

新兴技术作用下未来城市空间的碳减排效益研究综述

李文竹 梁佳宁

Research Review on Benefits of Carbon Emission Reduction in Future Urban Space Under the Impact of Emerging Technologies

LI Wenzhu, LIANG Jianing
(School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In the era of digital transformation, the combination of emerging technologies and urban space is expected to solve the long-standing problems in cities such as traffic congestion, environmental pollution, and energy waste, leading to the achievement of the dual carbon targets in urban and rural development. Previous studies mainly focused on the technology-driven transition of urban spaces, lacking a systematic evaluation of the benefits of urban carbon emission reduction. Therefore, this paper selects 111 papers from the Web of Science (WOS) database through a systematic literature review and then examines the impact of technological advancement on carbon emissions in the urban structure and the four urban functions of dwelling, work, transportation, and recreation respectively. It is found that: (1) 74% of the studies believe that new technologies will contribute to the carbon emission reduction in the future urban space; (2) the combination of online and offline hybrid office modes as well as new transportation modes including shared travel will bring more carbon emission reduction benefits to the future urban space; (3) a rebound effect exists in the impact of emerging technologies on urban carbon emissions, which will reduce their carbon emission reduction benefits and need to be considered comprehensively. Finally, this paper summarizes the impact paths of emerging technologies on future urban space's carbon emissions, which will help to achieve low-carbon sustainable development in future cities.

Keywords future cities; carbon emission reduction; urban functional space; emerging technology; systematic literature review

作者简介

李文竹 (通讯作者)、梁佳宁, 清华大学建筑学院。

摘要 在数字化转型的时代背景下, 新兴技术与城市空间结合有望解决城市长期以来的交通拥堵、环境污染、能源浪费等问题, 促进城乡建设中“双碳”目标的达成。现有研究主要关注技术驱动下新城市空间的变化, 缺乏其对城市碳减排效益的关注和系统性的梳理。因此, 文章通过系统性文献综述的方法, 在 Web of Science (WOS) 数据库中筛选出 111 篇文献, 并分别在城市结构和城市居住、工作、交通、休闲四大功能空间综述科技发展对城市碳排放的影响。研究表明: ①74%的文献认为新技术将有助于实现未来城市空间碳排放的减少; ②线上线下结合的混合办公模式与共享出行等新型交通方式将为未来城市空间带来较高的碳减排效益; ③新兴技术对城市碳排放的影响存在反弹效应, 这会削减其带来的碳减排效益, 需要进行综合考虑。最后, 文章总结了新兴技术对未来城市空间碳排放的影响路径, 有助于实现未来城市的低碳可持续发展。

关键词 未来城市; 碳减排; 城市功能空间; 新兴技术; 系统性文献综述

1 引言

从 20 世纪提出的《联合国气候变化框架公约》到 2016 年签署的《巴黎协定》, 碳减排长期以来一直是世界范围内备受关注的话题, 实现碳减排对气候变化、环境保护和可持续发展具有重要意义。2020 年, 国家主席习近平在第七十五届联合国大会上提出“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和”的愿景。在“双

碳”目标下，城乡建设、产业、能源等领域相继做出了详细的部署。城市空间作为承载生产消费和日常人类生活活动的载体，也是资源能源消耗和二氧化碳等温室气体排放的集中地，产生了 70%~80% 的温室气体 (Hoornweg et al., 2011)。而截至 2021 年，我国常住人口城镇化率已高达 64.7% (中华人民共和国统计局, 2021)，未来城市空间低碳转型将成为应对气候变化、保护生态环境的重要途径。

以移动互联网、大数据与云计算、人工智能、物联网、虚拟现实、机器人自动化等为代表的新技术共同促进了第三次工业革命“信息时代”向第四次工业革命“智能时代”的变革，为城市空间转型和精细化城市管理提供了新的契机。随着新兴技术的不断发展，城市居民的生活方式与时空行为受到了深刻的影响。在个体层面上，日益便捷的数字基础设施和信息通信技术大幅提升了居民日常生活的数字化水平，居民由传统的线下活动方式转向线上线下相融合的行为模式，随之出现了时空行为灵活化、碎片化、智能化、多任务处理高频化的转变趋势 (张恩嘉、龙瀛, 2022)。在社会层面上，移动互联网技术促进了城市空间的高效灵活利用，催生了共享居住、共享办公、共享出行等为代表的共享经济。在服务层面上，信息通信技术的驱动下，城市服务即时化和线上化的特征愈发凸显，在家即可满足居民购物、办公、教育、医疗、休闲、服务等多种需求，在线娱乐、云旅游等新型游憩方式层出不穷。

这些新技术催生的新时空行为模式也与未来城市的空间结构和功能场景紧密相关。技术发展和居民活动需求的变化共同投影在城市空间中，其所构建的虚拟世界不断冲击着实体城市的空间结构和功能组织，促进了传统城市空间的转型 (Batty, 2018)。城市实体空间作为居民活动的容器，正在与虚拟线上空间逐步融合，并由单一功能向多功能混合化、碎片化演变，出现功能重组、区位改变等现象。未来城市空间将可能趋向于以居住空间为中心，办公、休闲游憩等多元空间混合、协调组织发展的模式 (李鹏, 2021)。在我国“十四五”规划纲要提出建设数字中国的背景下，新的生活方式与传统实体城市结构功能的转型为未来城市低碳可持续发展提供了新的机遇和挑战 (图 1)。

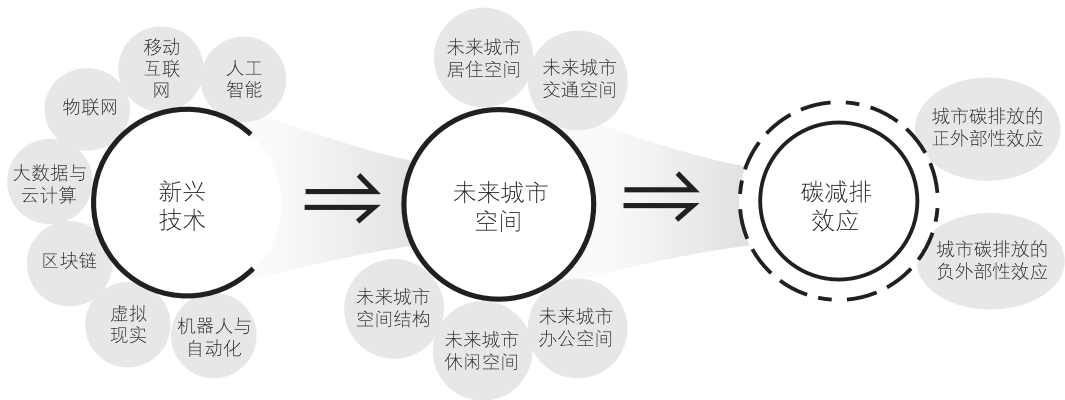


图 1 新兴技术驱动下未来城市空间与碳减排效益的互动关系

既有未来城市相关研究主要关注技术驱动下城市空间中出现的新生活方式和新空间特征(孔宇等, 2022), 既有碳中和相关研究主要集中在城市形态、土地利用模式、管理运营手段等内容(黄贤金等, 2021; 张赫等, 2021), 忽视了技术驱动下新的生活方式和新的城市空间转变为实现“双碳”目标带来的机遇, 也缺乏系统性地梳理新兴技术作用下未来城市空间转型为城市碳减排带来的潜在影响及其正负效应。因此, 本文通过系统性文献综述的方法, 在 Web of Science (WOS) 数据库中对 2000 年后相关主题的 1422 篇文献进行层层筛选, 最终选取了 111 篇文献, 分别在城市整体空间结构和城市四大功能(居住、工作、交通、休闲)五个方面探析科技发展对未来城市碳排放产生的正负外部效应, 并总结了技术驱动下未来城市空间的碳排放影响路径, 为实现“双碳”目标提供新兴技术影响下空间视角的参考依据。

2 研究方法与设计

2.1 系统性文献综述

为全面系统地探究新兴技术驱动下未来城市空间与碳减排效益的耦合关系, 我们采用了系统性文献综述的方法(图2)。学者们普遍认为新兴技术的不断发展对城市空间结构和功能场景具有深刻的影响。新兴技术与城市空间结合有望解决城市长期以来的交通拥堵、环境污染、能源浪费等问题。既有碳中和相关研究多集中在城市空间中各类技术的应用, 但新的生活方式、新的城市空间结构和功能场景也影响着城市的二氧化碳排放。因此, 我们借鉴《雅典宪章》对城市功能的四大分类(居住、工作、交通和休闲)(Gold, 2019), 分别在未来城市空间结构及居住、工作、交通、休闲四大功能空间场景, 分析新兴技术发展对未来城市空间碳排放带来的潜在影响及其正负效应。为保证检索期刊的质量, 数据的准确性、全面性和较高解释度, 选取 WOS 数据库, 系统性地梳理了 2000 年后发表的相关文献。在初步检索阶段, 选取未来城市空间(urban space)与碳排放(carbon emission)作为关键词。为了得到精准全面的检索结果, 我们基于城市功能空间产生的新现象, 在高级检索系统中将多个同义词纳入检索范围, 包括聚集与分散并存的城市内部空间结构, 共享居住, 共享办公和远程办公, 共享出行和自动驾驶, 以及线上活动和线上服务等。初步检索得到 1422 篇相关文献, 通过阅读全文、质量评估等层层筛选, 最终选取了 111 篇文献进行探索分析。由于本文主要关注新的生活方式和新的城市空间所带来的潜在碳减排效益, 因此, 不考虑与电气化、光伏发电等清洁能源技术相关的文章。

1. 选择研究问题: 新兴技术作用下未来城市空间的碳减排效益研究			
2. 选择检索系统: WOS (Web of Science) 数据库			
3. 选择检索主题关键词:	城市整体空间结构	聚集与分散并存的城市内部空间结构	TS=((urban agglomeration) AND (intercity)) OR TS=(urban compactness) AND TS=(carbon emission)
	城市各功能空间	未来城市居住空间	TS=(shared residences) OR TS=(shared homes OR shared housing OR co-living) OR TS=(shared room OR room sharing) AND TS=(carbon emission)
		未来城市工作空间	TS=(innovation cluster) OR TS=(teleworking OR telecommuting OR work from home OR flexible work) OR TS=(co-working) AND TS=(carbon emission)
		未来城市交通空间	TS=(autonomous vehicles OR driverless car OR self-driving car OR robotic car) OR TS=(vehicle-sharing OR shared mobility) AND TS=(carbon emission)
		未来城市休闲空间	TS=(online activity) OR TS=(digital life) OR TS=(online service) AND TS=(carbon emission)
4. 检索限制标准: 发表年份: 2000.01.01~2022.05.01 语言类型: 英语 文献类型: 期刊, 硕博论文, 会议论文, 书籍			
5. 文献筛选与质量评估:	初步筛选的文献: n=1 422		
	浏览过题目和摘要后选取的文献: n=291		
	浏览过全文后选取的文献: n=118 其中: 期刊114篇, 综述4篇		
	详细阅读全文后选取的文献: n=104		
	补充文献: n=7		
6. 最终筛选结果: 文献综述样本量 n=111			

图2 系统性文献检索框架

2.2 文献计量分析

通过对 111 篇筛选出的文献进行计量分析,发现关注新技术发展对城市碳排放影响的文献数量呈增长状态,并在 2018 年左右迅速发展(图 3a)。检索时间截至 2022 年 5 月 1 日,2022 年的相关文献仍在逐步发表中,表明近年来新技术对城市空间的影响以及为“双碳”目标带来的新机遇越来越多地得到了各界学者的关注。

在城市内部空间结构层面上,统计得到 23 篇文献主要关注多年多城市的碳排放数据与城市结构和形态的关系。在城市各个功能空间层面上,关注技术驱动下对未来城市交通空间碳排放影响的文献最多,共 47 篇(图 3b)。其次为对未来城市工作空间碳排放影响的文献,共 25 篇。其中新技术对未来城市交通空间碳排放的影响主要集中在共享出行和自动驾驶等新趋势上,对未来城市工作空间碳排放的影响主要集中在远程办公和共享办公的新现象上。相关文献量较少的是未来城市居住空间中碳排放的影响,其主要涉及共享居住现象,休闲空间主要涉及线上线下活动与服务等。通过对新技术在不同

功能空间中碳排放的具体影响统计分析，可以得到新技术为城市带来碳减排正效应、负效应和不确定性影响的文献比例。结果表明，74%的文献认为新技术会为城市空间带来碳减排正效应，12%的文献认为新技术对城市碳排放的影响存在反弹效应，这在一定程度上削弱了其减碳效益，反而给城市带来碳排放的增量（图 3c）。

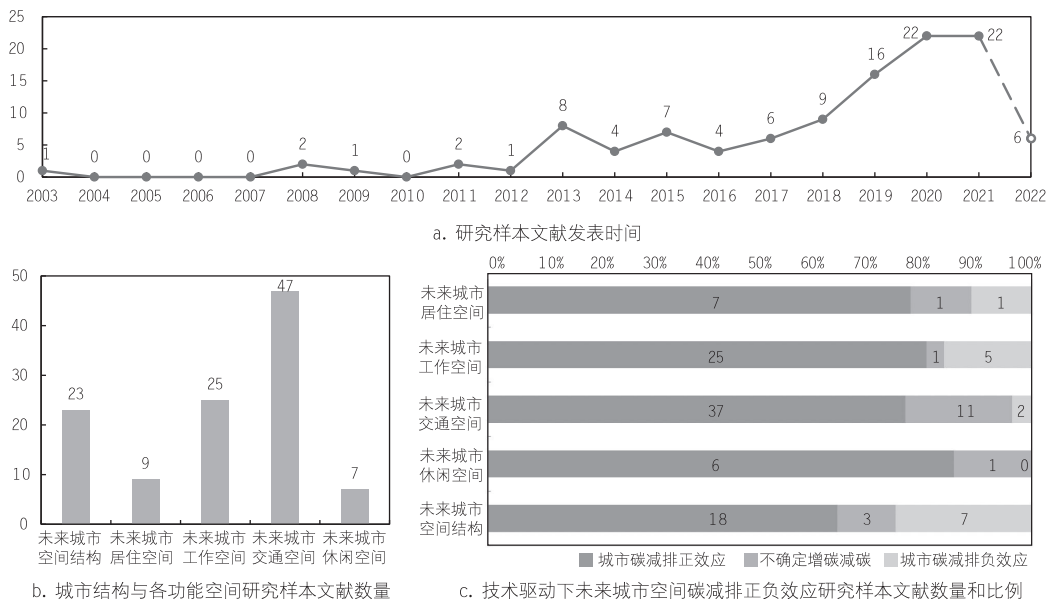


图 3 研究样本文献计量分析

注：同一文献涉及多种空间类型或碳减排双重效应时作重复计数。

3 技术驱动下未来城市空间的碳减排效益

在研究样本文献计量分析结果的基础上，本文从未来城市空间结构和四大功能空间五个方面，进一步探究新技术发展对未来城市空间碳排放带来的潜在影响及其正负外部效应。

3.1 未来城市空间结构的碳减排效益

随着中心城区生活成本的逐渐上升以及城际铁路等交通技术的逐步发展，城市间的通勤时间和通勤成本逐渐下降，未来都市圈的空间组织模式将愈加明显，城市空间结构更加趋向于多中心网络化发展。研究样本文献中主要使用“城市规模”“紧凑度”“复杂度”和“多中心度”等指标衡量城市形态和城市内部结构（图 4）。我们分别探究了这些指标与城市碳排放之间的关系。几乎所有研究都表明，

碳排放量随着城市规模的增加而逐渐增加,以北京为例,城市规模每增加1%,碳排放量就会增加0.32% (Jia et al., 2015)。

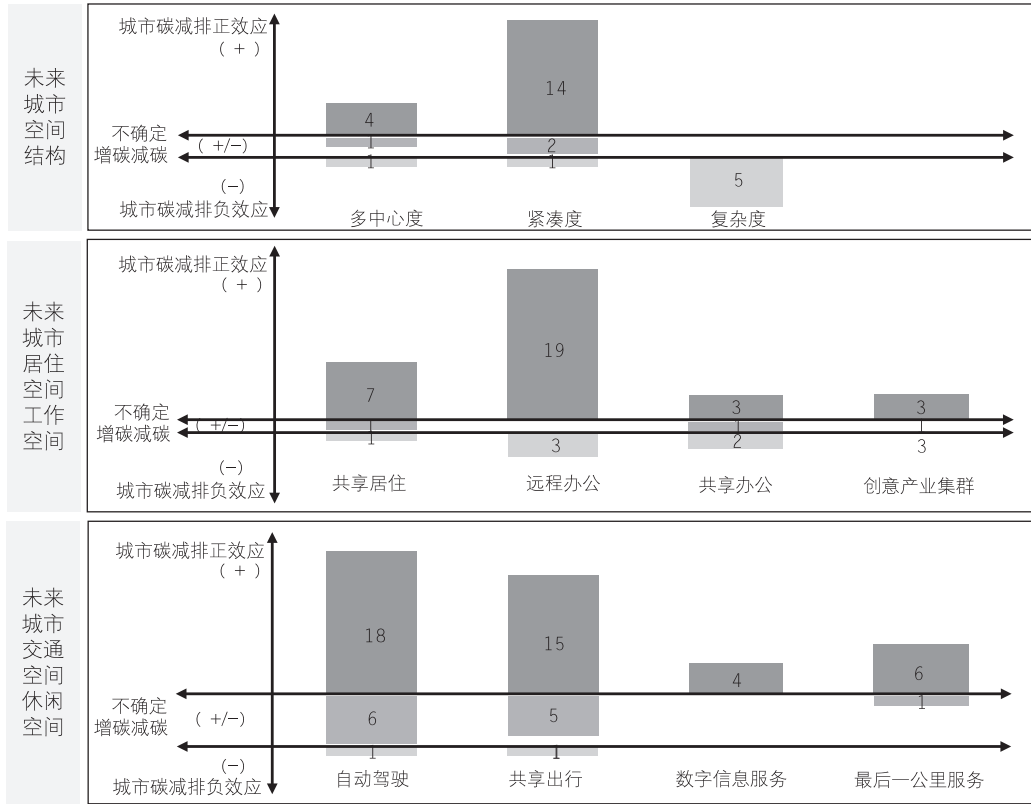


图4 未来城市结构和各功能空间的碳排放正负效应计量分析

较高的紧凑度通常意味着较高的城市人口密度和混合用途开发,多篇文章认为更高的城市紧凑度有助于减少城市碳排放,其主要影响因素包括:①更高的城市紧凑度可以通过改善交通可达性来减少通勤距离,并通过鼓励人们使用步行等非机动交通方式来减少日常通勤产生的碳排放(Liu et al., 2014; Liu et al., 2021);②集中的建筑布局能够减少供暖和制冷产生的能源消耗(Capello and Camagni, 2000; Ye et al., 2015; Schubert, 2013; Wilson, 2013);③紧凑的城市和用地布局可以促进资源的高效利用,防止建设用地的盲目扩张,有利于郊区绿地的保护,从而增加城市的碳汇空间(Shi et al., 2016; Wang, 2019)。然而,有少量研究认为更高的紧凑度会加剧城市热岛效应,这会导致碳排放增加(Zhou et al., 2017; Zhu et al., 2022)。同时,建筑密度增加带来的反弹效应,如土地价格的变化,对商业和住宅选址的影响等,也对城市碳减排产生负面影响(Gaigné, 2012)。

较高的复杂度意味着更多的城市碎片空间或更复杂的城市边界，研究一致认为高复杂度会导致城市碳排放量的增加。较高的城市复杂度降低了基础设施和公共交通的可达性 (Ma et al., 2015)，导致更长的行驶时间和更低的车速，加剧了城市交通拥堵现象和机动车尾气的排放 (Ou et al., 2013)。不规则的空间模式也增加了通勤距离和时间，促进了人们采用机动车通勤的方式 (Bereitschaft and Debbage, 2013)，进而为城市带来碳排放的增量 (Falahatkar and Rezaei, 2020)。然而，城市呈多中心分布有助于实现职住的相对平衡，并通过减少通勤距离带来碳减排效益 (Zhu et al., 2022; Liu et al., 2020)。有研究表明城市中心的数量与碳排放量之间没有显著关系 (Sha et al., 2020)，但当多中心度超过一定限制时，多中心度的升高反而会导致城市碳排放量的增加 (Chen et al., 2021)。

3.2 未来城市居住空间的碳减排效益

互联网时代催生了共享经济模式，以 WeLive、自如等共享住宿、共享起居室为代表的共享居住模式蓬勃发展，主要包括共享房间、共享住宅和共享社区等多种形式。随着交通技术的发展，工作生活边界的愈加模糊，混合功能的多元化发展，未来居住空间将能够同时满足生活、工作、购物等多种需求，并有助于促进职住的相对平衡 (Rehmani et al., 2022)。

大多数研究认为共享居住模式有助于减少城市的碳排放 (图 4)，其主要影响路径包括：①共享居住模式优先关注对既有资源和空间的利用，而非居住空间所有权 (Heinrichs, 2013)，从而提高了资源利用率和空间使用绩效 (Kathan et al., 2016; Zervas et al., 2017)；②共享居住模式提供了居民共同使用家庭能源的空间，人们的行为在他人的监督下更容易得到规正，这有利于提高居民的节能意识 (Javaid et al., 2020; Zhu et al., 2021)；③共享程度的增加和家庭规模的扩大会减少家庭成员的人均能源需求，从而减少人均能源使用量 (Brand et al., 2013; Ivanova and Büchs, 2020)；④职住混合或商住混合的地区可以通过减少机动车出行来促进城市的节能减排 (Zhou and Li, 2016)。

未来共享社区、低碳社区、绿色社区等新社区模式的出现，为社区多能源共享机制的实施提供了机会，有利于提高社区能源的利用效率 (Ceglia et al., 2021; Petersen, 2016)。社区生活圈不再局限于实体空间组织和设施配置，而是形成集线下步行可达和线上服务便捷到家于一体的社区生活圈，促进了居民绿色低碳出行 (Li et al., 2021)。

尽管共享居住模式降低了居住的生活成本，但仍可能带来一系列负面的环境影响 (Juvan et al., 2017)。较低的居住成本使居民倾向于在共享空间中停留更长时间或产生更多出行行为，从而增加出行者的碳足迹，并在一定程度上加剧了城市的绅士化发展 (Czepakiewicz et al., 2018)。同时，由于商家的诱导消费效应，共享居住模式也可能会刺激居民产生额外的消费。此外，共享住宅还会促进居民对周边设施等资源的消耗 (Seidel et al., 2021)。

3.3 未来城市工作空间的碳减排效益

信息通信技术的发展促进了不受时间和空间限制的知识型工作的增长,其主要包括三种新的办公空间和模式,即创意产业集群、共享办公和远程办公(Ruth and Chaudhry, 2008)。新冠疫情导致的居家隔离和社区封锁也进一步推动了远程办公的应用,促使居住空间和咖啡厅、图书馆等城市第三空间成为新的工作空间(Saludin et al., 2020; Giovanis, 2018)。居家办公、路上办公、第三空间办公等多元办公模式向传统办公模式渗透。未来,线上线下混合的办公模式或将长期存在。

多位学者针对远程办公可以通过减少通勤距离和通勤时间来降低城市碳排放达成了共识(Godínez-Zamora et al., 2020; Eregowda et al., 2021; Kitou and Horvath, 2008; Akbari and Hopkins, 2019)(图4),其主要影响路径包括:①远程工作者往往倾向于居家办公,或在离家不远的城市第三空间(如咖啡馆和图书馆)远程办公,从而减少了机动车辆的通勤里程(Kitou and Horvath, 2003),并由于灵活的出行时间间接地缓解了城市交通拥堵,提高了出行效率(Güereca et al., 2013)。同时,随着通勤次数的减少,远程工作者对公共交通的容忍度提升,进一步减少了出行碳排放(Tang et al., 2011; Andrey et al., 2004)。②由于远程工作人员需要承担居家办公产生的家庭能源费用,因此,他们的能源使用行为可以得到改善(Muto et al., 2019)。③远程办公可以降低传统办公空间和停车空间的需求,并降低传统办公空间的能源消耗(Fuhr and Pociask, 2011; O'Keefe et al., 2016; Bhuiyan et al., 2020)。④远程工作者更倾向于迁往房价较低的城市郊区,因此,非远程工作者能够居住在离工作场所更近的地方(Liu and Su, 2021; Kim et al., 2015),间接促进了城市的职住平衡。从长远来看,远程办公也会影响住房和车辆的购置需求(Ohnmacht et al., 2020)。同时,共享办公模式可以通过更新现有的低效城市空间和高效利用建筑空间来促进城市可持续性土地开发(Harris et al., 2021; Lu et al., 2015)。此外,创新产业园区和生态产业园区也通过空间与能源的有效利用降低了运营成本(Maynard et al., 2020; Krozer, 2017),节省了数百万升燃料(Kitou and Horvath, 2006),促进了城市的低碳可持续发展。

然而,一些文献表明,许多反弹效应会抵消新办公模式和办公空间带来的减碳效益(Asgari et al., 2016)。例如,选择居住在离工作场所更远的郊区远程办公者,可能会将通勤节省下来的时间花在其他休闲活动上,从而产生更多的个人出行(Bartolomeo et al., 2003)。部分学者还发现,约20%的远程工作者会产生原本涵盖在工作通勤中的额外购物出行,而非工作出行距离的增加约为远程工作通勤距离减少的25%(Matthews and Williams, 2005)。居家办公也意味着需要更大的住宅空间,增加了家庭照明、供暖、通风、空调和办公设备的能源使用(Baliga et al., 2009; Guignon et al., 2021)。而共享办公和创新产业办公集群也会产生加剧城市蔓延、破坏土地利用的负面效应(Bagheri and Tousi, 2018)。

3.4 未来城市交通空间的碳减排效益

交通是城市产生碳排放的重点领域,占全球能源相关碳排放量的25%左右,占中国的10%左右(International Energy Agency, 2021)。新兴技术影响下,数字化信息服务(如MaaS系统、电子地图

导航等)正在重塑着居民的出行方式和城市交通空间。共享交通、公共交通、私家车出行、慢行出行等多种出行方式并存,未来共享出行和无人驾驶将成为新的出行选择。

部分学者认为,共享出行与无人驾驶等新的出行方式有助于实现城市的减碳目标(图4),其主要影响因素包括:①经济驾驶(*eco-driving*),即安全平稳的驾驶过程,可以减少车辆行驶产生的能源消耗。具体而言,数字信息服务和智能交通系统通过信息交互,为驾驶过程中的加速和减速行为提供动态指导,避免拥堵和事故路段,从而减少驾驶过程中的能耗(Wu et al., 2011; Meneguette et al., 2016)。绿波系统(Suzuki and Marumo, 2018)和自动路口(ACUTA)(Li et al., 2015)等基础设施的数字化也有助于驾驶员使用最佳行驶速度,绿灯时通过交叉口从而减少停车次数。另外,自动驾驶技术可以通过自适应巡航直接实现经济驾驶(Zhang et al., 2015)。②自动驾驶的可交互性提高了行驶的安全性,因此可以保持更小的行车间距,从而增加道路容量,减少交通拥堵,促进城市交通空间的低碳集约发展(Brown et al., 2014)。③共享出行与自动驾驶的结合将在满足居民出行需求的同时减少出行时间和所需车辆数量(Claudel and Ratti, 2015),从根本上减少城市的碳排放量(Wadud et al., 2016; Stern et al., 2019)。除了因共享出行而减少的行驶里程外,自动驾驶车辆还可以减少传统寻找停车地点所产生的里程,从而在一定程度上有助于实现交通的可持续发展(Fournier et al., 2017)。

部分研究也认为,无人驾驶和共享出行在一定程度上增加了城市碳排放,主要原因如下:①自动驾驶带来的效率提高可能会被出行量的增加所抵消,因为其提高了老年人、儿童、残疾人等出行不便人群的出行便利性(Fox-Penner et al., 2018);②基于较慢速度和较慢加速的经济驾驶策略也可能增加区域层面的交通拥堵,在较慢的巡航车速结束后,加速幅度更大,从而导致实际能耗增加(Rafael et al., 2020);③共享机动车辆(汽车、摩托车等)的环境不友好因素则在于其无乘客时的空载行驶里程(Sun and Ertz, 2021; Suatmadi et al., 2019)。从全生命周期的角度来看,共享滑板、单车等非机动车交通工具具有较短的使用寿命和较高的日常维护成本,因此给城市环境带来负面影响(De Bortoli and Christoforou, 2020)。

但研究普遍认为,新交通技术对能源的净影响并不确定,因此,大多数研究探讨了不同自动驾驶渗透率下的不同场景。较低的渗透率将导致自动驾驶车辆与传统车辆混行,削减了自动驾驶的优势,如减少拥堵和经济驾驶模式等。然而,也有研究表明,自动驾驶普及率达到100%时,碳排放量反而会增加(Conlon and Lin, 2019)。同样,不同的地理环境(如城市道路、农村道路和高速公路)也会产生不同的影响(Bandeira et al., 2021)。

3.5 未来城市休闲空间的碳减排效益

休闲活动数字化是未来城市休闲空间的主要发展趋势,通过提供基于位置的便利生活服务,围绕社区配备个性化物流配送仓库,实现以购物行为为代表的线上线下一体化(OMO)服务模式。现有研究更多地讨论了OMO模式和无人配送的方式(图4)。OMO模式将部分在线配送需求转移为消费者

在附近线下商店获取商品的方式从而减少物流量，在一定程度上缓解了交通拥堵，并为城市带来了碳减排效益（Niu et al., 2019）。同时，如果最后一公里配送方式自动化发展，如采用自动驾驶车辆、无人机或机器人等方式，将进一步节省人力成本并为城市环境带来积极影响（Figliozzi, 2020; Peng et al., 2020; Li et al., 2021）。

然而，一些研究认为，从整个送货周期的角度分析，无人机的前端阶段即物流中心机动车辆运载无人机和货物的阶段具有更高的碳排放量，因此，电动三轮车等传统送货方式的减碳效益反而高于无人机（Figliozzi, 2017）。为了解决这个问题，有研究表明无人机的前端运输阶段可以使用现有的公共交通工具，从而在一定程度上减少前端阶段产生的碳排放（Khalid and Chankov, 2020）。而对于其他线上休闲活动，如云旅游和在线娱乐等，理论上也可以减少线下出行产生的碳排放，但其节省的出行时间和出行里程难以量化，探讨相关内容的文献较少。

4 技术驱动下未来城市空间的碳排放影响路径

本文选取的 111 篇研究样本文献中，74% 的文献认为新兴技术影响下产生的城市空间新现象将有助于减少城市的碳排放量，这可以归纳为以下影响路径（图 5、图 6）：①共享化使用提高空间和资源

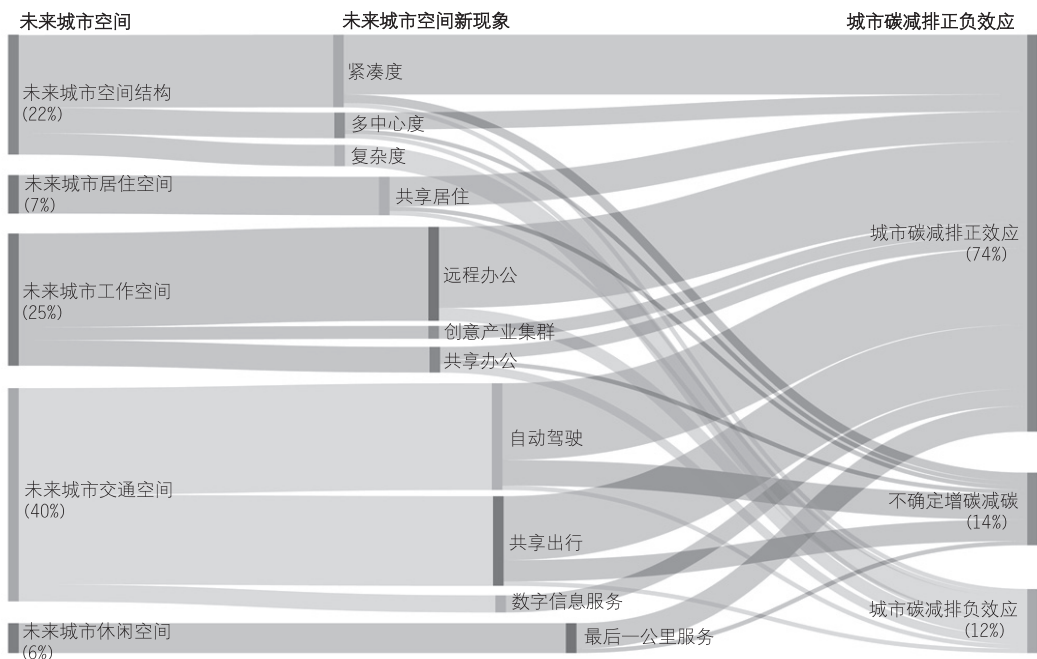


图 5 新兴技术对未来城市空间碳排放的影响

的利用率；共享居住、办公和出行模式等，在时空维度上将传统的私有资源精准匹配给需求方，使原本固定单一的资源具有灵活性和可部署性，提高了资源的利用率，从而有助于实现城市的“双碳”目标。②线上化服务减少出行产生的碳排放：在线购物、医疗和远程办公等新的生活方式减少了居民前往线下实体场所的需求，从而减少了交通部门产生的城市碳排放。③复合化功能和用地减少出行产生的碳排放：高度紧凑的城市结构和小型化设施的复合功能都在较小的出行范围内满足居民的各种需求，因此鼓励非机动出行方式，有助于城市绿色低碳交通模式的发展。④智能化管理降低设施使用产生的碳排放：自动驾驶等技术从专业角度降低交通碳排放量，而物联网技术能够实时监测调节基础设施使用产生的能耗，并提高人们的减排意识。

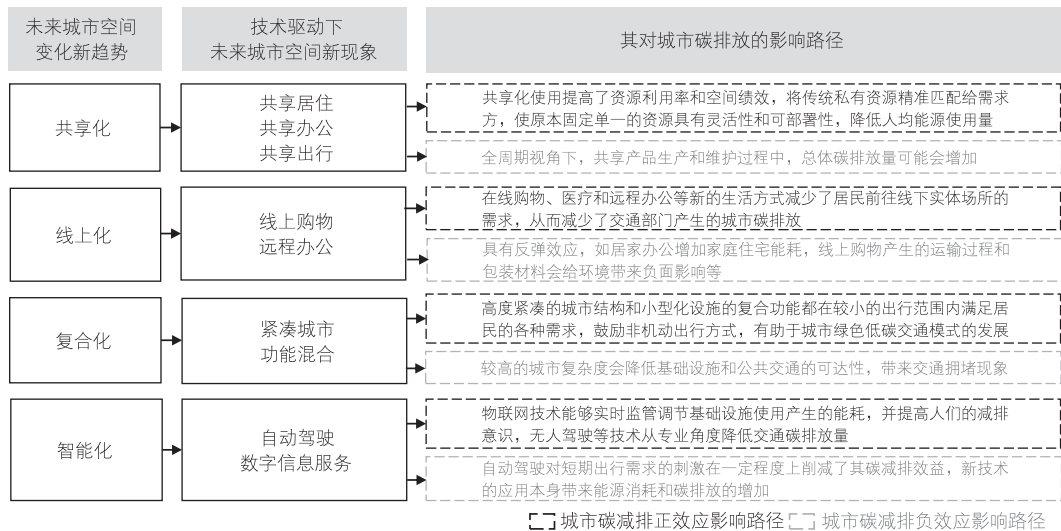


图6 技术驱动下未来城市空间的碳排放影响路径

14%的文献没有明确指出为城市带来的增碳或减碳效益，其余12%的文献表明，技术驱动下部分未来城市空间的新现象将在一定程度上给城市碳减排目标带来反弹效应，这会削减其带来的减碳效益。其影响路径包括：①当新兴技术包含补偿机制时，总体碳排放量可能会增加。如居家办公会增加家庭住宅能耗；线上购物产生的运输过程和包装材料会给环境带来负面影响；自动驾驶对短期出行需求的刺激也在一定程度上减少了其产生的减碳效益。②全周期视角下，总体碳排放量可能会增加。研究多聚焦于某一时间段的某一对象，但其碳排放量需要在全生命周期角度来衡量，如共享单车被广泛认为是低碳的出行方式，但当考虑到生产和维护过程时，其减碳效益会大大削减，总体碳排放量可能会增加。③新技术的应用本身带来的碳排放增加。如与传统基础设施相比，运行数字化基础设施会产生额外能耗，从而给城市碳减排目标带来了负面影响。

5 结语

在数字化转型时代,信息通信技术的蓬勃发展、碳中和的发展愿景和数字中国的建设要求,共同推动了居民生活方式的改变和城市空间的转型。本文选取 WOS 数据库,筛选过去 20 年来与技术驱动下未来城市空间碳排放相关的文献,最终选取 111 篇文献,分别在未来城市空间结构和未来城市居住、工作、交通、休闲四大功能空间进行分析总结。研究发现,74%的文献认为新技术、新生活方式与城市空间的新转变趋势可以促进未来城市碳排放的减少。其中,线上线下相结合的混合办公模式与共享出行等新型交通方式共同为未来城市空间带来更多的减碳效益。然而,新兴技术对城市碳排放的影响存在反弹效应,这会削减其带来的减碳效益,需要进行综合考虑。本文最后总结了技术驱动下未来城市空间的碳排放影响路径,为我国实现碳中和愿景提供了新的思路和机遇。

同时,在新兴技术快速发展的时代洪流下,需要有更多的学者从探索传统实体空间的特征转变为准确捕捉居民时空行为变化,并通过自下而上的需求转变,推动未来城市结构和功能的系统变革,剖析这些转型对城市低碳发展的影响。然而,由于我国对技术驱动下未来城市空间与碳排放之间关系的研究尚处于起步阶段,中国知网上符合搜索标准的文献较少,因此本研究未选择中国知网数据库。近年来,越来越多的国内学者开始关注未来城市空间的发展趋势及其为实现碳中和目标带来的机遇。未来开展进一步研究时,可纳入中国视角,加入多空间尺度、多源数据、全生命周期角度的思考,从而更准确地判断未来城市空间碳排放的变化,引导相关空间政策的有序完善。

致谢

本研究得到“WeCityX 科技规划研究”(20212001232)以及清华大学—丰田联合研究基金专项“未来社会广义人居环境研究:场所营造及评估关键技术研发、决策优化与场景应用”(20213930029)的资助。

参考文献

- [1] AKBARI M, HOPKINS J L. An investigation into anywhere working as a system for accelerating the transition of Ho Chi Minh city into a more livable city[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 665-679.
- [2] ALIAS N A. ICT development for social and rural connectedness[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] ANDREY J C, BURNS K R, DOHERTY S T. Toward sustainable transportation: exploring transportation decision making in teleworking households in a mid-sized Canadian city[J]. Canadian Journal of Urban Research, 2004, 13(2): 257-277.
- [4] ASGARI H, JIN X, DU Y. Examination of the impacts of telecommuting on the time use of nonmandatory activities[J]. Transportation Research Record, 2016, 2566(1): 83-92.
- [5] BAGHERI B, TOUSI S N. An explanation of urban sprawl phenomenon in Shiraz Metropolitan Area (SMA)[J]. Cities, 2018, 73: 71-90.
- [6] BALIGA J, HINTON K, AYRE R, et al. Carbon footprint of the internet[J]. Telecommunications Journal of

- Australia, 2009, 59(1): 1-14.
- [7] BANDEIRA J M, MACEDO E, FERNANDES P, et al. Potential pollutant emission effects of connected and automated vehicles in a mixed traffic flow context for different road types[J]. *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2021, 2: 364-383.
- [8] BARTOLOMEO D M, DAL MASO D, DE JONG D P, et al. Eco-efficient producer services—what are they, how do they benefit customers and the environment and how likely are they to develop and be extensively utilised?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2003, 11(8): 829-837.
- [9] BATTY M. *Inventing future cities* [M]. MIT Press, 2018.
- [10] BEREITSCHAFT B, DEBBAGE K. Urban form, air pollution, and CO₂ emissions in large US metropolitan areas[J]. *The Professional Geographer*, 2013, 65(4): 612-635.
- [11] BHUIYAN M A A, RIFAAT S M, TAY R, et al. Influence of community design and sociodemographic characteristics on teleworking[J]. *Sustainability*, 2020, 12(14): 5781.
- [12] BRAND C, GOODMAN A, RUTTER H, et al. Associations of individual, household and environmental characteristics with carbon dioxide emissions from motorised passenger travel[J]. *Applied Energy*, 2013, 104(100): 158-169.
- [13] BROWN A, GONDER J, REPAC B. *An analysis of possible energy impacts of automated vehicles*[M]. Springer, Cham, 2014: 137-153.
- [14] CAPELLO R, CAMAGNI R. Beyond optimal city size: an evaluation of alternative urban growth patterns[J]. *Urban Studies*, 2000, 37(9): 1479-1496.
- [15] CEGLIA F, MARRASSO E, ROSELLI C, et al. Small renewable energy community: the role of energy and environmental indicators for power grid[J]. *Sustainability*, 2021, 13: 2137.
- [16] CHEN X, ZHANG S, RUAN S. Polycentric structure and carbon dioxide emissions: empirical analysis from provincial data in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123411.
- [17] CLAUDEL M, RATTI C. Full speed ahead: how the driverless car could transform cities[M]. McKinsey & Company, August, 2015: 14.
- [18] CONLON J, LIN J. Greenhouse gas emission impact of autonomous vehicle introduction in an urban network[J]. *Transportation Research Record*, 2019, 2673(5): 142-152.
- [19] CZEPKIEWICZ M, HEINONEN J, OTTELIN J. Why do urbanites travel more than do others? A review of associations between urban form and long-distance leisure travel[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13: 073001.
- [20] DE BORTOLI A, CHRISTOFOROU Z. Consequential LCA for territorial and multimodal transportation policies: method and application to the free-floating e-scooter disruption in Paris[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273: 122898.
- [21] EREGOWDA T, CHATTERJEE P, PAWAR D S. Impact of lockdown associated with COVID-19 on air quality and emissions from transportation sector: case study in selected Indian metropolitan cities[J]. *Environment Systems and Decisions*, 2021, 41: 401-412.
- [22] FALAHATKAR S, REZAEI F. Towards low carbon cities: spatio-temporal dynamics of urban form and carbon

- dioxide emissions[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2020, 18: 100317.
- [23] FIGLIOZZI M A. Carbon emissions reductions in last mile and grocery deliveries utilizing air and ground autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 85: 102443.
- [24] FIGLIOZZI M A. Lifecycle modeling and assessment of unmanned aerial vehicles (Drones) CO₂ emissions[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 57: 251-261.
- [25] FOURNIER G, PFEIFFER C, BAUMANN M, et al. Individual mobility by shared autonomous electric vehicle fleets: Cost and CO₂ comparison with internal combustion engine vehicles in Berlin, Germany [C]//2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). IEEE, 2017: 368-376.
- [26] FOX-PENNER P, GORMAN W, HATCH J. Long-term US transportation electricity use considering the effect of autonomous-vehicles: estimates & policy observations[J]. *Energy Policy*, 2018, 122: 203-213.
- [27] FUHR J P, POCIASK S. Broadband and telecommuting: helping the US environment and the economy[J]. *Low Carbon Economy*, 2011, 2: 41.
- [28] GAIGNÉ C, RIOU S, THISSE J F. Are compact cities environmentally friendly?[J]. *Journal of Urban Economics*, 2012, 72(2-3): 123-136.
- [29] GIOVANIS E. The relationship between teleworking, traffic and air pollution[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9(1): 1-14.
- [30] GODÍNEZ-ZAMORA G, VICTOR-GALLARDO L, ANGULO-PANIAGUA J, et al. Decarbonising the transport and energy sectors: technical feasibility and socioeconomic impacts in Costa Rica[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2020, 32: 100573.
- [31] GOLD J R. Athens Charter (CIAM), 1933[J]. In: ORUM, A M (Ed.), *The Wiley Blackwell Encyclopedia of Urban and Regional Studies*. Wiley-Blackwell, Chichester, 2019: 1-3.
- [32] GÜERECA L P, TORRES N, NOYOLA A. Carbon footprint as a basis for a cleaner research institute in Mexico[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 47: 396-403.
- [33] GUIGNON V, BRETON C, MARIETTE J, et al. Ten simple rules for switching from face-to-face to remote conference: an opportunity to estimate the reduction in GHG emissions[J]. *PLOS Computational Biology*, 2021, 17: e1009321.
- [34] HARRIS S, MATA É, PLEPYS A, et al. Sharing is daring, but is it sustainable? An assessment of sharing cars, electric tools and offices in Sweden[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 170: 105583.
- [35] HEINRICHS H. Sharing economy: a potential new pathway to sustainability [J]. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society*, 2013, 22(4): 228-231.
- [36] HOORNWEG D, SUGAR L, TREJOS GÓMEZ C L. Cities and greenhouse gas emissions: moving forward[J]. *Environment and Urbanization*, 2011, 23(1): 207-227.
- [37] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Greenhouse gas emissions from energy[DB/MT]. (2021-09)[2022-05] <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-products>.
- [38] IVANOVA D, BÜCHS M. Household sharing for carbon and energy reductions: the case of EU countries[J]. *Energies*, 2020, 13: 1909.
- [39] JAVAID A, CREUTZIG F, BAMBERG S. Determinants of low-carbon transport mode adoption: systematic review

- of reviews[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15: 103002.
- [40] JIA J, WU Y, GU Z. Does the urban morphology have an influence on the carbon emission (CE) of energy consumption (EC)? —A case study in Beijing city[J]. *Advances in Energy Science and Equipment Engineering*, ICEESE, 2015.
- [41] JUVAN E, HAJIBABA H, DOLNICAR S. Environmental sustainability[J]. In: DOLNICAR, S (Ed.), Oxford: Goodfellow Publishers, 2017.
- [42] KATHAN W, MATZLER K, VEIDER V. The sharing economy: your business model's friend or foe?[J]. *Business Horizons*, 2016, 59(6): 663-672.
- [43] KHALID R, CHANKOV S M. Drone delivery using public transport: an agent-based modelling and simulation approach[C]//International Conference on Dynamics in Logistics. Springer, Cham, 2020: 374-383.
- [44] KIM S-N, CHOO S, MOKHTARIAN P L. Home-based telecommuting and intra-household interactions in work and non-work travel: a seemingly unrelated censored regression approach[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 80: 197-214.
- [45] KITOU E, HORVATH A. Energy-related emissions from telework[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(16): 3467-3475.
- [46] KITOU E, HORVATH A. External air pollution costs of telework[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2008, 13(2): 155-165.
- [47] KITOU E, HORVATH A. Transportation choices and air pollution effects of telework[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2006, 12(2): 121-134.
- [48] KROZER Y. Innovative offices for smarter cities, including energy use and energy-related carbon dioxide emissions[J]. *Energy, Sustainability and Society*, 2017, 7(1): 1-13.
- [49] LI L, HE X, KEOLEIAN G A, et al. Life cycle greenhouse gas emissions for last-mile parcel delivery by automated vehicles and robots[J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 55(16).
- [50] LI L, ZHANG S, CAO X, et al. Assessing economic and environmental performance of multi-energy sharing communities considering different carbon emission responsibilities under carbon tax policy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 328: 129466.
- [51] LI Z, CHITTURI M V, YU L, et al. Sustainability effects of next-generation intersection control for autonomous vehicles[J]. *Transport*, 2015, 30(3): 342-352.
- [52] LIU D, DENG Z, ZHANG W, et al. Design of sustainable urban electronic grocery distribution network[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, 60(1): 145-157.
- [53] LIU K, XUE M, PENG M, et al. Impact of spatial structure of urban agglomeration on carbon emissions: an analysis of the Shandong Peninsula, China[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2020, 161: 120313.
- [54] LIU S, SU Y. The impact of the COVID-19 pandemic on the demand for density: evidence from the US housing market[J]. *Economics Letters*, 2021, 207: 110010.
- [55] LIU Y, SONG Y, SONG X. An empirical study on the relationship between urban compactness and CO₂ efficiency in China[J]. *Habitat International*, 2014, 41: 92-98.

- [56] LU Y, CHEN B, FENG K, et al. Ecological network analysis for carbon metabolism of eco-industrial parks: a case study of a typical eco-industrial park in Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49: 7254-7264.
- [57] MA J, LIU Z, CHAI Y. The impact of urban form on CO₂ emission from work and non-work trips: the case of Beijing, China[J]. *Habitat International*, 2015, 47: 1-10.
- [58] MATTHEWS H S, WILLIAMS E. Telework adoption and energy use in building and transport sectors in the United States and Japan[J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2005, 11: 21-30.
- [59] MAYNARD N J, RAJ KANAGARAJ SUBRAMANIAN V, HUA C-Y, et al. Industrial symbiosis in Taiwan: case study on Linhai Industrial Park[J]. *Sustainability*, 2020, 12: 4564.
- [60] MENEGUETTE R I, FILHO G, GUIDONI D L, et al. Increasing intelligence in inter-vehicle communications to reduce traffic congestions: experiments in urban and highway environments[J]. *Plos One*, 2016, 11(8): e0159110.
- [61] MUMFORD L. The city in history: its origins, its transformations, and its prospects[J]. Houghton Mifflin Harcourt, 1961, 26(5): 791-791.
- [62] MUTO D, YOKOO N, FUJIWARA K. Reduction of environmental load by telecommuting in Oku-Nikko[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 294: 012008.
- [63] NIU B, MU Z, LI B. O2O results in traffic congestion reduction and sustainability improvement: analysis of "Online-to-Store" channel and uniform pricing strategy[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 122(Feb.): 481-505.
- [64] OHNMACHT T, Z'ROTZ J, DANG L. Relationships between coworking spaces and CO₂ emissions in work-related commuting: first empirical insights for the case of Switzerland with regard to urban-rural differences[J]. *Environmental Research Communications*, 2020, 2: 125004.
- [65] O'KEEFE P, CAULFIELD B, BRAZIL W, et al. The impacts of telecommuting in Dublin[J]. *Research in Transportation Economics*, 2016, 57: 13-20.
- [66] ORUM A M. The wiley-blackwell encyclopedia of urban and regional studies[M]. John Wiley & Sons, 2019.
- [67] OU J, LIU X, LI X, et al. Quantifying the relationship between urban forms and carbon emissions using panel data analysis[J]. *Landscape Ecology*, 2013, 28(10): 1889-1907.
- [68] PENG X, SUN D, MENG Z. The vehicle routing problem with drone for the minimum CO₂ emissions[C]//International Conference on Management Science and Engineering Management. Springer, Cham, 2020: 24-34.
- [69] PETERSEN J-P. Energy concepts for self-supplying communities based on local and renewable energy sources: a case study from northern Germany[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2016, 26: 1-8.
- [70] RAFAEL S, CORREIA L P, LOPES D, et al. Autonomous vehicles opportunities for cities air quality[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 136546.
- [71] REHMANI M, ARSHAD M, KHOKHAR M N, et al. COVID-19 repercussions: office and residential emissions in Pakistan[J]. *Frontiers in Psychology*, 2022: 12.
- [72] RUTH S, CHAUDHRY I. Telework: a productivity paradox?[J]. *IEEE Internet Computing*, 2008, 12(6): 87-90.

- [73] SALUDIN N A, KARIA N, HASSAN H. Working from home (WFH): is malaysia ready for digital society[J]. *Entrepreneurship Vision*, 2020: 981-989.
- [74] SCHUBERT J, WOLBRING T, GILL B. Settlement structures and carbon emissions in Germany: the effects of social and physical concentration on carbon emissions in rural and urban residential areas[J]. *Environmental Policy and Governance*, 2013, 23(1): 13-29.
- [75] SEIDEL A, MAY N, GUENTHER E, et al. Scenario-based analysis of the carbon mitigation potential of 6G-enabled 3D videoconferencing in 2030[J]. *Telematics and Informatics*, 2021, 64: 101686.
- [76] SHA W, CHEN Y, WU J, et al. Will polycentric cities cause more CO₂ emissions? A case study of 232 Chinese cities[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, 96: 33-43.
- [77] SHI L, YANG S, GAO L. Effects of a compact city on urban resources and environment[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2016, 142(4): 05016002.
- [78] STERN R E, CHEN Y, CHURCHILL M, et al. Quantifying air quality benefits resulting from few autonomous vehicles stabilizing traffic[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 67: 351-365.
- [79] SUATMADI A Y, CREUTZIG F, OTTO I M. On-demand motorcycle taxis improve mobility, not sustainability[J]. *Case Studies on Transport Policy*, 2019, 7(2): 218-229.
- [80] SUN S, ERTZ M. Environmental impact of mutualized mobility: evidence from a life cycle perspective[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 772: 145014.
- [81] SUZUKI H, MARUMO Y. A new approach to green light optimal speed advisory (GLOSA) systems for high-density traffic flow[C]// 2018 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, 2018.
- [82] TANG W, MOKHTARIAN P L, HANDY S L. The impact of the residential built environment on work at home adoption and frequency: an example from Northern California[J]. *Journal of Transport and Land Use*, 2011, 4: 3-22.
- [83] WADUD Z, MACKENZIE D, LEIBY P. Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2016, 86: 1-18.
- [84] WANG S, WANG J, FANG C, et al. Estimating the impacts of urban form on CO₂ emission efficiency in the Pearl River Delta, China[J]. *Cities*, 2019, 85(Feb.): 117-129.
- [85] WILSON B. Urban form and residential electricity consumption: evidence from Illinois, USA[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 115: 62-71.
- [86] WU C, ZHAO G, OU B. A fuel economy optimization system with applications in vehicles with human drivers and autonomous vehicles[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2011, 16(7): 515-524.
- [87] YE H, HE X Y, SONG Y, et al. A sustainable urban form: the challenges of compactness from the viewpoint of energy consumption and carbon emission[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 93: 90-98.
- [88] ZERVAS G, PROSERPIO D, BYERS J W. The rise of the sharing economy: estimating the impact of Airbnb on the hotel industry[J]. *Journal of Marketing Research*, 2017, 54: 687-705.
- [89] ZHANG W, GUHATHAKURTA S, FANG J, et al. The performance and benefits of a shared autonomous vehicles

- based dynamic ridesharing system: an agent-based simulation approach[C]//Transportation Research Boarding Meeting, 2015.
- [90] ZHOU B, RYBSKI D, KROPP J P. The role of city size and urban form in the surface urban heat island[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-9.
- [91] ZHOU W, LI Z. Determining sustainable land use by modal split shift strategy for low emissions: evidence from medium-sized cities of China[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016: 2745092.
- [92] ZHU J, ALAM M M, DING Z, et al. The influence of group-level factors on individual energy-saving behaviors in a shared space: the case of shared residences[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 311: 127560.
- [93] ZHU K, TU M, LI Y. Did polycentric and compact structure reduce carbon emissions? A spatial panel data analysis of 286 Chinese cities from 2002 to 2019[J]. Land, 2022, 11(2): 185.
- [94] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J]. 自然资源学报, 2021, 36(12): 2995-3006.
- [95] 孔宇, 甄峰, 张姗姗. 智能技术对城市居民活动影响的研究进展与展望[J]. 地理科学, 2022, 42(3): 413-425.
- [96] 李鹏. 互联网发展影响实体城市研究评述与展望——来自城市规划视角[J]. 城市发展研究, 2021, 28(12): 55-61.
- [97] 张恩嘉, 龙瀛. 面向未来的数据增强设计: 信息通信技术影响下的设计应对[J]. 上海城市规划, 2022(3): 1-7.
- [98] 张赫, 王睿, 于丁一. 基于差异化控碳思路的县级国土空间低碳规划方法探索[J]. 城市规划学刊, 2021(5): 58-65.
- [99] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.

[欢迎引用]

- 李文竹, 梁佳宁. 新兴技术作用下未来城市空间的碳减排效益研究综述[J]. 城市与区域规划研究, 2023, 15(1): 111-128.
- LI W Z, LIANG J N. Research review on benefits of carbon emission reduction in future urban space under the impact of emerging technologies[J]. Journal of Urban and Regional Planning, 2023, 15(1): 111-128.