

基于景观连通性优化的坝上地区张家口段 生态安全格局构建

徐泽皓, 邱燕, 李磊, 张鑫

(河北建筑工程学院 建筑与艺术学院, 河北 张家口 075000)

摘要: [目的] 构建坝上地区张家口段生态安全格局, 识别关键生态要素及其空间优化方向, 为稳定坝上生态屏障及生态空间管控提供科学依据。[方法] 通过评估水源涵养、碳存储、生境质量和水土保持等生态系统服务功能, 结合生态敏感性评价与 MSPA 形态学空间格局分析识别生态源地, 基于最小累积阻力模型(MCR)与电路理论构建综合阻力面, 提取生态廊道及生态夹点与障碍点, 开展生态安全分区与格局优化。[结果] 坝上地区高与较高生态安全区面积为 5 423 km², 占研究区的 39.4%; 共识别出生态源地 21 块(430 km²), 生态廊道 50 条(总长 1 600 km), 生态节点 127 个, 其中生态夹点 36 个, 生态障碍点 91 个, 整体呈现“高区聚源连廊, 低区障碍密布”的空间特征。[结论] 坝上地区生态安全格局空间分异显著, 高安全区是维系区域生态连通与稳定的核心, 中低安全区是影响生态流通的关键区域, “五区三带”格局能够有效统筹源地保护、廊道连通与重点修复区域。

关键词: 生态安全格局; 坝上地区; 最小累积阻力模型; 电路理论

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2026)02-0191-11

中图分类号: X171.4

文献参数: 徐泽皓, 邱燕, 李磊, 等. 基于景观连通性优化的坝上地区张家口段生态安全格局构建[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 191-201. Xu Zehao, Qiu Yan, Li Lei, et al. Construction of ecological security pattern at Zhangjiakou section of Bashang region based on landscape connectivity optimization [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 191-201.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.008

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.008

Construction of ecological security pattern at Zhangjiakou section of Bashang region based on landscape connectivity optimization

Xu Zehao, Qiu Yan, Li Lei, Zhang Xin

(College of Architecture and Art, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

Abstract: [Objective] An ecological security pattern at Zhangjiakou section of Bashang Plateau region was constructed, and key ecological elements and their spatial optimization directions were identified, in order to provide scientific basis for stabilizing the ecological barrier in the upper reaches of the river and for the management of ecological space. [Methods] Ecological sources were identified by evaluating ecosystem services including water conservation, carbon storage, habitat quality, and soil conservation, combined with ecological sensitivity assessment and morphological spatial pattern analysis (MSPA). A comprehensive resistance surface was constructed based on the minimum cumulative resistance (MCR) model and circuit theory to extract ecological corridors, ecological pinch points, and barriers. On this basis, ecological security zoning and pattern optimization were performed. [Results] High and relatively high ecological security zones in the Bashang region covered an area of 5 423 km², accounting for 39.4% of the study area. A total of 21 ecological sources (430 km²), 50 ecological corridors (with a total length of 1 600 km), and 127 ecological nodes were identified. These nodes included 36 ecological pinch points and 91 ecological barriers. The overall spatial pattern was characterized by the

收稿日期: 2025-08-17

修回日期: 2025-11-10

采用日期: 2025-11-10

资助项目: 市级科技计划财政资助项目“张家口首都生态屏障核心区生态安全格局与风险阻控研究”(2511007A); 河北建筑工程学院硕士研究生创新资助项目“多模型耦合视角下冬奥赛事扰动区的生态安全格局动态演变以张家口崇礼区为例(2017—2023)”(XY2026068); 河北省高等学校科学研究项目“健康城市视角下街道园林与低碳行为的耦合评价研究”(QN2025873)

第一作者: 徐泽皓(2002—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 硕士研究生, 研究方向为生态安全格局构建。Email: 1106610180@qq.com。

通信作者: 张鑫(1986—), 男(汉族), 河北省张家口市人, 博士, 副教授, 主要从事景观生态与规划、生态景观建设研究。Email: zx2036@hebiace.edu.cn。

aggregation of sources and corridors in high-security zones and the concentration of barriers in low-security zones. [Conclusion] The ecological security pattern of the Bashang region exhibits significant spatial differentiation. High-security zones serve as core areas for maintaining regional ecological connectivity and stability, while middle- and low-security zones are key areas affecting ecological flows. The proposed “five zones and three belts” framework can effectively coordinate source protection, corridor connectivity, and priority restoration areas.

Keywords: ecological security pattern; Bashang region; minimum cumulative resistance model; circuit theory

随着城镇化进程的加快,土地利用结构剧变,生态环境质量与承载力发生变化,从而导致景观连续性破坏、土壤侵蚀加剧与生物多样性衰减等系统性生态风险,对区域生态安全构成多维度威胁^[1]。生态安全格局作为维持生态系统稳定性的空间基础^[2],通过识别生态源地、廊道及节点等关键要素,诊断生态过程障碍,进而提出针对性修复策略。区域生态安全格局评估可揭示盲目修复与低效保护问题,为协调经济生态冲突,维护生物多样性及促进可持续发展提供科学方案^[3]。因此,基于生态服务功能的生态脆弱区评估,对于构建生态安全格局和区域生态文明建设具有重要实践意义^[4]。

生态安全格局(ecological security pattern, ESP)构建作为维护生态安全与生物多样性的核心手段,其研究源于国外景观生态学的兴起,初期研究聚焦于特定生态要素,现已形成“源地识别-阻力面构建-廊道与节点提取”的综合框架。国外研究侧重生态过程模拟与保护政策设计,Fu等^[5]提出“两轴、四核、六带、八区”空间策略,为区域规划提供创新思路^[5]。自俞孔坚提出生境斑块-廊道构建模式以来^[6],国内研究重点转向生态安全评价与优化。例如,王浩等^[7]结合最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance model, MCR)与生态系统服务理论构建广东省ESP;汤峰等^[8]通过生态红线与网络融合解决河北省保护要素缺失问题。

当前,源地识别主要采用直接识别法(选取自然保护区或优质生态区)、空间形态学分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)^[9]及生态敏感性评价(识别易受干扰区域)等方法,这些方法往往忽视生态服务间的相互作用。而InVEST模型则可以通过多服务重要性评估,提供更综合、科学的源地提取方案。此外,阻力面构建需综合考量自然因素(土地利用类型、海拔、坡度)与社会因素(距道路、城镇距离)^[10],可真实模拟生态过程阻力。

生态廊道作为生态流通道,对缓解生境破碎化^[11]、促进物种迁移至关重要。在生态廊道研究中,最小累积阻力模型(MCR)虽能模拟景观阻碍效应,但难以量化廊道宽度及节点。电路理论^[12-13]将生态

流类比电流运动,通过电流密度精准识别关键廊道与节点,弥补MCR在随机运动模拟与障碍点识别上的不足,实现生态信息交换的动态量化。

景观连通性优化是生态安全格局构建的重要环节,其核心在于通过源地、廊道与节点的科学布局,增强生态过程的连续性与系统稳定性^[14]。连通性优化不仅维持物种迁移与能量流通,还使生态安全格局由“结构识别”向“功能提升”转变。其中,生态节点是影响连通效率的关键环节,通过优先保护夹点、修复障碍区域,可显著提升廊道密度、闭合度及网络稳健性^[15]。该理念已成为景观生态学与空间规划融合研究的重要趋势。

坝上四县(张北、沽源、康保、尚义)作为京津冀生态屏障与绿色发展双核心区,具有水源涵养、风沙阻隔、清洁能源供给等重要功能。但近年来受土地利用加剧、农牧结构调整及能源开发等因素影响,区域生态格局呈现破碎化趋势,景观连通性面临弱化风险。本研究基于景观连通性优化,综合运用多种模型与方法,结合生态敏感性和生态服务功能等,通过识别生态源地、廊道及节点,构建坝上地区生态安全格局,并提出空间优化与修复策略,以期高原生态屏障的稳定与生态空间管控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

坝上地区(张家口段)位于河北省北部,是内蒙古高原南缘与华北平原的过渡带,地理坐标为113°30′—116°20′E, 41°10′—42°40′N,总面积约 $1.35 \times 10^4 \text{ km}^2$,占河北省陆地面积的7.16%。区域涵盖张北、康保、沽源、尚义四县,是京津冀生态屏障和北方防沙带关键节点。研究区北部为典型草原和草甸,年均气温1.5~4.0℃,年降水量350~450 mm,春季风沙频繁,草场退化、水源涵养功能减弱;南部为丘陵沙地区,多为固定或半固定沙丘,年均降水量400~500 mm,蒸发强,地表水少。该区域农业开发与生态保护矛盾突出,地下水位下降、湿地萎缩、生物多样性减少。沙化面积30%以上,部分沙丘活化。超载放牧与水资源过度利用导致生态系统功能退化。坝上地区生态稳定性关系京津水源安全与区域

可持续发展,生态安全评价可明确问题,指导修复路径,为生态保护与农业协调发展提供保障。

1.2 数据来源

(1) 遥感数据。土地利用类型(2023)和土壤侵蚀度(2023)数据来源于中国科学院 RESDC(<https://www.resdc.cn/>),土地利用类型按国标 GB/T 21010—2017 分为 8 类;NDVI(NASA, 2023)和 DEM(2023)数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/search>);NPP 数据源自 NASA(2000—2023),取年累计值;河网数据来源于全国地理目录系统(<https://www.webmap.cn/>),栅格化生成后,统一

WGS84 投影与 30 m 重采样。

(2) 气象数据。逐月降雨量(2000—2023)数据来源于国家地球科学中心(<http://www.geodata.cn>),由日值克里金插值合成;气温数据来源于中国科学院 RESDC 站点数据(<https://www.resdc.cn/>),经空间插值并重采样生成 30 m 栅格。

(3) 植被与土壤数据。NPP 数据来源于 NASA;土壤侵蚀度数据来源于青藏高原中心(<http://data.tpd.ac.cn>);根系深度与土壤质地数据分别来源于中国基岩数据和 HWSD 数据库。数据均经 30 m 重采样(表 1)。

表 1 数据类型及来源
Table 1 Data types and sources

数据类型	具体指标	时间范围	数据来源
遥感数据	土地利用类型	2023 年	中国科学院 RESDC (https://www.resdc.cn/)
	DEM	2023 年	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/search)
	土壤侵蚀度	2023 年	中国科学院 RESDC
	NDVI	2023 年	地理空间数据云
	NPP	2000—2023 年	NASA
	河网数据		全国地理目录系统(https://www.webmap.cn/)
气象数据	逐月降雨量	2000—2023 年	国家地球科学中心 (http://www.geodata.cn)
	气温	2000—2023 年	中国科学院 RESDC 站点数据
植被与土壤数据	NPP(植被固碳)		NASA
	土壤侵蚀度	2000—2023 年	青藏高原中心 (http://data.tpd.ac.cn)
	根系深度		中国基岩数据
	土壤质地		HWSD 数据库

1.3 研究方法

本研究以张家口坝上地区为研究对象,基于生态系统服务功能重要性评价(水源涵养、土壤保持、生境质量和碳存储)与生态敏感性提取基础生态源地,通过形态学空间格局分析(MSPA),识别核心生态源地。通过筛选地形、植被、人为干扰等阻力因子,结合最小累积阻力模型(MCR)生成区域生态阻力面;再根据电路理论模型,依据电流密度识别高连通性生态廊道并定位关键节点(如生态夹点和障碍点);最终整合源地、廊道、节点 3 类空间要素,构建“点-线-面”协同的综合生态安全格局(图 1)。该框架通过多模型耦合提升了格局识别的客观性,可为类似生态脆弱区的空间管控提供科学依据。

1.3.1 生态源地识别

结合生态系统服务功能与生态敏感性评价提取生态源地,综合反映生态要素服务价值及系统对外部干扰的响应机制。选取生态敏感性和生态服务功能指标(水源涵养、水土保持、碳存储和生境质量),评估系统对干扰的响应;对不同服务功能量化生态

价值,等权叠加生态敏感性和 4 个生态服务功能;运用 ArcGISpro 进行栅格叠加分析生成综合栅格层,采用自然断点法将生态重要性划分为 5 级(一般、较高、中等、高度、极高);剔除面积 < 1 km² 的破碎斑块,将连片极高重要性区域确定为生态源地。该方法兼顾人类服务价值与生态系统抗干扰能力,科学识别坝上地区核心生态空间。

采用贺鼎等^[16]提出的 6 项因子(高程、坡度、坡向、水体缓冲区、土地利用类型与 NDVI)进行生态敏感性评价。运用层次分析法(AHP)结合专家打分确定各因子权重(表 2),判断矩阵通过一致性检验(CR < 0.1)。

水源涵养计算方法主要参考陈文华等^[17]的研究。计算公式为

$$WR = NPP_{\text{mean}} \times F_{\text{sic}} \times F_{\text{pre}} \times (1 - F_{\text{slo}}) \quad (1)$$

式中:WR 为生态系统水源涵养服务能力指数;NPP_{mean} 为多年植被净初级生产力平均值;F_{sic} 为土壤渗流因子;F_{pre} 为多年平均降水量因子;F_{slo} 为坡度因子。

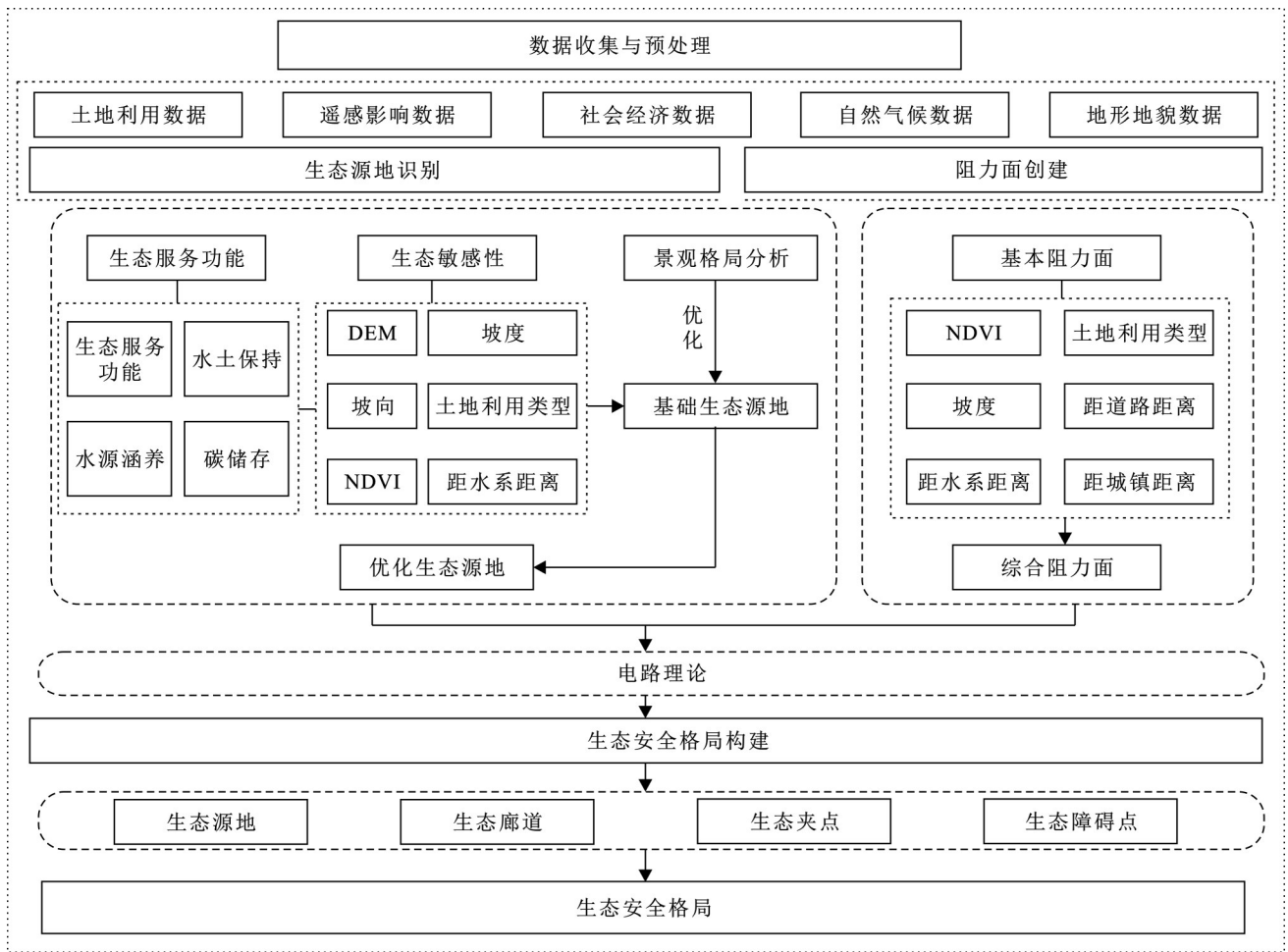


图 1 坝上地区张家口段综合生态安全格局构建流程框架图

Fig.1 Flowchart framework for constructing a comprehensive ecological security pattern at Zhangjiakou section of Bashang region

表 2 生态敏感性指标等级划分

Table 2 Classification of ecological sensitivity indicators

指标体系	低敏感	较低敏感	中敏感	较高敏感	高敏感	权重
DEM/m	<1 200	1 200~1 400	1 400~1 600	1 600~1 800	>1 800	0.106
坡度/(°)	0~5	5~13	13~20	20~30	>30	0.265
坡向	平地、正南	东南、西南	正东、正西	东北、西北	正北	0.041
NDVI	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8	0.366
土地利用类型	建设用地	未利用地	耕地	水域、草地、灌木地	林地	0.141
距水系距离/m	<5 000	3 000~5 000	2 000~3 000	1 000~2 000	>1 000	0.081

水土保持计算方法主要参考何莎莎等^[18]的研究。计算公式为

$$USLE = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2)$$

式中:USLE为土壤侵蚀量;R为降雨侵蚀力因子;K为土壤可蚀性因子;L为坡长因子;S为坡度因子;C为植被覆盖因子;P为水土保持措施因子。

碳储量计算方法主要参考刘洋等^[19]的研究。计算公式为

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

式中: C_{tot} 为生态系统碳固持服务供给总量; C_{above} 为地上生物量碳密度(植物茎叶等活体有机碳储存); C_{below} 为地下生物量碳密度(根系等地下部分有机碳储存); C_{soil} 为土壤有机碳密度(腐殖质等稳定态碳库); C_{dead} 为死亡有机物碳密度(枯落物等过渡态碳库)。

生境质量计算方法主要参考张学儒等^[20]的研究。生境质量指数(habitat quality index, HQI)作为核心量化工具(InVEST模型核心输出参数),其取值区间为[0,1],指数趋近于1指示高完整性生境(如原

始林地),趋近于0则标志严重退化区域(如城市建成区)^[21]。计算公式为

$$A_{xj} = H_j \left\{ 1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \right\} \quad (4)$$

式中: A_{xj} 为*j*类生境类型中栅格*x*的生境质量; H_j 为生境适宜性指数; D_{xj} 为*j*类土地生境退化度,表示生境的退化程度; K 为半饱和系数(表征物种丰富度阈值); z 为尺度调节常数。

基于Vogt等^[22]提出的形态学空间格局分析(MSPA)模型,本研究通过二值化处理将生态重要性高度-极高区域设为前景值(赋值1),非重要区设为背景值(赋值0),输入Guidos Toolbox进行形态学运算。输出7类互斥景观要素——核心区、孤岛、桥接区、边缘区、孔隙、环道及支线,并选取核心区作为最终的生态源地^[23]。

1.3.2 阻力面构建

最小累积阻力模型(MCR)是一种通过计算空间运动过程中累积阻力最小值来识别最优路径或区域连通性的地理空间分析方法。最早由Knappen等人提出^[24],后经俞孔坚等^[25]完善和改进。MCR模型的数学表达式如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (5)$$

式中: D_{ij} 为物种从生态源地*j*扩散至*i*的空间距离; R_i 为源地*i*的阻力系数(受土地利用类型影响); f_{\min} 为最

小累积阻力函数。

1.3.3 生态组分的识别

(1) 提取生态廊道。生态廊道连接源地,确保生态系统空间完整性^[26]。借鉴物理学中电流在电阻网络中的运动规律,使用Linkage Mapper 2.0提取累积阻力最低路径作为廊道。

(2) 提取关键生态节点。生态节点分为生态夹点和障碍点。生态夹点作为拓扑结构关键区,表现为电流密度显著集聚,指示生物扩散的必经通道,故需纳入优先保护策略,采用Pinchpoint Mapper的all-to-one模式识别(试验步长200)(成本加权距离CWD=1 000)进行生态夹点识别。障碍点指景观阻隔严重区域,消除后可显著提升连通性。采用Barrier Mapper的maximum模式进行迭代运算(试验步长100),并基于移动窗口分析(半径200),量化其空间阻隔强度。

2 结果与分析

2.1 坝上地区生态重要性分析

由图2可知,张家口坝上地区生态重要性呈现显著的空间异质性,显示出“南高北低,东优西劣”的分布格局。西南部(尚义南部)和东部(沽源县南部)为极重要地区,其周边分布有高度重要区,北部(康保北部)、西部(尚义北部)及中部的张北部分地区为一般和较重要地区。

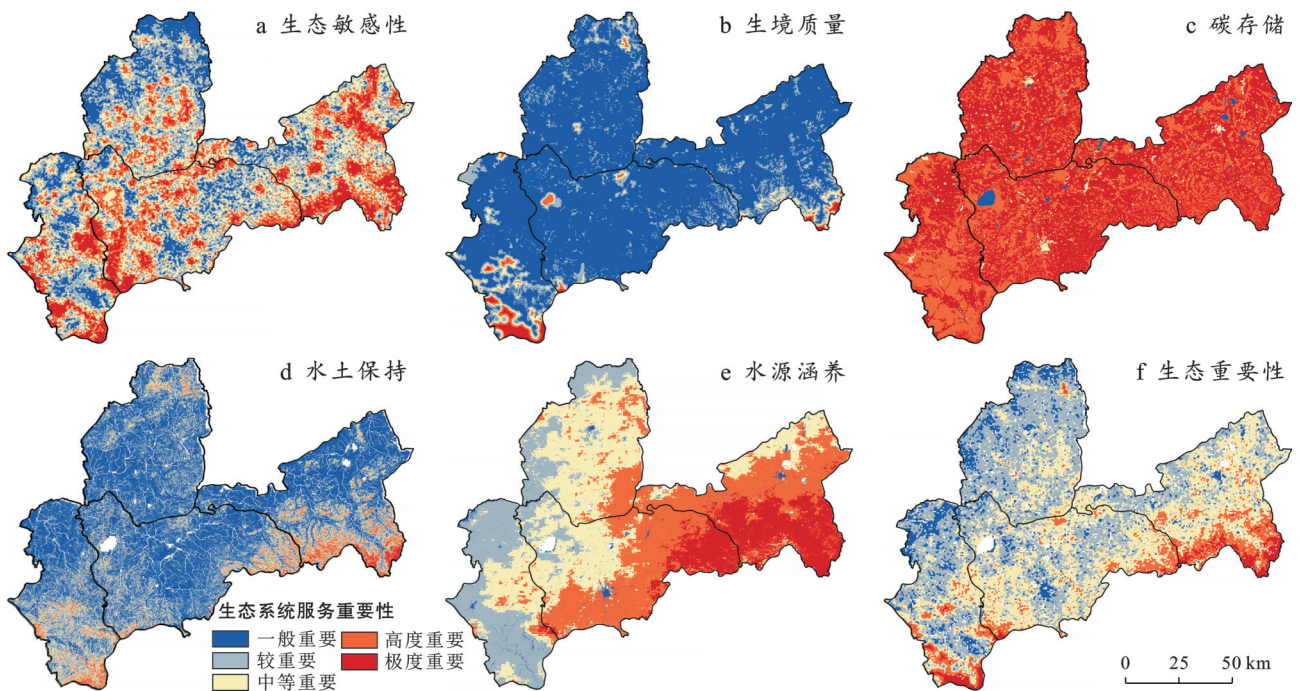


图2 张家口坝上地区生态系统服务重要性

Fig.2 Importance of ecosystem services at Zhangjiakou section of Bashang region

2.2 生态安全格局识别

2.2.1 生态源地识别

因研究区极高重要区较少,选取连片分布的极高及高重要生态栅格为基础源地,剔除小于 1 km²的斑块,并通过MSPA景观格局进行优化(图3)。最终确定 21 个核心生态源地,总面积430 km²(占研究区总面积0.3%)。由图 4 可知,源地空间分布集中于南、东部,其中沽源县和尚义县分别占源地总数的 38% 和 33%,面积占比分别为 57% 和 33%,反映其高生态重要性与连通性;北部源地稀疏,生态功能较弱。

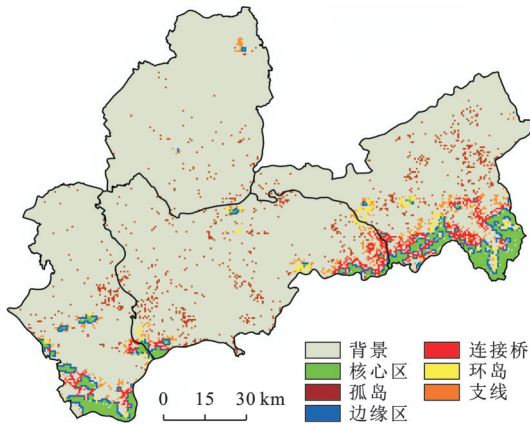


图3 坝上地区张家口段形态学分析(MSPA)景观格局
Fig.3 Morphological spatial pattern analysis (MSPA)-based landscape pattern at Zhangjiakou section of Bashang region

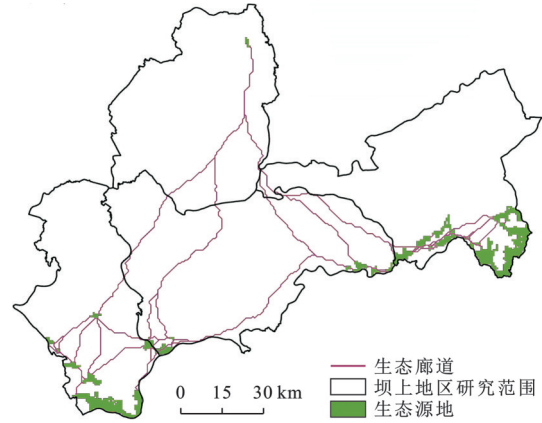


图4 坝上地区张家口段生态源地分布情况
Fig.4 Distribution of ecological source areas at Zhangjiakou section of Bashang region

2.2.2 阻力面识别

结合坝上地区实际情况及数据可得性,从自身因子(坡度、NDVI、土地利用类型)与干扰因子(距水系距离、距主要道路距离、距城镇建设用地距离)两方面选出 6 项核心空间阻力因子(表3)。参考景观生态学阻力赋值规范并改进汉瑞因等^[27]的阻抗系数标定法,对各因子赋予 1~100 的生态流通阻抗值(数值越高表征生态流通阻力越强)。采用层次分析法(AHP)计算权重,加权各单因子阻力面(图5),生成综合阻力面。

表3 坝上地区张家口段核心阻力因子评价表

Table 3 Evaluation of core resistance factors at Zhangjiakou section of Bashang region

项目	阻力因子	阻力分级标准	阻力值	权重	项目	阻力因子	阻力分级标准	阻力值	权重
自身因子	NDVI	0~0.2	100	0.253 3	干扰因子	距道路距离/km	>5	1	0.132 9
		0.2~0.4	80				3~5	20	
		0.4~0.6	50				2~3	50	
		0.6~0.8	20				1~2	80	
		0.8~1	1				1	100	
自身因子	坡度/(°)	0~5	1	0.075 4			距城镇建设用地距离/km	>5	
		5~13	20		3~5	20			
		13~20	50		2~3	50			
		20~30	80		1~2	80			
		>30	100		1	100			
土地利用类型	土地利用类型	林地、未利用地	1	0.295 0	距水系距离/km	1	1	0.110 6	
		草地	20			1~2	20		
		水域	50			2~3	50		
		耕地	80			3~4	80		
		建设用地	100			>5	100		

由综合阻力面结果(图6)可知,最小综合阻力值为 1,最高为 96.24。

整体分布空间差异显著。城市建设区(如满井镇周边)因不透水表面阻碍使得阻力值达到峰值;南

部林地区域,坡度较缓,阻力较低,利于生态连通;东部大苏计乡至两面井乡因植被覆盖低且道路密集形

成高阻带。此分布格局直接决定了生态廊道与节点的空间形态。

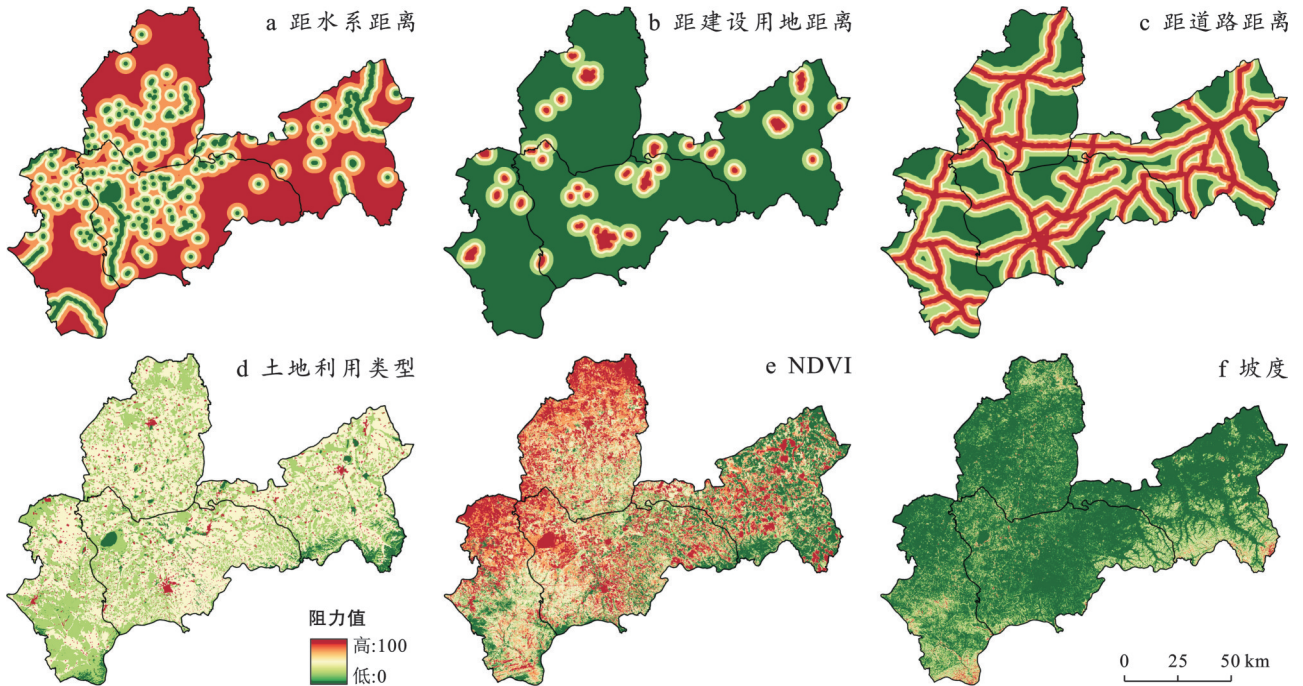


图 5 坝上地区张家口段单因子阻力面

Fig.5 Single-factor resistance surface at Zhangjiakou section of Bashang region

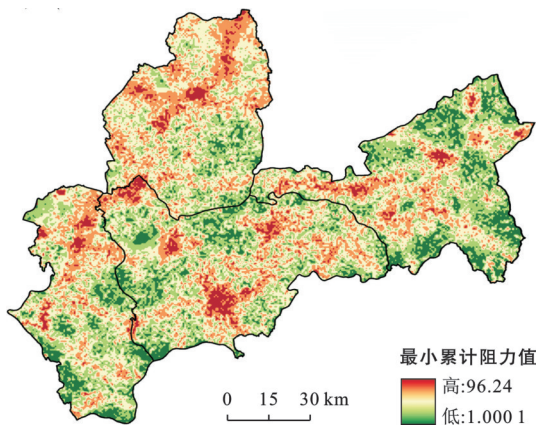


图 6 坝上地区张家口段生态综合阻力面

Fig.6 Integrated ecological resistance surface at Zhangjiakou section of Bashang region

2.2.3 生态廊道与生态节点识别

基于坝上地区生态安全格局(生态源地、阻力面、廊道网络及生态节点),运用电路理论共识别出 50 条生态廊道(图 7),包括 37 条活跃廊道和 13 条不活跃廊道,总长度为 1 600 km,其中活跃廊道长度为 1 069 km,非活跃廊道 531 km。各县廊道空间分布差异显著,张北县廊道分布最密,总长度 736 km,为区域生态主通道;尚义县(368 km)位于中东部,是重要连接区;沽源县(256 km)以湿地及北部廊道为主;康保县(240 km)廊道零散,连通性较弱。整体呈“张北

集中,尚义承接,沽源南聚,康保疏散”的特征。用 Pinchpoint Mapper 工具的 all to one 模式识别生态夹点,得到累积电流图,结合自然断点法,划分为 5 级梯度并筛选最高值区,最终得到 36 个生态夹点,总面积 18.4 km²,主要分布在张北县南部的台路沟乡、油篓沟乡、东部的白庙滩乡和大囫囵镇及康保县东南部区域的丹青河乡等地,主要位于植被覆盖良好的林地、灌草交错区及水体、湿地周边,构成生态功能的关键枢纽。

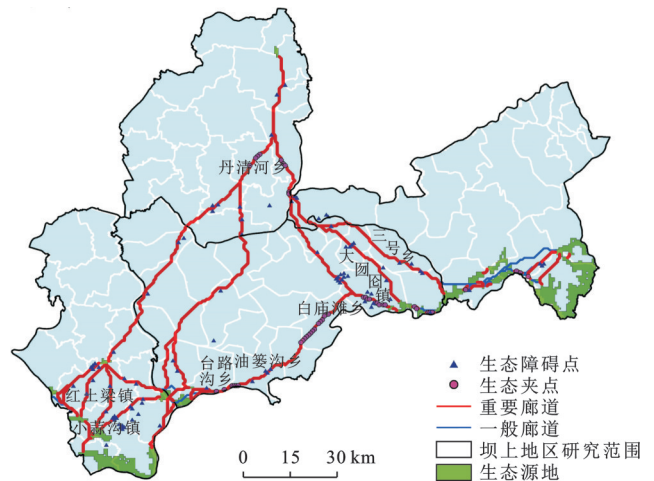


图 7 坝上地区张家口段生态廊道和节点分布

Fig.7 Distribution of ecological corridors and nodes at Zhangjiakou section of Bashang region

利用 Barrier Mapper 工具提取累积电流恢复高值区作为障碍点。经自然断点法分级识别并结合实际情况,识别出障碍点 91 处,总面积 74.82 km²,高度集中于尚义县南部的小蒜沟镇、红土梁镇以及张北县中部的大囿图镇、三号乡等。农业扩张与建设用地导致生态流割裂,亟需通过退耕还林、植被恢复等工程提升景观连通性。

研究表明,坝上地区生态夹点主要分布于质量优良的森林斑块,这类区域构成物种迁徙与基因交流的核心通道;而障碍点则集中出现在植被结构单一的灌草交错带,其破碎化生境导致生物迁移受阻及能量传递、信息流动的连续性中断。

2.3 生态安全格局分析

2.3.1 生态安全格局

将坝上地区综合阻力面划分为 5 个安全级别(图 8):高、较高、中等、较低和低^[27]。为便于总体表述与对比分析,本研究将 5 级合并为 3 级:高安全区(高+较高)、中安全区(中等)与低安全区(较低+低)。

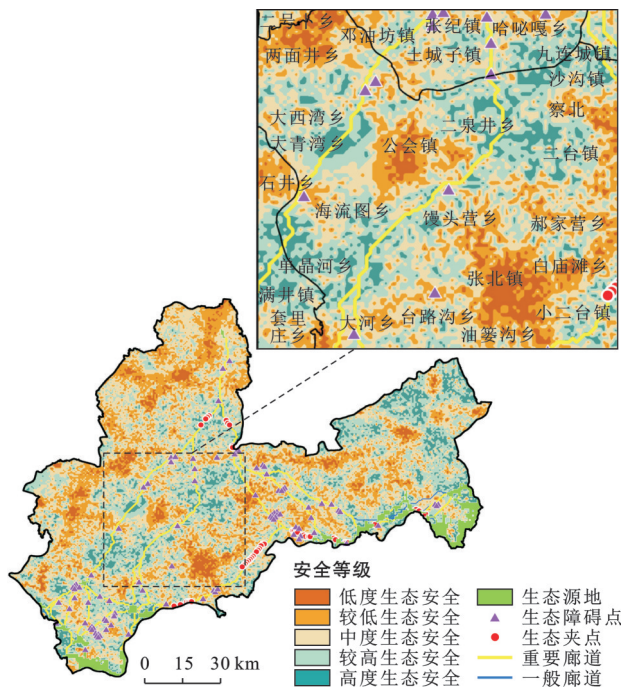


图 8 坝上地区张家口段生态安全格局构建图

Fig.8 Construction of ecological security pattern at Zhangjiakou section of Bashang region

高安全区(5 423 km²,占 39.4%)主要分布于沽源县南部(丰源店乡和莲湖滩乡)和北部(平定堡镇和闪电河乡),尚义县南部的小蒜沟镇和东部的满井镇以及张北县的海流图乡等。这些区域大多地势平缓、植被覆盖良好,生态功能显著,是生态系统连通与稳定的核心地带。统计结果显示,该区生态源地面积 347.1 km²(高度安全区 228.1 km²,较高安全区

118.3 km²),廊道总长度 1 298 km(高度 762.3 km,较高 535.7 km),并汇聚了大部分生态夹点(高度安全区 16 个,较高安全区 15 个,占总数 86%)与少量障碍点(高度安全区 2 个,较高安全区 16 个)。

中安全区(4 305 km²,占 31.3%)主要分布于康保县北部的屯垦镇和照阳河镇,沽源县中部的小河子乡以及尚义县中部的红土梁镇。多为高、低区的过渡带,其坡度与植被状况介于高、低区之间,适宜通过节点修复与廊道加固来提升连通性。该区内生态源地面积 61.5 km²,廊道长度 261.1 km,共识别出 5 个生态夹点与 32 个障碍点。

低安全区(4 023 km²,占 29.3%)主要分布于康保县中部的康保镇和屯垦镇、张北县中南部的张北镇和油篓沟乡、尚义县南部的大青沟镇。土地类型以耕地与建设用地为主,受人类活动干扰强烈,植被破碎化严重,是生态流阻断的主要地带。该区内生态源地面积 21.6 km²(较低 20.4 km²,低 1.2 km²),廊道长度 40.9 km(较低 36.2 km,低 4.7 km),基本无生态夹点,而障碍点数量占全区 45%(较低 33 个,低 8 个)。

总体上,坝上四县生态安全格局呈现“南优北劣、东强西弱”的空间分异特征,高生态安全区集中于林草覆盖良好、地势平缓区,是维系区域生态稳定与生态流通的核心空间;中安全区承担生态过渡与能量传递功能;低安全区多位于建设用地与耕作密集区。整体格局呈现分层分区的安全梯度,为坝上地区生态保护分区分管控与“五区三带”优化提供了依据。

2.3.2 生态修复与优化

结合研究结果,将坝上地区的生态安全格局划分为西北生态缓冲区、东北核心保护区、中部生态枢纽区、东南生态修复区、西部源地扩展区、生态廊道构建带、东西生态连通带和南北生态保护带,形成“五区三带”的生态安全保护格局(图 9)。

西北生态缓冲区(康保县)作为“北方防沙带”的关键组成部分,基于中低安全等级与稀疏廊道,面临风蚀沙化风险。应在康保镇、屯垦镇及芦家营乡一带建设柠条、沙棘等乡土灌丛为主的防风固沙林带,并对中度及以上退化草原实施“草方格沙障+乡土耐旱草种(如羊草、冰草)补播”的综合治理。

中部生态枢纽区主要位于张北县公会镇、二台镇及宇宙营乡一带,生态流高度集中必须实施严格保护,减少开发建设。通过对田间道路等线性干扰进行灌草隔离带生态软化,并在关键夹点区域补植灌丛,提升节点功能与网络稳定性。

西部源地扩展区含多个破碎生态源地和大量障碍点,应严格限制草原开垦与工矿建设,对红土梁镇

与小蒜沟镇等地障碍点集中区实施退耕还草和生态林修复工程;在大河乡、小蒜沟镇等现有源地外围增建乔灌复合林带,形成源地-廊道连续扩展带,增强区域生态缓冲功能。这些措施的实施不仅是“三北”六期工程中草原改良与种草工作的需要,同时有利于防范新生生态障碍点的产生。

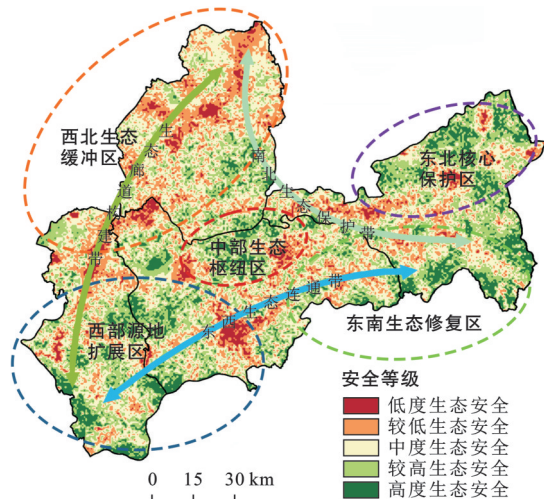


图9 坝上地区张家口段生态安全格局优化图
Fig.9 Optimization of ecological security pattern at Zhangjiakou section of Bashang region

东南生态修复区含重要生态源地与夹点,同时也存在密集障碍点。应优先对张北县三号乡和大囿囿镇等障碍点实施退耕还草或生态移民,并拓宽被割裂的关键廊道,同时辅以营造耐旱乡土树种(如榆树、小叶杨)为主的沟道水土保持林,系统消解生态瓶颈。该区修复需考虑纳入坝上地区淖泊生态保护修复工作范畴。

东北核心保护区生态安全等级较高,是生物多样性核心区。应将其纳入生态保护红线进行严格管护,实施草畜平衡管理,控制放牧强度,并建立以典型草原与湿地生态系统为核心的长期监测体系,筑牢生态安全基底。同时,通过平定堡镇、闪电河乡等高等级斑块与南部源地对接,强化其对周边区域的生态辐射与带动作用,形成“核心—缓冲—过渡”式生态安全结构。

东西生态连通带横跨中部区域,连接沽源县和尚义县的生态源地,廊道上分布有关键生态夹点。应针对高阻力的耕地与退化草地实施植被恢复,并将这些夹点通道拓宽至50 m以上,增强其通行能力,破解生态流动瓶颈,减少“生态孤岛”。

南北生态保护带纵贯东部。为保障南北向生态流畅通,应严格限制沿线低密度住宅与设施农业无序扩张。从屯垦镇到白土窑乡,建设草灌结合的缓

冲带,修复由道路或耕地形成的生态障碍点,维持廊道安全。

生态廊道构建带连接西部与北部源地,针对其生态要素匮乏及廊道破碎化和生态阻力高等问题,需修复沿线退化草地与灌木林。通过补植乡土植被稳固廊道结构,重点在南壕坨镇与康保镇一带实施廊道补全工程,增强西-北源地连接稳定性,确保生态流畅通并提高连通强度。该带建设可与“三北”工程中的人工造林和退化林分修复任务统筹推进。

3 讨论

生态安全格局构建对缓解坝上地区人为扰动、拓展生态源地及提升生境质量具有重要意义。本研究遵循“自然恢复优先,人工调控辅助”原则,结合区域生态变化特征开展以生态恢复为主,人工干预为辅的修复工作。修复策略参考了国外学者 sylvain 等人^[28]的人类干扰区生态系统恢复成果及姚材仪等^[29]的岷江流域分区策略。在此基础上,本研究进一步从景观连通性视角优化生态安全格局。通过最小累积阻力模型(MCR)及电路理论模型等多模型整合,识别并整合了生态源地、廊道与关键节点,构建了多层次生态网络,实现了生态流路径的系统性优化。此优化路径体现了“点-线-面”协同构建理念,使生态安全格局由结构识别转向功能提升,为后续生态空间规划与分区修复提供了技术支撑。将研究结果与河北省生态保护红线的空间布局相关文件进行对比,结果显示,识别的东北核心保护区及高度生态安全区与红线体系中张北、沽源等关键节点空间导向一致,从景观连通性角度验证了区域生态安全格局的合理性。本研究的价值在于对宏观框架进行了空间细化与功能深化,“西北生态缓冲区”和“生态廊道构建带”精准对应“坝上高原防风固沙带”,通过识别36处生态夹点与91处生态障碍点,为生态修复提供精准靶点;“中部生态枢纽区”的廊道与夹点则明确了需重点保护的生态关键区。研究表明,该格局不仅在战略上呼应了省级生态保护导向,更通过量化生态流瓶颈,为区域精准管控与修复优先级划定提供了科学依据。

另外,参考坝上地区目前已有的研究结果^[30],王彦芳等同样基于MCR模型识别坝上地区生态安全格局,其结果显示高安全区主要分布于林草覆盖良好、地形平缓区域,低安全区集中于农田及城镇扩张区,与本研究结论总体一致,但其未充分考虑其他生态服务功能对源地的影响。本研究在指标体系与服务功能融合方面更为综合,进一步揭示了生态连通

性在廊道与节点层面的空间优化特征。值得注意的是,王彦芳等在研究中提及崇礼区作为“两区”建设的政策节点,其生态修复带动效应在区域尺度上对提升整体安全格局具有积极意义,与本研究的空演变趋势相互印证。

本研究中,数据维度的局限,水文径流因子缺失及道路微观要素遗漏导致阻力估算偏差;同时,仅从空间尺度进行了探讨,缺乏时空动态验证与分析;模拟深度上,缺乏多情景推演能力。未来研究中,将强化多源数据融合与多情景模拟,支撑生态保护与人类活动的空间协同决策,推动坝上地区生态系统的长期稳定与安全。

4 结论

(1) 坝上地区生态安全水平较高,空间分异显著,整体呈“东南优,西北弱”的分布格局。其中,高与较高生态安全区占39.4%(5 423 km²),集中于沽源县南的丰源店乡、莲湖滩乡以及尚义县的小蒜沟镇等林草良好区,是区域生态稳定与连通的主体结构;中等安全区占31.3%(4 305 km²),多为过渡带;低与较低生态安全区占29.3%(4 023 km²),分布在康保县康保镇和张北县张北镇等耕地和建设用地密集区。

(2) 共识别出生态源地21块(430 km²),生态廊道50条(1 600 km),活跃廊道37条,非活跃廊道13条,生态节点127个(36个夹点,91个障碍点)。夹点主要集中于张北县的白庙滩乡、油篓沟乡及康保县丹青河乡等地;障碍点多分布于尚义县小蒜沟镇、张北县大囫囵镇与三号乡一带,是生态流阻断的关键区。

(3) 研究构建的“五区三带”生态保护格局呈现显著空间分异,各功能区生态特征与保护重点不同。东北核心保护区保持源地稳定;中部生态枢纽区保障多廊道集散;西部源地扩展区需外围增设草灌隔离带;西北缓冲区以防风固沙为主;东南修复区通过治理障碍点与拓宽廊道提升连通性;三条连通带强化了区际连接,构建了区域生态安全网络。

参考文献(References)

- [1] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. Global desertification: Building a science for dryland development [J]. *Science*, 2007, 316(5826):847-851.
- [2] Kang Peng, Chen Weiping, Hou Ying, et al. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636:1442-1454.
- [3] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,等.区域生态安全格局:概念与

理论基础[J].*生态学报*,2004,24(4):761-768.

Ma Keming, Fu B J, Li Xiaoya, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): The concept and theoretical basis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4):761-768.

- [4] 于婧,汤昇,陈艳红,等.山水资源型城市景观生态风险评价及生态安全格局构建:以张家界市为例[J].*生态学报*,2022,42(4):1290-1299.
- Yu Jing, Tang Bian, Chen Yanhong, et al. Landscape ecological risk assessment and ecological security pattern construction in landscape resource-based city: A case study of Zhangjiajie City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(4):1290-1299.
- [5] Fu Yangjun, Shi Xueyi, He Juan, et al. Identification and optimization strategy of county ecological security pattern: A case study in the Loess Plateau, China [J]. *Ecological Indicators*, 2020,112:106030.
- [6] 何玲,贾启建,李超,等.基于生态系统服务价值和生态安全格局的土地利用格局模拟[J].*农业工程学报*, 2016,32(3):275-284.
- He Ling, Jia Qijian, Li Chao, et al. Land use pattern simulation based on ecosystem service value and ecological security pattern [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016,32(3):275-284.
- [7] 王浩,马星,杜勇.基于生态系统服务重要性和生态敏感性的广东省生态安全格局构建[J].*生态学报*,2021,41(5):1705-1715.
- Wang Hao, Ma Xing, Du Yong. Constructing ecological security patterns based on ecological service importance and ecological sensitivity in Guangdong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(5):1705-1715.
- [8] 汤峰,王力,张蓬涛,等.基于生态保护红线和生态网络的县域生态安全格局构建[J].*农业工程学报*,2020,36(9):263-272.
- Tang Feng, Wang Li, Zhang Pengtao, et al. Construction of county-level ecological security pattern based on ecological protection red line and network in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020,36(9):263-272.
- [9] 李倩瑜,唐立娜,邱全毅,等.基于形态学空间格局分析和最小累积阻力模型的城市生态安全格局构建:以厦门市为例[J].*生态学报*,2024,44(6):2284-2294.
- Li Qianyu, Tang Lina, Qiu Quanyi, et al. Construction of urban ecological security pattern based on MSPA and MCR Model: A case study of Xiamen [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(6):2284-2294.
- [10] 曹玉红,曹卫东,吴威,等.基于自然生态约束空间差异的区域生态安全格局构建[J].*水土保持通报*,2008,28(1):106-109.
- Cao Yuhong, Cao Weidong, Wu Wei, et al. Construct-

- ing regional ecological security pattern based on the spatial difference of eco-environmental restriction [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(1): 106-109.
- [11] Li Pingxing, Cao Hui, Sun Wei, et al. Quantitative evaluation of the rebuilding costs of ecological corridors in a highly urbanized city: The perspective of land use adjustment [J]. Ecological Indicators, 2022, 141: 109130.
- [12] Wu Yingdi, Han Ziyang, Meng Jijun, et al. Circuit theory-based ecological security pattern could promote ecological protection in the Heihe River basin of China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(10): 27340-27356.
- [13] Zhang Haitao, Li Jialin, Tian Peng, et al. Construction of ecological security patterns and ecological restoration zones in the city of Ningbo, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2022, 32(4): 663-681.
- [14] Dickson B G, Albano C M, Anantharaman R, et al. Circuit-theory applications to connectivity science and conservation [J]. Conservation Biology, 2019, 33(2): 239-249.
- [15] Hamonic F, Albert C, Couëtoux B, et al. Optimizing the ecological connectivity of landscapes with generalized flow models and preprocessing [EB/OL]. 2021: arXiv:2109.06622. <https://arxiv.org/abs/2109.06622>
- [16] 贺鼎, 卢丽娜, 王晶, 等. 基于GIS的北京长城文化带生态敏感性评价[J]. 住区, 2023(1): 135-139.
He Ding, Lu Lina, Wang Jing, et al. GIS-based ecological sensitivity assessment of Beijing's great wall cultural belt [J]. Community Design, 2023(1): 135-139.
- [17] 陈文华, 徐娟, 李双成. 滇西山地城市水源涵养功能研究: 以保山市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 1153-1160.
Chen Wenhua, Xu Juan, Li Shuangcheng. Water conservation function of mountainous city in western Yunnan: A case study of Baoshan City [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(6): 1153-1160.
- [18] 何莎莎, 朱文博, 崔耀平, 等. 基于InVEST模型的太行山淇河流域土壤侵蚀特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(2): 426-439.
He Shasha, Zhu Wenbo, Cui Yaoping, et al. Study on soil erosion characteristics of Qihe watershed in Taihang Mountains based on the INVEST model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(2): 426-439.
- [19] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4052-4065.
Liu Yang, Zhang Jun, Zhou Dongmei, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River basin based on InVEST model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4052-4065.
- [20] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 160-178.
Zhang Xueru, Zhou Jie, Li Mengmei. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(1): 160-178.
- [21] Lin Qian, Mao Jiaying, Wu Jiansheng, et al. Ecological security pattern analysis based on InVEST and least-cost path model: A case study of Dongguan water village [J]. Sustainability, 2016, 8(2): 172.
- [22] 汪勇政, 李久林, 顾康康, 等. 基于形态学空间格局分析法的城市绿色基础设施网络格局优化: 以合肥市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 2022-2032.
Wang Yongzheng, Li Jiulin, Gu Kangkang, et al. Optimization of urban green infrastructure network layout based on MSPA-CIRCUIT: Case of Hefei [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 2022-2032.
- [23] Luo Jiuling, Zhu Ling, Fu Hui. Construction of wetland ecological network based on MSPA-Conefor-MCR: A case study of Haikou City [J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112329.
- [24] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1): 1-16.
- [25] 俞孔坚, 李迪华, 段铁武. 生物多样性保护的景观规划途径[J]. 生物多样性, 1998, 6(3): 205-212.
Yu Kongjian, Li Dihua, Duan Tiewu. Landscape approaches in biodiversity conservation [J]. Chinese Biodiversity, 1998, 6(3): 205-212.
- [26] 勾容, 苏维词, 权小丫, 等. “中国天眼”宁静区生态安全格局识别: 基于OWA和电路理论[J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9636-9651.
Gou Rong, Su Weici, Quan Xiaoya, et al. Identification of ecological security pattern in FAST quiet zone based on Ordered Weighted Averaging and circuit theory [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9636-9651.
- [27] 汉瑞英, 赵志平, 肖能文, 等. 基于最小累积阻力差值模型的北京市生态安全格局构建[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 95-102.
Han Ruiying, Zhao Zhiping, Xiao Nengwen, et al. Construction of ecological security pattern in Beijing City based on minimum resistance model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 95-102.