

利用约束性CA重建历史时期耕地空间格局 ——以江苏省为例

龙 瀛^{1,2}, 金晓斌^{1,3}, 李苗裔⁴, 杨绪红³, 曹 雪³, 周寅康^{1,3}

(1. 南京大学自然资源研究中心, 南京 210023; 2. 北京市城市规划设计研究院, 北京 100045; 3. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093; 4. 金泽大学环境设计学院, 金泽 920-1192, 日本)

摘要: 历史时期耕地空间格局重建是土地利用/土地覆被变化研究(LUCC)的重要组成部分, 受到了国内外学术界的广泛关注。已有研究多采用基于总量进行空间分配的方法。考虑到耕地连续性分布及相关空间约束特点, 基于约束性元胞自动机提出重建历史时期空间格局的方法, 给出了模型建立、参数识别和结果验证的方法, 结合数据可获得性, 以江苏省为例进行了模型应用。通过与空间分配方法进行对比, 结果表明该方法能较为客观地反映历史时期耕地空间格局的演变过程, 可为历史耕地研究提供新的方法借鉴。

关键词: 历史耕地空间格局; 重建; 约束性CA; HARM模型; 江苏省

DOI: 10.11821/dljy201412003

1 引言

20世纪90年代中期所发起的LUCC研究中强调: 必须利用各种手段重建(reconstruct)过去土地利用变化的详细历史^[1]。由此开启了历史时期土地覆被变化研究的热潮, 对历史土地覆被尤其是耕地的高精度空间数据重建受到学者的广泛关注^[2-5]。历史时期土地利用, 特别是耕地数据的重建, 可分为数量重建和空间格局重建两类。前者指获得历史土地利用各类型相关面积的数量统计信息, 即历史耕地数据的修订^[2], 数量重建重点反映历史时期土地利用的总体趋势和区域差异, 是空间重建的重要基础; 后者指历史土地利用总量在空间中分布状态的还原, 是根据一定的空间分配原则, 结合总量数据模拟土地利用的空间分布^[2]。目前数量重建的研究已相对成熟, 而历史耕地空间格局重建还有待深入研究。

国外土地利用(特别是耕地)的空间格局重建研究中, 以Ramankutty等^[3]和Goldewijk等^[4,5]分别建立的网格化全球历史土地覆被数据集SAGE和HYDE最为著名, 前者基于全球土地利用的现代格局, 在 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的空间分辨率上重建了过去300年的全球耕地分布, 而后的最新版本则以更细致的算法, 在更高的空间分辨率($5' \times 5'$)和更长的时间跨度上(过去12000年)模拟了全球耕地和牧草地的历史变迁。在此基础上诸多学者使用或者改良其方法进行了更深入的空间重建研究, 其中全球尺度研究如Pongratz等^[6]以1700年为基准重建了公元800-1700年全球耕地和牧草地分布, 区域尺度研究中如Kaplan

收稿日期: 2014-05-21; 修订日期: 2014-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41340016); 国家重点基础研究计划(973)项目(2011CB952001)

作者简介: 龙瀛(1980-), 男, 吉林四平人, 博士, 高级工程师, 主要从事城市规划、城市模型和规划支持系统研究。E-mail: longying1980@gmail.com

通讯作者: 金晓斌(1974-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 副教授, 主要从事土地资源管理研究。E-mail: jinxb@nju.edu.cn
2239-2250 页

等^[7]重建了欧洲地区公元前1000年以来的森林覆盖。国内土地利用（特别是耕地）空间格局重建研究中，Liu等^[8]的1820年中国传统农区垦殖强度数据集是国内少有的覆盖全国范围的研究。受数据限制，国内研究多以区域为研究对象，如白淑英等^[9]重建了大庆市杜尔伯特蒙古族自治县的土地利用格局，林珊珊等^[10]重建了六个历史时间断面内地传统农区的耕地空间格局分布，叶瑜等^[11]重建了过去300年东北各县域耕地数量，何凡能等^[12]重建了北宋中期耕地空间分布格局，李柯等^[13]重建了1671年和1827年云南省耕地数据集，李士成等^[14]重构了西南地区耕地分布的空间格局。总体而言，已有的历史时期耕地重建成果均深入挖掘了可用的耕地资料，尤其是在针对中国的研究中，充分利用了历史资料丰富的优势^[10]。在研究方法上，大多遵循从数量重建到空间格局重建，即首先基于环境背景和历史社会经济等数据重建历史时期土地利用总体数量，而后基于现代土地利用格局和空间格局的影响因子建立相应算法进行空间配置^[2]，其核心是基于耕地适宜性的自上而下（top-down）的空间分配（allocation）。空间分配方法主要有三种类型：一是以现代土地利用为全部影响因子进行简单分配的完全依赖法；二是以现代农业格局为空间分配的边界条件并结合人口、地形等影响因子（用于评价耕地适宜性）进行分配的部分依赖法；三是在部分依赖法的基础上增加一个动态变化的权重，即现代农业格局的权重随时间回溯而逐渐减小，而影响因子的权重随时间回溯而逐渐增加，用以反映影响因子对历史空间格局产生影响的时间效应^[2]。

在耕地空间格局重建过程中，除要考虑耕地适宜性外，还需考虑耕地连续性分布原则，即周边是耕地的地方更有可能是耕地。这点与元胞自动机（cellular automata, CA）的建模思路基本一致。CA作为一种自下而上（bottom-up）的建模工具，可以较好地用于模拟复杂系统的时空动态过程。CA的基本概念是一个元胞下一时间的状态受自身状态和其周边元胞（即邻域，neighbor）状态的影响；而约束性CA在考虑邻域影响的简单CA基础上又增加了其他约束条件，使其可模拟更为真实的空间动态过程，该方法已经在城市增长模拟中有了广泛应用^[15-25]。拟在约束性CA和历史耕地空间格局重建的已有研究基础上，综合考虑耕地连片开发原则和相关影响因子，基于约束性CA进行历史耕地空间格局重建，并以江苏省为例进行模型应用和结果验证，以期对历史耕地分布研究提供一种新的视角和思路。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

江苏省位于中国大陆东部沿海、长江下游的江淮平原，建制由清康熙六年（1667年）分江南省为江苏（含上海）、安徽二省伊始，其辖区包括江宁府（今南京）、苏州府、徐州府、常州府、镇江府、松江府（今上海）、通州府、扬州府、淮安府，辖境大致为今江苏省大部（除盱眙县、泗洪县大部），上海市全部，安徽省砀山县、萧县，浙江省嵊泗县以及岱山县小部。考虑与已有数据和研究成果的衔接，以现代江苏省为个案研究区域（图1）。研究区介于116°18′~121°57′E、30°45′~35°20′N，是长江三角洲地区的重要组成部分，境内地势平坦，水网密布，是中国农业最发达的省份之一。全省土地面积 $10.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国土地总面积1.06%；2011年耕地面积为 $4.70 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全省土地面积45.8%。下辖13个地市，包括102个县级行政单元。

2.2 数据来源

2.2.1 耕地空间分布 以1980年为重建起始年进行空间格局重建。基于1980年江苏省土地利用数据,在ArcGIS中采用最大面积原则栅格化生成现代江苏省耕地空间分布图(图2)。

2.2.2 典型年份历史耕地数量 选取若干年份的耕地总量数据,作为约束性CA的外生变量。

其中:清代耕地数据主要来源于三方面:一是官修政书及地方志等,如《大清一统志》、《嘉庆重修一统志》等;二是普遍引用的研究成果,如梁方仲的《中国历代户口、田地、田赋统计》^[26]等;三是区域性历史地理研究成果,如赵赟的《苏皖地区土地利用及其驱动力机制》^[27]等。清代耕地数据恢复重建包括两方面,一是册载田亩数据的修正体系,主要从影响册载耕地失实的因素分析入手,通过估测不同时期各类因素的影响程度,建立因素修正表,将册载税亩转换为实际耕地面积,得到初步修正的耕地数据;二是耕地修正数据的校验体系,从人口基数和垦殖趋势两方面对初步修正的耕地数据进行进一步检验和订正^[28]。受历史资料的限制,选取的清代时间断面为1661年、1820年和1887年。民国时期耕地历史记录的区别较小。

一方面由于数据来源有限,学者们所参考的文献时有相同,如张心一的《中国农业概况估计》^[29]、卜凯的《中国土地利用统计资料》^[30]等;另一方面学者们大多采用“转引衔接”的修正方法,即在考虑各年代间耕地数据衔接的基础上,以转引相关文献为主体数据。民国数据主要参考许道夫的《中国近代农业生产及贸易统计》^[31]和国民政府主计处统计局的《中国土地问题之统计分析》^[32],所选取的时间断面为1933年。利用曹雪等^[28]建立的修正体系,确定江苏省上述时间断面下的耕地数量分别为43175 km² (1661年)、54479 km² (1820年)、59544 km² (1887年)和56864 km² (1933年)。

2.2.3 人口和居民点 人口和居民点用于对重建的历史耕地空间格局进行验证。为便于对比分析,选取CHGIS数据库^[33]中1820年江苏省府级人口与村庄数据进行验证。1820年各府行政边界与所选用的现代行政区划不完全重合,对于差别细微者将各府边界扩展或收缩至现代边界,人口数不变;差别较大者,将人口数等比例替换,得到1820年村庄居民点和各府的人口数量分布(图3)。

2.2.4 耕地空间分布影响因子 现有研究已对耕地布局的影响因素进行了综合分析。如李柯等^[33]认为耕地开发过程受地形、热量、水分、土壤、植被等自然因素以及人口状况、经济发展水平、农业政策、战争等社会因素的共同影响;刘耀林等^[34]将海拔高度、侵蚀

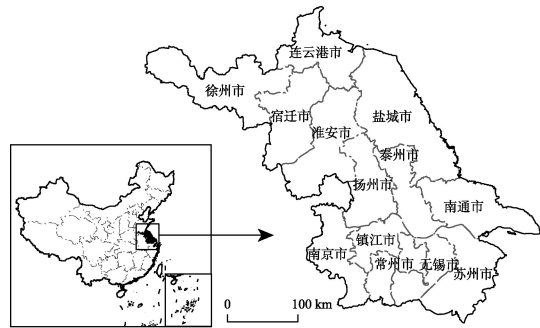


图1 研究区位与行政区划

Fig. 1 Location and administrative divisions of research area

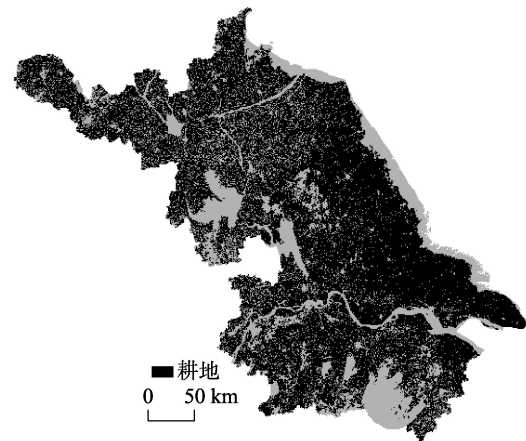


图2 1980年江苏省耕地分布

Fig. 2 Cropland map of Jiangsu province in 1980

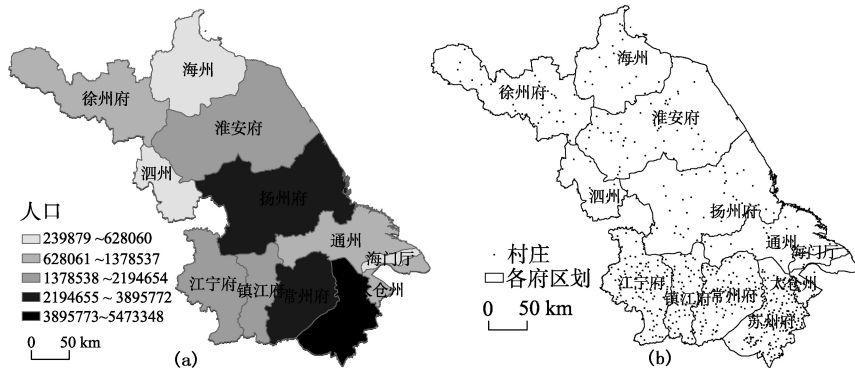


图3 1820年江苏省各府人口分布(a)与村庄分布(b)

Fig. 3 Distribution of population (a) and village settlements (b) in each prefecture of Jiangsu Province in 1820

强度、有机质含量、pH值、土壤质地、耕层厚度、土层厚度、排灌状况作为土地适宜性评价的主要影响因子；焦利民等^[35]将有机质含量、土壤质地、土层厚度作为宜林地评价因子。总体上，可将耕地适宜性影响因素总结为自然因素和人文因素两类，前者包括地形坡度、海拔高度、热量、水分、土壤侵蚀强度、气候生产潜力、温度条件（积温）、有效土层厚度、基岩裸露（裸岩占总面积）、土壤质地、水文与排水条件、土壤盐碱化（盐碱化面积比例）、灌溉条件（与水体距离）、植被指数、土壤pH值、土壤有机质含量和耕层厚度等；后者包括人口状况、经济发展水平、农业政策、战争以及饥荒等。

考虑到研究区自然气候、农业历史条件、研究尺度以及数据可获得性，选取土壤侵蚀强度、土壤pH值、土壤有机质含量、与居民点的距离、与河流的距离等因子作为耕地空间重建的影响因子。由于江苏为平原河网地区，陡坡地比例小，故未考虑坡度因素。为了便于影响因素之间的对比和模型构建，需对所有空间图层进行归一化，设定1代表最适宜耕地布局，0代表最不宜耕地布局，结果如图4。

(1) 土壤侵蚀强度：微度水力侵蚀设为1，轻度、中度水力侵蚀与工程侵蚀设为0；

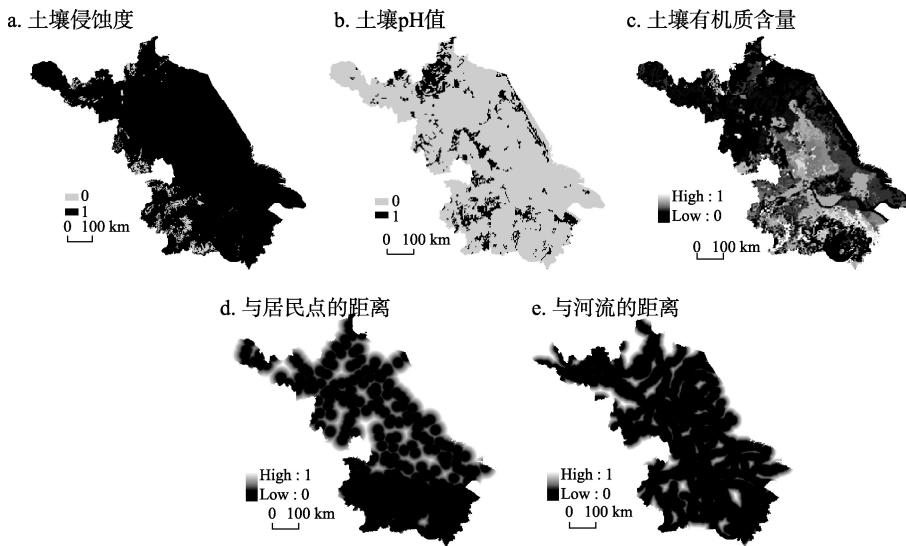


图4 影响江苏省历史耕地空间分布的因子分析

Fig. 4 Influencing factors for spatial distribution of historical arable land in Jiangsu Province

(2) 土壤pH值: 取值6.5~7.5设为1, 其余设为0;

(3) 土壤有机质含量: 将0~13.99范围内的有机质含量值按极差法归一化处理(13.99为1, 最低值为0);

(4) 与居民点的距离: 基于1820年村庄分布格局计算研究范围内所有地块距村庄的最近距离, 并将最大距离设为0;

(5) 与河流的距离: 基于1820年河流网分布格局计算研究范围内所有点与河流的最近距离, 并将最大距离设为0。

2.3 研究方法

2.3.1 模型假设及概念模型 构建基于约束性CA的历史时期耕地空间格局重建模型(Historical Arable-land Reconstruction Model, HARM), 模型基本假设为: ① 历史耕地的空间格局与现代格局具有相似性; ② 历史上的农业活动范围不超过现代农业用地范围; ③ 最不宜耕作的耕地元胞首先转为非耕地(向历史方向); ④ 周边非耕地比例多的耕地元胞先转为非耕地; ⑤ 由于数据限制, 假设耕地适宜性的相关影响因子不随时间变化。

基于约束性CA的HARM模型基本要素如下:

(1) 空间变量(自然条件约束)为前述的五个影响因子: 土壤有机质含量(SOM)、土壤pH值(pH)、土壤侵蚀强度(EROSION)、居民点距离(DVILLAGE)以及河流距离(DRIVER);

(2) 元胞空间(lattices)为整个江苏省域;

(3) 元胞(cells)大小为1 km×1 km, 研究区域范围内共103395个;

(4) 状态变量(cell states) $V=1$ 表示耕地, $V=0$ 表示非耕地;

(5) 转换规则(transition rules)为多属性分析(multi-criteria evaluation, MCE);

(6) 邻域(neighborhoods)为摩尔邻域, 即3×3的矩形、共8个邻近元胞;

(7) 离散时间(discrete time), 1个iteration为1年。

2.3.2 状态转换规则 元胞状态受到自然条件和邻域这两类约束的影响, 其中自然条件又包括前述五个空间变量。HARM模型的具体转换规则如下所示:

$$LandAmount = \sum_t stepNum^t \quad (1)$$

$$s_{ij}^t = w_0 + w_1 * SOM_{ij} + w_2 * PH_{ij} + w_3 * EROSION_{ij} + w_4 * DVILLAGE_{ij} + w_5 * DRIVER_{ij} + w_N * neighbor_{ij}^t \quad (2)$$

$$p_g^t = \frac{1}{1 + e^{-s_{ij}^t}} \quad (3)$$

$$p^t = \exp \left[\alpha * \left(\frac{p_g^t}{p_g^t \max} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

forinStepID = 1 to stepNum

if $p_{ij}^t = p_{\min}^t$ then $V_{ij}^{t+1} = 0$

$$p_{ij}^t = 1 \quad (5)$$

p_{\min}^t update

nextinStepID

式中: $LandAmount$ 为耕地元胞总缩减数目(以1980年作为基准年进行回溯); $stepNum$

为每次循环耕地元胞减少的数目； s_{ij}^t 为耕地适宜性； w 为变量系数； p_g^t 为元胞用地转换的全局概率； $p'_{g,max}$ 为每次循环中全局概率最大值； α 为扩散系数（1~10）； p' 为最终概率； $in-StepID$ 为子循环ID； V_{ij} 为元胞状态； p'_{min} 为每次循环不同子循环内最终概率最小值，其数值在子循环内不断更新。

这种形式的转换规则不同于Wu^[20]提出的 $P_c^t = P_g \times con(s_{ij}^t = suitable) \times \Omega_{i,j}^t$ 形式的约束性CA状态转换规则，而是把邻域作用以加权的方式纳入土地利用适宜性的计算中，既能够反映约束条件对简单CA模拟结果的约束，也可将邻域作用与其他空间变量的权重系数进行对比，其合理性已在龙瀛等^[22]的研究中进行了深入阐述。

2.3.3 参数识别 需要识别的模型参数主要分为三类：

(1) *stepNum* 参数表示各个年份耕地数量的变化，可根据基准年和各历史时间断面的耕地总量进行计算，即耕地总量的插值除以间隔的年份。

(2) 空间变量和常数项的权重系数 ($w_0 \sim w_5$) 可采用多种方法进行识别，例如蚁群算法^[36]、人工免疫系统^[37]等。考虑到转换规则的智能获取并非研究重点，故采用统计回归方法。因变量一般需要两个时间点的耕地布局来识别缩减的耕地(1)与不缩减的耕地(0)，如果只有一个时间点的耕地，则假设该时间点的耕地布局是合理的，因变量为耕地(1)与非耕地(0)；自变量则为前述的五个影响因子。考虑到因变量为0或1，不符合正态分布，采用Logistic回归识别权重系数。首先需要对耕地布局 and 多个影响因子进行采样，随机选取部分元胞作为样本，采用Logistic回归对五个空间变量的权重系数和常数项进行识别。

(3) 通过Logistic回归方法确定除neighbor之外五个空间变量的权重参数之后，保持这些权重参数不变，在模型中增加一个单一参数循环(MonoLoop)过程来确定neighbor的权重参数。通过不断调整neighbor的权重系数(w_N)，对比不同 w_N 影响下耕地空间分布的模拟值与观察值，选取点对点匹配指标Kappa指数最大的系数作为识别得到的neighbor的权重系数 w_N^* 。将具有最佳匹配度的 w_N^* 与Logistic回归获得的 $w_0 \sim w_5$ 一同代入状态转换规则进行模拟。

2.3.4 历史时期耕地空间格局重建 基于所建立的状态转换规则，利用HARM进行历史时期耕地空间格局重建的模拟(图5)。首先，设定模型的环境变量、空间变量及相应系数；进而，基于宏观社会经济条件计算不同时间阶段的stepNum参数，在CA环境中计算元胞转换的初始概率、全局概率和最终概率；而后，在Alloca-

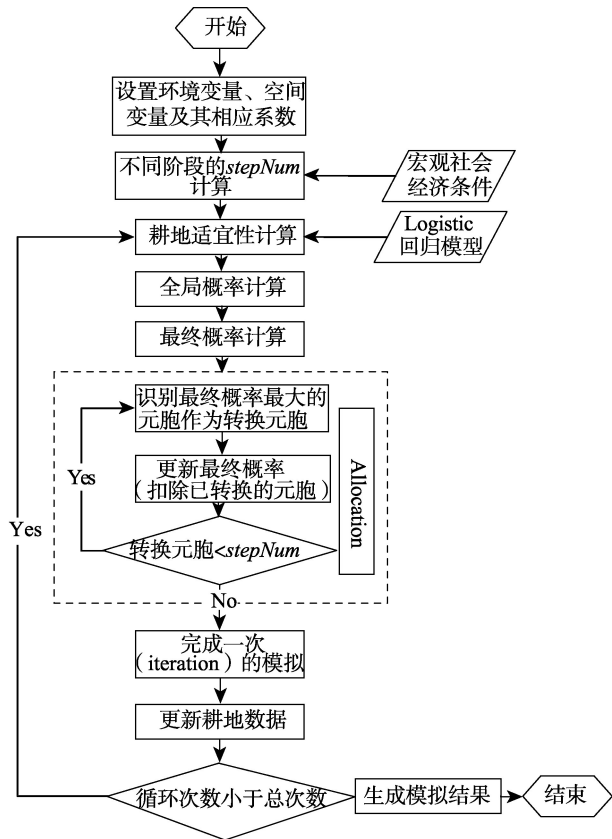


图5 HARM模拟流程图
Fig. 5 Flowchart of HARM

tion过程中采用循环的方式进行转换元胞的空间识别,完成一个CA离散时间的模拟;最后,根据模拟的目标时间,确定循环次数,经过多次Allocation完成整个模拟过程,得到历史时期耕地空间格局的重建结果。

考虑到研究区的耕地数量还有进一步修正的可能性,可将HARM扩展为分区同步模型,即以每个子区域作为独立子模型,子模型运行到该子区域的耕地总量即停止运行,各子模型运行时间统一,保证模型运行结束时各子区域的耕地总量与预期一致。

2.3.5 模型验证 利用约束性CA模型进行预测分析时,可利用变化后的现实格局进行验证。但由于缺乏对应的历史资料,历史耕地空间分布模拟结果很难进行直接验证。现有研究的验证方法可分为定性验证和定量验证两类。前者包括农户调查对比验证法、历史文献对比法^[13]、重建结果一致性验证法^[38]等;后者包括各府耕地面积比例拟合值与册载田亩的误差比较^[10]以及遥感影像中的点对点栅格验证^[39]。也有学者提出依据统计指标、重大历史事件等对数据集进行多空间尺度(耕地总量、省级耕地数量和栅格等)的对比验证方法^[40]。

中国历史统计中缺乏具体耕地分布的记载,在实践中可通过文献分析获取居民点分布和州府的人口数量,并利用这些数据进行模拟结果的验证,主要有以下途径:

(1) 定性验证:在子研究区域(Sub-region)层次将史书古籍中的多、少、高、低等描述性文字与相应区域的重建结果进行趋势对比,如趋势基本一致,则重建效果较好;

(2) 半定性验证:如果某子研究区域人口数据丰富,可利用相应子研究区域不同等级聚落的个数与重建的耕地总量进行对比,如基本一致则重建效果较好;

(3) 定量验证:如果有具体的户数信息,可进行子户数或人口数与耕地总量的相关性分析,相关系数越高,则重建效果越好。

3 结果分析

3.1 参数识别

为了确定状态转换规则中的参数值,需要对历史数据进行分析,获得基于历史数据的状态转换规则作为模型预测的基础。以1980年作为一个历史时期进行模型参数识别,相关变量统计性描述见表1。

(1) 利用SPSS软件,采用Logistic回归对1980年除neighbor之外的五个空间变量的权重系数(包括常数项)进行识别,因变量为是否发生由非耕地向耕地转变(发生转变为1,不发生转变为0),自变量为五个空间变量。回归结果如表2所示,各变量的显著性水平都小于0.001,其中f_som与f_erosion是模型的两个主要影响因子。

(2) Logistic回归模型的预测精度可用目标存在与否的正确分类比例来衡量。分析表明(表3),建模数据集的总正确率为77.3%,检验数据集的总正确率为70.0%,说明模型预测精度较高,且预测能力比较稳定。

3.2 历史耕地空间格局重建结果

根据上述耕地适宜性评价,利用HARM模型得到多

表1 HARM变量对应的数据统计性描述表

Tab. 1 Descriptive statistics of datasets in HARM

变量名称	最小值	最大值	均值	标准差	来源
farm1980	0	1	0.70	0.458	遥感数据解译
SOM	0	1	0.11	0.079	
EROSION	0	1	0.96	0.196	史学正等 ^[41]
pH	0	1	0.14	0.348	
DVILLAGE	0.0000	1.0000	0.176537	0.1417773	CHGIS
DRIVER	0.0000	1.0000	0.116155	0.1295516	CHGIS

个历史阶段的耕地分布格局，依据耕地总量的重建结果，得到四个历史时间断面（1661年、1820年、1887年和1933年）的耕地空间布局（图6）。

3.3 结果验证

根据数据的可获取性，选取1820年的耕地重建结果进行验证，验证从两个方面开展：一是利用CHGIS数据集中各府人口数据，将耕地重建结果按府进行数量统计，进行各府人口数量与耕地数量的相关性分析，相关系数可以间接体现重建结果的精确度；二是利用村镇分布格局进行验证。假设各村庄居民点内的人均耕地数量相同，通过统计各府的居民点数量，计算各府村庄数量与耕地数量的相关系数评价重建结果的精确度。通过上述评价方法发现，江苏省1820年各府的人口数和村庄居民点数目显著正相

表2 参数识别结果表

Tab. 2 Calibrated parameters of HARM

变量	系数	标准差	Wald统计量	显著性
SOM	9.415	0.118	6368.570	0.000
EROSION	1.195	0.034	1205.643	0.000
pH	0.251	0.022	134.433	0.000
DVILLAGE	-1.008	0.053	367.223	0.000
DRIVER	0.534	0.058	85.350	0.000
Constant	-1.141	0.038	899.380	0.000

表3 Logistic回归结果分类表

Tab. 3 Classification of the logistic regression results

	已观测	已预测		总计(%)
		farm1980		
		0	1	
farm1980	0	10061	20996	32.4
	1	2435	69903	96.6
总计(%)		80.5	76.9	77.3

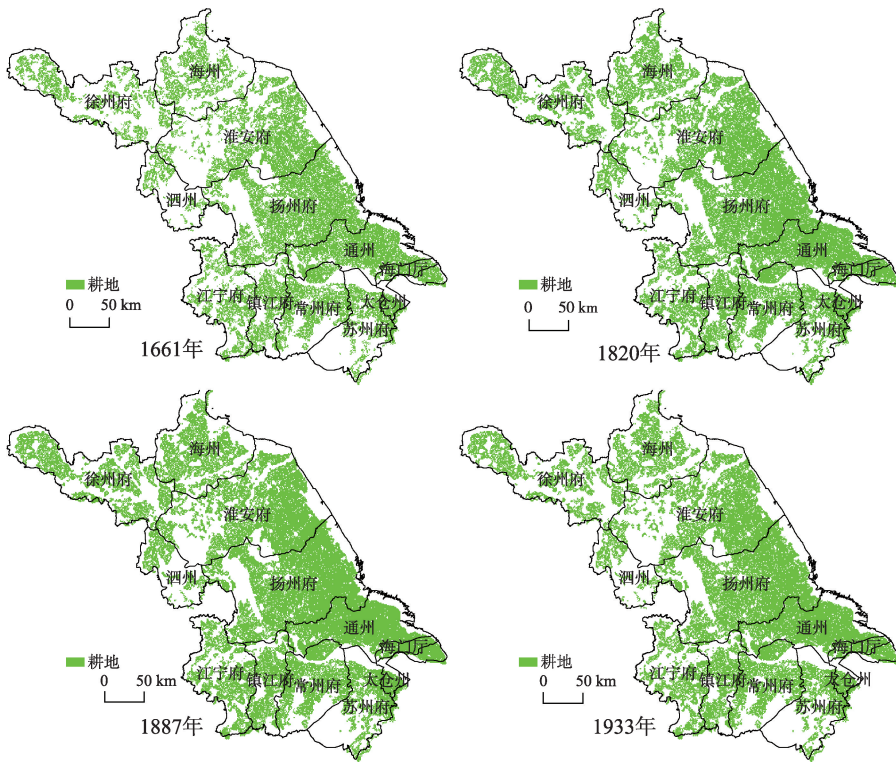


图6 历史时间断面的江苏省耕地空间格局重建结果

Fig. 6 Historical reconstruction of arable lands in Jiangsu province

耕地的分布规律进行客观识别,借助约束性CA得到了精度更高的布尔型耕地数据,以及利用人口数据进行重建结果验证的定性和定量相结合的方法,可为历史耕地分布研究提供一种新的视角和思路。

受数据可获得性的限制,构建的模型没能考虑转化规则的空间差异。如针对不同区域构建相应的转化规则,集成后同步或异步分区运算生成省域乃至全国的历史耕地空间格局,则其模拟结果可能更为可靠,这有待在下一步研究中深化。

参考文献(References)

- [1] 葛全胜,何凡能,郑景云,等. 21世纪中国历史地理学发展的思考. 地理研究, 2004, 23(3): 374-384. [Ge Quansheng, He Fanneng, Zheng Jingyun, et al. Some ideals related to the development of Chinese historical geography in the 21st century. *Geographical Research*, 2004, 23(3): 374-384.]
- [2] 朱枫,崔雪锋,缪丽娟. 中国历史时期土地利用数据集的重建方法述评. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1563-1573. [Zhu Feng, Cui Xuefeng, Miao Lijuan. China's spatially-explicit historical land-use data and its reconstruction methodology. *Progress in Geography*, 2012, 31(12): 1563-1573.]
- [3] Ramankutty N, Foley J A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(4): 997-1027.
- [4] Goldewijk K K. Estimating global land use change over the past 300 years: The HYDE database. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(2): 417-433.
- [5] Goldewijk K K, Beusen A, Van Drecht G, et al. The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12,000 years. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(1): 73-86.
- [6] Pongratz J, Reick C, Raddatz T, et al. A reconstruction of global agricultural areas and land cover for the last millennium. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22: GB3018.
- [7] Kaplan J O, Krumhardt K M, Zimmermann N. The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(27-28): 3016-3034.
- [8] Liu M L, Tian H Q. China's land cover and land use change from 1700 to 2005: Estimations from high-resolution satellite data and historical archives. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24: GB3003.
- [9] 白淑英,张树文,张养贞. 土地利用/土地覆被时空分布100年数字重建:以大庆市杜尔伯特蒙古族自治县为例. 地理学报, 2007, 62(4): 427-436. [Bai Shuying, Zhang Shuwen, Zhang Yangzhen. Digital rebuilding of LUCC spatial-temporal distribution of the last 100 years: Taking Durbod Mongolian autonomous county in Daqing city as an example. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(4): 427-436.]
- [10] 林珊珊,郑景云,何凡能. 中国传统农区历史耕地数据网格化方法. 地理学报, 2008, 63(1): 83-92. [Lin Shanshan, Zheng Jingyun, He Fanneng. The approach for gridding data derived from historical cropland records of the traditional cultivated region in China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(1): 83-92.]
- [11] 叶瑜,方修琦,任玉玉,等. 东北地区过去300年耕地覆盖变化. 中国科学: D辑, 2009, 39(3): 340-350. [Ye Yu, Fang Xiuqi, Ren Yuyu, et al. Northeast cultivated land cover changes over the past 300 years. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 39(3): 340-350.]
- [12] 何凡能,李士成,张学珍. 北宋中期耕地面积及其空间分布格局重建. 地理学报, 2011, 66(11): 1531-1539. [He Fanneng, Li Shicheng, Zhang Xuezheng. The reconstruction of cropland area and its spatial distribution pattern in the mid-northern Song dynasty. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1531-1539.]
- [13] 李柯,何凡能,张学珍. 基于MODIS数据网格化重建历史耕地空间分布的方法:以清代云南省为例. 地理研究, 2011, 30(12): 2281-2288. [Li Ke, He Fanneng, Zhang Xuezheng. An approach to reconstructing spatial distribution of historical cropland with grid-boxes by utilizing MODIS land cover dataset: A case study of Yunnan province in the Qing Dynasty. *Geographical Research*, 2011, 30(12): 2281-2288.]
- [14] 李士成,何凡能,陈屹松. 清代西南地区耕地空间格局网格化重建. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1196-1203. [Li Shicheng, He Fanneng, Chen Yisong. Gridding reconstruction of cropland spatial patterns in Southwest China in the Qing dynasty. *Progress in Geography*, 2012, 31(9): 1196-1203.]
- [15] Clark K C, Gaydos L J. Loose-coupling a cellular automata model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *Geographical Information Sciences*, 1998, 12(7): 699-714.
- [16] Engelen G, White R, Uljee I. Integrating constrained cellular automata models, GIS and decision support tools for urban and regional planning and policy making. In: Timmermans H. *Decision Support Systems in Urban Planning*. London: E&FN Spon, 1997: 125-155.
- [17] Li X, Yeh A G O. Modeling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14(2): 131-152.
- [18] Ward D P, Murray A T. An optimized cellular automata approach for sustainable urban development in rapidly urbanizing

- ing regions. *International Journal of Geographical Information Science*, 1999, 7(5): 235-250.
- [19] White R, Straatman B, Engelen G. Planning scenario visualization and assessment: A cellular automata based integrated spatial decision support system. In: Goodchild M F, Janelle D G, Shrore Z G. *Spatially Integrated Social Science*. Oxford: Oxford University Press, 2004: 420-442.
- [20] Wu F. Simland: A prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. *International Journal of Geographical Information Science*, 1998, 12(1): 63-82.
- [21] 刘小平, 黎夏, 彭晓娟. “生态位”元胞自动机在土地可持续规划模型中的应用. *生态学报*, 2007, 27(6): 2391-2402. [Liu Xiaoping, Li Xia, Peng Xiaojuan. Niche-based cellular automata for sustainable land use planning. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2391-2402.]
- [22] 龙瀛, 韩昊英, 毛其智. 利用约束性CA制定城市增长边界. *地理学报*, 2009, 64(8): 999-1008. [Long Ying, Han Haoying, Mao Qizhi. Establishing urban growth boundaries using constrained CA. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 999-1008.]
- [23] 龙瀛, 沈振江, 毛其智, 等. 基于约束性CA方法的北京城市形态情景分析. *地理学报*, 2010, 65(6): 643-655. [Long Ying, Shen Zhenjiang, Mao Qizhi, et al. Form scenario analysis using constrained Cellular Automata. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(6): 643-655.]
- [24] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社. 1999. [Zhou Chenghu, Sun Zhanli, Xie Yichun. *The Research of Geography Cellular Automata*. Beijing: Science Press, 1999.]
- [25] 何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究. *中国科学: D辑*, 2005, 35(5): 464-473. [He Chunyang, Shi Peijun, Chen Jin, et al. Research of scenarios simulation model based on dynamic model and CA. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 2005, 35(5): 464-473.]
- [26] 梁方仲. 中国历代户口、田地、田赋统计. 北京: 中华书局, 2008. [Liang Fangzhong. *The Statistics of Ancient Accounts, Land and Land Taxes of China*. Beijing: Zhonghua Book Company, 2008.]
- [27] 赵赞. 苏皖地区土地利用及其驱动力机制(1500-1937). 上海: 复旦大学博士学位论文, 2005. [Zhao Yun. *The land use and its driving force in the Su-Wan regions (1500-1937)*. Shanghai: The Doctoral Dissertation of the Fudan University, 2005.]
- [28] 曹雪, 金晓斌, 周寅康. 清代耕地数据恢复重建方法与实证研究. *地理学报*, 2013, 68(2): 245-256. [Cao Xue, Jin Xiaobin, Zhou Yinkang. Research on cropland data recovery and reconstruction in the Qing Dynasty: Method and case study. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(2): 245-256.]
- [29] 张心一. 中国农业概况估计. 南京: 统计局出版, 1933. [Zhang Xinyi. *The General Estimation of Agricultural Development of China*. Nanjing: Statistical Bureau Publishing House, 1933.]
- [30] 卜凯. 中国土地利用统计资料. 北京: 商务印刷馆, 1937. [Bo Kai. *Statistic of Land Use in China*. Beijing: The Commercial Press, 1937.]
- [31] 许道夫. 中国近代农业生产及贸易统计资料. 上海: 上海人民出版社, 1983. [Xu Daofu. *China's Modern Agricultural Production and Trade Statistics*. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1983.]
- [32] 国民政府主计处统计局. 中国土地问题之统计分析. 南京: 正中书局, 1936. [Statistical Bureau of KMT Government. *Statistical Analysis of Chinese Land Use*. Nanjing: Zhengzhong Publishing House, 1936.]
- [33] Harvard Yenching Institute. CHGIS (Version 4). Cambridge: Harvard Yenching Institute, 2007.
- [34] 刘耀林, 刘艳芳, 夏早发. 模糊综合评判在土地适宜性评价中应用研究. *武汉测绘科技大学学报*, 1995, 20(1): 71-75. [Liu Yaolin, Liu Yanfang, Xia Zaofa. Land suitability evaluation based on fuzzy comprehensive judgment. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1995, 20(1): 71-75.]
- [35] 焦利民, 刘耀林. 土地适宜性评价的模糊神经网络模型. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2004, 29(6): 513-516. [Jiao Limin, Liu Yaolin. Application of fuzzy neural networks to land suitability evaluation. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(6): 513-516.]
- [36] Liu X P, Li X. A bottom-up approach to discover transition rules of cellular automata using ant intelligence. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(11-12): 1247-1269.
- [37] Liu X P, Li X. Simulating land use dynamics under planning policies by integrating artificial immune systems with cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(5): 783-802.
- [38] 汪桂生, 颀耀文, 王学强, 等. 明代以前黑河流域耕地面积重建. *资源科学*, 2013, 35(2): 362-369. [Wang Guisheng, Xie Yaowen, Wang Xueqiang, et al. Data reconstruction of Heihe river basin cultivated land area prior to the Ming dynasty. *Resources Science*, 2013, 35(2): 362-369.]
- [39] Hall C A S, Tian H, Qi Y, et al. Modeling spatial and temporal patterns of tropical land use change. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(22): 753-757.
- [40] 李蓓蓓, 方修琦, 叶瑜, 等. 全球土地利用数据集精度的区域评估: 以中国东北地区为例. *中国科学: D辑*, 2010, 40(8): 1048-1059. [Li Beibei, Fang Xiuqi, Ye Yu, et al. Accuracy assessment of global historical cropland datasets based on regional reconstructed historical data: A case study in Northeast China. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 2010, 40(8): 1048-1059.]

[41] 史学正, 于东升, 高鹏, 等. 中国土壤信息系统(SISChina)及其应用基础研究. 土壤. 2007, 39(3): 329-333. [Shi Xuezheng, Yu Dongshen, Gao Peng, et al. Soil information system of China(SISChina) and its application. Soil, 2007, 39(3), 329-333.]

A constrained cellular automata model for reconstructing historical arable land in Jiangsu province

LONG Ying^{1,2}, JIN Xiaobin^{1,3}, LI Miaoyi⁴, YANG Xuhong³, CAO Xue³, ZHOU Yinkang^{1,3}

(1. Natural Resources Research Center of Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Beijing Institute of City Planning, Beijing 100045, China; 3. College of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 4. School of Environment Design, Kanazawa University, Kanazawa 920-1192, Japan)

Abstract: Land-use and land-over change (LUCC) is one of the core elements of global environmental change. Large-scale and long-scale LUCC have profound effects on atmospheric composition, climate change, nutrient cycling, ecosystem, and more. The effect of human activities on the Earth has increased, especially in the past 300 years, and the resulting changes in the global environment are also profound. The reconstruction of arable land pattern over historical periods, an important part of LUCC, has been a worldwide concern in academic circles. Most of previous studies have used the total based spatial allocation approach. Taking into account the continuous distribution of arable land and spatial constraints, this paper proposes a constraint-based cellular automata model to reconstruct the historical arable land pattern. The model establishment, parameter calibration, and result validation are described in detail in this paper. We selected five constraints including soil pH value, content of soil organic matter, intensity of soil erosion, and distance to the nearest human settlements as well as distance to the nearest river, and their relationships with the arable land distribution in 1980, as the transition rule of CA, were quantitatively estimated using logistic regression. The model was applied to Jiangsu Province in China, and was compared with the conventional spatial allocation method. The results showed that the methodology developed in this study can more objectively reflect the evolution of the pattern of arable land over historical periods, in terms of similarity with contemporary pattern, than the spatial allocation methods and can provide an effective basis for the historical study of arable land. Compared to the conventional spatial allocation approach for spatial pattern reconstruction of historical arable land, this study has the following findings: (1) Borrowing ideas from urban growth simulation, constrained CA has been initially applied for reconstructing historical arable land to consider contiguous development of arable land. (2) Contemporary arable land pattern and several spatial factors were used to identify the objective transition rule of historical arable land incorporating with logistic regression, avoiding the subjectivity in some existing studies. (3) The constructed pattern can be dynamically visualized at intervals of ten years. (4) Compared with existing research, our reconstruction has high resolution (1 km grid) and is a form of land-use types (non-proportional). Reconstruction result in other coarser scale could be aggregated based on the 1-km pattern. (5) According to the characteristics of available data in the history of China, we proposed qualitative and quantitative methods to validate reconstruction results.

Key words: historical arable land; reconstruction; constrained cellular automata; HARM; Jiangsu