

# 黄河上游生态脆弱区河道岸坡破坏型式浅析

张峻岭, 张哲, 王国庆, 曾阳益, 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.2026030003

**摘 要 :** 黄河上游地区地处青藏高原向黄土高原过渡地带, 生态环境脆弱, 河道岸坡稳定性问题突出。本文基于野外实地调查与遥感影像解译, 系统分析了黄河上游部分河段岸坡破坏的主要型式及其成因机制。研究表明, 该区域岸坡破坏可划分为冲刷侵蚀型、冻融剥落型、重力崩塌型及复合破坏型四类, 其中冻融-水力复合破坏占比达42.3%, 为主要破坏模式。岸坡破坏受控于河谷深切地貌、季节性冻土发育、暴雨径流冲刷及人类工程活动等多重因素耦合作用。针对不同类型的岸坡破坏, 提出了生态护坡、格宾网垫、植被恢复等差异化防护对策, 为黄河上游生态屏障建设提供技术支撑。

**关 键 词 :** 黄河上游; 生态脆弱区; 河道岸坡; 破坏型式; 冻融侵蚀; 生态防护

## Brief Analysis of the Failure Modes of Riverbank Slopes in the Ecologically Fragile Area of the Upper Yellow River

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

Sichuan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Chengdu, Sichuan 610072

**Abstract :** The upper reaches of the Yellow River are located in the transitional zone between the Qinghai-Tibet Plateau and the Loess Plateau, characterized by a fragile ecological environment and prominent issues regarding the stability of riverbank slopes. Based on field investigations and interpretation of remote sensing images, this paper systematically analyzes the main failure modes and their formation mechanisms of riverbank slopes in certain sections of the upper Yellow River. The study reveals that the failures of riverbank slopes in this region can be classified into four types: scour erosion, freeze-thaw spalling, gravitational collapse, and composite failure, with freeze-thaw-hydraulic composite failure accounting for 42.3%, representing the primary failure mode. Riverbank slope failures are controlled by the coupling effects of multiple factors, including deeply incised valley topography, seasonal permafrost development, storm runoff scouring, and human engineering activities. In response to different types of riverbank slope failures, differentiated protection measures such as ecological slope protection, gabion mattresses, and vegetation restoration are proposed, providing technical support for the construction of ecological barriers in the upper reaches of the Yellow River.

**Keywords :** upper Yellow River; ecologically fragile area; riverbank slope; failure mode; freeze-thaw erosion; ecological protection

## 引言

黄河上游指青海省玛多县至内蒙古自治区河口镇区间, 干流长3472km, 流域面积38.6万 km<sup>2</sup>, 是黄河流域重要的水源涵养区与生态屏障<sup>[1]</sup>。该区域海拔高程2600-4500m, 气候寒冷干燥, 年均气温-4℃至4℃, 多年冻土与季节性冻土广泛分布。受新构造运动抬升与河流下切共同作用, 河谷深切, 岸坡陡峻, 岩土体结构松散, 生态系统抗干扰能力低下。

近年来, 受气候变化与人类活动双重扰动, 黄河上游岸坡失稳事件频发, 不仅造成河道淤塞、水库库容损失, 更威胁沿岸基础设施与居民安全。1998年西柳沟“7·12”洪水入黄后形成淤积量近1亿立方米的巨型沙坝, 堵塞黄河河道, 掩埋河对岸包钢3个取水口, 致使企业一度停产。2019年黄河水利委员会统计数据显示, 上游干流及主要支流共有不稳定岸坡段186处, 总长度逾420km, 年泥沙贡献量约占全河近15%<sup>[2]</sup>。气候变暖加剧了岸坡不稳定性。1961-2020年, 研究区呈现“暖湿化”趋势: 年均气温上升1.2℃, 年降水量增加8.3%, 极端降水频次增多。水热条件改变加速了冻土退化(年均退化速率4.6cm), 削弱了岸坡稳定性。同时, 暴雨-径流过程冲刷力增强, 直接触发岸坡失稳。因此, 厘清该区域岸坡破坏类型及其动力机制, 对于科学制定防治策略、维护河道生态安全具有重要现实意义。

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: 张峻岭(1984-), 男, 汉族, 安徽省砀山县人, 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。

## 一、研究区概况与研究方法

### （一）研究区概况

本文选取黄河上游核心生态脆弱区一部分为研究对象。该河段穿越若尔盖高原、共和盆地及龙羊峡峡谷区，地貌类型涵盖高寒草甸宽谷、冲积河谷平原及深切峡谷。地层岩性以第四系松散沉积物、第三系泥岩砂岩互层及古近系红色砂砾岩为主，岩土体遇水易软化、冻融易崩解。

### （二）研究方法

采用“空-天-地”一体化调查技术：

- （1）利用卫星影像进行岸坡变形解译，识别潜在失稳区域；
- （2）开展不同水文年的野外踏勘，实测岸坡几何参数（坡度、坡高、坡向）、岩土体性质及破坏特征；
- （3）选取典型断面进行地质探测与探槽揭露，查明浅层结构；
- （4）结合气象站数据与冻土观测资料，分析水热耦合对岸坡稳定性的影响。

采用数值模拟方法建立冻土斜坡热-水-力耦合模型，分析冻融循环与降雨入渗条件下的岸坡稳定性变化。该模型能够反映边坡内部不同区域的应力分布、位移变化及潜在滑动面的发展演化过程，克服了传统极限平衡法将土体简化为刚体的局限性。

## 二、河道岸坡破坏型式分类与特征

基于野外调查与成因分析，将研究区岸坡破坏划分为四种基本类型：

### （一）冲刷侵蚀型

主要分布于宽谷段漫滩及低阶地前缘，占调查岸坡总数的28.6%。特征表现为：洪水期流速增大导致岸脚淘刷，形成近垂直的临空面；上部土体因失去支撑而坍塌，坍塌物随水流搬运，形成“淘刷-坍塌-再淘刷”的循环后退模式。典型断面位于玛曲县城下游黄河右岸，年均后退速率0.8-1.2m，最大冲刷深度达3.5m。该类型破坏与河道弯曲度、洪水频次及岸土抗冲性密切相关。某流域的观测显示，下游冲积洪积扇区河道宽浅，汛期洪水漫滩，侧向侵蚀强烈，河岸年侵蚀模数可达 $12762\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。这种高强度冲刷侵蚀与流域内风沙物质堆积、植被覆盖度低（平均25%）密切相关。

冲刷侵蚀型破坏的水动力机制在于：洪水期流速超过临界起动流速（约0.8m/s）时，岸脚泥沙起动，形成冲刷坑；随着冲刷深度增加，岸坡高度增大，稳定性系数降低，最终发生重力坍塌。坍塌体进入河道后，可能形成堰塞或潜坝，改变局部水流结构，加剧下游冲刷。

### （二）冻融剥落型

该地质现象多发育在海拔3500米以上的阴坡地带与季节性冻土区域，整体分布占比为19.4%。岩土体内部的孔隙水处于负温环境时会发生冻结并产生膨胀效应，体积增幅约9%，进而对岩土体产生冻胀作用力；进入升温阶段后，土体内部冰晶逐渐融化，孔

隙水压力快速升高，致使岩土颗粒之间的胶结结构与联结强度大幅衰减。岸坡表层土体经过多次冻融循环作用后，会形成厚度0.3至0.8米的松散破碎层，该层土体在重力牵引作用下，会以片状、块状的形式逐步脱落。根据若尔盖唐古乡实地监测数据，每年3至5月为冻融剥落的高发时段，该阶段单次岸坡土体剥落厚度最大可达15至25厘米。

冻融剥落式岩土破坏的微观演化机制主要包含三个过程。

（1）水分迁移过程。冻结界面会形成吸附吸力，促使未冻结区域的水分向冻结边缘汇聚，最终形成冰分凝现象；

（2）结晶膨胀过程。土体内部冰晶的持续生长会生成膨胀压力，其压力峰值最高可达200MPa；

（3）结构损伤过程。冻融交替反复作用会使岩土体内部产生微小裂隙，并推动裂隙不断发育、相互贯通，逐渐使土体整体力学强度降低。相关试验研究证实，砂岩试样历经200次冻融循环处理后，其单轴抗压强度会出现30%~50%的降幅。

### （三）重力崩塌型

重力崩塌型岸坡破坏主要发育于深切峡谷地段，岩土类型以半固结砂砾岩和泥岩为主，在各类岸坡破坏类型中占比9.7%。该类边坡普遍具备陡峭的地形特征，坡角多大于 $55^\circ$ 、坡高介于30~80m，且岩体内部发育多条卸荷裂隙，整体结构稳定性较差。在暴雨入渗、地震动力扰动、库水位快速下降等外部诱因作用下，坡体岩土体会沿内部软弱结构面发生整体失稳破坏，主要运动形式包括滑坡、崩塌以及碎屑流等。

龙羊峡库区左岸在2021年时出现过一次规模较大的岸坡崩塌现象，当时崩塌的岩土方量约12万立方米。大量垮塌的岩体堆积在河道支流处，直接堵塞水流并形成堰塞湖。这类重力崩塌灾害往往突发性较强、破坏力度大，对库区边坡安全威胁极高，一直以来都是库区岸坡治理和防护工作的重难点。

目前，极限平衡法是业内分析重力崩塌型斜坡稳定性最常用手段。不过这套传统分析方法存在不少短板，并不适配冻土区斜坡的复杂工况，没办法精准刻画冻土活动层内部温度、水分、应力三场的动态变化规律，也无法有效反映三者的耦合作用机制。已有相关研究验证，把摩尔-库伦强度准则嵌入冻土热-水-力耦合数值模型中，就可以定量分析夏季极端高温天气对多年冻土斜坡稳定性带来的影响。从数值模拟结果能够看出，当多年冻土活动层融化深度达到1.45m时，斜坡土体就会顺着融化界面发生滑移失稳，且形成的滑移破裂面基本和坡面保持平行状态。

### （四）复合破坏型

复合破坏模式是研究区岸坡最主要的失稳类型，占总体破坏形式的42.3%，主要由前述单一破坏类型两两或多重叠加形成。该类灾害的典型演化路径为“冻融松弛-降雨冲刷-重力垮塌”的链式递进过程：冬季反复冻融循环会不断松弛岸坡岩土体的结构面，造成岩体原生结构损伤、整体性下降；春季积雪消融水与降雨共同作用，水体沿岩土裂隙快速下渗，大幅弱化坡体土体的抗剪性能；最终在流水冲刷作用与自重应力的共同驱动下，岸坡出现整体性失稳破坏。

县域内某河段的现场监测数据显示，发育复合破坏特征的岸

坡年均后退量可达1.5~2.3m，变形速率远高于单一冻融剥落或重力崩塌边坡。后续的数值模拟试验也进一步证实，降雨是加剧滑坡体变形的关键因素，其中坡体在水平方向的位移变化最为突出。在降雨环境的影响下，滑坡体的水平变形幅度能够增加25m左右，坡体堆积层中部的最大剪切应变会出现明显增长，塑性贯通区域的安全系数大幅降低，这也让边坡发生失稳破坏的风险快速上升。

复合破坏的链式诱发机制具备明确的递进规律：冻融交替作用在岩土体内部塑造出贯通性裂隙网络，为后期雨水入渗提供了便捷渗流通道；雨水沿裂隙持续下渗后，不仅会产生静水压力与动水压力，还会持续软化、劣化岩土介质的物理力学性质；当土体抗剪强度衰减至临界平衡状态时，岸坡结构彻底失稳并发生整体破坏。整体演变过程呈现“损伤累积—应力重分布—突发性失稳”的阶段性特征，充分体现出冻融作用与水力作用耦合叠加的放大破坏效应。

### 三、岸坡破坏成因机制分析

#### （一）地质地貌基础

新构造运动导致的区域抬升（年均2~4mm）使河流持续下切，形成高陡岸坡，为破坏提供势能条件。河谷深切导致应力释放，岸坡发育卸荷裂隙，成为地下水渗流与冻融作用的优先通道。冻结期，岩土体中水分迁移至冻结锋面，形成冰透镜体，产生体积膨胀（冻胀率3%~8%）；融化期，冰体消融导致土体强度骤降，孔隙水压力升高，抗剪强度降低40%以上。这种“冻胀—融化—强度丧失”的循环，使岸坡岩土体经历反复损伤累积，形成周期性的孔隙水压力波动，加剧了岸坡浅层松动。

#### （二）气候水文驱动

气候变化背景下，研究区呈现“暖湿化”趋势：1961~2020年年均气温上升1.2℃，年降水量增加8.3%，极端降水频次增多<sup>[3]</sup>。水热条件改变加速了冻土退化（年均退化速率4.6cm），削弱了岸坡稳定性。同时，暴雨—径流过程冲刷力增强，直接触发岸坡失稳。

全球气候变暖背景下，区域冰川持续消融退缩，冻土埋藏上限不断下移，彻底改变了原有水文循环结构与演变规律。已有研究指出，热融湖产生的侧向热力侵蚀作用，会对周边冻土工程结构产生强烈的扰动影响。监测数据表明，若湖岸以年均0.8m的速率坍塌后退，路基坡脚及路基中心下方的冻土升温现象会被显著加剧。在湖底年均温度5℃的恒定条件下，叠加湖岸逐年坍塌后退的动态过程后，模拟至第100年时，路基坡脚冻土升温幅度可达0.85℃，路基中心冻土升温0.42℃，冻土融化层深度增加0.6m。该研究结论能够为厘清黄河上游热融湖发育区域的岸坡稳定机制，提供重要的理论参考与数据支撑。

#### （三）人类活动扰动

高寒草甸植被受过度放牧影响，地表覆盖程度显著衰退，部分区域植被覆盖率由初始85%降至60%，致使草本根系的固土防护能力大幅弱化。同时，道路开挖边坡、水利工程施工等人类工

程活动，打破了岸坡原始应力平衡状态，造成坡体应力场重构。此外，库区水位存在幅度最高达20m的周期性升降变化，反复产生的动水压力持续冲刷坡体，进一步加剧岸坡土体的侵蚀破坏程度。

过度放牧是造成高寒草甸退化的重要人为因素，不少区域的地表植被覆盖度明显下滑，部分地段植被覆盖率从原本的85%下降至60%，草本植物根系固土护坡的能力大幅减弱。除了植被退化，人为工程扰动也带来了不小影响，道路切坡、水利设施修建等施工行为，都会打破岸坡原本稳定的应力平衡，使得坡体内部应力场重新分布、调整。除此之外，库区水位会出现周期性涨落，最大波动幅度可达20m，频繁变化的水位会持续产生动水压力冲刷岸坡，不断侵蚀、弱化坡体土体结构，进一步加重了岸坡的破坏程度。

某流域采用分区治理的方式开展综合生态整治工作，实践结果表明，这种方式能够有效抑制流域内的泥沙产出。治理工作按照区域特点分层推进，工作人员在上游丘陵地带重点开展植被修复工作、在中游风沙区域主打防风固沙治理、在下游平原片区则着重完善防洪减灾体系。从实际治理成效数据来看，该流域汇入黄河的泥沙浓度从原先的1550kg/m<sup>3</sup>下降至195kg/m<sup>3</sup>，效果极为可观。同时区域生态植被状况得到大幅提升，森林覆盖率由10.19%提升至28.9%，整体植被覆盖度也从64.4%增加到了78.8%。

### 四、岸坡防护对策建议

结合研究区岸坡各类失稳破坏的特征与形成机理，本文因地制宜搭建了一套差异化的边坡防控体系，针对不同破坏类型匹配对应的治理方案，具体措施如下：

#### （一）冲刷侵蚀型边坡治理

这类边坡的治理主要依靠生态护坡技术，优先选用垂穗披碱草、冷地早熟禾等本地优势草种，在坡面搭建草本防护层。同时搭配枝桠编篱、灌丛垫这类常见的生态工程手段，能有效提高表层土体的抗冲刷能力。对于水流冲刷强烈、病害更严重的重点岸段，单纯生态措施往往不够，可配合布设格宾网垫、抛石护脚等工程结构，搭建柔性防护体系。

#### （二）冻融剥落型边坡治理

冻融破坏治理主要从排水、控温、固坡三个方面入手。首先优化坡面排水布局，合理设置截水沟与排水孔，快速疏导坡体内部积水、降低岩土含水率。其次在坡面铺设聚苯乙烯板等保温材料，缓冲外界昼夜、季节温差对浅层土体的影响。除此之外，可人工栽种高山柳、沙棘这类深根系乡土灌木，既能依靠根系锚固土体、加固坡体，又能通过植被蒸腾作用辅助排水，避免坡面出现松散、剥落等病害问题。

#### （三）重力崩塌型边坡治理

首先，布设自动化坡体形变监测系统，全天候捕捉边坡的细微变形情况，以此实现地质灾害的提前预警。针对那些稳定性差、崩塌风险极高的危险岸坡，可通过削坡减载、锚索锚固、格

构护坡等常规工程方式加固坡体，整体提升边坡的结构稳定性。而对于库区周边的岸坡，重点在于优化水库的调度运行方式，严格把水位单日下降速率控制在0.5m以内，以此削弱水位骤变带来的动水压力扰动，最大限度降低坡体失稳、崩塌的可能性。

（四）复合破坏型

采取“上截下护”综合措施，坡顶设置截排水沟，坡面实施生态重建，坡脚采用石笼或混凝土护岸；构建“灌木+草本+土工材料”的复合防护体系，兼顾稳定性与生态功能。



岸坡生态防护图片

（五）高寒草甸植被恢复技术

青藏高原高寒草甸区植被恢复是岸坡生态防护的关键。研究表明，人工建植草地和自然草皮移植是主要的生态修复手段。原生草皮生长较好，草皮移植植被易成活，生态恢复较快，因此在江河源高寒草甸生态区的边坡优先考虑“无痕迹”生态恢复技术，如原生草皮护坡、窗式护面墙+原生草皮贴坡、冻土层保温挡土墙+原生草皮贴坡、原生草皮生态边沟等工艺。

草种选择应遵循乡土化原则，可采用垂穗披碱草、青海草地早熟禾、青海冷地早熟禾、青海中华羊茅、冰草等。这些草种具有耐寒、耐旱、根系发达的特点，适应高寒环境，能够有效固土护坡。在祁连山针叶林-高寒草甸生态区，边坡植被防护以撒播草种、栽植灌木为主，工艺可采用撒播、客土喷播、三维网植草、混凝土框架梁植草、拱形骨架植草、植生袋等。

五、结论

（1）黄河上游生态脆弱区河道岸坡破坏可划分为冲刷侵蚀型、冻融剥落型、重力崩塌型及复合破坏型四类，复合破坏为主导模式。

（2）岸坡破坏是地质构造、气候水文、冻土环境及人类活动多因素耦合作用的结果，冻融-水力耦合作用尤为关键，气候变化呈现显著放大效应。

（3）应依据破坏类型与生态功能需求，采取生态护坡、工程加固与监测预警相结合的综合防治策略，实现岸坡稳定与生态保护的协同，为黄河上游生态屏障建设提供技术支撑。

（4）未来研究应进一步开展冻土斜坡长期原位监测，验证数值模拟结果；开发适应气候变暖的韧性防护技术；建立基于生态功能的后评估体系，推动黄河上游生态屏障建设从“工程安全”向“生态安全”转型。

参考文献

[1] 王光谦, 李丹勋, 吴保生, 等. 黄河上游水沙变化与河床演变 [M]. 北京: 科学出版社, 2020: 45-62.  
[2] 黄河水利委员会. 黄河上游河道岸坡稳定性调查评价报告 [R]. 郑州: 黄河水利委员会, 2019.  
[3] 张强, 张良, 姚晓军, 等. 1961-2020年青藏高原气候暖湿化趋势及其空间分异 [J]. 地理学报, 2022, 77(5): 1234-1248.  
[4] 吴青柏, 张泽, 陈继. 季节冻土区岸坡冻融侵蚀机理与防治技术研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1456-1463.  
[5] 刘晓燕, 杨文俊, 李占斌. 黄河上游宽谷段河岸侵蚀速率与影响因素分析 [J]. 水利学报, 2020, 51(6): 712-720.