

引用格式:张经度,梅志雄,吕佳慧,等.纳入空间自相关的FLUS模型在土地利用变化多情景模拟中的应用[J].地球信息科学学报,2020,22(3):531-542. [Zhang J D, Mei Z X, Lv J H, et al. Simulating multiple land use scenarios based on the FLUS model considering spatial autocorrelation[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(3):531-542.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190359

纳入空间自相关的FLUS模型在土地利用变化多情景模拟中的应用

张经度¹,梅志雄^{1,2*},吕佳慧¹,陈进钊¹

1. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; 2. 华南师范大学粤港澳村镇可持续发展研究中心, 广州 510631

Simulating Multiple Land Use Scenarios based on the FLUS Model Considering Spatial Autocorrelation

ZHANG Jingdu¹, MEI Zhixiong^{1,2*}, LV Jiahui¹, CHEN Jinzhao¹

1. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; 2. Center for Sustainable Development of Rural and Town in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

Abstract: The Future Land Use Simulation (FLUS) model is a new model for simulating multiple land-use changes, and has a broad application prospect. This paper improved the FLUS model by incorporating a spatial autocorrelation factor into the Artificial Neural Network (ANN) module of FLUS, selected the Pearl River Delta region as the case study area, and validated the improved FLUS model based on the land use data of 2009 and 2015, as well as a series of driving factors. Three future land-use scenarios in 2035: the baseline scenario, cultivated protection scenario, and ecological protection scenario, were simulated using the improved model. The results showed that: (1) After incorporating the spatial autocorrelation factor, the model had better predictive power for the occurrence probability distribution of each land use. The ROC values of cultivated land, forestland, water area, construction land, and unused land increased from 0.819, 0.928, 0.885, 0.855, and 0.861 to 0.857, 0.934, 0.890, 0.863 and 0.978, respectively. (2) The simulation accuracy of the improved FLUS model was improved. The Kappa value increased from 0.732 to 0.744, and the FOM value increased from 0.077 to 0.106. (3) The scenario simulation results indicated that under all three scenarios, forestland and construction land would increase, whereas cultivated land would decrease. Apparent differences also existed in the simulated change sizes and locations of each land use type under different scenarios. Under the baseline scenario, construction land would expand rapidly at the expense of a large amount of cultivated land. Under the cultivated land protection scenario, cultivated land area would remain at a reasonable level, the expansion of construction land would alleviate, and the land use layout would tend to be reasonable. Under the ecological protection scenario, cultivated land, forestland, and water area would be well protected, the layout of construction land would be more rational, and the land use sustainability in the study area would be improved significantly.

收稿日期:2019-07-04;修回日期:2019-12-19.

基金项目:国家自然科学基金(41001078)。[**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China, No.41001078.]

作者简介:张经度(1995—),男,江西赣州人,硕士生,主要从事空间分析与建模、土地利用模拟等研究。E-mail: cuitzjd@163.com

*通讯作者:梅志雄(1976—),男,湖北黄梅人,教授,主要从事空间分析与建模、土地利用模拟与优化等研究。

E-mail: zhixiongmei76@126.com

Key Word: FLUS model; artificial neural networks; system dynamics; spatial autocorrelation; multiscale; land use change; multi-scenarios simulation; Pearl River Delta

***Corresponding author:** MEI Zhixiong, E-mail: zhixiongmei76@126.com

摘要: FLUS模型是一种新型的土地利用变化模拟模型,应用前景广阔。本文通过在FLUS模型的人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)训练模块中引入空间自相关因子来改进模型,以珠江三角洲地区为例,基于2009年、2015年土地利用数据和一系列驱动因子对改进的模型进行了验证,并利用该改进的FLUS模型模拟了2035年研究区在3种情景下土地利用变化格局。结果表明:①引入空间自相关因子后各地类发生概率分布的预测精度更高,耕地、林地、建设用地、水体和未利用土地的拟合优度ROC值分别从0.819、0.928、0.885、0.855和0.861提高到0.857、0.934、0.890、0.863和0.978;②改进的FLUS模型的模拟精度有一定的提高,Kappa系数从0.732提高到0.744,FOM系数从0.077升到0.106;③情景模拟表明,3种情景下珠江三角洲建设用地和林地均将增加,而耕地均呈减少趋势。但不同情景下模拟的土地利用格局也存在显著差异:基准情景下,建设用地明显扩张且大幅侵占耕地。耕地保护情景下,耕地面积保持在合理水平,建设用地蔓延扩张趋势得到遏制,土地利用布局总体趋向合理。生态保护情景下,耕地、林地和水体得到较好保护,建设用地布局更为合理,土地利用可持续性明显提高。

关键词: FLUS模型; 人工神经网络; 系统动力学; 空间自相关; 多尺度; 土地利用变化; 多情景模拟; 珠江三角洲

1 引言

土地利用变化是多种社会经济和自然环境等因素在时间和空间上共同作用的结果,具有较复杂的机理和过程^[1-2]。土地利用变化模型在分析土地利用变化的驱动力、演变过程及其效应和探索其将来变化趋势等方面有重要作用^[3]。因此,通过建模对土地利用变化进行模拟,有助于更好地理解土地利用变化过程与趋势、制定合适的土地政策等^[4]。

当前,国内外学者针对土地利用变化模型的设计和应用开展了大量工作,开发了多种模型。常用的主要包括Markov模型、灰色系统模型、系统动力学(SD)模型等土地利用数量变化模拟模型和元胞自动机(CA)、SLEUTH、多智能体系统、CLUE/CLUE-S等土地利用空间变化模拟模型。

上述基于数学方法或系统科学的土地利用数量变化模拟模型能够依据过去、当前的地类数量合理预测未来地类的数量,但由于缺乏模拟土地利用空间变化的能力,难以满足国土空间规划和管理的需求。而土地利用空间变化模拟模型则在模拟土地利用空间复杂系统的时空动态方面具有非常突出的优势。目前,CA模型已成功应用于土地利用变化^[5-7]和城市扩展过程^[8-9]的模拟,然而传统CA模型没有设置限制元胞状态改变的模块,且只能模拟一种土地利用类型的变化^[10-11];SLEUTH模型能通过配置不同的参数来调整约束条件以控制城市的生长类型,进而通过元胞分配来模拟城市化过程^[12-14],但该模型主要适用于城市扩展模拟,且未考虑宏观土地供需及相关土地政策对土地利用变化的影响^[15];

多智能体模型能够在多个智能体交互决策及外部环境作用的基础上模拟土地利用变化^[16-17],但对不同土地利用变化决策过程的规则刻画较复杂且收集个体层面充足的数据来验证模型难度较大^[18-19];CLUE/CLUE-S模型是一种经验统计模型,由于其运用系统论方法处理不同土地利用类型之间的竞争关系,因此能同时模拟多种土地利用类型的变化^[11,20-21],然而该模型在地类分配过程中仅将具有最大联合概率的主导地类分配给栅格单元,而忽视了其他非主导地类转化的可能性,致使模型缺乏模拟跳跃式土地利用变化的能力^[22]。

FLUS模型是一种新型的土地利用变化模拟模型,可以克服上述缺陷,它由“自上而下”的SD模型和“自下而上”的CA模型耦合而成^[22-23]。FLUS模型不但能同时模拟多种土地利用类型的变化,而且其基于轮盘赌的地类选择机制使得非主导地类也有机会被分配至元胞上,使得模型能反映真实土地利用变化中的不确定性以及能模拟跳跃式土地利用变化情形^[22-23]。然而,FLUS模型忽视了土地利用数据中可能存在的空间自相关效应,所以在空间自相关明显的土地利用变化模拟中显得不足。已有一些研究也验证并处理了土地利用变化过程中空间自相关作用,如谢花林等^[24]对内蒙古翁牛特旗土地利用变化的多尺度空间自相关效应进行了分析;戴声佩和张勃^[1]、Mei等^[11]、Wu等^[25]、Jiang等^[26]均通过在logistic回归模型中引入空间自相关性因子形成Autologistic模型以捕获空间自相关效应对土地利用变化的影响,从而提高了土地利用变化模型的模拟精度。因此有必要对FLUS模型进行相应改进,

在利用其体现不同地类竞争性的基础上,增加对空间自相关性的考量。所以,本文通过在FLUS模型的用于估计各元胞上出现各地类概率的人工神经网络(ANN)训练模块中引入空间自相关因子作为土地利用变化的一个驱动因子来改进模型,以珠江三角洲地区为例,基于2009年土地利用数据和一序列土地利用变化外生驱动因子模拟2015年土地利用格局,并与2015年实际土地利用数据对比,以验证改进的模型;然后使用该改进的FLUS模型对3种不同情景下2035年土地利用格局进行模拟和分析,以为该区土地可持续利用和规划管理提供决策参考。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

珠江三角洲(21°40'N—24°30'N, 111°20'E—115°30'E)位于广东省中南部,与东南亚隔海相望,海陆交通便利,属于亚热带季风气候,总面积达5.3万km²(图1)。2015年该区人口达5874.27万人, GDP为62 267.78亿元,城市化率为84.59%,是中国人口集聚最多、创新能力最强、开放程度最高的三大城市群之一。近年来,伴随快速城市化,该区土地利用发生了剧烈变化,其中建设用地面积显著增加,耕地和水面面积明显减少,人地矛盾加剧,可持续发展进程受到严峻挑战。因此,对该地区土地利用变化进行分析和多情景模拟具有重要意义。

2.2 数据来源及处理

如表1所示,本文所用数据包括土地利用数据、

基础地理数据、自然环境数据和社会经济数据。

土地利用数据通过Google Earth Engine(GEE)平台解译得到。首先从GEE平台获取经大气校正预处理的2009年和2015年的地表反射数据,经GEE平台筛选工具得到研究区影像,通过去云算法和均值计算得到适宜解译的两期影像,再利用GEE内置的随机森林算法解译影像得到两期土地利用数据,并利用交叉验证法检验解译结果, kappa系数为0.95,解译精度较高、满足研究需要。根据研究区实际及FLUS模型需要,将土地利用类型分为耕地、林地、建设用地、水体和未利用地5类。

根据获取的资料和研究区实际及参考相关研究^[22-23],本文选取了23个土地利用变化驱动因子:利用GIS软件从获得的基础地理数据中提取的到最近河流的距离、到最近铁路的距离、到最近主要

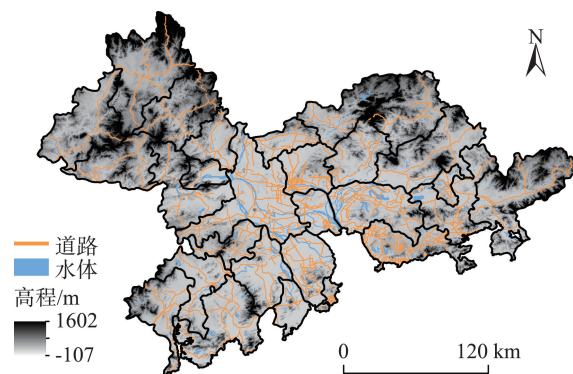


图1 珠江三角洲地区示意

Fig. 1 Map of the Pearl River Delta region

表1 研究所使用的数据

Tab. 1 List of data used in this study

数据类别	数据	数据获取年份	数据来源
土地利用数据	土地利用数据	2009、2015	GoogleEarthEngine 平台(https://earthengine.google.com/)
基础地理数据	河流、公路、铁路、机场、火车站、城市位置	2018	OpenStreetMap 网站(https://www.openstreetmap.org/)
自然环境数据	DEM	2009	地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn/) ^[22]
	土壤含氧量、土壤含氮量、土壤盐碱化程度、土壤功效	2008	联合国粮农组织官网(http://www.iiasa.ac.at/) ^[23]
社会经济数据	年均降水、年均气温、各季度平均气温	1970—2000年平均值	世界气候数据中心(http://www.worldclim.org/) ^[23]
	人口分布情况	2010、2015	全球人口网站(https://www.worldpop.org/) ^[23]
	人口出生率、人口死亡率	2009—2015	《广东省统计年鉴》 ^[27]
	GDP	2009—2015	《广东省统计年鉴》 ^[27]
	固定资产投资	2009—2015	《广东省统计年鉴》 ^[27]
	城镇人口占常住人口比例(城镇化率)	2009—2015	《广东省统计年鉴》 ^[27]
	粮食总产量	2009—2015	《广东省统计年鉴》 ^[27]

公路的距离、到最近次要公路的距离、到最近机场的距离、到最近火车站的距离、到最近地级市的距离、到最近县城的距离,从DEM提取的高程、坡度、坡向等地形因子,土壤含氧量、土壤含氮量、土壤盐碱化程度、土壤功效等土壤条件因子,年均降水、年均气温、各季度平均气温(4个季度对应4个因子)等气候因子,人口密度分布及通过矢量转栅格得到的GDP分布等社会经济因子。本文设置了从50~500 m间隔步长为50 m的共10个空间尺度进行模拟比较以选择最佳的模拟空间尺度,上述所有驱动因子和5类土地利用类型空间数据均重采样为这10个分辨率的栅格数据。

3 研究方法

3.1 FLUS模型

FLUS模型主要由基于SD模型的土地利用数量预测模块和基于CA模型的土地利用空间模拟模块2部分组成^[23,28-29]。首先通过数量预测模块依据人口、经济发展条件和相关政策来预测地类数量变化,然后使用ANN根据土地利用变化驱动因子估计地类转化概率,再将地类转化概率、元胞间的相互作用和地类变化的趋势结合来共同参与元胞转换总体概率的计算,最后利用轮盘赌确定元胞是否发生用地类型的转换,从而实现土地利用变化模拟。FLUS模型的总体结构如图2所示。

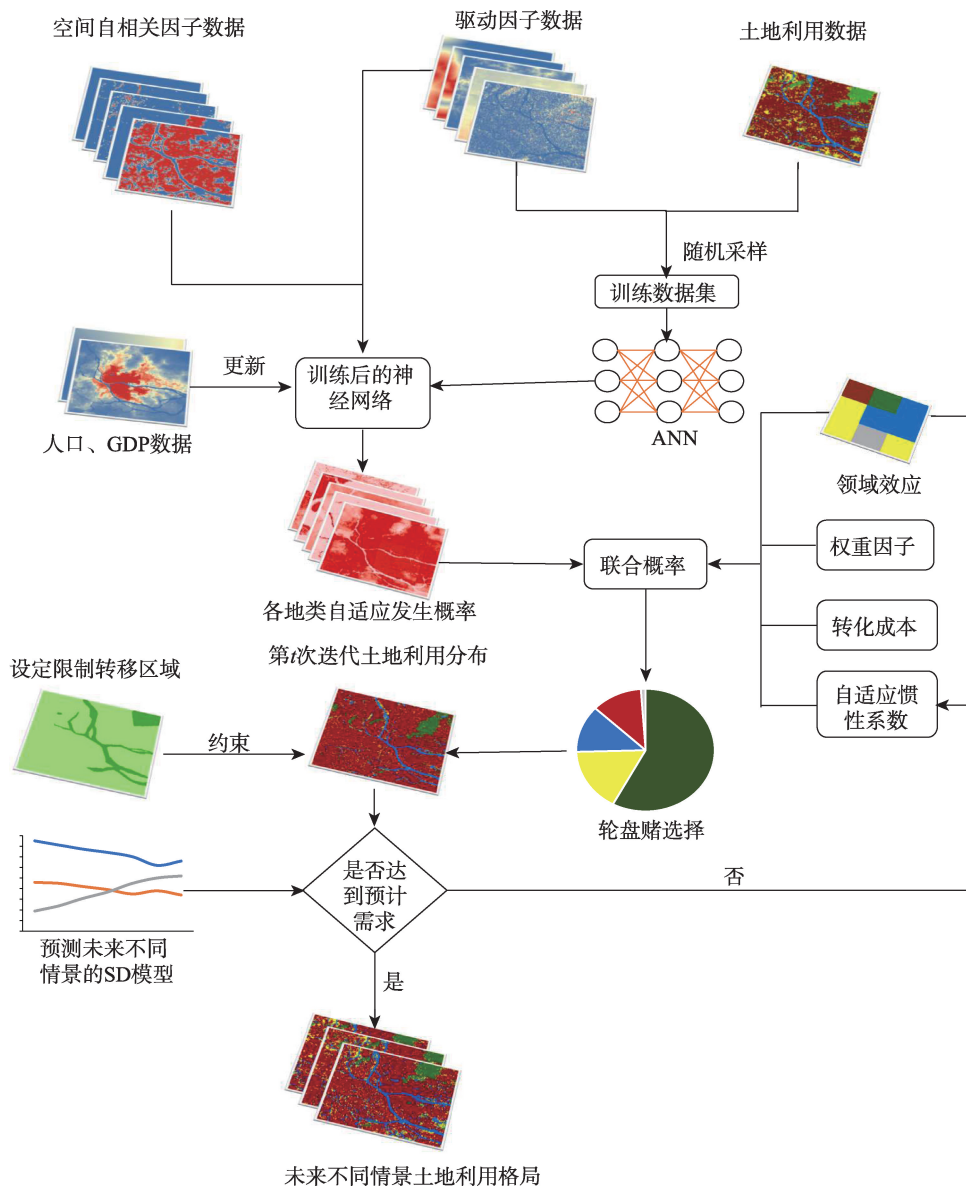


图2 FLUS模型总体结构

Fig. 2 Schematic framework of the FLUS model

3.1.1 SD模型

SD模型是通过栈、流、内部反馈、时间延迟等机制来模拟复杂系统非线性行为的方法,可利用其在复杂系统模拟上的优势来预测未来不同情景下的土地利用数量变化^[10,30]。本文参考文献[10]和[30],利用Vensim软件构建了研究区土地利用需求的SD模型(图3),包括社会经济和土地利用2个子系统。前者选取了人口增长率和GDP增长率为主导因素,后者包括上述5种土地利用类型、同时考虑社会经济因素及地类的相互作用对土地利用子系统产生的影响,另选用城镇化率、技术进步(用粮食单产衡量)及退耕还林政策作为辅助因素。

3.1.2 改进的CA模型

FLUS模型的空间模拟模块对传统CA模型进行了较大改进:首先引入了ANN来估计各元胞上各地类的发生概率,然后将此发生概率与元胞间邻域影响、转换成本和惯性系数结合计算各元胞上各地类转换总概率,再通过轮盘赌机制反映不同地类间的竞争作用、确定元胞上的用地类型转换情况及用地类型的分配,从而实现土地利用变化模拟。

用于估计各元胞上各地类发生概率的ANN结构及计算流程详见文献[5]、[23]、[28]。元胞间邻域影响反映了元胞周围用地对中心元胞产生的影响,其公式为^[23]:

$$\Omega_{p,k}^t = \frac{\sum_{N \times N} con(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times w_k \quad (1)$$

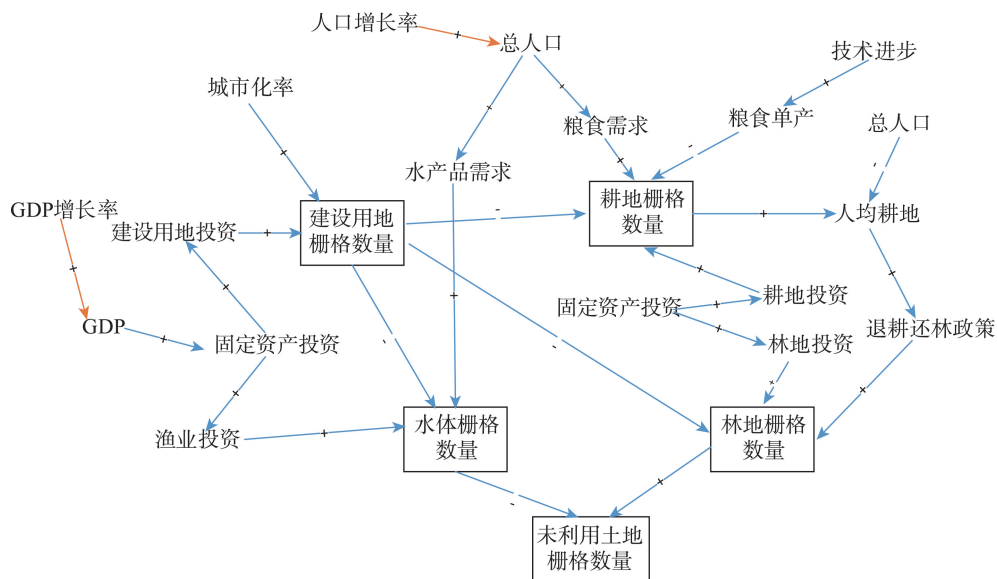
式中: t 为迭代次数; p 为元胞单元; k 为用地类型; $\Omega_{p,k}^t$ 为第 t 次迭代时元胞 p 上地类 k 的邻域作用; $\sum_{N \times N} con(c_p^{t-1} = k)$ 为在 $t-1$ 次迭代中 $N \times N$ 的Moore窗口中地类 k 的数量,本文 N 取3; w_k 为不同土地利用类型邻域作用的权重,其值越大表示地类的邻域作用越强烈,本文在参考相关文献[23],咨询土地规划和地理信息等领域专家基础上,通过微调参数反复实验最终得到耕地、林地、建设用地、水体和未利用土地的邻域权重值分别为0.7、0.3、1、0.5和1。

基于已获得的2009年和2015年两期土地利用数据计算研究区2009—2015年的土地转移矩阵,再根据此矩阵和土地规划、地理信息等领域专家意见确定各地类的转换成本系数(表2)。

FLUS模型中的自适应惯性系数用于调整当前土地利用的数量,使得模拟用地按照实际需求进行发展^[23,28]。具体而言,在某次迭代中,当某个地类数量与预期需求存在较大差距时,增加该地类在下次迭代中栅格的改变量,从而确保地类发展趋势与预期一致。其计算公式为:

$$Inertia_k^t = \begin{cases} Inertia_k^{t-1} & \text{if } |D_k^{t-1}| \leq |D_k^{t-2}| \\ Inertia_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & \text{if } D_k^{t-1} < D_k^{t-2} < 0 \\ Inertia_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} & \text{if } 0 < D_k^{t-2} < D_k^{t-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Inertia_k^t$ 表示第 t 次迭代时地类 k 的惯性系数;



注:+表示正向关系;-表示负向关系。

图3 地类数量预测的系统动力学模型内部结构

Fig. 3 The internal structure of system dynamics model for quantity prediction of land use types

表2 各地类间转换成本系数

Tab. 2 Conversion cost coefficients between land use types

	耕地	林地	建设用地	水体	未利用土地
耕地	1	1	1	1	0
林地	1	1	0	0	1
建设用地	0	0	1	0	0
水体	1	0	1	1	1
未利用土地	1	0	1	0	1

注:1表示两地类能互相转换,0表示不能转换。

D_k^{t-1} 、 D_k^{t-2} 分别表示 $t-1$ 、 $t-2$ 时刻地类 k 的数量与需求之间的差值。

综合各元胞上的地类发生概率、元胞间邻域影响、转换成本和自适应惯性系数,可以确定各元胞的土地利用总体转换概率:

$$TP_{p,k}^t = P_{p,k} \times \Omega_{p,k}^t \times Inertia_k^t \times (1 - sc_{c \rightarrow k}) \quad (3)$$

式中: $TP_{p,k}^t$ 为第 t 次迭代时元胞 p 上从原始地类转化至 k 地类的总概率; $P_{p,k}$ 表示元胞 p 上 k 地类的发生概率; $\Omega_{p,k}^t$ 和 $Inertia_k^t$ 的含义分别同式(1)和式(2), $sc_{c \rightarrow k}$ 为从原始地类 c 转换至 k 地类的成本。

FLUS模型引入轮盘赌机制进行地类分配,该机制反映了地类发生概率较高的元胞更有可能被分配到新的用地类型,而地类发生概率较低的元胞亦有可能被分配。由于轮盘赌具有随机性的特点,因此使用该机制能更加真实地表现土地利用转化过程中的竞争性^[23,28]。

此外,FLUS模型提供了设置限制土地利用发

生转换的区域的功能,本文根据研究区实际,将研究区内主要河流、湖泊设定为限制转换区。

3.2 空间自相关因子

FLUS模型在利用ANN拟合土地利用与驱动因子之间关系、进而计算地类发生概率时,未考虑土地利用数据中可能存在的空间自相关的影响。本文引入空间自相关因子作为ANN模型的输入变量来探测这个空间自相关效应,以期提升模型的模拟效果,各地类空间自相关因子可视化结果如图4所示,空间自相关因子可表达为^[25-26]:

$$Autocov_p = \frac{\sum_{p \neq j} w_{pj} y_j}{\sum_{p \neq j} w_{pj}} \quad (4)$$

式中: $Autocov_p$ 为元胞 p 上的某一土地利用类型的空间自相关变量; j 为元胞 p 的邻域元胞, y_j 表示元胞 j 上该地类的出现情况(出现赋值为1,否则为0); w_{pj} 为元胞 p 和 j 之间的空间权重系数,当 p 和 j 间的距离小于阈值距离 d 时 $w_{pj} = 1/d$,否则 $w_{pj} = 0$ ^[25-26]。

4 模型验证

4.1 最佳模拟尺度确定

基于2009年土地利用数据和23个驱动因子数据,在50~500 m间隔步长为50 m共10个空间尺度上分别利用ANN计算了各元胞上各地类发生概率,结果产生的ROC(Relative Operating Character-

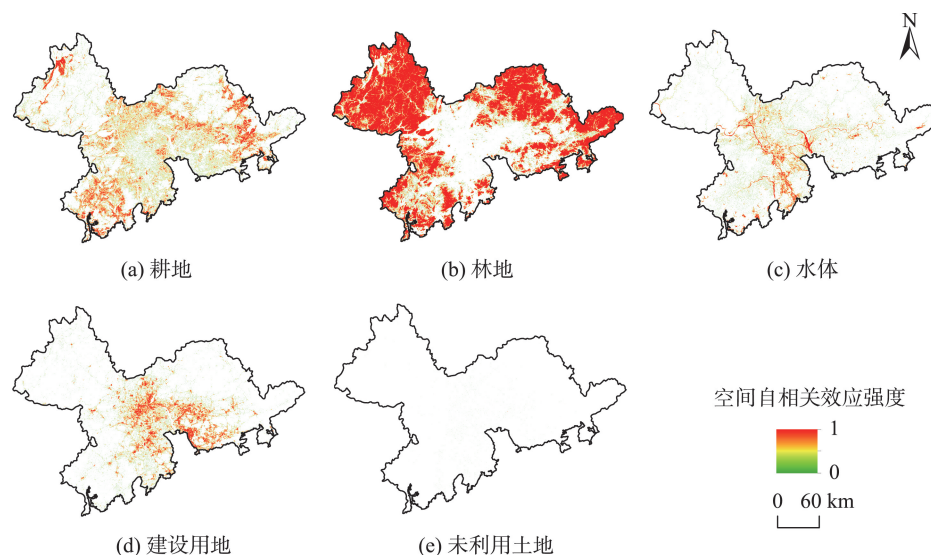


图4 引入FLUS模型的各地类空间自相关因子可视化结果

Fig. 4 Spatial autocorrelation factors for each landuse type after introduced FLUS model

istic)值如表3所示。ROC方法常用来评估土地利用与其驱动因子之间关系的拟合优度,其值一般位于[0.5, 1],值越高表示模型拟合性能越好^[11,23]。通常,当ROC值大于0.7时,认为所选驱动因子对土地利用分布具有较好的解释能力^[11,26]。表3显示,100 m尺度下林地、水体和未利用地的ROC值均最高,而耕地和建设用地的ROC值仅略低于50 m尺度下的值,因此选取100 m尺度作为本文最佳模拟尺度。另外,该尺度下各地类的ROC值均大于0.8,表明所选驱动因子对土地利用空间分布具有较好的解释能力。

4.2 模型验证

为检验研究区土地利用数据中是否存在空间自相关性,首先在100 m尺度上取窗口范围为3×3的Moore邻域,采用式(4)计算各地类的空间自相关值,再分别利用ANN计算引入和未引入空间自相关因子的地类发生概率分布,结果显示引入空间自相关因子计算的地类发生概率分布的拟合优度比未引入该因子计算结果的拟合优度有了一定的提高(耕地、林地、建设用地、水体和未利用土地的ROC值分别从0.819、0.928、0.885、0.855、0.861提高到0.857、0.934、0.890、0.863、0.978)。这表明研究区土地利用数据存在空间自相关性,利用ANN计算地类发生概率时引入空间自相关因子能提高其对各地类发生概率分布的预测精度。因此,模拟研究区土地利用变化时应考虑土地利用数据的空间自相关效应。

然后基于3×3, 5×5, …, 19×19的Moore邻域计

算得到9个不同的各地类空间自相关因子集,以2009年土地利用数据为基期,分别模拟2015年土地利用格局,并与2015年实际土地利用图比较以验证模拟结果。本文采用Kappa系数和FOM(Figure of Merit)系数进行精度评价(表4),其中Kappa值介于0~1之间,大于0.7表明模拟结果可以被接受^[21];FOM系数由观察到的变化与预测到的变化的交集与二者并集的比值确定,其值介于0~1之间,值越高表示模型预测的精度越高^[31]。表4表明不同窗口范围下Kappa值均大于0.7,而Moore邻域为7×7时Kappa系数和FOM系数均最高,故选择7×7的Moore邻域来计算最终的各地类空间自相关值。

基于上述最佳Moore邻域采用式(4)计算各地类空间自相关值,利用ANN训练得到各元胞上引入空间自相关因子的地类发生概率,接着向FLUS软件的CA模块导入该地类发生概率,并输入前文确定的元胞邻域影响因子、地类转换成本矩阵和由2015年真实地类数量确定的土地利用需求等参数,然后以2009年土地利用数据为基期模拟2015年土地利用格局(图5(a)),同时模拟未引入空间自相关因子的2015年土地利用格局(图5(b)),最后利用2015年实际土地利用图(图5(c))进行验证。

由表5可知,改进后的FLUS模型和原始FLUS模型的Kappa系数分别为0.744与0.732,FOM系数分别为0.106和0.077;由于本文对主要河流、湖泊等水域设置为限制转换区域,因此两种模型对水体的模拟精度相差不大,但改进后的FLUS模型对耕地、林地、建设用地、未利用土地的模拟精度均较原始FLUS模型有所提升,因此在模拟过程中有必要

表3 各尺度下ANN计算得到的各地类发生概率的ROC值

Tab. 3 The ROC values of the occurrence probability of each land use type calculated by ANN at different spatial scales

	步长/m									
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
耕地	0.826	0.819	0.765	0.756	0.694	0.670	0.675	0.672	0.633	0.731
林地	0.918	0.928	0.917	0.903	0.891	0.907	0.901	0.911	0.919	0.899
建设用地	0.886	0.885	0.867	0.829	0.805	0.824	0.857	0.763	0.759	0.785
水体	0.854	0.855	0.822	0.821	0.796	0.771	0.764	0.773	0.698	0.750
未利用土地	0.839	0.861	0.803	0.815	0.832	0.853	0.853	0.847	0.840	0.810

表4 不同Moore邻域下的FLUS模型模拟精度

Tab. 4 Simulation accuracies of FLUS model under different window ranges

	Moore邻域								
	3×3	5×5	7×7	9×9	11×11	13×13	15×15	17×17	19×19
Kappa值	0.735	0.731	0.744	0.740	0.741	0.743	0.742	0.736	0.732
FOM值	0.098	0.092	0.106	0.103	0.104	0.103	0.106	0.106	0.104

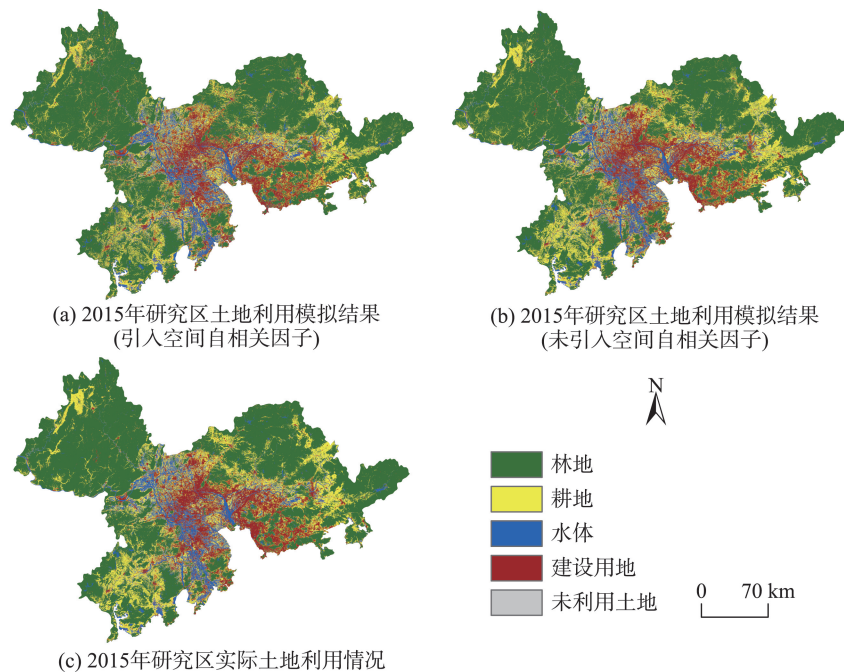


图5 珠江三角洲地区2015年土地利用模拟及实际情况对比

Fig. 5 Comparisons of simulated and actual land use of 2015 in the Pearl River Delta

考虑土地利用数据中的空间自相关效应。2种方法下模型模拟结果的Kappa系数均大于0.7,但改进模型的模拟效果更好,所以可将其应用于研究区不同情景下的土地利用变化模拟。

5 未来土地利用变化情景模拟

5.1 情景方案设置

根据研究区人口、经济等的不同规划情况,通过设置不同模型参数及约束条件,构建了基准情景、耕地保护情景、生态保护情景3种情景,分别模拟各情景下2035年研究区土地利用格局。

(1)基准情景:表示研究区土地利用变化未受到大的政策干预,人口和经济增速延续现有趋势,土地需求按照2009—2015年变化率变化,该情景展现了研究区土地利用无约束发展情况。利用SD模型预测得到该情景下2035年耕地、林地、建设用地、

水体和未利用土地的面积分别为8438.58、31762.90、7450.90、5247.41和100.73 km²。

(2)耕地保护情景:《广东省土地利用总体规划》(2006—2020年)^[32]、《广东省国土规划》(2016—2035年)^[33]均要求严格保护耕地和基本农田,据此在SD建模中引入耕地面积反馈调节机制,使研究区耕地面积维持在基准水平之上。该情景展现了保护耕地政策下研究区土地利用变化情况。此情景下预测得到2035年耕地、林地、建设用地、水体和未利用土地的面积分别为8881.76、31874.20、7313.42、4795.33和135.81 km²。

(3)生态保护情景:根据《广东省国土规划》(2016—2035年)^[33]和《粤港澳大湾区规划纲要》^[34]中的提升生态环境质量、塑造优美生态空间的要求,在耕地保护情景的基础上进一步设置珠三角陆域生态控制区作为限制土地利用发生变化的区域。该情景保证了研究区生态屏障的完整性,使模拟期

表5 原始FLUS模型和改进的FLUS模型的模拟精度

Tab. 5 Simulation accuracies of the original and improved FLUS models

模型	kappa系数	FOM		耕地	林地	建设用地	水体	未利用土地
原始FLUS模型	0.732	0.077	生产者精度	0.672	0.932	0.733	0.784	0.011
			用户精度	0.670	0.929	0.732	0.789	0.048
改进后的FLUS模型	0.744	0.106	生产者精度	0.687	0.937	0.740	0.784	0.057
			用户精度	0.683	0.938	0.741	0.780	0.161

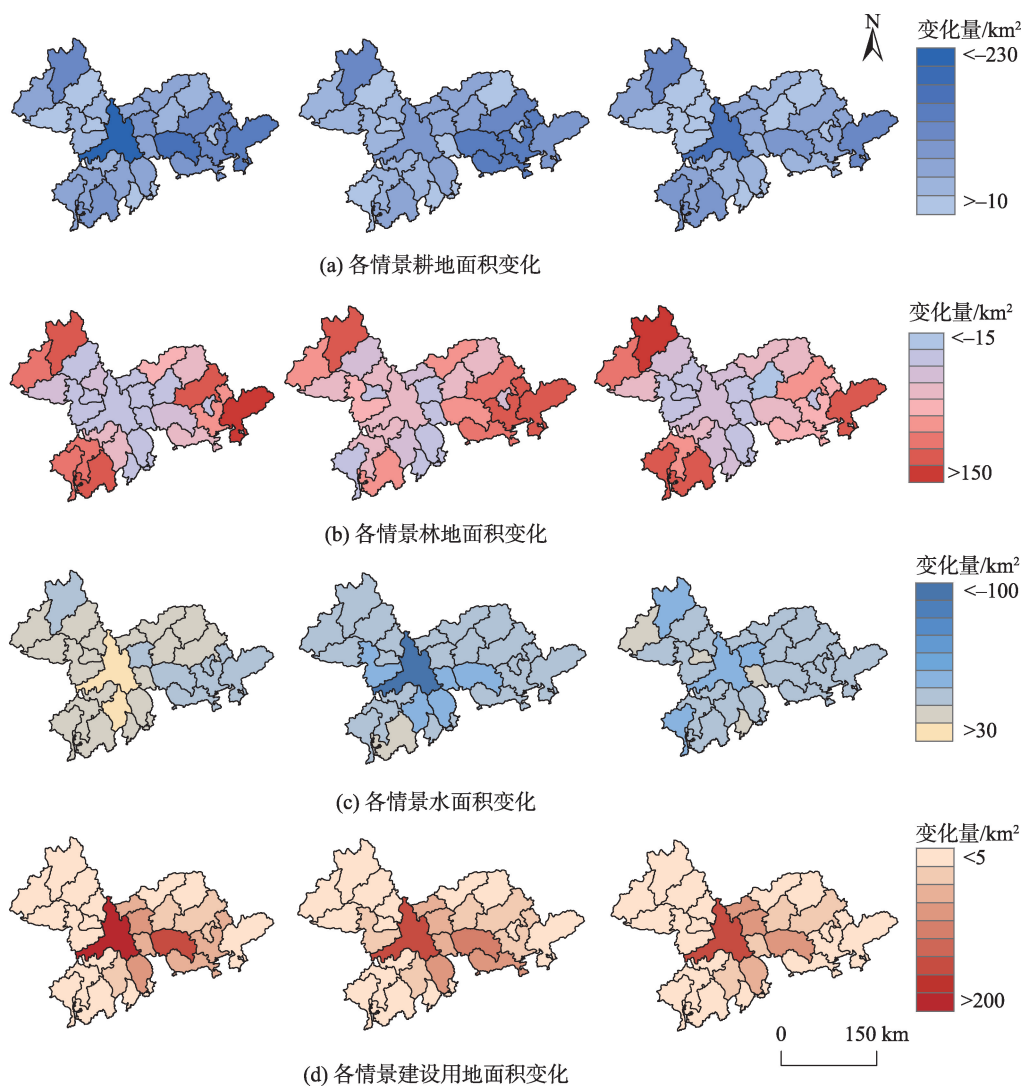
间研究区生态环境质量保持稳定。该情景下2035年耕地、林地、建设用地、水体和未利用土地的面积分别为9012.33、31821.66、7090.82、4959.17和116.54 km²。

5.2 情景模拟结果分析

基于上述3种情景预测的各地类数量,利用FLUS模型模拟得到3个情景下土地利用分布图,接着对模拟土地利用分布图和基期土地利用分布图以县区为单位进行分区统计,再分别计算模拟结果相对基期的地类数量变化量,得到的结果如图5所示。

由图6(a)可知,3种情景下耕地均出现减少,且减少情况的空间差异较为明显。基准情景下,佛山、东莞等市耕地减少幅度最大,研究区东部和西

北部耕地减少幅度则相对较小;耕地保护情景下,耕地流失量较小;生态保护情景下,位于陆域生态控制区内的耕地减小幅度明显下降。3种情景下林地总面积均增加,但增加情况的空间格局有所不同(图6(b))。基准情景下,研究区中部的林地出现一定程度的减少,但在怀集、惠东、台山等研究区边缘地区呈现明显增加;生态保护情景下林地变化情况与基准情景类似,但佛山、花都等地区林地由减少转为增长;相对其他情景,耕地保护情景下的林地变化幅度较小,主要在惠州、肇庆等市出现增长。图6(c)显示,基准情景下,水体主要在佛山、新会等水产养殖业发达的地区出现增长,而在研究区东南部和西北部丘陵地区呈现小幅下降;耕地保护情景下,佛山市水体面积大幅减少,这是由于限制了耕



注:第1列为基准情景,第2列为耕地保护情景情景,第3列为生态保护情景。

图6 2015—2035年珠江三角洲3种情景下各地类空间分布变化

Fig. 6 Spatial distribution of each land use type under the three scenarios of the Pearl River Delta from 2015 to 2035

地转移数量,建设用地转而向水体扩张所导致的;生态保护情景下,研究区水体面积整体减少,但减少情况的空间分布较为均衡。3种情景下建设用地均出现增长且增长的空间格局颇为相似,都呈现从中心向四周减缓趋势(图6(d)),但在基准情景下,佛山、东莞等城市的扩张幅度大于其他2种情景,这是由于未约束建设用地扩张,致使建设用地大幅侵占城郊耕地所造成的;其他2种情景中建设用地扩张程度相对较缓。未利用土地所占比重较小,故省略对未利用土地变化情况的分析。

另外,基准情景下,建设用地大幅扩张将导致土地资源无谓损耗、城郊优质耕地流失、生态环境恶化等不良后果;耕地保护情景下,耕地快速流失现象得到缓解,建设用地扩张势头得到遏制,总体上耕地得到较好保护,建设用地布局趋向合理,人居环境得到改善;生态保护情景下,耕地、林地和水体得到较好保护,建设用地布局更为合理,经济发展与生态保护相得益彰,研究区土地利用可持续性明显提高。

6 结论与讨论

6.1 结论

针对FLUS模型忽视了土地利用数据中可能存在的空间自相关效应,本文通过构建空间自相关因子,并联合其他外生驱动因子基于FLUS模型的概率计算模块预测地类发生概率,在充分发挥模型处理不同地类竞争关系的优势同时,增加模型对空间自相关效应的考量,切实提升了模型模拟效果,对FLUS模型的扩展应用作出了一定贡献。同时,在模拟尺度和空间自相关计算窗口大小的选择上,本文通过实验对比确定了模拟的最佳尺度。此外,本文还模拟了珠江三角洲地区2035年3种情景下的土地利用变化情况。本文引入空间自相关因子改进的FLUS模型能够提升其模拟效果,扩展了FLUS模型的应用,同时研究区的模拟结果可为该区土地可持续利用和规划管理提供参考依据。

实验表明研究区的最佳模拟尺度为100 m,该尺度下,引入空间自相关因子后模拟得到的地类发生概率分布的拟合优度(耕地、林地、建设用地、水体和未利用土地的ROC值分别为0.857、0.934、

0.890、0.863和0.978)比未引入该因子模拟结果的拟合优度(各地类ROC值分别为0.819、0.928、0.885、0.855和0.861)更高,表明引入空间自相关因子后模型对各地类发生概率分布具有更好的预测精度。

基于2009年土地利用图模拟2015年土地利用图并与2015年实际土地利用图对比验证,得到引入空间自相关因子的模型模拟效果(Kappa系数和FOM系数分别为0.744和0.106)优于未引入空间自相关因子的模型模拟效果(Kappa系数和FOM系数分别为0.732和0.077),表明纳入空间自相关效应对FLUS模型的模拟效果有一定的提高,该改进的FLUS模型能更好地模拟研究区土地利用变化情况。

3种模拟情景下,2015—2035年研究区建设用地和林地均呈现增长趋势,而耕地均呈现减少趋势。但不同情景下模拟结果也存在一定差异:基准情景下,建设用地扩张明显并大幅侵占耕地;耕地保护情景下,耕地总体得到较好保护,建设用地蔓延式扩张趋势得到遏制,土地利用布局总体趋向合理;生态保护情景下,耕地、林地和水体得到较好保护,建设用地布局更为合理,研究区土地利用可持续性明显提高。

6.2 讨论

尽管本文取得了一定进展,但仍存在如下不足:

(1)在情景模拟中仅将生态控制区作为限制转换区域,受数据资料限制,未考虑对土地利用变化有重要影响的国土空间规划、多规融合所规定的另2个控制线:基本农田控制线、城市边界控制线,这对模拟结果的合规性可能有一定的影响。

(2)FLUS模型是利用SD方法预测未来土地利用数量变化,然后进行空间模拟,对土地利用数量的预测主要依据过去土地利用数量变化情况推测未来土地利用数量变化趋势,然而随着人口和经济增速放缓等不利因素出现,城镇化已开始呈现与传统“增量模式”不同的“存量模式”甚至“减量模式”^[6]。在此影响下,依据过去土地利用数量变化情况推测未来土地利用数量变化、进而进行空间模拟可能会导致模拟结果与实际存在一定的偏差。

因此下一步需要考虑人口、经济结构调整等因素,使得模拟结果更接近现实。此外,本文也缺乏与其他模型比较。这些有待后续进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 戴声佩,张勃.基于CLUE-S模型的黑河中游土地利用情景模拟研究——以张掖市甘州区为例[J].自然资源学报,2013,28(2):336-348. [Dai S P, Zhang B. Land use change scenarios simulation in the middle reaches of the Heiheriver basin based on CLUE-S model: A case of Ganzhou District of Zhangye city[J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(2):336-348.]
- [2] 卞子浩,马小雪,龚来存,等.不同非空间模拟方法下CLUE-S模型土地利用预测——以秦淮河流域为例[J].地理科学,2017,37(2):252-258. [Bian Z H, Ma X X, Gong L C, et al. Land use prediction based on CLUE-S model under different non-spatial simulation methods: A case study of the Qinhuai river watershed[J]. Scientia Geographica Sinica,2017,37(2):252-258.]
- [3] 梁友嘉,徐中民,钟方雷.基于SD和CLUE-S模型的张掖市甘州区土地利用情景分析[J].地理研究,2011,30(3):564-576. [Liang Y J, Xu Z M, Zhong F L. Land use scenario analyses by based on system dynamic model and CLUE-S model at regional scale: A case study of Ganzhou District of Zhangye city[J]. Geographical Research, 2011,30(3):564-576.]
- [4] 王保盛,廖江福,祝薇,等.基于历史情景的FLUS模型邻域权重设置——以闽三角城市群2030年土地利用模拟为例[J].生态学报,2019,39(12):4284-4298. [Wang B S, Liao J F, Zhu W, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the golden triangle of southern Fujian in 2030[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(12):4284-4298.]
- [5] 黎夏,叶嘉安.基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J].地理研究,2005,24(1):19-27. [Li X, Yeh A G. Cellular automata for simulating complex land use systems using neural networks[J]. Geographical Research, 2005,24(1):19-27.]
- [6] 曹雪,罗平,李满春,等.基于扩展CA模型的土地利用变化时空模拟研究——以深圳市为例[J].资源科学,2011,33(1):127-133. [Cao X, Luo P, Li M C, et al. Spatio-temporal simulation of land use change based on an extended CA model: A case study of Shenzhen city, China[J]. Resources Science, 2011,33(1):127-133.]
- [7] Wang H J, Kong X D, Zhang B. The simulation of LUCC based on Logistic-CA-Markov model in Qilian Mountain area, China[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2016,8(4):350-358.
- [8] Clarke K C, Gaydos L J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1998,12(7):699-714.
- [9] Liu Y B, Dai L, Xiong H H. Simulation of urban expansion patterns by integrating auto-logistic regression, Markov chain and cellular automata models[J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2015,58(6):1113-1136.
- [10] 严冬,李爱农,南希,等.基于Dyna-CLUE改进模型和SD模型耦合的山城镇用地情景模拟研究——以岷江上游地区为例[J].地球信息科学学报,2016,18(4):514-525. [Yan D, Li A N, Nan X, et al. The Study of urban land scenario simulation in mountain area based on modified Dyna-CLUE model and SDM: A case study of the upper reaches of Minjiang river[J]. Journal of Geo-information Science, 2016,18(4):514-525.]
- [11] Mei Z X, Wu H, Li S Y. Simulating land-use changes by incorporating spatial autocorrelation and self-organization in CLUE-S modeling: A case study in Zengcheng District, Guangzhou, China[J]. Frontiers of Earth Science, 2018,12(2):299-310.
- [12] Silva E A, Clarke K C. Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2002,26(6):525-552.
- [13] 詹云军,朱捷缘,严岩.基于元胞自动机的城市空间动态模拟[J].生态学报,2017,37(14):4864-4872. [Zhan Y J, Zhu J Y, Yan Y. Dynamic simulation of urban space based on the SLEUTH model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(14):4864-4872.]
- [14] 米媛,姜博,陈颜,等.基于SLEUTH模型的鄂尔多斯城市扩张模拟分析[J].中国农业大学学报,2019,24(2):183-190. [Mi Y, Jiang B, Chen Y, et al. Simulation analysis of urban expansion in Ordos based on SLEUTH model[J]. Journal of China Agricultural University, 2019,24(2):183-190.]
- [15] 王丽妍,李飞雪,李满春,等.基本农田信息对SLEUTH模型模拟准确性的影响——以常州市中心城区为例[J].地理与地理信息科学,2015,31(3):48-53. [Wang L Y, Li F X, Li M C, et al. Influences of basic farmland on SLEUTH model simulation accuracy: case study of Changzhou downtown[J]. Geography and Geo-Information Science, 2015,31(3):48-53.]
- [16] Le Q B, Park S J, Vlek P L G, et al. Land-Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled human-landscape system I. Structure and theoretical specification[J]. Ecological Informatics, 2008,3(2):135-153.
- [17] 刘小平,黎夏,艾彬,等.基于多智能体的土地利用模拟与规划模型[J].地理学报,2006,61(10):1101-1112. [Liu X

- P, Li X, Ai B, et al. Multi-agent systems for simulating and planning land use development[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006,61(10):1101-1112.]
- [18] Luo J, Zhan J, Lin Y, et al. An equilibrium analysis of the land use structure in the Yunnan Province, China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2014,8(3):393-404.
- [19] 田光进, 邬建国. 基于智能体模型的土地利用动态模拟研究进展[J]. *生态学报*, 2008,28(9):4451-4459. [Tian G J, Wu J G. Simulating land use change with agent-based models: progress and prospects[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(9):4451-4459.]
- [20] Verburg P H, Overmars K P. Dynamic simulation of land-use change trajectories with the CLUE-S model[J]. *Modelling Land-Use Change: Progress and applications*, 2007, 90(5):321-337.
- [21] Luo G P, Yin C Y, Chen X, et al. Combining system dynamic model and CLUE-S model to improve land use scenario analyses at regional scale: A case study of Sangong watershed in Xinjiang, China[J]. *Ecological Complexity*, 2010,7(2):198-207.
- [22] Liang X, Liu X P, 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.
- [23] Liu X P, 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.
- [24] 谢花林, 刘黎明, 李波, 等. 土地利用变化的多尺度空间自相关分析: 以内蒙古翁牛特旗为例[J]. *地理学报*, 2006,61(4):389-400. [Xie H L, Liu L M, Li B, et al. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale land-use changes: A case study in Ongniud Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006,61(4):389-400.]
- [25] Wu G P, Zeng Y N, Xiao P F, et al. Using autologistic spatial models to simulate the distribution of land-use patterns in Zhangjiajie, Hunan Province[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2010,20(2):310-320.
- [26] Jiang W G, Chen Z, Lei X, et al. Simulating urban land use change by incorporating an autologistic regression model into a CLUE-S model[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015,25(7):836-850.
- [27] 广东省统计局, 国家统计局广东调查总队. 广东省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. [Statistics Bureau of Guangdong Province, Guangdong Survey Headquarters, National Bureau of Statistics. *Guangdong Statistical Yearbook*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.]
- [28] 朱寿红, 舒帮荣, 马晓冬, 等. 基于“反规划”理念及FLUS模型的城镇用地增长边界划定研究: 以徐州市贾汪区为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2017,33(5):80-86. [Zhu S H, Shu B R, Ma X D, et al. The delimitation of urban growth boundary based on the idea of "anti-planning" and FLUS model: A case study of Jiawang district, Xuzhou city[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2017,33(5):80-86.]
- [29] 吴欣昕, 刘小平, 梁迅, 等. FLUS-UGB多情景模拟的珠江三角洲城市增长边界划定[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(4):532-542. [Wu X X, Liu X P, Liang X, et al. multi-scenarios simulation of urban growth boundaries in Pearl River Delta based on FLUS-UGB[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(4):532-542.]
- [30] 田贺, 梁迅, 黎夏, 等. 基于SD模型的中国2010-2050年土地利用变化情景模拟[J]. *热带地理*, 2017,37(3):547-561. [Tian H, Liang X, Li X, et al. Simulating multiple land use scenarios in China during 2010-2050 based on system dynamic model[J]. *Tropical Geography*, 2017,37(3):547-561.]
- [31] Koomen E, Pontius R, Boersma W, et al. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change[J]. *The Annals of Regional Science*, 2008,42:11-37.
- [32] 广东省国土资源厅. 广东省土地利用总体规划(2006-2020)[M]. 广州: 广东省国土资源厅, 2009. [Department of Land and Resources of Guangdong Province. *General land use planning of Guangdong Province(2006-2020)* [M]. Guangzhou: Department of Land and Resources of Guangdong Province, 2009.]
- [33] 广东省国土资源厅. 广东省国土规划(2016-2035)[M]. 广州: 广东省国土资源厅, 2016. [Department of land and resources of Guangdong province. *land use planning of Guangdong province(2016-2035)* [M]. Guangzhou: Department of Land and Resources of Guangdong Province, 2016.]
- [34] 中华人民共和国国务院. 粤港澳大湾区发展规划纲要[M]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2019. [The State Council of the People's Republic of China. *Outline of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Development Plan*[M]. Beijing: State Council of the People's Republic of China, 2019.]
- [35] 吴康, 李耀川. 收缩情境下城市土地利用及其生态系统服务的研究进展[J]. *自然资源学报*, 2019,34(5):1121-1134. [Wu K, Li Y C. Research progress of urban land use and its ecosystem services in the context of urban shrinkage [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019,34(5):1121-1134.]