透视矫正的平面识别结果与居住区平面进行结合，并针对公共开敞空间设计关注的行为类型，研发了结合活动密度与轨迹、停留行为等方面的综合性使用模式测度方法，优化了其在应用过程中的行人识别流程，实现

了图片透视矫正算法在居住区公共开敞空间使用模式测度的实践应用方式。研究分别用摄像头数据及红外触发相机图片数据验证不同数据源的可靠性，并在实验小区展现方法在评估使用模式的适用性。本研究选择用的数据获取工具均为成本相对较低，且能与居住区监控摄像头等基础设施结合，因此可将此方法推广到全国更多的居住区中，也可降低大规模、长时间研究的成本。

7.2.3 实践应用——低成本、灵活的活动监测与评估支持多路径空间优化

本研究在研发公共开敞空间使用模式测度、模拟方法过程中充分考虑放在在工程实践上的应用，即考虑设施布局的可拓展性、便捷性及灵活性，以及分析方法的自动化。因此，本研究在宏观使用模式测度方法的数据收集工具的选择中考虑未来 Wi-Fi 设备可作为居住区基础设施，为居民提供免费的户外网络，因此，基于 Wi-Fi 的数据收集相较于蓝牙设备而言有潜力推广应用到更多其他居住区公共开敞空间使用模式测度和评估中，支持各空间的长时间监测和更新设计及改造实施研究。同时研究在微观使用模式测度方法中选择了可与居住区监控摄像头结合的视频拍摄方法及可灵活便捷布置的红外触发相机记录方法，由于数据获取工具的成本较低，因此可将此方法推广到更多的居住区中，也可降低大规模、长时间研究的成本。

在公共开敞空间优化方面，本研究提出了基于评估和模拟两种路径的空间优化方法。前者适用于已建居住公共开敞空间，针对小微公共开敞空间的设计改造，通过“使用模式评估-问题识别-设计优化”的路径，对其进行设计优化与空间干预。后者则适用于已建居住区的大规模改造或新建居住区的设计方案评估，考虑居住区公共开敞空间在不同尺度的活动特征，综合自上而下及自下而上的模拟方法，通过“使用模式模拟-设计方案比选-设计方案优化”的路径，对设计方案进行评估，提前优化设计，减少建造后的空间及设施浪费。研究通过在已建居住区空间和未建的居住区公共开敞空间设计方案的应用，探索了基于两种路径的空间优化方法。考虑到当前我国存在大量的老旧小区，以及正在开展的老旧小区公共开敞空间更新改造实践，该方法可推广应用到大规模的老旧小区空间优化与公共开敞空间改造实践中。

7.3 研究局限与未来展望

本研究选择用的数据获取工具均为成本相对较低，且能与居住区免费公共 Wi-Fi、监控摄像头等基础设施结合，可用于大规模环境行为学研究及基于“前策划-后评估”框架的工程实践中。研究通过实证研究验证了方法及模型的有效性，并进一步探索了其在支持空间优化的方法路径。然而本研究在实证研究案例数量、测度及评估维度等方面仍存在一定的局限性，有待未来研究进一步深化。

案例数量局限，本研究重点在于测度与模拟方法的研发，案例研究主要用于展现和验证该方法的可靠性和在居住区公共开敞空间“前策划-后评估”实践中的适用性。然而受限于案例数量，研究所得出的居住区公共开敞空间的行为规律和模拟居住区公共开敞空间使用模式的参数选择的可靠性还有待更多类型（如新旧居住区、高档居住区与普通居住区，不同面积的居住区、人车分流与人车混行的居住区等）、更多区域及更长周期研究的对比和交叉验证。

其他维度的评估与测度局限方面，本研究关注的居住区公共开敞空间使用模式测度只是居住区公共开敞空间评估的一部分。其他还包括满意度评价、环境感知评价、环境质量评价及其他环境效能评价。本研究只在综述部分对其内容和方法进行了梳理，在实证研究中并未全面展开。本研究认为居住区使用模式测度是最需要也最能够被自动化大规模算法替代的工作，且目前的方法尚不能像基于图片的环境质量评价或基于大数据的环境效能评价那样很好匹配此类工作对活动类型和数据精度的需求。因此，本研究旨在解决居住区公共开敞空间评估中亟需定量工具的使用模式测度难题，能够节约人力、物力的同时，可将节约的人力支撑与人满意度或情感相关的同样十分重要的主观评估工作中。

评估维度和内容的局限方面，研究只实现了部分类型活动的时空特征的刻画，而对于更精细化的不同使用人群（如老人、小孩等）和更具体的活动类型（如奔跑、站立、蹲坐、谈话、游戏等）的考虑不足，本研究也试图通过现有图片识别方法对人群类型和行为特征进行识别，但受限于图片拍摄视角和距离的影响，本研究所关注的的数据获取方式所获取的数据与现有模型训练集的匹配度角度，因此识别精准度较低，因此相关研究有待后续更大规模数据的收集和训练，以及更精准的识别方法研发和实证研究的拓展补充。

此外，本研究中微观尺度测度依赖于图像数据，尽管在实验中没有对每个人进行识别，最终结果的呈现也是汇总的数据，但在数据收集及处理过程中仍可能存在一定的伦理问题，并且动态变化的MAC地址可能会影响本研究的结论。未来研究可选择不获取人面貌的图像采集设备来进行大规模工程实践，避免对个体隐私的侵犯。

参考文献

- [1]. Abedi N, Bhaskar A, Chung E, et al. Assessment of antenna characteristic effects on pedestrian and cyclists travel-time estimation based on Bluetooth and Wi-Fi MAC addresses[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2015, 60: 124–141.
- [2]. Al-Anbuky A, Rudolph S, Haehner J, et al. Public space ambient intelligence systems: Benefits, approaches and challenges[C]. In: *Proceedings of the ARCS 2015 - The 28th International Conference on Architecture of Computing Systems Proceedings*, F 24-27 March 2015, 2015.
- [3]. Albert A, Kaur J, Gonzalez M. Using convolutional networks and satellite imagery to identify patterns in urban environments at a large scale[C]. In: *Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, New York, NY; 2017. pp. 1357-1366.
- [4]. Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74: 47.
- [5]. Alkheder S, Abdullah W A, Al-Rukaibi F, et al. Mobility patterns for newly proposed metro system in Kuwait[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2020, 146(1): 04019020.
- [6]. Astell-Burt T, Feng X, Mavoa S, et al. Do low-income neighbourhoods have the least green space? A cross-sectional study of Australia’s most populous cities[J]. *BMC Public Health*, 2014(14): 292.
- [7]. Ashihara Y. *The aesthetic townscape*[M]. Cambridge: MIT Press, 1983.
- [8]. Bafna S. Space syntax: A brief introduction to its logic and analytical techniques[J]. *Environment and Behavior*, 2003, 35(1): 17–29.
- [9]. Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286: 509.
- [10]. Barthelemy M. *The Structure and Dynamics of Cities: Urban Data Analysis and Theoretical Modeling* [M]. Cambridge University Press, 2017.
- [11]. Batty M. *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals*[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2007.
- [12]. Batty M. Exploring isovist fields: Space and shape in architectural and urban morphology[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2001, 28(1): 123–150.
- [13]. Batty M. *The New Science of Cities*. Cambridge (MA): The MIT Press, 2013.
- [14]. Batty M, Longley P A. *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*[M]. San Diego, CA: Academic Press, 1996.
- [15]. Bedimo-Rung A, Mowen A, Cohen D. The significance of parks to physical activity and public health: a conceptual model[J]. *Preventive Medicine*, 2005; 28: 159–168.
- [16]. Berry N M, Smith M, Ullah S, et al. Walking for recreation and transport by geographic remoteness in South Australian adults[J]. *The Australian Journal of Rural Health*, 2017, 25 (3): 155-162.
- [17]. Bettencourt L M A. Impact of changing technology on the evolution of complex informational networks [C]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102: 1878-1891.

-
- [18]. Berry B J L. Geography of Market Centers and Retail Distribution[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1967.
- [19]. Bianconi G. Multilayer Networks: Structure and Function[M]. Oxford: Oxford University Press, 2018.
- [20]. Boccaletti S, Bianconi G, Criado R, et al. The structure and dynamics of multilayer networks[J]. Physics Reports, 2014, 544: 1–122.
- [21]. Çelik H, Hanjalić A, Hendriks E A. Towards a robust solution to people counting[C]. In: Proceedings of the International Conference on Image Processing; 2006. pp. 2401-2404.
- [22]. Cerin E, Saelens B E, Sallis J F, et al. Neighborhood environment walkability scale: Validity and development of a short form[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2006, 38(9): 1682-1691.
- [23]. Chai Y, Ta N, Ma J. The socio-spatial dimension of behavior analysis: Frontiers and progress in Chinese behavioral geography[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(08): 1243-1260.
- [24]. Cheng Y, Legates R. China's hybrid global city region pathway: Evidence from the Yangtze river delta[J]. Cities, 2018, 77: 81-91.
- [25]. Christaller W. Central Places in Southern Germany[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1966.
- [26]. Clark A F, Scott D M. Does the social environment influence active travel? An investigation of walking in Hamilton, Canada[J]. Journal of Transport Geography, 2013, 31: 278-285.
- [27]. Dalton R. Spatial navigation in immersive virtual environments[D]. London; University of London, 2001.
- [28]. Danyluk M. Fungible space: Competition and volatility in the global logistics network[J]. International Journal of Urban and Regional Research, 2019, 43(1): 94-111.
- [29]. de Nadai M, Staiano J, Larcher R, et al. The death and life of great Italian cities: A mobile phone data perspective[C]. In: Proceedings of the 25th International Conference on World Wide Web; 2016. pp. 413-423.
- [30]. Desyllas J, Duxbury E. Axial maps and visibility analysis: A comparison of their methodology and use in models of urban pedestrian movement[C]. In Proceedings: Third International Symposium on Space Syntax, Atlanta, 2001, 27:1–13.
- [31]. Deuble M P, de Dear R J. Green occupants for green buildings: The missing link?[J] Building and Environment. 2012, 56: 21-27.
- [32]. Dong L, Ratti C, Zheng S. Predicting neighborhoods' socioeconomic attributes using restaurant data[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116 (31): 15447-15452.
- [33]. du Toit L, Cerin E, Leslie E, et al. Does walking in the neighbourhood enhance local sociability?[J]. Urban Studies, 2007, 44 (9): 1677-1695.
- [34]. Duchowny K, Clarke P, Gallagher N A, et al. Using mobile, wearable, technology to understand the role of built environment demand for outdoor mobility[J]. Environment and Behavior. 2019, 51(6): 671–688.
- [35]. Engelniederhammer A, Papastefanou G, Xiang L. Crowding density in urban environment and its effects on emotional responding of pedestrians: Using wearable device technology with sensors

- capturing proximity and psychophysiological emotion responses while walking in the street[J]. *Journal of Human Behavior in the Social Environment*. 2019, 29(5): 630-646.
- [36]. Ericson J D, Chrastil E R, Warren W H. Space syntax visibility graph analysis is not robust to changes in spatial and temporal resolution[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2020, doi: 10.1177/2399808319897624.
- [37]. Ermagun A, Levinson D M. Development and application of the network weight matrix to predict traffic flow for congested and uncongested conditions[J]. *Environment and Planning B-Urban Analytics and City Science*, 2019, 46(9): 1684-1705.
- [38]. Etman A, Kamphuis C B, Prins R G, et al. Characteristics of residential areas and transportation walking among frail and non-frail Dutch elderly: Does the size of the area matter?[J] *International Journal of Health Geographics*, 2014, 13: 7.
- [39]. Ewing R, Clemente O. *Measuring Urban Design: Metrics for Livable Places*[M]. Washington, DC: Island Press, 2013.
- [40]. Ewing R, Handy S. Measuring the unmeasurable: Urban design qualities related to walkability[J]. *Journal of Urban design*, 2009, 14(1): 65-84.
- [41]. Feng X, Li K, Ding C, et al. Bayesian network modeling explorations of strategies on reducing perceived transfer time for urban rail transit service improvement in different seasons[J]. *Cities*, 2019, 95: 102474.
- [42]. Haggett P, Cliff A D, Frey A. *Locational Analysis in Human Geography*[M]. New York: Wiley, 1977.
- [43]. Hess F, Salze P, Weber C, et al. Active Mobility and Environment: A Pilot Qualitative Study for the Design of a New Questionnaire[J]. *PLoS One*. 2017; 12(1): e0168986.
- [44]. Hillier B. The common language of space: A way of looking at the social economic and environmental functioning of cities in a common basis[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1999, 11(3):344-249.
- [45]. Hillier B, Leaman P, Stansall P, et al. *Space Syntax*[J]. *Environment and Planning B* 不完整, 1976, 3:147-185.
- [46]. Hillier B, Major M, Desyllas J, et al. *A study of the existing layout and new masterplan proposal*[M]. London: Tate Gallery, Millbank, 1996.
- [47]. Hillier B, Hanson J. *The Social Logic of Space*[M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1984.
- [48]. Hou J, Chen L, Zhang E, et al. Quantifying the usage of small public spaces using deep convolutional neural network[J]. *PLoS One*, 2020, 15 (10): e0239390.
- [49]. Hu X, Shen P, Shi Y, et al. Using wi-fi probe and location data to analyze the human distribution characteristics of green spaces: A case study of the Yanfu greenland park, China[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 54: 126733.
- [50]. Huang Y, Li J, Wu G, et al. Quantifying the bias in place emotion extracted from photos on social networking sites: A case study on a university campus[J]. *Cities*. 2020; 102: 102719.
- [51]. Hufnagel L, Brockmann D, Geisel T. Forecast and control of epidemics in a globalized world[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(42): 15124-15129.

- [52]. Hu X, Shen P, SHI Y, et al. Using Wi-Fi probe and location data to analyze the human distribution characteristics of green spaces: A case study of the Yanfu Greenland Park, China[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 54: 126733.
- [53]. Galpern P, Ladle A, Uribe F A, et al. Assessing urban connectivity using volunteered mobile phone GPS locations[J]. *Applied Geography*, 2018, 93: 37-46.
- [54]. Gehl J. *Life Between Buildings: Using Public Space*[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987.
- [55]. Gehl J, Gemzøe L. *Public spaces-public life*[M]. Copenhagen: Danish architectural press; 1996.
- [56]. Gilbert E N. Random graphs[J]. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1959, 30:1141-1144.
- [57]. Gilbert E N. *Agent-Based Models: Quantitative Applications in the Social Sciences*[M]. SAGE Publications, 2007.
- [58]. Gilies-Corti B, Broomhal M H, Kniuman M, et al. Increasing Walking: How important is distance to, attractiveness, and size of public open space?[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2005, 28(S2): 169-176.
- [59]. Giles-Corti B, Donovan R, Holman C D J. Factors influencing the use of physical activity Facilities: results from qualitative research[J]. *Health Promotion Journal of Australia*, 1996, 6(1): 16-21.
- [60]. Giles-Corti B, Timperio A, Cutt H, et al. Development of a reliable measure of walking within and outside the local neighborhood: RESIDE's Neighborhood Physical Activity Questionnaire[J]. *Preventive Medicine*, 2006; 42: 455-459.
- [61]. Goremyko M V, Makarov V V, Hramov A E, et al. Betweenness centrality in urban networks: Revealing the transportation backbone of the country from the demographic data[C]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 177: 012017.
- [62]. Gulbahce N, Barabasi A L, Loscalzo J. Network medicine: A network-based approach to human disease[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2011, 12: 56-68.
- [63]. Hu X, Shen P, Shi Y, et al. Using Wi-Fi probe and location data to analyze the human distribution characteristics of green spaces: A case study of the Yanfu greenland park, China[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 54: 126733.
- [64]. Jabareen Y R. Sustainable urban forms: Their typologies, models, and concepts[J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2006, 26(1): 38-52.
- [65]. Jacobs A B. *Great streets*[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 1995.
- [66]. Jacobs J. *The life and death of Great American Cities*[M]. New York: Random House, 1961.
- [67]. Jia X J, Yu Y, Xia W N, et al. Cardiovascular diseases in middle aged and older adults in China: The joint effects and mediation of different types of physical exercise and neighborhood greenness and walkability[J]. *Environmental Research*, 2018, 167: 175-183.
- [68]. Jiang B, Chang C, Sullivan W C. A dose of nature: Tree cover, stress reduction, and gender differences[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 26-36.
- [69]. Jiang B, Ma D, Yin J, Sandberg M. Spatial distribution of city tweets and their densities[J]. *Geographical Analysis*, 2016, 48(3): 337-351.
- [70]. Joseph A, Zimring C. Where active older adults walk - understanding the factors related to path choice for walking among active retirement community residents[J]. *Environment and Behavior*, 2007, 39 (1): 75-105.

- [71]. Kaczynski A T, Glover T D. Talking the talk, walking the walk: Examining the effect of neighbourhood walkability and social connectedness on physical activity[J]. *Journal of Public Health (Oxford, England)*, 2012, 34 (3): 382-389.
- [72]. Kaczynski A T, Henderson K. Environmental correlates of physical activity: A review of evidence about parks and recreation[J]. *Leisure Sciences*, 2007; 29: 315–354.
- [73]. Kang B, Moudon A V, Hurvitz P M, et al. Differences in behavior, time, location, and built environment between objectively measured utilitarian and recreational walking[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 57: 185-194.
- [74]. Kerr J, Rosenberg D, Frank L. The role of the built Environment in healthy aging: Community design, physical activity, and health among older adults[J]. *Journal of Planning Literature*, 2012, 27(1): 43-60.
- [75]. Khiali-Miab A, Van Strien M J, Axhausen K W, et al. Combining urban scaling and polycentricity to explain socio-economic status of urban regions[J]. *PLoS One*, 2019, 14(6): e0218022.
- [76]. Kielar P M, Biedermann D H, Kneidl A, et al. A unified pedestrian routing model combining multiple graph-based navigation methods; proceedings of the Traffic and Granular Flow '15, Cham, F 2016//, 2016[C]. Springer International Publishing.
- [77]. Kivelä M, Arenas A, Barthelemy M, et al. Multilayer networks[J]. *Journal of Complex Networks*, 2014, 2: 203–271.
- [78]. Koohsari M, Kaczynski A, McCormack G, et al. Using space syntax to assess the built environment for physical activity: Applications to research on parks and public open spaces[J]. *Leisure Sciences*, 2014; 36: 206–216.
- [79]. Lambiotte R, Sinatra R, Delvenne J C, et al. Flow graphs: Interweaving dynamic and structure[J]. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2011, 84: 017102.
- [80]. Larotta S, Silva P. A gravity model analysis of determinants of international migration from Colombia 1990-2015[J]. *Territorios*, 2019, 41: 69-100.
- [81]. Learnihan V, Van Niel K P, Giles-Corti B, et al. Effect of scale on the links between walking and urban design[J]. *Geographical Research*, 2011, 49 (2): 183-191.
- [82]. Lefebvre H. ‘Notes on the new town’, *Introduction to Modernity*[M]. London and New York: Verlso, 1962.
- [83]. Li S X, Zhao P J, Zhang H, et al. Walking behavior in the old downtown Beijing: The impact of perceptions and attitudes and social variations[J]. *Transport Policy*, 2019, 73: 1-11.
- [84]. Li X, Santi P, Courtney H K, et al. Investigating the association between streetscapes and human walking activities using google street view and human trajectory data[J]. *Transactions in GIS*, 2018, 22(4): 1029-1044.
- [85]. Liu X, Song Y, Wu K, et al. Understanding urban China with open data[J]. *Cities*, 2015, 47: 53-61.
- [86]. Liu Z, Wang S, Wang F. Isolated or integrated? Planning and management of urban renewal for historic areas in old Beijing city, based on the association network system[J]. *Habitat International*, 2019, 93: 102049.

- [87]. Long Y, Huang C C. Does block size matter? The impact of urban design on economic vitality for Chinese cities[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 2019; 46(3), 406-422.
- [88]. Long Y, Liu L. How green are the streets? An analysis for central areas of Chinese cities using Tencent Street View[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0171110.
- [89]. Long Y, Ye Y. Measuring human-scale urban form and its performance[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 191: 103612. doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103612>.
- [90]. Losch A. *The Economics of Location*[M]. New Haven, Yale University Press, 1954.
- [91]. Lu Y. The association of urban greenness and walking behavior: Using google street view and deep learning techniques to estimate residents' exposure to urban greenness[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(8): 1576.
- [92]. Lu Y, Sarkar C, Xiao Y. The effect of street-level greenery on walking behavior: Evidence from Hong Kong[J]. *Social Science & Medicine*, 2018, 208: 41-49.
- [93]. Lynch K. *Good City Form*[M]. Cambridge: MIT press, 1984.
- [94]. Lynch K. *The Image of the City*[M]. Cambridge: MIT Press; 1960.
- [95]. Ma S, Long Y. Functional urban area delineations of cities on the Chinese mainland using massive Didi ride-hailing records[J]. *Cities*, 2020, 97: Unsp 102532.
- [96]. Mandelbrot B B. *The Fractal Geometry of Nature*[M]. San Francisco, CA: W. H. Freeman, 1982.
- [97]. Meenar M, Afzalan N, Hajrasouliha A. Analyzing Lynch's City Imageability in the Digital Age[J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2019, 0(0).
- [98]. Montgomery J. Making a city: Urbanity, vitality and urban design[J]. *Journal of Urban Design*, 1998, 3(1): 93-116.
- [99]. Mora R, Astudillo H, Bravo S. Looking ahead: A vision-based software for predicting pedestrian movement[J]. *Ingenieria e Investigacion*, 2014, 34(1): 79-82.
- [100]. Morello E, Ratti C. A digital image of the city: 3D isovists in Lynch's urban analysis[J]. *Environment and Planning B-Planning & Design*, 2009, 36 (5): 837-853.
- [101]. Neal Z. *The Connected City: How Networks are Shaping the Modern Metropolis*[M]. New York: Routledge, 2013.
- [102]. Newman M. *Networks: An Introduction*[M]. New York: Oxford University Press, 2001.
- [103]. Oltvai Z N, Barabasi A L. Network biology: Understanding the cell's functional organization[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2004, 5: 101-113.
- [104]. Omer I, Kaplan N. Structural properties of the angular and metric street network's centralities and their implications for movement flows[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2019, 46(6): 1182-1200.
- [105]. Osorio-Arjona J, Carlos Garcia-Palomares J. Social media and urban mobility: Using twitter to calculate home-work travel matrices[J]. *Cities*, 2019, 89: 268-280.
- [106]. Pan J, Lai J. Spatial pattern of population mobility among cities in China: Case study of the national day plus mid-autumn festival based on Tencent migration data[J]. *Cities*, 2019, 94: 55-69.

- [107]. Penn A, Hillier B, Banister D, et al. Configurational modelling of urban movement networks[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1998, 25(1): 59–84.
- [108]. Piaget J. *Structuralism*[M]. London: Routledge and Kegan Paul, 1971.
- [109]. Pumain D. *Hierarchy in the Natural and Social Sciences*[M]. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2006.
- [110]. Qin X, Zhen F, Gong Y. Combination of big and small data: Empirical study on the distribution and factors of catering space popularity in Nanjing, China[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2019, 145(1): 05018022.
- [111]. Raimbault J. Indirect evidence of network effects in a system of cities[J]. *Environment and Planning B-Urban Analytics and City Science*, 2020, 47(1): 138-55.
- [112]. Rathore M M, Ahmad A, Paul A, et al. Urban planning and building smart cities based on the Internet of Things using Big Data analytics[J]. *Computer Networks*. 2016; 101, 63–80.
- [113]. Ratti C. Space syntax: Some inconsistencies[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2004, 31(4): 487–499.
- [114]. Retscher G, Tatschl T. Indoor positioning using differential Wi-Fi lateration[J]. *Journal of Applied Geodesy*. 2017, 11(4): 249-269.
- [115]. Ribeiro A I, Hoffmann E. Development of a neighbourhood walkability Index for the Metropolitan Area. How strongly is walkability associated with walking for transport?[J] *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(12): 2767.
- [116]. Rodriguez D A, Khattak A J, Evenson K R. Can new urbanism encourage physical activity? Comparing a new urbanist neighborhood with conventional suburbs[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2006, 72(1): 43-54.
- [117]. Saelens B E, Sallis J F, Black J B, et al. Neighborhood-based differences in physical activity: An environment scale evaluation[J]. *American Journal of Public Health*, 2003, 93(9): 1552-1558.
- [118]. Safari H, Moridani F F. Syntactical analysis of the accessibility and sociability of a square in the Kuala Lumpur city center[J]. *Frontiers of Architectural Research*, 2017, 6(4): 456 – 468.
- [119]. Saldarriaga J F, Hua Y. A gravity model analysis of forced displacement in Colombia[J]. *Cities*, 2019, 95: 102407.
- [120]. Salat S. *Cities and Forms*[M]. Paris, France: Editions Hermann, 2011.
- [121]. Schmidt R, Möhring M, Keller B. More than a technical feature: Insights into augmented reality with social media integration in the travel industry[M]. In: Sigala M and Gretzel U (eds) *Advances in Social Media for Travel, Tourism and Hospitality*. London: Routledge, 2017, pp. 86-102.
- [122]. Schipperijn J, Stigsdottir U K, Randrup T B, et al. Influences on the use of urban green space: A case study in Odense, Denmark[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2010, 9(1): 25-32.
- [123]. Serok N, Levy O, Havlin S, et al. Unveiling the inter-relations between the urban streets network and its dynamic traffic flows: Planning implication[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2019, 46(7): 1362-1376.
- [124]. Shen Y, Karimi K. Urban function connectivity: Characterisation of functional urban streets with social media check-in data[J]. *Cities*, 2016, 55: 9-21.

- [125]. Shen Y, Karimi K, Law S, et al. Physical co-presence intensity: Measuring dynamic face-to-face interaction potential in public space using social media check-in records[J]. *PLoS One*, 2019, 14(2): e0212004.
- [126]. Shi S, Pain K. Investigating China's Mid-Yangtze river economic growth region using a spatial network growth model[J]. *Urban Studies*, 2020. doi: 10.1177/0042098019894232.
- [127]. Shi S, Wall R, Pain K. Exploring the significance of domestic investment for foreign direct investment in China: A city-network approach[J]. *Urban Studies*, 2019, 56(12): 2447-64.
- [128]. Sierra-Paycha C. The reemigration of immigrants in Spain. Beyond distance and pull factors: The migratory network effect (2007-2014)[J]. *Territorios*, 2019, 41: 45-68.
- [129]. Simpson J, Freeth M, Simpson K J, et al. Visual engagement with urban street edges: Insights using mobile eye-tracking[J]. *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability*, 2019, 12 (3): 259-278.
- [130]. Smit, T, Nelischer M, Perkins N. Quality of an urban community: A framework for understanding the relationship between quality and physical form[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1997, 39(2-3): 229-241.
- [131]. Spinney J E L, Millward H, Scott D. Walking for transport versus recreation: A comparison of participants, timing, and locations[J]. *Journal of Physical Activity and Health*, 2012, 9(2): 153-162.
- [132]. Sporns O, Tononi G, Kotter R. The human connectome: A structural description of the human brain[J]. *PLOS Computational Biology*, 2005, 1: 4.
- [133]. Straumann R K, Çöltekin A, Andrienko G. Towards (re)constructing narratives from georeferenced photographs through visual analytics[J]. *The Cartographic Journal*, 2014, 51(2): 152-165.
- [134]. Sulis P, Manley E, Zhong C, et al. Using mobility data as proxy for measuring urban vitality[J]. *Journal of Spatial Information Science*, 2018, 16: 137-162.
- [135]. Sung H, Lee S, Cheon S. Operationalizing Jane Jacobs's urban design theory: Empirical verification from the great city of Seoul, Korea[J]. *Journal of Planning Education and Research*, 2015, 35(2): 117-130.
- [136]. Tang L, Lin Y, Li S, et al. Exploring the influence of urban form on urban vibrancy in Shenzhen based on mobile phone data[J]. *Sustainability*, 2018, 10(12): 1-21.
- [137]. Tang J, Long Y. Measuring visual quality of street space and its temporal variation: Methodology and its application in the Hutong area in Beijing[J]. *Landscape and Urban Planning*. 2019; 191: 103436.
- [138]. Taylor P J. City generics: External urban relations in ancient-mesopotamian and modern-global city networks[J]. *Urban Geography*, 2019, 40(8): 1210-30.
- [139]. Tsai T I A. Strategies of building a stronger sense of community for sustainable neighborhoods: Comparing neighborhood accessibility with community empowerment programs[J]. *Sustainability*, 2014, 6(5): 2766-2785.

- [140]. Traunmueller W, Johnson N, Malik A, et al. Digital footprints: using Wi-Fi probe and locational data to analyze human mobility trajectories in cities[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2018, 72: 4–12.
- [141]. Tudor-Locke C, Bittman M, Merom D, et al. Patterns of walking for transport and exercise: A novel application of time use data[J]. *The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 2005, 2: 5-5.
- [142]. Turner A. Analysing the visual dynamics of spatial morphology[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2003, 30(5): 657–676.
- [143]. Turner A, Doxa M, O’Sullivan D, et al. From isovists to visibility graphs: A methodology for the analysis of architectural space[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2001, 28(1): 103–121.
- [144]. Ueshiba T, Tomita F. Plane-based calibration algorithm for multi-camera systems via factorization of homography matrices[A]; *Proceedings Ninth IEEE International Conference on Computer Vision[C]*, 2003, 2: 966-973.
- [145]. Wang P, Gonzalez M, Hidalgo C A, et al. Understanding the spreading patterns of mobile phone viruses[J]. *Science*, 2009, 324: 1071.
- [146]. Wang S, Wang J, Liu X. How do urban spatial structures evolution in the high-speed rail era? Case study of yangtze river delta, China[J]. *Habitat International*, 2019, 93: 102051.
- [147]. Watts D J. *Six Degrees: The Science of a Connected Age*[M]. New York: W. W. Norton, 2002.
- [148]. Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. *Nature*, 1998, 393: 440.
- [149]. Weber A F. *The Growth of Cities in the Nineteenth Century*[M]. New York: Macmillan, 1899.
- [150]. West G. *Scale: The Universal Laws of Growth, Innovation, Sustainability, and the Pace of Life in Organisms, Cities, Economies, and Companies*[M]. New York: Penguin Press, 2017.
- [151]. Whyte W H. *The Social Life of Small Urban Spaces*[M]. Washington, DC: Conservation Foundation, 1980.
- [152]. Wilson R L. Liveability of the city: Attitudes and urban development[M]. In Chapin, F. S., & Weiss, S. F. (Eds.), *Urban Growth Dynamics*. New York: Wiley; 1962.
- [153]. Winkel G H, Sasanoff R. An approach to an objective analysis of behaviour in architectural space[M]. In Proshansky, H., et al (Eds.), *Environmental Psychology*. New York: Holt, Rinehart & Winston; 1976.
- [154]. Winters M, Brauer M, Setton E M, et al. Built environment influences on healthy transportation choices: bicycling versus driving[J] *Urban Health*. 2010, 87(6): 969-993.
- [155]. Wolfram S. *A New Kind of Science*[M]. Champaign, IL: Wolfram Media, 2002.
- [156]. Wu L, Waber B N, Aral S, et al, Pentland A. Mining face-to-face interaction networks using sociometric badges: Predicting productivity in an IT configuration task[C]. Paris, France: *Proceedings of the International Conference on Information Systems*, December 14-17, 2008.
- [157]. Verma D, Jana A, Ramamritham K. Machine-based understanding of manually collected visual and auditory datasets for urban perception studies[J]. *Landscape and Urban Planning*. 2019; 190: 103604.

- [158]. Xing J, Ai H, Liu L, et al. Robust crowd counting using detection flow[C]. In: Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Image Processing, Brussels; 2011. pp. 2061-2064.
- [159]. Xu J, Zhang M, Zhang X, et al. How does city-cluster high-speed rail facilitate regional integration? Evidence from the Shanghai-Nanjing corridor[J]. *Cities*, 2019, 85: 83-97.
- [160]. Yang H, Dijst M, Witte P, et al. Comparing passenger flow and time schedule data to analyse high-speed railways and urban networks in China[J]. *Urban Studies*, 2019, 56(6): 1267-87.
- [161]. Ye Y, Liu X. How block density and typology affect urban vitality: An exploratory analysis in Shenzhen, China[J]. *Urban Geography*, 2018, 39(4): 631-652.
- [162]. Ye Y, Richards D, Lu Y, et al. Measuring daily accessed street greenery: A human-scale approach for informing better urban planning practices[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 191: 103434.
- [163]. Ye Y, Yeh A, Zhuang Y, et al. Form Syntax as a contribution to geodesign - A morphological tool for urbanity making in urban design[J]. *Urban Design International*, 2017, 22: 73-90.
- [164]. Yoshimura Y, Amini A, Sobolevsky S, et al. Analysis of pedestrian behaviors through non-invasive bluetooth monitoring[J]. *Applied Geography*, 2017, 81: 43-51.
- [165]. Zhang Z, Long Y, Chen L, et al. Assessing personal exposure to urban greenery using wearable cameras and machine learning[J]. *Cities*, 2021, 109: 103006.
- [166]. Zhao L Z, Shen Z J, Zhang Y J, et al. The Impact of the community built environment on the walking times of residents in a community in the downtown area of Fuzhou[J]. *Sustainability*, 2019, 11(3): 11.
- [167]. Zhao P J, Wan J. Examining the effects of neighbourhood design on walking in growing megacity[J]. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 2020, 86: 102417.
- [168]. Zhen F, Qin X, Ye X, et al. Analyzing urban development patterns based on the flow analysis method[J]. *Cities*, 2019, 86(1): 78-97.
- [169]. Zhou Y, Long Y. SinoGrids: A practice for open urban data in China[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2016, 43: 1-14.
- [170]. Zipf G K. *Human Behavior and the Principle of Least Effort*[M]. Cambridge, MA: Addison-Wesley, 1949.
- [171]. 柴彦威, 塔娜. 中国时空间行为研究进展[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(09): 1362-1373.
- [172]. 柴彦威, 谭一泓, 申悦, 等. 空间——行为互动理论构建的基本思路[J]. *地理研究*, 2017, 36(10): 1959-1970.
- [173]. 陈晨. 浅议现代城市居住区内公共空间的人性化设计[J]. *中外建筑*, 2010(04): 88-90.
- [174]. 陈肖月. 商住复合型居住区中商业对人居环境的影响研究——基于问卷访谈及统计分析[J]. *现代城市研究*, 2015(07): 94-100.
- [175]. 陈义勇, 刘卫斌. 使用者行为视角的城市大型公共空间设计研究: 以深圳北中轴广场为例[J]. *中国园林*, 2015, 31(70): 108-112.
- [176]. 陈义勇, 刘涛. 社区开放空间吸引力的影响因素探析: 基于深圳华侨城社区的调查[J]. *建筑学报*, 2016(2): 107-112
- [177]. 陈梓烽, 柴彦威, 周素红. 不同模式下城市郊区居民工作日出行行为的比较研究——基于北京与广州的案例研究[J]. *人文地理*, 2015, 30(02): 23-30.

- [178]. 丁浪. 基于居民运动数据的杭州城市绿道评价及优化策略研究[D]. 浙江大学, 2018.
- [179]. 苟爱萍, 王江波. 基于SD法的街道空间活力评价研究[J]. 规划师, 2011, 27(10): 102-106.
- [180]. 韩亚楠, 茅明睿, 贺俊堯, 等. 新技术驱动下城市微更新的设计赋权——基于北京双井街道参与式微更新实践[J]. 新建筑, 2021(04): 11-17.
- [181]. 郝新华, 龙瀛, 石淼, 等. 北京街道活力: 测度、影响因素与规划设计启示[J]. 上海城市规划, 2016(03): 37-45.
- [182]. 侯静轩, 张恩嘉, 龙瀛. 多尺度城市空间网络研究进展与展望[J]. 国际城市规划, 2021, 36(4): 17-24.
- [183]. 胡亚飞. 城市生活性街道步行停留活动影响因素分析及其应用研究[D]. 重庆大学, 2017.
- [184]. 黄丹. 基于居住行为的生活性街道要素对活力的影响研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [185]. 黄洁, 杜德林, 王姣娥, 等. 基于城市群尺度的高铁列车与长途汽车网络结构比较[J]. 地理科学, 2020, 40(12): 1958-1966.
- [186]. 黄蔚欣, 吴明柏. 室内定位大数据中的信息维度——环境行为研究的新视角[J]. 时代建筑, 2017(05): 50-53.
- [187]. 黄蔚欣, 张宇, 吴明柏, 等. 基于Wi-Fi定位的智慧景区游客行为研究——以黄山风景名胜区为例[J]. 中国园林, 2018, 34(03): 25-31.
- [188]. 姜蕾. 城市街道活力的定量评估与塑造策略[D]. 大连理工大学, 2013.
- [189]. 李方正, 董莎莎, 李雄, 等. 北京市中心城绿地使用空间分布研究——基于大数据的实证分析[J]. 中国园林, 2016, 32(09): 122-128.
- [190]. 李帅, 彭震伟. 信息流视角下的成渝城市群空间组织特征及其规划探讨——基于百度指数的城市网络研究[J]. 西部人居环境学刊, 2020, 35(06): 49-57.
- [191]. 林瑛. 城市社区户外休闲空间设计——以无锡某居住区一期社区为例[J]. 规划师, 2012, 28(09): 44-48.
- [192]. 刘凌波, 彭正洪, 吴昊. 基于H/T断裂点法的POI自然城市规模等级测度[J]. 国际城市规划, 2019, 34(03): 56-64.
- [193]. 刘正莹, 杨东峰. 邻里建成环境对老年人户外休闲活动的影响初探: 大连典型住区的比较案例分析[J]. 建筑学报, 2016(6): 25-29.
- [194]. 龙瀛. 面向空间规划的微观模拟: 数据、模拟与评价[D]. 清华大学, 2011.
- [195]. 龙瀛, 毛其智, 杨东峰, 等. 城市形态、交通能耗和环境影响集成的多智能体模型[J]. 地理学报, 2011, 66(08): 1033-1044.
- [196]. 龙瀛, 周垠. 街道活力的量化评价及影响因素分析——以成都为例[J]. 新建筑, 2016(01): 52-57.
- [197]. 龙瀛, 沈尧. 数据增强设计——新数据环境下的规划设计回应与改变[J]. 上海城市规划, 2015(2): 81-87.
- [198]. 吕元, 曹小芳, 李婧, 等. 社区公共空间老幼共享模式研究[J]. 建筑学报, 2021(S1): 80-85.
- [199]. 马婕, 成玉宁. 基于集群智能行为模拟与空间句法分析的城市公园优化设计研究[J]. 中国园林, 2021, 37(04): 69-74.
- [200]. 马学广, 赵彩霞. 中国城市网络格局阶层与布局: 航空客运流的实证[J]. 城市发展研究, 2020, 27(09): 66-71+81+2.

- [201]. 牟燕川, 王荻, 黄瓴. 社区建成环境审计——推进健康社区的有效工具[J]. 国际城市规划, 2022, 37(02): 44-52.
- [202]. 钱肖颖, 孙斌栋. 基于城际创业投资联系的中国城市网络结构和组织模式[J]. 地理研究, 2021(2): 1-12.
- [203]. 邱坚坚, 刘毅华, 陈浩然, 等. 流空间视角下的粤港澳大湾区空间网络格局——基于信息流与交通流的对比分析[J]. 经济地理, 2019, 39(06): 7-15.
- [204]. 任凯, 徐磊青. 第三场所可持续营造的环境行为学研究——基于室外环境—行为互馈共生分析与选择性行为验证[J]. 城市设计, 2017(02): 76-81.
- [205]. 盛强, 杨滔, 侯静轩. 连续运动与超链接机制——基于重庆地面及地铁交通流量数据的大尺度范围空间句法实证分析[J]. 西部人居环境学刊, 2015, 30(05): 16-21.
- [206]. 史飞, 鲍家声. 城市居住区公共绿地开放空间设计研究[J]. 华中建筑, 2005(01): 129-132.
- [207]. 孙继平, 侯兰功. 基于腾讯人口迁徙数据的成渝城市群网络结构特征研究[J]. 现代城市研究, 2020(09): 78-85.
- [208]. 唐凤玲, 姚静怡, 邓紫晗, 等. 基于PLPS调研的建成环境对街道活力的影响评估——以南京市广州路段为例[A]. 中国城市规划学会、杭州市人民政府. 共享与品质——2018中国城市规划年会论文集(07城市设计) [C]. 中国城市规划学会、杭州市人民政府: 中国城市规划学会, 2018: 13.
- [209]. 田深圳, 李守伟, 李雪铭. 我国滨海城市网络时空格局研究——基于2012-2019年百度指数数据[J]. 城市问题, 2020(08): 14-21.
- [210]. 王海洋. 福田中心区公共空间活力时空分布特征及其影响因素研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [211]. 王乃迪. 生活性街道物质空间环境对街道活力的影响研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [212]. 王均瑶, 宋崴, 刘彤起. 基于多元“流”数据的吉林省城市网络结构研究[J]. 规划师, 2020, 36(S2): 64-68.
- [213]. 王启轩, 张艺帅. 广东省域城市网络的“核心—边缘”结构再解读——基于“流动空间”视角的实证研究[J]. 上海城市规划, 2020(04): 84-90.
- [214]. 王玉琢. 基于手机信令数据的上海中心城区城市空间活力特征评价及内在机制研究[D]. 东南大学, 2017.
- [215]. 王志芳, 赵稼楠, 彭瑶瑶, 等. 广州市公园对比评价研究——基于社交媒体数据的文本分析[J]. 风景园林, 2019, 26(08): 89-94.
- [216]. 谢永顺, 王成金, 韩增林, 等. 哈大城市带网络结构韧性演化研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1619-1631.
- [217]. 徐磊青. 城市开敞空间中使用者活动与期望研究——以上海城市中心区的广场与步行街为例[J]. 城市规划汇刊, 2004(04): 78-83+96.
- [218]. 徐磊青, 孟若希, 黄舒晴, 等. 疗愈导向的街道设计: 基于VR实验的探索[J]. 国际城市规划, 2019, 34(01): 38-45.
- [219]. 徐磊青, 康琦. 商业街的空间与界面特征对步行者停留活动的影响——以上海市南京西路为例[J]. 城市规划学刊, 2014(03): 104-111.
- [220]. 闫闪闪, 靳诚. 基于多源数据的市域旅游流空间网络结构特征——以洛阳市为例[J]. 经济地理, 2019, 39(08): 231-240.

- [221]. 闫闪闪, 靳诚. 洛阳城区旅游流空间网络结构特征[J]. 地理科学, 2019, 39(10): 1602-1611.
- [222]. 杨蒙, 赵宇雯, 臧鑫宇, 等. 基于主成分分析的商业街道活力空间影响因素研究——以天津小白楼片区为例[A]. 中国城市规划学会、杭州市人民政府. 共享与品质——2018中国城市规划年会论文集(07城市设计) [C]. 中国城市规划学会、杭州市人民政府: 中国城市规划学会, 2018:10.
- [223]. 郁荟. 商业街道步行空间停留性研究[D]. 同济大学, 2008.
- [224]. 于文婷, 周博, 李翥彬, 等. 既有住区老年人活动场所选择及差异性分析——以大连市为例[J]. 现代城市研究, 2020(11): 123-129.
- [225]. 曾琳, 吴承照. 上海城市社区体育设施现状调查与思考[J]. 规划师, 2007, (01): 69-73.
- [226]. 张幸颖. 新时代住区规划到参与式社区规划的转型研究[J]. 城市住宅, 2020, 27(01): 199-201.
- [227]. 中华人民共和国住房和城乡建设部. 《城市居住区规划设计标准(GB50180—2018)》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [228]. 中华人民共和国住房和城乡建设部. 《城市居住区规划设计规范(GB50180-93)》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [229]. 周慧玲, 王甫园. 基于修正引力模型的中国省际旅游者流空间网络结构特征[J]. 地理研究, 2020, 39(03): 669-81.
- [230]. 周慧玲, 许春晓. 中国城市旅游信息流空间网络结构特征分析[J]. 统计与决策, 2019, 35(20): 91-4.

附录 A 图像中最上方分析单元下边缘与上边缘夹角计算方法

空间利用效率分析方法研究与空间设施布置有效性分析方法研究中，涉及将图像中最上方分析单元下边缘位置的步骤（图 S1），正文中所附公示推导方法如下：

确定下面缘线 OF 位置可转为求线 OF 与分析空间上边缘 CD 夹角 $\angle DOF$ （图 S1）。

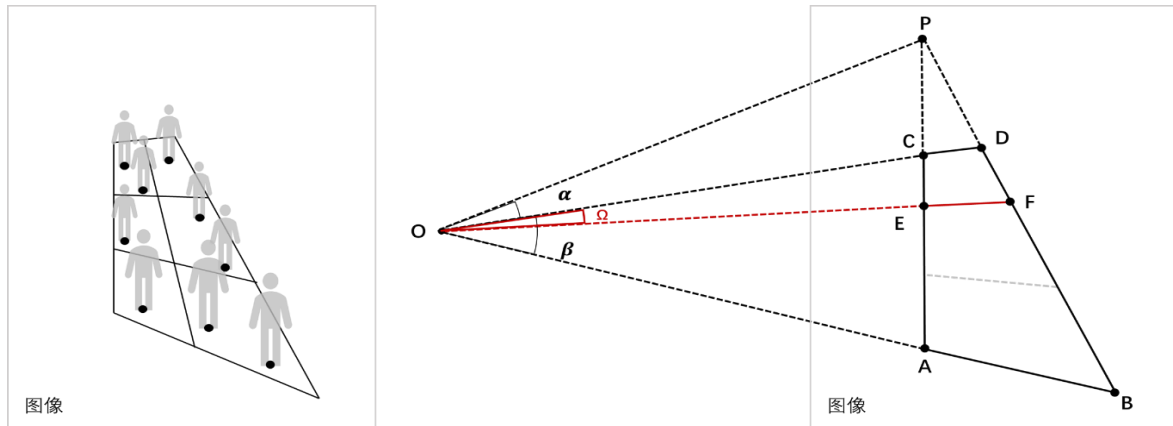


图 S1

步骤 1 推导当分析单元为两行时夹角 $\angle DOF$

当边 CD 与 AB 夹角不变时，分析空间左右边缘 AC 与 BD 的位置不影响 $\angle DOF$ 大小（图 S2）（1）。根据结论（1），由于 $\angle APB$ 大小不影响 $\angle DOF$ 的大小，可将四边形转换为边 AC 与边 CD 垂直，且 CD 边为水平线的四边形。而由于图像的平移与缩放不影响夹角，因此可以将线段 OC 缩放为 1。此时假设线段 CP 长度为 n，线段 CA 长度为 m，通过旋转 PB 使 B 点横坐标为 2，则可获得各图像中各点坐标（图 S3）。

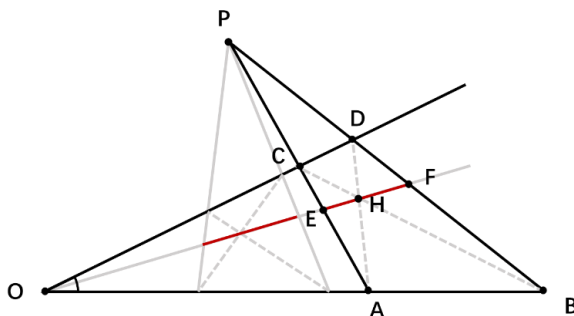


图 S2

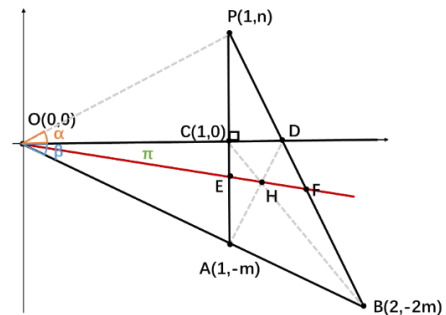


图 S3

此时所求夹角可通过求 $\tan \angle COE$ 值确定，其计算方法如下：

可求得线段 BP 所在直线的函数表达式为 $f(BP) = -(2m + n)X + 2(m+n)$

D 点坐标为 $(\frac{2(n-m)}{2m+n}, 0)$

则线段 AD 所在直线的函数表达式为 $f(AD) = \frac{m(2m+n)}{n} X - \frac{2m(m+n)}{n}$,

线段 BC 所在直线的函数表达式为 $f(BC) = -2m X + 2m$

可求得线段 AD 与线段 BC 交点 H 的坐标为 $H(\frac{2(m+2n)}{2m+3n}, -\frac{2mn}{2m+3n})$

由于线段 OE 与线段 OH 共线, 因此 $\tan \angle COE = \tan \angle COH = \frac{mn}{m+2n}$

又因为 $\tan \alpha = n, \tan \beta = m$, 则 $\tan \pi = \frac{\tan \alpha * \tan \beta}{2 \tan \alpha + \tan \beta}$ (2)

连接点 P 与 H, 交线段 OD 于点 G。连接点 FG, 延长线段 FG, 与线段 PA 交于点 J。连接 OJ, 根据透视几何基本原理, 线段 OJ 与分析单元向上增加时新分析单元的上边缘共线。则研究问题转换为推导分析单元为两行时夹角 $\angle COG$ (图 S4)。

步骤 2 推导当分析单元向上增加一行时时夹角 $\angle COG$

由于线段 OF 所在直线与线段 OH 共线, 其函数表达式为 $f(OF) = -\frac{mn}{m+2n}X$

可求得线段 BP 与线段 OF 交点 F 坐标为 $F(\frac{m+2n}{m+n}, -\frac{mn}{m+n})$

则可求得线段 HP 所在直线的函数表达式为 $f(HP) = -(4m + 3n)X + 4(m+n)$

可求得线段 HP 与线段 OD 交点 G 的坐标为 $G(\frac{4(m+n)}{4m+3n}, 0)$

因此可求得线段 FG 所在直线的函数表达式为 $f(FG) = -\frac{m(4m+3n)}{3m+2n}X + \frac{4m(m+n)}{3m+2n}$

可求得线段 FG 与线段 AP 交点 J 的坐标为 $J(1, \frac{mn}{3m+2n})$, 即 $\tan \Omega = \frac{mn}{3m+2n}$

而由于此时 α 已转换为 α_x , 则 $\tan \alpha_x = \tan(\alpha - \Omega) = \frac{\tan \alpha - \tan \Omega}{1 + \tan \alpha * \tan \Omega} = \frac{2n(m+n)}{(3m+2n)+n(mn)}$

同理由于此时 β 已转换为 β_x , 则 $\tan \beta_x = \tan(\beta + \Omega) = \frac{\tan \beta + \tan \Omega}{1 - \tan \beta * \tan \Omega} = \frac{3m(m+n)}{(3m+2n)-m(mn)}$

则使用 α_x 与 β_x 表示的 $\tan \Omega$ 结果为: $\tan \Omega = \frac{mn}{3m+2n} = \frac{\tan \alpha_x * \tan \beta_x}{3 \tan \alpha_x + 2 \tan \beta_x}$

此时可知 $j=2$ 和 3 时, 满足 j 分线与上边缘夹角的 \tan 值为 $\frac{\tan \alpha_x * \tan \beta_x}{j \tan \alpha_x + (j-1) \tan \beta_x}$

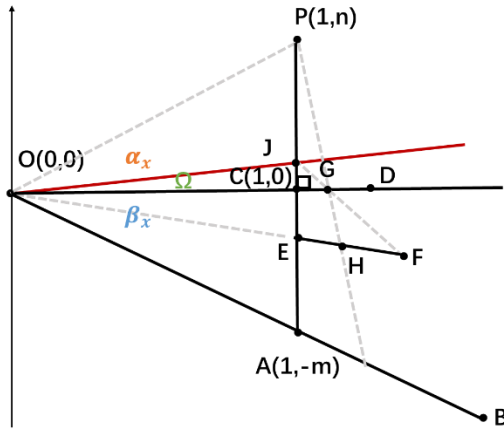


图 S4

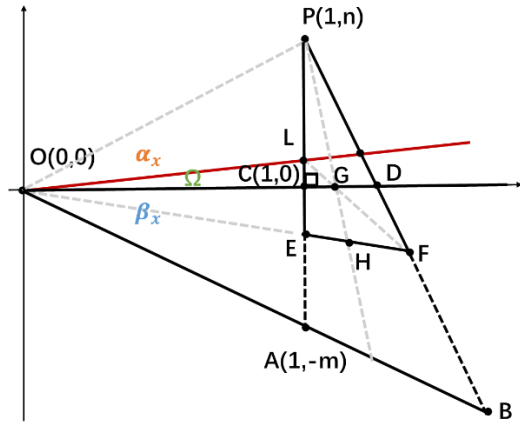


图 S5

步骤 3 证明 $j=j+1$ 时满足 $\tan \Omega = \frac{\tan \alpha_x * \tan \beta_x}{(j+1) \tan \alpha_x + j \tan \beta_x}$

假设 F 为当分析单元为 j 行时最上行分析单元右下角顶点，则延长线段 FG 与线段 AP 相交于点 L（图 S5）

可求得线段 OE 所在直线的函数表达式为 $f(OE) = \frac{\tan \alpha_x * \tan \beta_x}{j \tan \alpha_x + (j-1) \tan \beta_x} X = -\frac{n * m}{jn + (j-1)m} X$

可求得线段 BR 所在直线的函数表达式为 $f(BP) = -(2m + n) X + 2(m+n)$,

则线段 OE 的延长线与线段 BP 交点 F 的坐标为 $F(\frac{2jn+2(j-1)m}{jn+2(j-1)m}, \frac{2mn}{jn+2(j-1)m})$

此外可求得线段 HP 与线段 CD 的交点 G 的坐标为 $G(\frac{4(m+n)}{4m+3n}, 0)$,

则可求得线段 FG 所在直线的函数表达式为 $f(FG) = -\frac{m(4m+3n)}{jn+(j+1)m} X + \frac{4m(m+n)}{jn+(j+1)m}$

从而可求得线段 FG 延长线与线段 AP 交点 L 的坐标为 $L(1, \frac{mn}{jn+(j+1)m})$

即 $\tan \Omega = \frac{mn}{jn+(j+1)m}$

而由于此时 $\tan \alpha_x = \tan(\alpha - \Omega) = \frac{\tan \alpha - \tan \Omega}{1 + \tan \alpha * \tan \Omega} = \frac{n(jn+(j-2)m)}{(jn+(j-1)m) + n(mn)}$

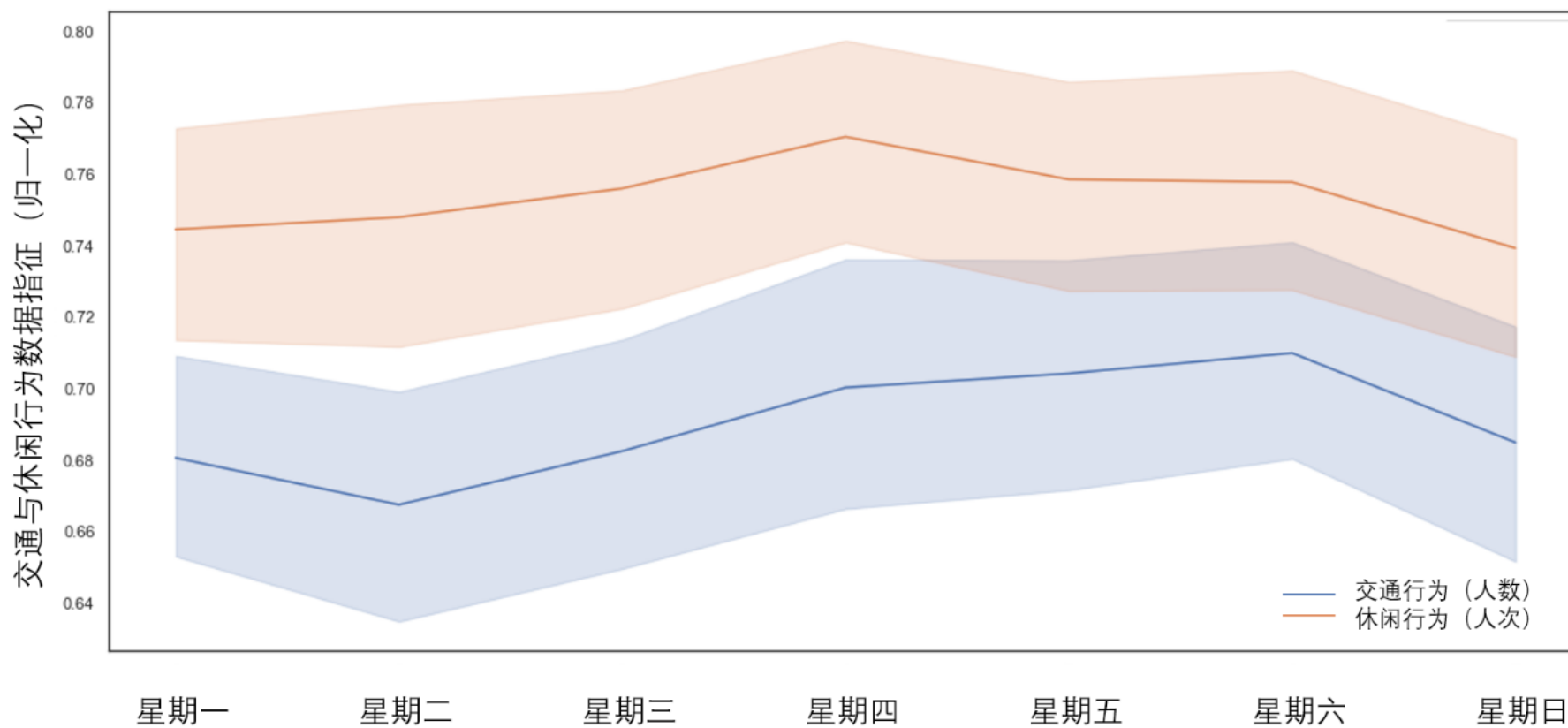
且 $\tan \beta_x = \tan(\beta + \Omega) = \frac{\tan \beta + \tan \Omega}{1 - \tan \beta * \tan \Omega} = \frac{3m(m+n)}{(3m+2n) - m(mn)}$

可得出 $\tan \Omega = \frac{\tan \alpha_x * \tan \beta_x}{(j+1) \tan \alpha_x + j \tan \beta_x}$

则对于任意 n 层分析单元其最上方分析单元下边缘与上边缘的夹角 Ω 的正弦值为：

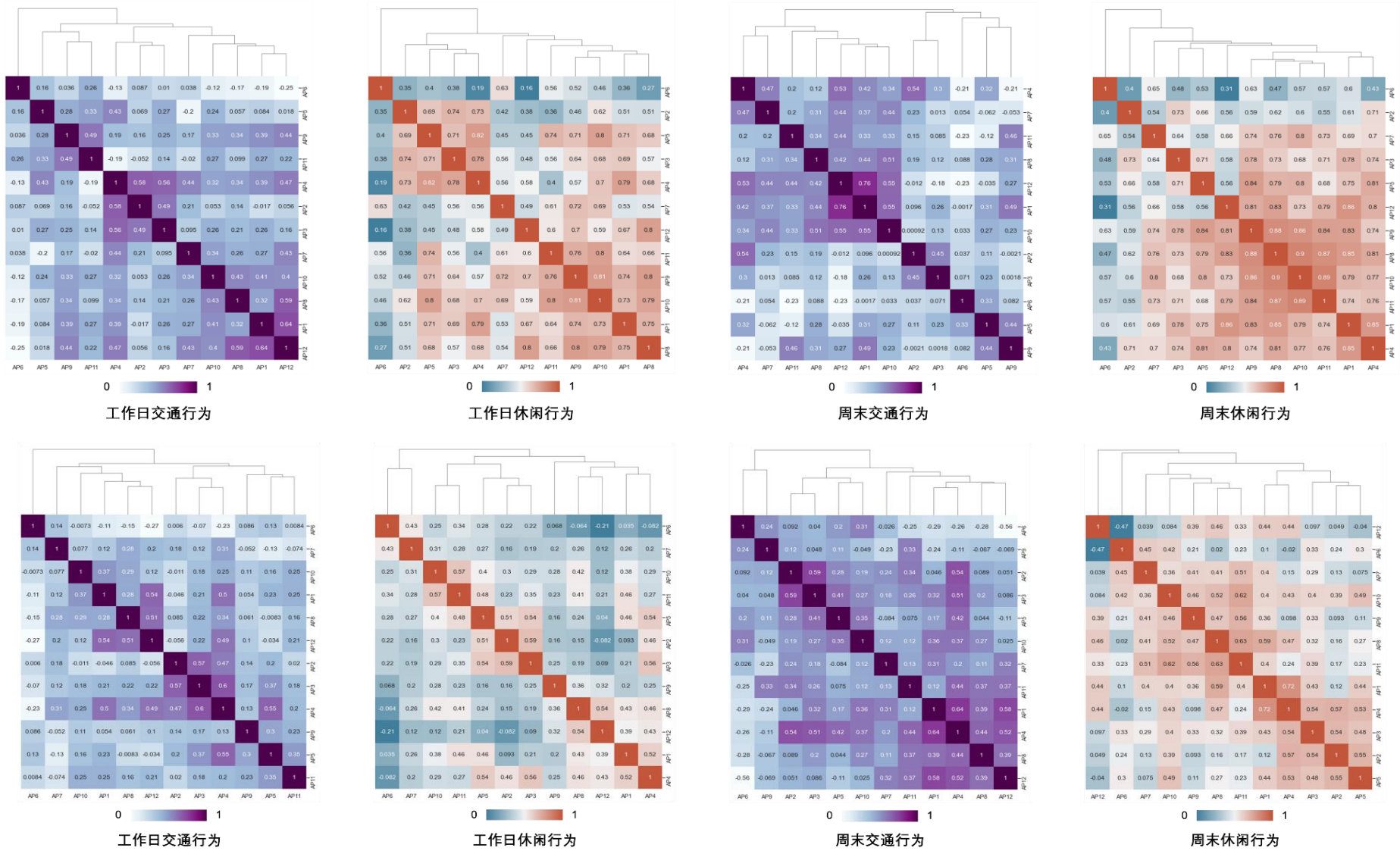
$$\tan \Omega = \frac{\tan \alpha * \tan \beta}{n * \tan \alpha + (n-1) * \tan \beta}$$

附录 B 附图

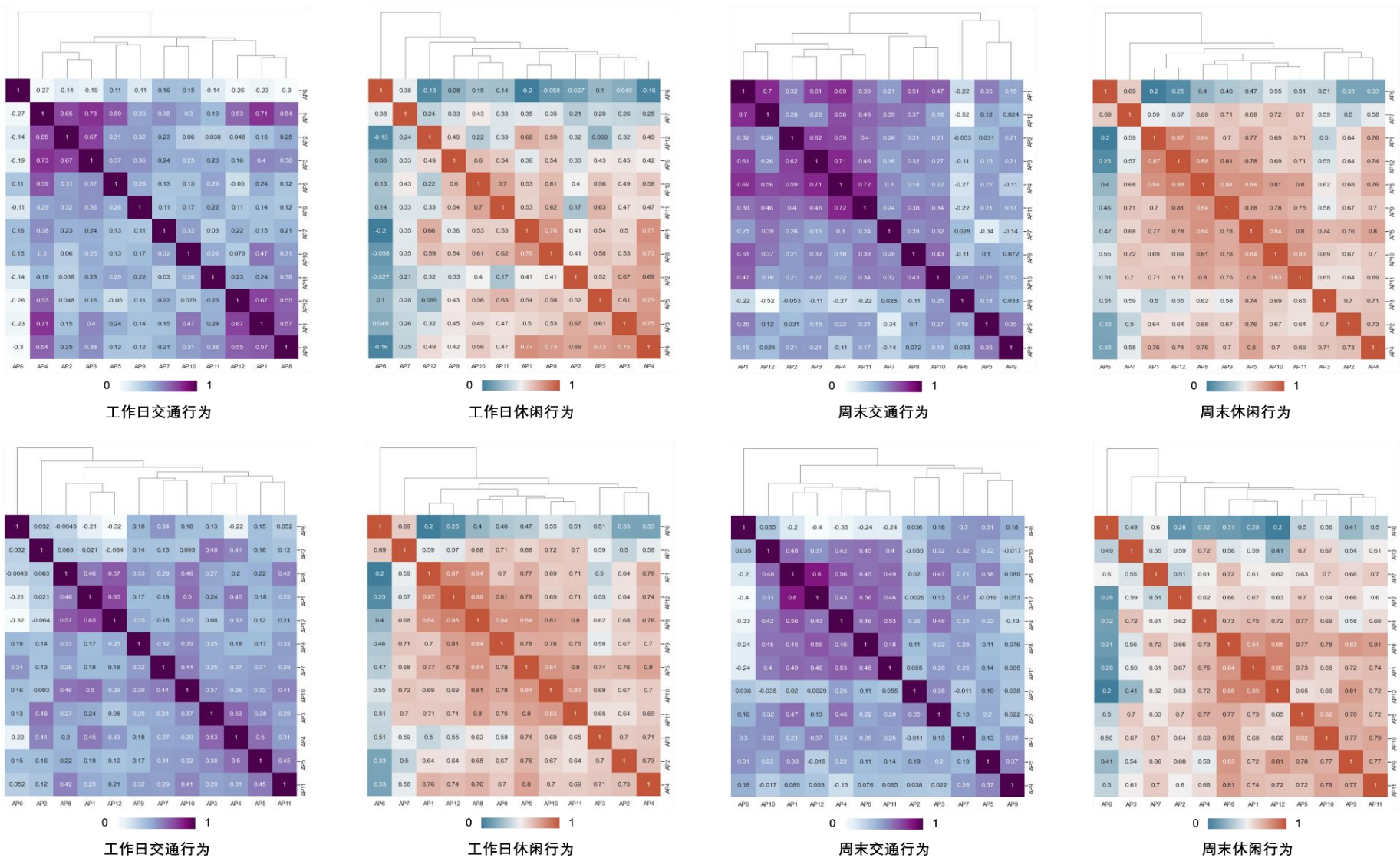


附图 1 居住区所有公共开敞空间一周内交通与休闲行为使用强度比较

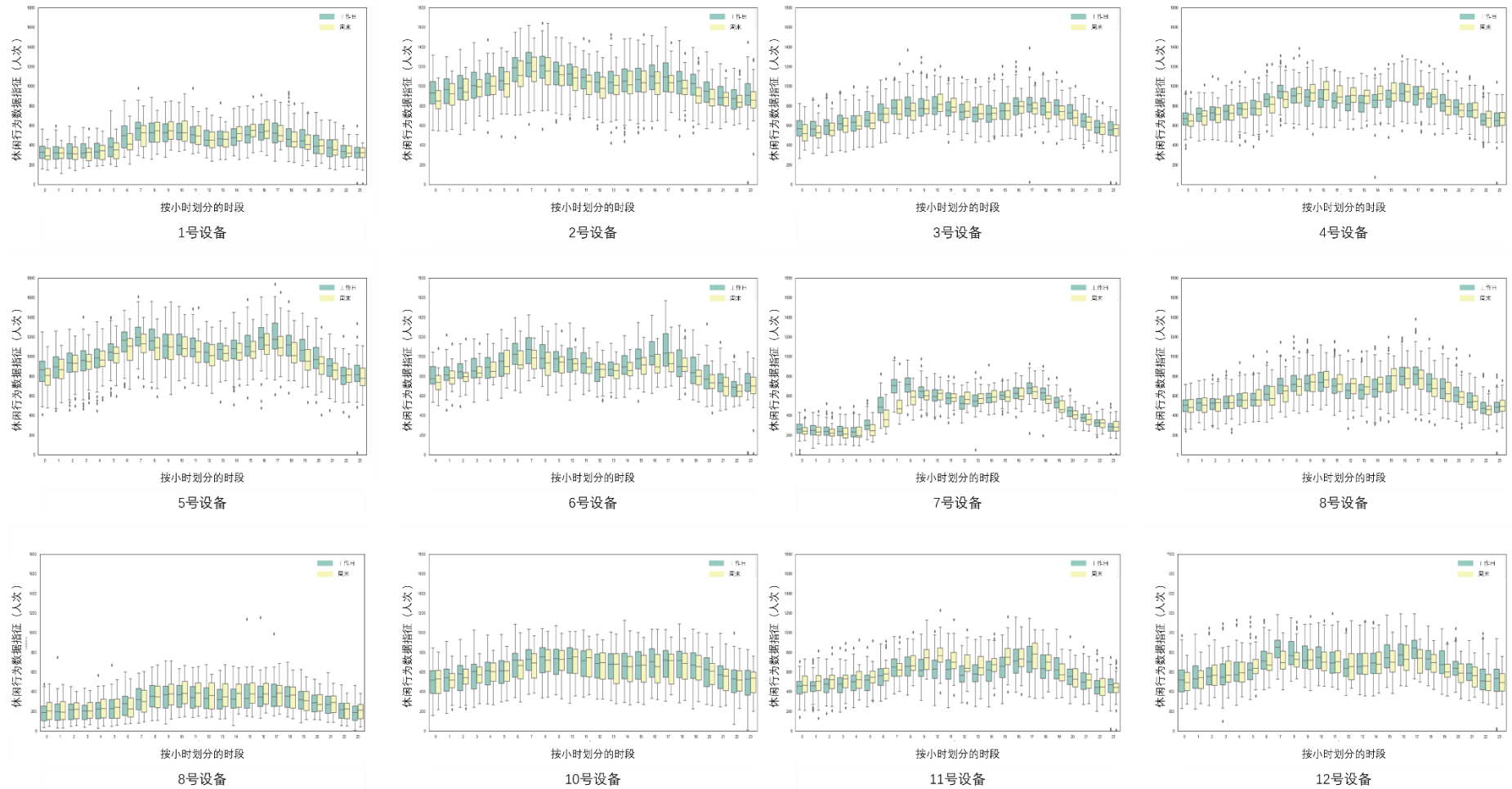
附录 B 附图



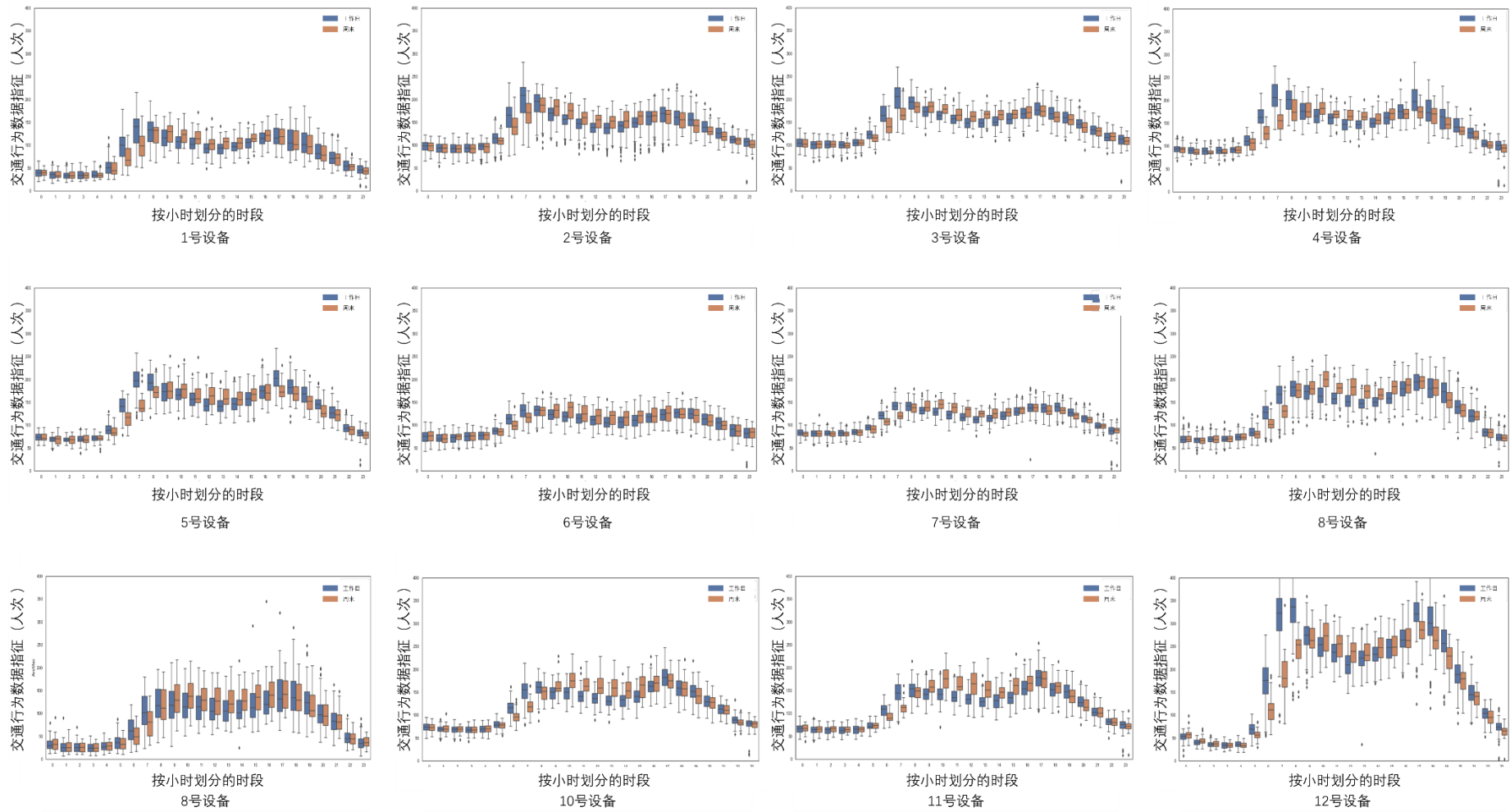
附图 2 早高峰（上）与日间（下）时段交通与休闲行为使用强度一致性比较



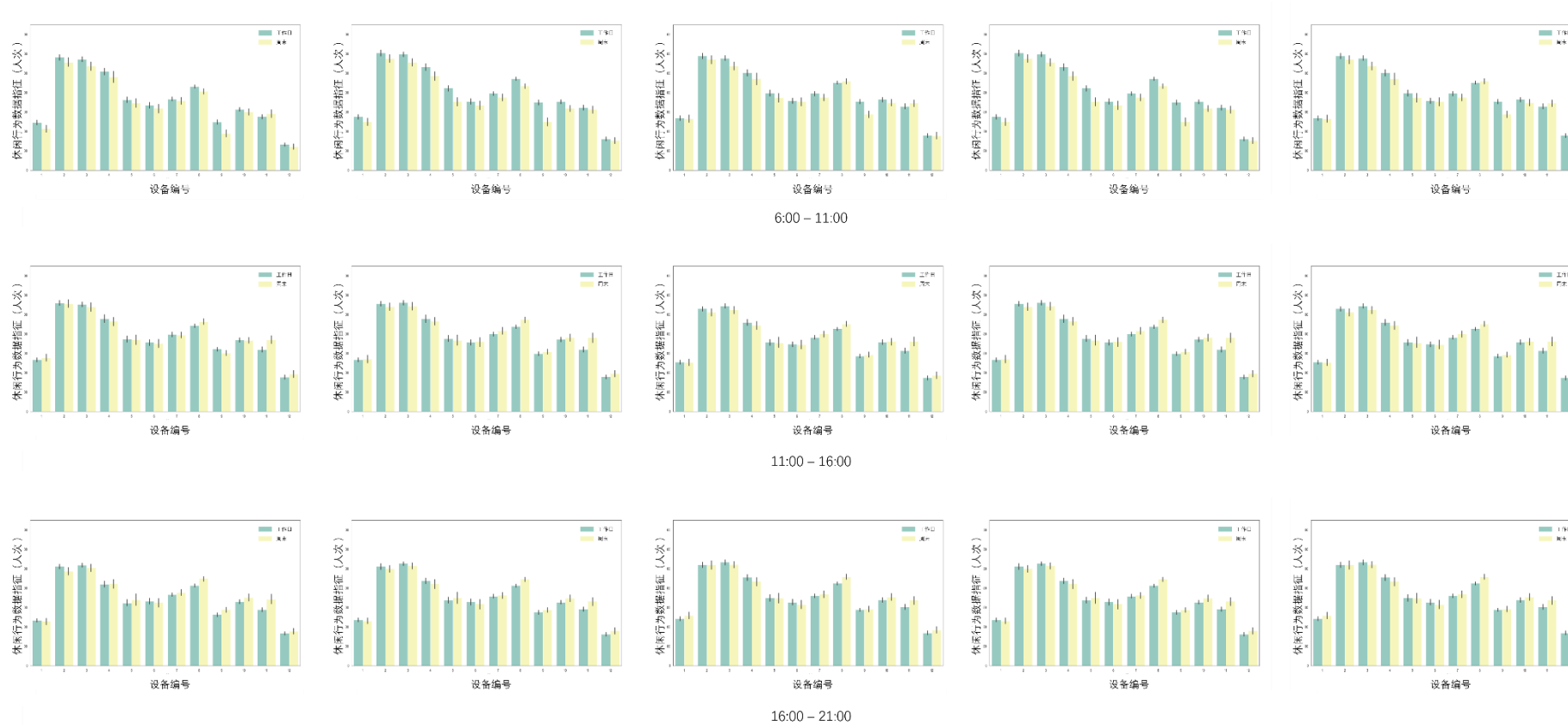
附图 3 晚高峰（上）与夜间（下）时段交通与休闲行为使用强度一致性比较



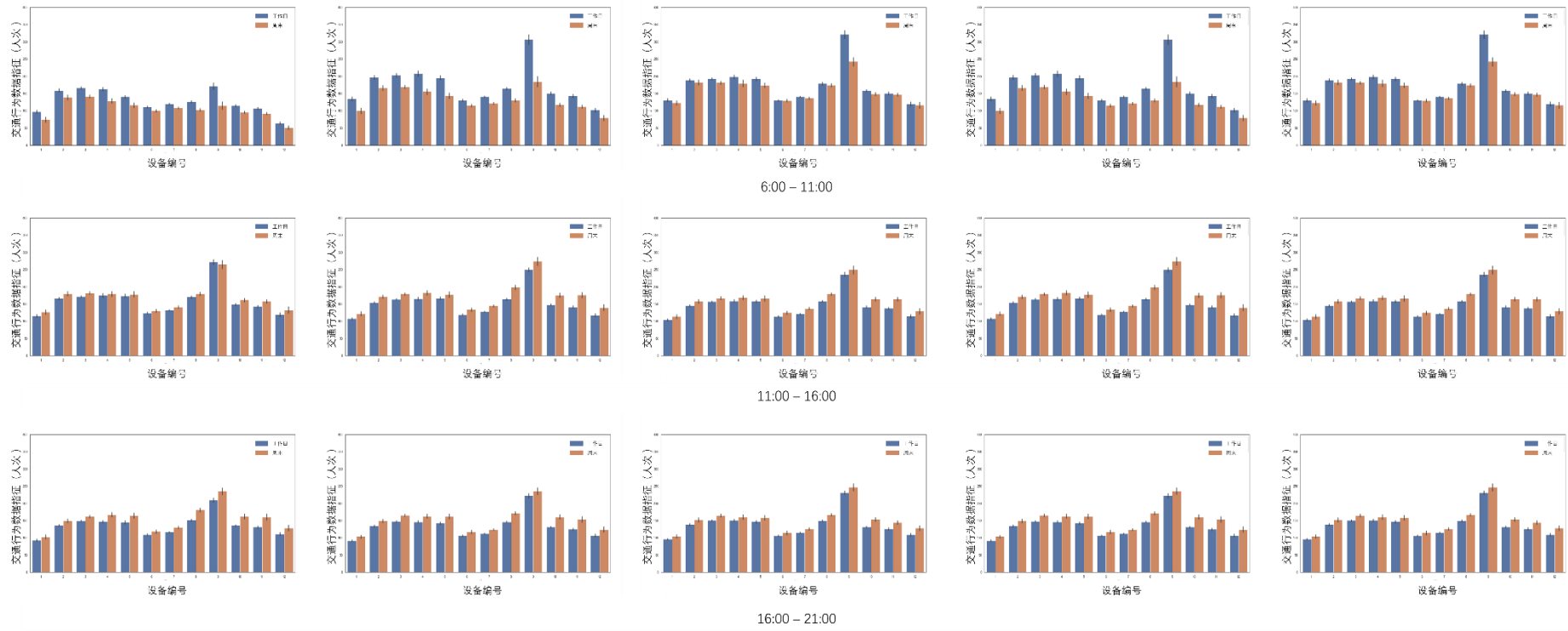
附图 4 居住各空间不同小时休闲行为使用模式



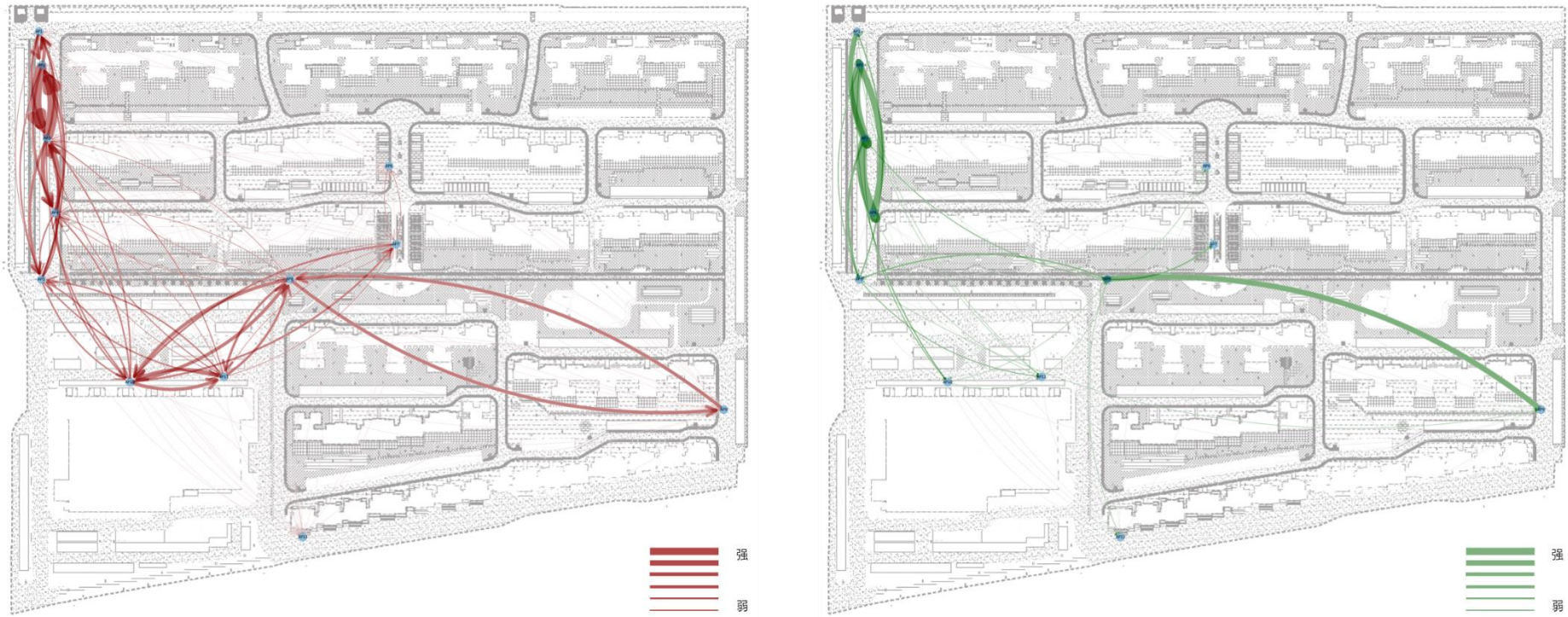
附图 5 居住各空间不同小时交通行为使用模式



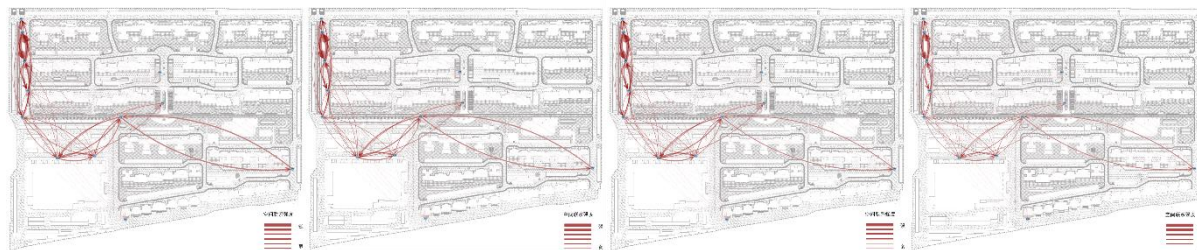
附图 6 同空间各小时休闲行为使用模式



附图 7 同空间各小时交通行为使用模式



附图 8 全时段空间使用联系性（左）与空间净出入人流量（右）



早高峰

日间

晚高峰

夜间

工作日各时段空间使用联系性



早高峰

日间

晚高峰

夜间

周末各时段空间使用联系性

附图 9 不同时段周末与工作日空间使用联系性



早高峰

日间

晚高峰

夜间

工作日各时段空间净出入人流量



早高峰

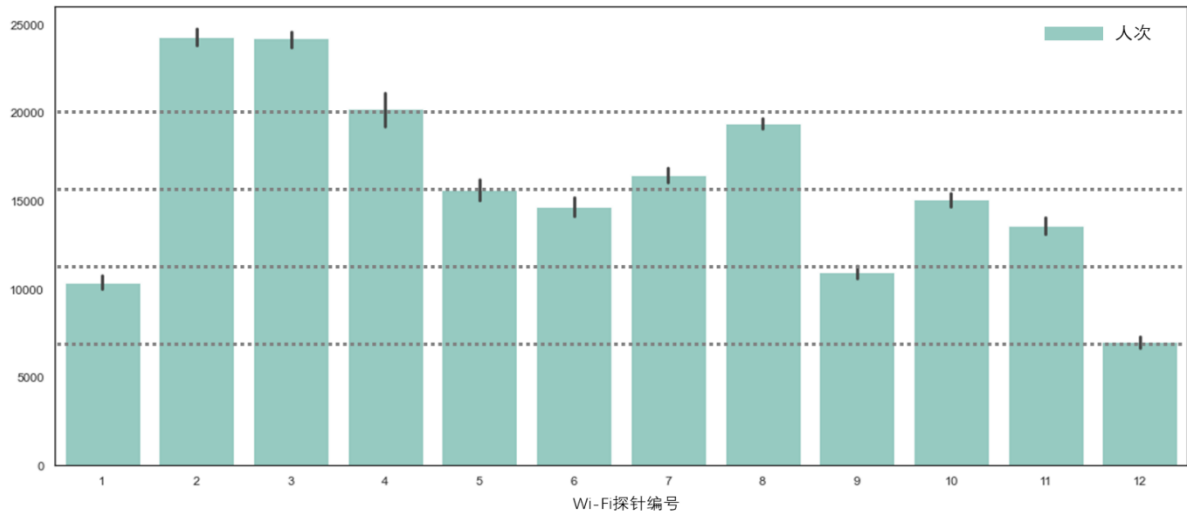
日间

晚高峰

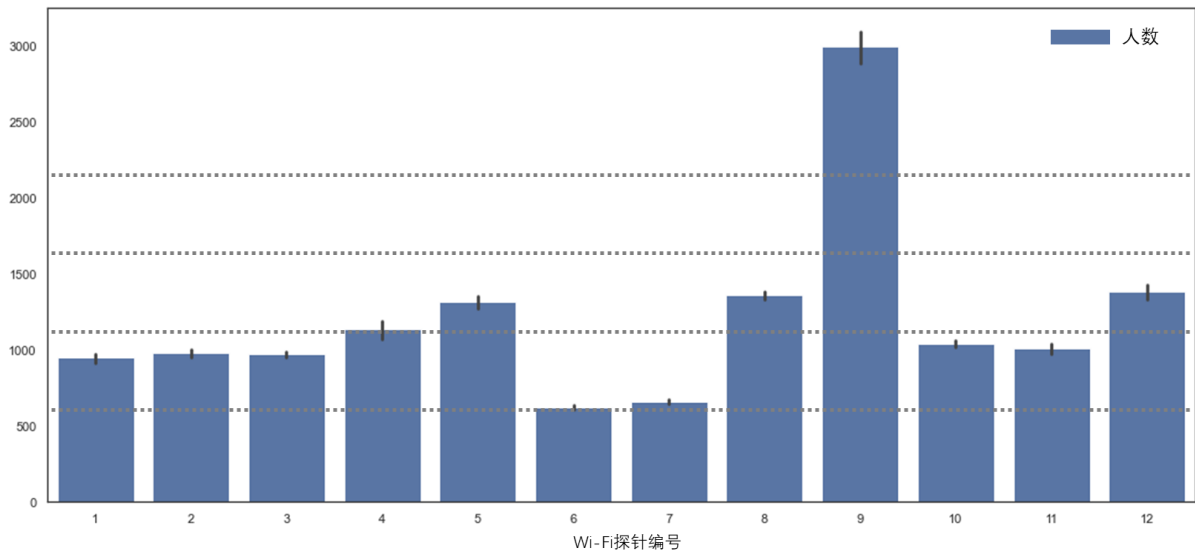
夜间

周末各时段空间净出入人流量

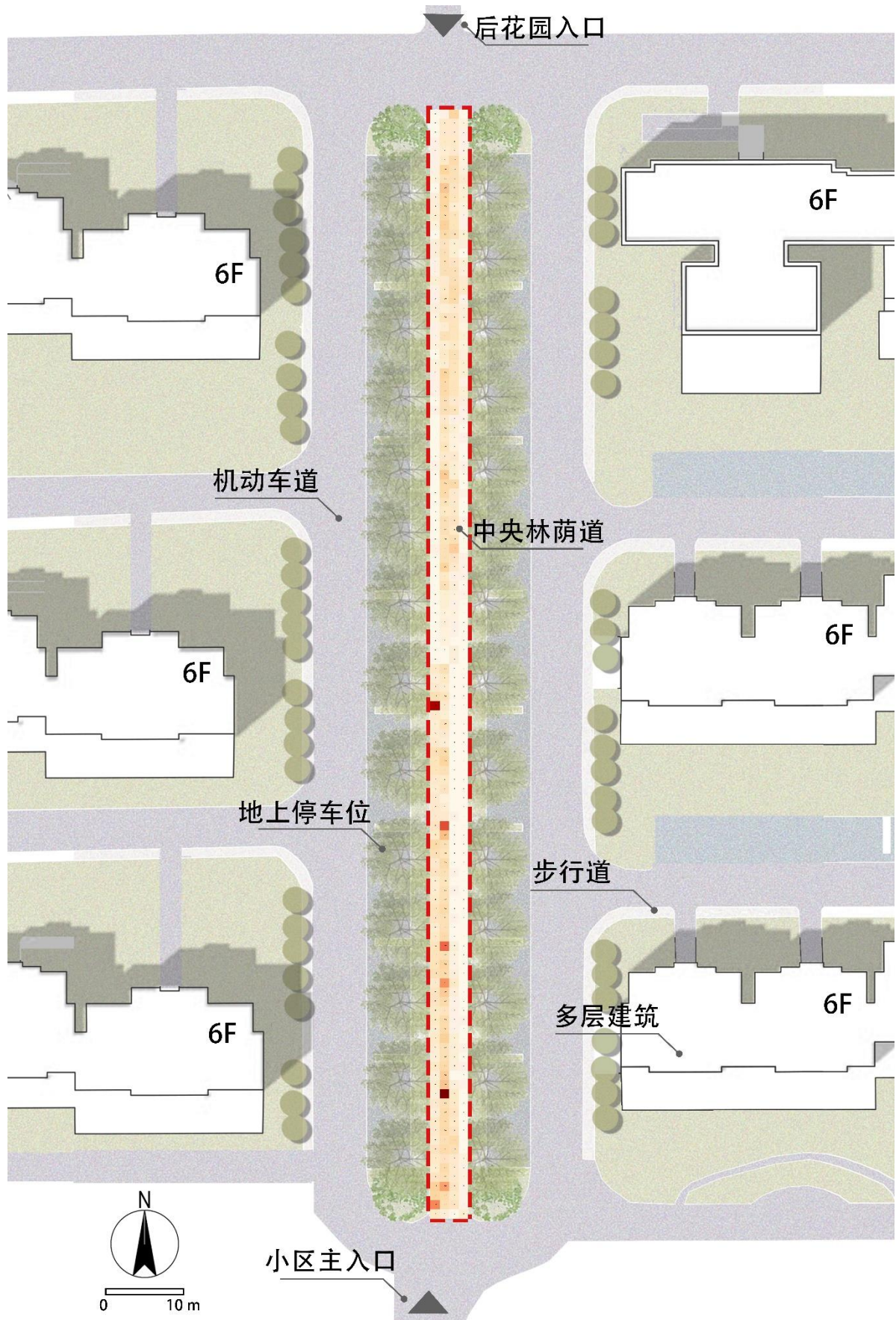
附图 10 不同时段周末与工作日空间净流出流入



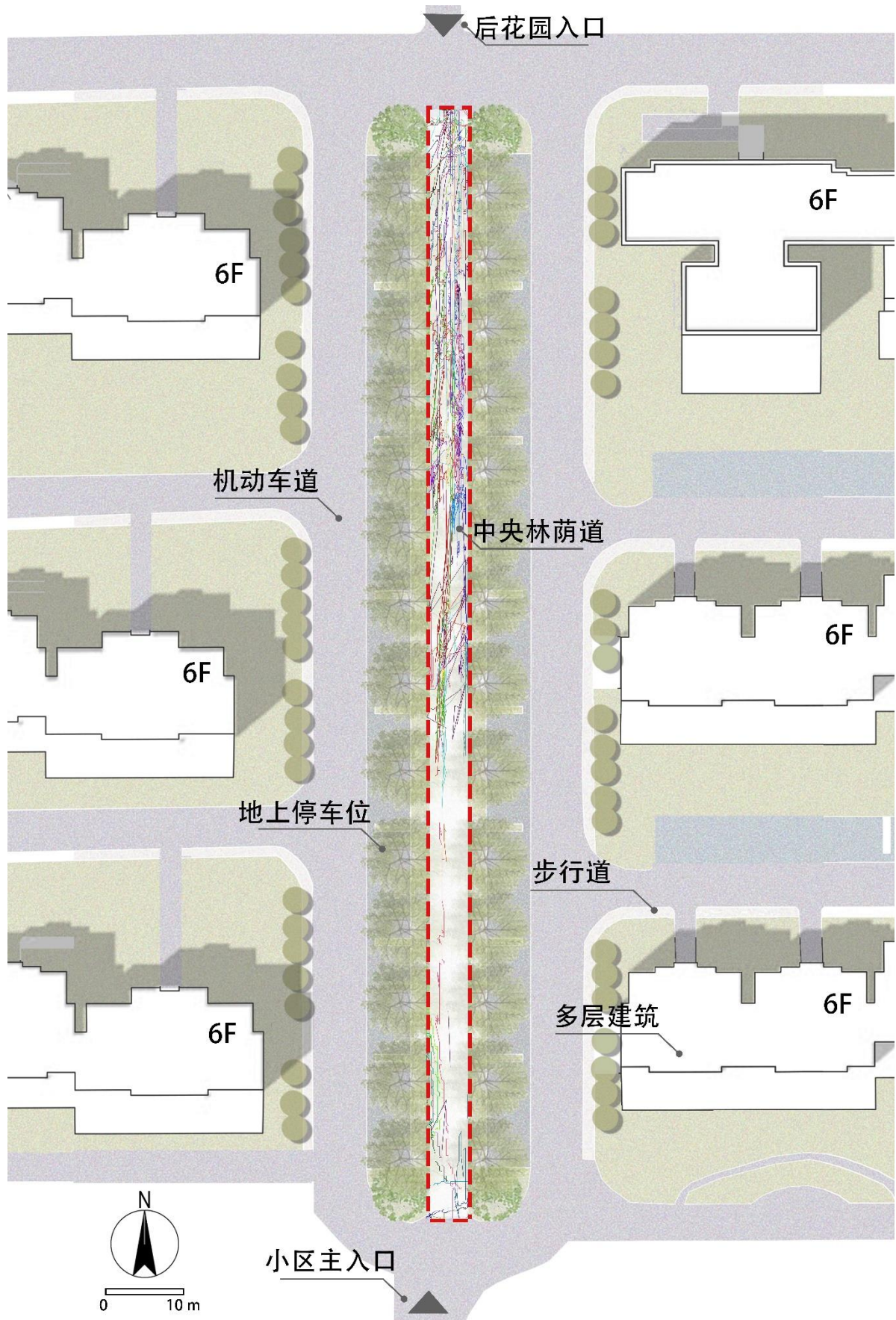
附图 11 休闲行为使用模式评分标准



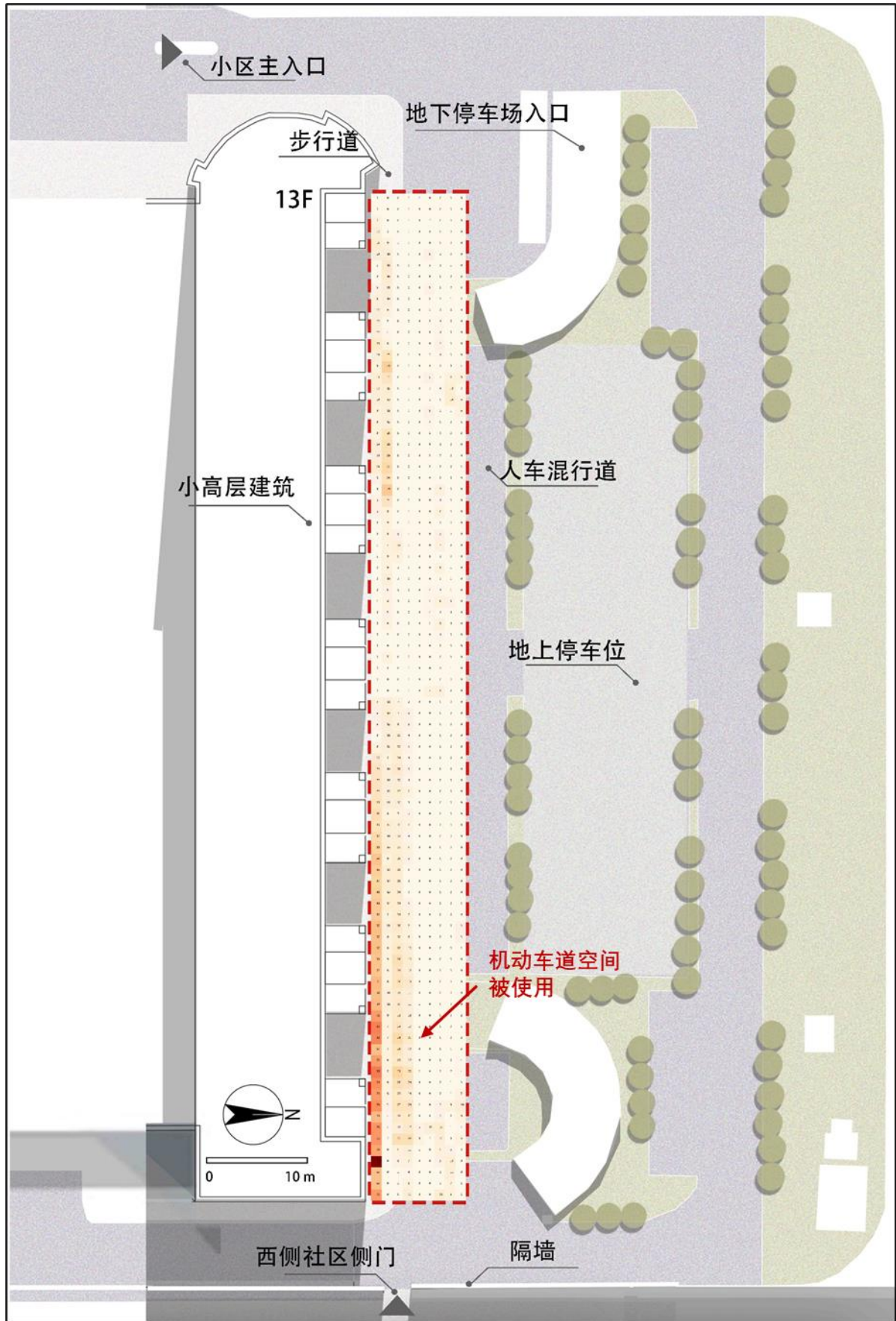
附图 12 交通行为使用模式评分标准



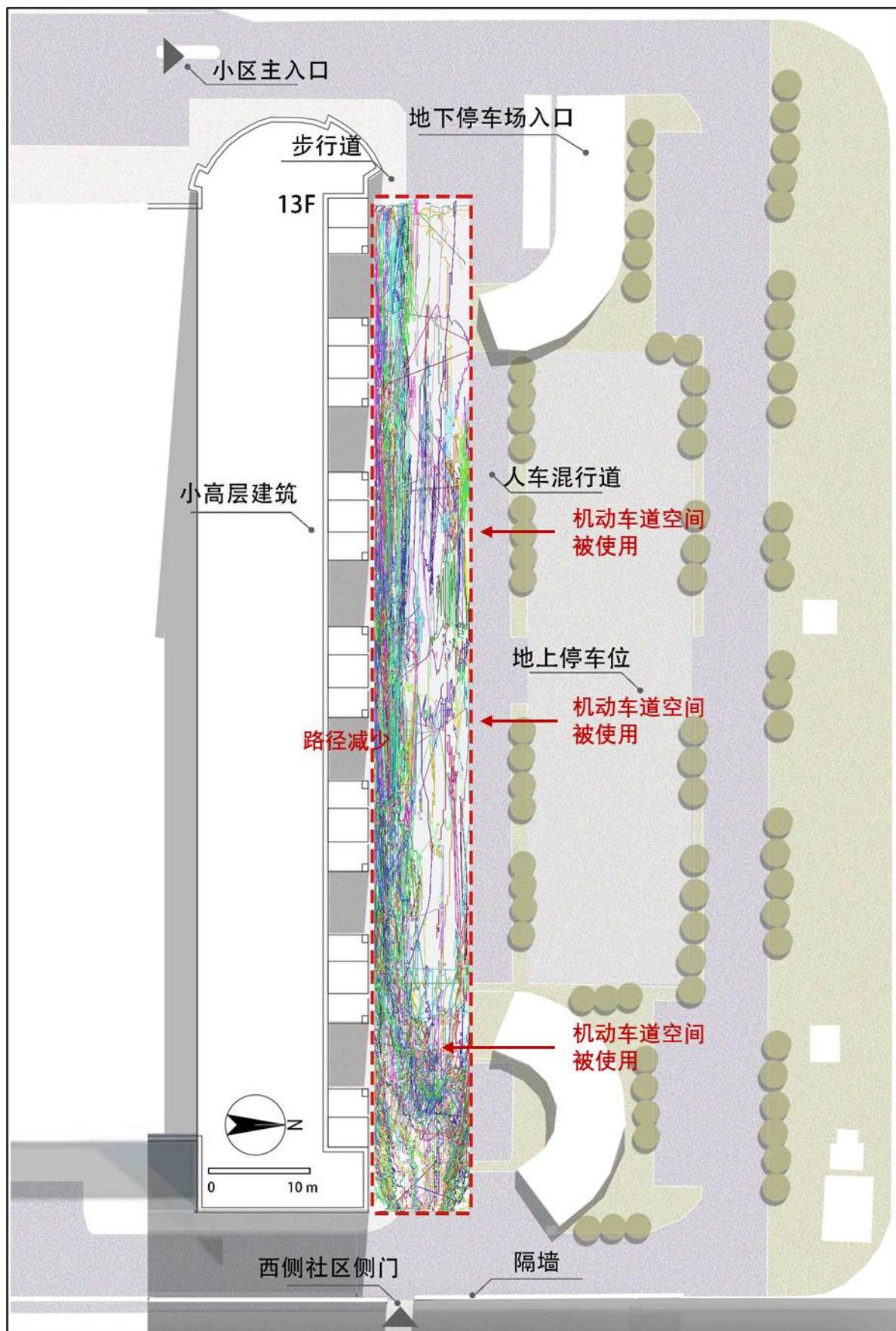
附图 13 居住区林荫大道空间穿行行为微观使用模式



附图 14 居住区林荫大道空间穿行行为微观使用模式



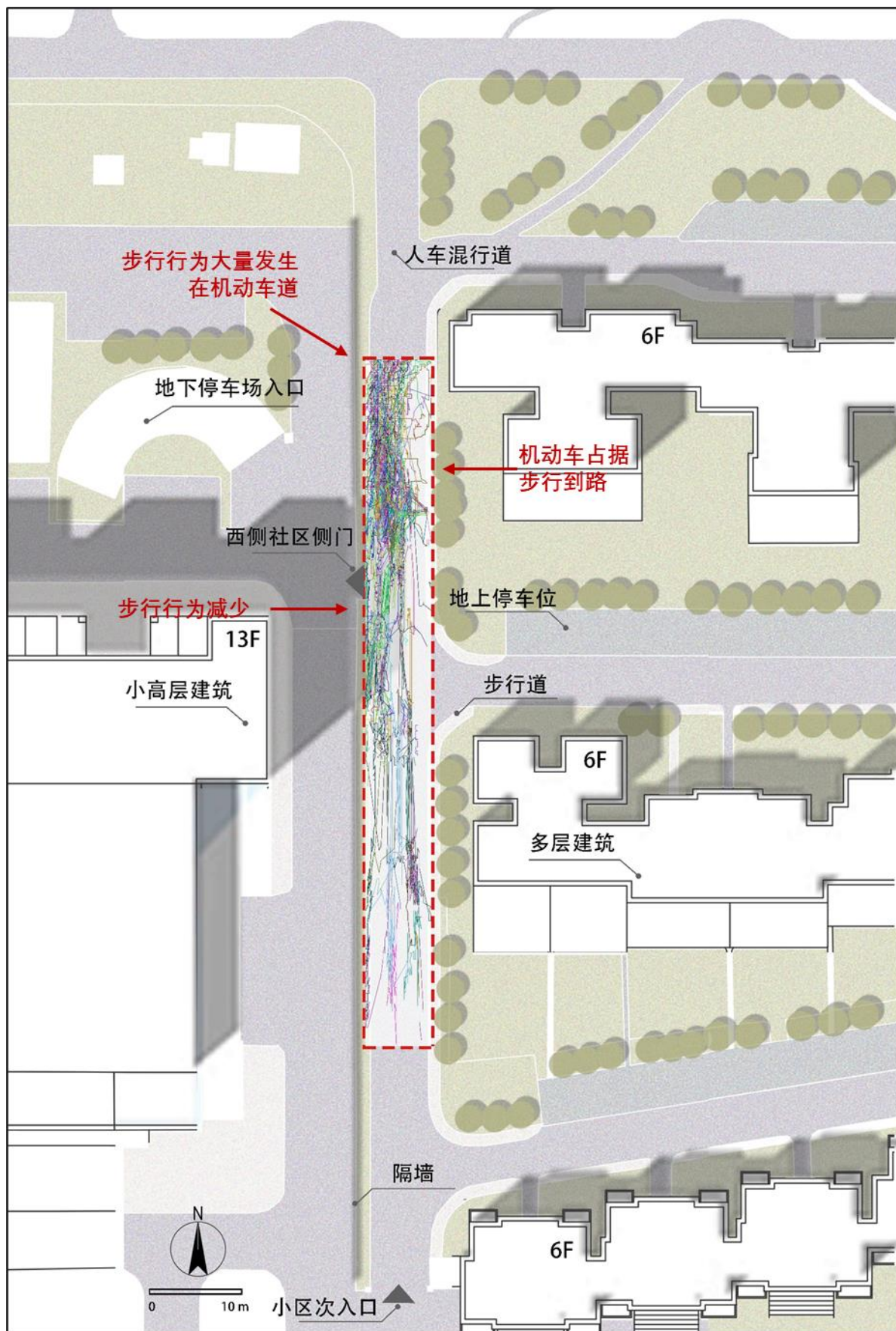
附图 15 居住区商业综合体旁公共开敞空间穿行行为微观使用模式



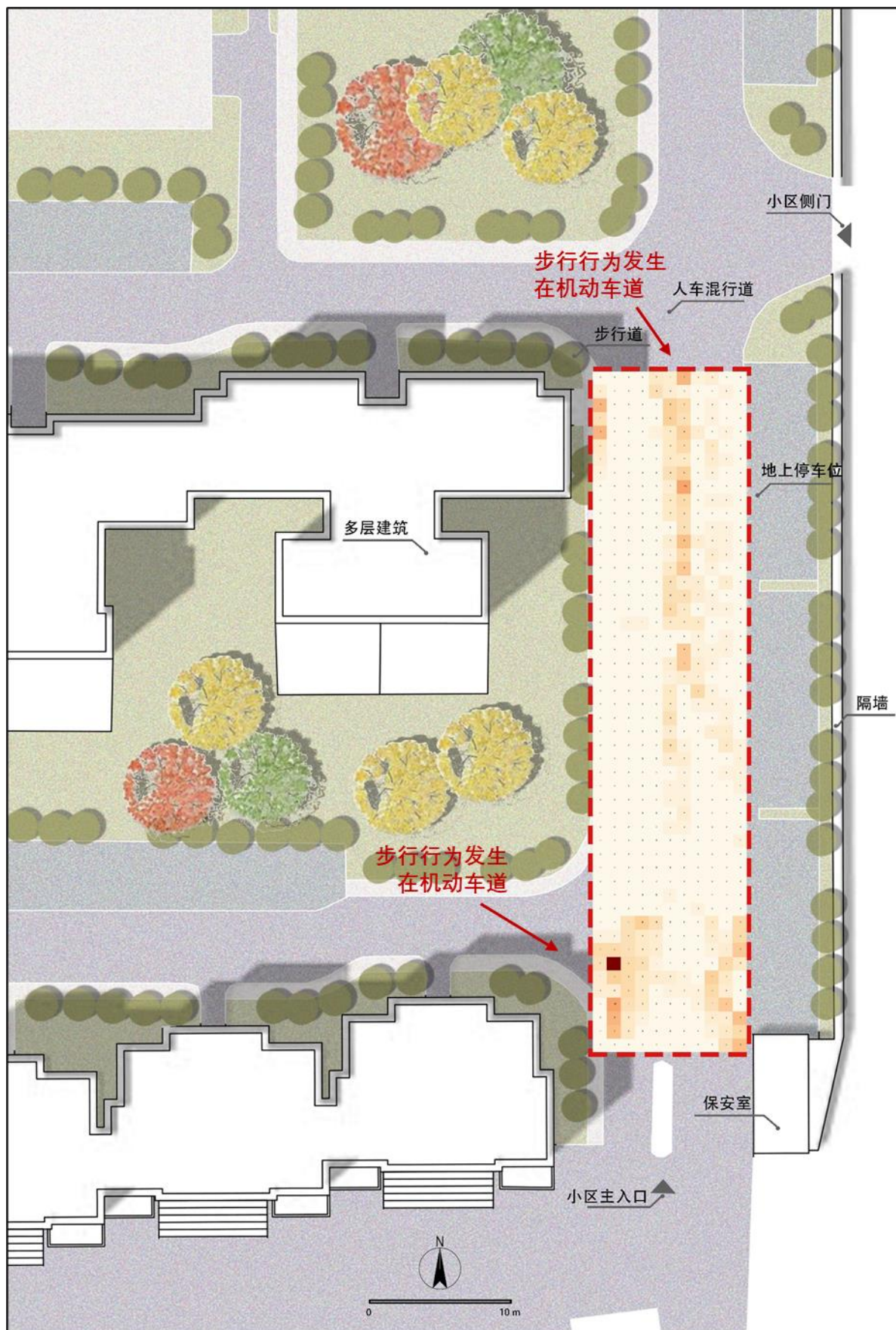
附图 16 居住区商业综合体旁公共开敞空间穿行行为微观使用模式



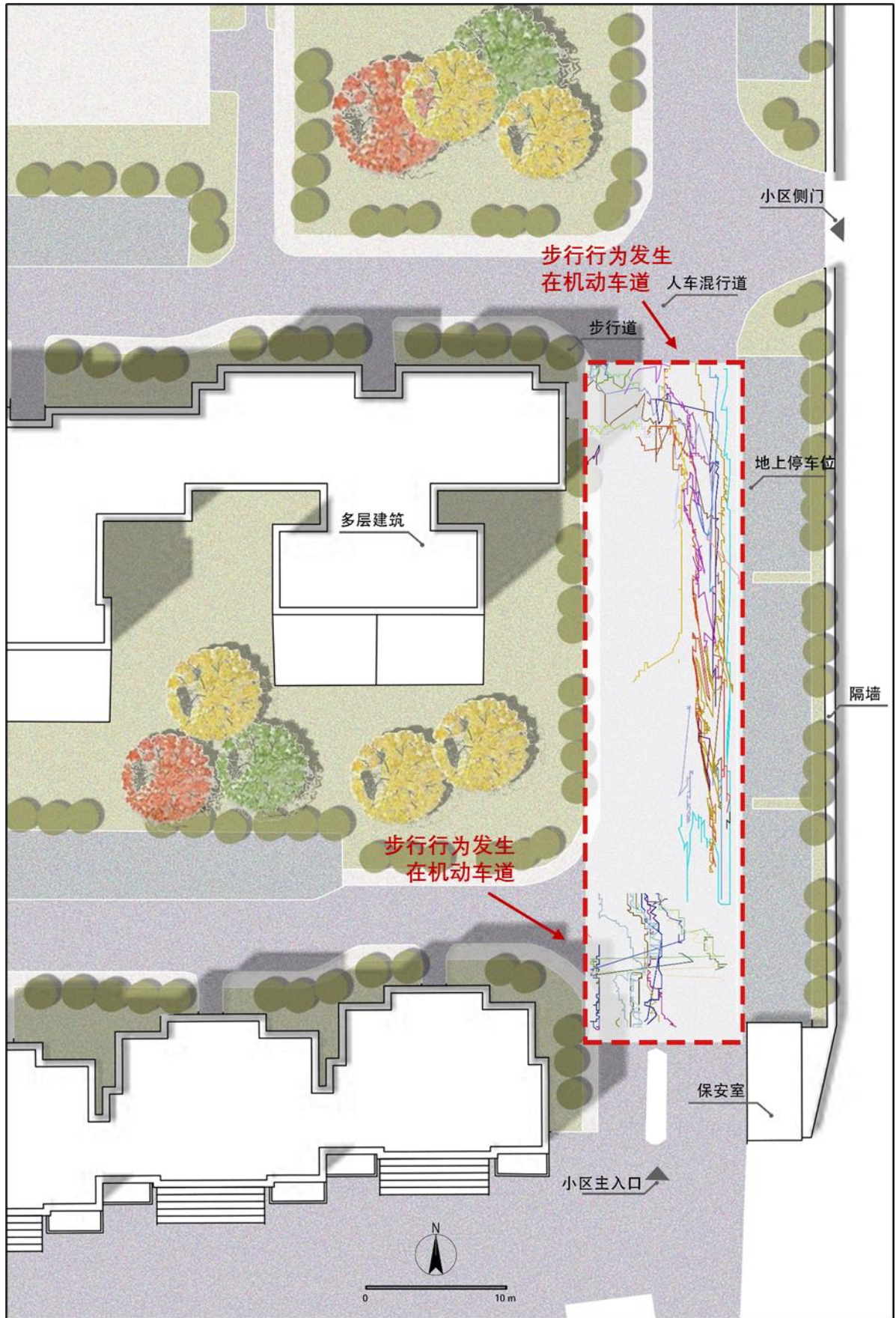
附图 17 居住区绿廊空间穿行行为微观使用模式



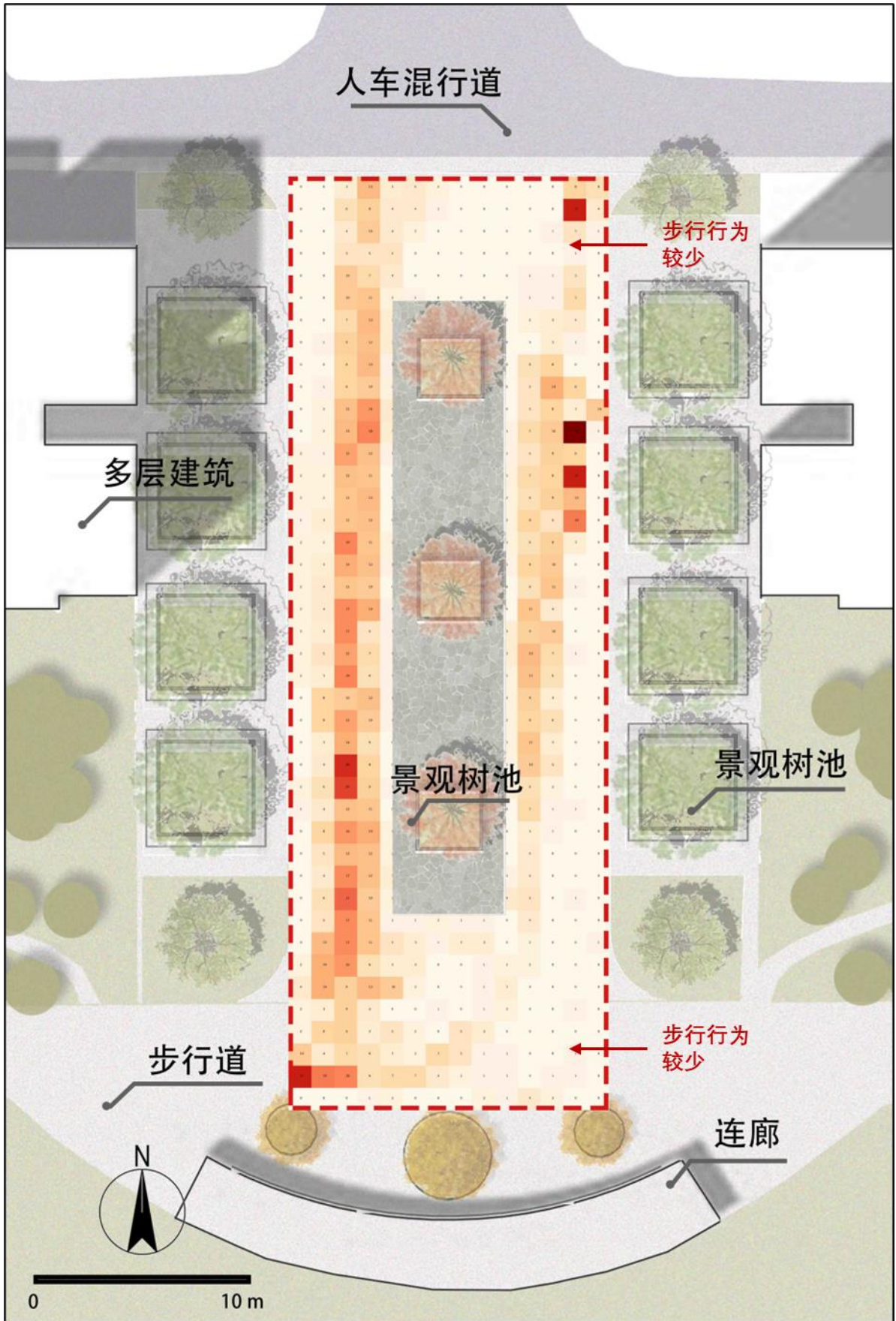
附图 18 居住区绿廊公共开敞空间穿行行为微观使用模式



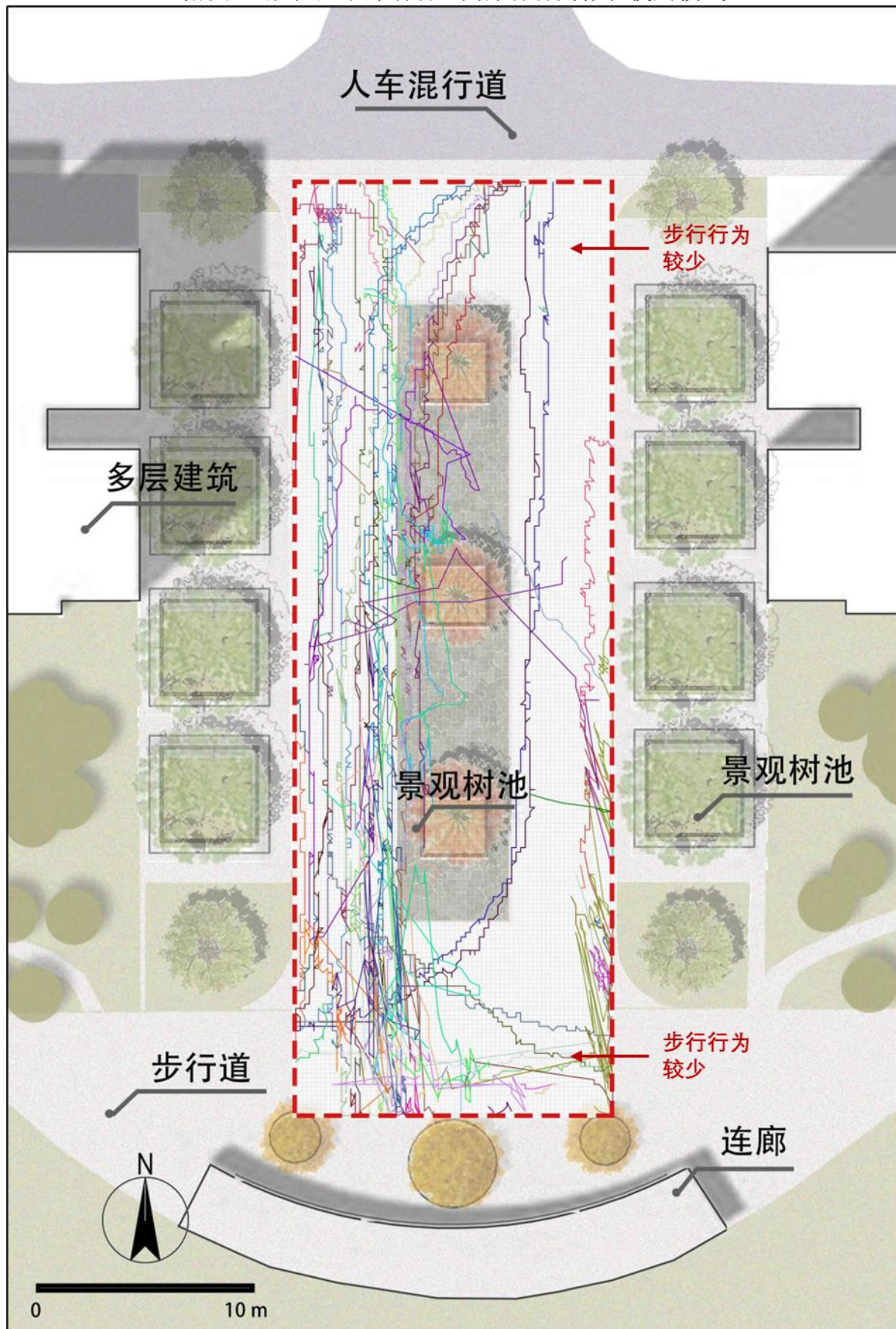
附图 19 居住区东南出入口空间穿行行为微观使用模式



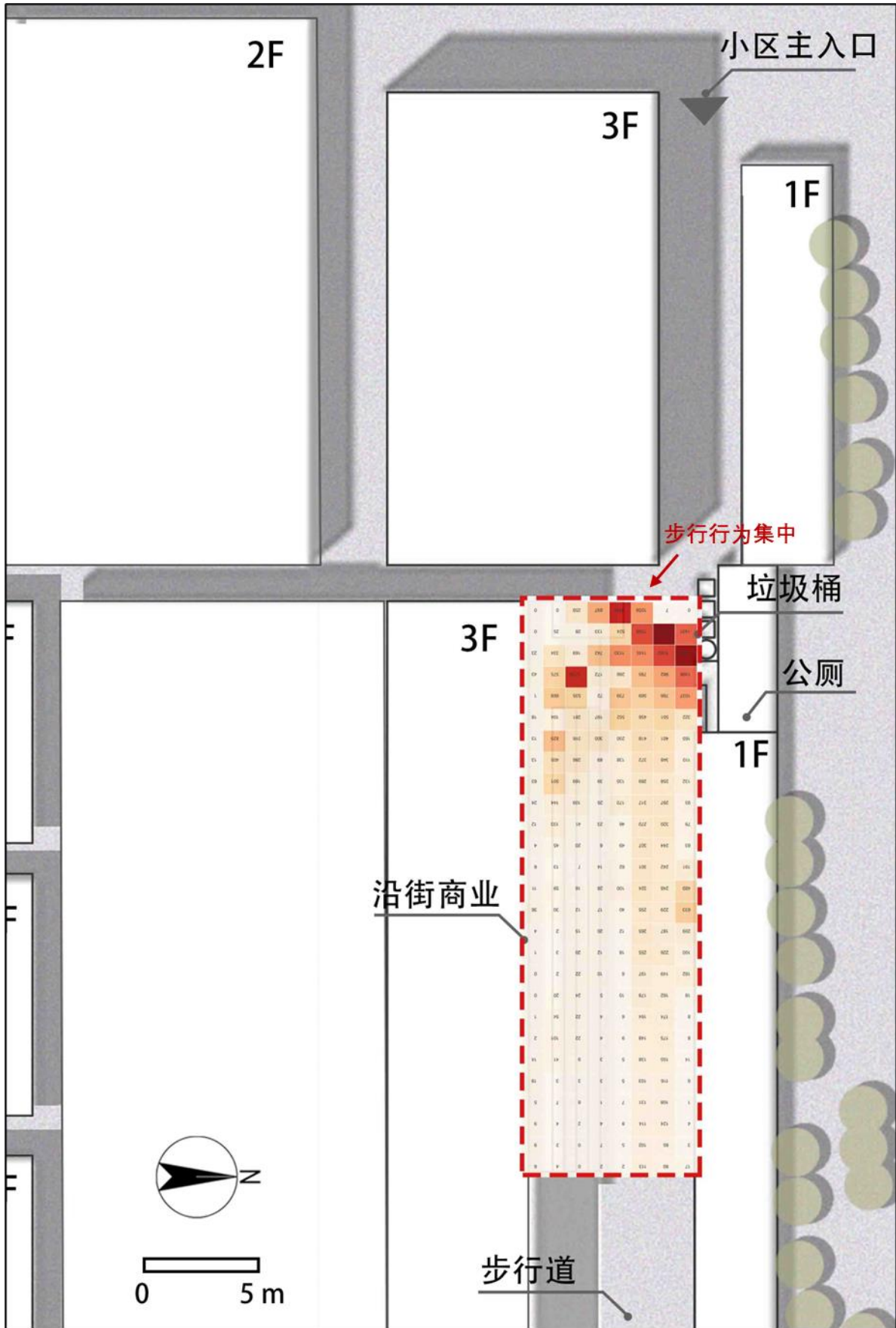
附图 20 居住区东南出入口公共开敞空间穿行行为微观使用模式



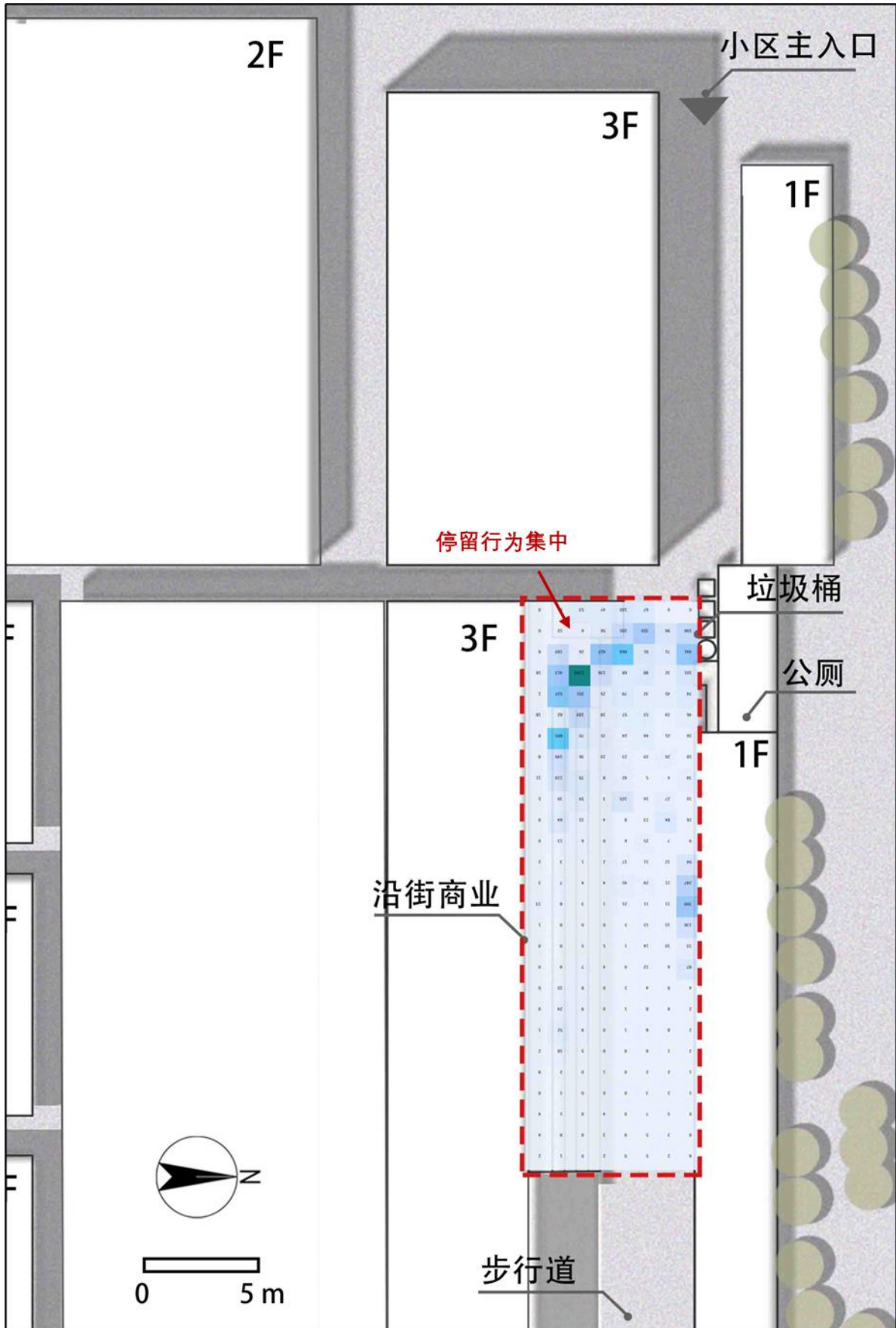
附图 21 居住区中部活动空间穿行行为微观使用模式



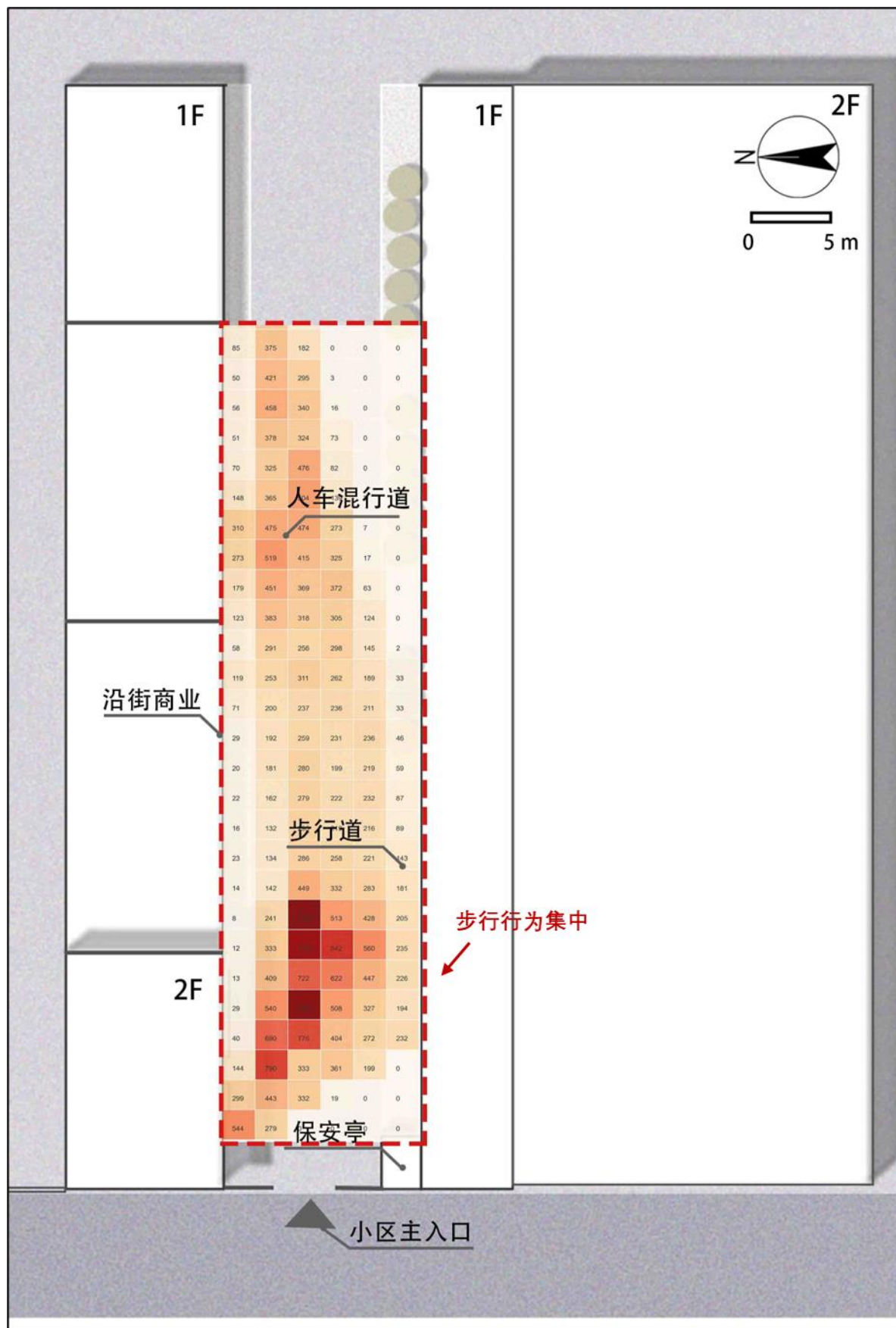
附图 22 居住区中部活动空间穿行行为微观使用模式



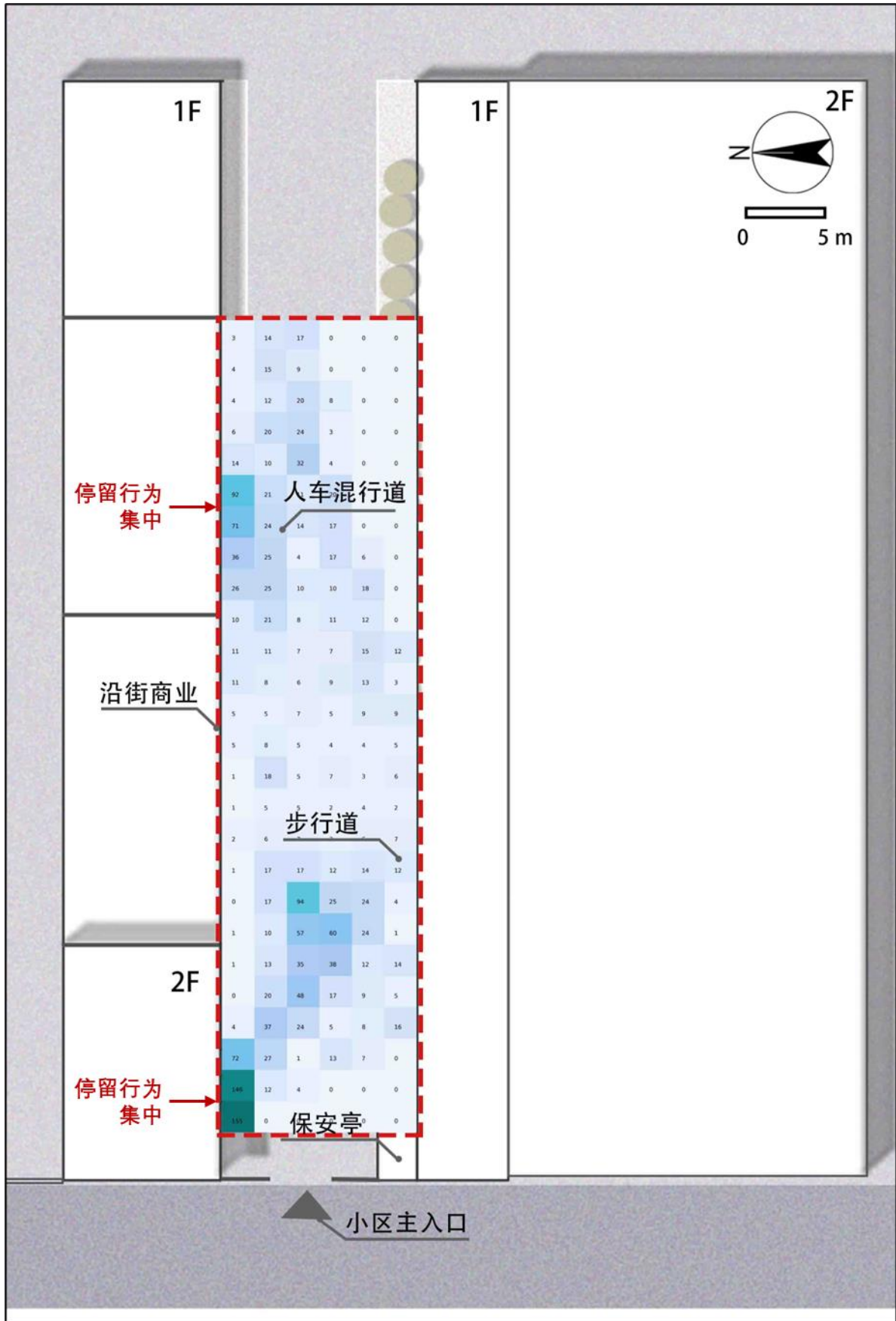
附图 23 居住区北部商业空间穿行行为微观使用模式



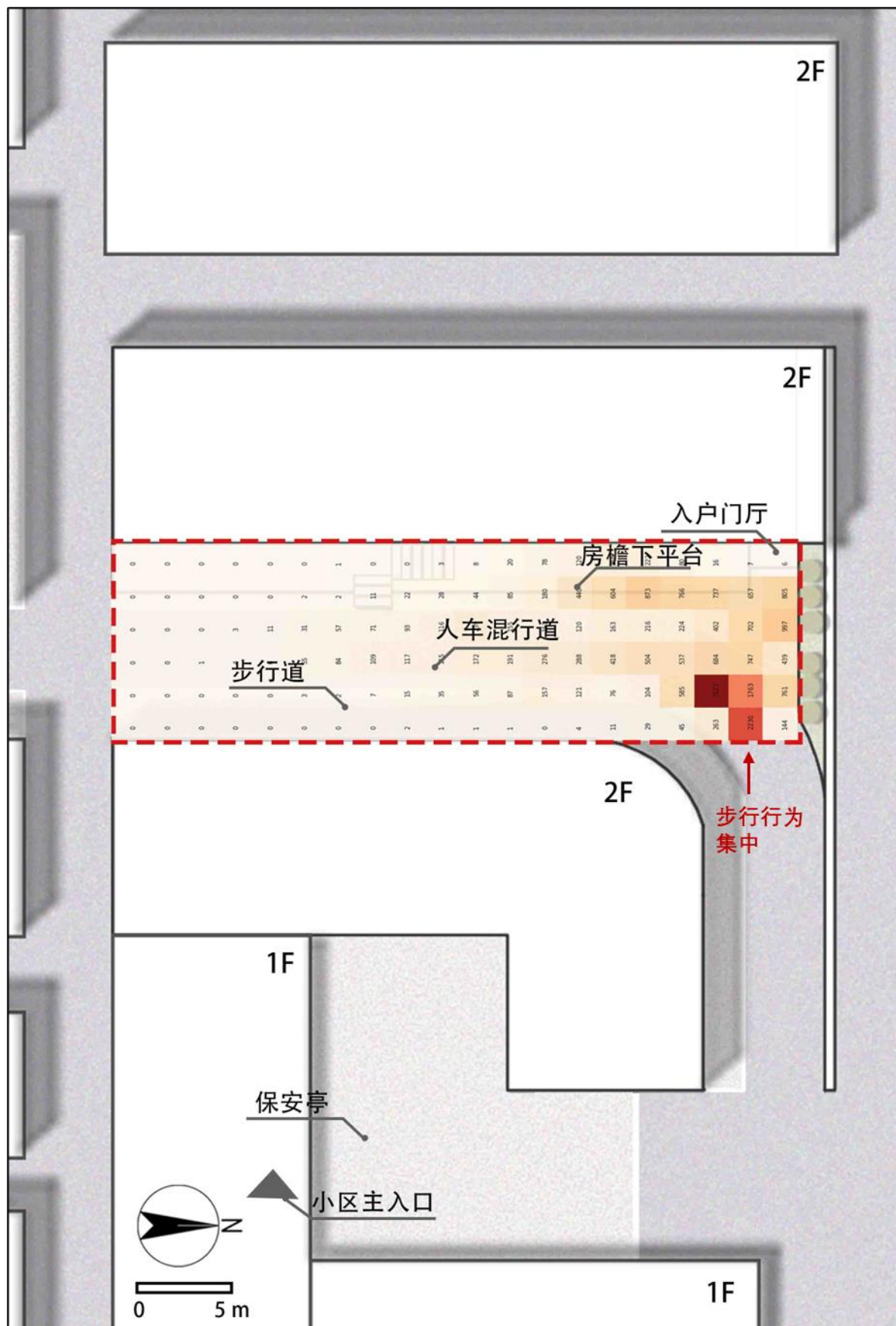
附图 24 居住区北部商业空间停留行为微观使用模式



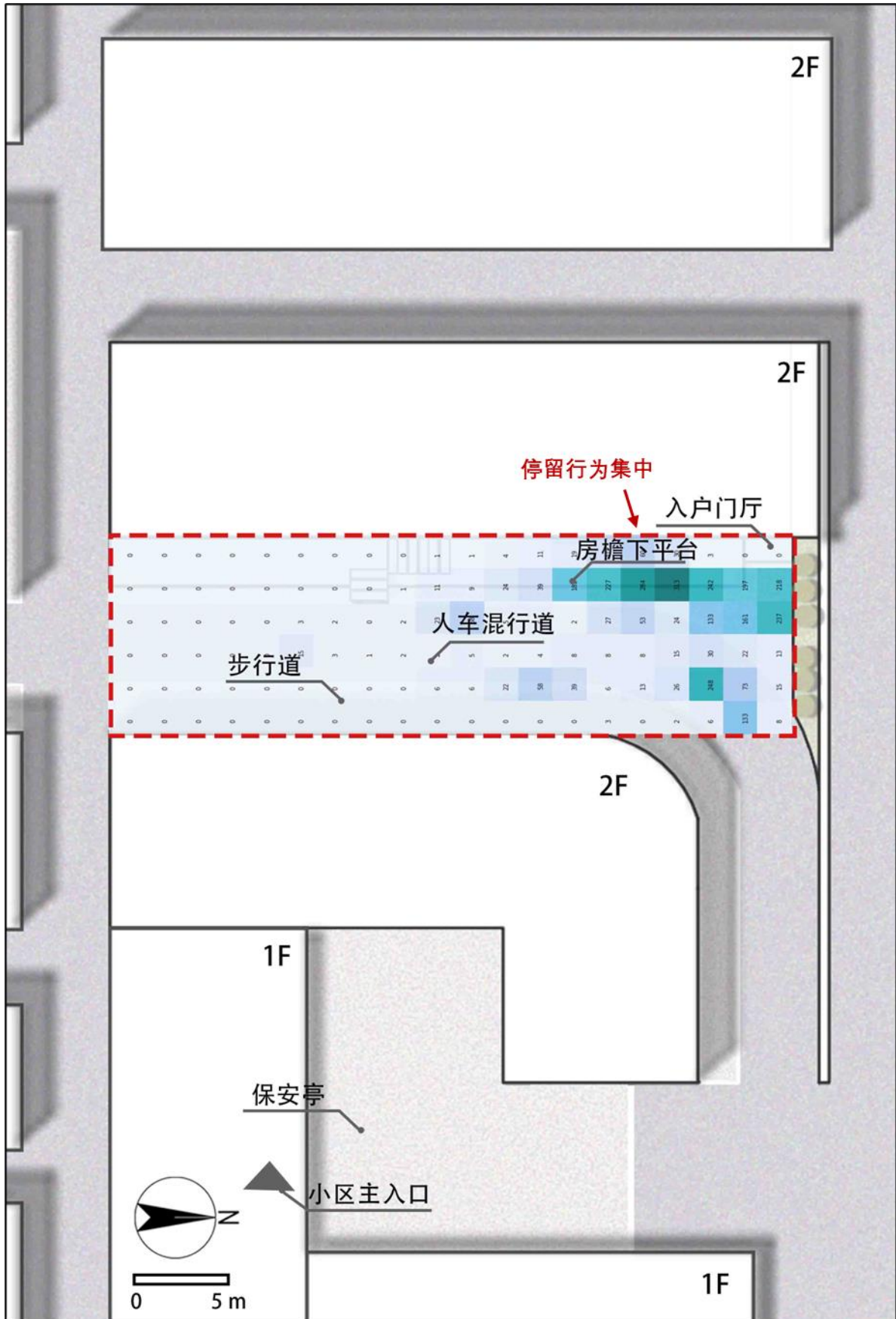
附图 25 居住区南部入口公共开敞空间穿行行为微观使用模式



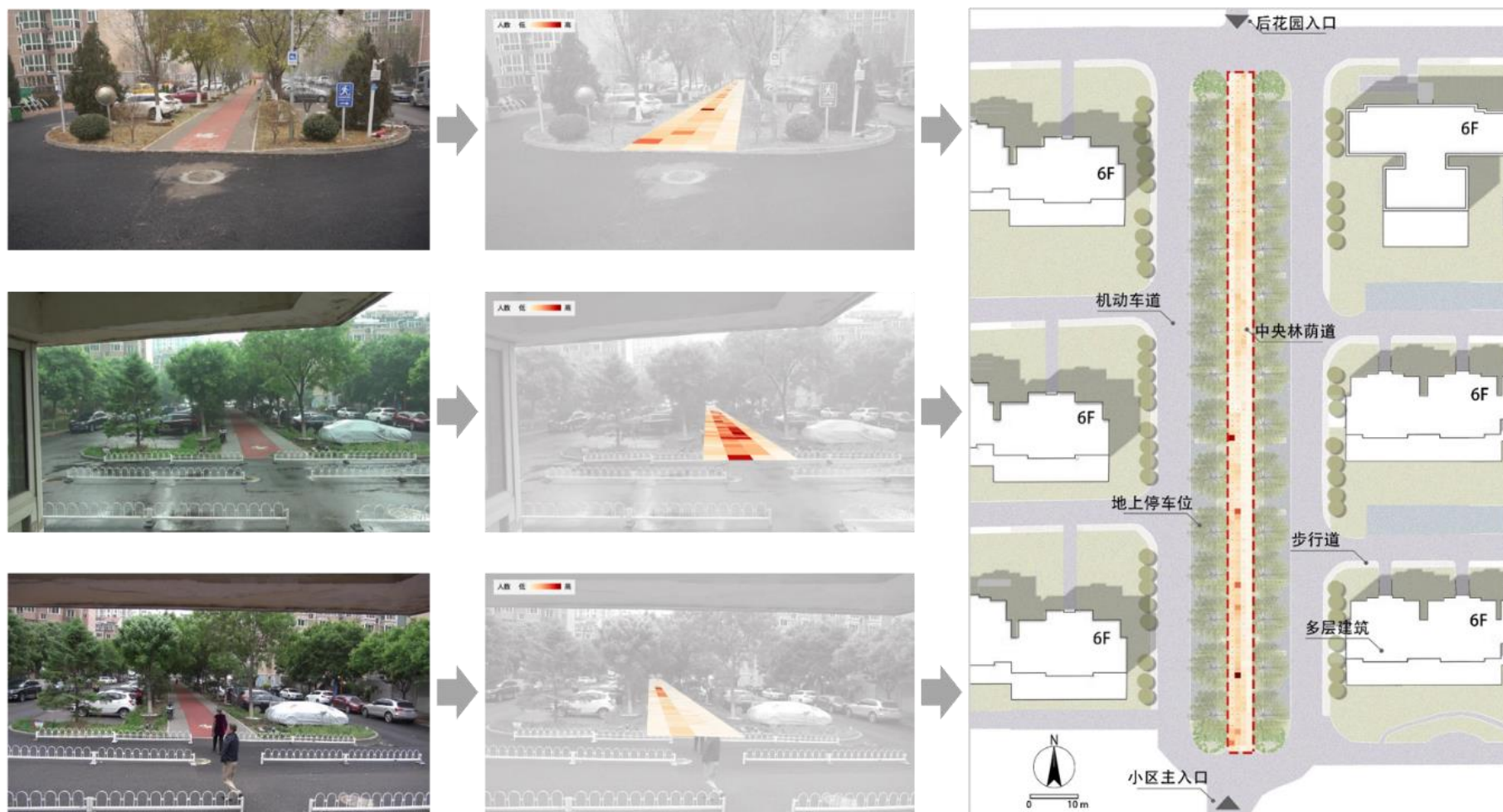
附图 26 居住区南部入口公共开敞空间停留行为微观使用模式



附图 27 居住区东部公共开敞空间穿行行为微观使用模式



附图 28 居住区东部公共开敞空间停留行为微观使用模式

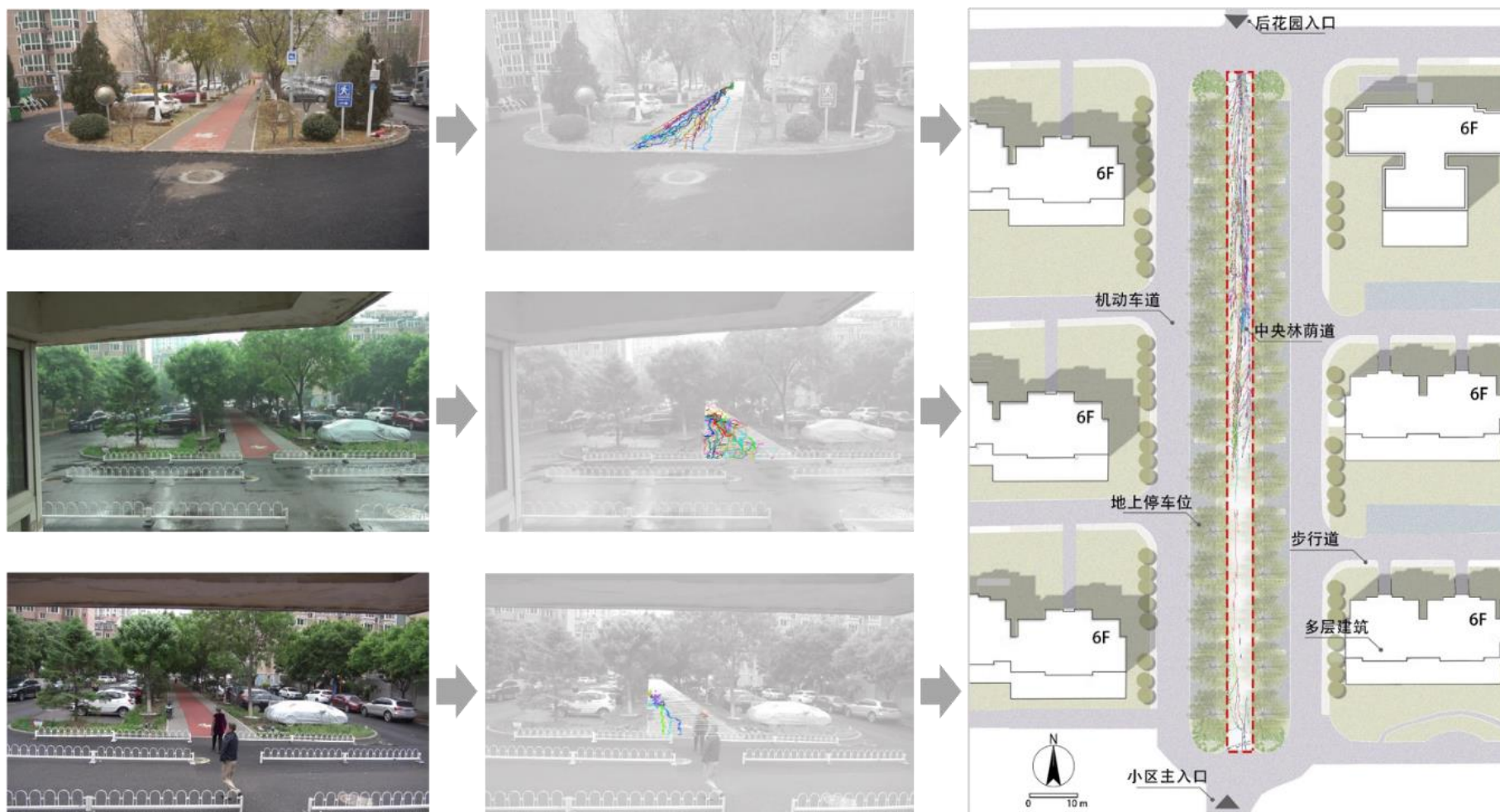


不同拍摄位置数据收集结果

不同拍摄位置数据处理结果

不同拍摄位置数据处理结果汇总

附图 29 居住区林荫大道空间穿行行为汇总

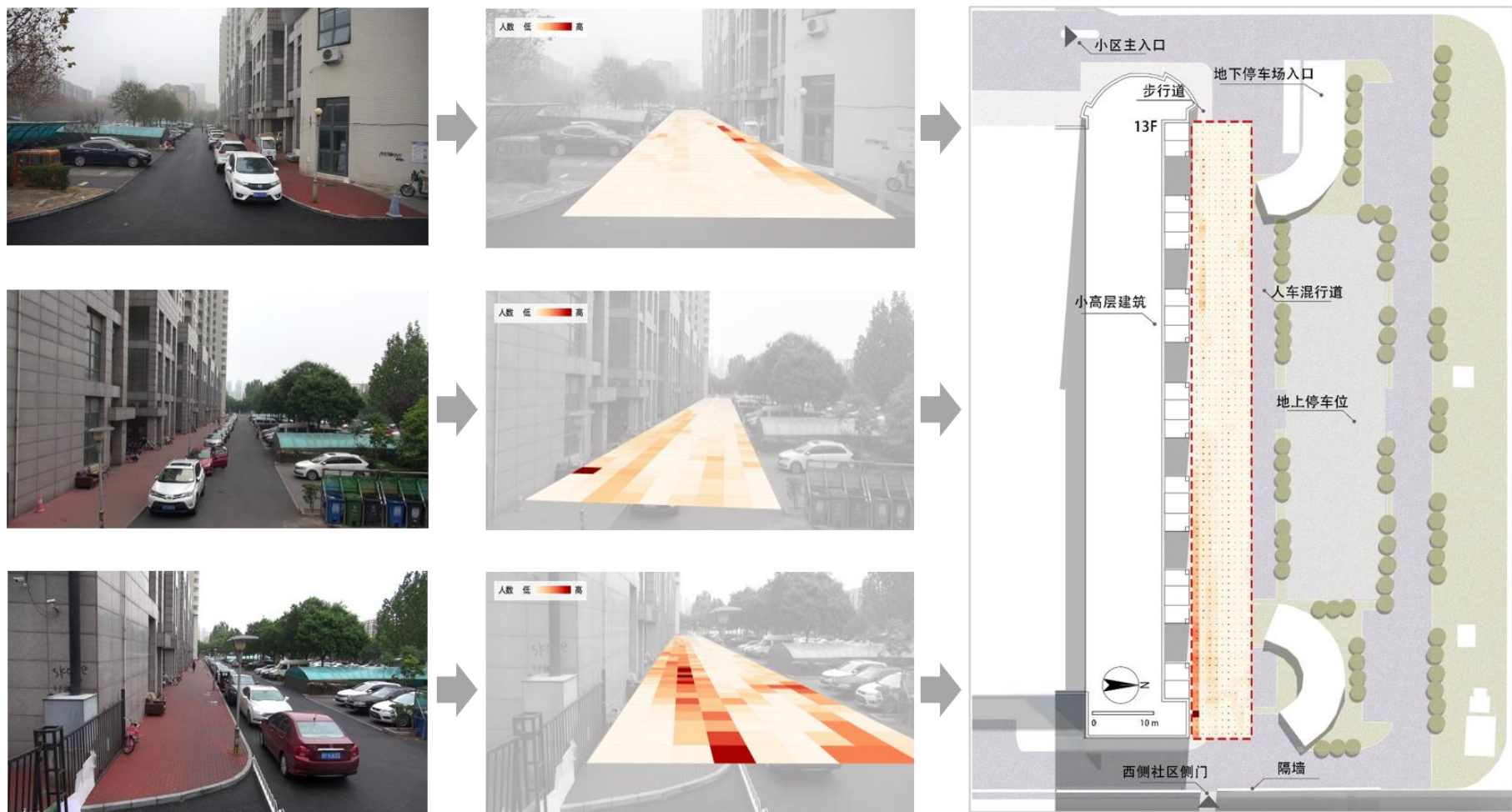


不同拍摄位置数据收集结果

不同拍摄位置数据处理结果

不同拍摄位置数据处理结果汇总

附图 30 居住区林荫大道空间运动轨迹汇总

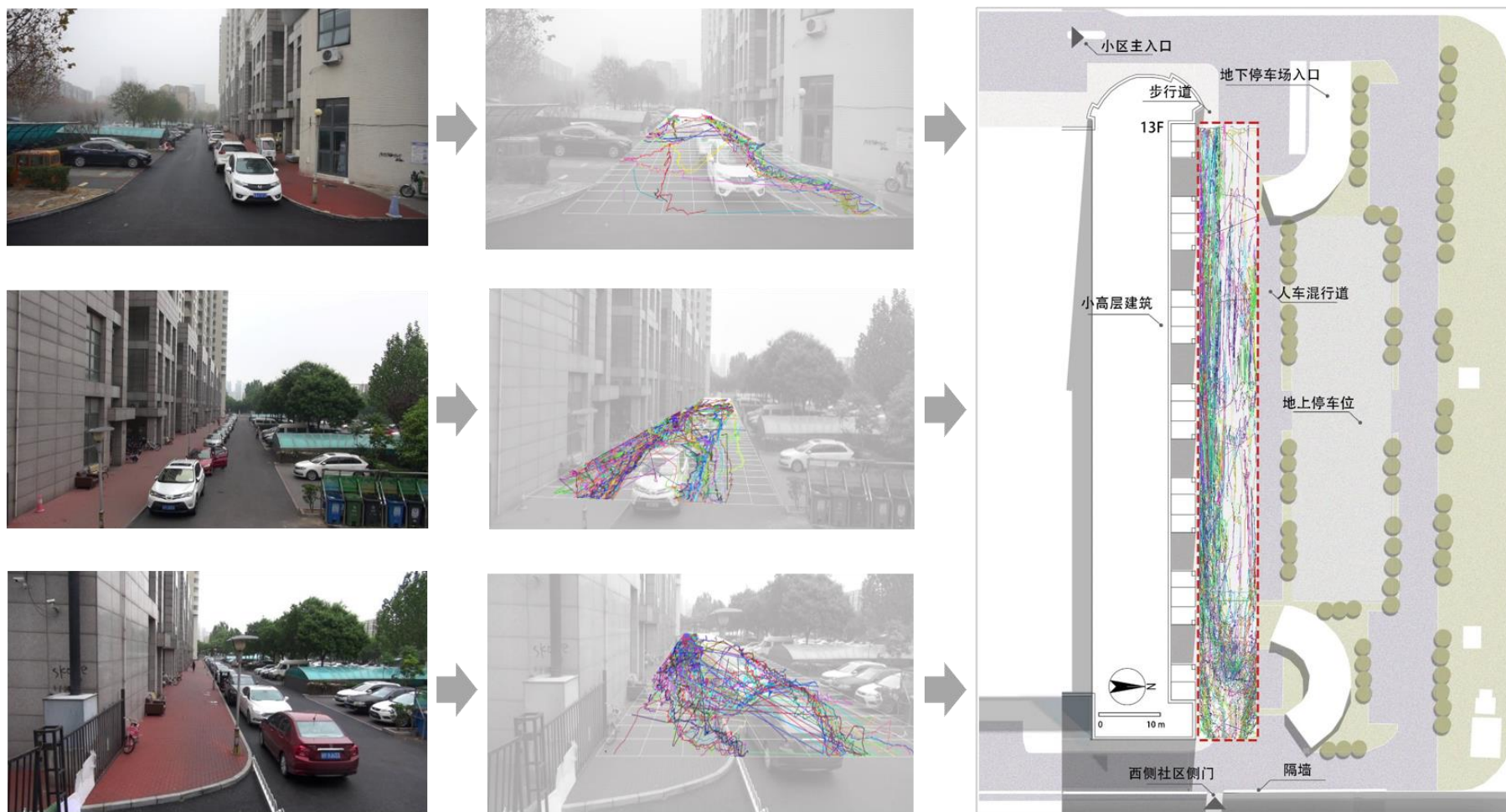


不同拍摄位置数据收集结果

不同拍摄位置数据处理结果

不同拍摄位置数据处理结果汇总

附图 31 居住区商业综合体旁公共开敞空间穿行行为汇总

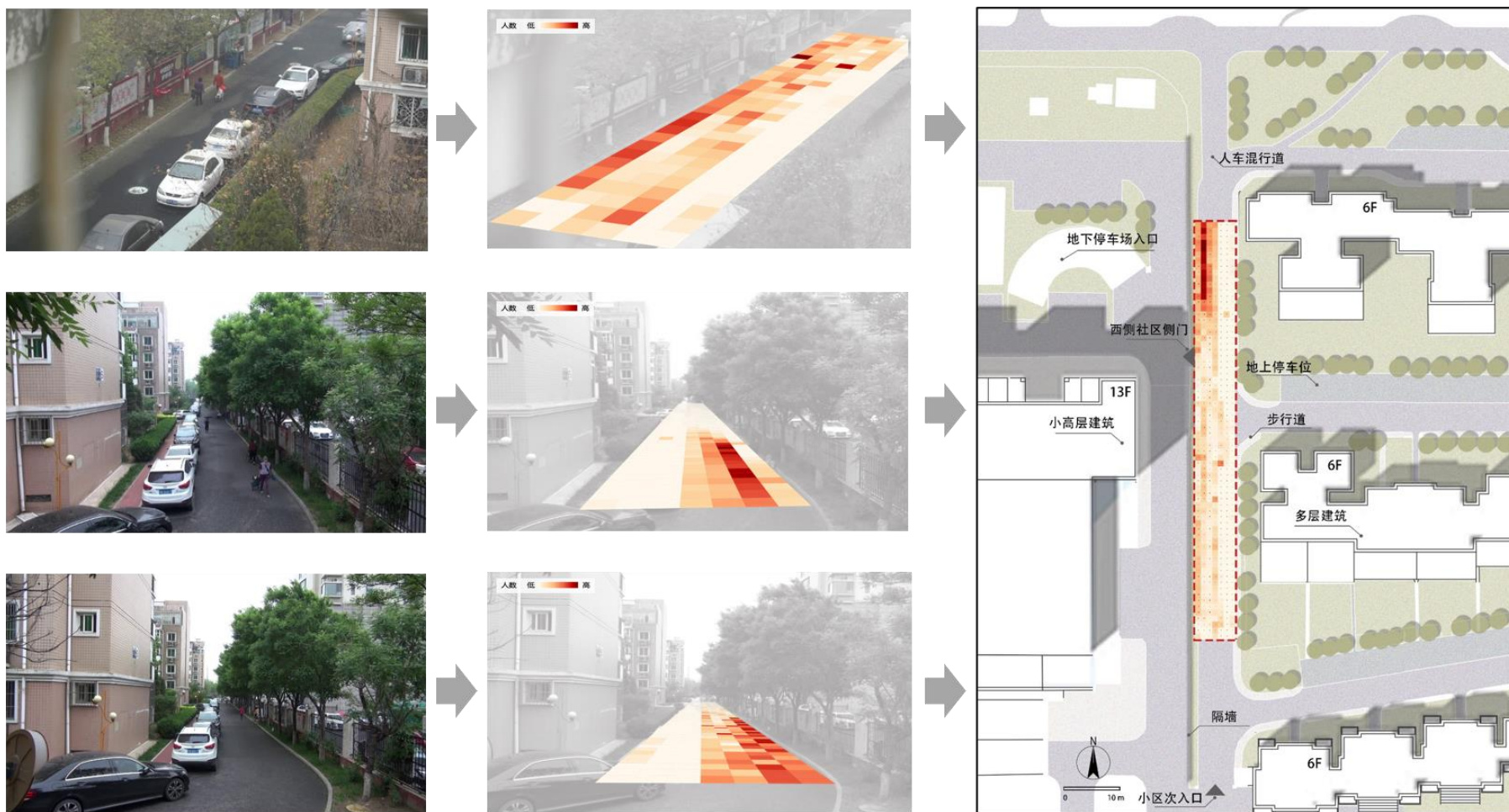


不同拍摄位置数据收集结果

不同拍摄位置数据处理结果

不同拍摄位置数据处理结果汇总

附图 32 居住区商业综合体旁公共开敞空间运动轨迹汇总

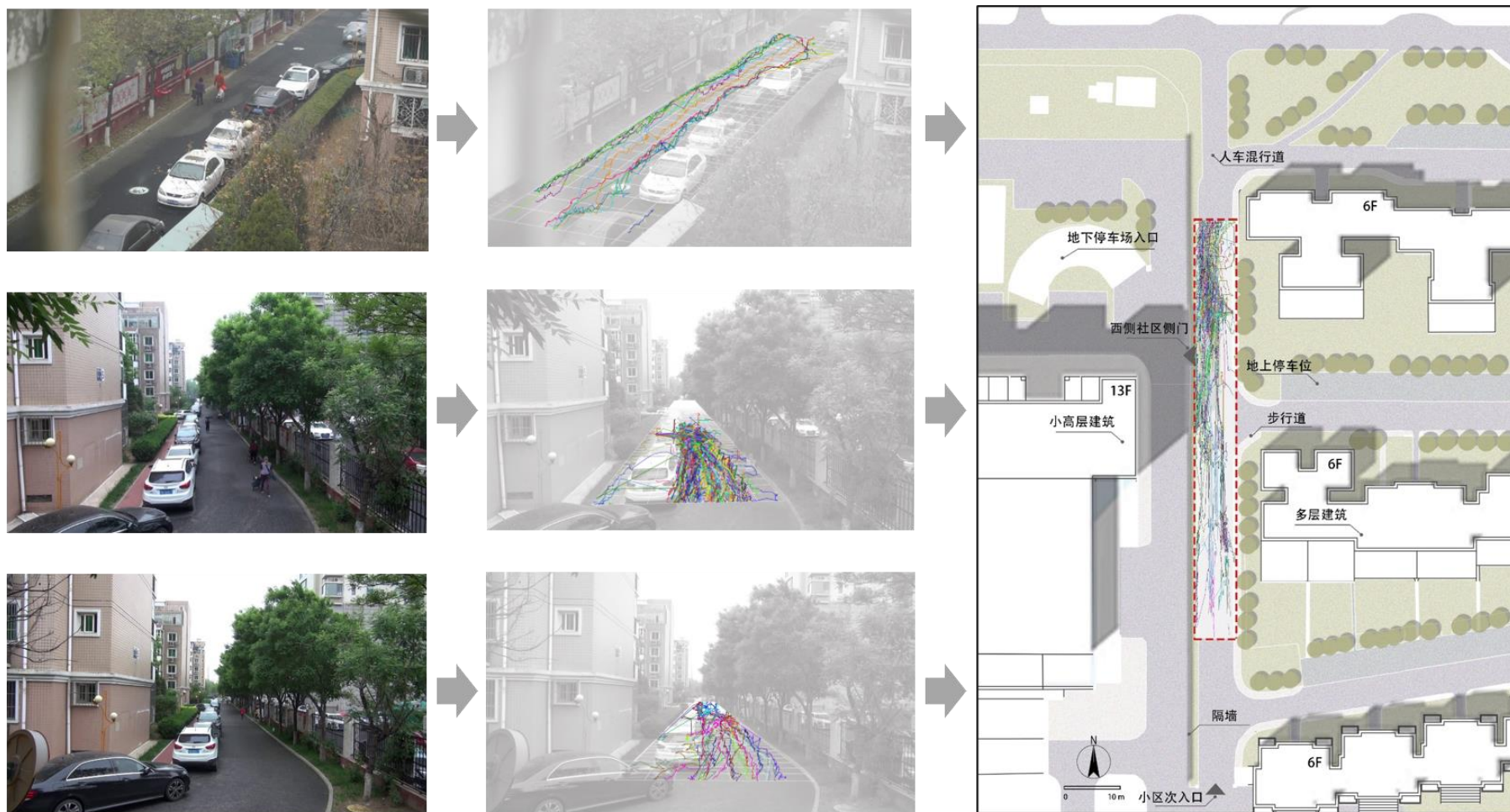


不同拍摄位置数据收集结果

不同拍摄位置数据处理结果

不同拍摄位置数据处理结果汇总

附图 33 居住区绿廊公共开敞空间穿行行为汇总

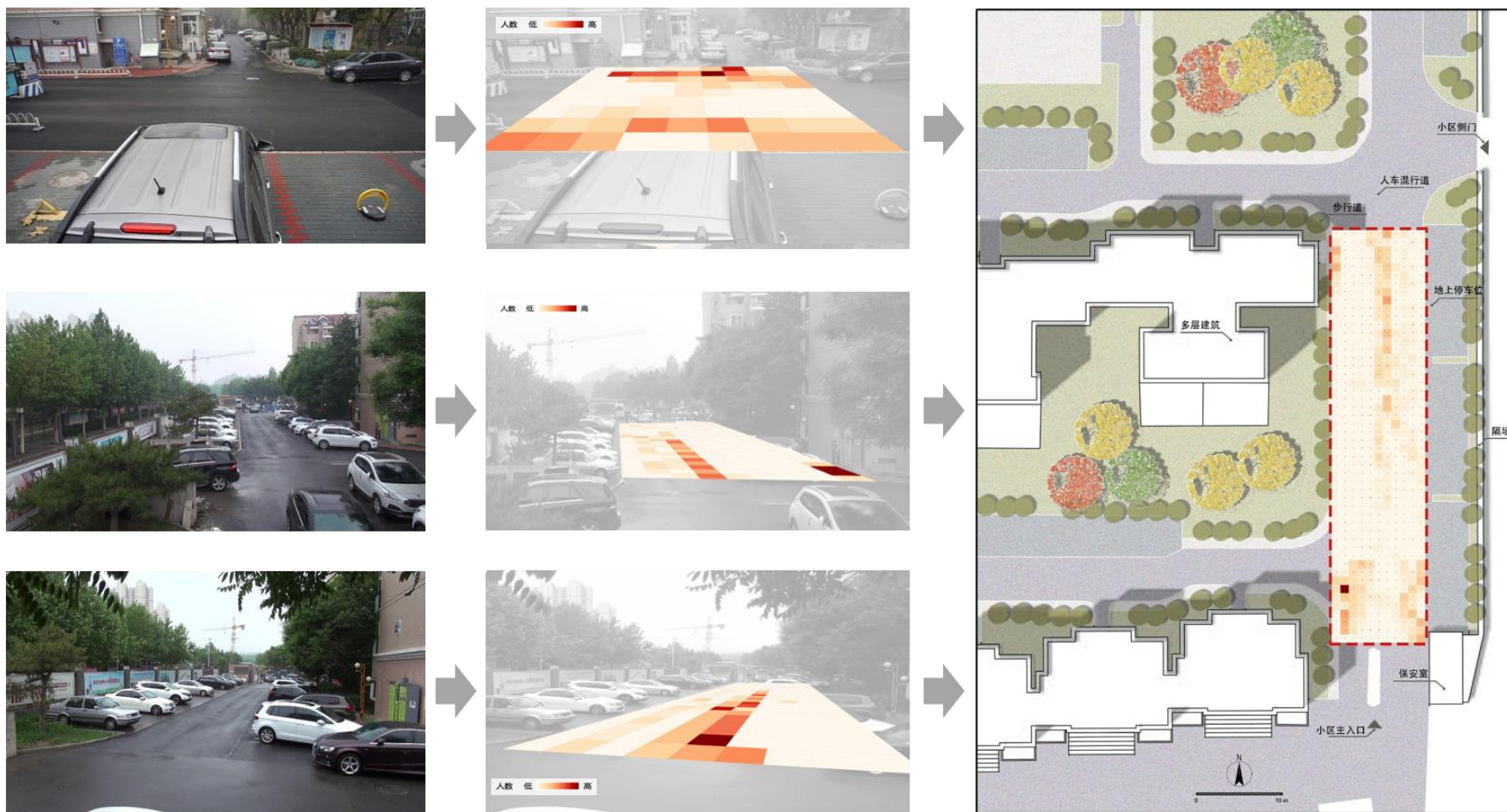


不同拍摄位置数据收集结果

不同拍摄位置数据处理结果

不同拍摄位置数据处理结果汇总

附图 34 居住区绿廊公共开敞空间运动轨迹汇总



不同拍摄位置数据收集结果

不同拍摄位置数据处理结果

不同拍摄位置数据处理结果汇总

附图 35 居住区东南出入口空间穿行行为汇总

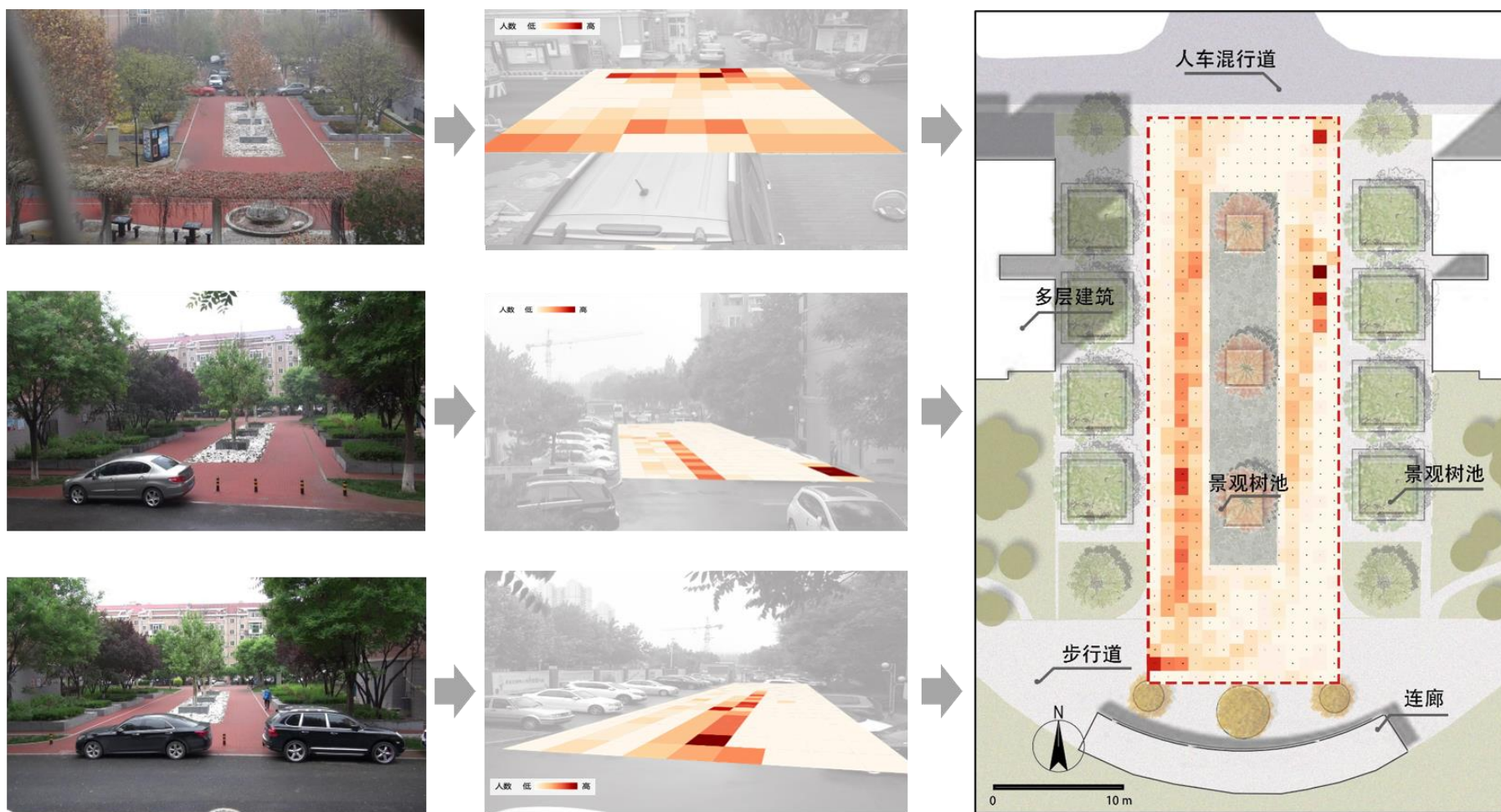


不同拍摄位置数据收集结果

不同拍摄位置数据处理结果

不同拍摄位置数据处理结果汇总

附图 36 居住区东南出入口空间运动轨迹汇总

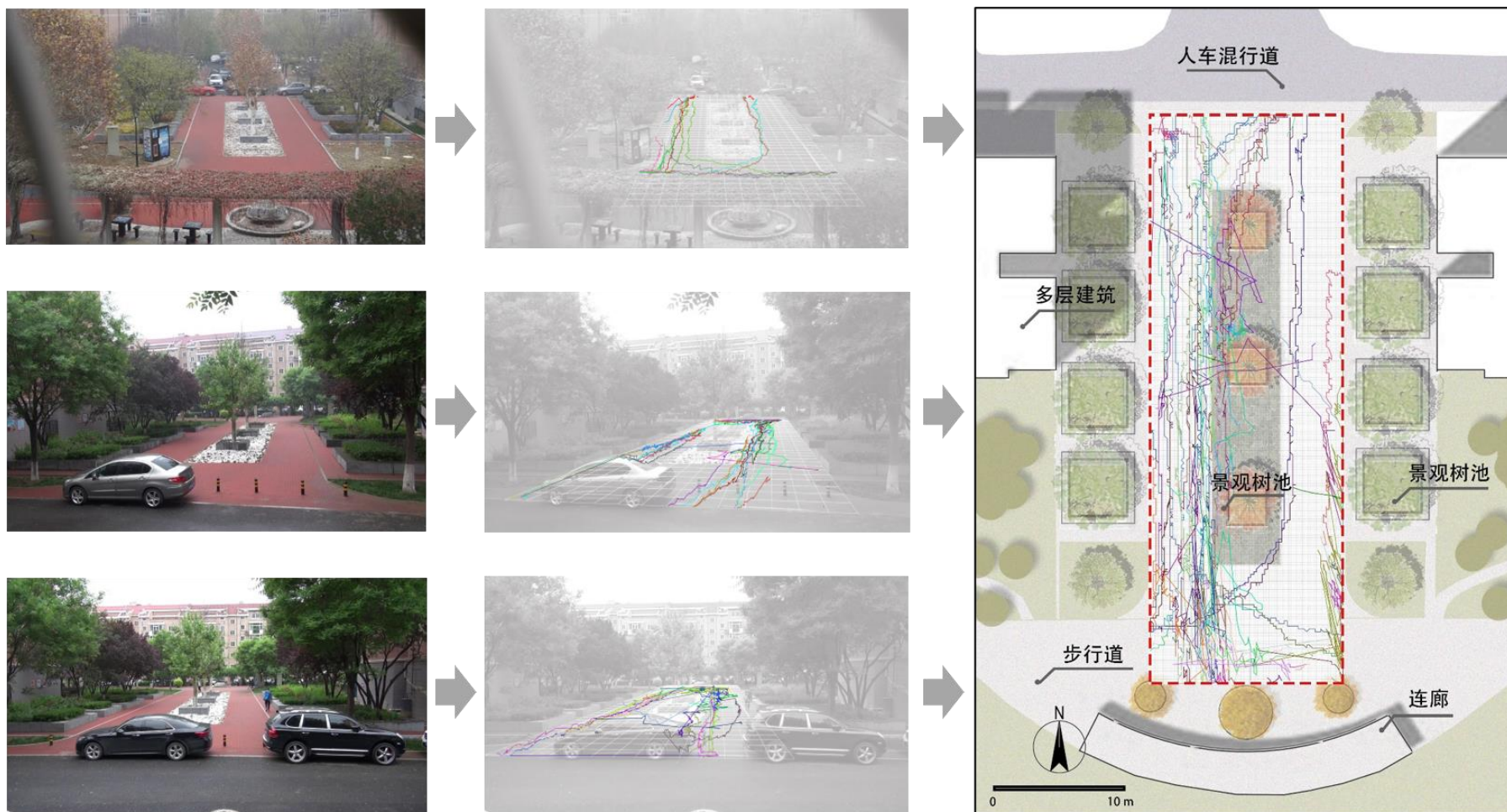


不同拍摄位置数据收集结果

不同拍摄位置数据处理结果

不同拍摄位置数据处理结果汇总

附图 37 居住区中部活动空间穿行行为汇总

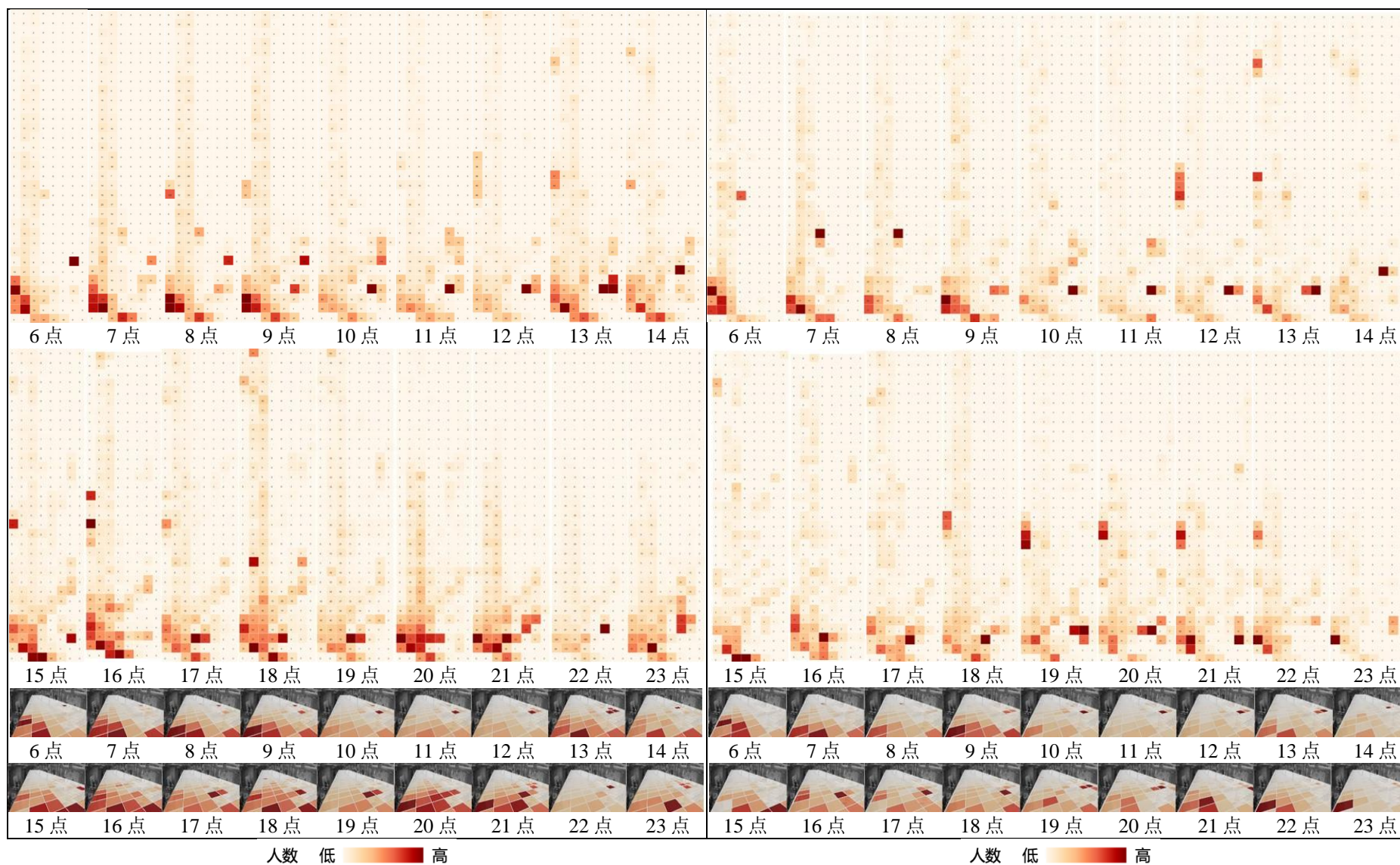


不同拍摄位置数据收集结果

不同拍摄位置数据处理结果

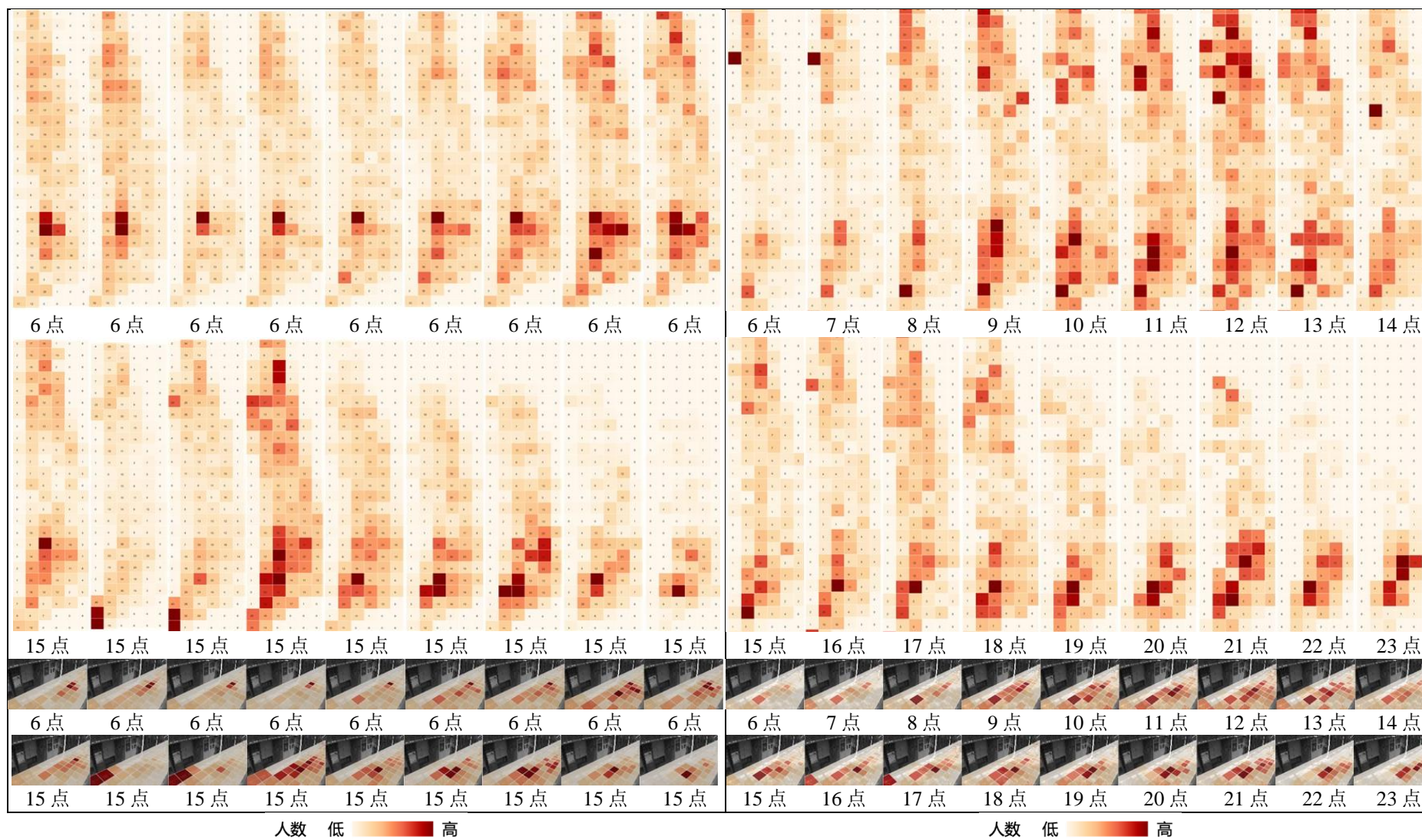
不同拍摄位置数据处理结果汇总

附图 38 居住区中部活动空间运动轨迹汇总



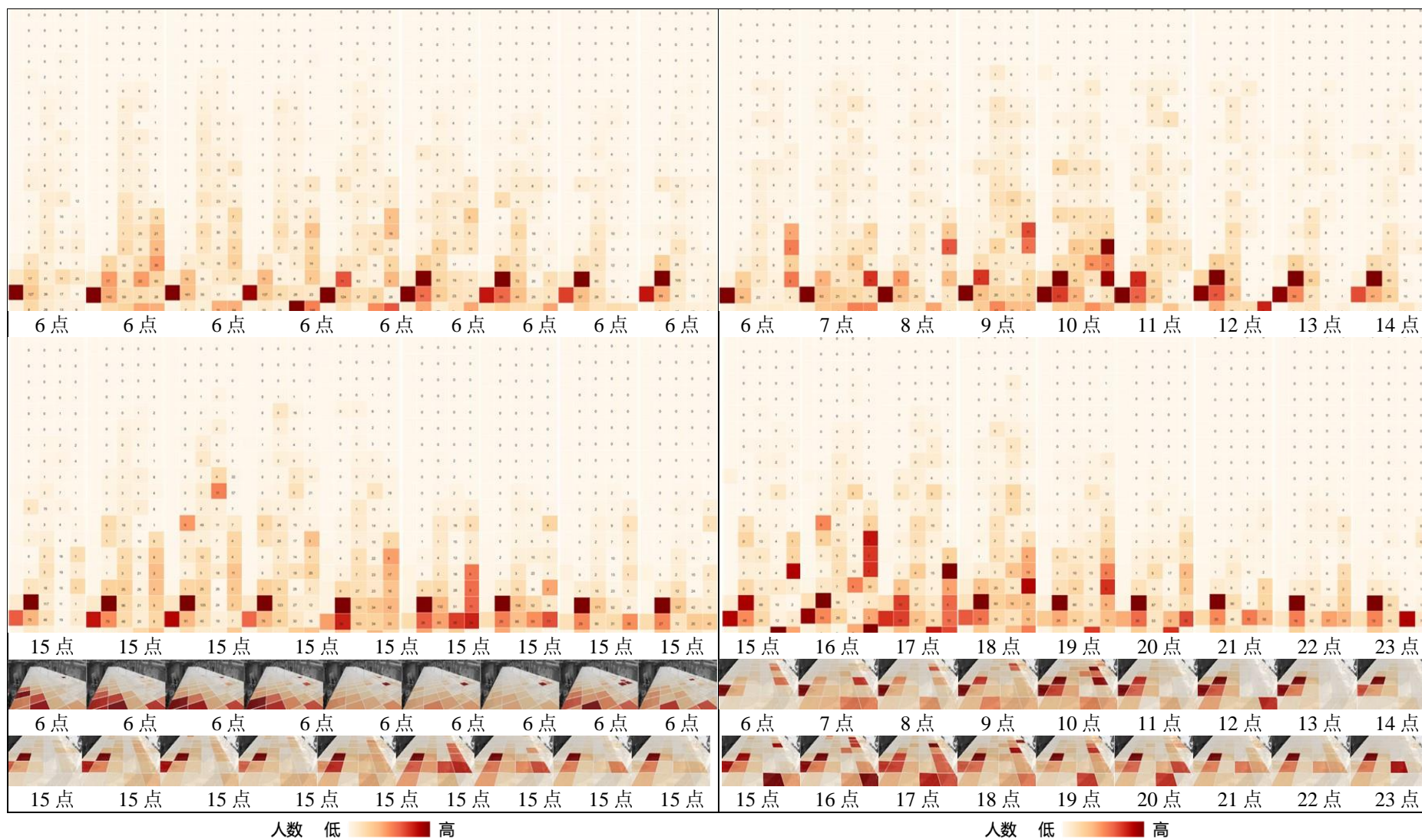
附图 39 工作日北部商业空间穿行行为使用强度分布

附图 40 周末北部商业空间穿行行为使用强度分布



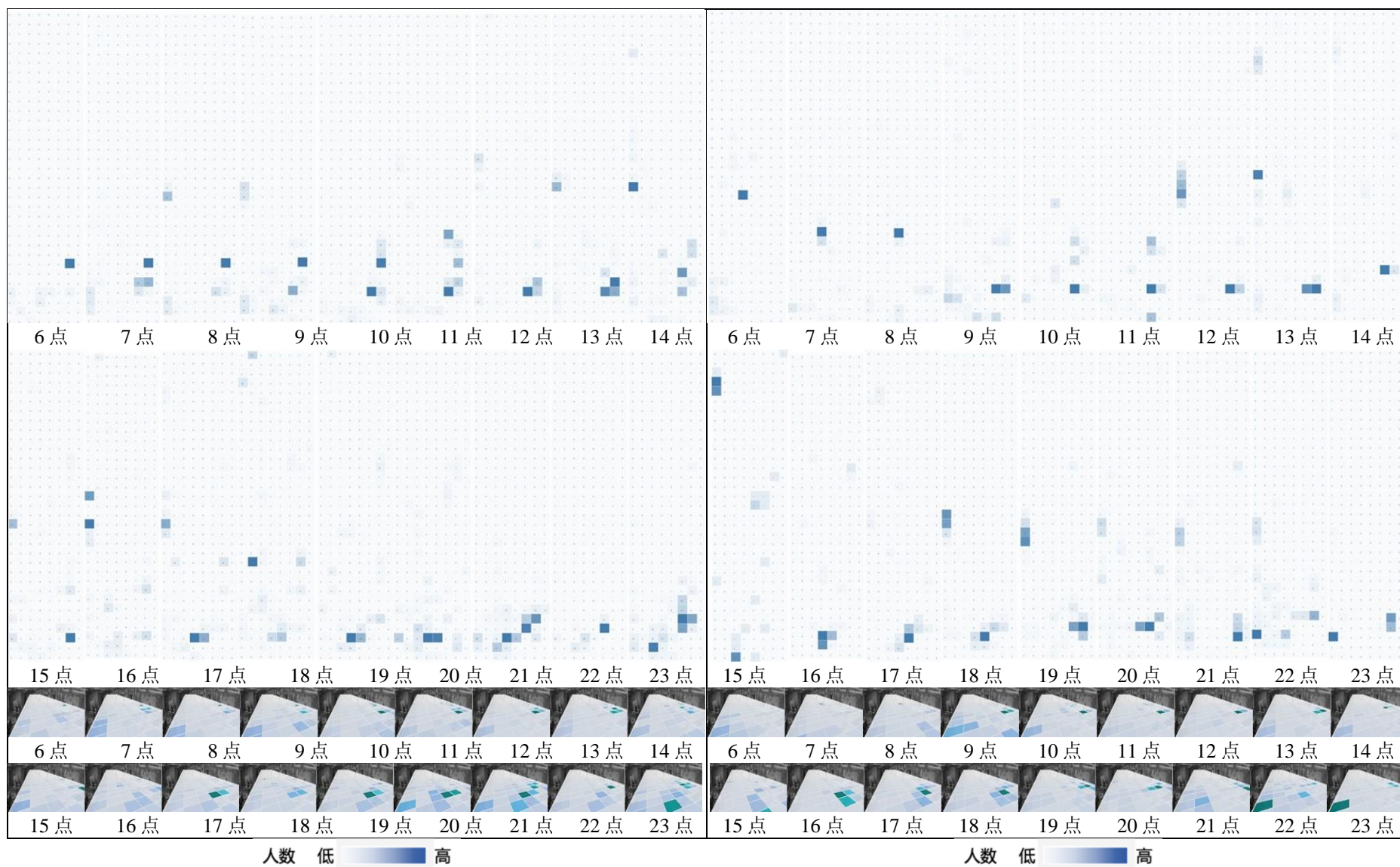
附图 41 工作日南部出入口空间穿行行为使用强度分布

附图 42 周末南部出入口空间穿行行为使用强度分布



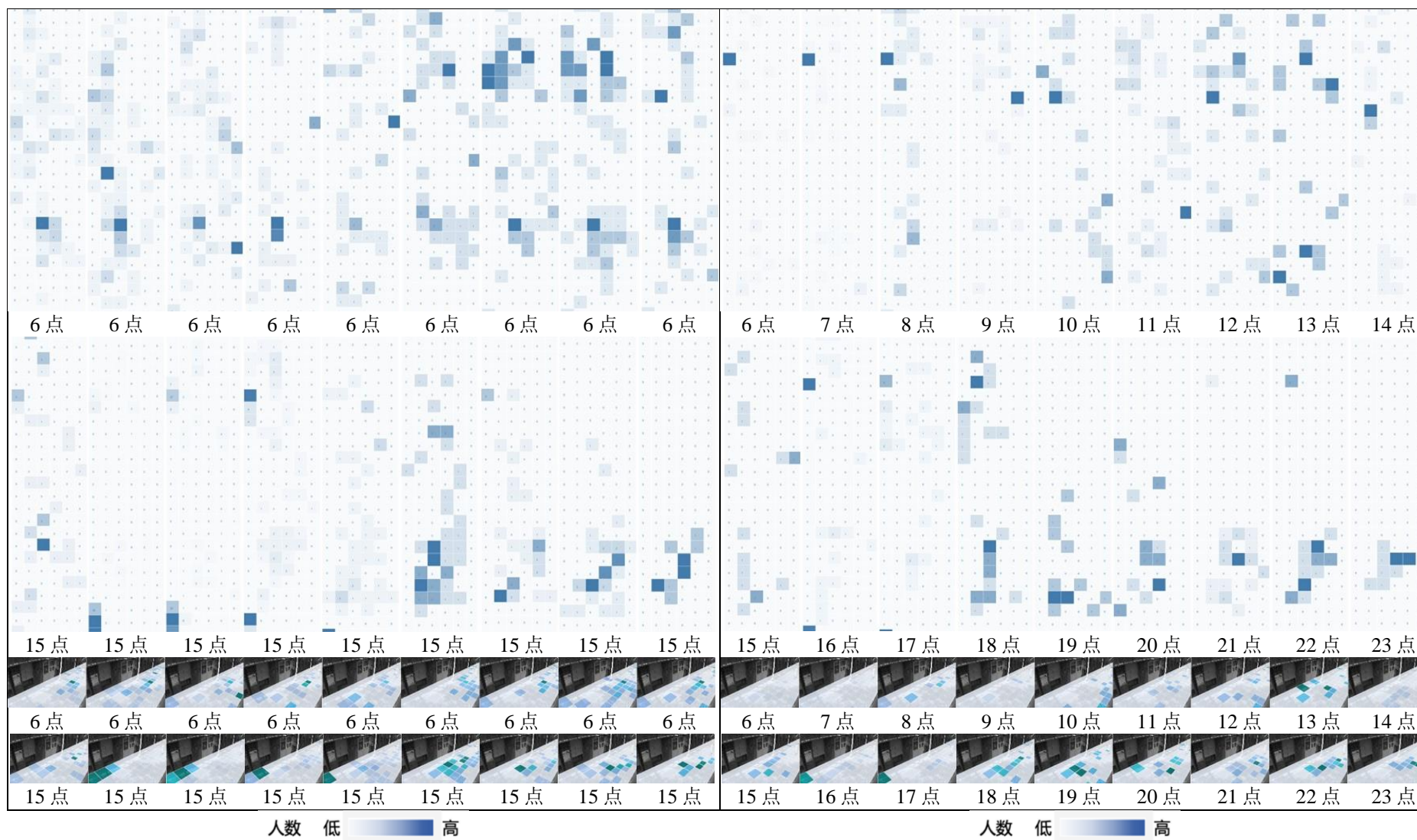
附图 43 工作日东部活动空间穿行行为使用强度分布

附图 44 周末东部活动空间穿行行为使用强度分布



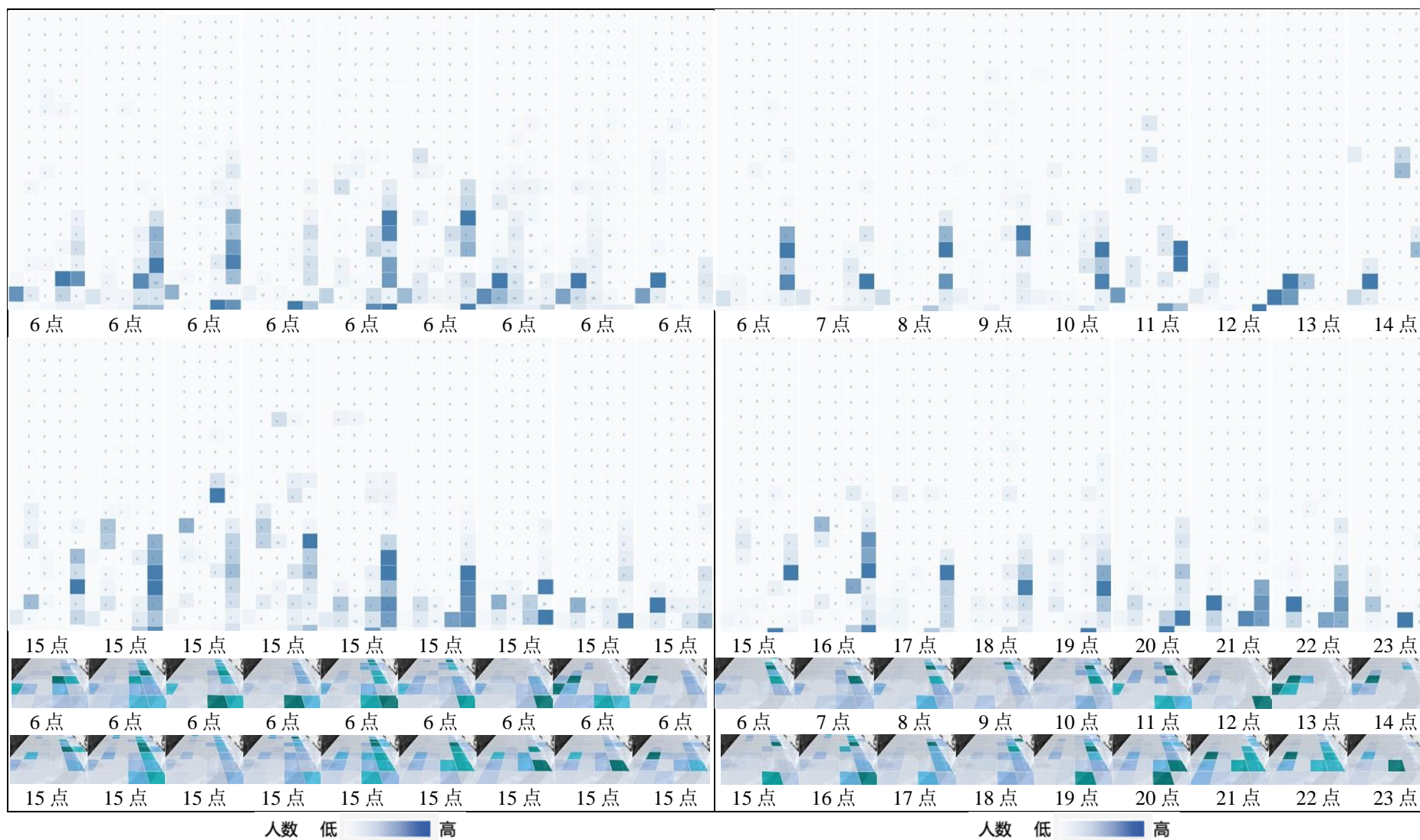
附图 45 工作日北部商业空间停留行为使用强度分布

附图 46 周末北部商业空间停留行为使用强度分布



附图 47 工作日南部出入口空间停留行为使用强度分布

附图 48 周末南部出入口空间停留行为使用强度分布

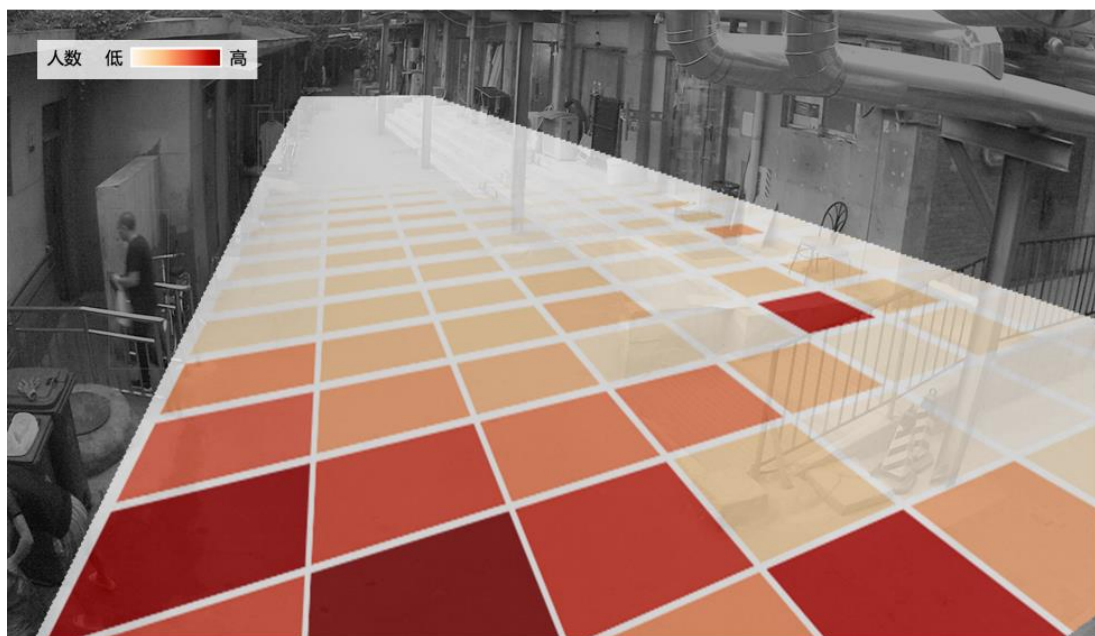


附图 49 工作日东部活动空间停留行为使用强度分布

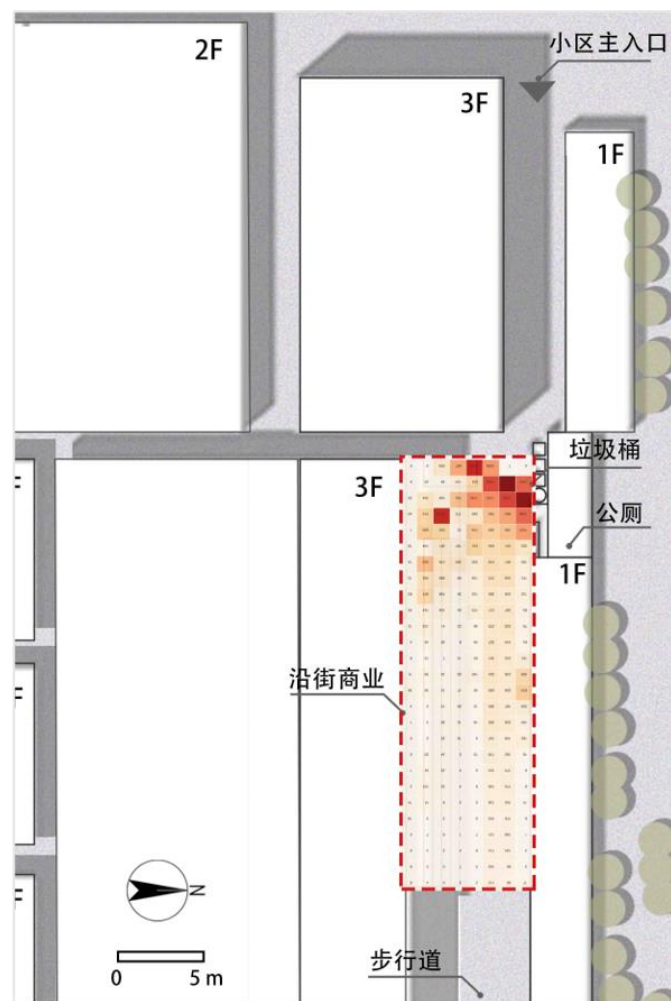
附图 50 周末东部活动空间停留行为使用强度分布



不同拍摄时段数据收集结果



不同拍摄时段数据处理结果

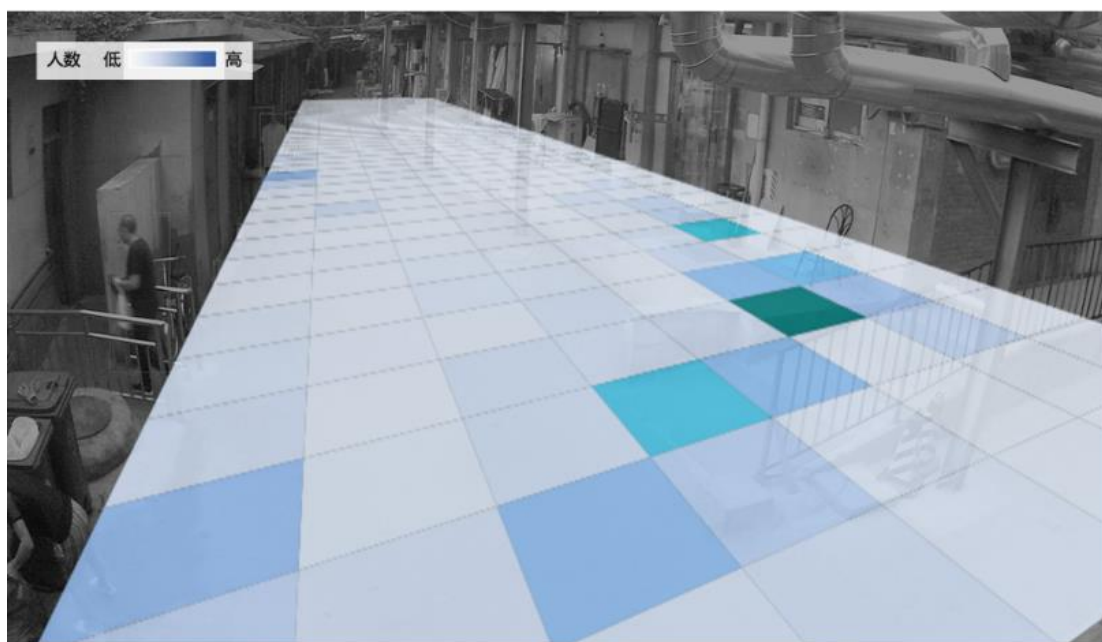


不同拍摄时段数据处理结果汇总

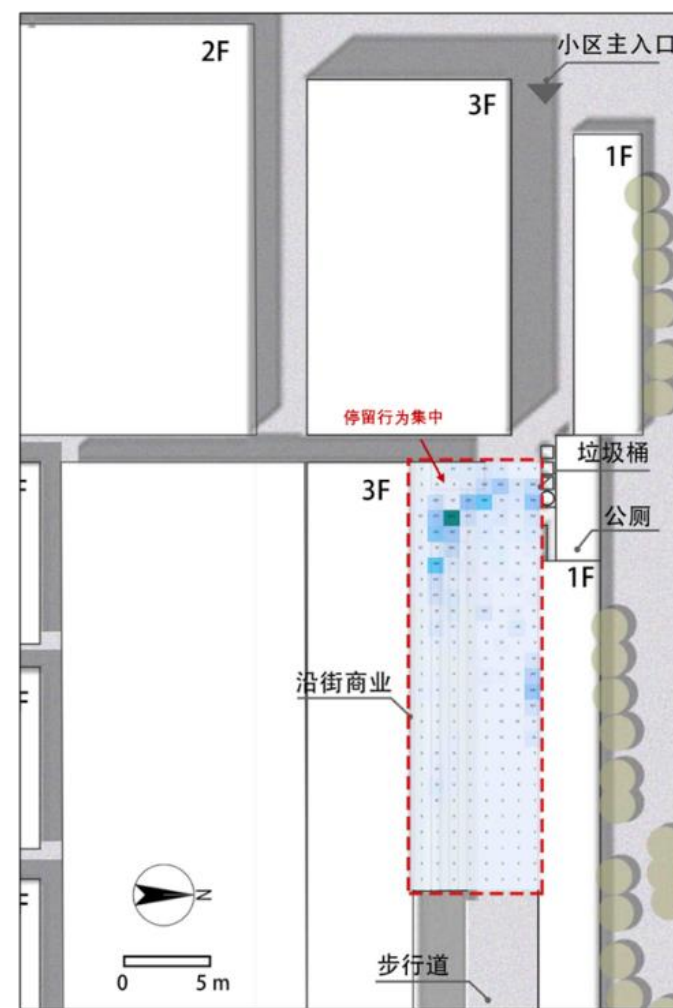
附图 51 居住区北部商业空间各时段穿行行为汇总



不同拍摄时段数据收集结果



不同拍摄时段数据处理结果

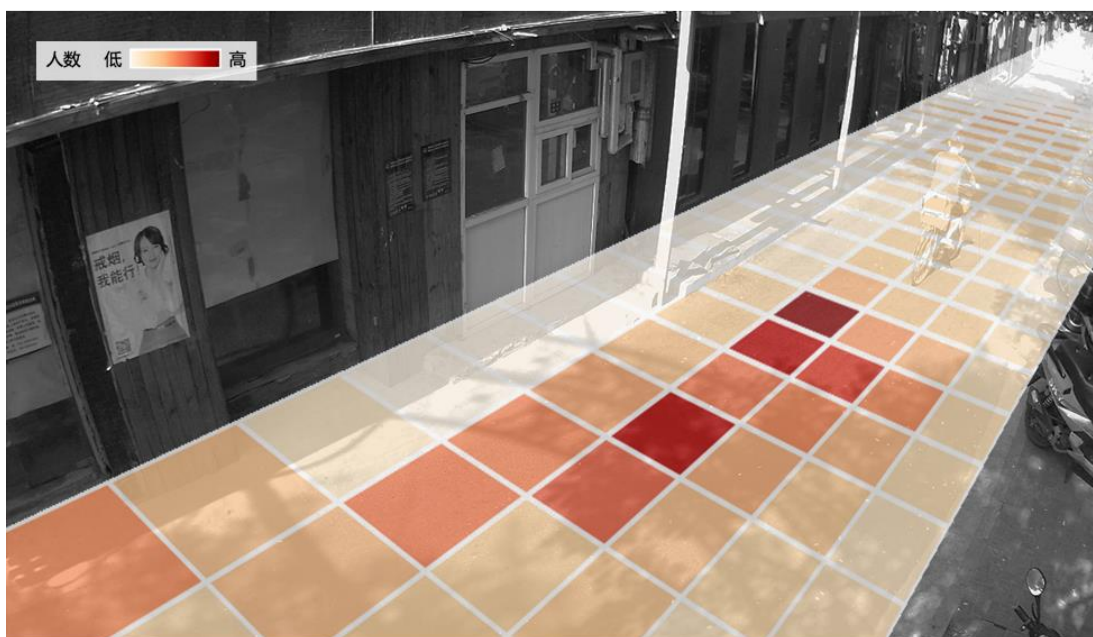


不同拍摄时段数据处理结果汇总

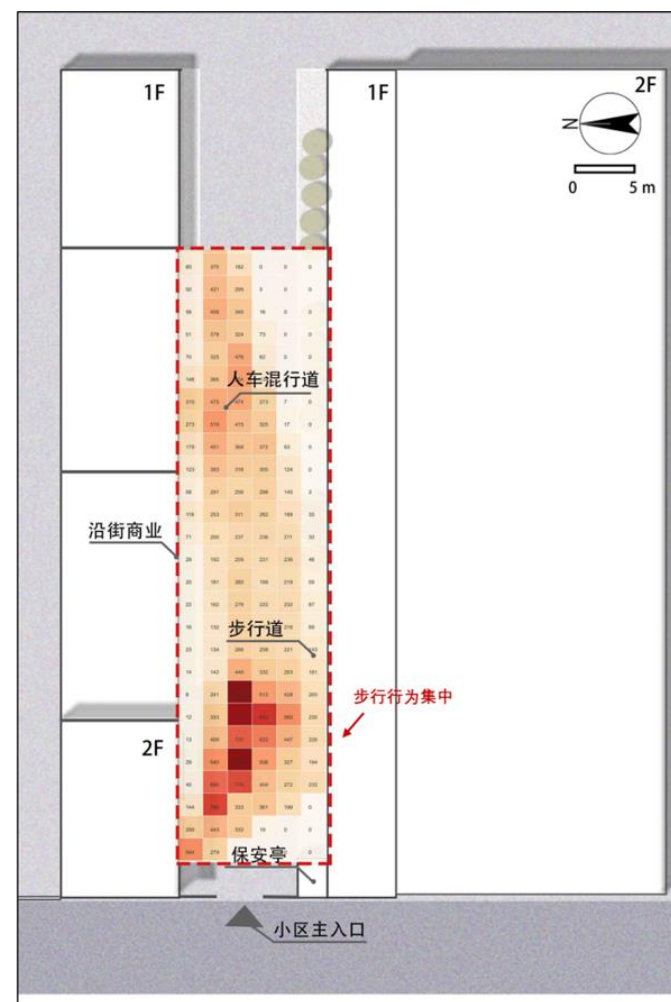
附图 52 居住区北部商业空间停留行为汇总



不同拍摄时段数据收集结果



不同拍摄时段数据处理结果

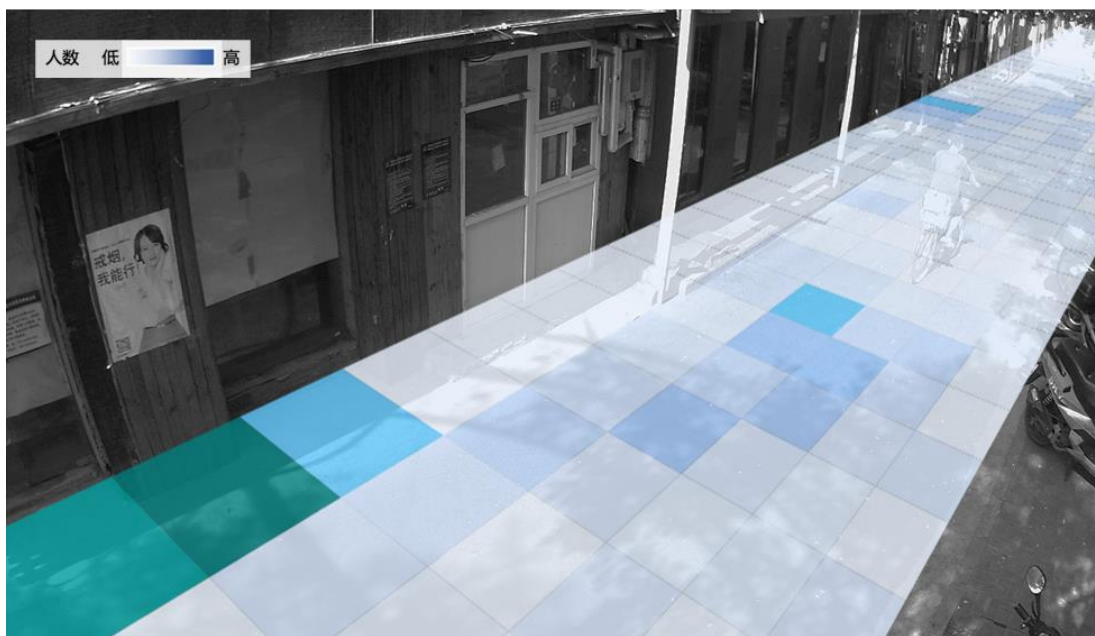


不同拍摄时段数据处理结果汇总

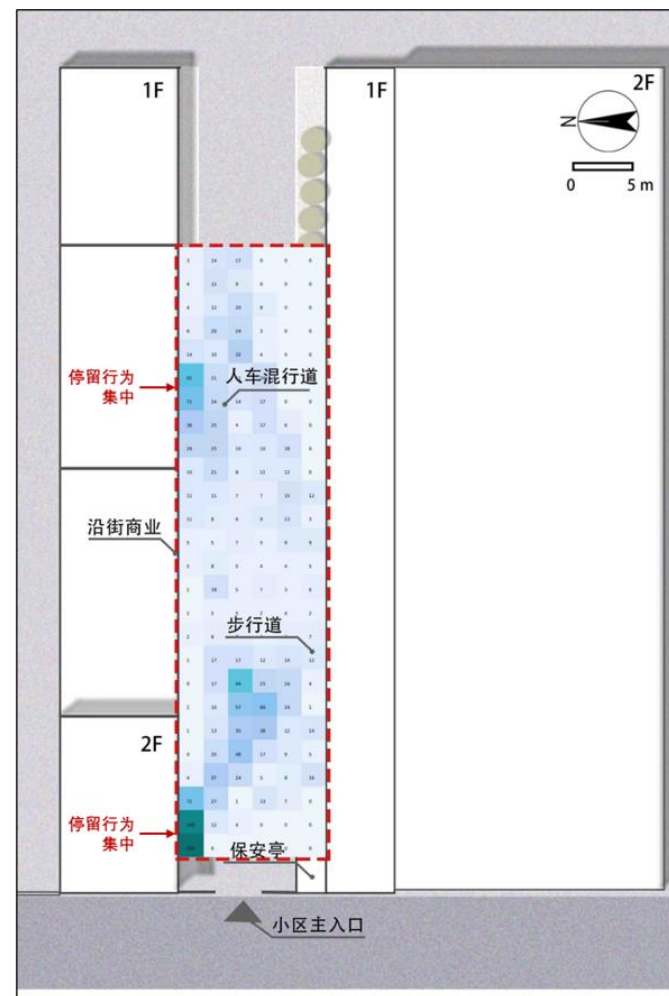
附图 53 居住区南部入口空间各时段穿行行为汇总



不同拍摄时段数据收集结果



不同拍摄时段数据处理结果

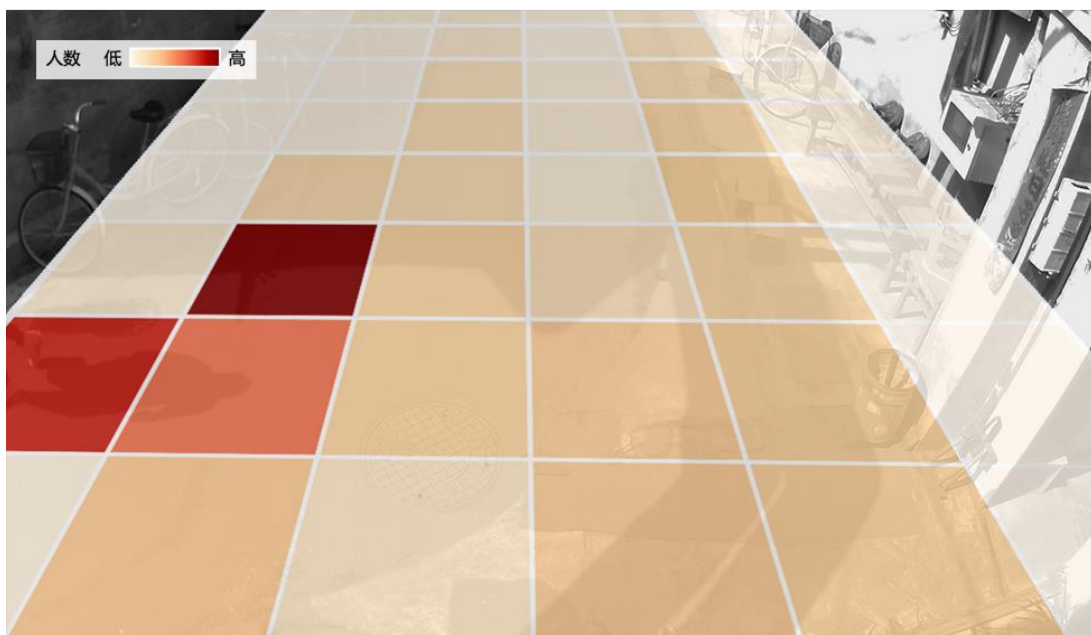


不同拍摄时段数据处理结果汇总

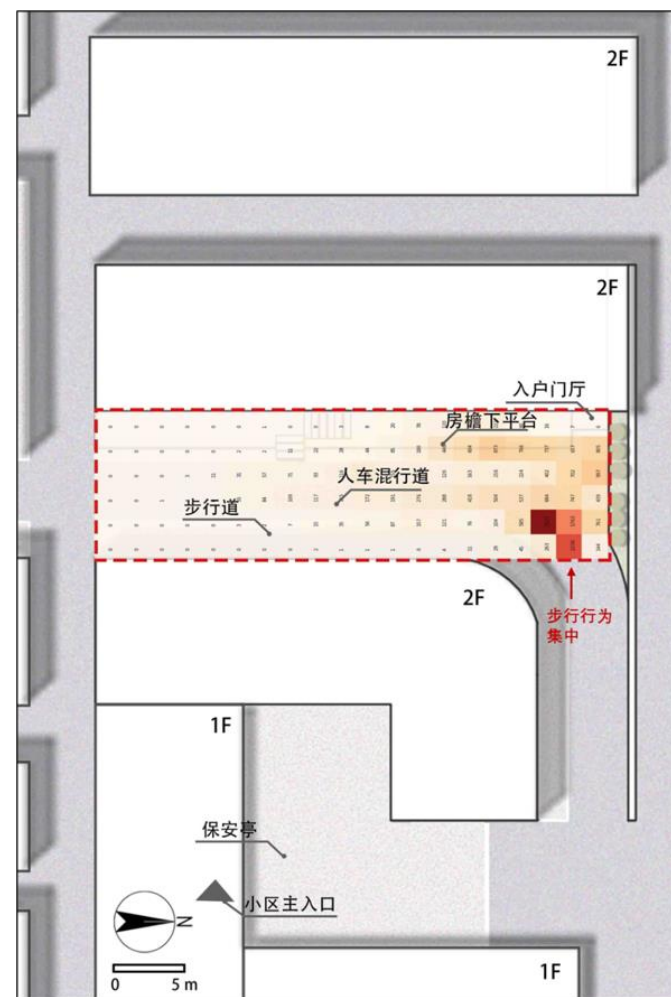
附图 54 居住区南部入口空间各时段停留行为汇总



不同拍摄时段数据收集结果



不同拍摄时段数据处理结果

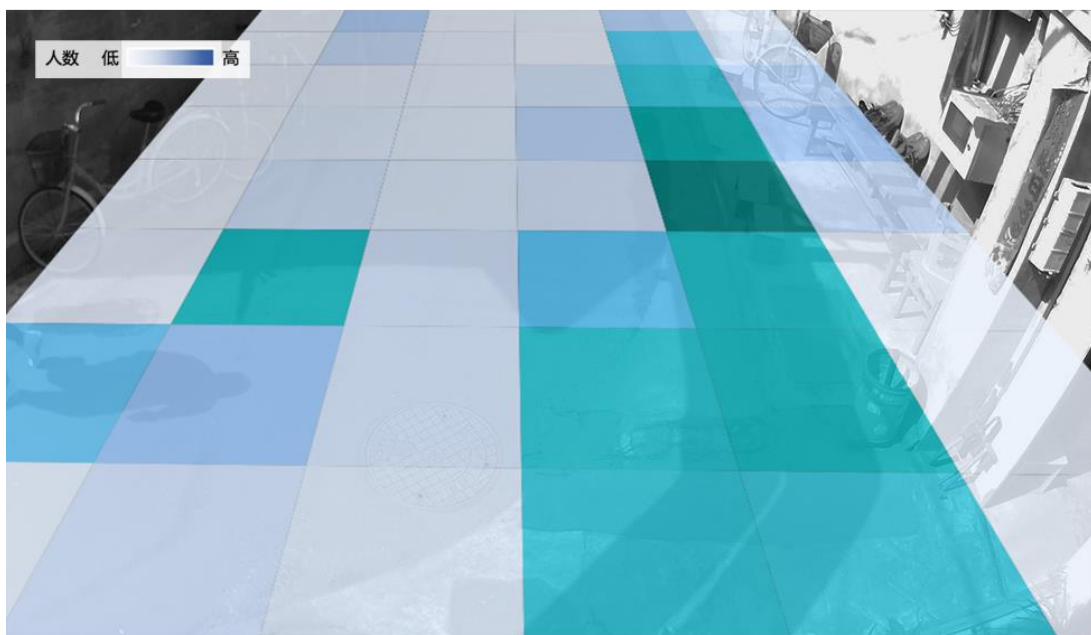


不同拍摄时段数据处理结果汇总

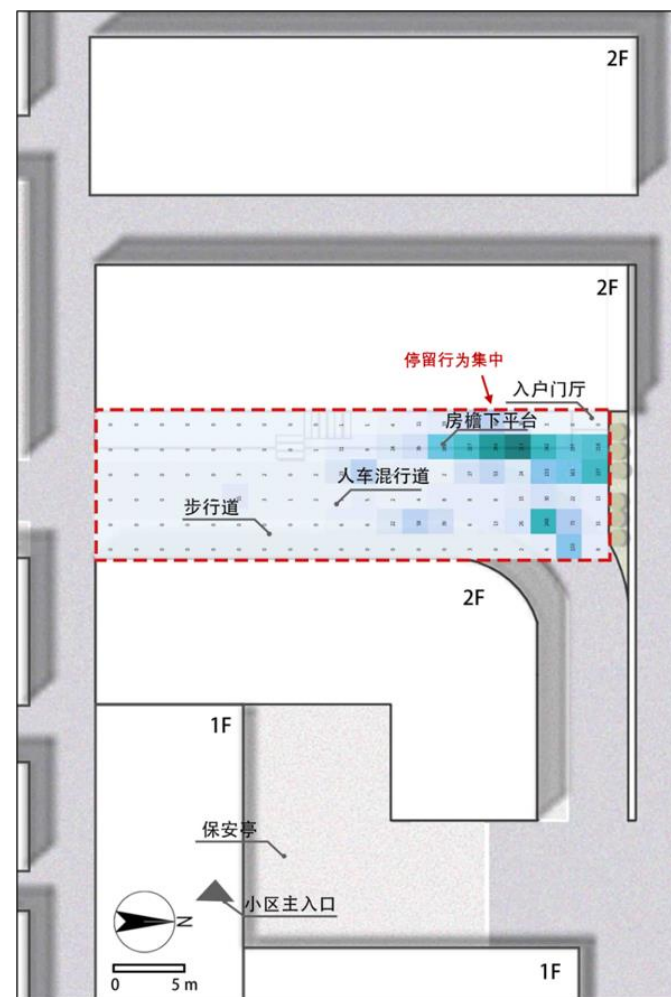
附图 55 居住区中部活动空间各时段穿行行为汇总



不同拍摄时段数据收集结果

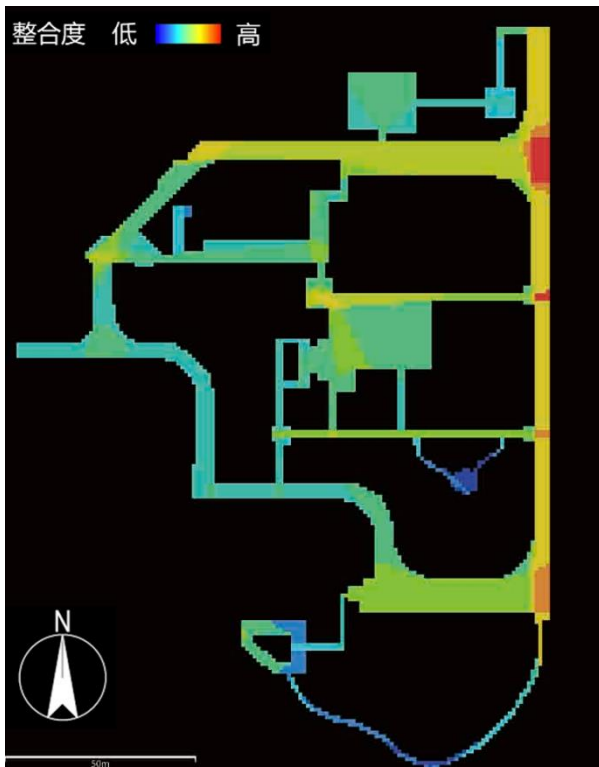


不同拍摄时段数据处理结果

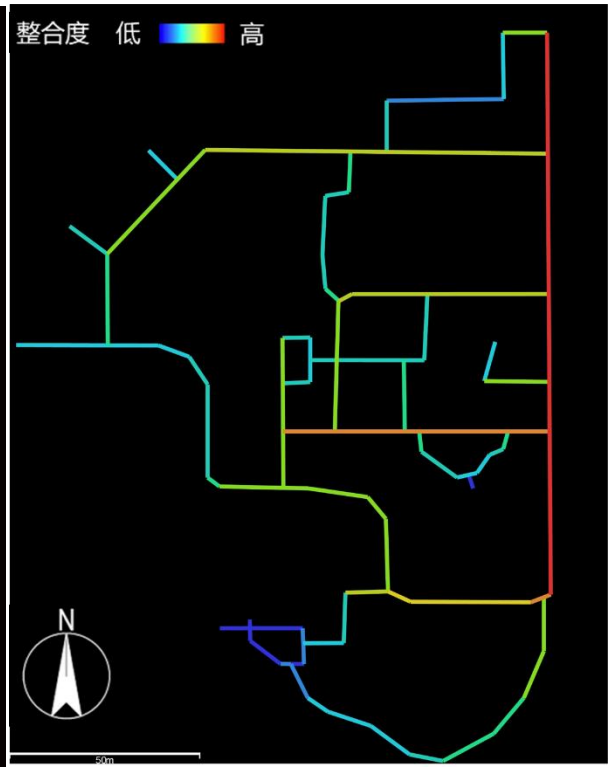


不同拍摄时段数据处理结果汇总

附图 56 居住区中部活动空间各时段停留行为汇总



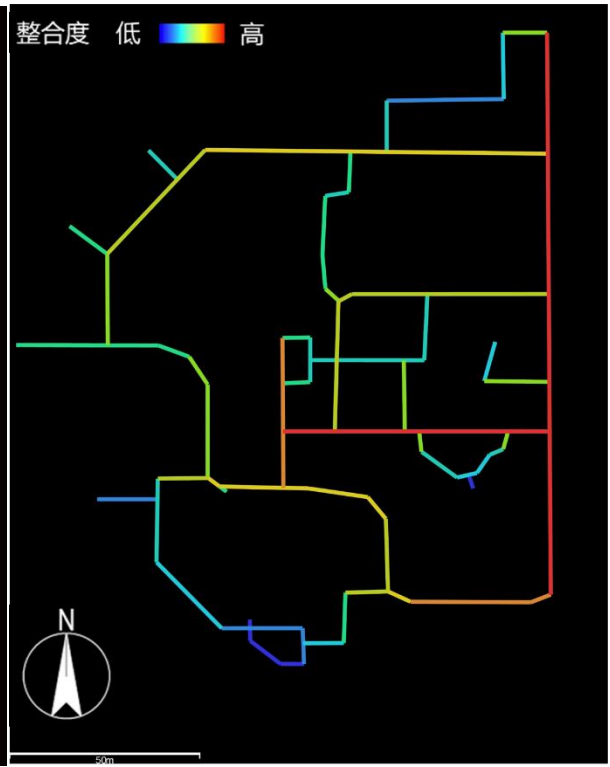
方案 1-2 休闲行为空间使用模式模拟结果



方案 1-2 交通行为空间使用模式模拟结果



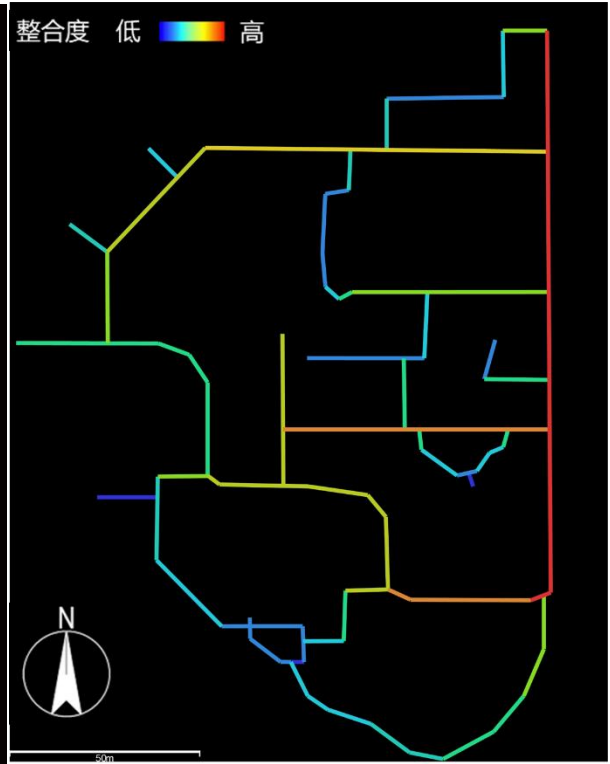
方案 1-3 休闲行为空间使用模式模拟结果



方案 1-3 交通行为空间使用模式模拟结果



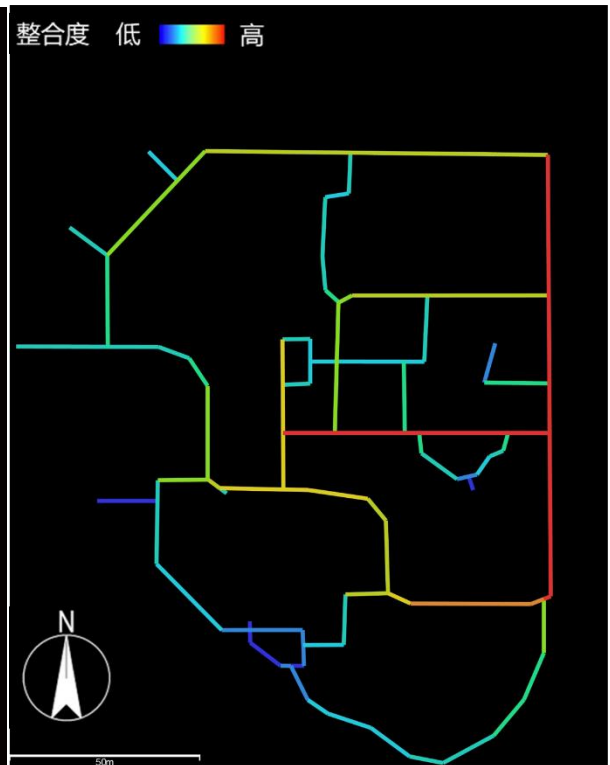
方案 1-4 休闲行为空间使用模式模拟结果



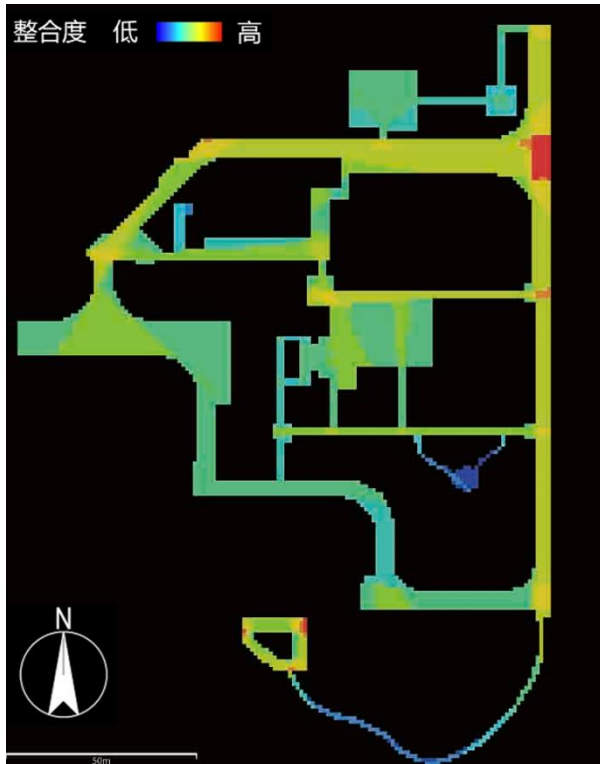
方案 1-4 交通行为空间使用模式模拟结果



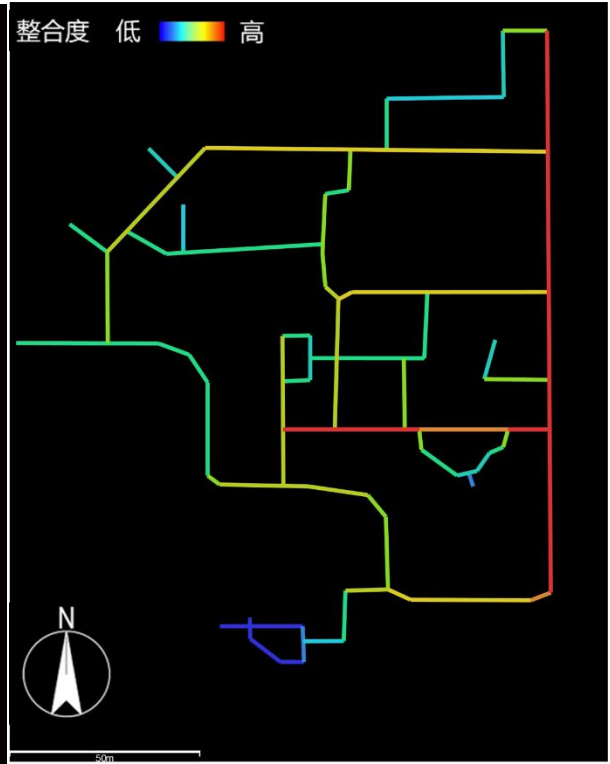
方案 1-5 休闲行为空间使用模式模拟结果



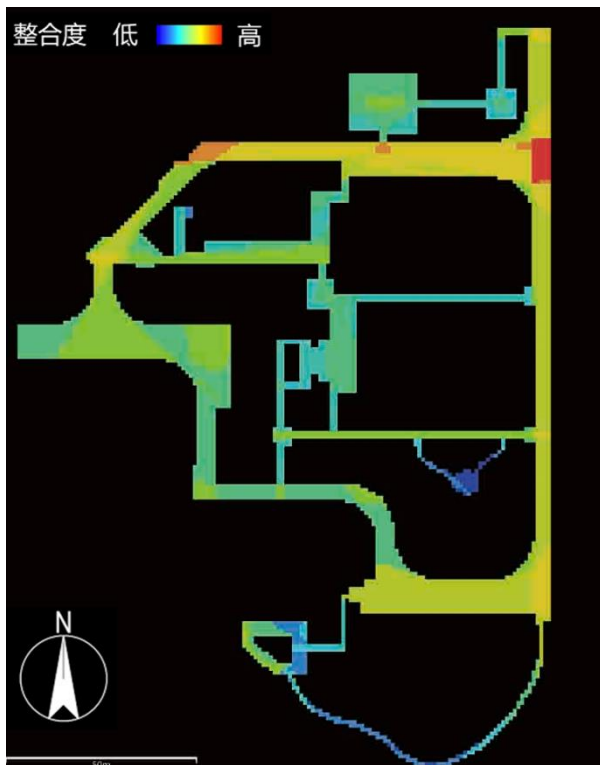
方案 1-5 交通行为空间使用模式模拟结果



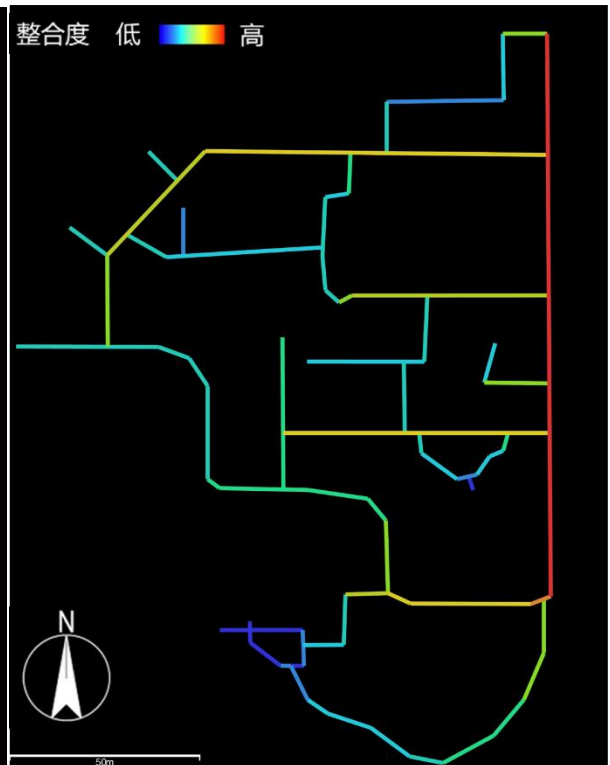
方案 2-3 休闲行为空间使用模式模拟结果



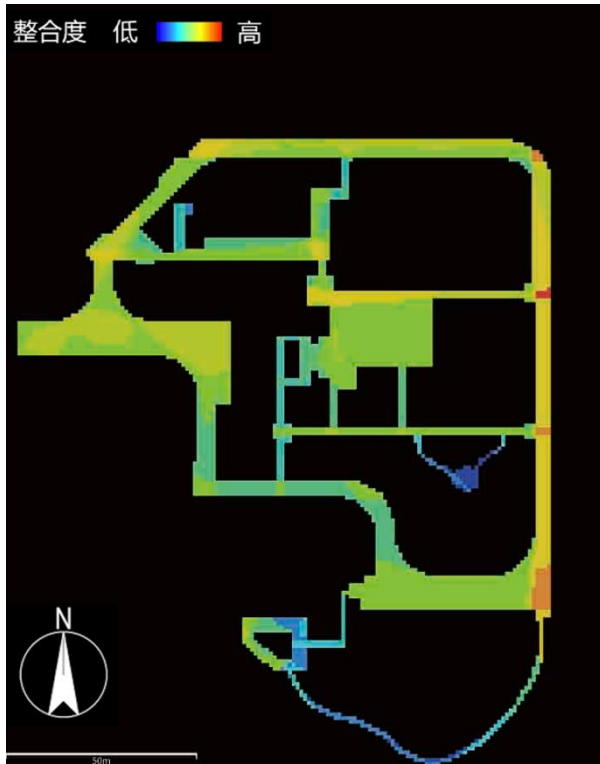
方案 2-3 交通行为空间使用模式模拟结果



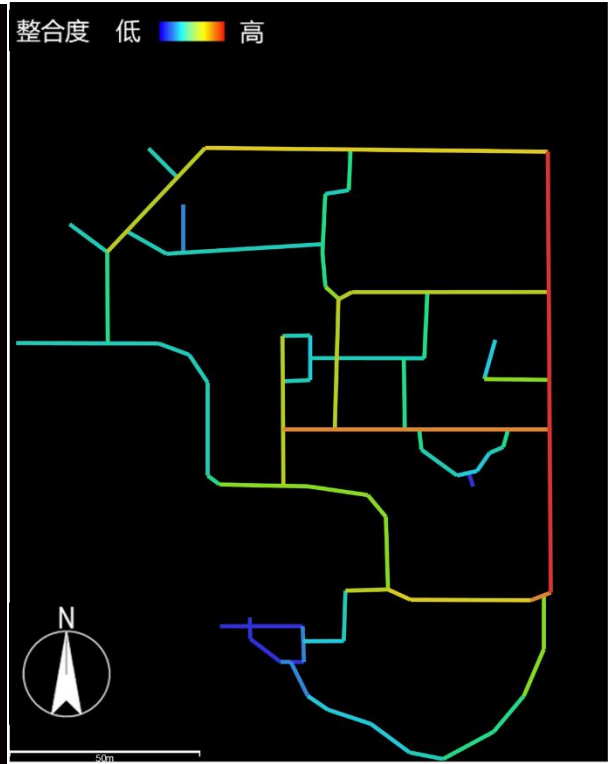
方案 2-4 休闲行为空间使用模式模拟结果



方案 2-4 交通行为空间使用模式模拟结果



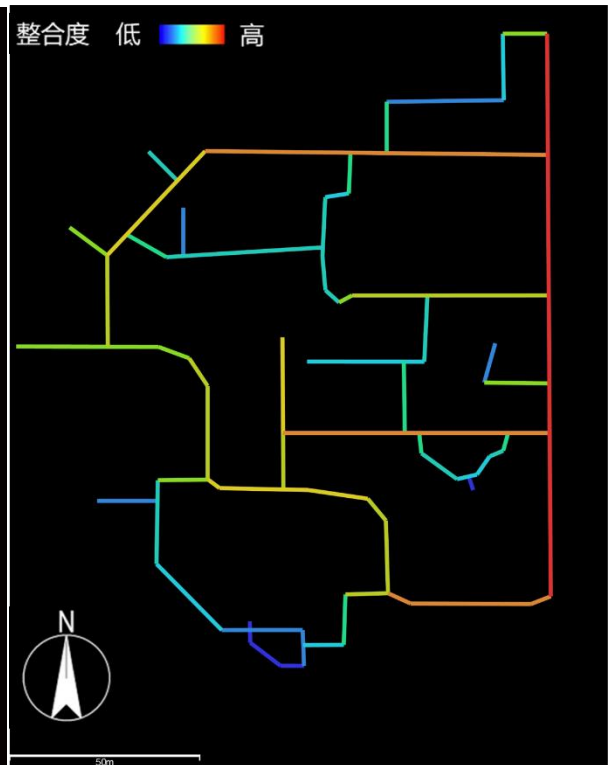
方案 2-5 休闲行为空间使用模式模拟结果



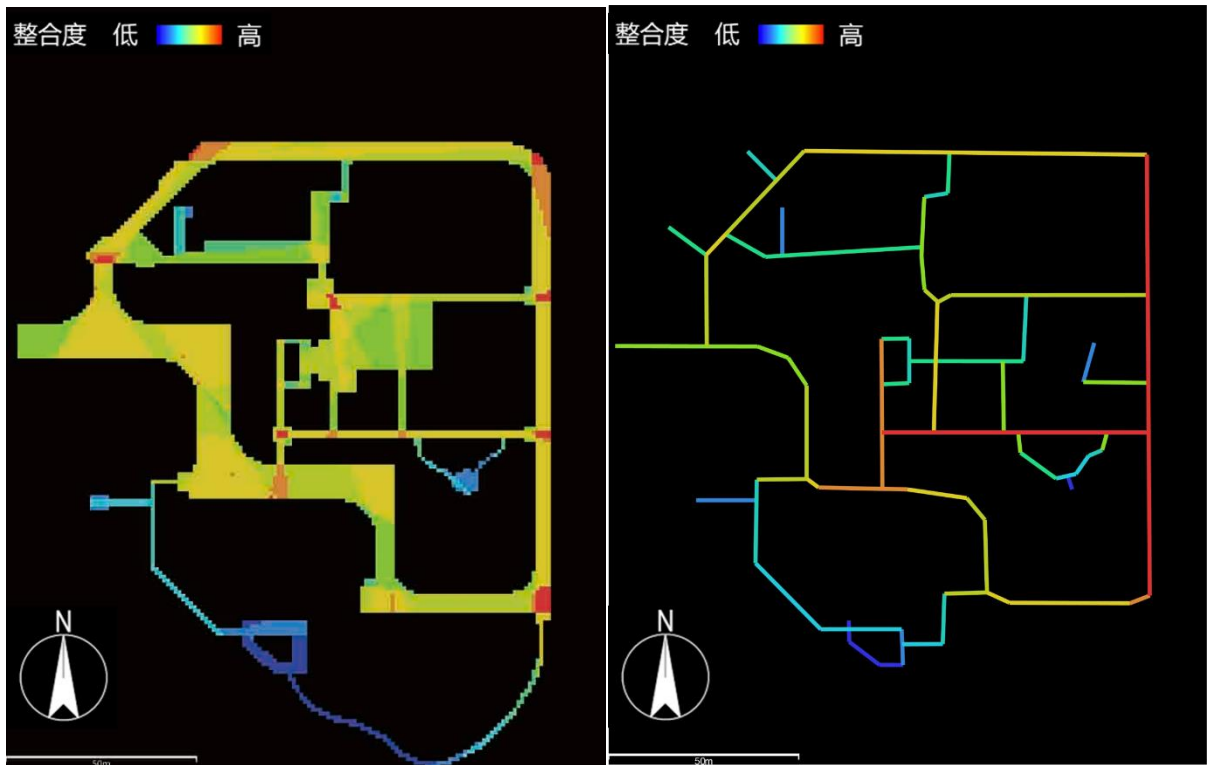
方案 2-5 交通行为空间使用模式模拟结果



方案 3-4 休闲行为空间使用模式模拟结果



方案 3-4 交通行为空间使用模式模拟结果



方案 3-5 休闲行为空间使用模式模拟结果 方案 3-5 交通行为空间使用模式模拟结果



方案 4-5 休闲行为空间使用模式模拟结果 方案 4-5 交通行为空间使用模式模拟结果

附图 57 各方案休闲与交通使用模式模拟结果

附录 C 附表

文件名称	重点内容	部门	时间
《关于加快推进棚户区（危旧房）改造的通知》	逐步开展基础设施简陋、建筑密度大的城镇旧住宅区综合整治。	住建部等	2012年12月
《“十二五”绿色建筑和绿色生态城区发展规划》	统筹规划进行老旧小区环境整治；老旧基础设施更新改造。	住建部	2013年4月
《关于加快棚户区改造工作的意见》	要加快城镇旧住宅区综合整治，加强环境综合整治和房屋维修改造。	国务院	2013年7月
《关于进一步加强棚户区改造工作的通知》	进一步完善棚户区改造规划，完善安置房选点布局。	国务院	2014年8月
《关于进一步做好城镇棚户区和城乡危房改造及配套基础设施建设有关工作的意见》	2015-2017年，改造包括城市危房、城中村在内的各类棚户区住房、农村危房，加大棚改配套基础设施建设力度。	国务院	2015年6月
《关于进一步做好棚户区改造工作有关问题的通知》	加速推进棚改，依法依服控制棚改成本，科学规划棚腾空的土地，注重配套和环境建设。	住建部等	2016年7月
《城乡建设抗震防灾“十三五”规划》	继续实施农村危房改造工程，统筹推进农村抗震改造。	住建部	2016年11月
《棚户区改造工作激励措施实施办法（试行）》	激励各地有效推进棚户区改造。	住建部等	2016年12月
《国务院常务会议纪要》	兑现改造约1亿人居住的城镇棚户区和城中村的承诺。	国务院	2017年5月
《全国城市市政基础设施建筑“十三五”规划》	老城区以问题为导向，结合城市棚户区、城中村、老旧小区改造等。	住建部等	2017年5月
《关于推进北方采暖地区城镇清洁供暖的指导意见》	城市主城区、城乡结合部及城中村要结合旧城改造、棚户区改造以及老旧小区改造等工作。	住建部等	2017年9月
《关于进一步做好城市既有建筑保留利用和更新改造工作的通知》	高度重视城市既有建筑保留利用和更新改造，建立健全城市既有建筑保留利用和更新改造工作机制。	住建部	2018年9月
《2019年国务院政府工作报告》	需要大力提升老旧小区改造、支持加装电梯等生活设施。	国务院	2019年3月

附录 C 附表

《关于做好 2019 年老旧小区改造工作的通知》	全面推进城镇老旧小区改造。	住建部	2019 年 7 月
《关于提前下达关于 2021 年部分中央财政城镇保障性安居工程补助资金预算的通知》	中央财政城镇保障性安居工程专项资金首次将老旧小区改造纳入支持范围。	财政部	2019 年 9 月
《中央经济工作会议纪要》	加强城市更新和存量住房改造提升，做好城镇老旧小区改造。	中共中央	2019 年 12 月
《关于全面推进城镇老旧小区改造工作的指导意见》	到 2022 年，基本形成城镇老旧小区改造制度框架、政策体系和工作机制。	国务院	2020 年 7 月
《绿色建筑创建行动方案》	结合北方地区清洁区取暖等工作，推动既有居住建筑节能节水改造。	住建部等	2020 年 7 月
《关于印发绿色社区创建行动方案的通知》	以城镇老旧小区改造为抓手，积极改造提升社区基础设施。	国务院	2020 年 8 月
《2021 年国务院政府工作报告》	新开工改造城镇老旧小区 5.3 万个。	住建部	2021 年 3 月
《关于加强县城绿色低碳建设的意见（征求意见稿）》	大力发展绿色建筑和建筑节能：推进老旧小区节能改造和功能提升。	中共中央等	2021 年 3 月
《2021 年新型城镇化和城乡融合发展重点任务》	实施城市更新行动。加快推进老旧小区改造。	发改委	2021 年 4 月
《关于在实施城市更新行动中防止大拆大建问题的通知（征求意见稿）》	指导各地积极稳妥实施城市更新行动，防止大拆大建，急功近利等问题。	住建部	2021 年 8 月
《关于加强城镇老旧小区改造配套设施建设的通知》	加强项目储备；强化资金保障；加强事中事后监管；完善长效管理机制。	发改委等	2021 年 9 月
《中央城市工作会议公报》	推动以人为核心的新型城镇化，有效化解各种“城市病”。	中共中央	2015 年 12 月
《第十二届全国人民代表大会第五次会议纪要》	城市管理应该像绣花一样精细。	新华社	2017 年 3 月
《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》	推进以人为核心的新型城镇化。	中共中央	2020 年 11 月

附表 1 城市更新相关文件及重点内容

致 谢

衷心感谢我的导师城市规划系龙瀛副教授对本人的精心指导。在入学前的逾一年时光中，我以客座学生的身份跟随龙老师系统学习了大数据与城市规划相关内容。此段经历开拓了我的眼界、提升了我的研究能力，为我日后进行研究工作打下了坚实基础。入学后，龙老师结合我自身的特点，以国际学术前沿作为标准帮我设立了科研目标，时时激励、帮助我将研究推进下去，并在研究过程中为我提供了数据以及研究经费支持。此外，龙老师在深入城乡规划专业研究的基础上，给我们提供了与建筑学、环境科学、计算机科学等不同专业的专家、学者进行深入交流与合作的机会，进一步使我开拓思路并增强学术能力。通过参加龙老师组织的科研项目，我对如何将科研与实践相结合有了更深刻的认识。在龙老师的组织和鼓励下，我参与了很多学术会议与学术研讨活动，并有机会将自己的科研进展汇报给更多的专家、学者，从而可以根据他们的建议与反馈提升自己的科研水平。龙老师对我的影响不止在于科研能力的提升，更体现在精神层面，比如学风上，龙老师有极高的学术道德水准，是我科研工作的楷模。龙老师的言传身教将使我终生受益。

在博士论文实验、写作和答辩过程中，首先需要感谢我的导师龙瀛副教授的悉心指导，此外还要衷心感谢清华大学党安荣教授、边兰春教授、贾海峰教授、于涛方副教授、黄鹤副教授、来源助理教授给予指导，使我能够认识到论文中的优势与不足，帮助我持续提升论文的质量。

感谢在清华大学攻读博士期间，曾在博士论文推进过程中对我提供帮助的清华大学张恩嘉、刘滋菁，四川大学的牛通，龙瀛老师实验室等单位的韩治远、李派、陈龙、张昭希等同学、专家，以及北京市水科院、城市象限、美团研究院等单位的相关专家、学者的支持与指导。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名： _____ 日 期： _____

个人简历、在学期间完成的相关学术成果

个人简历

1991年8月8日出生于河北省保定市。

2010年9月考入天津大学建筑学院建筑学专业，2015年7月本科毕业并获得建筑学学士学位。

2016年9月考入宾夕法尼亚大学（University of Pennsylvania）城市空间分析专业，2017年月硕士毕业获得城市空间分析（Urban Spatial Analytics）硕士学位。

2019年9月考入清华大学建筑学院攻读城乡规划学博士至今。

在学期间完成的相关学术成果

学术论文：

- [1]. Niu T, Qing L, Han L, Long Y, **Hou J**, Li L, Tang W, Teng Q. Small public space vitality analysis and evaluation based on human trajectory modeling using video data[J]. Building and Environment, 2022, 109563. (SCI收录)
- [2]. Liu Z, Yang Y, **Hou J**, et al. Decision-making framework for GI layout considering site suitability and weighted multifunction effectiveness: A case study in Beijing sub-center [J]. Water, 2022, 14(11): 1765. (SCIE收录)
- [3]. 侯静轩, 张恩嘉, 龙瀛. 多尺度城市空间网络研究进展与展望 [J]. 国际城市规划, 2021, 36 (04): 17-24. (CSSCI收录)
- [4]. Zhang E, Ye Y, **Hou J**, Long Y. Revealing the spatial preferences embedded in online activities: A case study of Chengdu, China [M]//Geertman S C M, Pettit C, Goodspeed R, et al. Urban informatics and future cities. Cham; Springer International Publishing. 2021: 173-188. (国际会议)
- [5]. **Hou J**, Chen L, Zhang E, et al. Quantifying the usage of small public spaces using deep convolutional neural network [J]. PloS One, 2020, 15 (10): e0239390. (SCIE收录)
- [6]. Han Z, Long Y, Wang X, **Hou J**. Urban redevelopment at the block level: Methodology and its application to all Chinese cities [J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2019, 47 (9): 1725-1744. (SSCI收录)
- [7]. 龙瀛, 李派, 侯静轩. 基于街区三维形态的城市形态类型分析——以中国主要城市为例 [J]. 上海城市规划, 2019, (03): 10-15. (北大中文核心)

会议宣讲:

- [1]. 侯静轩, 张昭希, 龙瀛. 应用固定摄像机和深度学习的人本尺度公共开敞空间中人群行为时空特征分析, 中国城市科学学会城市大数据专业委员会2021年会暨“智慧城市协同治理”学术研讨会, 沈阳, 2021.08
- [2]. 侯静轩, 龙瀛. 基于WiFi探针数据的空间句法线段与视域模型的步行数据模型机制分析, 2021城市空间分析论坛暨第六届中国空间句法学术研讨会, 广州, 2021.04
- [3]. 侯静轩. 基于步行流量研究的空间句法拓扑模型与视域模型作用机制分析, 中国城市科学学会城市大数据专业委员会2020年会, 暨“数据驱动与智慧治理”学术研讨会研究生论坛, 在线, 2020.10.
- [4]. 侯静轩, 张恩嘉, 龙瀛. 数字经济时代的城市商业重构与治理——基于美团数据透视的商圈识别、分类与评价, 2019年(第八届)国际智慧城市峰会“人工智能与城市未来”分论坛, 郑州, 2019.12.
- [5]. 侯静轩. 小尺度城市公共开敞空间活力的监测方法初探——以北京通州某居住小区海绵设施为例, 第二届国际城市生态学会中国分会学术研讨会, 上海, 2018.12.

发明专利与软件著作权

发明专利:

- [1]. 侯静轩、龙瀛、陈龙, 2021. 一种获取视频中人群空间位置的方法. 专利类型: 发明专利. 专利号: ZL 201911118462.2

软件著作权:

- [1]. 贾海峰, 龙瀛, 刘滋菁, 侯静轩, 陈龙, 陈正侠. 城市降雨径流最佳管理措施筛选专家系统V2.0, 计算机软件开发, 2020SR0877105, 2020.

获奖情况

- [1]. 侯静轩. 2021年清华大学综合优秀奖学金(二等). 清华大学. 2021.12
- [2]. 侯静轩. 基于商圈的到店、到家餐饮消费模式的空间分异研究. WeSpace学术支持计划(优秀). 腾讯研究院. 2021.07
- [3]. 张恩嘉, 侯静轩. 网络理论视角下万物互联的城市机遇与挑战. 2020《中国建筑教育》·“清润奖”大学生论文竞赛(二等). 2020.09.

- [4]. 张恩嘉, 陈婧佳, 雷链, 张书杰, **侯静轩**. 减量规划, 森林鹤岗. 2019中国收缩城市规划设计工作坊(二等). 2019.07
- [5]. 张恩嘉, **侯静轩**, 雷链. 基于延时摄影与深度学习的人群时空行为研究模型. 第三届“城垣杯·规划决策支持模型设计大赛”(一等). 2019.05

项目参与情况

- [1]. 2021-2021. 美团点评 | 北京市大型综合商场商业辐射力研究, 核心成员
- [2]. 2021-2021. 美团点评 | 中国主要城市商圈识别、评估与发展规律研究技术咨询, 核心成员
- [3]. 2020-2020. 美团点评 | 商圈商业生态指数体系系列研究, 核心成员
- [4]. 2019-2019. 美团点评 | 智慧商圈商业生态指数体系构, 核心成员
- [5]. 2017-2020. 国家科技重大专项“北京城市副中心高品质水生态建设综合示范”项目”, 核心成员