

DOI: 10.12401/j.nwg.2023089

榆林黄河中游粗泥沙区生态问题与生态格局构建

刘颖¹, 张茂省^{1,2,*}, 冯立¹, 张鹏飞³, 王耀³, 李良娜⁴, 王尧⁵, 郭迟辉¹

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 712000; 2. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710119;
3. 榆林市自然资源和规划局, 陕西 榆林 719000; 4. 陕西自然资源勘测规划设计院有限公司,
陕西 西安 710076; 5. 自然资源部国土整治中心, 北京 100000)

摘要: 黄河中游粗泥沙是黄河下游地上悬河形成的最重要组成物质, 从源头遏制粗泥沙入黄是保障黄河长久安澜的根本之策。笔者采用从大尺度向小尺度梯度分析、生态问题识别诊断与综合评判等方法, 确定了陕西省榆林市北部 7 个黄河一级支流区为粗泥沙主要来源区, 并在识别出粗泥沙主要来源区生态问题及其之间关联性、紧迫度、优先度的基础上, 提出了榆林黄河中游粗泥沙区生态保护修复的系统性对策。即围绕 2 个核心目标、3 个关键问题, 将研究区划分为 10 个保护修复单元, 提出布局 7 类工程和 29 个子项目, 构建“1 廊 2 带 3 区 多点”的人与自然和谐共生的生态安全格局, 从而达到提升粗泥沙集中来源区生态系统稳定性和韧性, 实现从源头遏制粗泥沙入黄, 缓解拦沙坝、水库和“地上悬河”泥沙淤积压力的目标。研究成果对于保障中国北方生态安全和能源资源安全等具有极为重要的意义。

关键词: 黄河流域; 粗泥沙区; 生态问题; 生态修复; 保护修复对策

中图分类号: P69; F205

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0058-12

Ecological Problems, Systematically Protection and Restoration Strategies of Yulin Coarse Sand Area in the Middle Yellow River

LIU Hao¹, ZHANG Maosheng^{1,2,*}, FENG Li¹, ZHANG Pengfei³, WANG Yao³, LI Liangna⁴, WANG Yao⁵, GUO Chihui¹

(1. School of Human Settlement Environment and Architecture Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 712000, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Loess Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Yulin Bureau of Natural Resources and Planning, Yulin 719000, Shaanxi, China; 4. Shaanxi Natural Resources Survey, Planning and Design Institute Co., LTD, Xi'an 710076, Shaanxi, China; 5. Land Management Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100000, China)

Abstract: Coarse sediment in the middle reaches of the Yellow River is the most important component of the formation of suspended rivers in the lower reaches of the Yellow River. Preventing coarse sediment from entering the Yellow River from the source is a fundamental measure to ensure the long-term stability of the Yellow River. Using methods such as gradient analysis from large scale to small scale, ecological problem identification, diagnosis, and comprehensive evaluation, this paper identifies seven primary tributaries of the Yellow River in the north of Yulin City, Shaanxi Province as the main source areas of coarse sediment. Based on identifying the ecological problems in the main source areas of coarse sediment and their correlation, urgency, and priority, it

收稿日期: 2023-01-29; 修回日期: 2023-05-01; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFC1504700), 国家自然科学基金重点项目(41641011), 国家自然科学基金委项目(42107209)联合资助。

作者简介: 刘颖(1991-), 女, 博士研究生, 从事生态保护修复及环境承载力研究。E-mail: cherry_566@outlook.com。

* 通讯作者: 张茂省(1962-), 男, 博士, 教授, 长期从事地质调查、灾害防治与生态修复研究工作。E-mail: xjtzms@xjtu.edu.cn。

proposes systematic countermeasures for ecological protection and restoration of the coarse sediment areas in the middle reaches of the Yellow River in Yulin. That is, around two core objectives and three key issues, the research area is divided into 10 protection and restoration units, and it is recommended to arrange 7 types of projects and 29 subprojects, so as to build an ecological security pattern of "one corridor, two belts, and three areas with multiple points" in which people and nature coexist harmoniously, ultimately improving the stability and resilience of the ecosystem in the source area of coarse sediment concentration, achieving the goal of controlling the inflow of coarse sediment into the Yellow River from the source, and alleviating the impact of sand barriers. The target of sediment deposition pressure in reservoirs and "suspended rivers"; At the same time, this study has extremely important significance for ensuring ecological security and energy resource security in northern China.

Keywords: Yellow River Basin; coarse sand area; ecological problems; ecological restoration; protection and restoration strategies

黄河是全世界泥沙含量最高、治理难度最大、水害最严重的河流之一。历史上曾有“三年两决口、百年一改道”之说,治理黄河洪水泥沙之患,历来是中华民族安民兴邦的大事。新中国成立以来,中国在黄河流域水土流失治理方面取得了巨大成就,创造了黄河岁岁安澜的历史奇迹。目前已累计初步治理水土流失面积达 25.96 万 km²,其中修建梯田 624.14 万 hm²,营造水土保持林 1 297.18 万 hm²,种草 237.66 万 hm²,封禁治理 437.32 万 hm²,修建淤地坝 56 979 座(中华人民共和国水利部, 2021)。水土保持率从 1990 年的 41.49% 提升到 2021 年的 67.37%(其中黄土高原地区 2021 年水土保持率为 63.89%),黄河潼关站年均输沙量从 1919~1989 年的年均 15.8 亿 t 减少到 2010~2021 年的年均 2.03 亿 t,黄土高原植被覆盖度从 2000 年的 46.1% 提高到 2018 年的 63.2%(杨波等, 2019),实现了黄河流域生态环境由“整体恶化、局部好转”向“整体好转、局部良性循环”的转变(王浩, 2022)。

然而,“尽管黄河多年没出大的问题,但黄河水害隐患还像一把利剑悬在头上,丝毫不能放松警惕”“洪水风险依然是黄河流域的最大威胁”“黄河问题仍未取得根本性的解决,水土流失依然是黄河流域现阶段面临的重要生态问题”等问题依然存在(中国政府网, 2022)。目前,黄河流域仍然存在 25.93 万 km² 的水土流失面积亟待治理,河-龙区间(头道拐-龙门)涉及干支流流域(主要是黄河中游多沙粗沙区)仍然是中国水土流失最严重的地区。尽管经过多年治理,但是生态环境脆弱、流域生态屏障功能不强的局面还没有发生根本改变(金钊, 2019)。《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021~2035 年)》

指出,黄河中游流域,尤其是 786 万 hm² 的多沙粗沙区和粗泥沙集中来源区对下游构成严重威胁。而且治黄工作者认识到粗泥沙是黄河下游淤积形成“地上悬河”的根源,并将粗泥沙集中来源区逐步锁定在榆林神府佳绥地区以及鄂尔多斯南部(张金良, 2018; 周广胜等, 2021)。总体来看,当前黄河中游流域水土流失预防与治理任务依然艰巨,如何在粗泥沙源头通过系统性保护修复,实现遏制粗泥沙入黄,缓解拦沙坝、水库和“地上悬河”泥沙淤积压力的目标,是筑牢黄土高原生态屏障、保障黄河长久安澜的根本之策(胡振琪等, 2022)。亟需从山水林田湖草沙“生命共同体”角度,系统性、综合性、整体性解决黄河中游生态环境问题、提升生态系统的质量和稳定性,助力黄河流域生态保护与高质量发展(Wang et al., 2022)。

榆林市是黄河中游入黄粗泥沙最主要的源头,也是国家“两屏三带”和“三北防护林”生态安全屏障中的重要节点、国家水土流失重点防治区、全国重要的防风固沙和土壤保持生态功能区及整体绿色发展生态轮廓中的关键一环(中国政府网, 2020)。目前,榆林市粗泥沙区生态保护修复面临的困境整体表现为生态环境脆弱,水土流失风险大;采动引起的生态问题凸出,治理效果低下;生态系统结构较单一、整体质量有待提高(彭苏萍等, 2020);生态、生产和生活用水矛盾突出、水资源保障面临挑战以及生态保护修复系统性和综合性考虑不足。为了解决以上实际问题与需求,笔者在对研究区生态问题识别、诊断及综合评价的基础上,探索榆林黄河中游粗泥沙区生态保护修复的可行性路径,提出榆林粗泥沙区人与自然和谐共生的保护修复策略,使榆林黄河中游粗泥沙区生态环境实现根本好转,最终达到从源头遏制粗泥沙入黄,

缓解拦沙坝、水库和“地上悬河”泥沙淤积压力,保障黄河长久安澜的目标。同时对于筑牢黄土高原生态屏障,保障中国北方生态安全与国家能源资源安全,有效促进和支撑榆林高质量发展及后能源时代榆林转型发展等方面具有重要且深远的意义。

1 黄河中游水土流失与粗泥沙来源区

1.1 黄河流域水土流失特点

基于2020年全国水土流失动态监测成果和2021年中国水土保持公报,黄河流域水土流失状况主要呈现4个特点:①黄土高原地区仍然是中国水土流失最为严重的地区。黄河流域水土流失面积为25.93万km²,占其地总面积79.47万km²的32.63%。其中,黄土高原水土流失量大面广、生态环境脆弱、流域生态屏障功能不强的局面没有发生根本改变。②土壤侵蚀类型多样。黄河流域土壤侵蚀类型涵盖了水力侵蚀、风力侵蚀、冻融侵蚀和重力侵蚀,多种侵蚀类型相互交织,共同作用。其中,位于黄土高原地区的黄河中游多沙粗沙区由于特殊的地形、地貌、土壤及气候等条件,是黄河流域内水力侵蚀最为严重的区域,坡面侵蚀和沟道侵蚀并存。③高侵蚀强度区面积较大。黄河流域强烈及以上等级水土流失面积为6.46万km²,占水土流失总面积的14.26%。黄河多沙粗沙

区水土流失面积为10.68万km²,多分布于中游,占黄河流域总面积的42.85%,其中强烈及以上水土流失占比16.37%,高于国家平均水平(11.16%)(表1)。④水土流失区域分布相对集中。水土流失主要分布在腾格里—阴山北麓沙漠草原风沙区、黄河中游多沙粗沙区、湟水洮河黄土丘陵区 and 黄河源高地草原区。尤其黄河中游多沙粗沙区,是黄土高原地区水土流失的主要区域,也是导致黄河下游河道持续淤积抬高的根源(白艳萍等,2022)。

1.2 黄河中游多沙粗沙区分布及入黄泥沙贡献

在1990年公布的遥感调查资料基础上,根据黄河泥沙的主要来源及其对黄河下游的危害,按照侵蚀模数和粗沙(粒径大于0.05mm)模数,划定了多沙区和粗沙区分布(图1)。多沙区为侵蚀模数大于5000

表1 国家级水土流失重点治理区水土流失变化情况
(中华人民共和国水利部,2021)

Tab. 1 Changes of soil and water loss in key state-level control areas

国家级水土流失重点治理区	年度	水土流失面积(km ²)			
		轻度	中度	强烈及以上	合计
黄河多沙粗沙区	2021	58 067	31 212	17 478	106 757
	2020	57 924	30 933	19 123	107 980
	变化情况	143	279	-1 645	-1 223

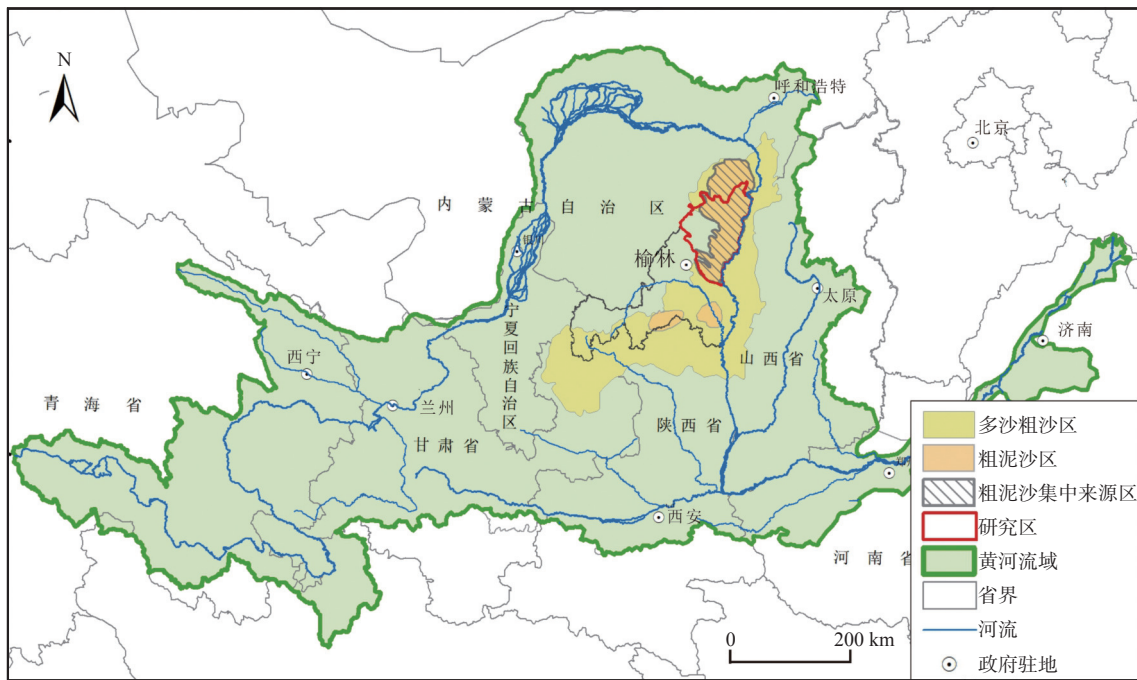


图1 黄河中游多沙粗沙区分布

Fig. 1 Distribution of sandy and coarse sand areas in the middle reaches of the Yellow River

t/km²·a 的地区;多沙粗沙区为侵蚀模数大于 5 000 t/km²·a 且粗沙模数大于 1 300 t/km²·a 的区域(魏艳红等, 2017)。从黄河中游多沙粗沙区分布面积上看, ①多沙区总面积为 21.2 万 km², 集中分布在河龙区间、泾洛渭河中上游以及青海、内蒙古、河南沿黄部分地区。②粗泥沙区总面积为 7.86 万 km², 分布于河口镇至龙门区间的 23 条支流和泾河上游(马莲河、蒲河)部分地区、北洛河上游(刘家河以上)部分地区, 主要涉及黄土丘陵沟壑区、黄土高原沟壑区(张发民, 2022)。粗泥沙区分布中, 陕西省内粗泥沙面积为 1.38 万 km², 占黄河中游粗泥沙区总面积的 75.58%, 仅榆林市粗泥沙区高达 1.31 万 km²(占陕西省粗泥沙面积的 95.01%)(数据来源于黄河中游管理局), 主要分布在榆林北部皇甫川等 7 条黄河一级支流流域, 该区域是黄河中游入黄粗泥沙的集中来源区(图 2)。从黄河中游入黄泥沙特征上看, 黄河约 60% 的径流来自兰州以上 30% 的流域面积, 但黄河流域约 90% 的泥沙来自于中游流域的黄土高原地区, 其中河口至龙门区间的泥沙量就占到了黄河同期总输沙量的 62.8%, 贡献的粗泥沙占黄河粗泥沙总量的 72.5%, 其中榆林北部

“四川三河”区域贡献了 54% 的粗泥沙输入量(穆兴民等, 2020)。截止到目前, 榆林北部粗泥沙集中来源区植被覆盖稀少, 以砒砂岩为特征地表侵蚀强度大, 沟道泥沙堆积丰富, 加之较强烈的人类活动, 该地区仍然面临较大的水土流失风险, 亟需从山水林田湖草沙生命共同体角度对该区域进行生态保护修复, 提升生态系统的稳定性和韧性, 实现从源头遏制粗泥沙入黄, 确保黄河安澜。

2 榆林粗泥沙区生态问题的识别诊断与评价

2.1 生态问题的识别与诊断

2.1.1 区域尺度生态问题

采用从大尺度向小尺度进行梯度分析、综合评判的方法, 分别从国家尺度、流域尺度识别研究区内生态系统质量、生态系统服务功能、生态空间格局、生态系统恢复力和退化程度等方面的生态问题。国家尺度: 根据《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021~2035 年)》、《全国生态功能区划》



图 2 黄河中游入黄粗泥沙榆林区域主要来源区(棕色区域)

Fig. 2 Main source area of coarse sediment entering the Yellow River in Yulin region (brown area)

(2015修编)、《全国主体功能区规划》(国发〔2010〕46号)、《全国国土规划纲要》(2016~2030年)等规划,研究区属于“黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区”“陕北黄土丘陵沟壑土壤保持功能区”“毛乌素沙地防风固沙功能区”“水土保持保护区”。因此,研究区主要以加强水土流失预防,在黄土高原丘陵沟壑区退耕还灌还草还林、小流域综合治理,限制陡坡垦殖和超载过牧,加强小流域综合治理,加大荒漠化治理和矿山环境整治修复力度为主要任务。在黄河流域尺度,据《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,研究区属于黄河流域生态保护“一带五区多点”空间布局及“一轴两区五极”发展动力布局中的突出位置,主要以加强中游水土保持为主要任务。在陕西省尺度,根据《陕西省生态保护红线划定方案》,研究区府谷县、神木市、佳县东南部黄土丘陵沟壑区均处于生态环境和水土流失的极敏感区,位于陕西省水土保持功能和防风固沙功能的极重要区。此外,在陕西省黄河流域生态空间治理总体布局中属于黄土丘陵沟壑生态修复区和毛乌素沙地生态防护屏障。总体来看,研究区呈现出生态功能多元化、生态环境脆弱化、生境质量低效化、生态系统敏感化,生态修复任务多重化的特征,水土流失问题是各种规划普遍强调的共性问题,同时还存在林草植被覆盖率不高、土地退化及沙化、农业产业及结构低下,沿黄生态安全胁迫、废弃矿山遗留问题较多、绿色矿山达标率低等问题。

(1)生态系统质量:生态系统质量是指生态系统的健康状态,表现为生态系统自我维持与抗干扰能力的大小,可通过生态系统脆弱性和生境质量指数来综合评判(图3)。选取水土流失脆弱性和土地沙化脆弱性2个指标作为生态脆弱性评价基础数据。生境质量指数能反映地区内生境退化程度。根据研究区2020年生境质量指数实际情况,生境质量等级以中等的土地面积最多,其次为良、差和优等。评价结果显示,研究区生态系统自我调节能力有限,抵抗人为干扰的能力处于低等格局,生态环境本底脆弱尚未得到彻底改善。结合特定的自然地理环境,生态系统群落结构较为简单,林分结构不合理。绝大部分人工林的生态功能较差,生物多样性不够丰富,林下植被稀疏,郁闭度低,森林生态系统的蓄水保土能力差。北部风沙滩地林分结构不合理、大量灌木防护林开始老化枯死、防护效能急剧下降、水土流失和土地沙化面临加剧的风险(张茂省等,2013)。

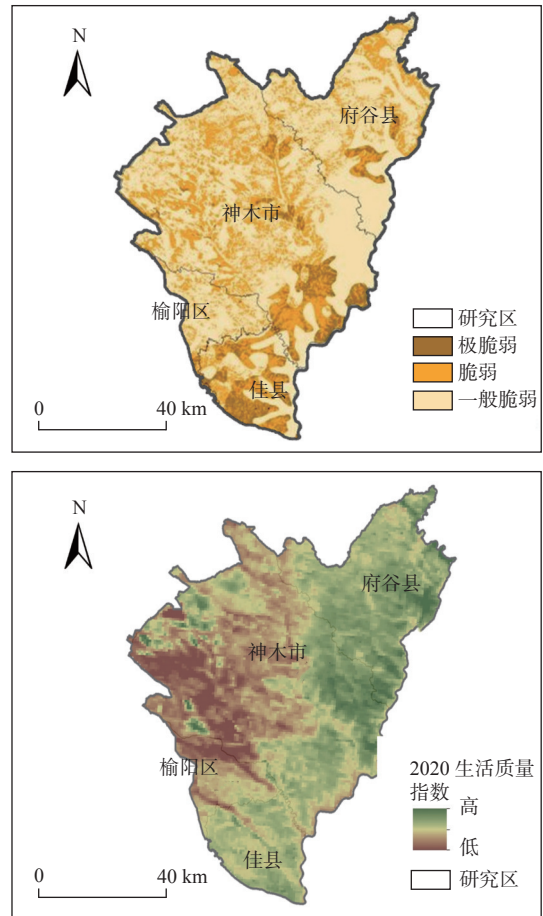


图3 研究区生态脆弱性评价图及生境质量指数(2020年)
Fig. 3 Ecological vulnerability assessment map and habitat quality index in the study area (2020)

(2)生态系统服务功能:生态系统服务功能是指人类直接或间接从生态系统中获取的利益。生态系统服务功能重要性评价以生物多样性维护功能、水源涵养功能、水土保持功能和防风固沙功能(及土壤沙化敏感性)等4项指标作为基础数据进行评价(图4a~图4d),分别取4项指标重要性的最高等级作为生态系统服务功能重要性的等级进行评价(图4e)。评价结果显示,研究区生态系统服务功能整体呈现低等格局,区域局部生态功能退化,伴随着人类活动对生态的胁迫压力持续升高,尤其是在生活用水对农业和生态用水的挤占方面,综合导致研究区生态系统服务功能锐减。

(3)生态空间格局:生态空间格局是对国土空间开发行为进行管控,理顺保护与发展的关系,达到保护重要生态空间及促进区域可持续发展的目的。基于此,取生态系统服务功能重要性和生态脆弱性评价结果的较高等级,作为生态保护重要性等级的初判结

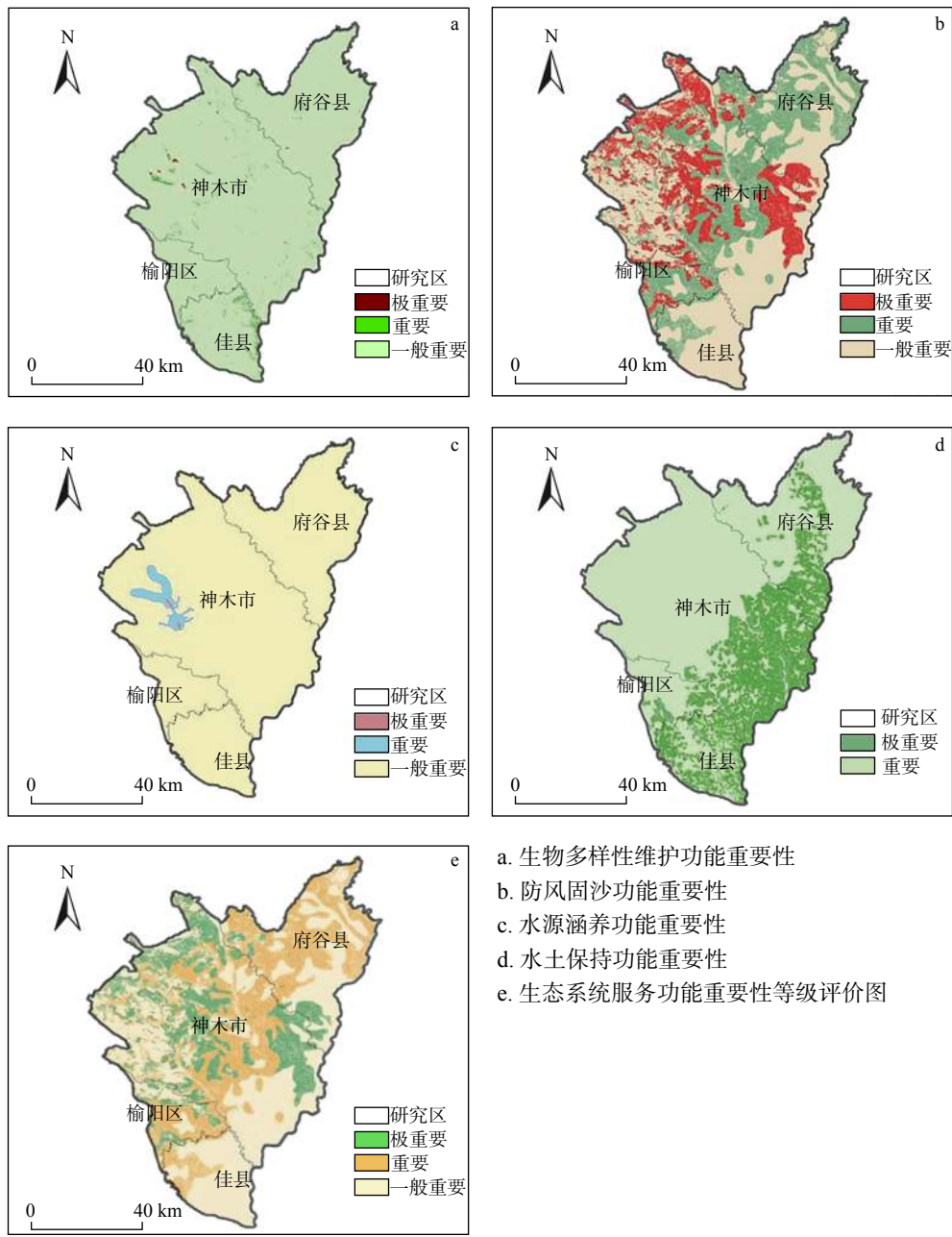


图 4 研究区生态系统服务功能重要性等级评价

Fig. 4 Assessment on the importance level of ecosystem services in the study area

果; 进一步根据生态红线、自然保护地、生态廊道和生态系统完整性进行校核修正。评价方法是生态系统服务功能极重要区和生态极脆弱区加和确定为生态保护极重要区, 其余重要和脆弱区加总确定为生态保护重要区, 剩余区域确定为生态保护重要性一般区域。研究区生态保护极重要区面积为 4 758.34 km², 占区内土地总面积的 36.71%, 主要分布在黄土丘陵沟壑水土流失地区、长城沿线防风固沙区、重要的自然保护区、河流湿地、水源地等涵养区等自然保护地等研

- a. 生物多样性维护功能重要性
- b. 防风固沙功能重要性
- c. 水源涵养功能重要性
- d. 水土保持功能重要性
- e. 生态系统服务功能重要性等级评价图

究区(图 5)。生态保护重要性主要体现在生态系统服务功能重要性和生态脆弱性上, 主要影响因子为水源涵养重要性和水土流失脆弱性。生态保护重要区面积为 4 393.07 km², 占区内土地总面积的 33.89%, 主要分布在黄土沟壑区除生态保护极重要区之外的区域, 以及土地沙化和水土流失较脆弱的地区。生态保护一般重要区面积为 3 809.90 km², 占区内总面积的 29.39%。

(4) 生态系统恢复力和退化程度: 依据研究区识

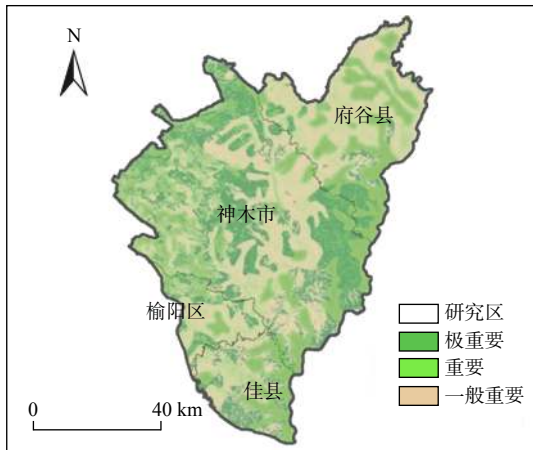


图5 研究区生态保护重要性评价

Fig. 5 Importance of ecological protection in the study area

别出的生态系统问题及相关评价结果,结合实地调查数据,充分考虑区内生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界规划成果,对研究区内需要修复的生态系统受损退化程度和恢复力进行了评价(图6)。可以看出,研究区1级极大退化区仅占0.003%,2级重度退化区占19.21%,主要分布在孤山川、石马山流域,窟野河和佳芦河下游,秃尾河上游区域均有所涉及,府谷县居多;3级中等退化区占比较大48.62%,主要集中在府谷四川上游流域、窟野河上游,秃尾河和佳芦河分布面积较大;4级轻度退化区占比25.33%,主要

分布在秃尾河流域上游、窟野河流域上游集中连片分布;5级未退化区区域占比6.837%,主要集中在秃尾河中上游流域左岸。生态系统恢复力与退化程度基本正相关,不退化区的恢复力最大。

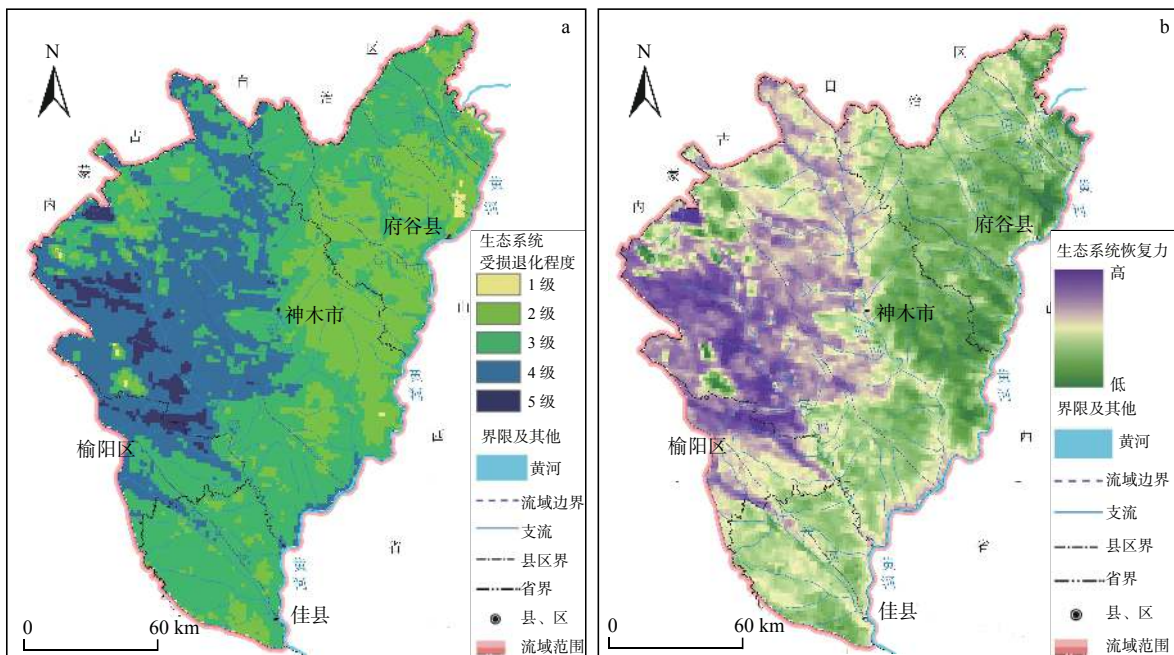
2.1.2 景观尺度生态问题

研究区包括榆林市内7个黄河一级支流。从景观尺度看,统筹考虑研究区皇甫川、清水川、孤山川、石马川、窟野河、秃尾河和佳芦河7个流域系统,由于各流域上、中、下游生态环境的时空变异性,按照流域上下游、左右岸、山上山下、地表地下的顺序开展了详细的野外调查。在此基础上,基于各流域地形地貌、水文、气候、植被、矿产等自然状况,分析了各流域尺度生态问题的差异和共性,识别了各流域存在的主要生态问题(表2)。

2.1.3 陕北能源化工基地生态问题

(1)地形地貌景观破坏:根据矿山生态修复规划和最新数据,研究区露天采场破坏地形地貌景观面积为1830.09 hm²,废石土渣堆和煤矸石堆破坏地形地貌景观影响面积为1573.08 hm²,工业广场破坏地形地貌景观面积为5966.72 hm²。

(2)含水层破坏:榆神府矿区采煤主要对烧变岩含水层和第四系潜水含水层造成影响,造成含水层结构破坏,区域地下水水位下降5~12 m,矿区地下水的均衡受到严重的影响与破坏(侯光才等,2007;常亮等,



a. 生态系统受损退化程度图; b. 生态系统恢复力程度图

图6 研究区生态系统受损退化程度与恢复力评价图

Fig. 6 Assessment of the degree of ecosystem damage and degradation and resilience in the study area

表2 各流域内生态问题识别

Tab. 2 Identification of ecological problems in each watershed

流域名称	流域面积(km ²)	主要生态问题描述
皇甫川流域	457.18	砒砂岩区支沟水土流失风险大、四乱集中、湿地退化及景观破碎化、土地沙化及植被退化趋势尚存、沿黄林草质量较低、农田质量不高、水源地保护待加强
清水川流域	617.61	历史遗留矿山生态、中游农用地耕地质量差、砒砂岩区及黄土沟壑区支沟水土流失风险大、湿地退化及景观破碎化、土地沙化及植被退化趋势尚存
孤山川流域	1 111.63	工矿业污染仍存、水土流失风险大、历史遗留矿山问题突出、矿山开发引起水土资源破坏、林草存在退化趋势、绿色矿山建设亟待加强
石马川流域	593.21	支沟林草覆盖率低、存在水土流失风险、沿黄破面裸露, 崩滑灾害风险较大、景观破碎化、耕地质量差
窟野河流域	4 559.53	水土流失风险大、历史遗留矿山问题突出、土地及植被退化趋势尚存、沿黄林草质量不高、滚石风险较大、矿区地下水污染风险较大、局部采空区塌陷严重、绿色矿山建设亟待加强
秃尾河流域	3 964.04	上游: 沿黄林草质量较低、坡面裸露, 灾害风险较大、农田质量不高、水源地保护待加强、人居环境较差、湿地萎缩, 生物多样性降低、防风固沙与水源涵养功能呈低等格局; 下游: 历史遗留矿山问题突出、支沟水土流失风险大、支沟水生态问题凸现、沿黄湿地保护待加强
佳芦河流域	1 204.64	上游: 沿黄林草质量较低、坡面裸露, 灾害风险较大、农田质量不高、水源地保护待加强、人居环境较差、湿地萎缩, 生物多样性降低、防风固沙与水源涵养功能呈低等格局; 中下游: 支沟水土流失风险大、林草质量不高、河道水环境较差、交通绿带灾害风险大、城区景观格局低等

2008)。同时由于地下开采时的井巷疏干排水易形成大面积的地下水疏干漏斗, 破坏了矿区生态平衡, 植被因缺水枯萎, 加剧土地荒漠化(尹立河等, 2008; 党学亚等, 2010)。

(3)采煤影响植被生态: 研究区植被覆盖状况总体上呈好转趋势, 但与未开采的对比区相比, 植被生态变差的区域所占的比例较大, 矿区煤炭资源的开采对植被生态造成负面影响(张茂省等, 2008)。

(4)水土污染: 2020年全面排查黄河流域入河排污口行动中, 研究区排查出1273个人河排污口。此外, 矿山废渣除了占用土地资源外, 在长期雨淋后, 部分有毒元素溶解析出后污染地表水土。

(5)沉地面陷和地裂缝: 高强度、大规模、机械化的采矿活动作用于矿山地质环境的强度远远超过了自然地质作用, 强烈地改变和破坏了矿区原有的地应力平衡系统, 产生了地面沉陷和地裂缝等。总体上研究区采煤引起的地面沉陷和地裂缝问题凸出(Li, 2006; 张茂省等, 2010)。

(6)矿山地质灾害: 在黄土斜坡地带, 地面沉陷和地裂缝进一步引发崩塌、滑坡、泥石流、尾矿库溃坝等次生地质灾害。

2.2 生态问题相互影响

综上所述, 研究区主要生态问题有水土流失、矿区地质环境破坏、地质灾害风险、水环境受损、植被退化与生物多样性下降等, 这些生态问题之间存在着

千丝万缕的相互影响(图7)。土地沙化风险增加, 使水源涵养区周围环境下降, 生态系统失衡, 而研究区林草退化, 植被覆盖面积减少, 直接导致沙化程度加剧, 同时也加剧了区域水土流失和湿地萎缩问题。反之, 水土流失日益严重, 大量土壤冲刷和退化, 进一步导致生态环境恶化, 林草生态系统不断受损甚至退化; 对矿山的合理及过度开采使得山体 and 植被大量破坏, 加剧了研究区林草退化和水土流失生态问题, 同时也使得耕地的数量下降, 质量降低; 而低质量的坡耕地又会增加水土流失的发生。只有从流域系统的角度, 进行整体保护、宏观管控、综合治理, 才能实现从源头遏制粗泥沙入黄的保护修复目标。

2.3 综合评价

(1)粗泥沙集中来源区水土流失是黄河流域最严重的生态问题。新中国成立后, 尽管黄河流域水土流失治理取得了巨大成就, 创造了黄河岁岁安澜, 但洪水风险依然是流域的最大威胁, 威胁下游河滩区近百万人民群众生命安全。黄河问题仍未取得根本性的解决, 水土流失依然是黄河流域现阶段面临的重要生态问题。研究区是黄河流域粗泥沙最主要的集中来源区, 研究区的水土流失是黄河流域乃至全世界最严重的生态问题, 从源头遏制粗泥沙入黄, 是确保黄河下游人民生命和财产安全的根本之策。

(2)矿区生态问题突出, 绿色矿山建设和生态保护修复任务艰巨。研究区共有持证矿山282个, 历史

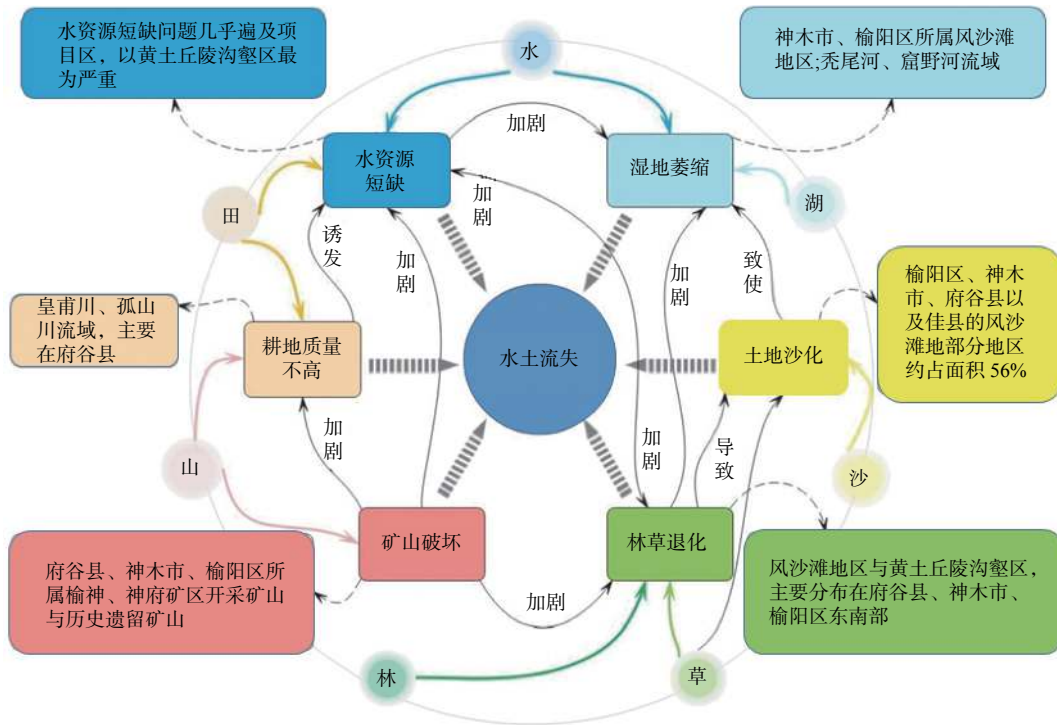


图7 研究区主要生态环境问题关系图

Fig. 7 Relationship diagram of main ecological and environmental problems in the study area

遗留矿山 96 处, 合计 378 个。矿区生态问题突出, 绿色矿山建设和生态保护修复任务艰巨。

(3) 生态系统韧性不高, 生态系统服务功能有待提升。研究区降水稀少, 多年平均降雨量位于 400 mm 线以下, 水资源匮乏, 加之人类活动范围和强度的不断扩大和增强, 生态环境相对脆弱, 景观破碎化, 生态功能整体偏弱, 生物多样性不够丰富, 生态环境质量虽在提升, 但生态系统韧性不高, 生态系统服务功能有待提升。

(4) 自然生态系统与人类经济社会系统融合不够。自然生态系统与人类经济社会系统融合不够, 缺乏将生态保护与经济发展有机结合的整体性和联动性战略, 亟待深入贯彻绿水青山就是金山银山的理念, 探索把生态治理和发展特色产业有机结合起来, 走出一条生态和经济协调发展、人与自然和谐共生之路, 从生态保护修复的角度促进和支撑榆林高质量发展及后能源时代榆林转型发展(图 8)。

3 榆林粗沙区生态格局构建

3.1 生态保护修复思路

坚持节约优先、保护优先、自然恢复为主的方针,

坚持山水林田湖草沙全生态要素一体化保护和修复的理念, 围绕“固一方水土、守黄河安澜, 绿能源基地、保资源供给” 2 个核心目标, 聚焦水土流失、矿山地质环境破坏和生态退化 3 个关键问题, 将研究区划分了 10 个修复单元, 在皇甫川、清水川、孤山川、石马川、窟野河、秃尾河、佳芦河等流域布局 7 个工程和 29 个子项目, 从而构建“1 廊 2 带 3 区多点” 自然生态系统与人类经济社会系统高度融合的生态安全格局, 最终实现从源头遏制粗泥沙入黄, 减少拦砂坝和水库淤积压力, 遏制下游“地上悬河” 发展, 保障黄河安澜; 筑牢黄土高原生态屏障, 保障中国北方生态安全; 系统修复矿区生态, 保障国家能源资源安全; 促进人与自然和谐共生的现代化建设(图 9)。

3.2 生态安全格局构建

构建“1 廊 2 带 3 区多点” 自然生态系统与人类经济社会系统高度融合的多层次、功能复合、成网络、完整的生态安全格局, 筑起一道“保持水土、抵御风沙、护农促牧、保障资源” 的榆林绿色长城(图 10)。

1 廊: 构建黄河沿岸 3 km 宽度范围的沿黄综合生态廊道, 保障榆林北段黄河干流沿线生态安全。

2 带: 建设黄河支流水生态绿带、交通沿线生态绿带, 衔接沿黄生态绿廊并串联各类生态源地及重要

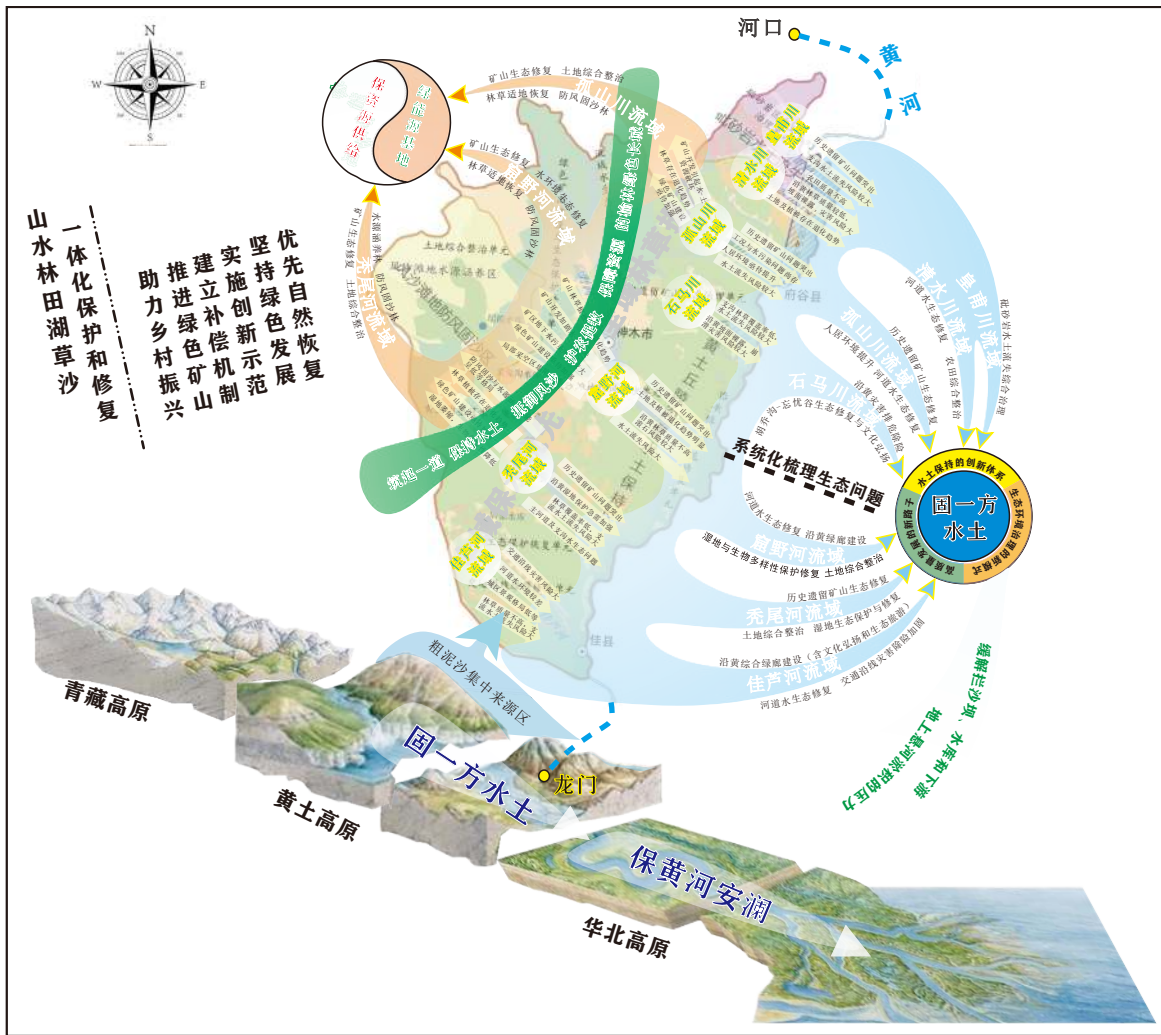


图 8 榆林黄河中游粗泥沙区生态问题综合评价与保护修复方向指引图

Fig. 8 General layout of integrated protection and restoration of ecological problems in the coarse sand area of the middle reaches of the Yellow River in Yulin

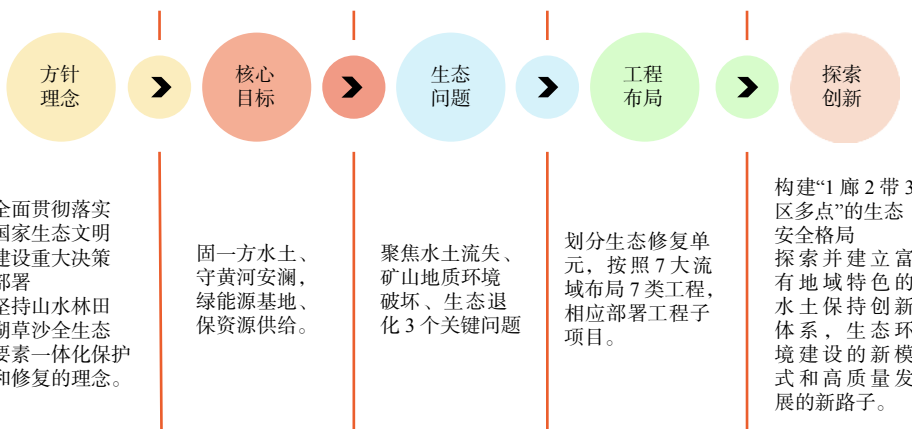


图 9 榆林黄河中游粗泥沙区生态保护修复思路图

Fig. 9 General idea of ecological protection and restoration in the coarse sand area of the middle of Yellow River in Yulin

节点，提升生态系统的连通性和流动性。

3 区: 清水川—皇甫川裸露砒砂岩水土流失治理区、

黄土丘陵沟壑水土保持区、风沙滩地防风固沙区。布局 3 区，整治失序低效空间，修复损毁退化空间，系统

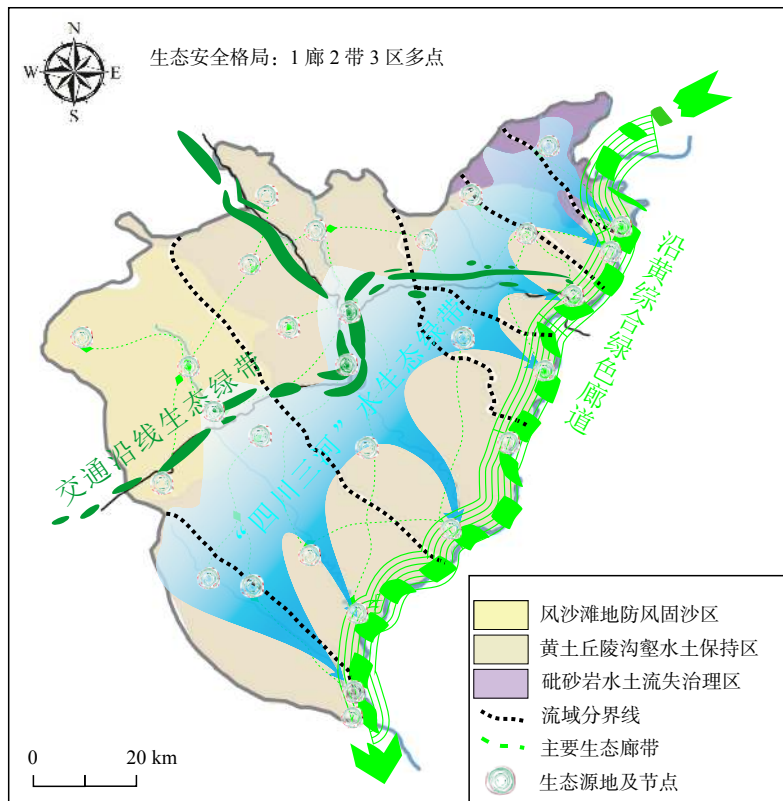


图10 研究区生态安全格局图

Fig. 10 Ecological security pattern in the study area

推进黄河中游水土综合治理,提升生态系统韧性。

多点:镶嵌分布在研究区的生态保护红线、自然保护地、重要水源地、生态保护极重要区,以及城镇、工业园区、矿山、村庄、旅游景点、湿地、水域等多个生态源地斑块或生态节点,旨在维持生态系统的稳定性,提高生态系统服务功能与生态产品供给。

4 结论

(1)黄河中游榆林市北部粗泥沙集中来源区生态问题主要表现为:水土流失依旧严峻;矿山生态问题突出,绿色矿山建设任务艰巨;生态系统韧性不高,生态系统服务功能有待提升;自然生态系统与人类经济社会系统融合不够。

(2)生态保护修复思路是围绕“固一方水土、守黄河安澜,绿能源基地、保资源供给”2个核心目标,聚焦水土流失、矿山地质环境破坏和生态退化3个关键问题,将研究区划分了10个修复单元、7个工程和29个子项目,从源头遏制粗泥沙入黄,保障黄河安澜。

(3)构建“1廊2带3区多点”自然生态系统与人类经济社会系统高度融合的多层次、功能复合、成

网络、完整的生态安全格局,筑起一道“保持水土、抵御风沙、护农促牧、保障资源”的榆林绿色长城。

参考文献(References):

- 白艳萍,李雷,李娜.《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》规划区水土流失动态变化研究[J].中国水土保持,2022,485(08):4-7.
- BAI Yanping, LI Lei, LI Na. Study on Dynamic Changes of Water and Soil Loss in the Planning Area of the Yellow River Basin Ecological Protection and High Quality Development Planning Outline[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2022, 485(08): 4-7.
- 常亮,张茂省.陕北能源化工基地河川径流特征和产流机理[J].地质通报,2008,27(8):1143-1150.
- CHANG Liang, ZHANG Maosheng. Characteristics and yield mechanisms of stream runoffs in the Northern Shaanxi Energy and Chemical Industry Base, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(8): 1143-1150.
- 党学亚,张茂省,董英,等.陕北侏罗纪煤田地下水保护对策与开采利用方案研究[J].地学前缘,2010,17(6):200-207.
- DANG Xueya, ZHANG Maosheng, DONG Ying, et al. Research on protection and exploitation of groundwater resources in Northern Shaanxi Jurassic Coalfield[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(6): 200-207.

- 侯光才, 张茂省, 王永和, 等. 鄂尔多斯盆地地下水资源与开发利用[J]. *西北地质*, 2007, 40(01): 7-34.
- HOU Guangcai, ZHANG Maosheng, WANG Yonghe, et al. Groundwater Resources of the Ordos Basin and Its Development and Utilization[J]. *Northwestern Geology*, 2007, 40(01): 7-34.
- 胡振琪, 李勇, 陈洋. 黄河泥沙在生态修复中的作用机理与关键技术[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(01): 1-15.
- HU Zhenqi, LI Yong, CHEN Yang. The Mechanism and key technology of the Yellow River sediment in ecological rehabilitation[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(01): 1-15.
- 金钊. 走进新时代的黄土高原生态恢复与生态治理[J]. *地球环境学报*, 2019, 10(03): 316-322.
- JIN Zhao. Ecological restoration and ecological governance of the Loess Plateau in the new era[J]. *Journal of the Earth Environment*, 2019, 10(03): 316-322.
- 穆兴民, 赵广举, 高鹏, 等. 黄河未来输沙量态势及其适用性对策[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(05): 328-332.
- MU Xingmin, ZHAO Guangju, GAO Peng, et al. Future Trend of Sediment Discharge in Yellow River and Its Adaptation Strategies[J]. *Bulletin of Water and Soil Conservation*, 2020, 40(05): 328-332.
- 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术 with 战略思考[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(4): 1211-1221.
- PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River basin of China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(4): 1211-1221.
- 王浩. 黄河流域治理水土流失 25.96 万平方千米[N]. *人民日报*, 2022, 12: 05(014).
- 魏艳红, 焦菊英. 皇甫川流域 1955-2013 年水沙变化趋势与周期特征[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(03): 1-6.
- WEI Yanhong, JIAO Juying. Variation Tendency and Periodic Characteristics of Streamflow and Sediment Discharge in Huangfuchuan Watershed from 1955 to 2013[J]. *Research on Soil and Water Conservation*, 2017, 24(03): 1-6.
- 杨波, 王全九, 许晓婷, 等. 还林还草工程后榆林市 NDVI 时空变化趋势[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(06): 1839-1848.
- YANG Bo, WANG Quanjiu, XU Xiaoting, et al. NDVI spatiotemporal variation in Yulin after grain for green project[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(06): 1839-1848.
- 尹立河, 张茂省, 董佳秋. 基于遥感的毛乌素沙地红碱滩面积变化趋势及其影响因素分析[J]. *地质通报*, 2008, 27(8): 1151-1156.
- YIN Lihe, ZHANG Maosheng, DONG Jiaqiu. Area variation and controlling factors of Lake Hongjian, Mu Us desert, China based on remote sensing techniques[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(8): 1151-1156.
- 张发民. 陕西省推动黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略的实践与探索[J]. *中国水土保持*, 2022, 486(09): 19-22.
- ZHANG Famin. Practice and Exploration of Shaanxi Province's Major National Strategy for Promoting Ecological Protection and High Quality Development of the Yellow River Basin[J]. *China's Soil and Water Conservation*, 2022, 486(09): 19-22.
- 张金良. 基于悬河特性的黄河下游生态水量探讨——“黄河下游滩区生态再造与治理研究”之三[J]. *人民黄河*, 2018, 40(09): 1-4.
- ZHANG Jinliang. Study on Ecological Water Volume of the Lower Yellow River Based on Perched-River Characteristics: "Study on Ecological Reconstruction and Management of the Floodplains in the Lower Yellow River" (III)[J]. *Yellow River*, 2018, 40(09): 1-4.
- 张茂省, 董英, 杜荣军, 等. 陕北能源化工基地采煤对地下水资源的影响及对策[J]. *地学前缘*, 2010, 17(6): 235-246.
- ZHANG Maosheng, DONG Ying, DU Rongjun, et al. The strategy and influence of coal mining on the groundwater resources at the energy and chemical base in the north of Shaanxi[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(6): 235-246.
- 张茂省, 卢娜, 陈劲松. 陕北能源化工基地地下水开发的植被生态效应及对策[J]. *地质通报*, 2008, 27(8): 1299-1312.
- ZHANG Maosheng, LU Na, CHEN Jinsong. Ecological effects of vegetations during groundwater exploitation in the Northern Shaanxi Energy & Chemical Industry Base, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(8): 1299-1312.
- 张茂省, 卢娜. 植被生态对气候变化和人类活动的响应——以陕西省榆林能源化工基地为例[J]. *地质论评*, 2013, 59(05): 909-918.
- ZHANG Maosheng, LU Na. Responses of Vegetation Ecology to the Climate Changes and Human Activities: A Case Study at Yulin Energy & Chemical Industry Base[J]. *Geological Review*, 2013, 59(05): 909-918.
- 中国政府网. 全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021~2035年)[S]. 中华人民共和国中央人民政府. 2020, http://www.gov.cn/xinwen/2020-06/12/content_5518797.htm.
- 中国政府网. 在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[R]. 中华人民共和国中央人民政府. 2022, http://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.
- 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报(2021年)[R]. 中华人民共和国水利部. 2022, http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202207/t20220713_1585301.html.
- 周广胜, 周莉, 汲玉河, 等. 黄河水生态承载力的流域整体性和时空连通性[J]. *科学通报*, 2021, 66(22): 2785-2792.
- ZHOU Guangsheng, ZHOU Li, JI Yuhe, et al. Basin integrity and temporal-spatial connectivity of the water ecological carrying capacity of the Yellow River[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(22): 2785-2792.
- Li M S. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice[J]. *Science of The Total Environment*, 2006, 357(1-3): 38-53.
- Wang X, Yan Y. Thoughts on the Construction Method of Stock Space Based on the Perspective of Ecological Restoration and Urban Repair[J]. *Landscape Research*, 2022, 003: 014.