

DOI: 10.20103/j.stxb.202501090079

邱大鹅, 张军以, 杨晓雪, 齐渴路. 基于 XGBoost-PLUS 模型的成渝城市群生态安全格局多情景模拟及反规划优化. 生态学报, 2025, 45(16): - .
Qiu D E, Zhang J Y, Yang X X, Qi K L. Multi-scenario simulation and future planning optimization of ecological security pattern of Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on XGBoost-PLUS model. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(16): - .

基于 XGBoost-PLUS 模型的成渝城市群生态安全格局多情景模拟及反规划优化

邱大鹅¹, 张军以^{1,2,*}, 杨晓雪¹, 齐渴路¹

¹ 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331

² 三峡库区地表过程与生态修复重庆市重点实验室, 重庆 401331

摘要: 工业化城镇化快速发展导致土地利用/土地覆被剧烈变化, 造成了土地退化、生物多样性丧失等一系列生态环境问题。基于未来长时间序列土地利用变化的生态安全格局共性问题, “反规划”提出优化策略, 就成为应对不确定发展情境下区域生态安全的重要途径。以成渝城市群为研究区, 使用 InVEST、PLUS 模型、XGBoost 机器学习算法等方法, 提取潜在生态源地, 优化生态阻力面空间权重分配, 识别多种发展情境下成渝城市群生态安全格局共性问题并提出优化策略。结果表明: (1) 成渝城市群 2020 和 2035 年 (NDS、CPS、EDS、EPS) 生态源地分别为 53、51、50、43、51 个, 面积为 24892.75、24462.57、24119.43、23833.75、27249.36 km², 空间呈“U”型半包围结构, 集中分布在成渝城市群边缘; (2) 2020 和 2035 年不同发展情景下成渝城市群生态廊道呈“边缘贯通-中疏-东密”的网状结构, 生态夹点集中分布在川东平行岭谷区, 生态障碍点广泛分布在以成都平原为核心的长距生态廊道中部; (3) 基于多种发展情境下生态安全格局共性问题“反规划”构建了“一轴两带四区多点”的生态安全优化格局。研究结果可为成渝城市群社会经济与生态安全建设协调发展提供科学依据。

关键词: XGBoost 机器学习; PLUS 模型; 生态安全格局; 电路理论; 成渝城市群

Multi-scenario simulation and future planning optimization of ecological security pattern of Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on XGBoost-PLUS model

QIU Dae¹, ZHANG Junyi^{1,2,*}, YANG Xiaoxue¹, QI Kelu¹

¹ School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

² Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Ecological Restoration in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China

Abstract: The rapid advancement of industrialization and urbanization triggered dramatic land use/land cover changes, leading to a series of ecological challenges such as land degradation and biodiversity loss. Addressing the common constraints of ecological security patterns under future long-term LULC change sequences, the “anti-planning” approach proposed optimization strategies as a critical pathway to safeguard regional ecological security amid uncertain development scenarios. Focusing on the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration, this study integrated methodologies including the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) model, Patch-generating Land Use Simulation (PLUS) model, and eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) machine learning algorithm to identify potential ecological sources, optimize spatial weight allocation of ecological resistance surfaces, and diagnose common ecological security patterns challenges across multiple development scenarios. Key findings included: (1) The number of ecological sources in 2020

基金项目: 国家社会科学基金一般项目 (23BJY156)

收稿日期: 2025-01-09; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hellojunyi@cqnu.edu.cn

and 2035 under NDS, CPS, EDS, and EPS scenarios were 53, 51, 50, 43, and 51, respectively, with corresponding areas of 24,892.75 km², 24,462.57 km², 24,119.43 km², 23,833.75 km², and 27,249.36 km². These sources exhibited a “U-shaped semi-enclosed” spatial configuration, predominantly clustered along the periphery of the urban agglomeration. (2) Ecological corridors under all scenarios displayed a “peripherally connected, sparser in central areas, and denser in eastern regions” network structure. Ecological pinch points concentrated in the eastern Sichuan parallel ridge-valley area, while ecological barrier points were widely distributed along the mid-sections of long-span corridors centered on the Chengdu Plain. (3) An optimized ESP framework of “one axis, two belts, four zones, and multiple nodes” was constructed via the “anti-planning” approach, resolving common ESP constraints across scenarios. This study provided a scientific foundation for harmonizing socio-economic growth with ecological security in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration.

Key Words: eXtreme Gradient Boosting algorithm; Patch-generating Land Use Simulation model; ecological security pattern; circuit theory; Chengyu urban agglomeration

随着全球工业化、城镇化的快速持续发展,产业和人口加速集聚,极大的改变了区域土地利用与土地覆盖(Land Use and Land Cover, LULC),尤其是城市规模的急剧扩张和农业生产的快速发展挤占大量生态用地,造成区域“三生”空间结构性冲突,出现了自然景观破坏、生物多样性丧失、土地退化以及加速全球气候变暖等一系列全球性生态环境问题,加剧了区域经济社会发展与生态保护的矛盾,部分区域生态安全面临着严重挑战^[1-3]。生态安全格局是支撑区域社会经济的基础,合理构建区域生态格局是调节区域社会经济与生态保护协调发展的关键路径^[4-5]。近年来,生态安全格局在景观生态学、城市规划等方面广泛运用,研究涉及生态网络时空演变^[6]、生态系统服务供需补偿^[7-8]、生态系统服务驱动机制等方面^[9-11]。研究由早期静态评估、定性分析发展到阻力累积模型^[11]、电路理论^[12]、CLUE-S、MarKov 等动态模拟、定量评价^[13-16],其中耦合 FLUS、OS-CA 和 PLUS 等模型^[17-19],基于未来 LULC 变化的区域生态安全格局研究发展迅速。但基于长时间序列、多情境 LULC 的生态安全格局研究和机器算法的生态要素识别仍显不足。

目前,基于“源地提取-阻力面构建-廊道识别”的生态安全识别逻辑能够综合考虑不同生态要素的内在联系^[20-21],已成为生态安全格局构建的基本范式^[22-25]。生态源地识别主要通过自然保护区、大面积连续生态林地等定性方法及生态系统服务供需比、形态学空间格局等定量方法提取^[26-27],但以上方法并未考虑各类土地覆被的内部差异,易造成生态源地错选漏选。生态阻力面的空间分布直接影响生态廊道模拟的准确性^[26],多采用德尔菲法赋予地类阻力值^[13,16],再结合区域土壤类型、不透水面指数、坡度、降水量等因子进行修正^[28-29]。修正因子阈值设定、权重分配存在主观性,导致生态阻力面空间权重阈值分配不合理。XGBoost 机器算法可通过分析生态阻力样本点揭示全域阻力因子的空间分布概率,能客观反映生态阻力的空间分布,有效改善阻力面空间权重阈值分配不合理问题。生态廊道作为生态源地间物质与能量流通的桥梁^[30],多采用阻力模型与电路理论提取^[31-33]。生态源地、生态阻力面等生态要素的精准提取是有效优化生态安全格局的基础^[34-35]。当前生态要素提取存在空间权重阈值设定失准、错选漏选等问题,导致以生态要素识别为基础的“要素-格局识别-格局优化”研究,因生态要素识别不准出现生态格局优化的“多米诺骨牌效应”。

区域生态安全格局呈现显著的时空动态特征,其演变过程主要受经济发展模式与人类活动方式的不确定性构成外源驱动和产业结构升级与社会经济转型加速“迭代”的内生变革驱动,区域生态安全格局的动态变化幅度加剧。基于历史-当前时间尺度构建的生态安全格局,传统通过预设发展目标引导生态空间配置的方法就存在一定时滞效应。“反规划”通过识别区域可能存在的發展路径与不同路径发展的共性约束,提出整体性、长期性空间底层框架解决了传统预设发展目标的不足。故引入 XGBoost 等机器算法提高生态要素识别精度,并基于多情景下 LULC 生态安全格局共性问题,从“反规划”视角优化生态安全格局,实现了从单一要素调控向统筹生态要素协调性、系统性的生态系统综合管理转型,就成为应对生态安全格局动态波动加剧的有效手段。

成渝城市群是我国西部地区发展水平最高、发展潜力最大的城市群。随着长江经济带、西部大开发、“一带一路”等发展战略的深入推进,成渝城市群社会经济与生态可持续性发展的矛盾日益突出。文章以成渝城市群为研究区,基于“源地提取-阻力面构建-廊道识别”的路径,使用 XGBoost 机器算法、InVEST、PLUS 模型等,从格网尺度测算生态系统服务价值,提取生态源地,优化生态阻力构建,识别不同发展情景下的生态安全格局共性问题,提出反规划的优化策略,以期成渝城市群社会经济与生态建设协调发展提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

成渝城市群位于我国西南地区,地形以平原、山地和丘陵为主,地势中间低四周高,地貌类型复杂多样,属于亚热带季风气候,年均降水量 1000—1300mm,是长江重要的水源涵养区,也是全国生物多样性保护重点区,生态地位极其重要。成渝城市群包含四川 15 个市、重庆 29 个区县,总面积 18 余万 km^2 ,2023 年常住人口约为 1.01 亿人,GDP 为 8.20 万亿元,占全国 GDP 总量的 6.5%,是我国西部地区重要的经济增长极。区域经济社会加速发展,LULC 变化显著(图 1),人类活动空间与生态空间的交织与冲突日益加剧,科学构建生态安全格局就成为实现区域经济社会与生态建设协调发展的前置基础。

1.2 数据来源及预处理

主要数据包含:(1)2010、2015、2020 年土地利用数据来源于资源环境与科学数据中心(<https://www.resdc.cn>),空间分辨率为 30m,重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地;(2)高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率 30m;(3)30m 空间分辨率的植被归一化指数来源于国家科技基础条件平台-国家科学数据中心(<http://www.nesdc.org.cn>);(4)人口密度、经济密度、气温、降水数据均来自于中科院资源环境与科学数据中心(<https://www.resdc.cn>)空间分辨率为 1000m;(5)土壤数据来源于世界土壤数据库(<https://www.resd.cn>);(6)道路、行政边界、研究区地表水体等地理信息数据均来自全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn>)。栅格数据分辨率重采样为 $500\text{m}\times 500\text{m}$,空间参考统一转换为 WGS1984_UTM_Zone_49N。

2 研究方法

基于《资源环境承载力与国土空间开发适宜性评价导则(试行)》,结合成渝城市群自然、经济社会发展特征,提出研究流程(图 2):1)PLUS 模型预测 2035 年成渝城市群多发展情景下的土地利用情况;2)测算成渝城市群 2020、2035 年多发展情景下的生态系统服务价值;InVEST 模型评估生态系统服务重要性,提取生态源地;3)XGBoost 机器算法构建修正生态阻力面;4)电路理论提取生态要素,识别生态安全格局并提出优化策略。

2.1 土地利用多情景模拟

以 2010、2015 和 2020 年土地利用数据为基础,利用 PLUS 模型模拟 2035 年多发展情景下的土地利用类型。考虑模型准确性和区域自然环境、社会经济和交通可达性因素,选取坡度、坡向、夜间灯光和人口密度等 12 个土地利用发展驱动因子^[36—37]。

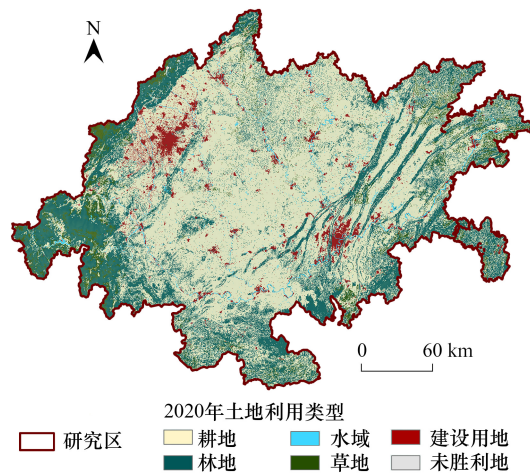


图 1 研究区土地利用概况

Fig.1 Overview of Land Use in the Research Area

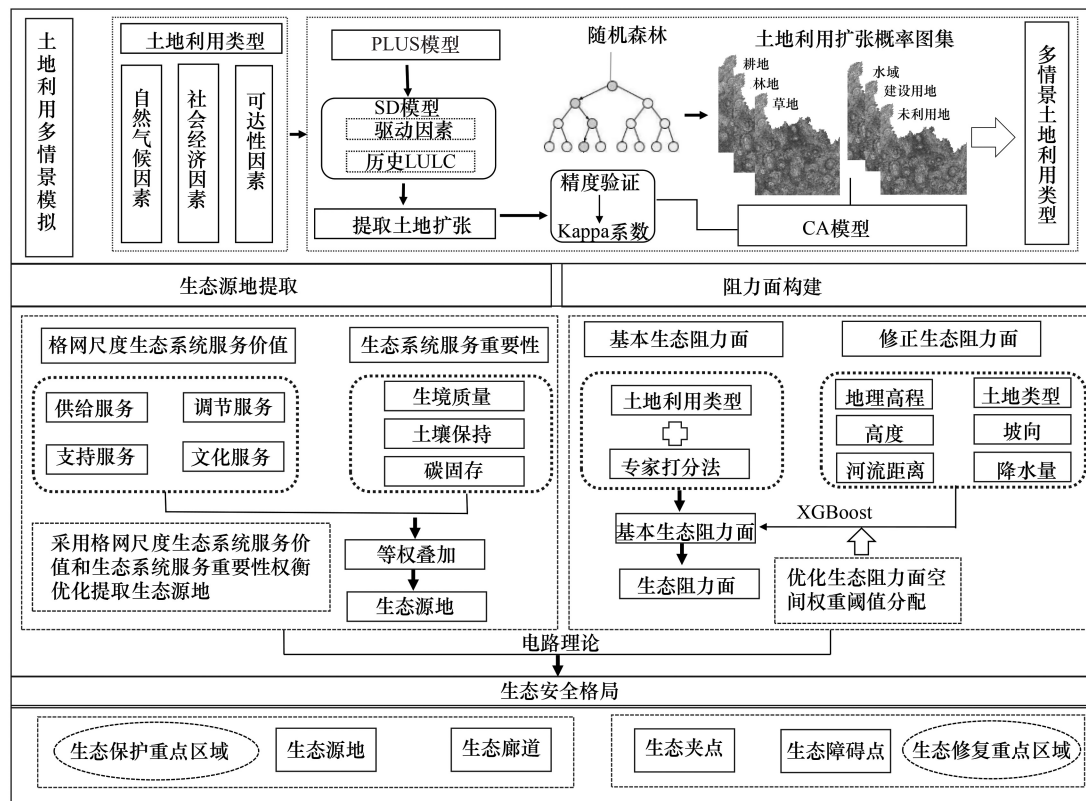


图2 生态安全格局识别流程

Fig.2 Ecological security pattern recognition process

(1)精度验证。通过 Kappa 系数对模拟结果验证,数值越接近 1,模拟精度越高,当数值超过 0.75 时,模拟结果可信度较大^[38]。文章 Kappa 系数为 0.85,总体精度为 0.91,可用于成渝城市群未来土地利用变化模拟。

(2)情景模拟。结合成渝城市群自然、经济社会发展特征,设置了 2035 年惯性发展情景 (Natural Development Scenario, NDS)、耕地保护情景 (Cropland Protection Scenario, CPS)、经济发展情景 (Economic Development Scenario, EDS)、生态保护情景 (Ecological Priority Scenario, EPS) (图 3)。NDS 情景:基于历史土地利用趋势,假设未来土地利用遵循历史发展惯性,保持原有地类转移概率和邻域权重不变。CPS 情景:成都平原是我国重要粮食基地,以永久基本农田保护为目标。EDS 情景:成渝城市群以打造具有全国影响力的重要经济中心和西部重要的增长极为目标,地类以高经济效益产生为目标,从低到高依次为未利用地、草地、水域、林地、耕地和建设用地,土地利用转移矩阵中允许低效益地类转向高效益地类,反之限制。EPS 情景:以地类高生态价值产出为目标,从高到低依次为林地、草地、水域、耕地、未用土地和建设用地,土地利用转移矩阵与 EDS 情景一致。

2.2 生态源地识别

文章从格网尺度生态系统服务价值和生态系统服务重要性评价提取生态源地。土地利用类型内部差异以生态系统服务价值量化,从碳固存、生境质量和土壤保持三方面评价生态系统服务的重要性。提取生态系统服务高重要区、高价值区并等权叠加提取生态源地。

2.2.1 格网尺度生态系统服务价值评价

文章采用当量因子法计算成渝城市群的生态系统服务价值(表 1),具体修正方法详见参考文献^[39]。将研究区土地利用类型划分为 500m×500m 格网,基于 ArcGIS 面积制表工具连接至渔网,计算格网内土地利用

类型的生态系统服务价值。

惯性发展情景							耕地保护情景							经济发展情景							生态保护情景						
	A	B	C	D	E	F		A	B	C	D	E	F		A	B	C	D	E	F		A	B	C	D	E	F
A	1	1	0	0	1	1	A	1	0	0	0	0	0	A	1	0	0	0	1	0	A	1	1	1	1	1	0
B	1	1	0	0	0	0	B	1	1	1	1	0	0	B	1	1	0	0	1	0	B	0	1	0	0	0	0
C	1	1	1	0	1	0	C	1	1	1	1	1	1	C	1	1	1	1	1	1	C	0	1	1	1	0	0
D	1	0	0	1	1	0	D	0	0	0	0	1	0	D	1	1	0	1	1	0	D	0	1	0	1	0	0
E	0	0	0	1	1	0	E	0	0	0	0	1	0	E	0	0	0	0	1	0	E	0	0	0	0	1	0
F	1	0	0	1	1	1	F	1	1	1	1	1	1	F	1	1	1	1	1	1	F	1	1	1	1	1	1

图 3 多发展情景土地利用类型转移矩阵

Fig.3 Multi-scenario land use type transfer matrix

A:耕地;B:林地;C:草地;D:水域;E:建设用地;F:未利用地; 0:能发生转换;1:不能发生转换

表 1 成渝城市群生态系统服务价值系数/(元/hm²)

Table 1 Coefficient of ecosystem service value of Chengdu-Chongqing urban agglomeration

类型 Types	生态系统服务功能 Ecosystem service	耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grass	水域 Water	未利用地 Unused land
供给服务 Provisioning service	食物生产	1553.51	512.66	668.01	823.36	0
	原材料生产	605.87	4629.47	559.26	543.73	62.14
	遗传资源	4135.6	2153.26	8404	451	138
支持服务 Supporting service	土壤保持	2283.66	6245.12	3479.87	636.55	264.1
	维持生物多样性	1584.58	7006.34	2905.07	5328.55	622.32
调节服务 Regulating service	气候调节	1506.91	632.79	2423.48	29159.66	102.75
	气体调节	1118.53	6711.17	2330.27	792.29	93.21
	水文调节	1196.38	6353.86	2361.34	29159.42	108.75
	废物处理	2159.38	2672.04	2050.87	23069.66	403.91
	提供美学景观	532.65	3231.31	1351.55	6897.59	258.62
文化服务 Cultural service	总计	16677.07	40148.02	26533.72	96861.81	2053.08

2.2.2 生态系统服务重要性评价

考虑成渝城市群主要生态问题和自然地理特征,选取生境质量、土壤保持和碳固存作为生态系统服务重要性评价指标。

1)生境质量。采用生物生境指数、生境适宜性和生境胁迫水平等评价,公式如下:

$$Q_{xj}=H_j(1-\frac{W_{xj}}{W_{xj}+k^2}) \quad (1)$$

式中, Q_{xj} 为生境类型 j 在栅格 x 的生境质量指数; H_j 为生境类型 j 的生境适宜性; W_{xj} 为生境类型 j 在栅格 x 的生境胁迫水平; K 为半饱和常数。

2)土壤保持。土壤保持功能与土壤、地形和植被关联。土壤保持采用修正土壤流失方程、潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差表示^[40],公式如下:

$$Y=R \times K \times L \times S \times (1-F) \quad (2)$$

式中, Y 为土壤保持量, R 为降雨侵蚀力因子, K 为土壤可蚀性因子, L 表示坡长, S 表示坡度, F 为植被因子。

3)碳固存。以土地利用类型为评估单元,采用地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳的平均碳密度和各评估单元的面积表示生态系统碳固存量,公式如下:

$$C_t=C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead} \quad (3)$$

式中, C_i 碳固存总量, C_{above} 为地上生物碳密度, C_{below} 为地下生物碳密度, C_{soil} 为土壤碳密度, C_{dead} 为死亡有机物中的碳密度。

2.3 生态阻力面构建

根据不同土地覆被类型耦合德尔菲法赋值阻力系数,构建基本生态阻力面。选取坡度、坡向、土壤类型、河流距离、土地利用类型、DEM 等六个阻力因子,使用 XGBoost 机器算法优化阻力因子空间权重阈值分配构建修正生态阻力面。加权叠加基本生态阻力面与修正生态阻力面得到生态阻力面。

(1) 基本生态阻力面。基于不同发展情景的 LULC,赋予不同地类阻力系数。参考生态阻力面的研究^[7,18-20],将不同地类阻力系数拟定在 1—100 间,赋予耕地、林地、草地、水域、未利用地、建设用地的阻力系数分比为 40、1、10、30、70 与 100。

(2) 修正生态阻力面。XGBoost 是基于梯度提升的决策树改进算法,每轮迭代中添加一颗决策树(弱学习者),通过加性策略不断优化,训练学习强者^[29,41]。目标函数包含损失函数和正则化项。损失函数用于衡量预测值与真实值之间的偏差,通过最小化损失优化模型。正则化项由叶节点数量和权值平方和构成,用于控制模型复杂度,防止过拟合。最佳目标函数如下:

$$O = -\frac{1}{2} \sum_{m=1}^n \frac{R_j^2}{H_j + e} + dm \quad (4)$$

式中, e 为固定系数, d 为复杂性参数, m 为树中叶节点的数量, R_j 为叶节点 j 包含样本的一阶偏导数和, H_j 为叶节点 j 中包含样本的二阶偏导数之和。

基于 Jupyter Notebook 和 phthon 包,构建修正生态阻力面评估模型:1) 输入阻力因子特征值、正负样本点数据集,并将其随机划分为训练集与测试集。2) 初始化各评估单元生态阻力值,以弱学习为起点,设定目标函数平均值为初始预测。3) 定义目标函数,计算损失函数对于生态阻力预测值的梯度。4) 基于前述结算结果,构建新的决策树。5) 结合原始值,利用新的决策树对评估单元的生态抗力水平进行迭代预测与累计。6) 迭代创建决策树过程,达到期望的准确性,停止迭代。7) 基于测试集利用 ROC 曲线评估生态阻力模型。

2.3.3 生态要素识别

基于电路理论和 Linkage Mapper 工具识别生态廊道,提取生态夹点和生态障碍点。生态廊道连接生态源地,是保障生态源地间能量物质流通的通道^[42];生态夹点是维持生态源地连通性至关重要的狭窄地带,其退化可能造成整条生态廊道的断裂^[43];生态障碍点是物种及生态流在源地间迁徙时的阻碍,其移除可提高源地间的连通性^[44]。

3 结果分析

3.1 不同情境下的 LULC 时空演变特征

NDS 情景:土地覆被变化呈现显著的空间分异特征,以成都、重庆两大都市圈为核心的城市建成区呈现高强度土地利用转型态势。其中,区县城建区最为突出,耕地向建设用地的转型面积占比达 4.9%。成渝城市群耕地(60.67%)和林地(27.48%)仍是主要的土地利用类型,林地主要分布在成渝城市群边缘及川东平行岭谷区,耕地则集中于成都平原及川东平坝带。草地呈现小幅缩减趋势,水域和未利用地变化较小。CPS 情景:建设用地逆向演变与耕地显著扩张的转型特征。较于 NDS 耕地面积由 114247.5 km² 增至 116023 km²,其增量多源于林地。建设用地空间重构显著,占比由 NDS 下的 4.9% 下降至 3.97%,空间上主要表现为以成都市、重庆市主城区为核心的两大都市区建设用地扩张减缓(图 4)。

EDS 情景:土地利用空间分异格局与 NDS 基本一致,但呈现差异化转型特征。该情境下建设用地呈外延式扩张加剧态势,转换热点区域仍集聚于成都、重庆都市圈及各区县城市建成区,建设用地面积占比达 4.89%,主要由耕地转化,草地、水域等较少;林地仍有小幅增加,面积占比 27.39%;草地、水域和未利用地均呈递减趋势。EPS 情景:林地、草地保护地类占比显著提升,地类转换速率趋缓。较于 NDS,林地覆盖率提升至

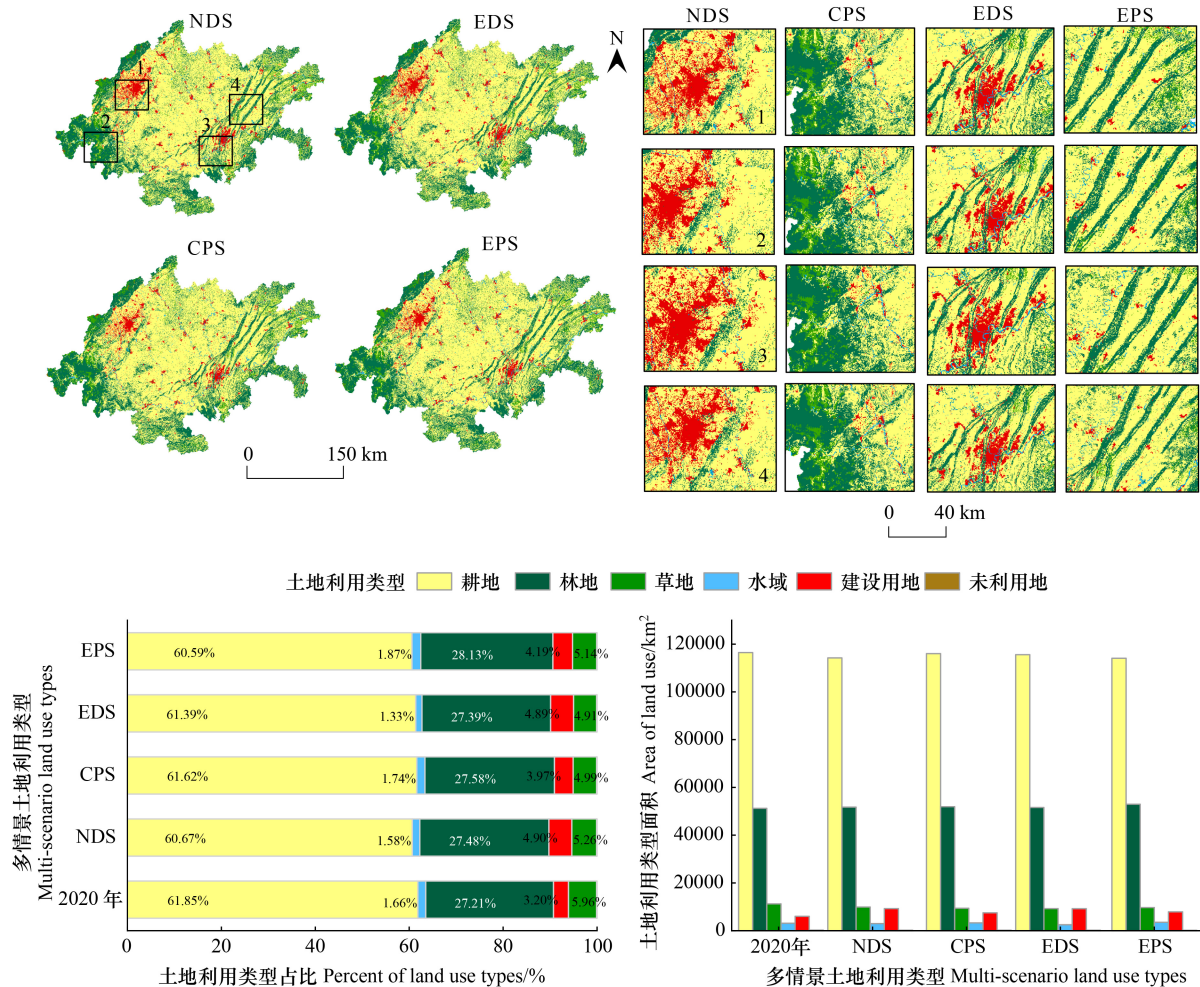


图4 成渝城市群多情景土地利用类型

Fig.4 Multi-scenario land use types of Chengdu-Chongqing urban agglomeration

NDS:自然发展情景;CPS:耕地保护情景;EDS:经济发展情景;EPS:生态保护情景

28.11%,耕地占比小幅下降至 60.54%。受生态修复等影响,草地、水域维持缓增态势。建设用地占比为 4.19%,扩张速度明显小于 NDS 和 EDS。

3.2 生态源地提取

3.2.1 生态系统服务价值与重要性时空演变特征

2035 年不同发展情境下生态系统服务价值空间分布呈“环状梯度递减”的同心圆式空间分布,高-低值区具有明显空间集聚(图 5),而生态系统服务重要性均则呈“高值团状集聚,低值点状散布”的空间特征(图 6)。

生态系统服务低值区主要集中分布在以成都、重庆为核心的两大都市区及各区县建成区,高值区主要分布在城市群东西两侧边缘地带,该区域地处青藏高原东缘,自然生态禀赋高,林地草地广泛分布。中值区则介于高-低值区中部,分布于以成都平原为核心的周边地区,该区域为国家九大商品粮基地之一,种植历史悠久,自然地理环境相对较好。

多发展情景下生态系统服务重要(最重要、非常重要)区集中分布,面积为 34836.35km²(占比 20.7%),主要分布于植被覆盖高、人口密度小,生态禀赋优良的川西、川南丘陵地区和川东平行岭谷区。次重要区(重要、一般)主要分布于建设用地外围,该区域耕地集中分布而生态林地呈“点状”分布,面积约为 77282.47km²(占比 43.54%)。低重要(不重要)区域占 35.76%(面积为 66704.75km²),主要分布在以成都、重庆主城区都市

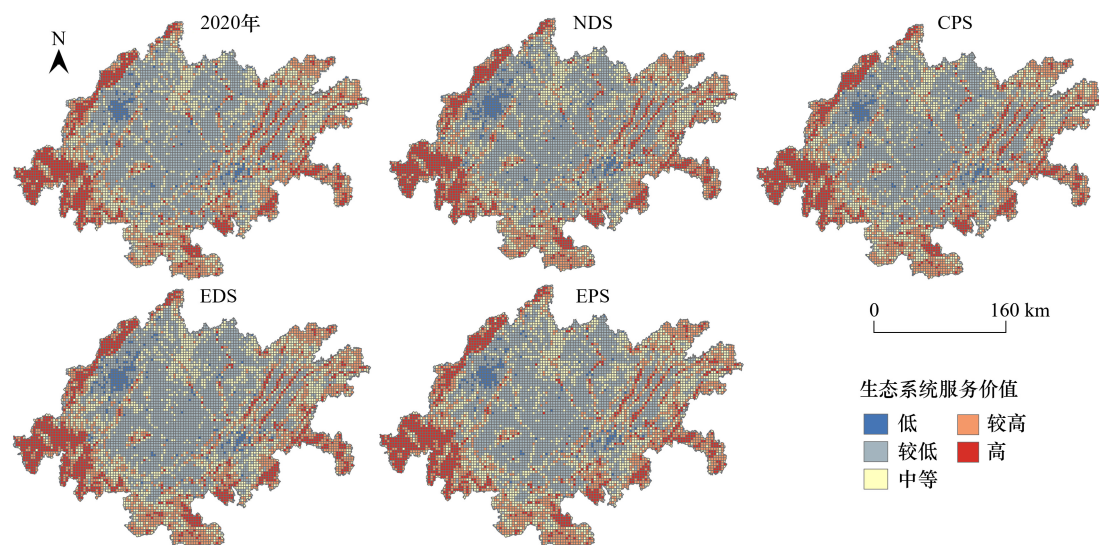


图5 成渝城市群生态系统服务价值时空分布

Fig.5 Spatial and temporal distribution of ecosystem service value in Chengdu-Chongqing urban agglomeration

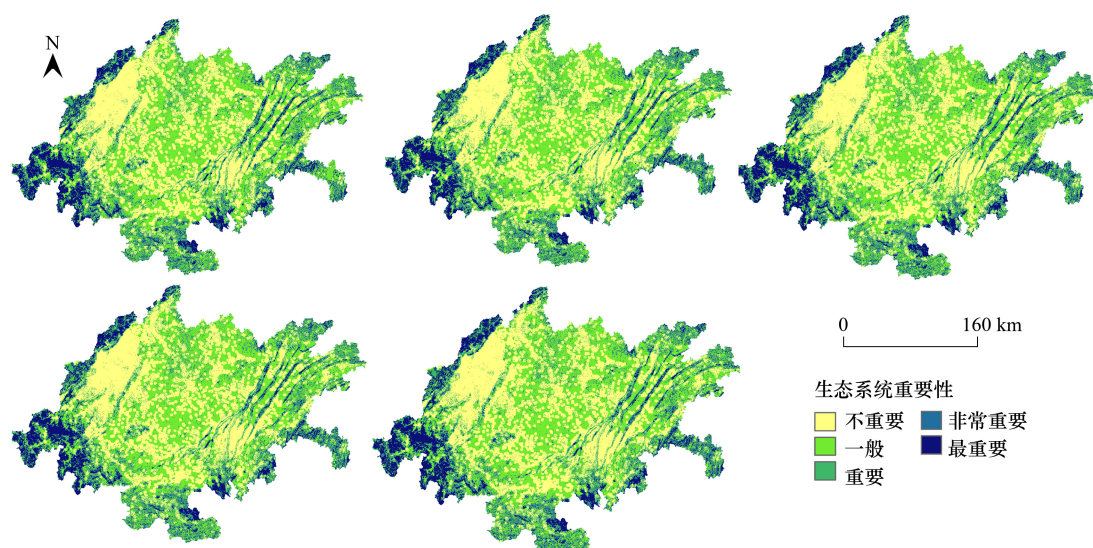


图6 成渝城市群生态服务重要性评价空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ecological importance evaluation in Chengdu-Chongqing urban agglomeration

区及其周边地区和次级区县建成区中心。

3.2.3 生态源地提取

将生态系统服务高价值区与生态系统服务高重要区进行空间融合,得到 2200 个潜在生态源地,面积 0.015—10472.15km²。基于生态源空间的邻近性、集聚性和功能的辐射性,参考吴茂全等^[44]研究,根据斑块面积阈值与累计面积占比、斑块数量关系,提取生态源地(图 7)。当生态源地斑块大于 40km²时,累计面积占比达 90%,可表征生态源地空间分布。

生态源地呈“U 型”分布于成渝城市群东-西-南三面的边缘山地(图 8)。2020、2035 年不同发展情境(NDS、CPS、EDS、EPS)下生态源地斑块分别为 53、51、50、43、51 个,面积为 24892.75、24462.57、24119.43、23833.75、27249.36km²,EPS 下生态源地面积最大,占比最高。成渝城市群西部、西南部人类活动弱、自然生

态禀赋高,多为连续分布的生态源地;川东平行岭谷分割了人类活动与城镇建设,农业生产、城镇建设破坏了生态源地的连片分布,生态源地破碎。成渝城市群中部人类活动频繁、城镇扩张明显,生态源地呈点状分布,90%的生态源地土地利用类型为林地,耕地次之。

3.3 生态阻力面构建

3.3.1 基本生态阻力面

不同发展情景下基本生态阻力面大致以成都、重庆为核心向四周发散,呈高-低阻力交错的空间特征(图9)。高值区主要分布在以成都、重庆为核心的都市区及各区县建成区,并沿道路延伸。低值区面积占比29%,主要分布在城市群边缘及川东平行岭谷区。

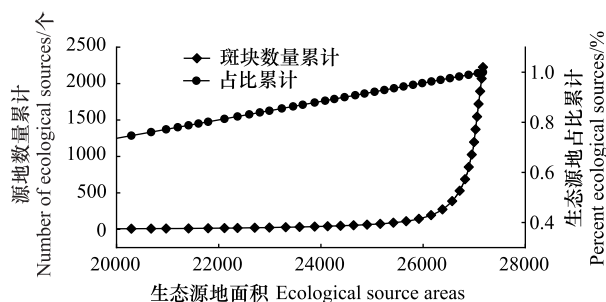


图7 生态源地斑块面积分布区间

Fig.7 Patch area distribution of ecological source areas

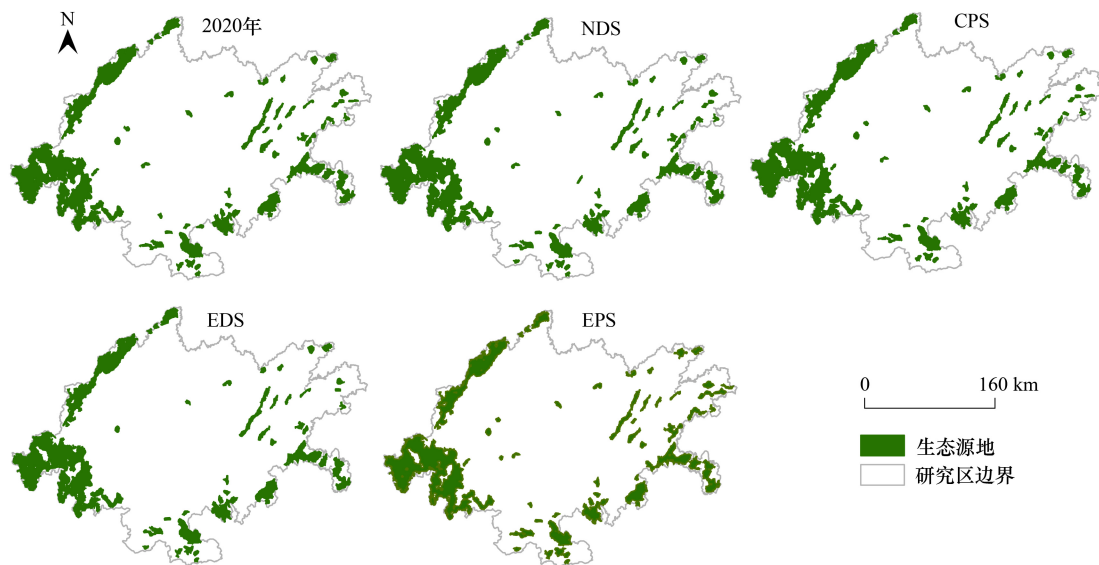
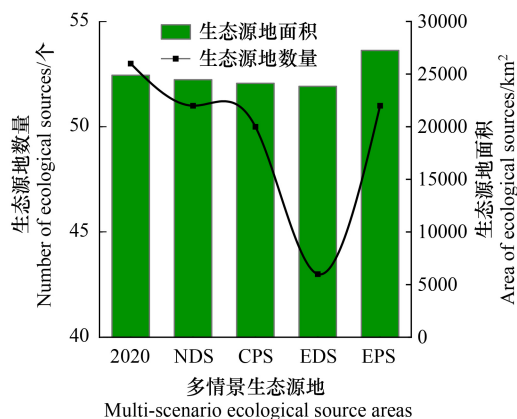


图8 成渝城市群生态源地空间分布

Fig.8 Spatial distribution map of ecological source areas in Chengdu-Chongqing urban agglomeration

3.3.2 修正生态阻力面

ROC (Receiver operating characteristic) 曲线是评估机器学习模型分类精度的常用工具, AUC (Area Under Curve) 为曲线下面积, 是模型预测精度的定量化表达, 曲线越接近左上角准确性和预测性就越准确, 预测结果越理想。成渝城市群 2020 和 2035 年多情景下的修正阻力面训练集与测试集均值分别为 0.901、0.900, 表明

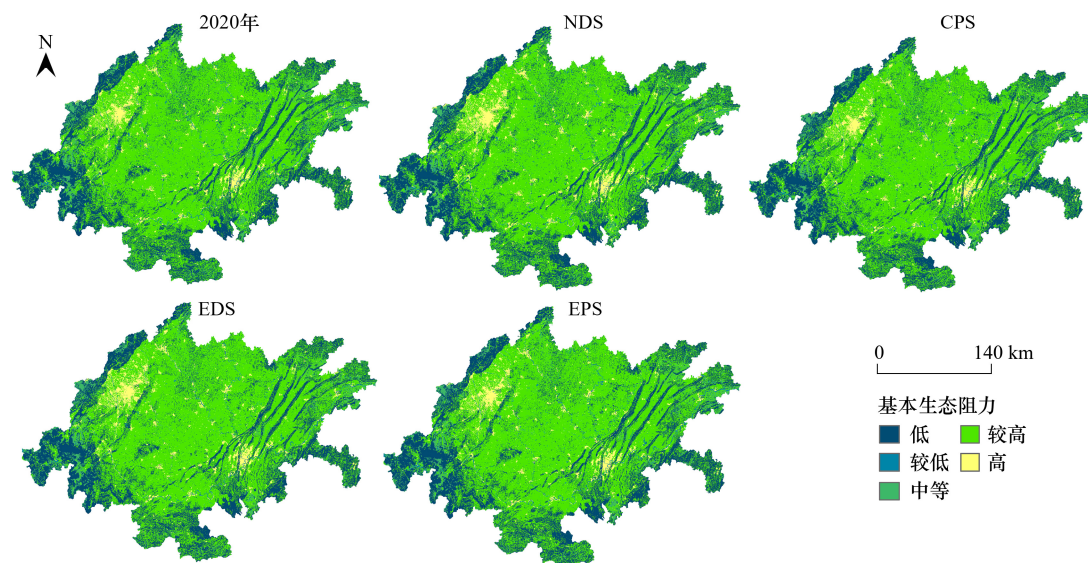


图9 成渝城市群基本生态阻力面空间分布

Fig.9 Spatial distribution map of basic ecological resistance surface in Chengdu-Chongqing urban agglomeration

XGBoost 的准确性和预测性高,可用于生态阻力面修正。基于 XGBoost 机器算法构建的修正生态阻力面存在显著的空间异质性,呈“中间高,四周低”的空间特征(图 10)。生态阻力低值区主要分布在川西南及川东北秦巴山区,高值区集中在以成都、重庆为核心的都市区。研究区中部农业历史悠久、人类活动剧烈,生境破碎,生态源地缺乏,为生态阻力高值区。研究区边缘山地、丘陵生态基底较好,森林、草地广泛分布对物种迁移和生态服务流干扰较小,为生态阻力低值区。

3.3.3 生态阻力面

将基本生态阻力面与修正生态阻力面加权叠加,得到成渝城市群 2020 和 2035 年各情景下的生态阻力面(图 11)。空间上,生态阻力面由中部向四周逐渐降低,整体上表现为倒置的“碗状”结构。生态阻力低值区与生态源地分布基本一致,主要分布在城市群边缘及川东平行岭谷区。生态阻力高值区集中分布在中部地势相对平坦的平原和低丘,与耕地和建设用地的分布较为一致,人类活动频繁,种植业发展历史悠久,对生态系统服务流动干扰较强。

3.4 生态要素识别

3.4.1 生态廊道识别

成渝城市群多发展情景下生态廊道呈“边缘贯通-中疏-东密”的网状结构(图 12),短距离生态廊道主要分布在川东平行岭谷区以及边缘生态源地断裂处,长距离生态廊道主要分布在研究区中部。2020 和 2035 年不同发展情境(NDS、CPS、EDS、EPS)下生态廊道分别为 113、99、99、78、105 条,总长度分别 6617.38、6059.32、6255.91、5131.40、6482.65km。EDS 下生态廊道数量最少、平均长度最长,分析认为是生态源地数量较少间隔较远、阻力面空间分布差异较大导致。

3.4.2 生态夹点和生态障碍点

使用 Linkage Mapper 的 Pinchpoints 工具识别生态夹点与生态障碍点。2020 和 2035 年不同发展情境(NDS、CPS、EDS、EPS)下识别出 600、521、594、578、481 个生态夹点,面积分别为 900.05、802.15、890.64、835.29、858.9km²,地类以林地为主(图 13)。主要分布于川东平行岭谷区,少量分布于研究区边缘生态源地连接处。川东平行岭谷在空间上虽未形成连片生态源地,但依托区域广泛分布的林地,形成了电流密度高值区域,成为生态系统服务流的关键节点。

2020 和 2035 年不同发展情境下生态障碍点分别为 111、82、102、111、95 个,面积为 707.44、477.23、

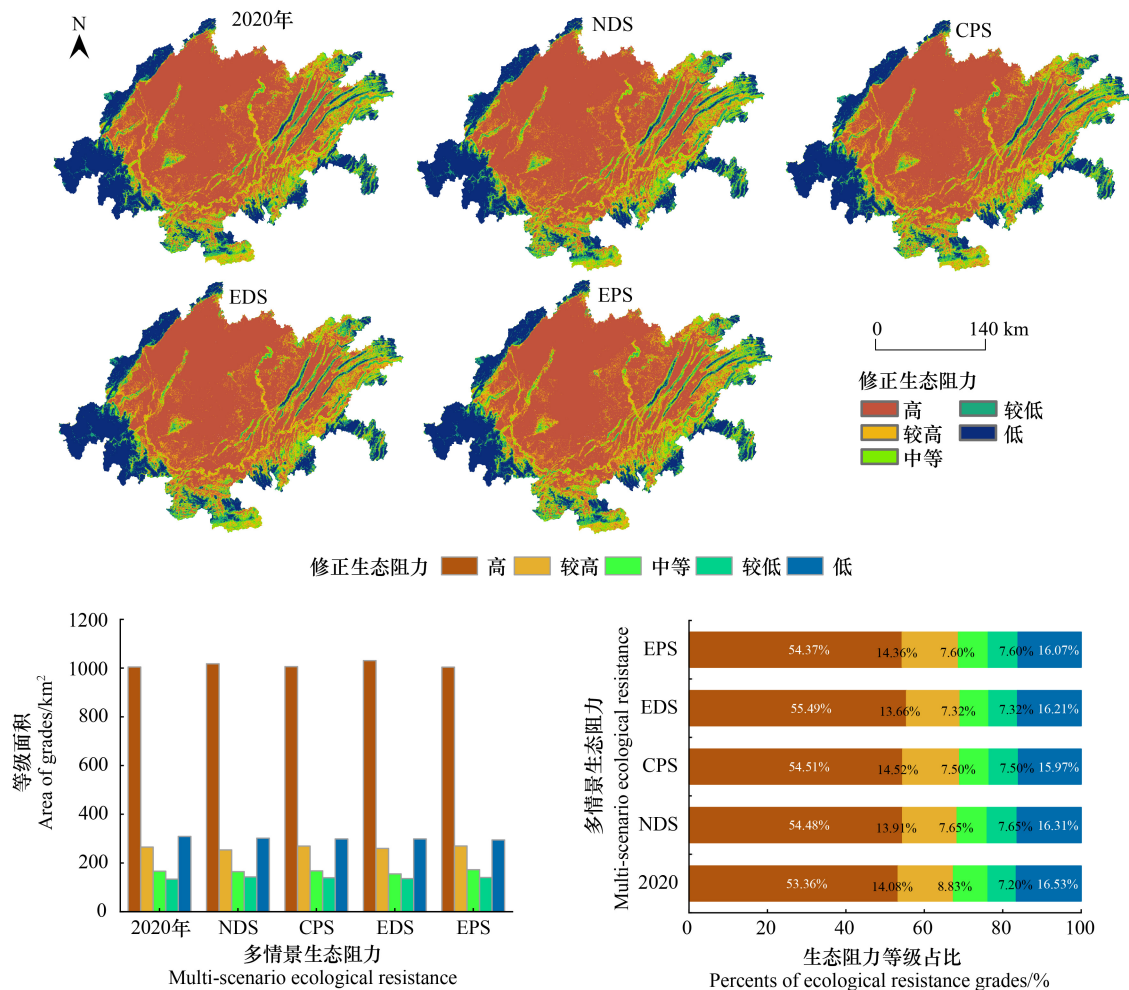


图 10 成渝城市群修正生态阻力面空间分布

Fig.10 Spatial distribution of ecological correction resistance surface in Chengdu-Chongqing urban agglomeration

637.92、633.59、721.78km²(图 13), 主要分布在成都平原及其周边地区与长距离生态廊道中部。多发展情景叠加的连续性生态障碍点 32 个, 以建设用地和耕地为主。

3.5 基于反规划的生态安全格局优化

反规划是以区域未来多种发展路径中的共性约束为出发点, 提出具有整体性、长期性的区域空间发展框架。基于多发展情景下生态源地、生态廊道、生态夹点、生态障碍点存在的共性问题, 提出“一轴两带四区多核心”的生态安全优化格局(图 14)。

“一轴”是指贯穿成渝城市群的长江干流, 以现有天然生态廊道实现城市群东-西生态源地间连通的河源生态保护轴。应以保护河流自然形态, 减少人工岸堤建设, 恢复水生植被, 加强河源污染治理为主。“两带”是依托城市群中部“点状”生态源地和长江支流构建的南-北部东-西轴向带。“两带”连接城市群边缘及川东平行岭谷生态源地, 斜穿城市群中部、成都平原等, 区内耕地广泛分布。“两带”应以现有碎片化自然生态林地和沿线支流为基础, 通过农田防护林、河岸林带等生态要素建设, 形成生态廊道, 提升东-西部生态源地的连通性, 保障城市群东-西向生态系统服务的流动。“四区”分别是川西、川西南生态关键屏障区和川东、川南生态脆弱保育区。川西、川西南生态关键屏障区地处青藏高原东缘, 人类活动干扰少, 动植物种类繁多, 是关键生态源地, 以保育为主, 减少人类活动的干扰, 防止生境质量、水源涵养等生态系统服务的退化, 发挥生态辐射和屏障作用。川东、川南生态脆弱保育区内生态夹点集中分布, 是城市群次级生态源地分布区。受川东

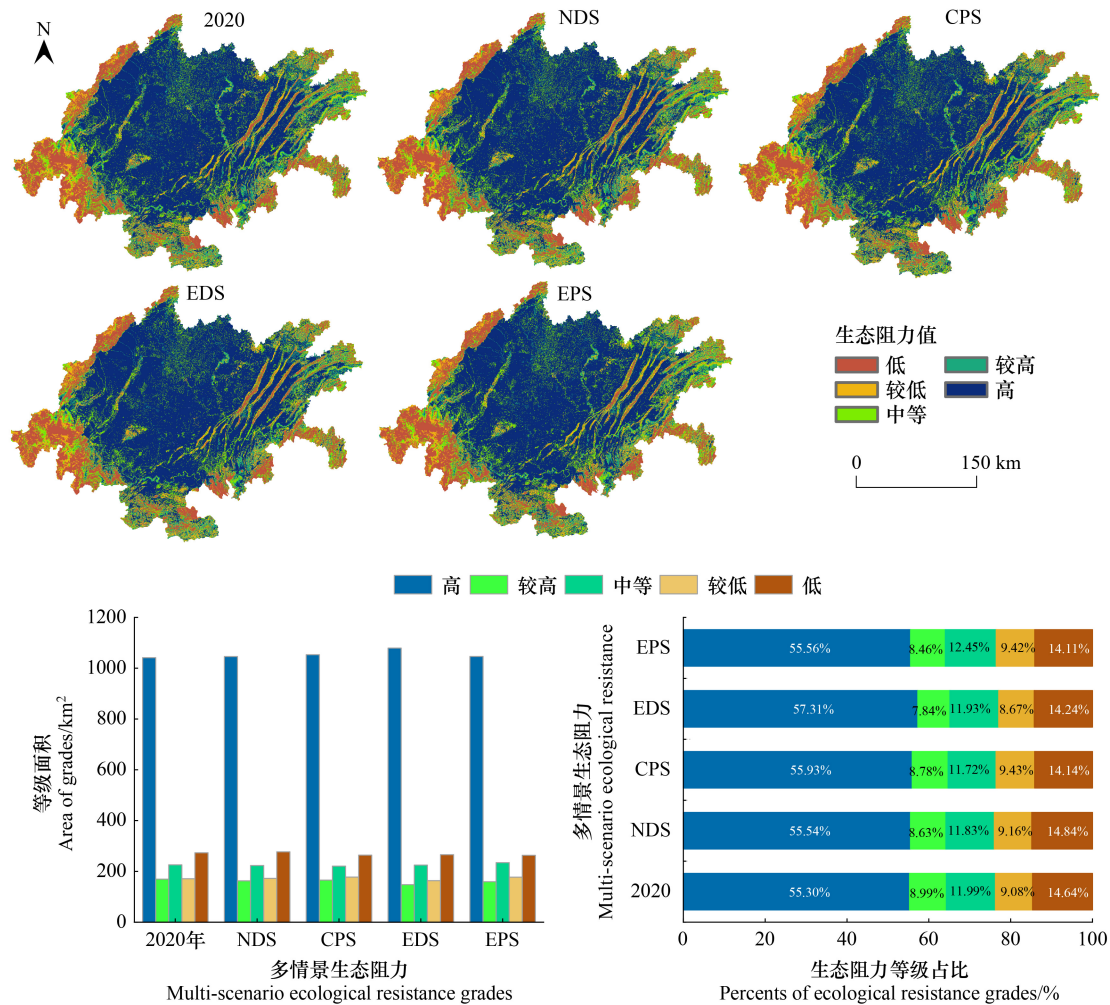


图 11 成渝城市群生态阻力面空间分布

Fig.11 Spatial distribution of ecological resistance surface in Chengdu-Chongqing urban agglomeration

平行岭谷、农业生产和城市建设的分割,生态源地空间分布较为破碎,生态廊道短小密集,生态夹点广泛分布。应加强植树造林、人工封育,注重乡土藤蔓、草本、灌木和乔木植物搭配,提高生态源地的连通性和空间集聚性。“多核心”针对研究区中部“一轴两带四区”未覆盖的生态安全关键节点。受成渝城市群地貌影响,经济社会活动集中在中部,形成了以成都、重庆主城以及各区县建成区为中心的生态阻力高值区,人类活动频繁,农业生产和城市建设扩张导致生态保护和经济发展矛盾突出,生态障碍点分布集中。中部“多核心”区应加强生态修复与生态建设,以生态障碍点的分布为导向,以移除生态障碍点为目标,在生态障碍点分布地区通过湿地重建、植被恢复和面污染源治理等微型生态源地建设削弱生态障碍点,提高生态廊道连通性。

4 讨论

4.1 生态要素识别优化分析

传统生态阻力面构建多基于土地利用类型与专家主观评断构建^[45—47],并根据区域特征选取坡度、坡向、夜间灯光指数等修正因子并赋权修正,获得生态阻力面^[1,30,33]。该方法造成了生态阻力面空间权重分配不合理,影响了生态阻力面空间分布识别精度。文章使用 XGBoost 机器算法选取人口密度、DEM 等生态阻力特征因子,通过机器算法定义目标变量,对特征因子值进行迭代训练和测试,得到修正生态阻力面的空间分布概率,以空间分布概率构建修正生态阻力面,解决了传统修正因子与德尔菲法对生态阻力面空间权重分布的主

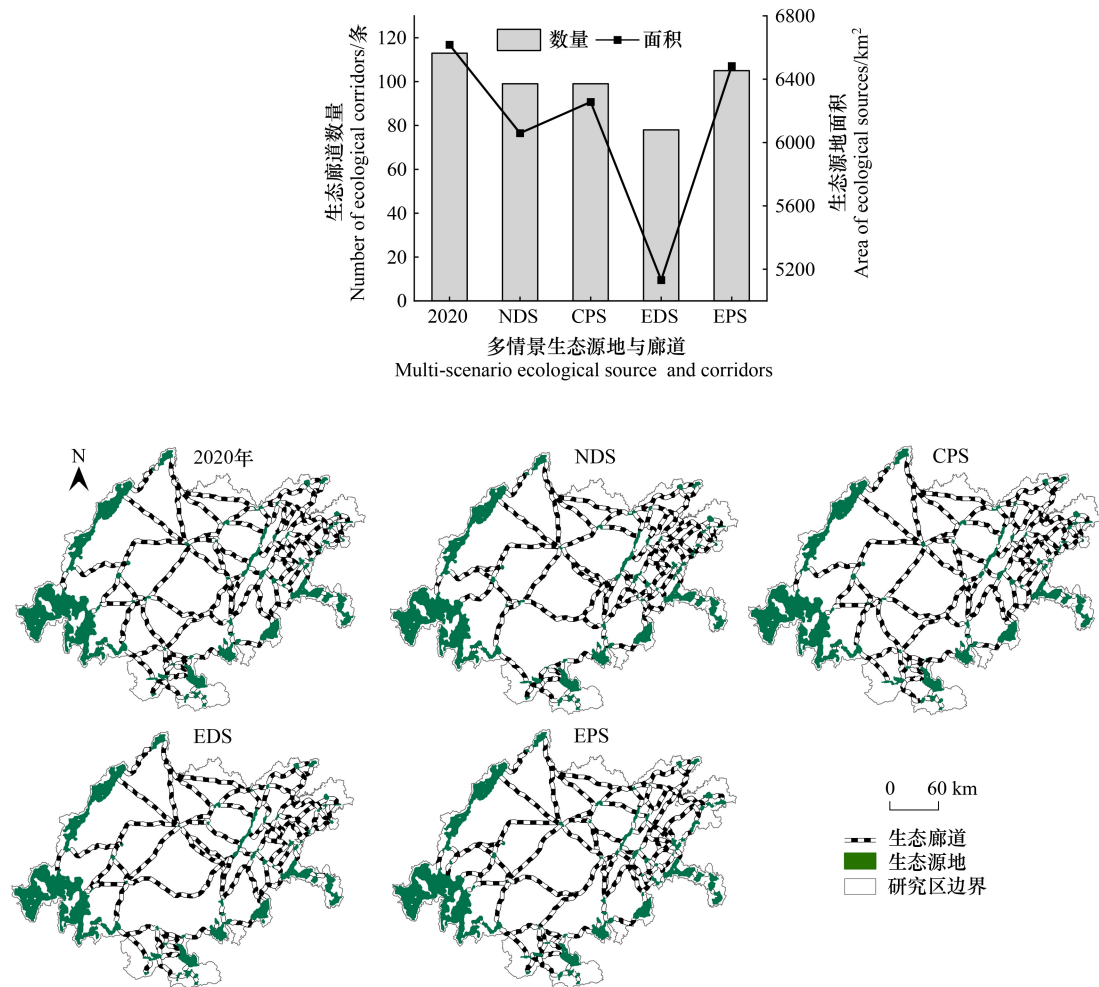


图 12 成渝城市群生态廊道空间分布

Fig.12 Spatial distribution of ecological corridors in Chengdu-Chongqing urban agglomeration

观性,提高了生态要素识别精度。生态源地提取采用双因子限制筛选潜在生态源地,并设置面积阈值剔除破碎生态源地,弥补了传统以大面积连续林地或自然保护区为生态源地,未能体现生态源地内部差异破碎的不足^[23,32],改善了生态源地选取质量。生态阻力面、生态源地等生态要素识别精度的提高,有效减弱了生态要素识别误差累计导致的“多米诺骨牌效应”。

4.2 基于反规划的生态安全格局优化

经济发展路径不确定性的外源驱动和产业结构、社会经济转型“迭代”的内生变革,极大的加剧了区域发展路径的不确定性,导致区域生态安全格局的动态变化幅度加剧。传统的预设发展目标引导生态空间配置策略难以为继。基于 NDS、CPS、EDS、EPS 发展情境下的生态安全格局的共性问题,提出了“一轴两带四区多核心”的成渝城市群生态安全优化格局。反规划优化虽形式上与传统的生态安全优化格局相似,但其构建基础不同。基于多种发展情境下成渝城市群生态安全格局存在的共性问题,构建的“一轴两带四区多核心”的生态安全优化格局,兼顾了区域多发展情境下生态安全格局的共性问题,是区域更底层的生态安全格局,可以更好的从整体性、长期性方面支撑区域多种发展情境,提高区域应对未来发展路径的不确定性带来的生态安全格局波动加剧等问题,基于多发展情境下生态安全格局共性问题构建“反规划”设计,解决了传统基于单发展目标规划的不足,提高了生态安全建设效能。

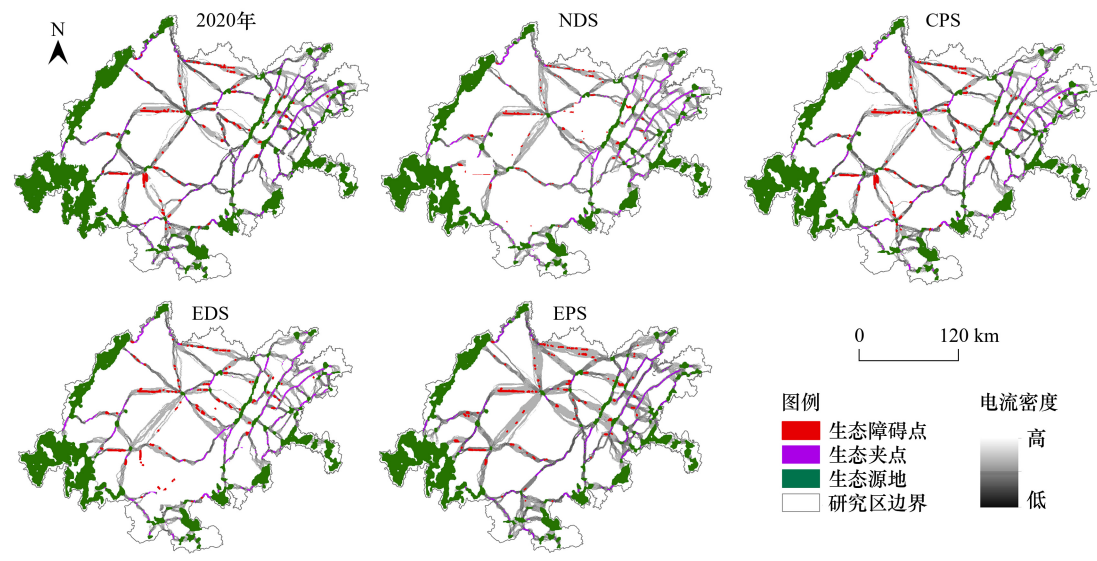


图 13 成渝城市群生态夹点与障碍点空间分布
Fig.13 Spatial distribution of ecological pinch points and obstacle points in Chengdu-Chongqing urban agglomeration

5 结论

(1)成渝城市群生态源地整体呈“U”型半包围结构,整体受大尺度地形限制。2020 和 2035 年 (NDS、CPS、EDS、EPS) 生态源地分别为 24892.75、24462.57、24119.43、23833.75、27249.36 km²,主要分布城市群边缘,其中大面积连续生态源地主要分布在研究区西部和西南部,土地利用类型以林地为主。

(2)XGBoost 机器算法的生态阻力面 ROC 训练集、测试集均较高适用于生态阻力构建。2020 和 2035 年不同发展情景下区域生态要素共性问题:生态廊道呈“边缘贯通-中疏-东密”网状结构;生态夹点集中分布在川东平行岭谷、破碎生态源地边缘;生态障碍点则集中分布在以成都平原为核心的长距生态廊道中部;生态夹点分布在川东平行岭谷区与成渝城市群中部。

(3)基于成渝城市群多发展情境下生态安全格局共性问题“反规划”构建了“一轴两带四区多点”的生态安全优化格局,解决了基于单一预设发展目标构建的传统“正规划”难以应对支撑区域发展路径不确定性的不足。

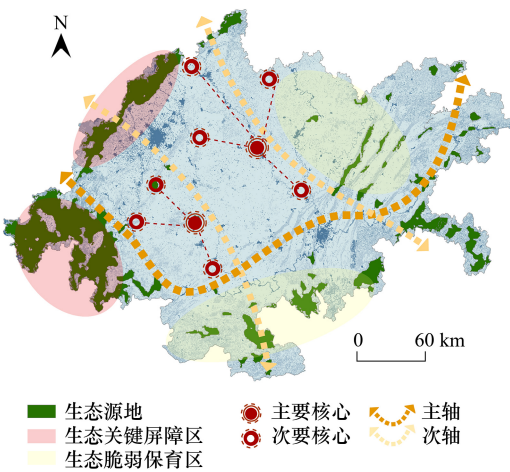


图 14 成渝城市群生态安全格局
Fig.14 Ecological security pattern of Chengdu-Chongqing urban agglomeration

参考文献 (References) :

[1] 王晓峰, 朱梦娜, 张欣蓉, 马嘉豪, 周继涛, 程通, 郑媛元, 涂又, 尧文洁, 马娟. 基于“源地-阻力-廊道”的三江源区生态安全格局构建. 生态学报, 2024, 44(11): 4609-4623.

[2] Juanita A D, Ignacio P, Jorgelina G A, Cecilia A S, Carlos M, Francisco N. Assessing the effects of past and future land cover changes in ecosystem services, disservices and biodiversity: a case study in Barranquilla Metropolitan Area (BMA), Colombia. Ecosystem Services, 2019, 37: 100915.

[3] Cai G, Xiong J F, Wen L S, Weng A F, Lin Y Y, Li B Y. Predicting the ecosystem service values and constructing ecological security patterns in

- future changing land use patterns. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110787.
- [4] 赵诚诚, 潘竟虎. 基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化. *生态学报*, 2022, 42(17): 6973-6984.
- [5] Peng J, Yang Y, Liu Y X, Hu Y N, Du Y Y, Meersmans J, Qiu S J. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Science of The Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [6] Qiu S, Fang M Z, Yu Q, Niu T, Liu H J, Wang F, Xu C L, Ai M S, Zhang J Y. Study of spatialtemporal changes in Chinese forest eco-space and optimization strategies for enhancing carbon sequestration capacity through ecological spatial network theory. *Science of The Total Environment*, 2023, 859: 160035.
- [7] 柯钦华, 周俏薇, 庄宝怡, 孙传淳. 基于生态系统服务供需平衡的粤港澳大湾区生态安全格局构建. *生态学报*, 2024, 44(5): 1765-1779.
- [8] 陈红, 邓晓红, 李宗省, 薛健. 祁连山国家公园生态系统服务供需匹配. *生态学杂志*, 2024, 43(6): 1901-1909.
- [9] 周媛, 唐密, 陈娟, 黎贝. 基于形态学空间格局分析与图谱理论的成都市绿地生态网络优化. *生态学杂志*, 2023, 42(6): 1527-1536.
- [10] 李彤, 贾宝全, 刘文瑞, 张秋梦, 姜莎莎. 宜昌市生态安全网络要素时空动态及其影响因素. *生态学报*, 2023, 43(15): 6154-6169.
- [11] 杨志广, 蒋志云, 郭程轩, 杨晓晶, 许晓君, 李潇, 胡中民, 周厚云. 基于形态空间格局分析和最小累积阻力模型的广州市生态网络构建. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3367-3376.
- [12] 潘竟虎, 王云. 基于 CVOR 和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化. *生态学报*, 2021, 41(7): 2582-2595.
- [13] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 李贵才. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. *地理研究*, 2017, 36(3): 471-484.
- [14] Li Z T, Yuan M J, Hu M M, Wang Y F, Xia B C. Evaluation of ecological security and influencing factors analysis based on robustness analysis and the BP-DEMALTE model: a case study of the Pearl River Delta urban agglomeration. *Ecological Indicators*, 2019, 101: 595-602.
- [15] Chen W H, Liu H M, Wang J L. Construction and optimization of regional ecological security patterns based on MSPA-MCR-GA Model: a case study of Dongting Lake Basin in China. *Ecological Indicators*, 2024, 165: 112169.
- [16] 潘越, 龚健, 杨建新, 杨婷, 王玉. 基于生态重要性和 MSPA 核心区连通性的生态安全格局构建——以桂江流域为例. *中国土地科学*, 2022, 36(4): 86-95.
- [17] Xiong H J, Hu H Z, Han P Y, Wang M. Integrating landscape ecological risks and ecosystem service values into the ecological security pattern identification of Wuhan urban agglomeration. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(4): 2792.
- [18] Jiang H, Peng J, Xu D M, Tang H. Constructing ecological security patterns with differentiated management intensity based on multifunctional landscape identification and multi-criteria decision-making. *Global Ecology and Conservation*, 2024, 50: e02862.
- [19] 王旭, 马博文, 李丹, 陈昆仑, 姚华松. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 230-242.
- [20] 应凌霄, 孔令桥, 肖焱, 欧阳志云. 生态安全及其评价方法研究进展. *生态学报*, 2022, 42(5): 1679-1692.
- [21] 张平江, 党国锋. 基于 MCR 模型与蚁群算法的洪河流域生态安全格局构建. *生态环境学报*, 2023, 32(3): 481-491.
- [22] Wang J, Bai Y, Huang Z D, Ashraf A, Ali M, Fang Z, Lu X. Identifying ecological security patterns to prioritize conservation and restoration: a case study in Xishuangbanna tropical region, China. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 444: 141222.
- [23] 孔凡斌, 段淑慧, 徐彩瑶. 基于生态系统服务和生态敏感性的生态安全格局构建——以钱塘江流域为例. *生态学报*, 2024, 44(24): 11359-11374.
- [24] Wu Y D, Han Z Y, Meng J J, Zhu L K. Circuit theory-based ecological security pattern could promote ecological protection in the Heihe River Basin of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(10): 27340-27356.
- [25] Fu Y J, Shi X Y, He J, Yuan Y, Qu L L. Identification and optimization strategy of county ecological security pattern: a case study in the Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106030.
- [26] 易浪, 孙颖, 尹少华, 魏晓. 生态安全格局构建: 概念、框架与展望. *生态环境学报*, 2022, 31(4): 845-856.
- [27] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. *地理研究*, 2017, 36(3): 407-419.
- [28] 杨鸿辉, 余娇, 耿建伟, 吴钺, 付琳, 丁铮. 基于遥感生态指数和电路理论的生态安全格局构建——以广州市为例. *北京林业大学学报*, 2023, 45(10): 127-139.
- [29] Sun D L, Wu X Q, Wen H J, Ma X L, Zhang F T, Ji Q, Zhang J L. Ecological security pattern based on XGBoost-MCR model: a case study of the Three Gorges Reservoir Region. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 470: 143252.
- [30] 魏胜蓉, 何婷婷, 付迎春, 肖云丹, 侯瑞霞, 张乃静, 纪平. 珠三角国家森林城市群生态安全格局变化与空间优化识别. *生态学报*, 2024, 44(18): 8094-8109.
- [31] 崔旺来, 蔡莉, 奚恒辉, 杨帆, 陈梦圆. 基于土地利用/覆盖变化的浙江大湾区生态安全评价及多情景模拟分析. *生态学报*, 2022, 42(6): 2136-2148.
- [32] Li S C, Xiao W, Zhao Y L, Lv X J. Incorporating ecological risk index in the multi-process MCRE model to optimize the ecological security pattern in a semi-arid area with intensive coal mining: a case study in northern China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247: 119143.

- [33] 孙梓渊, 王赛鸽, 陈彬. 基于生态系统服务的生态安全格局构建与生态韧性评估——以长株潭城市群为例. 生态学报, 2024, 44(11): 4650-4661.
- [34] 许译方, 周永杰, 何煜然, 邝红艳, 杨大勇. 基于土地利用变化的粤港澳大湾区生态系统服务价值预测研究. 生态科学, 2020, 39(1): 207-212.
- [35] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 李艺博, 李金融. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 204-216.
- [36] 李代超, 卢嘉奇, 谢晓苇, 虞虎, 李元, 吴升. 碳中和视角下基于主体功能区分类约束的国土空间分区优化模拟——以福建省为例. 生态学报, 2022, 42(24): 10111-10126.
- [37] 王朝阳, 张军以, 李海懿, 苏维词. 重庆市土地利用冲突多尺度时空演化与多情景演化模拟. 生态学报, 2024, 44(3): 1024-1039.
- [38] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [39] 赵伟, 邹欣怡, 蒲海霞. 成渝地区双城经济圈生态安全格局构建. 中国环境科学, 2021, 41(5): 2423-2433.
- [40] 高梦雯, 胡业翠, 李向, 宋荣. 基于生态系统服务重要性和环境敏感性的喀斯特山区生态安全格局构建——以广西河池为例. 生态学报, 2021, 41(7): 2596-2608.
- [41] Shapley L S. A value for n-person games. Contributions to the theory of games, 1953, 2(28): 307-317.
- [42] 朱炳臣, 李同昇, 陈谢扬, 李炬霖. 汉江流域生态综合网络构建与生态安全格局识别研究. 长江流域资源与环境, 2024, 33(2): 362-373.
- [43] 李和平, 牟玲利, 林涛. 总体国家安全观下的西部地区规划建设——以重庆为例. 城市发展研究, 2024, 31(2): 53-61.
- [44] 吴茂全, 胡蒙蒙, 汪涛, 凡宸, 夏北成. 基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别. 生态学报, 2019, 39(13): 4720-4731.
- [45] 王秀明, 赵鹏, 龙颖贤, 宋巍巍, 刘谓承. 基于生态安全格局的粤港澳地区陆域空间生态保护修复重点区域识别. 生态学报, 2022, 42(2): 450-461.
- [46] 周汝波, 林媚珍, 吴卓, 刘汉仪, 钟亮. 基于生态系统服务重要性的粤港澳大湾区生态安全格局构建. 生态经济, 2020, 36(7): 189-196.
- [47] 林文豪, 温兆飞, 吴胜军, 毕月. 成渝地区双城经济圈生态安全格局识别及改善对策. 生态学报, 2023, 43(3): 973-985.