

引用格式: 郑静, 李思亮, 周双飞, 岳甫均, 唐家良, 崔俊芳, 周明华. 长江上游关键生态脆弱区与水电集中开发区气候变化适应性生态修复进展[J]. 山地学报, 2026, 44(1): 1-15.

ZHENG Jing, LI Siliang, ZHOU Shuangfei, YUE Fujun, TANG Jialiang, CUI Junfang, ZHOU Minghua. Review of progress in climate-adaptive ecological restoration in key ecologically fragile and hydropower concentrated development area of the upper Yangtze River, China [J]. Mountain Research, 2026, 44(1): 1-15.

长江上游关键生态脆弱区与水电集中开发区 气候变化适应性生态修复进展

郑静¹, 李思亮², 周双飞³, 岳甫均², 唐家良¹, 崔俊芳¹, 周明华^{1*}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610213;
2. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072; 3. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司, 成都 610051)

摘要: 长江上游是国家战略级水电能源基地和生态安全关键屏障, 兼具高强度开发压力与气候敏感性的双重特征, 亟需开展系统性生态修复。本文全面评估了长江上游生态环境本底特征, 总结了近半个世纪水电开发对流域生态系统的累积效应, 深入探讨了气候变化与工程叠加效应下流域生态系统风险演化。研究发现: (1) 流域生态修复面临结构性矛盾, 受“源-汇”格局破碎化制约, 面源污染拦截效率不足, 亟需构建基于“源-过程-汇”全链条调控的修复范式; (2) 从系统认知革新、核心技术创新、管理保障优化三个维度, 构建了“气候变化-水电开发-生态脆弱性”三重耦合的适应性生态修复的理论框架, 提出了复合压力场景下流域可持续治理的协同路径; (3) 通过技术效能评估发现, 现有修复措施对极端气候事件的响应能力存在短板, 建议构建包含气候适应性的动态评估指标体系, 推动修复策略向“监测-评估-调整”闭环模式转型。建议今后在长江上游干流及其重要支流进一步扩大生态调度范围, 强化应用基础研究、技术开发与示范推广, 建立健全长效稳定的生态环境综合监测和评估机制, 为国家和区域宏观调控提供科技支撑。

关键词: 长江上游; 生态脆弱区; 水电开发; 气候变化; 适应性生态修复

中图分类号: X171.4

文献标志码: A

长江上游(长江源头至湖北宜昌江段)是长江经济带生态安全格局中的核心枢纽, 覆盖青、藏、川、渝、滇等9省(自治区、直辖市), 流域面积约 $100 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。区域内已知水能资源蕴藏量达 $21\ 857 \times 10^4 \text{ kW}$, 可开发量达 $17\ 075 \times 10^4 \text{ kW}$, 水能资源丰富, 是中国“双碳”目标下主要的清洁能源基地^[1]。

然而, 该区域叠加青藏高原复合侵蚀带、西南岩溶石漠化区、西南山地农牧交错区、南方红壤丘陵区

等生态脆弱区^[2], 水电开发等水资源开发利用活动引发的生态累积效应, 如水土流失、生物多样性下降、水环境恶化等问题日益凸显^[3-5]。

气候系统变异显著加剧了流域生态风险的不确定性。1961—2020年, 长江上游地区平均气温以 $0.20 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$ 速率上升(全球同期为 $0.17 \text{ }^\circ\text{C}/10\text{a}$)^[4], 导致极端强降水事件增多、年降水日数减少、季节性干旱加剧等, 加剧了长江上游生态敏感性和脆弱

收稿日期(Received date): 2025-05-12; 改回日期(Accepted date): 2026-02-07

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划(2023YFF0806002); 国家自然科学基金联合基金(U22A20562)。[National Key Research and Development Program of China (2023YFF0806002); Joint Funds of National Natural Science Foundation of China (U22A20562)]

作者简介(Biography): 郑静(1995-), 女, 山西临汾人, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 农业面源污染防治与生态修复。[ZHENG Jing (1995-), female, born in Linfen, Shanxi Province, Ph. D., associate professor, research on agricultural non-point source pollution control and ecological restoration] E-mail: zhjing@imde.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 周明华(1983-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 农田碳氮循环与面源污染防控。[ZHOU Minghua (1983-), male, Ph. D., professor, research on carbon and nitrogen cycling and non-point source pollution control] E-mail: mhuzhou@imde.ac.com

从结果来看, CNKI 文献的核心节点集中在“长江上游”“水电开发”“生态修复”“气候变化”, WOS 文献中关键节点“Yangtze River”“climate change”“impact”“ecological restoration”与国内高频关键词呼应, 但围绕这些核心节点的关联词汇更丰富, 且共现强度与网络密度更高, 显示国际研究在议题拓展与交叉关联上更为深入。突现词谱表明, 国内外研究重点逐步从传统的开发向气候变化响应转变, 但针对“水电开发与气候风险的耦合影响”研究极为有限, 尚未形成系统性的理论与实践框架。

2 长江上游生态脆弱区及水电集中开发区生态环境现状

2.1 长江上游生态脆弱区现状

长江上游流域主要包括长江源区(14%)、四川盆地周边山地丘陵区(9.9%)、喀斯特岩溶区(33.4%)和干热河谷区(7.8%)四类典型生态脆弱区^[2, 8](图2)。其中, 喀斯特岩溶区与干热河谷区的水电站分布密度最高, 水电开发与生态脆弱叠加效应显著。

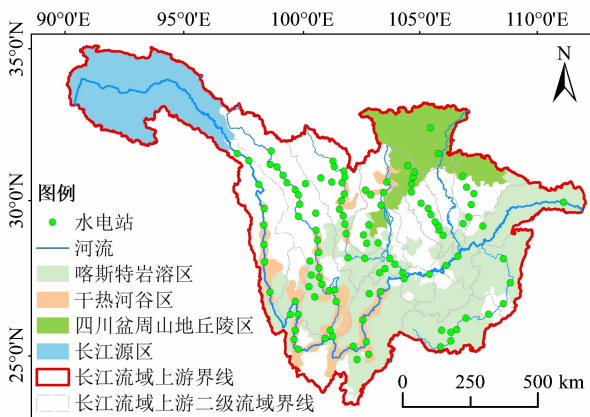


图2 长江上游流域生态脆弱区及水电站分布区

Fig. 2 Ecologically vulnerable areas and hydropower station distribution in the upper Yangtze River, China

(审图号:GS(2024)0650号)

(1)长江源区指通天河直门达水文站以上长江干支流的集水区域, 地处青藏高原东缘高山峡谷地带。生态系统类型多样, 涵盖森林、高寒灌丛草甸、高寒草原、高寒荒漠及沼泽湖泊等, 生物多样性资源丰富, 但生态本底脆弱。当前主要生态问题表现为森林植被退缩、草场退化、野生动植物种类与数量锐

减、水源涵养功能下降等^[9]。

(2)四川盆周山地丘陵区南临长江干流, 北接陕甘, 西起平武、北川一线, 东至渠江流域西界。区域内地质构造复杂, 地貌以丘陵、低中山、中山峡谷及高原为主。作为四川省重要粮食产区, 该区农业人口密集、人地矛盾突出、陡坡垦殖普遍, 加之广泛分布的紫色土与黄壤抗蚀性弱、易风化, 导致水土流失严重、生态环境恶化等问题^[10]。

(3)喀斯特岩溶区主要分布于贵州大部及桂、滇、川、鄂、湘等省部分地区。该区特有的地表-地下二元结构与孔隙-裂隙-管道三重介质, 导致降水-地表水-地下水转换迅速、养分循环过程敏感, 生态系统先天脆弱。在人口超载(2.29亿)与脱贫攻坚人口众多(2900万)的双重压力下, 生态环境退化问题突出, 部分修复区出现石漠化复发或加重现象^[11]。

(4)干热河谷区主要分布于金沙江、雅砻江、怒江、澜沧江等横断山区河流的河谷地带。该区年降水量稀少、蒸发强烈, 焚风效应明显。旱季(11月至翌年5月)降水仅占全年降水的10%~20%, 连续无雨期长达7个月, 水热矛盾在植物生长期尤为突出, 导致植被覆盖稀疏、水土流失严重、肥力持续流失, 生态系统稳定性差^[12]。

2000年以来, 国家在长江流域持续实施退耕还林、水土保持、湿地恢复及矿坑修复等多元生态修复工程, 覆盖上中下游多个重点区域。2018—2021年, 中央财政累计下达长江经济带生态环境保护修复与污染治理资金504亿元, 林业草原转移支付资金1203亿元, 农业面源污染治理及农村环境整治资金183亿元^[13]。随着修复措施持续推进, 流域植被覆盖率稳步提升, 水质状况显著改善(表1)。

2.2 长江上游水电开发的生态环境影响与作用机制

长江上游是中国水电开发最集中的区域, 已形成以三峡工程为核心的流域梯级水库群。截至2024年底, 大型梯级水电站总装机容量达 12×10^4 MW(表2); 预计2030年, 金沙江上游、雅砻江、大渡河流域将新增装机 3×10^4 MW, 总装机容量达 15.6×10^4 MW^[14]。梯级水电开发在提供防洪、发电、航运、供水等综合效益的同时, 显著改变河流自然水文情势。主要表现为: 天然河流连续性丧失, 原江段被分割为“河流-水库-河流”的片段化生境^[3], 进而引发河道径流减少、水环境质量恶化、生物多样

表1 2000—2024年长江上游典型生态修复工程投入与效益

Tab. 1 Investment and benefits of typical ecological restoration projects of the upper Yangtze River, China (2000 - 2024)

项目名称	投入资金/亿元	治理区域面积	生态效益
三峡库区水污染防治规划(2001) ^[15]	392	三峡库区及其上游流域	三峡库区及其上游主要控制断面水质在2010年整体上达到国家地表水环境质量三类标准。
四川省植树造林重点工程建设40年 ^[16]	约400	170 × 10 ⁴ hm ²	森林覆盖率从2000年约24%提升至2017年的38%，年水源涵养720 × 10 ⁸ t、年固碳6800 × 10 ⁴ t。
重庆长江上游生态屏障(重庆段)山水林田湖草生态保护修复工程——重庆广阳岛生态修复项目(2019—2023)	13.5	全岛	生物多样性不断丰富,全岛植被覆盖率90%以上。
湖北省长江三峡地区山水林田湖草生态保护修复工程(2018) ^[17]	102.93	湖北省宜昌市沿江8个县(市、区)、恩施州巴东县和荆州松滋市	累计完成生态农业示范区2.072 × 10 ⁴ hm ² ,长江岸线生态修复99.58 km,废弃渣堆采坑修复378.71 hm ² ,废弃工矿场地土地整治97.35 hm ² ,采矿塌陷区治理367.43 hm ² ,水土流失防治面积402.77 km ² 。
长江上游航道整治工程(2020—2022) ^[18]	5	营造鱼类栖息地85.8 × 10 ⁴ m ²	增殖放流长江鲟、胭脂鱼等珍稀鱼类64.2 × 10 ⁴ 尾,工程河段鱼类种群数量年均增长12%。
赤水河流域生态修复与保护工程(2017—2020) ^[19]	45	全流域治理面积1.2 × 10 ⁴ km ²	水质从劣V类提升至Ⅲ类,鱼类种类恢复至120种(占长江上游特有鱼类的48%),森林覆盖率从35%提升至45%。
湖北省汉江中游水源涵养区历史遗留废弃矿山生态修复示范工程 ^[17]	5.28	10.76 km ²	修复废弃矿山图斑453个。

表2 长江上游流域水电站情况

Tab. 2 Hydropower station development of the upper Yangtze River, China

生态脆弱区	总电站数/个	总装机容量/MW	大型(>250 MW)电站名称
四川盆地周边山地丘陵区	59	4326.68	紫坪铺水电站(760 MW)、太平驿水电站(260 MW)、碧口水电站(300 MW)、宝珠寺水电站(300 MW)。 银盘水电站(600 MW)、樱孜渡水电站(360 MW)、乌江渡水电站(1250 MW)、洪雅瓦屋山电站(260 MW)、铜街子水电站(600 MW)、索风营水电站(600 MW)、思林水电站(1050 MW)、三峡水电站(22 500 MW)、深溪沟水电站(660 MW)、沙湾水电站(480 MW)、沙沱水电站(1120 MW)、瀑布沟水电站(4260 MW)、彭水水电站(1750 MW)、泸定水电站(920 MW)、龙头石水电站(700 MW)、江口水电站(300 MW)、江边水电站(330 MW)、木里河梯级水电站(452 MW)、洪家渡水电站(600 MW)、构皮滩水电站(3000 MW)、龚嘴水电站(770 MW)、葛洲坝水电站(3190 MW)、东风水电站(695 MW)、大岗山水电站(2600 MW)、草街水电站(500 MW)、安谷水电站(772 MW)。
喀斯特岩溶区	207	58 706.55	阿海水电站(4750 MW)、白鹤滩水电站(13 050 MW)、二滩水电站(3300 MW)、福堂坝水电站(360 MW)、官地水电站(2400 MW)、观音岩水电站(3000 MW)、金安桥水电站(2800 MW)、锦屏一级水电站(3600 MW)、锦屏二级水电站(4400 MW)、龙开口水电站(1900 MW)、鲁地拉水电站(2160 MW)、毛尔盖水电站(420 MW)、桐子林水电站(600 MW)、向家坝水电站(6448 MW)、溪洛渡水电站(12 600 MW)。
干热河谷区	56	63 449.50	

性下降、湿地萎缩等一系列生态问题(图3)。其作用机制可从森林退化、水土流失、面源污染三个方面进行解析。

(1) 森林退化严重,水源涵养功能减退。

森林生态系统是长江上游关键的生态屏障,具有重要的水源涵养与水土保持功能^[20]。然而,水电



图3 水电开发对生态系统影响的作用机制

Fig. 3 Core mechanisms of impact of hydropower development on ecosystem

工程建设中的土石方开挖、弃渣堆砌、施工道路修筑等行为，直接占用和破坏林地，导致裸地面积增加^[21]。裸露地表土温变幅大、蒸发强烈，导致施工初期植被恢复缓慢，阻碍地表植被的再生^[22]。此外，移民安置加剧了林地占用与薪柴砍伐^[23]，电站建成后交通条件改善带动的旅游、采矿等后续开发活动，也对自然植被造成持续压力，导致森林生态功能特别是水源涵养能力显著减退^[24]。

(2) 水土流失加剧，地质灾害活动频发。

水电工程对地表的强烈扰动，叠加区域水力侵蚀、重力侵蚀及混合侵蚀的复合作用，激化了长江上游生态脆弱区的水土流失问题。以多布水电站建设为例，工程建设扰动地表面积263.87 hm²，破坏原生植被，改变下垫面物质组成与结构，地表原有水土保持功能丧失^[21]。在喀斯特岩溶区，乌江构皮滩水电站库区内地质构造复杂、地层岩性多变，滑坡等地质灾害突出^[25]；在干热河谷区，白鹤滩水电站库区中度以上水土流失面积占比达73%，坡耕地面蚀与边坡滑坡、崩塌、泥石流频发^[26]。此外，移民安置工程可能占用立地条件较差的边际土地进行开荒，坡地开垦及后续耕作中的不合理措施进一步增加地质灾害风险，诱发新的水土流失^[23]。

(3) 面源污染加剧，流域水质下降。

施工阶段，水土流失促进土壤溶质及吸附态污染物迁移，化肥、农药及有机污染物随径流进入库区，导致悬浮物及氮、磷营养盐浓度升高，水体富营养化趋势增强^[27]。运行阶段，水库为两岸农业提供灌溉保障，但伴随耕地开垦，过量的氮、磷、有机物等经地表与地下途径进入水体，农业面源污染加剧，局部区域藻类水华频发^[28]。与此同时，水库蓄水使河流生境“湖库化”，流速减缓、水体自净能力下降、营养盐滞留时间延长，污染积累效应显著^[3]。梯级开发导致的河流片段化进一步削弱了水动力条件，污染物扩散能力下降，水体恶化程度加剧^[29]。

3 生态修复技术与模式现状

生态恢复是指通过有意识干预启动或加速受损生态系统向健康、完整、可持续状态演进的过程。大型水电工程扰动区陆生生态系统的结构、组成及功能在项目实施后发生根本性改变，难以恢复至原生状态。因此，该类区域的生态恢复目标应设定为重建与自然和谐共生的人工生态系统^[30]。近年来，长江上游沿线各省针对水电开发引发的生态问题，探索并实施了一系列修复技术与绿色发展路径（图

4), 涵盖生物、工程、物化及联合修复等多种模式。

3.1 生物修复技术的植被恢复效果

生物修复主要包括自然修复与人工促进两种方式^[20, 22]。水电工程扰动区主要依据扰动分区与类型选择适宜物种进行植被重建(表3)。以西藏林芝多布水电站为例, 针对渣场区、施工生产生活区、枢纽区、交通道路区及移民安置区等不同区域特点, 因地制宜实施植被恢复措施, 可绿化面积全部绿化, 林草植被恢复率达100%, 林草覆盖率达38.1%^[21]。向家坝水电工程自2004年起逐步实施扰动区生态恢复, 经过3~5年演替, 本地物种逐步定居在人工

群落中, 植被覆盖率及物种多样性增加, 水土流失和滑坡隐患减少^[31]。然而, 工程扰动区植被生态恢复仍存在以下问题: 恢复植被与自然植被界限分明, 整体性缺失; 人工群落物种单一、结构简单, 生物多样性低; 植被种植过密导致适宜物种缺乏生存空间, 阻碍自然演替; 先锋群落演替方向不确定, 缺乏目标设计及后期监测调控^[30]。

3.2 工程措施的水土保持效果

工程措施主要包括山坡防护、沟道治理与蓄水工程三大类^[32](表4)。针对水电工程边坡开挖、施工道路及临时堆土场形成的裸露陡坡, 常采用挡土

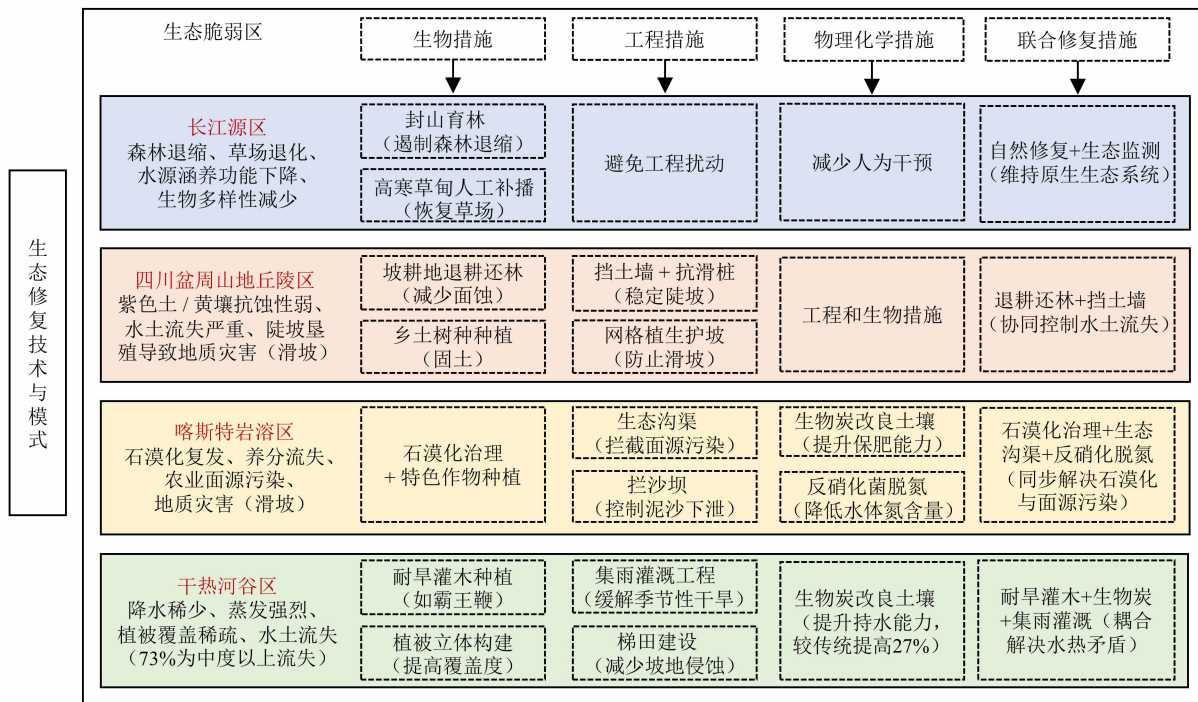


图4 生态修复技术与模式

Fig. 4 Ecological restoration technologies and models

表3 长江上游生态脆弱区水电工程建设扰动分区与植被生态恢复模式

Tab. 3 Disturbance types and ecological vegetation restoration for hydropower project construction in different ecologically vulnerable regions of the upper Yangtze River, China

工程扰动分区	扰动类型	恢复目标	先锋群落类型
工程核心区 (水电生产, 兼具生态与旅游)	岩石边坡。	增强坡地稳定性, 杜绝滑坡。	草坡配以稀疏灌丛。
工程服务区 (辅助水电生产, 兼具生活与生态)	岩石边坡、土质边坡、弃渣场、弃土场。	建设功能多样性的植被类型满足文化、休闲需求。	土质边坡主要是灌丛或草坡配以矮小乔木; 弃渣场、弃土场主要是以草坡、乔木、灌木为主。
工程过渡区 (提供物种流动的通道与临时栖息地)	弃渣场、弃土场。	保护好残留植被, 恢复遭受破坏的植被类型, 在干扰区周围形成较大规模的植被圈。	草坡、灌木、乔木。

墙、抗滑桩、网格植生护坡等措施提高边坡稳定性。乌东德水电站施工中对高位边坡实施了分级削坡与锚杆支护,并布设排水沟疏导地表径流,显著降低滑坡风险^[33]。针对施工加剧的沟蚀与泥石流风险,通过修建拦沙坝、排导槽等沟道拦蓄工程,有效控制泥沙下泄、稳定沟床。导流墙、拦砂坝、固床坝有效保护了乌东德水电站白滩沟沟道,阻止大量固体物质参与泥石流活动^[34]。为调节地表径流、减少冲刷,水电工程常在周边布设沉沙池、蓄水池等蓄水设施。云南省大盈江四级水电站水库库容小,通过增设沉沙池显著降低泥沙冲刷^[35]。然而,混凝土结构易出

现裂隙与生物附着退化,维护成本较高,揭示了生态-工程协同修复的必要性。此外,这类措施对生物栖息地连通性的长期影响尚缺乏系统评估。

3.3 物化修复技术的降污效能

物化修复技术主要用于降低水体与土壤污染物负荷(表5),重点应对施工期废水、运营期库区富营养化及底泥重金属污染等问题。在污水处理方面,将筛选的高效反硝化聚磷菌(如戈登氏菌)应用于河口湿地,可显著提升脱氮除磷效能,对总磷、硝氮、氨氮去除量分别达14.18、39.67和69.71 mg/L^[36]。在重金属污染土壤修复方面,生物炭与黏土矿物等

表4 水电工程建设区水土流失工程防治措施

Tab.4 Engineering practices of soil erosion prevention for hydropower project construction area

工程大类	水电工程典型应用分区	应用场景	措施
山坡防护工程	枢纽施工区、料场、弃渣场、施工道路边坡、移民安置区边坡。	稳定开挖和填筑形成的陡峭边坡,防止滑坡、崩塌和面蚀,保障工程安全和施工顺利进行。	挡土墙、抗滑桩、削坡开级、网格植生护坡、排水沟、护坡工程。
沟道治理工程	弃渣场下游、施工区周边自然冲沟、移民安置区排洪沟。	控制和稳定因工程扰动加剧的沟道,防止沟头前进、沟岸扩张和沟床下切,拦截泥沙,减轻泥石流风险和对下游河道的影响。	谷坊、拦沙坝、潜坝、排导槽、沟头防护、固床工程。
蓄水工程	弃渣场周边、施工场地周边、临时堆土区下游、道路两侧。	短时拦蓄地表径流,沉淀泥沙,减少冲刷,实现泥水分离;同时蓄积的水资源可回用于施工降尘、植被灌溉等,实现资源化利用。	沉沙池、蓄水池、渗塘、涝池、雨水收集池。

表5 物化修复措施

Tab.5 Physical and chemical restoration measures

污染类型	主要物化技术	修复机理	应用场景与效果	局限性
施工废水	混凝-沉淀法	投加混凝剂(如聚合氯化铝和聚合氯化铝铁),使胶体颗粒脱稳、絮凝,形成大絮体后沉降 ^[37] 。	有效去除悬浮物,净化度可达90%以上,是处理施工泥浆水、基坑排水最直接快速的方法。	产生大量污泥需后续处理;对溶解性污染物去除效果有限。
库区富营养化水体	化学脱氮除磷技术	投加除磷剂(如铝盐、铁盐、钙盐),与磷酸根形成不溶性沉淀,从而将其固定 ^[38] 。	能快速降低水体中磷浓度(去除率常>90%),从源头控制藻类生长,适用于应对局部水域水华应急治理。	过量投加可能对水生生态系统产生二次影响。
重金属污染水体/底泥	吸附技术(如活性炭、改性粘土、生物炭)	利用多孔材料的高比表面积和表面官能团,通过物理吸附/离子交换固定重金属离子 ^[39] 。	对低浓度重金属污染水体处理效果好,灵活性高。如生物炭对镉、铅等有强吸附能力,在某些工程废水中去除率可达80%以上。	吸附剂成本较高,且饱和后需更换或再生,存在后续处置问题。
	稳定化/固化技术	向重金属污染底泥中添加稳定化剂(如水泥、石灰、磷酸盐),将重金属转化为低溶解性、低迁移性的形态 ^[40] 。	能有效防止底泥中重金属的再释放和扩散,是实现污染底泥安全处置或资源化利用的前置关键技术。	长期稳定性需持续监测。
有机污染物	高级氧化技术	产生强氧化性自由基,无选择性地降解有机污染物,直至其矿化为CO ₂ 和H ₂ O ^[41] 。	适用于处理含油废水或难降解有机污染物,降解效率高、反应速度快。	处理成本高昂,设备复杂,且可能产生具有毒性的中间产物。

材料对镉、钴、铜等重金属具有显著固定化作用,最高去除率超过 75%^[42];生物炭与海泡石以 2:1 复配时,对土壤中镉和锌的钝化效果分别达 31.1% 和 23.1%^[43]。在农业面源污染控制方面,减少化肥农药的使用、添加氮肥增效剂有助于源头减排,硝化抑制剂可使 N_2O 排放量减少 39.8%^[44],脲酶抑制剂可使 NH_3 损失减少 52%^[45]。然而,上述技术在大流域尺度推广中仍面临成本高、长效性不足等挑战,其实际效果易受环境条件变化对材料寿命与微生物活性的影响。

3.4 联合修复技术的协同控污

联合修复侧重物理、化学与生物技术的耦合,以阻断地表径流与壤中流中的污染物迁移^[46]。主要技术模式包括:(1)多级可渗透反应屏障,以原位渗透处理带为主,填充活性炭、沸石、铁粉、微生物等介质,通过化学沉淀、氧化还原、吸附反应和生物降解等作用实现污染物协同修复^[47];(2)生物反应器脱氮技术,以天然(砾石等)或合成材料(塑料、纤维等)为载体,使微生物群体呈膜状附着形成生物膜,通过好氧菌吸附分解与厌氧层厌气分解,同步实现硝化-反硝化,去除有机污染物^[48];(3)联级生物滤池与生态沟渠净化技术,利用植物、微生物、吸附材料等,通过物化吸附与生物作用去除水体中重金属及无机、有机污染物^[49]。

3.5 气候变化背景下适应性生态修复措施

气候变化为生态修复带来新的不确定性。气温升高改变森林植物适宜生长温度范围,增加森林火灾风险;降水时空分布不均不仅影响森林植被分布与生长,还削弱水源涵养等生态功能^[50]。这些变化破坏森林生态平衡,威胁珍稀物种生存与生物多样性维持,最终影响传统生物修复与工程措施的成效^[51]。近年来,学界与工程实践形成了以生态流量调控、土壤改良与植被恢复、水库群协同调度为核心的技术体系,但在气候适应性机制构建上仍存在显著局限。以干热河谷区为例,其自然地理特征导致水土流失严重、生态环境脆弱,近年年均温、年均日照时长与降水量呈上升趋势,给生态修复带来新的挑战^[52]。通过优化造林树种及配置、创新造林方法与种植设备,初步形成了匹配气候变化背景的生态修复方案,一定程度上解决了传统生态修复中树种配置较单一、造林成活率低等问题,但对极端天气的应对能力仍显不足,长期生态环境监测及与效益评

价体系尚未建立^[53]。金沙江干热河谷长期监测显示,修建生物地埂(如合欢+紫花苜蓿组合)比裸土地埂土壤抗蚀性提升 40% 以上,粒径 > 2 mm 水稳性大团聚体含量显著增加,但研究同时证实,新修梯田初期存在土壤结构破坏与抗蚀性退化问题,现有技术方案多聚焦短期水土保持效果,缺乏对气候变暖导致的植被物候变化、土壤碳库动态等长期响应机制的研究,未能建立生物地埂物种选择与降水格局变化的关联模型^[54]。

4 当前研究与修复工作存在的问题

尽管长江上游生态修复已取得一定成效,但在空间统筹、理论支撑与技术适应性三个层面仍存在突出问题,制约着流域生态治理的系统性与长效性。

(1)空间尺度下流域“源-汇”统筹不足与修复实践碎片化

当前长江上游生态修复在空间尺度上存在“重局部、轻系统”的局限,未能实现“源-汇”统筹控制。基于景观生态学的“源-汇”理论,流域非点源污染控制需通过优化景观格局,形成“源端减排-过程拦截-汇端净化”的连续调控链条。然而,长江上游尚未形成此类系统框架^[55]。现有修复多聚焦库区、河道等“汇”端(如水库富营养化治理、河道清淤),对坡耕地、裸地、移民安置区等污染“源”端的控制不足,导致污染物持续输入,削弱汇端修复效果。面源污染治理依赖单一措施(如生态沟渠、缓冲带),未结合流域地形与植被格局构建“源-过程-汇”连续拦截体系^[56-57]。以喀斯特区为例,仅在库区周边设置缓冲带,忽略坡地到河道的壤中流污染路径,导致氮磷拦截效率不足 20%。与此同时,长江上游涵盖 9 省(区、市),但修复工程多以行政单元为界(如四川盆周与贵州喀斯特区治理方案独立),未统筹干支流、上下游的“源-汇”关联,加剧治理碎片化。

(2)“气候变化-水电开发-生态脆弱性”耦合机制研究薄弱与认知不足

全球变暖是加剧气候变化及其相关风险的关键驱动因素。受气候变化影响,长江流域洪涝、干旱灾害交替发生,极端气候事件与人类活动叠加进一步加剧流域生态系统的敏感性和脆弱性。然而,现有研究对“气候变化-水电开发-生态脆弱性”的三重耦合机制解析不足,难以支撑系统性修复方案的制定。

多数研究单独分析水电开发的生态影响(如梯级水库导致河流片段化)或气候变化的风险(如极端降水加剧水土流失),但对二者的交互作用(如水库调度改变径流后,是否会放大干旱期生态系统的脆弱性)研究薄弱。现有成果多聚焦单一脆弱区(如长江源区、干热河谷区),缺乏对全流域四类脆弱区的对比分析,且差异化响应研究不足,尚未识别喀斯特区与干热河谷区在“水电+气候”双重压力下的阈值差异^[18]。

(3) 气候适应性不足与动态评估体系缺失

传统修复技术(如单一树种造林、混凝土护坡)基于历史气候数据设计,未纳入极端气候场景。在干热河谷地区,干季气温升高进一步加剧气象干旱,导致森林面积萎缩、农业发展受限等风险^[52]。在山地丘陵区,干旱引发地下水开采增多,或在地形限制浇灌的区域出现土地撂荒、毁林开垦等现象,进一步加剧生态环境的破坏^[58]。与此同时,生态修复效果评价仍以短期静态指标(如植被覆盖率、土壤侵蚀量)为主,未将极端降雨强度、干旱持续时间等气候因子纳入评估,导致修复工程在气候波动下的长效性存疑。现有监测网络侧重水质、植被盖度等现状指标,缺乏对气候-生态耦合过程的跟踪,难以支撑修复方案的动态优化。局部地区季节性干旱和极端强降雨交替出现,导致自然湿地面积锐减、岩石脆性增加、土质沙化,显著削弱原有生态系统的调蓄防洪功能,同时增加山体滑坡、泥石流等地质灾害风险^[59-60]。

5 对策建议

针对长江上游关键生态脆弱区与水电集中开发区的生态现状、气候风险及现有修复工作的短板,结合“气候变化-水电开发-生态脆弱性”耦合机制,从系统认知、技术创新、管理保障三个维度提出以下对策,为流域可持续治理提供路径支撑(图5)。

(1) 强化流域系统认知与监测,夯实修复科学基础

以全流域“源-汇”过程统筹为核心,突破局部治理局限,构建多尺度、多要素的科学认知体系。整合长江源区、喀斯特岩溶区等典型脆弱区及水电密集区的生态数据,系统识别“源端”(如坡耕地、裸地)与“汇端”(如库区、河道)的生态关联,明确水土流

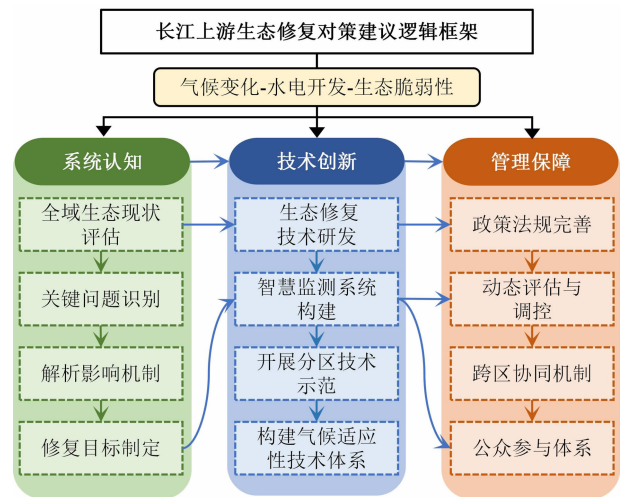


图5 长江上游流域关键生态脆弱区与水电集中开发区生态修复对策建议

Fig. 5 Suggestions for ecological restoration of key ecologically fragile and intensive hydropower development region of the upper Yangtze River, China

失、面源污染等问题的关键驱动区,为精准修复提供靶区。建立“土壤-植被-水文”三位一体监测网络,重点监测生态脆弱区的土壤侵蚀模数、植被净初级生产力、河道生态基流及极端气候(如强降雨、季节性干旱)下的动态响应,揭示碳、氮、磷等营养物质在“陆地-水生”系统中的迁移规律,为修复方案优化提供数据支撑。聚焦喀斯特区旱涝急转、干热河谷区干旱加剧等典型风险,量化气候变化与水电开发(如梯级水库调度)对径流分配、水质演化及地质灾害(滑坡、泥石流)的耦合效应,解析极端气候与人类活动的复合影响机制,为应对未来气候不确定性提供理论依据。

(2) 创新适应性修复技术与示范,提升生态系统韧性

针对气候变化带来的修复效果不确定性,推动技术耦合创新与分区示范,增强生态修复的气候适应性。针对干热河谷区季节性干旱,推广“耐旱灌木+生物炭改良+集雨灌溉”耦合技术,通过生物炭提升土壤持水能力,同步缓解水热矛盾;针对喀斯特区石漠化与农业面源污染,研发“石漠化治理+特色作物种植+生态沟渠”复合模式,实现生态修复与经济收益协同。结合未来极端气候场景(如暴雨频次增加、径流波动加剧),优化水电工程修复措施,例如将传统护坡工程升级为“网格植生+柔性挡墙”复合结构,提升抗暴雨冲刷能力;针对水库调

度,开发“生态基流保障-发电效益-防洪安全”协同模型,平衡气候变化下的水资源供需矛盾。

(3)完善协同管理与保障体系,强化修复长效性

建立动态评估与调控机制,将极端气候因子(如降雨强度、干旱持续时间)纳入生态修复评价体系,定期评估修复区的植被稳定性、水土保持效能及生态系统韧性,根据监测数据动态调整修复策略,避免“一次性修复”的短期效应。健全法规政策与科技支撑,完善长江上游生态保护专项法规,明确水电开发中的生态修复责任(如施工期水土保持保证金制度);加大应用基础研究投入,推动生物炭改良、高效脱氮菌等技术的低成本化与规模化,促进科研成果向工程应用转化。推动跨区域协同治理,针对长江上游涵盖9省(自治区、直辖市)的特点,建立流域级协调机制,统筹水电开发规划与生态修复工程(如梯级水库联合生态调度),避免区域治理碎片化;通过宣传教育强化“共抓大保护”意识,引导地方政府、企业及公众参与生态监测与维护,形成多元共治格局。

综上,通过系统认知强化科学支撑、技术创新提升适应能力、管理保障确保长效实施,推动长江上游流域生态修复从“局部治理”向“系统韧性提升”转型,为落实气候变化背景下的“长江大保护”战略提供实践路径。

参考文献(References)

- [1] 孙鸿烈. 长江上游地区生态与环境问题[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008: 1 - 161. [SUN Honglie. Ecological and environmental problems in the Upper Yangtze River Region [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008: 1 - 161]
- [2] 徐梦佳, 刘冬, 葛峰, 等. 长江经济带典型生态脆弱区生态修复和保护现状及对策研究[J]. 环境保护, 2017, 45(16): 50 - 53. [XU Mengjia, LIU Dong, GE Feng, et al. Study on the ecological restoration and protection countermeasures in the typical ecological fragile zone of the Yangtze Economic Belt [J]. Environmental Protection, 2017, 45(16): 50 - 53] DOI: 10.14026/j.cnki.0253-9705.2017.16.010
- [3] 林鹏程, 王春伶, 刘飞, 等. 水电开发背景下长江上游流域鱼类保护现状与规划[J]. 水生生物学报, 2019, 43: 130 - 143. [LIN Pengcheng, WANG Chunling, LIU Fei, et al. Current status and conservation planning of fish biodiversity in the Upper Yangtze River Basin in the context of hydropower development [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43: 130 - 143] DOI: 10.7541/2019.176
- [4] 徐欢. 长江上游气温时空变化特征分析[J]. 自然科学, 2021, 9(6): 892 - 909. [XU Huan. Analysis of spatial and temporal variation of air temperature in the Upper Reaches of the Yangtze River [J]. Open Journal of Nature Science, 2021, 9(6): 892 - 909] DOI: 10.12677/ojns.2021.96097
- [5] PENG Lu, XIA Jun, LI Zhihui, et al. Spatio-temporal dynamics of water-related disaster risk in the Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015 [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2020, 161: 104851. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104851
- [6] 袁林山, 张家余, 张力, 等. 气候变化对水电站发电出力的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(9): 231 - 235. [YUAN Linshan, ZHANG Jiayu, ZHANG Li, et al. Research on the impacts of climate change on the power generation of hydropower station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(9): 231 - 235] DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2020.09.046
- [7] 翟天林, 王静, 金志丰, 等. 长江经济带生态系统服务供需格局变化与关联性分析[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5414 - 5424. [ZHAI Tianlin, WANG Jing, JIN Zhifeng, et al. Change and correlation analysis of the supply-demand pattern of ecosystem services in the Yangtze River Economic Belt [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5414 - 5424] DOI: 10.5846/stxb201808261825
- [8] 韩炜. 长江上游3个典型生态脆弱区综合整治技术模式及其评价[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007: 1 - 114. [HAN Wei. Integration and evaluation of the integrated renovate technical modes in 3 typical ecological fragile areas of the upper reaches of the Yangtze River [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2007: 1 - 114] DOI: 10.7666/d.Y1094165
- [9] 杜际增, 王根绪, 李元寿. 基于马尔科夫链模型的长江源区土地覆盖格局变化特征[J]. 生态学杂志, 2015, 34(1): 195 - 203. [DU Jizeng, WANG Genxu, LI Yuanshou. Changes of land cover pattern in the source region of Yangtze River based on Markov process [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(1): 195 - 203] DOI: 10.13292/j.1000-4890.2015.0029
- [10] 张碧, 高成凤, 张素兰, 等. 四川土地可持续利用评价指标体系与实证研究[J]. 西南农业学报, 2011, 24(1): 171 - 177. [ZHANG Bi, GAO Chengfeng, ZHANG Sulan, et al. Sustainable land use study and empirical evaluation of Sichuan Province [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, 24(1): 171 - 177] DOI: 10.3969/j.issn.1001-4829.2011.01.038
- [11] 陈舒婷. 典型喀斯特地区石漠化时空演变格局及其驱动机制分析[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022: 1 - 81. [CHEN Shuting. Spatial and temporal evolution pattern and driving mechanism of rocky desertification in typical karst areas [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022: 1 - 81]
- [12] 张峻铭, 孙永玉, 周姗, 等. 2000—2020年金沙江干热河谷景观生态风险的时空变化[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2767 - 2776. [ZHANG Junming, SUN Yongyu, ZHOU Shan, et al. Spatial and temporal variations of landscape ecological risk in the dry and hot valley of the Jinsha River during 2000 - 2020 [J].

- Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, **34** (10): 2767 – 2776] DOI: 10.13287/j.1001-9332.202310.026
- [13] 郭雨密. 中央财政加大政策倾斜和资金支持力度-推动长江经济带生态修复[N/OL]. 央广网, (2021-09-02) [2025-09-15]. https://news.cnr.cn/native/gd/20210902/t20210902_525587435.shtml [GUO Yumi. Central government increases policy support and financial investment to promote ecological restoration in the Yangtze River economic belt [N/OL]. China National Radio, (2021-09-02) [2025-09-15]] https://news.cnr.cn/native/gd/20210902/t20210902_525587435.shtml
- [14] 刘宇. 梯级水电站水库调度系统主备调构架的探讨[J]. 水电与新能源, 2014(6): 4-6. [LIU Yu. Discussion on the main/standby dispatching framework in reservoir dispatching system for cascade hydropower stations [J]. Hydropower and New Energy, 2014(6): 4-6] DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2014.06.002
- [15] 国家环境保护总局, 国家发展和改革委员会. 三峡库区及其上游水污染防治规划(修订本): 环发[2008]16号[EB/OL]. (2008-01-31) [2025-09-15] https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172495.htm [State Environmental Protection Administration, National Development and Reform Commission. Notice on issuing the water pollution prevention and control plan for the Three Gorges Reservoir Area and its upstream (Revised Version): Huan Fa [2008] No. 16 [EB/OL]. (2008-01-31) [2025-09-15]] https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172495.htm
- [16] 邓绍辉. 四川植树造林重点工程建设40年[EB/OL]. (2019-01-05) [2025-09-15]. https://scdfz.org.cn/whzh/bsjy/jnggk40zn/content_11195 [DENG Shaohui. 40 years of key afforestation projects in Sichuan Province [EB/OL]. (2019-01-05) [2025-09-15]] https://scdfz.org.cn/whzh/bsjy/jnggk40zn/content_11195
- [17] 杨德斌, 何震启, 文蓉, 等. 绿满荆楚—湖北省生态保护与修复纪实[N/OL]. 中国自然资源报, (2024-12-30 专题5) [2025-09-15]. [YANG Debin, HE Zhenqi, WEN Rong, et al. Greening Jingchu: A record of ecological protection and restoration in Hubei Province [N/OL]. China Natural Resources News, 2024-12-30 (Special Issue 5) [2025-09-15]] http://zryzt.hubei.gov.cn/bmdt/zryzyw/202412/t20241231_5484530.shtml
- [18] 长江航道局. 尽心建设绿色航道 同心守护大美长江——长江上游两重点河段航道整治工程生态修复工作圆满完成[EB/OL]. (2025-04-11) [2025-09-15]. [Changjiang Waterway Bureau. Dedicated efforts to build green waterway, united hearts to guard the magnificent Yangtze River — Successful completion of ecological restoration work for the waterway regulation projects of two key reaches in the upper Yangtze River [EB/OL]. (2025-04-11) [2025-09-15]] https://www.cjhdj.com.cn/xwzx/hdjs/202504/t20250411_435387.shtml
- [19] 刘飞, 刘焕章. 长江上游赤水河示范区水生态修复的成效与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2023, **38** (12): 1883 – 1893. [LIU Fei, LIU Huanzhang. Effectiveness and challenges of aquatic ecological restoration of Chishui River in upper Yangtze River [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, **38** (12): 1883 – 1893] DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230905006
- [20] 张雄一, 邵全琴, 宁佳, 等. 长江上游地区生态恢复程度及植被恢复潜力空间差异分析[J]. 地理研究, 2023, **42** (7): 1904 – 1920. [ZHANG Xiongqi, SHAO Quanqin, NING Jia, et al. Spatial difference analysis of ecological restoration degree and vegetation restoration potential in the upper reaches of the Yangtze River [J]. Geographical Research, 2023, **42** (7): 1904 – 1920] DOI: 10.11821/dlyj020221028
- [21] 曹永翔, 韩晓峰, 权广峰. 西藏地区水电站建设水土流失影响及植被修复措施探讨——以多布水电站为例[J]. 西北水电, 2014(1): 7-9+23. [CAO Yongxiang, HAN Xiaofeng, QUAN Guangfeng. Study on impacts of soil and water loss by hydropower project construction and measures of vegetation renovation in Tibetan Autonomous Region——with example of Duobu Hydropower Project [J]. Northwest Hydropower, 2014(1): 7-9+23] DOI: 10.3969/j.issn.1006-2610.2014.01.002
- [22] 崔磊, 刘益敏, 任远, 等. 干热河谷水电站边坡生态修复方法和技术探讨——以白鹤滩水电站为例[J]. 水力发电, 2025, **51** (6): 15-21+54. [CUI Lei, LIU Yimin, REN Yuan, et al. Slope eco-restoration methods and technologies of hydropower station in dry-hot river valleys: A study of Baihetan Hydropower Station [J]. Water Power, 2025, **51** (6): 15-21+54] DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2025.06.005
- [23] 左禹政. 贵州省水利工程建设征地移民对环境的影响[J]. 资源节约与环保, 2019(6): 22. [ZUO Yuzheng. Environmental impact of land acquisition and resettlement for water conservancy projects in Guizhou Province [J]. Resources Economization & Environmental, 2019(6): 22] DOI: 10.16317/j.cnki.12-1377/x.2019.06.025
- [24] 李曼焘. 滇西北硕多岗河流域水电开发与旅游资源保护利用关系研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010: 1-136. [LI Mantao. Study on the relationship of hydropower development and tourism resources protection and utilization of Shuoduogang River Basin of Northwest Yunnan Province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010: 1-136]
- [25] 李明惠, 陈筠, 郭果. 构皮滩库区内滑坡发育规律统计分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2012, **29** (5): 27-30. [LI Minghui, CHEN Jun, GUO Guo. Statistical analysis of the laws of the landslides development in Goupitan Reservoir area [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2012, **29** (5): 27-30] DOI: 10.15958/j.cnki.gdxbrb.2012.05.030
- [26] 陈洋, 王玮, 罗龙海, 等. 金沙江干热河谷地带大型水电工程建设区水土流失防治措施探讨——以白鹤滩水电站为例[J]. 水电与新能源, 2018, **32** (1): 68-78. [CHEN Yang, WANG Wei, LUO Longhai, et al. Soil erosion prevention and

- control measures for construction area of large-scale hydropower project in dry and hot valley zone of Jinsha River: A case study of Baihetan Hydropower Station [J]. *Hydropower and New Energy*, 2018, **32**(1): 68–78] DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2018.01.018
- [27] 崔鹏, 王道杰, 范建容, 等. 长江上游及西南诸河区水土流失现状与综合治理对策[J]. *中国水土保持科学*, 2008, **6**(1): 43–50. [CUI Peng, WANG Daojie, FAN Jianrong, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for the upper Yangtze and other rivers in the southwestern China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, **6**(1): 43–50] DOI: 10.16843/j.sswc.2008.01.008
- [28] 程辉, 吴胜军, 王小晓, 等. 三峡库区生态环境效应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2015, **23**(2): 127–140. [CHENG Hui, WU Shengjun, WANG Xiaoxiao, et al. Research progress on the effects of the Three Gorges Reservoir on the ecological environment [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, **23**(2): 127–140] DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.140734
- [29] 张爱民. 梯级水电开发对长江干流生态水文情势影响研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018: 1–103. [ZHANG Aimin. Research on the influence of cascade hydropower development on the eco-hydrological regimes of the Yangtze River [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018: 1–103] DOI: 10.7666/d.D01533601
- [30] 唐伟. 大型水利水电工程扰动区植被的生态恢复研究[J]. *河南水利与南水北调*, 2021, **50**(12): 11–13. [TANG Wei. Study on ecological restoration of vegetation in disturbance area of large-scale water conservancy and hydropower project [J]. *Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion*, 2021, **50**(12): 11–13] DOI: 10.3969/j.issn.1673-8853.2021.12.007
- [31] 曾旭, 陈芳清, 许文年, 等. 大型水利水电工程扰动区植被的生态恢复——以向家坝水电工程为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(11): 1074–1079. [ZENG Xu, CHEN Fangqing, XU Wennian, et al. Vegetation restoration in disturbance area of large hydropower project: A case study of Xiangjiaba Hydropower Project [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(11): 1074–1079] DOI: 10.3969/j.issn.1004-8227.2009.11.014
- [32] 吴国新. 水土保持工程技术措施分析[J]. *珠江水运*, 2020(13): 91–92. [WU Guoxin. Analysis of technical measures in soil and water conservation engineering [J]. *Water Transport on the Pearl River*, 2020(13): 91–92] DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2020.13.043
- [33] 李会中, 刘冲平, 黄孝泉, 等. 金沙江乌东德水电站枢纽区高位自然边坡块体安全性评价与处理措施研究[J]. *资源环境与工程*, 2011, **25**(5): 468–473. [LI Huizhong, LIU Chongping, HUANG Xiaoquan, et al. Study on block safety evaluation and treatment measures of high natural slope in key region of Wudongde Hydropower Station of Jinsha River [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2011, **25**(5): 468–473] DOI: 10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2011.05.022
- [34] 刘波, 牛运华, 王科, 等. 乌东德水电站白滩沟泥石流特性分析与防治措施[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(S1): 225–230. [LIU Bo, NIU Yunhua, WANG Ke, et al. Characteristic analysis and control measures for debris flow in Baitan Gully of Wudongde Hydropower Station [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(S1): 225–230] DOI: 10.11779/CJGE2016S1042
- [35] 洪世兴, 邱本军, 曲德威. 云南大盈江四级水电站泥沙处理措施及效果分析[J]. *人民长江*, 2015, **46**(12): 12–14. [HONG Shixing, QIU Benjun, QU Dewei. Measures for sediment treatment of Dayingjiang Hydropower Station IV in Yunnan Province and effect analysis [J]. *Yangtze River*, 2015, **46**(12): 12–14] DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.12.004
- [36] 袁野, 周佳, 屈建航, 等. 高效反硝化聚磷菌的筛选及其脱氮除磷条件和性能研究[J]. *生物技术通报*, 2023, **39**(7): 266–276. [YUAN Ye, ZHOU Jia, QU Jianhang, et al. Screening of an efficient denitrifying phosphorus-accumulating bacterium and its denitrification and phosphorus removal [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2023, **39**(7): 266–276] DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2022-1522
- [37] 蔺宏铭. 低温高浊隧道施工废水处理工艺的响应面优化[J]. *广东化工*, 2024, **51**(23): 35–38. [LIN Hongming. Optimization of the response surface of the wastewater treatment technology for low-temperature and high-turbidity tunnel construction [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2024, **51**(23): 35–38] DOI: 10.3969/j.issn.1007-1865.2024.023.010
- [38] 林莉, 湛若云, 李青云, 等. 湖库水华发生机理研究进展及防治关键技术[J]. *长江技术经济*, 2019, **3**(2): 91–98. [LIN Li, ZHAN Ruoyun, LI Qingyun, et al. Occurrence mechanism and key technologies for prevention and control of water bloom in lakes and reservoirs [J]. *Technology and Economy of Changjiang*, 2019, **3**(2): 91–98] DOI: 10.19679/j.cnki.cjjsj.2019.0214
- [39] 刘子森, 李勇, 张义, 等. 应用矿物基复合材料控制水环境污染: 性能、机制与功效[J]. *地球科学*, 2025, **50**(1): 1–18. [LIU Zisen, LI Yong, ZHANG Yi, et al. Application of mineral based composite materials for aquatic environmental pollution control: Properties, mechanisms and performances [J]. *Earth Science*, 2025, **50**(1): 1–18] DOI: 10.3799/dqkx.2024.137
- [40] 李雪婷, 黄显怀, 周超, 等. 改性黏土矿物修复重金属污染底泥的稳定化试验研究[J]. *环境工程*, 2015, **33**(9): 158–163. [LI Xueting, HUANG Xianhuai, ZHOU Chao, et al. Study of the stabilization of heavy metals from contaminated river sediment by modified clay minerals [J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(9): 158–163] DOI: 10.13205/j.hjgc.201509035
- [41] 熊伶, 赵林, 张静, 等. 铁/过氧化乙酸氧化体系降解有机污染

- 物的研究进展[J]. 水处理技术, 2025, **51**(11): 1-8. [XIONG Ling, ZHAO Lin, ZHANG Jing, et al. Research progresses on the degradation of organic pollutants by iron/peracetic acid oxidation system [J]. Technology of Water Treatment, 2025, **51**(11): 1-8] DOI: 10.16796/j.cnki.1000-3770.2025.11.001.
- [42] 刘桃妹, 叶伟, 肖亿金, 等. 椰壳生物炭对多种重金属在广东水稻土中的吸附解吸特性影响[J]. 生态毒理学报, 2021, **16**(4): 342-350. [LIU Taomei, YE Wei, XIAO Yijin, et al. Adsorption and desorption of several heavy metals in paddy soils in Guangdong Province influenced by coconut shell biochar [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, **16**(4): 342-350] DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20200608003
- [43] 周振, 黄丽, 黄国棣, 等. 生物炭和海泡石复配对镉和锌复合污染土壤的钝化修复[J]. 华中农业大学学报, 2023, **42**(2): 158-166. [ZHOU Zhen, HUANG Li, HUANG Guodi, et al. Deactivation and remediation of cadmium and zinc contaminated soil by combination of biochar and sepiolite [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, **42**(2): 158-166] DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.02.020
- [44] XIA Longlong, LAM S K, CHEN Deli, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2017, **23**(5): 1917-1925. DOI: 10.1111/gcb.13455
- [45] SILVA A G B, SEQUEIRA C H, SERMARINI R A, et al. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: A meta-analysis [J]. Agronomy Journal, 2017, **109**(1): 1-13. DOI: 10.2134/agronj2016.04.0200
- [46] 郑海金, 王辉文, 杨洁, 等. 地表径流和壤中流对坡耕地氮磷流失影响研究概述[J]. 中国水土保持, 2015(2): 36-39+69. [ZHENG Haijin, WANG Huiwen, YANG Jie, et al. Summary of study on influence of surface runoff and subsurface flow to loss of nitrogen and phosphorus of slope farmland [J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(2): 36-39+69] DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2015.0043
- [47] 胡雅迪. 可渗透反应屏障修复简易填埋场壤中流的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022: 1-74. [HU Yadi. Experimental study on remediation of interflow around simple landfills with permeable reactive barrier [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022: 1-74] DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2022.002781
- [48] 李海翔, 陈宇超, 蒋敏敏, 等. 膜生物膜反应器气体逆扩散与控制研究进展[J]. 环境科学与技术, 2025, **48**(5): 119-132. LI Haixiang, CHEN Yuchao, JIANG Minmin, et al. Progress in the research of gas back-diffusion and control in the membrane biofilm reactor [J]. Environmental Science & Technology, 2025, **48**(5): 119-132.] DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.1952.24.338
- [49] 代晨薇. 新型生态拦截沟渠的开发及其在面源污染防治中的应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023: 1-75. [DAI Chenwei. Development of new ecological interception ditch and its application in non-point source pollution control [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023: 1-75] DOI: 10.27158/d.cnki.ghznu.2023.000829
- [50] 巩永芳. 生态保护与修复背景下的林木种苗多样化选择策略研究[J]. 种子世界, 2025(8): 210-212. [GONG Yongfang. A study on diversified selection strategies of forest tree seeds and seedlings in the context of ecological protection and restoration [J]. Seed World, 2025(8): 210-212] DOI: 10.3969/j.issn.1000-8071.2025.08.070
- [51] 李娜, 王翠华. 气候变化背景下云南林业生态修复适应性机制探究[J]. 现代园艺, 2025, **48**(16): 173-175. [LI Na, WANG Cuihua. Research on the adaptive mechanism of forestry ecological restoration in Yunnan under climate change [J]. Modern Horticulture, 2025, **48**(16): 173-175] DOI: 10.14051/j.cnki.xdyy.2025.16.066
- [52] 王妍方, 李仕杰, 罗琪, 等. 61年来滇西南地区干热河谷与热带雨林地区气候变化分析[J]. 西部林业科学, 2021, **50**(2): 145-153. [WANG Yanfang, LI Shijie, LUO Qi, et al. Climate change of dry-hot valley and tropical rainforest in southwest Yunnan in the past 61 years [J]. Journal of West China Forestry Science, 2021, **50**(2): 145-153] DOI: 10.16473/j.cnki.xblykx1972.2021.02.020
- [53] 子桂才, 李庆华, 赵丽芳, 等. 干热河谷区生态修复研究进展[J]. 广西林业科学, 2023, **52**(1): 141-145. [ZI Guicai, LI Qinghua, ZHAO Lifang, et al. Study progress of ecological restoration in dry-hot river valleys [J]. Guangxi Forestry Science, 2023, **52**(1): 141-145] DOI: 10.19692/j.issn.1006-1126.20230120
- [54] 殷庆元, 王章文, 谭琼, 等. 金沙江干热河谷坡改梯及生物地埂对土壤可蚀性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, **29**(1): 41-47. [YIN Qingyuan, WANG Zhangwen, TAN Qiong, et al. Effect of terracing slope cropland and bio-bank on soil erodibility in dry-hot valley of Jinsha River Basin, southwest China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, **29**(1): 41-47] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2015.01.009
- [55] 黄宁, 王红映, 吝涛, 等. 基于“源-汇”理论的流域非点源污染控制景观格局调控框架—以厦门市马銮湾流域为例[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(10): 3325-3334. [HUANG Ning, WANG Hongying, LIN Tao, et al. Regulation framework of watershed landscape pattern for non-point source pollution control based on ‘source-sink’ theory: A case study in the watershed of Maluan Bay, Xiamen City [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(10): 3325-3334] DOI: 10.13287/j.1001-9332.201610.013
- [56] 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 等. 红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(11):

- 5394–5404. [FANG Zhida, SU Jingjun, ZHAO Hongtao, et al. Output characteristics of nitrogen and phosphorus from non-point source pollution of typical land use in a micro-watershed in hilly red soil region [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5394–5404] DOI: 10.13227/j.hjx.202103163
- [57] 葛涛, 胡晨, 孙敏, 等. 生活垃圾填埋场地下水环境特征与污染研究——以皖北某垃圾填埋场为例[J]. *地下水*, 2022, **44**(4): 5–9. [GE Tao, HU Chen, SUN Min, et al. Study on groundwater environmental characteristics and pollution of municipal solid waste landfill site; Taking the waste landfill site in northern Anhui Province as an example [J]. *Ground Water*, 2022, **44**(4): 5–9] DOI: 10.19807/j.cnki.DXS.2022-04-002
- [58] 李华丽, 崔宁博, 李晨, 等. 川中丘陵区近 60 a 主要气象因子变化趋势研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016, **35**(12): 80–87. [LI Huali, CUI Ningbo, LI Chen, et al. Study on trends of the main meteorological factors in hill area of central Sichuan over the past 60 years [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, **35**(12): 80–87] DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.2016.12.015
- [59] 周斌, 邹强, 蒋虎, 等. 川西高原气候变化特征及泥石流动态危险性响应研究[J]. *自然灾害学报*, 2022, **31**(4): 241–255. [ZHOU Bin, ZOU Qiang, JIANG Hu, et al. Research on climate change characteristics and change of debris flow hazard in the Chuanxi plateau [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, **31**(4): 241–255] DOI: 10.13577/j.jnd.2022.0424
- [60] WINSEMIUS H C, AERTS J C J H, VAN BEEK L P H, et al. Global drivers of future river flood risk [J]. *Nature Climate Change*, 2016, **6**: 381–385. DOI: 10.1038/nclimate2893

Review of Progress in Climate-Adaptive Ecological Restoration in Key Ecologically Fragile and Hydropower Concentrated Development Area of the Upper Yangtze River, China

ZHENG Jing¹, LI Siliang², ZHOU Shuangfei³, YUE Fujun², TANG Jialiang¹,
CUI Junfang¹, ZHOU Minghua^{1*}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Chengdu 610213, China;

2. School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610051, China)

Abstract: The upper Yangtze River serves as both a nationally strategic hydropower energy base and a key ecological security barrier. Characterized by the dual pressures of intensive development and climate vulnerability, this region urgently requires systematic ecological restoration.

This review provides a comprehensive assessment of the ecological and environmental baseline characteristics of the upper Yangtze River. It summarizes the cumulative effects of nearly half a century of hydropower development on the riverine ecosystem and delves into the pattern of ecosystem risks (including vegetation destruction, soil erosion, water resource pollution, etc.) under the combined impacts of climate change and extensive engineering projects.

(1) Our findings indicate that watershed ecological restoration in the upper Yangtze River faces structural contradictions: constrained by the fragmentation of source-sink patterns and insufficient interception efficiency of non-point source pollution, there is an urgent need to establish a restoration paradigm based on integrated source-process-sink regulation.

(2) From three dimensions—innovation in system cognition, breakthroughs in core technologies, and optimization of management safeguards—this paper constructs a theoretical framework for adaptive ecological restoration that couples the climate change-hydropower development-ecological vulnerability triad, proposing

synergistic pathways for sustainable watershed governance under compound pressure scenarios.

(3) Restoration technology efficacy assessments reveal deficiencies in existing restoration measures' responsiveness to extreme climate events, suggesting the establishment of a dynamic evaluation index system incorporating climate adaptability to transition restoration strategies toward a closed-loop "monitoring-assessment-adjustment" model.

(4) Future efforts should focus on expanding the scope of ecological regulation in the mainstem and key tributaries of the upper Yangtze River, strengthening applied basic research, technology development, and demonstration and promotion, and establishing a sound, long-term, and stable comprehensive ecological and environmental monitoring and evaluation mechanism. These actions will provide scientific and technological support for national and regional ecological macro-regulation.

Key words: the upper reaches of the Yangtze River; ecological fragile areas; hydropower development; climate change; adaptive ecological restoration

(责任编辑 李 嵘)