

杨清可, 段学军, 金志丰, 等. 南通市建设用地扩张情景模拟与景观生态效应[J]. 地理科学, 2017, 37(4): 528-536. [Yang Qingke, Duan Xuejun, Jin Zhifeng et al. Spatial Scenario Simulation and Landscape Ecological Effect Based on Construction Land Expansion of Nantong City. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(4): 528-536.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.04.006

南通市建设用地扩张情景模拟与景观生态效应

杨清可^{1,2,3}, 段学军^{1,3}, 金志丰⁴, 王磊^{1,3}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院流域地理学重点实验室, 江苏 南京 210008; 4. 江苏省土地勘测规划院, 江苏 南京 210024)

摘要:选择城镇化进程快速、区位条件特殊的南通市作为案例,集成CLUE-S模型与Auto-logistic回归模型构建适合不同情景的建设用地扩张的动态分布模型。通过1987年以来遥感影像获取的4个时段的南通市建设用地增长时空特征分析提取先验知识规则,模拟在基准、经济发展、生态保护等情景下建设用地增长与空间布局,通过景观学知识分析其空间扩张的生态效应。结果表明,1987年以来,南通市建设用地扩张剧烈,空间上围绕城区和乡镇中心快速蔓延,呈现“轴线增长-内部填充”交替的周期性波动规律。Kappa系数与模拟正确率(PCM)显示,构建的复合集成模型具有较高的可靠性,能够应用于对未来建设用地空间分布的模拟。模拟结果显示未来建设用地扩张集中在城镇周边,其中在经济发展情景下还有向东部沿海滩涂扩展的趋势。由于扩张剧烈,在建设用地集中区呈现出融合成更大面积分布区的现象。建设用地空间扩张的斑块密度和景观形状指数均较高,景观格局趋于不稳定,破碎化相对严重。

关键词:建设用地扩张;空间模拟;景观生态效应;南通市

中图分类号:K902 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2017)04-0528-09

快速的工业化和城镇化,使得城市扩张和蔓延成为过去几十年中全球城镇发展的显著特征,并将在未来持续发生^[1,2]。城镇空间的增长和伴随发生的土地利用变化对生态系统服务功能、城镇形态和城镇居民的生活方式等产生了诸多影响^[3]。尤其是中国作为世界上发展最快、人口最多的国家,城镇扩张产生的负面影响已经蔓延,如耕地占用、生态环境破坏等^[4,5]。因此,城市扩张一直是地理学、生态学、3S科学等学科研究的重点,在中国尤其受到关注^[6-8]。

认识和理解城市发展过程的特征规律,建立有效的城市空间扩张模型,对其扩张过程中的动态行为进行有效的描述、模拟、分析和预测,可以为区域发展、城市规划和管理等提供决策支持^[9]。建设用地扩张是受各种因素共同作用的非线性复杂过程,模拟与预测需要一定规则指标或者模型支撑,虽然预测具有不确定性及片面性,但建设用地扩张动态模拟是城市化影响下的土地利用/覆盖

变化以及城市化与环境变化交互机理研究的重要手段,在一定程度上为城镇发展与用地优化配置研究提供参考^[10]。目前对城市扩张分析与模拟的研究较多,主要集中在时空变化探测、驱动机制分析、过程模型构建,以及宏观生态环境效应等多个方面^[11]。基于微观的Cellular Automata(CA)和Multi-Agent System(MAS)的城市空间扩张模型^[12,13],以及基于灰色理论、系统动力学、神经网络和支持向量机等城市空间扩张规模预测模型因其具有鲜明的特点被应用于土地变化研究中,各模型在分析与预测土地数量结构变化、表达土地利用变化中的邻域关系、体现人为因素等复杂决策过程中的用地变化等方面具有不同的优势^[14-17],对于土地利用的模拟产生较好的效果。但是,土地利用类型与影响因素之间的空间位置与土地利用类型变换的竞争关系较少涉及。对城市建设用地扩张的模拟多是建立在不同数学模型与预测指标的基础上,采用的模型和预测指标不同,致使模拟的结果差别

收稿日期:2016-04-20;修订日期:2016-06-22

基金项目:国家自然科学基金(41601169)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41601169).]

作者简介:杨清可(1986-),男,山东滕州人,博士研究生,研究方向城市与区域规划。E-mail: yangqingke66@163.com

通讯作者:段学军,研究员。E-mail: xjduan@niglas.ac.cn

较大。

基于上述背景,本文尝试利用经过改进的Auto-logistic回归模型与CLUE-S模型,对用地概率进行评估,引入距离函数作为空间权重的设定依据,体现建设用地变化中除竞争性之外的空间自组织性^[18,19]。通过1987年以来高分辨率遥感信息探测获取的4个时段的南通市建设用地时空变化特征提取先验知识规则,模拟在基准、经济发展、生态保护等不同情景下建设用地增长过程与扩展特征,通过景观学知识来分析空间扩张的生态效应,为南通市土地集约利用、城市增长边界的划定和生态系统管理提供科学参考。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

南通市位于江海交汇处,地处江苏省东南部,长江口北岸,东濒黄海、背依苏北平原,与沪、苏、锡隔江相望,呈濒江临海“半岛型”的港城格局,被誉为“江湖门户”和“北上海”。地处长三角核心区,区位优势显著,尤其是苏通长江公路大桥建成后,南通将进入上海1 h经济圈。近年来,南通市注重经济增长提质增量,土地利用陆海统筹,空间扩展江海联动,社会经济水平显著提高。2012年,全市GDP高达4 558.7亿元,比上年增长11.8%;全年财政收入1 055.9亿元,比上年增长27.1%。经济增长快速,产业结构优化,2012年的三次产业结构为7.0:53.0:40.0,工业经济仍为GDP的构成主体^[20]。

1.2 数据来源

南通土地利用数据来源于中国环境保护部环

境卫星的遥感监测中心基于Landsat TM获取的土地利用/覆盖数据,以及基于中巴地球资源卫星(CBERS)新建立的2010年土地利用/覆盖数据(图1)。自然基础数据中的耕地质量、地质灾害、重要生态区与路网等数据来自对南通市发改委、国土局、港务局等单位的实地调研。水系、河网数据来自中科院南京地理所湖泊流域数据集成与模拟中心。社会经济数据来自历年统计年鉴。为研究方便,将自然属性信息借助ArcGIS10.1软件进行空间化处理,转化为点位数据、栅格数据与ASCII码数据。

2 研究方法

2.1 空间扩张模拟模型

建设用地空间扩张过程受到自然条件、社会经济发展、生态环境约束等多重因素的综合作用,本文运用CLUE-S模型来对其扩张进行空间模拟,模型可由非空间模块和空间模块组成^[21,22]。

非空间模块:作为单独输入到模型中的模块,不受空间环境的影响。通过对建设用地变化起驱动作用的非空间因素的分析,测算各类型土地利用的需求。由于南通市在不同时期受到人文经济、国土政策与城市发展战略的影响,建设用地具有时空差异和突变特征。为此,采用系统动力学模型(System Dynamics, SD),一种以反馈控制理论为基础,以计算机仿真技术为手段,研究复杂社会经济系统的定量方法^[23,24]。

空间模块:根据影响因子计算空间单元的概率,通过概率大小对建设用地进行空间分配,实现建设用地动态模拟。借助CLUE-S模型进行建设

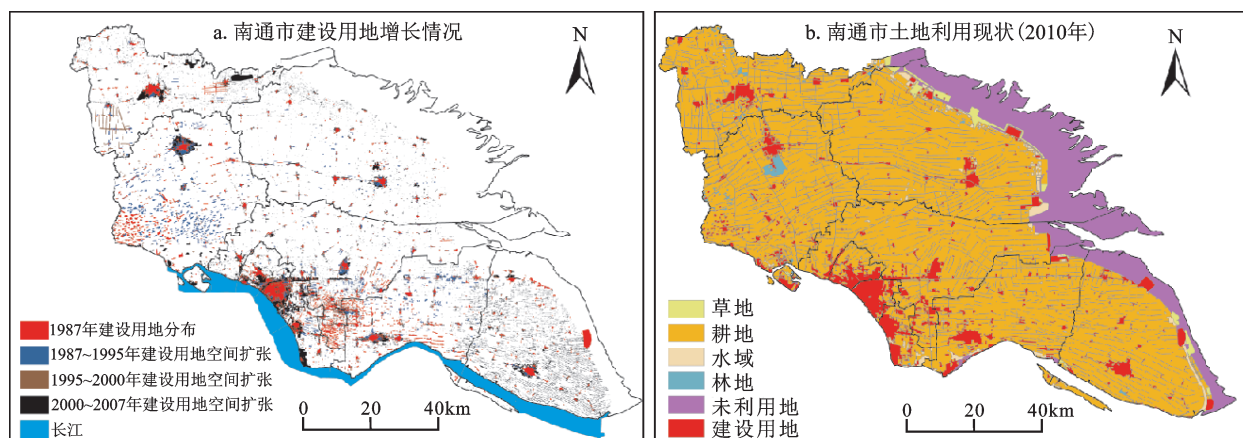


图1 南通市建设用地增长情况(a)和土地利用现状(b)

Fig.1 construction land growth (a) and Land use map in 2010 (b) in Nantong

用地扩张的空间影响分析、区域发展情境与空间布局动态模拟。

1) 空间影响分析:对建设用地扩张的空间影响分析运用改进的 Auto-logistic 模型,由 Besag 于 1972 年首先提出^[23],是在传统 Logistic 回归模型基础之上以空间权重的形式引入自相关因子,解决了空间统计分析中固有的自相关影响。为引入空间自相关因子,将时空点 (X, T) 处的土地利用类型出现的条件概率定义为驱动因素和一个表示空间自相关性的虚拟变量的函数形式。如果用集合 $\{(X_i, T_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ 表示所有出现的土地利用类型的空间位置和发生时间,且假定时空位置 (X_i, T_i) 出现某种土地利用类型的条件概率及其相应的驱动因素满足 Logistic 函数形式,引入空间权重形成 Auto-logistic 回归模型。一般表达式为:

$$P(y_i = 1 | \beta_0, \beta, \gamma) = \frac{\exp\left(\beta_0 + X\beta + \gamma \sum_{j=1}^n y_j w_{ij}\right)}{1 + \exp\left(\beta_0 + X\beta + \gamma \sum_{j=1}^n y_j w_{ij}\right)} \quad (1)$$

式中: X 代表由一系列影响因素构成的向量; w_{ij} 代表空间权重值; y_i 代表事件的状态,为值变量。其中空间权重函数 w_{ij} 的选择可以根据实际情况自行确定。Tobler 的地理学第一定律指出:空间数据的相关性揭示了一种自然分布模式,即 2 个靠近点的属性值比 2 个分离点的属性值具有更大的相关性^[25]。因此,取权重函数为点对间距离的倒数,即如果空间点对 i, j 的距离以 D_{ij} 表示,空间权重函数表示为:

$$w = \begin{cases} 1/D_{ij} & \text{当对象 } i \text{ 和 } j \text{ 的距离小于给定距离阈值 } d \text{ 时} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中,空间权重函数可以运用 OpenGeoDa 软件计算得到。

2) 区域发展情景分析:旨在描述和分析事物发展的各种可能性,对比不同发展路径下的状态,为决策提供依据和宏观背景,是开展建设用地模拟的基础。考虑南通建设用地的生产适宜性、常住人口的空间集聚与固定资产投资强度,设定建设用地利用系统变化主要参数,确定 3 种不同情景(表 1)。

① 基准情景:此情景是针对实地调研资料而设计的情景方案。各参数的设置主要参考南通市经济发展的实际,较好地反映了其土地利用的实

表 1 不同扩张情景下主要指标的预测

Table 1 The predication of the main indexes in different scenarios

情景设置	指标	2015 年	2020 年	2025 年
基准情景	常住人口(万人)	784.5	798.3	806.4
	城镇化率(%)	60	66	70
	固定资产投资(亿元)	4712.4	7085.9	9708.3
	GDP 总量(亿元)	5972.6	8775.7	11743.8
经济发展情景	常住人口(万人)	796.3	816.4	830.8
	城镇化率(%)	62	70	75
	固定资产投资(亿元)	5389.1	9163.1	14424.8
	GDP 总量(亿元)	6527.8	10276.3	14753
生态保护情景	常住人口(万人)	776.7	784.5	786.5
	城镇化率(%)	58	64	68
	固定资产投资(亿元)	4280.6	6003.7	7662.5
	GDP 总量(亿元)	5581.5	8013	10723.1

际情况(目标控制的设置参考《南通市城市总体规划(2011~2020)》,而 2025 年的目标控制参考《南通市城市总体规划修编(2015~2030)》)。^② 经济发展情景:此情景优先保障城镇工矿与旅游休闲产业发展的用地,满足高效农业发展下的农业结构调整的用地需求,保持经济快速发展。未来 10~20 a,将是南通市工业发展与转型升级、城镇化进程的关键时期。政府要扶持当地支柱产业,加大固定资产投资力度,提高产业发展层次。此情景下 SD 模型中有利于经济发展的参量将被适当提高。^③ 生态保护情景:此情景根据南通市对生态环境保护的限制性要求,满足生态用地需求,保护自然环境。严格限制林地、草地等生态用地向其他用地类型转换,积极实施退耕还林工程,控制固定资产投资,提倡集约高效发展。

最后,空间布局动态模拟:是整个模块的核心部分。利用统计分析模块输出不同情景下土地利用时空格局与自然本底条件、社会经济因素之间的相互作用关系,根据需求模块确定的土地利用变化目标,预测各因素的变化特征,在空间上对建设用地进行动态分配与优化布局。

2.2 景观生态效应分析

景观格局的生态效应可以通过格局分析解释其蕴含的生态意义,景观异质性是判断生态系统稳定性和安全性的重要标志^[26,27]。借鉴相关研究^[28~30],斑块尺度上的破碎度(FN)、斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、分维度(FD)包含斑块数量、大小、周长、面积等信息,表示结构上的破碎

程度和形状规则的程度;景观尺度上的蔓延度指数(CONTAG)、散布与并列指数(IJI)、香农多样性指数(SHDI)和香农均度指数(SHEI)包含团聚延展、相邻、多样性、均度等信息,功能上反映斑块之间的组合程度和稳定程度。本文选用以上8种景观格局指数评价建设用地扩张的景观生态效应,利用Fragstats 4.2软件计算。

2.3 方法处理与技术流程

依据模型结构,实现步骤如下:① 基于南通市建设用地变化的时空信息,分析建设用地扩张的时空格局特征与驱动机制,挖掘先验知识规则,设置未来建设用地增长的情景方案;② 针对不同时段受到自然本底条件、社会经济发展以及生态环境保护等的相关因素与政策的影响,运用SD模型对南通市建设用地增长进行分析,以2010年为起始时点,测算南通2015年、2020年、2025年3个节点年份不同情景下的建设用地面积;③ 建立研究区480 m×480 m格网系统,生成用地空间比例数据,在南通城市面积总量控制下转化为(0,1)空间网格数据。识别影响城市增长的空间因素,选择距离城市中心,距离海岸带距离,一般公路、高速公路、铁路的距离以及长江与其他主要河流距离等指标生成480 m×480 m格网;④ 应用Auto-logistic模型分析不同影响因素下各单元建设用地分布概率,CLUE-S模型根据建设用地在空间上发生转变的概率最大的位置,完成空间分布模拟;⑤ 测算不同情景下建设用地扩张的景观生态效应。

3 研究结果

3.1 建设用地扩张的特征分析

根据TM遥感影像解译结果,1987年以来,南

通市建设用地面积快速增长,从1987年的648.6 km²增长到2010年的1 972.3 km²,土地开发强度从6.16%升至18.70%,20多年内,扩张了3倍多。建设用地增长在不同时段呈现显著的变化,其中1987~1990年,年均增速仅有0.13%,开发强度增至6.56%。1991~1997年,建设用地的扩展速度最快,年均增长1.17%,开发强度在1997年迅速增至14.61%。1998~2003年,由于国家土地利用政策收紧,严控建设用地指标投放,制止建设用地无序蔓延和低效利用,城市扩张缓慢,但2004年后,由于城镇化和工业化加速进行,为支撑经济增长和大量人口向城市集聚,增速较前一阶段加快,至2010年,建设用地面积增至1 972.3 km²,开发强度也相应达到18.70%(图2)。

南通市建设用地增长的主要特征:① 建设用地扩张剧烈,表现为原有城区和乡镇中心的急剧蔓延,村庄建设用地呈“串珠状”布局,交通建设用地迅速扩张。② 建设用地扩张呈现“轴线增长-内部填充”交替的周期性波动态势。经济起飞初期,建设用地利用为追求交通可达性和经济效益最大化,多沿主干道路沿线和经济增长走廊扩张;经济发展至一定阶段后,因后备土地不足、用地供给紧张与土地政策约束等因素,多以填充式扩张为主。③ 不同阶段建设用地变化呈现非线性增长的特点,受经济发展周期与工业化、城镇化等多重因素影响,尤其是国家宏观层面的土地利用政策(如建设用地的“增减挂钩”和耕地利用的“占补平衡”)与城市发展战略的影响深远。

3.2 建设用地扩张情景模拟

应用基期年建设用地现状数据推演未来城市增长情况,将模拟结果与真实变化情况进行比较,应用Kappa系数与模拟正确率(PCM)来进行精度

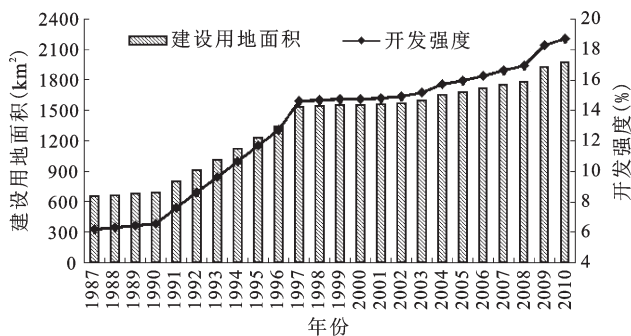


图2 南通市建设用地面积与土地开发强度

Fig.2 Construction land area and development intensity in Nantong

评价^[10]。结果(表2)显示PCM的平均精度为60.19%,Kappa系数值也达到0.61,说明模拟结果较好。其中,由于本文以2010年作为未来建设用地扩张模拟的基础,所以2010年的模拟效果最好,PCM精度达到67.31%,Kappa系数为0.68,模拟效果较为理想,可将构建的复合模型应用于建设用地空间扩张的模拟。

表2 不同时间节点建设用地增长空间模拟精度

Table 2 Analysis of simulated precision of construction land in different time points

节点年份	1987	1995	2000	2010	平均
PCM	58.12%	53.16%	62.15%	67.31%	60.19%
Kappa	0.58	0.52	0.64	0.68	0.61

根据城市建设用地预测与增长潜力模拟2015年、2020年、2025年在基准情景、经济发展情景、生态保护情景下的城市建设用地扩张的空间格局。依据上文情景设置,以及社会、经济、生态环境等方面主要控制指标目标值的设置,运用SD模型预测不同情景下建设用地扩张的面积(表3)。

表3 不同情景下建设用地扩张的面积(km²)

Table 3 The areas of construction land expansion under different scenarios(km²)

情景设置	2015年	2020年	2025年
基准情景	2051.8	2131.0	2175.3
经济发展情景	2095.1	2212.2	2301.9
生态保护情景	2030.7	2072.9	2109.9

① 基准情景:2015年、2020年、2025年的建设用地面积分别为2 051.9 km²、2 131.0 km²、2 175.3 km²(表3)。2011~2025年中建设用地需求面积的总量持续增加,但由于经济发展的转型升级、生态环境约束的加强,建设用地的扩张在不断降低。模拟结果显示,在2010~2015年、2015~2020年、2020~2025年3个时段,建设用地分别增加79.6 km²、79.1 km²与44.3 km²。建设用地扩张空间集中分布在城市建成区周边、长江以及道路网沿线(图3)。

② 经济发展情景:通过SD模型预测建设用地于2015年、2020年、2025年的扩张面积分别为2 095.1 km²、2 212.2 km²与2 301.9 km²(表3),与基准情景相比,经济发展情景关键约束指标设置侧重满足经济发展对建设用地的需求,生态指标的

设置相对宽松。在2010~2015年、2015~2020年、2020~2025年3个时段内,建设用地增长分别高达122.8 km²、117.1 km²与89.7 km²。在空间扩张模拟中,除在原有城区外围扩张外,还呈现向东部沿海滩涂扩展的趋势,对生态系统稳定性产生严重压力。同时,在新的工业园区、城镇工矿集中区周围的建设用地扩张也较为显著(图4)。

③ 生态保护情景:在2015年、2020年、2025年3个时间节点中建设用地分别增加至2 030.7 km²、2 072.9 km²与2 109.9 km²(表3)。建设用地需求总量不断增加,但由于生态环境的关键约束指标数值设置较为严格,在2010~2015年、2015~2020年、2020~2025年3个时间段内只增长了58.4 km²、42.2 km²与37 km²。空间模拟中,建设用地的扩张仍然出现集中连片的趋势,主要分布在西南部的城区、海门及启东等地,但面积均较小,扩张速度在一定程度上得到控制(图5)。

3.3 建设用地扩张的景观生态效应

情景模拟在景观格局上生态效应的差异,能够成为决策者选择未来发展模式的重要依据。因此,本文在斑块尺度与景观尺度上分析城市建设用地格局变化所产生的景观生态效应,揭示其蕴含的重要生态意义。

斑块尺度上,不同时期建设用地的景观格局指数差异较大。各情景下建设用地空间分布的破碎度(FN)、斑块密度(PD)和景观形状指数(LSI)都相对较高,分维度(FD)小,形状复杂,是景观脆弱性的主要来源,而且景观格局趋于不稳定(表4)。在2015年、2020年、2025年,对比不同情景下的城市建设用地景观格局可以发现,随着扩张面积的持续增加,基准情景与经济发展情景下的破碎化程度均较高。按照目前的发展趋势,在以经济增长为未来发展导向的情况下,建设用地数量需求和空间管制措施,并不能有效制约人类活动为主导的建设用地面积增长与空间扩展对城市景观格局所造成的潜在影响。受南通市实际土地利用类型,以及域内95%以上的耕地被划为基本农田保护区的限制,土地利用规划中变更使用性质程序复杂,未来建设用地扩张的主要方向放在了对沿海滩涂的大面积围垦,通过建设用地指标置换来满足城市发展的用地需求。与此对应,生态保护情景下的建设用地破碎度相对较低,斑块密度下降,分维度提高,对城市生态环境与景观格局的影

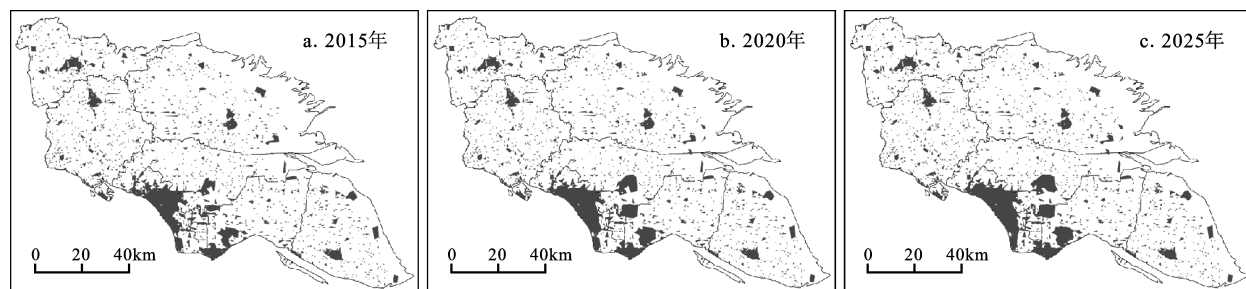


图3 基准情景下建设用地空间分布模拟

Fig.3 Simulated result of future construction land based on baseline scenario

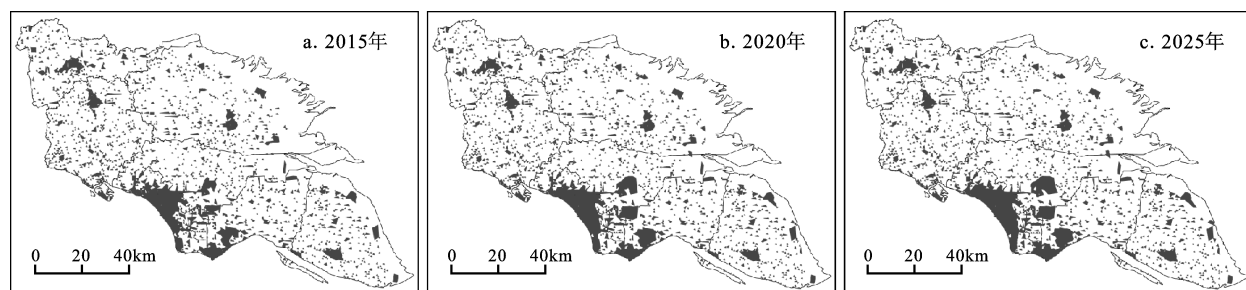


图4 经济发展情景下建设用地空间分布模拟

Fig.4 Simulated result of future construction land based on scenario of economic development

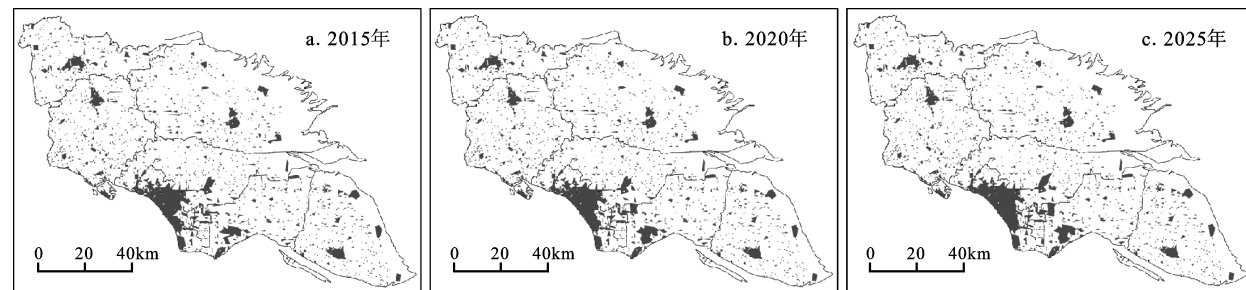


图5 生态保护情景下建设用地空间分布模拟

Fig.5 Simulated results of future construction land based on scenario of ecological conservation

响最小,是未来建设用地扩张需要引导的方向。

景观尺度上(表5),经济发展情景下蔓延度指数(CONTAG)最大,这与建设用地扩张的空间模拟结果相对应,扩张的建设用地主要分布城镇、工矿周边,集中连片趋势明显。生态保护情景下的散布与并列指数(IJI)、香农多样性指数(SHDI)和香农均度指数(SHEI)达到最大,表明在斑块之间组合程度合理,景观格局具有最大的多样性和最均匀的分布格局。基准情景下的建设用地扩张的景观生态效应指标介于其余2种情景之间,比较符合预期。

总体上,在城市经济发展与生态环境保护之间,建设用地面积扩展与空间分布的结果对南通市景观生态效应的影响显现出两种不同的方向,未来城镇化的稳步推进、产业经济发展与生态环境保护之间需要寻找平衡点,实现景观空间结构的合理布局,降低各种不稳定性和风险,使城市发展具有可持续性。此外,在南通市土地利用层面,景观生态的稳定还依赖于建设用地、农用地和生态用地景观的合理组合,多样性的用地格局能保证建设用地不因自然或人类环境的不稳定而造成对生态环境不可逆的破坏。

表4 南通市不同情景下斑块尺度景观指数比较

Table 4 Landscape indices based on class-level in different scenarios in Nantong

年份	指标	基准情景	经济发展情景	生态保护情景
2015	FN	0.114	0.228	0.116
	PD	0.446	0.459	0.421
	LSI	52.435	53.436	48.866
	FD	1.019	1.020	1.019
2020	FN	0.105	0.182	0.112
	PD	0.455	0.470	0.434
	LSI	50.344	52.102	47.644
	FD	1.023	1.026	1.019
2025	FN	0.103	0.178	0.109
	PD	0.462	0.482	0.441
	LSI	48.345	50.827	46.215
	FD	1.024	1.029	1.021

表5 南通市不同情景下景观尺度的景观指数比较

Table 5 Landscape indices based on landscape-level in different scenarios in Nantong

年份	指标	基准情景	经济发展情景	生态保护情景
2015	CONTAG	47.763	52.398	49.623
	IJI	75.094	69.897	76.126
	SHDI	0.989	0.857	0.882
	SHEI	0.615	0.532	0.548
2020	CONTAG	50.325	54.157	52.243
	IJI	72.033	65.872	73.192
	SHDI	0.909	0.828	0.853
	SHEI	0.615	0.532	0.548
2025	CONTAG	51.135	57.237	55.570
	IJI	69.054	62.715	71.125
	SHDI	0.889	0.826	0.855
	SHEI	0.584	0.503	0.529

4 结论

本文以南通市为例,集成CLUE-S模型与Auto-logistic回归模型构建建设用地扩张增长动态分布模型,模拟在基准、经济发展、生态保护等情景下的建设用地空间扩张,通过景观格局指数对比分析不同情景模式下的景观生态效应。研究表明:

1) 1987年以来,南通市建设用地扩张剧烈,空间上主要是城区和乡镇中心快速蔓延。不同阶段城市建设用地变化呈现非线性增长,具有“轴线增长-内部填充”交替的周期性波动态势。建设用

地扩张在不同时段呈现时空差异性与突变特征,在空间格局上与各因素的欧几里德距离呈现高度的动态相关性。

2) 应用基期年南通土地利用现状数据推演模拟未来城市增长情况,将模拟结果与真实变化情况进行比较,Kappa与PCM系数显示模拟效果较好。通过SD模型与CLUE-S模型对南通市建设用地扩张进行预测与模拟,基准情景下2015年、2020年、2025年的预测结果为2 051.8 km²、2 131.0 km²与2 175.3 km²;经济发展情景的结果为2 095.1 km²、2 212.2 km²与2 301.9 km²;生态保护情景的结果为2 030.7 km²、2 072.9 km²与2 109.9 km²。空间扩张分配集中于城镇周边,其中在经济发展情景下建设用地还有向东部沿海滩涂扩展的趋势。

3) 建设用地空间扩张的斑块密度和景观形状指数均较高,景观格局趋于不稳定,破碎化相对严重,与当前南通市建设用地“满天星”式的空间格局相吻合,是未来土地整治需重点解决的问题。

本文运用CLUE-S模型进行情景模拟中,在因子选取、地图修饰、空间分析等方面还有一些不足。首先,提高模拟的精度,挖掘CLUE-S模型的工具价值是研究的方向,而在与其他模型耦合的选择、模型“平衡”假设的验证以及土地利用变化的过程3个方面,还需对CLUE-S模型开展研究;再者,加强建设用地的“空间尺度”分析,探究不同尺度对合理土地开发强度的作用方向。同时,在进行景观生态效应分析时,虽从斑块尺度和景观尺度分析景观结构、破碎度与异质性的变化,而在选择哪些景观指标能有效指示景观格局特征,是需进一步思考的问题,以便为城市生态建设与景观格局优化提供参考。

参考文献(References):

[1] Harahap F, Silveira S, Khatiwada D. Land allocation to meet sectoral goals in Indonesia-An analysis of policy coherence[J]. Land Use Policy, 2017, 61: 451-465.

[2] Warren P S, Ryan R L, Lerman S B et al. Social and institutional factors associated with land use and forest conservation along two urban gradients in Massachusetts[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 102(2): 82-92.

[3] Chen H, Jia B, Lau S Y. Sustainable urban form for Chinese compact cities:Challenges of a rapid urbanized economy[J]. Habitat International, 2008, 32(1): 28-40.

[4] Kahn M E. The environmental impact of suburbanization[J]. Journal of Policy Analysis&Management, 2000, 19(4): 569-586.

- [5] 陆大道. 我国的城镇化进程与空间扩张[J]. 中国城市经济, 2007, (10): 14-17. [Lu Dadao. Urbanization process and spatial sprawl in China. China Urban Economy, 2007, (10): 14-17.]
- [6] Wu Xiaoqing, Hu Yuanman, He H S et al. Performance evaluation of the SLEUTH model in the shenyang metropolitan area of northeastern China[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2009, 14(2): 221-230.
- [7] Han S S. Urban expansion in contemporary China: What can we learn from a small town?[J]. Land Use Policy, 2010, 27(3): 780-787.
- [8] Tian Guangjin, Jiang Jing, Yang Zhifeng et al. The urban growth, size distribution and spatio-temporal dynamic pattern of the Yangtze River Delta megalopolitan region, China[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(3): 865-878.
- [9] 张豪, 罗亦泳, 张立亭. 基于遗传支持向量机的城市扩张非线性组合模型[J]. 地理学报, 2010, 65(6): 656-664. [Zhang Hao, Luo Yiyong, Zhang Liting. A nonlinear polynomial model for urban expansion incorporating genetic algorithm and support vector machines. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(6): 656-664.]
- [10] 匡文慧, 刘纪远, 邵全琴, 等. 区域尺度城市增长时空动态模型及其应用[J]. 地理学报, 2011, 66(2): 178-188. [Kuang Wenhui, Liu Jiyuan, Shao Quanqin et al. Dynamic urban growth model at regional scale and its application. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(2): 178-188.]
- [11] 刘纪远, 刘文超, 匡文慧, 等. 基于主体功能区规划的中国城乡建设用地扩张时空特征遥感分析[J]. 地理学报, 2016, 71(3): 355-369. [Liu Jiyuan, Liu Wenchao, Kuang Wenhui et al. Remote sensing-based analysis of the spatiotemporal characteristics of built-up area across China based on the plan for major function-oriented zones. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(3): 355-369.]
- [12] 张鸿辉, 曾永年, 金晓斌, 等. 多智能体城市土地扩张模型及其应用[J]. 地理学报, 2008, 63(8): 869-881. [Zhang Honghui, Zeng Yongnian, Jin Xiaobin et al. Urban land expansion model based on multi-agent system and application. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(8): 869-881.]
- [13] 杨青生, 黎夏. 多智能体与元胞自动机结合及城市用地扩张模拟[J]. 地理科学, 2007, 27(4): 542-548. [Yang Qingsheng, Li Xia. Integration of multi-agent systems with cellular automata for simulating urban land expansion. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(4): 542-548.]
- [14] 冯徽徽, 刘慧平. 基于误差反馈控制的变系数城市扩张模型构建及应用[J]. 地理科学, 2014, 34(5): 594-600. [Feng Huihui, Liu Huiping. The variable-coefficient urban growth model based on the error feedback control[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(5): 594-600.]
- [15] 赵黎明, 李振华. 城市建设系统的动力学模型研究[J]. 中国软科学, 2004, (11): 147-151. [Zhao Liming, Li Zhenhua. Study of the city construction system using system dynamics models. China Soft Science, 2004, (11): 147-151.]
- [16] Liu Zhijia, Huang Heqing, Werners S E et al. Construction area expansion in relation to economic-demographic development and land resource in the Pearl River Delta of China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(2): 188-202.
- [17] Huang Bo, Xie Chenglin, Tay R. Support vector machines for urban growth modeling[J]. Geoinformatica, 2009, 14(1): 83-99.
- [18] 吴桂平, 曾永年, 冯学智, 等. CLUE-S模型的改进与土地利用变化动态模拟——以张家界市永定区为例[J]. 地理研究, 2010, 29(3): 460-470. [Wu Guiping, Zeng Yongnian, Feng Xue-zhi et al. Dynamic simulation of land use change based on the improved CLUE-S model: A case study of Yongding County, Zhangjiajie. Geographical Research, 2010, 29(3): 460-470.]
- [19] 梁辰, 王诺. 基于 Logistic 回归的沿海经济区建设用地演变驱动因素研究——以大连市新市区为例[J]. 地理科学, 2014, 34(5): 556-562. [Liang Chen, Wang Nuo. Driving factor analysis of construction land changes in coastal economic zone based on logistic regression: a case study of Dalian new urban. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(5): 556-562.]
- [20] 南通市统计局, 国际统计局南通调查队. 南通统计年鉴-2013 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2013. [Nantong Municipal Statistics Bureau, State Statistics Bureau Nantong Team. Nantong Statistics Yearbook-2013. Beijing: China Statistics Press, 2013.]
- [21] Veldkamp A, Fresco L O. Clue-cr: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica[J]. Ecological Modelling, 1996, 91(1/3): 231-248.
- [22] 高金龙, 陈江龙, 袁丰, 等. 南京市建设用地扩张模式、功能演化与机理[J]. 地理研究, 2014, 33(10): 1892-1907. [Gao Jinlong, Chen Jianglong, Yuan Feng et al. Patterns, functions and underlying mechanisms of urban land expansion in Nanjing. Geographical Research, 2014, 33(10): 1892-1907.]
- [23] 秦贤宏, 段学军, 李慧, 等. 基于 SD 和 CA 的城镇土地扩展模拟模型——以江苏省南通地区为例[J]. 地理科学, 2009, 29(3): 439-444. [Qin Xianhong, Duan Xuejun, Li Hui et al. Urban land expansion simulation model based on SD and CA—a case study of Nantong city. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(3): 439-444.]
- [24] Nh A, Ma B sm. An autologistic model for the spatial distribution of wildlife[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(33): 339-347.
- [25] Pontius J. R G, Cornell J D, Hall C A S. modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2001, 85(1): 191-203.
- [26] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观空间分析的特征和主要内容[J]. 生态学报, 2002, 22(7): 1135-1142. [Chen Wenbo, Xiao Duning, Li Xiuzhen. The characteristics and contents of landscape spatial analysis. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(7): 1135-1142.]
- [27] 冯应斌, 何建, 杨庆媛. 三峡库区生态屏障区土地利用规划生态效应评估[J]. 地理科学, 2014, 34(12): 1504-1510. [Feng Yingbin, He Jian, Yang Qingyuan. Evaluation of ecological ef-

- fects in land use planning:a case study of ecological barrier zone of three gorges reservoir area. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(12): 1504-1510.]
- [28] Herzog F, Lausch A, Müller E, et al. Landscape metrics for assessment of landscape destruction and rehabilitation[J]. *Environmental Management*, 2001, 27(1): 91-107.
- [29] 陈利顶, 傅伯杰. 黄河三角洲地区人类活动对景观结构的影响分析——以山东省东营市为例[J]. *生态学报*, 1996, 16(4): 337-344. [Chen Liding, Fu Baijie. Analysis of impact of human activity on and scape structure in Yellow River delta-a case study of Dongying region. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(4): 337-344.]
- [30] Pijanowski B C, Brown D G, Shellito B A et al. Using neural networks and GIS to forecast land use changes:a Land Transformation Model[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2002, 26(6): 553-575.

Spatial Scenario Simulation and Landscape Ecological Effect Based on Construction Land Expansion of Nantong City

Yang Qingke^{1,2,3}, Duan Xuejun^{1,3}, Jin Zhifeng⁴, Wang lei^{1,3}

(1. *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China*; 4. *Jiangsu Institute of Land Surveying and Planning, Nanjing 210024, Jiangsu, China*)

Abstract: Modeling and scenario analysis are the core content of the research on the spatial expansion of construction land. On account of the rapid urbanization process and the special geographical position, Nantong is chosen as the study case in this paper. We employ the hybrid model of CLUE-S and Auto-logistic regression to project the likelihood map of land use distribution, and then simulate the dynamic distribution of the expansion of construction land. We acquire a series of knowledge rules by analyzing the temporal and spatial characteristics of construction land expansion from four time periods of remote sensing images since 1987. The future expansion of construction land under different scenarios is then simulated based on the baseline model, economic development model, ecological conservation model. Through the landscape ecology knowledge we analyze the ecological environment effect of construction land expansion under different scenarios. Key results emerge: since 1987, the expansion of construction land in Nantong has been rapid, which is spreading intensely around the city and the town center on the space. It's presented that the alternate rule of cyclical fluctuations in the form of 'axis growth—interior filled'. At the meanwhile, the Kappa and PCM coefficients also show that the hybrid model has high reliability and can be applied to the simulation of the spatial distribution of construction land in the future. The simulation results declare that the expansion of construction land is concentrated in the urban area and towns around, and there is an obvious expansion trend towards the east coast under the economic development scenario. Due to the intense expansion, it's very obvious that the spatial pattern tends to merge into the larger districts in the concentration area of construction land. The patch density and landscape shape index of the construction land expansion are both high, the landscape pattern tends to be unstable, and the fragmentation is also relatively severe. Therefore, not only control the amount of construction land expansion in the future land use, but also optimize the spatial landscape pattern, which can provide scientific basis for land intensive use, urban growth boundary control and ecosystem management of Nantong City.

Key words: construction land expansion; spatial simulation; landscape ecological effect; Nantong City