

黄河上游河道岸坡防护工程技术难点总结研究

张哲, 曾阳益, 王国庆, 张峻岭, 丁云龙, 陈欢欢, 张鼎

四川省水利科学研究院, 四川 成都 610072

DOI:10.61369/WCEST.2026030004

摘 要 : 黄河上游高寒生态敏感区岸坡防护工程长期面临严酷气候条件、多元地质构造以及严格生态管控要求的多重约束叠加。本文在系统梳理区域工程实践资料与已有研究成果的基础上, 提炼归纳出五项典型技术瓶颈: 冻融交替驱动下防护结构力学性能衰退与形变失稳、大坡度岸段施工作业条件苛刻且质量管控薄弱、护坡植被群落营造受阻并伴随逆向演替退化、刚性工程防护与岸带生态服务之间功能耦合失衡, 以及监测预警长效运行能力亟待强化。借助典型工程实例的深入剖析, 揭示了制约因素背后的深层驱动逻辑: 冻融过程与渗流场的正反馈耦合效应显著放大了坡体失稳概率, 有效工期窗口的极度收窄对施工品质形成刚性约束, 乡土种质资源供给匮乏制约了目标植被的定向恢复, 而大面积刚性护砌则阻断了岸带水陆生态系统间的物质能量连通。在此基础上, 从寒区适应性设计优化、柔性生态防护工法推广、乡土植被精准恢复技术和多源数据融合智能监控四个层面提出了集成化应对路径, 旨在为黄河上游岸坡防护工程的提质增效与可持续运营提供决策参考。

关 键 词 : 黄河上游; 岸坡防护; 冻融损伤; 施工质量; 生态修复; 智能监测

Summary Research on Technical Difficulties of Riverbank Slope Protection Engineering in the Upper Reaches of the Yellow River

Zhang Zhe, Zeng Yangyi, Wang Guoqing, Zhang Junling, Ding Yunlong, Chen Huanhuan, Zhang Ding

Sichuan Academy Of Water Conservancy, Chengdu, Sichuan 610072

Abstract : Riverbank slope protection projects in the alpine ecologically sensitive zone of the upper Yellow River have long confronted the compounded constraints of severe climatic conditions, diverse geological structures, and rigorous ecological conservation mandates. Based on a systematic review of regional engineering practice records and existing research findings, this paper distills and summarizes five representative technical bottlenecks: mechanical property degradation and deformation instability of protective structures driven by freeze-thaw alternation, extremely demanding working conditions and inadequate quality oversight on steep bank sections, impeded establishment and subsequent retrogressive succession of slope-protection vegetation communities, functional decoupling between rigid engineering protection and riparian ecological services, and the pressing need to strengthen long-term monitoring and early-warning capabilities. Through in-depth analysis of representative engineering cases, the underlying driving mechanisms of these constraining factors are revealed: the positive feedback coupling between freeze-thaw processes and seepage fields significantly amplifies slope instability probability; the extreme narrowing of effective construction windows imposes rigid constraints on construction quality; the scarcity of native germplasm resources restricts targeted vegetation restoration; and extensive rigid revetments disrupt material and energy connectivity between aquatic and terrestrial ecosystems along riparian zones. Accordingly, integrated response pathways are proposed from four dimensions—cold-region adaptive design optimization, flexible ecological protection method promotion, precision native vegetation restoration technology, and multi-source data fusion intelligent monitoring—aiming to provide decision-making reference for enhancing quality and efficiency and ensuring sustainable operation of slope protection engineering in the upper Yellow River.

Keywords : upper Yellow River; slope protection; freeze-thaw damage; construction quality; ecological restoration; intelligent monitoring

基金项目: 水利部重大科技项目《黄河上游生态脆弱区防洪治理工程关键技术研究》(SKS-2022023); 四川省省级科研院所基本科研项目(2025-SKY-ZXKY-03)。

作者简介: 张哲(1984-), 男, 汉族, 河南省许昌市人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事水利水电工程设计、咨询与管理工作。

引言

黄河上游河段（海拔区间2600 ~ 4500m）地处青藏高原生态安全屏障的核心地带，其沿线坡体的稳定状况对于整个流域的生态安全格局维持和基础设施长期运行保障具有基础性意义^[1]。该区域自然环境极为严酷，年均气温介于-4 ~ 4℃之间，历史极低温记录低于-37℃，季节性冻土广泛分布，年均冻融交替频次高达120 ~ 150次。在气候变化加剧与工程开发强度攀升的双重作用下，坡体失稳事件的发生频率呈现上升态势，传统防护技术的区域适应性面临严峻考验。

尤其值得注意的是，尽管生态护坡理念近年来已获得广泛的工程推广，然而“建成即衰败”“植被覆盖难以为继”等负面现象在实际工程中仍然普遍存在，安全防护与生态恢复两大目标的协同实现程度明显不足[2]。鉴于此，有必要对黄河上游岸坡防护领域面临的核心技术瓶颈进行系统性的归纳梳理，并对其内在成因展开深入剖析，这对于优化防护方案的技术路线设计、增强工程系统的综合可靠性具有显著的学术价值与现实意义。

一、区域环境特征与工程约束背景

（一）气候与地质基础条件

黄河上游区域呈现典型的高原大陆性气候特征，多年平均降雨量介于300 ~ 550mm之间，降水集中分布于6 ~ 9月，年蒸发量则达到1200 ~ 1800mm，远超降水补给。河谷区广泛出露第四纪松散沉积地层，以冲积砾石土为主体类型，具有中等偏强的持水特性。区域内季节冻土的发育厚度约为1.5 ~ 3.0m，冻胀率介于3% ~ 8%，频繁的冻融交替过程导致土体抗剪强度出现显著衰减^[3]。

在气候变暖的宏观背景下，研究区正经历明显的“暖湿化”演变：1961至2020年间，区域年均温升高约1.2℃，年降水增加约8.3%，极端暴雨事件的出现概率有所上升。这种水热环境的整体性变迁正在加速冻土退化进程（年均融化速率约4.6cm），从根本上削弱了坡体的稳定基础；同时，洪峰径流的侵蚀输沙能力持续增强，已成为诱发坡体失稳的首要外部动力。

（二）工程建设的客观制约条件

高寒特殊自然条件从多维度对工程建设形成了刚性约束：①年均可利用施工期仅4 ~ 6个月，工期排布极为紧张；②大气含氧量约为平原基准的60% ~ 70%，施工作业人员的体能消耗显著增大，机械设备动力输出同步衰减；③项目多位于偏远山区，交通运输基础设施薄弱，建材运送成本居高不下，部分标段需另行开辟临时施工便道；④区域生态环境高度敏感且脆弱，施工期对高寒草甸、高原湿地等敏感生态单元的地表扰动必须实行严格管控。

二、岸坡防护工程核心技术瓶颈解析

（一）冻融交替驱动防护结构性能衰退与失效

冻融损伤是导致黄河上游岸坡防护工程提前丧失功能的首要致灾因子。调查统计显示，服役超过5年的混凝土护坡工程中，出现网状裂缝的占比超过50%，裂缝宽度通常在2 ~ 10mm范围；浆砌石结构发生砂浆松散剥落的比例超过15%^[3]，在反复冻融循环

作用下贯通性裂缝加速扩展。

从微观层面分析，冻融致损机制可归纳为三条路径：①低温条件下孔隙内部水分冻结产生体积膨胀（约9%），结构内部可产生高达200MPa的冻胀应力；②长期周期性冻融过程导致材料疲劳损伤不断累积，经历200次冻融循环后混凝土弹性模量的下降幅度超过40%；③冻土层中未冻的自由水形成优势渗流通道，加速结构物质的溶蚀迁移，并引发护坡底部架空掏蚀现象。

黄河上游堤防工程还衍生出若干特有病害类型：当堤顶道路兼作社会交通通道时，频繁的车辆荷载引起堤面表层翻砂冒泥，叠加风力侵蚀和水力冲刷，造成堤身标高持续下降；排水系统不畅与背水面积水浸泡使路面结构承载力严重衰退，翻浆、开裂、坑槽等病害依次显现。此外，鼯鼠等穴居动物在堤身内部打洞筑巢，表面看似完好的堤防内部实际上潜藏着大量空洞隐患，对堤防安全构成严重威胁。

以某县2015年完工的一处混凝土护坡工程为例，经历8年冻融老化后，现场实测抗压强度已由设计C25衰退至C18，碳化侵入深度达到25mm，内部钢筋锈蚀率12%，年均维护养护费用高达初始投资的15%。

（二）大坡度岸段施工困难与质量保障薄弱

黄河上游峡谷区坡面倾角普遍达50° ~ 70°，常规施工装备难以抵达有效操作范围，由此衍生出系列技术瓶颈：①坡面整平操作难度极大，防护结构与基底之间的接触面常残留0.3 ~ 1.2m的架空间隙，为后续渗流侵蚀和冻胀变形的发育埋下伏笔；②陡坡条件下的混凝土浇筑与振捣操作极为困难，蜂窝麻面等表观缺陷发生率偏高，现场取芯检测的强度离散性较大；③生态袋等柔性防护材料在陡坡面溜放铺装过程中，填筑体的压实度与层间搭接质量难以得到切实保障。

冻土区域的施工还须应对额外的技术障碍：路基冻胀效应引发的不均匀变形可诱发多类型工程病害。路基填料须满足质地致密、抗风化能力强、水稳性优良的要求，颗粒级配与含泥量均需严格受控；路床应采用石灰改良土并加强施工过程质量控制。然而，可用施工时间窗口的严重压缩使得工期矛盾极为突出，混凝土养护周期不足、防冻保温措施执行不力、隐蔽工程验收流于形

式等质量隐患较为普遍。调查数据表明，超过60%的冻融破坏案例的根源可追溯至施工过程中质量管控的缺失。

龙羊峡库区某坡度55° 铰链排护岸工程受制于现场施工条件，采用自上而下溜铺工法施工，竣工后铰链排与坡面之间残留约0.5m 松散填充层。运行3年后坡脚淘蚀深度达到2.3m，排体出现局部坍塌，防护功能明显受损^[4]，充分暴露了陡坡施工工艺与验收标准体系的双重缺位，现行技术规范对45° 以上岸坡施工的专项条文仍十分匮乏。

（三）护坡植被群落营造困难与退化演替

生态护坡工程普遍呈现出“初期达标验收、中后期退化衰败”的规律性特征。调研结果表明，竣工5年后仍能保持优良植被覆盖度（大于80%）的工程比例不足40%^[2]。其核心障碍体现在三个层面：①草种适应性与立地条件的匹配不当，大量引入的外来草种难以承受严酷低温，在-20℃以下的越冬存活率不足40%，而垂穗披碱草、冷地早熟禾等乡土适生种的实际应用推广率尚不足30%；②坡面生境条件极为恶劣，土壤有机质含量低于2%，pH值偏碱性（8.0 ~ 8.5），保水保肥性能不足，难以支撑目标群落的持续生长发育；低温冻土对植物根系生长和土壤改良进程形成制约，缓坡谷地段的植被保存率明显优于山脊陡坡区域；③后期养护管理基本处于缺位状态，竣工后2 ~ 3年内缺乏必要的补植补灌和草地管护措施，外来杂草入侵与鼠害破坏导致目标植被群落发生逆向演替，生物多样性较自然植被下降超过50%。

某县生态袋护坡示范工程引入外来草种，首年植被覆盖率达到85%，但后续跟踪监测显示，坡面被原生毒杂草侵占的比例攀升至60%，呈现出“外观绿化达标、实质功能退化”的典型困局。

（四）刚性防护与生态服务功能耦合失衡

刚性防护措施（混凝土与浆砌石结构）在防护工程总量中所占比例偏高，在河岸带形成连续性的硬化隔离带，阻断了水陆生态系统之间的能量传递与物质循环通道^[5]。部分工程片面追求“景观营造”效果，大量采用外来观赏植物和标准化预制构件，破坏了岸带地形地貌的多样性格局与植被空间配置的异质性，形成生态功能缺失的“景观孤岛”。

生态护坡技术在黄河上游区域的本地化适配也面临突出问题：陡坡段植被根系入土深度有限，对重力驱动的滑坡缺乏足够的抵抗能力，易出现局部坍塌现象；水位周期性变幅较大的消落带区域植物长期经受淹没胁迫，存活率极低，植株衰亡后产生裸露斑块，削弱护坡系统的整体防护效能。此外，不同区段之间的气候和土壤条件差异显著，简单移植其他地区的成功经验往往导致建植失败；低温环境下生态袋材料受冻融循环损伤的破损率较高，结构完整性面临考验。

（五）监测预警长效运行能力滞后

当前监测基础设施的站点布设密度严重不足，且多以简易水准尺观测和人工巡检为主要手段，对于坡体变形位移、孔隙水压力变化和植被健康状态的自动化实时感知能力十分薄弱。工程管护长期维持在“灾后被动抢修”的传统模式，年均维修经费支出相当于工程初始投资的8% ~ 15%，远高于主动预防性养护所需的

3% ~ 5% 成本水平。

某段大通河岸坡崩塌（方量约5万 m³）的事后复盘分析表明，若能在事发前6个月即识别坡顶裂缝从2mm 渐进扩展至15mm 的变形演变过程，并适时采取灌浆加固配合削坡减重措施，则可避免超过90% 的经济损失。监测预警能力的缺失，使工程管护陷入“信息盲区→被动应对→损失放大”的恶性循环。

三、技术瓶颈的根源机理剖析

深入审视上述问题，其根本成因可从以下五个维度加以辨识：

其一，冻融-渗流耦合放大机制：黄河上游岸坡失稳的首要控制因素在于冻融循环与地下水渗流的协同叠加效应。冻结阶段，土中水分向冻结锋面方向迁移富集，形成冰透镜体并引发显著冻胀变形（3% ~ 8%）；消融阶段，土体强度急剧下降，孔隙水压力骤然升高，坡体抗剪能力损失超过40%。这一“冻胀→融蚀→强度衰减”的周期性劣化过程造成坡体材料持续累积疲劳损伤。数值模拟计算表明，计入冻融-水力耦合效应的边坡稳定安全系数较单因素分析值低30% ~ 45%，而现行设计规范仍以单因素独立评价为主要方法，安全裕度明显偏低。

其二，高寒环境特殊性的认知欠缺：将平原低海拔地区经过验证的成熟防护方案直接移植至高寒环境，忽略了冻融频繁、辐射强烈、大气稀薄等特殊环境因素的差异化影响，导致设计参数取值与工程实际工况之间存在系统性偏差。

其三，技术标准与工程实际需求的脱节：现行《堤防工程设计规范》（GB 50286-2013）等规范参数体系主要基于平原地区工程实践积累，关键指标取值与黄河上游实际需求之间存在明显差距：冻融循环次数按50次取值，远低于实际的120 ~ 150次；混凝土抗冻标号设定为F100，而高寒区域的实际需求为F250乃至更高；生态护坡覆盖率指标未充分考虑高寒区植被生长缓慢的客观规律。标准体系的滞后导致大量工程在建设之初即存在潜在缺陷，是后期集中出现病害的重要诱因。借鉴青藏铁路建设的成功经验，冻土区工程质量评价应涵盖施工期与长期服役两个阶段的双重体系——施工期侧重变形监控，长期阶段从温度场与变形量双维度进行综合评判，这一全周期质量管控理念在岸坡防护领域尚待系统构建。

其四，施工过程管控粗放：有效施工窗口仅4 ~ 6个月，工期压力催生了抢工降质行为，混凝土养护时间被压缩、低温防护措施执行不到位、隐蔽工程验收流于形式等质量短板普遍存在，多数冻融破坏事件与施工质量管控缺失之间存在直接关联。

其五，全生命周期管理理念缺位：长期以来存在“重建轻养、重工程轻生态”的管理倾向，导致工程建成后的可持续运行能力不足。建设阶段资金投入相对充裕，而运维期经费保障严重不足；生态绩效后评估机制尚未建立，“生态优先”的指导理念在实践中难以真正落地。

四、对策建议

（一）建立高寒环境适应性设计标准体系

系统构建冻融环境专用设计参数标准：混凝土抗冻等级不应低于 F250，引气剂掺量控制在 4% ~ 6%；生态护坡基质土壤有机质含量须不低于 5%，植物配置优先选用垂穗披碱草、冷地早熟禾等乡土适生种；坡度超过 45° 的高陡岸段应强制采用自密实喷射混凝土或格宾加筋柔性护砌技术体系。

（二）推进柔性生态防护工法的广泛应用

逐步降低刚性护砌在防护工程中的占比，大力推广“格宾网垫 + 乡土植被复层”“生态袋 + 灌草混合播种”等柔性生态防护技术组合。某工程将格宾石笼与生态袋进行集成应用，综合实施植被恢复与水土保持配套措施，实现了防洪安全保障与岸带生态功能改善的双重目标，为流域综合治理提供了可复制可推广的实践经验。

针对技术本地化适应性问题，应组织专项研究攻关：陡坡段宜采用工程加固与植被防护相融合的复合防护模式，如混凝土框架格宾格网内客土回填种植、拱形骨架绿化等工法；消落带区域宜优先选用耐淹水植物品种，或配套使用高透水性生态袋软体护坡系统。



黄河干流若尔盖段应急处置工程建成前 工程建成后河岸得到有效加固、水土流失明显改善

（三）推进乡土植被精准定向恢复

建立区域乡土植物种质资源保育与规模化扩繁基地，研发“草本层—灌木层—乔木层”立体配置的高寒适应性技术模式；辅以保水剂施用、菌根真菌接种等技术手段增强初期建植存活率；设定不少于 3 ~ 5 年的生态养护跟踪期，通过精细化管理保障目标植被群落的正向演替进程。

（四）构建多源数据融合智能监测预警平台

综合运用卫星遥感开展岸坡宏观形变大范围普查，结合无人机高分辨率地形测绘获取精细化三维形变信息，配合地面传感网络实时跟踪孔隙水压力与冻土温度场动态，构建多源数据融合的坡体失稳预警决策支持平台。

（五）建立工程生态绩效长效评估制度

将植被覆盖度、生物多样性指数、群落演替方向等生态量化指标纳入工程竣工验收与后续绩效考核体系，建立以 5 年、10 年、15 年为关键评估节点的全周期跟踪评价机制，评估结果与运维经费拨付直接挂钩，形成质量管控的正向激励闭环。

五、结论

（1）黄河上游岸坡防护工程面临防护结构冻融劣化、大坡度岸段施工困难、植被群落营造受阻、工程与生态功能耦合失衡及监测预警能力薄弱五项核心挑战，表现出显著的区域特殊性与多因素耦合叠加特征，其中冻融—渗流耦合效应是制约防护结构耐久性的首要控制机制。

（2）上述挑战的深层根源在于：对高寒环境特殊性的认知不足、技术标准体系滞后于工程实践、施工过程管控粗放以及全生命周期管理理念缺位等多重因素的叠加影响，需从系统性整体视角推进综合治理。规范关键参数取值与实际工程需求之间的鸿沟，使大量防护工程长期暴露于潜在风险之中。

（3）建议通过构建高寒适应性设计标准体系、大力推广柔性生态防护技术、完善多源数据融合智能预警平台和建立生态绩效量化评估机制，推动岸坡防护工程从“单一工程安全保障”向“工程—生态协同保障”的根本性转变。

（4）未来应持续加强冻土边坡长期原位监测体系建设，加快完善高寒地区工程技术标准体系，建立生态效益定量考核制度，为推进黄河流域生态保护与高质量发展国家战略提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 堤防工程设计规范: GB 50286-2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [2] 刘晓燕, 杨文俊, 李占斌. 黄河上游宽谷段河岸侵蚀机理与防护技术研究进展 [J]. 水利学报, 2020, 51(6): 712-720.
- [3] 吴青柏, 陈继, 张泽. 季节冻土区岸坡水文地质特征与稳定性研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1023-1031.
- [4] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 多年冻土地区公路路基设计与施工技术规范: JTG/T 3331-04-2023[S]. 北京: 人民交通出版社, 2023.
- [5] 董哲仁. 河流生态修复的理论与技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 156-178.