

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.030

CSTR:32310.14.stbxb.2026.05.030

余杭, 胡德玉, 付兴涛, 等. 水位波动与降雨作用下黄河潼三段岸坡稳定性与变形响应[J]. 水土保持学报, 2026, 40(5): 314-323.

Yu Hang, Hu Deyu, Fu Xingtao, et al. Stability and deformation response of bank slope in Tongguan-Sanmenxia section of Yellow River under water level fluctuations and rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 314-323.

水位波动与降雨作用下黄河潼三段岸坡稳定性与变形响应

余 杭¹, 胡德玉¹, 付兴涛¹, 王 琦²

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024; 2. 山西省三门峡库区管理中心, 山西 运城 044000)

摘 要: [目的] 以黄河潼三段山西侧库岸边坡为研究对象, 探讨水位波动与降雨共同作用下自然岸坡与工程防护岸坡的稳定性及变形响应机制。[方法] 基于 GeoStudio 有限元模拟平台, 集成 SEEP/W、SLOPE/W 和 SIGMA/W 模块, 构建渗流-水压-位移耦合模型; 结合野外原位监测的位移、入渗及降雨数据, 对模型在黄河中游库岸侵蚀研究中的适用性进行验证。[结果] 所建立的耦合模型具有良好适用性; 自然岸坡对水位波动的响应更为敏感, 稳定性变化幅度显著大于工程防护岸坡, 在降雨与水位下降共同作用 72 h 后安全系数降至 0.827, 处于失稳状态, 而工程防护岸坡安全系数为 1.036, 处于欠稳定状态; 工程防护措施可显著抑制岸坡变形, 自然岸坡最大水平位移为 396.26 mm, 远高于工程防护岸坡的 42.28 mm; 岸坡变形受降雨量与水位下降速率共同调控, 当日降雨量超过 100 mm 且水位下降速率达 1.00 m/d 时, 累计水平位移由“渐进式”增长转变为“阶跃式”跃升。[结论] 水位波动与降雨共同作用显著削弱库岸边坡稳定性, 相关性分析可知降雨的影响更为显著; 工程防护措施能够有效提高岸坡稳定性并抑制变形发展, 研究成果可为黄河中游库岸边坡防护提供科学依据。

关键词: 降雨; 水位波动; 渗流; 岸坡稳定; 岸坡变形

中图分类号: TV223.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0314-10

Stability and Deformation Response of Bank Slope in Tongguan-Sanmenxia Section of Yellow River under Water Level Fluctuations and Rainfall

Yu Hang¹, Hu Deyu¹, Fu Xingtao¹, Wang Qi²

(1. College of Water Conservancy Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Sanmenxia Reservoir Area Management Center, Yuncheng, Shanxi 044000, China)

Abstract: [Objective] Taking the reservoir bank slope on the Shanxi side of the Tongguan-Sanmenxia section of the Yellow River as the study object, this study investigates the stability and deformation response mechanisms of natural bank slope and engineering-protected bank the slope under the combined action of water level fluctuations and rainfall. [Methods] Based on the GeoStudio finite element simulation platform, the SEEP/W, SLOPE/W, and SIGMA/W modules were integrated to construct a coupled seepage-water pressure-displacement model. Combined with field in-situ monitoring data on displacement, infiltration, and rainfall, the applicability of the model in reservoir bank erosion studies in the middle reaches of the Yellow River was verified. [Results] The established coupled model showed good applicability. Natural bank slope was more sensitive to water level fluctuations, and their stability variation was significantly greater than that of engineering-protected bank slopes. After 72 h under the combined action of rainfall and water level decline, the safety factor of the natural bank slope decreased to 0.827, indicating instability, whereas the safety factor of the engineering-protected bank slope was 1.036, indicating a marginally stable state. Engineering protection measures could significantly inhibit bank slope deformation. The maximum horizontal displacement of the natural bank slope was 396.26 mm, much higher than

收稿日期: 2026-04-10

修回日期: 2026-05-08

录用日期: 2026-05-14

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-09-02

资助项目: 山西省水利科学技术研究与推广项目 (2024ZF13)

第一作者: 余杭 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 2023510519@link.tyut.edu.cn

通信作者: 付兴涛 (1982—), 女, 博士, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、生态水文等研究。E-mail: fuxingtao@tyut.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

the 42.28 mm of the engineering-protected bank slope. Bank slope deformation was jointly controlled by rainfall amount and water level decline rate. When daily rainfall amount exceeded 100 mm and the water level decline rate reached 1.00 m/d, the cumulative horizontal displacement transitioned from gradual growth to stepwise increase. [Conclusion] The combined effect of water level fluctuations and rainfall significantly weakens reservoir bank slope stability, and correlation analysis shows that rainfall has a more significant impact. Engineering protection measures can effectively improve bank slope stability and inhibit deformation development. The findings can provide a scientific basis for reservoir bank slope protection in the middle reaches of the Yellow River.

Keywords: rainfall; water level fluctuation; seepage; bank slope stability; bank slope deformation

Received: 2026-04-10

Revised: 2026-05-08

Accepted: 2026-05-14

Online(www.cnki.net): 2026-09-02

河岸侵蚀是自然的地形地貌过程,严重的河岸侵蚀可能对河道整治工程造成损害^[1]。水库蓄水后,库岸所处的自然环境发生剧烈变化,从而引发多种侵蚀作用,这些作用从不同方面削弱岸坡的稳定性。库水调度引起的水位周期性变化不仅改变岸坡内部渗流场与应力场分布,而且在湿润或湿润-干燥循环影响下使得岸坡坡脚处发生位移变化^[2],从而诱发岸坡变形与破坏,尤其在暴雨等强降雨条件下,降雨入渗与水位波动耦合作用进一步削弱岸坡稳定性,加剧失稳风险^[3-5]。稳定性取决于岸坡在自然条件及人类活动影响下各种力之间的平衡^[6],受地质构造、岩土体抗剪强度、地下水位波动、降雨量及额外荷载等多因素综合影响,岸坡失稳不仅威胁工程安全,而且可能诱发涌浪、洪涝等次生灾害,造成严重的生命财产损失^[7]。

针对降雨及水位波动对岸坡稳定性的影响,国内外学者已开展大量研究,取得丰富成果。黎良辉等^[8]研究发现,降雨诱发岸坡失稳的根本原因在于土体吸水后体积质量增加、抗剪强度降低;Koyama等^[9]通过二维饱和-非饱和渗流模拟研究发现,暴雨期间因降雨入渗,岸坡潜在滑移面的安全系数显著下降;Li等^[10]研究指出,随着降雨强度增大,岸坡土体的孔隙水压力急剧升高,在重力作用下坡体逐渐趋于失稳并发生坍塌;王元战等^[11]进一步研究指出,降雨强度与土体渗透能力的匹配关系对岸坡稳定性具有重要控制作用,土体的稳定性变化趋势由二者相对大小决定,当雨强接近土体渗透速度时,岸坡稳定性的变化最为不利。相较单一降雨作用,库水位波动较大,尤其是水位快速下降时,对岸坡稳定性的影响更为显著。仇文岗等^[12]研究表明,相较于降雨入渗,库水位涨落对边坡稳定性起关键作用,最小安全系数出现在库水位快速下降期。在机理研究方面,有研究^[13-14]应用合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术等手段,分析水位升降过程中岸坡孔隙水压力场

与应力场的动态响应规律,基于应变极限状态^[15]及考虑岸坡抗剪强度变化^[16],揭示波浪运动的时空演变特征及水位快速波动对岩质岸坡倾覆机理的影响规律,指出库水位上升或下降分别增强或降低岸坡稳定性,而水位下降是岸坡失稳的主要控制因素;Jin等^[17]通过现场监测与离心模型试验,分析水位上升后岸坡变形过程的阶段性特征指出,长期的淹没作用削弱斜坡底部的软岩,加剧基岩的倾倒,从而导致上部覆盖层的滑动。此外,降雨与库水位的耦合作用显著增大边坡的失效概率,进一步加剧岸坡失稳风险,增加滑动体积及破坏规模^[18]。

综上所述,尽管国内外学者对影响岸坡稳定性的因素展开广泛研究,并取得重要进展,但是目前就水位波动与降雨耦合作用下对岸坡稳定性与变形响应的综合影响机制仍有待进一步深入分析。因此,本研究结合实测数据及数值模拟方法,分析水位波动及降雨条件下工程防护岸坡与自然岸坡稳定性响应及位移变化特征,阐明水位变化-降雨联合作用对岸坡水平位移的调控机理,研究成果可为库区岸坡防护工程的优化设计提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究选取潼三段(潼关至三门峡水库坝址之间)山西侧岸坡($34^{\circ}35'28''\sim 35^{\circ}42'26''\text{N}$, $109^{\circ}13'15''\sim 111^{\circ}18'12''\text{E}$)为研究对象,全长约113.5 km,位于秦岭与中条山之间的狭长河谷内,流经山西省芮城、平陆两县,河道平均河宽约1.22 km,属暖温带大陆性半干旱季风气候,春季干旱多风、夏季高温少雨、秋季凉爽湿润及冬季寒冷干燥(图1)。全年降水量为485.70~561.20 mm,多年平均降水量为519.90 mm,降水时空差异显著,其中6—8月与9—11月累计占比达76.80%,呈集中型降水分布模式。研究岸坡大多为第四纪黄土(图1),实测砂粒质量分数达50%,土壤类型为粉砂壤土(表1)。

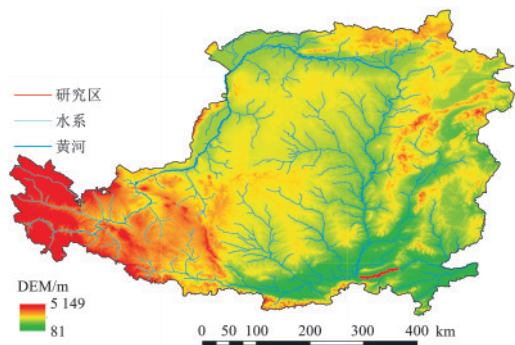


图 1 研究区位置
Fig. 1 Location of study area

表 1 土壤颗粒级配与质地
Table 1 Soil particle size distribution and texture

岸坡类型	砂粒(0.02~0.20 mm)/% 粉粒(0.002~0.02 mm)/% 黏粒(<0.002 mm)/%			土壤类型
	砂粒(0.02~0.20 mm)/%	粉粒(0.002~0.02 mm)/%	黏粒(<0.002 mm)/%	
工程防护岸坡	49.22	44.05	6.73	粉砂壤土
自然岸坡	52.07	38.82	9.11	粉砂壤土

选取形态完整、可进行长期设备监测且具有典型代表性的自然岸坡与工程防护岸坡作为研究对象。目前,研究区工程防护岸坡主要采用复合防护体系,即岸坡坡面下部设置浆砌块石护坡,以减少水流冲刷作用,岸坡水平部分和上坡面采用植被覆盖,以减少降雨入渗,坡顶处为黄河一号旅游公路,岸坡旁边修建排水渠系统,形成人工-自然耦合防护结构;自然岸坡没有任何防护措施,受水位变化和降雨影响显著,尤其在冬季和春季水库蓄水阶段,受西北和东南方向季风影响(最大风速为 20 m/s),可引发高 2.50 m 的波浪,加剧岸坡土壤流失与结构破坏。实测结果显示,工程防护岸坡土壤崩解速率较自然岸坡小(表 2)。

表 4 材料物理力学性质参数
Table 4 Physical and mechanical property parameters of materials

岸坡类型	残余含水量/%	饱和含水量/%	土壤重度(γ)/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)		黏聚力(c)/kPa		内摩擦角(φ)/($^{\circ}$)	
			天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
工程防护岸坡	6.7	26.0	16.1	19.1	15.0	6.0	28.0	20.0
自然岸坡	6.8	25.0	15.3	18.9	25.0	5.0	20.0	16.0

1.2.2 数值模拟方法 基于山西省三门峡库区管理中心给定的岸坡坡度、平台宽度、坡顶高度与宽度等参数设定边界参数,将土体的材料设为弹塑性和各向同性;对于处于水位以下的饱和土材料力学参数采用有效应力,而水位以上的天然状态土材料力学参数为总应力;岸坡内的水位线与坡外水位处于同一水平线上,且岸坡底部为不透水基岩^[21]。

通过 GeoStudio 模拟软件的 SEEP/W 与 SLOPE/W 模块,构建渗流-应力稳定性耦合分析模型,系统研究降雨及水位变化对岸坡渗流场、孔隙水压力、变形及稳定性的影响。具体流程为:第 1 步,在 SEEP/W 模块

表 2 土壤崩解速率和水稳定性指数
Table 2 Soil disintegration rate and water stability index

岸坡类型	崩解速率/($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$)	水稳定性指数(K)
工程防护岸坡	3.92	4.59
自然岸坡	8.63	2.61

1.2 研究方法

1.2.1 野外数据监测 本研究采用野外监测与数值模拟相结合的方法,在自然岸坡与工程防护岸坡坡体中上部布设 GNSS 位移监测系统以监测地表位移,该系统结合 RTK(实时动态差分技术)能够实现毫米级的高精度定位,每 30 min 自动采集 1 次监测数据,并上传至环境综合云平台进行存储与分析;同时在自然岸坡和工程岸坡分别布设 1 台 GDA1602 型孔隙水压力采集仪,每台采集仪均设置双通道(1 通道与 3 通道),传感器在地面以下 2.00 m,每小时自动记录 1 次数据,并实时自动上传至葛南云平台。监测系统的具体位置见表 3。

表 3 监测系统的地理位置
Table 3 Geographical locations of monitoring systems

岸坡类型	纬度(N)	经度(E)	高程/m	距离三门峡水库/km
自然岸坡	34°45'36"	111°02'24"	318.90	29.39
工程防护岸坡	34°45'00"	111°01'48"	319.50	30.58

根据《工程地质手册》(第五版)^[19]的规范要求和由山西省三门峡库区管理局编制的《山西省三门峡库区志》^[20]中经验值,工程防护岸坡和自然岸坡物理力学性质参数见表 4。实测结果显示,工程防护岸坡的饱和渗透系数(K_s)为 0.016 7 cm/s,自然岸坡的饱和渗透系数(K_s)为 0.013 8 cm/s。

中建立岸坡二维渗流模型,进行网格划分并设置初始水位线,首先开展稳态分析以获得初始渗流场分布,在此基础上进行瞬态分析,结合实测水位过程确定边界条件,计算不同工况下孔隙水压力变化;第 2 步,将 SEEP/W 计算得到的孔隙水压力结果导入 SIGMA/W 模块,求解不同水位条件下岸坡变形响应,并与实测位移数据进行对比验证,以校核模型参数的合理性;第 3 步,在模型验证基础上,引入降雨入渗边界条件,并结合不同水位变化工况,分别在 SLOPE/W 模块中计算岸坡稳定安全系数,同时分析累计水平位移变化规律,从而揭示降雨与水位耦合作用下岸坡稳定性与变形响应特征。

2 结果与分析

2.1 GeoStudio 软件中 SEEP 模块和 SIGMA 模块模型的适用性评价

基于 GeoStudio 软件的 SIGMA 模块和 SEEP 模块模拟工程防护岸坡和自然岸坡的累计垂直位移及孔隙水压力,结果显示,工程防护岸坡模拟累计垂直位移量为 79.14 mm,实测值为 87.65 mm,相对误差 9.71%;自然岸坡模拟值为 535.98 mm,实测值为 580.24 mm,相对误差为 7.63%,均小于工程实践中广泛遵循的精

度判定标准 20%。实测与模拟孔隙水压力均随水位上升而增大(图 2),其中工程防护岸坡变化趋势符合线性规律,而自然岸坡更适用于指数函数描述。具体而言,自然岸坡当水位 < 316 m 时,孔隙水压力增速较缓,稳定在 1~3 kPa,水位 > 316 m 时增速显著变快,至 318 m 时岸坡已基本被淹没。工程防护岸坡和自然岸坡孔隙水压力实测值与模拟值的相对误差分别为 4.00% 和 9.46%,均处于可接受的 20% 误差范围内,充分验证 GeoStudio 软件中的 SEEP、SLOPE 及 SIGMA 模块在本研究区域的适用性。

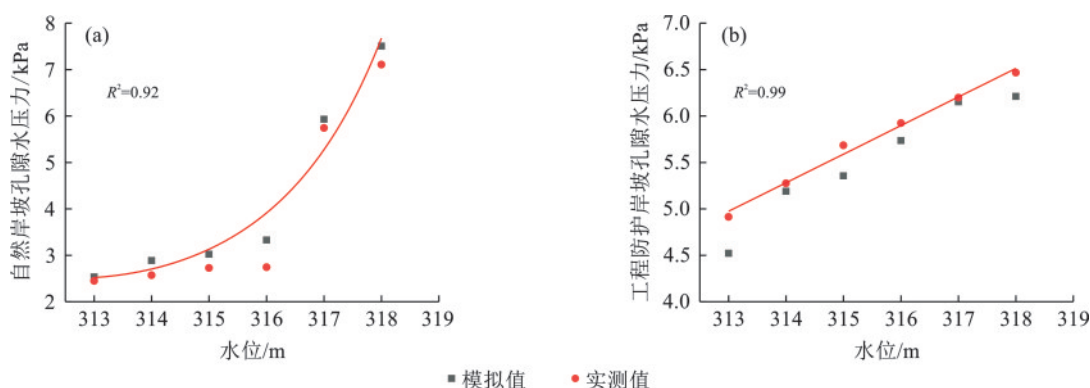


图2 2种类型岸坡孔隙水压力实测值与模拟值对比

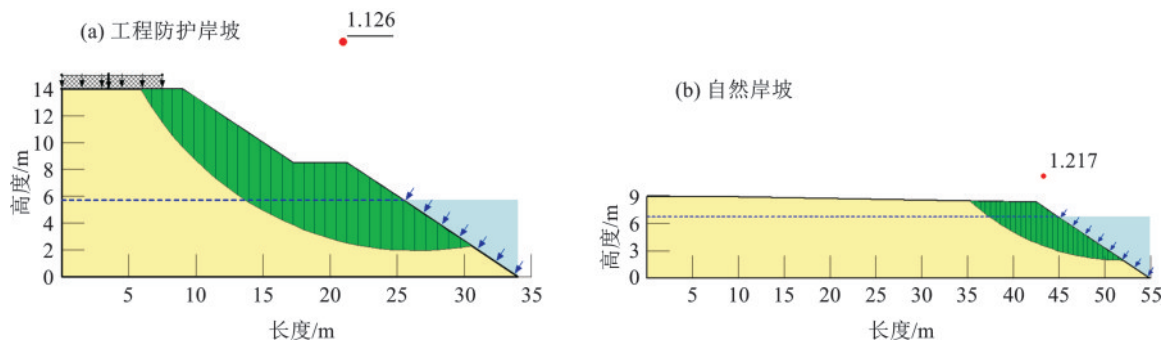
Fig.2 Comparison between measured and simulated values of pore water pressure on two types of bank slopes

2.2 岸坡稳定性对水位变化的响应

研究区河道水位监测数据显示,4月1日至7月5日水位在 306.00~318.20 m 区间波动,其中6月21—27日为三门峡水库集中泄水期,7月8日至10月1日水位基本稳定于 305.00 m,其中7月19—20日水位发生骤升,分别达到 309.27、310.75 m,10月20日至11月30日水位回升至 311.71~318.40 m。

本研究以实测水位数据 316.71 m 为岸坡模型的初始水位。首先,采用 SEEP 模块和 SLOPE 模块中稳态分析方法模拟初始水位条件下的岸坡稳定性;其次,采用瞬态分析方法模拟水位变化条件下渗流途径,分析水位线变化特征;最后,采用 SLOPE 模块

选取岸坡滑移面的范围,揭示临界滑移面条件下岸坡的稳定性,评估岸坡在水位变化下的稳定性。模拟结果显示,工程防护岸坡与自然岸坡在初始水位条件下稳定安全系数分别为 1.126、1.217,根据《水利水电工程边坡设计规范》(SL 386—2007)^[22]和《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)^[23]对四级岸坡正常蓄水位条件下的抗滑稳定安全系数规定,当 $F_s < 1.0$ 时,岸坡处于不稳定状态;当 F_s 为 1.0~1.05 时,岸坡为欠稳定状态;当 F_s 为 1.05~1.15 时,岸坡处于基本稳定状态;当 $F_s > 1.15$ 时,岸坡处于稳定状态。由此可知,2类岸坡在初始水位下分别处于基本稳定与稳定状态(图 3)。



注:图中工程防护岸坡坡顶的黑色箭头表示黄河一号旅游公路荷载,蓝色虚线表示模型中的初始水位线,作用于斜坡上的蓝色实线箭头表示静水压力,绿色部分表示岸坡的滑移面。

图3 工程防护岸坡与自然岸坡初始水位下的稳定安全系数

Fig.3 Safety factors of initial water level for engineering-protected bank slope and natural bank slope

利用 GeoStudio 软件模拟不同水位下岸坡稳定性 (图 4) 显示, 工程防护岸坡与自然岸坡的稳定安全系数分别为 1.033~1.287、0.928~1.718, 说明水位升降变化显著影响岸坡稳定性, 该结果进一步印证 Deng 等^[16]采用有限元方法研究水位波动对岸坡稳定性影响的相关结论, 且自然岸坡稳定性变化幅度显著大于工程防护岸坡稳定性。当水位下降幅度 $\Delta H = -0.67$ m, 下降速率 0.08 m/d 时, 工程防护岸坡与自然岸坡稳定安全系数降幅分别为 0.038 和 0.110, 自然岸坡处于不稳定状态, 说明自然岸坡稳定性对水位变化的敏感性高于工程防护岸坡; 当水位下降幅度 $\Delta H = -5.2$ m, 下降速率 0.75 m/d 时, 工程防护岸坡与自然岸坡的安全系数分别降至 1.033 和 0.928, 降幅分别达 0.107 和 0.496, 自然岸坡稳定性下降幅度较工程防护

岸坡高 0.389, 此时工程防护岸坡和自然岸坡处于最不利工况下, 坡内水位线呈现“外凸”特征^[12] (图 5), 而日渗流量实测结果显示, 2 类岸坡 6 月 27 日渗流量达到最大值 (图 6), 分别为 -0.196 、 -0.342 m^3/d , 滞后时间约为 1 d, 此结果与实测孔隙水压力与水位“响应”时间一致。当水位下降速率突破 0.75 m/d 阈值时, 工程防护岸坡的安全系数达临界安全值 ($F_s < 1.0$), 其滑坡风险概率显著增加。邱嘉琦等^[24]研究指出, 当河道水位下降速率 > 3 m/d 时素土岸坡发生失稳破坏, 与本文 0.75 m/d 阈值有一定差异, 主要由于其岸坡为黏性土, 浸水条件下抗剪强度衰减较研究区粉砂壤土慢。建议实际运行中水位下降速率超过 0.75 m/d 时, 持续跟踪监测库区内岸坡变形及渗流响应, 防范失稳风险。

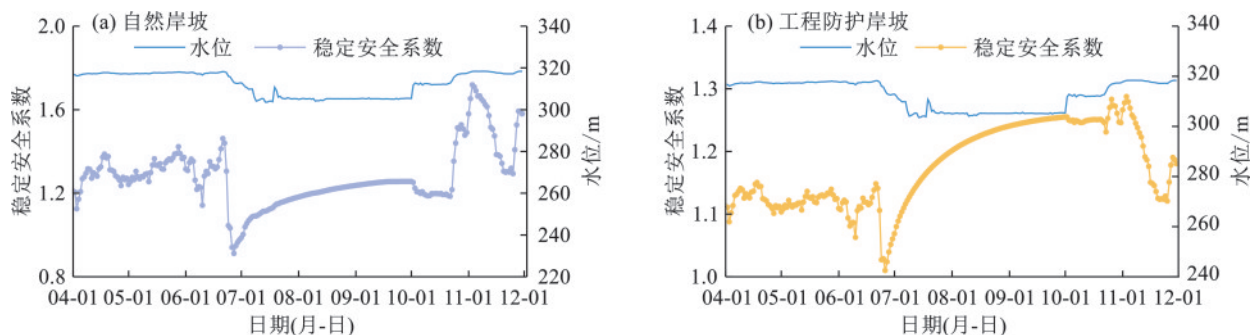


图 4 工程防护岸坡和自然岸坡稳定安全系数随水位的变化曲线

Fig.4 Variation curves of safety factor with water level for engineering-protected bank slope and natural bank slope

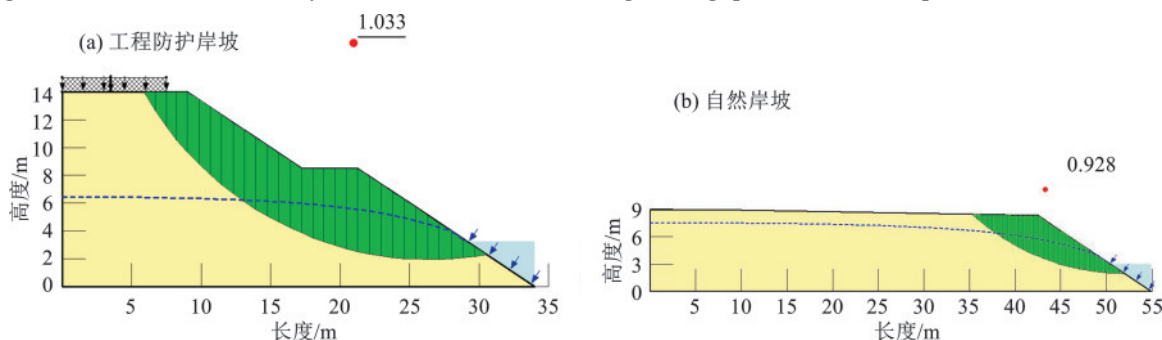
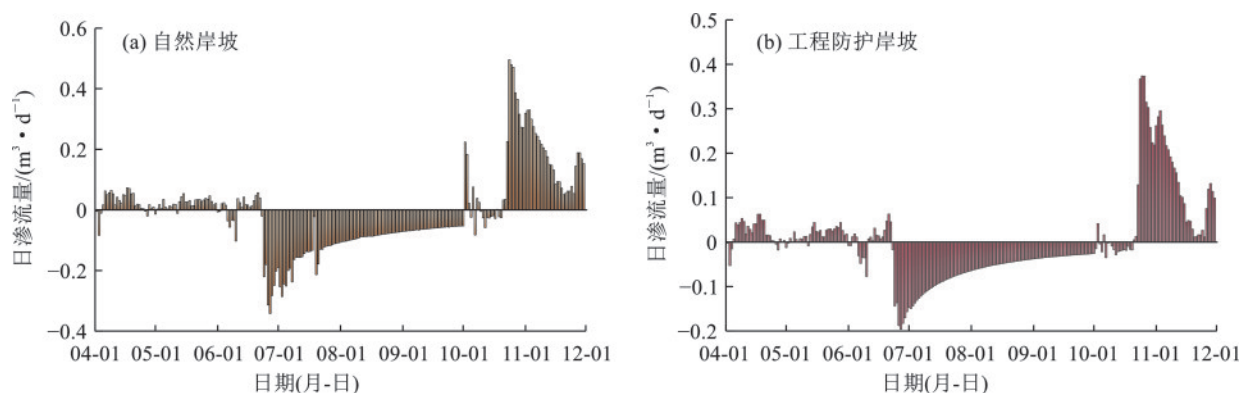


图 5 工程防护岸坡与自然岸坡在最不利情况下水位线

Fig.5 Water levels of engineering-protected bank slope and natural bank slope under the most unfavorable conditions



注: 工程防护岸坡、自然岸坡的渗流量为正数时, 是河道指向岸坡的渗透压力; 渗流量为负数时, 是岸坡指向河道方向的渗透压力。

图 6 工程防护岸坡和自然岸坡日渗流量随时间变化曲线

Fig.6 Variation curves of daily seepage flow over time for engineering-protected bank slope and natural bank slope

2.3 降雨对岸坡稳定性的影响

基于实测日降雨量模拟降雨对岸坡稳定性的影响,设置降雨时间为 24 h,之后 72 h 之内为降雨停止阶段,结果显示,当日降雨量达到 150 mm(研究区极端降雨最大雨量)时,工程防护岸坡与自然岸坡在 48 h 时达到最小稳定安全系数,分别为 1.10、1.11,均处于基本稳定状态(图 7)。降雨期间工程防护岸坡和自然岸坡稳定安全系数与降雨量增加呈负相关,降雨停止后,25 mm/d 降雨量构成 2 类岸坡稳定性恢复的临界值:低于此值岸坡稳定性开始回升;高于此值时岸坡稳定安全系数并未立即回升,反而仍呈下降趋势,表现出明显的“滞后效应”,因降雨量持续超过其饱和渗透系数(0.016 7、0.013 8 cm/s),导致降雨停

止后坡表积水仍持续向坡体内部入渗,引发孔隙水压力滞后上升,从而使岸坡稳定性在降雨结束后仍持续减弱,此降雨稳定性“滞后效应”与实测孔隙水压力变化规律一致。降雨期间,自然岸坡稳定性变幅显著大于工程防护岸坡稳定性,变幅分别为 1.11~1.20、1.105~1.115。现场勘察发现,工程防护结构可有效维持岸坡稳定状态,特别当降雨量超过 25 mm 时,工程岸坡稳定性降幅低于 0.01,而自然岸坡稳定性降幅依次增至 0.024、0.055 及 0.098,呈显著递增趋势。在 48 h~96 h 时,2 类岸坡稳定性均呈缓慢恢复趋势,表明工程措施虽不能改变岸坡稳定性随降雨变化的总体趋势,但能有效减小其稳定性降幅,尤其在极端降雨条件下,工程防护效果更优。

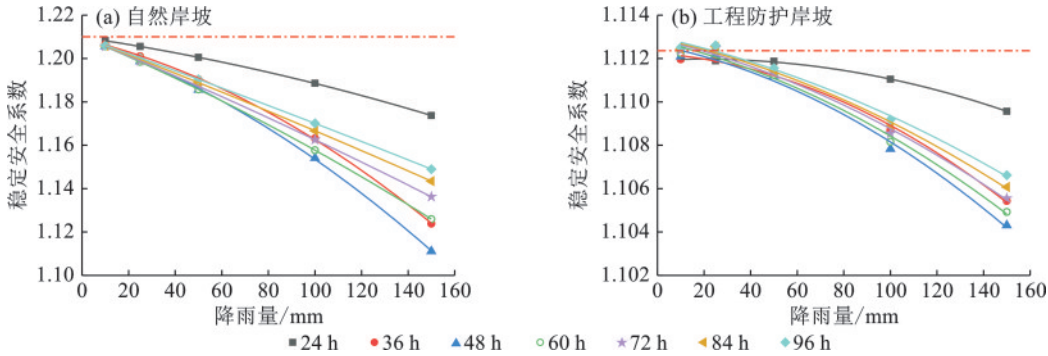


图 7 不同降雨量下工程防护岸坡和自然岸坡稳定安全系数

Fig.7 Safety factors of engineering-protected bank slope and natural bank slope under different rainfall amounts

2.4 降雨量与水位下降共同作用下岸坡稳定性变化

根据实测水位以初始水位 316.71 m 为基准,将 4 个典型水位下降速率(0.25、0.50、0.75、1.00 m/d)与 4 种日降雨量(10、25、50、100 mm)(表 5、表 6)进行组合,基于 GeoStudio 软件模拟不同降雨量与水位下降速率共同作用下工程防护岸坡和自然岸坡稳定性变化,模拟时间为 96 h,其中,前 72 h 为水位下降与降雨变化共同作用阶段,72~96 h 为降雨与水位下降停止作用阶段。

mm/d 分别代表小雨、中雨、大雨及暴雨等级。模拟总时长设定为 96 h,其中前 72 h 为降雨及水位变化作用阶段,后 24 h 为响应恢复阶段。该设置可覆盖典型降雨持续时间(通常为 1~3 d),并反映孔隙水压力消散及岸坡稳定性恢复的滞后效应。

表 6 工程防护岸坡和自然岸坡降雨量变化

Table 6 Variations in rainfall amount of engineering-protected bank slope and natural bank slope

模拟时间/h	小雨/mm	中雨/mm	大雨/mm	暴雨/mm
24	10	25	50	100
48	10	25	50	100
72	10	25	50	100
96	0	0	0	0

表 5 工程防护岸坡和自然岸坡水位变化

Table 5 Variations in water level of engineering-protected bank slope and natural bank slope

模拟时间/h	0.25 m/d	0.50 m/d	0.75 m/d	1.00 m/d
初始水位	316.71	316.71	316.71	316.71
24	316.46	316.21	315.96	315.71
48	316.21	315.71	315.21	314.71
72	315.96	315.21	314.46	313.71
96	315.96	315.21	314.46	313.71

从图 8 可以看出,当降雨与水位变化共同作用 72 h 时,工程防护岸坡和自然岸坡稳定性达最小值,72~96 h 内二者稳定性均开始呈现恢复趋势。特别在相同降雨量条件下,水位下降速率为 0.75、1.00 m/d 工况下,工程防护岸坡处于欠稳定状态,其最小稳定安全系数为 1.036,而此时自然岸坡最小稳定安全系数仅为 0.827,处于不稳定状态,说明在降雨量和水位下降速率共同作用下,工程防护岸坡稳定性相较于自然岸坡提升 25.30%,采取工程防护措施可显著提高岸坡稳定性。

水位变化工况基于研究区 2024 年实测水位变化监测确定,选取 0.25、0.50、0.75、1.00 m/d 作为典型水位下降速率,分别代表缓慢、中等、较快及极端下降情形,能够覆盖研究区水库调度的实际范围。降雨工况依据研究区多年降雨统计特征设置,10、25、50、100

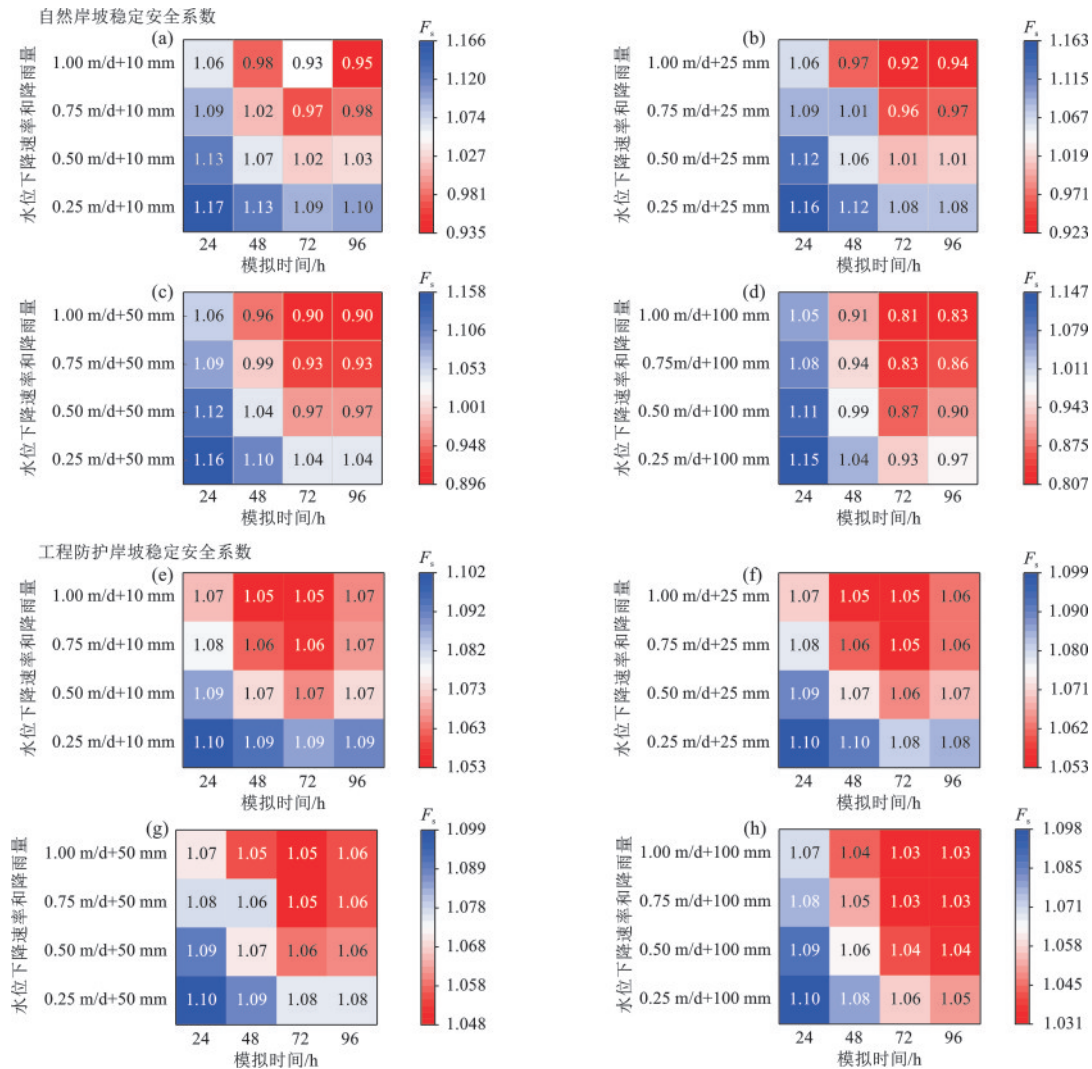


图8 自然岸坡与工程防护岸坡在降雨和水位下降共同作用下稳定安全系数变化

Fig.8 Variations in safety factor of natural bank slope and engineering-protected bank slope under combined action of rainfall and water level decline

基于GeoStudio软件SIGMA模块模拟不同降雨量和水位下降速率共同作用下岸坡水平位移变化结果(图9)可知,日降雨量为10~50 mm且水位下降速率为0.25~0.75 m/d条件下,工程防护岸坡与自然岸坡累计水平位移均呈渐进式增加,前者曲线斜率为0.004~0.189,后者为0.370~1.300,较前者陡增。在日降雨量为100 mm且水位下降速率达1.00 m/d的工况下,累计水平位移显著增加,呈阶跃式变化。在连续降雨72 h和水位下降速率为1.00 m/d时,工程防护岸坡与自然岸坡最大累计水平位移分别为42.28、396.26 mm,前者较后者减少353.98 mm,水位与降雨变化停止后,工程防护岸坡累计水平位移依然增大,而自然岸坡则趋于稳定。相关性分析(表7)显示,工程防护岸坡、自然岸坡的稳定性与水位下降速率和降雨量均呈负相关,其中,降雨量与水位下降速率分别作用时对工程防护岸坡、自然岸坡的稳定性影响较共同作用影响大,降雨量的影响较水位下降速率大。

3 讨论

相较于工程防护岸坡,自然岸坡稳定性对水位变化的响应更为敏感,主要缘于2类岸坡在结构条件与抗侵蚀能力上的本质不同。试验测得,工程防护岸坡土壤崩解速率为3.92 g/min,而自然岸坡为8.63 g/min,显著高于工程防护岸坡,说明其结构松散、抗冲刷能力较弱,在水位波动作用下更易被侵蚀。相比于水位上升,下降阶段更易诱发岸坡失稳,且自然岸坡对此响应更为敏感。当水库水位上升时,虽然自然岸坡坡脚土体被浸泡软化,黏聚力(c)和内摩擦角(φ)显著降低,但外部水体提供的静水压力对坡体产生支撑作用^[25];而在水位下降阶段,外部静水压力迅速消失,坡体内部孔隙水压力消散远小于坡体表面的孔隙水压力,从而导致坡体内部与坡体表面之间形成较大的孔隙水压力差,降低岸坡稳定性^[26]。自然岸坡坡面缺乏防护,岩土体直接遭受波浪淘刷、干湿循环与冻融

循环等物理风化作用,易导致坡脚掏空和裂隙向内部扩展,进一步放大其对水位变化的敏感性。工程防护岸坡稳定性显著优于自然岸坡,其原因在于多种防护措施协同作用。在降雨阶段,坡面植被与排水系统

可有效削弱降雨入渗强度,降低孔隙水压力增长速率;在水位下降阶段,排水设施促进坡体内部水分排出,减弱孔压滞后效应,而浆砌块石护坡可增强坡脚抗冲刷能力并提高整体抗剪强度。

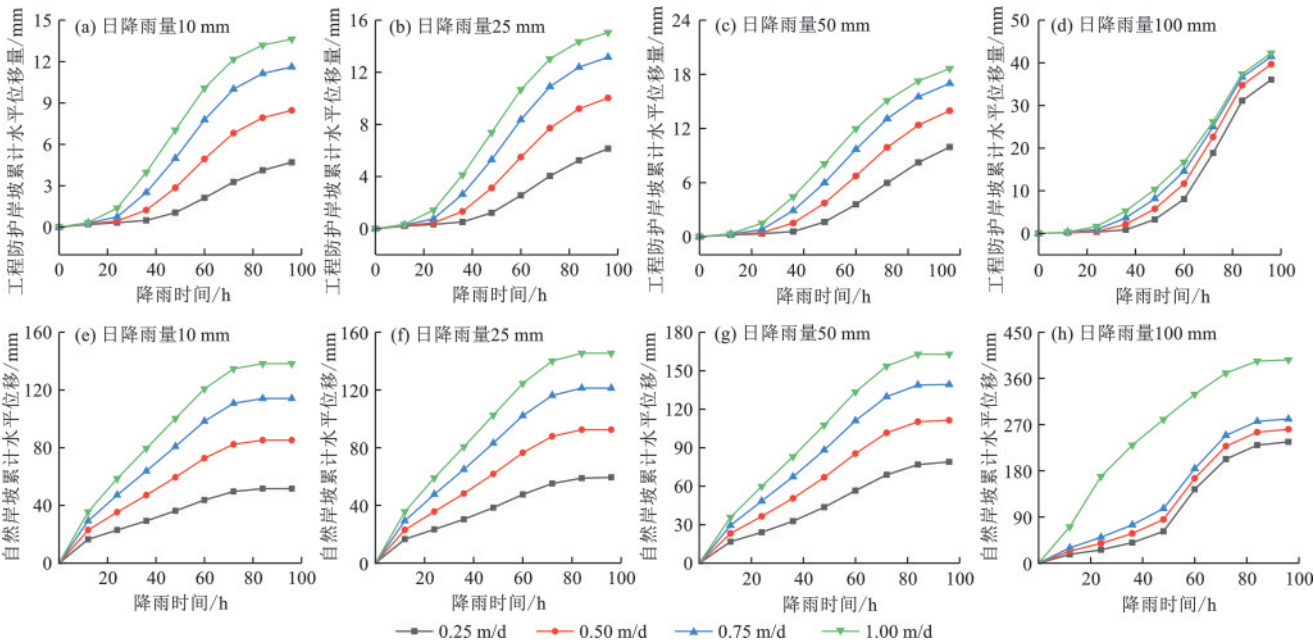


图 9 工程防护岸坡与自然岸坡累计水平位移变化
Fig. 9 Variations in cumulative horizontal displacement of engineering-protected bank slope and natural bank slope

表 7 工程防护岸坡与自然岸坡稳定性与降雨、水位变化相关性分析

Table 7 Correlation analysis between stability of engineering-protected bank slope and natural bank slope and variations in rainfall and water level

影响因素	工程防护岸坡	自然岸坡
水位下降速率	−0.85**	−0.72**
降雨量	−0.98**	−0.99**
降雨和水位下降	−0.96**	−0.97**

注:**表示 $p < 0.01$ 。

在最不利工况下,工程防护岸坡与自然岸坡坡内水位线均呈外凸状,由于岸坡内部渗流场对外部水位变化的响应存在时间滞后^[27],当库水位快速下降时,靠近河道一侧的水位可迅速随外界变化而降低,而坡体内部渗透系数有限,水分排出速度较慢,使内部水位下降滞后,从而形成外高内低的水力梯度,使坡内水位线向外凸出。这种不均匀水头分布在坡体内部产生指向坡外的渗透力,降低有效应力并削弱抗剪强度,是诱发滑移的重要机制。因此,这种“外凸”的水位线不仅是渗流滞后的直观表现,同时也可作为不利状态的判别依据。

当降雨与水位下降共同作用 72 h 后,工程防护岸坡与自然岸坡稳定性均降至最低,而在变化停止后的 24 h 内,稳定性开始逐步回升。其原因在于持

续降雨使雨水不断入渗坡体,使土壤饱和度提高,导致土体在高含水量下有效应力减少,其剪切强度降低^[28];同时水位下降削弱外部水体对坡体的支撑作用,并且水位下降速度大于坡体渗透系数,使得坡体内地下水排出存在一定的滞后效应,同一高程下坡面附近的孔隙水压力低于坡体内,2 种因素叠加使有效应力持续降低,从而导致稳定性降至最低^[29];当降雨与水位变化停止后,坡体内部水分逐渐向外排泄,孔隙水压力开始消散,有效应力逐步恢复,土体的抗剪能力增强,因此岸坡稳定性呈恢复趋势。

在日降雨量为 10~50 mm 且水位下降速率为 0.25~0.75 m/d 的条件下,工程防护岸坡与自然岸坡的累计水平位移均呈渐进式增长,这是由于岸坡的变形与水位下降的速率及降雨强度呈正相关,在较低的降雨强度及水位下降速率下岸坡变形趋于平缓^[30]。而当日降雨量达到 100 mm 且水位下降速率增至 1.00 m/d 时,降雨强度的增大导致孔隙水压力发生变化,随着孔隙水压力的持续增大,岸坡变形显著加速,同时水位下降产生向外的渗透力也导致岸坡出现更大的水平位移,而当降雨与水位变化停止时,土体孔隙水压力消散,从而使岸坡变形减慢,表现出阶跃式增长特征^[31-32],表明降雨与水位下降均导致岸坡发生变形,而强降雨条件增强岸坡的变形破坏^[33]。

4 结 论

1) 基于GeoStudio构建的渗流-水压-位移耦合模型能够较好地反映研究区岸坡稳定性与变形特征,模拟结果与实测数据较吻合,模型具有一定的可靠性和适用性。

2) 水位变化对岸坡稳定性影响较水位显著,其中水位下降阶段最不利,建议水位下降速率超0.75 m/d时,防范工程防护岸坡失稳风险;自然岸坡稳定性对水位变化较工程防护岸坡敏感,且增大水位下降速率,显著降低岸坡稳定性;降雨对岸坡稳定性具有显著削弱作用及滞后效应,且自然岸坡稳定性下降幅度较工程防护岸坡更大。

3) 在降雨与水位下降共同作用下,工程防护岸坡与自然岸坡稳定性均于72 h达到最小值,此时工程防护岸坡仍处于欠稳定状态,而自然岸坡已失稳,表明工程防护措施可有效提升岸坡稳定性;在强降雨及水位快速下降的情况下累计水平位移由渐进式增长转为阶跃式跃升,且降雨的影响较水位波动更大。

本研究基于实测数据与数值模拟方法主要关注水位变化与降雨对岸坡稳定性的影响,尚未考虑波浪对岸坡的侵蚀,且模型参数取值采用均质化假定,未系统考虑岩土体物理力学参数的空间变异性,难以完全反映土体非均质特征的影响。下一步可结合波浪对岸坡侵蚀的长期监测数据,并在模型中考虑岩土体参数的空间变异性,以更真实地反映岸坡的非均质特征及其对稳定性的影响。

参考文献:

- [1] Deng Shanshan, Xia Junqiang, Zhou Yueyao, et al. Prediction and early-warning of bank erosion in the middle Yangtze River, China[J]. *Catena*, 2024, 242: e108105.
- [2] Liu Yaoru, Wang Xiaoming, Wu Zhesu, et al. Simulation of landslide-induced surges and analysis of impact on dam based on stability evaluation of reservoir bank slope[J]. *Landslides*, 2018, 15(10): 2031-2045.
- [3] 丁军领, 吉锋, 魏松, 等. 降雨及库水位作用下碎石土岸坡变形破坏机制模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2025, 46(12): 3740-3756.
- [4] Ding Junling, Ji Feng, Wei Song, et al. Model test of deformation and failure mechanism of gravel soil bank slope under rainfall and reservoir water level[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(12): 3740-3756.
- [5] Simon A, Curini A, Darby S E, et al. Bank and near-bank processes in an incised channel[J]. *Geomorphology*, 2000, 35(3/4): 193-217.
- [6] 张秋桔, 朱平宗, 郭逸轩, 等. 极端降雨条件下三峡库区浅层滑坡发育特征及主控因素[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(6): 181-193.
- [7] Zhang Qiujie, Zhu Pingzong, Guo Yixuan, et al. Development characteristics and main controlling factors of shallow landslides in Three Gorges Reservoir area under extreme rainfall conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(6): 181-193.
- [8] Thorne C R, Tovey N K. Stability of composite river banks[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1981, 6(5): 469-484.
- [9] 杨喜田, 董惠英, 黄玉荣, 等. 黄土地区高速公路边坡稳定性的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(1): 77-81.
- [10] Yang Xitian, Dong Huiying, Huang Yurong, et al. Study on slope stability of expressway in loess region[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000, 14(1): 77-81.
- [11] 黎良辉, 罗星, 赵旭, 等. 降雨条件下临水岸坡失稳试验[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 758-767.
- [12] Li Lianghui, Luo Xing, Zhao Xu, et al. Experiment on water bank instability under rainfall[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology*, 2021, 19(4): 758-767.
- [13] Koyama A, Fujimoto T, Suetsugu D, et al. Analysis of embankment failure mechanism in reservoirs due to rainfall infiltration during heavy rainfall[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2022, 13(1): 1849-1866.
- [14] Li Yu, Yang Xuezhi, Hu Xiao, et al. Mechanisms of rainfall-induced landslides and interception dynamic response: A case study of the Ni Changgou landslide in Shimian, China[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: e1567.
- [15] 王元战, 袁永强, 吴林键. 降雨入渗条件下内河航道岸坡稳定性分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(3): 403-411.
- [16] Wang Yuanzhan, Yuan Yongqiang, Wu Linjian. Stability analysis of inland waterway bank slope under rainfall infiltration[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2019, 39(3): 403-411.
- [17] 仇文岗, 冉博, 顾鑫, 等. 库水位变化和降雨联合作用下黑水河岸坡稳定可靠度分析[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2025, 47(6): 43-51.
- [18] Zhang Wengang, Ran Bo, Gu Xin, et al. Reliability analysis of bank slope stability in the Heishui River under combined effects of reservoir water level changes and rainfall[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2025, 47(6): 43-51.
- [19] Zangerl C, Eberhardt E, Perzmaier S. Kinematic behaviour and velocity characteristics of a complex deep-seated crystalline rockslide system in relation to its interaction with a dam reservoir[J]. *Engineering Geology*, 2010, 112(1/2/3/4): 53-67.
- [20] Guo D, Hamada M, Jia H. Influential factors on slope stability and landslide mobility[G]//IACGE 2013: Challenges and Recent Advances in Geotechnical and Seismic Research and Practices, 2013: 247-254.
- [21] Jadid R, Montoya B M, Bennett V, et al. Effect of repeated rise and fall of water level on seepage-induced deformation and related stability analysis of Princeville

- levee[J].Engineering Geology,2020,266:e105458.
- [16] Deng Zezhi, Wang Gang, Wang Zhaonan, et al. Modeling erosion and stability degradation of a reservoir slope under periodic water level fluctuations[J].Computers and Geotechnics,2024,166:e106021.
- [17] Jin Leilei, Wei Yufeng, Ye Fei, et al. Large-scale toppling slope under water level fluctuation of reservoir: A case of Yunnan Province, China[J].Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2024,16(8):3034-3046.
- [18] Li Yihang, Xu Xiangzhou, Guo Shengli. Coupled effects of heavy rainfall and falling water-level exhibit the most significant influences on reservoir bank failures[J].Earth Surface Processes and Landforms,2024,49(10):3177-3188.
- [19] 《工程地质手册》编写组.工程地质手册[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2018.
- Engineering Geology Manual Editorial Committee. Engineering Geology Manual[M].5th Edition. Beijing: China Architecture and Building Press,2018.
- [20] 山西省三门峡库区管理局.山西省三门峡库区志[M].郑州:黄河水利出版社,2007.
- Sanmenxia Reservoir Area Administration of Shanxi Province. Annals of Sanmenxia Reservoir Area in Shanxi Province[M].Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press,2007.
- [21] 李晨嘉,孙立娟,赵一韩,等.基于GeoStudio的降雨入渗边坡稳定性分析的数值模拟研究[J].吉林建筑大学学报,2024,41(5):44-52.
- Li Chenjia, Sun Lijuan, Zhao Yihan, et al. Numerical simulation of stability analysis of rainfall infiltration slope based on GeoStudio[J].Journal of Jilin Jianzhu University,2024,41(5):44-52.
- [22] 中华人民共和国水利部.水利水电工程边坡设计规范:SL 386—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2007.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical code for design of slopes in hydraulic and hydroelectric engineering: SL 386—2007 [S]. Beijing:China Water and Power Press,2007.
- [23] 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.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of levee project: GB 50286—2013[S].Beijing: China Planning Press,2013.
- [24] 邱嘉琦,余明辉,李倩.水位变化条件下植被对下荆江河段岸坡稳定性影响分析[J].水利学报,2024,55(1):60-70.
- Qiu Jiaqi, Yu Minghui, Li Qian. Analysis of the influence of vegetation on the riverbank stability in the lower Jingjiang reach under water level change [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(1):60-70.
- [25] Liu Yaoru, Gao Chenfeng, Zhuang Wenyu, et al. Prediction and early warning analysis of reservoir bank slopes based on anti-sliding stability evolution [J]. Geoscience Frontiers,2025,16(5):e102113.
- [26] 蒋家发.库水位下降条件下动水压力型滑坡失稳的分析[J].水利科技与经济,2025,31(2):22-25.
- Jiang Jiafa. Analysis of instability of hydrodynamic pressure landslide under the condition of reservoir water level decline [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy,2025,31(2):22-25.
- [27] Zhang Pengjiao, Gao Yuan, Liu Yachao, et al. Evaluation of slope stability and landslide prevention in a closed open-pit mine used for water storage [J]. Applied Sciences,2025,15(15):e8659.
- [28] 唐庆瑜,盖永杰.降雨与水位升降联合作用下库岸边坡渗流场及稳定性分析[J].水利科学与寒区工程,2025,8(8):25-28.
- Tang Qingyu, Gai Yongjie. Analysis on seepage field and stability of reservoir bank slope under the combined action of rainfall and water level rise and fall [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering,2025,8(8):25-28.
- [29] 麻潇文,黄晓虎,杨岚峒.降雨与库水作用下大型膨胀土滑坡变形机制研究[J].中国地质灾害与防治学报,2025,36(5):21-32.
- Ma Xiaowen, Huang Xiaohu, Yang Lanyao. Study on deformation mechanism of large expansive soil landslide under rainfall and reservoir water[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2025,36(5):21-32.
- [30] 尚敏,廖芬,马锐,等.白家包滑坡变形与库水位、降雨相关性定量化分析研究[J].工程地质学报,2021,29(3):742-750.
- Shang Min, Liao Fen, Ma Rui, et al. Quantitative correlation analysis on deformation of Baijiabao landslide between rainfall and reservoir water level [J]. Journal of Engineering Geology,2021,29(3):742-750.
- [31] Li Yabo, Hu Xinli, Zhang Haiyan, et al. Displacement prediction and failure mechanism analysis of rainfall-induced colluvial landslides [J]. Journal of Hydrology,2025,660:e133361.
- [32] 刘东泽,谭燕,卢应发.基于库水位涨落与降雨耦合作用下新田崩塌体变形分析[J].科学技术与工程,2021,21(31):13238-13247.
- Liu Dongze, Tan Yan, Lu Yingfa. Analysis of Xintian collapsed body deformation based on the coupling action of reservoir water level fluctuation and rainfall[J].Science Technology and Engineering,2021,21(31):13238-13247.
- [33] 杨潇,晏鄂川,贾琳,等.降雨-库水联合作用下的丹江口库区金岗滑坡机理研究[J].安全与环境工程,2026,33(2):187-198.
- Yang Xiao, Yan Echuan, Jia Lin, et al. Study on the mechanism of Jingang landslide under the combined action of rainfall and reservoir water in Danjiangkou Reservoir area [J]. Safety and Environmental Engineering,2026,33(2):187-198.