

DOI: 10.5846/stxb202212283686

向爱盟, 赵筱青, 黄佩, 易琦, 普军伟, 施馨雨, 储博程. 高原湖泊流域国土空间生态修复优先区诊断及修复研究. 生态学报, 2023, 43(15): 6143-6153.
Xiang A M, Zhao X Q, Huang P, Yi Q, Pu J W, Shi X Y, Chu B C. Diagnosis and restoration of priority area of territorial ecological restoration in Plateau Lake Watershed. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6143-6153.

高原湖泊流域国土空间生态修复优先区诊断及修复研究

向爱盟¹, 赵筱青^{1,*}, 黄佩², 易琦¹, 普军伟², 施馨雨¹, 储博程³

1 云南大学地球科学学院, 昆明 650500

2 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500

3 云南风蓝项目投资咨询集团有限公司, 昆明 650200

摘要: 高原湖泊流域是高原地区人类活动的重要载体, 兼具高生态价值和高脆弱性的特点。随着高原湖泊流域城市化和工业化发展加速, 湖泊面积萎缩, 污染加剧, 流域生态环境受损严重, 引发了一系列生态环境问题, 如水土流失、水污染、湿地退化、生境质量下降等。亟需开展生态修复以平衡经济发展与生态环境保护之间关系, 而基于整体保护与系统治理思维诊断并修复生态修复优先区, 是科学有序推进国土空间生态保护与修复的重要抓手。基于此, 研究以高原湖泊流域典型代表滇池流域为例, 利用人类足迹和景观生态风险模型定量评估生态系统所受负向干扰, 以最小累积阻力模型和电路理论构建流域生态网络; 提取生态网络受负向干扰较高的关键区域为生态修复优先区并提出针对性修复措施。研究表明: (1) 滇池流域人类干扰和生态风险整体较高, 人类干扰整体呈核心—边缘递减的圈层式分布, 中高生态风险占据了绝大部分区域。人类交通网络大幅扩展了人类干扰和生态风险的强度和深度; (2) 区域生态网络呈典型湖泊生态网络特点, 38 条生态廊道呈放射状或环状分布, 连通湖区、山区两大生态空间内共 23 块生态源地, 保障区域生态安全; (3) 研究共提取生态源地修复优先区 73.83 km², 生态廊道修复优先区 26.97 km², 生态夹点修复优先区 31 处, 根据不同生态修复优先区典型问题和空间分布特征, 提出了点线面结合协同治理的修复策略。研究可为高原湖泊流域国土空间生态修复优先区识别、生态系统整体修复提升提供一定科学借鉴和参考。

关键词: MCR 模型; 电路理论; 景观生态风险; 人为干扰; 生态修复优先区; 高原湖泊流域

Diagnosis and restoration of priority area of territorial ecological restoration in Plateau Lake Watershed

XIANG Aimeng¹, ZHAO Xiaoqing^{1,*}, HUANG Pei², YI Qi¹, PU Junwei², SHI Xinyu¹, CHU Bocheng³

1 College of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500, China

2 Institute of International Rivers and Ecological Security, Yunnan University, Kunming 650500, China

3 Yunnan Fenglan Project Investment Consulting Group Company Limited, Kunming 650200, China

Abstract: The plateau lake basin is an important carrier of human activities in the plateau area, which has the characteristics of high ecological value and high vulnerability. However, with the acceleration of urbanization and industrialization in the plateau lake basin, the lake area is shrinking, the pollution is increasing, and the ecological environment of the basin is seriously damaged, causing a series of ecological and environmental problems, such as soil erosion, water pollution, wetland degradation and habitat quality decline. It is urgent to carry out ecological restoration to balance the relationship between economic development and ecological environment protection. Diagnosing and restoring

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41761109); 国家自然科学基金资助项目(42061052); 2022 产教融合研究生联合培养基地项目(云南风蓝项目投资咨询)(CZ22622203)

收稿日期: 2022-12-28; **采用日期:** 2023-04-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xqzhao@ynu.edu.cn

priority areas for ecological restoration based on holistic protection and systematic governance thinking, is a critical method for the scientific and orderly promotion of territorial space ecological protection and restoration. Based on this, the study took Dianchi Lake Basin, a typical plateau lake basin, as an example. The human footprint and landscape ecological risk model were used to quantitatively evaluate the negative interference of ecosystem, and the ecological network of the watershed was constructed by minimum cumulative resistance model and the circuit theory. The key areas with high negative interference in the ecological network were extracted as priority areas for ecological restoration and the targeted restoration measures were proposed. The results showed that: (1) the overall human disturbance and ecological risk in the Dianchi Lake Basin were high. The human disturbance was distributed in a core-periphery decreasing circle, and the medium and high ecological risks occupied most of the areas. Human traffic network had greatly expanded the intensity and depth of human disturbance and ecological risk. (2) The characteristics of regional ecological network were consistent with the typical lake ecological network. A total of 38 ecological corridors were distributed radially or circularly, connecting 23 ecological sources in the two ecological spaces of lake and mountain areas to ensure regionally ecological security. (3) The study extracted a total of 73.83 km² priority areas for ecological source restoration, 26.97 km² priority areas for ecological corridor restoration, and 31 priority areas for ecological pinch restoration. According to the typical problems and spatial distribution characteristics of different ecological restoration priority areas, a restoration strategy combining point, line and surface was proposed. The research results would help to provide some scientific reference for the identification of priority areas for ecological restoration of territorial space and the improvement of overall ecosystem restoration in plateau lake basin.

Key Words: Minimum Cumulative Resistance model; circuit theory; landscape ecological risk; human disturbance; ecological restoration priority area; plateau lake basin

随着工业化和城镇化的快速发展,人类活动成为改变和重塑国土空间的主要驱动力^[1-2],对生态系统结构和功能的干扰日益加剧^[3],人地矛盾不断突出,系统开展国土空间生态修复迫在眉睫。高原湖泊流域是我国国土空间的重要组成部分,其所承载的人口、经济众多,同时也是重要的生态功能供给区和涵养区^[4]。由于在快速城镇化、工业化过程中忽视对流域国土空间的合理利用与保护,在引发一系列生态环境问题的同时^[5-7],破坏了流域原有景观的整体性,致使景观斑块破碎化加剧,生态环境自我恢复能力大幅减弱,加剧流域生态环境恶化,严重制约着区域可持续发展。

随着长江经济带和黄河流域生态保护与高质量发展战略的提出,流域国土空间生态修复成为新时期我国生态文明建设的热点和关键^[8]。国土空间生态修复是对国土空间中受损和退化的生态系统的恢复和重建^[9-10];而生态修复优先区则是生态功能敏感、受损严重亟待开展生态修复的重点区域,准确识别生态修复优先区,提高生态系统质量和稳定性,是现阶段国土空间生态修复的关键^[11-12]。目前,已有的生态修复研究多集中于修复污染场地、土壤、森林、废弃矿山等单一要素,导致生态修复局部效果显著,但整体效果不佳^[13]。因此,源于景观生态学理论的国土空间生态修复逐渐成为研究热点。在现有的研究中,国土空间生态修复优先区研究的重心多集中于东部平原地区的城市^[14]或城市群^[15-16],对高原湖泊流域等生态脆弱区关注不足;在生态修复优先区识别上,多考虑生态重要性和人为干扰视角^[17-19],但人类干扰和生态系统间并非简单的干扰与被干扰关系,生态系统对人类干扰有其自适应能力,仅考虑生态重要性和人为干扰所提取生态修复优先区的准确性有待提高,亟需引入生态系统自适应能力视角以提升生态修复优先区的准确性。

滇池流域是我国高原湖泊流域典型代表和滇中城市群的核心^[20],地处长江、珠江、红河三大水系分水岭地带,在保障长江上游生态安全,支撑一带一路建设上发挥着重要作用;对于云南省更具特殊意义,其不仅是云南省重要的生态系统,也是云南国民经济、社会发展的核心。相较其他地区,滇池流域除具有高度城镇化区域生态环境受损严重的共性^[21],也有其自身生态环境脆弱,受损后恢复难度大的特性。亟待科学有序地开展国土空间生态修复工作来有效引导和管理人类活动,促进人与自然的可持续发展。鉴于此,研究以滇池流域

为研究区,综合自然生态和人类社会两大系统,结合生态重要性、人类干扰和景观生态风险视角,提取生态修复优先区域,并提出针对性的生态保护修复策略,以期为滇池流域国土空间生态修复提供借鉴和参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

滇池流域位于云南省中东部($102^{\circ}29'E-103^{\circ}1'E$, $24^{\circ}28'N-25^{\circ}28'N$),总面积为 3013.49km^2 (图1);该区属亚热带高原季风气候,全年干湿分明;地形以山地和山间盆地为主,地势起伏和缓。滇池是我国西南地区最大的高原淡水湖泊,在调蓄洪水、保障供水、调节气候、维护环境等方面发挥着重要作用。在社会经济上,滇池流域是滇中城市群核心,流域人口众多、经济发达,人口负荷和围湖开发强度大,是生态保护和发展的矛盾最突出的区域之一。该区域作为云南工农业、旅游业、经济和社会发展等最活跃的地区,准确识别生态修复优先区对于助推国土空间生态保护修复,保障该区经济与生态安全协调发展具有重要的现实意义。

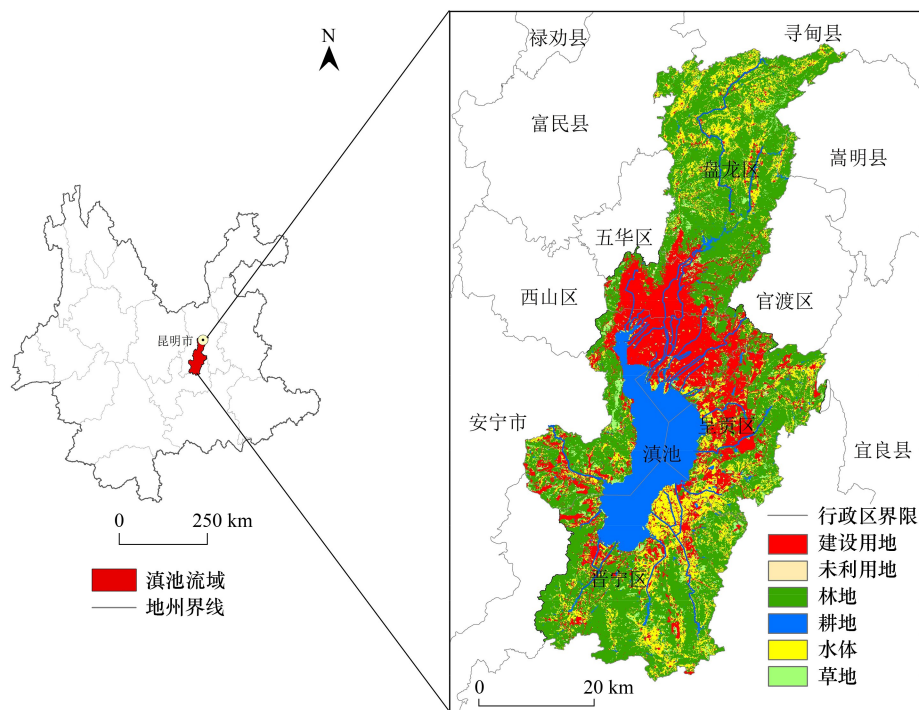


图1 滇池流域区位图

Fig.1 Location map of the Dianchi Lake Basin

1.2 数据来源

研究数据主要包括遥感影像、气候、地形、交通、人口和规划文本等多源数据(表1),数据时间为2020年。参考刘林、彭建等对滇池、玉溪等高原湖泊流域的研究^[22-24],将土地利用类型划分为建设用地、未利用地、林地、水体、耕地、草地六类,解译精度为88.32%。基于粒度反推法,选取斑块个数、斑块密度、景观分维数、蔓延度指数、景观连通性、内聚力指数表征景观整体性和连通性,最终确定90m为最优景观粒度大小,以该粒度水平作为参照,作为本文的空间分辨率尺度,坐标系统一转换为CGCS2000_3_Degree_GK_Zone_34。

2 研究方法

2.1 基于人类足迹的人类干扰评估

人类足迹(Human Footprint, HF)是从生态效应角度评估人类干扰对陆地生态系统影响的常用指标^[25],在

自然保护区和生态连通性研究^[26]中得到广泛应用。基于现有人类足迹体系架构^[27],考虑研究区的区域特征与数据的可用性,选取人口密度、土地利用、夜间灯光及交通四类典型人类活动影响,以 90m 的空间分辨率绘制人类足迹,量化人类活动对生态系统的干扰,计算公式如下:

$$HII = \text{pop} + \text{landuse} + \text{nightlight} + \text{access} \quad (1)$$

$$HF = \frac{HII - HII_{\min}}{HII_{\max} - HII_{\min}} \quad (2)$$

式中, pop 为人口密度指数, landuse 为土地利用影响指数, nightlight 为夜间灯光指数, access 为交通影响指数, HF 为人类足迹, HII 为人类影响指数 (Human Influence Index), $HII_{\max}$ 与 $HII_{\min}$ 分别为研究区内人类影响指数的最大值与最小值。

表 1 数据信息表

Table 1 Data list

数据类型 Data type	数据用途 Data usage	数据来源 Data source
Landsat8 OLI 数据 Landsat8 OLI data	土地利用类型推演、植被指数计算	地理空间数据云
数字高程模型 Digital Elevation Model	地形、坡度推演	
夜间灯光数据 Nighttime lighting data	人为干扰指数计算	珞珈一号 GEC 数据
NPP 数据 Net Primary Production data	固碳释氧计算	MODIS 网站
土壤类型数据 Soil type data	水土保持、水源涵养计算	世界土壤数据库 (HWSD)
人口密度数据 Population density	人为干扰指数计算	全球高分辨率人口计划项目
气象数据 Meteorological data	水土保持、水源涵养计算	昆明市气象局
道路数据 Road data	人为干扰指数计算	Open Street Map 网站

2.2 景观生态风险评估

景观生态风险是指自然因素或人类活动干扰对生态环境与景观格局交互作用造成的负面影响^[28],可反映生态系统自适应能力。研究选取景观干扰度指数、脆弱度指数和损失度指数建立景观生态风险评估模型^[29-30]。其中,景观干扰度可反映不同景观所代表的生态系统所受干扰程度;生态脆弱度可反映景观类型抵抗外界干扰的能力和对外界变化的敏感程度;损失度指数由景观干扰度指数和景观脆弱度指数来综合反映,是对景观类型受干扰后所受到生态损失的描述。此外,由于景观格局在空间上分布不均,具有区域异质性,需要对研究区划分风险小区。结合已有研究^[31-32],分别以 200, 400, 600, 800, 1000, 1200m 的粒度划分,如图 2 所示,研究发现 600m 的格网是各景观指数发生突变的关键点,600m 时景观分离度较低,而景观内聚力指数较高,该粒度时景观组分整体性和连通性最佳。因此,以 600m×600m 格网划分风险小区。景观生态风险指数计算公式如下:

$$ERI_k = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} \times R_i \quad (3)$$

式中, ERI_k 是第 k 个风险小区的生态风险指数 (Ecological Risk Index), A_{ki} 是第 k 个风险小区里第 i 类景观的面积, A_k 是第 k 个风险小区的总面积, R_i 是第 i 类景观的生态损失指数。

利用景观生态风险评估模型求得每个风险小区的生态风险指数,以生态风险值作为小区中心点的值,利用 ArcGIS 软件通过普通克里金插值,获得滇池流域景观生态风险空间分布情况。通过将生态风险指数与人类干扰指数等权叠加,得到滇池流域生态网络负向干扰面。

2.3 区域生态网络识别

2.3.1 基于生境重要性的生态源地识别

生境重要性评价是针对区域典型生态系统服务,分析其地域分异特征,明确各种生态系统服务的核心供给区域,是生态源地识别的基本途径。基于生态系统服务内涵与滇池流域特点,选取水源涵养、生物多样性、水土保持以及固碳释氧^[33-34]进行生境重要性评价。通过等权叠加计算生境重要性,以重要性评价结果中面

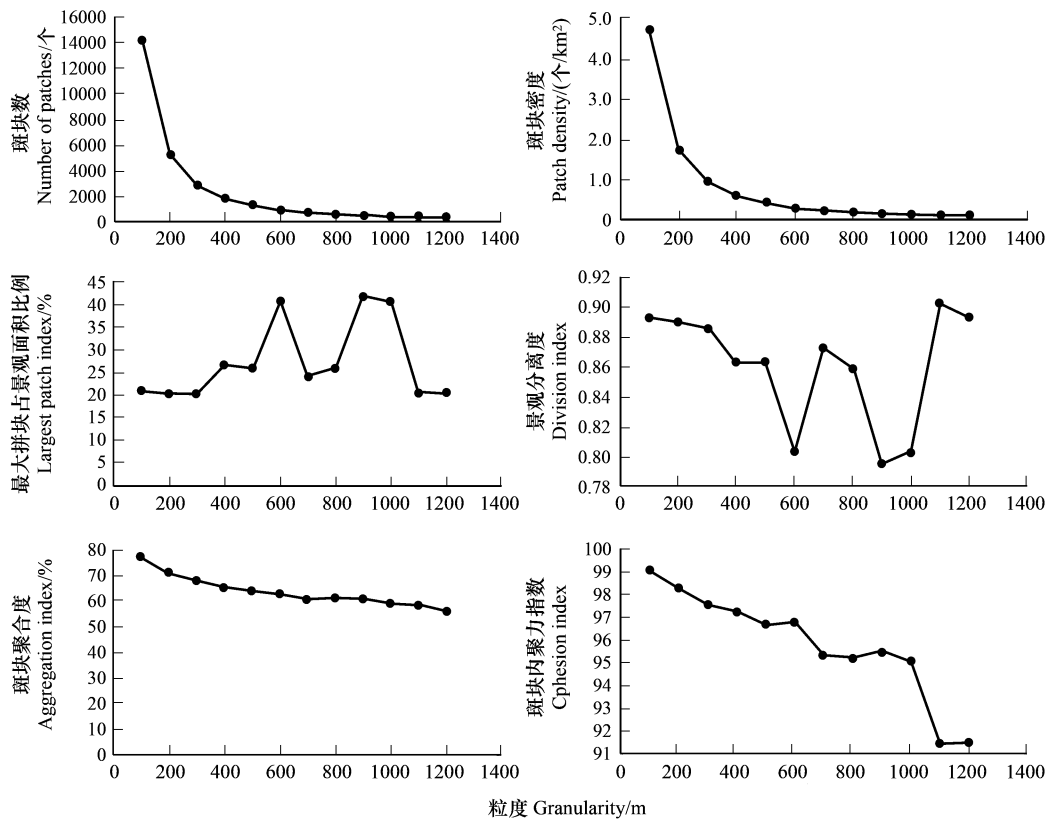


图2 不同粒度下景观格局指数

Fig.2 Landscape pattern index under different sizes

积大于 5km²的极重要等级生态用地作为“源”。同时考虑到滇池在高原湖泊流域保护及生物多样性等方面的突出作用,将滇池作为生态源地。

2.3.2 生态阻力面构建

(1)基础阻力面构建:生态阻力是源地之间进行能量传输、物质交换或物种迁徙过程中遭遇的阻碍,土地利用类型和地形是“源”对外扩散时受到阻力的主要来源^[35]。本文参考已有学者研究并结合研究区实际,选取土地利用类型、坡度、海拔和植被覆盖度因子划分阻力值;层次分析法简单实用,结合专家打分可有效反映不同阻力因子的影响大小,且有较多应用实例^[36-37]。因此,研究采用层次分析法(AHP)计算各阻力因子对应权重值,最终得到各阻力因子等级权重如表2所示。

(2)阻力面修正:自然因素是影响物种生存范围的基础性因素,而人为干扰和景观生态风险对物种的干扰不可忽视。滇池流域人口密集,城镇扩张迅速,生境斑块破碎,景观生态风险高,抗干扰能力弱。高强度人类活动显著改变了栖息地环境,也造成了区域生态系统服务功能退化,致使原有廊道受阻,降低生态网络的连通性;高景观生态风险区域,生境斑块破碎,抗干扰能力弱,承载生物迁徙和能量流动的能力弱。因此,有必要通过人类干扰和生态风险两方面修正阻力面。公式如下:

$$NL_i = 0.5 \times HF_i + 0.5 \times ERI_i \quad (4)$$

$$R_i = R \times \frac{NL_i}{NL_a} \quad (5)$$

式中, R_i 为基于人类干扰和景观生态风险指数修正的栅格*i*的阻力值; R 为栅格*i*对应的基础阻力值; NL_i 为栅格*i*所受负向干扰指数, NL_a 为栅格*i*所对应地类*a*的负向干扰平均值, HF_i 和 ERI_i 分别为栅格*i*所受人类干扰指数和景观生态风险指数。

表 2 研究区阻力值和权重

Table 2 Resistance factor and weight in the study area

阻力因子 Resistance factor	权重 Weight	指标 Index	阻力值 Resistance value	阻力因子 Resistance factor	权重 Weight	指标 Index	阻力值 Resistance value
土地利用类型 Land use type	0.57	林地	10	海拔/m Elevation	0.06	<1950	10
		草地	20			1950—2100	30
		耕地	40			2100—2250	50
		水体	60			2250—2450	70
		未利用地	80			>2450	100
		建设用地	100	植被覆盖度 Vegetation coverage	0.11	0—0.25	100
坡度/(°) Slope	0.26	0—5	10			0.25—0.5	70
		5—15	30			0.5—0.65	50
		15—25	50			0.65—0.85	30
		25—35	70			0.85—1	10
		>35	100				

2.3.3 生态廊道提取

生态廊道是生态源地间生态流动的低阻力值通道,其识别和保护对促进区域生态要素流通以及生物多样性保护具有重要意义,本文采用最小累积阻力模型(Minimum Cumulative Resistance, 简称 MCR), 利用 Circuitscape 插件的 Linkage Mapper 模块进行滇池流域生态廊道提取。具体公式如下^[38]:

$$MCR = \int \min \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \tag{6}$$

式中,MCR 为最小累积阻力值; D_{ij} 为生态源地斑块 j 到景观单元 i 的空间距离; R_i 为景观单元 i 对生物物种迁徙的阻力。

2.4 国土空间生态修复优先区诊断

完整稳定的生态网络对维护生态系统及其过程完整、保障区域生态安全的意义重大。而生态网络的完整稳定除受高程度人类活动干扰外,也与生态系统自身状况有关。鉴于此,本文将生态网络与负向干扰面进行叠加分析,将生态网络中受到较高负向干扰区域诊断为国土空间生态修复优先区(如表 3)。

表 3 生态修复优先区诊断原则及方法

Table 3 Diagnostic principles and methods of ecological restoration priority areas

生态修复优先区类型 Ecological restoration priority area	诊断原则 Diagnosis principle	诊断方法 Diagnosis method
生态源地修复优先区 Ecological source restoration priority area	提取高负向干扰的生态源地为修复优先区	叠加分析
生态廊道修复优先区 Ecological corridor restoration priority area	提取生态廊道中的障碍区为廊道修复优先区	Circuitscape 软件的 Barrier Mapper 模块、移动窗口法
生态夹点修复优先区 Ecological pinch point restoration priority area	提取高负向干扰的生态夹点为修复优先区	Circuitscape 软件的 Pinch point Mapper 模块、叠加分析

3 结果分析

3.1 滇池流域人类干扰与生态风险评估

滇池流域人类干扰指数较高,表明人类活动对流域生态环境的干扰强度大、范围广。其中,人类干扰高值区集中于流域中部,即滇池周边区域,特别是滇池北岸。人类干扰低值区集中于流域四周山地区域,且人类干扰多沿交通网络向远离城区的山区延伸,交通网络大幅增强了人类干扰的强度和深度;流域大部分区域处于中高生态风险影响下,中高生态风险区多位于城区边缘、道路两侧及耕地,低生态风险分布于昆明主城区及北

部和南部大片连续林地。中高生态风险区主要受高强度人类活动影响,生境破碎化程度高,生态系统恢复能力较弱,生态风险较高;而主城区建设用地集中连片,景观斑块较为完整,同时建设用地对外界变化的敏感程度较低,景观脆弱度低,因而呈现“高人类干扰区低景观生态风险”(图3)。

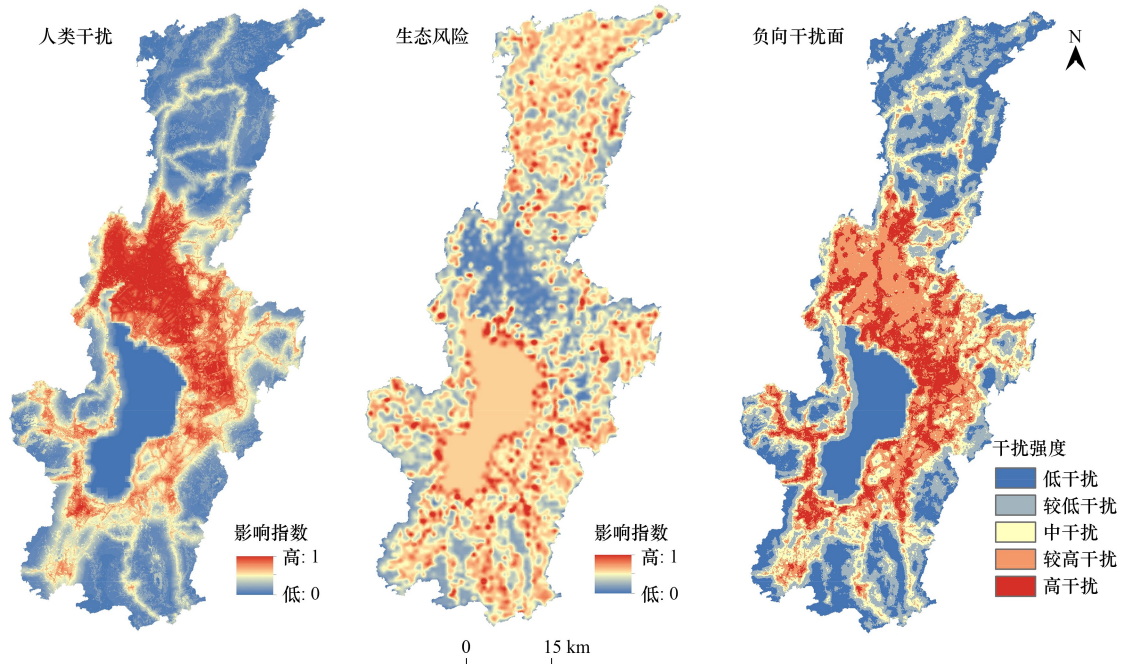


图3 人类干扰、生态风险和负向干扰空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of human disturbance, ecological risk and negative disturbance

人类干扰和景观生态风险叠加得到研究区负向干扰面,采用自然断点法将负向干扰面划分为低干扰(0.02—0.23)、较低干扰(0.23—0.34)、中干扰(0.34—0.45)、较高干扰(0.45—0.56)、高干扰(0.56—0.92)共5级。其中,滇池流域负向干扰以低负向干扰和较低负向干扰为主,占比达50.74%;其次是较高负向干扰,占20.16%;而高负向干扰最少,仅占10.52%。高负向干扰区集中分布在滇池周边和城区周围,少量沿交通要道带状分布;较高干扰区分布于滇池北部城区,区域人为扰动强烈但生态风险相对较小;中干扰区主要分布于滇池沿岸和交通干线周边;低干扰和较低干扰区域主要集中于研究区周边山地和滇池(图3)。整体而言,研究区负向干扰呈现从滇池周边向边缘沿交通干线递减的趋势。

3.2 区域生态网络构建

流域生态源地斑块共23个,集中分布在流域边缘的山地丘陵地区,流域中部生态源地较少,以滇池为中心零散分布。这些区域对生态系统服务功能的发挥具有重要作用,能满足较高的生态需求;通过MCR模型共提取源间生态廊道38条,共计136.86km²,分为由滇池向山区的放射状廊道和串联山区的流域边缘分散式环状廊道。廊道空间分布呈明显的区域差异,中部城区廊道分布相对稀疏,长度长,路径平均耗费成本值高;边缘的山地丘陵,如盘龙区北部和晋宁区的廊道分布密集,长度较短,路径平均耗费成本值低(图4)。

3.3 生态修复优先区识别

流域生态源地处于负向低干扰、较低干扰、中干扰、较高干扰和高干扰下的区域面积分别为589.02km²、204.7km²、63.14km²、9.82km²和0.87km²(图5)。将中干扰及以上干扰区作为生态源地修复优先区,生态源地修复优先区面积占源地总面积的8.51%,较为分散地镶嵌于生态源地斑块边缘,加剧生境斑块地破碎化。空间分布上多位于滇池沿岸和北部丘陵山地与城区交界边缘,如滇池沿岸、棋盘山国家公园和金殿国家公园等。整体而言,生态源地受负向干扰相对较低,体现了当前滇池流域保护措施合理性和保护的有效性,但仍需严

格保护。

廊道修复优先区面积为 26.97km², 占廊道总面积的 19.71%。整体来看廊道修复优先区集中分布于研究区中部的城镇边界、廊道与道路交汇处, 地类以建设用地和耕地为主(图 5)。这是由于研究区中部是区域生态过程的中转与集散区, 源间廊道众多, 加之研究区中部人口众多、经济发达, 人类干扰强度高, 斑块破碎、生态风险高, 对生态过程造成极大的阻力, 因而廊道修复优先区面积较大。

生态夹点修复优先区共 31 处, 均分布于城区边缘或交通干线附近(图 6)生态夹点修复优先区的空间分布特征体现了流域城镇扩张、交通与生态系统的剧烈冲突。一方面城镇扩张致使生境斑块的破碎化, 生态系统的自我恢复能力受损严重; 另一方面交通网络在增强人类干扰的广度和深度的同时进一步阻碍了景观生态流的水平生态过程。因此需重点关注城镇边界、交通道路与生境斑块交汇处的节点建设及其生态功能的提升。

3.4 滇池流域生态修复优先区修复策略

针对上文识别的生态源地、廊道、夹点修复优先区空间分布特征和典型问题, 研究提出了相应生态修复策略, 以保障生态系统结构完整、提升生态系统功能、完善源地—廊道—节点生态网络。

(1) 生态源地修复优先区的面层面修复策略: “限制人为扰动, 促进功能提升”。源地修复优先区多位于滇池沿岸和北部丘陵山地与城区交界边缘, 受人为干扰大, 源地边缘斑块破碎。源地内部应控制不符合主体功能定位的开发建设活动, 加大封育力度, 维护原有地形和生物多样性, 提升生态系统功能。如针对滇池生态源地, 全面清理、迁出滇池源地内的违规建筑物。持续推进滇池水生态治理, 确保滇池水质达标和生态系统功能的提升; 源地边缘需加强源地边缘区域管控, 注重生态缓冲区建设, 通过构建环湖生态缓冲区、滇池生态步道等方式, 加大保护修复力度。

(2) 生态廊道修复优先区的线层面修复策略: “清除生态障碍, 保障生态流通”: 廊道修复优先区多位于城镇边界、城区河流及廊道与道路交汇处。流域中部尤其是滇池周边市区, 需注重生态廊道保护, 依托现有山地、林地、水系, 建设维护环城生态廊道、城市绿地等连通性生态空间, 避免城市无序扩张、过度蔓延, 营造良好的城镇发展形态。因此, 在后期城市发展规划中应加强生态规划, 合理引导城市发展方向, 同时, 结合河流、林地分布情况, 预留绿化、通风廊道空间, 构建环城生态廊道, 保障生态流畅通, 避免城市低效、过度扩张; 此外, 针对宝象河、盘龙江水系等结构性天然廊道应加强治理, 持续开展入湖河流整治, 治理河道污染, 加强岸线管控及河流沿岸湿地保护, 构建美丽河道。

(3) 生态夹点修复优先区的点层面修复策略: “预留生态通道, 加强监测管理”: 生态夹点修复优先区多位于城镇边缘和交通干线附近。应增设交通廊道防护设施、生态绿地和绿色通道, 削弱现有道路网络的噪声、扬尘、尾气等对生境的影响; 此外, 在未来城市建设和交通规划应加强生态环境影响评估与生态空间的保留塑造, 降低交通建设对生态环境的不利影响。

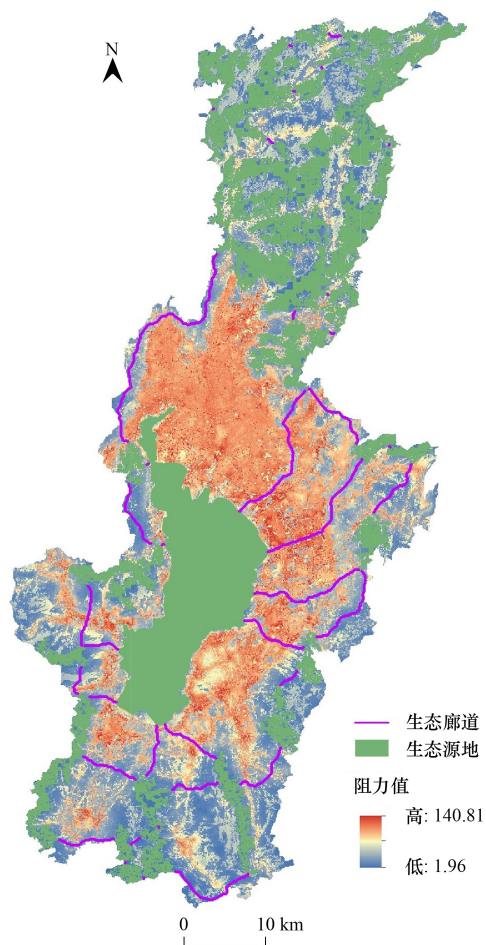


图 4 研究区生态网络

Fig.4 Ecological network of study area

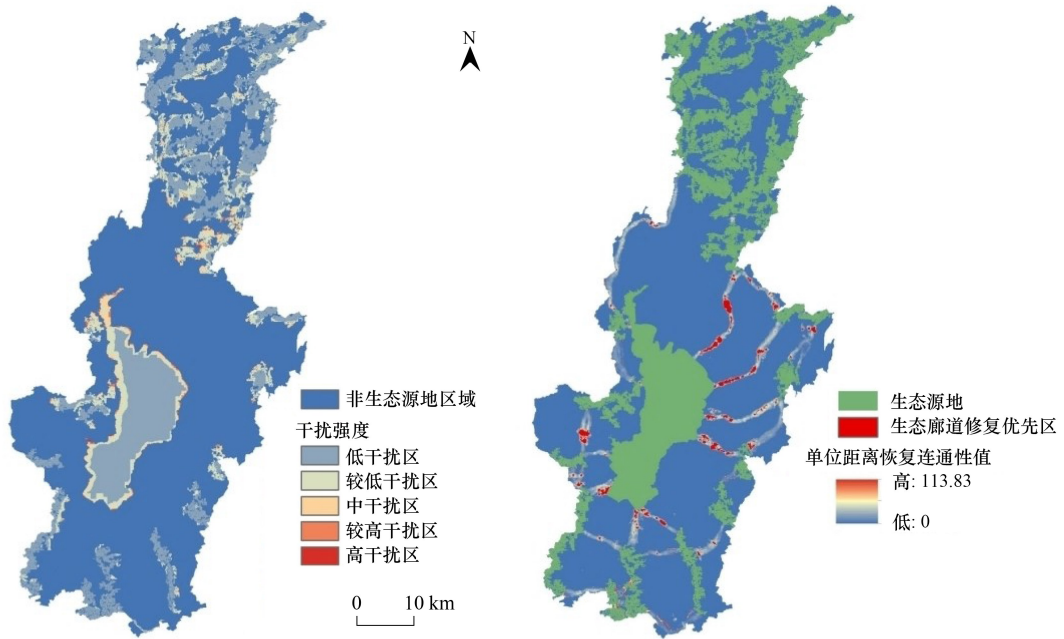


图 5 生态源地修复优先区及廊道修复优先区空间分布

Fig.5 Spatial distribution of priority areas of ecological source restoration and corridor restoration

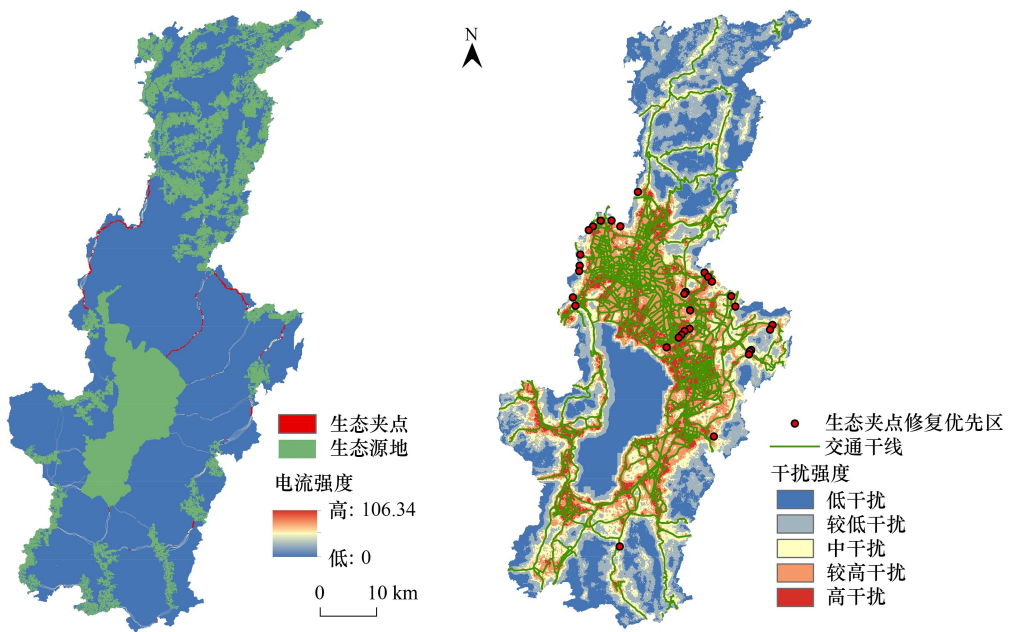


图 6 生态夹点修复优先区空间分布

Fig.6 Spatial distribution of priority areas for restoration of ecological points

4 讨论与结论

4.1 讨论

生态修复优先区可以突出生态保护和修复的重点,为生态保护修复政策的建立和完善提供重要的科学依据。而生态修复优先区的准确识别需要精准把控国土空间生态修复“整体保护、系统修复、综合治理”的理

念^[39-40]。相较以往生态修复研究对生态系统自身调节和适应能力考虑不足的局限^[41-42]。研究在生态修复迫切性表征上引入负向干扰指数。负向干扰指数构建涉及对生态系统所受干扰的多角度分析,既考虑人类干扰对生态系统的直接影响,又考虑区域景观生态风险来衡量生态系统的调节和适应能力,从而有效避免了单尺度评价对区域生态修复迫切性表征不准的问题。所构建的负向干扰面相较单一人类干扰指数局限于城区和交通网络有所锐化和突出,耕地破碎和扩展对流域生态系统的负向影响得到进一步体现。

在生态修复优先区的修复策略制定上,研究针对不同类型生态修复优先区的空间分布特征和区域典型问题,提出限制人为扰动,提升生态功能;清除障碍区,保障生态流通;预留生态通道,加强监测管理的点线面结合协同治理策略,可对现有保护修复政策进行一定的补充和优化。现有的地方生态保护修复政策多侧重于生态红线的划定和生态保护区的区块保护^[43],如昆明市政府自 2008 年启动的滇池湖滨“四退三还一护”生态建设工作、滇池草海系统整治、滇池流域“两线”“三区”划定管控等。虽然这种区块保护对大面积或脆弱的生态用地具有保护作用,但并未充分考虑景观连通性、生态系统结构和功能。生态用地间缺乏重要的连接通道,物质循环和能量受阻,生态保护修复效果相对较差^[44]。而通过修复优先区,完善生态源地、廊道、节点等景观组分,有助于明晰生态修复的重点和关键,增强生态系统之间的联系和相互作用,形成一体的生态功能网络,达成系统修复、综合治理的目标^[45]。同时所识别的生态源地修复优先区又能为现有保护区区块保护策略制订和缓冲区范围划定提供一定的依据和参考,由以往缓冲区范围硬性划定到弹性设置。

然而,本研究还存在以下局限:一方面,在生态修复优先区提取过程中,仅考虑了人类活动对生态系统的负面影响,忽视了经济发展、环保投入等人类活动对生态系统的正向影响。在后续的研究中有待进一步完善;另一方面,本文依据源地、廊道、节点修复优先区在生态安全格局中的作用、空间分布特征等,提出了一定的生态修复策略。但具体的修复措施如斑块面积的优化尺度、缓冲区距离设置、生态通道设立标准等可能与实际景观格局存在误差,导致实际修复操作中产生不确定性,未来有必要结合实践作进一步的深入研究。

4.2 结论

基于生态网络—人为干扰—景观生态风险开展生态修复优先区诊断与修复研究,对流域生态修复进行了积极探索,并提出了针对性的修复策略。研究结论如下:

(1) 滇池流域人类干扰和景观生态风险整体较高,交通网络对人类干扰和景观生态风险的扩展和增强作用不容忽视。流域负向干扰以中低干扰为主,但较高、高干扰区占比较大,集中分布于城区和交通干线两侧。

(2) 区域生态网络呈现典型湖泊生态网络特点,生态廊道以中部放射型廊道和边缘分散式环形廊道,连通 23 块生态源地,保障区域生态安全。

(3) 研究共识别生态源地修复优先区面积 73.83km²,生态廊道修复优先区 26.97km²,生态夹点 31 处。结合各生态修复优先区的空间分布特征和典型问题,提出限制人为扰动,提升生态功能;清除生态障碍,保障生态流通;预留生态通道,加强监测管理的修复策略。

参考文献 (References):

- [1] Steffen W, Crutzen J, McNeill J R. The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of Nature? *Ambio*, 2007, 36(8): 614-621.
- [2] 李杨帆, 朱晓东, 孙翔, 王向华. 快速城市化对区域生态环境影响的时空过程及评价. *环境科学学报*, 2007(12): 2060-2066.
- [3] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J, Bai X, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [4] 杨开忠, 单菁菁, 彭文英, 陈洪波, 朱守先. 加快推进流域的生态文明建设. *今日国土*, 2020(8): 29-30.
- [5] 李双成, 赵志强, 王仰麟. 中国城市化过程及其资源与生态环境效应机制. *地理科学进展*, 2009, 28(1): 63-70.
- [6] 陈明星, 梁龙武, 王振波, 张文忠, 余建辉, 梁宜. 美丽中国与国土空间规划关系的地理学思考. *地理学报*, 2019, 74(12): 2467-2481.
- [7] 文字立, 谢阳村, 徐敏, 路瑞, 王东. 构建适应新国土空间规划的流域空间管控体系. *中国环境管理*, 2020, 12(5): 58-64.
- [8] 邓楚雄, 刘唱唱, 李忠武. 生态修复背景下流域国土空间韧性研究思路. *中国土地科学*, 2022, 36(5): 11-20.
- [9] 蔡海生, 查东平, 张学玲, 陈艺, 曾珩, 邵晖, 洪士林. 基于主导生态功能的江西省国土空间生态修复分区研究. *地学前缘*, 2021, 28(4): 55-69.
- [10] 张世文, 卜中原, 沈强, 杨邵文, 胡青青, 周妍, 罗明. 粤北南岭大宝山矿流域山水林田湖草修复阻力与优先级分析. *生态学报*, 2019, 39(23): 8920-8929.

- [11] 袁媛,白中科,师学义,赵雪娇,张嘉楠,杨博宇. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复优先区确定——以河北省遵化市为例. 生态学报, 2022, 41(4): 750-759.
- [12] 胡动刚,蒙萌,胡思颖,李雪妍,鲍泽韩. 2010 年以来从土地整治到全域整治的热点研究和阶段分析——基于耕地保护视角. 华中农业大学学报, 2021, 40(6): 103-111.
- [13] 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.
- [14] 付凤杰,刘珍环,刘海. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以贺州市为例. 生态学报, 2021, 41(9): 3406-3414.
- [15] 柳建玲,李胜鹏,范胜龙,胡勇. 基于生态安全格局的厦漳泉地区国土空间生态保护修复区与预警点识别. 生态学报, 2021, 41(20): 8124-8134.
- [16] 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. 生态学报, 2021, 41(9): 3441-3448.
- [17] 涂婧林,侯东瑞,陈弋冉,丁茗童,安文雨,刘文平,朱春阳. 国土空间生态修复关键区域系统识别与修复——以武汉市蔡甸区为例. 华中农业大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 47-55.
- [18] 焦胜,刘奕村,韩宗伟,周可婧,胡亮,刘铁雄. 基于生态网络—人类干扰的国土空间生态修复优先区诊断——以长株潭城市群为例. 自然资源学报, 2021, 36(9): 2294-2307.
- [19] Li Q, Zhou Y, Yi S Q. An integrated approach to constructing ecological security patterns and identifying ecological restoration and protection areas: A case study of Jingmen, China. *Ecological Indicators*, 2022, 10: 8979.
- [20] 王筱春,夏雪,雷轩. 基于生态保护红线的滇池流域生态空间管控. 经济地理, 2020, 40(5): 191-197.
- [21] 刘林,雷冬梅,冉玉菊,张渊. 基于生态系统服务功能的滇池流域关键性生态用地识别. 农业工程学报, 2021, 37(11): 277-284.
- [22] 刘杰,叶晶,杨婉,郭怀成,于书霞. 基于 GIS 的滇池流域景观格局优化. 自然资源学报, 2012, 27(5): 801-808.
- [23] 杨文龙. 云南高原湖泊的开发与保护. 湖泊科学, 1994, (2): 161-165.
- [24] 彭建,郭小楠,胡媚娜,刘焱序. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例. 应用生态学报, 2017, 28(2): 627-635.
- [25] 刘世梁,刘芦萌,武雪,侯笑云,赵爽,刘国华. 区域生态效应研究中人类活动强度量化评价. 生态学报, 2018, 38(19): 6797-6809.
- [26] Li S, Wu J, Gong J, Li S W. Human footprint in Tibet: assessing the spatial layout and effectiveness of nature reserves. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 18-29.
- [27] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, Redford K H, Wannebo A V, Woolmer G. The Human Footprint and the Last of the Wild: the human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not. *BioScience*, 2002, 52(10): 891-904.
- [28] 彭建,党威雄,刘焱序,宗敏丽,胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(4): 664-677.
- [29] 巩杰,赵彩霞,谢余初,高彦净. 基于景观格局的甘肃白龙江流域生态风险评价与管理. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2041-2048.
- [30] Peng J, Wang Y L, Zhang Y, Wu J S, Li W F, Li Y. Evaluating the effectiveness of landscape metrics in quantifying spatial patterns. *Ecological Indicators*, 2010, 10(2): 217-223.
- [31] 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. 生态学报, 2016, 35(3): 791-799.
- [32] 巩杰,谢余初,赵彩霞,高彦净. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异. 中国环境科学, 2014, 34(8): 2153-2160.
- [33] 冉玉菊,雷冬梅,刘林,高丽萍. 滇中城市群 2000—2020 年土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 水土保持通报, 2021, 41(4): 310-322.
- [34] Gao B P, Wu Y M, Li C, Zheng K J, Wu Y. Ecosystem Health Responses of Urban Agglomerations in Central Yunnan Based on Land Use Change. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(19).
- [35] 于航,刘学录,赵天明,张梦莹,年丽丽,李晓丹. 基于景观格局的祁连山国家公园景观生态风险评价. 生态科学, 2022, 41(2): 99-107.
- [36] 刘金花,杨朔,吕永强. 基于生态安全格局与生态脆弱性评价的生态修复关键区域识别与诊断——以汶上县为例. 中国环境科学, 2022, 42(7): 3343-3352.
- [37] 王雪然,万荣荣,潘佩佩. 太湖流域生态安全格局构建与调控——基于空间形态学-最小累积阻力模型. 生态学报, 2022, 42(5): 1968-1980.
- [38] Kong F, Yin H, Nakagoshi N, Zong Y. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 95(1/2): 16-27.
- [39] 刘俊国,崔文惠,田展,贾金霖. 渐进式生态修复理论. 科学通报, 2021, 66(9): 1014-1025.
- [40] 苏冲,董建权,马志刚,乔娜,彭建. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护修复优先区识别——以四川省华蓥山区为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8948-8956.
- [41] 刘世梁,董玉红,孙永秀,史芳宁. 基于生态系统服务提升的山水林田湖草优先区分析——以贵州省为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8957-8965.
- [42] Hao R F, Yu D Y, Liu Y P, Liu Y, Qiao J M, Wang X, Du J S. Impacts of changes in climate and landscape pattern on ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 718-728.
- [43] Wang C, Yu C, Chen T, Feng Z, Hu Y C, Wu K N. Can the establishment of ecological security patterns improve ecological protection? An example of Nanchang, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 140051.
- [44] Ran Y J, Lei D M, Li J, Gao L P, Mo J X, Liu X. Identification of crucial areas of territorial ecological restoration based on ecological security pattern: a case study of the central Yunnan urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109318.
- [45] 闫玉玉,孙彦伟,刘敏. 基于生态安全格局的上海国土空间生态修复关键区域识别与修复策略. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3369-3378.