

DOI: 10.20103/j.stxb.202403280664

王腾雯, 程俊豪, 熊航, 刘允瑄, 谢苗苗. 融合生态安全格局和基于自然解决方案的山水林田坝草一体化保护和系统治理. 生态学报, 2025, 45(3): 1210-1225.

Wang T W, Cheng J H, Xiong H, Liu Y X, Xie M M. Integrated conservation and systematic management of mountain-river-forest-farmland-dam-grass based on the ecological security pattern and Nature-based Solutions (NbS). Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1210-1225.

融合生态安全格局和基于自然解决方案的山水林田坝草一体化保护和系统治理

王腾雯¹, 程俊豪¹, 熊航¹, 刘允瑄¹, 谢苗苗^{1,2,*}

1 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083

2 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035

摘要: 山水林田湖草沙生命共同体理念是当前我国落实生态文明建设的重要遵循, 基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)理念综合考虑社会、经济和生态效益以应对多样化挑战, 实现“社会-生态”系统可持续管理, 与生命共同体理念高度契合。生态安全格局是整合生态要素和优化空间配置的有效工具。以黄土高原沟壑区的皇甫川入黄小流域为研究区, 提出了NbS指导下的“风险-格局-路径”生态修复框架。基于景观生态风险评价诊断流域“社会-生态”系统问题, 构建源地-廊道-节点式生态安全格局, 依据NbS八大准则设计“修复措施-生态效益-人类福祉”的NbS生态修复路径。建立“要素-问题-准则-策略”逻辑关系, 实现NbS修复路径的全要素空间落位。结果表明: (1) 皇甫川入黄小流域景观生态风险空间分异显著, 干流周围及流域南部风险高, 高与较高风险区、中风险区、低与较低风险区分别占全区面积的21.43%、25.56%、53.01%。(2) 流域内共识别18个生态源地、153条生态廊道和86个生态节点, 生态源地与廊道分布较均匀, 生态节点在流域西北部分布较少。(3) 设计流域“川道改造+坡沟共治+矿山重塑”三位一体的山水林田坝草一体化保护和系统治理策略, 布局3大类10小类共计80个修复工程。(4) 修复策略NbS自评估总分值86.04%, 与NbS准则高度匹配。在NbS理念指导下, 利用生态安全格局进行山水林田坝草要素生态过程耦合、空间布局协同, 为流域维护生态安全、治理系统问题、实现可持续发展提供了有益实践。

关键词: NbS; 山水林田湖草沙; 生态修复; 生态安全格局; 黄土高原

Integrated conservation and systematic management of mountain-river-forest-farmland-dam-grass based on the ecological security pattern and Nature-based Solutions (NbS)

WANG Tengwen¹, CHENG Junhao¹, XIONG Hang¹, LIU Yunxuan¹, XIE Miaomiao^{1,2,*}

1 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

Abstract: The concept of a community of life in the mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, grasses and sands is an important guideline for the implementation of ecological civilization in China. Nature-based Solutions (NbS) integrates social, economic, and ecological benefits, to address diversified challenges and realize sustainable management of socio-ecological systems, which is highly compatible with the concept of life community in China. The ecological security pattern is an effective tool for integrating ecological elements and optimizing spatial allocation. In this study, the Huangfu River sub-watershed on the Loess Plateau gully region was taken as the study area, and a “risk-pattern-path” ecological restoration

基金项目: 国家自然科学基金项目(42207530); 中国地质大学(北京)2022年度本科教育质量提升计划建设项目

收稿日期: 2024-03-28; **网络出版日期:** 2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiemiaomiao@cugb.edu.cn

framework guided by NbS was proposed. Based on the landscape ecological risk assessment, we diagnosed the ecosystem problems in the watershed, constructed a source-corridor-node ecological security pattern, and designed the “restoration measures-ecological benefits-human well-being” ecological restoration framework in accordance with the eight NbS criteria. The logical relationship of “element-problem-criterion-strategy” was established to realize the spatial location of the NbS restoration pathway of all elements. The results show that: (1) The landscape ecological risk of Huangfu River sub-watershed has significant spatial differentiation, with high risk around the main stream and the southern part of the watershed. The area of high risk, medium risk, and low risk accounted for 21.43%, 25.56%, and 53.01% of the whole area, respectively. (2) There were 18 ecological sources, 153 ecological corridors and 86 ecological nodes identified in the watershed. The distribution of ecological sources and corridors is relatively uniform, while the distribution of ecological nodes in the northwestern part of the watershed is relatively low. (3) The strategy of integrated conservation and systematic management of mountain-river-forest-farmland-lake-grass-sand of “river channel renovation+slope and ditch co-management +mine remodelling” was designed. A total of 80 restoration projects in 3 major categories and 10 minor categories were arranged. (4) The restoration strategy has a total score of 86.04% in the NbS self-assessment, which is highly compatible with the NbS criteria. Under the guidance of the NbS, the study makes use of the ecological security pattern for the ecological process coupling and spatial layout synergy of the elements of mountains, rivers, forests, farmlands, dams and grasses, which provides a useful practice for maintaining ecological security, managing systemic problems and realizing sustainable development in the watershed.

Key Words: NbS; mountain-river-forest-farmland-lake-grass-sand; ecological restoration; ecological security pattern; the Loess Plateau

山水林田湖草沙一体化保护与系统治理是指按照山水林田湖草沙生命共同体理念,从系统思维和全局思维出发,全方位、全地域、全过程加强生态文明建设,改善我国生态保护与修复工作中存在的修复要素单一、解决问题分散、系统空间割裂等突出问题,有利于推进生态文明建设和国土空间治理能力的现代化^[1]。2016年以来,中国在“三区四带”重要生态屏障区域分批布局了52个山水林田湖草沙一体化保护与修复工程,提升了国家重点区域重要生态系统的多样性、稳定性和持续性。然而,在山水工程实施过程中,表现出了对生态系统空间结构和功能认识不足、工程化思维影响大等缺点^[2],亟需通过“基于自然”的手段进行修复目标的协调和修复路径的创新,建立科学完善的全域空间治理体系。

世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)定义基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)为在可持续发展理念指导下,发挥自然生态系统自我修复功能应对各类社会问题与挑战,保护生物多样性并提升人类福祉的解决方案^[3]。IUCN根据“基于自然”的核心理念提出了八大准则及28项指标,与我国山水林田湖草沙生命共同体理念高度契合,为应对多重目标的复杂生态系统治理提供了有效途径^[4]。目前,中国在NbS与生态文明建设的结合方面已做出初步探索,部分学者系统阐述了NbS理论内涵,并分析总结了其对我国生态保护修复工作的启示意义^[5-7]。刘文平等探索长江经济带流域的自然解决方案^[8],朱正杰等基于NbS开展滨湿海地修复^[9],闫玉玉等进行郊野公园的基于自然的修复^[10],但直接应用NbS理念进行流域尺度山水林田湖草沙一体化保护和系统治理的实践研究较少。多数研究未形成科学系统的修复策略制定框架,要素间相互作用关系与空间分布格局的分析较为欠缺。

生态安全格局整合生态系统的多功能性并将各生态要素抽象成“源地-廊道-节点”构成的网络模式,是平衡社会经济发展和生态保护修复的有效方法^[11]。景观生态风险评价反映风险空间分布规律,是景观结构和生态过程相互作用的结果,为生态系统要素配置和景观格局优化提供指导^[12]。引入景观生态风险评价基础上的生态安全格局为流域基于自然的生态修复提供要素整合和空间分析依据^[13],能够有效解决山水林田湖草一体化保护和系统治理过程中落实NbS理念时的空间矛盾冲突^[14]。此外,传统的管理方式对于经济、社会

和生态不同尺度间的耦合关系认识不足^[15-17],在生态修复时较少考虑到人类福祉的目标因素,不利于应对多尺度复杂社会挑战。采用“社会-生态”系统的新型管理方式^[18-19],以人类福祉的提升为终极目标,探索优化生态安全格局、实现生态系统可持续发展的 NbS 实践^[20-21]。

皇甫川位于黄河“几”字湾东段,属于陕西省最北端的黄河一级支流,是黄河中游粗泥沙入黄最主要的源头。由于流域内生态修复工程存在治理模式单一、效益追求片面、监督体系缺失等情况,导致地区水土流失等问题并未得到根本解决^[22],亟需更好地结合 NbS 理念进行山水林田坝草一体化保护和系统治理以进一步实现生态与福祉的双赢。因此本文选取皇甫川入黄小流域作为研究区,提出“风险-格局-路径”的 NbS 生态修复框架,考虑在多重尺度的治理目标下如何利用 NbS 将修复工程导向人类福祉,并结合生命共同体理念统筹流域全要素空间,基于生态系统内在机理和规律开展一体化保护和系统治理,实现“社会-生态”高效且可持续的协同发展。

1 研究区及数据来源

1.1 研究区概况

研究区为府谷县内的皇甫川入黄小流域,位于北纬 $39^{\circ}35'7''$ — $39^{\circ}12'44''$,东经 $110^{\circ}51'41''$ — $111^{\circ}12'10''$,为黄土高原沟壑区典型入黄小流域,作为黄河流域粗泥沙的集中区域,是遏制粗泥沙入黄的重要源头(图 1)。研究区域总面积为 419.35km^2 ,包括古城镇、哈镇、清水镇、皇甫镇等四个乡镇。属于温带大陆性季风气候,年均气温 8.6 — 9.6°C ,年均降水量 375 — 410mm ,多集中于每年的 6 — 9 月,地貌沟壑纵横、地形破碎,水土流失问题严重。区域地处农牧交错带,现有土地利用类型以林草地为主,占研究区的 65.22% ,其次耕地、园地面积较大,分别占 18.04% 、 6.12% ,耕地和建设用地主要沿皇甫川川道分布,人类活动强度大,人工植被代替天然植被。区域内矿产资源丰富,东北部有在建矿山古城一号井田和待修复的废弃矿山。自皇甫川 1983 年被列为国家治理重点支流以来,区域内实施淤地坝建设、退耕还林还草等水土保持措施,水土流失治理取得一定成

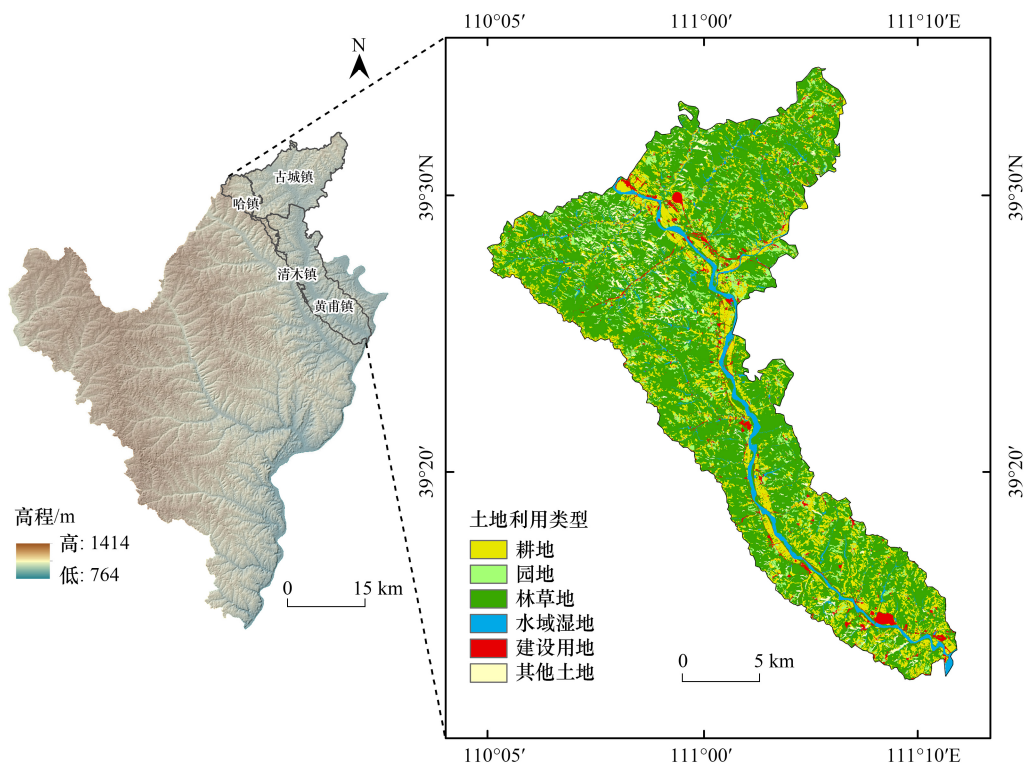


图 1 研究区位置及土地利用

Fig.1 Location and land use in the study area

效,但区域内仍存在地表景观破碎化、生物多样性程度低、生态环境脆弱等问题,同时已有生态治理工程如淤地坝也存在老化问题,降低水土保持成效,有待开展流域系统治理。

1.2 数据来源及预处理

本研究数据主要包括(1)从国家地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)获取 ASTER GDEM 30m 分辨率的府谷县数字高程数据,通过 ArcGIS10.7 裁剪和坡度分析工具进一步得到研究区高程和坡度数据。(2)从国家地理空间数据云获取 2020 年 Landsat8 OLI-TIRS 卫星数字遥感影像,分辨率 30m,利用 ENVI5.3 和 ArcGIS10.7 对影像进行校正、配准和裁剪,采用监督分类方法提取耕地、园地、林草地、水域湿地、建设用地和其他土地 6 种土地利用类型,并利用目视解译、外业检核的方式修正。(3)从国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn>)获取研究区周边气象站点 2020 年地面气候资料日值数据,插值分析生成年平均气温、降水量 30m 分辨率数据。

2 研究方法

本研究以山水林田湖草沙生命共同体和 NbS 理念为指导,提出“风险-格局-路径”的生态修复框架,实现全要素耦合的皇甫川入黄小流域山水林田坝草一体化保护和系统治理,并完善“社会-生态”系统多尺度效益评估体系。技术路线如图 2 所示。

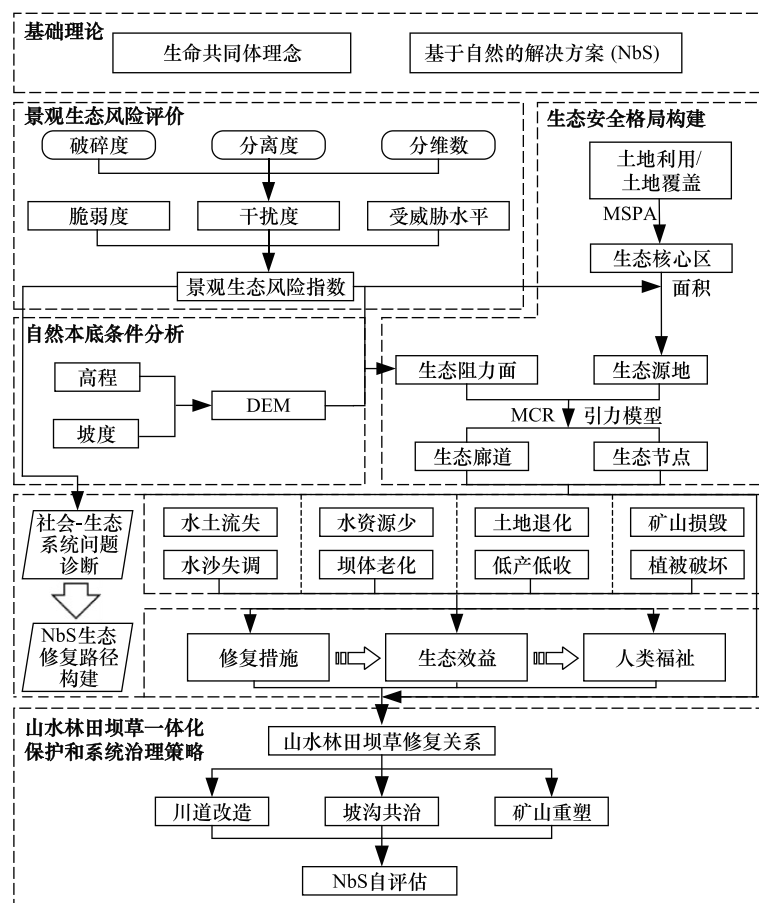


图 2 技术路线图

Fig.2 Technology roadmap

2.1 景观生态风险评价

生态风险评估能够有效反映区域景观尺度风险的时空分异和整体生态可持续性。研究开展景观生态风

险评估用于诊断流域“社会-生态”系统问题^[23-24],并服务于生态阻力面构建。为有效描绘景观生态风险的空间变化,基于研究区平均斑块面积划分 400m×400m 的风险小区采样方格^[25-26],共计 2874 个。利用 Fragstats 软件构建景观损失度指数(R_i)^[27]:

$$R_i = E_i \times V_i \tag{1}$$

式中: R_i 为损失度指数, E_i 为干扰度指数, V_i 为脆弱度指数。

景观脆弱度取决于其所处的景观自然演替阶段,结合参考文献^[28]和专家打分法进行景观脆弱度分级赋值并经过归一化处理参与计算(表 1)。

表 1 景观脆弱度赋值及归一化

Table 1 Landscape types vulnerability assignment and normalization

景观类型 Landscape type	脆弱度分级 Vulnerability classification	归一化值 Normalized value	景观类型 Landscape type	脆弱度分级 Vulnerability classification	归一化值 Normalized value
建设用地 Construction land	1	0.05	耕地 Arable land	4	0.19
林草地 Forest and grass land	2	0.10	水域湿地 Water and wet land	5	0.24
园地 Orchard land	3	0.14	其他土地 Other land	6	0.28

景观干扰度衡量生态系统受外部干扰的程度大小,通过景观破碎度、分离度和分维数加权计算(表 2)^[29-30]。

表 2 景观干扰度相关指数及公式

Table 2 Landscape pattern index and its formula

指数名称 Name of index	计算公式 Formula	参数意义 Parameter meaning
景观破碎度 Landscape fragmentation	$C_i = \frac{n_i}{A_i}$	A_i 为景观类型 i 面积, n_i 为景观 i 斑块数量
景观分离度 Landscape isolation	$N_i = \frac{A}{2A_i} \sqrt{\frac{n_i}{A_i}}$	A_i 为景观类型 i 面积, A 为景观总面积, n_i 为景观 i 斑块数
景观分维数 Landscape fractal dimension	$F_i = 2\ln(p_i/4) / \ln A_i$	p_i 为景观类型 i 周长
景观干扰度 Landscape disturbance	$E_i = aC_i + bN_i + cF_i$	a, b, c 为各指数权重,根据相关研究 ^[31] 并结合实际情况,分别赋权 0.5、0.3、0.2

C :景观破碎度 Landscape fragmentation; N :景观分离度 Landscape isolation; F :景观分维数 Landscape fractal dimension; E :景观干扰度 Landscape disturbance

在建立景观损失度指数的基础上,利用景观受威胁水平^[28],获得景观生态风险指数(Ecological Risk Index,ERI):

$$ERI_i = \sum_{k=1}^n \frac{A_{ki}}{A_i} (0.5R_i + 0.5S_i) \tag{2}$$

式中: ERI_i 代表风险小区 i 的景观生态风险指数, R_i 为损失度, A_{ki} 是第 k 个小区中景观 i 面积, A_i 为第 k 个小区面积, n 是景观类型, S_i 表示受威胁水平,与生态系统面临灾害等挑战时可能造成的损失成正比。依据参考文献^[28]和专家打分法进行景观类型的受威胁水平分级赋值和归一化计算(表 3)。

2.2 景观生态安全格局

2.2.1 生态源地识别与筛选

形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)利用数学形态学原理,基于空间形态和连通性识别具有各类生态意义的斑块^[32]。本文在 ArcGIS 中将前景数据即林草地、水域湿地赋值 2,将背景数据即其他景观、缺失数据 Nodata 分别赋值 1 和 0^[32]。运用 GuidosToolbox 八邻域法提取核心区、桥接区、孔隙、边缘区、孤岛斑块、支线、环道区 7 大类景观斑块。选取具有重要生态意义的核心区作为潜在生态源地。

综合考虑斑块面积和生态风险指数,筛选对景观连通性有重要作用的低风险斑块作为生态源地^[32]。

表 3 景观受威胁水平赋值及归一化

Table 3 Landscape types risk resistance levels assignment and normalization

景观类型 Landscape type	受威胁 水平分级 Risk resistance level	归一化受 威胁水平值 Normalized value of risk resistance level	景观类型 Landscape type	受威胁 水平分级 Risk resistance level	归一化受 威胁水平值 Normalized value of risk resistance level
林草地 Forest and grass land	1	0.05	耕地 Arable land	4	0.19
水域湿地 Water and wet land	2	0.10	其他土地 Other land	5	0.24
园地 Orchard land	3	0.14	建设用地 Construction land	6	0.28

2.2.2 生态阻力面设置

生态阻力是生态系统中物质、能量、信息等流通传输所遇到的阻碍大小,通常由多种因素复合而成^[33]。研究选择高程、坡度、ERI 生态阻力因子(图 3),参考相关研究^[33]并结合研究区特点,对因子分级赋值、设定权重(表 4),加权生成生态阻力面(图 3)。

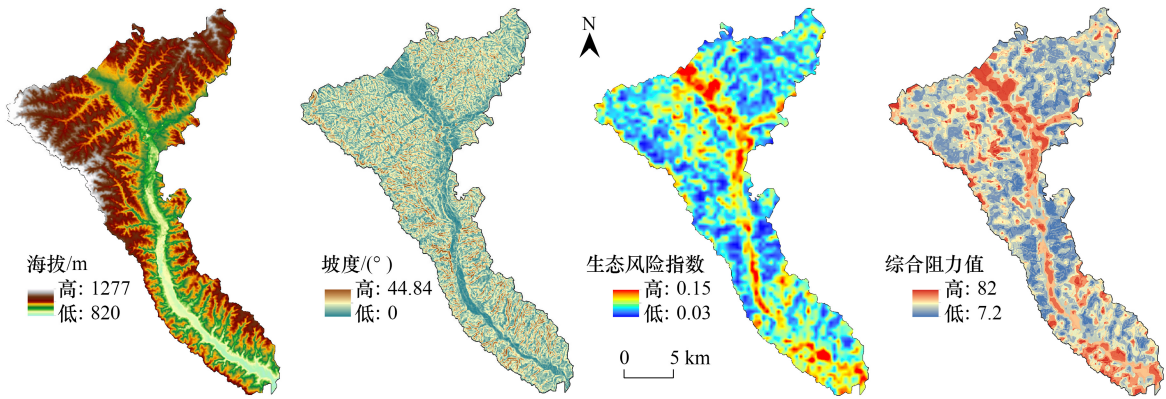


图 3 研究区各阻力层和生态阻力面

Fig.3 Resistance layers and ecological resistance surface of the study area

表 4 研究区阻力因子体系

Table 4 Resistance factor system of study area

阻力因子 Resistance factor	分级范围 Grading range	阻力值 Resistance value	权重 Weight	阻力因子 Resistance factor	分级范围 Grading range	阻力值 Resistance value	权重 Weight
海拔 Altitude	< 900m	5	0.2	生态风险指数 ERI	[25°, 35°)	80	0.6
	[900m, 1000m)	30			>= 35°	100	
	[1000m, 1100m)	60			[0.03, 0.05)	10	
	[1100m, 1200m)	80			[0.05, 0.06)	30	
	>= 1200m	100			[0.06, 0.07)	50	
坡度 Slope	< 5°	1	0.2		[0.07, 0.09)	80	
	[5°, 15°)	10			[0.09, 0.15)	100	
	[15°, 25°)	50					

ERI:生态风险指数 Ecological risk index

2.2.3 生态廊道和节点的构建

生态廊道在空间上表现为阻力面上连接两个源地斑块的最小阻力通道^[33]。最小累积阻力模型

(Minimum Cumulative Resistance, MCR)综合源地、距离和景观表面特征,在生态阻力面基础上模拟生成源地间的最小成本路径,从而确定潜在生态廊道^[34]。公式如下:

$$MCR = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \tag{3}$$

式中:MCR 代表源地间的最小累积阻力值, D_{ij} 为生物从源 j 到某点穿过景观 i 距离, R_i 为景观 i 对生物运动的阻力值, f 代表阻力与生态过程呈正相关,min 表示取累积阻力最小值。

引力模型将源地相互作用的强度量化,用于评价潜在生态廊道的相对重要性^[35]。计算公式如下:

$$F = G_{ij} = \frac{N_i N_j}{D_{ij}^2} = \frac{\frac{\ln a_i \ln a_j}{P_i P_j}}{\left(\frac{L_{ij}}{L_{\max}}\right)^2} = \frac{L_{\max}^2 \ln a_i \ln a_j}{L_{ij}^2 P_i P_j} \tag{4}$$

式中: F 为引力值, G_{ij} 是源 i j 间作用力, N_i 、 N_j 是源 i j 权重, D_{ij} 是两源地间潜在廊道阻力, a_i 、 a_j 是两源地面积, P_i 、 P_j 是两源地阻力值, L_{ij} 是两源地间廊道累积阻力, $L_{\max}$ 是最大阻力值。

生态节点指源地斑块间的廊道上对生物迁徙等生态过程起突出作用的关键位置。在 ArcGIS 中通过水文分析工具识别阻力面脊线并与生态廊道相交,提取生态节点^[34]。将靠近廊道交界的生态流汇集处的节点确定为重要生态节点,独立于生态廊道单线即生态功能薄弱的节点作为脆弱生态节点^[36]。生态节点的保护和建设能够完善生态网络结构,加速物质能量流动,对生态系统功能稳定有战略性意义^[35]。

2.3 基于 NbS 的生态修复路径

NbS 通过模仿自然过程,提供社会、环境和经济利益,应对多样化社会挑战^[37],具有恢复、维持和再生生态系统的潜力,并最终提高居民幸福水平^[38]。在生态安全格局基础上,顺应全要素生态系统的整体、弹性、动态等特性和内部机理,将 NbS 理念结合当地“社会-生态”系统问题,厘清“生态修复措施实施-生态效益实现-人类福祉增进”的修复逻辑,构建基于 NbS 的生态修复路径^[8](图 4)。

基于 NbS 生物多样性净增长准则,通过河道湿地整治修复、植被恢复提质增效等措施提升研究区生物多样性和生态服务功能,保障城乡生态安全;基于 NbS 经济可行性、良好包容性治理、适应性管理准则,通过淤地坝和截排水体系建设等措施治理当地水土流失等问题,推进耕地质量提升和保护,实现乡村经济增长;基于 NbS 应对社会挑战、合适尺度设计、目标与效益权衡、主流化与可持续性准则,通过人居环境改造和土地转型利用等措施提高生态系统的稳定性与可持续性,以应对多重社会挑战,最终促进社会关系的增强、健康的保证和生活质量的提高,增进当地民生福祉。

2.4 NbS 自评估

采用《IUCN 基于自然的解决方案全球标准使用指南》,邀请相关专家对本研究提出的皇甫川入黄小流域的山水林田坝草一体化保护和系统治理策略进行 NbS 自评估^[39]。自评估采用红绿灯系统评估 8 条准则下 28 项指标的状态,按项目满足程度自高至低划分四个等级并对应赋值 3、2、1、0 分^[40](表 5)。对各项指标进行标准化后,按照相同的权重进行累加,得到总体匹配程度的总百分数,对应即得所提出策略的 NbS 准则评估等级结果^[41]。

表 5 NbS 自我评估表

Table 5 NbS self-assessment form		
指标匹配度/分 Index matching degree	准则匹配度/% Criterion matching degree	评估等级 Assessment grade
3	75—100	高度匹配
2	50—75	基本匹配
1	25—50	部分匹配
0	0—25	不匹配

3 研究结果

3.1 景观生态风险评价与流域“社会-生态”系统问题诊断

采用自然断点法将皇甫川入黄小流域 ERI 划分为五级,分别为:高[0.09—0.15)、较高[0.07—0.09)、中

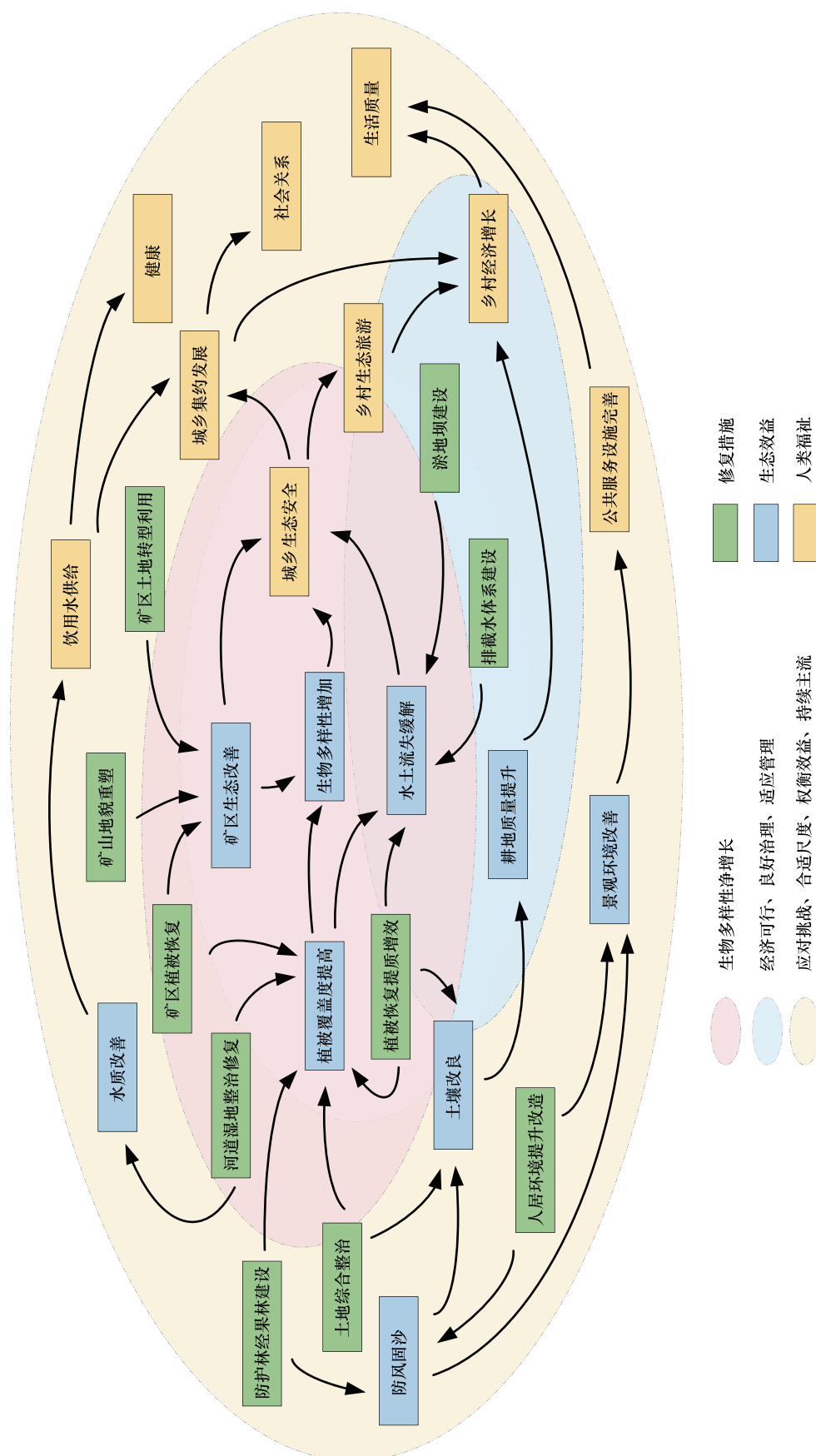


图4 研究区基于自然解决方案的生态修复路径

[0.06—0.07)、较低[0.05—0.06)、低[0.03—0.05),具体空间分布见图5。由景观生态风险空间分布结合实地调查可知,区域总体生态风险空间分异显著,生态系统整体呈现出脆弱化特征。景观生态高与较高风险区面积为89.87km²,占全区面积的21.43%,主要分布于古城镇、黄甫镇内皇甫川河流干流周围,并由干流向外辐射,流域南部也有部分分布。该区域主要用地类型为水域湿地及建设用地、耕地,人为影响强度高,存在土地退化问题,农业生产水平较低;湿地生态平衡被破坏,人工恢复植被结构单一,生物多样性较差,且水资源损耗严重,进一步产生用水冲突的风险;坝区风险较高,坝体出现淤满失效、年久失修等老化问题。另外,两岸坡地散布高与较高风险区,主要由于水土流失问题,水沙关系不协调;另有东北部零星高风险矿区存在矿山遗留及修复不合理等问题。景观生态中风险区域面积107.18km²,占区域总面积的25.56%,主要分布于哈镇和清水镇的园地与林草地过渡地带,城区的快速扩张使其景观生态面临挑战^[42]。景观生态较低与低风险区面积为222.3km²,占比53.01%,主要分布于远离河流的山区地带,景观类型以林草地为主,受人类活动影响小,生态系统稳定性强,为当地提供了大量的生态系统服务价值。

3.2 生态安全格局构建

3.2.1 生态源地的确定

利用 MSPA 分析提取生态核心区 171.1km² 作为潜在生态源地,共 1710 个斑块,占区域总面积的40.80%。叠加生态风险分布筛选生态风险较弱且斑块面积大于 2km² 的生态源地共 18 个(图6),占地面积为 127.77hm²,占区域总面积的 30.47%。以林草地为主,其次为水域湿地。主要分布在古城镇、黄甫镇东部,以及哈镇和清水镇的交界区。这些区域植被覆盖度较高,生态系统服务功能强。

3.2.2 生态廊道的模拟与分级

将筛选出的生态源地中心提取为生态源点,作为源地生态效益集中点用于生态廊道构建。基于 MCR 模型,模拟出研究区潜在生态廊道共 153 条,总长度 293.59km。依据引力模型将引力值大于 80 的划分为一级廊道,在 40—80 之间的划分为二级廊道,20—40 之间的划分为三级廊道,小于 20 的划分为四级廊道(图6)。一级生态廊道共 4 条,总长 9.55km,占比 3.25%,主要分布在流域的东北侧方位,为该流域内的关键性生态廊道。二级和三级生态廊道共 9 条,总长 35.09km,占比 11.97%,主要分布在流域的南部和中部。四级廊道共 140 条,总长 248.95km,占比 84.78%,分布范围广。受流域土地利用类型影响,生态廊道总体表现为绿带型、河流型廊道,其中清水镇内无廊道分布,主要由于该区域景观斑块面积较小,无生态源地作为廊道连接基础,因此生态廊道主要分布在林草地和水域湿地景观面积较大的古城镇和黄甫镇内,且在古城镇和黄甫镇内存在交汇,促进了生态流的顺利流通。

3.2.3 生态节点的提取与分类

研究区共提取 86 个生态节点,主要分布于古城镇、黄甫镇中部和哈镇、清水镇东部。其中靠近廊道交界处的重要生态节点 23 个,独立于生态廊道单线的脆弱生态节点 63 个,均在古城镇内分布数量最多(图6)。脆弱生态节点距离源地较远,处于景观联通的生态薄弱地带,需加强对其的建设和保护,增强其生态链接地

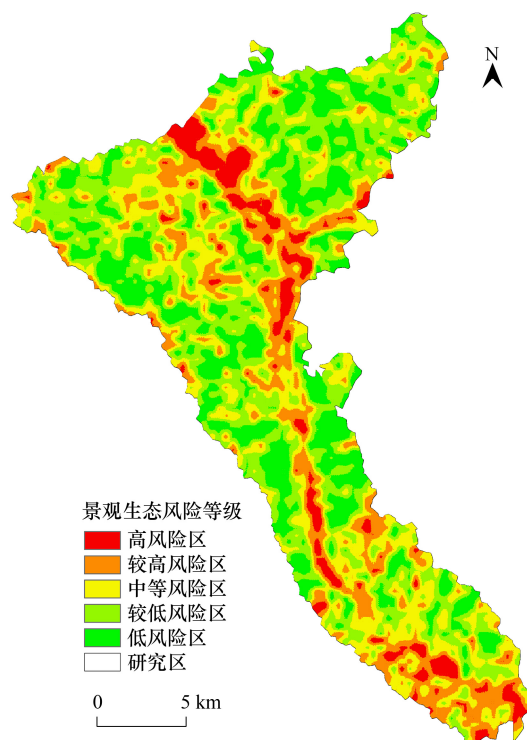


图5 研究区景观生态风险空间分布

Fig.5 Spatial distribution of landscape ecological risks in the study area

位;重要生态节点靠近生态廊道汇集处,可作为生态网络中的“垫脚石”,对实现生态流的正常传输具有重要生态意义。

3.2.4 生态安全格局分析

构建“源地-廊道-节点”点、线、面一体的皇甫川入黄小流域生态安全格局(图6)。该区域生态源地空间上分布均匀,面积最大的源地主要位于区域中部,并自中部往西北部方向延伸;生态廊道整体分布较均匀,生态廊道连通性较好;节点东北部、中部及南部分布较均匀,西北部节点分布较为稀少。

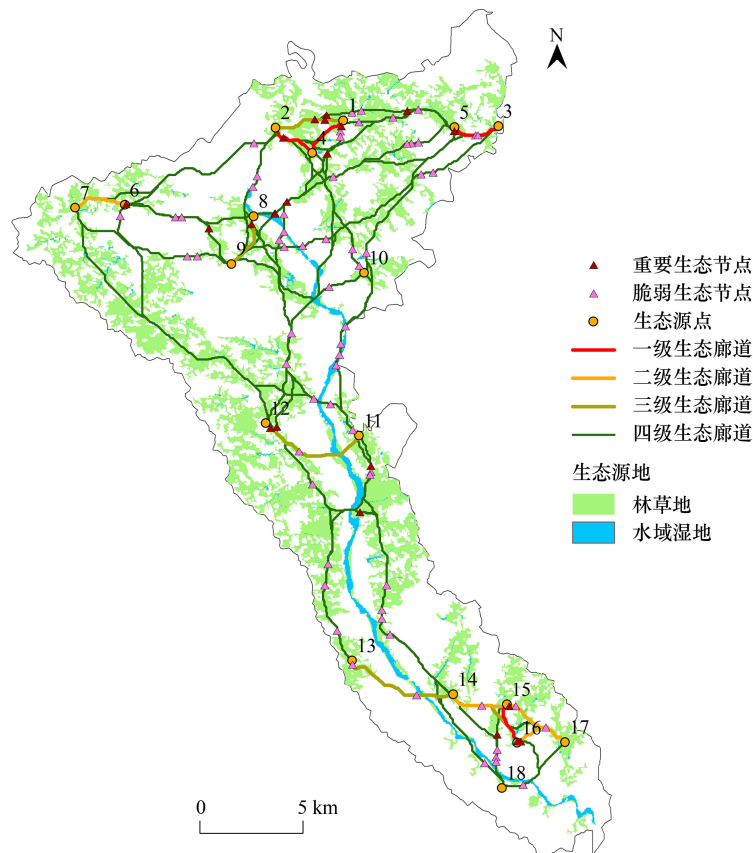


图6 研究区生态安全格局

Fig.6 Ecological security pattern in the study area

3.3 基于 NbS 路径的一体化保护和系统治理策略

皇甫川入黄小流域生态安全格局主要由山、水、林、田、坝、草六大核心要素形成,不同的生态要素具有其相应的生态空间结构与功能。为更好基于生态安全格局落实 NbS 修复路径,在生命共同体理念的指导下,统筹流域“社会-生态”系统全要素,基于各要素自身特性和空间分析结果,锚定“社会-生态”系统问题,参考主导准则,制定相应的生态修复策略,在全流域治理背景中充分满足各要素差异化的生态修复需求。即建立“要素-问题-准则-策略”之间的逻辑联系,为科学提出流域山水林田坝草一体化保护和系统治理策略提供基础。

以山水林田坝草生命共同体为一体化保护和系统治理对象,对应研究区遥感影像和土地利用空间分布图,在 ArcGIS 中确定各要素开展修复的主要区域,进一步与生态安全格局进行叠加分析。由于生态节点能够反映局部脆弱性,各要素覆盖生态节点的数量与要素在修复过程中的重要性成正比,通过节点数量占比获得各要素在修复过程中的占比。在此基础上根据同要素解决不同问题的修复流平均必要性原则,将各要素比例平均分配至其存在的问题,涉及不同要素的复杂问题,进一步将每条准则所主要解决的问题对应占比叠加即

获得准则在修复过程中的指导作用占比,以指导制定修复策略。流向宽度越宽,修复策略的实施对生态环境的修复带来的影响越大。利用 Origin 软件绘制桑基图,实现生命共同体全要素修复流的量化分析与可视化表达(图 7)。

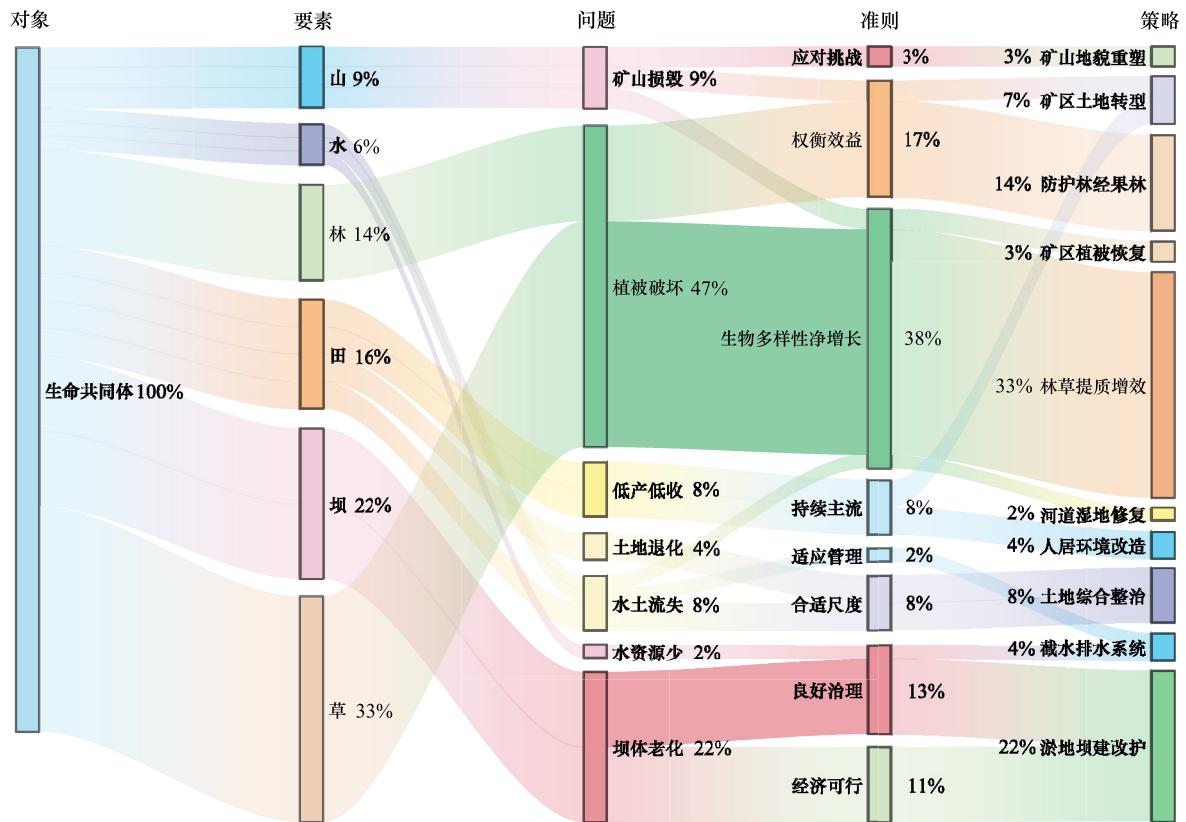


图 7 基于自然解决方案的山水林田坝草修复关系图

Fig.7 Restoration relationship map of mountain-river-forest-farmland-dam-grass based on Nature-based Solutions

按修复重要性排列全要素为草、坝、田、林、山、水,分别占 33%、22%、16%、14%、9%、6%;流域“社会-生态”系统问题比例分配与要素重要性呈正相关,以植被破坏、坝体老化、矿山损毁、水土流失、低产低收等为主,占比分别为 47%、22%、9%、8%、8%;各要素问题治理中以生物多样性净增长、权衡效益、良好治理、经济可行原则主导最多,总和达 79%;对应制定修复策略,其中林草提质增效和淤地坝建改护占比之和超一半,另外防护林经果林、土地综合整治、矿区土地转型等策略也对研究区修复具有较大影响。

依据流域基于 NbS 的生态修复路径和山水林田坝草修复关系,结合区域生态安全格局空间结构,本研究提出统筹落位“川道改造+坡沟共治+矿山重塑”三位一体的山水林田坝草一体化保护和系统治理策略,并从工程措施、生物措施、管理措施等方面提出具体技术措施(表 6)。重点在生态风险较高的生态节点以及生态廊道交叉处布局小类工程,并对生态源地进行保护保育,产生社会、经济、生态等多尺度效益。具体工程空间布局见图 8。

①川道三生空间提升工程:川道地区生态节点聚集,是生态源地连通的关键。川道附近耕地、建设用地分布多,规划三生空间优化工程。皇甫川作为重要水域生态源地,进行重点水环境治理,通过全面清淤、滩涂植被恢复和生态护岸工程修复改善水域生态廊道连通性。在重要源地开展林地、湿地质量提升和水源涵养等工程,整治改造人居环境,实现整体生态系统功能增强。

②水土流失坡沟共治工程:研究区两侧坡地生态源地多,生态廊道分布均匀,具有较低的生态风险和阻力值,可为物种提供重要栖息地,以保护保育、自然恢复为主,优化源地斑块形状。区内水土流失、石漠化问题显

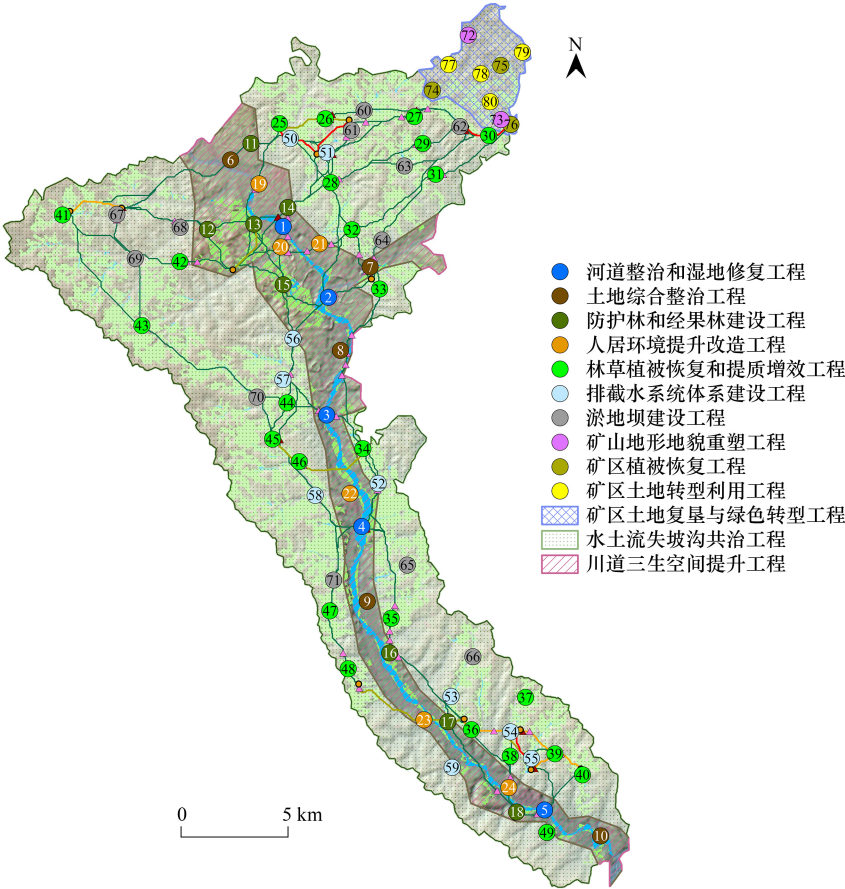


图8 研究区工程布局
Fig.8 Engineering layout of the study area

著,需要按照水土流失空间分布规律,因地制宜,因害设防,坚持生物措施和工程措施并举、沟坡兼治,完善淤地坝系统配置,进行防护林廊道建设和生态节点保护优化,避免破坏生物生态环境。

表6 保护与治理工程项目及具体技术措施

Table 6 Protection and management projects and specific technical measures		
大类工程 Major project	小类工程 Subclass project	技术措施 Technical measure
川道三生空间提升工程 River channel Production-Living-Ecological Spaces enhancement project	河道整治和湿地修复工程(图8序号1—5)	防护:在河道两侧利用格宾石笼网构建生态友好型护岸,实现水、土、生物融合的生态效益; 清淤:对河床淤泥、生活垃圾等进行清理,改善河道和湿地环境; 植被重建:在河堤内侧栽植杨树、柳树,在河流内湾滩涂区域栽植芦苇、睡莲等,净化水质; 宣教:在河岸设置保护湿地、保护环境等公告牌、宣传牌
	土地综合整治工程(6—10)	整理:按照“大弯就势、小弯取直”原则将零碎坡地整理成集中连片的高标准农田,通过表土剥离及回填、石质田坎田埂构筑、土壤改良及翻耕,增强田块保水保肥能力; 配套:完善相关配套设施,利用遥感监测等现代化农艺技术促进生产高效、精细、绿色; 防护:在田坎上扦插紫穗槐,农田周边设置油松防护林,提高农田生态系统稳定性
	防护林和经果林建设工程(11—18)	防护:在道路两侧栽植油松和杨树等乡土乔木,既防风固沙、涵养水源,又创造景观效果; 经果:在缓坡园地补植浅山经果林,选择山杏、鲜食梨等树种适地适种,林下套种矮棵作物,将土地资源优势转化为经济发展优势

续表

大类工程 Major project	小类工程 Subclass project	技术措施 Technical measure
水土流失坡沟共治工程 Slope and gully management project for soil erosion	人居环境提升改造工程(19—24)	清废:生活污水垃圾处理设施布局优化,推进垃圾污水减量、无害、低碳化处理和资源循环利用; 绿化:选择格桑花、国槐等乡土植物,进行土壤栽植绿化和生态树池种植,提高公园绿地等绿色开敞空间可达性,促进自然与人文环境耦合的舒适宜居; 配套:完善村庄配套基础设施和公共服务设施,推进水网、电网、路网、绿网、信息网全网络建设; 产业:因地制宜发展特色产业,以产业生态化和生态产业化推进乡村振兴,实现生产-生活-生态协同发展
	林草植被恢复和提质增效工程(25—49)	育土:清理边坡区域风化松动岩土体,利用增肥剂和保水剂改良土壤,为边坡土壤生物修复技术实施创造条件; 截水:修建鱼鳞坑,坑内蓄水,并种植油松、侧柏等乔木或沙棘等灌木,构筑生态坡岸,达到拦截地表径流、减轻水土流失、保水保土保肥的目的; 复绿:局部不适合栽植的边坡采用喷播草籽的方式复绿,提高区域植被覆盖度和生态环境韧性
	排截水系统体系建设工程(50—59)	固沟:在沟道的沟口处修建生态谷坊,就地取材砒砂岩风化物修筑,防止沟床下切冲刷,减少沟道水土流失; 护坡:在谷坊的坡面加固浆砌块石护坡,以增加抗冲刷能力,延长使用寿命; 排洪:依托天然水系修建排洪渠,下沉式绿地延伸到外侧,结合湿塘设计,打造防洪、生态、亲水效果
	淤地坝建设工程(60—71)	增建:遵循“小型居多、小多成群、大中小配合”规律,因地制宜、自上而下,全面布置淤地坝,通过其“拦”“蓄”“淤”的功能,缓解水土流失和干旱缺水问题,同时淤地造田,提高粮食产量; 维护:对病险淤地坝和老旧淤地坝分别进行加固和改造,完善监测体系,落实管护责任,提高养护水平,上下游、干支流坝群治理统筹推进
矿区土地复垦与绿色转型工程 Mining land reclamation and green transformation project	矿山地形地貌重塑工程(72—73)	塑坡:定制边坡削坡、加固和护坡工程措施等,依山就势开展已破坏地形地貌的重塑; 整理:清理矿区被毁损土地固体废弃物,进行土地平整,为土壤重构提供基础; 调水:建设生态型辅助配套截排水工程,其中地表排水工程包括在滑坡、泥石流区设置生态截水沟,以及在边坡坡面和坡脚处设置排水系统,对有地下水渗出的边坡设置地下水排水系统 ^[43]
	矿区植被恢复工程(74—76)	育土:采用“植被-微生物”联合修复技术,借助微生物新陈代谢作用削弱土壤有害元素活性,修复土壤养分,提高持水保肥能力; 植被恢复:采用生态植被袋、生态植被毯、三维网格边坡植被恢复综合技术进行植被立体化配置,加快矿区生态系统结构和功能的修复
	矿区土地转型利用工程(77—80)	转型:将采矿损毁的土地复垦为农用地、建设用地开展生产建设活动,或通过景观再造发展旅游产业,盘活工矿废弃地利用,推动矿山治理与经济转型和社会发展相衔接

③矿区土地复垦与绿色转型工程:矿区分布于研究区东北部,生态源地破碎,生态廊道缺乏,且具有较高生态风险水平,作为生态脆弱区需要重点修复。以自然修复与人工辅助再生相结合的手段,通过地貌、土壤、植被、景观的多层重建^[4],构建与周边环境相协调的矿区生态系统。

基于 NbS 理念所提倡的适应性管理准则,利用遥感、大数据等技术对流域全要素生态系统服务功能进行定期监测和评估,保证项目可持续性的修复效果,实现山水林田坝草修复工程全生命周期管理。

3.4 NbS 生态修复策略评价

专家 NbS 自评估结果(图 9)显示准则评分总分为:86.04%,即本皇甫川入黄小流域山水林田坝草一体化保护和系统治理策略与 NbS 八大准则的总体匹配程度远超 75%,达到高度匹配水平。相应地,28 项指标以高度匹配为主,占 17 项,基本匹配指标 12 项,部分匹配指标 1 项,无不匹配指标。结果符合 IUCN 认定的 NbS 全球标准,是 NbS 在流域一体化保护和系统治理中的有益实践。

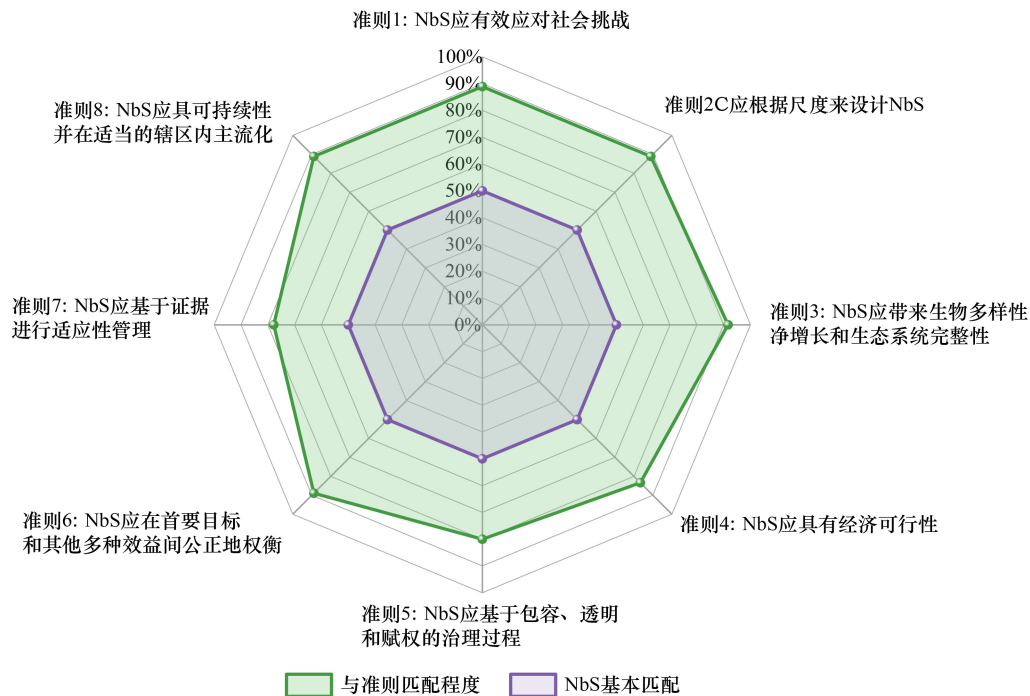


图9 山水林田坝草一体化保护和系统治理项目自评估

Fig.9 Self-assessment of the integrated conservation and systematic management project of mountain-river-forest-farmland-dam-grass

4 讨论

4.1 景观生态风险评价基础上的生态安全格局分析

景观生态风险评价能够反映景观结构对于生态安全的影响,有效指导生态安全格局构建^[12]。但是目前大部分相关研究以行政单元^[44-45]作为研究对象,针对自然小流域尺度开展的研究尚属空白。因此,本研究以皇甫川入黄小流域为研究对象,提出了“风险-格局-路径”的生态修复框架,利用景观生态风险空间分布指导格局优化,为小流域生态安全维护、系统问题治理提供了决策依据。此外,在“源地-廊道-节点”生态安全格局构建过程中运用 MSPA 提取生态源地,利用 MCR 和引力模型进行廊道节点的分级构建,使生态安全格局科学完整,为修复路径落位提供重要依据,改善了其他研究普遍存在的理论修复策略与实地景观格局难以匹配的情况^[46]。

4.2 NbS 生态修复路径与山水林田坝草修复流构建

相较于以往生态修复研究存在问题治理片面、未耦合“社会-生态”系统等局限^[47],本研究基于社会生态学理论^[48]和千年生态系统评估(Millennium ecosystem assessment, MA)报告,构建链接修复措施、生态效益、人类福祉的 NbS 修复路径,充分体现了山水林田湖草沙一体化保护和系统治理的“社会-生态”转型。充分阐述 NbS 八大准则与生态修复开展的结合方式,通过基于自然的方法为皇甫川入黄小流域提供生态服务功能提升、生物多样性增加、风沙危害和水土流失有效缓解等生态效益,促进乡村经济增长、社会关系改善、生活质量提高等一系列人类福祉的实现,进一步明晰 NbS 理念对生态修复策略的具体指导方法^[49],探索了流域“社会-生态”系统治理实现人地关系协调与可持续发展的新途径^[50]。“要素-问题-准则-策略”逻辑关系的分析和全要素修复流的量化,充分体现了山水林田湖草沙一体化保护和系统治理强调的生命共同体理念,考虑了山水林田坝草要素间有机的共生互动关系和稳定生态系统的共同作用,弥补了生态保护修复全要素耦合过程显化的研究空白^[51]。利用 NbS 自评估工具验证了 NbS 实现多重修复目标的有效性,完善山水林田湖草沙一体化保护和系统治理体系。

4.3 局限性与展望

后续应加强人为干扰因素对景观格局影响的分析,如在生态阻力评估中适当考虑夜间灯光指数、交通影响指数、已实施修复工程、人工环保投入等因素,为“社会-生态”系统治理提供更科学依据,进一步整合形成自然-人类和谐的生命共同体。同时,NbS 生态修复产生预期效益的潜力未得到量化,未来有必要进一步探索预测 NbS 干预结果的科学方法。可以加入时间序列开展 NbS 修复的多情景空间演化系统模拟,量化监测生态修复对区域发展的外部效应。完善 NbS 指导下山水林田湖草沙一体化保护和系统治理与生态产品价值实现的连接机制,将恢复置于更广泛的社会生态目标下,以期实现更持久、深刻的“社会-生态”系统转型。

5 结论

本研究以黄土高原典型小流域为研究区,基于生命共同体和 NbS 理念,构建了“风险-格局-路径”生态修复框架。研究区景观生态风险空间分异显著,高与较高风险区、中风险区、低与较低风险区分别占全区面积的 21.43%、25.56%、53.01%。皇甫川干流周围及流域南部风险高。通过 MSPA、MCR 和引力模型,识别生态源地 18 个,构建生态廊道 153 条,提取生态节点 86 个。生态源地与廊道分布较均匀,生态节点在流域西北部分布较少。基于 NbS 八项准则构建“修复措施-生态效益-人类福祉”NbS 生态修复路径。结合生态安全格局,定量耦合山水林田坝草六大核心要素修复流,提出“川道改造+坡沟共治+矿山重塑”三位一体的山水林田坝草一体化保护和系统治理策略,布局 3 大类 10 小类共计 80 个修复工程。NbS 自评估总分值 86.04%,即该策略与 NbS 准则高度匹配,是 NbS 在山水林田湖草沙一体化保护和系统治理中的有益实践,为小流域实现“社会-生态”协同的可持续发展积累了经验。

参考文献(References):

- [1] 张杨, 杨洋, 江平, 邓红蒂, 祁帆, 李强, 常献伟, 程鹏. 山水林田湖草生命共同体的科学认知、路径及制度体系保障. 自然资源学报, 2022, 37(11): 3005-3018.
- [2] 杨崇曜, 周妍, 陈妍, 王立威. 基于 NbS 的山水林田湖草生态保护修复实践探索. 地学前缘, 2021, 28(04): 25-34.
- [3] MacKinnon K, Sobrevilla C, Hickey V. Biodiversity, climate change, and adaptation: nature-based solutions from the World Bank portfolio. The World Bank, 2008.
- [4] 白中科. 关于国土空间一体化生态保护修复的若干思考. 中国土地, 2022, (08): 9-12.
- [5] 罗明, 张琰, 张海. 基于自然的解决方案在《山水林田湖草生态保护修复工程指南》中的应用. 中国土地, 2020, (10): 14-17.
- [6] 罗明, 刘世梁, 张琰. 基于自然的解决方案(NbS)优先领域初探. 中国土地, 2021, (02): 4-11.
- [7] 王志芳, 简钰清, 黄志彬, 付宏鹏. 基于自然解决方案的研究视角综述及中国应用启示. 风景园林, 2022, 29(06): 12-19.
- [8] 刘文平, 宋子亮, 李岩, 孔凡婕. 基于自然的解决方案的流域生态修复路径——以长江经济带为例. 风景园林, 2021, 28(12): 23-28.
- [9] 谢先坤, 施震余. 基于自然解决方案的元荡湖湖滨带生态修复. 湿地科学与管理, 2022, 18(04): 56-59.
- [10] 闫玉玉, 刘静. 基于自然的上海郊野公园生态保护修复实践与思考——以青西郊野公园为例. 上海房地, 2022, (01): 58-62.
- [11] Zhang Y L, Zhao Z Y, Fu B J, Ma R M, Yang Y Y, Lü Y H, Wu X. Identifying ecological security patterns based on the supply, demand and sensitivity of ecosystem service: a case study in the Yellow River Basin, China. Journal of Environmental Management, 2022, 315: 115158.
- [12] Zhao Y, Kasimu A, Liang H, Reheman R. Construction and restoration of landscape ecological network in urumqi city based on landscape ecological risk assessment. Sustainability, 2022, 14(13): 8154.
- [13] Xu L, You H, Li D, Yu K. Urban green spaces, their spatial pattern, and ecosystem service value: The case of Beijing. Habitat International, 2016, 56: 84-95.
- [14] 文晨, 钱雅萱, 吴承程, 邱悦. 空间分析方法在基于自然的解决方案中的应用——研究进展综述. 南方建筑, 2023, (06): 86-95.
- [15] Man Y, Liu K, Xie T, Zhou F W, Shi W, Liu Z Z, Wang Q, Cui B S. A multilevel social-ecological network approach for reconciling coast-saltmarsh conservation and development. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118647.
- [16] Ofori S A, Asante F, Boateng T A, Dahdouh-Guebas F. The composition, distribution, and socio-economic dimensions of Ghana's mangrove ecosystems. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118622.
- [17] Mikkelsen N, Planque B, Arneberg P, Skern-Mauritzen M, Hansen C, Fauchald P, Holsman K K, Haynie A C, Ottersen G. Multiple stakeholders' perspectives of marine social ecological systems, a case study on the Barents Sea. Ocean & Coastal Management, 2023, 242: 106724.
- [18] Yin J B, Wang D Y, Li H. Spatial optimization of rural settlements in ecologically fragile regions: insights from a social-ecological system. Habitat International, 2023, 138: 102854.
- [19] Weng C Y, Bai Y P, Chen B H, Hu Y C, Shu J Y, Chen Q, Wang P. Assessing the vulnerability to climate change of a semi-arid pastoral social-ecological system: a case study in Hulunbuir, China. Ecological Informatics, 2023, 76: 102139.
- [20] 刘畅, 渠鸿娇, 郭涿. “山水林田湖草沙生命共同体理念”下社会-生态系统时空耦合及模拟预测. 生态学报, 2024, 44(07): 2745-2760.

- [21] 罗明, 刘世梁, 高岩, 孙雨芹, 杨崇曜, 张琰, 胡俊涛. 基于自然的解决方案(NbS)理念在北方防沙带生态屏障建设中的应用. 生态学报, 2024, 44(08): 3121-3131.
- [22] 傅伯杰, 刘彦随, 曹智, 王壮壮, 武旭同. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议. 中国科学院院刊, 2023, 38(08): 1110-1117.
- [23] Shu H J, Fan S X, Jiang Y D, Wang L Q, Li J W, Yu Z R, Liu Y H. Landscape Ecological Risk Assessment and Ecological Restoration Zoning of Cultivated Land in Inner Mongolia, China. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(04): 895-906.
- [24] Li H C, Yuan M. Ecological Risk Identification and Ecological Security Pattern Construction of Productive Wetland Landscape. Water Resources Management, 2023, 37(12): 4709-4731.
- [25] Kang L, Yang X, Gao X, Zhang J, Zhou J, Hu Y, Chi H. Landscape ecological risk evaluation and prediction under a wetland conservation scenario in the Sanjiang Plain based on land use/cover change. Ecological Indicators, 2024, 162: 112053.
- [26] 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.
- [27] Ju H R, Niu C Y, Zhang S R, Jiang W, Zhang Z H, Zhang X L, Yang Z Y, Cui Y R. Spatiotemporal patterns and modifiable areal unit problems of the landscape ecological risk in coastal areas: a case study of the Shandong Peninsula, China. Journal of Cleaner Production, 2021, 310: 127522.
- [28] 李少玲, 谢苗苗, 李汉廷, 王回茴, 许萌, 周伟. 资源型城市景观生态风险的时空分异:以乌海市为例. 地学前缘, 2021, 28(04): 100-109.
- [29] Zhou S Y, Chang J, Hu T H, Luo P J, Zhou H X. Spatiotemporal variations of land use and landscape ecological risk in a Resource-Based City, from rapid development to recession. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29(1): 475-490.
- [30] Gao B P, Li C, Wu Y M, Zheng K J, Wu Y. Landscape ecological risk assessment and influencing factors in ecological conservation area in Sichuan-Yunnan provinces, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1603-1613.
- [31] 张师赫, 李宝银, 林玉英, 钟全林, 程栋梁, 徐朝斌, 常云妮. 基于生态系统服务的景观生态风险评价及其驱动因素研究——以福建省为例. 水土保持研究, 2022, 29(06): 174-182.
- [32] 陈竹安, 马彬彬, 危小建, 曾令权, 姜晓桦. 基于 MSPA 和 MCR 模型的南昌市生态网络构建与优化. 水土保持通报, 2021, 41(6): 139-147.
- [33] 于颖, 孟京辉, 宋增明, 徐露. 基于 MCR 模型和景观连通性的县域生态网络构建. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 226-234.
- [34] 孙宝娣, 钟城豪, 崔东旭, 韩青, 唐敬超, 陈亚男. 区域协同视角下黄河流域生态安全格局构建研究. 生态学报, 2024, (11): 1-13.
- [35] 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.
- [36] 赵玉攀, 于欢, 雷光斌, 李爱农, 边金虎, 南希. 基于生态风险评估的渭河流域生态网络识别. 遥感技术与应用, 2023, 38(01): 116-128.
- [37] Cohen-Shacham E, Walters G, Janzen C, Maginnis S. Nature-based solutions to address global societal challenges. IUCN: Gland, Switzerland, 2016, 97: 2016-2036.
- [38] Fan H, Zhao C W. Coupling Coordination Relationship between Ecological Human Settlements and the Happiness Levels of Residents in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. Journal of Resources and Ecology, 2024, 15(5): 1-12.
- [39] IUCN. Guidance for using the IUCN Global Standard for Nature-based Solutions. Gland: IUCN, 2020.
- [40] 罗明, 杨崇曜, 周妍. NbS 自评估工具在国土空间生态保护修复中的应用路径. 中国土地, 2021, (11): 4-8.
- [41] 罗明, 拉斐尔·格莱梅特, 张琰. 人与自然和谐共生的厦门实践——基于自然的解决方案最佳案例. 中国土地, 2024, (02): 27-31.
- [42] 陈美景, 王庆日, 白中科, 谢立军, 张冰松, 郝森. 黄河流域资源型城市土地利用转型及其对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2023, 43(22): 9459-9470.
- [43] 陈倩. 黄河流域历史遗留矿山生态环境修复模式研究. 资源节约与环保, 2023, (03): 45-48.
- [44] 杜佳衡, 王影雪, 潘悦, 王锦. 高原河谷县域景观生态风险评价与生态安全格局构建:以云南省大理州永平县为例. 生态学杂志, 2024, 43(5): 1509-1520.
- [45] 于婧, 汤昇, 陈艳红, 张蕾, 聂艳, 邓文胜. 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. 生态学报, 2022, 42(4): 1290-1299.
- [46] 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.
- [47] 辛顺杰, 连华, 梁浩东, 肖凯文, 李若飏. 基于“山水林田湖草沙”生命共同体理念的生态问题识别与修复策略——以甘南洮河流域为例. 草业科学, 2022, 39(06): 1256-1268.
- [48] Tedesco AM, López-Cubillos S, Chazdon R, Rhodes JR, Archibald CL, Pérez-Hammerle KV, Brancalion PHS, Wilson KA, Oliveira M, Correa DF, Ota L, Morrison TH, Possingham HP, Mills M, Santos FC, Dean AJ. Beyond ecology: ecosystem restoration as a process for social-ecological transformation. Trends in ecology & evolution, 2023, 38(7): 643-653.
- [49] 康瀛月, 李妹洋, 李洪远. NbS 在海岸带蓝碳生态系统修复中的案例研究. 景观设计, 2021, (04): 10-15.
- [50] 傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 程昌秀, 李琰, 冯晓明, 刘焱序. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控. 中国科学基金, 2021, 35(04): 504-509.
- [51] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 刘焱序, 刘前媛, 李冰. 过程耦合与空间集成:国土空间生态修复的景观生态学认知. 自然资源学报, 2020, 35(01): 3-13.