

基于生态约束的城市开发边界模拟研究 ——以南京为例

孙伟¹, 刘崇刚¹, 王苏宁^{1,2}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008;
2. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 城市开发边界划定是国土空间规划的重要内容,也是实施国土空间管治、城乡建设管理和生态安全管控的关键抓手,对于推动城市空间高质量发展具有基础性和约束性作用。综合利用回归分析模型、InVEST模型和CA模型,探索构建基于生态约束的城市开发边界划定方法,并以南京市中心城区为例,在评价城市生态用地重要性和建设用地空间扩展潜力基础上,开展不同目标年份的城市用地扩张模拟,据此划定城市开发边界。研究表明:城市建设用地扩张具有动态性、复杂性、系统性特征,受到多因子相互作用,基于生态约束的城市开发边界模拟能够兼顾城市空间发展需求和居民高品质生态环境诉求,促进城市发展与生态保护相统一、人口经济和资源环境相协调,有助于丰富城市开发边界划定方法研究,为国土空间规划编制提供科学参考。

关键词: 城市开发边界;生态约束;扩张潜力;模型模拟;空间管控

城市开发边界又可称为城市增长边界,是一种通过控制城市开发规模抑制城市无序扩张的政府管理手段^[1],是对划定的区域实施土地开发限制,以遏制城市扩张和保护生态空间,鼓励城市内部空间的再开发^[2,3]。国外关于城市开发边界的研究源于20世纪60年代,受到能源危机的影响,地方财政难以支持市政建设活动,美国的很多城市萌生了“精明增长”的城市发展理念,并将其作为有效管控城市发展范围、抑制城市蔓延式扩张的控制手段^[4-6]。20世纪70年代,为解决与周边地区城市发展问题的冲突,欧美国家开始在城乡土地之间划定分界线,边界内的土地不可用作城市建设用地开发,通过立法的方式提升城市开发边界的地位^[7,8]。2000年之后,城市开发边界的研究更多拓展到划定方法和城市形态优化理论等方面研究,内容不断拓展^[9,10]。国内关于城市开发边界的相关概念伴随城市建设热潮、规划立法及中央调控产生^[11,12]。2006年实施的《城市规划编制办法》中首次提出“研究中心城区空间增长边界”,被学者们认为是我国最早的城市开发边界概念^[13,14]。从研究方法来看,主要侧重于以下几个方面,一是基于城市发展需要的正向规划法,通过测算对于城市未来发展的用地需求,剖析城市建设空间的扩张机理和自然地理要素的限制条件,预测城市未来建设空间的扩张方向,运用土地适宜性评价或动态模拟城市空间增长变化划定城市开发边界^[15,16]。二是基于城市环境安全的逆向规划法,评价城市用地的生态敏感性,并结合景观生态学的理论知识,优先确定城市空间内的禁止建设区,通过生态适宜性评价确定城市开发空间并划定城市开发边界^[17-20]。三是正逆向规划相结合的综合法,结合两种规划方法的优势,既考虑城市空间的发展需要,又注重生态环

收稿日期: 2020-05-29; 修订日期: 2020-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41871119)

作者简介: 孙伟 (1980-), 男, 辽宁彰武人, 博士, 研究员, 研究方向为区域发展与规划。

E-mail: wsun@niglas.ac.cn

境的保护要求,兼顾城市社会经济发展和城市生态需求,较为科学地反映城市建设空间的动态变化^[21,22]。由于未将边界划定作为强制性内容,加上城市化热潮和土地财政的推动,地方相关实践并未起到有效控制城市无序蔓延的作用。2014年国土资源部、住建部共同开展城市开发边界工作,选择北京、上海、南京等14个城市作为首批试点城市,通过优化城市空间布局,提高土地利用水平,合理控制大城市规模,保护基本农田和生态资源,进而促进城市转型。2018年,国家机构职能调整,在国土资源部基础上整合其他部委相关空间规划职能组建自然资源部,开展国土空间规划编制工作,提出以资源环境承载力和空间开发适宜性“双评价”为基础,统筹划定城市开发边界、永久基本农田红线和生态保护红线。目前各地正在开展规划研究编制工作。

城市开发边界的研究具有一定的理论基础和实践案例,划定方法多样,切入的视角各异,在指标的选取上侧重点各有不同,大多围绕着城市经济社会发展的空间需求和生态环境保护之间的平衡问题展开^[23-25]。近年来的城市开发边界划定方法愈发趋向于综合划定方法,对于影响城市建设用地扩张的驱动力的研究,更多侧重于社会经济发展或自然条件的限制,一定程度上忽略了人类行为对于城市空间结构的塑造功能^[26,27]。在划定过程中存在分类标准不统一、空间参照不对应、对生态敏感性区域考虑不足等问题,不利于国土空间综合管理和生态资源保护。而且随着国土空间规划实践和生态文明理念的深入,生态环境对经济社会的可持续发展作用愈发凸显,结合生态约束的城市空间划定显得越来越重要。因此,在城市空间扩张的研究中,需要融入表征人口活动特征的空间分布,才能够更精确地表达城市空间的扩张情形,在此基础上通过生态约束规则模拟城市建设用地的空间扩张,不仅能够满足城市未来的发展需要,也能保障城市生态安全和可持续发展,有助于丰富城市开发边界划定方法的研究与实践。

因此,本文以南京中心城区为例,基于大数据方法,利用InVEST模型定量计算南京中心城区的各项生态系统服务功能,评价城市内部生态用地重要性的空间差异。以此为基础,结合建设用地的空间扩展潜力,构建生态约束条件下的建设用地转换规则,优先划定城市空间内部不宜建设开发的区域,并通过计算基期和目标年份建设用地变化量,确定城市建设用地的扩展规模,进行建设用地的扩展模拟,在此基础上进行城市开发边界模拟划定。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

南京(图1)位于江苏西南部、苏皖两省交界处,是全国重要的科研教育基地和综合交通枢纽。全市下辖11个区,总面积6587 km²,建成区面积971.62 km²,2019年常住人口850.0万人,城镇人口707.2万人,城镇化率达到83.2%。自然条件优越,地处亚热带季风区,属于亚热带季风气候,四季分明,气候温润,多年平均降雨量1106 mm,市内有秦淮河、滁河等长江支流,又有玄武湖、金牛山水库等湖泊,水资源量达到 28×10^8 m³。地处宁镇山脉,低山、丘陵、平原交错分布,既有紫金山、老山、金牛山、汤山等山体,又有石臼湖、固城湖、水阳江等沿岸平原,亦有江宁东北部、浦口西南部等地的丘陵区。南京正处于快速城市化向平稳成熟阶段的过渡时期,如何科学合理地控制城市开发空间、划定城市开发边界、优化城市空间格局、提高土地资源的利用效率,成为城市向高质量发展转型中面临的一道难题。因此选择南京中心城区作为案例区,具体包括鼓楼、秦淮、玄武、建邺、江宁、雨花台、栖霞和浦口区8个区,研究区面积3214.66 km²。综合利用Logistic回

归分析模型、InVEST模型和CA模型，建立生态约束规则下的城市建设用地模拟模型，并以1995年、2000年和2016年作为历史典型年份进行模型精度检验，模拟2030年建设用地扩张状态，据此划定城市开发边界。

1.2 数据来源

(1) 影像数据

Landset 遥感影像：使用 Landset TM (1985年、1995年、2000年、2005年) 及 Landset 8 OLI (2016年) 卫星遥感数据，并对数据使用监督，使用分类方法将用地类型分为耕地、林地、草地、建设用地、水体和未利用地六大类，分类精度为0.83。
夜间灯光遥感影像：有 DMSP/OLS 夜间灯光数据 (1 km×1 km, 2000年) 和 NPP/VIIRS (0.5 km×0.5 km, 2016年) 新型夜间灯光数据，为保证数据像元大小统一，采用了重采样的方法进行数据统一。

(2) 网络大数据

新浪微博签到数据：使用爬虫程序，抓取POI信息，获取签到点的位置信息。对于爬取的签到信息，需要进行数据清洗和坐标转换。
基础设施分布点数据：包括公交站点、地铁站点、医疗卫生点、教育点，对于获取到的基础设施分布数据进行空间化处理。
商服点数据：来自大众点评网，对于无用信息进行数据清洗，确保数据真实可靠，并将数据坐标进行转换，通过空间化处理得到基础设施分布信息，计算得出基础设施分布因子。由于多元数据爬取限制，同时兼顾与卫星遥感数据的时间一致性，网络大数据统一采用2016年数据。

(3) 社会经济数据

人口数据通过统计年鉴获取南京各街道的人口统计数据，验证夜间灯光数据反演街道人口结果的准确性；**GDP数据**通过统计年鉴整理得到南京1995年、2000年、2016年的GDP数据，辅助计算研究区内各栅格单元的经济变化。

(4) 自然地理数据

气象数据：包括气温、降雨等基础气象数据 (1995年、2000年、2016年)，来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)，作为计算中心城区土壤保持量和水源涵养功能的重要组成，用于计算生态服务功能变化；**土壤数据：**来自第二次全国土地调查制作的土壤数据集，用于计算1995—2016年南京中心城区土壤保持量，并评价分析研究区内土壤保持功能变化。

1.3 研究方法

1.3.1 指标体系及数据处理

基于城市发展客观需求，结合影响城市建设用地扩张的各因素，构建建设用地扩展潜

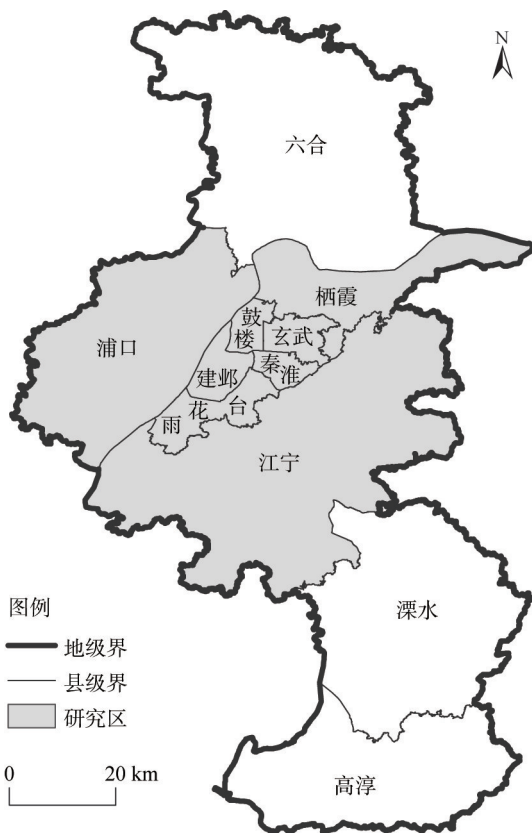


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

力模型,判断城市未来潜在增长空间和发展方向。利用InVEST模型定量计算南京中心城区的各项生态系统服务功能,评价研究区内部生态用地重要性的空间差异。结合建设用地的空间扩展潜力和生态用地的重要性,构建生态约束条件下的建设用地转换规则,优先划定城市空间内部不宜建设开发的空间,并通过计算基期和目标年份建设用地变化量,确定城市建设用地的扩展规模,进行建设用地的扩展模拟并划定城市开发边界(图2)。

1.3.2 城市建设用地扩展潜力评价

城市建设用地扩展潜力探讨影响城市内部空间建设活动的各个因素,综合考虑城市内部的人口空间分布、各区域的经济发展水平及变化、区位交通条件以及基础设施的空间分布,通过空间量化形式,系统评价城市建设用地的扩展潜力(表1)。具体通过夜间灯光数据反演南京中心城区的经济发展和人口密度,利用微博签到数据反演城市内部人口的空间活动特征,采用百度地图和大众点评的POI数据收集反演教育资源、医疗卫生条件、商服分布、交通区位等基础设施信息的空间分布,对数据进行空间分析,结合逻辑回归分析各驱动因子对建设用地扩张的作用,最终得出南京中心城区建设用地扩展潜力的空间分布。

城市建设用地扩展潜力评价主要采用Logistic回归分析模型,这是一种被广泛应用于数据挖掘、经济预测、城市发展驱动力等研究领域的线性回归分析模型^[28,29]。将土地利用状态通过建设用地与非建设用地进行分类,未发生建设用地变化的栅格单元用0表示,转变为城市建设用地的栅格单元用1表示,研究区内共有321466个100×100的栅格单元,为避免数据存在自相关效应,影响模型精度,在数据输入模型前,需要对数据进行随机抽样。在研究区内随机生成均匀分布的10000个样本点,未转变为城市建设用地的为0,转变为城市建设用地的取值1。

1.3.3 生态用地重要性评价

国内外对于生态系统服务功能的研究多集中在水土保持功能、水源涵养功能、土壤保持功能及生物多样性维持功能四个方面^[30,31],因此将上述四个功能作为评价生态用地重要性的评价因子。土壤保持功能主要利用降雨侵蚀力因子^[32]、土壤可蚀性因子^[33]、坡度坡长

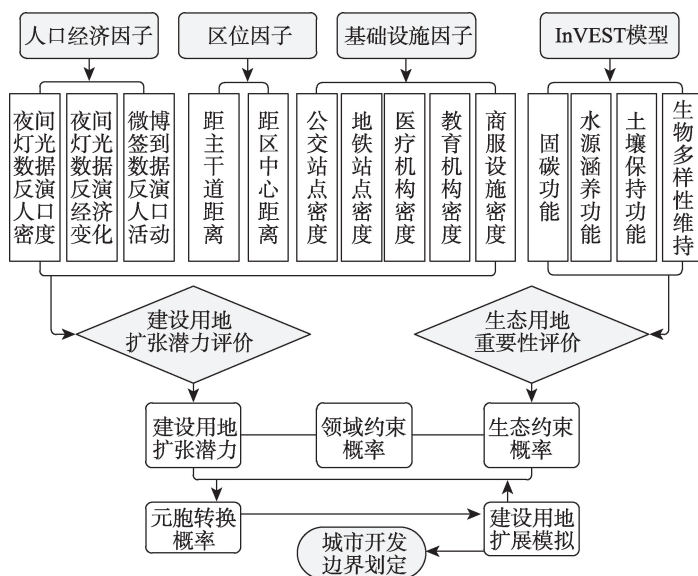


图2 研究思路与评价指标体系

Fig. 2 Research route and evaluation index

因子^[34]、植被覆盖因子和土壤保持措施因子^[35]；固碳功能主要根据研究区内不同土地利用类型的地上碳库、地下碳库、土壤碳库和死亡碳库的平均碳密度乘以各用地类型的面积计算得出；水源涵养功能使用水量平衡法计算，根据单位面积的实际降雨量减去蒸散后的水量即得到该区域的产水量即水源涵养量；生物多样性主要利用土地覆盖数据、威胁因子数据、威胁因子敏感性数据、地类敏感性数据等。在此基础上，采用InVEST模型计算四方面城市生态系统服务功能，综合系统地量化评价重要的生态用地，划定南京中心城区内部不宜进行开发建设活动的空间，作为保障城市生态安全的底线。

1.3.4 基于生态约束规则的城市开发边界模拟

本文以CA模型为基础，融入生态约束的限制条件，基本要素由元胞空间、元胞状态、邻域、状态更新规则和元胞时间五种要素构成，与CA模型基本一致。元胞自动机CA模型的原理是元胞单元依据规定的转换规则，根据自身和邻域元胞单元的状态进行状态变换或保持不变。元胞状态如果发生改变，会影响周围元胞的邻域环境，通过相互作用从而会影响元胞在空间内发生状态变化^[36-38]。

根据约束性转换规则，建设用地模拟流程如下所示（图3）：

- （1）确定研究区起始年份至目标年份城市发展需要转换的城市建设用地数量，计算每次循环所转换的元胞个数及迭代次数。
- （2）依据生态用地重要性的计算结果，将生态用地重要性进行分级，识别城市中的重要生态源地作为建设用地模拟过程中的生态安全阈值。超过生态安全阈值的地区，是城市健康发展的生态安全底线，禁止建设开发活动。低于安全阈值的地区，可作为城市开发建设的后备资源，供开发建设活动，计算得出生态约束值。
- （3）通过逻辑回归模型计算出影响城市建设用地扩张的各因子的影响力，得到城市建设用地扩张潜力，并根据邻域约束规则计算出邻域约束概率。
- （4）识别出转换为建设用地概率最大的元胞，进行元胞状态转换，如果转换为建设用地的元胞数量累计达到循环所需的元胞数量时，则完成迭代，并更新得到土地利用数据。
- （5）得到的土地利用图层数据作为基础，重复上述流程，不断循环，直至元胞数量达到所需城市建设用地数量，输出最终的模拟结果。

2 结果分析

2.1 城市建设用地扩展潜力评价

2.1.1 模型回归结果

Logistic回归分析可选用全要素法、前进法或后退法，选择需要代入模型的变量。全

表1 城市建设用地扩展潜力评价因子

Table 1 Evaluation factors of expansion potential of urban construction land

类别	评价因子	单位
人口	常住人口密度	人/km ²
	人口活动分布	人/km ²
经济	经济变化	亿元
区位	距市中心的距离	km
	距区中心的距离	km
基础设施分布	距主干道距离	km
	公交站点核密度	个/km ²
	地铁站点核密度	个/km ²
	医疗卫生点核密度	个/km ²
	教育点核密度	个/km ²
	商服点核密度	个/km ²

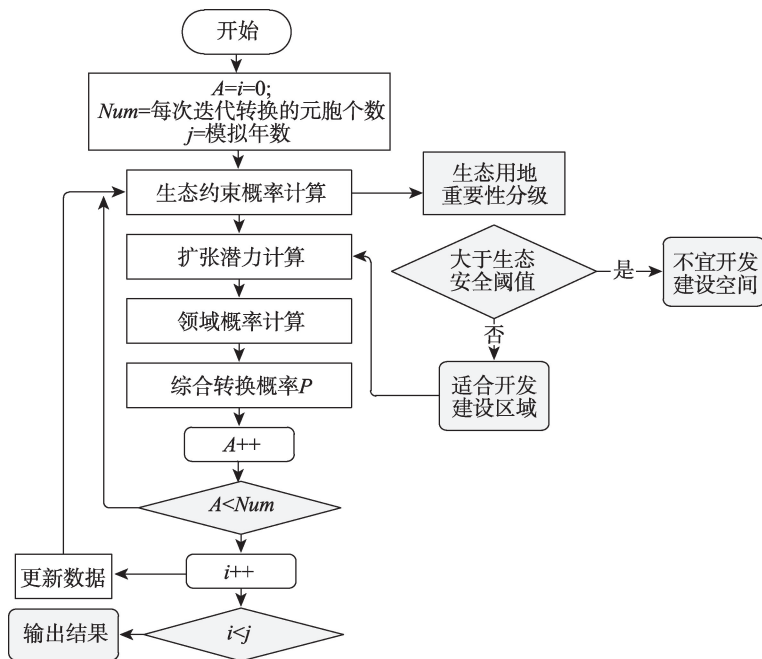


图3 生态约束模型模拟流程

Fig. 3 Flow of ecological constraint model simulation

要素法不考虑变量的显著性，前进法通过选取模型中解释效果较为良好的变量，而后退法综合分析自变量和因变量之间的相互关系，筛选出与因变量相关性较大的解释变量。本文使用后退法进行回归分析，显著性水平 p 值越小，可信度越高，越具有统计意义，故选取显著性水平0.05作为可信度阈值；回归系数 $\beta > 0$ 且统计显著时，发生比率OR增加，回归系数 $\beta < 0$ 时，发生比率降低；Wald统计量表现出解释变量的影响权重。

从回归模型结果来看，保留8个解释度较好的解释变量，可以看出城市经济空间变化、人口空间活动分布、人口密度和到交通干线距离对城市建设用地的变化起到主要作用。地铁站点和公交站点的空间分布与城市建设用地的分布存在同步性，站点分布越密集的地区越有可能转变为城市建设用地。

从表2可以看出，区域经济发展水平是城市建设的引擎，经济发展越快的地区建设用地增加的概率越高；交通设施越完善的地区，转变为建设用地的几率越高。而到主干道和板块中心的距离回归系数小于0，表明越远离道路和城市中心，转变为建设用地的概率越低。近年来大学、科研院所多选址城市郊区，周边一般开发强度较低，从而转为建设用地的几率也较低。

2.1.2 城市建设用地扩展潜力

研究区内建设用地扩展潜力高值区面积为462.37 km²，占南京中心城区总面积的14.4%，与南京1995—2016建设用地增加面积541.88 km²相比，吻合度较高。从区域看，建设用地扩展潜力高值区为浦口东南侧沿江一带、栖霞区向东沿江一带、江宁区向南沿秦淮新河两岸、建邺区向西河西新城片区，城市扩展方向较为分散，呈现多组团发展的趋势（图4）。建设用地扩展潜力与建设用地实际情况较为符合，建邺区向西方向建设用地扩展潜力高，而高值区实际建成的有河西新城、板桥新城和滨江新城；栖霞区建设用地扩展潜力高值区实际建成仙林大学城、南京经济技术开发区、龙潭新城；江宁区

表2 相关系数

Table 2 Correlation coefficients

解释变量	回归系数	标准误差	Wald统计量	自由度	显著性水平	发生比率
常住人口密度	1.42	0.27	22.63	1	< 0.001	3.65
人口活动分布	17.96	4.1	41.29	1	< 0.001	1.95
经济变化	3.72	0.08	290.42	1	< 0.001	3.55
距区中心距离	-0.18	0.09	3.62	1	0.05	0.9
距主干道距离	-0.4	0.078	2.74	1	< 0.001	0.57
公交站点核密度	0.61	0.23	4.56	1	0.006	1.92
地铁站点核密度	0.6	0.2	12.52	1	0.001	1.54
教育点核密度	-1.7	0.44	13.01	1	< 0.001	0.2
常量	1.24	1.03	56.5	1	< 0.001	2060.1

建设用地扩展潜力高值区实际建成禄口新城、江宁经济技术开发区、江宁大学城；浦口东南侧沿江一带建设用地扩展潜力高，实际建成浦口高新区，沿江一带建成浦口大学城，城市建设用地由老城区向四周扩散增长。

2.2 生态用地重要性评价

通过空间量化研究区的各项生态服务功能，对四种生态系统服务功能赋予相同的权重，评价生态用地的重要性（图5、图6）。1995—2000年，重要生态用地增加11 km²，主要集中在铁心桥街道东南侧、秣陵街道西侧和谷里街道东北侧。1995年研究区内生态用地主要以一般重要或较不重要为主，面积占研究区总面积的81.3%，重要生态用地占研究区面积的13.1%。由于南京经济开发区的建设，栖霞沿江一带的生态用地质量有一定程度的下降。1995—2000年，生态用地重要性基本不变的地区主要是老山、紫金山、汤山、将军山、牛首山等山林地区，这些地区作为重要生态功能区域，生态保护较好，受城市建设活动影响程度相对较小，自然生态环境保持良好。而秦淮河两岸的生态环境质量存在下降态势，城市开发建设活动侵占了原有的生态空间，一定程度上破坏了原有的自然生态格局。

2000—2015年，随着城市规模不断扩大，沿江两岸的生态用地数量明显下降，生态完整性存在一定程度下降。随着工业发展进程加快和城市建设活动的活跃，秦淮河沿岸的生态用地质量整体上处于下降趋势，但城市生态用地重要性低值区面积较2000年有明显减少，城市发展对生态环境的依赖程度越发凸显。研究区内重要生态用地面积为422.05 km²，占研究区总面积的13%，基本以大面积的林地为主。南京中心城区重要的生态用地包括紫金山、老山、牛首山、将军山、长江、秦淮河等生态源地，这些重要的生态用地不仅为城市提供生态服务功能，而且提供了休闲游览场所，是城市可持续发展的生态底线，在城市开发建设中应当采取有效的生态保护措施，以发挥更大的生态服务价值。

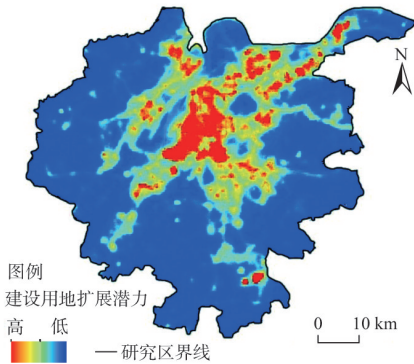


图4 建设用地扩展潜力分布
Fig. 4 Distribution of construction land expansion potential

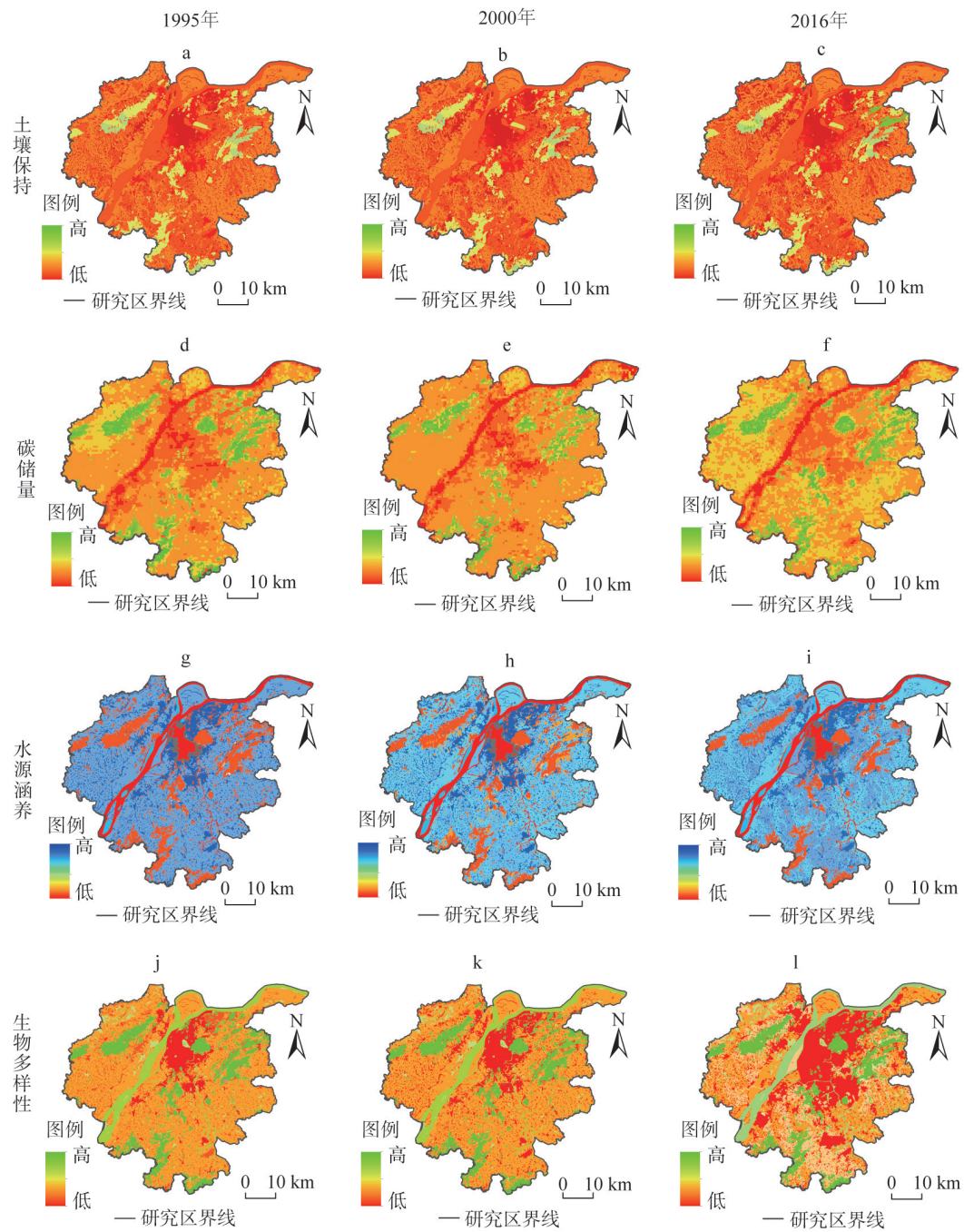


图5 生态服务功能评价

Fig. 5 Evaluation of ecological service function

2.3 基于生态约束规则的城市开发边界模拟

2.3.1 城市扩展模拟

本文以1995年、2000年、2016年作为城市建设用地模拟的初始年份，以2000年、2016年、2030年作为目标年份，模拟南京中心城区的城市空间演变（图7）。南京中心城

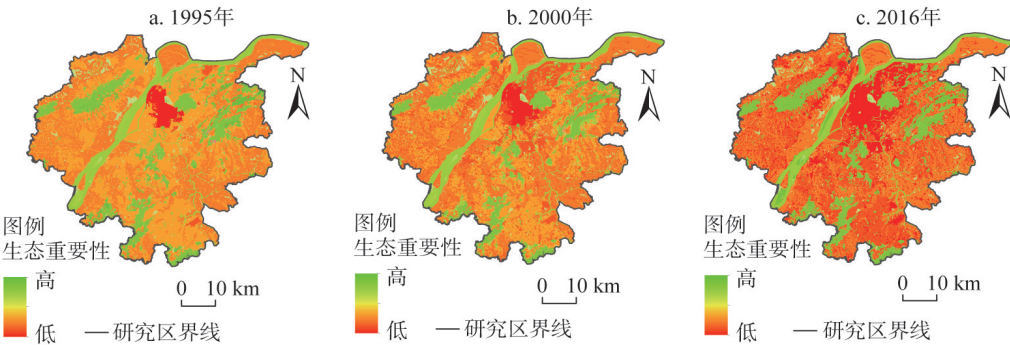


图6 生态重要性评价
Fig. 6 Ecological importance evaluation

区1995年建设用地面积523.5 km²，2000年建设用地面积为615.3 km²，增加了91.8 km²，共迭代五次，每次迭代中转换为建设用地的元胞个数为1836个。与2000年实际结果相比，2000年的模拟结果符合南京的实际发展格局，但栖霞区城市建设用地的密度比实际要小，因为生态约束条件的限制，建设用地转换量小于实际结果。经过与实际建设用地对比发现，2000年实际建设用地面积为615.84 km²，模拟精度超过90%，模拟结果可信。本文使用Kappa系数评价模拟结果的精度，模拟结果与实际用地情况进行像元比对，通过误差矩阵检验模型模拟的准确性。模拟结果的Kappa系数为0.90，一般认为Kappa大于0.75，说明一致性较好。

以2000年为初始年份，2016年作为目标年份，模拟南京中心城区建设用地的变化。2016年南京中心城区建设用地面积为1065.38 km²，与2000年相比，增加了451.51 km²，共迭代16次，每次迭代约2822个元胞转为城市建设用地。经过与实际建设用地对比发现，2016年实际建设用地面积为1069.8 km²，模拟精度超过90%，模拟结果可信。

以2016年为初始年份，由于《南京市城市总体规划2018—2035》（草案）中关于建设用地的要求为2030年建设用地控制在2150 km²以内，2035年的建设用地规模在2030年基础上不再增加，因此将2030年作为目标年份，模拟研究区城市建设用地的空间扩张情形和城市空间的格局演变。规划要求2030年南京中心城区的建设用地规模控制在1344 km²以内，按照2016年建设用地面积1065 km²为基础，则至2030年研究区内建设用

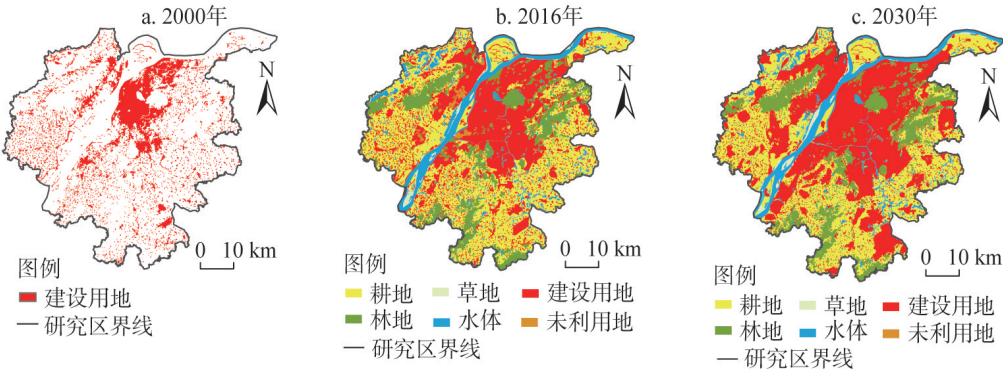


图7 不同年份城市扩展模拟结果
Fig. 7 Simulation results of urban expansion in different years

疗、商服、公交、地铁等基础设施资源集中分布在中心城区,而这些优势公共服务资源在推动服务业发展的同时,也吸纳了大量的商业服务人口和居住人口的集聚,加重城区的生态环境压力,需要考虑适当地向城市外围疏散,缓解中心城区资源环境承载压力。进一步争取盘活老城存量建设用地空间,推动城市土地盘活、土地综合利用和低效用地的再开发。

(3) 综合城市空间的发展潜力和生态需求,模拟城市未来的空间扩展,能为国土空间规划编制中城市开发边界划定提供一定参考,也能够丰富完善当前关于空间开发边界划定方法的研究。随着各大城市开发边界划定实践的开展,还需进一步考虑开发边界的分区细化落实、评估调整以及配套政策的制定,以期真正将开发边界管好用好,促进空间高质量发展,夯实现代化建设的空间基底。

参考文献(References):

- [1] 丛佃敏,赵书河,于涛,等.综合生态安全格局构建与城市扩张模拟的城市增长边界划定:以天水市规划区(2015—2030年)为例.自然资源学报,2018,33(1): 14-26. [CONG D M, ZHAO S H, YU T, et al. Urban growth boundary delimitation method integrating comprehensive ecological security pattern and urban expansion simulation: A case study of planning areas in Tianshui city (2015-2030). Journal of Nature Resources, 2018, 33(1): 14-26.]
- [2] BATTY M. New ways of looking at cities. Nature, 1995, 377(6550): 574.
- [3] LOURES L. Post-industrial landscapes as drivers for urban redevelopment: Public versus expert perspectives towards the benefits and barriers of the reuse of post-industrial sites in urban areas. Habitat International, 2015, 45: 72-81.
- [4] STALEY S, EDGENS J G, MILDNER G C S. A line in the land: Urban-growth boundaries, smart growth, and housing affordability. Los Angeles: Reason Public Policy Institute, 1999.
- [5] INGRAM G K, CARBONELL A, HONG Y H, et al. Smart growth policies: An evaluation of programs and outcomes. Cambridge, Massachusetts: Lincoln Institute of Land Policy, 2009.
- [6] BEER A. Leadership and the governance of rural communities. Journal of Rural Studies, 2014, 34: 254-262.
- [7] CUBUKCU K M. The problem of fair division of surplus development rights in redevelopment of urban areas: Can the Shapley value help?. Land Use Policy, 2019, 91: 104320, Doi: 10.1016/j.landusepol.2019.104320.
- [8] DONOVAN G H, LANDRY S, WINTER C. Urban trees, house price, and redevelopment pressure in Tampa, Florida. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, 38: 330-336.
- [9] ERFANI G. Sense of place as an investigative method for the evaluation of participatory urban redevelopment. Cities, 2020, 99: 102648, Doi: 10.1016/j.cities.2020.102648.
- [10] RENTERGHEM T V, DEKONINCK L, BOTTELDOOREN D. Multi-stage sound planning methodology for urban redevelopment. Sustainable Cities and Society, 2020, 62: 102362, Doi: 10.1016/j.scs.2020.102362.
- [11] TAYYEBI A, PERRY P C, TAYYEBI A H. Predicting the expansion of an urban boundary using spatial Logistic regression and hybrid raster-vector routines with remote sensing and GIS. International Journal of Geographical Information Science, 2014, 28(4): 639-659.
- [12] CALTHORPE P, FULTON W. The Regional City. Washington D C: Island Press, 2001.
- [13] 林坚,乔治洋,叶子君.城市开发边界的“划”与“用”:我国14个大城市开发边界划定试点进展分析与思考.城市规划学刊,2017,(2): 36-43. [LIN J, QIAO Z Y, YE Z J. "Delimitation" and "Implementation" of urban growth boundary: Analysis and thoughts on the practice in 14 pilot cities in China. Urban Planning Forum, 2017, (2): 36-43.]
- [14] 钟珊,赵小敏,郭熙,等.基于空间适宜性评价和人口承载力的贵溪市中心城区城市开发边界的划定.自然资源学报,2018,33(5): 83-94. [ZHONG S, ZHAO X M, GUO X, et al. Delimitation of urban growth boundary based on spatial suitability evaluation and population carrying capacity in Guixi county. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 83-94.]
- [15] 黄木易,岳文泽,何翔.长江经济带城市扩张与经济增长脱钩关系及其空间异质性.自然资源学报,2018,33(2): 219-232. [HUANG M Y, YUE W Z, HE X. Decoupling relationship between urban expansion and economic growth and its spatial heterogeneity in the Yangtze Economic Belt. Journal of Natural Resources, 2018, 33(2): 219-232.]
- [16] 苏伟忠,杨桂山,陈爽,等.城市增长边界分析方法研究:以长江三角洲常州市为例.自然资源学报,2012,27(2): 322-331. [SU W Z, YANG G S, CHEN S, et al. Analysis method of urban growth boundary of the Changzhou city in the Yangtze River Delta. Journal of Natural Resources, 2012, 27(2): 322-331.]

- [17] 俞孔坚, 游鸿, 许立言, 等. 北京市住宅用地开发压力与城市扩张远景: 基于阻力面的分析. 地理研究, 2012, 31(7): 1173-1184. [YU K J, YOU H, XU L Y, et al. A minimum cumulative resistance (MCR) analysis approach. Geographical Research, 2012, 31(7): 1173-1184.]
- [18] 王振波, 张蔷, 张晓瑞, 等. 基于资源环境承载力的合肥市增长边界划定. 地理研究, 2013, 32(12): 2302-2311. [WANG Z B, ZHANG Q, ZHANG X R, et al. Urban growth boundary delimitation of Hefei city based on the resources and environment carrying capability. Geographical Research, 2013, 32(12): 2302-2311.]
- [19] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 等. 基于MCR模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化. 自然资源学报, 2019, 34(4): 101-114. [HUANG M Y, YUE W Z, FENG S R, et al. Analysis of spatial heterogeneity of ecological security based on MCR model and ecological pattern optimization in the Yuexi county of the Dabie Mountain Area. Journal of Natural Resources, 2019, 34(4): 101-114.]
- [20] 周锐, 王新军, 苏海龙, 等. 平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建. 生态学报, 2015, 35(6): 2003-2012. [ZHOU R, WANG X J, SU H L, et al. Identification and security pattern of ecological land in Pingdingshan Newly Developed Area. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 2003-2012.]
- [21] 王颖, 顾朝林. 基于格网分析法的城市弹性增长边界划定研究: 以苏州市为例. 城市规划, 2017, 41(3): 25-30. [WANG Y, GU C L. Grid-Based spatial evaluation of establishing urban growth boundary: A case study of Suzhou city. City Planning Review, 2017, 41(3): 25-30.]
- [22] 张亮. 基于生态安全格局的城市增长边界划定与管理研究. 杭州: 浙江大学, 2018. [ZHANG L. Demarcation and management of urban growth boundary in combination with ecological security patterns. Hangzhou: Zhejiang Normal University, 2018.]
- [23] CHO S H, POUDYAL N, LAMBERT D M. Estimating spatially varying effects of urban growth boundaries on land development and land value. Land Use Policy, 2008, 25(3): 320-329.
- [24] JIANG P H, CHENG Q W, GONG Y, et al. Using urban development boundaries to constrain uncontrolled urban sprawl in China. Annals of the Association of American Geographers, 2016, 106(6): 1321-1343.
- [25] WU J S, ZHANG L Q, PENG J, et al. The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [26] 范擎宇, 杨山. 协调视角下长三角城市群的空间结构演变与优化. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1581-1592. [FAN Q Y, YANG S. Evolution and optimization of spatial structure of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration from the perspective of coordination. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1581-1592.]
- [27] 陈力, 关瑞明. 城市空间形态中的人类行为. 华侨大学学报: 自然科学版, 2000, 21(3): 296-301. [CHEN L, GUAN R M. Human behavior in urban spatial pattern. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2000, 21(3): 296-301.]
- [28] 李传华, 俞慧云, 张巧英, 等. 基于Logistic的土地利用格局模拟案例研究. 人民黄河, 2012, (10): 103-105. [LI C H, YU H Y, ZHANG Q Y, et al. A case study of simulation of land use patterns based on Logistic model. Yellow River, 2012, (10): 103-105.]
- [29] 罗平, 姜仁荣, 李红岩, 等. 基于空间Logistic和Markov模型集成的区域土地利用演化方法研究. 中国土地科学, 2010, 24(1): 31-36. [LUO P, JIANG R R, LI H G, et al. Research on the method of regional land use evolution based on the combination of spatial Logistic model and Markov model. China Land Science, 2010, 24(1): 31-36.]
- [30] 潘韬, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 基于InVEST模型的三江源区生态系统水源供给服务时空变化. 应用生态学报, 2013, 24(1): 183-189. [PAN T, WU S H, DAI E F, et al. Spatiotemporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 183-189.]
- [31] 杨园园, 戴尔阜, 付华. 基于InVEST模型的生态系统服务功能价值评估研究框架. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2012, (3): 44-50. [YANG Y Y, DAI E F, FU H, et al. The assessment framework of ecosystem service value based on InVEST model. Journal of Capital Normal University: Natural Sciences Edition, 2012, (3): 44-50.]
- [32] 闫业超, 岳书平, 张树文. 降雨资料时间序列长度对降雨侵蚀力平均值置信度的影响. 自然资源学报, 2013, 28(2): 321-327. [YAN Y C, YUE S P, ZHANG S W. The confidence coefficient of mean annual rainfall erosivity influenced by record length of rainfall datasets. Journal of Natural Resources, 2013, 28(2): 321-327.]
- [33] 李季孝, 丁剑宏, 陶余铨, 等. 云南省土壤可蚀性及其空间分布特征. 人民黄河, 2019, (8): 103-106. [LI J X, DING J H, TAO Y S, et al. Soil erodibility and its spatial distribution characteristics in Yunnan province. Yellow River, 2019, (8): 103-106.]
- [34] 何莎莎, 朱文博, 崔耀平, 等. 基于InVEST模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 426-439. [HE S S, ZHU W B, CUI Y P, et al. Study on soil erosion characteristics of Qihe Watershed in Taihang Mountains based on the InVEST model. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(2): 426-439.]

- [35] 党虹, 葛丽娟, 赵传燕, 等. 基于 InVEST 模型的称钩河流域水土保持功能研究. 兰州大学学报: 自然科学版, 2018, 54(5): 69-75. [DANG H, GE L J, ZHAO C Y, et al. Soil conservation function of Chenggou River Basin based on the InVEST model. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2018, 54(5): 69-75.]
- [36] 马世发, 艾彬, 欧金沛. 约束性 CA 在城乡建设用地指标空间化中的应用. 地理科学, 2013, 36(10): 91-97. [MA S F, AI B, OU J P. Spatial allocation of construction land with constrained Cellular Automata Model. Scientia Geographica Sinica, 2013, 36(10): 91-97.]
- [37] 汪贝, 张金亭, 彭晓军. 基于约束性 CA 的“三规”空间管制整合引导下的城市增长模拟. 地理与地理信息科学, 2017, 33(5): 69-74. [WANG B, ZHANG J T, PENG X J. The simulation of urban growth induced by the spatial regulation integration of "Three Regulation" using constrained CA. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33(5): 69-74.]
- [38] 王海军, 夏畅, 张安琪, 等. 基于约束性 CA 的大都市郊区城镇增长的情景模拟与管控: 以武汉市江夏区为例. 地理科学进展, 2016, 35(7): 793-805. [WANG H J, XIA C, ZHANG A Q, et al. Scenario simulation and control of metropolitan outskirts urban growth based on constrained CA: A case study of Jiangxia district of Wuhan city. Progress in Geography, 2016, 35(7): 793-805.]

Simulation research of urban development boundary based on ecological constraints: A case study of Nanjing

SUN Wei¹, LIU Chong-gang¹, WANG Su-ning^{1,2}

(1. Key Laboratory of Watershed Geography Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The delineation of urban development boundary is an important part of land spatial planning, and also a key to the implementation of land spatial governance, urban and rural development management, and ecological security management and control. It plays a fundamental and restrictive role in promoting the high-quality development of urban space. This article takes the central urban area of Nanjing as an example, and the logistic regression analysis model, InVEST model and CA model were used to explore and construct a method of urban development boundary delineation based on ecological constraints. According to the evaluation of the importance of urban ecological land and the spatial expansion potential of construction land, a simulation of urban land expansion in different target years was carried out to delineate urban development boundary. The results show that the expansion of urban construction land has dynamic, complex and systematic characteristics, and is subject to multi-factor interactions. The urban development boundary simulation based on ecological constraints can take into account the needs of urban space development and residents' high-quality ecological environment demands, promote the unification of urban development and ecological protection, the coordination of population economy and resources and the environment, and help enrich the delineation methods of urban development boundary research, which provide scientific reference for the preparation of land spatial planning.

Keywords: urban development boundary; ecological constraints; expansion potential; model simulation; space control