

郑州市土地利用/覆被变化与生境质量的时空演变及情景预测

徐梦菲, 孙一帆, 汪霞

(郑州大学 建筑学院, 河南 郑州 450000)

摘要: [目的] 探究郑州市土地利用格局和生境质量时空演变特征并预测未来发展趋势,为区域生态保护实践和可持续发展提供理论参考。[方法] 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型,同时结合 ArcGIS 空间分析及地理信息图谱法,分析 2000—2020 年郑州市土地利用变化情况,并模拟 2030 年基准情景和生态保护情景下的空间分布格局,探究郑州市生境质量时空演变规律和像元尺度下的迁移状态。[结果] ①2000—2020 年,耕地和建设用地位于郑州市主要景观类型,20 年间,建设用地面积激增,涨幅 15.76%,主要来源于耕地; ②PLUS 模型对郑州市土地利用模拟具有适用性,相较于基准情景,2030 年生态保护情景下建设用地扩张受限,生态用地总量上升,该情景可为研究区推进生态建设提供参考; ③2000—2020 年生境质量不断退化,空间分布差异显著,高生境质量区始终位于巩义市和登封市,低和较低等级的图谱单元相互转移最频繁; ④2030 年延续“西高东低”格局,生态保护情景下生境质量呈“低值减少,高值增多”的特征,向较高和高等级转移率升至 14.44%,与基准情景相比表现出稳中向好的发展趋势。[结论] 郑州市生境质量时空分布与土地利用变化密切相关,未来应注重国土空间结构的合理布局,增强土地利用效率,提升生态系统质量和稳定性。

关键词: 土地利用变化; 生境质量; PLUS 模型; InVEST 模型; 图谱特征; 郑州市

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2024)02-0364-14 **中图分类号:** X321, TU984.115, F301.2

文献参数: 徐梦菲, 孙一帆, 汪霞.郑州市土地利用/覆被变化与生境质量的时空演变及情景预测[J].水土保持通报, 2024, 44(2): 364-377. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.037; Xu Mengfei, Sun Yifan, Wang Xia. Spatiotemporal evolution and scenario prediction of land-use/land-cover changes and habitat quality in Zhengzhou City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 364-377.

Spatiotemporal Evolution and Scenario Prediction of Land-use/ Land-cover Changes and Habitat Quality in Zhengzhou City

Xu Mengfei, Sun Yifan, Wang Xia

(School of Architecture, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: [Objective] The spatial and temporal evolution characteristics of land use patterns and habitat quality in Zhengzhou City were determined and future development trends were predicted in order to provide a theoretical reference for regional ecological conservation practices and sustainable development. [Methods] The PLUS model and InVEST model were combined with ArcGIS spatial analysis and the geo-spectrum information method to analyze land use changes in Zhengzhou City from 2000 to 2020, and to simulate the spatial distribution pattern under a baseline scenario and an ecological protection scenario in 2030. The spatial and temporal evolution laws of habitat quality and the migration status were then determined at the pixel scale. [Results] ① From 2000 to 2020, cultivated land and construction land were the main land use types in Zhengzhou City. Over the past 20 years, the area of construction land increased sharply by 15.76%, coming mainly from cultivated land. ② The PLUS model was applicable in Zhengzhou City. Compared with the

收稿日期: 2023-09-01

修回日期: 2024-01-22

资助项目: 河南省科技攻关项目“韧性城市理念下基于气候适应性的景观基础设施规划设计方法与技术研究”(182102210177); 河南省科技攻关项目“生态融城理念下的郑州都市圈生态安全网络构建与保障技术研究”(202102310256)

第一作者: 徐梦菲(1999—), 女(汉族), 河南省郑州市人, 硕士研究生, 研究方向为生态服务功能评估及城乡规划与设计。Email: xmf1023@gs.zzu.edu.cn.

通信作者: 汪霞(1974—), 女(汉族), 四川省简阳市人, 博士, 教授, 主要从事可持续发展城市规划理论与方法及景观生态规划等方面的研究。Email: wx1208@zzu.edu.cn.

baseline scenario, the expansion of construction land was limited, and the total amount of ecological land increased under the ecological protection scenario, which could provide a reference for promoting ecological construction in the study area. ③ Habitat quality degraded continuously, with significant spatial distribution differences, from 2000 to 2020. High habitat quality areas were consistently located in Gongyi and Dengfeng City, and low and medium-low map units transferred to each other most frequently. ④ In 2030, the pattern of “higher in the west and lower in the east” will continue. Under the ecological protection scenario, habitat quality was characterized by “decrease in low values and increase in high values”, and the transfer rate to the high and medium-high grades increased to 14.44%, showing a stable and positive development trend compared with the baseline scenario. [Conclusion] The spatial and temporal distribution of habitat quality in Zhengzhou City was closely related to land use changes. The study area should focus on the rational layout of national spatial structure, enhance the efficiency of land use, and improve the quality and stability of ecosystems in the future.

Keywords: land-use and land-cover change (LUCC); habitat quality; PLUS model; InVEST model; characteristics of geo-spectrum; Zhengzhou City

LUCC(土地利用/覆被变化)作为保障人类生存发展的重要生态系统组成部分及区域生态安全的关键因素^[1],成为当下全球环境变化的研究热点。生境质量指环境可以提供给个体和种群适宜生存和繁殖条件的潜力^[2],能够反映生态系统服务功能和水平。土地利用方式的转变通过影响景观斑块间物质能量的相互循环^[3],从而对生境质量格局、功能等方面造成影响。随着中国城市化进程加快,土地面临解构与重构的恶性循环,空间分布平衡性欠缺,生物多样性遭到破坏,城市生态系统愈发脆弱。因此,基于LUCC探究生境质量演变特征有利于协调区域土地资源管理^[4],对科学制定环境保护政策具有重要现实意义^[5]。

目前针对土地利用变化和生境质量评估的相关研究多集中在二者间的响应关系^[6]、生境质量演变与驱动分析^[7]、土地利用及生境质量的模拟预测^[8]、生态风险评估与生态安全格局构建等^[9-10]方面,土地利用变化已成为评估生境质量优劣的基础。研究对象多侧重于省域、流域、城市群、自然保护区、市域、区县等大中尺度,像元尺度生境质量空间变迁特征及转移轨迹方面鲜有涉及。研究方法上,LUCC多结合转移矩阵、动态度等特征参数^[11]进行相关计算分析。土地利用预测模型主要包括 CA-Markov 模型^[12]、FLUS 模型^[13]、CLUE-S 模型^[14]、Logistic 回归模型等,不足在于挖掘土地发展潜力和驱动因素的能力较弱;PLUS 模型^[15]是最新斑块级土地利用预测模型,对土地利用变化与潜在驱动因素之间的非线性关系具有更好的解释力。生境质量评价方法主要分为两种,一种是依托于野外实地调查,通过特定物种或栖息地变化确定其分布和特性并建立评估体系,由于数据收集的成本较高,因此适用于小尺度下为特定目标

服务的研究^[16];另一种则是利用遥感技术和空间分析手段,相关成果更契合于生态保护规划的迫切需求,现阶段更趋向于借助生态学模型对大中尺度生境质量的时空变化进行分析,如 SolVES 模型^[17]、InVEST模型等^[18]。相比之下,后者优点在于数据获取难度低,空间可视化能力更强。威胁因子的设定是基于 InVEST 模型评估生境质量的关键参数之一,已有研究大多将耕地、建设用地等人类活动频繁的地类设为胁迫因子,或将其细分为水田、旱地、工矿用地等二级类,但将道路线性因子纳入设置范畴中的研究相对较少。

郑州市作为河南省省会,是黄河流域生态保护和高质量发展的核心示范区,在维护生态景观稳定、保护生物多样性等方面具有重要作用。郑州城市能级大幅攀升的同时,大量生态用地被侵占,土地资源短缺、生态承载力不足成为制约郑州可持续发展的瓶颈,因此对未来土地利用发展规律的把握变得愈发迫切和重要。本文以郑州市为例,在土地利用数据的基础上,集合 ArcGIS 空间分析、PLUS 模型和 InVEST 模型,对土地利用和生境质量演化规律进行评估及多情景预测;依据变化图谱探究生境质量图谱单元的时空迁移特点,以期为区域生态保护规划和国土资源优化配置提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

郑州市位于河南省中部偏北(112°42′—114°13′E, 34°16′—34°58′N),地处嵩山东麓、黄河之滨,下辖6区,5市,1县。地势总体呈西南高、东北低,阶梯状下降的特征^[19],地貌类型多样,以山区、丘陵、台地、

平原为主;属北温带大陆性季风气候,四季分明,年均温 14.4 ℃,多年平均降水量 635.6 mm。郑州市河网水系发达,共有大小河流 124 条,分属黄河、淮河两大流域;拥有嵩山世界地质公园 1 处、郑州黄河国家湿地公园 1 处^[20]、省级及以上森林公园、自然保护区和风景名胜区分共 15 处,占据十分重要的生态地理区位。

1.2 数据来源

本文涉及数据包括基础地理信息数据、土地利用

数据、自然气象数据、社会经济数据及道路交通数据(表 1)。为符合后续模型运行要求,使用 ArcGIS 10.4 将数据在 WGS 84 投影坐标系下统一转换为分辨率 30 m×30 m 的 tif 格式并使行列号保持一致。土地利用数据选取 2000,2010 和 2020 年 3 期,结合实际并参照《土地利用现状分类(GB/T21010-2017)》对郑州市用地进行重分类。利用欧氏距离工具,生成社会经济和道路交通的可达性栅格数据。

表 1 数据来源信息

Table 1 Data source information

数据类型	数据名称	初始数据来源
基础地理信息数据	河南省行政境界	全国地理信息资源目录服务系统 (https://www.webmap.cn/)
	郑州市行政境界	
	与水域距离	
	与镇驻地距离	高德地图(https://lbs.amap.com/)
土地利用数据	中国多时期土地利用遥感监测数据集 (2000 年、2010 年、2020 年 3 期)	
社会经济数据	中国人口空间分布	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)
	中国 GDP 空间分布	
自然及气象数据	土壤类型空间分布	根据 DEM 提取
	年平均温度	
	年平均降水	
	数字高程(DEM)	
道路交通数据	坡度	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)
	与铁路距离	
	与高速公路距离	
	与高架及快速路距离	
	与主干道距离	
	与次干道距离	
	与支路距离	

1.3 研究方法

1.3.1 PLUS 模型 PLUS 模型是 Liang 等^[21]在 FLUS 模型的基础上开发的优化模型,集成土地扩张分析策略(LEAS)和基于多类随机斑块种子的 CA 模块(CARS),优势在于数据获取方面更便捷^[22],具有更高的计算效率和模拟精度。

(1) 邻域权重参数设置。邻域权重代表土地类型的扩张强度,取值范围 0~1,值越大说明扩张能力越强。由于土地利用驱动因子间关系极为复杂,一般根据前人经验及专家知识来确定参数值^[23],但该方法主观性较强。考虑到土地在历史过程中的演变特征是对其扩张能力的最好诠释^[24],通过历史客观规律设定邻域权重可有效规避主观因素影响。使用 Fragstats 4.2 计算 2000—2020 年斑块类型尺度上 TA(Total Area)变化量并进行极差标准化处理。耕地、林地、草地、水域和建设用地分别为 0.000,0.512,

0.507,0.559,1.000,由于实际任何土地都有扩张或转化的概率,故将耕地和建设用地参数值调整为 0.100,0.900。

(2) 土地利用多情景模拟设置。基于前人研究成果和区域实际设置模型运行场景,客观检验当下政策规划对土地利用变化导向的合理性。基准情景:延续历史变化规律,不对建设用地扩张进行约束且未涉及政府和市场干预。生态保护情景:在基准情景中融入生态保护因素,参考《全国生态功能区划》《全国生态环境保护纲要》,将具有水源涵养、土壤保持等生态系统服务功能的林地、草地和水域归为生态用地;结合《郑州市“十四五”生态环境保护规划》《郑州市“十四五”林业保护发展规划》中“扩水增湿、增加森林面积”等内容,将林地、水域作为限制转换区并减少其他地类对其侵占。转换成本矩阵详见表 2,其中 1,0 分别代表允许和限制转化。

表 2 不同模拟情景下转换成本矩阵

Table 2 Conversion matrix parameters under different simulation scenarios

项目	2030 年基准情景					2030 年生态保护情景				
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地
2020 年	耕地	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	林地	1	1	1	1	0	1	1	1	0
	草地	1	1	1	1	0	1	1	1	1
	水域	1	1	1	1	0	0	0	1	0
	建设用地	0	0	0	0	1	1	0	0	1

1.3.2 InVEST 模型

(1) 生境质量模块。InVEST 模型可用于评价生态系统服务功能及其经济价值,使用模型中生境质量(Habitat Quality)模块,对相关参数进行设置,在此基础上得到生境质量评价结果。具体计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (1)$$

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{\omega_r}{\sum_{r=1}^R \omega_r} \right) r_{xy} i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (2)$$

式中: Q_{xj} 、 D_{xj} 分别为土地利用类型 j 在斑块单元 x 处的生境质量和退化度^[25]; H_j 为地类 j 的生境适宜性指数^[26]; k 为半饱和参数,默认值 0.5; z 为模型尺度常数; R 为威胁因子数目; Y_r 、 ω_r 分别表示威胁因子 r 所占栅格数和权重; i_{rxy} 为栅格 y 中威胁因子 r 对栅格 x 的胁迫程度; β_x 为栅格 x 的可达性; S_{jr} 为地类 j 对威胁因子的敏感性。

(2) 运行参数设置。通常较为原始和大型连续的自然生态系统具有较高的适宜度和稳定性,而纯人工环境则不具备生境适宜性^[27]。《郑州市国土空间总体规划(2021—2035 年)》中大片林地、自然保护区等区域被划入生态保护红线,河流水系为重要生态廊道。因此将林地、水域、草地的生境适宜性分别设为 1.0、0.9 和 0.7,耕地为 0.5,建设用地为 0.0。在威胁因子的设置中,人类影响是主要考虑因素。耕地、建设用地作为人类活动密集区,生态干扰较强。郑州市既是全国普通铁路唯一的“双十字”中心,也是首个米字形高铁枢纽中心,多条国道及省道过境而过,交通枢纽地位显赫,道路交通对区域生境质量影响较大^[28]。综上,选取建设用地、耕地、高速公路、铁路为威胁因子,采用 ArcGIS 缓冲区分析设置线性要素的影响范围,根据 InVEST 使用手册^[29]推荐值并参考相关文献中的赋值^[30-32],最终确定具体参数(表 3—4)。

1.3.3 地理信息图谱法 地理信息图谱法可基于像元尺度定量表达研究对象的空间转化特征,核心在于信息重组和编码^[33]。以 30 m×30 m 栅格为空间地理单元,将生境质量评价结果的 5 种等级分别对应编

码 1~5,进行地图代数和叠加运算。计算公式为:

$$W = 10B + Q \quad (3)$$

式中: W 为生境质量图谱单元等级转化类型; B 、 Q 分别表示前后 2 期生境质量编码。由此可得郑州市各研究时段的生境质量变化图谱,探究像元尺度下区域生境质量时空迁移状态。

表 3 威胁因子最大影响距离及权重

Table 3 Maximum influence distance and weight of threat factors

威胁因子	最大影响距离/km	权重	空间衰退类型
耕地	4	0.6	Linear(线性)
建设用地	8	1.0	Exponential(指数)
高速公路	6	0.6	Linear(线性)
铁路	5	0.5	Linear(线性)

表 4 不同地类的生境适宜度和对威胁因子的敏感度

Table 4 Habitat suitability and sensitivity to threat factors of different land types

土地利用类型	生境适宜度	威胁因子			
		耕地	建设用地	高速公路	铁路
耕地	0.5	0.0	0.7	0.3	0.3
林地	1.0	0.7	0.8	0.9	0.8
草地	0.7	0.5	0.6	0.7	0.7
水域	0.9	0.6	0.8	0.6	0.5
建设用地	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

2 结果与分析

2.1 土地利用时空变化及模拟预测

2.1.1 郑州市 2000—2020 年土地利用演变特征 郑州市 2000—2020 年土地利用格局如图 1 所示。耕地和建设用地为主要景观类型,所占比例超 75%,林地和草地次之。耕地广泛分布在郑州市中部和东部地区,由于地势西高东低,因此较为缓和的平原更适合农业耕种;林地和草地集中于西部及南部山区并伴随林草交错的特点,包括巩义市、登封市和新密市;水域呈线状分布于北部,主要为部分水库、黄河及淮河支流;建设用地集中在东北部主城区,呈现显著扩张趋势,对其他地类侵占的现象严重。

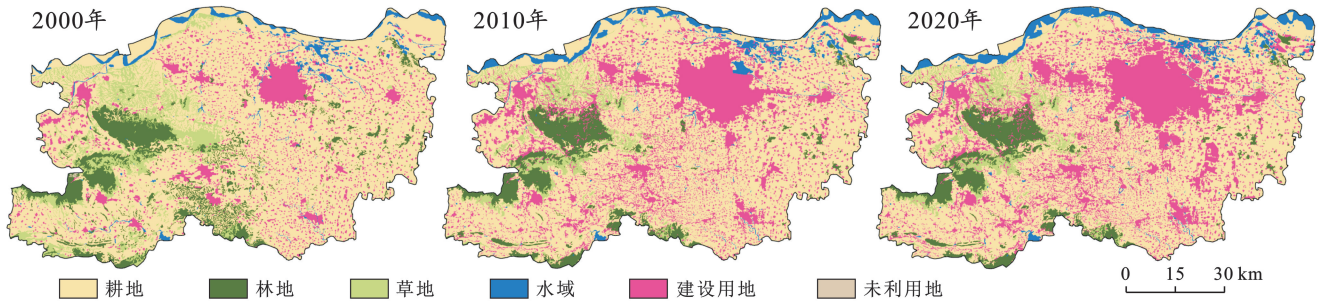


图 1 2000—2020 年郑州市土地利用空间分布

Fig.1 Spatial distribution of land use in Zhengzhou City during 2000—2020

2000—2020 年耕地呈负向变化趋势,由 5 080.27 km² 减少到 4 271.54 km²,降幅 10.66%;林地、草地面积持续下降,分别减少 200.99 km²,298.27 km²;水域和建设用分别增幅 1.53%,15.76%。通过土地利用转移矩阵(表 5—6)可看出,耕地和建设用相互转移量最大,2000—2010 年耕地共转出 1 101.72 km²,其中 79.19%转为建设用地。该阶段郑州城镇化进程加大,

土地开发力度不断加强,建设项目大量侵占农用地。受占补平衡制度影响,草地和林地主要流向耕地,转出率分别为 58.81%,69.00%。2010—2020 年各地类转换强度明显放缓,转移总量为 598.41 km²,建设用地共转入 412.93 km²且 91.71%来源于耕地;林地和草地逆向转化大于正向转化,原因在于其分布位置受地形地貌限制,治理难度相对较大。

表 5 2000—2010 年郑州市土地利用转移矩阵

Table 5 Land use transfer matrix for Zhengzhou City during 2000—2010

km²

土地利用类型	2000 年						总计
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2010 年							
耕地	3 978.56	54.87	21.13	153.29	872.43	0.00	5 080.27
林地	208.70	456.88	14.99	4.29	74.47	0.00	759.31
草地	193.79	43.43	357.12	1.03	91.27	0.00	686.63
水域	59.19	0.93	0.45	133.36	15.66	0.00	209.58
建设用地	197.74	2.69	0.90	3.12	640.76	0.00	845.21
未利用地	1.37	1.80	0.02	0.00	0.23	0.00	3.42
总计	4 639.34	560.59	394.60	295.08	1 694.83	0.00	7 584.44

表 6 2010—2020 年郑州市土地利用转移矩阵

Table 6 Land use transfer matrix for Zhengzhou City during 2010—2020

km²

土地利用类型	2010 年						总计
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2020 年							
耕地	4 180.16	5.76	9.24	65.47	378.71	0.00	4 639.34
林地	5.39	546.81	2.79	0.26	5.35	0.00	560.59
草地	9.45	2.88	373.32	0.97	7.98	0.00	394.60
水域	15.59	0.14	0.15	258.33	20.88	0.00	295.08
建设用地	60.96	2.74	2.87	0.85	1 627.42	0.00	1 694.83
总计	4 271.54	558.32	388.36	325.88	2 040.34	0.00	7 584.44

2.1.2 不同情景下郑州市 2030 年土地利用模拟预测

(1) 模拟精度验证。基于 2010 年土地利用数据对 2020 年进行预测,将模拟结果与 2020 年实际进行对比。从图 2 可以看出,二者空间分布一致性较高;栅格总量方面(表 7),耕地、林地和建设用地的数量与实际相符,草地和水域略有不同,误差分别为 1 952

和 -1 952。原因在于郑州市水资源长期时空分布不均且受季节因素扰动较大,而退耕还草政策使草地面积增加,导致部分区域存在统计偏差。为进一步验证模拟的合理性,计算出总体精度(OA)达 0.896,kappa 系数为 0.827,表明准确度较高且满足模拟要求,PLUS 模型适用于郑州市土地利用变化模拟。

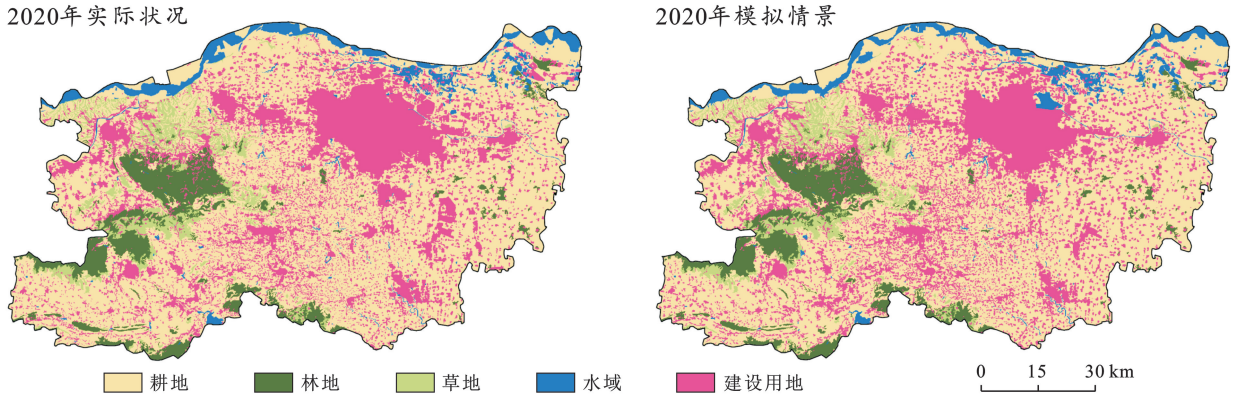


图 2 2020 年郑州市实际与模拟土地利用空间分布对比

Fig.2 Comparison of actual and simulated land use spatial distribution in Zhengzhou City in 2020

表 7 郑州市 2020 年实际与模拟土地利用栅格对比

Table 7 Comparison of actual and simulated land use grids in Zhengzhou City in 2020

土地利用类型	实际栅格数量	模拟栅格数量	误差
耕地	4 746 150	4 746 150	0
林地	620 357	620 357	0
草地	431 515	433 467	1 952
水域	362 087	360 135	-1 952
建设用地	2 267 047	2 267 047	0

6.04 km²,其中耕地 95.67%转为建设用地;此时建设用地扩大到 2 344.12 km²,占研究区总面积 30%以上。该情景下,郑州城市发展仍以经济增长为主旋律,土地无序开发严重。生态保护情景下,生态用地总面积升至 1 316.91 km²且主要来源于耕地;相较于基准情景,3 种地类均呈不同程度的正向变化,分别增加3.06,4.82 和 22.73 km²,而耕地进一步收缩,减少0.17%,波动最为显著;建设用地增幅明显放缓,对其他地类的侵占减少。空间上新增生态用地以北部水域为主,湿地保护政策的实施使全市河湖水系进一步连通。综上所述,生态保护情景下建设用地扩张受到遏制,生态资源的重要价值得以凸显,区域生态状况稳中向好。

(2) 土地利用变化。2030 年不同情景下土地利用状况如图 3 所示。未来将延续现有格局,耕地和建设用地的主导地位持续提升。基准情景下,耕地、林地和草地呈负向变化,分别减少 317.52, 2.14 和

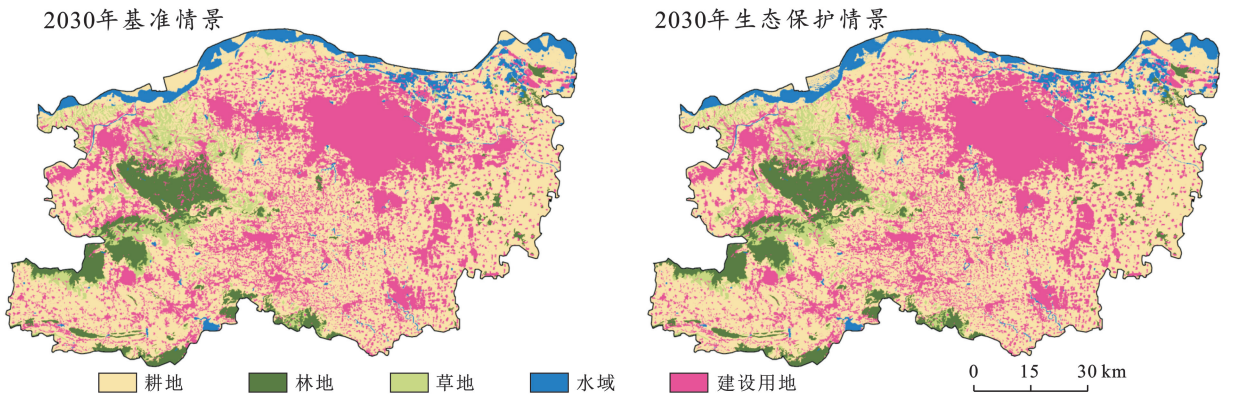


图 3 2030 年郑州市不同情景下土地利用格局

Fig.3 Land use pattern in Zhengzhou City under different scenarios in 2030

2.2 生境质量时空演变特征分析

2.2.1 2000—2020 年郑州市生境质量变化 为更直观表达生境质量演变特征,采用 ArcGIS 中的自然间断点分级法将结果划分为 5 个等级:低(0.0~0.3)、较低(0.3~0.5)、中等(0.5~0.7)、较高(0.7~0.9)、高(0.9~1.0),该方法具有较好的分级精度和制图效果,可以使数列的类别间差异最大化^[34]。从时间维度分析(表 8),不同等级的数量结构具有较大差异,总体

以低、较低为主,平均比例 81.64%,其次是中等和高等级。20 a 间低生境质量区域面积共涨幅 15.71%,较低、中等、高生境质量比例逐期下降,面积分别减少 808.73,298.27 和 210.64 km²;较高等级小幅度上涨,各时期比例均不足 5%。2000—2020 年郑州市生境质量均值分别为 0.521 3,0.447 6 和 0.425 4,呈先快后慢的递减趋势,等级由中等降为较低,生境质量恶化,生态环境问题日益突出。

表 8 郑州市 2000—2020 年不同生境质量等级变化

Table 8 The grade changes of different habitat quality in Zhengzhou City during 2000—2020

生境质量等级	分段区间	2000 年		2010 年		2020 年	
		面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
低等	0.0~0.3	848.64	11.19	1 694.83	22.35	2 040.34	26.90
较低	0.3~0.5	5 080.27	66.98	4 639.34	61.17	4 271.54	56.32
中等	0.5~0.7	686.63	9.05	394.60	5.20	388.36	5.12
较高	0.7~0.9	209.58	2.76	297.42	3.92	335.53	4.42
高等	0.9~1.0	759.31	10.01	558.25	7.36	548.67	7.23
合计		7 584.44	100.00	7 584.44	100.00	7 584.44	100.00

从空间格局分析(图 4),郑州市生境质量与土地利用结构密切相关,高值区主要集中于巩义市、登封市等山地丘陵区,中牟县北部、新密市南部也有零星斑块,中等生境围绕高生境集聚分布,林草地为主要土地类型;该区域地势复杂,人为干预弱,植被覆盖率高,自然生态系统稳定性强。较高值区在市域北部形成带状布局,地类主要为水域,具有丰富的生物多样性。较低和低生境分布广泛,主要位于市内平原农区、人口密集的城市市区以及各区划中心,该区域海拔较低且地形平坦,人类活动强度大,植物种类单一,生态系统脆弱。

近 10 a 郑州交通运输事业蓬勃发展,为印证其

对生境质量是否存在影响,以 2020 年为例,探究非线性工程威胁下生境质量状况(图 5)。此时生境质量均值为 0.445 0,相比有线性工程增加 0.019 6;部分斑块由较高转为高生境且以中、东部居多,主要在郑机城际铁路、郑万高铁、郑州绕城高速等沿线分布。可见交通路网会对城市生境带来负面影响,一方面其具有分割作用,导致原本完整的斑块趋向破碎化;另一方面在施工过程中会破坏地表植被及生态平衡,加速水土流失。《郑州都市圈交通一体化发展规划(2020—2035 年)》中提到,未来将进一步完善以郑州为中心的交通枢纽体系,因此同样将道路因素设为 2030 年生境质量的威胁因子。

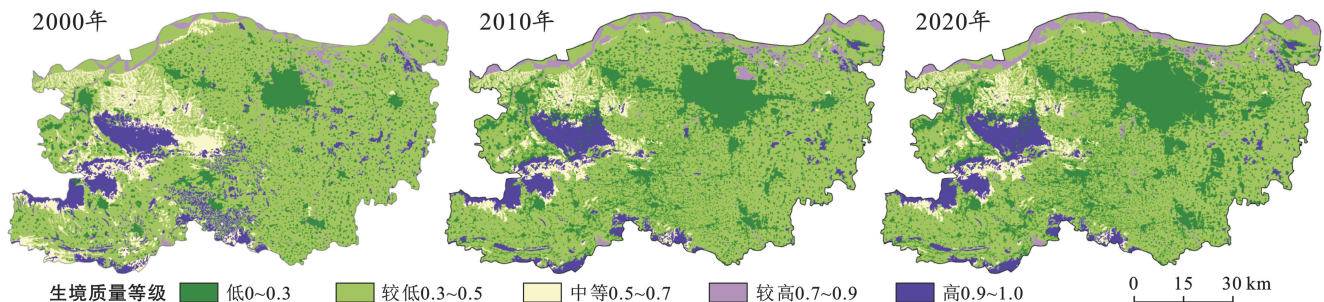


图 4 2000—2020 年郑州市生境质量空间分布

Fig.4 Spatial distribution of habitat quality in Zhengzhou City during 2000—2020

在 ArcGIS 中对 3 期生境质量进行分区统计(图 6),可以看出 2000—2010 年变化趋势显著。巩义市和登封市的生境质量始终优于全市平均水平,其生态基底丰厚,对土地利用产生了良好的生态效应,其中 2000 年巩义市均值最高为 0.610 3。中牟县、荥阳市、惠济区和新郑市的生境质量呈明显优化提升态势,得益于近年来沿黄林草植被带建设以及生态水系修复力度的加大。金水区、二七区、中原区和管城回族区生境质量持续下降,过境交通形成的尾气对市区东部和北部环境造成了较大影响,因此金水区和管城回族区恶化趋势最为显著。

2.2.2 2030 年不同情景下郑州市生境质量变化 基于 2030 年土地利用数据得到不同情景下生境质量空间分布情况。基准情景下生境质量进一步恶化,低值区比例提升 4.01%,较低、中等和高生境区收缩,分别减少 317.52,330.27 和 2.96 km²;较高生境区域保持微幅增长。生态保护情景下低值减少、高值增多,总体趋势向好;相较于基准情景,低、较低生境区面积分别减少 17.85 和 12.75 km²;中等、较高和高生境区总面积扩大到 1 316.91 km²,比基准情景增加 30.61 km²。可见生态保护情景下区域生境质量有所改善,生态压力得以缓解。

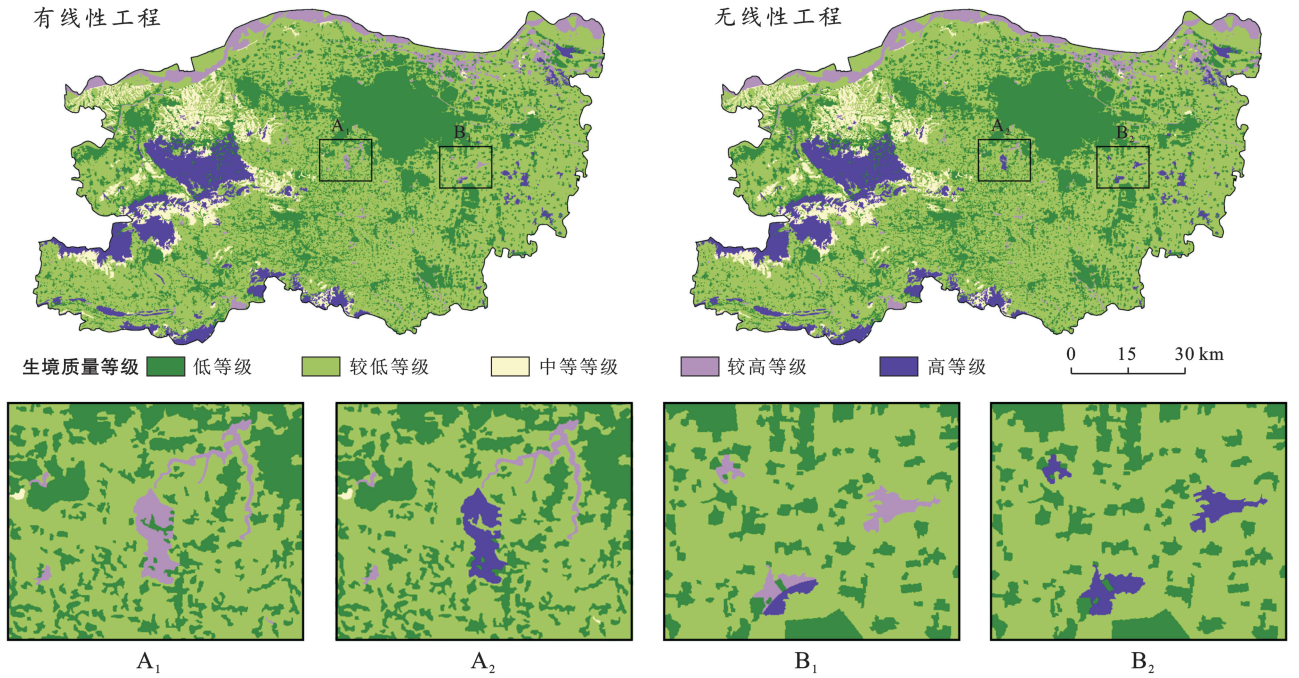


图 5 2020 年郑州市有线性和无线性工程威胁下生境质量对比

Fig.5 Comparison of habitat quality with and without linear engineering threats in Zhengzhou City in 2020

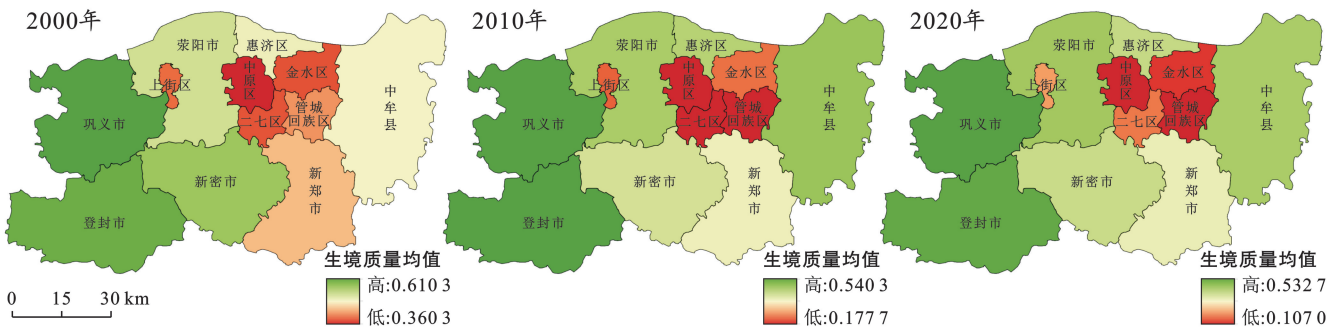


图 6 2000—2020 年郑州市生境质量分区

Fig.6 Habitat quality zoning in Zhengzhou City during 2000—2020

由图 7—8 可知,2030 年延续“西高东低”的生境质量空间格局,基准情景和生态保护情景下均值分别为 0.405 5,0.418 3。两种情景下新增的低值和较低值区均以点状分布于全市,破碎化程度加剧。未来生境质量分区情况与 2020 年基本一致,山区丘陵高于平原、农村好于城市、生态保护情景优于基准情景。荥阳市、巩义市和惠济区的生境质量平均值分别上升 0.005 9, 0.005 1 和 0.003 5,巩义市和登封市生境质量稳定保持领先水平,对全市生境质量改善具有关键作用。

2.2.3 郑州市生境质量图谱变化

(1) 数量变化差异。2000—2020 年各生成 25 类生境质量图谱单元,2020—2030 年两种情景分别生成 13, 14 类,编码 11, 22, 33, 44, 55 代表生境质量未发生等级变化。据统计,该市共有图谱单元

8 427 156 个,稳定单元比例逐期提高,生境质量转变幅度放缓。由变化图谱像元排序可知(表 9—10), 4 期图谱均以较低向低(编码 21)的转换最频繁,变化率分别为 43.23%,62.55%,90.62%和 84.62%,强于同期低向较低(编码 12),其次是较低向较高(编码 24)。从不同时序上看,2000—2010 年和 2010—2020 年各有 84.96%,83.29%转为较低或低,向较高或高转变的总量极低,郑州市生境质量恶化大于改善,向差发展的图谱单元净增长现象严重。2020—2030 年变化强度大幅减小,基准情景下 8 类变化单元中 92.98%转为低等级,7.02%向较高或高发生变化。生态保护情景下共 9 类变化单元,其中 14.44%向较高和高转换,在 4 期生境质量变化图谱中向好的图谱单元转化比例最高,生境质量处于明显优化阶段。

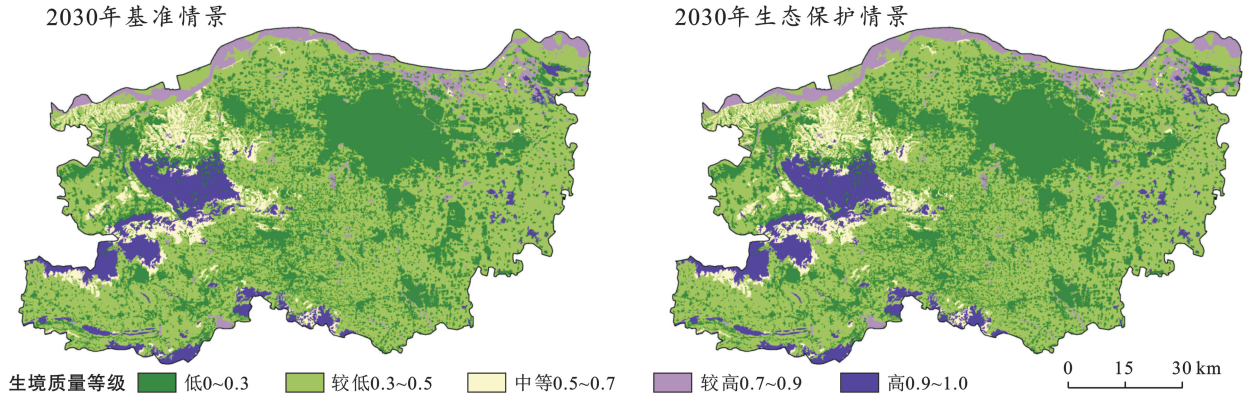


图 7 2030 年郑州市不同情景下生境质量空间分布

Fig.7 Spatial distribution of habitat quality in Zhengzhou City under different scenarios in 2030

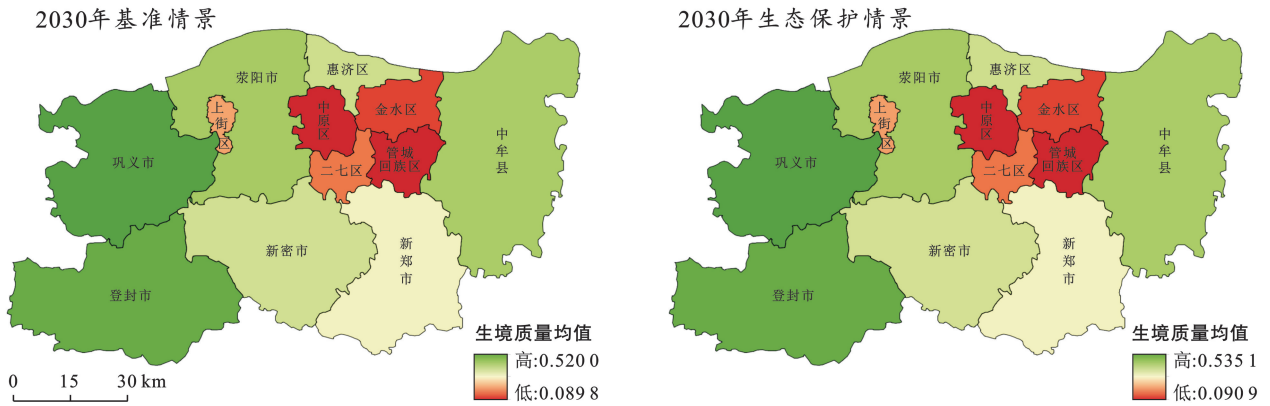


图 8 2030 年郑州市不同情景下生境质量分区

Fig.8 Habitat quality zoning in Zhengzhou City under different scenarios in 2030

表 9 郑州市 2000—2020 年生境质量变化图谱像元排序

Table 9 Pixel sequence of habitat quality change map in Zhengzhou City during 2000—2020

排序	2000—2010 年				2010—2020 年			
	编码	变化类型	像元数/个	变化率/%	编码	变化类型	像元数/个	变化率/%
1	21	较低—低	969 369	43.23	21	较低—低	420 792	62.55
2	52	高—较低	231 885	10.34	24	较低—较高	72 991	10.85
3	12	低—较低	221 238	9.87	12	低—较低	67 732	10.07
4	32	中等—较低	215 321	9.60	41	较高—低	23 216	3.45
5	24	较低—较高	172 001	7.67	42	较高—较低	17 389	2.58
6	31	中等—低	101 414	4.52	32	中等—较低	10 495	1.56
7	51	高—低	82 744	3.69	23	较低—中等	10 265	1.53
8	42	较高—较低	65 764	2.93	31	中等—低	8 870	1.32
9	25	较低—高	59 284	2.64	54	高—较高	8 158	1.21
10	35	中等—高	48 252	2.15	25	较低—高	6 156	0.92
11	23	较低—中等	23 476	1.05	51	高—低	5 929	0.88
12	41	较高—低	17 402	0.78	52	高—较低	5 913	0.88
13	53	高—中等	16 650	0.74	35	中等—高	3 204	0.48
14	54	高—较高	5 655	0.25	13	低—中等	3 184	0.47
15	15	低—高	4 987	0.22	53	高—中等	3 101	0.46
16	14	低—较高	3 470	0.15	15	低—高	2 943	0.44
17	34	中等—较高	1 142	0.05	34	中等—较高	1 075	0.16
18	13	低—中等	1 021	0.05	14	低—较高	1 043	0.16
19	45	较高—高	1 009	0.04	43	较高—中等	166	0.02
20	43	较高—中等	500	0.02	45	较高—高	153	0.02
合计			2 242 584	100.00	合计		672 775	100.00

表 10 2020—2030 年郑州市不同情景生境质量变化图谱像元排序

Table 10 Pixel sequence of habitat quality change map under different scenarios in Zhengzhou City during 2020—2030

排序	基准情景				生态保护情景			
	编码	变化类型	像元数/个	变化率/%	编码	变化类型	像元数/个	变化率/%
1	21	较低—低	329 002	90.62	21	较低—低	316 520	84.62
2	24	较低—较高	23 799	6.56	24	较低—较高	51 885	13.87
3	31	中等—低	6 273	1.73	42	较高—较低	2 310	0.62
4	51	高一—低	2 125	0.59	31	中等—低	1 174	0.31
5	54	高一—较高	1 213	0.33	54	高一—较高	1 080	0.29
6	34	中等—较高	441	0.12	25	较低—高	875	0.23
7	41	较高—低	132	0.04	35	中等—高	135	0.04
8	45	较高—高	54	0.01	34	中等—较高	47	0.01
9					45	较高—高	1	0.00
	合计		363 039	100.00	合计		374 027	100.00

(2) 空间变化特征。2000—2030 年郑州市生境质量空间迁移图谱如图 9 所示。2000—2010 年各类型图谱单元广泛分布,以“较低—低”和“高一—较低”较多。前者连贯成片分布于金水区、中原区、二七区和管城回族区,自 2000 年郑州迈入快速发展阶段起土地利用方式转变剧烈,“耕地城镇化”现象严重。“高一—较低”主要位于南部新密市,其地处浅山丘陵且具有良好的自然条件,但煤炭、耐材等产业的发展使生态环境遭到破坏。2010—2020 年“较低—低”则集中在新郑市和中牟县,由于郑州市区规模基本饱和,城镇占耕地扩张聚焦于新的开发热点^[35],即航空港区和高新开发区。“较低—较高”多分布在荥阳市和中牟县,由于郑州黄河湿地保护成为重点,两地积极开展退耕还湿及荥阳邙岭、中牟黄河高滩区景观提质等行动。2020—2030 年生境质量变化图谱表现出空间分散、种类单一的特点。基准情景下,由于郑州市经济建设高速发展,城市边界不断扩大,“较低—低”仍为转移最为明显的类型,生境质量进一步恶化;生态保护情景下,“较低—较高”的变化更加频繁,围绕郑州沿黄景观带延伸,这与对生态用地限制转换密不可分。在不同时空环境下,随着社会的不断发展,生态环境会面临各种威胁和挑战,虽然生态系统自身具有一定环境修复功能,若辅以一定保护措施政策,合理控制建设用地规模,也可有效保障区域生境质量良性发展。

3 讨论

区域土地利用变化是人类活动、气候变化、自然条件等共同作用的结果,是导致生境质量变化的重要因素。郑州市作为黄河沿线经济体量最大的国家中心城市,扼黄河中下游分界,生态地理区位十分重要。从土地利用变化来看,2000—2020 年郑州市建设用

地规模呈“外延式”快速扩张,耕地面积大幅收缩且在平原地区尤为突出,而为保证耕地总量不减少,按照占补平衡对生态空间进行调整,林草地面积也相应缩减。水域面积略有增加,但总体上生态用地数量不断减少,生态保护成效并不稳固。

郑州市生境质量与土地利用结构密切相关,高生境质量集中于巩义市和登封市,一方面受自然条件限制,西部及西南部海拔较高,人类活动强度低;另一方面近年来该区域大力实施生态修复工程,因此稳定保持高生境质量水平。北部较高生境面积小幅上涨,水域对维护水生态平衡和生物多样性具有重要作用。中部及东北部以低、较低生境为主,城镇化发展致使大量自然地表被人工地表所取代,生态系统服务功能减弱,整体生境质量不断恶化。

从预测结果来看,2020—2030 年郑州市土地利用变化基本稳定,基准情景下建设用地仍呈扩张趋势,生境质量均值持续下降;生态保护情景下生态用地总量提升,为区域生境质量水平稳中向好提供稳定支撑。结合《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》《河南省“十四五”生态环境保护和生态经济发展规划》等相关政策来看,当前和未来一个时期,是郑州维护国家中心城市生态安全、着力打造沿黄生态保护示范区的关键期,鉴于此提出生境质量调控优化策略:①针对郑州市西部和西南部的高生境质量区,加强国家公园、地质公园等自然保护地体系建设,严格控制林地转化为其他用途土地;提升森林质量,开展系统修复,提高森林水源涵养和水土保持功能。②针对较高和中等水平区域,以黄河、淮河水系为依托,提高流域治理水平,构建水系生态廊道,同时提升湿地生态系统连通性;严格草地保护,对退化草地开展修复工程,增强草地生态功能。③针对较低和低生境区域,合理布局国土空间结构,严格管控建设

用地增量而转为“内涵挖潜”式发展,提升土地利用效率,协调生活、生产、生态服务功能,构建平原生

态绿网,扩大城乡绿色空间以防止生境质量进一步退化。

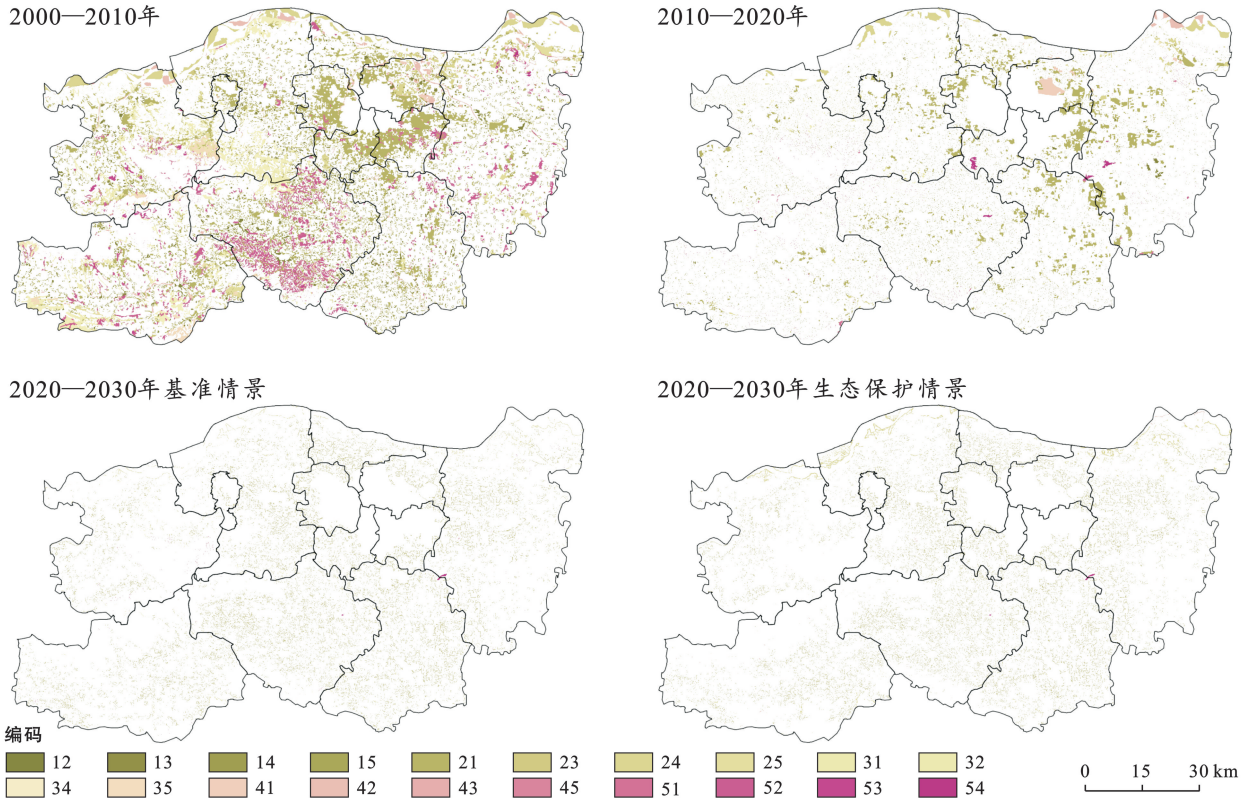


图9 2000—2030年郑州市生境质量空间变化图谱

Fig.9 Spatial change map units of habitat quality in Zhengzhou City during 2000—2030

本研究综合利用PLUS模型和InVEST模型,以“过去—现在—未来”的逻辑,在分析郑州市土地利用变化的基础上预测未来空间格局,基于市域、区县、像元尺度,探究生境质量时空演变特征及发展趋势。本文最大不同在于生境质量评价中关注线性道路的影响,通过设置无线性威胁因子,与前者进行对比,从而印证道路交通与生境质量间存在一定关联。研究过程及结果为郑州市生态保护实践和资源优化配置提供参考。由于InVEST生境质量评估中主要考虑的是受人类干扰的外部威胁,忽视了生态系统中天敌、食物链完整度等内部威胁,且参数设置缺乏科学统一标准,具有一定局限性和主观性。因此如何进一步优化生境质量模型参数、探究土地利用变化与生境质量的驱动关系,可作为未来重点研究方向。

4 结论

(1) 2000—2020年郑州市各地类时空分布差异显著,耕地和建设用地为优势地类,耕地大幅减少,建设用地在城市化驱动下剧烈扩张且主要来源于耕地,生态用地总量持续下降,城市发展与生态环境保护矛盾日益加剧。

(2) PLUS模型精度检验结果表明准确度较高,适用于郑州市未来土地利用变化模拟。2030年基本保持稳定国土空间结构,变化速率明显放缓。基准情景下,城市边界扩展进一步蚕食农用地和生态用地;生态保护情景下,建设用地扩张受到遏制,生态用地规模稳步提升,对保障区域国土生态安全具有重要意义。

(3) 郑州市生境质量与土地利用空间格局基本吻合,2000—2020年生境质量逐步恶化,具体表现为低生境区域面积激增,高生境区不断收缩,生境质量向较高和高等级转移的数量极低。郑州市道路交通对生境质量具有一定负面效应;金水区和管城回族区生境退化趋势尤为显著,巩义市、登封市生境质量稳定优于全市平均水平。

(4) 2020—2030年郑州市生境质量空间格局变化微弱,基准情景下高、较高主要流向低等级,生境质量恶化程度加深;生态保护情景下低生境减少,高生境增多,向高、较高等级转换率升至14.44%,总体趋势向好。郑州城市规模急剧扩大是生境质量下降的主要原因,在城市发展同时,应严格控制不合理的开发利用,重视生态发展的可持续性。

参考文献 (References)

- [1] 刘彦随,陈百明.中国可持续发展问题与土地利用/覆被变化研究[J].地理研究,2002(3):324-330.
Liu Yansui, Chen Baiming. The study framework of land use/cover change based on sustainable development in China [J]. Geographical Research, 2002(3):324-330.
- [2] 滕雅丽,谢苗苗,王回苗,等.资源型城市土地利用转型及其对生境质量的影响:以乌海市为例[J].生态学报,2022,42(19):7941-7951.
Teng Yali, Xie Miaomiao, Wang Huihui, et al. Land use transition in resource-based cities and its impact on habitat quality: The case of Wuhai City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(19):7941-7951.
- [3] 吴健生,毛家颖,林倩,等.基于生境质量的城市增长边界研究:以长三角地区为例[J].地理科学,2017,37(1):28-36.
Wu Jiansheng, Mao Jiaying, Lin Qian, et al. Urban growth boundary based on the evaluation of habitat quality: Taking the Yangtze River delta as an example [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017,37(1):28-36.
- [4] Wei Yiming, Wang Hongwei, Xue Mengqi, et al. Spatial and temporal evolution of land use and the response of habitat quality in Wusu, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022,20(1):361.
- [5] Xiang Qing, Kan Aike, Yu Xiaoxiang, et al. Assessment of topographic effect on habitat quality in mountainous area using InVEST model [J]. Land, 2023,12(1):186.
- [6] 魏文飞,包玉,王志泰,等.喀斯特多山城市生境质量对土地利用变化的时空响应:以贵阳市为例[J].生态学报,2023,43(10):3920-3935.
Wei Wenfei, Bao Yu, Wang Zhitai, et al. Spatio-temporal responses of urban environment quality to land use change in mountainous cities of Karst areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(10):3920-3935.
- [7] He Yunlin, Mo Yanhua, Ma Jiangming. Spatio-temporal evolution and influence mechanism of habitat quality in Guilin City, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022,20(1):784.
- [8] 郑云有,刘艳婷,姚鹏,等.湖南省重点生态功能区生境质量时空变化及其预测[J].水土保持通报,2022,42(4):347-356,364.
Zheng Yunyou, Liu Yanting, Yao Peng, et al. Spatial and temporal changes and prediction of habitat quality in key ecological function area of Hu'nan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(4):347-356,364.
- [9] 刘希朝,李效顺,蒋冬梅.基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估[J].农业工程学报,2021,37(4):265-274.
Liu Xizhao, Li Xiaoshun, Jiang Dongmei. Landscape pattern identification and ecological risk assessment using land-use change in the Yellow River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(4):265-274.
- [10] 白召弟.基于 InVEST-MSPA 模型关中平原城市群生态安全格局的构建[D].陕西 西安:长安大学,2022.
Bai Zhaodi. Ecological security construction of Guanzhong Plain urban agglomeration based on InVEST-MSPA model [D]. Xian, Shaanxi: Chang'an University, 2022.
- [11] 甄艳,吴宗攀,尹志恒,等.四川省若尔盖县土地利用时空变化研究[J].生态科学,2022,41(2):41-49.
Zhen Yan, Wu Zongpan, Yin Zhiheng, et al. Study on spatio-temporal change of land use in Zoige County, Sichuan Province [J]. Ecological Science, 2022,41(2):41-49.
- [12] 马银,郑敏睿,郑新奇,等.基于 CA-Markov 和 MSPA 的绿色基础设施预测与时空演变分析:以京津冀城市群为例[J].生态学报,2023,43(16):6785-6797.
Ma Yin, Zheng Minrui, Zheng Xinqi, et al. Prediction and spatiotemporal evolution analysis of green infrastructure based on CA-Markov and MSPA: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(16):6785-6797.
- [13] 任胤铭,刘小平,许晓聪,等.基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J].生态学报,2023,43(11):4473-4487.
Ren Yinming, Liu Xiaoping, Xu Xiacong, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on the FLUS-InVEST Model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(11):4473-4487.
- [14] 唐娇娇,余成,张委伟,等.基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的苏州市生境质量评估及预测[J].环境工程技术学报,2023,13(1):377-385.
Tang Jiaojiao, Yu Cheng, Zhang Weiwei, et al. Habitat quality assessment and prediction in Suzhou based on CLUE-S and InVEST models [J]. Journal of Environmental Engineering and Technology, 2023,13(1):377-385.
- [15] 崔文兵,侯国博,陈万基,等.基于多情景模拟的伊犁河谷土地利用景观格局分析[J].水利水电技术(中英文),2023,54(9):1-12.
Cui Wenbing, Hou Guobo, Chen Wanji, et al. Landscape pattern analysis of land use in Yili River Valley based on

- multi-scenario simulation [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(9): 1-12.
- [16] 刘园, 周勇, 杜越天. 基于 InVEST 模型的长江中游经济带生境质量的时空分异特征及其地形梯度效应[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10): 2429-2440.
Liu Yuan, Zhou Yong, Du Yuetian. Study on the spatio-temporal patterns of habitat quality and its terrain gradient effects of the middle of the Yangtze River economic belt based on InVEST model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(10): 2429-2440.
- [17] 马桥, 刘康, 高艳, 等. 基于 SolVES 模型的西安浐灞国家湿地公园生态系统服务社会价值评估[J]. *湿地科学*, 2018, 16(1): 51-58.
Ma Qiao, Liu Kang, Gao Yan, et al. Assessment on social values of ecosystem services in Xi'an Chanba National Wetland Park based on Sol VES model [J]. *Wetland Science*, 2018, 16(1): 51-58.
- [18] 高庆彦, 潘玉君, 刘化. 基于 InVEST 模型的大理州生境质量时空演化研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(3): 402-408.
Gao Qingyan, Pan Yujun, Liu Hua. Spatial-temporal evolution of habitat quality in the Dali Bai Autonomous Prefecture based on the InVEST model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(3): 402-408.
- [19] 尹泽凯, 谭立峰, 贾琦. 郑州市“三生空间”用地转型及其生态效应[J]. *人民黄河*, 2022, 44(7): 93-98, 104.
Yin Zekai, Tan Lifeng, Jia Qi. Land use transformation based on ecological-production-living spaces in Zhengzhou City and its ecological effects [J]. *Yellow River*, 2022, 44(7): 93-98, 104.
- [20] 郑州市林业局. 郑州市“十四五”林业保护发展规划 [EB/OL]. [2023-08-29] (2023-11-11). <https://public.zhengzhou.gov.cn/D08 Y/6843270.jhtml>.
Zhengzhou Forestry Administration. 14 th five year plan of forestry protection and development in Zhengzhou City [EB/OL]. [2023-08-29] (2023-11-11). <https://public.zhengzhou.gov.cn/D08 Y/6843270.jhtml>.
- [21] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [22] 罗芳, 潘安, 陈忠升, 等. 四川省宜宾市 1980—2018 年耕地时空格局变化及其驱动因素[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(6): 336-344.
Luo Fang, Pan An, Chen Zhongsheng, et al. Spatio-temporal pattern change of cultivated land and its driving forces in Yibin City, Sichuan Province during 1980-2018 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(6): 336-344.
- [23] 谢向东, 林孝松, 王莹, 等. 基于 PLUS 模型的重庆市南川区土地利用多情景模拟[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(6): 86-92, 113.
Xie Xiangdong, Lin Xiaosong, Wang Ying, et al. Multi-scenario simulation of land use in Nanchuan District of Chongqing based on PLUS model [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(6): 86-92, 113.
- [24] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 等. 基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置: 以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4284-4298.
Wang Baosheng, Liao Jiangfu, Zhu Wei, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of Southern Fujian in 2030 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4284-4298.
- [25] 邱天琦, 王向荣. 基于 InVEST 模型的长株潭城市群生境质量时空演变分析研究[J]. *林业资源管理*, 2022(5): 99-106.
Qiu Tianqi, Wang Xiangrong. Research on the temporal and spatial evolution of habitat quality in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration based on InVEST model [J]. *Forest Management Resources*, 2022(5): 99-106.
- [26] 卢茵怡, 李天翔, 龚建周. 广东省不同地貌形态类型区生境质量归因[J]. *生态科学*, 2022, 41(3): 24-32.
Lu Yinyi, Li Tianxiang, Gong Jianzhou. Attribution of habitat quality in different geomorphological types in Guangdong Province [J]. *Ecological Science*, 2022, 41(3): 24-32.
- [27] 赵孟琪. 郑州市生境质量的空间梯度效应[D]. 河南 郑州: 河南农业大学, 2023.
Zhao Mengqi. Spatial gradient effect of habitat quality in Zhengzhou [D]. Zhengzhou, Henan: Henan Agricultural University, 2023.
- [28] 孙汇颖, 宫巧巧, 刘庆果, 等. 基于土地利用变化的山东省生境质量时空演变特征[J]. *土壤通报*, 2022, 53(5): 1019-1028.
Sun Huiying, Gong Qiaoqiao, Liu Qingguo, et al. Spatio-temporal evolution of habitat quality based on the land-use changes in Shandong Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(5): 1019-1028.
- [29] Shar P R, Tallis H T, Ricketts T, et al. InVEST 3.2.0 User's Guide [M]. Stanford: the Natural Capital Project, 2015.

- [30] 陈妍,乔飞,江磊.基于 InVEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究:以北京为例[J].北京大学学报:自然科学版,2016,52(3):553-562.
Chen Yan, Qiao Fei, Jiang Lei. Effects of land use pattern change on regional scale habitat quality based on InVEST model: A case study in Beijing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2016,52(3):553-562.
- [31] 路亚方,李红波.2000—2020 年基于土地利用变化的生境质量时空动态演变:以武汉城市圈为例[J].水土保持研究,2022,29(6):391-398.
Lu Yafang, Li Hongbo. Temporal and spatial dynamic evolution of habitat quality based on land use change from 2000 to 2020: Taking Wuhan metropolitan region as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):391-398.
- [32] 周德志,关颖慧,张冰彬,等.基于土地利用变化的陕北地区生境质量时空演变及其驱动因素[J].北京林业大学学报,2022,44(6):85-95.
Zhou Dezhi, Guan Yinghui, Zhang Bingbin, et al. Spatial-temporal evolution of habitat quality in Northern Shaanxi Province of northwestern China based on land use change and its driving factors [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022,44(6):85-95.
- [33] 黄鑫,程文仕,李晓丹,等.甘肃省生境质量变化的图谱特征[J].应用生态学报,2020,31(9):3131-3140.
Huang Xin, Cheng Wenshi, Li Xiaodan, et al. Spectrum characteristics of habitat quality changes in Gansu Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(9):3131-3140.
- [34] 张丹红,王效科,张路,等.大比例尺土壤保持服务制图分级方法研究[J].生态学报,2021,41(4):1391-1401.
Zhang Danhong, Wang Xiaoke, Zhang Lu, et al. Research on the classification methods of ecosystem service of soil retention for large-scale choropleth mapping [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(4):1391-1401.
- [35] 张永民,程维明.快速城镇化背景下耕地城镇化的时空格局模拟与分析:以郑州地区为例[J].江苏农业科学,2020,48(2):233-238.
Zhang Yongmin, Cheng Weiming. Simulation and analysis of the spatial and temporal pattern of cultivated land urbanization under the background of rapid urbanization: A case study of Zhengzhou City [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020,48(2):233-238.

(上接第 344 页)

- [30] 周士锋,唐蒲霞,郭悦,等.基于 MSPA 的城市绿色基础设施景观格局时空变化分析[J].河南科学,2022,40(6):914-921.
Zhou Shifeng, Tang Puxia, Guo Yue, et al. Spatial and temporal change analysis of urban green infrastructure landscape pattern based on MSPA [J]. Henan Science, 2022,40(6):914-921.
- [31] 于亚平,尹海伟,孔繁花,等.基于 MSPA 的南京市绿色基础设施网络格局时空变化分析[J].生态学报,2016,35(6):1608-1616.
Yu Yaping, Yin Haiwei, Kong Fanhua, et al. Analysis of the temporal and spatial pattern of the green infrastructure network in Nanjing, based on MSPA [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016,35(6):1608-1616.
- [32] 熊畅,吴卓,曾梓瑶,等.基于“空间形态—破碎化—聚集度”的粤港澳大湾区森林景观格局时空演变[J].生态学报,2023,43(8):3032-3044.
Xiong Chang, Wu Zhuo, Zeng Ziyao, et al. Spatiotemporal evolution of forest landscape pattern in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on “Spatial Morphology-Fragmentation-Aggregation” [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(8):3032-3044.
- [33] 徐红枫,王妍,刘云根,等.基于 Google Earth Engine 的典型峰丛洼地石漠化时空演变与驱动因子分析:以西畴县为例[J].水土保持研究,2022,29(4):407-414.
Xu Hongfeng, Wang Yan, Liu Yungen, et al. Analysis of the spatial and temporal evolution and driving factors of rocky desertification in typical cluster depression areas in the past 30 years based on google earth engine: Taking Xichou County as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):407-414.
- [34] 陈棋,张超,田湘云,等.云南省 2000—2020 年石漠化时空演变分析[J].浙江农林大学学报,2023,40(2):417-426.
Chen Qi, Zhang Chao, Tian Xiangyun, et al. Spatio-temporal evolution process of rocky desertification in Yunnan Province from 2000 to 2020 [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2023,40(2):417-426.
- [35] 田湘云,张超,陈棋,等.云南省岩溶地区土地利用对石漠化景观格局演变的影响分析[J].林业资源管理,2022(1):61-69.
Tian Xiangyun, Zhang Chao, Chen Qi, et al. Influence of land use on landscape pattern evolution of rocky desertification in karst areas of Yunnan, China [J]. Forest Resources Management, 2022(1): 61-69.