

引用格式:孔祥玉, 闵婕, 侯莉蓉, 文诗媛, 冉会平. 权衡生态安全与城市扩展模拟的山地城市增长边界划定[J]. 山地学报, 2021, 39(1): 88-100  
KONG Xiangyu, MIN Jie, HOU Lirong, WEN Shiyuan, RAN Huiping. Delineation of the growth boundary of mountain cities by weighing ecological security and urban expansion simulation[J]. Mountain Research, 2021, 39(1): 88-100

## 权衡生态安全与城市扩展模拟的 山地城市增长边界划定

孔祥玉<sup>1</sup>, 闵婕<sup>2,3,4\*</sup>, 侯莉蓉<sup>5</sup>, 文诗媛<sup>2</sup>, 冉会平<sup>2</sup>

(1. 天津师范大学 地理与环境科学学院, 天津 300387; 2. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331;  
3. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331; 4. GIS 应用研究重庆市高校重点实验室, 重庆 401331;  
5. 重庆市南岸区规划和自然资源局, 重庆 401147)

**摘要:** 进行城市空间增长边界模拟研究, 对区域有序开发土地资源和有效保护生态效益具有重要意义。传统方法未考虑到现实约束下生态需求对城市扩展的影响, 缺乏一定的客观评价。本文以 2005 年和 2015 年两期城镇建设用地数据为基础, 从协调城市扩展与生态安全的视角出发, 借助 ArcGIS 平台构建改进 CA 模型, 模拟了 2025 年万州城区的城镇用地扩展情况, 并划定了城市增长边界。首先, 通过计算生态敏感性、生态服务价值和禁止开发区划定生态保护红线, 结合水域用地得到生态安全格局; 其次, 合理选取城市扩展潜力因子建立 Logistic 驱动评价体系, 并纳入可控的邻域作用和随机作用构建 CA 模型模拟城市扩展的空间形态; 最后, 综合评价划定出 2025 年城市增长边界。结果表明: (1) 以 2005 年为基期模拟 2015 年研究区的城镇用地情况, 模拟总精度为 96.80%, Kappa 系数为 0.86, 模型效果好; (2) 2025 年模拟的城市增长边界内面积为 166.79 km<sup>2</sup>, 占研究区面积的 15.32%。模拟结果可为城市空间规划提供定量支撑, 保障了城市扩展的可持续性, 对生态环境敏感、城市用地紧张的山地型城市的增长边界划定具有参考价值。

**关键词:** 城市增长边界; CA 模型; 生态约束; 山地城市

**中图分类号:** F291.1, F205

**文献标志码:** A

城市扩展是城市用地不断扩展, 进而占用非城市用地的过程, 是城市化现象的重要特征<sup>[1-3]</sup>。随着全球经济的迅猛增长和人口急剧膨胀, 城市化成为重要的研究课题<sup>[4-5]</sup>。中国改革开放进行了 40 多年, 面临着资源环境承载力不断衰减、生态安全仍未引起广泛高度的重视以及开发建设区域愈加破碎化等问题, 导致生态资源与经济矛盾的矛盾不断加

深, 土地生态系统的结构和功能紊乱, 从而影响城市的可持续发展<sup>[6-8]</sup>。我国已明确要求在城市规划中必须确定建设用地的规模, 在永久基本农田、生态保护红线、城市增长边界三条管控线的基础上, 合理划定城市增长边界线 (Urban Growth Boundary, UGB), 提高城市空间利用率, 引导城市健康发展<sup>[9]</sup>。

美国学者最早开始 UGB 研究<sup>[10]</sup>。作为一种管

**收稿日期** (Received date): 2020-02-01; **改回时间** (Accepted date): 2021-02-01

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金 (41501582); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ1500316, KJQN201800519); 重庆师范大学校级招标项目 (16xzb03); 重庆师范大学基金项目资助项目 (17xll13009)。[National Natural Science Foundation of China (41501582); Science and Technology Research Project of Chongqing Education Commission (KJ1500316, KJQN201800519); University-Level Bidding Project of Chongqing Normal University (16xzb03); Chongqing Normal University-Level Funded Project (17xll13009)]

**作者简介** (Biography): 孔祥玉 (1997-), 女, 重庆长寿人, 硕士研究生。主要研究方向: 定量遥感。[KONG Xiangyu (1997-), female, born in Changshou, Chongqing, M. Sc. candidate, research on quantitative remote sensing] E-mail: kxybee@126.com

\* **通讯作者** (Corresponding author): 闵婕 (1978-), 女, 四川南充人, 博士, 副教授。主要研究方向: 土地利用与地理信息系统应用。[MIN Jie (1978-), female, born in Nanchong, Sichuan province, Ph. D., professor, research on land use and application of geographic information system] E-mail: tmtminjie@cqnu.edu.cn

理城市扩展和土地利用的有效工具,UGB 在国外得到持续关注<sup>[11-12]</sup>。例如,1970 年左右,Tobler<sup>[13]</sup>首次发现 CA 元胞自动机模型在模拟和预测地理问题上具有优势;Bhatta<sup>[14]</sup>通过 GIS 技术对印度加尔各答的 UGB 进行了模拟划定;Tayyebia<sup>[15]</sup>等利用神经网络和 GIS、RS 结合综合划定了德黑兰的 UGB。国内对于 UGB 的研究起步虽然晚,但也从地学、城市规划、城市管理、生态学等领域进行了探索和研究<sup>[16]</sup>。

划定 UGB 的方法主要有适宜性评价和 CA 模型。前者是通过 GIS 叠置分析对城市用地进行适宜性评价或构建生态安全格局,最终划定综合 UGB<sup>[11,17]</sup>,但这种方法缺乏城市自身发展的客观影响;后者是利用人工神经网络和 CA 模型等对城市远景年的边界进行模拟并划定 UGB<sup>[18-20]</sup>,但对城市的生态条件关注不够,不利于城市的可持续发展。

由于城市群落的复杂性,传统 CA 模型在时空分析上并不能很好体现城市模拟的发展态势。基于 GIS 技术的 CA 模型在研究城市扩展的课题上,提供了更为合理的时空分析<sup>[21-22]</sup>。例如,利用 GIS 空间分析功能将生态敏感性和城市建设适宜性综合起来,定量划定城市增长边界<sup>[2]</sup>;结合城市生态适宜性评价和城市资源承载力,模拟预测出不同时期的城市增长边界<sup>[17]</sup>。

中国“十四五”规划指出,“优化国土空间布局,推进区域协调发展和新型城镇化”。基于国土空间规划这一项重要的国土空间治理政策,许多学者对城镇空间和城镇开发边界的划定方法展开了新的探索<sup>[22-24]</sup>。

城市扩展的空间形态演变受到复杂的人地要素的综合作用。本文以重庆市万州城区为例,在传统模型的基础上,依据现实要求和模拟的不确定性对模型进行修正,针对山地城市扩展中建设用地与生态保护的冲突问题<sup>[25]</sup>,构建改进的 CA 模型来模拟城市扩展的空间格局;在 ArcGIS 的 Model Builder 平台上构建 CA 模型,考虑驱动因素和生态约束,同时引入可控邻域因子来实现扩展的邻域作用,在真实地理系列中体现事件发生可能性的随机概率,模拟研究区未来城市扩展形态,合理划定城市扩展边界。本文根据城市的自然特征和规划政策,提出平衡城市开发与生态安全的预防措施,为协调研究区未来的城市扩展和生态保护提供一定的依据和参考。

## 1 研究区概况与数据源

万州区(107°55′22″~108°53′25″E,30°24′00″~31°14′58″N)属重庆市东北部边缘的川东平行岭谷地带,多山地、丘陵,地形较为破碎,长江由南北流经,形成南北高、中间低的地势特征,是生态涵养的核心城市。截至 2019 年末,万州区常住人口 165.01 万人,地区生产总值 920.91 亿元,人均生产总值 55 854 元。

因研究城市增长边界的划定,故以万州城区为核心研究区(图 1),包括高笋塘街道、牌楼街道、周家坝街道等 11 个街道以及街道相邻的天城镇、新田镇、高峰镇等 11 个乡镇。研究区占地面积 1089.06 km<sup>2</sup>,占万州区总面积的 31.51%,地区生产总值 2017 年占到全万州区的 87.86%。

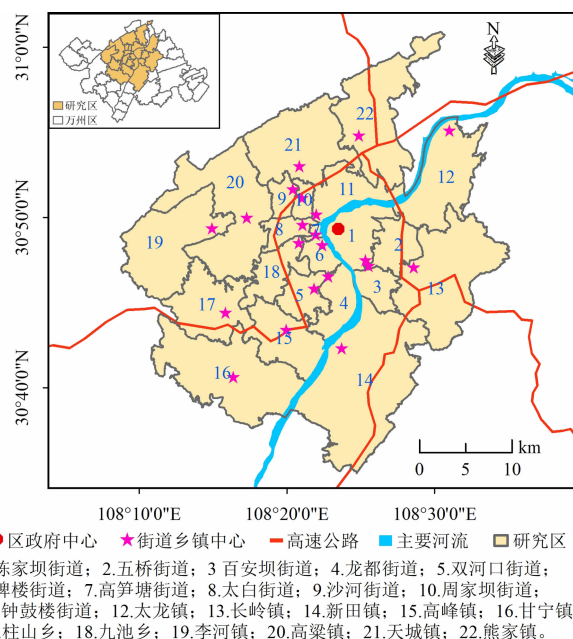


图 1 研究区位置图

Fig. 1 The location of the study area

本文所用数据包括:重庆市万州区 2005 年和 2015 年 Landsat5 - TM 和 Landsat8 - OLI 遥感影像数据,该数据通过地理空间数据云获取;生态保护红线划定所需数据由相关研究成果提供;万州区行政区划矢量数据、区县行政中心矢量数据、城市总体规划、水系、交通等矢量数据源于万州区国土资源局、城乡规划局;2015 年万州区商服站点、教育点、政府机构点等互联网大数据由 Python 自高德地图爬取;

万州区的人口密度和经济数据则由《重庆统计年鉴》、《万州区统计年鉴》和相关研究成果获取。

## 2 研究方法

研究基于生态安全和城市发展潜力,耦合邻域作用和随机作用搭建改进的 CA 模型对未来城市扩展进行模拟。通过权重叠加计算出由生态敏感性、生态服务价值和禁止开发区三者划定的生态保护红线,利用 GIS 的叠置分析对生态保护红线和水域用地计算生态综合安全格局。对选取的 7 个指标因子进行欧氏距离分析,通过 Logistic 回归分析获得城市扩展的驱动力作用。另外,考虑到邻域作用对相邻元胞之间的影响机制,本文对土地利用类型的邻域开发率进行计算;结合 GIS 创建随机栅格的模型搭建,较合理地解释了城市扩展的随机性因素。

借助 ArcGIS 的 Model Builder 平台构建改进的 CA 模型,利用 2005 年城镇建设用地现状数据模拟 2015 年的城镇建设情况,并通过实际 2015 年的城镇建设用地的对比分析,验证模型的精度及合理性。模型校正完成后,基于 2015 年城镇建设用地模拟 2025 年城镇建设用地,并提取 2025 年城市增长边界。本文研究流程见图 2。

### 2.1 生态安全约束

因研究区属三峡库区,这使得研究区在城市用地扩张的同时必须考虑生态安全问题。本文从生态安全的视角出发,将生态保护红线和水域用地作为约束因子,对研究区进行生态刚性管控区的划定。

生态保护红线是指用于划定生态保护的空间边界,对于保障生态资源安全和社会可持续发展具有现实意义。研究从可行性、操作性及准确性的角度

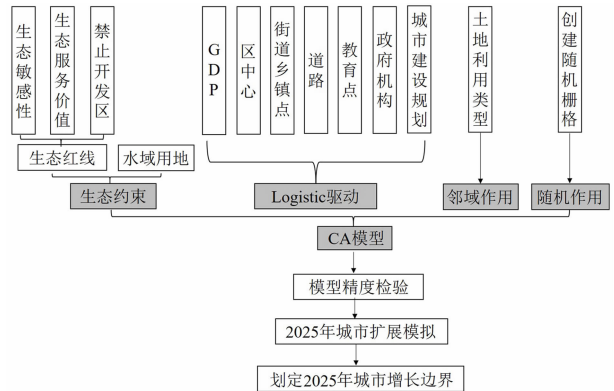


图 2 城市增长边界划定技术路线

Fig. 2 The technology flow chart for the delineation of the urban growth boundary

思考,通过生态敏感性评价、生态服务价值评价以及禁止开发区分析三者相结合的方法,划定出研究区的生态保护红线。

#### 2.1.1 生态敏感性评价

生态敏感性是指生态系统对自然环境变化和人类活动干扰综合作用的反映程度<sup>[26]</sup>,敏感性高的区域表示生态环境更易受到破坏,敏感性低的区域则表示其生态环境较为稳定。本文选取水体、坡度、土壤类型、植被覆盖度、降水侵蚀力 5 个因子(表 1)构建多因子综合分析法评价生态敏感性<sup>[27]</sup>(图 3a)。考虑减小主观性带来的权重值不合理,本文选择层次分析法确定其各因子的权重值。结果显示,中度敏感以上区域占研究区的 61.56%,集中分布在中部以外的丘陵山地,表明研究区的生态敏感较高,容易引发生态安全问题。

#### 2.1.2 生态服务价值评价

生态服务价值指人类从自然生态系统获取的所有效益,价值的高低影响着区域的可持续性发展。本文结合谢高地<sup>[28-29]</sup>与杨岚杰<sup>[30]</sup>的研究成果,考

表 1 生态敏感性评价因子及分级

Tab. 1 Ecological sensitivity assessment indexes and their classification

生态敏感因子	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极高度敏感	权重
水体/m	≥500	350 ~ 500	200 ~ 350	100 ~ 200	< 100	0.15
坡度/(°)	≤6	6 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 25	> 25	0.25
土壤类型	水稻土	新积土、山地草甸土	棕壤、黄褐土、石灰土	黄壤、黄棕土、粗骨土	紫色土	0.15
植被覆盖度/%	≤20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	> 80	0.25
降水侵蚀力/ (MJ · mm · hm <sup>-2</sup> · h <sup>-1</sup> · a <sup>-1</sup> )	≤250	250 ~ 300	300 ~ 350	350 ~ 400	> 400	0.20

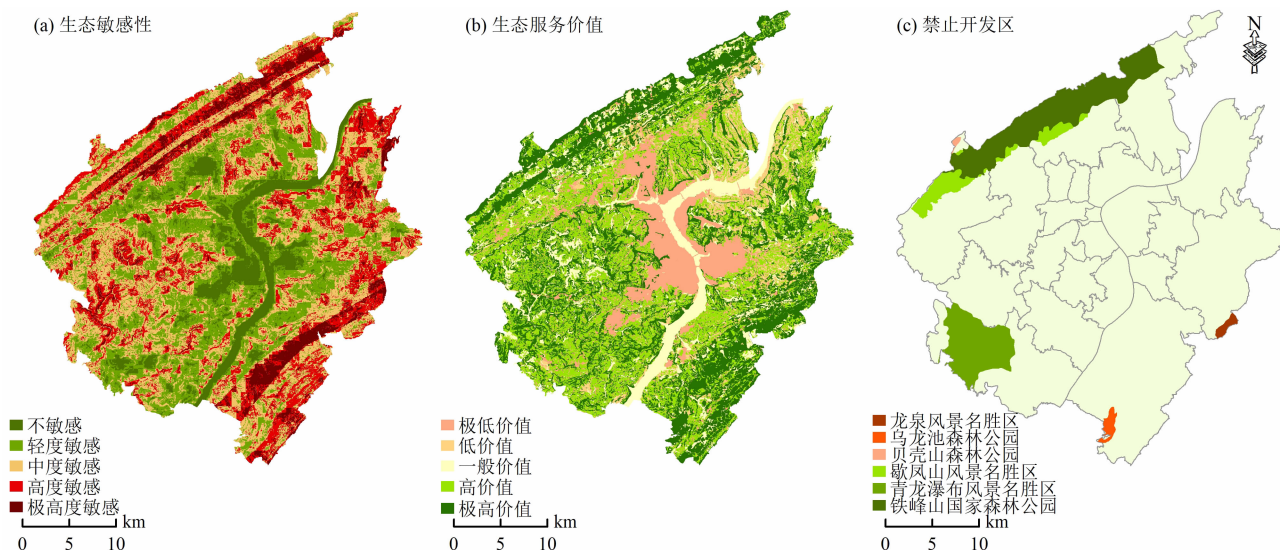


图3 生态保护红线中间计算结果

Fig. 3 The middle results of ecological protection redline

考虑 2015 年研究区土地利用状况和经济状况,将土地利用类型合并二级类为一级类,分别为建设用地、耕地、林地、园地、草地、水域及未利用地七大一级类,以此作为 7 种生态系统进行服务价值核算。

当前,普遍认为建设用地与其他类型的生态系统服务价值不同,故将建设用地按其他方法计算。参考董家华<sup>[31]</sup>和胡喜生<sup>[32]</sup>,建设用地在气体调节、水源涵养和废物处理等方面具有较为明显的负向作用,而提供生态服务功能的正向作用可忽略不计<sup>[31]</sup>。参考谢高地<sup>[29]</sup>研究成果,通过生态服务价值当量因子法,考虑区域差异,构建 9 种服务类型的非建设用地的生态服务价值当量评价体系,分别为气体调节、气候调节、水源涵养、土壤形成与保护、废物处理、食物生产、生物多样性保护、原材料和娱乐文化<sup>[33]</sup>。

由于生态服务价值随社会经济不断变化的不断产生波动,经济发展不断上涨,对生态服务的支付意愿也会随之提高。因此,采用对应阶段经济发展系数和城镇化水平来校正研究区生态服务价值<sup>[34]</sup>。将校正后的生态服务价值分类赋值到土地利用类型的数据中,通过自然断点法对其进行重分类,得到研究区的生态服务价值评价结果(图 3b)。

对于生态服务价值高的区域应尽量减少城镇建设对其造成的生态破坏,而生态服务价值较低的部分,应加强对其生态保护的监管和城镇建设的合理规划。结果显示,高服务价值和极高服务价值区域

占研究区的 65.37%,主要分布在中部以外的山地地区,且长江流域及附近的街道生态服务价值较低。同时,中部地区的生态环境较差,而南北两端的山地地区其生态环境较为优越。

### 2.1.3 禁止开发区

对于禁止开发区,则直接将研究区中的森林公园、自然保护区等国家法律保护区划分为不可建设用地,这些区域在改善生态环境等方面发挥着积极作用。本文中研究区北部的铁峰山国家森林公园、甘宁乡北部的青龙瀑布等都作为禁止开发区(图 3c)。

### 2.1.4 生态保护红线划定

本文将以上三个结果图层中,生态极敏感区域、生态服务价值极高价值区域与禁止开发区赋值为 0,其他用地赋值为 1,通过二值法将三个图层相乘,计算结果值为 0 表示生态红线区域,以此得到研究区的初步的生态保护红线范围。由于研究区的土地利用类型分类较为细致,使得提取的生态红线图斑相对破碎。故本文在 ArcGIS 中利用图斑聚集工具,将生态红线范围中邻近的图斑聚集成片状区域,最终划定出研究区的生态保护红线结果(图 4a)。研究区的生态红线范围面积为 215.11 km<sup>2</sup>,占总面积的 19.80%,呈条带状分布在研究区北部铁峰山、西部青龙瀑布及东南角王二包自然保护区。

### 2.1.5 生态约束强度

除了生态保护红线的约束,水域用地作为不可建设用地,必须纳入约束区域。本文水域约束区用



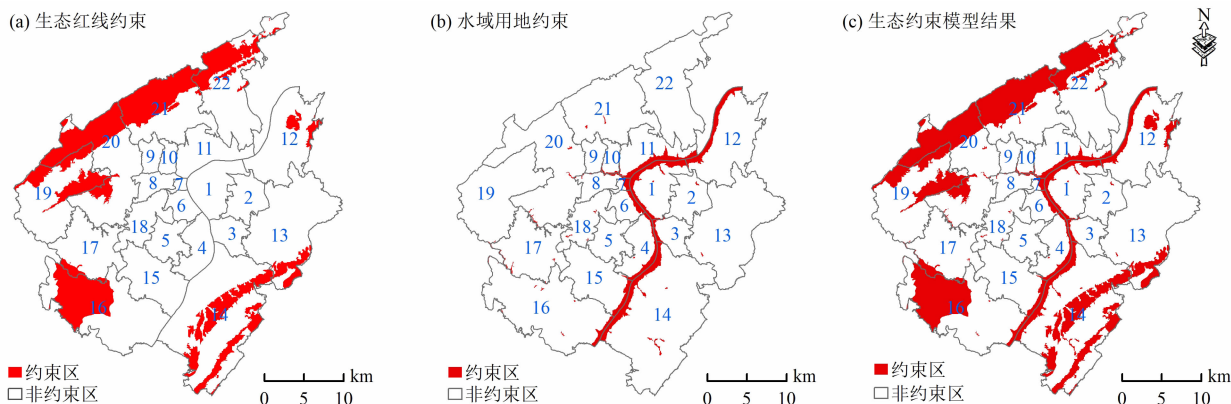


图 4 生态安全格局结果

Fig. 4 The results of ecological security pattern

长江流域和水库构建。将研究区内生态保护红线范围(图 4a)和水域用地(图 4b)区域赋值为 0,其他用地赋值为 1,采用二值法对两个约束因子进行乘积运算,计算出值为 0 的区域即表示最终的生态约束区。按公式(1),*ecology* 为生态保护红线约束指数(图 4a),*water* 为水域用地约束指数(图 4b),得到生态约束强度 *pconstraint*(图 4b)。

$$pconstraint = ecology \times water \quad (1)$$

经过计算最终划定的生态安全约束区域面积为 264.17 km<sup>2</sup>,占研究区的 24.26%,主要分布在北部一带的森林公园、南部山区以及甘宁乡北部的青龙瀑布景区。长江作为不可建设用地,将研究区划分为东西两部分,由于长江流域地势平缓、自然条件优越,加之万州区政府中心的集聚效应,呈现出以高笋塘街道为核心的非约束区空间格局。生态约束层作为环境保护的警戒线,被开发为城镇居民生产生活活动空间的概率非常小,在一定时期内基本不会发生较大变化,因此可将此静态结果作为研究区未来一定年限城市扩展的生态屏障区。

## 2.2 城市扩展潜力驱动评价

城镇居民生产生活活动空间的演变反映了城市扩展的进程,城市扩展的实质是城市人口对该区域的作用机制,其中包括人口、经济、区位、交通、商服等多方面基础设施建设的影响。在搜集反映城市扩展驱动因子指标基础上,通过共线性诊断剔除不合理因子,最终选取了 GDP、距区中心距离、距街道/乡镇点距离、距道路距离、教育点密度、政府机构密度和城市建设规划这 7 个驱动因子构建 Logistic 回归分析评价体系(图 5),对研究区的城市扩展潜力

进行模拟。

在 SPSS 中建立以城镇用地变化值为因变量、7 个驱动因子为自变量的二元回归模型(表 2),Beta 值代表各因子回归系数,值大于 0 则表示该因子影响越大,越有利于非城镇用地转化为城镇用地;反之,则表示该因子影响越小,非城镇用地向城镇用地转化的概率越低。 $\exp(\text{Beta})$  为系数 Beta 的指数值,表示距中心近的地区对城市扩展驱动作用是距区中心远的地区的 1.106 倍。各系数在 0.05 的显著性水平上具有显著意义,表明这 7 个特征变量对城市扩展过程都有很大影响,可进一步作为研究区居民活动空间扩展的驱动评价体系,并建立 Logistic 回归方程如下:

$$plogistic = 1 / \{ 1 + \exp [ - ( \beta_0 + \beta_1 GDP + \beta_2 Discity + \beta_3 Discenter + \beta_4 Disroad + \beta_5 Edu + \beta_6 Gov + \beta_7 Plan ) ] \} \quad (2)$$

式中,*plogistic* 为城市扩展潜力驱动模型结果; $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 、 $\beta_4$ 、 $\beta_5$ 、 $\beta_6$  和  $\beta_7$  分别表示回归方程中常量、GDP 值、区中心距离、距街道乡镇点距离、距道路距离、教育点密度、政府机构密度和城市建设规划变量的回归系数;*GDP* 表示 GDP 在各元胞上的数值;*Discity* 表示待评元胞与区中心的距离;*Discenter* 表示待评元胞的距离;*Disroad* 表示待评元胞与道路的距离;*Edu* 表示待评元胞与教育点密度的距离;*Gov* 表示待评元胞与政府机构密度的距离;*Plan* 表示待评元胞与城市建设规划的距离。

通过 Logistic 回归分析计算得到 7 个驱动因子对城市扩展的驱动作用(图 5h)。结果显示,研究区

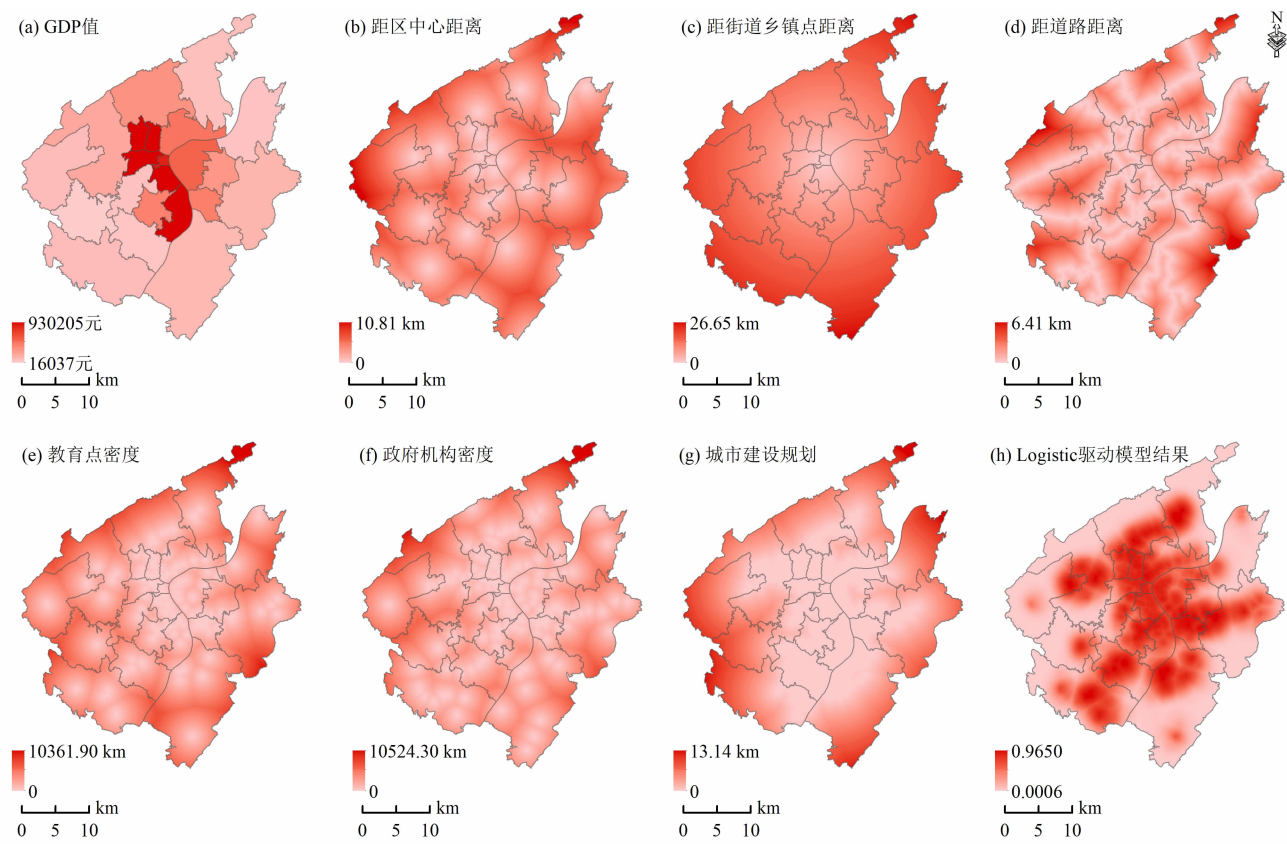


图 5 Logistic 指标评价因子集

Fig. 5 The evaluation results of Logistic indexes

表 2 2005—2015 年回归系数及结果检测表

Tab. 2 Regression coefficients and result test from 2005 to 2015

特征变量	Beta (回归系数)	Std Error (标准误差)	Walds (卡方值)	Degrees of Freedom (自由度)	Significance (显著性)	EXP(Beta) (优势比)
GDP 值( <i>GDP</i> )	-0.0001( $\beta_1$ )	0.001	30.534	1	0.000	1.000
距区中心距离( <i>Discity</i> )	0.1007( $\beta_2$ )	0.036	7.897	1	0.005	1.106
距街道乡镇点距离( <i>Discenter</i> )	-0.2209( $\beta_3$ )	0.066	11.234	1	0.001	0.802
距道路距离( <i>Disroad</i> )	-0.4162( $\beta_4$ )	0.098	18.187	1	0.000	0.660
教育点密度( <i>Edu</i> )	-0.0002( $\beta_5$ )	0.001	8.847	1	0.003	1.000
政府机构密度( <i>Gov</i> )	-0.0003( $\beta_6$ )	0.003	23.821	1	0.000	1.000
城市建设规划( <i>Plan</i> )	-0.3667( $\beta_7$ )	0.108	11.466	1	0.000	0.693
常量	2.9890( $\beta_0$ )	0.323	1871.643	1	0.000	19.866

的驱动作用强烈表现在中部地区,呈现出以牌楼街道为中心向周围扩散的趋势;其中,距区中心距离、距街道乡镇点距离、距道路距离和城市建设规划对城市扩展有更大的驱动作用。通常,距区中心和街道乡镇点近的区域往往拥有更优越的地理环境和经济吸引力,这使得城镇居民的活动空间更加倾向于

该区域。

2005—2015 年回归系数的分类预测结果(表 3),其总体分类精度为 79.20%,说明如果只考虑区位、经济、交通、教育、政府中选取的这 7 个驱动因子对城市扩展模拟的作用是不充分的,还应综合考虑单个元胞的邻域作用及随机作用等。

表 3 2005—2015 年分类预测精度表  
Tab.3 Classification prediction accuracy in 2005 to 2015

2005—2015 年 建设用地变化	预测值		正确 比例/%
	0	1	
观测值	0	152	44.80
	1	52	93.60
总精度/%	—	—	79.20

2.3 邻域作用模型

由于土地利用在空间上是相互影响的,相邻栅格之间存在一定的制约或驱动作用,因此本文引入扩展 Moore 型邻域,探究城镇用地在 5 × 5 窗口内(不包含中心元胞)24 个邻域元胞的作用机制。模型中的 2005 年和 2015 年的城镇用地栅格均由 0、1 二值构成(0 表示非城镇建设用地,1 表示城镇建设用地),按公式(3)计算,构建邻域作用模型,得到其邻域作用结果。

$$pneighbor = 1 - \frac{20}{9} \left( \frac{\sum_{5 \times 5} \text{con}(S_{i,j} = 1)}{24} - \mu \right)^2 \tag{3}$$

式中,*pneighbor* 为邻域作用结果,表示邻域作用对单个元胞城镇用地状态转换的影响; $\mu$  为邻域因子,在(0,1)内取实数值,本文取值 0.6<sup>[35]</sup>;con()是条件函数,当邻域窗口内的元胞状态(*i,j*) *S<sub>i,j</sub>* = 1 时,则返回 1,否则返回 0。

2.4 随机作用模型

城市扩展是一种存在各种偶然和随机的过程,本文通过构建随机模型实现城市系统中的不确定性,使得城市模拟结果更符合现实情况。通过工具创建随机栅格 Create Random Raster,样本点的栅格值在(0,1)内随机且均匀分布,再根据公式(4)计算得到随机因素的作用。

$$prandom = 1 - [\{4 \times random\} \div 10] \tag{4}$$

式中,*prandom* 为随机作用结果;*random* 为创建的随机栅格。

2.5 城市建设用地扩展模拟

本文基于生态安全约束、城市扩展潜力和随机作用,在 Model Builder 中构建改进的 CA 模型模拟城市建设用地的演变情况。公式如下:

$$P = plogistic \times pconstraint \times pneighbor \times prandom \tag{5}$$

式中,*P* 为城市建设用地扩展模拟结果;*plogistic* 为城市扩展潜力驱动模型结果;*pconstraint* 为生态约束强度结果;*pneighbor* 为邻域作用结果;*prandom* 为随机作用结果。

按公式(5)计算每个栅格单元的城市化概率,值越大表示该单元转换为城镇建设用地的可能性就越大。

2.6 城市增长边界划定

城市增长边界是对该城市未来一定年限内的城市扩展划定限制范围,代表的应是连续的大面积轮廓。本文采用边缘检测和面积阈值<sup>[8]</sup>的方法,提取城市增长边界。对模拟结果设置面积阈值 *Pthreshold* = 0.25,去掉外围小面积图斑,保留连续分布的中心区域。再通过融合大图斑、填补小洞、平滑图斑等处理方法,最终得到城市增长边界的模拟结果。

3 结果分析

3.1 2005—2015 年城市扩展模拟及精度评价

本文以 2005 年为初始年,模拟 2015 年研究区的城镇建设用地。对比 2015 年模拟建设用地和实际建设用地的混淆矩阵(表 4),2015 年建设用地模拟的元胞数量为 94 603 个,实际建设用地元胞数量为 121 472 个,城镇用地的正确率为 66.07%,模拟总精度为 96.80%。利用 Kappa 系数评价模拟精度,其值为 0.86,说明模拟效果良好。

表 4 2015 年城市空间扩展模拟结果精度评价

Tab.4 The accuracy evaluation of simulation results  
of urban spatial expansion in 2015

城市空间用地类型		2015 年模拟			正确率/%
		城镇用地	非城镇用地	总计	
2015 年 实际	城镇用地	80262	41210	121472	66.07
	非城镇用地	14341	1599648	1613989	99.11
	总计	94603	1640858	1735461	
总精度		—	—	—	96.80
kappa		—	0.86	—	—

由图 6 可知,2015 年研究区连续分布的中部城镇建设用地基本都可以预测,沿长江流域方向的城

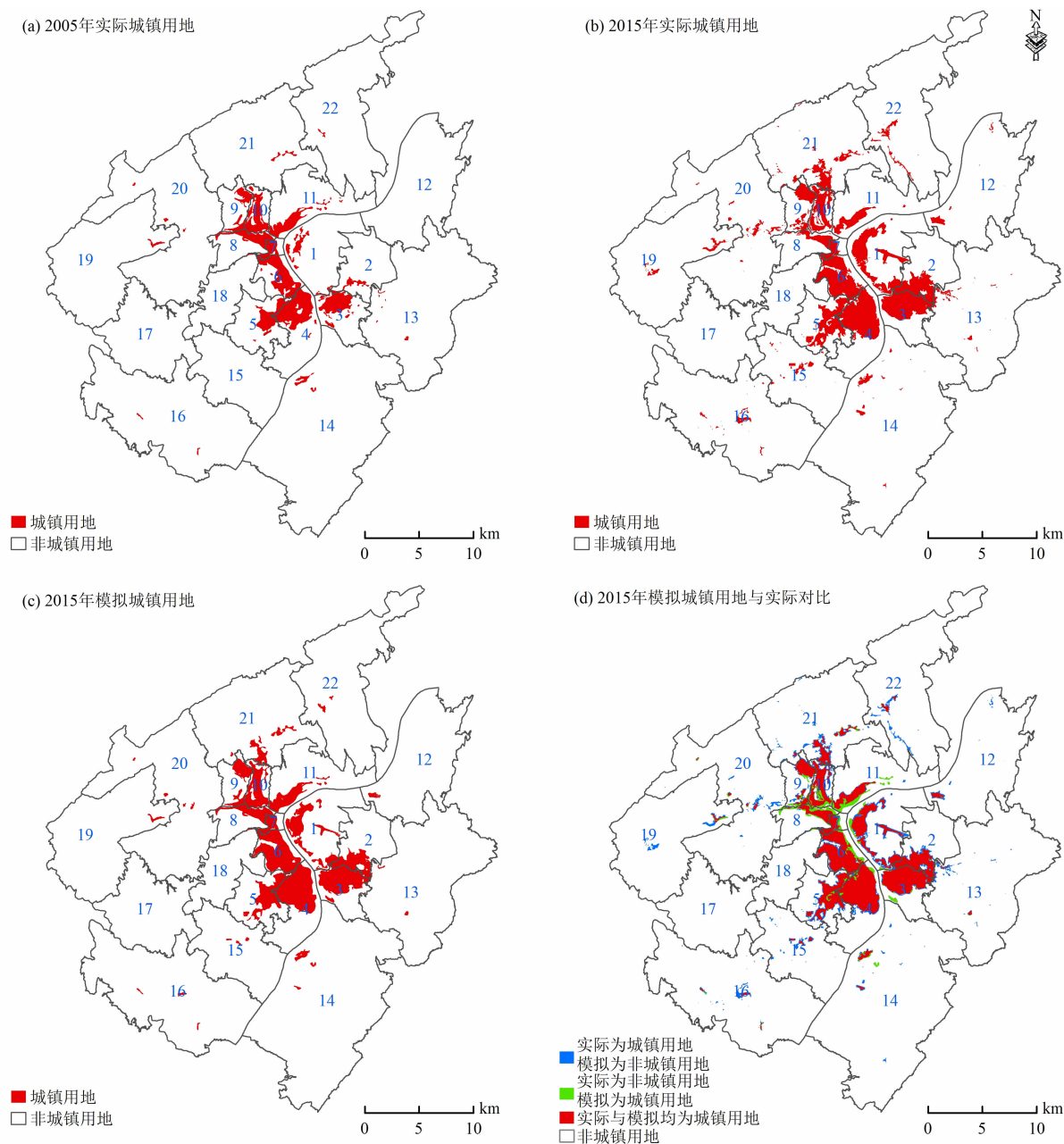


图6 2005—2015年城市扩展模拟结果

Fig. 6 The simulation results of urban expansion in 2015 based 2005

镇化集中,模拟效果较好;而在北部和南部的乡镇,如天城镇、陈家坝街道,由于距离区中心较远,其城镇建设用地较少且离散分布,因此模拟效果欠佳。

### 3.2 2015—2025年城市扩展模拟及边界划定

以2015年为基期,模拟2025年研究区的城镇建设用地扩展情况(图7a)。可以发现,研究区的城市扩展演变剧烈,以2015年城镇建设用地为中心,逐渐向四周扩散,其中南北方向的扩展更为急剧。中部地区的牌楼街道、陈家坝街道、周家坝街道都增

加了大面积的建设用地,并有向外扩张的趋势;北部的高粱镇、天城镇、熊家镇及南部的甘宁镇、高峰镇、新田镇、长岭镇以乡镇中心展开建设用地的扩张。另外,研究区的城镇建设用地也在逐渐聚集,未来有可能发展为连片分布的大面积城市用地。基于2025年城镇建设用地的模拟结果提取城市增长边界(图7b),作为研究区城市开发的边界。从城市建设规划来看,该边界基本符合研究区规划布局方案的方向和强度,以长江流域为发展轴,建立以滨江两



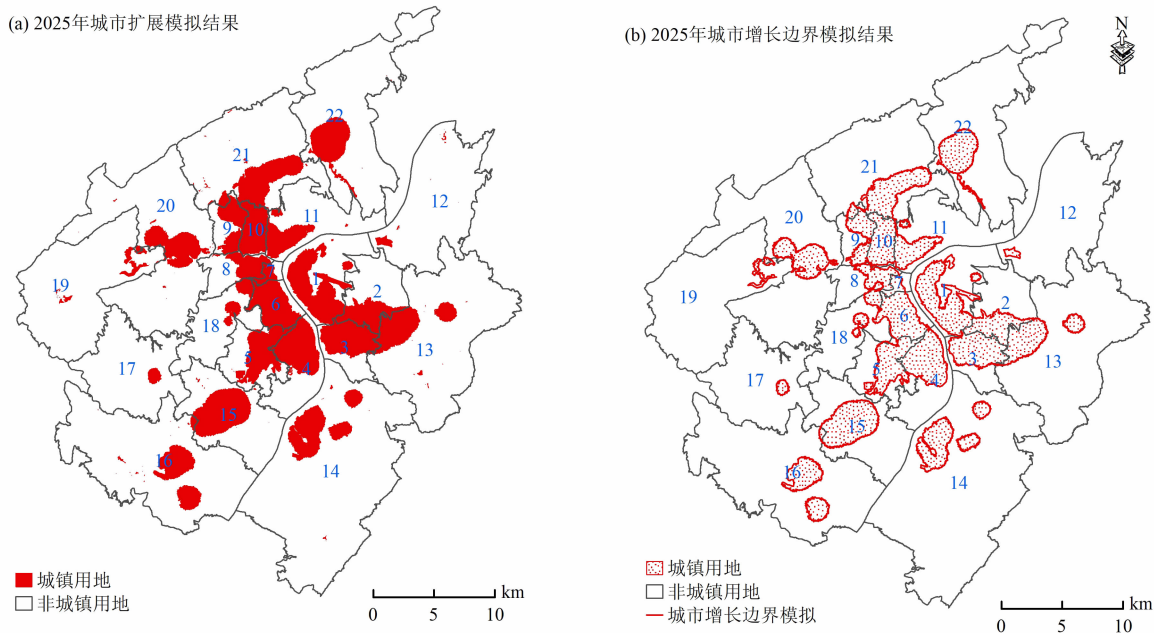


图 7 2025 年城市扩展及其增长边界模拟结果

Fig. 7 The simulation results of urban expansion and its growth boundary in 2025

岸的都市核心区。模拟的 2025 年研究区城市增长边界内面积为  $166.79 \text{ km}^2$ , 占研究区总面积的  $15.32\%$ , 其中城市增长边界内已建设面积为  $75.87 \text{ km}^2$ , 去除生态约束区所占面积  $264.17 \text{ km}^2$ , 研究区剩余可建设面积为  $749.02 \text{ km}^2$ , 结果表明划定的城市增长边界内面积小于在考虑生态安全格局下预测的可用于城镇扩展的面积, 对于研究区未来城市规划和自然资源的可持续发展具有现实意义。

### 3.3 未考虑生态安全的 2025 年城市扩展模拟结果

本文在构建城市扩展模型时, 考虑到居民生产生活对生态环境和谐美好的迫切需求, 因此从生态安全的角度出发得到研究区 2025 年城市扩展模拟结果(图 7)。

当未考虑生态安全带来的城市扩展约束, 只采用驱动作用、邻域作用和随机作用构建模型时, 其模拟结果(图 8)仍表现出以 2015 年城镇建设用地区为中心向四周剧烈扩散的特征。但在距城镇中心较近的几个乡镇中, 如高粱镇、李河镇、甘宁镇和新田镇, 未考虑生态安全的城镇扩展面积较基于生态安全的模拟结果来看明显扩大, 且城镇用地的空间形态更为规整。从图 8a 中可以发现, 模拟结果将研究区南北方向的河流区域也划定为城镇用地, 显然, 这是错误的。图 8b 中划定的城市增长边界内面积为  $188.53 \text{ km}^2$ , 较基于生态安全的模拟结果多了

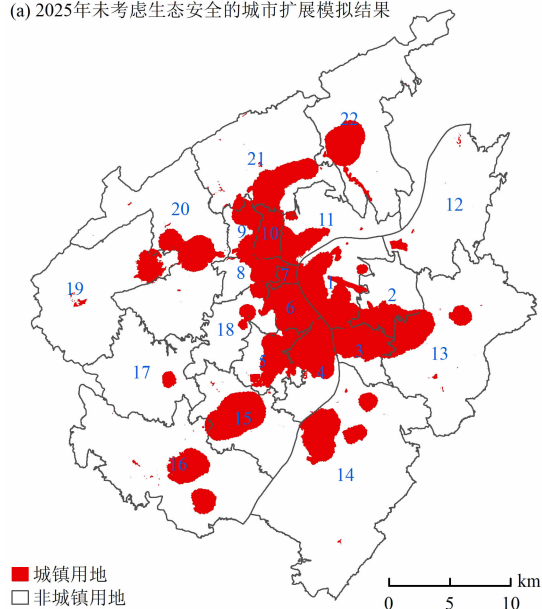
$21.74 \text{ km}^2$ 。如果去除其中错误划定的河流区域部分, 其城市增长边界内面积为  $176.01 \text{ km}^2$ , 较基于生态安全的模拟结果多了  $9.22 \text{ km}^2$ , 多出的部分主要分布在李河镇和甘宁镇的城镇中心, 而这部分恰好是划定在生态保护红线内的区域, 是服务于生态安全的不可建设用地。

通过对比基于生态安全与未考虑生态安全的模拟结果, 发现在未考虑生态安全时的模拟结果, 按扩展趋势将城市中心的河流区域也连片模拟为城镇用地, 这是明显错误的。在去除河流区域出现的错误后, 其他多出的模拟区域主要分布在李河镇和甘宁镇的生态保护红线内的区域。因此, 缺乏生态保护红线约束和水系约束的城市扩展模型会产生一定错误、不合理的模拟结果。因此, 本文以基于生态安全为出发点来模拟并划定城市增长边界的方法是合理且必要的。

## 4 结论与展望

本文基于 2005 年和 2015 年两期遥感影像解译数据, 以山地城市万州城区的 22 个街道乡镇为研究对象, 通过 Model Builder 构建改进的 CA 模型, 从生态安全的角度出发, 利用 Logistic 模型评价驱动因子的作用强度, 同时考虑邻域作用和随机作用, 对其城

(a) 2025年未考虑生态安全的城市扩展模拟结果



(b) 2025年未考虑生态安全的城市增长边界模拟结果

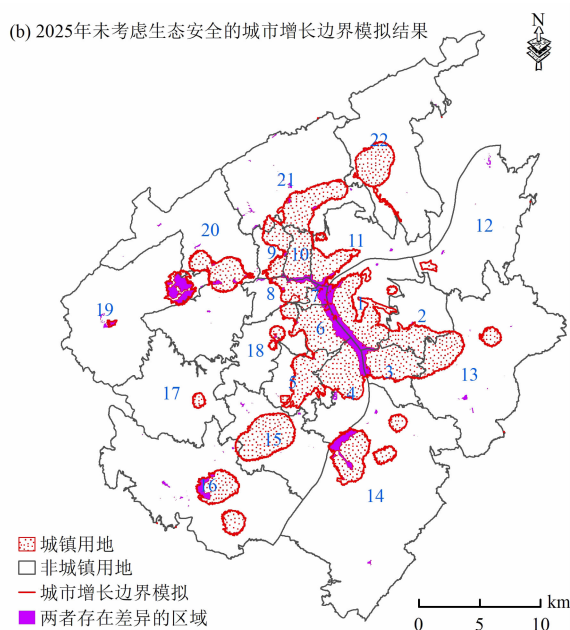


图8 2025年未考虑生态安全的城市增长边界模拟结果

Fig. 8 The simulation results of urban growth boundary in 2025 without ecological security

市扩展进行模拟预测,并划定研究区未来的城市增长边界。主要结论如下:

(1)通过构建 CA 模型,得到每个模块对研究区的作用机制。通过 Logistic 回归分析得到城市开发的潜力评价,其中,距区中心距离、距街道乡镇点距离、距道路距离和城市建设规划对其城市扩展的驱动作用更强;以生态保护红线和水域用地叠加得到的生态约束模块限制了不可开发的区域;邻域分析则考虑到了相邻元胞之间的相互作用;而随机模块把城市活动的不确定性纳入模型。

(2)2015 年模拟效果良好,与实际建设用地的基本一致。以 2005 年为基期模拟 2015 年的城市扩展,发现建设用地模拟精度为 66.07%,总精度为 96.80%,Kappa 系数为 0.86,模拟结果一致性较好。从空间上看,模拟的结果以 2005 年建设用地密集分布的中心向外扩散,南北地区的建设用地面积大幅增加,城市化进程明显加速。整体来看,本文构建的模型及参数比较合理,可以用于后期的预测。

(3)2025 年研究区的建设用地模拟基本符合城市扩展方向和规划布局。以 2015 年为基期,通过构建的 CA 模型模拟得到的 2025 年研究区城镇建设用地,从 2005—2015 年的城镇用地变化来看,研究区的城市建设以中部地区为中心逐渐向四周扩张,南北部乡镇以乡镇中心呈现点状式扩散,有连续成

片的发展态势。

(4)2025 年城市增长边界模拟协调了生态保护与城市开发。根据模拟结果,划定的 2025 年城市增长边界内面积为 166.79 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 15.32%,可为城市生态安全提供一定的空间布局,保障了城市扩展的可持续性。

本文提出兼顾城市扩展与生态安全的城市增长边界划定方法,适用于大部分山地城市的城市增长边界的划定,也对其他类型城市扩展模拟研究有一定的参考意义。研究方法既保障生态资源的安全,又能预测城市扩展的空间形态,同时还可为集约型城镇化的战略布局提供有效的定量支撑,促使土地资源的优化配置,适应于当前“十四五”规划建议中对国土规划和生态文明建设的新需求。但在本文提出的划定方法中,不包含对城市资源环境承载力的评估,使得模拟的城市扩展结果是否与自身基础资源环境的合理使用相对应,这方面的验证还需在后续研究中完善。另外,由于城市系统极为复杂,人类活动和自然变化的多样性无法准确预估,因此对于不同城市的模拟还需要依据具体情况来划定城市扩展的边界。

#### 参考文献 (References)

- [1] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力

- 因子分析[J]. 地理学报, 2009, **64**(4): 387 – 398. [CHEN Mingxing, LU Dadao, ZHANG Hua. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, **64**(4): 387 – 398]
- [2] 何春阳, 史培军. 中国景观城市化及其影响模拟[C]. 乌鲁木齐: 中国地理学会, 2011. [HE Chunyang, SHI Peijun. Landscape urbanization and its impact simulation in China [C]. Urumqi: Geographical Society of China, 2011]
- [3] 宋世雄, 刘志锋, 何春阳, 等. 城市扩展过程对自然生境影响评价的研究进展[J]. 地球科学进展, 2018, **33**(10): 1094 – 1104. [SONG Shixiong, LIU Zhifeng, HE Chunyang, et al. Research progress on assessing the impacts of urban expansion on natural habitats [J]. Advances in earth science, 2018, **33**(10): 1094 – 1104] DOI: 10.11867/j. issn. 1001 – 8166. 2018. 10. 1094
- [4] 戴均良, 高晓路, 杜守帅. 城镇化进程中的空间扩张和土地利用控制[J]. 地理研究, 2010, **29**(10): 1822 – 1832. [DAI Junliang, GAO Xiaolu, DU Shoushuai. Expansion of urban space and land use control in the process of urbanization [J]. Geographical Research, 2010, **29**(10): 1822 – 1832]
- [5] LIN Xueqin, WANG Yang, WANG Shaojian, et al. Spatial differences and driving forces of land urbanization in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, **25**(5): 545 – 558. DOI: 10.1007/s11442 – 015 – 1186 – 7
- [6] 冯琰玮, 甄江红, 峰一, 等. 干旱区城市增长边界划定方法与实证——以内蒙古呼和浩特市为例[J]. 经济地理, 2019, **39**(3): 76 – 83. [FENG Yanwei, ZHEN Jianghong, FENG Yi, et al. Method and demonstration of urban growth boundary delimitation in arid regions: a case study of Hohhot city, Inner Mongolia [J]. Economic Geography, 2019, **39**(3): 76 – 83] DOI: 10.15957/j. cnki. jjdl. 2019. 03. 009
- [7] 叶玉瑶, 苏泳娴, 张虹鸥, 等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用[J]. 地理学报, 2014, **69**(4): 485 – 496. [YE Yuyao, SU Yongxian, ZHANG Hong'ou, et al. Ecological resistance surface model and its application in urban expansion simulations [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, **69**(4): 485 – 496] DOI: 10.11821/dlxb201404005
- [8] 梅梦媛, 陈振杰, 张云倩, 等. 居民活动空间与生态约束协调的城市开发边界划定方法——以长沙市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(11): 2472 – 2480. [MEI Mengyuan, CHEN Zhenjie, ZHANG Yunqian, et al. Study on the delineation method of urban growth boundary under the coordination of residential activity space and ecological constraint: a case study of Changsha, China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, **27**(11): 2472 – 2480] DOI: 10.11870/cjlyzyhj201811009
- [9] 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[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(1): 14 – 26. [CONG Dianmin, ZHAO Shuhe, YU Tao, 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) [J]. Journal of Natural Resources, 2018, **33**(1): 14 – 26] DOI: 10.11849/zrzyxb. 20161330
- [10] NELSON A C, MOORE T. Assessing urban growth management: the case of Portland, Oregon, the USA's largest urban growth boundary [J]. Land Use Policy, 1993, **10**(4): 293 – 302.
- [11] 刘焯序, 彭建, 孙茂龙, 等. 基于生态适宜与风险控制的城市新区增长边界划定——以济宁市太白湖新区为例[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(8): 2605 – 2613. [LIU Yanxu, PENG Jian, SUN Maolong, et al. Delimitation of urban growth boundary based on ecological suitability and risk control: a case of Taibai Lake new district in Jining city, Shandong, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(8): 2605 – 2613] DOI: 10.13287/j. 1001 – 9332. 201608. 004
- [12] 刘辉, 张志赞, 税伟, 等. 资源枯竭型城市增长边界划定研究——以淮北市为例[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(3): 391 – 405. [LIU Hui, ZHANG Zhiyun, SHUI Wei, et al. Urban growth boundary delimitation of resource-exhausted cities: a case study of Huaibei city [J]. Journal of Natural Resources, 2017, **32**(3): 391 – 405] DOI: 10.11849/zrzyxb. 20160425
- [13] Tobler W R. Cellular geography [G]. Philosophy in Geography. Berlin: Springer Netherlands, 1979: 379 – 386.
- [14] BHATTA B. Modelling of urban growth boundary using geoinformatics [J]. International Journal of Digital Earth, 2009, **2**(4): 359 – 381.
- [15] TAYYEBI A, PIJANOWSKI B C, TAYYEBI A H. An urban growth boundary model using neural networks, GIS and radial parameterization: an application to Tehran, Iran [J]. Landscape and Urban Planning, 2011, **100**(1): 35 – 44.
- [16] 张进. 美国的城市增长管理[J]. 国外城市规划, 2002(2): 37 – 40. [ZHANG Jin. Urban growth management in the United States [J]. Urban Planning Overseas, 2002(2): 37 – 40]
- [17] 王振波, 张蕾, 张晓瑞, 等. 基于资源环境承载力的合肥市增长边界划定[J]. 地理研究, 2013, **32**(12): 2302 – 2311. [WANG Zhenbo, ZHANG Qiang, ZHANG Xiaorui, et al. Urban growth boundary delimitation of Hefei city based on the resources and environment carrying capability [J]. Geographical Research, 2013, **32**(12): 2302 – 2311] DOI: 10.11821/dlyj2013112012
- [18] 徐海龙, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于潜力—约束和 SLEUTH 模型松散耦合的南京城市扩展模拟[J]. 地理研究, 2017, **36**(3): 529 – 540. [XU Hailong, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. Urban sprawl simulation based on the loose coupling between potential-limitation and SLEUTH model in Nanjing city [J]. Geographical Research, 2017, **36**(3): 529 – 540] DOI: 10.11821/dlyj201703011
- [19] 李沁, 沈明, 高永年, 等. 基于改进粒子群算法和元胞自动机的城市扩张模拟——以南京为例[J]. 长江流域资源与环境,

- 2017, **26**(2):190 – 197. [LI Qin, SHEN Ming, GAO Yongnian, et al. Urban expansion simulation using modified particle swarm optimization algorithm and cellular automata: a case study of Nanjing city [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, **26**(2): 190 – 197] DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201702004
- [20] 赵莉, 杨俊, 李闯, 等. 地理元胞自动机模型研究进展[J]. 地理科学, 2016, **36**(8): 1190 – 1196. [ZHAO Li, YANG Jun, LI Chuang, et al. Geographic cellular automata model research progress [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, **36**(8): 1190 – 1196] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.08.009
- [21] 陶卓霖, 喻忠磊, 王砾, 等. 基于空间区位条件的城市扩展生态阻力面模型及应用[J]. 地理研究, 2018, **37**(1): 199 – 208. [TAO Zhuolin, YU Zhonglei, WANG Li, et al. The urban expansion ecological resistance surface model incorporated with spatial locational conditions and its application [J]. Geographical Research, 2018, **37**(1): 199 – 208] DOI: 10.11821/dlyj201801015
- [22] 邱思齐, 岳文泽. 刚性与弹性相结合的城市开发边界划定——以浙江省义乌市为例[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(5): 1607 – 1616. [QIU Siqi, YUE Wenzhe. Delineation of urban development boundary based on the combination of rigidity and elasticity: a case of Yiwu city in Zhejiang province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(5): 1607 – 1616] DOI: 10.13287/j.1001-9332.201805.016
- [23] 周侃, 樊杰, 盛科荣. 国土空间管控的方法与途径[J]. 地理研究, 2019, **38**(10): 2527 – 2540. [ZHOU Kan, FAN jie, SHENG Kerong. Research on methods and approaches of spatial governances [J]. Geographical Research, 2019, **38**(10): 2527 – 2540] DOI: 10.11821/dlyj020190308
- [24] 高晓路, 吴丹贤, 周侃, 等. 国土空间规划中城镇空间和城镇开发边界的划定[J]. 地理研究, 2019, **38**(10): 2458 – 2472. [GAO Xiaolu, WU Danxian, ZHOU Kan, et al. The urban space and urban development boundary under the framework of territory spatial planning [J]. Geographical Research, 2019, **38**(10): 2458 – 2472] DOI: 10.11821/dlyj020171164
- [25] 陈吉煜, 刘勇, 何东. 山地城市的蔓延特征分析——以重庆主城区为例[J]. 山地学报, 2018, **36**(3): 432 – 440. [CHEN Jiyu, LIU Yong, HE Dong. Characteristics of urban sprawl in mountainous cities: a case of central Chongqing [J]. Mountain Research, 2018, **36**(3): 432 – 440] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000339
- [26] 李冬梅, 吴晓青, 于德永, 等. 云南省生态环境敏感性评价[J]. 生态学报, 2008, **28**(11): 5270 – 5278. [LI Dongmei, WU Xiaoqing, YU Deyong, et al. Evaluation on eco-environmental sensitivity of Yunnan province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(11): 5270 – 5278]
- [27] 丁雨霖, 冯长春, 王利伟. 山地区域土地生态红线划定方法与实证研究——以重庆市涪陵区义和镇为例[J]. 地理科学进展, 2016, **35**(7): 851 – 859. [DING Yuchen, FENG Changchun, WANG Liwei. Determination of ecological red line of mountainous areas: a case study of Yihetown in Chongqing municipality [J]. Progress in Geography. 2016, **35**(7): 851 – 859] DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.07.006
- [28] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, **30**(8): 1243 – 1253. [XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources, 2015, **30**(8): 1243 – 1253] DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.08.001
- [29] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, **37**(9): 1740 – 1746. [XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Changshun, et al. The value of ecosystem services in China [J]. Resources Science, 2015, **37**(9): 1740 – 1746]
- [30] 杨岚杰. 基于生态保护红线划定的三峡库区土地利用布局研究——以重庆市忠县为例[D]. 重庆: 西南大学, 2017, 17 – 22. [YANG Lanjie. Study on the land usage layout of the Three Gorges reservoir area based on the ecological red line: taking Zhongxian county of Chongqing as an example [D]. Chongqing: Southwest University, 2017, 17 – 22]
- [31] 董家华, 舒廷飞, 谢慧, 等. 城市建设用地生态服务功能价值计算与应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, **35**(5): 636 – 640. [DONG Jiahua, SHU Tingfei, XIE Hui, et al. Calculative method for ecosystem services values of urban constructive lands and its application [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2007, **35**(5): 636 – 640]
- [32] 胡喜生. 福州土地生态系统服务价值空间异质性及其与城市化耦合的关系[D]. 福建: 福建农林大学, 2012: 21 – 22. [HU Xisheng. Spatial heterogeneity of land ecosystem service value and the coupling relationship between it and urbanization [D]. Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012: 21 – 22]
- [33] 蒋大林, 曹晓峰, 匡鸿海, 等. 生态保护红线及其划定关键问题浅析[J]. 资源科学, 2015, **37**(9): 1755 – 1764. [JIANG Dalin, CAO Xiaofeng, KUANG Honghai, et al. Ecological red line planning and related key issues analysis for China [J]. Resources Science, 2015, **37**(9): 1755 – 1764]
- [34] 钟莉娜, 王军, 赵文武. 多流域降雨和土地利用格局对土壤侵蚀影响的比较分析——以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J]. 地理学报, 2017, **72**(3): 432 – 443. [ZHONG Lina, WANG Jun, ZHAO Wenwu. Comparative analysis of the effect of rainfall pattern and land use pattern on soil erosion in different-scale watersheds: a case study in hilly and gully area of the Loess Plateau [J]. ActaGeographicaSinica, 2017, **72**(3): 432 – 443] DOI: 10.11821/dlxh201703006
- [35] 甘喜庆. 基于约束 logistic—CA 模型的城市扩张空间形态研究[D]. 湖南: 中南大学, 2008: 49. [GAN Xiqing. Study on city



growth spatial form based on constrained logistic-CA model [D].

Hunan; Central South University, 2008; 49]

## Delineation of the Growth Boundary of Mountain Cities by Weighing Ecological Security and Urban Expansion Simulation

KONG Xiangyu<sup>1</sup>, MIN Jie<sup>2,3,4\*</sup>, HOU Lirong<sup>5</sup>, WEN Shiyuan<sup>2</sup>, RAN Huiping<sup>2</sup>

(1. School of Geographic and Environment Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

2. School of Geographic and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

3. Chongqing Key Laboratory of Earth Surface Processes and Environmental Remote Sensing in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China; 4. Chongqing University Key Laboratory of GIS Application Research, Chongqing 401331, China;

5. Planning and Natural Resources Bureau of Nan'an District, Chongqing Municipality, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** The simulation of urban spatial growth boundary is of great significance for the orderly development of land resources and the effective protection of ecological benefits. Under the realistic constraints, traditional methods do not consider the impact of ecological demands on urban expansion, so they generally are lack of objective assessments. Based on the urban construction land data of the study area in 2005 and 2015, this practice constructed an improved CA model to coordinate the ecological security and urban expansion; then, we used the ArcGIS cooperation platform to simulate the urban land growth, and we finally delimited the urban growth boundary of Wanzhou city in 2025. In order to get the ecological security pattern, we first combined the water land with the ecological protection redline; among them, the ecological protection redline was calculated by three results which were ecological sensitivity value, ecological service value and prohibiting development zones. Then, through reasonably selecting the potential factors about urban expansion, a Logistic driven evaluation system was constructed; meanwhile, a CA model which including controllable neighborhood influence and random influence was established to simulate the spatial form of urban expansion. Finally, the urban growth boundary in 2025 was determined after comprehensive evaluation. The results indicated that: (1) taking 2005 as the base period to simulate of urban land use of the study area in 2015, the total simulation accuracy was 96.80%, and the value of Kappa coefficient was 0.86. The model worked well. (2) The area within the scope of the simulated urban growth boundary in 2025 was 166.79 km<sup>2</sup>, which was accounted for 15.32% of the total study area. The simulation results provide quantitative support for urban spatial planning, and ensure the sustainability of urban expansion. This study provides some reference value for delineating the urban growth boundary of mountains cities, which are along with sensitive ecological environment and limited urban land.

**Key words:** urban growth boundary; CA model; ecological security; mountainous city