

基于生态敏感性评价的城市用地扩张模拟研究

彭宏杰^{1,2,3} 花磊^{1,2,3} 张雪松^{1,2,3} 李建豪^{1,2,3}

袁绪英^{1,2,3} 吴宜进^{1,2,3} 田云聪⁴¹

(1. 华中师范大学 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430079;

2. 华中师范大学 城市与环境科学学院, 湖北 武汉 430079;

3. 华中师范大学 地理科学实验教学中心, 湖北 武汉 430079;

4. 中国地质大学(武汉)经济管理学院, 湖北 武汉 430074)

【摘要】: 开展城市扩张模拟研究为优化国土空间规划、践行绿色发展理念具有重要作用。以生态敏感性为基础, 在 RS 与 GIS 技术的支持下, 从水土流失、生境、地质灾害和水资源 4 个方面进行敏感性分析, 并对研究区开展生态综合敏感性研究, 同时基于 CA-Markov 模型和武汉市 3 期土地利用数据对该区域 2025 年城镇用地进行模拟预测。研究成果: 武汉市生态综合敏感性中, 高度敏感和极度敏感区域面积占到研究区的 32.52%。基于 CA-Markov 模型预测出 2025 年武汉市城镇用地面积将达到 1845.00km²; 在尊重自然的前提下, 通过与生态敏感性极敏感区域叠加, 最终将武汉市建设用地面积调整为 1784.16km², 并划分出武汉市未来城镇建设用地的边界。从绿色发展的角度出发, 引导城市合理有序的扩张, 保障社会经济和生态文明的和谐稳定发展。

【关键词】: CA-Markov 模型 城市扩张 生态敏感性 绿色发展

【中图分类号】: P204 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)01-0083-10

伴随着我国城镇化速度不断加快, 改革开放初期我国的城镇化率为 17.94%, 截止到 2018 年增加到 58.52%^[1]。近年来, 城镇化发展过快导致一些问题越来越凸显, 如建设用地的无序开发、生态功能的不断退化、人地矛盾的不断加剧等^[2]。这些问题给我国生态安全带来了极大的威胁, 同时影响着区域间社会经济可持续发展。为实现区域可持续发展和推进生态文明建设, 对城镇开发进行预测与模拟具有重要的意义。

中国作为世界上最大的发展中国家, 中国城镇用地扩张受到国内外研究者们的关注。李进涛等^[3]运用定量与定性相结合的办法对 1985~2015 年京津冀地区 13 个城市的建设用地进行研究, 分析出城镇时空扩张演化过程当中的主导驱动因子从而对城市

作者简介: 彭宏杰(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为国土空间规划与国土资源评价. E-mail: peng199612170018@163.com; 袁绪英 E-mail: yuanxuying2000@yahoo.com.cn

基金项目: 典型景观水体中异味污染的成因机制研究(31300394); 国家自然科学基金(31300394); 嘉陵江上中游国家重点防治区水土流失动态监测遥感解译技术服务项目(SK02252017-1942)

发展开展功能定位。程铭等^[4]从人口、产业结构、土地类型和宏观经济 4 个方面对沈阳市 3 个时间阶段的建设用地扩展进行分析,得出影响建设用地扩张的作用的机理和因素。刘纪远等^[5]以主体功能区规划为指导,对我国东部、中部、西部和东北部 4 大主体功能区的城乡建设用地扩张进行差异性对比。严冬等^[6]以山区地形和地质灾害等为城镇扩张的限制因素,运用 Dyna-CLUE 改进模型并结合 SD 模型对山区城镇用地扩张进行情景模拟。段学军等^[7]通过对南通市 5 个时间节点的遥感影像进行解译得到建设用地数据,分析出城镇扩张的变化规律和特征。另外还有很多研究学者对城镇用地扩张进行分析及模拟^[8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19]。这类文章主要研究某些要素对城市扩张的影响程度的大小,在一定程度上确实对城市扩张模拟提供研究基础,但是仍然存在局限性。(1)研究主要考虑的是从社会经济和生态环境单一方面对城镇用地的影响,把两者相互结合的分析不多。(2)在对城市扩张的研究当中,从生态敏感性角度入手的较少。而从生态敏感性方面能够划分出生态敏感区更好地对城市未来的发展方向进行合理的规划。(3)近年来武汉市作为新的一线城市,其城镇化速度和经济发展水平不断加快,但环境污染和生态破坏等问题比较突出。然而,通过梳理相关文献发现,武汉地区城市扩张对生态破坏的研究较少。因此,本研究针对武汉市生态敏感性和城市扩张进行分析,以推进国土空间合理规划和加快生态文明建设,并为同类研究提供技术支撑。

综上所述,本文基于 RS 和 GIS 技术及 CA-Markov 模型,对武汉市生态敏感性和土地适宜性进行分析,并对研究区未来的城市扩张进行模拟,从而采取相应的针对措施,最终实现武汉市人与自然可持续发展的目的。

1 研究区概况及数据来源

武汉市位于湖北省的东部、长江流域的中游部分^[26],地理坐标范围介于 29° 58' N~31° 22' N, 113° 41' E~115° 05' E 之间。据统计,武汉市包括 13 个行政区,面积约为 8569.15km²(图 1),武汉市淡水资源极为丰富,水域面积达到 2217.6km²。武汉市海拔高度介于 10~831m 之间,高海拔地区主要集中在武汉市的西北部。截止到 2019 年末,武汉市共有常住人口 1221.57 万人,当中城镇常住人口为 902.45 万人,城镇化率约为 80.49%。

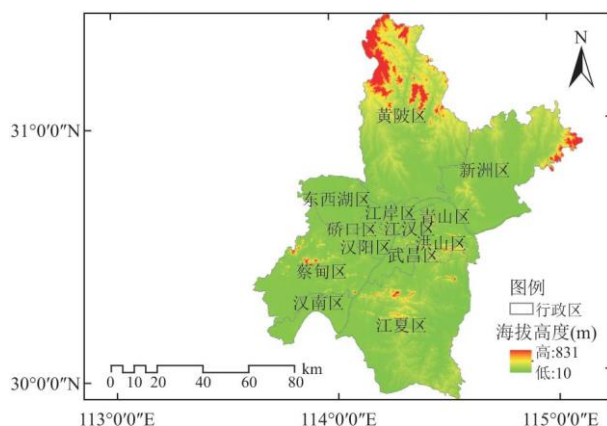


图 1 武汉市地理位置

本研究当中使用的数据主要有武汉市 2010、2015、2020 年 3 个时段的土地利用数据(LUCC)、数字高程数据(DEM)、植被覆盖指数(NDVI)、气象数据、土壤类型、道路、水系和公园点位及地质灾害等数据。数据主要来源于 USGS 平台、地理空间数据云、资源环境数据云、中国气象科学平台及武汉市统计年鉴。土地利用数据主要是自然资源部所提供的 2020 年的 30m 武汉市土地利用现状图,2010 和 2015 年的土地利用数据是通过 ENVI5.3 和 ArcGIS10.2 等软件对该年武汉市多光谱遥感影像进行几何校正、大气校正、波段融合等处理得到,数据判读精度高于 88%;坡度、海拔等数据通过数字高程数据计算得出;气象数据通过武汉市周围 12 个气象站点采用反距离插值法(IDW)得到研究区栅格数据;地质灾害数据根据武汉市政府发布的易发生灾害点位,利用 ArcGIS 软件当中的多缓冲区工具得到^[27,29]。

在 ArcGIS10.2 平台支持下,将得到的所有数据投影到 WGS_1984_UTM_ZONE_49N 坐标系统上,将所有数据转化为栅格数据并按 30m×30m 的像元进行重采样处理,使得数据保持一致性。

2 研究方法

本文借助 RS 和 GIS 技术的基础上,根据武汉市自然环境、交通条件、用地类型等因素,对研究区开展生态敏感性评价和城镇用地扩张模拟。其中生态敏感性评价分别选取水土流失、生境、地质灾害和水资源 4 种生态环境敏感性构建评价体系;城镇用地扩张模拟主要选择土地利用类型、公园 POI、地形地貌等因子,基于 2020 年土地利用类型和土地适宜性评价来对 2025 年武汉市城市扩张进行预测。

2.1 生态敏感性评价

生态敏感性是指生态系统在受到人为因素和自然灾害作用下,出现生态环境问题的概率大小^[20]。评价指标的选取对生态敏感性评价极其重要。本文主要根据武汉市生态环境条件,并参考《生态保护红线划定指南》(2017)^[21],选取水土流失、生境、地质灾害和水资源 4 种敏感性^[22]作为其指标层,指标因子主要有降雨侵蚀力、土壤类型、土地利用类型、距道路距离、植被覆盖度、海拔、坡度、地质灾害因素、距水系距离。依据不同指标因子对武汉市生态系统的影响程度,划分出敏感程度和指标权重(表 1)。

表 1 生态敏感性评价指标体系

指标层	权重	指标因子	权重	敏感程度				
				不敏感	低度敏感	中度敏感	高度敏感	极度敏感
水土流失 敏感性	0.455	降雨侵蚀力	0.143	<25	25~100	100~400	400~600	>600
		土壤类型	0.148					
		土地利用类型	0.164	水稻土、岩石河流	石灰土、草甸土、建设用地	暗棕壤、黄褐土、耕地	黄壤和黄棕壤林地、草地	紫色土未利用地
生境敏感性	0.208	距道路距离(m)	0.048	<500	500~1000	1000~1500	1500~2000	>2000
		植被覆盖度	0.087	<0.16	0.16~0.28	0.28~0.39	0.39~0.49	>0.49
		海拔高度(m)	0.073	<30	30~120	120~270	270~460	>460
地质灾害 敏感性	0.186	坡度(°)	0.069	<5	5~10	10~15	15~30	>30
		地质灾害易发生区	0.117	不易发区	低发生区	中发生区	—	高发生区
水资源 敏感性	0.151	距河流水系距离(m)	0.151	>1200	800~1200	400~800	200~400	<200

对上述 9 个指标因子权重选取主要运用 AHP 层次分析法^[23],利用判断矩阵算出其一致性指标结果 CR=0.08,其值小于 0.1,通

过验证，即确定出以上因子的权重值。最后，通过 ArcGIS 当中的栅格计算器功能得出生态敏感性综合图，运用自然断点分级法 (Jenks) 划分出不同敏感类型区域。

2.2 城市扩张模拟

土地适宜性是指针对某块土地对其使用用途的适宜程度^[24]。开展土地适宜性评价能够优化土地资源结构，同时是实现国土空间合理布局的关键^[28,30]。本文将对武汉市城镇用地进行适宜性评价，划分出不同类型适宜性的建设用地，从而为武汉市城镇扩张提供驱动机制的基础。城镇建设用地适宜性评价主要选取水体距离、坡度、道路、旅游景点等 7 个因素。根据不同因素的影响程度不同，划分出权重和适宜程度区间 (表 2)。

表 2 建设用地适宜性评价指标体系

指标因子	权重	适宜程度				
		不适宜	低度适宜	中度适宜	高度适宜	极度适宜
土地利用类型.	0.14	水源	耕地、林地	城镇用地	草地	未利用地
距水体距离 (m)	0.14	<200	>800	600~800	400~600	200~400
坡度 (°)	0.17	>25	20~25	15~20	8~15	<8
距道路距离 (m)	0.16	>1000	400~1000	200~400	100~200	<100
距公园距离 (m)	0.12	>1200	800~1200	400~800	200~400	<200
海拔高度 (m)	0.11	>400	200~400	150~200	100~150	<100
距地铁站距离 (m)	0.16	>1600	1200~1600	800~1200	400~800	<400

以上因子权重主要运用 AHP 层次分析法算出，通过 7 个指标因子栅格图层的叠加得出综合适宜性栅格图，运用自然断点法得出武汉市城镇用地适宜性栅格图 (图 2)，并划分出不同等级的适宜性区域。

本文城市扩张模拟研究是基于多准则 (MCE) 评估、Markov 链和元胞自动机 (CA) 构成，三者结合能够科学合理模拟出武汉市城镇建设用地扩张的变化。基于多准则评估对研究区进行城镇用地适宜性评价，适宜性较高的栅格更易成为未来城镇用地的发展方向，运用 CA-Markov 模型对下一时间节点的城镇用地进行模拟预测，预测公式如下^[8,13]：

$$S_{t+1}=f (S_t, C \cup P_t) \tag{1}$$

$$P_t = f (D \{ N \}) \tag{2}$$

上述公式中：S_{t+1}、S_t 为在 t+1 和 t 时间段元胞的状态；f 为转换规则；C 为元胞的领域；P_t 是指在 t 时间内，依据土地适宜性评价结果，研究区土地易成为城镇用地的概率；D {N} 是基于交通条件、地形、土地利用类型等因素的城镇建设用地适宜性。土地利用类型代表着不同元胞的状态，本文为了在 ArcGIS 中运算方便将元胞的状态代表着不同地块类型，其地块类型有：耕地、林地、草地、水域、城镇用地和未利用地，并表示到数字集合中为 N={1, 2, 3, 4, 5, 6}。

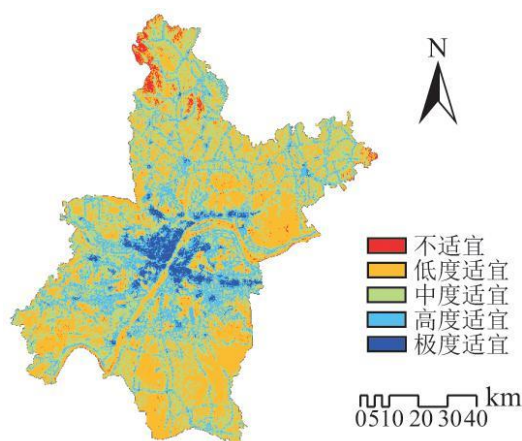


图 2 城镇建设用地适宜性空间分布

3 结果与分析

3.1 生态敏感性分析

(1) 水土流失敏感性

水土流失是指水土自然资源和土地生产力遭到严重的破坏以及本身受到损失的现象^[31]。据统计, 2018 年武汉市水土流失面积占其总面积的 11.22%, 因此对武汉市开展水土流失敏感性评价是极其重要的。水土流失敏感性图主要选取降雨侵蚀力、土壤类型和土地利用类型 3 个因子进行评价体系的构建, 如图 3 所示武汉市水土流失敏感性主要以高度敏感为主, 占比为 28.87%。高度敏感区域主要分布在黄陂区和江夏区, 主要原因是因为这部分区域黄壤、黄棕壤较多, 水土流失敏感性受土壤母质的影响较大。

(2) 生境敏感性

生境称为生物栖息地, 其是由动植物和非生物综合构成的生态系统^[32]。生态环境作为动植物生长的重要场所, 对研究区展开生境敏感性研究能够识别出敏感地区, 从而对生物采取保护措施。基于前人^[22]的研究成果, 生境敏感性选取道路距离、植被覆盖度和海拔高度因子。武汉市生境敏感性(图 3)主要以中度敏感和高度敏感为主, 二者占到研究区面积的 65.53%, 极度敏感区主要在黄陂区的北部, 导致极敏感的原因是这部分地区海拔较高、植被覆盖度占比高等。

(3) 地质灾害敏感性

武汉市部分地区由于地势险峻、地质环境复杂等原因, 容易发生山体滑坡、崩塌和岩溶地面塌陷等地质灾害, 所以对武汉市开展地质灾害敏感性评价是有必要的^[33]。地质灾害敏感性选择坡度及地质灾害易发生区 2 个指标得出。研究区地质灾害敏感性(图 3)主要表现出不敏感, 占武汉市的 79.96%, 其中较为敏感区主要分布在黄陂区的北部, 主要受到降雨、地形等自然因素的影响。

(4) 水资源敏感性

武汉市作为滨江滨湖特色的宜居城市, 同时地处长江中游, 其水环境的安全影响着整个长江经济带的发展, 对武汉市进行水

资源敏感性评价具有重要的意义。水资源敏感性主要通过对武汉市重要河流进行欧式距离分析得到，并划分出不同敏感区从而对武汉市水资源敏感性进行研究。武汉市水资源敏感性(图 3)呈现出极敏感的状态，其极敏感区域占到研究区国土面积的 49.69%，原因是武汉市的湖泊较多，湖泊总数达到了 200 个，水资源敏感性对研究区的影响较大。

(5) 综合生态敏感性评价

综合生态敏感性是指对上述 4 种敏感性进行加权叠加得出武汉市的综合生态敏感性空间分布图(图 3)。依据木桶原理，武汉市生态敏感程度由其最敏感的单因子敏感性指标所决定。通过分析，对研究区影响最大的指标层为水土流失，其次是生境，再次是地质灾害，水资源相对影响最小。

从生态敏感性综合分析结果中，武汉市生态综合敏感性主要表现为中度敏感和不敏感，二者之和占到研究区的 56.77%，高度敏感区占 22.42%，极度敏感区为 10.10%。通过生态敏感性综合图(图 3)对比，武汉市的中心城区整体表现出不敏感和轻度敏感的特征，如武昌区、硚口区、江汉区、江岸区和青山区等；中度敏感区域主要在东西湖区、蔡甸区中部和黄陂区东南部等；高敏感和极敏感区域主要在新洲区、江夏区东南部、黄陂区西北部和蔡甸区的西南部等。针对武汉市不同敏感程度的区域将提出相应对策：(1)不敏感和低度敏感区域，这部分地区不易受到生态问题的干扰，可以开展生态农业集约化，从而提升此区域的生态环境功能。(2)中度敏感区域，该区域生态环境良好，其对高度敏感区生态系统起到极其重要的保障功能，因此，区域中应该多开展生态保护的活动，从而优化区域内森林、草地和河流等生态保护系统。(3)高度敏感和极敏感区域，此区域具有植被覆盖率高、生态系统类型具有多样化和空间异质化等特征，导致在受到一定外界干扰活动的反应尤为敏感。因此针对这部分区域应当践行“共抓大保护，不搞大开发”的绿色发展理念^[25]。

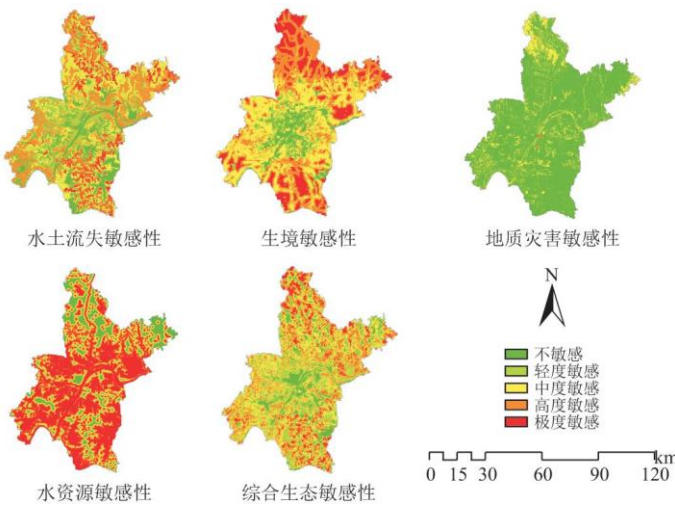


图 3 武汉市生态敏感性评价结果

3.2 城市扩张程度分析

武汉市建设用地适宜性占比最高的为中度适宜，占到 39.04%(表 3)，高度适宜和极度适宜之和占到研究区的 24.07%，集中在武汉市中心城区、黄陂区的南部、江夏区的西北部、蔡甸区的东北部等(图 2)。

表 3 建设用地适宜性综合分析结果表

适宜性类型	不适宜	轻度适宜	中度适宜	高度适宜	极度适宜
面积(km ²)	136.97	3024.78	3345.01	1735.29	327.11
占比(%)	1.60	35.29	39.04	20.25	3.82

本文以武汉市 2010、2015 年 2 个时段的土地利用数据对 2020 年城镇用地进行扩张预测模拟研究,选取的指标主要有土地利用类型、水体距离、道路距离和公园距离等驱动因子,利用 MCE 获取每个指标的栅格图,并进行处理得到武汉市土地利用模拟数据,将训练好的 CA-Markov 模型对武汉市 2020 年土地利用进行城市模拟预测。在 IDRISI 中运用 CrossTab 工具,用模拟好的城镇建设用地与实际 2020 年武汉市城镇建设用地进行精度检验,计算得到的 Kappa 系数约为 0.81,表明整体模拟精度较为良好,能够进行下一步的预测模拟,从而利用训练好的样本对武汉市 2025 年城镇扩张进行预测。

通过 CA-Markov 模型模拟出武汉市 2025 年的土地利用图(图 4),武汉市 2025 年城镇用地面积约为 1845.00km²。从 2010~2025 土地利用类型面积统计图(图 5)可以看出,2010~2015 年,武汉市耕地、林地和草地面积逐渐减少,同时城镇用地急剧增长;2015~2020 年,武汉市水域面积减少 517.22km²,耕地、草地和建设用地面积分别增加了 27.59、138.45 和 370.25km²。2020~2025 年,武汉市耕地面积减少 373.04km²,伴随着耕地面积的减少,城镇用地面积增长 309.91km²。从整体来看,2010~2015 年武汉市的城镇用地面积增长较快,其主要的发展方向为武汉市的中心城区,呈现出单一核心的城市扩张模式。在 2015~2020 年和 2020~2025 年,由于受到自然条件和政府政策的影响^[34, 35, 36],武汉市城市扩张则由原来的单一核心扩张模式转变为跳跃式和边缘式的城镇扩张。从上述现象可以了解到,随着时间的推移,武汉市城市用地面积越来越紧凑,城镇开发越来越注重土地利用空间规划的合理性。

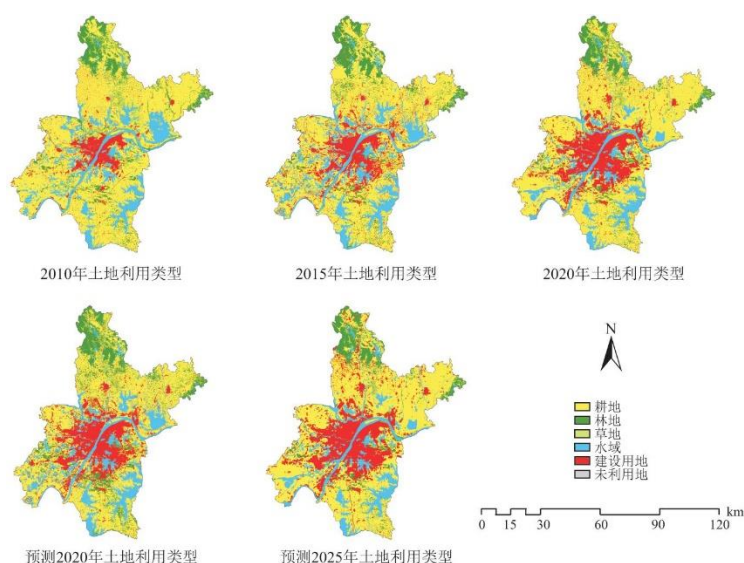


图 4 武汉市土地利用模拟结果

将武汉市 2025 年土地利用模拟与综合生态敏感性的结果进行叠加,发现城镇用地与生态敏感性极敏感的区域有部分重叠,重叠面积为 60.64km²,高度敏感区域与城镇用地面积重叠面积较大,约为 233.71km²,为了更好践行“共抓大保护,不搞大开发”的绿色发展战略,应对极度敏感区域与城镇用地重合部分进行剔除,从而使得武汉市达到区域间可持续发展。最终得到调整后 2025 年武汉市功能区布局图(图 6),确定武汉市城镇用地面积约为 1784.16km²,占总面积的 20.82%。对调整后的城镇用地进行提取,对范围较小的斑点剔除,得到城镇建设用地范围图(图 6),最后对其进行面转线处理得到城市开发边界图(图 6)。依据《武汉

市土地利用总体规划(2006~2020年)》^[18]和武汉市城市总体规划(2017~2035年)^[19]中提到未来武汉市城镇化格局呈现出多中心化,蔡甸区、黄陂区和新洲区等新城区将会出现分散式发展,这与本文所模拟出来未来武汉市的城镇化趋势基本一致。武汉市作为长江经济带的重要城市,又由于“两江交汇,三镇鼎立,用地分散;山水相交,生态敏感,布局受限”的土地资源特点,应以自然生态资源为基础,着力构建“两轴七带、三环六楔、六心十片、两网交融”的综合生态网络体系,选择“以主城为核,多卫星城”的开放式发展模式,有效处理好城市发展与保护资源之间的关系,维护和改善武汉市生态安全格局。总体而言,模拟后的建设用地扩张方向与武汉市未来的发展规划大致相同,本文结合生态敏感性和城镇建设用地适宜性评价对武汉市未来城市用地扩张进行了科学合理的模拟。

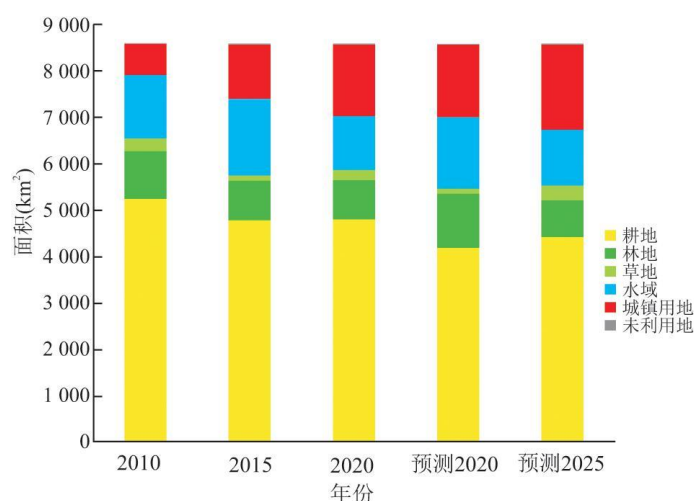


图5 武汉市土地利用类型面积统计

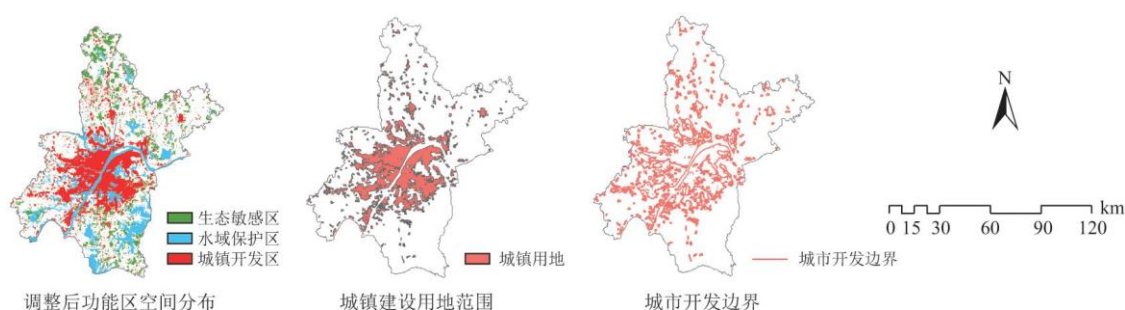


图6 模拟后武汉市2025年城市开发边界

4 结论与讨论

武汉市作为我国中部地区的中心城市,其城市扩张具有典型代表性。本研究基于综合生态敏感性分析,运用CA-Markov模型对未来武汉市的城市扩张进行模拟,从而为实现人与自然可持续发展提供可行性方案^[37, 38, 39]。本文体现出“生态优先、绿色发展”的理念,在保护自然的前提下,实现社会经济最大化,并协调好生态保护和城市扩张之间的关系。与前人^[2, 7, 20]的研究相比,本研究创新性的提出把生态敏感性和城市扩张模拟相互结合,从而凸显出二者在未来国土空间规划中的重要性。本研究表明:(1)在生态综合敏感性评价中,武汉市高度敏感和极敏感区域总面积为2787.03km²,占到研究区总面积的32.52%。(2)通过运用元胞自动机模型模拟出武汉市2025年土地利用栅格图,发现武汉市城镇用地面积达到1845.00km²,但由于部分城镇用地对生态敏感性较高的区域构成威胁,因此调整城镇用地面积,最终调整为1784.16km²,占到研究区总面积的20.82%。(3)结合生态敏感性评价

和基于 CA-Markov 模型对城市扩张模拟能够更科学合理地指导武汉市的用地空间规划,保护生态用地和划定出城镇开发的范围。在尊重自然的前提下,减少城市发展当中的盲目扩张、引导城市经济社会稳定发展提供可行性方案。

绿色发展理念是区域内实现社会经济可持续发展和推进生态文明建设的重要理论基础,运用生态敏感性评价与城市扩张模拟相结合能够为践行绿色发展提供量化的手段^[40]。在未来城镇用地开发中不能进行盲目扩张,要注重人与自然和谐发展,既要保护生态安全,也要为城市的社会经济的发展保留必要的空间^[41]。随着城镇化的不断推进,如何优化国土空间规划布局将会成为重中之重。因此,针对未来生态空间和城镇开发界限,需要结合更高精度的土地利用数据及统筹各项政府政策进行动态调整,从而协调好区域内自然环境和社会经济发展之间的关系,为践行绿色发展战略做出重要贡献。

参考文献:

- [1]张林. 专家热议中国城市发展 40 年城镇化从速度向深度转变[N]. 经济日报, 2018-06-27(8).
- [2]田恬, 谷达华, 郑财贵, 等. 基于土地资源限制性等级的重庆市建设用地开发适宜性评价[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11):26-34.
- [3]李进涛, 刘彦随, 杨园园, 等. 1985~2015 年京津冀地区城市建设用地时空演变特征及驱动因素研究[J]. 地理研究, 2018, 37(1):37-52.
- [4]程铭, 肖寒, 荀文会. 1999~2015 年沈阳市建设用地规模扩张影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(7):146-152.
- [5]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.
- [6]严冬, 李爱农, 南希, 等. 基于 Dyna-CLUE 改进模型和 SD 模型耦合的山区城镇用地情景模拟研究——以岷江上游地区为例[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(4):514-525.
- [7]段学军, 卢雨田, 李慧, 等. 南通市城镇建设用地扩展时空特征分析及模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2):104-110.
- [8]黎夏, 叶嘉安. 约束性单元自动演化 CA 模型及可持续城市发展形态的模拟[J]. 地理学报, 1999(4):3-12.
- [9]黎夏, 叶嘉安. 基于元胞自动机的城市发展密度模拟[J]. 地理科学, 2006(2):2165-2172.
- [10]吕添贵, 吴次芳, 李洪义, 等. 人口城镇化与土地城镇化协调性测度及优化——以南昌市为例[J]. 地理科学, 2016, 36(2):239-246.
- [11]李骞国, 王录仓, 严翠霞, 等. 基于生境质量的绿洲城镇空间扩展模拟研究——以黑河中游地区为例[J]. 生态学报, 2020, 40(9):2920-2931.
- [12]刘焱序, 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.

-
- [13]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.
- [14]薛贝,张红旗,刘长星,等.贵州六盘水市土地利用动态模拟研究[J].山地学报,2018,36(1):132-142.
- [15]刘勇,吴次芳,岳文泽,等.基于 SLEUTH 模型的杭州市城市扩展研究[J].自然资源学报,2008(5):797-807.
- [16]孙泽祥,刘志锋,何春阳,等.中国北方干燥地城市扩展过程对生态系统服务的影响——以呼和浩特-包头-鄂尔多斯城市群地区为例[J].自然资源学报,2017,32(10):1691-1704.
- [17]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.
- [18]武汉市自然资源和规划局.武汉市土地利用总体规划(2006~2020 年)[EB/OL].http://zrzyhgh.wuhan.gov.cn/zwgk_18/fdzdgk/ghjh/zzqgh/202001/t20200107_602862.shtml.
- [19]武汉市自然资源和规划局.武汉市城市总体规划(2017~2035 年)[EB/OL].http://zrzyhgh.wuhan.gov.cn/zwdt/gzdt/202001/t20200107_609312.shtml.
- [20]欧阳志云,王效科,苗鸿,中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[C].中国科协 2001 年学术年会,中国吉林长春,2001.
- [21]国家发展改革委.国家生态保护红线划定指南[Z],2017.
- [22]李月臣,刘春霞,汪洋,等.重庆市生境敏感性评价研究[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2009,26(1):30-34.
- [23]许树柏.层次分析法原理[M].天津出版社,1986
- [24]冯祥瑞,陈竹安,危小建,等.南昌市建设用地区适宜性扩展路径研究[J].测绘通报,2019(12):116-121.
- [25]夏函,张万顺,马蒙越,等.服务于“生态优先绿色发展”的生态承载能力监控预警机制研究[J].环境保护,2019,47(18):39-47.
- [26]杨建新,龚健,高静,等.国家中心城市土地利用变化稳定性和系统性特征——以武汉市为例[J].资源科学,2019,41(4):701-716.
- [27]潘方杰,王宏志,宋明洁,等.基于 GIS 的国家重点生态功能区生态空间识别研究——以湖北长阳县为例[J].华中师范大学学报(自然科学版),2020,54(4):658-669.
- [28]陈蕾,郭熙,韩逸,等.基于 BRT 模型的南昌市城市扩展时空特征及驱动因素研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(2):322-333.
- [29]李建军,苏志珠,王言荣.基于 GIS 的万荣县生态敏感性评价与区划[J].中国农业资源与区划,2014,35(5):48-54.

-
- [30]徐秋蓉, 郑新奇. 一种基于地理探测器的城镇扩展影响机理分析法[J]. 测绘学报, 2015, 44(S1):96-101. 2015, 44(S1):96-101.
- [31]屈赛, 林爱文, 黎斌, 等. 基于生态敏感性的庐山区生态旅游用地策略[J]. 生态科学, 2018, 37(1):164-170.
- [32]刘春霞, 李月臣, 杨华, 等. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价[J]. 地理学报, 2011, 66(5):631-642.
- [33]DING Q, SHI X, ZHUANG D F, et al. Temporal and spatial distributions of ecological vulnerability under the influence of natural and anthropogenic factors in an Eco-province under construction in China[J]. Sustainability, 2018, 10(9).
- [34]关兴良, 胡仕林, 蔺雪芹, 等. 武汉城市群城镇用地扩展的动态模式及其驱动机制[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11):1493-1501.
- [35]秦鹏, 董玉祥, 李裕梨. 广州市城镇用地扩展及预测分析[J]. 资源科学, 2012, 34(10):1881-1890.
- [36]花磊, 彭宏杰, 杨秀锋, 等. 基于腾讯位置大数据的长江经济带人口流动空间分析[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2019, 53(5):815-820.
- [37]金浩然, 马萍萍, 戚伟, 等. 城市规划和土地规划对城市建设用地扩张的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(7):22-27.
- [38]易丹, 赵小敏, 郭熙, 等. 基于生态敏感性评价和 CA-Markov 模拟的平原型城市开发边界划定——以南昌市为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(1):208-218.
- [39]XU Z H, FAN W G, WEI H J, et al. Evaluation and simulation of the impact of land use change on ecosystem services based on a carbon flow model: A case study of the Manas River Basin of Xinjiang, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 652:117-133.
- [40]WANG C D, WANG Y T, WANG R Q, et al. Modeling and evaluating land-use/land-cover change for urban planning and sustainability: A case study of Dongying city, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172:1529-1534.
- [41]MOHAMMAD REZA MANSOURI DANESHVAR, GHAZALEH RABBANI, SUSAN SHIRVANI. Correction to: Assessment of urban sprawl effects on regional climate change using a hybrid model of factor analysis and analytical network process in the Mashhad city, Iran[J]. Environment Systems Research, 2019, 8(1):1-1.