

基于城市森林生态系统健康评价的郑州市土地利用规划研究

Research on Land Use Planning of Zhengzhou City Based on Health Evaluation of Urban Forest Ecosystem

张钰岑¹ 冯嘉悦¹ 冯策¹ 逯瑞星² 刘晨晖² 张淑梅^{1*}
ZHANG Yucen¹ FENG Jiayue¹ FENG Ce¹ LU Ruixing² LIU Chenhui² ZHANG Shumei^{1*}

(1.河南农业大学风景园林与艺术学院, 郑州 450003; 2.北京林业大学园林学院, 北京 100080)
(1. College of Landscape Architecture and Art, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan, China, 450003; 2. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing, China, 100083)

文章编号: 1000-0283(2023)08-0032-10
DOI: 10.12193/j.laing.2023.08.0032.004
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2023-04-25
修回日期: 2023-06-21

摘要

将城市森林生态系统健康评价纳入土地利用规划, 对实现城市生态系统的良性循环具有重要意义。以郑州市为研究区域, 基于2009年和2019年两期土地利用数据, 使用CA-Markov模型预测了4类发展情景下郑州市2029年的土地利用情况, 通过构建耦合城市生态系统服务的城市森林生态系统健康评估体系, 对4类发展情景下的城市森林生态系统作健康评价, 以此讨论最优土地利用策略。结果显示, 生态城市建设情景下的城市健康值较2019年增加了19.01%, 增幅最大; 快速发展情景下的城市健康值则降低了17.03%, 降幅最大。此外, 城市核心性斑块的数量和面积对城市森林生态系统健康产生了显著影响。为实现最大化的林地扩张收益和有效提升城市森林生态系统的健康水平, 可采用在高增量生态廊道和潜在生态廊道处增加林地建设的土地利用规划策略。

关键词

城市森林; 土地利用模拟; 土地利用规划; 生态系统服务价值; 生态系统健康评价

Abstract

Incorporating the health assessment of urban forest ecosystems into land use planning is of great significance to realize the virtuous cycle of the urban ecosystem. This paper takes Zhengzhou City as the research area, based on the land use data in 2009 and 2019, uses the CA-Markov model to predict the land use situation of Zhengzhou City in 2029 under four types of development scenarios, and builds a city that couples urban ecosystem services. The forest ecosystem health assessment system evaluates the health of urban forest ecosystems under four types of development scenarios and discusses optimal land use strategies. According to the evaluation results, the urban health value under the ecological city construction scenario increased by 19.01% compared with 2019, the largest increase, while the urban health value under the rapid development scenario decreased by 17.03%, the largest decline. In addition, the number and size of urban core patches significantly impacted the health of urban forest ecosystems. To maximize the benefits of forest land expansion and effectively improve the health level of urban forest ecosystems, land use planning strategies that increase forest land construction at high-increment ecological corridors and potential ecological corridors can be adopted.

Keywords

urban forest; land use simulation; land use planning; ecosystem service value; health assessment

张钰岑

1998年生/男/河南驻马店人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计

冯嘉悦

2000年生/女/河南郑州人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计

张淑梅

1987年生/女/河南郑州人/博士/副教授/研究方向为城乡绿地资源调控

城市森林生态系统作为现代城市的重要角色^[1]。土地利用是城市空间的外在物质表
要有机组成部分, 在城市生态环境改善和征, 其变化能客观反映土地利用的空间特征
经济社会可持续发展进程中扮演着关键性的 与变化规律, 有利于协调快速发展背景下生

基金项目:

河南省科技攻关计划项目“中欧城市开发强度对森林生态系统的影响研究”(编号: 222102520033); 河南省科技厅国际合作项目“河南省城乡绿地资源调控与景观生态设计学科创新引智基地”(编号: KXJD006)

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: meishu_zhang83@henau.edu.cn

态环境与土地资源合理利用的关系^[2]。作为城市空间的重要配置手段,土地利用规划对城市发展起到了关键的指引作用^[3]。因此,在当今高强度的城市开发背景下,城市森林生态系统的保护和发展亟需与城市土地利用规划紧密协调,以缓解人与自然的紧张关系。

健康的城市生态系统可协调城市复合生态系统的自然过程、经济过程和社会过程之间的关系,促进复合生态系统的各方面协调高效可持续发展^[4]。评估城市生态系统的健康水平对制定合理有效的生态系统健康保护策略至关重要。20世纪90年代,以Costanza^[5]为代表提出的指标体系法由活力、组织力和恢复力^[6]三部分组成,其评价结果较为全面且与生态系统健康的原则较为相符,应用最为广泛。赵艳^[7]以VOR模型为基础,运用综合指标法建立评价体系计算了广州市森林健康值;燕守广^[8]基于VOR-ESV评价模型,并将人类胁迫纳入准则层,构建出生态保护红线的生态系统健康评价模型,对南京市生态保护管控区进行了生态系统健康评价。谷瑞丽^[9]构建VORS评价模型,以格网为研究单元对2000年、2010年和2020年黄河下游城市群生态系统健康水平进行了动态评价。刘一鸣^[10]基于邻域变异度和人为干扰修正后的VOR-ESV评价模型,量化地评估了我国东海岸地区的生态系统健康状况,并分析其时序变化特征和空间分异规律。对比上述定量评价城市生态系统健康的评估方法,评价指标虽逐渐趋于完善,但仅局限于过去时空下的研究,缺乏对未来时空演变下的健康评价,因而无法用于分析城市林地资源结构优化策略。

土地利用模式直接影响着生态系统的健康,在经济发达和人口密集地区尤为明显^[11]。同时,城市的快速扩张不断改变着土地资源

的转化,带来了诸多生态环境问题。分析和模拟城市扩张的机制,并对城市未来土地利用变化的风险进行预警,利于合理调控城市的发展^[12]。目前常用的土地利用预测模型主要有CA-Markov模型、CLUE-S模型、人工神经网络模型等,其中CA-Markov模型具备强大的土地利用空间模拟能力和长期预测能力的优势,被成功应用于许多国家和地区的案例研究^[13]。罗双晓^[14]基于CA-Markov模型,对成都市天府新区土地时空变化进行了预测,并对该区未来土地利用发展趋势进行了评价。倪永薇^[15]基于CA-Markov模型预测了北京市2029年不同发展情景下的土地利用情况,同步构建区域生态系统健康评价体系对不同发展模式进行健康评价,探讨了最优城市发展模式下的土地利用策略。刘强^[16]基于CA-Markov模型,预测了海南岛不同发展情景下的土地利用空间分布格局,定量分析了海南岛未来的土地利用变化及其生态环境效应。上述基于土地利用模拟的健康评价或生境评价方法虽不局限于单一时空下的研究,但未探究时空变化情形下重要生态斑块的演化情况,因而无法厘清城市生态系统健康与城市土地利用变化间的相互制约机制。

郑州市为特大城市,据《郑州统计年鉴》(<https://tj.zhengzhou.gov.cn>),2009-2019年间,郑州市城区建成面积由1478 km²增至2884 km²;城区人口由688万人增至1054万人,人均森林占有率由0.97 m²/人增至2.42 m²/人。郑州虽在城市森林建设方面有着显著进步,但人均森林占有率水平仍远低于中国的均值。10年间的高强度城市开发使郑州市土地利用类型大量转化,林地、耕地的破碎化程度随之增加,对城市生态系统健康产生不利影响,亟待探讨当前与未来的郑州市土地利用状况与郑州市生态系统健康的时空演变规律和相互

制约机制。因此,文章以构建健康的城市森林生态系统为目标,采用土地利用模拟和生态系统健康评估的方法,定量分析各发展情景下郑州市2029年城市森林生态系统的健康系数,以期推演各类城市发展模式下的郑州市森林生态系统健康状况,结合郑州市森林斑块空间分布和健康数值空间分布特征,为城市开发中的土地利用规划提供决策依据。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区域

郑州市位于华北平原南部黄河中下游,全市总面积7511 km²,地势呈阶梯状,从中山到低山、丘陵再到平原,土地利用类型以建设用地、林地、耕地为主,建设用地集中在市域中部偏北的主城区,市域东南象限的新郑市、航空港区,东部的中牟县,西部的荥阳市、上街区、巩义市,市域西南象限的新密市、登封市,林地主要分布在西部及西南部山区,耕地主要分布在主城区西部、东部及东南部平原。

1.2 数据来源与预处理

(1) 遥感影像数据。郑州市2009年、2019年的Landsat TM遥感影像,来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>),使用ENVI5.3将遥感影像解译为林地、草地、耕地、建设用地、水域和其他用地(图1)。

(2) DEM及交通矢量数据。郑州市全域的高程和坡度数据,来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>);郑州市的公路、铁路、高速公路的矢量数据,来源于OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org>)。在ArcGIS10.4中将公路、铁路、高速公路等矢量数据转为栅格数据,保证与土地利用数据栅格像元大小、地理空间坐标系、投影相同(图2)。

(3) 土地利用类型转移概率及适宜性图

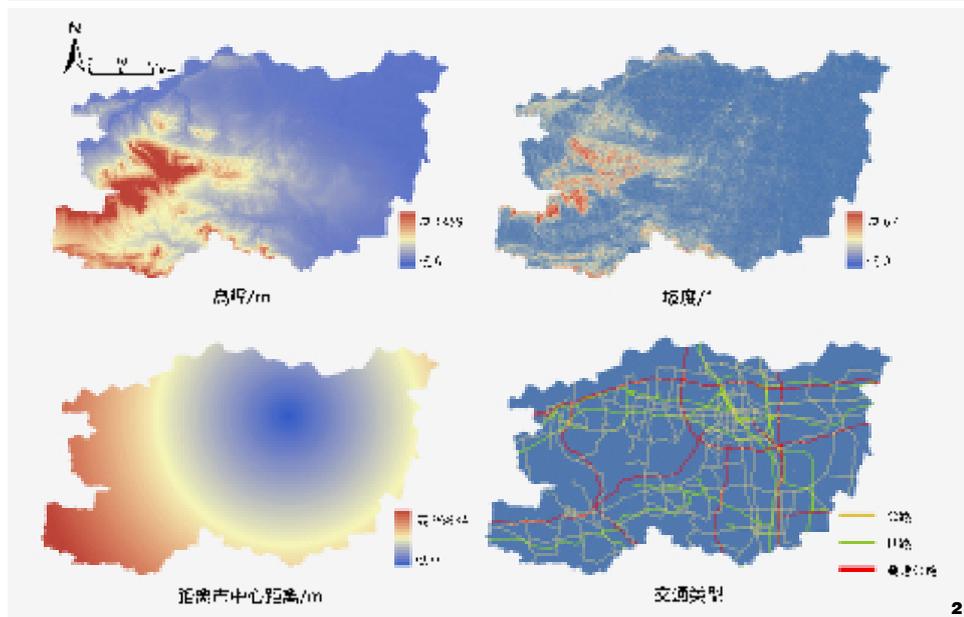
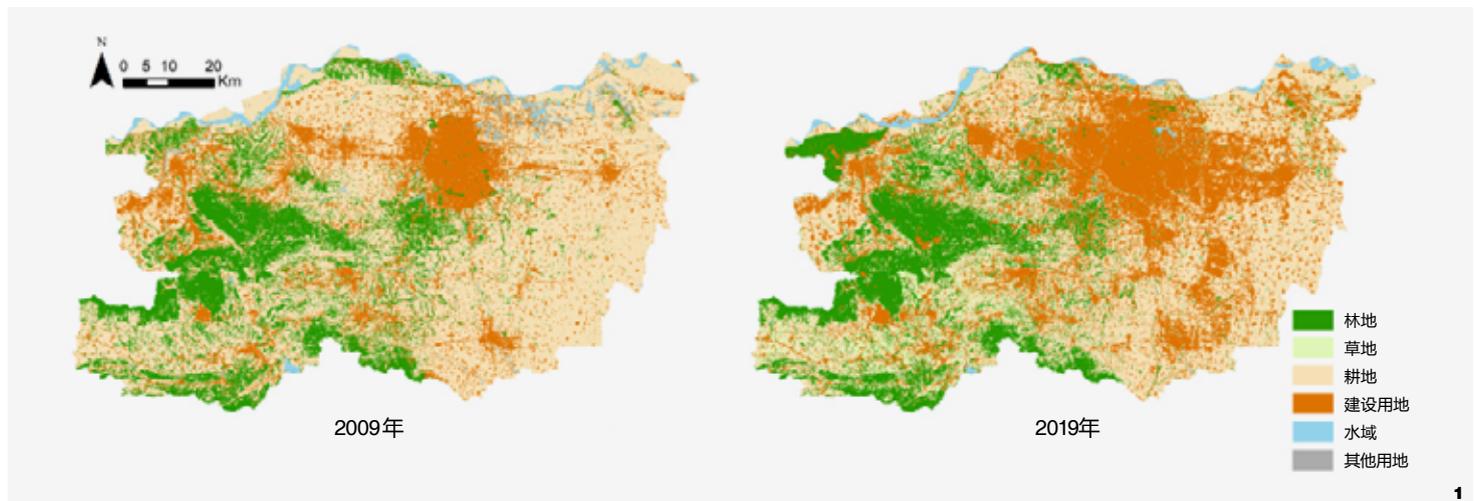


图1 郑州市2009年、2019年土地利用类型
Fig. 1 Land use types of Zhengzhou in 2009 and 2019

图2 DEM数据及交通矢量数据
Fig. 2 DEM data and traffic vector data

集。以2009年和2019年两期土地利用类型为
基础数据, 在IDRISI中使用Markov模型得到各
类土地利用类型的转移概率。本次研究将水
域设为限制条件, 将高程、坡度、距离市中
心的距离和交通现状作为4种影响土地利用
变化的因素。在此基础上根据城市生态规划
方针调整土地利用类型的转移概率, 利用层

次分析法结合多准则评价分析得到完整的土
地类型转移适宜性图集(图3)。

2 研究方法

2.1 土地利用模拟

将郑州市2019年的土地利用类型、适宜
性图集、2009-2019年的用地转移概率作为基

础数据, 在IDRISI中使用CA-Markov模型对2029
年的城市土地利用情况进行模拟。结合郑州
市发展现状及郑州市有关森林建设的相关规
划, 本次研究设置了自然发展、快速发展、
政府引导和生态城市建设4种发展情景。

情景一为自然发展, 使用2009-2019年
郑州市的土地利用转移概率, 模拟自然发展
下郑州市2029年的土地利用情况(表1), 作
为其他三类模拟情景的对比样本; 情景二为
快速发展, 参数设置为三类生态用地向建
设用地的转移概率增加20%, 模拟城市建成
区高速扩张下郑州市2029年的土地利用情
况; 情景三为政府引导, 参数设置为建设用
地、耕地、其他用地向林地、草地的转移概
率分别增加10%和5%(表2), 模拟政府调控
下各类生态用地均衡发展的郑州市2029年
的土地利用情况; 情景四为生态城市建设, 根
据《河南省“十四五”国土空间生态修复和
森林河南建设规划》《森林郑州生态建设规
划(2020-2035年)》等政策提出的森林覆盖
率、森林蓄存量等指标要求, 将参数设置为
草地、耕地、建设用地、其他用地向林地的
转移概率增加15%, 模拟森林生态城市建设

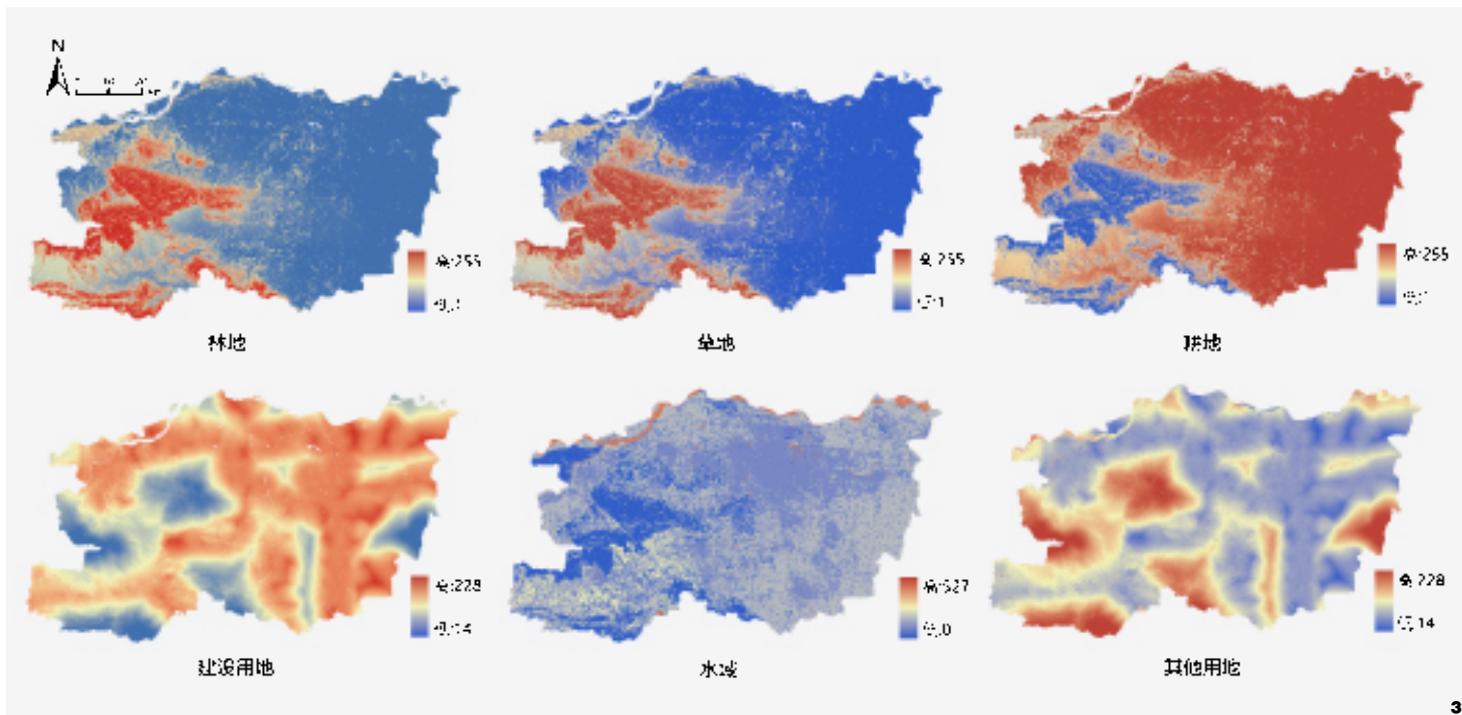


图3 适宜性图集
Fig.3 Suitability atlas

表1 情景一和情景二的土地利用面积转移概率 (单位: %)
Tab. 1 Probability of land use area transition in scenario 1 and scenario 2

用地类型 Land use type	林地 Forest		草地 Grass		耕地 Farmland		建设用地 Build		水 Water		其他用地 Other	
	情景1	情景2	情景1	情景2	情景1	情景2	情景1	情景2	情景1	情景2	情景1	情景2
林地	58.59	43.39	1.52	0.78	28.62	24.60	11.13	31.13	0.14	0.09	0.01	0.01
草地	8.32	4.52	0.11	0.06	55.60	39.71	33.73	53.73	2.24	1.98	0.00	0.00
耕地	9.79	6.54	6.51	4.73	51.74	37.11	30.78	50.78	1.17	0.84	0.00	0.00
建设用地	13.08	4.34	1.58	0.64	23.55	13.60	61.22	81.22	0.57	0.20	0.00	0.00
水	4.59	4.59	0.31	0.31	29.63	29.63	34.91	34.91	30.52	30.52	0.04	0.04
其他用地	2.57	1.46	0.01	0.01	43.90	3.80	44.01	94.01	9.50	0.71	0.00	0.00

表2 情景三和情景四的土地利用面积转移概率 (单位: %)
Tab. 2 Probability of land use area transition in scenario 3 and scenario 4

用地类型 Land use type	林地 Forest		草地 Grass		耕地 Farmland		建设用地 Build		水 Water		其他用地 Other	
	情景3	情景4	情景3	情景4	情景3	情景4	情景3	情景4	情景3	情景4	情景3	情景4
林地	68.59	73.59	6.89	1.02	15.40	18.76	8.97	6.48	0.14	0.14	0.01	0.01
草地	18.32	23.32	5.11	0.08	49.80	52.60	24.53	21.76	2.24	2.24	0.00	0.00
耕地	19.79	24.79	11.51	4.65	45.92	45.69	21.61	23.70	1.17	1.17	0.00	0.00
建设用地	23.08	28.08	6.58	1.01	19.86	20.16	49.91	50.18	0.57	0.57	0.00	0.00
水	4.59	4.59	0.31	0.31	29.63	29.63	34.91	34.91	30.52	30.52	0.03	0.04
其他用地	12.57	17.57	5.01	0.01	39.80	37.25	33.13	35.67	9.50	9.50	0.00	0.00

下郑州市2029年的土地利用情况。

2.2 生态系统健康评价

构建生态健康评价体系是研究的关键。在现有的研究中,“活力—组织力—恢复力”评价体系侧重于生理物理范畴。Rapport^[17-19]提出的生态系统健康(H)包含生态系统能否满足人类社会的需求^[20]。本次评估同时考虑生态系统本身结构与生态系统的服务价值,即:“生态系统物理健康(PH) + 生态系统功能健康(FH)”两部分组成的评价指标体系。计算见公式(1)。

$$H = \sqrt[2]{PH \times FH} \quad (1)$$

2.2.1 生态系统物理健康 (PH)

生态系统物理健康包含活力、组织力、恢复力,计算见公式(2),其中生态系统活力(V)使用植物净初级生产力(NPP)衡量^[21](表3)。

$$PH = \sqrt[3]{V * O * R} \quad (2)$$

生态系统组织力(O):即生态系统的结构稳定性。结合前人研究^[22],通过Fragstats4.2进行测算,从景观异质性(LH)、景观连通性(LC)和森林连通性(CC)三个方面选取SHDI、AWMPFD、FN1、CONT、FN2、COHESION 6个景观指数用于评估组织力。考虑到景观异

质性与景观连通性通常呈正向关联,在景观异质性较高的区域内,景观类型间通常也有较好的连接,两者同等重要,因此将两者权重均设定为0.35。考虑到森林斑块是城市生态系统稳定性的主要提供者,能提高生态系统的适应性,因此将森林连通性的权重设定为0.3。由此则有公式(3)。

$$\begin{aligned} O &= 0.35 \times LH + 0.35 \times LC + 0.3 \times CC \\ &= 0.25 \times SHDI + 0.1 \times AWMPFD + 0.25 \times FN1 \\ &\quad + 0.1 \times CONT + 0.2 \times FN2 + 0.1 \times COHESION \end{aligned} \quad (3)$$

生态系统恢复力(R)指生态系统受到外界干扰后恢复原有功能的能力,又称生态系统的弹性。根据现有研究确定生态系统恢复力的量化和评估标准,得出 R 的数值^[23],其公式为(4)。其中, S_i 为第 i 类土地利用类型的面积; R_i 为对应土地利用类型的恢复力系数。详见表4。

$$R = \sum_{i=1}^n S_i \times R_i \quad (4)$$

2.2.2 生态系统功能健康 (FH)

生态系统功能健康主要考量生态系统给人带来的功能价值,可通过生态系统服务价值(ESV)进行计算。本文根据中国单位面积生态系统服务价值当量表^[24](表5),使用当量因子法计算各土地利用类型的供给、调

节、支持、文化4类服务价值。生态系统服务价值当量因子是指生态系统产生生态服务价值当量因子的潜在能力,定义为1 hm²全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值^[24],其公式为(5)。式中, T_a 表示研究区在研究期间内作物的平均基准单产, T_b 表示对应作物的单价,1/7指在无人力耕作条件下,自然生态系统的食物生产服务经济价值量是人工耕作下的1/7。

$$C_{crop} = \frac{1}{7} T_a \times T_b \quad (5)$$

根据《郑州统计年鉴》(<https://tj.zhengzhou.gov.cn>),郑州市主要粮食经济作物为小麦。2009年至2019年郑州市小麦平均基准单产为4708.88 kg/hm²,最低单价为2.26元/kg,计算得到单个当量因子的价值量约为1520.296元。对应土地利用类型的生态系统服务价值总当量系数,对应土地利用类型的面积、单个当量因子的经济价值量的乘积即为研究区的生态系统服务价值总量,其公式为(6)。式中,ESV代表生态系统服务价值总量, V_i 代表第 i 类土地利用类型的生态系统服务价值总当量系数, A_i 代表第 i 类土地利用类型的面积, E_f 代表单个当量因子的经济价值量。

$$ESV = \sum_{i=1}^n V_i \times A_i \times E_f \quad (6)$$

表5中的农田、森林、林地、灌草丛、裸地、水系分别对应本研究中土地利用类型

表3 不同土地利用类型的NPP值^[21]
Tab. 3 NPP values of different land use types

土地利用类型 Land use type	林地 Forest	草地 Grass	耕地 Farmland	建设用地 Build	水 Water	其他用地 Other
NPP/ (gC/m ² *a)	642.9	382.8	426.5	347.1	236.8	80.9

表4 不同土地利用类型的生态系统恢复力系数^[22]
Tab. 4 Ecosystem resilience coefficients of different land use types

土地利用类型 Land use type	林地 Forest	草地 Grass	耕地 Farmland	建设用地 Build	水 Water	其他用地 Other
恢复力系数 (R_i)	0.85	0.73	0.47	0.27	0.77	1

中的耕地、林地、草地、其他用地、水域。考虑到高密度城市建成区内的建设用地难以提供生态系统服务价值，因此对该类用地的生态系统服务总当量系数赋值为0。将土地利用类型面积和对应系数代入上述公式，计算得出郑州市的生态系统服务价值。

3 结果与分析

3.1 土地类型变化分析

结合土地利用模拟结果及各类土地面积比例(表6, 图4)得知, 郑州市2009-2019年间耕地与建设用地变化趋势明显, 耕地降低14%, 建设用地增加11.5%。该变化主要发生在郑州市中心城区与耕地的交界处及市区东南方向, 主因是近10年来郑州市高速城市化过程中的主城区扩张、郑汴一体化建设及郑州航空港经济区的建设。

2029年自然发展情景下, 与2019年相比, 林地增加0.67%, 草地增加0.19%, 耕地减少5.54%、建设用地增加4.69%, 水域减少0.005%, 其他用地增加0.0001%, 建设用地以城市扩张的形式增加在主城区周围和航空港区, 且原位置为耕地的转化最为常见, 城市发展延续了前十年的规律, 以减少耕地为代价不断扩张建设用地, 生态用地微弱增加, 未能跟上城市扩张的步伐。

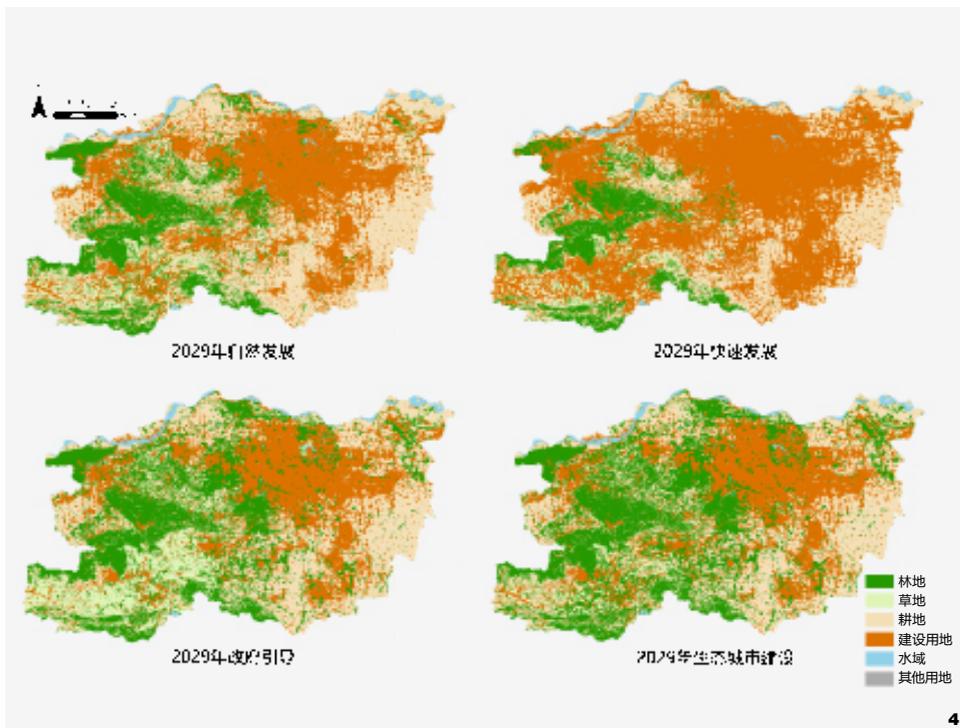


图4 2029年4种发展情景下的土地利用类型
Fig. 4 Land use types under four development scenarios in 2029

2029年快速发展情景下, 与2019年相比, 林地减少6.61%、草地减少1.04%、耕地减少16.55%、建设用地增加24.2%、水域减少0.008%、其他用地减少0.002%。建设用地扩张对耕地、林地的破坏程度显著, 主城区与县域城市趋向融合, 建设用地大幅增加。

2029年政府引导情景下, 与2019年相

比, 林地增加10.48%、草地增加5.20%、耕地减少12.07%、建设用地减少3.6%、水域减少0.006%、其他用地减少0.002%。林地、草地均衡增加, 建设用地扩张得到有效抑制, 新增的林地、草地主要由耕地转化而来。

2029年生态城市建设情景下, 与2019年相比, 林地增加15.38%、草地减少0.90%、

表5 中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表^[24]
Tab. 5 Ecological service value equivalent table per unit area of China's terrestrial ecosystems

土地类型 Land use type	供给 Supply	调节 Regulatory	支持 Support	文化 Cultural	总当量 Total equivalent
农田	1.27	1.4	1.28	0.06	4.01
森林	1.29	15.34	5.26	1.06	22.95
灌草丛	1.25	12.72	4.76	0.96	19.69
裸地	0	0.15	0.04	0.01	0.2
水系	9.32	110.85	3.55	1.89	125.61
建设用地	0	0	0	0	0

耕地减少11.07%、建设用地减少3.18%、水域减少0.006%、其他用地减少0.002%。生态城市建设使得林地有显著增加,而草地、耕地等有所减少,新增的林地主要由耕地转化而来。

3.2 生态系统健康评估结果

根据生态系统健康评估结果(表7),2029年自然发展情景下的生态系统功能健康、生态系统物理健康、生态系统健康值均有微弱降低,降幅分别为0.27%、0.19%、0.23%,主因是按照当前城市扩张趋势,建设用地将继续增加,耕地将减少,林地、草地、水域等生态用地受城市扩张胁迫缓慢增加。

2029年快速发展情景下的生态系统功能健康、生态系统物理健康、生态系统健康值

均有明显降低,降幅分别为26.39%、6.47%、17.03%,最不利于生态系统健康,主因是城市的快速扩张侵占了林地、草地,生态系统物理健康、功能健康也随生态用地的减少而大幅降低。

2029年政府引导情景下的生态系统功能健康、生态系统物理健康、生态系统健康值均有明显增加,增幅分别为32.71%、5.42%、18.28%,此情景下各生态用地均衡发展,生态系统服务价值大幅增加,生态系统健康值也随之大幅增加。

2029年生态城市建设情景下的生态系统功能健康、生态系统物理健康、生态系统健康值均有明显增加,增幅分别为32.17%、7.17%、19.01%,此情景的生态系统健康值增幅最佳,主因是林地的大幅增加使区域活力、

恢复力、生态系统功能健康大幅增加。

3.3 多情景发展分析

根据健康评估结果,生态城市建设情景下,城市生态系统健康值增幅最高,达到19.01%,表明坚持生态城市建设,加大林地保护和森林规划建设对于城市生态系统健康最有益。政府引导发展情景下健康值增幅为18.28%,仅次于生态城市建设,在提供生态系统服务价值方面高出生态城市建设情景0.54%,表明该发展情景下,生态系统健康度和生态系统服务价值实现了均衡发展。然而,在快速发展情景下,健康值却降低了17.03%,这表明在快速发展情景下,建设用地扩张远远超过了生态用地扩张,对城市森林生态系统健康产生了不利影响。

表6 土地利用类型面积和比例
Tab. 6 Area and proportion of land use types

土地类型 Land use type	2009年 Year 2009		2019年 Year 2019		情景一 Scenario 1		情景二 Scenario 2		情景三 Scenario 3		情景四 Scenario 4	
	面积/km ²	比例/%										
林地	1 427.43	18.667	1 493.2200	19.501	1 546.6790	20.167	989.0100	12.896	2 298.9690	29.976	2 675.0820	34.880
草地	36.47	0.477	267.9830	3.500	283.0761	3.691	188.8443	2.462	667.1898	8.699	199.5273	2.602
耕地	4 421.56	57.821	3 344.2200	43.675	2 924.3270	38.130	2 080.3810	27.126	2 424.2570	31.610	2 483.7910	32.386
建设用地	1 540.05	20.139	2 422.6900	31.640	2 786.4400	36.332	4 282.7430	55.842	2 150.2950	28.038	2 182.3190	28.455
水域	214.36	2.803	128.6480	1.680	128.4606	1.675	128.2347	1.672	128.4282	1.675	128.4300	1.675
其他用地	7.08	0.093	0.3069	0.004	0.3177	0.004	0.1539	0.002	0.1683	0.002	0.1728	0.002

表7 生态系统健康评估结果
Tab. 7 Ecosystem health assessment results

生态系统健康指数 Ecosystem Health Index	2019年 Year 2019		情景一 Scenario 1		情景二 Scenario 2		情景三 Scenario 3		情景四 Scenario 4	
	数值	变化幅度/%	数值	变化幅度/%	数值	变化幅度/%	数值	变化幅度/%	数值	变化幅度/%
V	3 360 289	0	3 347 656	-0.38	3 112 325	-7.38	3 544 146	5.47	3 643 435	8.43
O	15.99	0	16.15	0.95	16.68	4.25	15.81	-1.18	16.10	0.64
R	3 790	0	3 747	-1.13	3 212	-15.27	4 260	12.40	4 275	12.80
ESV	891 414	0	888 984	-0.27	656 167	-26.39	1 182 986	32.71	1 178 187	32.17
PH	5 884	0	5 873	-0.19	5 503	-6.47	6 203	5.42	6 306	7.17
H	72 423	0	72 256	-0.23	60 092	-17.03	85 661	18.28	86 194	19.01

4 土地利用规划启示

4.1 基于生态系统健康数值空间分布的土地利用规划启示

根据郑州市生态系统健康值空间分布(图5),生态系统健康数值较高的区域与森林资源空间分布情况重合。高值区域主要包含嵩山国家森林公园、西北部黄河沿线区域、黄河湿地、浮戏山等位置。城市建成区内的高值区域主要是公园绿地斑块,但这些斑块与西部山地、丘陵之间的生态廊道连接度较低,未形成绿地网络系统。

通过对比生态城市建设情景和政府引导发展情景可以发现,两者的生态健康高值区分布较为稳定,并呈现正向分布。在政府引导情景下,郑州市西南象限(郑登快速通道沿线)出现大量均质化高值区域。结合图4可知,主因是该区域草地的发展,而生态城市建设场景在此位置则呈现出散点高一高聚类的分布态势。对城市土地利用规划的启示是:应持续在市域西侧、北侧、西南侧等邻近生态源地的中低值区域增加生态用地规划,以衔接来自西部高值区域的生态空间延伸,进而提升高值区域的集聚性。

进一步对比自然发展情景和快速发展情景可以发现,后者的低值区域在建成区边缘出现明显扩张态势,对以耕地为主体所构成的中值区域造成严重侵蚀,生态源地边缘的中高值区域也被割裂。结合图4可知,主因是建成区与乡镇建设用地的过度开发占用了原位置耕地,同时阻隔了林地扩张的潜在生态廊道。对城市土地利用规划的启示是:应严格控制城市边缘区的建设用地开发,坚守耕地红线,在乡镇聚落的集约规划建设方面也应避免对潜在生态廊道的破坏。

再对比自然发展情景和两类生态系统健

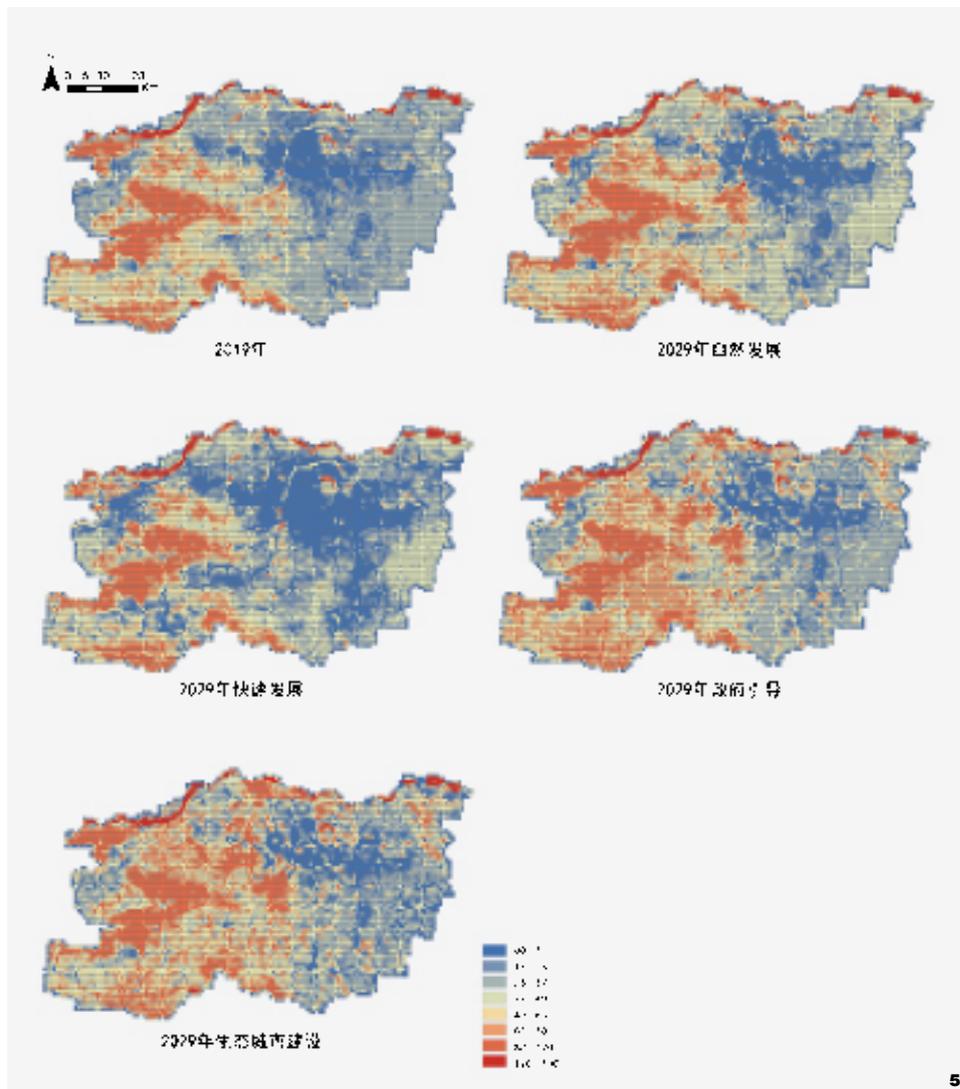


图5 生态系统健康数值空间分布图
Fig. 5 Spatial distribution map of ecosystem health value

康值较高的情景可以发现,后两者的高值区域在生态源地与耕地交界处大量扩张,并呈集聚分布的趋势,且中高值区域在原有优势生态廊道处增加明显。结合图4可知,这种变化的主因是生态用地数量和面积的大量增加。对城市土地利用规划的启示是:应持续增加生态源地周围的森林的数量和面积,同时加强廊道建设连接原有孤岛绿地,增强城市森林生态系统的抵抗力。

4.2 基于森林斑块演化分析的土地利用规划启示

根据郑州市绿色基础设施网络要素分布图(图6),可知核心斑块呈西高东低的分布趋势,主要集中在西部山脉和丘陵地区,这些区域拥有绝大多数的森林资源。森林退化表现为大量桥接区被建设用地占用,造成了森林斑块破碎度增加,使得森林边缘的核心区转化为孤岛。森林覆盖率增加的主因是原桥

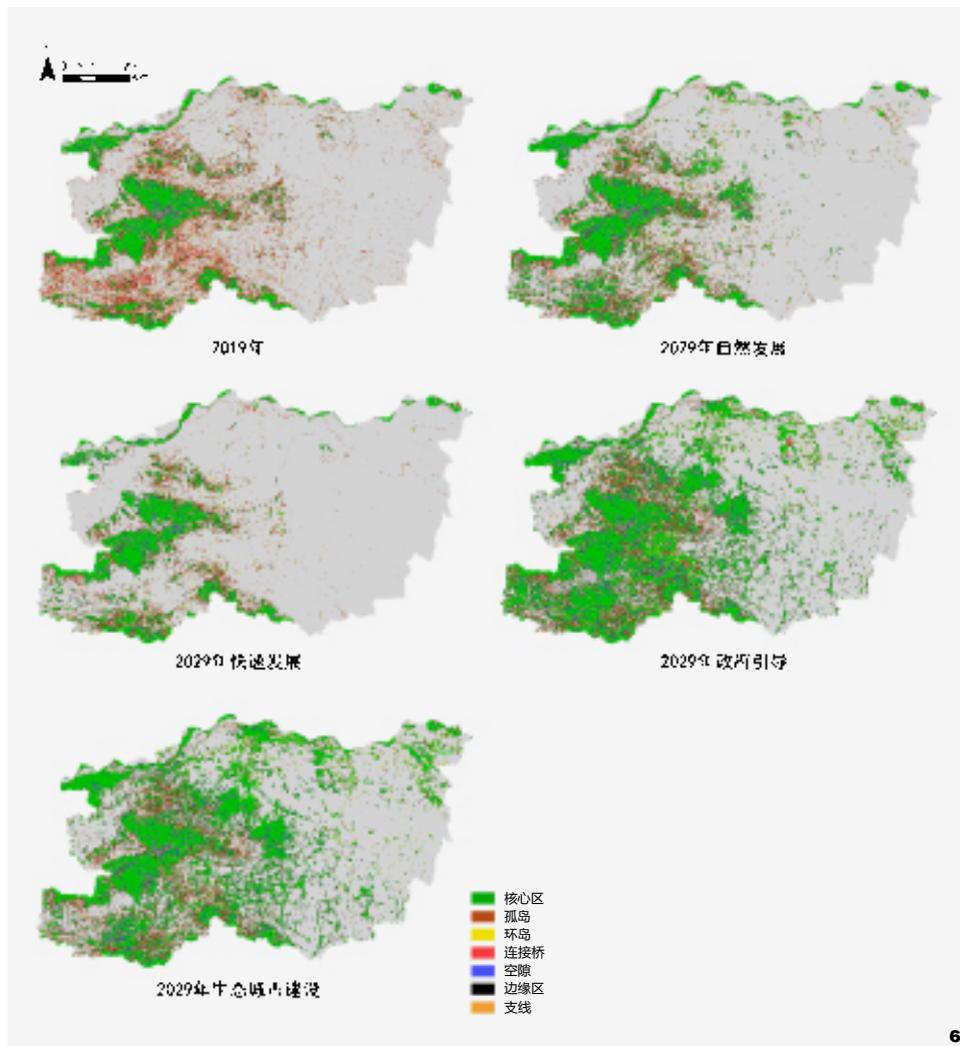


图6 绿色基础设施网络要素分布图
Fig. 6 Distribution map of green infrastructure network elements

接区(连接桥)大量转化为核心区,这些桥接区的扩张联通了林地孤岛和建成区内的林地斑块,从而使景观连通性得到较好发展。

对比生态城市建设情景和政府引导发展情景可以发现,后者的生态系统服务价值虽高出0.54%,但各生态用地均匀发展的模式将阻碍森林斑块的增加,其生态系统活力将显著低于前者,因此健康评估结果也将低于生态城市建设发展情景。所以,生态城市建设发展模式最利于城市生态系统健康。对土

地利用规划的启示是:城市土地利用规划应与林地的自然增长规律相匹配,在高增量生态廊道处增加片林建设,可实现指数增长。同时,加快桥接区的发展以连接林地孤岛,为形成更多核心斑块建立基础。

进一步对比自然发展情景和快速发展情景可以发现,后者的森林斑块大量消失,主要表现在主城区西南方向原属白庙镇和岳村镇区域内的低坡度林地、主城区西部五云山和万山区域的林地、主城区北部邙山地区林

地、登封市城区南部大金店镇和东华镇内的低坡度林地等区域,以上森林斑块的消失使主城区完全孤立于西部山地与北部黄河湿地等高质量生态区域之外,使得嵩山与箕山之间的连接度大幅降低,城市森林廊道潜在延伸空间被阻隔。对土地利用规划的启示是:应着重控制城市边缘扩张和生态源地位置的乡镇建设用地增加,从而避免建设用地对森林生态空间和耕地生产空间造成威胁,以达到保护林地孤岛高危区和弱抵抗力生态廊道的目的。

再对比自然发展情景和两类较高生态系统健康值情景可以发现,后者在生态用地斑块上大幅增加,主要增加在龙湖北部区域、贾鲁河沿线绿地、黄河南岸沿岸林地(东起京港澳高速,西至邙山地区)、南水北调沿岸绿地、万山一嵒山林地等区域,且上述区域构成了环状绿地系统,使城市绿道与主城区外侧的森林斑块紧密连接。对土地规划的启示是:在潜在城市生态廊道处规划林地,加强城区与西部森林生态斑块的空间连接度以优化城市森林生态空间格局,发挥森林可持续化的生态服务功能。

5 结论与讨论

本文基于郑州市的城市规划政策和发展目标,设置了4种不同的城市发展模式,使用CA-Markov模型,通过设定各发展情景下的转移概率模拟未来城市土地利用状况,同时构建了活力—组织力—恢复力—生态系统服务价值模型,对各发展模式进行城市森林生态系统健康评价,结合郑州市生态系统健康空间分布和城市森林斑块分布情况,分析得出有利于城市森林健康的土地利用策略。

评价结果显示,相较于2019年,生态城市建设情景与政府引导情景的健康值有显著

增加,分别为+19.01%、+18.28%,自然发展情景的健康值有微弱减少,为-0.23%,快速发展情景的健康值则大幅减少了17.03%。这表明,坚持生态城市建设,增加林地核心斑块的面积和数量,加强生态廊道建设和森林规划建设最利于城市生态系统健康。对土地利用规划的启示可从4类区域概括:(1)对于耕地生产区,应严格控制农村宅基地建设,推行集约化发展,严守耕地红线;(2)对于城市建成区,应在潜在生态廊道处规划林地,将西部山区的核心生态斑块与建成区内的绿地孤岛进行有机衔接,从而优化林地空间布局;(3)对于城乡缓冲区,应严格控制建设用地,将城市边缘区的村落有序纳入城市规划建设,同时增补耕地;(4)对于林草生态区,应在高增量生态廊道处规划林地,拓宽森林发展空间,同时控制郊区乡镇建设用地的不合理开发,全面保护森林边界。

与前人的研究相比,本研究的意义在于将多情景下的土地利用模拟与MSPA形态学分析相结合,深度挖掘并识别潜在生态廊道和高增量生态廊道,在土地利用规划策略上实现远瞻性规划,将林地资源规划至关键区域以获取最大化的林地扩张增益,从而高效增加城市核心斑块的面积和数量,进而优化城市的林地空间布局,达到提升城市森林生态系统健康的目的。未来的工作包括:(1)采用更高精度的土地利用类型基础数据,以准确识别小型生态廊道、潜在桥接区和薄弱桥接区,用以指导林地高增量区和薄弱区的林地规划建设;(2)在评价体系方面,使用动态模型评价生态系统的活力和恢复力,并充分考虑社会驱动因素的影响;(3)在土地利用模拟方面,将通过梯度设定转移概率,获取更全面的土地利用模拟结果。

注:文中图表均由作者自绘。

参考文献

- [1] 赵正,韩锋,侯一蕾.基于Meta回归方法的中国城市森林生态系统服务功能价值再评估[J].长江流域资源与环境,2021,30(01):64-75.
- [2] 傅丽华,谢炳庚,张晔.长株潭核心区土地利用生态风险多尺度调控决策[J].经济地理,2012,32(07):118-122.
- [3] 吴左宾,钟飞.实施评估导向的城市土地利用优化路径探究——以高洛市中心城区为例[J].现代城市研究,2020(06):95-102.
- [4] 李锋,马远.城市生态系统修复研究进展[J].生态学报,2021,41(23):9144-9153.
- [5] COSTANZA R, NORTON B G, HASKELL B D. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management[M]. Washington, D. C.: Island Press, 1992: 239-256.
- [6] CARPENTER S R. Complex Systems: Spatial Signatures of Resilience[J]. Nature, 2013, 496(7445): 308-309.
- [7] 赵艳,徐正春,温秀军,等.广州市城市森林健康评价[J].中国城市林业,2018,16(03):12-16.
- [8] 燕守广,李辉,李海东,等.基于土地利用与景观格局的生态保护红线生态系统健康评价方法——以南京市为例[J].自然资源学报,2020,35(05):1109-1118.
- [9] 谷瑞丽,多玲花,邹自力,等.黄河下游城市群生态系统健康时空演变特征[J].水土保持通报,2022,42(06):285-292.
- [10] 刘一鸣,徐媛媛,曾辉.中国东海岸带地区生态系统健康评估及其尺度依赖性[J].生态学报,2022,42(24):9913-9926.
- [11] 王立彬.中共中央、国务院出台《关于加强耕地保护和改进占补平衡的意见》[J].城市规划通讯,2017(3):5.
- [12] 赵林峰,刘小平,刘鹏华,等.基于地理分区与FLUS模型的城市扩张模拟与预警[J].地球信息科学学报,2020,22(03):517-530.
- [13] ABURAS M M, HO Y M, RAMLI M F, et al. Improving the Capability of an Integrated CA-Markov Mode to Simulate Spatio-Temporal Urban Growth Trends Using an Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 59: 65-78.
- [14] 罗双晓,何政伟,高菁,等.基于CA-Markov模型的天府新区土地时空变化预测[J].水土保持研究,2018,25(03):157-163.
- [15] 倪永薇,刘阳,阎姝伊,等.基于区域生态系统健康评估的土地利用规划研究——以北京市为例[J].中国园林,2020,36(9):110-115.
- [16] 刘强,杨众养,陈毅青,等.基于CA-Markov多情景模拟的海南岛土地利用变化及其生态环境效应[J].生态环境学报,2021,30(07):1522-1531.
- [17] RAPPORT D J, COSTANZA R, MCMICHAEL A J. Assessing Ecosystem Health-Reply[J]. Trends in Ecology and Evolution, 1998, 13: 397-402.
- [18] COSTANZA R. Ecosystem Health and Ecological Engineering[J]. Ecological Engineering, 2012, 45(8): 24-29.
- [19] RAPPORT D J, BOHM G, Buckingham D, et al. Ecosystem Health: The Concept, the ISEH, and the Important Tasks Ahead[J]. Ecosystem Health, 1999, 5(2): 82-90.
- [20] PENG J, LIU Y, WU J, et al. Linking Ecosystem Services and Landscape Patterns to Assess Urban Ecosystem Health: A Case Study in Shenzhen City, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 143: 56-68.
- [21] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
- [22] DAN X, ZHUANG C, DI X, et al. Land Use Change and Ecosystem Health Assessment on Shanghai—Hangzhou Bay, Eastern China[J]. Land, 2022, 11: 867.
- [23] PENG J, LIU Y, LI T, et al. Regional Ecosystem Health Response to Rural Land Use Change: A Case Study in Lijiang City, China[J]. Ecological Indicators, 2017, 72: 399-410.
- [24] 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.