



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：若尔盖山水工程生态修复实施技术体系及应用

作者：许向宁，向国萍

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026111

投稿时间：2026-08-10

录用时间：2026-10-07

预出版时间：2026-10-07

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

若尔盖山水工程生态修复实施技术体系及应用

许向宁^{1,2}, 向国萍^{1,2}

XU Xiangning, Xiang Guoping

1.四川省第二地质大队, 四川 成都 610041;

2.自然资源部黄河上游若尔盖生态修复野外科学观测研究站, 四川 若尔盖 624500

1. The 2nd Geological Brigade of Sichuan, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Zoige Ecological Restoration Field Scientific Observation and Research Station in the Upper Reaches of the Yellow River, Ministry of Natural Resources, Zoige 624500, Sichuan, China;

Ecological Restoration Technology System and Application for the Zoige Restoration Project

Abstract: [Objective]The ecological restoration technology system holds significant importance for the implementation of landscape restoration projects. Focusing on the integrated protection and restoration project of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, grasslands and sands in Zoige, this study reveals the evolutionary characteristics and laws of surface water-groundwater cycles in alpine ecological functional zones. [Method]Through systematic investigation, comprehensive evaluation and scientific analysis, it accurately identifies and diagnoses the key ecological problems and their causes in Zoige. [Results]This paper constructs a theoretical and technical support system for integrated ecological restoration based on geo-ecosystem evolution, establishes preliminary ecological problem identification, diagnosis and full-life-cycle monitoring in high-altitude grassland wetlands, and innovates the practical application mode of the Two Mountains theory centered on the utilization and value promotion of unique geo-ecological resources in Zoige. [Conclusion]The research results fully support the ecological restoration of high-altitude grassland wetland ecosystems, and provide replicable technical paradigms for the systematic governance of alpine wetlands. [Significance] This study can provide a basis for developing the theoretical and technical framework for ecological restoration in high-altitude cold grassland wetlands.

Keywords: alpine grassland wetland; mountains-rivers project; alpine peat wetland; geological-ecological system; mountain-water-forest-field-lake-grass-sand; theoretical systems; ecological protection and restoration

摘要: 若尔盖高寒草原湿地面临湿地萎缩、草地沙化等严峻生态问题, 威胁水源涵养、碳汇储存及生物多样性保育功能。文章聚焦若尔盖山水林田湖草沙一体化保护和修复工程, 研究高寒生态功能区水源涵养地表-地下水循环演化特征与规律, 通过系统调查、综合评价与科学分析, 精准识别并诊断若尔盖地区核心地质环境与生态问题及其成因, 据此构建了基于地质-生态系统演化的山水林田湖草沙一体化生态修复理论技术支持体系, 建立了高海拔草原湿地生态问题识别诊断与全生命周期监测技术, 形成了以若尔盖独特地质生态资源利用和价值提升为核心的“两山”理论转化实践应用模式。这项研究成果全面支撑服务高海拔草原湿地生态系统修复, 为高寒湿地“山水林田湖草沙”系统治理提供了可复制的技术范式。

关键词: 若尔盖; 山水林田湖草沙; 山水工程; 高寒泥炭湿地; 地质-生态系统; 技术体系; 生态修复

基金项目: 四川省自然科学基金项目 (2025ZNSFSC0435)

This research was supported by the Sichuan Provincial Natural Science Foundation Project (Grants No. 2025ZNSFSC0435).

第一作者: 许向宁 (1971—), 男, 博士, 正高级工程师, 长期从事地质地勘查、地灾防治与生态修复保护工作。Email: 470762660@qq.com

通信作者: 向国萍 (1989—), 男, 正高级工程师, 长期从事国土空间生态保护修复工程。Email: xiangguoping1989@163.com

中图分类号: X171.4; P941.78 文献标识码: A

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026060

0 引言

山水林田湖草沙一体化保护和修复工程(简称山水工程)是践行“山水林田湖草沙是生命共同体”理念的国家级重大生态工程。自2016年工程启动以来,国家分多批次布局52个重点项目,覆盖全国29个省份,中央财政累计投入超千亿元,重点聚焦青藏高原、黄河流域、长江流域等国家核心生态安全屏障区开展系统治理。若尔盖高寒草原湿地位于青藏高原及毗邻区域,作为全球海拔最高、生态最脆弱的湿地类型之一,承担着水源涵养、碳汇储存、生物多样性保育等重要生态功能(赵燕州等,2013;刘梦园,2023;许向宁等,2026)。然而,长期以来受气候、地质条件和人为活动等因素影响,若尔盖湿地出现水土流失,湿地、草地、森林、沙地和耕地质量退化等生态问题,地质环境和水生态环境均遭到破坏(许向宁等,2004a;许向宁等,2023;谭世林等,2025a;谭世林等,2025b;谭世林等,2025c;丁励,2026)。为促进流域经济与环境保护协调发展,2022年国家给予20亿奖补资金支持,开展若尔盖草原湿地山水林田湖草沙一体化修复项目(简称“若尔盖山水工程”)。该生态修复项目为区域高寒湿地系统化治理、生态功能修复重塑提供了重要工程依托与政策保障。尽管当前区域生态修复与评估工作已逐步开展,但现有治理技术与研究体系仍难以匹配高寒湿地地质-生态耦合演化的复杂特征,重大生态工程的精准修复技术亟待加强(华国春等,2005;李潇等,2019;郭玉佳等,2023;孙平安等,2026)。

目前国内外针对若尔盖湿地生态修复工作多侧重于短期水文调控与植被恢复等表层生态干预,利用生态系统服务评估模型及机器学习等算法开展生态功能评估及驱动因素分析,但整体研究体系仍存在不足:一是多数评估较少将地质-水文基底作为前置约束,对地表-地下水循环调控生态功能的机制刻画不足;二是模型参数与判别阈值多直接采用通用取值,缺少面向若尔盖高海拔强异质性环境的本地化校正;三是评估、修复、监测、价值转化之间常相互割裂,缺少面向重大生态工程的全链条技术范式。因此,研究亟需从地质-生态长时序耦合演化视角厘清湿地形成、维持与退化内在机制,弥补现有研究缺口。基于此,文章以若尔盖为研究区,依托若尔盖山水工程,聚焦地质-生态系统演化,拟系统构建高寒地区生态保护修复的理论和技術体系,来揭示高寒湿地水源涵养功能区地质-生态系统关键要素的相互作用机制与演化规律,以期高寒草原湿地区生态修复理论技术体系的构建提供依据。

1 研究区概况

研究区地处青藏高原东北边缘,为四川盆地向青藏高原过渡地带,行政区划涵盖若尔盖县、阿坝县、红原县、松潘县等四县,总面积37136.1 km²(图1)。是国家“三区四带”生态安全青藏高原生态屏障核心片区,国家双重生态规划划定的若尔盖草原湿地水源涵养生态保护和修复重点工程核心实施区域,同时被纳入《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》流域生态保护“五区多点”水源涵养核心区,承担黄河上游径流补给、高原碳汇储存、高寒珍稀物种保育三重国家级生态安全使命,区域生态治理成效直接关系黄河全流域水资源安全与青藏高原生态屏障稳定性。

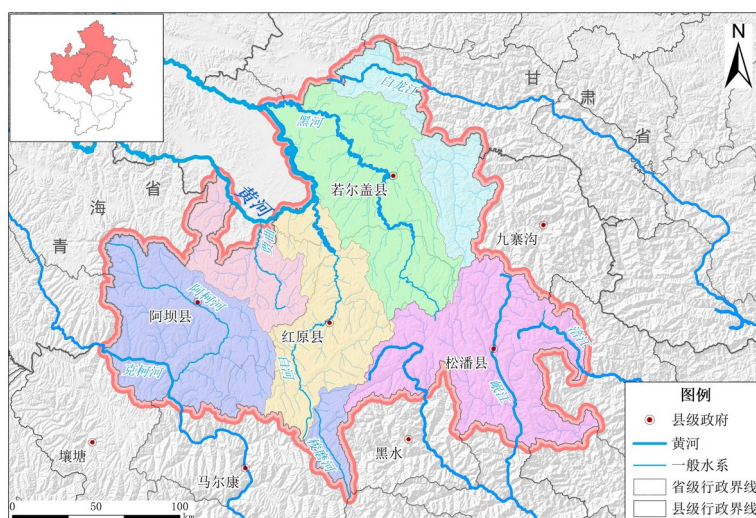


图 1 研究区范围图

Fig. 1 Location of study area

2 地质—生态演化特征及效应

2.1 构造地质与水文地质本底特征

若尔盖湿地位于青藏高原东北缘的若尔盖断陷盆地，受东昆仑断裂带东段新构造活动的控制，在高原持续隆升背景下经历长期相对缓慢的沉降，形成构造-沉积盆地格局。盆地基底以三叠系砂岩、板岩与碳酸盐岩为主，周缘山地露出古生代—中生代碎屑岩与变质岩；盆地内部积聚厚层第四纪河湖相沉积、冰水洪积以及风成-泥炭沉积。自新生代晚期以来形成封闭的高原盆地地貌格局（图 2），若尔盖草原湿地在新近纪末期和第四纪整体隆升过程中受强烈沉降等地质、气候因素影响，形成了独特的地质-生态系统自然演化特征和高原泥炭沼泽湿地等独有生态资源禀赋。盆地内广泛分布的湖相沉积与泥炭层构成了区域独特的水文地质结构，含水层空间分布受构造沉降与沉积物分异作用控制，浅部岩土体渗透性呈现沼泽区低、河谷阶地高的空间异质性特征，为区域水循环过程奠定了本底地质与水文条件，这决定了泥炭湿地的发育基础与碳储存潜力（Wang et al., 2025; Gaffney et al., 2023; 刘世梁等, 2023）。通过对若尔盖地区黑河流域水文站点月平均径流量的原位监测数据进行分析，并结合同位素示踪方法，发现区域水循环过程中降水、冻土融水、地表径流与地下径流存在频繁转化。多年冻土区冻土活动层季节性融化构成了地下水的重要补给来源。基于 2003—2021 年若尔盖、玛曲两个典型站点长期连续观测的植被蒸腾、土壤蒸发及降雨截留数据集，采用 MOD16-STM 蒸散发算法对研究区实际蒸散发及其组分进行模拟估算与精度验证。为使 MOD16-STM 蒸散发模型匹配若尔盖湿地，对模型的本地化校正主要包括：①根据若尔盖区的土壤质地重新拟合回归方程；②调整动量与热传输粗糙长度及测量高度；③在当地气候条件下对稳定性修正函数进行参数化修正；④引入区域特有的冻结-融化循环中的截留与土壤蒸发参数。结果显示，MOD16-STM 模型在若尔盖高寒林草湿地交错区具有较高的模拟精度与良好的区域适用性，其中若尔盖站、玛曲站蒸散发模拟值与观测值的决定系数分别达到 0.85 和 0.90，表明模型能够较好刻画区域蒸散发的年际变化特征与时空分异规律。从蒸散发组分结构来看，植被蒸腾为区域蒸散发的绝对主导组分，年均植被蒸腾量对总蒸散发的贡献率高达 82%，显著高于土壤蒸发与冠层降雨截留，温度与植被覆盖是驱动蒸散发变化的核心因子，河谷区则存在显著的地表水-地下水侧向交互，不同地貌单元分别形成了冻土区冻结层上水补给、沼泽区泥炭层滞蓄、河谷区地表地下双向交换的耦合模式（Lu et al., 2025; Li et al., 2023; Idowu et al., 2007; 杜耘等, 2008; 尚闽等, 2024）。

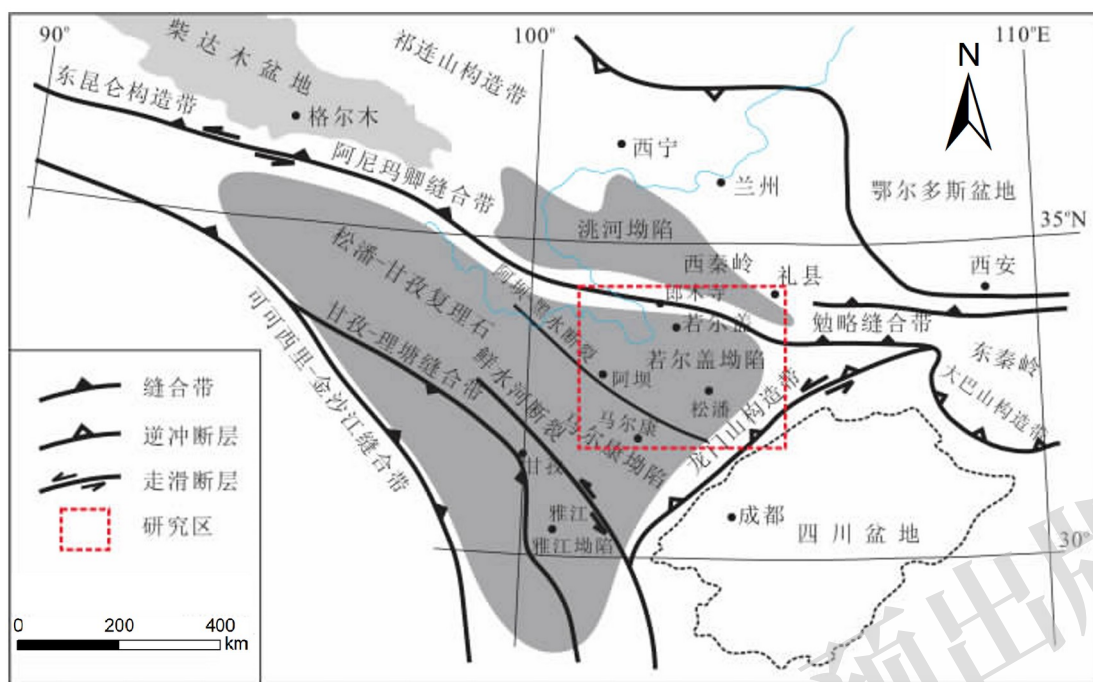


图2 若尔盖地区区域构造格架 (邓宾等, 2013)

Fig. 2 Regional tectonics in Zoige and its periphery (Deng et al., 2013)

2.2 自然营力驱动下的生态退化过程

青藏高原东缘高寒脆弱带, 受独特地质构造与气候条件约束, 生态系统先天稳定性差、抗干扰能力弱, 全球变暖背景下 2°C 升温即可显著削弱完整泥炭地的碳汇强度, 甚至可能使区域碳循环整体转为净碳源 (GAFFNEY et al., 2023; 周锐, 2025)。同时, 气温升高导致蒸散发提升, 其中植被蒸腾占总蒸散发的 82%, 直接改变区域水循环过程 (Lu et al., 2025), 加之降水与水汽输送通量的波动, 直接驱动径流发生先减后增的阶段性变化 (齐冬梅等, 2025), 而气候暖干化叠加西北季风、松散沉积物等本底条件, 本即为沙化发展提供了自然基础 (徐刚等, 2007; 费怡等, 2019), 温度上升、降水减少的气候变化趋势进一步加剧了湿地萎缩与生态系统退化 (Li et al., 2025) (图 3)。

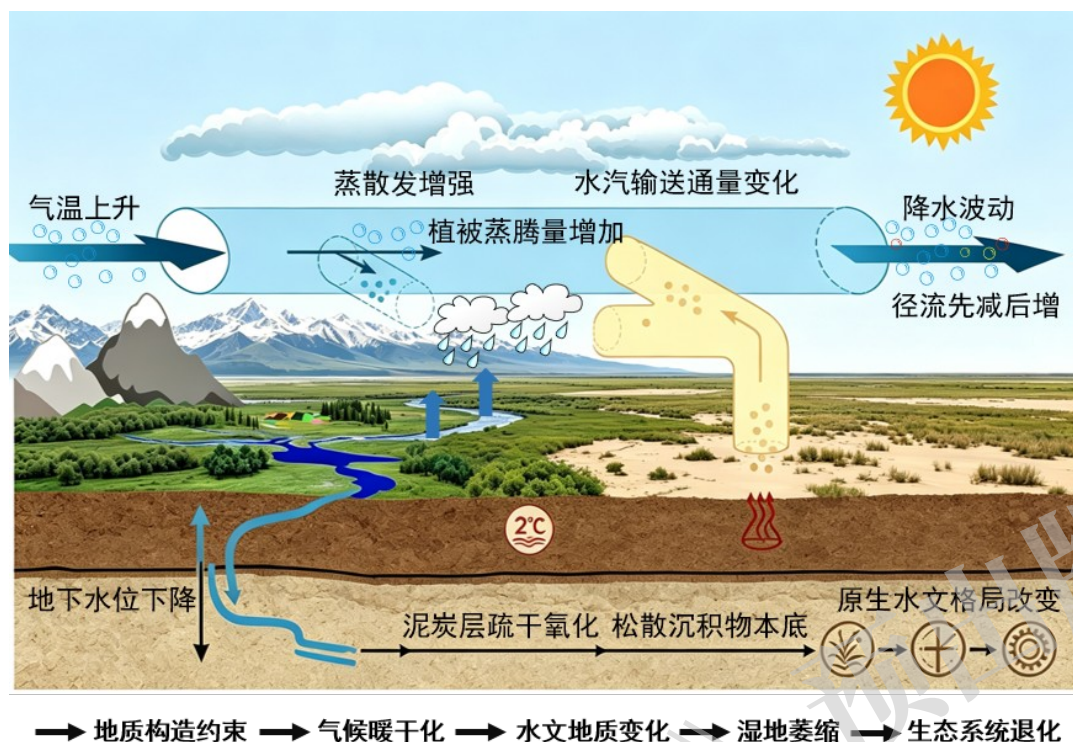


图3 自然营力驱动下的生态退化过程

Fig.3 Ecological degradation processes driven by natural and hydrogeological evolution.

2.3 人类活动与生物灾害对生态退化的加速演进

1935年红军过草地时，若尔盖湿地是近代历史里天然原生最优状态，泥炭储水、植被、水文循环均未受人类工程影响。五十年代后，开沟放牧等人类活动因素及其生物灾害则加速了地质环境与生态系统退化进程，人工沟渠持续强化侧向排水，增大泥炭层水力梯度，造成区域泥炭潜水位持续下降，大面积沼泽地下水位降至地表1 m以下，严重退化区域水位降幅可达2 m以上，泥炭层长期疏干氧化，形成大范围干化疏干带（图4）。基于1975、1990、2000、2005和2010年Landsat影像解译得到的土地利用/覆被变化监测结果证实，1975—2005年间的人为活动是区域湿地萎缩、草地退化和沙化扩张的主导驱动因素（Hu et al., 2012; Li et al., 2008）。开沟排水、过度放牧、泥炭开采等活动直接导致水地质循环变化、地下水位下降疏干，破坏植被与土壤结构，工程建设、农业开垦进一步加剧生境破碎化，同时喜马拉雅旱獭掘洞活动会加快沙斑向未沙化草地扩展，是草地沙化的重要生物驱动因素（许向宁等，2003；许向宁和李胜伟，2003；黎俊豪等，2022），而高原鼠兔的掘洞、取食行为也会对植物群落与土壤结构产生复杂影响，在退化区域会进一步放大生态受损效应（闫趁心等，2026）。各类因素共同作用下，生态问题与核心生态功能之间形成负反馈循环，湿地、草地、林地退化直接削弱水源涵养能力，而水源涵养功能衰退又反向加速生态系统退化，凸显了系统治理的必要性（许向宁等，2004a，2004b）。

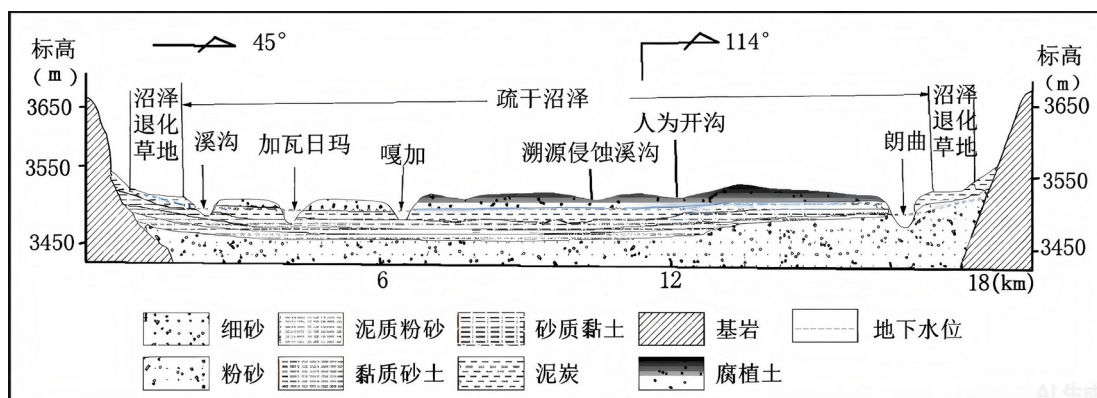


图 4 地表 - 地下水疏干与沼泽退化演化关系图

Fig. 4 Relationship between surface-water and groundwater drainage and marsh degradation evolution.

2.4 生态要素与核心功能的互馈演化关系

研究区内各类生态要素、生态问题与核心功能之间存在相互影响、相互关联的关系。从生态问题与四大核心功能价值的互馈机制来看，湿地萎缩、草地退化、林地退化会直接削弱水源涵养能力，损害“黄河上游重要水源涵养区”与“独特高原泥炭沼泽湿地”的核心价值，造成珍稀动植物栖息地破碎化、生境退化；土地沙化、水安全隐患、耕地质量下降及地质环境破坏，则会降低“绚丽多彩的人文自然景观”价值，削弱区域生态屏障功能。水源涵养功能衰退又会进一步加剧沼泽湿地萎缩。依托 GEE 获取 1990—2020 年的 Landsat5、Landsat7 和 Landsat8 卫星影像，数据分辨率 30m，选取 6—9 月份生长季数据用于湿地的提取分析。研究包含遥感影像处理、湿地精细分类、湿地时空分布及变化特征分析、湿地分布驱动力分析。首先，通过去云处理、裁剪和中值合成生成 1990~2020 年的无云完整遥感影像；其次，基于以往研究和反复测试筛选出较为有效的特征数据集参与湿地分类，以建立的湿地分类体系为依据，将特征数据集与训练样本点相结合输入随机森林算法，获得了 1990—2020 年的湿地分类成果图。结果显示湿地的 Kappa 系数为 0.86，基于提取的湿地面积序列进行线性回归分析，结果显示湿地面积年际波动强，回归斜率为 $-2.63 \text{ km}^2/\text{a}$ ，拟合优度为 $R^2=0.23$ ，2005 年湿地面积降低最低为 3554.89 km^2 。

此外，挖沟排水与沼泽开采是构成湿地面积长期下降的主要驱动因素。受湿地退化影响，基于 2000—2020 年从国家基础地类信息中心获取的 30 m 分辨率土地利用时序数据，此次研究采用 InVEST 生境质量模型开展区域生境质量评估。模型整合土地覆被类型与生物多样性胁迫因子信息，选取耕地、道路、城镇建设用地以及河流作为主要生境胁迫因子，通过对不同土地覆被类型赋值，构建对应胁迫因子的生境敏感性参数，定量刻画各类生境受人类活动与自然环境扰动的响应程度。经模型运算得到若尔盖湿地生境质量指数，2000—2020 年间该指数由 0.72 下降至 0.68，表明研究区整体生境质量呈小幅退化态势，区域生境的维持能力有所减弱，反映出土地利用格局变化对湿地生物栖息地造成一定的胁迫影响，生境下降进而缩减生物栖息地并削弱生物多样性维持功能。区内生态问题之间、生态问题与核心功能之间、四大核心功能内部均形成负反馈循环（图 5），充分印证了山水林田湖草沙是生命共同体的科学内涵，凸显实施一体化系统治理的必要性与紧迫性。因此，若要改善项目区的生态环境质量，提升生态系统服务功能价值，需从源头上开展综合治理、系统治理，统筹实施山水林田湖草沙一体化保护和修复工程。

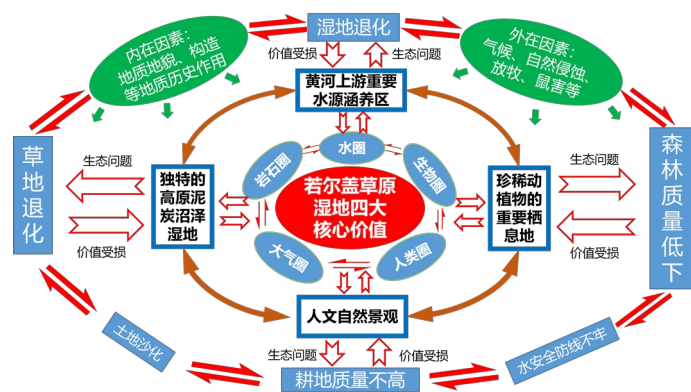


图5 若尔盖区域主要生态问题 - 功能受损 - 地质生态演化关系图

Fig. 5 Diagram of Relationships Among Major Ecological Problems

2.5 地质-生态演化对核心服务功能的支撑作用机理

地质水文过程与生态系统的互馈作用直接主导了区域水源涵养功能的形成与演化：湿地泥炭层的多孔结构具备极强的径流调节与蓄水保水能力，可实现降水的缓慢下渗与滞后补给，若尔盖湿地国家级自然保护区内单位面积水源涵养量较周边草地高出 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，基于1980年以来多期普查数据、公开数据库、文献资料及野外实测数据，构建若尔盖高寒湿地138个土壤剖面数据集，并获取90 m分辨率土壤容重数据。通过ASRIS样条插值统一土层深度至0~20 cm、20~50 cm和50~100 cm，消除多源数据土层不统一的差异。基于多层实测样本构建并验证土层间土壤有机碳机器学习模型，有效补齐深层土壤有机碳缺失数据，并评估1985、2000和2020年不同土壤深度的土壤有机碳动态。结果显示土壤有机碳的评估精度约为91%，总量由2.03 g·kg增至2.21 g·kg。（Hou et al., 2022）。

当湿地发生退化时，排水活动导致地下水位下降，泥炭层氧化分解加速，不仅会削弱区域碳汇功能，甚至可能使退化区转为碳排放源，同时土壤容重上升、透水性能下降，直接降低了径流调蓄与地下水补给能力，连通性较低的流域湿地对这一退化过程的响应更为敏感，而温度升高与人为活动叠加会进一步加速水涵养功能与固碳能力的衰减（蔡倩倩，2012；Cui et al., 2020；冉沁蔚等，2026）。区域不同生态系统的协同作用共同支撑了水源涵养、固碳释氧、生物多样性维持等核心功能的稳定发挥，为后续修复技术体系的构建提供了过程机理支撑（Wang et al., 2011；Zhang et al., 2019；李邵宇等，2022；郑鑫梦等，2026）。但当前若尔盖湿地保护修复实践多聚焦于现代水文调控、植被重建等表层干预，往往将地质条件作为基础背景予以罗列，较少基于地质-生态系统演化的山水林田湖草沙一体化生态修复理论技术支持体系，易出现修复目标与区域长期演化趋势不相匹配、分区管控缺乏底层本底约束等局限。

独特的若尔盖高寒地区生态系统通过调节水循环（如降水截留、地表径流调节等），维持了水资源的稳定性，从而为植物生长提供了保障。湿地和草地等水源涵养功能较强的生态系统为生物提供了丰富的栖息地，并通过调节区域气候条件，影响着生物多样性。丰富的生物多样性增加了生态系统固碳释氧能力，提高了生态系统的稳定性，孕育了独特的核心服务功能。

（1）水源涵养功能：若尔盖高寒湿地、草地具备径流调节、蓄水保水、水质净化、地下水补给等核心水源涵养功能，地质水文过程以降水截留、土壤储水、泥炭调蓄、下渗补地下水为主。

（2）固碳释氧功能：若尔盖高寒湿地与草地（尤其泥炭地）是青藏高原重要碳库，固碳以植被光合作用固碳、泥炭厌氧累积为主，形成长期稳定碳库。

（3）生物多样性维持功能：研究区为青藏高原东缘高寒泥炭湿地与草甸集中区，是我国生物多样性丰富而独特的关键地区之一，生物多样性的维持有助于增强生态系统对外界干扰的抵抗力与恢复能力，对于整个若尔盖地区乃至更广泛的区域生态健康和稳定都具有重要影响。

3 问题识别诊断评价与监测技术

3.1 总体思路

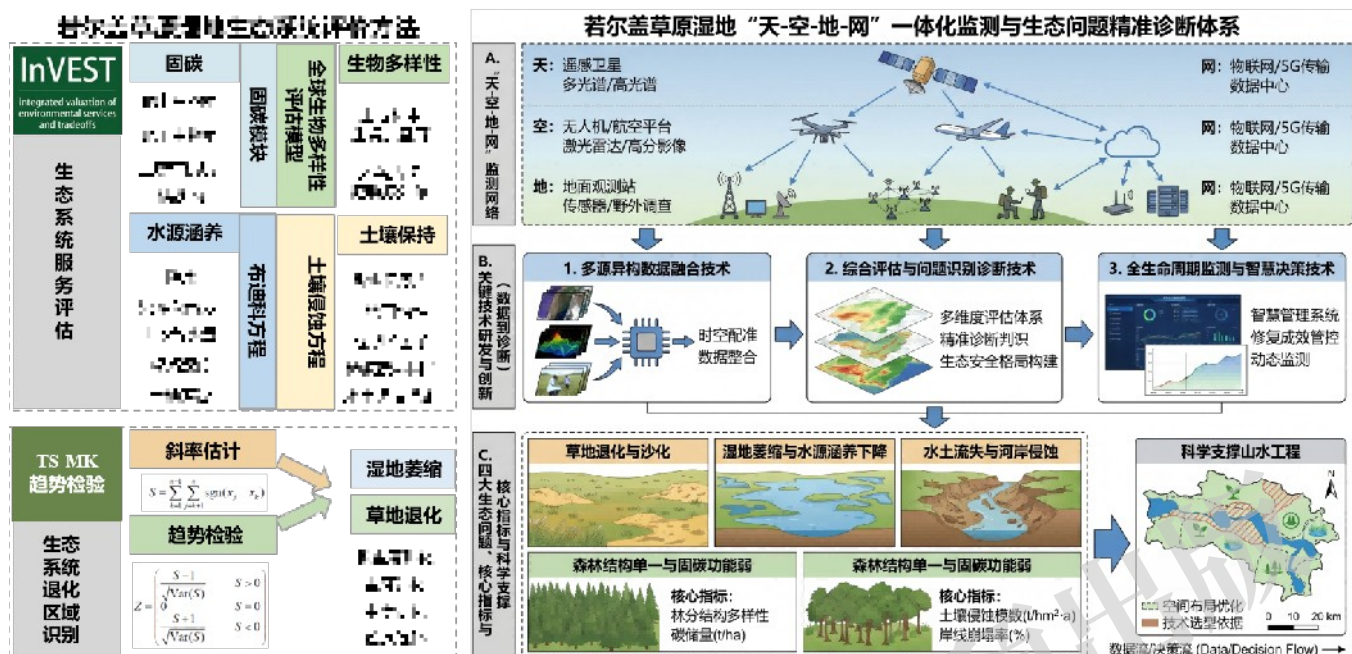
研究区是山、水、林、田、湖、草、沙耦合的高寒复合生态系统，各生态要素依托区域地质基底与地下水循环形成紧密的互馈联动机制，单一要素退化会沿水文、土壤、植被链条产生连锁传导效应，生态问题具备整体性、空间尺度差异性特征。仅依靠单一要素、单一类型数据无法完成全域生态问题完整诊断，因此此次研究构建覆盖多要素、多尺度、多来源的综合空间数据库以及评价方法，支撑生态问题识别与定量评价工作。针对识别诊断的生态问题进行分区分类分级评价、评价出不同区域不同类型生态问题的严重程度，以开展辩证施治精准施策，同时建立评价指标体系（雍国玮等，2003；臧正等，2014；周妍等，2021；谭世林等，2025b）。评价数据获取主要整合三类核心数据源：一是宏观卫星遥感数据，基于长时间序列 Landsat、Sentinel 影像，从县域全域尺度提取湿地、草地、沙地、林地景观分布信息；二是中微观地面实测数据，包含野外地质剖面、地下水监测井、冻土钻孔、土壤样品、植被样方点位数据，刻画生态退化内在机理；三是专题辅助数据，涵盖 DEM 地形、地层冻土矢量图、长序列气象监测数据、历史文献、山水工程规划资料，补充地质约束与长时间维度演变依据。最后结合研究区域的生态系统现状，对研究区主要生态环境问题进行综合诊断与分析评价。

3.2 技术方法

此次研究采用 InVEST 模型评估区域生态系统固碳、水涵养、土壤保持以及生物多样性维持服务，评价模型数据利用包含土地利用栅格、数字高程模型 DEM、气象数据集、土壤属性数据、碳密度参数、人类活动威胁源数据，所有栅格统一与研究边界后开展模块运算，得到四类生态系统服务空间栅格结果，获取各项生态系统服务模拟结果后开展定量综合评价，划分出极重度退化、重度退化、中度退化和轻度退化四类变化趋势。利用 GIS 空间可视化功能绘制单项服务空间分布图、等级分区图、综合服务空间格局图，从而识别诊断评价出研究区生态系统退化特征、空间分异规律、问题严重程度的分区分类分级评价结果。

同时，构建天空地网一体化立体化监测技术体系，融合天基卫星全域长时序观测、空基无人机高精度局部航拍、地面点位实地采样、物联网全天候实时感知四类监测手段，覆盖山、水、林、草、湖、沙生态要素与宏观、精细、原位多尺度数据采集；依托该套监测设备开展全过程动态监测，通过周期性遥感航测、不间断物联网数据回传、分时段野外复测持续获取时序数据，动态完成生态问题追踪识别与多期生态质量评价，包括基于 InVEST 模型评估区域生物多样性、水源涵养和土壤保持等关键生态系统服务，结合 Theil-Sen Median Mann-Kendall (TS-MK) 趋势分析和显著性检验，识别区域湿地萎缩和草地退化区域；同时围绕若尔盖山水工程搭建覆盖修复本底期、工程施工期、长期管护修复期的全生命周期监测模式，分阶段差异化搭配天空地网监测方案，形成工程完整周期的连续时序数据集，对比不同阶段生态状况变化，完整刻画区域生态退化与修复的全过程演化规律，实现分区分类分级评价。

针对高海拔生态系统监测与诊断的核心技术难题，开展系列技术研发与创新：一是研制高海拔生态系统关键过程数据融合技术，整合多时段、多尺度多源异构数据，实现时空配准，破解数据融合难题，具体方法为构建统一空间基准与时间序列标准，完成多源数据重采样、投影转换、时空配准、异常值剔除与偏差校正；二是研发高海拔生态系统综合评估与问题识别诊断技术，构建多维度综合评估体系，建立精准诊断判识方法与生态安全格局构建技术，解决评估不系统、问题识别不精准等难题；三是创建“天-空-地-网”一体化地理大数据采集与全生命周期监测技术，构建全流程数据支撑体系与智慧管理系统，实现生态修复全周期、全覆盖监测与智慧决策，为高海拔草原湿地生态问题精准诊断、动态监测及修复成效管控提供核心技术支撑（图6）。



S—斜率；Z—Z 值检验

图 6 生态环境问题识别评价与诊断技术体系

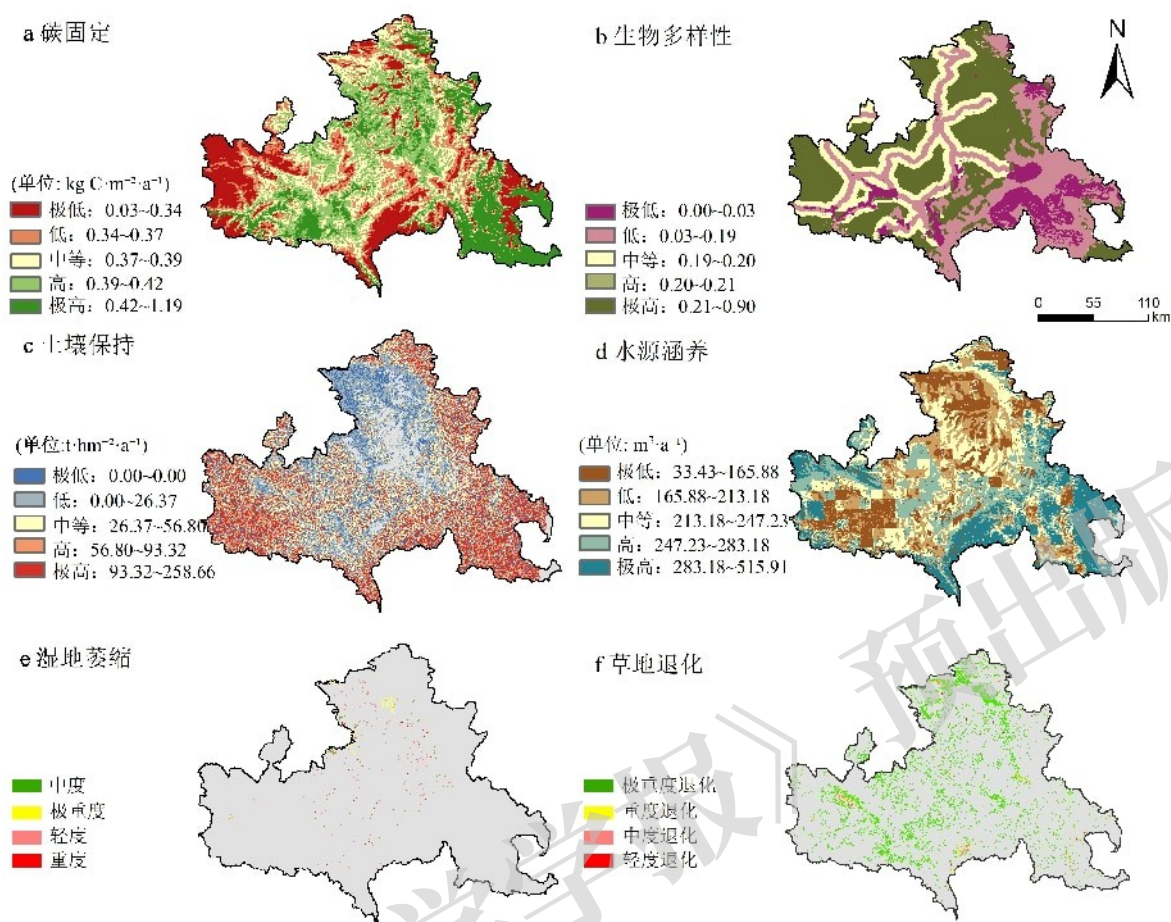
Fig. 6 Ecological Environment Monitoring and Management Technology System

S—slope; Z—Z test

3.3 诊断评价结果

研究表明 2001—2020 年整体上生态系统服务呈增加的趋势。碳固定在 $0.37\sim0.40\text{ (kg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ 的区间内浮动，序列呈“高位波动、无显著长期增减趋势”的特征，而非持续性向上或向下。生物多样性指数从 0.153 增至 0.154，约增加 0.001，约增幅 0.6% 左右，属于微弱上升。土壤保持从 48.36 增至 69.65 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)，约上升 21.29，增幅约 44% 左右，显示出明显的上升趋势但伴随波动。水源涵养从 199.07 增至 299.54 ($\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$)，约上升 100.47，增幅约 50% 左右，趋势明确但中间有大幅波动（如 2002 年的明显下跌）。研究进一步基于分位数法，本研究将区域碳固定、生物多样性、土壤保持和水源涵养划分为极低、低、中等，高，极高 5 个等级，区域生态系统服务整体处于中等以上水平（图 7）。

研究进一步基于 TS-MK 趋势分析，揭示区域生态退化的空间格局。轻度，中度，重度和极重度萎缩的湿地，面积分别为 190.12，65.76，35.12 及 118.69 km^2 。轻度，中度，重度和极重度退化的草地，面积分别为 600.76，910.25，1820.49，8374.26 km^2 。其中黑河流域存在中度湿地退化、中-重度草原退化、中-极重度土地沙化、中度矿山地质环境破坏，白河流域存在中-重度草原退化、中度水土流失、中-一重度水生态环境破坏，贾曲流域存在中-一重度湿地退化、中-一重度草原退化，长江流域大渡河、岷江、白龙江流域则分别存在不同程度的森林退化、水土流失与地质环境破坏问题。



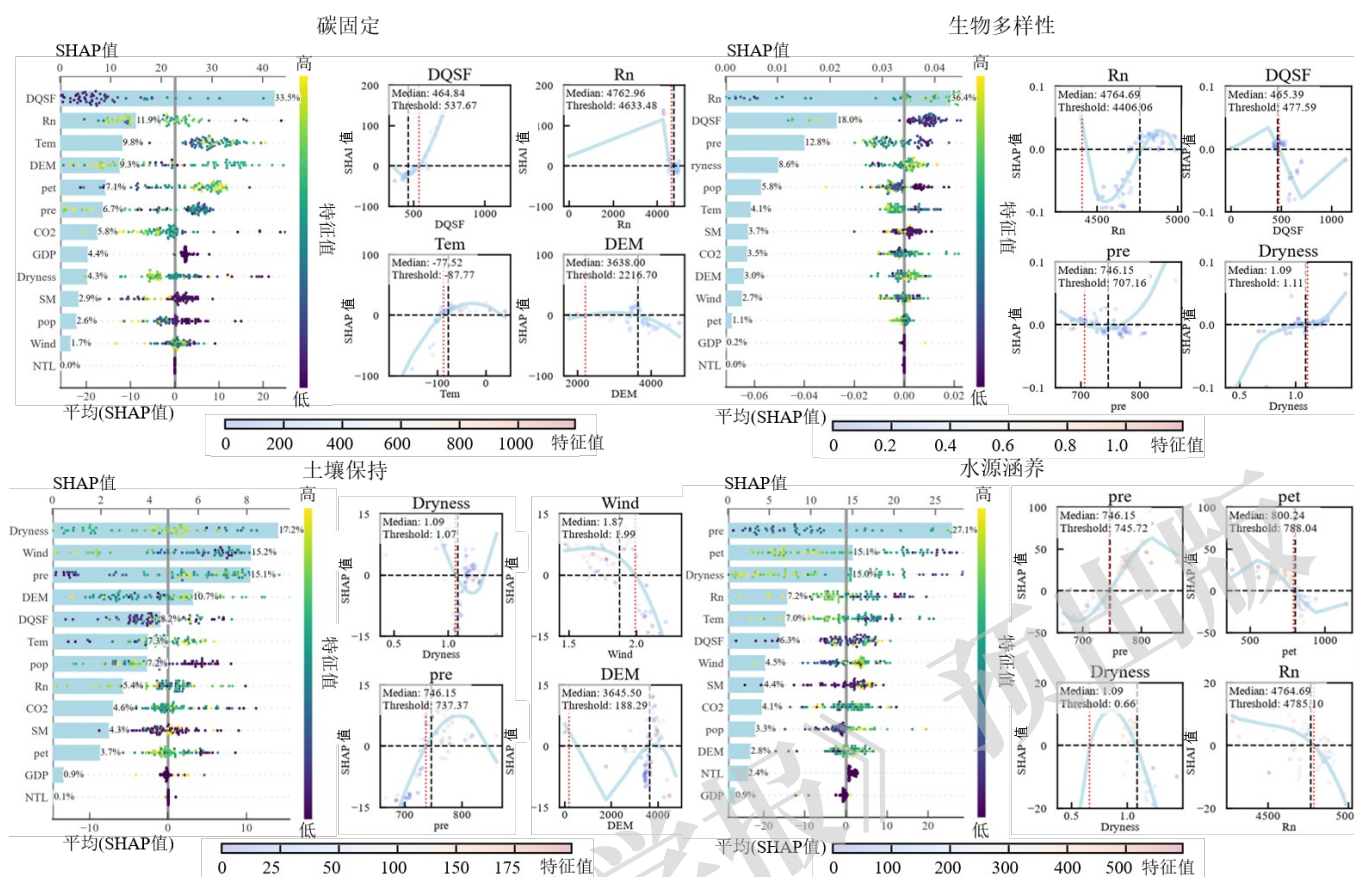
a—碳固定；b—生物多样性；c—土壤保持；d—水源涵养；e—湿地萎缩；f—草地退化
图 7 2001—2020 多年平均生态系统退化问题综合评价结果图

Fig. 7 Spatial distribution of the multi-year average of ecosystem services and ecosystem degradation from 2001 to 2020

a—carbon fixation; b—biodiversity; c—soil conservation; d—water conservation; e—wetland shrinkage; f—grassland degradation

3.4 生态退化归因分析

依托 XGBoost 和 SHAP 模型，研究表明地表粗糙度、净辐射、气温是驱动区域碳固定的关键因子，对应的响应阈值分别为 537.67、4633.48 W/m^2 和 -8.7°C ；净辐射、地表粗糙度、降水主导生物多样性空间分异，阈值依次为 4460.06 W/m^2 、477.59 和 707.16 mm；干旱指数、风速与降水为土壤保持的主要驱动因子，临界阈值分别为 1.07、1.99 和 737.37 mm；降雨、潜在蒸散发和干燥度指数是驱动水源涵养功能的重要因素，贡献度分别为 27.1%、15.1%和 15.0%。SHAP 值显示三者的阈值分别是 745.72 mm，788.04 mm 和 0.66，超过阈值时，降雨对水源涵养的影响由负转正，潜在蒸散发和干燥度的影响相反，表明了在不同的驱动条件下，变量对水源涵养的影响并非单调线性。整体来看，四类生态系统服务均表现出显著的非线性阈值效应。人口、夜间灯光、GDP 等人类活动因子的贡献度整体偏低，在 XGBoost-SHAP 重要性排序中均处于末位，表明若尔盖高寒湿地生态服务格局以自然因子主控、人为直接扰动偏弱为主要特征（图 8）。该研究也表明人为扰动是局部点位驱动，而区域大尺度生态服务空间格局主要受气候、地形等自然本底控制，两者尺度不同，并不冲突。



DQSF—地表粗糙度；Rn—净辐射；Tem—温度；DEM—高程；pet—潜在蒸散发；pre—降雨；CO2—二氧化碳浓度；GDP—地区生产总值；Dryness—干燥度；SM—土壤湿度；pop—人口；Wind—风速；NTL—夜间灯光

图8 生态退化归因分析

Fig.8 Attribution analysis of ecological degradation

DQSF—surface roughness; Rn—net radiation; Tem—temperature; DEM—elevation; pet—potential evapotranspiration; pre—precipitation-; CO2—carbon dioxide concentration; GDP—gross domestic product; Dryness—dryness; SM—soil moisture; pop—soil moisture; Wind—wind speed; NTL—wind speed

4 修复实施技术体系及其应用

以“山水林田湖草是一个生命共同体”的理念为主线，立足四川黄河上游若尔盖草原湿地独特高寒脆弱地质环境-生态特征，系统总结山水林田湖草沙一体化保护修复理论与技术，构建基于若尔盖区域地质生态演化机理的若尔盖山水工程生态修复实施技术体系。探索高寒地区生态产品价值实现路径，形成一套可推广、可复制的可持续管理模式，助力黄河上游生态保护与高质量发展，推动高寒地区生态保护、民生改善与绿色发展协同共赢。

4.1 高寒脆弱区水源涵养功能循环地质-生态演化机理与协同修复模式

立足若尔盖草原湿地独特地质-生态演化背景，结合区域内新近纪末期至第四纪隆升过程中形成的泥炭沼泽湿地禀赋，系统揭示了高寒湿地水源涵养功能区地质-生态系统关键要素的相互作用机制与演化规律，建立了山水林田湖草沙一体化系统修复与源头治理的理论-技术实施路径。研究了草原、湿地等生态要素在人类圈、大气圈、生物圈、水圈、岩石圈五大圈层长期交互演化过程中（许向宁，2003；许向宁，黄润秋，

2004; 许向宁, 王文俊等, 2004), 受地质、气候、自然侵蚀与人类活动等内外营力共同影响, 引发的土地沙化、湿地萎缩、草地退化等生态问题(付晚涛等, 2014; 赵燕洲等, 2013), 进而导致水源涵养功能、泥炭沼泽湿地、生物多样性功能及人文自然景观四大核心价值受损, 体现在山、水、林、田、湖、草、沙等要素生态遭受破坏的成因机制, 高寒湿地脆弱区生态功能退化过程及其相互作用演化规律, 以及从表及里到根到源头的修复机理, 构建了“生命共同体”山水林田湖草沙冰一体化系统修复的“理论技术—实施应用”逻辑路径(图9)。

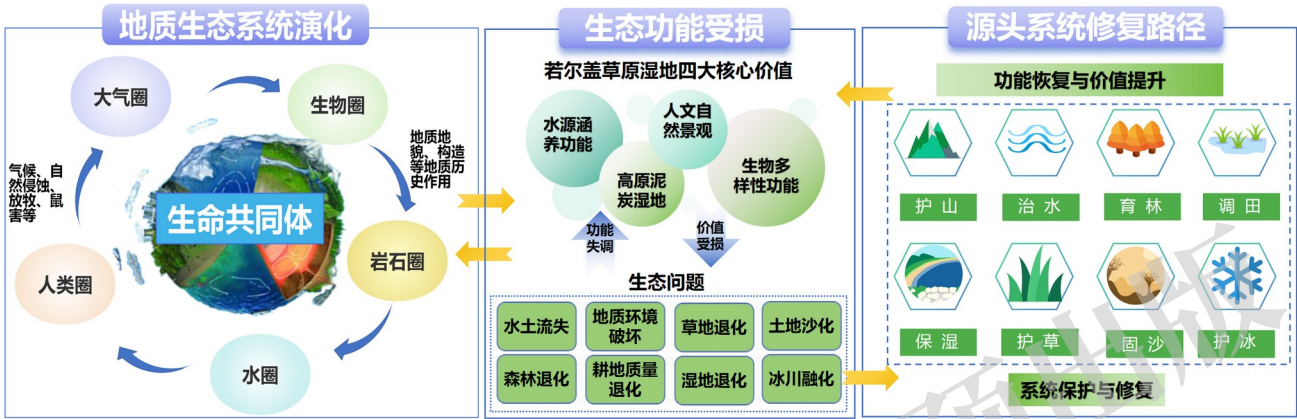


图 9 生命共同体地质生态演化与保护修复机理图

Fig.9 A schematic diagram of the geological-ecological evolution and the protection/restoration mechanisms in the biotic community.

此次研究揭示了人为疏干、过度放牧等多因子驱动下, 水位下降 - 包气带增厚 - 沙化加剧 - 水涵养与碳汇功能衰退的链式破坏机制(图10), 厘清了四大核心生态价值受损的内在逻辑。基于上述机理, 文章构建了面向山水林田湖草沙一体化生态修复的“多圈层互馈—人地协同—全生态要素循环联动”理论与实践应用框架, 提出“生态问题诊断—生态空间分区—修复模式设计—适应性管理实施”分阶段序贯联动技术路径, 确立“人工干预 - 自然恢复平衡”修复机理, 破解理论到实践的技术转化难题, 为若尔盖及同类高寒湿地水涵养功能保护修复提供了关键理论支撑与技术指引。

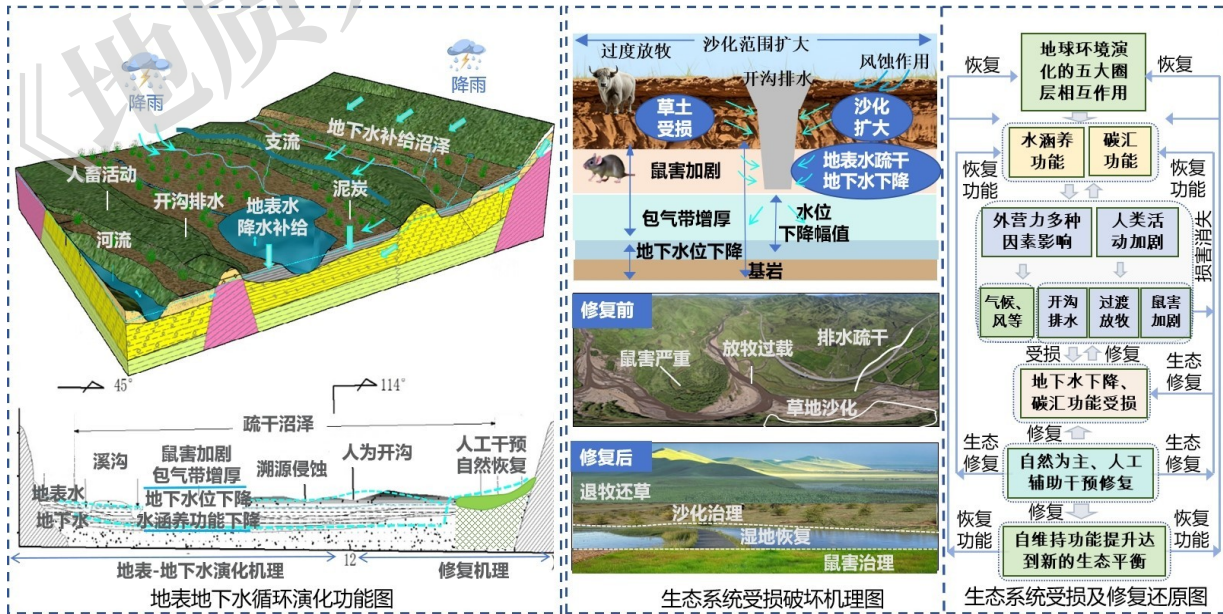


图 10 功能 - 受损破坏 - 修复还原演化图

Fig. 10 Damage and Restoration Evolution Diagram

依托前述演化机理与修复理论, 立足独特地质 - 生态本底特征, 结合若尔盖牧区、高原湿地本地易得生态

物料与本土适宜特性，构建本地化协同修复模式，所有工程措施优先选用区域原生乡土材料，在降低材料长途运输成本、适配高原低温冻融气候的同时，保障修复植被长期稳定存活，并构建了基于 NBS 的近地貌重塑 - 固沙防风 - 水涵养功能修复技术体系。整套本地化协同修复模式以恢复区域地下水循环、重建泥炭储水屏障两大核心目标，统筹湿地、高寒草地、沙地、多年冻土、山地林地多生态要素同步治理，同步达成水源涵养功能回升、泥炭碳汇恢复、退化草场提质、土地沙化遏制多重修复效益。

4.2 基于生命共同体的一体化保护修复实施体系构建

若尔盖山水工程覆盖泥炭湿地、高寒草甸、沙化土地、山地森林等多元生态单元，属于典型高寒区域系统性综合治理工程，为了从理论到实践得以实可以转化操作应用、目标得以实现，研究建立了从基础认知层的多学科交叉融合理论支撑，到修复路径设计层的问题识别精准辩证施治因地制宜自然与人工干预等相匹配技术措施、再到成效评估修复模式构建层面的动态评估与价值实现的系统性理技术体系支撑与实践路径（图 11）。

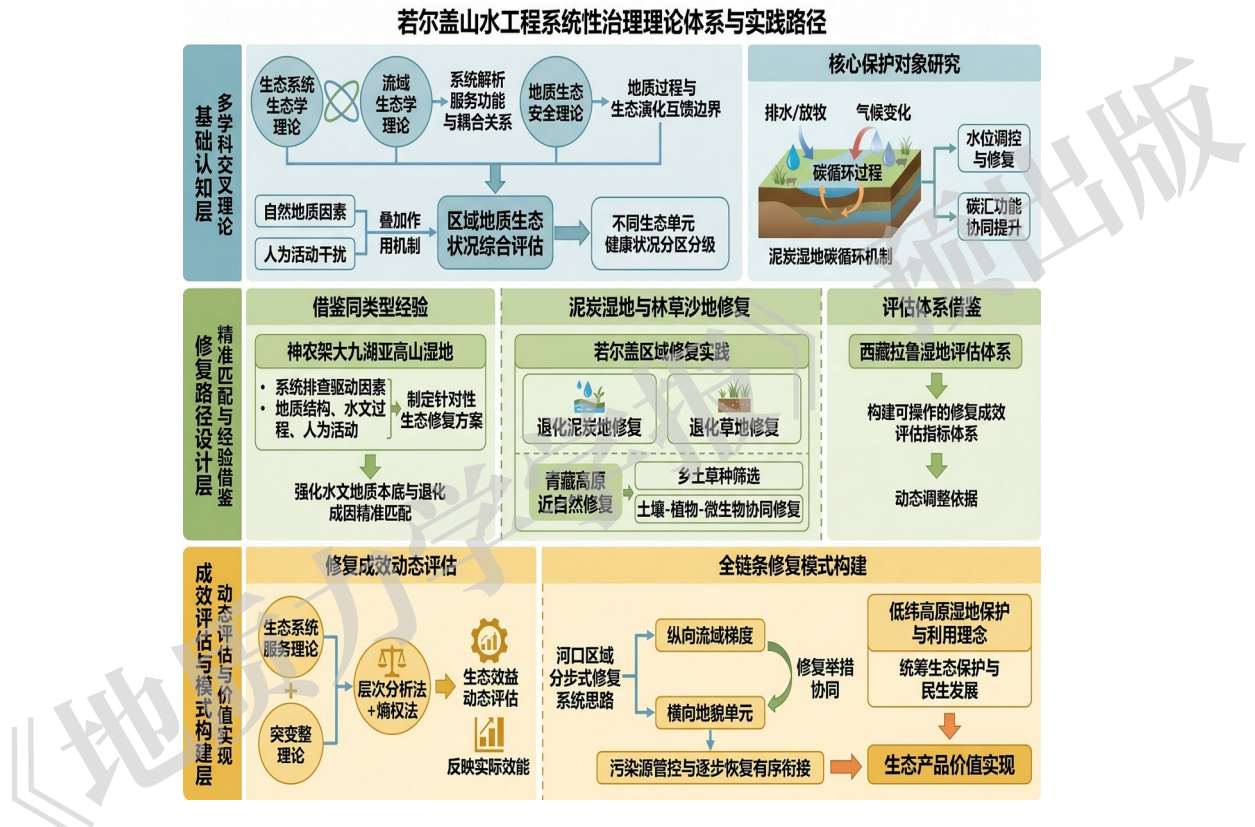


图 11 若尔盖山水工程修复理论支撑与实施路径技术体系框架

Fig. 11 Theoretical Framework of Ecological Protection and Restoration

具体以地球系统科学和自然演化规律为准则，围绕关键地质 - 生态环境问题，以四大核心功能价值提升为核心，创新构建了以地质-生态系统水源涵养功能演化互馈作用机制及其源头系统修复保护机理为核心，涵盖天 - 空 - 地一体化监测与问题识别诊断、功能材料作用机理以及碳汇多过程耦合功能提升的工程实施全链条生态修复技术体系，搭建了从地质 - 生态修复理论到实践应用的关键桥梁，系统构建了：①以问题精准识别与诊断为导向，以四大核心价值提升为目标的一体化生态保护修复总体思路；②以若尔盖草原湿地及黄河、长江源区水源涵养功能修复保护为核心的“一核两源六区”生态保护修复格局；③基于“流域特征+生态功能+生态问题+模式措施”的部署思路，形成“一湿地、六修复单元、全域监测”的子项目空间布局；④以自然恢复为主导、多种创新技术工艺相结合的修复模式与措施；⑤以若尔盖草原湿地独特生态资源可持续利用与价值提升为核心的“两山”理论转化应用模式；⑥以天空地网一体化的全生命周期、适应性管理与智慧监测技术构成的智慧支持系统；⑦以可量化考核的综合评估绩效指标体系等，从理论到实践、全链条可操作的生态修复实施技术体系（图 12）。创新构建了基于地质 - 生态系统演化地表地下水循环的水涵养功能保护修复，构建了生命共同体山水林田湖草沙一体化系统修复与源头治理从

理论到实践应用的技术实施路径和体系框架，形成了涵盖地质 - 生态系统理论支撑、问题识别诊断与本地化功能材料关键技术、碳汇功能提升的工程实施全链条生态修复技术体系。

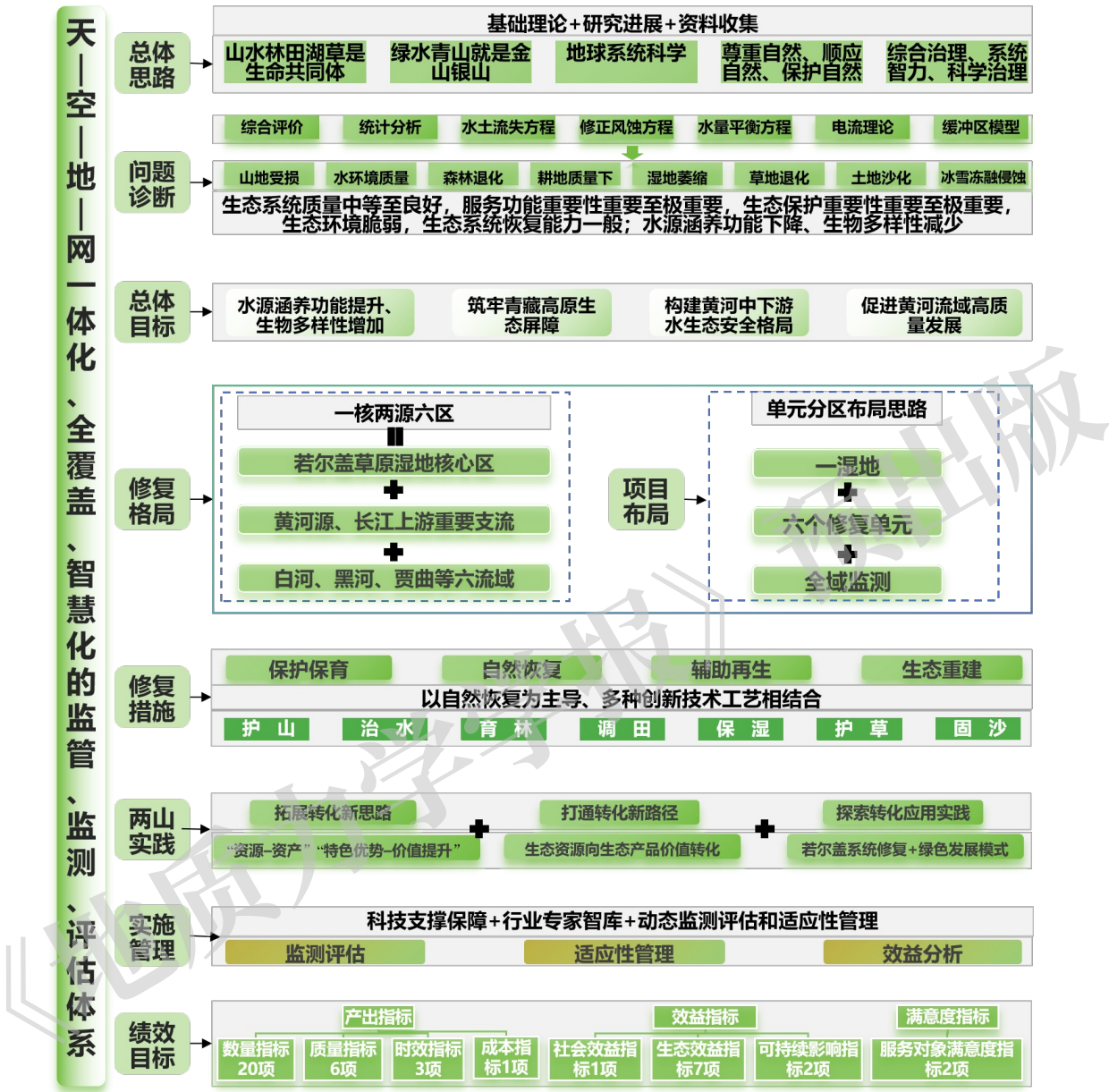


图 12 若尔盖山水工程修复实施技术体系构建图

Fig.12 A schematic diagram of the technical framework for the restoration and implementation of the Zoige Mountain-Water Project.

4.3 若尔盖山水工程一体化修复与子项目分区工程部署实施

山水林田湖草沙一体化修复技术体系是衔接与转化生态修复基础理论、理论支撑体系与山水工程落地实施的核心载体与桥梁，通过该体系能够确保实现山、水、林、田、湖、草、沙多类自然生态要素治理工程的源头性、系统性、综合性一体化有机整合，并得以具体落地应用实施（谭世林等，2025c）。

在填沟复水修复方面，针对若尔盖湿地长期人工开沟疏干导致的泥炭退化、湿地破碎化问题，采用间隔式生态堰滞蓄修复模式，对历史人工排水沟渠以 100~300 m 为间距布设生态堰体进行分段拦蓄滞水，避免沟渠完全封堵造成的局部积水淤积与泥炭厌氧损伤，最大程度契合自然水文连通规律。沟渠回填过程中严格控制回填泥炭层厚度维持在 0.3~0.6 m，压实后泥炭容重调控至 0.7~0.9 g·cm⁻³，在保障沟渠稳定、抑制持续疏干的同时，保留泥炭层天然孔隙与渗透特性，依靠泥炭介质自然透水回渗实现湿地水文自然恢复，最大程度保留高寒

泥炭湿地原生水文结构与生态功能。

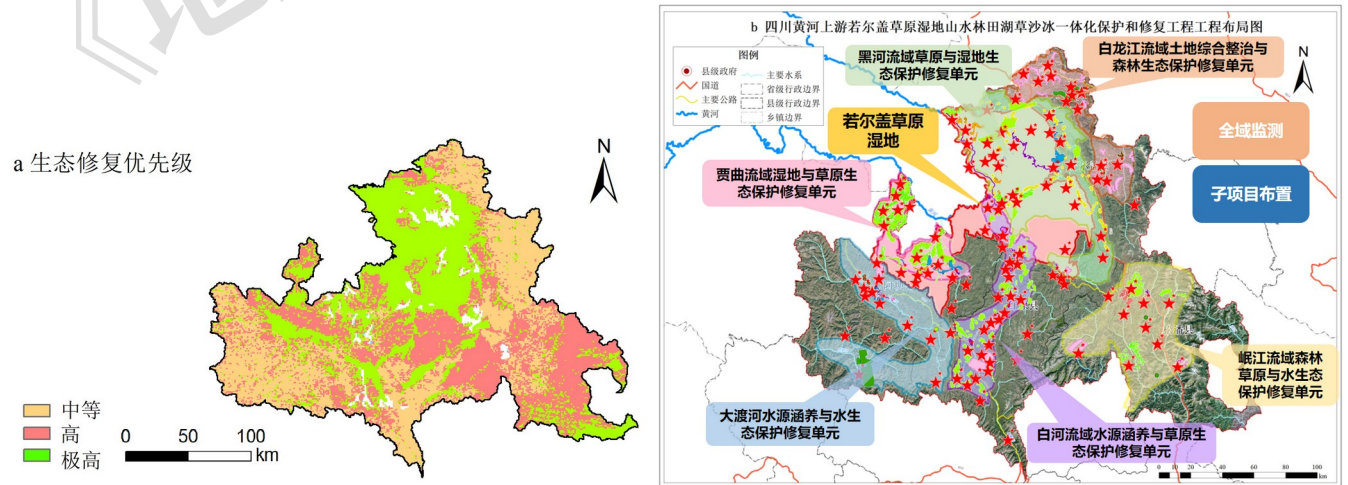
在水位精准管控方面，综合若尔盖泥炭湿地长期水碳耦合观测成果，结合高寒湿地季节性水文节律，明确泥炭沼泽生长季（5—9月）适宜地下水位埋深阈值为-5~-20 cm，即地表维持0~20 cm浅层积水状态，该水位区间可有效维持泥炭厌氧保存环境、抑制土壤有机碳分解、保障湿生植被正常生长，规避长期低水位引发的泥炭干燥退化、沙化扩张等生态问题。

在乡土植被生态修复方面，遵循适地适树、原生优先原则，筛选垂穗披碱草、老芒麦、冷地早熟禾、中华羊茅等耐低温、耐贫瘠、适配高寒湿地环境的本土草种构建复合植被群落，严格参照标准(四川省标准, 2025)实施修复；植被撒播总用量控制为22.5~37.5 kg·hm⁻²，播种深度维持3~5 cm的浅播标准，最佳播期选取5月下旬至6月中旬水热匹配窗口期，保障种子萌发与幼苗存活。修复过程中严格禁止引入高水肥需求外来物种，仅将燕麦作为短期先锋辅助物种适度配比使用，避免外来植被破坏原生群落结构。

在沙地生态固沙修复方面，针对研究区不同退化程度沙地实施差异化布设方案，流动沙地采用2 m×2 m~2 m×3 m规格的高山柳活枝沙障与植物纤维复合沙障，障体高度控制在40~60 cm，有效削减近地表风力、固定流动沙丘、拦蓄雨雪水源；对半固定、固定沙地以带状沙障布设为主，以改善微地貌、提升土壤保水能力为核心目标，全程优先采用生态可降解、原生植被扦插式固沙材料，杜绝大面积塑料沙障带来的二次生态污染。

在分区放牧管控方面，基于湿地生态敏感性差异实施分级管控，泥炭沼泽核心修复区实行不少于3年的全封闭围栏禁牧，待植被群落与泥炭水文环境初步恢复后，实施每年6—9月植被生长季季节性休牧制度；周边退化修复草地严格控制载畜量在0.7~1.2羊单位·hm⁻²·a⁻¹的合理承载力区间，同时在沼泽湿地边缘设置宽度不低于150 m的生态缓冲带，通过分区轮牧、限时放牧、定量载畜的精细化管控模式，有效缓解人畜扰动对修复区的持续胁迫，保障高寒湿地修复成效稳定维持。

采用BACI设计评估恢复效果。结果显示修复前地表水位深度分布在-60至-40 cm之间，修复后回升至-25至-10 cm；修复前土壤水分分为32%~42%，修复后提升为42%~54%；植被覆盖度由18%~35%增加至45%~65%。在退化阶段，中生-旱生群落占优的格局转变为湿生群落（如木里苔草、乌拉苔草等）并出现重要值回升。土壤有机碳作为慢变量，在本时段表现为损耗被抑制、趋向稳态。总体而言，恢复成效呈现积极趋势。研究进一步基于若尔盖高寒地区特殊气候、地质与生态特征，结合Zonation模型，以恢复水源涵养、固碳两大核心生态服务为总目标，应用该修复实施体系，依据识别生态问题及其流域单元特征、分区分类分级特征，划分6个修复单元划分、构建了39子项目并分解绩效，进行了分项工程布局落地实施（图13）。同步部署配套实施全生命周期动态监测机制与适应性管理方案，搭建从多源数据采集、生态状况动态评估到工程方案优化调整的全链条管理机制的具体应用实践。



a—分区评价图；b—保护和修复工程部署图
图13 若尔盖山水工程生态修复分区评价图及工程布局图

Fig. 13 Zoige Mountain–Water Project: Zoning, Zoning evaluation map and Subproject Construction Zoning

Deployment Diagram.

(a) Zoning evaluation map;(b) Protection and restoration engineering layout map

5 若尔盖山水工程生态产品价值实现与“两山”转化路径探索

5.1 “两山”理论转化路径总体思路

立足若尔盖高原泥炭湿地、优质草场、珍稀物种栖息地及民族人文资源禀赋，探索生态修复职称资源盘活、生态优势转化为发展优势。针对产业结构单一、生态保护与经济发展统筹难等现实问题，以系统生态修复为基础，统筹生态产业化、产业生态化，培育高原生态旅游、草畜循环农牧业、清洁能源低碳产业等新业态，构建“修复赋能价值、价值反哺保护”良性循环格局。

5.2 生态产业化与产业生态化实现路径及其案例

(1) “资源资产→利用转化”和“特色优势→价值提升”的“两山”理论转化新路径

针对项目区经济发展动力不足，生态资源价值实现路径缺乏影响生态保护的问题：①形成了以独特的高原泥炭沼泽湿地，优质草原、黄河上游重要的水源涵养区，黑颈鹤、黑鹳、东方白鹳等珍稀动植物重要栖息地，长征文化、安多文化和高原风光等人文自然景观等独特生态资源禀赋为基础，以顺应自然尊重自然的生态修复措施为撬动生态资源转化的手段方式和动力、拓宽了生态资源利用和产业化发展思路和渠道，实现资源利用到资产产业的转化；②结合生态保护修复工程，针对生态特色资源，通过整体性、系统性、协同性保护修复草原、湿地及河湖等要素，改善区域生态本底与资源承载潜力。在此基础上适度发展高原湿地生态旅游、草畜一体化生态农牧业等，探讨“生态功能改善支撑特色资源可持续利用、进而带动区域绿色发展”的可行模式。

(2) 若尔盖“两山”理论转化应用模式

针对若尔盖地区产业单一，经济发展与生态保护协调难，发展模式和动力缺乏的问题，提出以修复治理生态问题为核心，以生态功能提升、生态产业化和产业生态化、生态产品价值实现的绿色发展为目标和手段，立足生态资源向生态产品价值的转化，在识别湿地、草原等生态资源禀赋基础上，开展生态本底价值的量化评估。依托生态修复成效，培育若尔盖“系统修复—绿色发展”导向的生态产品转化示范链条。在2019—2023年山水林田湖草沙一体化治理支撑下，若尔盖生态本底持续改善，若尔盖县官方统计及工程专项效益评估报告，采用前后差值法并剥离非生态扰动因素核算。以若尔盖唐克黄河国家文化公园、巴西会议长征国家文化公园、若尔盖湿地国家公园等生态旅游示范，实现了旅游年均增收1.5亿元、旅游带动户均增收3000元；以大藏黑青稞种植、邛溪镇优质牧草种繁育基地、麦洼牦牛标准化养殖生态农牧业等生态农牧业示范，实现年均增收4亿元；以查理乡光伏治沙、高原之宝奶粉基地、阿西风力发电等生态工业示范和泥炭沼泽湿地保护利用示范，实现了清洁能源利用年均增收1.1亿元等为示范带动推广。上述增量均为生态修复带来的间接产业赋能效益，区别于工程直接生态效益与县域综合经济增长，是高寒湿地生态治理推动“两山”价值转化的典型示范成果。形成黄河上游草原湿地特色产业示范带，为此总结构建了“草原泥炭湿地文自然多要素特色生态旅游业”“草畜一体化高原特色生态农牧业”“清洁能源及低碳产业特色生态工业”的若尔盖“两山”理论转化实践应用新模式。为其他重要生态功能区保护修复和发展路径的选择具有示范和参考价值，为“两山”价值转化、增效探索实践了科学路径和模式和案例借鉴（图14）。



图14 若尔盖山水工程“两山”理论转化应用及其案例

Fig.14 Translation and application of ecological restoration theory

5.3 展望

若尔盖高寒草原湿地地质环境与生态系统脆弱性强、演化周期长，对气候环境变化和人为活动干扰十分敏

感。本研究虽构建了理论、监测、修复及价值转化完整技术体系，但后续进一步深化研究和具体应用，重点从三方面推进：

（1）深化退化地质-生态演化机理与本地化修复技术。揭示气候变暖、冻土消融与过度放牧、人为疏干、生物灾害的耦合驱动机制，厘清水文—泥炭—冻土互馈演化规律；优化乡土物种配置、湿地填沟复水、沙化综合治理等本地化修复技术，提升高寒生态系统自我恢复与气候适应能力。

（2）优化一体化监测预警体系。完善天一空一地一网立体监测网络，加强冻土、地下水、泥炭碳汇、生物多样性长期连续观测，结合生态模型模拟生态演化趋势，实现生态退化风险预警与修复成效智慧管控。

（3）健全生态保护与绿色发展协同机制。统筹生态保护、农牧业发展、文旅开发空间布局，完善草畜平衡与生态补偿长效机制；完善碳汇交易、生态旅游、循环农牧等生态产品价值实现路径，凝练可复制的高寒湿地系统治理与“两山”转化示范模式，为同类区域提供借鉴。

6 结论

（1）若尔盖生态问题是地质—生态本底脆弱、自然营力作用、人为干扰叠加、生物灾害频发共同作用的结果，区内生态问题之间、生态问题与核心功能之间、四大核心功能受损与地质—生态演化之间的内在关系、规律及其内部负反馈循环效应，是开展一体化系统、源头治理的理论技术支撑。

（2）地质—生态系统演化、水涵养—碳汇功能提升和人工干预—自然恢复修复、高寒草原湿地生态问题识别诊断与全生命周期监测技术为核心，形成山水林田湖草沙一体化生态修复理论技术支撑体系，可推广应用于高寒生态系统修复。

（3）依托区域独特生态资源，形成生态旅游、生态农牧业、清洁能源等特色价值转化业态，构建起生态修复赋能价值提升、价值反哺生态保护的良性格局，是同类高寒生态功能区可复制、可推广的示范样板。

作者贡献声明：许向宁负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；向国萍参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: Xiang Ning Xu conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; Guo Ping Xiang participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

- CAI Q Q, 2012. Study on soil carbon storage of Kobresia tibetica wetland in Zoige[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry (in Chinese).
- Deng Bin, Liu Shugen, Liu Shun, et al. 2013. Meso-Cenozoic tectono-thermal events and chronological framework in Zoigê area, western Sichuan[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, (2): 317-328 ((in Chinese with English abstract).
- DING L, DU P F, ZHANG F, et al., 2026. Innovative application of ecological restoration and stress-tolerant grass species in degraded grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau[J/OL]. Scientia Sinica Vitae, 1-12 (in Chinese with English abstract)[2026-08-08]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5840.Q.20260410.1109.00>. DOI:10.1360/SSV-2025-0155..
- DU Y, CAI S M, WANG X L, et al., 2008. Environmental background and ecological restoration of the Dajihu sub-alpine wetland in Mt. Shennongjia[J]. Resources

and Environment in the Yangtze Basin, 17(6): 915-919 (in Chinese with English abstract).

FEI Y, WANG J Y, WANG Z G, 2019. Quantitative analysis on land sandy desertification and its driving factors in Zoige Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 33(8): 146-152 (in Chinese with English abstract).

FU W T, LIU Z Y, QIN S, 2014. A stepwise strategy for ecological restoration of degraded estuary areas[J]. Guangxi Sciences, 21(6): 569-572, 586 (in Chinese with English abstract).

GAFFNEY P P J, TANG Q, LI Q W, et al., 2023. The impacts of land-use and climate change on the Zoige peatland carbon cycle: A review[J]. WIREs Climate Change, 15(2): e862.

GUO Y J, LIU S L, DONG Y H, et al., 2023. Evaluation index system for ecological corridor restoration effectiveness based on landscape pattern and ecosystem services[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 31(10): 1525-1538 (in Chinese with English abstract).

HOU P, ZHAI J, JIN D D, et al., 2022. Assessment of changes in key ecosystem factors and water conservation with remote sensing in the Zoige[J]. Diversity, 14(7): 552.

HUA G C, LI Y L, HUANG C Y, et al., 2005. Study on the assessment index system of the ecological restoration to the Lalu Wetland in Tibet[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 37(6): 21-26 (in Chinese with English abstract).

HU G Y, DONG Z B, WEI Z H, et al., 2012. Driving forces of land use and land cover change (LUCC) in the Zoige Wetland, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 4(5): 422-430.

IDOWU O A, MARTINS O, GBADEBO A M, 2007. Hydrological processes of interaction between surface water and groundwater - A review[J]. Journal of Environmental Sciences, 6(1): 172-190.

КОПЫЛОВ И С, 2011. Принципы и критерии интегральной оценки геоэкологического состояния природных и урбанизированных территорий[J]. География и природные ресурсы, (4): 11-18.

LI J X, 2023. Response of the biological components to climate change in the wetland ecosystem of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Highlights in Science, Engineering and Technology, 69: 199-204.

LI B, 2008. Driving factors of Zoige Wetland desertification and countermeasures[J]. Chinese Population, Resources and Environment, 18(2): 145-149 (in Chinese with English abstract).

LI S Y, 2022. Response of plant community stoichiometric characteristics to degradation in different grassland types on the Qinghai-Tibet Plateau[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University (in Chinese with English abstract).

LI X, WU K N, LIU Y N, et al., 2019. Study on ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands based on ecosystem services — A case study of Heshan District in Taihang area, southern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 39(23): 8806-8816 (in Chinese with English abstract).

LI J H, YANG Q W, PEI X J, et al., 2022. Effect of Himalayan marmot (*Marmota himalayana*) burrowing on grassland desertification in the Zoige Basin[J]. Journal of Desert Research, 42(3): 196-204 (in Chinese with English abstract).

LIU M Y, 2023. Evaluation of carbon storage and habitat quality in Hexi region based on InVEST model[D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese with English abstract).

LIU S L, DONG Y H, WANG F F, et al., 2023. Application of ecosystem service value assessment in ecological restoration[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 31(8): 1343-1354 (in Chinese with English abstract).

LU X Z, SHAO H Y, KAN Y X, et al., 2025. Estimation of land surface evapotranspiration and identification of key influencing factors in the Zoige forest-grass transition zone[J]. Land, 14(4): 805.

QI D M, LI Y Q, ZHOU C Y, et al., 2025. Analysis of runoff variation characteristics and influencing factors in the Zoige Wetland region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 47(1): 14-29 (in Chinese with English abstract).

RAN Q W, XUE K, HU R H, et al., 2026. The spatiotemporal patterns and regulating role of connectivity in alpine wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Scientia Sinica Terrae, 2026,56,(6):2225-2237 (in Chinese with English abstract).

SHANG M, JIAYANG J C, LIU H T, et al., 2024. Quantitative study on evolution characteristics and driving factors of grassland desertification in Zoige County[J]. Environmental Engineering, 42(12): 43-51 (in Chinese with English abstract).

SHENGPING L, LAVRUSEVICH A, SLESAREV M, et al., 2020. Research on the concept and evaluation method of geo-ecological security[C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1001(1): 12106-12112.

Sichuan Provincial Standard. Technical Specification for Artificial Grassland Establishment in Pastoral Areas of Northwest Sichuan: DB51/T 1304-2025[S].2025.

- SUN P A R, REN H, JIA X, et al., 2026. Research situation of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands-deserts[J]. *Journal of Desert Research*, 46(1): 318-330 (in Chinese with English abstract).
- TAN S L, LIU T, XIONG X, et al., 2025a. Study on ecological restoration technology of Zoige alpine grassland wetland[J]. *Environmental Science and Management*, 50(10): 161-166 (in Chinese with English abstract).
- TAN S L, XIANG G P, LIU T, et al., 2025b. Characteristics and existing problems of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands-deserts elements in Zoige grassland wetland[J]. *Environmental Protection Science*, 51(4): 69-78 (in Chinese with English abstract).
- TAN S L, XIANG G P, XIONG X, et al., 2025c. Zoning and restoration unit division for ecological restoration of Zoige grassland wetland[J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 41(2): 222-231 (in Chinese with English abstract).
- TU M C, LU H F, SHANG M, 2021. Monitoring grassland desertification in Zoige County using Landsat and UAV image[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(6): 5789-5799.
- WANG Z B, LI J X, GUO Y Q, et al., 2019. Model of ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in the Qinghai-Tibet Plateau — A case study of Lhasa River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(23): 8966-8974 (in Chinese with English abstract).
- WANG Y, LIU G D, HU H L, 2011. Simulation on the water transporting process in Zoige Wetland SPAC system and its eco-hydrological effect[J]. *Advanced Materials Research*, 356-360: 2556-2561.
- WANG Z, SUN F H, YANG T, et al., 2025. Wind erosion control of bare surface soil in arid mining area by cyanobacterial inoculation and biochar amendment[J]. *CATENA*, 250: 108765.
- WU S X, 2022. Landscape renewal design of urban wetland park in low latitude plateau[D]. Liaocheng: Liaocheng University (in Chinese with English abstract).
- XIAN W, XIANG Z Y, LIU L Y, et al., 2015. Monitoring spatial-temporal change of land desertification in a fragile subalpine rangeland eco-environment: A case study from China[J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 21(3): 223-234.
- XU G, ZHAO Z Z, WANG Y, et al., 2007. Remote-sensing dynamic monitoring of sand-and rock-desertification of the Zoigê Plateau basin, northern Sichuan[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 979-986 (in Chinese with English abstract).
- Xu X N, Huang R Q, Qin J L. 2003a. Eco-environmental geological survey and applications of the 3S system-A case study of the eco-environmental geological survey of the Anning River valley, southern Sichuan[J]. *Geological bulletin of China*, 22: 999-1005 (in Chinese with English abstract).
- Xu X N, Li S W. 2003b. Develop an Ecologic Environmental Geological Survey in the Anning River Basin by New Ideas[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 23: 216-219 (in Chinese with English abstract).
- Xu X N. 2003c. The eco-geological environment comprehensive exploitation and protection Anning River[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, (3): 5-9 (in Chinese with English abstract).
- Xu X N. 2004a. Main eco-environmental geological problems and their effects in Anning River Basin, upper reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Mountain Science*, (5): 572-577 (in Chinese with English abstract).
- Xu X N, Wang W J, Huang R Q. 2004b. Evaluation of eco-environmental geological quality in Anning River area based on GIS technology[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, (3): 243-248 (in Chinese with English abstract).
- Xu X N, Huang R Q. 2004c. An analysis of dynamic evolution of the eco-geological environment in the Anninghe River watershed in western Sichuan Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (5): 31-34 (in Chinese with English abstract).
- Xu X N. 2004d. Eco-environmental geological issues and effects in Anning River Upper Yangtze[J]. *Journal of Mountain Science*, (5): 572-577 (in Chinese with English abstract).
- Xu X N, Zhang D D, Xiang G P, Li X P. 2023. Comprehensive ecological restoration of mountains, rivers, forests, fields, lakes and grasslands[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 34(2): 109-113 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Xiangning, Xiang, Guoping, and Song, Changqing. 2026. Ecological Restoration in the Upper Reaches of the Yellow River and Demonstration of Territorial Spatial Pattern Optimization[D]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Xu, Xiangning., Wu, Y., Wang, K., Bai, S., Qian, J. (2026). Electron-flow-driven redox cycling in CN-supported CoFe₂O₄ enables intensified peroxymonosulfate activation for tetracycline degradation. *Environmental Research* 306, Part 3, 125322.
- YAN C X, WANG D, YANG X, et al., 2026. Research progress on the ecology of plateau pika (*Ochotona curzoniae*)[J/OL]. *Sichuan Journal of Zoology*, 45(3): 336-347 (in Chinese with English abstract).
- YONG G W, SHI C C, QIU P F, 2003. Dynamic monitoring of grassland desertification and wetland shrinkage in the northwestern Sichuan Plateau based on remote

sensing[J]. Journal of Mountain Science, 21(6): 758-762 (in Chinese with English abstract).

ZANG Z, ZHENG D F, SUN C Z, et al., 2014. Evaluation of wetland ecological benefit and restoration in the natural reserves of western Jilin Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 25(5): 1447-1454 (in Chinese with English abstract).

ZHANG Y F, MA A Z, ZHUANG G, et al., 2019. The acetotrophic pathway dominates methane production in Zoige alpine wetland coexisting with hydrogenotrophic pathway[J]. Scientific Reports, 9: 19675.

ZHAO Y Z, XUE C X, YANG Y H, 2013. Research on ecological restoration technology of alpine grassland along Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 30(7): 90-94 (in Chinese with English abstract).

ZHENG X M, FU H S, LI J P, et al., 2026. Warming and wetting climate intensifies the evolution of meandering rivers in the source region of the Yellow River[J/OL]. Advanced Engineering Sciences, 1-15[2026-08-08]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20260421.1243.00>. (in Chinese with English abstract).

ZHOU R, 2025. Effects of restoration years on soil aggregates and organic carbon components in alpine desertified grassland[D]. Nanchong: China West Normal University (in Chinese with English abstract).

ZHOU Y, CHEN Y, YING L X, et al., 2021. Technical framework for ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands[J]. Earth Science Frontiers, 28(4): 14-24 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

蔡倩倩, 2012. 若尔盖高寒嵩草甸湿地土壤碳储量研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院.

邓宾, 刘树根, 刘顺, 等, 2013. 川西若尔盖地区中—新生代构造—热事件及其年代学框架[J]. 地球科学(中国地质大学学报), (2): 317-328.

丁励, 杜鹏飞, 张菲, 等, 2026. 青藏高原退化草地生态修复与耐逆草种创新应用 [J/OL]. 中国科学: 生命科学, 1-12[2026-08-08]. <https://link.cnki.net/urlid/11.5840.Q.20260410.1109.00>. DOI:10.1360/SSV-2025-0155.

杜耘, 蔡述明, 王学雷, 等, 2008. 神农架大九湖亚高山湿地环境背景与生态恢复[J]. 长江流域资源与环境, 17(6): 915-919.

费怡, 王继燕, 王泽根, 2019. 若尔盖高原土地沙化及其成因定量分析[J]. 干旱区资源与环境, 33(8): 146-152.

付晚涛, 刘正一, 秦松, 2014. 入海河口退化生境阶梯式生态修复策略构想[J]. 广西科学, 21(6): 569-572, 586.

郭玉佳, 刘世梁, 董玉红, 等, 2023. 基于景观格局和生态系统服务的生态廊道修复成效评估指标体系[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 31(10): 1525-1538.

华国春, 李艳玲, 黄川友, 等, 2005. 拉萨拉鲁湿地生态恢复评价指标体系研究[J]. 四川大学学报 (工程科学版), 37(6): 21-26.

黎俊豪, 杨晴雯, 裴向军, 等, 2022. 旱獭 (*Marmota himalayana*) 掘洞对若尔盖盆地草地沙化的影响[J]. 中国沙漠, 42(3): 196-204.

李邵宇, 2022. 青藏高原不同草地类型植物群落化学计量特征对退化的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学.

李潇, 吴克宁, 刘亚男, 等, 2019. 基于生态系统服务的山水林田湖草生态保护修复研究: 以南太行地区鹤山区为例[J]. 生态学报, 39(23): 8806-8816.

刘梦园, 2023. 基于 InVEST 模型的河西地区碳储量与生境质量评价[D]. 兰州: 兰州大学.

刘世梁, 董玉红, 王方方, 等, 2023. 生态系统服务价值评估在生态修复中的应用[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 31(8): 1343-1354.

齐冬梅, 李跃清, 周长艳, 等, 2025. 若尔盖湿地区域径流变化特征及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 47(1): 14-29.

冉沁蔚, 薛凯, 胡容海, 等, 2026. 青藏高原高寒湿地时空格局及连通性的调节作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2026, 56(6): 2225-2237.

尚闽, 加羊甲措, 刘洪涛, 等, 2024. 若尔盖县草原沙化演变特征与驱动因素定量研究[J]. 环境工程, 42(12): 43-51.

四川省标准. 川西北牧区人工草地建植技术规程: DB51/T 1304-2025[S]. 2025.

孙平安然, 任珩, 贾信, 等, 2026. 山水林田湖草沙研究态势[J]. 中国沙漠, 46(1): 318-330.

谭世林, 刘涛, 熊西, 等, 2025a. 若尔盖高寒草原湿地生态修复技术研究[J]. 环境科学与管理, 50(10): 161-166.

谭世林, 向国萍, 刘涛, 等, 2025b. 若尔盖草原湿地山水林田湖草沙各要素特征及存在问题[J]. 环境保护科学, 51(4): 69-78.

谭世林, 向国萍, 熊西, 等, 2025c. 若尔盖草原湿地生态修复分区及修复单元划分研究[J]. 广西科学院学报, 41(2): 222-231.

王振波, 李嘉欣, 郭义强, 等, 2019. 青藏高原山水林田湖草生态保护修复模式: 以拉萨河流域为例[J]. 生态学报, 39(23): 8966-8974.

吴双秀, 2022. 低纬高原城市湿地公园景观更新设计[D]. 聊城: 聊城大学.

徐刚, 赵志中, 王燕, 等, 2007. 川北若尔盖高原盆地沙漠化、岩漠化遥感动态监测研究[J]. 地质通报, 26(8): 979-986.

许向宁, 黄润秋, 秦举礼, 2003. 生态环境地质调查与 3S 技术应用生态环境地质调查为例[J]. 地质通报, (Z1): 999-1005.

许向宁, 李胜伟, 2003. 以创新的思路开展长江上游安宁河流域生态环境地质调查四[J]. 川地质学报, 23(04): 216-219.

许向宁, 2003. 安宁河流域生态地质环境综合开发与保护[J]. 地质灾害与环境保护, 14(03): 5-9.

- 许向宁. 2004a. 长江上游安宁河流域主要生态环境地质问题及其效应[J]. 山地学报, (5): 572-577.
- 许向宁, 王文俊, 黄润秋. 2004. 基于 GIS 的安宁河流域生态环境地质质量评价[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), (03): 243-248.
- 许向宁, 黄润秋. 2004. 川西安宁河流域生态地质环境动态演化分析[J]. 水文地质工程地质, (05): 31-34.
- 许向宁. 2004b. 长江上游安宁河流域主要生态环境地质问题及其效应[J]. 山地学报, (05): 572-577.
- 许向宁, 张丹丹, 向国萍, 等, 2023. 山水林田湖草综合生态修复研究综述[J]. 地质灾害与环境保护, 34(2): 109-113.
- 许向宁, 向国萍, 宋长青等, 2026. 黄河上游生态修复与国土空间格局优化示范[M]. 北京: 科学出版社.
- 闫趁心, 汪典, 杨雪, 等, 2026. 高原鼠兔生态学研究进展[J]. 四川动物, 45,(3): 336-347.
- 雍国玮, 石承苍, 邱鹏飞, 2003. 川西北高原若尔盖草地沙化及湿地萎缩动态遥感监测[J]. 山地学报, 21(6): 758-762.
- 臧正, 郑德凤, 孙才志, 等, 2014. 吉林西部自然保护区湿地生态效益及生态恢复评价[J]. 应用生态学报, 25(5): 1447-1454.
- 赵燕洲, 薛春晓, 杨印海, 2013. 青藏铁路路域高寒草原生态修复技术研究[J]. 铁道工程学报, 30(7): 90-94.
- 郑鑫梦, 付鸿声, 李金钊, 等, 2026. 暖湿气候加剧黄河源区弯曲河道演变 [J/OL]. 工程科学与技术, 1-15[2026-08-08]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20260421.1243.00>.
- 周锐, 2025. 高寒沙化草地恢复年限对土壤团聚体及其有机碳组分的影响[D]. 南充: 西华师范大学.
- 周妍, 陈妍, 应凌霄, 等, 2021. 山水林田湖草生态保护修复技术框架研究[J]. 地学前缘, 28(4): 14-24.