

DOI: 10.5846/stxb202111033088

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.

Lin W H, Wen Z F, Wu S J, Bi Y. Identification and optimization of ecological security pattern in the Chengdu-Chongqing Economic Zone. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 973-985.

成渝地区双城经济圈生态安全格局识别及改善对策

林文豪^{1,2}, 温兆飞^{1,*}, 吴胜军¹, 毕月^{1,3}

¹ 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714

² 中国科学院大学, 北京 100049

³ 重庆交通大学, 重庆 400074

摘要:成渝地区双城经济圈位于我国长江上游第二阶梯, 具有重要的生态屏障功能。基于“源地-廊道”法, 选取生境维持、土壤保持、产水服务三大生态系统服务功能作为主要评价指标, 识别该区域生态源地, 在综合考虑土地利用类型和社会经济要素的情况下设置阻力面, 利用最小累积阻力模型提取生态廊道, 构建了区域生态安全格局, 识别出现存主要问题。研究表明: (1) 全区生态源地共 507 处, 共计面积 67191 km², 主要分布在东西南三方的山地地区; (2) 区域整体呈现“三翼-多轴”的生态安全格局, 保证了区域生态安全; (3) 区域生态安全格局存在生态源地空间分布不均、生态源地破碎、生态源地与人类活动冲突、生态廊道脆弱四大问题。通过进一步讨论问题背后的原因, 提出了对应的改善对策, 相关结果有望为成渝地区双城经济圈的国土空间布局建设规划提供参考。

关键词:成渝地区; 生态源地; 生态廊道; “源地-廊道”法; 生态系统服务; InVEST 模型

Identification and optimization of ecological security pattern in the Chengdu-Chongqing Economic Zone

LIN Wenhao^{1,2}, WEN Zhao-fei^{1,*}, WU Sheng-jun¹, BI Yue^{1,3}

¹ Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract: Chengdu-Chongqing Economic Zone (CCEZ) is located in the second step of the upper reach of the Yangtze River, China. It is characterized by a vitally ecological barrier for maintaining ecological security of the middle and lower reach of the Yangtze River. Identifying the ecological security pattern (ESP) of the CCEZ and their functional problem are thus in urgent needs. This work used “source-corridor” method for identifying ESP of the CCEZ. The method consisted of three steps: identifying ecological sources, setting resistance surface, and extracting ecological corridor. Firstly, three major ecosystem service functions, namely soil conservation, habitat maintenance, and water yield service, were selected as evaluation indicators for recognizing ecological sources of the CCEZ. Then the resistance surface of the CCEZ was generated in a traditional way with carefully considering of land use types and socio-economic factors. Lastly, the ecological corridors were extracted by using the least cumulative resistance model applied to the resistance surface. Thus, the ecological security pattern was identified with the extracted ecological sources and corridors. Finally, the major problems for functioning the ecological security pattern was recognized and the corresponding suggestions for solving such problems were proposed as well. The main results were as follows. (1) There were 507 ecological sources in the CCEZ with a total area of 67191 km²

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA23040303); 国家自然科学基金(51779241)

收稿日期:2021-11-03; **网络出版日期:**2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wenzhaofei@cigit.ac.cn

and were mainly distributed in the mountainous areas in the east, west and south of the CCEZ. (2) With respect to the ecological security pattern, it was generally characterized by a “three wings with multiple arises” which referred to the spatial distribution of the identified ecological sources and corridors. (3) The currently ecological security pattern of the CCEZ had four main problems need to be paid attention: the spatial distribution of ecological sources were uneven, the ecological sources were in fragmentation patterns, many ecological sources were in conflict with human activities spaces, and many ecological corridors were fragile. Therefore, the reasons behind these weaknesses were discussed and the corresponding improvement strategies were suggested in this paper. The findings of this work is expected to be helpful for providing a guidance for planning land use of CCEZ in the future.

Key Words: Chengdu-Chongqing area; ecological source; ecological corridor; source-corridor method; ecosystem services; InVEST model

成都、重庆是我国西南地区重要的国家中心城市,在成渝地区双城经济圈建设的大背景下,成渝地区协调发展成为了一个热门话题。区域地处长江上游,位于我国第二级地势阶梯处,具有优良的自然资源禀赋,区域生态安全对长江中下游生态环境保护起重要的屏障作用^[1]。成渝地区双城经济圈目前面临经济发展和环境保护的双重压力,在倡导绿色经济的当今社会,推动区域生态环境建设就显得尤为重要^[2]。2021年10月20日中共中央、国务院印发的《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》中提出了生态优先、绿色发展的主要发展原则,赋予了该区域高品质生活宜居地的战略定位^[3]。针对成渝地区双城经济圈的生态本底特征,提取对区域生态安全具有重要影响的生态源地和廊道,识别当前区域生态安全格局,可为提升区域生态持续性提供关键指引。成渝地区双城经济圈生态安全格局的构建,还能够使区域生态过程得到更为合理的调控,区域物质流通和能量循环更好维持,强化和保障区域生态系统健康与生态安全^[4-5]。

生态安全格局起源于景观生态规划方法,其实质是指景观中某种潜在的,对于维护、控制特定区域某种生态过程有着重要意义的关键生态要素的空间格局^[6]。作为沟通生态系统服务与人类社会发展的桥梁,生态安全格局是协调生态环境与社会经济可持续发展的重要空间途径之一^[7]。目前生态安全格局领域的研究方法主要有指标体系法、生态系统服务供需法、情景分析法、生态风险评估法、“源地—廊道”法等^[8]。其中“源地—廊道”法具有较好的空间格局展示,且构建方法已日趋成熟,业已成为生态安全格局构建的主流范式^[6]。针对该范式,学者主要就生态安全格局要素(源地、生态阻力面、廊道)的识别方法和生态安全格局构建的应用两方面开展了研究^[9-11]。

在源地识别方面的研究,主要有直接识别^[9]和构建综合评价指标体系两种途径。其中,构建综合评价指标体系通过对生态敏感性^[12-13]、景观连通性^[14]、生境重要性^[14]等指标的定量评价,保证了源地识别的客观性,相对于直接识别法更为严谨。在生态阻力面设置方面,多基于土地利用类型采用专家打分法直接赋值^[9,15-16];部分学者考虑到地形起伏对物种迁移、物流、能流的阻碍作用,又增加地形因素作为阻力面因子^[17];在此基础上,又有学者认为人为活动对生态要素扩散有着较大的影响,因此使用夜间灯光等可以表征社会经济状况的数据对阻力面进行修正^[18]。在生态阻力面基础上,使用最小累积阻力(Minimum Cumulative Resistance, MCR)模型是提取生态廊道最常用的方法^[6]。已有大量学者从景观、生态承载力、生态足迹以及其他生态安全指数等多方位多角度开展了“源地识别—阻力面构建—廊道提取”的生态安全格局构建研究^[18-21]。

利用“源地—廊道”法开展的生态安全格局构建研究已经十分广泛,大尺度的生态安全格局研究也已经屡见不鲜。Zhao^[22]等基于“结构-质量-过程”框架,对辽河流域的生态安全格局进行了评价,并对现有政策提出修正建议,为大尺度的生态安全格局研究提供了参考依据。Peng^[23]等基于“源地-廊道”模型,构建了云南省的生态安全格局,从省级尺度上评估了人类活动对区域生态安全的干扰影响。Zhang^[11]等提出了生态系统服务功能重要性评价、景观连通性评价与人类生态需求重要性评价相结合的生态资源评价框架,构建了京津

冀地区的景观生态安全格局,为跨传统行政边界的大尺度研究提供了参考。

综上,众多学者在生态安全格局方面所做的研究为本研究中成渝地区双城经济圈生态安全格局构建方面提供了充分的方法和应用参考。过去几年间,虽有零星的相关研究探索^[1,24-25],但这些研究大都缺乏对生态安全格局要素(特别是生态源地)的深入讨论以及对生态安全格局存在问题的改善对策分析,这对于助力当前正积极推进的“生态优先、绿色发展”和“高品质生活宜居地”建设仍显不足。

当前,成渝地区双城经济圈发展空间充裕,但如何在开发过程中确保区域生态安全是当前亟待解决的关键问题,生态安全格局则提供了一种重要的空间途径。考虑到区域横跨平原、丘陵和山地,长江、嘉陵江等重要河流穿梭其中,土壤保持、生境维持和产水服务这三种生态系统服务功能较为重要,可通过识别三者的高价值服务供给区作为区域生态源地,并对生态源地进行分级分析;基于最小累积阻力模型识别生态廊道,构建生态安全格局;识别现存问题,并在此基础上探讨生态安全格局的改善对策,以期为区域开发建设生态城市、保障区域生态安全和打造“高品质生活宜居地”提供空间指引和决策参考。

1 研究区概况

成渝地区双城经济圈位于我国西南地区,区域涉及四川 15 个市与重庆 29 个区县(图 1),总面积约为 18.5 万 km²。成渝地区双城经济圈是我国西部经济的重要增长极,也是我国西部地区发展水平最高、发展潜力较大的城镇化区域,还是实施“长江经济带”和“一带一路”战略的重要组成部分。2019 年全区常住人口约为 9600 万人,地区生产总值近 6.3 万亿元,建设用地面积约为 7338 km²,人口密度大,人类活动空间与生态空间交织。区域内主要包含丘陵、平原、山地三类地形,境内大型河流有长江、金沙江、岷江、沱江、涪江、嘉陵江等,自然资源丰富。西部为海拔较高的横断山脉东部,自然禀赋好,有包括大熊猫、距瓣尾囊草在内的各种珍稀物种;南部高山丘陵纵横,生态空间与农业空间交错;东部有多条呈南北纵向分布的山脉,如华蓥山、明月

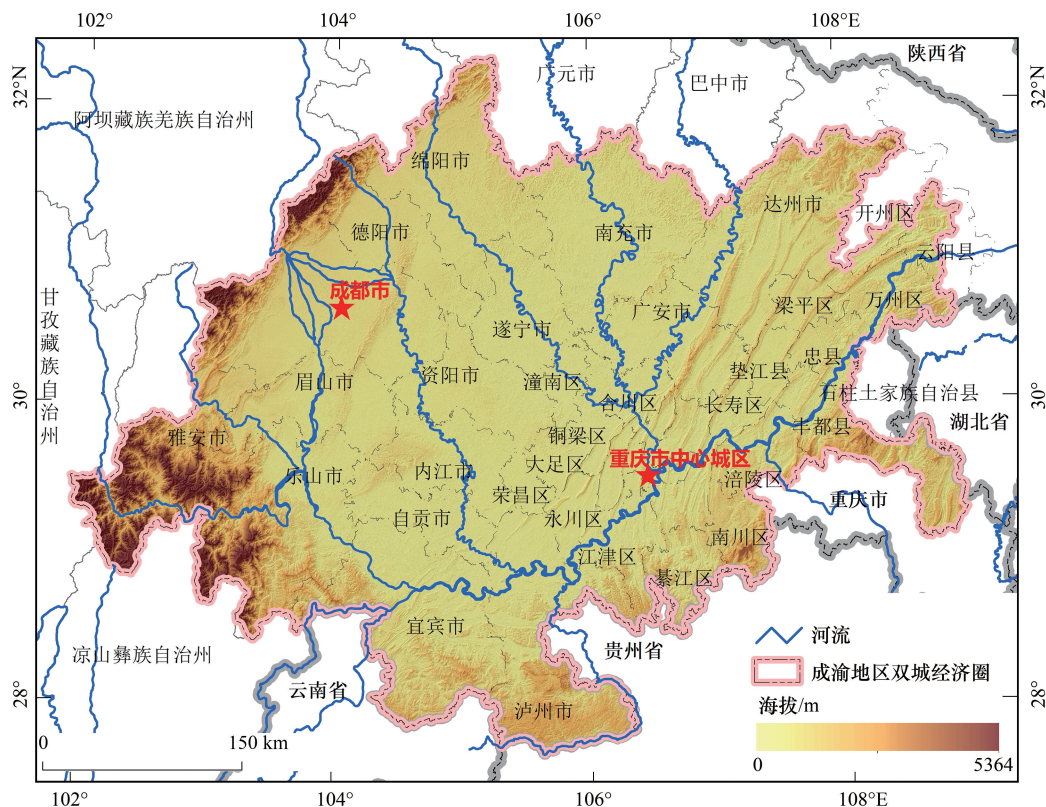


图 1 研究区区位图

Fig.1 Location of the study area

山、铜锣山等,东北部为秦巴山地;中部为四川盆地,包含成都平原、龙泉山、川东丘陵。全区植被覆盖度高,山地丘陵区域天然乔木林密布,河道水网交错,是长江流域上游重要生态屏障。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本研究所采用的数据均来自于国内外公开数据库,包括土地利用数据、气象数据、蒸散发数据、土壤数据、数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)、归一化植被指数 (Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)、国民生产总值 (Gross National Product, GDP)、人口密度。其中,所有地理信息数据均采用 WGS_1984_UTM_Zone_48N 投影坐标系,栅格数据像元大小统一为 1000m。气象数据为 2010 年至 2019 年数据集,处理过程中取 10 年平均值;土壤数据为 2009 年第二次全国土地调查所得;DEM 数据为 2009 年数字高程数据产品;其余数据均为 2015 年数据产品。数据详情如表 1 所示。

表 1 数据来源介绍

Table 1 Description of the data sources

数据名称 Data name	数据类型 Data type	数据来源 Data sources	分辨率/m Resolution
土地利用数据 Land use data	栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心	1000
气象数据 Meteorological data	文本文件	国家气象信息中心	—
蒸散发数据 Evapotranspiration data	栅格数据	https://earthexplorer.usgs.gov/	500
土壤数据 Soil data	栅格数据	世界土壤数据库 (HWSD)	1000
数字高程模型 DEM	栅格数据	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)	30
归一化植被指数 NDVI	栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心	1000
国民生产总值 GDP	栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心	1000
人口密度 Population density	栅格数据	中国科学院资源环境科学与数据中心	1000

2.2 研究方法

2.2.1 生态源地的识别与评价

生态源地是指生态系统相对稳定且对生态安全有重要意义或具有辐射功能的生境斑块^[26],考虑到研究区特性,本文提取生物多样性高、水土保持能力强、产水服务功能好的生境作为生态源地。结合研究区的地理环境特征,研究区中包含了三峡库区水土保持生态功能区,加上川中地区广泛分布紫色土易发生水土流失^[27],因此选取水土保持功能作为评价指标之一;区域内还有川滇森林生态及生物多样性功能区、秦巴生物多样性功能区等重要的陆域生态功能区^[28],因此选取生境维持功能作为指标之一;考虑到区域为长江流域重要汇水区,选取产水服务功能作为评价指标之一。具体而言,生境维持使用生态系统服务和权衡综合评估 (InVEST) 模型的生物多样性模块进行评估^[29–30];水土保持使用修正的通用土壤流失方程 (RUSLE),以潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值计算土壤保持量^[31];产水服务使用 InVEST 模型的产水模块,基于水量平衡方法进行估算^[32]。

InVEST 模型中的生境维持模块基于土地利用类型,对不同生境生物多样性受各类生态威胁因子的响应进行分析,其计算所得的生境质量反映了区域内的生物多样性^[33]。模型输入参数包括栅格类型的当前土地利用数据、威胁因子数据、威胁源数据、生境类型及生境类型对威胁的敏感性。土地利用数据中用数字代码表

示每种地类;威胁因子为.csv 格式的表格数据,记录不同威胁因子(如城市、农村居民地)对自然生境的影响以及影响距离;威胁源数据为栅格形式的各类威胁因子空间分布;生境类型及生境类型对威胁的敏感性同样为.csv格式的数据,用来表示不同土地利用类型对各类威胁的敏感程度。

土壤保持计算方法参考我国生态红线划定指南推荐的修正通用水土流失方程(RUSLE),通过计算潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值,评估生态系统水土保持功能,计算公式如下:

$$A_c = R \times K \times L \times S \times (1 - C) \quad (1)$$

式中, A_c 代表土壤保持量($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$), R 代表降雨侵蚀力因子($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$), K 代表土壤可蚀性因子($\text{t hm}^2 \text{h hm}^{-2} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$), L 代表坡长因子, S 代表坡度因子, C 代表植被覆盖因子。

InVEST 模型的产水服务模块通过细化区域内的子流域,可以计算各子流域对区域产水量的相对贡献,从而评估出产水服务较为重要的子流域^[34],模型方法源于水量平衡方程,将降水量减去蒸散发量得到产水量,其结果包括地表产流、土壤含水、枯落物持水量及冠层截留量^[29]。模型基于降雨数据、蒸散发数据、土地利用数据、流域数据、生物物理系数表等数据,采用产水模块进行计算。降雨、蒸散发、土地利用数据均为统一栅格大小的栅格数据,流域数据为研究区的流域矢量数据,生物物理系数表为.csv 格式的表格数据,主要记录各类土地利用类型的植物蒸散发系数,计算公式如下:

$$Y_x = \left(1 - \frac{\text{AET}_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (2)$$

$$\frac{\text{AET}_x}{P_x} = \frac{1 + w_x R_{xj}}{1 + w_x R_{xj} + 1/R_{xj}} \quad (3)$$

$$w_x = Z \frac{\text{AWC}_x}{P_x} \quad (4)$$

$$R_{xj} = \frac{k_{ij} \times \text{ET}_0}{P_x} \quad (5)$$

式中, Y_x 表示产水量, P_x 表示年降水量, AET_x 表示年实际蒸散发,上述公式中, R_{xj} 为土地利用覆被类型 J 上栅格单元 x 的 Budyko 干燥指数,定义为潜在蒸散发与降雨量的比值; w 是一个经验参数; Z 为经验常数,与区域降水模式和水文特征相关; AWC_x 为土壤有效含水量,由植物可利用水分含量与土壤的最大根系埋藏深度,植物根系深度共同决定; k_{ij} 是植物蒸散系数; ET_0 表示潜在蒸散发。

在此基础上,本研究拟选取位于每种服务靠前(以自然断点法将生态系统服务划分为 3 个等级,选取最高等级)的斑块,取并集作为生态源地备选区,从而保证生态源地具有较好的生态系统服务功能^[26],同时,考虑到天然林地与水域的生态重要性,将区域内的林地、水域与生态源地备选区叠加^[24,35]。

在评价过程中,单个生态系统服务功能的计算并不会直接考虑土地利用的影响,因此识别的生态源地可能与建设用地重合,对这部分生态源地进行修正。此外,为了确保生态源地的功能完整性并能对周围环境产生一定的影响,需要源地具有足够大的面积规模,本文在参考前人研究的基础上,通过多次调整生态源地面积阈值,保留面积大于 10km^2 、连通性较好的斑块作为最终的生态源地^[36-37]。

专家打分法为生态源地综合识别的重要方法^[14,38],本文基于专家打分法的思想,以已发表论文作为“专家”,通过统计三种生态系统服务功能(生境维持、土壤保持、产水服务)在这些论文中出现的次数,间接评估它们相对重要性和权重。在中国知网上检索成渝地区生境维持、土壤保持、产水服务三种生态系统服务的相关文献,检索到生境维持/生物多样性相关文献 980 篇,土壤保持/土壤侵蚀相关文献 519 篇,产水服务/水源涵养相关文献 265 篇,三者文献量之比约为 0.55:0.3:0.15,因此确定权重为生境维持(0.55)、土壤保持(0.3)、产水服务(0.15)。对三者进行加权叠加求和,并按照表 3 划分源地等级,Ⅰ级源地表示生态系统服务功能最强的源地,其次为Ⅱ、Ⅲ级源地,生态源地分级标准如表 2 所示。

表 2 生态源地分级表

Table 2 Three levels of ecological sources

生态源地等级 Ecological sources	生态系统服务加权求和值 Weighted sum of ecosystem services	生态源地等级 Ecological sources	生态系统服务加权求和值 Weighted sum of ecosystem services
I	2.5—3	III	1—2
II	2—2.5		

2.2.2 生态阻力面设置

在生态空间中,物种迁徙、能量流动会受到各种因素的干扰和限制,主要包括土地利用方式、地形地貌特征等^[24]。生态阻力面就是在综合考虑以上影响因素的情况下,计算物种在迁徙中所受的阻力。参照前人研究^[25],同时考虑到研究区内山地众多,特别是区域西部高山林立,地形起伏大,同样的土地利用类型在不同地形条件下阻力相差较大,因此本文以生态源地为基础,选取土地利用方式和地形地貌作为主要阻力因子。在考虑各阻力因子的权重大小时,本文参考了洪丹等^[35]在四川龙门山地区所做的研究,认为生态源地本身阻力值较小,非生态源地阻力值相对较大,因此将生态源地本身纳入阻力面构建的考虑范围,并赋权重为 0.5。土地利用要素与地形要素的权重分布参考赵伟等^[24]的研究,二者权重分别赋值为 0.3、0.2。

表 3 阻力因子及指标权重表

Table 3 Resistance factors and their corresponding indicators with weights

阻力因子(权重)	阻力因子		阻力值
Resistance factors (Weight)	Resistance factors		Resistance value
土地利用类型(0.3) Land use types (0.3)	耕地	水田	50
		旱地	70
	林地	林地	15
		灌木林地	30
		疏林地及其他	40
		高覆盖草地	40
	草地	中覆盖草地	50
		低覆盖草地	80
		水域	
	建设用地	城镇用地	150
		农村居民点	120
		其他建设用地	500
未利用地		未利用地	100
地形地貌因素(0.2) Topography factors (0.2)	坡度	<6°	5
		6°—15°	15
		15°—25°	50
		25°—35°	75
		>35°	100
		地形起伏度	0—20m
	20—200m		15
	200—500m		50
	500—1500m		75
	>1500m		100
	生态源地(0.5) Ecological sources (0.5)		源地
		非源地	100

尽管本文已经加入了地形因素来描述扩散阻力,但依旧缺少对人类活动干扰的考虑,部分学者基于夜间灯光数据来表征人类活动因子^[18,39],再利用阻力面修正公式进行修正。本文直接利用人口密度数据与 GDP

数据对阻力面进行修正,公式如下:

$$R_i = \frac{SE_i}{SE_a} \times R \quad (6)$$

式中, R_i 为经过社会经济要素修正后的栅格生态阻力系数; SE_i 为人口密度与 GDP 数据归一化后的值; SE_a 为区域人口密度与 GDP 归一化后的平均值, R 为栅格 i 对应土地利用类型的基本生态阻力系数。

2.2.3 生态廊道提取

生态廊道作为区域内不同景观之间物质流和能量流的连接通道,是生态安全格局的重要组成部分,也是物种迁徙的重要通道,具有连接破碎生境、保护生物多样性等多种功能^[8,40]。识别出关键廊道有利于加强源地间种群与物质的交流,提高生态源地抗干扰能力和恢复能力;而对现有廊道进行优化,重点改进廊道布局,有助于增强生态系统功能的完整性。本研究采用最小累积阻力模型提取源地间的生态廊道^[41],最小累积阻力模型综合考虑源、距离和景观介面三种因素,计算物种从起点到目的地的运动过程中花费的代价,选取其中代价最小的通道作为源地之间的生态廊道。MCR 模型通过对土地利用类型、地形地貌因素、人类活动因素进行综合分析,得到的一个理论上的物种迁徙、物质传播潜在通道^[42],计算公式如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (7)$$

式中, MCR 为最小累积阻力值; D_{ij} 为物种从源地 j 到景观单元 i 的空间距离; R_i 为景观单元 i 对物种运动的阻力系数; f 表示累积阻力与生态过程的正相关关系。此外,河流对于生态源地直接的物质流通、物种迁徙、种子传播起着重要的连通作用,区域内大型河流包括长江、岷江、沱江、嘉陵江、涪江、渠江,选取以上大型河流作为天然廊道。

3 结果

3.1 三种主要生态系统服务功能评价

3.1.1 生境维持

运用 InVEST 模型的生境质量模块对研究区的生境维持功能进行定量评估,以表征生态系统维持生物多样性的能力高低。利用自然间断点法对生境质量计算结果分类,结果表明(图 2),区内高质量生境主要位于川西龙门山一带,如成都、德阳、绵阳三市西部,雅安市大部分地区,乐山市西南部,达州市北部,泸州市、宜宾市南部;此外,在华蓥山、铜锣山、明月山三条山脉集中分布,在江津区、南川区、丰都县有大面积分布,在綦江县、黔江县、梁平区、开州区等地也有零星分布。从分布格局来看,高质量生境主要分布在山地区域,平原地区几乎没有高质量生境。主要原因在于平原多为耕地、建设用地,生态系统原真性差,植被类型单一,人为干扰大,不利于野生动植物生存繁殖;相比之下,山区多为林地,地形复杂多变,人类活动少,有利于生物的自然生长繁衍,因此生物多样性高。

3.1.2 土壤保持

根据 RUSLE 模型,计算出 2019 年研究区土壤保持量约为 25.6 亿 t,平均土壤保持能力约为 $139 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,最高土壤保持能力约为 $1200 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。按照自然间断点分级法将土壤保持功能划分为低、中、高三级(图 2),可以看出,土壤保持功能高的区域主要分布在四川西部山区、南部丘陵地区与川北秦巴山区,如绵阳市、德阳市、成都市西部,雅安市、眉山市西南部,乐山市、宜宾市南部、达州市北部等地;以及重庆市山区,如开州区、云阳县、万州区、梁平区、南川区等地;此外,在研究区中部平原地区有少量分布。总的来看,土壤保持功能高的区域主要分布在西南山地区域,这些区域植被覆盖度高,多为乔木,固土保水能力强。

3.1.3 产水服务

产水量是生态系统服务中重要的服务类型,也是许多生态过程和生态服务功能的基础,其定量评估和可视化对区域生态系统保护及水资源可持续利用具有重要意义。通过 InVEST 模型对成渝地区双城经济圈产

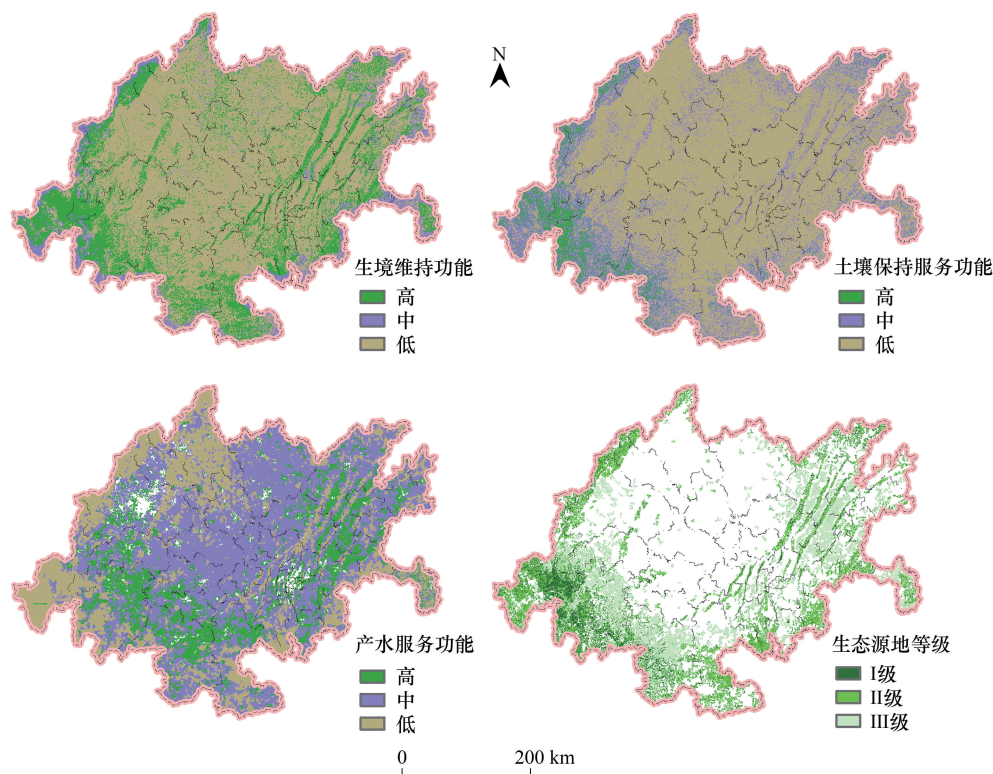


图2 不同生态系统服务功能及生态源地分布格局

Fig.2 Spatial distribution patterns of the three different ecological services and ecological sources

水量进行估算,结果表明(图2),区域年产水深度均值约为337mm,最大产水深度约为1283mm,最大值位于四川省宜宾市,全区年均产水量约为604亿 m^3 。产水量高值区域主要集中分布在雅安市东部、眉山市西部、乐山市西部、宜宾市西南部等地,以及重庆市华蓥山、明月山、铜锣山等山脉之间的平原地区;此外在江河两岸部分地区有少量集中分布,在平原地区有零散分布。

3.2 生态安全格局

3.2.1 生态源地

识别出区域内各级生态源地(图2、表4、表5),源地共计507处,总面积约为67191 km^2 ,其中四川部分约为50323 km^2 ,约占总面积的75%,重庆部分约为16868 km^2 ,约占总面积的25%。在所有四川的地级市和重庆的区县中,乐山市的生态源地最多,面积为9718 km^2 ,占乐山市总面积76.3%,其次为宜宾市和雅安市,面积分别为8807 km^2 和6663 km^2 。最大生境斑块为32318 km^2 ,位于四川省西部与南部的山地区域,主要是德阳市西部、成都市西部、雅安市南部、乐山市南部与宜宾市西南部。Ⅱ级生态源地面积最大,约占源地总面积的44.9%,Ⅰ级生态源地最小,仅占源地总面积的13.8%。

从空间分布来看,研究区生态源地主要分布在东西南三方的山地区域,西部与南部源地连通性较好,多为连续分布的大规模源地;东部源地则较为破碎,仅在华蓥山、铜锣山、明月山等山脉区域集中连片分布;北部生态源地缺乏,仅有零星分布;中部区域仅有少量生态源地零星分布,主要分布在河流、湖泊及周边区域,以及龙泉山等地区。不同等级的生态源地的分布差异主要体现在海拔上,Ⅰ级生态源地所在区域平均海拔约为1365m,Ⅱ级生态源地所在区域平均海拔约为1117m,Ⅲ级生态源地所在区域平均海拔约为529m。Ⅰ级源地主要分布在川西南地区的邛崃山、峨眉山等高山区域及川东北的秦巴山区;Ⅱ级源地主要分布在海拔稍低的山地区域;Ⅲ级源地主要分布在平原及海拔较低的丘陵区域,与Ⅱ级源地接壤。

表 4 生态源地面积统计/km²

Table 4 Statistics of ecological source area for different counties

市县 Cities	生态源地 Ecological sources	市县 Cities	生态源地 Ecological sources	市县 Cities	生态源地 Ecological sources
乐山	9718	丰都县	1674	璧山区	289
宜宾	8807	黔江区	1559	彭水苗族土家族自治县	277
雅安	6663	南川区	1482	开州苗族土家族自治县	239
达州	5778	江津区	1430	铜梁区	203
成都	5082	垫江县	1203	九龙坡区	185
泸州	4840	涪陵区	1188	北碚区	167
眉山	3047	綦江区	1076	沙坪坝区	137
广安	1822	梁平区	1047	合川区	135
绵阳	1436	万州区	1021	南岸区	115
南充	1069	忠县	880	荣昌区	104
德阳	940	长寿区	772	大足区	91
自贡	591	永川区	438	江北区	74
内江	375	云阳县	383	大渡口区	37
遂宁	114	巴南区	368	渝中区	0
资阳	41	渝北区	292		

表 5 不同生态源地等级面积统计

Table 5 Total area of the three levels of ecological sources

生态源地等级 Ecological sources level	面积/km ² Area	生态源地等级 Ecological sources level	面积/km ² Area
I	9285	Ⅲ	27734
Ⅱ	30172		

尽管区域内生态源地数量众多,但从空间分布来看主要集中在研究区东、西、南部的山地及周边地区,研究区中部分布较少。尤其在中部平原地区的嘉陵江、涪江、沱江、岷江等大型河流两岸,生态源地少且连通性差。此外,I级源地主要分布在区域西南部,在东部、中部、北部有少量分布,重庆市I级源地面积约为863km²,仅占I级源地总面积的9.29%。并且不少源地规模较小,其中有286处面积小于20km²。破碎源地主要分布在川东北达州市、南充市部分地区,川中平原地区,川南宜宾市、泸州市部分地区及重庆北部万州区、开州区、云阳县、忠县等地,另外在川中平原地区有零星分布。将生态源地与建设用地叠加分析,发现生态源地还与建设空间存在一定冲突(图3)。全区共有3074km²的生态源地与建设用地、道路等人类活动频繁区域毗邻或相交,共有16491km的道路穿过生态源地。与建设用地冲突主要分布在成都市与重庆主城区周边地区,与道路冲突主要分布在研究区东、南、西部的山地区域。

3.2.2 生态阻力面

综合考虑了土地利用类型、地形地貌因素、生态源地分布及社会经济活动的生态阻力面(图4)呈现出从两中心(成都市主城区、重庆市主城区)向四周发散的状态,阻力值高值区主要集中于两中心及各市、区县的城镇区域,其次为平原地区,阻力低值区域主要分布在研究区周围的山地区域。

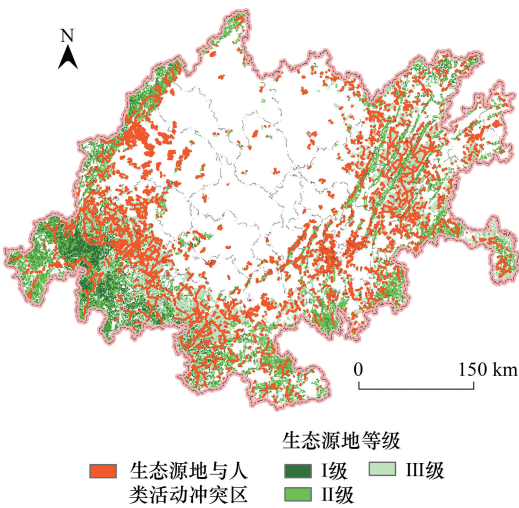


图 3 与人类活动空间冲突的生态源地分布

Fig.3 Spatial distribution of the ecological sources where are having conflicts with human activities spaces

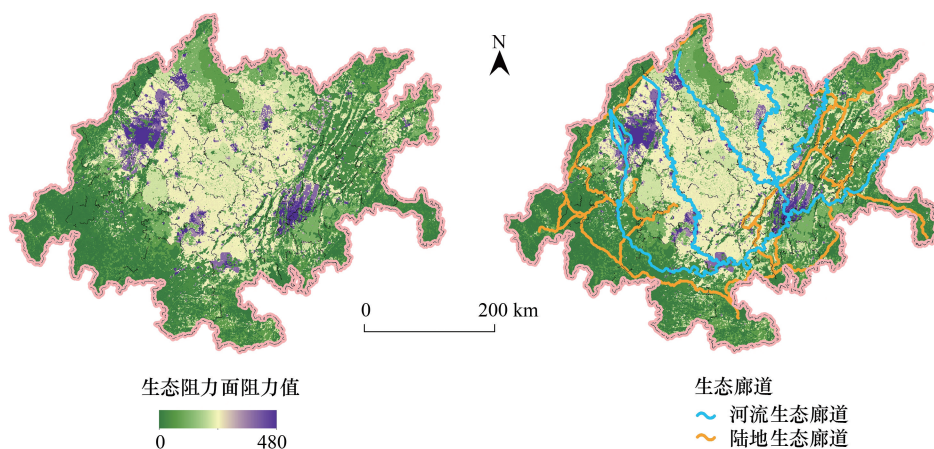


图4 构建的生态阻力面及生态廊道

Fig.4 Spatial distributions of the generated ecological resistance surface and the identified ecological corridor

3.2.3 生态廊道

基于最小累积阻力法提取生态廊道(图4),识别出陆地生态廊道26条,总长度4075km,河流生态廊道6条,总长度3040km。生态廊道主要依托于现有的生态源地形成。空间上西部山区陆地生态廊道呈东北-西南向沿龙门山延伸分布,南部丘陵地区呈东-西向分布,东部丘陵地区呈东北-西南向分布;中部地区河流生态廊道呈西北-东南向分布,东部地区河流生态廊道呈西南-东北向分布,全区生态廊道连通了东西南3方生态源地。将陆地生态廊道与交通路网数据叠加分析发现,陆地生态廊道与区域内的国道、省道、县道共有423处相交(图5),交点处可能会对生态廊道功能产生干扰。

3.2.4 生态安全格局构建

成渝地区双城经济圈的生态安全格局分布如图6所示,整体上呈现出“三翼-多轴”的生态安全格局,“三翼”是指研究区内的生态源地主要分布于西部四川龙门山区、川南山区与东部的丘陵地区。“三翼”地区均为山区,不利于建设,人类活动较少,生态系统原真性保留较好,生物多样性高。“西翼”为岷江、沱江、涪江发源地,“南翼”为大渡河流经地,是下游生态屏障,保障了下游居民用水安全;“东翼”为长江上游途径地,也是三峡库区所在地,“三翼”生态安全关系着长江流域生态安全。“多轴”是指贯穿东西“三翼”的三条生态廊道与连接两翼南北部的多条廊道。西部生态廊道贯通岷山、龙门山、西岭雪山、邛崃山、峨眉山等山脉;北部生态廊道连通西部岷山山区与东部华蓥山、铜锣山、明月山等山脉;中部生态走廊连通研究区西部山区与东部江津、綦江、南川等地山区;南部生态走廊连通西部邛崃山、峨眉山与东部泸州山区;东部生态廊道连通泸州东区山区与华蓥山等三条山脉,直到川东南地区秦巴山脉。

4 讨论

4.1 存在的主要问题及原因分析

生态源地分布不均。从整个区域来看,相比“三翼”地区,研究区中部区域生态状况较差,而“东翼”生态源地质量又略低于“西翼”与“南翼”。从生态源地分布来看,研究区西部生态质量略高于东部,特别体现在

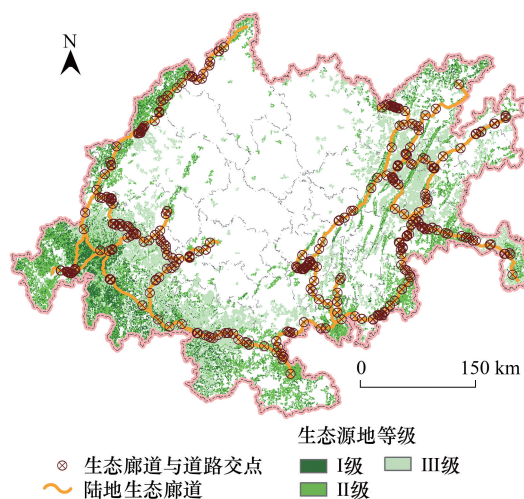


图5 生态廊道与主要交通道路的交叉点分布

Fig.5 Spatial distribution of the intersection points between ecological corridors and main roads

I级源地的分布上,大部分I级源地都分布于区域西南。盆地内多为建设用地与耕地,相对于周围山区生物多样性较差,而东部山区水土保持能力比西部山区弱,因此造成了研究区生态源地分布不均的现状。

生态源地破碎。研究区人口密集,平均人口密度为519人/km²,还分布众多建设用地与耕地,全区建设用地面积为7338km²,耕地面积为113688km²,建设用地与耕地面积占区域总面积的65.42%。密集的人类活动对自然景观造成了割裂,此外,由于川渝地区山区山高坡陡,区域内广泛分布易受侵蚀的紫色土,整体上土壤保持能力一般,因此土壤保持功能区较为破碎,导致生态源地破碎化问题突出。相对于连片的大规模生态源地,破碎的生态源地生态系统抗干扰能力弱,且与周围源地之间缺乏廊道沟通,无法与周围源地形成有效的物质交换与能量流通,容易受外界干扰而退化。

生态源地与建设空间的冲突明显。成都东面为龙泉山,西面为龙门山,均为生态质量较好的生态源地,但成都地处平原,近年城市扩张较快,道路交通建设密布,对生态源地存在不小的影响;重庆主城区附近的缙云山、铜锣山、明月山等山脉及周边地区生态质量较高,但主城区人类活动频繁,易对周边生态源地造成干扰。与城镇建设用地的冲突区域主要为Ⅲ级生态源地,Ⅲ级源地多位于平原地区,与城镇、耕地接壤,且Ⅲ级源地生态质量相对较差,受到干扰后更容易退化,随着城市的扩张,生产生活空间对生态空间的侵占将不可避免地发生,对于这部分生态源地需要给予更多关注。在山地区域,由于受沿山道路的影响,尤其是道路交通建设过程,造成表层土大量流失,生态环境遭受严重破坏。

生态廊道脆弱且功能不足。区域内遍布的农村居民点与各级道路对生态源地间的物种扩散、迁徙造成较大阻力,在平原地区的破碎生态源地之间,多为建设用地与耕地,源地之间不能形成长期有效的生态廊道,而陆地生态廊道与道路之间的众多交点还使生态廊道面临被切断的风险。此外,河流生态廊道也面临功能不足的问题,尽管区域内的几条大型河流能保障水、土、水生物种的流通,但方向性明显,且对于陆生物种的流通也存在一定的困难。

4.2 改善对策分析

研究区中部生态环境较差是一个突出问题,农村地区注重粮食生产而忽略了生态建设。近年来,随着国家对于乡村振兴的重视,农村地区开始探索生态农旅“三位一体”融合的发展模式。例如四川省宜宾市翠屏区的“茶园牧歌”项目,结合当地茶叶种植进行产业升级,发展农业生态旅游,将“茶园牧歌”打造成国家3A级旅游景区,一方面促进当地经济发展,更重要的是通过这样的设计规划,在保证农业生产的同时改善当地生态环境。在成渝地区双城经济圈的农村地区推广这种模式,可以有效提高区域中部生态状况。

针对农村地区特别是山区农村的生态源地破碎问题,开展小流域水土保持综合治理。例如达州市北部的秦巴山区,因地制宜采取更具针对性的措施,加强天然林保护工程和退耕还林工程,采取植树种草、边坡固定、改坡为梯、25°以上坡耕地退耕还林还草等措施进行治理修复。重庆山区生态源地质量普遍为二级源地,少有一级源地,针对这一情况,参考缙云山国家级自然保护区生态环境综合整治模式对山区开展生态环境治理,整治违法违规占地,覆土复绿。通过一系列治理手段,提高区域内水土保持与产水服务功能,使农业用地与自然生境生态环境质量相适应,以连通破碎的生态源地,扩大生态源地规模。

针对在城镇化过程中出现的生产、生活空间侵占生态空间的问题,要完善国土空间规划体系,合理布局三生用地,追求人与自然的和谐发展。同时积极推进城市生态绿地基础建设,发挥出城市公园的生态功能。对

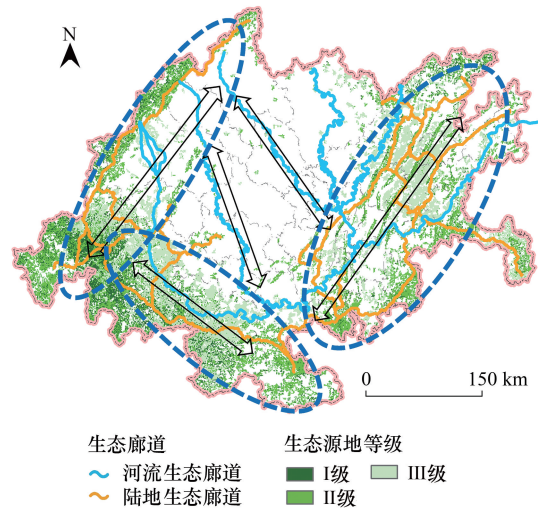


图6 生态安全格局

Fig.6 Ecological security pattern of the study area

于整个区域的生态源地,要坚守住一级源地底线,提高二、三级源地质量,在保证生活、生产空间的同时,扩展生态空间,坚决守住生态环境质量“只能更好、不能变坏”的刚性底线。

针对生态廊道功能不足的问题,在区域西部,以“大熊猫国家公园”为基础,通过对生态廊道关键节点进行保护等措施,沟通区域西部的大片生态源地以加强其连通性,强化生态廊道稳定性,整体提高生态源地质量。在区域东部、中部,川渝两地共同推进长江流域保护工作,落实河湖长制,大力实施“清船”“清网”“清江”“清湖”行动,保证河流生态廊道的稳定性,同时恢复河湖生态系统生物多样性,提高区域东部、中部生态质量。考虑到川渝地区我国重要的水稻、油菜籽产区,在保护生态的情况下还要尽可能保证粮食产量,因此在保护廊道时尽量基于原有廊道进行修复、保护,例如采取对荒废河道的修复利用,加强对滨河绿带的保护,加强河流廊道两岸林地恢复和保护等措施。

4.3 展望

本文从成渝地区双城经济圈融合发展的角度出发,以跨行政界线的眼光审视区域整体生态状况,再从全局出发提出生态建设对策,为建设山清水秀美丽之地,筑牢长江上游重要生态屏障建言献策。方法上,本文基于“源地-廊道”理论,选取生境质量、水土保持、产水服务三类指标进行生态格局构建,三类指标分别能反应区域内的生物多样性、植被覆盖度、水热状况,能基本概括区域内的生态状况。从研究结果来看,因选取指标不同,生态源地的分布与前人结果^[1,24-25]略有差异,但总体来说,基本上生态源地都分布在东、南、西部的山地区域。在阻力面构建方面,本文在 MCR 模型框架下,使用人口密度数据与 GDP 数据更为直观地表达人为活动对生态阻力面的影响,从而构建出更符合社会经济现实的生态廊道。由于本文所选用的生态指标相对较少,对于区域内的生态安全格局构建相对较为粗疏,依托更详细的地理数据,更细致的调查手法对区域进行更全面的生态评估有待进一步深入探讨。此外,本文虽然通过模型计算的方法识别了研究区的生态源地与潜在生态廊道,但是基于地理空间数据所得的成果在具体生态过程中是否准确需要更多探讨,因此,结合生态过程的大尺度生态安全格局研究值得进一步关注。

5 结论

本文从研究区实际情况出发,基于本地生态系统服务功能提取了生态源地,基于土地利用类型设置生态阻力面,根据最小累积阻力模型提取生态廊道,最终形成研究区域现状生态安全格局的识别结果。研究得出如下结论:(1)研究区共有生态源地 507 处,共计面积 67191km²,主要分布在东西南三方的山地区域,中部区域仅有少量生态源地零星分布;(2)研究区整体上呈现出“三翼-多轴”的生态安全格局,“三翼”为生态源地,为区域提供优质的生态系统服务,“多轴”为生态廊道,连通“三翼”,保障生态源地的连通性与持续性;(3)研究区存在生态源地空间分布不均、生态源地破碎、生态源地与人类活动冲突、生态廊道脆弱且功能不足四大问题。随后结合研究区域现有生态安全格局与自然社会特征,提出生态安全格局的未来改善对策。

参考文献(References):

- [1] 李咏红, 香宝, 袁兴中, 刘孝富. 区域尺度景观生态安全格局构建—以成渝经济区为例. 草地学报, 2013, 21(1): 18-24.
- [2] 李兴苏. 成渝城市群绿色发展满意度评价及实施路径研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [3] 新华网. 《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》发布. [2021-10-20]. http://www.news.cn/politics/zyw/2021-10/20/c_1127978492.htm.
- [4] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长预警. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [5] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张懿铨. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.
- [6] 彭建, 赵会娟, 刘焱生, 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.
- [7] 吴健生, 岳新欣, 秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例. 地理研究, 2017, 36(3): 429-440.
- [8] 卢慧婷, 严岩, 赵春黎, 吴钢. 雄安新区多尺度生态安全格局构建框架. 生态学报, 2020, 40(20): 7105-7112.
- [9] 李晖, 易娜, 姚文璟, 王思琪, 李志英, 杨树华. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划. 生态学报, 2011, 31(20): 5928-5936.
- [10] 郭家新, 胡振琪, 李海霞, 刘金兰, 张雪, 赖小君. 基于 MCR 模型的市域生态空间网络构建. 农业机械学报, 2021, 52(3): 275-284.
- [11] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, Wu J S. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security

- pattern: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(3): 701-714.
- [12] 曹玉红, 曹卫东, 吴威, 梁双波. 基于自然生态约束空间差异的区域生态安全格局构建. *水土保持通报*, 2008, 28(1): 106-109, 118-118.
- [13] 钱颖, 杨建军. 基于生态敏感性和景观格局的城市生态带规划探究. *中国园林*, 2014, 30(6): 107-111.
- [14] 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.
- [15] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. *生态学报*, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [16] 许文雯, 孙翔, 朱晓东, 宗跃光, 李杨帆. 基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别. *生态学报*, 2012, 32(4): 1264-1272.
- [17] Li Y F, Sun X, Zhu X D, Cao H H. An early warning method of landscape ecological security in rapid urbanizing coastal areas and its application in Xiamen, China. *Ecological Modelling*, 2010, 221(19): 2251-2260.
- [18] 杨彦昆, 王勇, 程先, 李维杰, 高敏, 王家录, 傅俐, 张瑞. 基于连通度指数的生态安全格局构建——以三峡库区重庆段为例. *生态学报*, 2020, 40(15): 5124-5136.
- [19] Reshmidevi T V, Eldho T I, Jana R. A GIS-integrated fuzzy rule-based inference system for land suitability evaluation in agricultural watersheds. *Agricultural Systems*, 2009, 101(1/2): 101-109.
- [20] 张学渊, 魏伟, 颜斌斌, 郭泽呈, 周俊菊. 西北干旱区生态承载力监测及安全格局构建. *自然资源学报*, 2019, 34(11): 2389-2402.
- [21] 李鹏辉, 徐丽萍, 刘笑, 吴品儒. 基于三维生态足迹模型的天山北麓绿洲生态安全评价. *干旱区研究*, 2020, 37(5): 1337-1345.
- [22] Zhao C L, Wang C X, Yan Y, Shan P, Li J X, Chen J G. Ecological security patterns assessment of Liao River basin. *Sustainability*, 2018, 10(7): 2401.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 陈田田, 彭立, 王强. 基于多情景决策和生态系统服务权衡的成渝城市群生态安全格局识别. *中国环境科学*, 2021: 1-23. (2021-03-25). <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210324.001>.
- [26] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. *地理学报*, 2018, 74(4): 701-710.
- [27] 鲍玉海, 丛佩娟, 冯伟, 王海燕, 贺秀斌, 田风霞. 西南紫色土区水土流失综合治理技术体系. *水土保持通报*, 2018, 38(3): 143-150.
- [28] 中华人民共和国环境保护部. 全国生态脆弱区保护规划纲要. (2008-09-27). http://www.gov.cn/gongbao/content/2009/content_1250928.htm.
- [29] 张梦迪, 张芬, 李雄. 基于 InVEST 模型的生境质量评价——以北京市通州区为例. *风景园林*, 2020, 27(6): 95-99.
- [30] 廖珍梅, 王烜. 基于 InVEST 模型的滇池流域生境质量评估. *三峡生态环境监测*, 2021: 1-12. (2021-05-20). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1214.X.20210520.1610.006.html>.
- [31] 宁婷, 郭新亚, 荣月静, 杜世勋, 李超. 基于 RUSLE 模型的山西省生态系统土壤保持功能重要性评估. *水土保持通报*, 2019, 39(6): 205-210.
- [32] 韩念龙, 张伟璇, 张亦清. 基于 InVEST 模型的海南岛产水量的时空变化研究. *海南大学学报: 自然科学版*, 2021, 39(3): 280-287.
- [33] Kooistra L, Wamelink W, Schaepman-Strub G, Schaepman M, Van Dobben H, Aduaka U, Batelaan O. Assessing and predicting biodiversity in a floodplain ecosystem: assimilation of net primary production derived from imaging spectrometer data into a dynamic vegetation model. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(5): 2118-2130.
- [34] R Sharp, R Chaplin-Kramer, S Wood, A Guerry, James Douglass. InVEST 3.3.0 user's guide. 2015.
- [35] 洪丹, 陈晓东. 国土空间生态修复背景下区域生态安全格局构建及优化——以四川省龙门山地区为例. *园林*, 2021, 38(11): 92-99.
- [36] 王琦, 付梦娣, 魏来, 韩煜, 史娜娜, 李俊生, 全占军. 基于源-汇理论和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建——以安徽省宁国市为例. *环境科学学报*, 2016, 36(12): 4546-4554.
- [37] 潘竞虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建. *生态学杂志*, 2016, 35(3): 791-799.
- [38] 张玥, 许端阳, 李霞, 张晓宇, 王小博, 王绍强. 中-老交通走廊核心区生态廊道构建与关键节点识别. *生态学报*, 2020, 40(6): 1933-1943.
- [39] 吴健生, 牛妍, 彭建, 王政, 黄秀兰. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的 1995-2009 年中国地级市能源消费动态. *地理研究*, 2014, 33(4): 625-634.
- [40] 邓金杰, 陈柳新, 杨成韞, 徐志博. 高度城市化地区生态廊道重要性评价探索——以深圳为例. *地理研究*, 2017, 36(3): 573-582.
- [41] 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.
- [42] 陈群, 刘平辉, 朱传民. 基于 MCR 模型的抚州市生态安全格局构建. *水土保持通报*, 2022: 1-9. [2022-03-10]. <https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20220124.001>.