

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.01.024

CSTR:32310.14.stbxb.2026.01.024

陈朝阳,石淞,李文.基于生态风险评价的黑龙江省生态安全格局构建[J].水土保持学报,2026,40(1):414-425.

CHEN Zhaoyang, SHI Song, LI Wen. Construction of ecological security pattern in Heilongjiang Province based on ecological risk assessment[J].

Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):414-425.

基于生态风险评价的黑龙江省生态安全格局构建

陈朝阳,石淞,李文

(东北林业大学园林学院,哈尔滨 150040)

摘要: [目的] 为应对黑龙江省日趋严峻的城市化加快,景观破碎化、生物多样性减少等生态问题,推动生态系统健康发展。[方法] 研究基于2000年、2010年、2020年土地利用数据,计算景观生态风险指数构建景观生态风险评价模型,对比分析生态风险对生态阻力的影响,选择2020年生态风险评价结果纳入综合阻力面。通过MSPA模型、景观连通性识别和筛选生态源地,并基于最小累积阻力模型(MCR)和电路理论提取生态廊道,结合生态风险分区构建多层次的生态安全格局。[结果] 1)2000—2020年,黑龙江省的景观生态高风险区域整体呈下降趋势,并表现出“两边高、中间低”的空间分布格局。2)识别并筛选出11处生态源地,建立24条生态廊道,总长度达6 443 km,为区域生态保护与景观优化提供科学依据。3)共识别出85个生态夹点,36个生态障碍点,并结合国土空间规划与生态风险分区,提出“双核引领、三轴联动、四区统筹、多点支撑”的生态安全格局。4)研究不足在于研究尚未全面整合生态系统服务功能,未对生态网络的实际运行效果进行验证。[结论] 研究提出的基于生态风险评价开展生态安全格局构建的方法及应用,可为黑龙江省推进国土空间布局优化、提升国土空间可持续利用效能,提供理论层面的指导与实践层面的借鉴。

关键词: 生态安全格局; 景观生态风险; 景观指数; 电路理论; 黑龙江省

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0414-12

Construction of Ecological Security Pattern in Heilongjiang Province Based on Ecological Risk Assessment

CHEN Zhaoyang, SHI Song, LI Wen

(College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: [Objective] This study aims to address the increasingly severe ecological challenges in Heilongjiang Province, including accelerated urbanization, landscape fragmentation, and biodiversity loss, thereby promoting healthy development of the ecosystem. [Methods] Based on land use data from 2000, 2010, and 2020, landscape indices and landscape ecological risk indices were calculated to construct an ecological risk assessment model. The influence of ecological risk on ecological resistance was comparatively analyzed, and the ecological risk assessment results from 2020 were integrated into the comprehensive resistance surface. Ecological sources were identified and screened using the MSPA model and landscape connectivity analysis. Ecological corridors were extracted based on the minimum cumulative resistance (MCR) model and circuit theory. A multi-level ecological security pattern was constructed by integrating ecological risk zoning. [Results] 1) From 2000 to 2020, the high-risk areas of landscape ecology in Heilongjiang Province showed an overall decreasing trend and exhibited a spatial distribution pattern of "high on both sides and low in the middle". 2) Eleven ecological sources were identified and selected, and 24 ecological corridors with a total length of 6 443 km were established, providing a scientific basis for regional ecological protection and landscape optimization. 3) A total of 85 ecological pinch points and 36 ecological barrier

收稿日期: 2025-06-24

修回日期: 2025-07-26

录用日期: 2025-09-10

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-10-10

资助项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2022E001)

第一作者: 陈朝阳(2004—),男,硕士研究生,主要从事构建生态安全格局研究。E-mail: 2322254841@qq.com

通信作者: 李文(1963—),女,教授,博士,博士生导师,主要从事风景园林规划设计研究。E-mail: liwen@nefu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

points were identified. Combined with territorial spatial planning and ecological risk zoning, an ecological security pattern of "dual-core leadership, three-axis linkage, four-zone coordination, and multi-point support" was proposed. 4) The limitations of this study lay in the incomplete integration of ecosystem service functions and the lack of validation on the actual operational effectiveness of the ecological network. [Conclusion] The method and application of ecological security pattern construction based on ecological risk assessment proposed in this study can provide theoretical guidance and practical reference for Heilongjiang Province to promote the optimization of territorial space layout and enhance the sustainable utilization efficiency of territorial space.

Keywords: ecological security pattern; landscape ecological risk; landscape index; circuit theory; Heilongjiang Province

Received: 2025-06-24

Revised: 2025-07-26

Accepted: 2025-09-10

Online(www.cnki.net): 2025-10-10

随着城镇化进程的加速,生物栖息地缩减、生境碎片化等生态危机持续加剧,严重危及区域生态系统的稳定与安全^[1]。我国部分区域面临着自然资源高强度开发带来的生态问题,如土地退化和森林生态系统破坏,破坏生态平衡,增加自然灾害^[2]。因此,在新一轮国家生态文明建设政策的背景下,及时进行区域生态风险评价并构建生态安全格局,对于生态文明建设具有重要意义^[3]。黑龙江省作为我国重要的生态安全屏障,拥有丰富的农业资源和林业资源,生态系统类型多样,生态功能显著,该区域生态系统服务的重要性不可忽视^[4]。然而,随着人类活动的加强,黑龙江省的生态环境也面临着严峻的挑战,尤其是湿地和森林等自然生态系统的破坏^[5]。为应对该挑战,科学评估景观生态风险并优化生态安全格局具有重要意义。

景观格局的急剧变化往往意味着生态系统的物质流、能量流等受到强烈干扰与破坏,影响生态系统的格局和功能,威胁当地的生境质量^[6]。景观生态风险评价可为区域综合风险防范提供决策依据、有效指引区域景观格局优化与管理^[7]。当前景观生态风险评价范式较为成熟,国内外学者^[8]主要以景观指数法和相对风险模型对景观生态风险进行评价。而生态安全格局是一种维护生态系统稳定的空间结构,是物种生存环境的重要保障^[9]。景观生态风险评价是构建生态安全格局的基础支撑工具,它通过识别高风险区域、揭示生态系统脆弱性和风险驱动机制,为生态安全格局提供科学依据和空间指引。国外生态安全格局研究始于20世纪50年代,核心围绕优先保护区划定、生态系统功能、生物多样性及生态保护红线等方向展开。我国相关研究具有阶段性特征,早期以借鉴国外经验为主,后逐步结合国情,聚焦国土空间生态安全区划、生态保护优先区及相关政策研究^[10]。研究生态安全格局构建以“生态源地-生态

阻力面-生态廊道”为基本模式^[11]。其中,首先要基于形态学空间格局法,基于图形学原理,结合栅格运算方式在像元级尺度分析土地数据,在生态源地的识别与选取上更具有科学性^[12]。生态廊道是生态源地间生物迁徙的通道^[13]。其中,MCR模型可更好地模拟和量化物种、能量和信息从“生态源地或源头”沿着某条线路(路径或方向)扩散到研究区域空间某点(区域)的最短运动轨迹,但该方法在确定廊道内需重点保护与修复的关键区域时存在一定的局限性^[14]。与之相比,电路理论通过借鉴电流、电压、电阻等物理学概念,利用电荷随机游走特性模拟物种迁徙路径,能够更贴近实际生物迁移行为。该方法不仅能明确廊道的具体范围和关键区域,还能识别生态夹点与障碍点,弥补传统方法的不足^[15]。虽然部分学者已经针对黑龙江省生态安全格局开展相关研究,但均未将景观生态风险因子纳入考虑之中,而对于农业、林业资源丰富但生态脆弱的黑龙江省地区,景观生态风险是不可忽视的重要因素。景观生态风险评价既聚焦于特定风险受体的受损程度,也重视生态风险对整体景观格局破碎度与多样性产生的作用。通过耦合景观生态风险评价构建生态阻力面从而能够更加科学、准确地识别生态廊道。

基于此,本研究通过黑龙江省的土地利用数据,结合景观指数分析景观格局,计算景观生态风险指数,评估景观生态风险的时空变化规律。通过MSPA模型识别生态源地,构建多因子综合阻力面,利用最小累积阻力(MCR)模型和电路理论提取生态廊道,将景观生态风险评价与生态安全格局相结合,综合分析高生态风险分区和生态安全格局构建廊道及优化分区,并有针对性地进行防治。为区域生态安全格局优化提供更具科学性和可操作性的理论支持与实践路径。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

黑龙江省位于中国最北端,地处东北亚地区的核心(44°06′~52°00′N, 123°26′~135°05′E),总面积约为 $4.54 \times 10^5 \text{ km}^2$,是中国第五大省,辖区包括 13 个地级行政单位。黑龙江省的地形多样,东北部为山地和丘陵,海拔较高,部分地区可超过 $1 \times 10^3 \text{ m}$,而南部为广阔的平原地带,海拔较低,为 100~300 m。黑龙江省的农业以耐寒作物为主,尤其是水稻、小麦、玉米等粮食作物,森林资源也十分丰富,是中国重要的木材生产基地之一。尽管黑龙江省人口相对较少,但其特殊的地理和气候条件使其成为中国的重要粮食生产区和生态屏障区域(图 1)。

1.2 数据来源

本研究使用的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据,来源于国家科技资源共享服务平台(<http://www.nesdc.org.cn>); 道路交通数据获取自 Open Street Map 平台(<http://www.openstreetmap.org>); 数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据调取于地理空间数据云

平台(<https://www.gscloud.cn>); 土地利用数据则以中国科学院资源环境科学与数据中心(resdc.cn)2020 年发布的 Landsat 8 遥感影像数据为基础。为保障数据质量与空间参考的统一性,研究将所有栅格数据重采样至 30 m 空间分辨率,并统一采用 WGS 1984 投影坐标系。

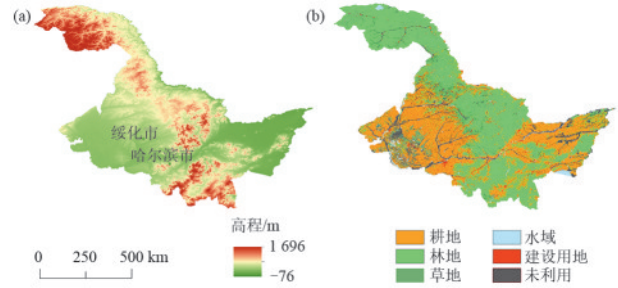


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.3 研究方法

研究框架主要分为 3 个部分(图 2),根据景观指数对景观格局进行评估,在此基础上,通过计算景观生态风险指数分析黑龙江省景观生态风险的演变,最后利用MCR模型和电路理论构建生态网络,提取生态夹点和生态障碍点来实现生态安全格局优化。

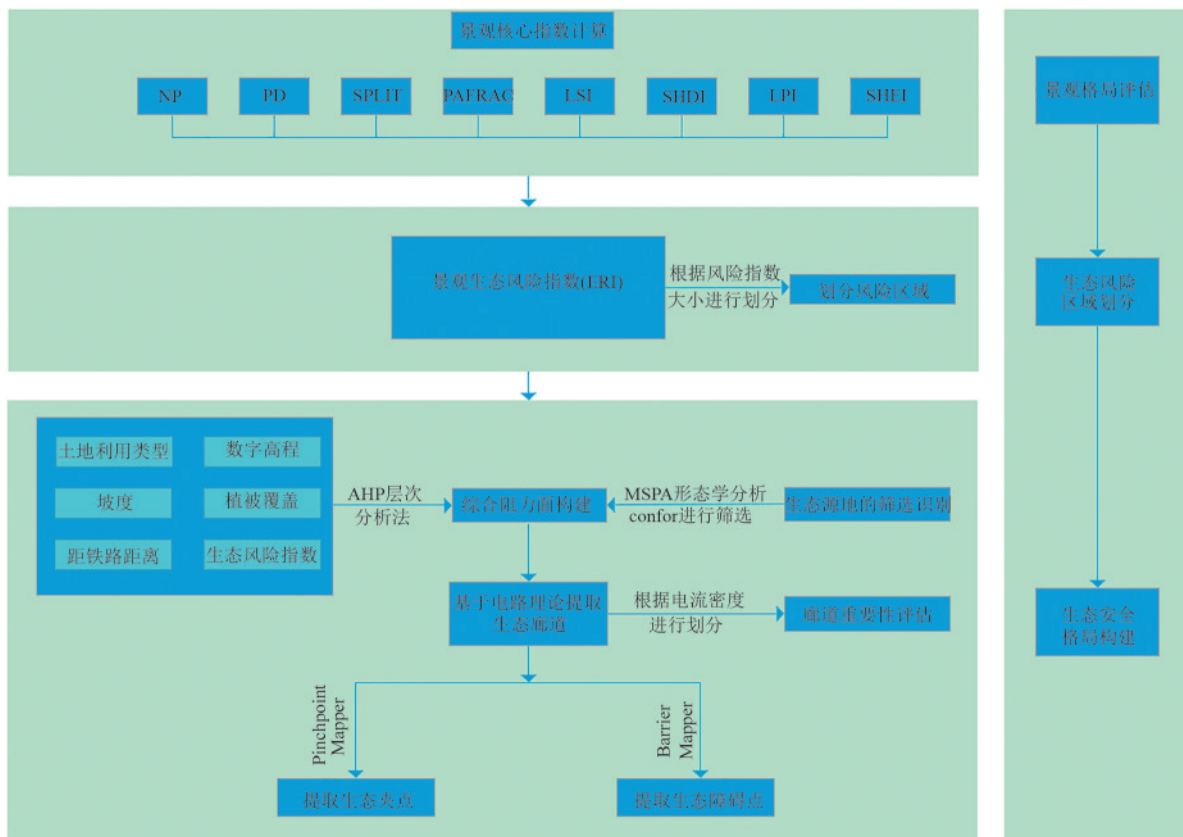


图 2 研究框架

Fig.2 Research framework

1.3.1 景观格局指数 景观格局指数可量化景观结构素及其结构布局^[16]。本研究在景观层面选取NP(斑块数量)、PD(斑块密度)、SPLIT(分裂指数)、LPI(最大与空间分布特征的指标,能够全面体现景观的组成要

斑块指数)、PAFRAC(周长-面积分形维数)、LSI(景观均匀度指数)8种景观指数来分析黑龙江省的景观格局,并且应用fragstat 4.3软件进行计算(表1)。

表 1 景观格局指数的计算方法

Table 1 Calculation methods of landscape pattern indices

景观指数	公式	解释
NP	$NP = n_i$	NP 表示景观中某种类型斑块的数量,数值越大,表明景观越破碎,斑块分布越零散。如果 NP 值较小,说明景观较为完整、连通性较强
PD	$PD = \frac{n_i}{A}$	PD 主要用于衡量景观破碎程度,能有效监测生态环境变化,并为景观生态规划、生态恢复提供重要依据
SPLIT	$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{i=1}^n A_i^2}$	SPLIT 描述各种类型景观的破碎化程度,这间接地表明人类对生态系统的参与程度
LPI	$LPI = \frac{A_{max}}{A} \times 100$	LPI 主要用于衡量某个斑块在景观中的主导性,可反映生态系统的连通性与稳定性
PAFRAC	$PAFRAC = \frac{2\ln(F_i/4)}{\ln(A_i)}$	PAFRAC 主要用于衡量景观斑块的形状复杂性
LSI	$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}}$	LSI 代表各种景观类型斑块形状结构的复杂特征,值越高,表示形状越不规则,形状越不稳定
SHDI	$SHDI = -\sum_{i=1}^m (p_i \times \ln p_i)$	SHDI 主要用于衡量景观的多样性
SHEI	$SHEI = \frac{-\sum_{i=1}^m (p_i \times \ln p_i)}{\ln m}$	SHEI 主要用于衡量景观类型的均匀分布情况

1.3.2 景观生态风险 为更详细地观测生态风险的地理分布和在空间上表征景观生态风险指数的变化情况,参照相关学者^[17]对景观生态风险小区划分结果的研究发现,评价小区的面积最佳为斑块平均面积的 2~5 倍。按 2 倍的平均斑块面积计算后,区域单元按 20 km×20 km 进行划分,得到 1 276 个单元区域,对各单元的景观风险指数进行计算,在 ArcGIS 10.8 软件中运用克里金插值法对景观生态风险的空间分布进行可视化表达。最后,采用自然断点法将依据生态风险水平差异,研究区域被划分为 5 个生态

风险区间,分别为低生态风险区、较低生态风险区、中等生态风险区、较高生态风险区和高生态风险区,基于研究区生态情况,引入景观干扰度指数、景观脆弱度指数和景观损失度 3 类核心评价指数,建立区域生态风险评估体系。使用 E_i 、 F_i 、 R_i 3 个核心指标(表 2),该过程的计算公式为:

$$ERI = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} \times R_i \quad (1)$$

式中: A_{ki} 为 k 评估单元内 i 类景观的面积; A_k 为 k 评估单元景观的总面积; R_i 为 i 景观的损失程度指数。

表 2 景观生态风险指数计算公式

Table 2 Calculation formulas of landscape ecological risk indices

指数	公式	公式说明
C_i	$C_i = \frac{n_i}{A_i}$	评估景观生态系统的稳定性;环境稳定性随着价值的增加而降低
N_i	$N_i = \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{n_i}{A}} \times \frac{A}{A_i}$	量化不同景观类型之间的空间隔离程度。随着价值的增加,这种景观中斑块的地理分布变得更加复杂
F_i	$F_i = \frac{2\ln(p_i/4)}{\ln(A_i)}$	价值随着景观斑块形状的复杂性而增加
E_i	$E_i = aC_i + bN_i + cF_i$	分配给 a 、 b 和 c 的值分别为 0.5、0.3、0.2。这些权重相当于特定的指数,它们的总和等于 1
R_i	$R_i = E_i \times F_i$	它量化各种景观类型在受到自然和人为干扰时生态退化的差异

1.3.3 生态网络构建

1) 生态源的识别

MSPA 是在数学形态学算法基础上,对图像的空间格局度量、识别和分割的一种图像处理方法,能够更加精确地辨认景观的类型与结构^[18]。本研究基

于 MSPA 方法对黑龙江省土地利用数据进行识别处理和分类,对 2020 年栅格数据分别进行投影栅格、裁剪等预处理,并运用 ArcGIS 软件按掩膜提取、重分类等方法,将研究区土地划分为耕地、林地、草地、水体、建设用地、未利用地 6 种土地类型,并得到 2020

年研究区土地利用情况^[19]。把 2020 年的土地利用数据的草地、林地和水域设置为前景,建设用地、耕地、未利用土地设置为背景进行重分类,将得到的二值图导入 Guidos toolbox 软件中共分割出核心区、孔隙、桥接区、边缘区、孤岛、环岛和支线等 7 种景观类型^[20]。

在生态网络构建的过程中,景观连通性展现生态过程发展及物种迁移的顺利进行的程度,较高的景观连通性意味着物种的迁移与发展更为顺利,同时也有助于提升城市的生态安全格局^[21]。本研究在基于面积初步选取的生态源地的基础上,进一步通过 confor 2.6 软件进行景观连通性分析,并通过多次尝试不同的连接距离阈值和连通概率^[22],经过多次试验(表 3),整体连通性指数(IIC)和可能连通性(PC)指数随着连通距离阈值的增加而增大。当距离阈值达到 550 km,可能性概率为 0.5 时,整体连通性指数将固定为 1.34,即景观连通性已达到最高值。最终确定连接距离阈值为 550 km,连通概率为 0.5。研究采用重要性指数(dPC)、整体连通性指数(IIC)和可能连通性指数(PC)对景观连通性进行评估,并选取 dPC>1 的 11 个核心斑块,其余斑块作为潜在生态源地。

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2} \quad (2)$$

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij}^* a_i a_j}{A_L^2} \quad (3)$$

$$dPC = \frac{PC - PC_{\text{remove}}}{PC} \times 100\% \quad (4)$$

表 4 生态阻力因子分级及权重

Table 4 Classification and weights of ecological resistance factors

评价因子	土地利用类型	高程/m	坡度/(°)	生态风险指数	NDVI	距铁路距离/m
1	林地	<50	<2	低风险	0.8~1.0	>2 000
2	草地	50~200	2~5	较低风险	0.6~0.8	1 000~2 000
3	水域	200~500	5~15	中等风险	0.4~0.6	500~1 000
4	耕地	500~1 000	15~25	较高风险	0.2~0.4	250~500
5	未利用地	>1 000	>25	高风险	0~0.2	<250
权重	0.2	0.05	0.07	0.23	0.15	0.3

3) 生态廊道构建

生态廊道是连接各生态源地的重要纽带,电路理论通过对电子在电路中随机游走特性的模拟,能够有效解析物种个体或基因流在景观基质中的迁移和扩散过程^[24]。生态夹点作为生态网络中维系生态迁移与景观连通性的关键节点,是生态保护与修复的优先管控区域。生态障碍点则是生物在不同景观斑块间迁徙扩散的限制性区域,可通过测算障碍移

式中: n 为斑块总数; a_i 和 a_j 分别为斑块 i 与 j 的面积; nl_{ij} 为斑块 i 和斑块 j 间的连通度; A_L 为景观的总面积; P_{ij}^* 为物种在斑块 i 和 j 直接扩散的最大可能性; PC_{remove} 为斑块剔除之后剩余斑块的指数。

表 3 景观连通性指数试验

Table 3 Landscape connectivity index experiment

距离阈值/km	整体连通性指数 (IIC)	可能连通性指数 (PC)
400	1.26	1.32
450	1.27	1.35
500	1.29	1.38
550	1.34	1.41
600	1.34	1.41

2) 构建综合生态阻力面

最小累计阻力模型能够量化“源”经过不同阻力的景观所耗费的成本,即从目标斑块到最近源斑块的加权距离。生态阻力面用于表征景观元素的可达性及其变化趋势,在生态网络构建中起着关键作用^[23]。生态风险用于评估特定区域的生态风险水平,并指示该区域的生态安全状况。考虑到黑龙江省是农业大省并且是我国生态安全格局的重要组成部分,在此基础上,景观生态风险指数被纳入阻力因子体系。因此,共选取土地利用类型、高程模型(DEM)、坡度、植被覆盖、距铁路距离及景观生态风险指数作为生态阻力因子。通过叠加分析,构建综合生态阻力面,并对各个阻力因子进行分级。结合黑龙江省地理特征和社会经济状况进行阻力因子赋值。采用 AHP 层次分析法经一致性检验,得到各阻力因子权重(表 4)。

除后生态流的恢复潜力,进而精准辨识生态网络中的重要区域,移除生态源地间的障碍点将明显提高景观连贯性^[25]。

本研究基于 LinkageMapper 工具插件和 Circuitscape 软件,对提取的生态源地和阻力面进行分析,以识别研究区内的关键生态廊道及潜在生态廊道。通过成本加权距离与最小成本路径之比来量化和评估生态廊道的连通效能。比值越小,表明该廊道的连通性越

高,据此将生态廊道划分为主要和次要 2 个等级^[26]。比值 <0.35 的廊道为主要生态廊道,比值 >0.35 的廊道为次要生态廊道。在此基础上,在 PinchpointMapper 工具中使用“all to one”模式识别廊道内的夹点,经过多次不同半径的试验并参考相关研究^[27]发现,廊道宽度设置为 800 m 具有一定的生态学意义,按照自然断点法对电流密度进行分级,提取最高值作为生态夹点^[28]。使用 Barrier Mapper 工具对于生态障碍点进行识别,可识别出物种运动时受到阻碍的区域^[29]。经过多次试验和参考相关研究^[27],将搜索半径设置为 1 100 m,步长为 1 100 m,最后得到生

态障碍点。

2 结果与分析

2.1 景观生态风险的时空变化

通过计算各风险单元的景观生态风险指数,并采用普通克里金插值方法对其进行空间拟合,随后利用自然断点分类法对风险等级进行分级^[30],基于 ERI 值将全省划分为低风险区(0,0.012]、较低风险区(0.012,0.013]、中等风险区(0.013,0.015]、较高风险区(0.015,0.017]及高风险区(0.017,0.2]5 类生态风险区域,最终得到 2000—2020 年黑龙江省各区域生态风险等级的统计分布(图 3)。

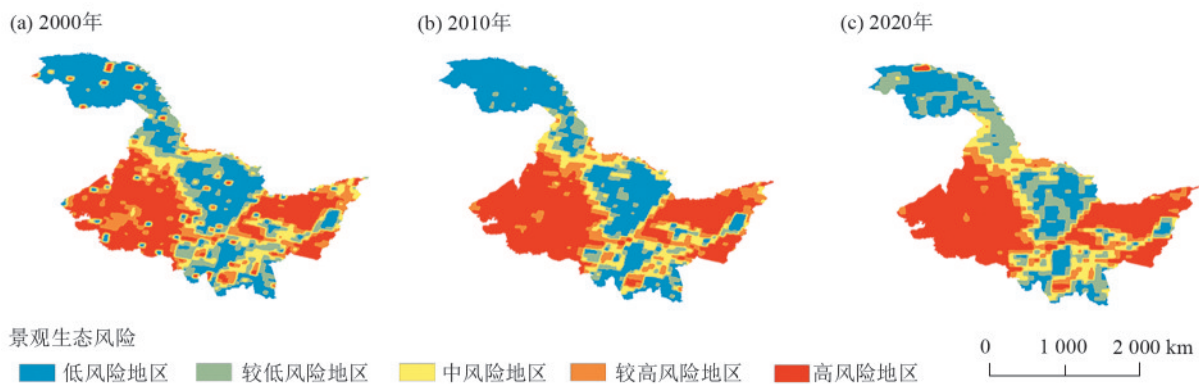


图 3 2000—2020 年黑龙江省综合生态风险时空分布特征

Fig.3 Spatiotemporal distribution characteristics of comprehensive ecological risk in Heilongjiang Province from 2000 to 2020

经计算后得出,景观生态风险各等级面积占比及时空分布(表 5),2000—2020 年呈高风险等级逐步扩展、低风险等级持续收缩的总体趋势。2000 年,低风险区域面积为 163 217.83 m²,占比为 36.05%;高风险区域面积为 134 266.41 m²,占比 29.66%。到 2020 年,低风险区域面积降至 12 693.51 m²,占比 28.01%,而高风险区域面积升至 180 508.40 m²,占比 39.87%。可以看出,2000—2020 年低风险区域减少 36 424.32 m²,占比下降约 8 个百分点;高风险区域则增加 46 241.99 m²,占比提高超过 10 个百分点,表明研究区土地风险等级整体上显著上升。中间等级区域的变化则相对复杂。较低风险区域从 2000 年的 32 119.39 m²,占比 7.10%,上升至 2020 年的 46 890.68 m²,占比 10.36%;中风险区域基本保持

稳定,3 个时间点面积分别为 50 783.05、48 942.97、48 857.90 m²;而较高风险区域则呈波动性下降趋势,从 2000 年的 72 071.75 m²减至 2020 年的 46 338.41 m²。总体来看,研究区生态风险等级在 2000—2020 年发生由低等级向高等级迁移趋势,高风险区域占比不断扩大,低风险区域逐年减少,中等级别区域则表现出一定的动态平衡。可知 2020 年的高风险区域面积最大,风险等级最高,代表其相对应生态阻力值也最大。因此,将 2020 年的生态风险结果进行标准化处理,作为综合阻力面因子。以上演变趋势可能受土地利用强度提升、人类活动干扰增强及生态系统服务功能退化等多重因素的共同驱动,揭示区域生态安全面临的压力持续加剧。

表 5 2000—2020 年的景观生态风险面积

Table 5 Areas of landscape ecological risk from 2000 to 2020

风险等级	2000 年		2010 年		2020 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
低风险	163 217.83	36.05	140 049.36	30.93	126 793.51	28.01
较低风险	32 119.39	7.10	43 496.93	9.61	46 890.68	10.36
中风险	50 783.05	11.21	48 942.97	10.81	48 857.90	10.79
较高风险	72 071.75	15.92	52 089.35	11.51	46 338.41	10.24
高风险	134 266.41	29.66	168 162.18	37.14	180 508.40	39.87

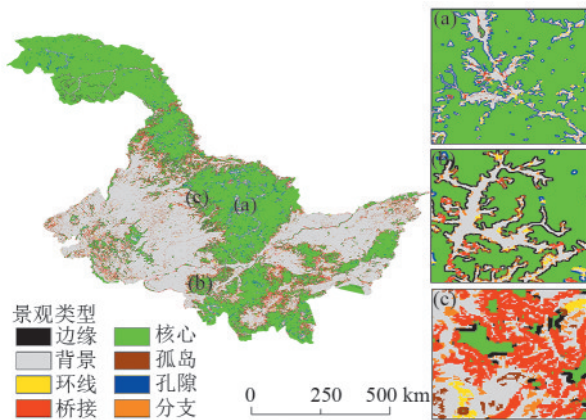
2.2 景观生态网络构建

2.2.1 MSPA 分析 通过形态学分析后,计算各个景观类型的面积和所占生态景观面积的比例(表 6 和图 4)。研究区生态景观以核心区为主导,其面积占比高达 76.29%,表明区域内尚保留较为完整的生态基底,具备良好的生态稳定性和生境供给功能。边缘区、桥接区及分支结构则在维系斑块间的空间连通性与生态流动性方面发挥重要作用,整体呈“核心集中、连接有限、边缘破碎”的典型格局。与此同时,孤岛、孔隙及环岛区等破碎型景观虽占比相对较小,但仍反映出区域内存在一定的景观破碎化风险,特别是在局部地区,生态斑块的隔离现象较为明显,可能对物种迁移和生态过程产生潜在影响。

表 6 景观类型组成及面积

Table 6 Composition and area statistics of landscape types

景观类型	面积/(10 ³ km ²)	占生态景观面积比例/%
核心区	185.04	76.29
孤岛	8.84	3.64
孔隙	5.46	2.25
边缘区	19.38	7.99
环岛区	3.55	1.47
桥接区	11.92	4.92
分支	8.35	3.44
合计	242.55	100.00



注:图 a 为孔隙区;图 b 为边缘区;图 c 为桥接区。

图 4 基于 MSPA 的景观类型分布

Fig.4 Distribution of landscape types based on MSPA

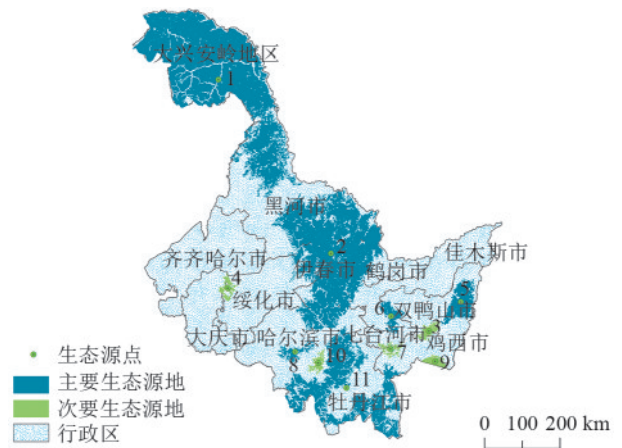
2.2.2 生态源地识别结果 生态源地通常具备良好的景观连通性及较低的人类干扰程度。本文在识别生态源地时采用多方法的综合策略。其中,基于 MSPA(形态空间格局分析)方法,能够在数据量较小的情况下实现初步的可视化识别,为后续分析奠定基础。在此基础上,融合景观生态风险评价,有效把握生态源地的生态功能特征,从而提升源地识别的准确性与综合性。在一般情况下,面积较大的区域

斑块的连接性更好,生态状况更加稳定^[31],结合景观生态风险评价低风险区和较低风险区域,初步提取面积>150 km²的 43 个重叠的核心区斑块,占核心区的 26.95%。景观连通性的高低可通过概率连通性指数(dpc)直观表征,dpc 数值越高,区域生态连通性越强,越有利于生态要素的迁移扩散与物质能量交换。借助 Confor 软件开展景观连通性定量分析,最终筛选出 11 个核心斑块作为生态源地(表 7)。结合研究区实际情况,将 dpc>1.5 的斑块界定为主要生态源地,其总面积为 161 671.31 km²,而编号为 3、4、7、9、10 的 5 个生态源地,dpc<1.5 表明其周边景观连通性水平相对薄弱,故划分为次要生态源地,面积为 5 856.24 km²,可作为潜在的生态源区。空间分布特征显示,生态源地集中分布于中部及西北部区域,覆盖大兴安岭、伊春等城市的生态重点保护区,景观类型以林地与水域为主导;而西部区域受人类活动干扰强度较高,景观构成以耕地、水域及建设用地为主,导致生态源地分布密度低且呈零散化格局(图 5)。

表 7 景观连通性计算结果

Table 7 Calculation results of landscape connectivity

生态源地类型	编号	面积/km ²	dPC
主要生态源地	1	71 513.06	7.798
	2	54 693.18	1.772
	5	5 193.80	4.636
	6	2 302.35	2.413
	8	1 735.49	1.798
	11	26 233.43	23.166
次要生态源地	3	1 382.41	1.329
	4	1 190.97	1.228
	7	1 013.38	1.028
	9	1 177.10	1.071
	10	1 092.39	1.135



注:数字 1~11 为不同的生态源地。下同。

图 5 生态源地分布

Fig.5 Distribution of ecological sources

2.2.3 生态阻力面的构建 物种在不同生态源地迁徙时,受到有差异阻力的制约,形成多样化的迁徙路径,构建阻力面是生态网络的基础。本研究选取土地利用类型、坡度、植被覆盖度、生态风险指数、距道路距离及高程作为阻力因子。对于土地利用类型等离散型数值进行标准化,再开展极差标准化运算(图6)。对坡度、高程、植被覆盖度、距铁路距离等连续性因子,则分别实施正向或逆向极差标准化,二者均采用数据无量纲化的方式^[32]。其中,坡度与物种迁徙难度呈正相关,因此,采用正向极差标准化,即坡度值越大,其对应的阻力赋值越高;植被覆盖度与物种迁徙难度呈负相关,因此采用逆向极差标准化,即植被覆盖度越高,其对应的阻力赋值越低。其余影响因子均参照这一赋值原则依次完成标准化处理,最终叠加各单因子阻力面,生成综合阻力面。

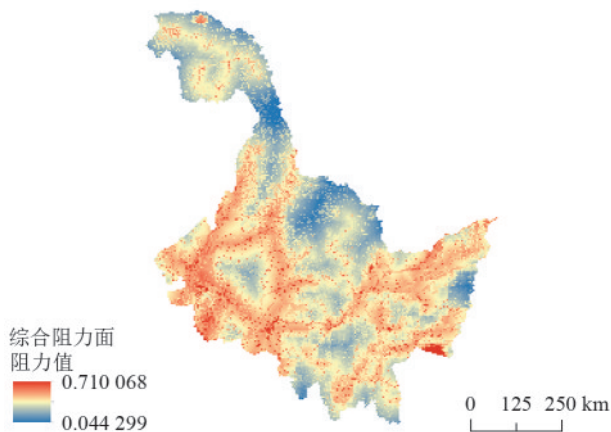


图 6 综合阻力面

Fig.6 Comprehensive resistance surface

2.2.4 生态廊道和关键生态节点

1) 生态廊道的构建

通过模拟电路中电流的传导规律,可准确识别生态网络中廊道的最优连接节点与路径,能最大化提升生态廊道的连通效能及其在生态系统中的服务价值。利用Linkage Mapper工具生成最短距离廊道(图7),共提取24条生态廊道,总长度为6443.78 km。其中主要廊道是12条,总长度为3844.96 km;次要廊道有12条,总长度为2598.82 km。廊道布局形成“主干支撑、次级补充”的多层次生态网络体系,保证主要生态源地间的高效连接。从分布来看,中部与西北部生态源地分布范围广,使区域内生态廊道呈现出长度短、密度高的空间格局。

2) 关键生态节点

本研究通过Pinchpoint Mapper工具共确定85个生态夹点(图8),综合2类廊道的模拟结果,生态夹点集中在源地1和源地2、源地5和源地10廊道间,应优化景观格局降低周边环境阻力,提高廊道中生物流

动的通畅程度。利用Barrier Mapper工具识别得到36个生态障碍点,主要分布在源地2和源地6、源地6和源地10廊道间,并存在较大范围的高电流密度值,生物在中部地区流动受到更大障碍,修复难度大。

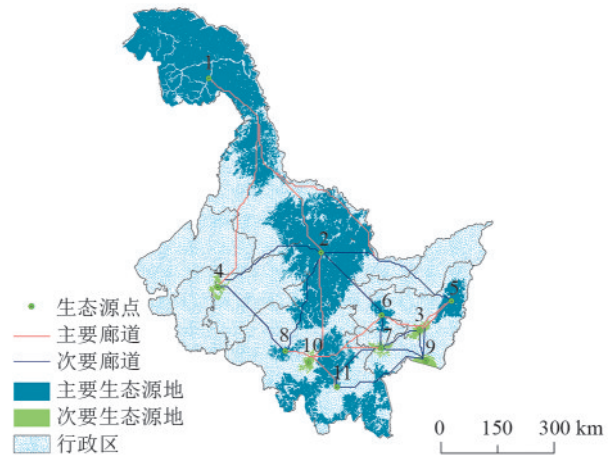


图 7 生态廊道的分布情况

Fig.7 Distribution of ecological corridors

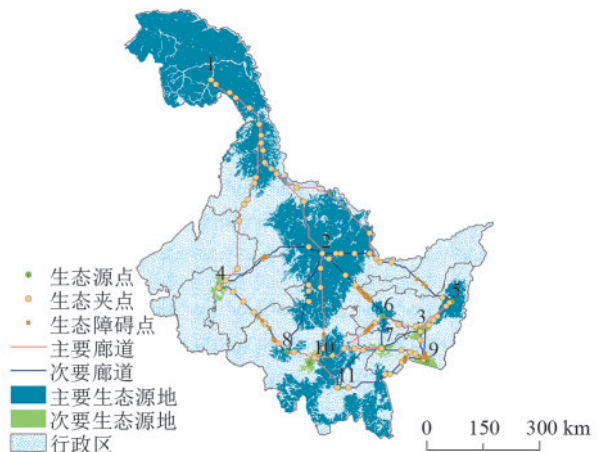


图 8 生态夹点与生态障碍点分布

Fig.8 Distribution of ecological pinch points and ecological barrier points

2.2.5 生态安全格局的构建 为确保生态安全和可持续发展,结合黑龙江省国土空间规划内容与以上研究结果,本文提出“双核引领、三轴联动、四区统筹、多点支撑”生态安全格局模型(图9)。

“双核引领”即构建以大小兴安岭林区 and 三江平原湿地地区为核心的2个生态主导区域。前者为国家重要的森林生态屏障,是野生动植物的重要栖息地;后者是我国典型的湿地系统,对维护区域水生态安全具有重要意义。2个生态核心区构成生态保护的 重心与起点,是维系区域生态安全的关键节点。

“三轴联动”体现为构建3条主干生态联系通道,分别为:1)贯穿南北的大兴安岭-完达山生态安全轴;2)横贯东西的三江平原-松嫩平原湿地连接轴;3)环绕中部城市群的城市绿带调节轴。三轴不仅联通主

要生态源地,也增强区域生态过程的流通性与生态要素的循环能力。

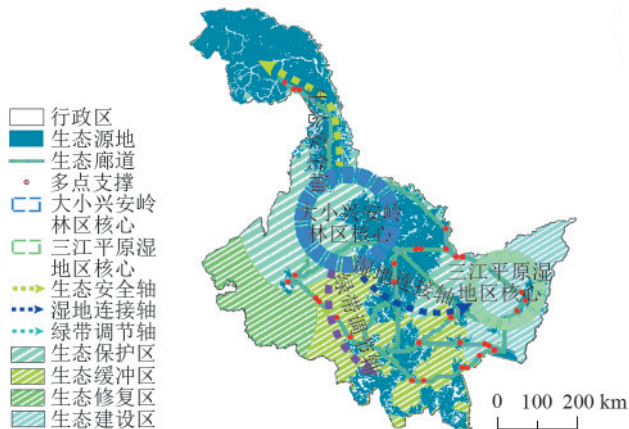


图9 黑龙江省生态安全格局

Fig.9 Ecological security pattern of Heilongjiang Province

“四区统筹”依据土地利用强度、景观破碎度、景观生态风险分区及生态功能分布,划分4类生态功能区,实施分区分类管理:1)生态保护区,多集中于低风险区和较低风险区,以原生自然生态系统为主,严格保护开发边界。优先保障天然林、湿地系统及珍稀物种栖息地的完整性与连通性。2)生态修复区,主要分布在中风险区和较高风险区,针对退化区域实施生态治理工程,增强生态系统的结构稳定性与自然恢复能力。3)生态缓冲区,位于较高风险区和高风险区交汇地带,设于城市扩张前沿与交通基础设施密集区域,用以过渡人类活动影响。4)生态建设区,多位于高风险区中开发适宜区域,鼓励发展绿色农业、生态旅游等生态友好型产业。

“多点支撑”指在高生态风险区域识别出的生态夹点为基础的关键生态点位,发挥生态系统连接、调节与扩散的功能。

3 讨论

3.1 生态安全格局的构建

构建黑龙江省生态安全格局是落实“绿水青山就是金山银山”理念的关键路径,也是对于降低景观生态风险、提升生态系统稳定性与服务功能的重要举措。本研究结果表明,黑龙江省目前由于生态本底的脆弱和人类活动的干扰,生态高风险区域占比不断扩大,低风险区域逐年减少。基于此,本研究提出“双核引领、三轴联动、四区统筹、多点支撑”生态安全格局分区模型,统筹空间规划、生态保护与风险防控来实现区域生态安全稳定。现有研究为本研究提供重要支撑,李玉恒等^[33]通过对生境质量的时空演变趋势的研究得出,2000—2020年,黑龙江省呈西北部和东南部生境质量高,西南部和东北部生境质

量低的特点。该结论力求为研究生态安全格局分区策略的合理性提供科学依据。然而,现有研究多数以土地利用类型、地形、水文等静态自然因子作为主导,忽略生态风险的动态演变特征,难以全面体现生态系统在城市化背景下的脆弱性与响应性,并且多数研究集中在局部类型生态系统,未能从全省尺度统筹构建完整生态安全格局。本研究统筹黑龙江省的景观生态风险评价,结合景观生态风险结果来筛选生态源地,将其作为综合阻力面因子并通过识别低、中、高风险区域,揭示生态系统脆弱性,为生态安全格局分区提供指引,以此来作为构建生态安全格局的基础,有效弥补上述缺陷。

3.2 生态安全格局优化建议

生态安全格局的构建不仅有助于保障区域内物种迁徙和物质能量流动的稳定性,还能有效支撑经济社会可持续发展对生态系统服务的多样化需求^[34]。基于黑龙江省当前面临的生态风险特征,本研究构建融合景观生态风险评价的生态安全格局模型,提出分区优化建议,以提升区域生态系统的整体韧性。

1)具体而言,“双核”区域即大小兴安岭林区及三江平原湿地区,作为黑龙江省生态功能的核心载体,应划为严格保护区,优先保障其生态完整性,防止高生态风险区域扩张至该区域,并通过生态廊道提升核心水源涵养与生物迁徙通道的连通性。

2)“三轴”生态通道应聚焦于修复城市扩张破坏下的廊道断裂区,增强南北向与东西向生态流动的连续性。

3)“四区”生态功能区划强化差异化管理策略,依据各区生态资源与生态风险等级,采取保护与修复模式,实现生态治理的精准化。

4)“多点”保护策略则聚焦于本研究识别出的生态夹点,该节点在保障生态网络结构稳定性和维持物种扩散路径中具有关键作用,亟需在国土空间规划中划定为生态优先保护区。

3.3 研究不足之处

本研究虽在景观生态风险评估与生态安全格局构建方面取得一定进展,但仍存在若干不足。首先,土地利用数据空间分辨率有限,难以全面反映生态变化的动态过程;其次,阻力因子的选取和赋值仍带有一定主观性,影响模型的普适性和精度;最后,研究尚未全面整合生态系统服务功能,未对生态网络的实际运行效果进行验证,缺乏生物迁徙效率和生态修复成效的支撑数据。

4 结论

黑龙江省整体景观格局趋于破碎,生态系统正面临连通性下降与多样性退化的双重压力。2000—2020年,生态高风险区域呈整体上升趋势,空间上表现为“两边高、中间低”,其中高风险区域主要集中在哈尔滨、齐齐哈尔、绥化人口密集、交通发达地区,而低风险区域则零星分布于大兴安岭、伊春等林区城市。本研究识别出11处生态源地,占全省面积的37.00%,并提取出24条生态廊道,总长度达6443.78 km。基于电路理论共识识别出85个生态夹点和31个生态障碍点。未来应优先考虑现有生态源区和廊道,并有针对性地增强生态源区和生态廊道的连通性,防止景观破碎化。针对高风险区域,为助力优化黑龙江省生态安全格局,应在现有基础上优化5个潜在生态源区,应进一步在研究区西北和东南方向上构建更优的生态连接桥梁。应针对生态网络中的关键阻断点与高风险夹点处,设立生态过渡带、动物通道及监测预警系统等措施,提升生态网络的动态响应能力。

参考文献:

- [1] 苏荣菲,陈睿山,郭晓娜.城市社区更新中生物多样性的保护策略:以上海市市长宁区生境花园为例[J].生物多样性,2023,31(7):194-207.
SU R F, CHEN R S, GUO X N. Conservation strategies for biodiversity in urban community renewal: A case study of habitat garden in Changning District, Shanghai [J]. Biodiversity Science, 2023, 31(7): 194-207.
- [2] 莫志明,李闻东,黄兆泳,等.基于最小累积阻力模型的广西生态安全格局研究[J].广西科学院学报,2025,41(1):72-85.
MO Z M, LI W D, HUANG Z Y, et al. Study on the ecological security pattern in Guangxi based on minimum cumulative resistance model [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2025, 41(1): 72-85.
- [3] 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 J, TANG B, CHEN Y H, 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.
- [4] 王佳琪,邢艳秋,常晓晴,等.东北地区生态系统服务空间分布及其驱动因子分析[J].环境科学,2024,45(9):5385-5394.
WANG J Q, XING Y Q, CHANG X Q, et al. Analysis of spatial distribution of ecosystem services and driving factors in northeast China [J]. 2024, 45(9): 5385-5394.
- [5] 崔嵩,杜显磊,贾朝阳,等.黑龙江省生态系统服务价值估算及其生态安全格局构建[J].环境科学,2024,45(11):6489-6500.
CUI S, DU X L, JIA Z Y, et al. Ecosystem service value estimation and ecological security pattern in Heilongjiang Province [J]. Environmental Science, 2024, 45(11): 6489-6500.
- [6] 傅伯杰,陈利顶,王军,等.土地利用结构与生态过程[J].第四纪研究,2003(3):247-255.
FU B J, CHEN L D, WANG J, et al. Land use structure and ecological processes [J]. Quaternary Sciences, 2003(3): 247-255.
- [7] 彭建,党威雄,刘焱序,等.景观生态风险评价研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(4):664-677.
PENG J, DANG W X, LIU Y X, et al. Review on landscape ecological risk assessment [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4): 664-677.
- [8] 姚罗兰,李魁明.基于土地利用的大都市外围地区景观生态风险评价[J].湖南生态科学学报,2025,12(1):90-97.
YAO L L, LI K M. Landscape ecological risk assessment in peripheral areas of metropolis based on land use [J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2025, 12(1): 90-97.
- [9] 彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望[J].地理研究,2017,36(3):407-419.
PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction [J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419.
- [10] 孙宝娣,程道心,陈赵慧,等.基于湿地水鸟保护的山东省黄河流域生态安全格局构建[J].应用生态学报,2025,36(6):1837-1848.
SUN B D, CHENG D X, CHEN Z H, et al. Enhancing construction of ecological security pattern through a wetland waterbird protection approach: A case study of Yellow River basin in Shandong Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(6): 1837-1848.
- [11] 王晓峰,朱梦娜,张欣蓉,等.基于“源地-阻力-廊道”的三江源区生态安全格局构建[J].生态学报,2024,44(11):4609-4623.
WANG X F, ZHU M N, ZHANG X R, et al. Ecological security pattern construction of the Three-River Source region based on Source-Resistance-Corridor [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4609-4623.
- [12] 孙杰,杨温鑫,刘盛源,等.基于MSPA与MCR模型的洛阳市生态网络构建研究[J].林业调查规划,2025,50(1):72-79.
SUN J, YANG W X, LIU S Y, et al. Construction of ecological network in Luoyang City based on MSPA and MCR model [J]. Forest Inventory and Planning, 2025, 50(1): 72-79.
- [13] 马世发,劳春华,江海燕.基于生态安全格局理论的国土

- 空间生态修复分区模拟:以粤港澳大湾区为例[J].生态学报,2021,41(9):3441-3448.
- MA S F, LAO C H, JIANG H Y. Ecological restoration zoning of territorial space based on the pattern simulation of eco-security scenario: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(9): 3441-3448.
- [14] 勾容,苏维词.多情景生态系统服务权衡的贵州省生态安全格局构建[J].环境科学,2026,47(1):481-493.
- GOU R, SU W C. Construction of ecological security pattern in Guizhou Province based on multi-scenario ecosystem services trade-offs [J]. *Environmental Science*, 2026, 47(1): 481-493.
- [15] 黄继超,邓晓颖,齐玉峰,等.基于MSPA、电路理论和空间句法的河南省生态安全格局构建[J/OL].环境科学,1-22 [2025-08-26].<https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202502144>.
- HUANG J C, DENG X Y, QI Y F, et al. Construction of ecological security pattern in Henan Province based on MSPA, circuit theory and space syntax [J/OL]. *Environmental Science*, 1-22 [2025-08-26]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202502144>.
- [16] 赵冰雪,胡海涛.安徽省湿地景观格局变化及生态风险评价[J/OL].水生生态学杂志,1-12 [2025-08-26].<https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202406210237>.
- ZHAO B X, HU H T. Changes in landscape patterns and ecological risk assessment of wetlands in Anhui Province [J/OL]. *Journal of Hydroecology*, 1-12 [2025-08-26]. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202406210237>.
- [17] 边振兴,刘彬,管德阳.基于土地利用变化的东北黑土区景观生态风险评价[J].沈阳农业大学学报,2025,56(1):140-155.
- BIAN Z X, LIU B, GUAN D Y. Landscape ecological risk assessment for the black soil region in northeast China based on land use change [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2025, 56(1): 140-155.
- [18] 于亚平,尹海伟,孔繁花,等.南京市绿色基础设施网络格局与连通性分析的尺度效应[J].应用生态学报,2016,27(7):2119-2127.
- YU Y P, YIN H W, KONG F H, et al. Scale effect of Nanjing urban green infrastructure network pattern and connectivity analysis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2119-2127.
- [19] 赵隆莲,曹广超,闫欣,等.基于InVEST模型和电路理论的生态安全格局识别:以青海省海南藏族自治州为例[J].水土保持通报,2025,45(1):137-146.
- ZHAO L L, CAO G C, YAN X, et al. Ecological security pattern identification based on InVEST model and circuit theory: A case study at Hainan Zang Autonomous Prefecture, Qinghai Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(1): 137-146.
- [20] 王娇.基于生态系统服务与景观连通性提升的生态网络优化:以苏锡常地区为例[D].南京:南京农业大学,2022.
- WANG J. Optimizing ecological network based on improvement of ecosystem service and landscape connectivity: A case study of SUXICHANG area [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.
- [21] 张晓瑞,项金铭,王振波.基于MSPA-MCR的滨江城市蓝绿空间生态网络构建:以安徽省芜湖市为例[J].安徽工程大学学报,2025,40(1):72-79.
- ZHANG X R, XIANG J M, WANG Z B. Construction of blue-green space ecological network in waterfront cities based on MSPA-MCR: A case study of Wuhu City, Anhui Province [J]. *Journal of Anhui Polytechnic University*, 2025, 40(1): 72-79.
- [22] 王珊珊,毋兆鹏.基于生态安全的乌鲁木齐市土地利用冲突识别[J].湖北农业科学,2022,61(1):46-53.
- WANG S S, WU Z P. Identification of land use conflicts based on ecological security in Urumqi City [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(1): 46-53.
- [23] 李晶,蒙吉军,毛熙彦.基于最小累积阻力模型的农牧交错带土地利用生态安全格局构建:以鄂尔多斯市准格尔旗为例[J].北京大学学报(自然科学版),2013,49(4):707-715.
- LI J, MENG J J, MAO X Y. MCR based model for developing land use ecological security pattern in farming-pastoral zone: A case study of Jungar Banner, Ordos [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(4): 707-715.
- [24] 李涛,巩雅博,戈健宅,等.基于电路理论的城市景观生态安全格局构建:以湖南省衡阳市为例[J].应用生态学报,2021,32(07):2555-2564.
- LI T, GONG Y B, GE J Z, et al. Construction of urban landscape ecological security pattern based on circuit theory: A case study of Hengyang City, Hunan Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7): 2555-2564.
- [25] 史文艳,方伟,郑钧宁,等.国土空间生态修复关键区域识别[J].北京测绘,2025,39(3):327-333.
- SHI W Y, FANG W, ZHENG J N, et al. Identification of key areas for ecological restoration of national land space [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2025, 39(3): 327-333.
- [26] 张平江,党国锋.基于MCR模型与蚁群算法的洮河流域生态安全格局构建[J].生态环境学报,2023,32(3):481-491.
- ZHANG P J, DANG G F. Construction of ecological security pattern of Tao River basin based on MCR model and ant colony algorithm [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(3): 481-491.
- [27] 金丽娟.集成CVOR-GWLR-电路理论模型的云南省生态安全格局构建研究[D].昆明:云南师范大学,2022.
- JIN L J. Integrating CVOR-GWLR-Circuit theory model into construction of ecological security pattern

- research in Yunnan Province [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2022.
- [28] 韦宝婧, 苏杰, 胡希军, 等. 基于“HY-LM”的生态廊道与生态节点综合识别研究[J]. 生态学报, 2022, 42(7): 2995-3009.
- WEI B J, SU J, HU X J, et al. Comprehensive identification of eco-corridors and eco-nodes based on principle of hydrological analysis and linkage mapper[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7): 2995-3009.
- [29] 许涛, 樊鹤翔, 周可钦, 等. 基于 MSPA-MCR-CIRCUIT 的山西省运城市景观生态网络构建[J]. 中国园林, 2024, 40(3): 114-118.
- XU T, FAN H X, ZHOU K Q, et al. Construction of landscape ecological network in Yuncheng City of Shanxi Province based on MSPA-MCR-CIRCUIT [J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2024, 40(3): 114-118.
- [30] 张园, 张红. 1990—2020 年运城盐湖湿地土地利用变化及景观生态风险评价[J]. 新兴科学与技术趋势, 2024, 3(4): 345-352.
- ZHANG Y, ZHANG H. Land use changes and landscape ecological risk assessment of Yuncheng salt lake wetlands from 1990 to 2020 [J]. *Emerging Science and Technology*, 2024, 3(4): 345-352.
- [31] 韩王亚, 夏双双, 周维, 等. 基于生态廊道识别的拉萨河流域生态安全格局构建[J]. 生态学报, 2023, 43(21): 8948-8957.
- HAN W Y, XIA S S, ZHOU W, et al. Constructing ecological security pattern based on ecological corridor identification in Lhasa River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(21): 8948-8957.
- [32] 夏山林, 骆训, 杨显华, 等. 川西北生态源地识别与生态网络构建[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2025, 50(4): 43-54.
- XIA S L, LUO X, YANG X H, et al. Exploration of ecological source identification methods and ecological network construction in northwest Sichuan [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2025, 50(4): 43-54.
- [33] 李玉恒, 赵宁, 张云, 等. 东北黑土区土地生境质量演化及多情景预测: 以黑龙江省为例[J]. 环境科学, 2025, 46(12): 7958-7970.
- LI Y H, ZHAO N, ZHANG Y, et al. Evolution in land-habitat quality in black soil area of northeast China and multi-scenario forecasting: The study of Heilongjiang Province [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(12): 7958-7970.
- [34] 陈刚, 吴孟泉, 王强, 等. 基于 MSPA 和电路理论的生态安全格局构建研究: 以烟台市福山区为例[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2025, 41(2): 145-155.
- CHEN G, WU M Q, WANG Q, et al. Construction of ecological security pattern based on MSPA and circuit theory: A case study of Fushan District, Yantai City [J]. *Journal of Ludong University (Natural Science Edition)*, 2025, 41(2): 145-155.
- (上接第 413 页)
- [32] NOSRATI K, COLLINS A L. Fingerprinting the contribution of quarrying to fine-grained bed sediment in a mountainous catchment, Iran [J]. *River Research and Applications*, 2019, 35(3): 290-300.
- [33] 张加琼, 殷敏峰, 刘颖, 等. 指纹因子和估算模型对复合指纹识别泥沙来源的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2022, 20(6): 143-150.
- ZHANG J Q, YIN M F, LIU Y, et al. Influence of fingerprinting properties and estimation models on sediment source discrimination *via* composite fingerprinting approach [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(6): 143-150.
- [34] 戴伟. 复合指纹识别泥沙来源的准确性及方法优化研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- DAI W. Study on accuracy and method optimization of compound fingerprint identification of sediment source [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.
- [35] WALLING D E, WOODWARD J C. Tracing sources of suspended sediment in river basins: A case study of the River Culm, Devon, UK [J]. *Marine and Freshwater Research*, 1995, 46(1): e327.
- [36] SMITH H G, KARAM D S, LENNARD A T. Evaluating tracer selection for catchment sediment fingerprinting [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(9): 3005-3019.