

融合交通驱动因子的RF-CA-Markov土地利用演化模型

汤文¹,李慧君¹,郑小毅²,陈玲娟¹,王竹²,徐琳²

(1 武汉科技大学 汽车与交通工程学院,武汉 430081; 2 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,贵阳 550081)

摘要 为探究城市交通系统对土地利用格局的影响,选取道路网密度、可达性、道路距离、公共交通站点距离四种交通因素,融入RF-CA-Markov模型,模拟2010—2020年武汉市蔡甸区土地利用格局的演化进程,并结合土地利用转移矩阵与景观指数分析交通因素对模型精度的影响.结果表明:与未考虑交通因素的RF-CA-Markov模型相比,模拟结果Kappa系数与OA值明显提高,在土地演化模拟中考虑交通因素可显著提高模拟精度;与自然发展情景相比,交通因素介入情景中建设用地的转移地区主要集中于交通设施附近且便利程度大的区域,交通因素介入下景观的复杂程度更高,斑块分散更加均匀.

关键词 交通系统;土地利用;元胞自动机;RF-CA-Markov模型;可达性

中图分类号 TU984.11+3 文献标志码 A 文章编号 1672-4321(2025)04-0475-09

doi:10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20240740

RF-CA-Markov land use evolution model with integrated transportation driving factors

TANG Wen¹, LI Huijun¹, ZHENG Xiaoyi², CHEN Lingjuan¹, WANG Zhu², XU Lin²

(1 School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;
2 POWERCHINA Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract In order to investigate the influence of urban transportation system on land use patterns, four traffic factors including road network density, accessibility, road distance and public transportation station distance were selected and incorporated into the RF-CA-Markov model to simulate the evolution of land use patterns in Caidian District of Wuhan City from 2010 to 2020. The effects of transportation factors on model accuracy were analyzed using land use transition matrices and landscape indices. The results indicated that compared with the RF-CA-Markov model without considering transportation factors, the simulation results of Kappa coefficient and OA value were significantly improved. The simulation accuracy can be significantly improved by considering traffic factors in land evolution simulation. Compared with the natural development scenario, the transfer area of construction land in the traffic factor intervention scenario was mainly concentrated in the area near the transportation facilities with high convenience, the complexity of the landscape is higher, and the dispersion of patches is more uniform under the intervention of traffic factors.

Keywords traffic system; land use; cellular automata; RF-CA-Markov model; accessibility

城市的发展对土地有极强的需求和依赖性^[1],城市化的加快极大地促进了经济的快速发展,同时也带来了土地与城市之间的矛盾,如人口聚集、城市人口密度急速增大、交通拥堵、可用土地减少、能

源消耗增大等问题^[2].要解决上述问题,需要深入地认识城市土地利用的发展模式,寻找驱动因素,探寻土地利用变化的信息和结构,才能准确分析交通系统与土地利用之间的互馈关系^[3].利用土地利用

收稿日期 2023-12-07

作者简介 汤文(1982-),男,副教授,博士,研究方向:土地利用模拟与交通模拟规划,E-mail:tangwen@wust.edu.cn

基金项目 国家社会科学基金资助项目(20CGL018)

演化模型可以从时间与空间两方面分析土地利用的演化进程,对未来土地格局进行预测,协调土地与交通系统的关系,是从根源上解决城市交通问题的重要前提^[4].

常用的土地动态演化模型有 CA 模型、Markov 模型^[5]、CA-ANN 模型、FLUS 模型^[6]等,有学者基于此进行拓展改进,其中加入随机森林算法的 RF-CA-Markov 模型,能够有效挖掘土地利用转换规则,使模型精度更高.刘凯等提出 RF-CA 模型^[7],提取影响城市扩展的元胞自动机转换规则,并选用 LR-CA 模型与 RF-CA 模型共同用于城市扩展的探索研究,证明 RF-CA 模型更有优势;刘小平等提出基于随机森林算法的多类元胞自动机(RF-CA)模型^[8],利用随机森林算法探究各空间变量的重要性并建立土地利用转换规则,实现土地利用演化模拟,通过与 LR-CA 模型模拟结果比较,表明 RF-CA 模型模拟精度更高.这些模型从土地利用的历史数据中获取转化规则,没有充分认识到交通因素与土地利用之间的相互影响.

对于交通系统与土地利用关系的探究,李少英等^[9]结合遥感影像和 POI 数据,从时间和空间两个维度定量研究地铁对土地利用转变过程的复杂影响与空间差异规律;刘诗奇等^[10]分析了北京市典型站点周边土地利用的空间分布特征;陆晴等^[11]基于道路网络定性、定量分析景观格局对道路建设的反馈关系;胡昂等^[12]以日本东京为例,对站域土地的演化特征进行分析.目前许多学者从轨道交通站域或城市中心的容积率、开发强度、用地类型的变化与转移等方面^[13-14]分析了交通系统影响下的土地利用情况及结构变化.但少有研究能系统地构建影响

土地利用的交通因素指标体系,因此缺乏对交通因素与土地演化影响机制的深入研究.

本文以武汉市蔡甸区为研究区域,建立以道路网密度、可达性、道路距离、公共交通站点距离为核心的交通因素计算体系,并将其作为驱动因子融入 RF-CA-Markov 模型,进行自然发展与交通介入两种情景下的土地演化模拟,从时间、土地利用转移、景观指数等角度获取研究区域土地利用变化信息,验证在 RF-CA-Markov 模型中加入交通因素的可行性,分析交通因素对土地演化模拟产生的影响,为后续土地规划工作提供理论支撑,推进城市化加快的同时建设生态环境,有利于城市的建设开发与可持续发展.

1 研究区域与数据处理

1.1 研究区域概况

选取武汉蔡甸区作为研究区域.武汉蔡甸区位于武汉西南,113°41'E~114°13'E,30°15'N~30°41'N之间,濒临长江,地处汉江与长江汇流的三角地带,占地面积约 1100 平方公里,国道横贯全境,高速公路在区内交会,构成东西贯通、南北相接的交通网络,截至 2022 年底,常住人口为 62.29 万,如图 1 所示.

1.2 数据来源与处理

研究所需数据包含土地利用数据、社会经济数据、交通数据、环境数据四大类,数据来源如表 1 所示.其中土地利用数据包含 2010—2020 年共三期土地利用数据,经重分类后分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类,分类后的土地利用现

表 1 研究数据源

Tab. 1 Study data sources

数据类型	数据名称	来源与处理
土地利用数据	蔡甸区 2010、2015、2020 年土地利用分类数据	来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,利用 ArcGIS 进行重分类,分为以下类型:(1)林地;(2)草地;(3)水域;(4)耕地;(5)建设用地;(6)未利用地
社会经济数据	人口、GDP	来源于地理遥感生态网,是像元大小为 30 m × 30 m 的全国范围栅格数据,利用 ArcGIS 结合蔡甸区行政边界对多期数据进行裁剪
交通数据	道路网数据	来源于 Open Street Map,获取多期全国道路网络数据,结合研究区域边界进行裁剪,基于道路等级计算路段的自由流通行时间
	公共交通站点数据	来源于高德地图开放平台,获取现状年公共交通数据,其中历史年数据通过公交线路开通年进行筛选
环境数据	Poi 数据	来源于地理遥感生态网,获取多期全国 poi 兴趣点数据,结合研究区域边界进行裁剪,得到矢量点数据
	高程、坡度	来源于地理遥感生态网,是像元大小为 30 m × 30 m 的全国范围栅格数据,结合研究区域行政边界对多期环境数据进行裁剪

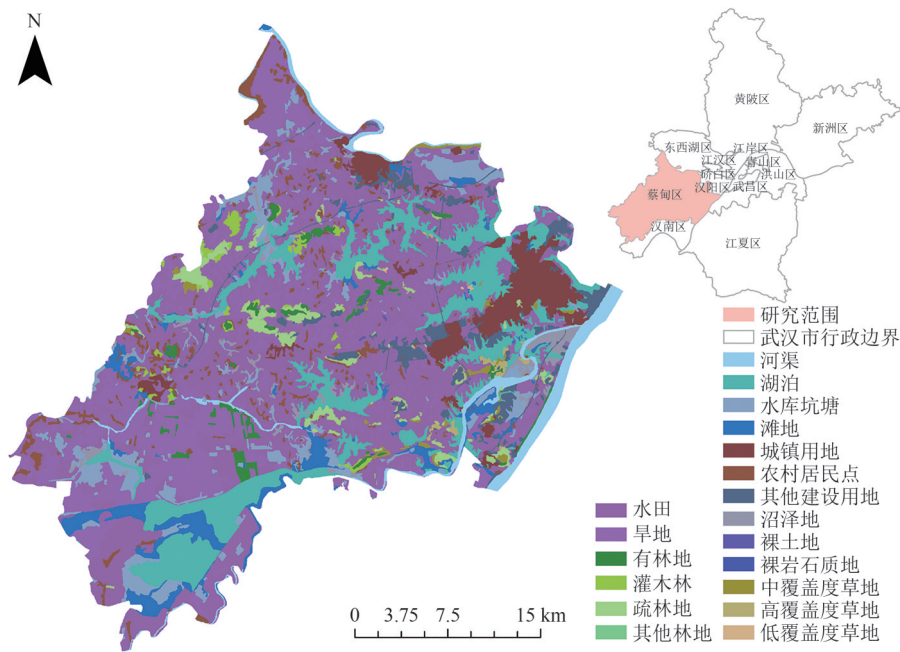


图1 研究区域土地覆盖及行政区域图

Fig. 1 Land cover and administrative area of the study area

状数据如图 2 所示.将社会经济数据以及环境数据
处理为同一坐标系统 WGS84 坐标系下的栅格数据;

交通数据来源于 Open Street Map 网站与高德地图开
放平台.

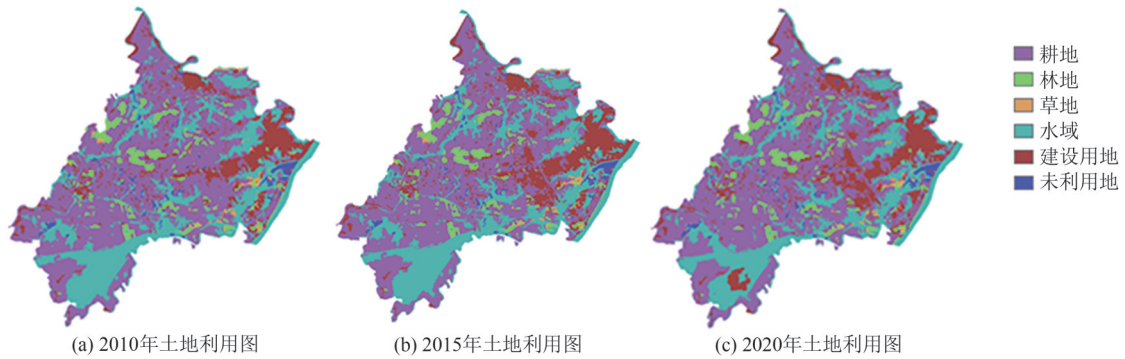


图2 蔡甸区土地利用现状图

Fig. 2 Map of land use status in the Caidian District

2 研究方法

2.1 交通因素计算体系构建

在土地利用演化模拟中加入交通因素可以充分
体现交通因素对土地利用演化过程的影响.对国
内外研究文献进行了归纳总结,建立了土地演化中
的交通因素计算体系并利用 ArcGIS 与 python 完成
了各指标的计算算法.

已选驱动因子从自然与经济两方面展开,其中
自然因子包括高程和坡度,经济因子包含 GDP 和人
口密度,对于交通因子的选择以 3~4 个为宜,以保
持多维度驱动因子的平衡.交通因子选取应具有全

性和可获得性,距道路距离作为交通驱动因子已
被广泛用于土地利用模拟中;道路网密度作为衡
量交通系统发展水平的基本指标,能够直接反映
交通网络的稠密程度与格局特征,以栅格形式
计算道路网密度避免了在长度与面积统计时产
生偏差,使得计算结果更可靠^[15];综合可达性
作为城市规划中衡量交通系统与土地利用互动
性的重要指标,通过量化栅格的便捷程度,提供
全面的交通系统综合分析视角^[16];公共交
通是交通系统中不可或缺的组成部分,距公共
交通站点的距离反映栅格使用公共交通的便利
程度.因此,交通因素计算体系包含道路网密
度、研究区域综合可达性、距各级道路的距离、
距公共交通站点的距离,如表 2 所示.

表2 交通因子说明与计算表
Tab. 2 Description and calculation of transportation factors

交通因素	计算公式	说明
道路网密度	$\rho = \frac{\text{km}}{\text{km}^2}$. (1)	道路网密度是道路里程与区域面积的比值,体现城市道路网建设数量与水平 ^[17] ,反映城市道路的布局.式(1)中km是区域道路里程数,km ² 是区域面积.
可达性	$V_j = \sum_{k=1}^m P_k t_{kj}^{-\beta}$. (2)	可达性表示从该区域到达其他地点的容易程度 ^[18] ,可达性能够影响交通系统的资源配置 ^[19-20] ,衡量交通系统是成熟.式(2)、(3)中 P_k 为区域k的人数; t_{ij} 为区域k到POI点之间的通行时间; β 是交通摩擦系数,取值为1; V_j 是人口规模因子,表明周围居民对POI点的潜在需求; A_i^c 是区域i的可达性指数.
	$A_i^c = \sum_{j=1}^n \frac{S_j t_{ij}^{-\beta}}{V_j}$. (3)	
道路距离	$d_r = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$. (4)	道路距离是区域质心点距离最近城市道路的直线欧式距离 ^[21] ,道路距离改变会引起道路沿线土地适宜功能及其对居民、货物等的吸引产生变化.式(4)中 x_i 是区域质心点在维度i下的坐标值, y_i 是最近城市道路点在维度i下的坐标值.
站点距离	$d_m = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - z_i)^2}$. (5)	站点距离是区域质心点距离最近城市公共交通站点的直线欧式距离 ^[22] ,站点距离会为周边土地带来收益,激励土地开发 ^[23] .式(5)中 x_i 是区域质心点在维度i下的坐标值, z_i 是最近城市公共交通站在维度i下的坐标值.

现有研究多以 500 m×500 m 或 300 m×300 m 像元大小的栅格进行计算^[24],为提高栅格计算的精度对栅格大小进行重新分割,计算前将研究区域土地利用数据分割为 100 m×100 m 像元大小的栅格图像,后续影响因子计算都基于分割后的栅格图像.

利用 ArcGIS 平台结合 2010 年与 2015 年交通数据,对道路网密度、道路距离、站点距离进行了计算;可达性计算结合 python、交通数据与社会经济数据展开.由于学校、就业与购物行为是日常生活主要活动,对交通系统需求影响较大,本文计算了学校可达性、购物可达性、就业可达性多种可达性.将栅格质心作为出发地,poi 数据作为目的地,出发地与目的地一一匹配生成 OD 对,基于路网计算 OD 对之间的通行时间,结合可达性公式计算 V_j 和 A_i 值, A_i 值越大,可达性越好;对可达性指数归一化,根据 poi 数据的权重加权计算得到综合可达性.

利用研究区域的基础数据,得到的 2015 年交通因素计算结果见图 3-6.

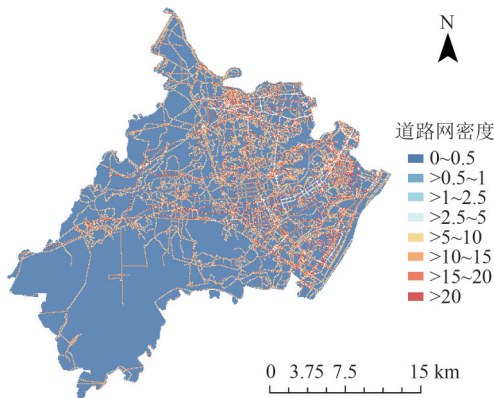


图3 道路网密度计算图

Fig. 3 Road network density calculation map

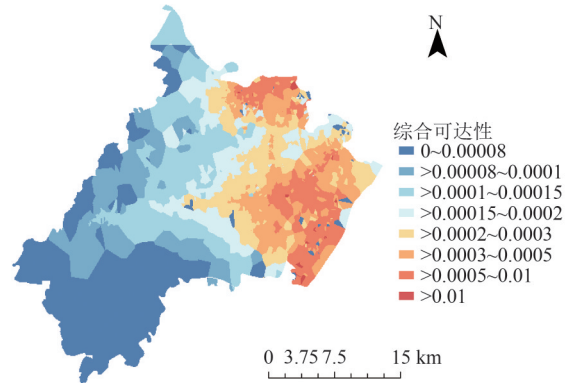


图4 综合可达性计算图

Fig. 4 Comprehensive accessibility calculation map

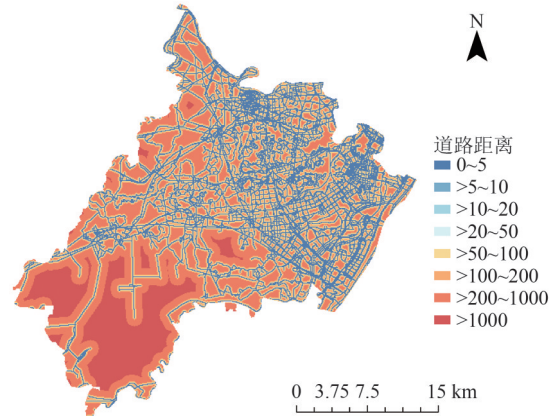


图5 道路距离计算图

Fig. 5 Road distance calculation map

2.2 构建多情景 RF-CA-Markov 土地演化模型

RF-CA-Markov 模型耦合了随机森林算法和 CA-Markov 模型,被证明能较高精度地进行土地利用的演化模拟.本文在 RF-CA-Markov 模型中加入交通因素计算体系,构建多情景的 RF-CA-Markov 模型,用于交通因素介入情景下土地演化模拟.模型计算在 PLUS 软件^[25]中完成,利用 markov 方法计

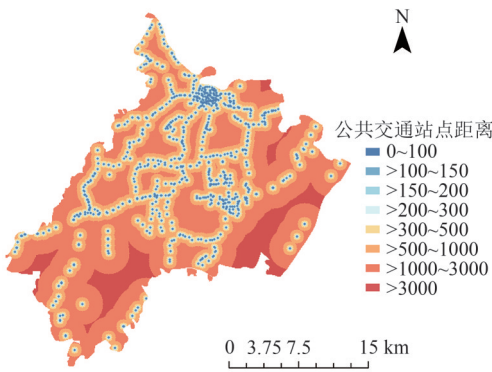


图 6 公共交通站点距离计算图

Fig. 6 Public transportation station distance calculation map

算转移矩阵,最终得到土地利用转移量矩阵和土地利用转移概率矩阵,定量描述土地利用演化中元胞的转移状态,反映前一时刻到现在时刻的转移过程.交通因素介入情景的具体流程如图 7 所示.

模型的具体构建流程可以分为五个步骤:数据处理、驱动因子计算、RF 模型、CA 转换规则制定、模

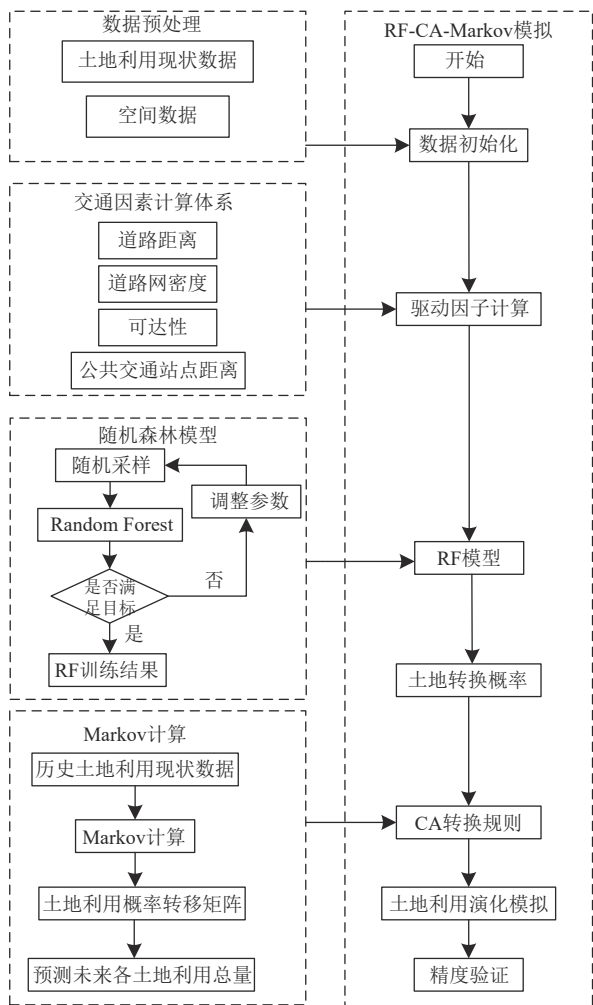


图 7 交通因素介入情景下 RF-CA-Markov 模型流程图

Fig. 7 Flowchart of the RF-CA-Markov model under the scenario of traffic factor intervention

拟与验证.主要步骤如下.

(1)首先进行数据的初始处理,对获取的数据进行预处理和计算,包括对土地利用图的土地类型划分、统一数据坐标系、道路数据裁剪、poi 数据裁剪聚集等.

(2)基于交通因素计算体系进行驱动因子计算,主要包含道路网密度、可达性、道路距离、公共交通站点距离、高程、坡度、人口、GDP 等驱动因子,将所有驱动因子转换为栅格数据格,用于随机森林训练与转换规则制定.

(3)建立随机森林模型对历史土地数据进行训练,得到各类用地的转换概率与驱动因子的贡献值.将土地利用数据与环境因素(高程、坡度等)、交通因素(道路网密度、可达性等)在随机森林模型进行训练,由于随机森林训练的采样比例要求单位是研究区域有效像元数的千分之一,参考现有研究^[26],将决策树总数设置为 20,采样率为 0.1,得到每种类型用地的转换概率以及每种驱动因子对土地演化的贡献值.

(4)预测年需求量的计算和 CA 规则制定,利用 markov 方法计算历史土地利用数据的土地利用概率转移矩阵,以此计算预测年的各类型土地利用总量;将随机森林预测的各类型土地转换概率作为土地转换概率,选择土地区域中是否有限制转换区域,定义土地类型的转换规则,即各种土地之间是否能进行转换;为保证土地转换的准确性,参考前人研究,提高土地转换要求^[27],设定土地转换概率阈值为 0.9,转移概率超过阈值即进行土地类型转换,元胞邻域权重设置为不同类型土地在历史土地演化中的扩展面积之比.随机森林训练后得到的土地类型转换概率图与 markov 方法计算的需求量与转移矩阵结合,利用轮盘赌方法判断元胞是否发生转换.

(5)结合土地利用总量、转换概率与转换规则,进行未来土地利用状态的预测,得到相同间隔时间内的土地利用情况.计算模拟结果的总体精度 OA 值和 Kappa 系数表征模拟的精度.

2.3 模型评价指标

为了评价模型的精度,采用 OA 指数与 Kappa 系数进行模型结果评价.OA 指数与 Kappa 系数可以验证模拟结果与真实数据的一致性程度;OA 指数将预测项目结果与历史真实土地项目相比较;Kappa 系数将模拟土地图像结果与真实土地利用图像相比较.

2.3.1 OA 指数

OA 指数是指总体分类精度,即正确预测的项

目数占有所有将要预测项目的比值^[28],正确预测的项目数越多,OA 值越大,精度越高.OA 值计算公式见公式(6):

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^c T_i}{n}, \quad (6)$$

式中: c 是类别总数, T_i 表示每个类别中正确分类的样本数, n 是样本的总数.

2.3.2 Kappa 系数

Kappa 系数是用于评价两个图像的空间相似度^[29],Kappa 系数越高,证明模拟的精度越高.Kappa 系数计算公式见公式(7)、(8):

$$Kappa = \frac{OA - P}{1 - P}, \quad (7)$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^c m_i \times n_i}{n^2}, \quad (8)$$

式中:式(7)中 P 值由式(8)计算, m_i 指每一种类型的真实样本数, n_i 是每一种类型的预测样本数.

3 模拟结果分析

3.1 土地利用演化模拟结果

利用 2010 年—2015 年的数据开展土地利用演

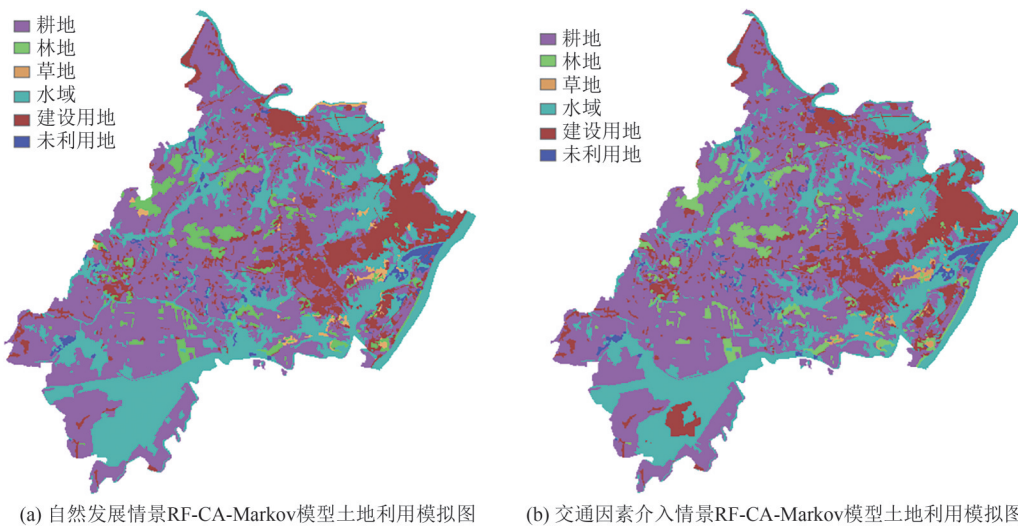


图 8 不同情景下的 2020 年土地利用模拟结果图

Fig. 8 2020 land use simulation results under different patterns

两次模拟的评价指标值见表 3.在自然发展情景下的模拟 Kappa 系数为 0.8078,OA 值为 0.8797,Kappa 系数在 0.8 以上表示预测与原始的土地利用一致性良好,自然发展条件下的 Kappa 系数为 0.8540,OA 值为 0.9069,Kappa 系数与 OA 值相比自然情景下都显著上升.分析结果表明两次模拟结果都符合现实发展趋势,但交通因素介入情景下的模拟精度更高,一致性更强,增强交

化过程的模拟,并将模拟结果与 2020 年真实数据进行对比.首先进行自然发展情景下的 RF-CA-Markov 模型土地演化模拟,将 2010—2015 年的土地利用扩张作为初始数据,与基础驱动因子一起在随机森林算法中进行训练,获取到不同土地利用类型的训练精度和每种驱动因子对该种土地利用类型转换的贡献值,同时得到每种土地利用类型的转换概率,根据制定的 CA 转换规则进行在自然条件下的土地利用演化模拟.

第二次模拟是交通因素介入情景下的 RF-CA-Markov 模型土地模拟,在驱动因子计算时利用交通因素计算体系计算交通因素,模拟中计算的交通因素包含道路网密度、综合可达性、距各级道路的距离、距所有公共交通站点的距离;利用首次模拟中已提取的土地扩张数据,与计算的驱动因子一同训练,其余步骤与首次模拟类似,分别得到不同情景下的土地模拟结果,如图 8 所示.

对比模型结果图像显示,交通因素介入情景下 RF-CA-Markov 模型土地利用模拟结果与 2020 年真实土地利用数据的土地分布特征基本一致,更为相似.

表 3 模拟结果精度系数值

Tab. 3 Accuracy coefficients of simulation results

参数	Kappa 系数	OA 值
自然发展情景	0.8078	0.8797
交通因素介入情景	0.8540	0.9069

通系统的可变性对土地利用的影响,模拟结果的变化更加丰富,更符合现实情况下的土地利用变化.

3.2 交通因素影响分析

3.2.1 土地利用转移矩阵

为了定量分析交通因素对土地演化的影响,统计土地利用转移矩阵,分析不同情景下的土地空间转移特征,分析结果见表 4。从三种情景的整体趋势来看,所有土地类型中耕地转出量最多,主要转变为建设用地;其他类型用地间的转换量较少;不同情景的转移矩阵相比,交通因素介入情景下 RF-CA-Markov 模型的转移矩阵与真实土地演化情景下的转移矩阵分布特征更相近。

从不同演化情景下看,交通因素介入情景下耕地转为建设用地的量更接近真实耕地-建设用地转换量,而自然发展情景下的耕地-建设用地转换量与真实转换量相比差距较大,结合模拟图像与交通因素计算结果图,分析交通因素介入情景下耕地-建设用地转换量更趋近于真实数据的原因是:研究区域中上部分的道路网密度较高,交通更为便利,且就业与购物 poi 在研究区域右边部分分布较多,可达性计算结果显示,poi 点位处的可达性较高,但 poi 邻域处由于 poi 与人口的聚集造成可达性降低,对 poi 邻域处的建设用地转入量进行限制,建设用地不会无序增长,更符合真实演化特征;交通因素介入情

景模拟结果中,研究区域中左下部分发生大面积建设面积转换,由于交通因素中可达性与公共站点距离增大了转换为建设用地的概率,与真实土地利用图中左下角发生的建设用地转换更为相似。

分析结果表明:在土地演化模拟中加入交通因子计算体系,对人口密集的区域建设用地的无序开发进行限制,并增高了可达性较高、公共站点距离较近的建设用地转换概率,更符合真实土地演化特征,提高了土地演化模拟精度。因此在未来土地演化模拟中考虑交通系统的影响是有必要的,不仅提高了模型模拟精度,且演化趋势更能体现城市可持续发展的发展战略,能将未来预测土地利用图作为国土空间规划发展的参考,符合未来城市经济发展趋势,有利于社会经济发展与生态环境的协调稳定发展。

3.2.2 景观指数

为了更直观量化研究区域各类用地在不同模拟情景下的景观结构和生态格局,引入景观指数从多个角度对土地格局进行分析,研究从形状、聚集度与景观多样性三个维度选取 6 个指标进行分析,见表 5。

蔡甸区在景观水平下的景观指数计算结果见表 6。从景观形状来看,交通因素介入情景下更接近

表 4 2015—2020 年土地利用转移量矩阵
Tab. 4 Land use transfer matrix from 2015 to 2020

	土地类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
真实土地演化情景	耕地	596816	2919	201	7541	13446	685
	林地	2116	53400	101	0	772	275
	草地	2069	623	7419	0	1035	324
	水域	6263	3476	1252	310690	7009	1509
	建设用地	1759	2462	1296	908	170843	664
	未利用地	1285	48	20	0	1137	16071
	总计	610308	59928	9289	309139	198242	19528
自然发展情景	耕地	588646	1981	758	621	28654	948
	林地	2977	52485	146	0	651	405
	草地	1782	102	8417	0	113	1056
	水域	27127	3369	1915	290288	6544	956
	建设用地	2988	2626	1892	812	168901	713
	未利用地	1236	93	237	0	5220	11775
	总计	624756	60656	13365	291721	210083	15853
交通因素介入情景	耕地	601057	717	24	3693	16102	15
	林地	25	55797	9	0	813	20
	草地	16	30	10881	0	449	94
	水域	1003	176	341	325093	3488	98
	建设用地	1708	2753	973	0	171778	720
	未利用地	34	2	1	0	172	18352
	总计	603843	59475	12229	328786	192802	19299

表 5 景观指数与说明

Tab. 5 Landscape index and description

类型	指标名称	应用尺度	单位	指标含义
形状指标	景观形状指数(LSI)	类型/景观		反映景观的形状的复杂程度,值越大景观形状越复杂
	周长面积分维数(PAFRAC)	类型/景观		反映景观的复杂程度与抗干扰能力,值接近 2 时越复杂,受干扰程度较大
聚集度指标	景观分割指数(DIVISION)	类型/景观	%	反映景观中斑块的分离程度,值越大表示景观分布复杂,破碎程度高
	蔓延度指数(CONTAG)	景观	%	反映景观的聚集程度与延展趋势,值越大说明景观中某种斑块类型有良好的连接性
多样性指标	香农多样性指数(SHDI)	景观		反映景观的异质性与多样性,值越大景观中土地利用丰富
	香农均匀度指数(SHEI)	景观		反映景观的多样性,值趋近 1 表示景观中各斑块分布均匀

表 6 蔡甸区景观水平下的景观指数对比

Tab. 6 Comparison of landscape index at the landscape level in Caidian District

	LSI	PAFRAC	DIVISION	CONTAG	SHDI	SHEI
真实土地情景	27.3803	1.3456	0.8966	59.7794	1.1121	0.5765
自然发展情景	18.1880	1.2534	0.579	69.1006	1.1006	0.5656
交通因素介入情景	20.4686	1.2592	0.5805	68.9371	1.0920	0.5612

真实土地情景, LSI 值与 PAFRAC 值较高, 景观中斑块形状较为复杂, 由于交通因素的介入, 斑块发展受到人为干扰, 交通因素计算值表现良好的斑块更吸引人们在该区域建立更为复杂的景观斑块, 引起斑块的形状复杂度升高; 从景观聚集度来看, 与自然发展情景相比, 交通因素介入情景下的 DIVISION 值更高, CONTAG 值更低, 与真实情景下更接近, 景观斑块分散程度更高且分布复杂, 交通因素介入引起建设斑块的增加, 高道路网密度、高可达性、道路距离短等因素导致其他类型景观的断裂, 造成斑块的聚集程度降低, 更符合真实土地区域性开发的特点; 从景观多样性分析, SHDI 值与 SHEI 值显示自然发展情景与交通因素介入情景下景观的多样性与异质性较为一致, 交通因素的介入没有显著削弱景观的生态与结构多样性, 显示蔡甸区合理的交通规划与设计确保了景观的生态完整性与空间异质性共存。

4 结论

本文构建基于交通因素计算体系的 RF-CA-Markov 模型, 模拟了不同情景下武汉蔡甸区的土地利用格局演化进程, 并分析交通系统对土地演化的影响, 主要结论如下:

(1) 建立了包括道路网密度、可达性、道路距离、站点距离的交通因素体系与计算方法, 系统全面地计算影响土地演化模拟的交通因素; 并将交通因素计算体系融入 RF-CA-Markov 土地演化模型, 对武汉蔡甸区土地演化进行交通因素介入情景模拟, 与自然发展条件下的模拟结果相比, 评价指标

Kappa 系数与 OA 值都有明显增高, 表明加入了交通因素计算体系的模型精度更高, 模拟更为精确。

(2) 交通因素介入情景下蔡甸区的土地利用类型变化主要表现为耕地向建设用地转移, 交通因素计算值表现良好的区域建设用地转移更为聚集, 促进了有较大开发潜力的非建设用地的开发; 交通因素介入能够对土地扩张趋势中建设用地增长速度较快的区域进行开发限制, 改善了传统土地演化中无序开发引起拥堵与聚集的问题。

(3) 相比自然发展情景, 交通因素介入情景下景观分散度与破碎度升高, 斑块形状更为复杂, 且景观中各类型的斑块分散程度增大, 连接性降低, 土地发展更分散均匀, 但景观多样性仍保持一致。交通因素的介入在一定程度上塑造了蔡甸区的景观格局, 既带来了一定的复杂性与分散性, 同时也维持了景观的生态完整性。

参 考 文 献

- [1] WADDELL P. UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning[J]. Journal of the American Planning Association, 2002, 68(3): 297-314.
- [2] MOKARRAM M, POURGHASEMI H R, HU M, et al. Determining and forecasting drought susceptibility in southwestern Iran using multi-criteria decision-making (MCDM) coupled with CA-Markov model[J]. Science of the Total Environment, 2021, 781: 146703.
- [3] 宋亚男. 基于用地竞争力评价的潜在土地利用冲突研究——以南京市为例[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [4] 李星, 周京春, 金婷婷, 等. 滇中城市群土地利用/覆盖变化(LUCC)空间模拟研究[J]. 生态与农村环境学

- 报, 2022, 38(10): 1318-1329.
- [5] 王森, 彭立. 权衡生态保护与经济发 展的土地利用多情景模拟[J]. 生态学报, 2023, 43(23): 9938-9951.
- [6] CHEN L T, CAI H S, ZHANG T, et al. Land use multi-scenario simulation analysis of Rao River Basin based on Markov-FLUS model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(10): 3947-3958.
- [7] 陈凯, 刘凯, 柳林, 等. 基于随机森林的元胞自动机城市扩展模拟——以佛山市为例[J]. 地理科学进展, 2015, 34(8): 937-946.
- [8] 张大川, 刘小平, 姚尧, 等. 基于随机森林CA的东莞市多类土地利用变化模拟[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(5): 29-36, 127.
- [9] 谭章智, 李少英, 黎夏, 等. 城市轨道交通对土地利用变化的时空效应[J]. 地理学报, 2017, 72(5): 850-862.
- [10] 刘诗奇, 郭静, 李若溪, 等. 北京轨道交通典型站点周边的土地利用特征分析[J]. 城市发展研究, 2014, 21(4): 66-71.
- [11] 陆晴, 刘根林, 闫冰, 等. 道路网络对景观格局及景观生态风险的影响——以瑞兴于地区为例[J]. 生态学杂志, 2022, 41(11): 2236-2244.
- [12] 胡昂, 刘杰, 李想, 等. 多中心城市轨道交通典型站域的土地利用特征演化研究——以日本东京为例[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(5): 746-757.
- [13] 何尹杰, 吴大放, 刘艳艳, 等. 城市轨道交通对土地利用变化的影响——以广州市3、7号线为例[J]. 经济地理, 2021, 41(6): 171-179.
- [14] 胡金晓, 朱明, 濮俊杰, 等. 交通道路对区域土地利用变化的影响研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1): 205-214.
- [15] 游青华, 李艳红, 黄金亮, 等. 交通道路网中时间感知的空间关键词查询[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 197-203.
- [16] 任佳宇, 李艳红, 冯雨. 考虑可达性的Top- k 空间关键词查询[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 740-748.
- [17] 赵威, 薛领. 区域开发策略对农业土地利用格局影响的动态模拟——以云南省为例[J]. 开发研究, 2022(5): 58-71.
- [18] 王子琳, 李志刚, 程晗蓓. 中国大城市公园绿地可达性的公平性研究——以武汉市中心城区为例[J]. 地理科学进展, 2022, 41(4): 621-635.
- [19] 黄应淮, 刘小平, 刘艳平, 等. 基于高德地图API的多种交通方式下城市公园时空可达性分析——以广州市海珠区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2018, 34(6): 50-57, 1.
- [20] 董小刚, 乔庆华, 翟亮, 等. 基于改进引力模型的广场公园可达性研究[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(10): 1518-1526.
- [21] KAVHU B, ERIC MASHIMBYE Z, LUVUNO L. Characterising social-ecological drivers of landuse/cover change in a complex transboundary basin using singular or ensemble machine learning [J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2022, 27: 100773.
- [22] 林素丽, 王枫. 基于PLUS模型并顾及交通规划的广州市土地利用情景模拟与分析[J]. 农业资源与环境学报, 2023(3): 557-569.
- [23] 王家丰, 王蓉, 冯永玖, 等. 顾及轨道交通影响的浙中城市群土地利用多情景模拟与分析[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 605-615.
- [24] YU X R, XIAO J T, HUANG K, et al. Simulation of land use based on multiple models in the western Sichuan Plateau [J]. *Remote Sens*, 2023, 15: 3629.
- [25] LIANG X, GUAN Q F, CLARKE K C, et al. Mixed-cell cellular automata: A new approach for simulating the spatio-temporal dynamics of mixed land use structures [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 205: 103960.
- [26] 胡俊聪, 何华贵, 陈朝霞. 基于PLUS模型的土地利用多情景模拟与时空特征分析[J]. 测绘通报, 2023(10): 28-33.
- [27] 赵祖伦. 基于Markov-FLUS模型的城市增长边界划定研究——以重庆主城区为例[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [28] ZHANG Y, CHANG X, LIU Y F, et al. Urban expansion simulation under constraint of multiple ecosystem services (MESs) based on cellular automata (CA)-Markov model: Scenario analysis and policy implications [J]. *Land Use Policy*, 2021, 108: 105667.
- [29] FU F, DENG S M, WU D, et al. Research on the spatiotemporal evolution of land use landscape pattern in a county area based on CA-Markov model [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 80: 103760.

(责编&校对 刘钊)