

引用格式: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.
[Wang J F, Wang R, Feng Y J, et al. Simulating land use patterns of the Mid-Zhejiang urban agglomeration considering the effects of urban rail transit[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):605-615.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190305

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

王家丰¹,王 蓉²,冯永玖^{1*},雷振坤²,高 忱²,陈书睿²,金雁敏¹,翟淑婷²

1. 同济大学测绘与地理信息学院,上海 200092; 2. 上海海洋大学海洋科学学院,上海 201306

Simulating Land Use Patterns of the Mid-Zhejiang Urban Agglomeration Considering the Effects of Urban Rail Transit

WANG Jiafeng¹, WANG Rong², FENG Yongjiu^{1*}, LEI Zhenkun², GAO Chen², CHEN Shurui²,
JIN Yanmin¹, ZHAI Shuting²

1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Urban rail transit possesses significant impacts on land use change and urban development. This study applies Future Land Use Simulation Model (FLUS) to reproduce land use change from 2000 to 2010 in the Mid-Zhejiang urban agglomeration based on GlobeLand30 datasets. The simulation results in 2010 show that the FLUS model can reproduce a realistic land use pattern with an overall accuracy of 89.74% and FOM 29.86%. A Markov chain is then used to predict the total land demand in 2030 for predicting future land use scenarios. We design two scenarios: the scenario of business-as-usual (BAU-scenario) and the scenario based on planned urban rail transit sites (RTS-scenario). Within 5 km from the urban rail transit, the RTS-scenario yields a significant effect on built-up areas with an increasing expansion intensity, where the newly built-up areas are allocated in the suburb and are greater than that produced by BAU-scenario by 45.25 km². The newly built-up cells mainly occupy high-quality farmland. The farmland transformed to built-up area is higher in RTS-scenario than in BAU-scenario by 33.34 km². We categorize the built-up expansion intensity (BUI) into five levels: lowest, low, medium, high and highest. The BUI for RTS-scenario is higher than that for BAU-scenario because the former's proportion of expansion intensity above the lowest level is 3.70% greater than of latter. Spatial patterns for forest, grassland and water are similar between both scenarios. This study not only indicates that FLUS can be used to capture land use change and predict future scenarios, but also helps to examine the effects of urban rail transit site plans in the Mid-Zhejiang urban agglomeration.

Key words: land use; rail transit sites; cellular automata; FLUS; BAU-scenario; RTS-scenario; built-up expansion intensity; Mid-Zhejiang Urban Agglomeration

收稿日期:2019-06-13;修回日期:2020-02-25.

基金项目:国家自然科学基金项目(41771414,41601414);上海市科委“扬帆计划”项目(16YF1412200)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41771414, 41601414; Shanghai Sailing Program, No.16YF1412200.]

作者简介:王家丰(1992—),男,安徽阜阳人,硕士生,主要从事空间数据分析与SAR应用研究。

E-mail: m170300595@st.shou.edu.cn

*通讯作者:冯永玖(1981—),男,云南镇雄人,教授、博士生导师,主要从事地理信息系统建模与空间分析研究。

E-mail: yjfeng@tongji.edu.cn

*Corresponding author: FENG Yongjiu, E-mail: yjfeng@tongji.edu.cn

摘要:土地利用变化受到地形地貌、自然环境、城市规划和经济发展等的影响,预测其未来情景对政策调整具有重要的参考意义。元胞自动机模型是模拟和预测不同规划政策下土地利用变化的常用方法。本文基于GlobeLand30数据集,利用浙中城市群2000—2010年土地利用变化校准FLUS模型,并模拟2010年土地利用格局,其总体精度、Kappa系数和图形优化(FOM)分别为89.74%、82.69%和29.86%。采用马尔可夫链预测2030年各类型土地总量,利用FLUS预测一般条件下(常规情景)和城市轨道交通规划站点影响下(轨交情景)浙中城市群未来土地格局。结果表明,在5 km范围内城市轨道交通站点对建设用地增长影响较大,在该区域轨交情景比常规情景面积增加45.25 km²、且主要发生在城市边缘区。建设用地扩张主要通过侵占优质农田实现,轨交情景5 km范围内农田转化为建设用地比常规情景增加33.34 km²,建设用地扩张强度高于常规情景,其中最低扩张强度以上占比高于常规情景3.70%。景观指数表明,2种情景中林地、草地和水域格局具有较高相似性。本研究表明,综合使用FLUS、遥感、GIS等技术方法,能够准确模拟和预测不同规划条件下未来土地利用格局,并为规划和政策调整提供高可信空间数据。

关键词:土地利用;轨道交通站点;元胞自动机;FLUS;轨交情景;常规情景;城市扩张强度;浙中城市群

1 引言

土地利用变化是自然和人类活动综合作用的复杂动态过程^[1]。随着城镇一体化加速和经济发展,城市用地快速扩张、格局发生显著变化,土地资源承受的压力日益凸显。考虑各种自然和政策因素的影响,对土地利用历史过程与未来情景进行模拟预测,在城市规划决策和环境变化分析中具有重要意义^[2-4],而其模拟和预测可以通过元胞自动机(CA)方法实现。国际人文地理百科全书“Cellular Automata”词条指出^[5],CA是模拟土地利用变化、预测未来土地利用格局的常用方法。该方法通过自下而上的建模,利用全局影响机制和局部转换规则模拟复杂的土地利用格局。在土地利用模拟中,CA通过分析和挖掘历史土地利用变化规律而预测未来土地利用情景^[6-7]。常用的CA模型有CLUE-S、SLEUTH、Markov-CA、UrbanCA和FLUS^[8-12]等,其中UrbanCA是一个新出现的融合空间统计算法和启发式优化算法的城市扩张模拟软件^[11,13]。FLUS是适用于多类别土地利用变化模拟、预测和分析的CA模型工具,在建模中可以考虑自然、经济和人类活动影响等因素,在不同尺度的土地利用和城市扩张模拟中得到了应用^[2,12,14]。

交通网络是影响城市土地利用格局和未来情景的重要因素,其规划指引城市发展方向;在CA建模中考虑交通规划,将提高模拟精度并使预测的城市空间格局更加可信^[15-16]。城市快速发展促进了对城市轨道交通的需求,进而交互影响土地利用与城市空间的演变^[17]。轨交站点提高了其周边地区的通达性、减少出行时间和成本,加速响应区域的经济发展和土地开发^[18-21]、提升周边土地利用强度^[22-23]。

研究表明,城市轨道交通对大都市外围也具有重要影响,有学者认为其影响甚至高于市中心^[24]。为缓解城市核心区土地利用紧缺与交通拥堵的矛盾,我国大部分城市明确了以轨道交通为导向的城市发展模式,而目前不少站点周边土地利用结构不合理(如尚未建设住宅区)^[25]。合理规划轨道交通对完善土地利用结构、功能和挖掘土地资源开发潜力等具有引导性作用,促进城市合理开发和可持续发展^[26-27]。针对轨道交通站点与土地利用的关系,探索各类型土地利用相互转化趋势,有助于预测未来城市格局和轨道交通对城市空间的影响^[28]。

城市轨道交通是长江三角洲城市间的重要交通方式。浙中城市群是浙江省融入长江三角洲的主体城市群之一,其轨道交通已远期规划至2030年,是探讨其对土地利用影响的理想研究区。本文通过2000—2010年土地利用变化校准FLUS模型并模拟研究区2010年土地利用格局,并预测2030年浙中城市群土地利用情景,为探讨城市轨道交通规划的影响提供空间信息参考。

2 研究区概况、数据源及研究方法

2.1 研究区概况

浙中城市群区包括金华全市、衢州市的龙游县、丽水市的缙云县和绍兴市南部(图1(a))^[29];其中金华市是浙中城市群主体,将其作为本研究的案例区域(后简称为浙中城市群)。该研究区包括2个市辖区(婺城区和金东区),4个县级市(兰溪市、义乌市、东阳市和永康市)和3个县(浦江县、武义县和磐安县),总面积10 941 km²(图1(b)),各行政区通过公路、铁路和规划的城市轨道交通相连。城市轨道

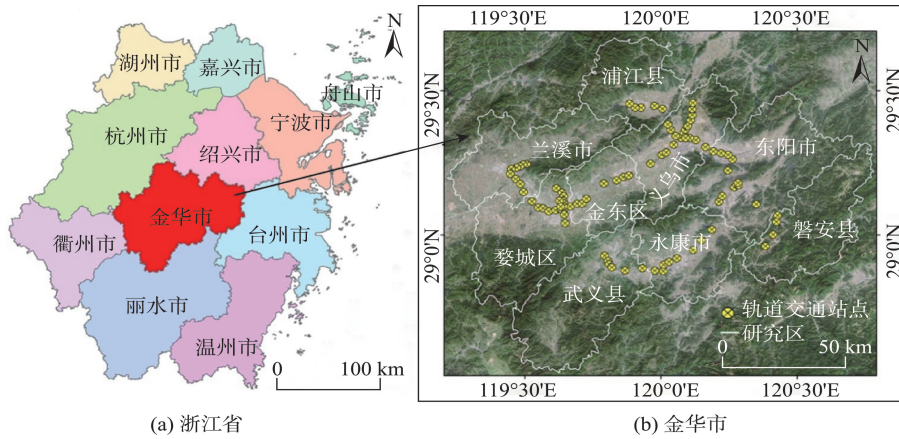


图1 研究区位置、行政区划和规划城市轨道交通站点

Fig. 1 Study area: location, administrative boundaries and planned urban rail transit sites

交通规划资料来源于金华市自然资源局与规划局 (www.jhup.gov.cn)。采用地理配准将规划图与研究区进行空间匹配,通过数字化方式提取城市轨道交通站点。图1(b)表明,轨道交通站点在城市群各行政区存在分布差异,可能会对各区未来土地利用格局产生不同的影响。

2.2 数据来源

GlobeLand30数据集来源于全国地理信息资源目录服务系统^[30],包含2000年和2010年土地利用图,研究称其总体分类精度超过80%^[31-32],被广泛用于土地利用变化和城市扩张模拟研究中^[33-34]。在CA建模中通过历史数据校准CA模型进而预测未来情景,是检验CA模型的常用方法^[3,34],其条件是默认土地利用变化机理稳定的情况下CA是否能够预测未来情景。因此,本文采用GlobeLand30数据(2000和2010)作为建模的基础土地利用数据。

将GlobeLand30数据集裁剪为5052行×5620列,并归并为5类:农田、林地、草地、水域与建设用

地(图2)。2000—2010年建设用地在原有区域周边向外扩张,主要集中在婺城、义乌和东阳。其中,农田用地急剧减少、主要转换为建设用地;林地、草地和水域用地变化不显著。为量化2000—2010年各类型土地利用的转换,通过逐像元对比计算土地利用转移矩阵(表1):农田用地转出显著,主要流向林地和建设用地、流向水域最少;林地、草地和水域用地转入和转出较为均衡,林地主要流向农田和草地,流向水域和建设用地面积均约10 km²;草地流向林地面积最多,达到118 km²;水域用地流向农田面积超过15 km²,流向林地、草地和建设用地面积均低于10 km²;建设用地转入量最多,同时流向农田、面积约为25 km²。

2.3 研究方法

2.2.1 土地利用空间驱动因子选取

本文采用多种类型的驱动因子来解释土地利用变化(表2)。其中,地形因子包括高程和坡度^[35]

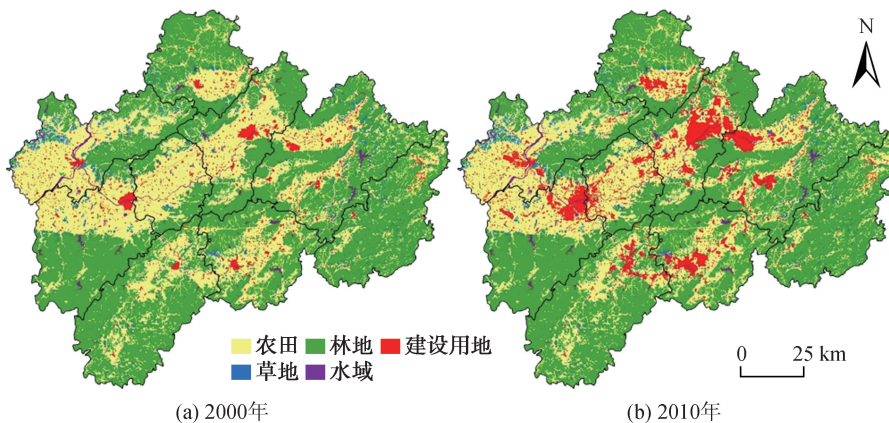


图2 2000年和2010年基于GlobeLand30的浙中城市群土地利用格局

Fig. 2 Land use patterns of the Mid-Zhejiang Urban Agglomeration derived from GlobeLand30 in 2000 and 2010

表1 2000—2010年浙中城市群土地利用面积转移矩阵

Tab. 1 Land use transition matrix of the Mid-Zhejiang Urban Agglomeration from 2000 to 2010 (km²)

类型	2010年					
	农田	林地	草地	水域	建设用地	总计
2000年 农田	3479.41	167.68	38.01	18.75	514.06	4217.91
林地	135.87	5506.24	130.84	12.09	9.66	5794.70
草地	61.53	118.18	296.80	1.34	5.73	483.59
水域	17.64	8.55	0.76	129.02	3.59	159.57
建设用地	25.27	1.23	0.64	0.99	262.05	290.19
总计	3719.73	5801.88	467.06	162.20	795.09	10 945.96

(图3(a)–(b)),社会经济因子包括人口和国民生产总值^[36–37](图3(c)–(d)),区位因子包括到市中心和到区县中心的距离(图3(e)–(f)),交通因子包括到主干道和到铁路的距离(图3(g)–(h))。针对未来情景,大多研究考虑某政策和规划调整、土地利用变化机理稳定等情况下预测未来土地利用格局^[2,10]。由于驱动因子存在交互作用,为了探讨城市轨道交通对土地利用变化的影响,本文重点探讨到轨道交通的距

离如何影响浙中城市群未来土地利用格局模拟和预测。为了使得人口和国民生产总值与城市扩张呈正相关关系,采用POP和GDP的倒数作为驱动因子。为了统一研究区土地利用数据的尺度,本文将社会经济要素的空间分辨率重采样为30 m;同时,采用Feng等^[38]的方法对所有驱动因子进行归一化处理(即表达为无量纲因子),消除量纲对挖掘影响因子参数的影响。

表2 土地利用变化的空间驱动因子

Tab. 2 The spatial driving factors of land use change

类别	变量	简称	分辨率/m	年份	意义	来源
地形	高程	DEM	30	2009	评估地形要素对土地利用的影响	www.gscloud.cn
	坡度	Slope	30	2009		计算高程数据的坡度
社会经济	人口	POP	90	2015	评估社会经济要素对土地利用的影响	www.worldpop.org
	经济	GDP	900	2010		www.ngdc.noaa.gov
区位	到市中心的距离	DisCity	30	2010	行政中心邻近度对土地利用的影响	ArcGIS 计算对应矢量数据的欧氏距离。
	到区中心的距离	DisCounty	30			
交通	到主干道的距离	DisRoad	30		道路邻近度对土地利用的影响	矢量数据来源: www.openstreetmap.org
	到轨道交通的距离	DisRail	30			

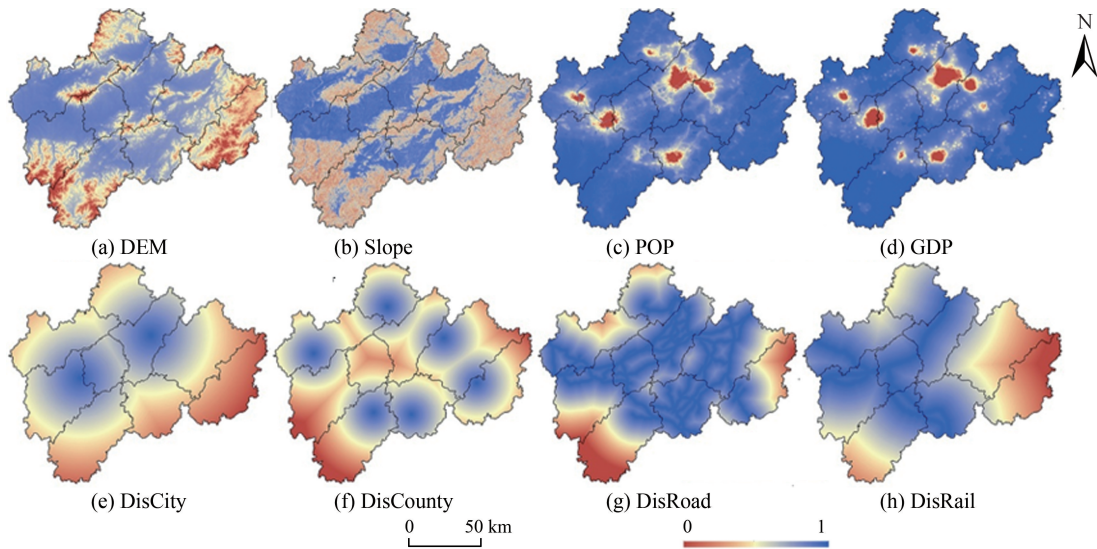


图3 2000—2010年土地利用变化驱动因子

Fig. 3 Spatially visualized driving factors of land use change from 2000 to 2010

2.2.2 FLUS模型与模拟评价

FLUS是一种复合CA模型,利用人工神经网络计算各元胞的转移概率,从而模拟土地利用变化、并预测在人类和气候变化影响下未来土地利用情景^[12]。FLUS模型通过对历史土地利用格局和驱动因子采样,训练模型并计算各类别土地利用的转移概率,通过邻域结构和自适应系数进行总体转移概率计算。此外,当迭代次数或各土地利用达到数量需求时停止模拟。在预测未来土地利用情景时,该模型可通过系统动力学或马尔可夫链计算未来各类别土地利用数量。

为定量评估模拟结果,对模拟与真实土地利用格局进行比对产生误差矩阵,计算得到总体精度和Kappa系数反映模拟结果的整体性。使用图形优化(Figure of Merit, FOM)指数来衡量模拟与真实变化的一致性^[39],该指数表示为^[40]:

$$FOM = \frac{A}{A+B+C+D} \quad (1)$$

式中: A 表示真实变化被正确模拟; B 表示真实变化在模拟中被遗漏; C 表示真实变化被错误模拟为其他类别; D 表示真实未变化被模拟为变化。

未来土地利用格局在不同影响条件下存在差异,只采用目视对比方式无法表现空间结构的差异性。景观指数可用于量化不同预测情景的空间结构差异性^[13],且可从多个角度分析斑块空间结构,如斑块形状、大小和优势度等。景观指数可分为景观、类型和斑块3个级别。本文采用9个类型级景观指数,包括反映斑块面积的最大斑块指数(LPI),反映形状复杂性的周长—面积分形维数(PAFRAC)、反映斑块聚集度的从生度(CLUMPY)、相似临近百分比(PLADJ)、散布与并列指数(IJI)、斑块结合指数

(COHESION)、分离度指数(DIVISION)和聚合度指数(AI)。

3 结果与分析

3.1 模拟模型验证与精度分析

在利用FLUS中人工神经网络计算土地利用的转移概率时,其隐藏层个数设置为12,以1%像元数对土地利用和空间驱动因子进行系统采样,样本作为神经网络的训练集。针对邻域设置,研究表明采用 5×5 Moore邻域结构的CA模型模拟结果精度较高^[41],因此本文采用该邻域结构。本文设定建设用地不能发展为其他类型土地利用,水域不能发展为建设用地,其他土地类型可以相互转化。

为校准FLUS模型,以2000年为初始模拟城市群2010年土地利用格局;实际与模拟土地利用格局如图4所示。目视对比表明,模拟结果与真实土地利用格局总体高度相似。模拟结果中建设用地更加聚集(区域1),少量农田在模拟中被分配为建设用地(区域2)。通过逐像元方法对实际格局和模拟格局进行对比,计算其误差矩阵从而量化模拟精度(表3)。结果表明,2010年模拟结果的总体精度为89.74%、Kappa为82.69%、FOM为29.86%,3个指标均能与目前大多数模拟模型和案例研究中的精度相当;这指示,FLUS模型能够以较高精度模拟出接近真实的土地利用格局,因而具有很好的稳健性并能支持多种情况下的未来土地利用情景预测。

3.2 不同情景下土地利用转移概率

本文设计了2种情景反映轨道交通站点对城市群未来土地利用格局的影响。常规情景根据研究

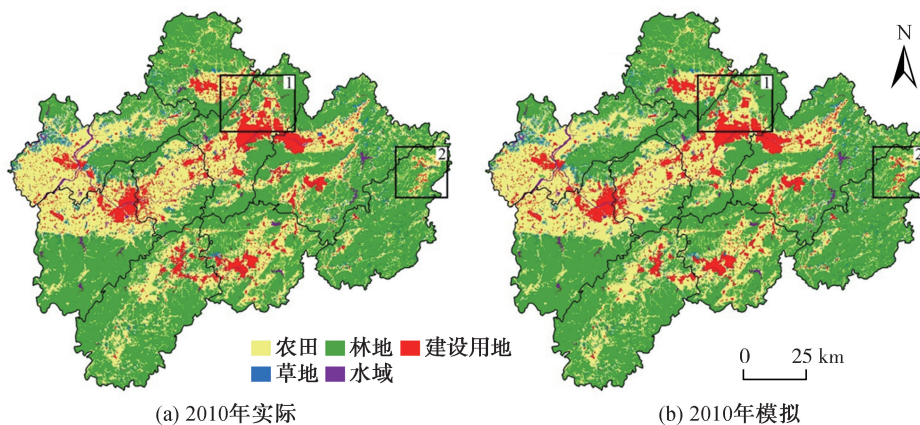


图4 浙中城市群2010年真实与模拟土地利用格局

Fig. 4 Comparison of the actual and simulated land use patterns in 2010

表3 2010年土地利用模拟误差矩阵与精度评估

Tab. 3 Error matrix and accuracy assessment of land use simulation in 2010

(km²)

类型	2010年真实					总计	
	农田	林地	草地	水域	建设用地		
2010年 模拟	农田	329.41	18.08	11.75	1.74	10.24	371.22
	林地	14.05	550.91	13.61	1.21	0.93	580.71
	草地	14.79	10.73	21.01	0.12	0.30	46.95
	水域	2.00	0.90	0.10	12.90	0.39	16.29
	建设用地	11.28	0.25	0.25	0.30	67.35	79.43
	总计	371.53	580.87	46.72	16.27	79.21	1094.60
总体精度/%						89.74	
Kappa /%						82.69	
FOM/%						29.86	

区过去10年土地利用变化趋势设定,不强调其他因素的影响;轨交情景重点考虑城市轨道交通规划站点对土地利用的影响。2种情景下各类型土地利用转移概率如图5所示。采用等间距法将转移概率分为5级:最低、较低、中等、较高和最高。目视判别表明,2种情景下各土地利用转移概率格局相似,但各类型土地利用的转移概率仍存在统计性差异。为表现空间分布差异,从轨道情景转移概率中减去常规情景获得转移概率差异图。轨交情景下,农田的转移概率整体上高于常规情景,林地和水域的转移概率低于常规情景,草地转移概率整体高于常规情景,建设用地转移概率仅在已有建设用地周围高于常规情景。

3.3 2030土地利用格局预测

通过马尔可夫链可以预测未来各类别土地利用数量,该方法已被广泛应用在CA模拟研究中^[42-43]。本文借助马尔可夫链分析2000—2010年城市群土地利用变化趋势,预测2030年各土地类型数量。结果表明,2030年城市群较2010年减少农田640.20 km²、林地44.91 km²、草地34.32 km²,增加水域2.55 km²、建设用地706.89 km²。基于2种情景的模拟显示,新增建设用地主要以侵占农田为代价,分布在已有建设用地周围(图6)。宏观上,2种情景下各类型土地空间格局相似。为表现2种情景模拟结果的空间差异,从中选取并放大2个子区域(图6区域1,区域2)。轨交情景下,婺城和金东建设用地相对于常规

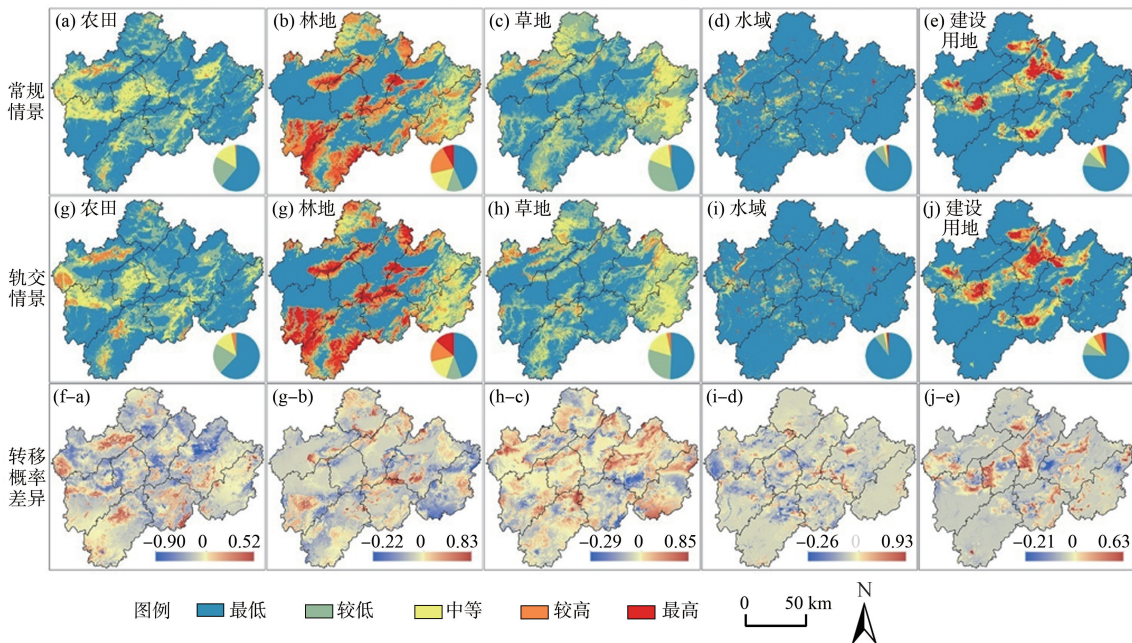


图5 不同情景下各土地利用转移概率及其统计分布

Fig. 5 Land use transition probabilities and their statistics under the two scenarios

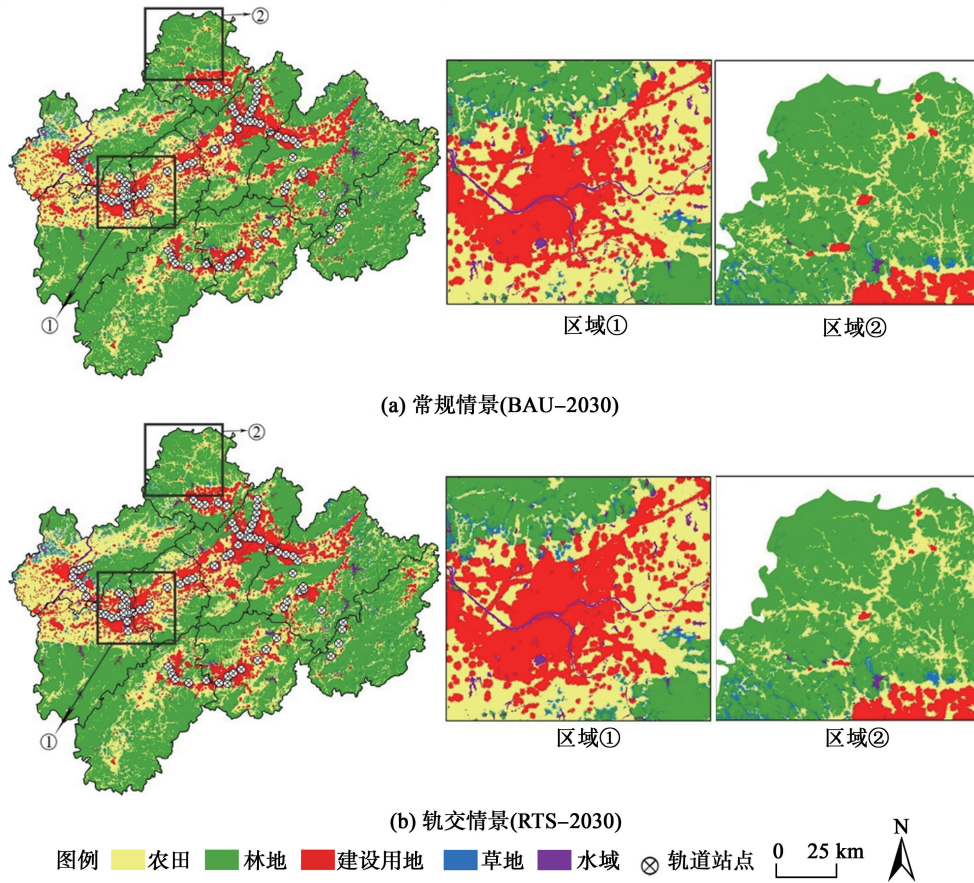


图6 浙中城市群2030年土地利用格局

Fig. 6 The Land use patterns of the Mid-Zhejiang urban agglomeration in 2030

情景更加聚集, 建设用地以填充式发展 (Infill Development) 为主; 浦江县在常规情景下建设用地扩张相比轨交情景更倾向于外延式扩张, 表明城市轨道交通对土地利用的影响可能与到轨道站点的距离有关。

利用景观指数评估了2种情景在面积—边缘 (Area-Edge)、形状 (Shape) 和聚集度 (Aggregation) 等方面的空间结构差异与相似性 (表4)。草地、水域和建设用地具有相似的LPI指数, 农田LPI指数

在轨交情景中小于常规情景, 林地LPI指数在轨交情景中大于常规情景, 说明轨道站点影响下农田更加破碎、林地更加聚集。各类型土地利用的PAFRAC指数在2种情景下最大差异只有0.11%, 指示各类型土地利用空间格局的复杂性相似。DIVISION、CLUMPY 和 COHESION 指数表明, 2种情景下各土地利用空间连接和聚集度高度相似。IJI 指数表明, 常规情景下农田和林地与其他土地利用类型相邻程度要高于轨交情景, 而草地、水域和

表4 2种情景下土地利用格局的景观指数对比

Tab. 4 Landscape metrics of the two predicted land use scenarios

景观指数	常规情景					轨交情景				
	农田	林地	草地	水域	建设用地	农田	林地	草地	水域	建设用地
LPI	6.67	14.48	0.02	0.29	3.56	4.74	15.94	0.02	0.29	3.54
PAFRAC	1.44	1.47	1.55	1.47	1.37	1.55	1.54	1.62	1.47	1.37
DIVISION	0.99	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	1.00	1.00	1.00
IJI	84.85	64.52	48.42	80.24	41.18	80.59	61.37	51.45	81.58	42.81
PLADJ	89.89	94.25	52.05	77.63	93.25	87.55	93.05	45.00	77.82	93.66
AI	89.94	94.29	52.12	77.81	93.32	87.60	93.08	45.06	78.01	93.73
CLUMPY	0.86	0.88	0.50	0.77	0.92	0.83	0.85	0.43	0.78	0.93
COHESION	99.65	99.90	84.77	97.12	99.49	99.59	99.91	85.03	97.09	99.52

建设用地在轨交情景中的分布均为程度低于常规情景。PLADJ和AI指数表明,农田和草地的连接度和聚合度在常规情景中要高于轨交情景,说明轨道交通站点使得农田和草地斑块更为破碎。综上,水域在2种情景下的景观格局数没有显著差异,林地和草地在2种情景中景观差异较小,农田和建设用地景观指数差异最大,表明城市轨道交通对水域影响最小,而对农田和建设用地的影响最大。

本文对城市轨道交通站点建立5 km缓冲区,分析缓冲区内土地利用变化。城市轨道交通对农田和建设用地影响最大,所以本文只统计农田和建设用地在缓冲区内的占比(图7(a)-(c))。统计表明,2种情景下缓冲区内建设用地扩张主要通过侵占农田实现,而林地、草地和水域变化很小。轨交情景中建设用地面积比在常规情景中多42.25 km²,说明轨道交通站点促进了周边建设用地发展。此外,本文计算了建设用地年均扩张强度^[44],将其等间距分为5个等级(图7(d)-(e))。大部分区域的建设用地扩张强度在两种情景下处于“最低”等级,但是在轨交情景中“较低”以上等级的扩张强度比常规情景高3.70%。轨道交通站点对建设用地的影响主要集中在婺城、金东和义乌,其扩张强度明显高于常规情景,扩张强度等级主要为“中等”和“较高”,轨道交通站点对建设用地的影响主要表现在城市边缘区。

4 讨论

预测城市轨道交通规划影响下的未来土地利用格局,对合理规划土地及其政策调整具有重要指导意义。本文以浙中城市群为例,利用FLUS模型模拟城市群2000—2010年土地利用变化并验证模型可靠性,进而预测常规情景和轨交情境下未来土地利用格局。在模型校正阶段,模拟总体精度为89.74%、Kappa值为82.69%、FOM为29.86%。根据Pontius等^[40]的研究,大部分模型和区域的模拟结果FOM在1%~30%范围内,说明FLUS模型能够真实地模拟浙中城市群土地利用变化,这主要源于FLUS采用自适应准则和竞争机制^[12],使结果具有较高可信度。此外,FLUS模型也同时被用于珠江三角洲的城市增长模拟和城市增长边界划定^[2],以及不同尺度下多类别土地利用格局模拟预测。如Liu等^[12]利用FLUS模型耦合人类和自然效应预测了中国大陆2050年土地利用格局,Li等^[14]利用FLUS预测了2050—2100年全球多类别土地利用格局。FLUS在不同区域预测未来土地利用变化的成功应用,说明该模型可用于捕捉土地利用的复杂转化。

本文利用马尔可夫链预测土地利用需求时,所计算的2020年农田和建设用地面积分别为3351.08 km²和1190.24 km²。农田和建设用地的预

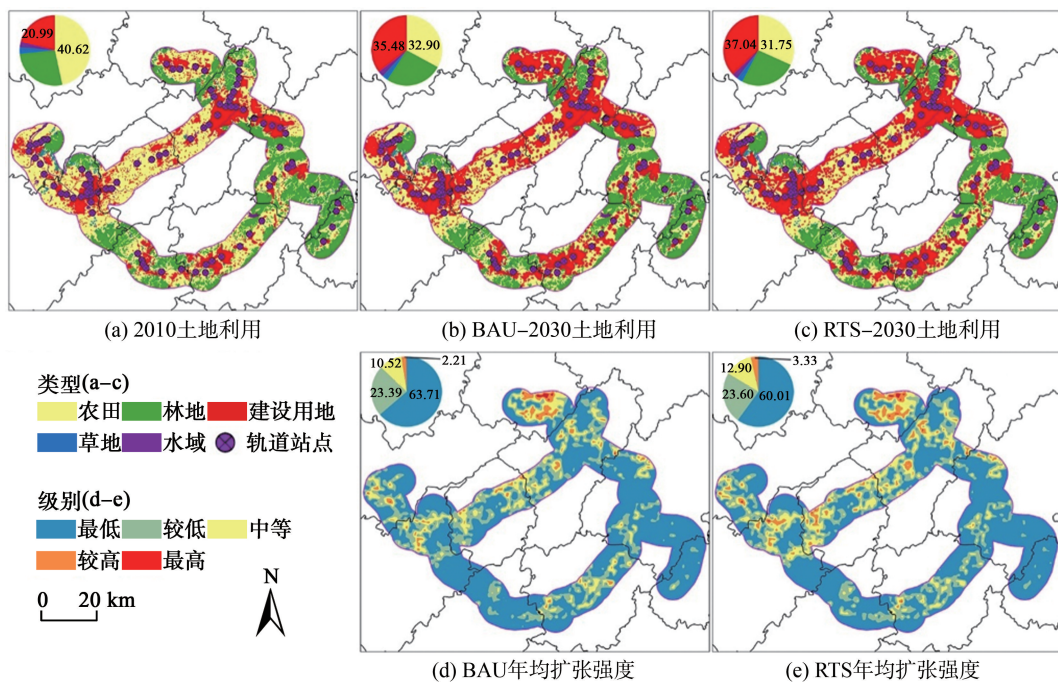


图7 轨道交通站点5 km范围

Fig. 7 5-km based buffers centered at the rail transit sites

测需求与浙中城市群实际规划面积分别相差3.44%和4.57%,预测需求与早期规划较为接近,说明使用马尔可夫链预测土地利用需求具有准确性。预测结果显示,相比于常规情景,轨交情景中新增建设用地更多分布在婺城、金东和义乌的已有建设用地周围。这可能是因为轨道交通弱化了传统城市中心区域,提高了周边地区的交通通达性,可能会将城市中心高密度人口引向周边地区。同时,郊区可开发用地较多且相对靠近市中心,由此推动了郊区城市开发并引起土地利用变化。轨道交通提升了站点周边的区位优势,带动其经济发展进而提升了其开发强度,加速了土地利用转变。

农田是农业生产和经济实现稳定发展的基本保障。在轨交情景中,站点增加了周边建设用地的增长强度,而城市发展主要是通过侵占优质农田实现,因此在轨道交通的建设中需加强对农田的保护。首先,宏观上需设定基本农田的保护面积和其区位,缓解农田保护与建设用地需求的矛盾,严格控制对农田的侵占。其次,浙中城市群在线路规划和站点的选取时应尽量避免占用农田,严格控制轨道交通建设的用地范围。再次,在轨道交通建设中要严格控制地铁站点周围建设用地的无序开发,调整站点周边的土地利用结构,优化土地利用格局。最后,需要重视对优质农田进行补偿,实现农田的占补平衡。

本研究也存在其局限之处,虽然实施了模型性能评估,但是没有开展全链路模型验证。例如,获取2020年浙中城市群土地利用格局可对FLUS模型进一步验证;但新的2020年数据在分类方法和样本选取方面势必与GlobeLand30存在差异,进而影响FULS模型的验证与情景预测。

5 结论

城市轨道交通提升了沿线区域的通达性,研究其对城市土地利用的影响有助于理解城市动态发展,从而更好地预测未来城市格局,进而合理引导城市土地空间优化。本文利用FLUS模型结合地形地貌、社会经济和区位交通驱动等因素,模拟了浙中城市群2000—2010年土地利用变化,取得了较好的模拟精度(总体精度为89.74%、FOM为29.86%),并在预测中耦合城市轨道交通规划因素模拟其对未来土地利用格局的影响。

本研究的主要结论如下:①在FLUS模型中重

点考虑轨道交通的作用并评估其影响,对已有CA文献是一种方法补充;②考虑轨道交通规划站点的影响,能够较好反应城市未来土地利用格局,反过来对轨道交通站点的选取具有一定的辅助参考作用,也可用于其他城市评估轨道交通规划对土地格局的影响;③轨道交通站点很可能增加周边建设用地扩张强度,因此需实施更加严格的基本农田保护政策,减少农田损失;④随着城市轨道交通建设扩容,基于轨道交通的CA模型可以起到很好的情景预测与决策辅助作用。

本研究为研究轨道交通对城市土地格局的影响提供一个替代方案,根据预测结果可为政策规划调整提供可信的数据支撑、为城市空间格局规划提供信息支持。但本文仅聚焦城市轨道交通规划对未来土地情景的影响,由于土地利用变化的影响因素多样,后续研究将在地理模拟中考虑多种规划因素,探索在多种规划因素影响下土地利用变化规律与未来情景。

参考文献(References):

- [1] Samat N, Hasni R, Elhadary Y A E. Modelling land use changes at the peri-urban areas using geographic information systems and cellular automata model[J]. Journal of Sustainable Development, 2011,4(6):72.
- [2] Liang X, Liu X, Li X, et al. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method[J]. Landscape and Urban Planning, 2018,177:47-63.
- [3] Guan D, Li H, Inohae T, et al. Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model[J]. Ecological Modelling, 2011,222(20):3761-3772.
- [4] 冯永玖,韩震.海岸线遥感信息提取的元胞自动机方法及其应用[J].中国图象图形学报,2012,17(3):441-446. [Feng Y J, Han Z. Cellular automata approach to extract shoreline from remote sensing imageries and its application[J]. Journal of Image and Graphics, 2012,17(3):441-446.]
- [5] Liu Y, Corcoran J, Feng Y. Cellular Automata. International Encyclopedia of Human Geography (Second Edition), 2019,22,101-104.
- [6] 李少英,刘小平,黎夏,等.土地利用变化模拟模型及应用研究进展[J].遥感学报,2017,21(3):329-340. [Li X Y, Liu X P, Li X, et al. Simulation model of land use dynamics and application: Progress and prospects[J]. Journal of Remote Sensing, 2017,21(3):329-340.]
- [7] 冯永玖,刘妙龙,童小华,等.基于核主成分元胞模型的城市

- 演化重建与预测[J].地理学报,2010,65(6):665-675. [Feng Y J, Liu M L, Tong X H, et al. Kernel principal components analysis based cellular model for restructuring and predicting urban evolution[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010,65(6):665-675.]
- [8] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model[J]. *Environmental management*, 2002,30(3):391-405.
- [9] Dietzel C, Clarke K C. Toward optimal calibration of the SLEUTH land use change model[J]. *Transactions in GIS*, 2007,11(1):29-45.
- [10] Halmy M W A, Gessler P E, Hicke J A, et al. Land use/land cover change detection and prediction in the north-western coastal desert of Egypt using Markov-CA[J]. *Applied Geography*, 2015,63:101-112.
- [11] Feng Y, Wang J, Tong X, et al. The effect of observation scale on urban growth simulation using particle swarm optimization-based CA models[J]. *Sustainability*, 2018,10(11):4002.
- [12] Liu X, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017,168:94-116.
- [13] Feng Y, Tong X. A new cellular automata framework of urban growth modeling by incorporating statistical and heuristic methods. *International Journal of Geographical Information Science*, 2020,34:74-97.
- [14] Li X, Chen G, Liu X, et al. A new global land-use and land-cover change product at a 1-km resolution for 2010 to 2100 based on human-environment interactions[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(5):1040-1059.
- [15] Liang X, Liu X, Li D, et al. Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2018,32(11):2294-2316.
- [16] Aljoufie M, Zuidgeest M, Brussel M, et al. A cellular automata-based land use and transport interaction model applied to Jeddah, Saudi Arabia[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013,112:89-99.
- [17] 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. [Liu S Q, Guo J, Li R X, et al. Analysis of land use around typical rail transport stations in Beijing[J]. *Urban Development Studies*, 2014,21(4):66-71.]
- [18] 刘保奎,冯长春.城市轨道交通对站点周边土地利用结构的影响[J].城市发展研究,2009,16(4):149-155. [Liu B K, Feng C C. Research of impact of urban railway transportation on land use structure based on GIS and information entropy[J]. *Urban Development Studies*, 2009,16(4):149-155.]
- [19] 麦地娜·哈尔山,母睿.城市轨道交通与土地利用一体化发展评价[J].城市规划,2018,42(7):86-92. [Maidina H E S, Mu R. Evaluation on integrated development of urban transport and land use[J]. *City Planning Review*, 2018,42(7):86-92.]
- [20] Shen Q, Chen P, Pan H. Factors affecting car ownership and mode choice in rail transit-supported suburbs of a large Chinese city[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2016,94:31-44.
- [21] 单卓然,黄亚平.轨道交通站点地区土地利用谬误及规划响应策略[J].经济地理,2013,33(12):154-160. [Shan Z R, Huang Y P. Fallacy and planning strategies on land-use of rail transit site area[J]. *Economic Geography*, 2013,33(12):154-160.]
- [22] 谷一桢,郑思齐.轨道交通对住宅价格和土地开发强度的影响——以北京市13号线为例[J].地理学报,2010,65(2):213-223. [Gu Y Z, Zheng S Q. The impacts of rail transit on property values and land development intensity: The case of No.13 line in Beijing[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010,65(2):213-223.]
- [23] Bhattacharjee S, Goetz A R. The rail transit system and land use change in the Denver metro region[J]. *Journal of Transport Geography*, 2016,54:440-450.
- [24] 何尹杰,吴大放,刘艳艳.城市轨道交通对土地利用的影响研究综述——基于Citespace的计量分析[J].地球科学进展,2018,33(12):1259-1271. [He Y J, Wu D F, Liu Y Y. Review on the impacts of public rail transport on urban land use change: a citesspace-based quantitative analysis [J]. *Advances in Earth Science*, 2018,33(12):1259-1271.]
- [25] 段德罡,张凡.土地利用优化视角下的城市轨道交通站点分类研究——以西安地铁2号线为例[J].城市规划,2013,37(9):39-45. [Duan D G, Zhang F. Study on classification of urban rail transit stations from the perspective of land use optimization: a case study on Xi'an subway line 2[J]. *City Planning Review*, 2013,37(9):39-45.]
- [26] 刘畅,潘海啸,贾晓韡.轨道交通对大都市区外围地区规划开发策略的影响——外围地区TOD模式的实证研究[J].城市规划学刊,2011(6):60-67. [Liu C, Pan H S, Jia X W. The influence of rail transit on the planning and development of metropolitan peri-urban areas[J]. *Urban Planning Forum*, 2011(6):60-67.]
- [27] 张泰城,张小青.中部地区城镇化的动力机制及路径选择研究[J].经济问题,2007(2):47-49. [Zhang T C, Zhang X Q. Research on the dynamic mechanism and path selection of urbanization in the central region [J]. *On Economic Problems*, 2007(2):47-49.]

- [28] 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. [Tan Z Z, Li S Y, Li X, et al. Spatio-temporal effects of urban rail transit on complex land-use change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(5):850-862.]
- [29] 叶远智,张朝忙,张剑.浙中城市群地理空间框架建设模式及关键技术研究[J].测绘通报,2015,5:120-123. [Ye Y Z, Zhang C M, Zhang J. Research on construction mode and key technology of geospatial framework in Mid-Zhejiang urban agglomeration[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015,5:120-123.]
- [30] 中国国家地理信息中心,2014年30米全球土地覆盖数据集 [DB/OL]. <http://www.webmap.cn/commres.do?method=globeIndex>. [National Geomatics Center of China, 2014. 30 Meter Global Land Cover Dataset (GlobeLand30) Production Description[DB/OL]. <http://www.webmap.cn/commres.do?method=globeIndex>.]
- [31] 陈军,陈晋,廖安平,等.全球30m地表覆盖遥感制图的总体技术[J].测绘学报,2014,43(6):551-557. [Chen J, Chen J, Liao A P, et al. Concepts and key techniques for 30 m global land cover mapping[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014,43(6):551-557.]
- [32] 马京振,孙群,徐立,等.GlobeLand 30和自发地理信息的对比分析研究[J].地球信息科学学报,2018,20(9):1225-1234. [Ma J Z, Sun Q, Xu L, et al. Comparison Analysis of GlobeLand 30 and Volunteered Geographic Information[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(9):1225-1234.]
- [33] Shafizadeh-Moghadam H, Minaei M, Feng Y, et al. GlobeLand 30 maps show four times larger gross than net land change from 2000 to 2010 in Asia[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019,78:240-248.
- [34] Arsanjani J J. Characterizing, monitoring, and simulating land cover dynamics using GlobeLand30: A case study from 2000 to 2030[J]. *Journal of environmental management*, 2018,214:66-75.
- [35] 中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台,2009,GDEM V2 30M 分辨率数字高程数据[DB/OL]. <http://www.gscloud.cn>. [Geospatial Data Cloud site, Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, 2009. GDEM V2 30m resolution digital elevation data[DB/OL]. <http://www.gscloud.cn>.]
- [36] Lloyd C T, Sorichetta A, Tatem A J. High resolution global gridded data for use in population studies[J]. *Scientific data*, 2017,4(1):1-17.
- [37] Ghosh T, Powell R, Elvidge C D, et al. Shedding light on the global distribution of economic activity[J]. *The Open Geography Journal*, 2010,3(1):148-161.
- [38] Feng Y, Tong X. Using exploratory regression to identify optimal driving factors for cellular automaton modeling of land use change[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2017,189(10):515.
- [39] Pontius Jr R G, Millones M. Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011,32(15):4407-4429.
- [40] Pontius R G, Boersma W, Castella J C, et al. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change[J]. *The Annals of Regional Science*, 2008,42(1):11-37.
- [41] 冯永玖,韩震.元胞邻域对空间直观模拟结果的影响[J].地理研究,2011,30(6):1055-1065. [Feng Y J, Han Z. Impact of neighbor configurations on spatially-explicit modeling results[J]. *Geographical Research*, 2011,30(6):1055-1065.]
- [42] Yang X, Zheng X Q, Chen R. A land use change model: Integrating landscape pattern indexes and Markov-CA[J]. *Ecological Modelling*, 2014,283:1-7.
- [43] 林沛锋,郑荣宝,洪晓,等.基于FLUS模型的土地利用空间布局多情景模拟研究——以广州市花都区为例[J].国土与自然资源研究,2019,2:7-13. [Lin P F, Zheng B R, Hong X, et al. Simulation of land use spatial layout based on FLUS model: A case study of Huadu District, Guangzhou [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2019,2:7-13.]
- [44] Xiao J, Shen Y, Ge J, et al. Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006,75(1):69-80.