

DOI: 10.5846/stxb201909011812

刘晓阳, 曾坚, 贾梦圆, 张森. 闽三角城市群生态安全格局构建及城镇扩展模拟. 生态学报, 2020, 40(21): 7873-7885.

Liu X Y, Zeng J, Jia M Y, Zhang S. Construction of ecological security pattern and simulation of urban sprawl in the Urban Agglomeration of Min Delta. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7873-7885.

闽三角城市群生态安全格局构建及城镇扩展模拟

刘晓阳, 曾 坚*, 贾梦圆, 张 森

天津大学建筑学院, 天津 300072

摘要:在快速城镇化背景下,构建生态安全格局并探讨城镇用地扩展格局已成为保障区域生态安全和缓解生态保护与土地开发矛盾的重要手段。以闽三角城市群为例,基于景观安全格局原理和 ArcGIS 空间分析法,从综合水安全、生物保护安全、地质灾害安全以及游憩安全四个方面叠加构建“底线安全格局-缓冲安全格局-最优安全格局”三种不同安全水平的综合生态安全格局;然后结合 SLEUTH 模型,将不同生态安全格局情景作为约束条件融入其排除图层,对研究区 2015—2030 年的城镇用地空间扩展进行多情景模拟。研究表明:①底线安全格局、缓冲安全格局以及最优安全格局的面积为 9305.51、7576.28、3482.73 km²,分别占闽三角城市群总面积的 36.89%、30.03%、13.81%;②三种生态安全格局情景模拟下城镇用地均呈增长趋势,但增长速度均小于历史用地的增长速度,高安全格局约束下的新增城镇用地面积和增长速度均最小,表明将生态安全格局作为城镇发展的约束条件,在城镇土地开发中能够增强对生态空间的保护力度,维护区域生态安全,控制城镇蔓延。相关研究成果可为城镇开发边界管控与国土空间规划的编制提供技术支撑与决策辅助。

关键词:生态安全;生态安全格局;城镇扩展; SLEUTH 模型

Construction of ecological security pattern and simulation of urban sprawl in the Urban Agglomeration of Min Delta

LIU Xiaoyang, ZENG Jian*, JIA Mengyuan, ZHANG Sen

School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Set against the backdrop of rapid urbanization in China, urban ecological environment suffers the elevated pressure of high-intensity human activities and unreasonable land development. Since urban ecological environment has been raised as an issue in relation to regionally ecological security, it is important to construct ecological security pattern and accordingly simulate the urban sprawl as a way to satisfy the requirements of both urban development and environment protection. Taking the Urban Agglomeration of Min Delta (Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou) as the study area, this paper provides three scenarios of ecological security pattern, namely, basic security pattern, intermediate security pattern, and optimal security pattern. Basic security pattern represents that the protected area will not be occupied by built-up land use. Both intermediate security pattern and optimal security pattern locate the transition area between urban area and the protected area with the potential to be transformed into urban built-up area on the prerequisite that the urban ecological environment and urban ecosystem cannot be jeopardized. Compared to intermediate security pattern, the optimal security pattern covers the areas closer to urban area to security the ecological environment to the greatest extent. In the process of constructing the three scenarios of ecological security pattern, grounded in the theory of landscape security, by using a set of spatial analytic approaches in ArcGIS platform, we incorporate four aspects, including water safety, biological safety,

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502903);国家自然科学基金重点项目(51438009);中国博士后科学基金项目(2018M640235)

收稿日期:2019-09-01; **网络出版日期:**2020-09-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 13602058416@vip.163.com

geological safety and recreation safety to establish a comprehensive evaluation of ecological security. In addition, drawing on the SLEUTH model, we simulate three types of urban growth from 2015 to 2030, in which the three scenarios of ecological security pattern are combined to form three levels (i.e. low, medium, high) of eco-constraints. The results show that the area of basic security pattern is 9305.51 km², while intermediate security pattern is 7576.28 km² and optimal security pattern turns out 3482.73 km². The three patterns account for 36.89%, 30.03% and 13.81% of the total area of the Min Delta urban agglomeration, respectively. In terms of simulation modelling results, it shows that under all three scenarios of ecological pattern, urban area will keep growing by 2030 but the growth rate will be lower than the historical records. Under high level of eco-constraints, both urban growth area and urban growth rate are smaller than the other two settings of constraints. This reveals that ecological security pattern, as urban growth constraint, should be considered in our spatial planning to enhance the protection of urban ecological environment and prevent unreasonable urban sprawl. We argue our research is important to better inform urban planner on (re) designating urban growth boundary with the capacity of providing reliable technical support and scientific basis.

Key Words: ecological security; ecological security pattern; urban sprawl; SLEUTH model

随着中国城镇化快速发展,城镇用地空间的无序扩展导致生态用地与城镇建设用地的空间错位日趋严重,并进一步引发洪涝灾害频至、生物生境破坏、水土流失加剧等生态环境问题的出现^[1-2]。如何从生态安全视角合理规划城镇用地规模,控制城市无序蔓延,已成为许多国家面临的挑战^[3-4]。生态安全是生态系统服务功能是否健全的综合反映,可有效保证人类生产生活可持续发展,也是表征适应环境变化的韧性状态和不受生态破坏影响的能力。如何科学有序的改善区域生态安全质量,提升生态系统服务价值,区域生态安全格局逐渐成为国内外研究的热点问题^[5-6]。

生态安全格局以景观生态学为理论基础,近年来国内外学者已在其概念、理论基础和构建方法等方面开展了大量研究。生态安全格局是指自然景观过程中(如物种迁徙、灾害蔓延等)的关键景观要素的空间位置所构成的具有潜在空间联系的生态系统空间格局,其合理构建对于提升区域生态系统的完整性具重大意义^[5,7]。相关理论基础最早是由我国学者俞孔坚于1999年提出^[8-9],目前其构建方法可大致分为三类:第一类是采用“约束-潜力”模型,将生态系统服务功能评价作为研究区发展的制约因素,社会经济发展引力作为其发展的潜力因素构建生态安全格局^[10-11];第二类是根据景观生态学“格局-过程-功能”原理,按照“识别源地-阻力面构建-廊道提取”的研究流程进行生态安全格局构建^[5,12];第三类是在关键单一生态过程选取的基础上基于 ArcGIS 空间叠加分析来进行生态安全格局构建^[13-15]。在城镇用地扩展模拟方面,以元胞自动机为原理的一系列城市扩展模型(如 DUEM、SLEUTH、UrbanSim 等)能够通过简单的局部转换规则来模拟复杂的城市空间格局变化,成为较具影响力的城市增长模型^[16-17]。其中,最具代表性的是 Clarke 等^[18]开发的 SLEUTH 模型,该模型可紧密结合 GIS 空间数据库和遥感数据,且因其数据易获取、定标参数少、模型精度高等特征得以广泛应用^[19-20]。然而,多数城镇用地扩展模拟是基于历史数据探索一套适于研究区域的城镇空间增长模型,对于城镇生态空间保护需求以及相关政策调控等因素在空间扩展上的影响较少涉及;在生态安全格局构建因素选择上,现有研究也多偏重于选取诸如水源涵养、生物保护等自然生态系统的基本服务,较少涉及居民对于生态空间的休憩需求^[21];此外,鲜有尝试利用表征人类活动的多源空间数据组合校正阻力面的研究(比如夜间灯光数据)^[5,7];在研究尺度上,也多是基于市、县和省级视角,以典型区域城市集群视角的研究较少。

闽三角城市群是我国快速城镇化区域及海岸带关键生态脆弱区域的典型代表,因其所处地理位置的特殊性及地形限制,可发展的建设用地空间稍显不足,如何在城镇开发过程中确保区域的生态安全是当前亟待解决的关键问题,基于生态安全格局约束的城镇扩展则提供了一种能兼顾城市精明增长与生态保护的空间规划途径。因此,本文从资源环境约束导向与环境保护视角,结合研究区生态本底分析和生态问题诊断,从综合水资源安全、生物保护安全、地质灾害安全、游憩安全方面构建综合生态安全格局;从城镇发展需求导向与控制

城镇无序扩张视角,基于 SLEUTH 模型模拟不同等级生态安全格局约束方案下的城镇空间扩展,在此基础上为城镇开发建设空间管控边界及国土空间规划的编制提供针对性建议。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

闽三角城市群(23°33′20″—25°56′45″N, 116°53′21″—119°01′38″E)位于福建省东南沿海,是海峡西岸经济区与海上丝绸之路的重要组成部分,包括厦门市、泉州市和漳州市 3 个设区市及其所辖县区(图 1),土地总面积约为 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (不含金门),总人口近 1800 万人,为典型的新兴海岸带城市群区域。随着区域就地城镇化与工业化的快速推进,生态系统服务功能受损、土地利用结构失衡、土地资源供需矛盾激增等问题凸显,研究区的生态安全以及可持续发展受到了极大威胁。

1.2 数据来源与处理

本研究所用数据主要包括研究区 2000、2005、2010、2015 年四期分辨率为 30 m 的土地利用现状数据,来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>);高程数据(DEM)来源于地理空间数据云网站(<https://www.gscloud.cn/>);土壤类型数据来源于福建省农业厅;NDVI 数据来源于美国国家地质勘探局网站(<https://earthexplorer.usgs.gov>);多年平均降雨量数据来源于中国气象数据共享网(<http://data.cma.cn/>);地质灾害点位数据来源于厦漳泉水利局、地震局、生态环境局等相关政府网站;行政区划、主要公路分布、铁路分布等其他基础地理数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<http://www.webmap.cn>);自然保护区、风景名胜区等数据来源于福建省林业厅和相关文献资料;福建省经济发展数据来源于福建省统计局及各市统计年鉴(表 1)。

2 研究方法

2.1 基于 ArcGIS 的综合生态安全格局构建

2.1.1 最小累积阻力模型(MCR)

MCR 模型广泛应用于物种保护和景观格局分析等生态领域,如生态网络构建、土地适宜性评价等^[22-24]。最小累积阻力模型是指物种从源向目标地迁徙过程中,穿过不同栅格单元所需克服的最小阻力的模型,用来模拟物种水平扩散的行为模式。它最早于 1992 年提出,后经相关学者修改如下^[9, 25]:

$$\text{MCR} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R'_i$$

MCR 是源 j 穿越所有单元的最小累积阻力值; D_{ij} 表示物种从源 j 到栅格单元 i 的距离; R'_i 表示栅格单元 i 对源 j 迁徙过程中产生的阻力值,该阻力值为文中经过夜间灯光数据修正后的阻力值; $f_{\min}$ 是用正函数反映了栅格单元对于不同源的最小累积阻力值,表明某一生态过程与 MCR 的正相关关系。此模型运算可利用



图 1 闽三角城市群地理区位

Fig.1 The location of the Urban Agglomeration of Min Delta

ArcGIS 中的成本距离命令来实现。

表 1 数据来源及处理
Table 1 Data sources and processing

数据名称 Data name	数据处理 Data processing	数据来源 Data source
高程 Elevation	由 30 m 网格数字高程模型(DEM) 获取	地理空间数据云
坡度 Slope	由 ArcGIS 平台基于 DEM 数据计算获取	数字高程模型(DEM)
表面曲率 Curvature	由 ArcGIS 平台基于 DEM 数据计算获取	数字高程模型(DEM)
土壤类型 Soil type	由 1:100 万福建省土壤类型分布图矢量化	福建省农业厅
归一化植被指数 NDVI Normalized Difference Vegetation Index	由 2015 年的 Landsat8 遥感影像反演计算得到年均 NDVI	美国国家地质勘探局网
多年平均降雨量 Average annual rainfall	基于中国地面累年值年值数据集(1981—2010 年), 采用 IDW 空间插值法获取	中国气象数据共享网
土地利用类型 Land use	遥感地图解译得到林地、草地、耕地、水域、建设用地和未利用地 6 种类型	中国科学院资源环境科学数据中心
地质灾害点位 Geological hazards location	相关网站公布的滑坡、泥石流、崩塌、地面塌陷等地质灾害数据, 通过 Python 语言爬取 POI 数据转换到空间落位获取	厦漳泉水利局、地震局、生态环境局等相关政府网站
主要公路 Traffic road	在网站数据的基础上, 结合野外调研及相应年份的遥感影像矢量化	全国地理信息资源目录服务系统; 相应年份遥感影像
游憩资源 Recreational resources	相关网站及文献资料整理筛选, 通过 Python 语言爬取 POI 数据转换到空间落位获取	中华人民共和国环境保护部和福建省林业厅; 《福建省生态功能区划》等相关文献

2.1.2 综合生态安全格局构建

结合研究区特征与已有成果,按照划分标准分别构建分级为“底线安全格局-缓冲安全格局-最优安全格局”的四项单一生态安全格局,叠加构建闽三角城市群综合生态安全格局。基于各项生态系统服务功能的唯一性,单一过程安全格局的叠加过程中采取等权叠加方法;在叠加判别时,按照重要程度与保护力度采取“两两取高”算法。具体方法为基于 ArcGIS 平台,对四个单一过程的生态安全格局级别进行赋值,底线、缓冲、最优格局分别赋值为 3、2、1, 然后进行栅格镶嵌,每个栅格单元经过四次对比,选取最大值输出原则,获取最终的保护级别结果,即为综合生态安全格局,公式如下:

$$IESP = \text{Max}(SP_i), i = 3, 2, 1$$

式中, IESP (Integrated ecological security pattern)表示综合生态安全格局; SP_i 表示四种生态过程的单一生态安全格局。

2.2 基于 SLEUTH 模型的城镇用地扩展模拟

2.2.1 模型数据准备

在输入数据阶段,需要城镇范围、交通、坡度、山体阴影和排除层五类数据图层。四期城镇范围由四期土地利用重分类获取;两期交通图层由相应年份遥感影像矢量化获取;坡度和山体阴影图层是基于 DEM 数据计算获取;SLEUTH 模型校正阶段的排除图层仅将 2000 年土地利用类型里的水域作为 100% 概率排除进行设置,预测阶段使用的排除图层则根据 2015 年不同安全水平的生态安全格局综合构建结果设置。经 ArcMap 处理将所有数据统一为 8 Bit 的灰度 GIF 图像格式的栅格数据,并按照相应规则命名,使之符合 SLEUTH 模型的格式要求(图 2、图 3)。

2.2.2 模型校正与模拟预测

校正最终目的是根据历史数据获取五个适用于研究区扩展的增长系数,从而对其未来城镇用地扩展进行有效模拟。模型采用蒙特卡罗迭代,通过粗校正、精校正、终校正三个阶段,逐步缩小系数取值范围,采取 OSM 系数(Compare、Pop、Edges、Cluster、Slope、Xmean、Ymean 等 7 个指标的乘积)作为缩小系数取值区间的依据^[12,21],终校正结束后通过模拟系数获取,并结合研究区域历史城市扩张数据与类似成功案例数据,调整得

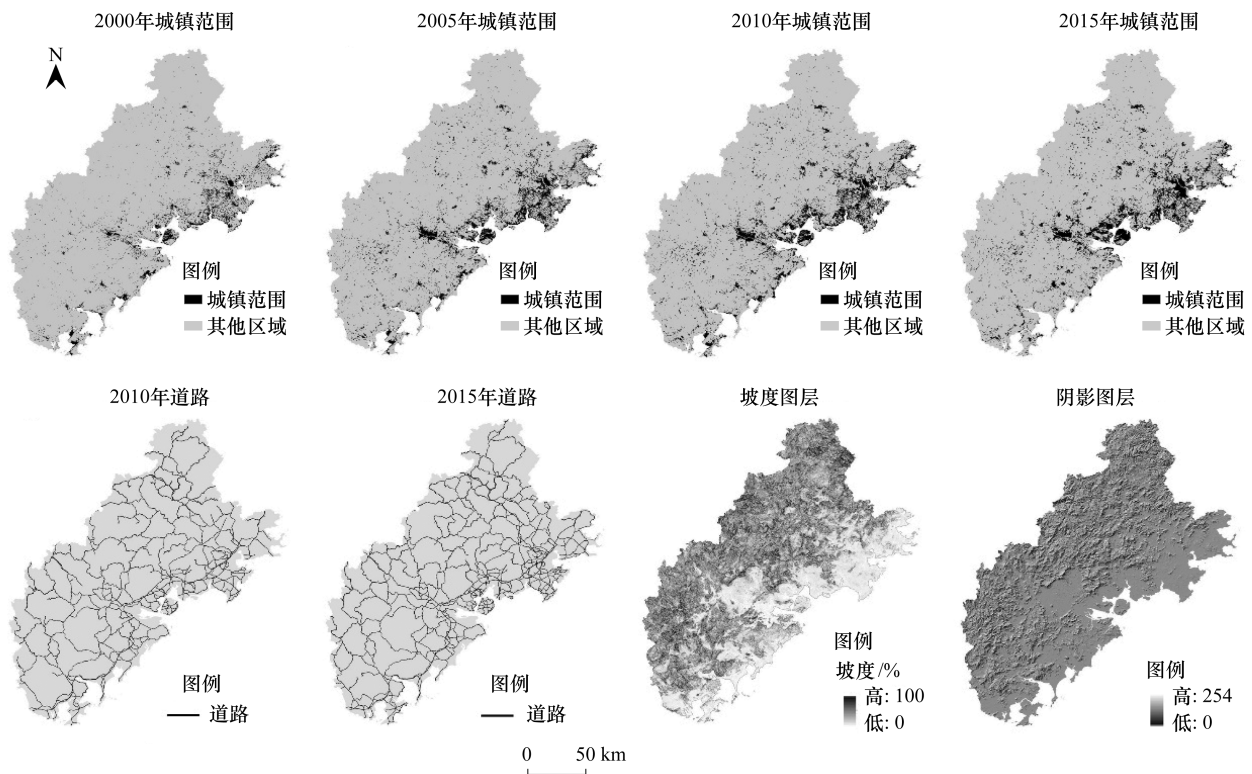


图2 输入数据图层

Fig.2 Input data layer

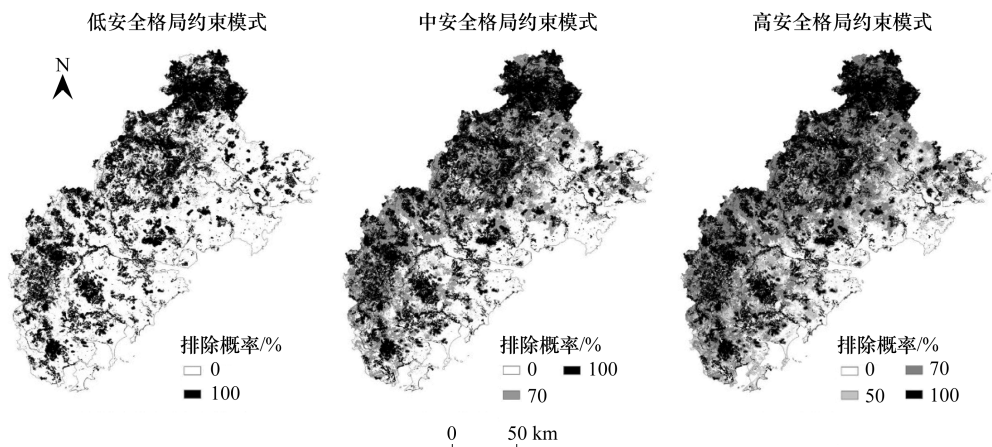


图3 三种情景下排除层设置图

Fig.3 Excluded layers of three scenarios

到最优系数集(表2)。为验证最优系数集的合理性,采用最优系数集重建历史时期的城市扩张过程,并在像元尺度上将2005年、2010年、2015年模拟图与实际观测图对比,模拟精度均在85%以上(表3),其值与很多其他成功案例相当,说明模拟精度达到要求。利用校正最后获取的模拟系数集启动预测模块,排除图层采用三种安全水平下的生态安全格局评价结果(表4),在predict命令下获取2030年度城镇开发概率图,根据研究区实际增长情况和相关案例经验^[26-27],将图中大于50%的开发概率栅格设为可转为城镇像元的阈值,得到不同情景预案下的2030年城镇用地扩展模拟结果。

表 2 SLEUTH 模型校正参数
Table 2 Calibrate coefficients in SLEUTH model

增长系数 Growth coefficient	粗校正 Coarse		精校正 Fine		终校正 Final		最优系数值 Best fit coefficient
	蒙特卡洛迭代次数 = 5		蒙特卡洛迭代次数 = 7		蒙特卡洛迭代次数 = 9		
	Monte-carlo iterations = 5		Monte-carlo iterations = 7		Monte-carlo iterations = 9		
	运行模拟次数 = 3125		运行模拟次数 = 3125		运行模拟次数 = 3125		
	Number of iterations = 3125		Number of iterations = 7776		Number of iterations = 7776		
	最佳模型指标 = 0.4679		最佳模型指标 = 0.4723		最佳模型指标 = 0.4723		
	OSM = 0.4679		OSM = 0.4723		OSM = 0.5034		
	范围	步长	范围	步长	范围	步长	
扩散系数 Diffusion	0—100	25	25—100	15	40—75	7	75
繁殖系数 Breed	0—100	25	50—100	10	50—75	5	53
传播系数 Spread	0—100	25	0—75	15	30—75	9	63
坡度系数 Slope	0—100	25	25—70	9	25—40	3	37
道路引力系数 Road gravity	0—100	25	25—100	15	25—55	6	33

表 3 SLEUTH 模型模拟精度统计表
Table 3 Simulation accuracy statistics of SLEUTH model

	2005 年	2010 年	2015 年
实际值 Actual value/(像元数/个)	368312	607196	735286
模拟值 Simulation value/(像元数/个)	419198	679978	817749
模拟精度 Simulation accuracy/%	87.86	89.30	89.92

模拟精度的计算公式为:模拟精度(%) = 100% - [(模拟值 - 实际值) × 100] / 模拟值

表 4 三种情景下排除图层的排除概率/%
Table 4 Exclusion probability of excluded layers in three scenarios

情景 Scenarios	2015 年现状 城镇建成区 Built-up area in 2015	水体 Water area	农业用地 Cultivated land	底线安全 格局区域 Basic security pattern area	缓冲安全 格局区域 Intermediate security pattern area	最优安全 格局区域 Optimal security pattern area
低安全格局约束 Lower grade ecological security pattern	0	100	100	100	0	0
中安全格局约束 Medium grade ecological security pattern	0	100	100	100	70	0
高安全格局约束 High grade ecological security pattern	0	100	100	100	70	50

3 研究区生态安全格局构建

研究整合闽三角城市群现状资源情况,总结出较突出的四大生态资源特征:(1)水资源较丰富。研究区雨量充沛,温暖湿润,年均降雨量 1400—2000 mm;区内水系发达、河网密布,坐拥晋江、九龙江、西溪等几大河流。(2)生物资源较丰富。区内森林覆盖率约 60%,地带植被是常绿阔叶林,优良的自然环境为多种生物的生长和繁衍提供有利的栖息地。(3)地质灾害隐患复杂多样。研究区丘陵和山地总面积占比超 80%,地形起伏度及坡度较大,且位于我国东南沿海台风高发区,常伴有高强度降雨,导致滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害频发^[28]。(4)游憩资源较丰富。研究区因其独特的地理环境,拥有省级以上自然保护区、风景名胜区、国家森林公园等 50 余处,是人文观光、休闲度假、游憩娱乐的重要区域。但当前人为胁迫影响日益严峻,研究区也面临水资源短缺、生物栖息地破碎化、地质灾害频发等问题。综上所述,从生态系统自身结构出发,选取水安全格局和生物保护安全格局来缓解较突出的生态问题;从生态过程对于环境变化的响应与灾害规避角度出发,将地质灾害安全格局作为一个重要因素;最后,从生态系统对人类的服务角度出发,选择游憩生态安全格局。在此基础上,结合数据的客观性、有效性、可获取性与可操作性,选取单一过程格局构建的相关指标进行评价,叠

加构建综合生态安全格局。

3.1 单一生态过程的安全格局构建

3.1.1 综合水安全格局

综合水安全格局构建是以恢复自然水文过程和规避雨洪灾害为目标,参考相关文献^[6,14],选取河湖水系、地表水源、洪水调蓄区和雨洪淹没区四个因子对水安全格局进行综合评判(表5)。其中,河湖水系、地表水源及洪水调蓄区是根据土地利用及重要水源地分布等数据,基于 ArcGIS 多环缓冲区和距离分析模块计算获取;雨洪淹没区分析是运用 ArcGIS 水文分析和空间分析模块,结合降水和数字高程数据,对地表径流、雨洪淹没等过程进行模拟,依次经过 DEM 填洼、水流方向模拟、汇流累积量计算等步骤,通过设置合理的径流量阈值进行流域划分;然后基于 SCS 水文模型^[15]模拟 10 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇的雨洪淹没体积与淹没高度,从而获取空间上三种不同风险频率的雨洪淹没范围。最后对这四个评价因子进行叠加,得到闽三角城市群综合水安全格局(图 4)。

表 5 综合水安全格局评价因子及其划分标准

Table 5 Evaluation factors and classification criterion of comprehensive hydrology security pattern

评价因子 Evaluating factors	底线格局 Bottom line security pattern	缓冲格局 Buffer security pattern	最优格局 Optimal security pattern
河湖水系 River and lake	河湖水系本身及缓冲区 (≤ 50 m)	50—150 m	150—500 m
地表水源 Water sources	地表水源本身及缓冲区 (≤ 500 m)	500—1000 m	1000—1500 m
洪水调蓄区 Flood storage area	三级调蓄区	二级调蓄区	一级调蓄区
雨洪淹没区 Flood inundated area	10 年一遇洪水淹没区	50 年一遇洪水淹没区	100 年一遇洪水淹没区

3.1.2 生物保护安全格局

根据研究区生物种群的生境特点及生活习性,对其进行栖息地适宜性评价和物种迁徙阻力面设置,运用最小累积阻力模型构建生物保护安全格局。首先,识别生物栖息地的关键空间,选取土地覆盖、海拔高度、人类干扰等评价因子,对其进行分类与权重赋值(表6),根据自然断点分级法,获取生物栖息地适宜性评价图,判别出生物种群的核心栖息地,即为生物迁徙的最小累积阻力模型中的“源”;然后进行生物迁徙阻力面设置,根据不同土地覆被类型与源地的差异,赋予 0—500 的阻力系数(表7),采用夜间灯光数据表征人类活动干扰对基本生态阻力面进行修正^[29]得到最终阻力面(图5、图6);最后,运用 ArcGIS 成本距离分析获取最小累积阻力面,并根据 MCR 阻力值与栅格数目的关系图,获取曲线的突变点作为阈值来划分不同的安全水平,以此来构建生物保护安全格局(图4)。

3.1.3 地质灾害安全格局

考虑研究区特殊的地形地貌地势特征及人类活动的影响,本文选取年均降雨量、坡度、高程、表面曲率、土壤类型、NDVI、土地利用类型、距主要公路距离及地质灾害点数目等因子作为地质灾害安全格局评价因子^[13,30],并对这 9 类因子的敏感性 & 权重进行赋值(表8),其中地质灾害点空间分布采用核密度分析法,并在此基础上叠加闽三角城市群近年来地质灾害点的空间分布范围,构建出闽三角城市群地质灾害安全格局(图4)。

3.1.4 游憩安全格局

选取省级以上自然保护区、风景名胜区、国家森林公园、国家地质公园、国家湿地公园等类别的游憩资源,作为游憩安全格局构建的主要生态源,根据其空间分布建立 ArcGIS 空间数据库,包括 10 处自然保护区、13 处风景名胜区、19 处森林公园、5 处湿地公园和 3 处地质公园;然后基于不同覆被类型对游憩活动的适宜性与可达性进行景观阻力赋值(表9),并以筛选出的游憩资源为源,基于最小累积阻力模型,运用 ArcGIS 成本距离

分析构建游憩活动的消费阻力面,判别和构建游憩安全格局(图4)。

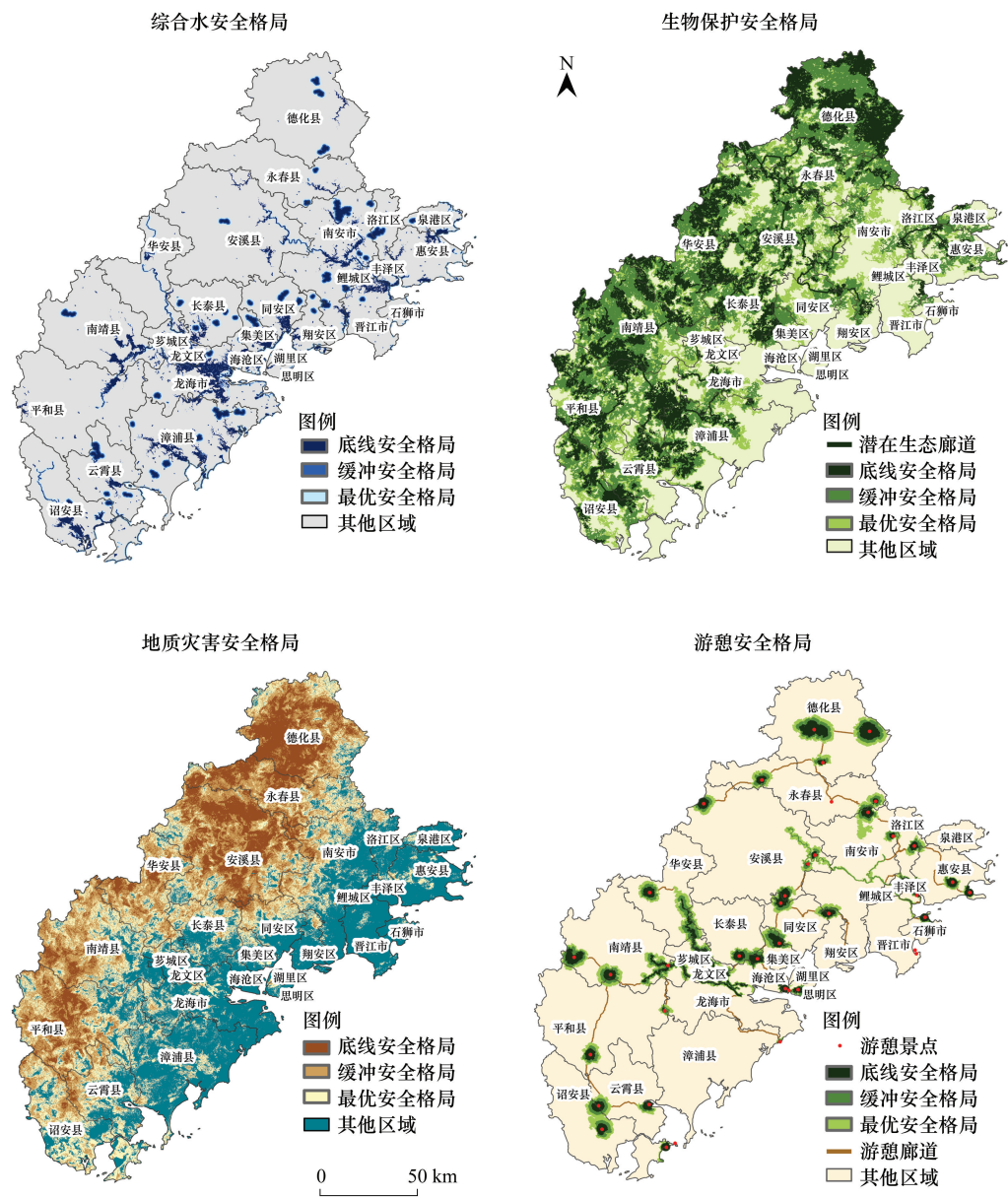


图 4 闽三角城市群单一生态安全格局

Fig.4 Single ecological security pattern of the Urban Agglomeration of Min Delta

表 6 生物栖息地适宜性评价因子及其划分标准

Table 6 Evaluation factors and classification criterion of biological habitat suitability			
评价因子 Evaluating factors	分类或分级 Classification	分值(0—10) Value	权重 Weight
土地覆被 Land cover	城镇用地、其他建设用地	0	0.35
	农村居民点	1	
	裸土地、裸岩石质地	2	
	低覆盖度草地	3	
	旱地、中覆盖草地	5	
	河渠、疏林地、其它林地	6	
	灌木林、高覆盖草地	7	

续表			
评价因子 Evaluating factors	分类或分级 Classification	分值(0—10) Value	权重 Weight
高程 Elevation	有林地、湖泊、水库坑塘、沼泽地	8	0.10
	水田、滩涂、滩地	10	
	0—100	5	
	100—800	10	
	800—1500	5	
	>1500	1	
距水源地距离/m	0—2000	6	0.25
Distance from water sources	2000—7000	8	
	7000—15000	10	
	15000—30000	5	
	>30000	2	
距建成区距离/m	>6000	10	0.15
Distance from Built-up area	4000—6000	5	
	2000—4000	3	
	0—2000	1	
	0	0	
距主要公路距离/m	0—500	0	0.15
Distance from traffic road	500—1000	1	
	1000—2000	3	
	2000—4000	5	
	>4000	10	

表 7 生物空间运动土地覆被阻力系数			
Table 7 Land cover resistance coefficient for space motion of wild animals			
土地覆被类型 Land cover	阻力系数 Resistance coefficients	土地覆被类型 Land cover	阻力系数 Resistance coefficients
有林地 Closed forest land	1	滩涂、滩地 Mudflat	100
灌木林、高覆盖草地 Shrub forest and Highly covered grassland	10	旱地 Nonirrigated farmland	200
中覆盖草地 Medium covered grassland	20	裸地、盐碱地 Bare land and saline-alkali land	300
疏林地、其他林地 Sparse forest land	30	农村居民点 Rural residential land	400
水田、沼泽地 Paddy field	50	城镇用地 Urban land	500
河渠、湖泊、水库坑塘 Water, lakes and reservoirs	50	其他建设用地 Other construction land	500

3.2 综合生态安全格局构建

按照等权叠加和两两取高原则,将综合水安全格局、生物保护安全格局、地质灾害安全格局以及游憩安全格局叠加,以此构建“底线-缓冲-最优”三种安全水平的综合生态安全格局(图 7)。其中,底线安全格局是保障区域安全的核心区,包括生态过程中最重要的源和关键生态区域,是城镇用地扩展不可逾越的生态底线,应划入主体功能区划中的禁止开发区域;此区域面积为 9305.51 km²,占总用地面积的 36.89%,主要分布于研究区西北部山区、滨水湿地以及各大地表水源保护区,景观类型主要由林地、高覆盖草地以及湿地组成。缓冲安全格局是包围在底线安全格局周边的缓冲区域,应划入限制建设区域;此格局面积为 7576.28 km²,占总用地面积的 30.03%,主要位于环绕在城市建成区的生态环境较好的区域。最优安全格局是自然系统与城镇系统进行物质能量交换流通的过渡区域,它是保障区域生态安全达到最优状态的分布范围,可根据研究区的具体情况进行有条件的开发建设活动;此格局面积为 3482.73 km²,占总用地面积的 13.81%。

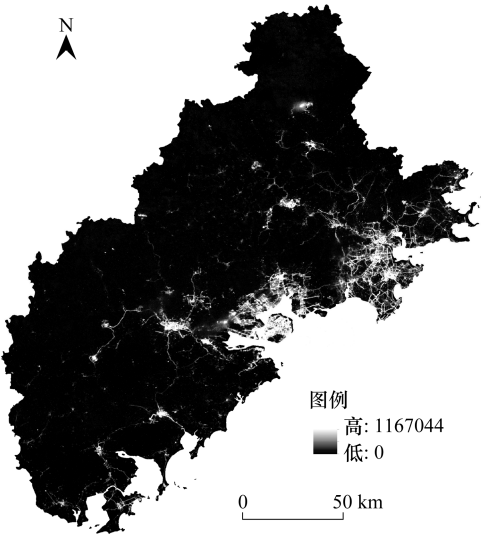


图 5 夜间灯光分布图
Fig.5 Night light distribution map

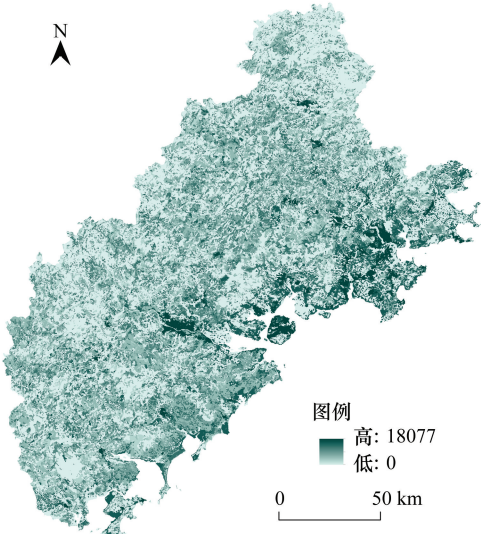


图 6 修正后的生态阻力面
Fig.6 Revised ecological resistance surface

表 8 地质灾害安全格局评价因子及其划分标准
Table 8 Evaluation factors and classification criterion of geological hazards

评价因子 Evaluating factors	标准化赋值 Standardized value					权重 Weight
	无影响区域 No impact area	最优安全格局 Optimal security pattern	缓冲安全格局 Intermediate security pattern	底线安全格局 Basic security pattern		
	不敏感(1) Insensitive	轻度敏感(3) Mildly sensitive	中度敏感(5) Moderately sensitive	敏感(7) Sensitive	高度敏感(9) Highly sensitive	
多年平均降雨量/mm Average annual rainfall	<1300	1300—1400	1400—1500	1500—1600	>1600	0.15
坡度 Slope/(°)	<5	5—15	15—25	25—35	>35	0.1
高程 Elevation/m	<200	200—500	500—800	800—1000	>1000	0.1
表面曲率 Curvature	-0.5, 0.5	(-1.5, -0.5], [0.5, 1.5)	(-2.5, -1.5], [1.5, 2.5)	(-3.5, -2.5], [2.5, 3.5)	(-∞, -3.5], [3.5, -∞)	0.1
土壤类型 Soil type	水稻土 灰潮土	盐土 风砂土 草甸土 石灰土	砖红壤 赤红壤 赤土 红壤 赤砂土	黄壤 黄红壤 粗骨土 石质土	紫色土	0.1
归一化植被指数(NDVI) Normalized difference vegetation index	>0.55	0.4-0.55	0.25-0.4	0.1-0.25	<0.1	0.1
土地覆被 Land cover	建设用地 水域 沼泽地 其他土地	林地 天然草地 改良草地	水浇地 旱地 园地	人工草地 荒草地 盐碱地	迹地 裸土地 沙地 裸岩石地 砾地	0.1
距主要公路距离/m Distance from traffic road	>5000	3000—5000	1500—3000	500—1500	<500	0.1
地质灾害点数目/(个/25km ²) Geological hazards number	<2	2—4	4—6	6—8	>8	0.15

表 9 游憩过程土地覆被类型与阻力系数
Table 9 Land cover resistance coefficient for recreation process

土地覆被类型 Land cover	阻力系数 Resistance coefficient	土地覆被类型 Land cover	阻力系数 Resistance coefficient
河渠、湖泊、水库坑塘、滩涂、滩地 Water, lakes, reservoirs and mudflat	0	沼泽地、裸土地 Wetlands and bare land	200
有林地、灌木林 Closed forest land and shrub forest	50	水田 Paddy field	300
疏林地、其他林地、高覆盖草地 Sparse forest land and highly covered grassland	100	旱地 Nonirrigated farmland	400
中覆盖草地 Medium covered grassland	150	农村居民点 Rural residential land	400
低覆盖度草地 Low covered grassland	200	城镇用地、其他建设用地 Urban land and other construction land	500

4 研究区城镇建设用地扩展模拟

在生态安全格局研究成果的基础上,本文构建了闽三角城市群城镇用地扩展的低、中、高三个生态安全格局约束预案,以此来探讨研究区城镇空间未来扩展的可能性。由图 8 可见,至 2030 年三种预案均沿东南沿海基本形成以厦漳泉建成区连片发展的趋势,且城镇用地空间分布表现出由东南沿海向西北内陆扩展的规律,区域一体化发展的空间雏形将形成。由表 10 可见,三种预案下的扩展模拟结果均表明在未来一定时段内,研究区都会面临用地增长,但扩展速率均小于历史年份 2000—2015 年的年均扩展速率。“高生态安全格局约束”情景秉承生态优先、兼顾发展理念,城镇用地扩展面积最小,林地耕地等生态空间被侵占的面积也最小,但城镇用地增长受限,整体呈现分裂式节点型发展,缺乏连续性;“低生态安全格局约束”情景秉承发展为主、生态底线理念,城镇用地的扩展面积和扩展速度均最大,对周边的生态资源侵占也最多,城镇建设用地整体呈现一体化发展趋势;中安全格局约束下的城镇扩展介于上述两种情景之间,基本可以同时满足生态用地和建设用地的双向需求。综上所述,将生态安全格局作为排除图层约束城镇用地的增长速度和扩展方向是有效且科学的,可以避免城镇无序蔓延对周边生态资源的大幅度侵蚀和破坏。

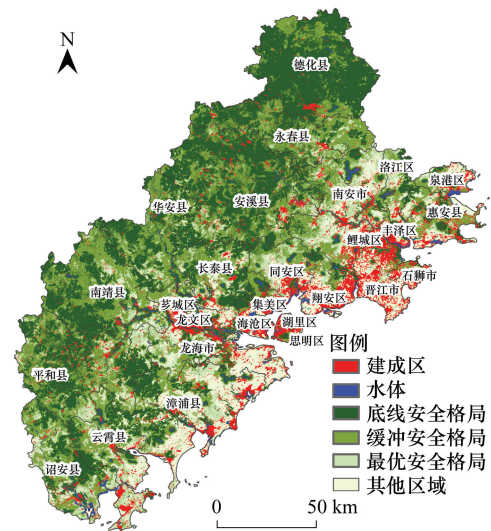


图 7 闽三角城市群综合生态安全格局
Fig.7 Integrated ecological security pattern of the Urban Agglomeration of Min Delta

表 10 2000—2030 年不同情境下城镇扩展面积和速率统计表
Table 10 The area and rate of urban sprawl under different scenarios from 2000—2030

时段 Period	情景 Scenarios	扩展像元数 Sprawl pixel number	扩展面积/hm ² Sprawl area	扩展速率/% Sprawl rate
2000—2015	历史数据	366974	132110.46	3.33
2015—2030	低生态安全格局约束	316355	113887.80	2.87
	中生态安全格局约束	264686	95286.96	2.39
	高生态安全格局约束	203876	73395.36	1.84

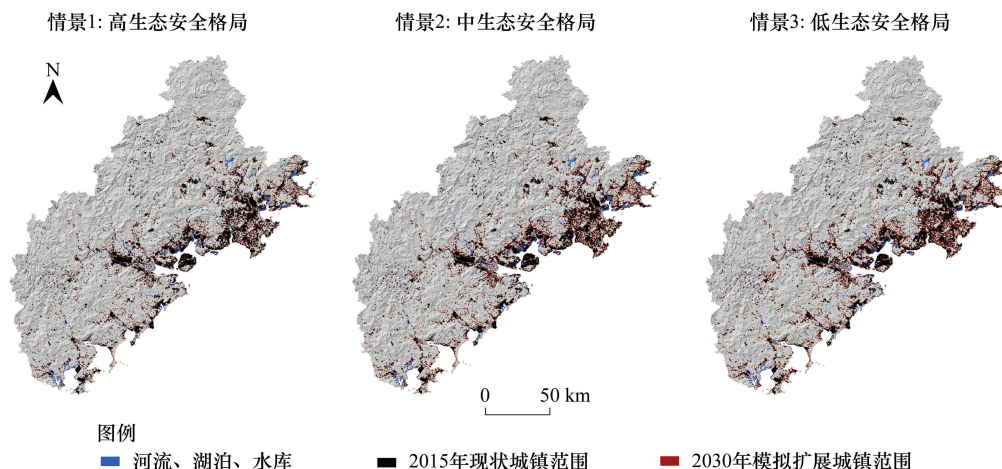


图 8 不同生态安全格局约束下 2030 年城镇用地扩展模拟

Fig.8 Simulation of urban sprawl in 2030 under different scenarios

5 讨论与结论

本文基于 ArcGIS 空间分析,通过综合水安全、生物保护安全、地质灾害安全、游憩安全四个单一的生态过程综合叠加构建了闽三角城市群综合生态安全格局,并划分为“底线格局-缓冲格局-最优格局”三个等级;然后,运用 SLEUTH 模型进行城镇用地扩展模拟,并将生态安全格局作为城镇扩展的约束条件,探索模拟了三种不同等级安全格局条件下的城镇用地扩展情景。“低-中-高生态安全格局”三种约束方式下的城镇用地扩展结果表明,至 2030 年厦漳泉区域一体化格局将基本形成,符合国家政策的宏观指导方向;随着约束等级的提高,研究区生态系统的连通性也逐级提高,而城镇系统的连通性逐级降低;综合比较,在中安全格局情景下,闽三角区域的生态保护与城乡建设能得到较均衡的发展,此预案较符合研究区域未来的扩展方向。研究结果也证明生态安全格局构建可实现生态保护与精明增长和谐发展的可能性,通过生态安全格局的限定来合理布局城镇空间格局。相关研究成果可为城镇增长边界控制、城市总体规划及土地利用规划等提供参考依据。

本文针对研究区的生态安全特征构建四大格局评价体系,从实践分析结果看,具有一定合理性,但综合生态安全格局的构建需要因地制宜的考虑因子的全面性和整体性,如大气安全、经济发展等因子也是未来研究的考虑方向;此外单一关键生态过程指标的选择、权重的分类赋值以及安全等级的划分是影响整个生态安全格局构建的科学合理性的关键,目前此方面的研究有待进一步的深化与完善。另一方面,快速城市化时期城市发展的复杂性与不确定性导致城市用地增长的影响因素广泛存在,使得 SLEUTH 模型的应用存在局限,如何更为科学合理的提高元胞自动机模型捕捉自上而下的政府决策、规划引导、开发区促动、基础设施建设等驱动因素对于城镇扩展影响的能力,是后续研究的重要方向。

参考文献 (References):

- [1] Peng J, Liu Y X, Li T Y, Wu J S. Regional ecosystem health response to rural land use change: a case study in Lijiang City, China. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 399-410.
- [2] 王玉莹, 金晓斌, 沈春竹, 鲍桂叶, 刘晶, 周寅康. 东部发达区生态安全格局构建——以苏南地区为例. *生态学报*, 2019, 39(7): 2298-2310.
- [3] 孙萍, 唐莹, Mason R J, 张景奇. 国外城市蔓延控制及对我国的启示. *经济地理*, 2011, 31(5): 748-753.
- [4] 马明, 顾康康, 李咏. 基于生态安全格局的城乡生态空间布局与优化——以宣城市为例. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(4): 93-102.
- [5] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419.
- [6] 周锐, 王新军, 苏海龙, 钱欣, 孙冰. 基于生态安全格局的城市增长边界划定——以平顶山新区为例. *城市规划学刊*, 2014, (4): 57-63.

- [7] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 林乃峰, 徐梦佳. 生态安全格局研究的主要内容与进展. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392.
- [8] Forman R T. Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [9] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.
- [10] 尹海伟, 孔繁花, 罗震东, 闫伟姣, 孙常峰, 许峰. 基于潜力-约束模型的冀中南区域建设用地适宜性评价. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2274-2280.
- [11] 徐海龙, 尹海伟, 孔繁花, 许峰. 基于潜力—约束和 SLEUTH 模型松散耦合的南京城市扩展模拟. 地理研究, 2017, 36(3): 529-540.
- [12] 田雅楠, 张梦晗, 许荡飞, 张圣微. 基于“源-汇”理论的生态型市域景观生态安全格局构建. 生态学报, 2019, 39(7): 2311-2321.
- [13] 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 黄光庆, 叶玉瑶, 吴旗韬, 黄宁生, 匡耀求. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案. 生态学报, 2013, 33(5): 1524-1534.
- [14] 俞孔坚, 王思维, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长远景. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [15] 周星宇, 郑段雅. 武汉城市圈生态安全格局评价研究. 城市规划, 2018, 42(12): 132-140.
- [16] Sakieh Y, Amiri B J, Danekar A, Feghi J, Dezhkam S. Simulating urban expansion and scenario prediction using a cellular automata urban growth model, SLEUTH, through a case study of Karaj City, Iran. Journal of Housing and the Built Environment, 2015, 30(4): 591-611.
- [17] Barredo J I, Kasanko M, McCormick N, Lavalle C. Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. Landscape and Urban Planning, 2003, 64(3): 145-160.
- [18] Clarke K C, Hoppen S, Gaydos L. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. Environment and Planning B: Planning and Design, 1997, 24(2): 247-261.
- [19] 蒋海波, 石培基, 李寿国, 陈芸芬. 基于 SLEUTH 模型的酒嘉一体化城市扩展预测. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 25-31.
- [20] Li F X, Wang L Y, Chen Z J, Clarke K C, Li M C, Jiang P H. Extending the SLEUTH model to integrate habitat quality into urban growth simulation. Journal of Environmental Management, 2018, 217: 486-498.
- [21] 蒙吉军, 王雅, 王晓东, 周朕, 孙宁. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1052-1061.
- [22] 李谦, 戴靓, 朱青, 杨桂山, 吴绍华. 基于最小阻力模型的土地整治中生态连通性变化及其优化研究. 地理科学, 2014, 34(6): 733-739.
- [23] 刘孝富, 舒俭民, 张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用——以厦门为例. 生态学报, 2010, 30(2): 421-428.
- [24] 杨志广, 蒋志云, 郭程轩, 杨晓晶, 许晓君, 李潇, 胡中民, 周厚云. 基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3367-3376.
- [25] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 1-16.
- [26] Rafiee R, Mahiny A S, Khorasani N, Darvishsefat A A, Danekar A. Simulating urban growth in Mashad City, Iran through the SLEUTH model (UGM). Cities, 2009, 26(1): 19-26.
- [27] Onsted J A, Chowdhury R R. Does zoning matter? A comparative analysis of landscape change in Redland, Florida using cellular automata. Landscape and Urban Planning, 2014, 121: 1-18.
- [28] 林金煌, 胡国建, 祁新华, 徐曹越, 张岸, 陈文惠, 帅晨, 梁春阳. 闽三角城市群生态环境脆弱性及其驱动力. 生态学报, 2018, 38(12): 4155-4166.
- [29] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, Wu J S. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Urban Ecosystems, 2017, 20(3): 701-714.
- [30] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 刘焱序. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例. 应用生态学报, 2017, 28(2): 627-635.