

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.06.004 CSTR:32310.14.stbcbx.2025.06.004

肖海,杨瑞东,夏振尧,等.碎石含量对三峡消落带波浪侵蚀的影响[J].水土保持学报,2025,39(6):49-56.

XIAO Hai, YANG Ruidong, XIA Zhenyao, et al. Effects of gravel content on wave erosion in Three Gorges Reservoir water-level fluctuation zone [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):49-56.

## 碎石含量对三峡消落带波浪侵蚀的影响

肖海<sup>1,2,3</sup>, 杨瑞东<sup>1</sup>, 夏振尧<sup>1,2,3</sup>, 张伦<sup>1,2,3</sup>, 刘德玉<sup>1</sup>,  
向瑞<sup>1</sup>, 刘子睿<sup>1</sup>, 丁瑜<sup>1,2,3</sup>, 刘琦<sup>1,2</sup>

(1.三峡库区地质灾害教育部重点实验室,湖北宜昌 443002; 2.三峡大学土木与建筑学院,湖北宜昌 443002;  
3.三峡库区生态环境教育部工程研究中心,湖北宜昌 443002)

**摘要:** [目的]明确碎石含量对三峡库区消落带波浪侵蚀的影响,为消落带波浪侵蚀治理提供理论依据。[方法]以三峡库区紫色土坡面为研究对象,设置4个碎石含量(10%、20%、30%和40%)和3种坡度(10°、20°和30°),以裸土为对照组CK,开展室内模拟波浪冲刷试验,测定水体浑浊度值、波浪侵蚀率和孔隙水压力,阐明碎石含量对坡面波浪侵蚀的影响。[结果]1)水体浑浊度随波浪冲刷时间的增加呈现先上升后降至波动稳定的变化趋势,含碎石试验组水体浑浊度值相比CK组减小3.64%~25.93%;2)波浪侵蚀率和孔隙水压力随碎石含量的增加而显著减小,与CK相比,波浪侵蚀率减小11.24%~42.85%,孔隙水压力降低1.74%~30.47%;3)相关性分析表明,波浪侵蚀率与浑浊度和孔隙水压力呈极显著正相关( $p<0.01$ ),与坡度呈不显著正相关( $p>0.05$ ),而与碎石含量呈极显著负相关( $p<0.01$ )。[结论]碎石分别通过减少孔隙水压力累积和增加坡面粗糙度以增强坡面抗侵蚀能力和耗散波浪能量,从而削弱波浪剥离和搬运土壤颗粒的能力,减少波浪侵蚀。

**关键词:**碎石含量;孔隙水压力;波浪侵蚀;消落带

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2025)06-0049-08

## Effects of Gravel Content on Wave Erosion in Three Gorges Reservoir Water-Level Fluctuation Zone

XIAO Hai<sup>1,2,3</sup>, YANG Ruidong<sup>1</sup>, XIA Zhenyao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Lun<sup>1,2,3</sup>, LIU Deyu<sup>1</sup>,  
XIANG Rui<sup>1</sup>, LIU Zirui<sup>1</sup>, DING Yu<sup>1,2,3</sup>, LIU Qi<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 2.College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;  
3.Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** [Objective] To clarify the effects of gravel content on wave erosion in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area, so as to provide a theoretical basis for wave erosion control in water-level fluctuation zones. [Methods] A purple soil slope in the Three Gorges Reservoir area was used as the research object. Indoor scouring experiments were conducted to simulate wave erosion with four levels of gravel content (10%, 20%, 30%, and 40%) and three slope gradients (10°, 20°, and 30°). Bare soil served as the control group (CK). Water turbidity, wave erosion rate, and pore water pressure were measured to clarify the influence of gravel content on wave erosion of the slope surface. [Results] 1) With increasing wave scouring time, water turbidity showed a trend of first rising, then falling, and eventually stabilizing with fluctuations. Compared with the CK group, the turbidity values in the gravel content groups were reduced by 3.64%–25.93%. 2) Wave

收稿日期:2025-05-07 修回日期:2025-05-26 录用日期:2025-06-08 网络首发日期(www.cnki.net):2025-07-24

资助项目:国家自然科学基金项目(U21A2031);土木工程防灾减灾湖北省引智创新示范基地项目(2021EJD026)

第一作者:肖海(1988—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与生态防护研究。E-mail:oceanshawctgu@163.com

通信作者:刘琦(1991—),男,博士后,硕士生导师,主要从事水土保持与根系固土机理研究。E-mail:ctgulq1016@163.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

erosion rate and pore water pressure decreased significantly with increasing gravel content. Compared with the CK group, the wave erosion rate decreased by 11.24%–42.85%, and pore water pressure decreased by 1.74%–30.47%. 3) Correlation analysis indicated that wave erosion rate was extremely significantly positively correlated with water turbidity and pore water pressure ( $p < 0.01$ ), showed a insignificant positive correlation with slope gradient ( $p > 0.05$ ), and was extremely significantly negatively correlated with gravel content ( $p < 0.01$ ). [Conclusion] Gravel enhances the erosion resistance of slopes and dissipates wave energy by reducing the accumulation of pore water pressure and increasing surface roughness, thereby weakening the ability of waves to detach and transport soil particles and reducing wave erosion.

**Keywords:** gravel content; pore water pressure; wave erosion; water-level fluctuation zone

Received: 2025-05-07

Revised: 2025-05-26

Accepted: 2025-06-08

Online(www.cnki.net): 2025-07-24

消落带是由于水位周期性变化而形成的干湿交替区域,具有水文调节、污染拦截、生物保育和岸线防护等多种功能<sup>[1]</sup>。三峡库区消落带周期性的淹水-出露会引发消落带土壤结构性能退变,并造成严重的水土流失。已有研究<sup>[2]</sup>表明,长江干流和支流消落带土壤侵蚀模数分别为 54 050、9 191 t/(km<sup>2</sup>·a),是三峡库区平均土壤侵蚀模数的 16、3 倍以上,其中波浪侵蚀占 70%,是三峡库区消落带的主要侵蚀形式。严重的土壤侵蚀威胁长江经济带生态安全及三峡工程全生命周期运行<sup>[3]</sup>。

波浪通过层蚀、舔蚀和淘蚀等作用剥蚀表层土壤,长期作用甚至会致使坡体结构失稳并衍生地质灾害。波浪对坡面的侵蚀过程可分为入射、上爬和回落 3 个阶段,其中入射冲击和回落冲刷对斜坡的破坏作用最为显著<sup>[4]</sup>。波浪的周期性作用会在岸坡形成侵蚀坎,当坎体向内发育至临界深度时,上部土体因重力作用塌落;随后,波浪继续淘蚀坡脚,使岸坡不断后退。此过程中,波浪引起的孔隙水压力变化和土颗粒间的相互作用导致循环剪切力累积,若超过土体抗剪强度,可能引发土体液化或变形,进而降低岸坡稳定性,最终导致塌岸<sup>[5]</sup>。波浪侵蚀强度受岸坡特征与波浪运动参数的影响。王力等<sup>[6]</sup>研究表明,坡度越大,波浪爬高越大,岸坡侵蚀速率越快;GERIVANI 等<sup>[7]</sup>进一步研究发现,波浪力方向与岸坡的夹角越大,垂直于岸坡的波浪能量越大,波浪侵蚀速率越快;CHANG 等<sup>[8]</sup>研究发现,波高的增大会提升波浪能量,进而加剧岸坡侵蚀程度;OZEREN 等<sup>[9]</sup>构建侵蚀率与岸坡后退速率和波高间的函数关系。然而,现有成果大多聚焦于土质坡体,很少考虑库区消落带土体中含有大量碎石这一特性,关于碎石对波浪侵蚀的影响研究还不够系统深入。

库区消落带土壤为紫色土,相关调查<sup>[10]</sup>分析表明,紫色土中含有大量碎石,而碎石对土壤侵蚀影响

明显。土壤中碎石含量通过改变土壤的组成和结构,增强土壤的抗蚀性和抗冲性<sup>[11]</sup>。李魁等<sup>[12]</sup>研究指出,土壤中碎石可以减缓坡面流速并增加坡面侵蚀阻力,从而减少坡面降雨侵蚀量;陈卓鑫等<sup>[13]</sup>研究指出,碎石可显著提升红壤堆积体的抗侵蚀性;赵满等<sup>[14]</sup>研究指出,含碎石坡面侵蚀量较土质坡面减少 22.80%~63.27%。前人关于碎石含量对土壤侵蚀的影响主要是在降雨条件下开展,而很少关注碎石对波浪侵蚀的影响。值得注意的是,降雨侵蚀主要是雨滴打击和径流冲刷过程,而波浪侵蚀则包含波浪入射至坡面、沿坡面上爬和回落等循环过程<sup>[4]</sup>,波浪侵蚀过程和机理与降雨侵蚀存在明显区别,碎石含量对侵蚀过程的影响可能存在明显区别。因此,有必要研究碎石含量对波浪侵蚀的影响,为后续波浪侵蚀控制提供可靠的依据和借鉴。

因此,本研究以三峡库区消落带紫色土坡面为研究对象,设置 4 个碎石含量(10%、20%、30% 和 40%)和 3 种坡度(10°、20°和 30°),以裸土为对照组 CK,明确碎石含量对消落带波浪侵蚀的影响,以期为三峡库区消落带碎石土坡面波浪侵蚀治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

以三峡库区消落带紫色土坡面为研究对象<sup>[5]</sup>,试验用土来源于湖北省宜昌市秭归县水田坝乡(30°10'15"~30°21'32"N,110°38'10"~110°44'20"E)。采集的土壤经去除地表枯落物后,运输至试验场地,风干后碾碎并通过 5 mm 筛备用。经测定,土壤体积质量为 1.35 g/cm<sup>3</sup>,粒径组成黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.050 mm)、砂粒(0.050~2.000 mm)分别占 15.25%、26.52% 和 58.23%,pH 为 6.67,有机质质量分数为 6.50 g/kg,为黏性土。碎石为天然岩石破碎制得,平均密度为 1.79 g/cm<sup>3</sup>,使用清水冲洗自然

晾干后,采用标准筛网进行粒径分级处理,最终按试验需求分装备用。

## 1.2 试验设计与装置

三峡库区紫色土碎石含量在40%以下,其中碎石粒径在5~20 mm的占80%以上<sup>[10]</sup>,筛分结果显示,5~10、10~15、15~20 mm的碎石粒径组成比例约5:3:2。基于上述特征,本研究按照5:3:2比例混合5~10、10~15、15~20 mm粒径,通过公式(1)、公式(2)计算碎石和土壤质量将其放入搅拌机进行均匀拌和,将其均匀混入土体中形成4种碎石含量(10%、20%、30%、40%),并以无碎石混入的裸土为对照组(CK),以研究碎石含量的影响。

$$M_R = \rho_R V_R \quad (1)$$

式中: $M_R$ 为碎石质量,g; $\rho_R$ 为碎石密度,g/cm<sup>3</sup>; $V_R$ 为土石混合物中碎石的体积,cm<sup>3</sup>。

$$P_R = \frac{M_R}{M_R + M_S} \times 100\% \quad (2)$$

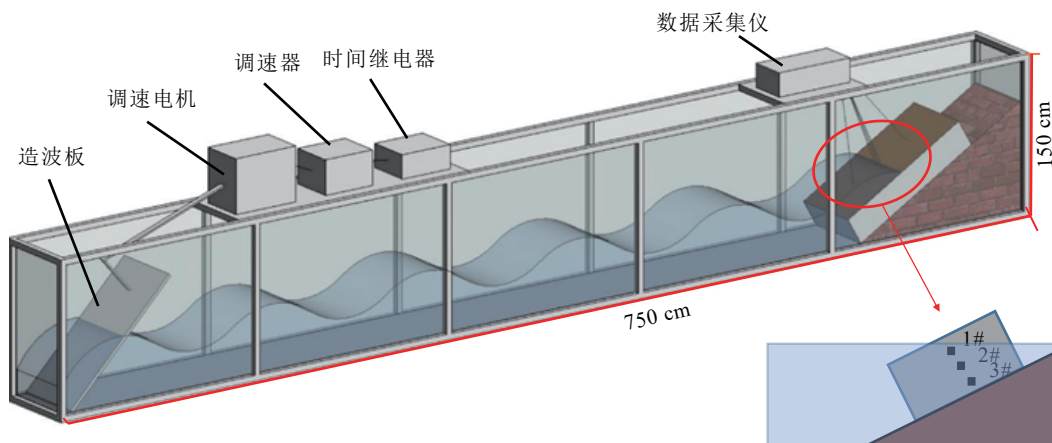


图1 波浪冲刷装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of wave scouring device

## 1.3 试验流程

试验于2023年9月10日至11月20日在三峡库区地质灾害教育部重点实验室生物岩土水土治理试验场地进行。先将土样与碎石均匀混合后,采用分层填筑法按每层5 cm的厚度将混合料逐层填入自制土槽(0.75 m×0.50 m×0.20 m)。自制土槽底部设有直径为5 mm的透水孔,并在装土前铺设细纱网以保持透水性能并防止土壤流失。每层填筑完成后进行压实处理保证达到设计的体积质量,通过刮毛工艺确保层间结合面粗糙,避免出现分层现象,累计完成4层填筑,形成深度为20 cm的完整坡面。为提高土石接触效果及恢复土壤结构,在冲刷试验开始前对试样进行5次干湿循环处理:每次循环需24 h吸水饱和,随后自然排水至无连续水滴渗出。正式波浪冲刷试验前将试样饱和以消除前期含水量的影响,随后将土槽放置在预设坡度的波浪冲刷装置中,并

式中: $P_R$ 为碎石质量百分比,%; $M_S$ 为土壤质量,g。

依据《水运工程模拟试验技术规范》(JTS/T 231—2021)<sup>[15]</sup>设计试验所用波浪冲刷装置(7.5 m×0.5 m×1.5 m)。波浪冲刷装置整体结构是由钢框架和有机玻璃构建而成,包括造波系统和数据采集系统(图1)<sup>[16]</sup>。造波系统由调速电动机、时间继电器、造波板和开关组成,可精确调节波高和波浪周期;数据采集系统由3个高精度压力传感器(精度为0.005 kPa)和数据采集仪(CYY22型)组成。在深度为5、10、15 cm的中轴线位置分别预埋1#、2#、3#孔隙水压力传感器,用于实时监测波浪冲刷过程中的孔隙水压力变化。考虑三峡库区消落带坡度<30°的岸坡占比超过80%<sup>[17]</sup>,试验设置3种典型坡度(10°、20°、30°)模拟不同消落带坡度岸坡。参考三峡库区近岸波浪实际分布<sup>[18]</sup>,同时考虑波浪周期为1.2 s时对岸坡的侵蚀作用最为显著<sup>[19]</sup>,因此,本研究采用正弦波试验,并将试验波高和波浪周期分别设定为8 cm和1.2 s。

将传感器埋入固定位置与数据采集系统相连。将波浪冲刷装置充水至设计水位(30 cm),启动波浪冲刷装置并率定波浪参数,在土槽前布置垂直于波浪的木板以防止波浪率定过程中波浪对土体形成侵蚀,待形成稳定的设计波浪后移开木板开始正式模拟波浪冲刷试验,并开启数据采集系统。试验过程中每3 min在固定位置处取样并使用浑浊度仪测定水体浑浊度,待冲刷60 min后停止试验。试验完成后,将排水口打开以获得水和沉积物的混合物,静置混合物将上清液倒掉得到沉淀物,通过干燥并称量获得侵蚀量。每组波浪试验重复3次,计算平均数据用于后续分析。

## 1.4 数据处理与统计分析

试验结束后收集冲刷后产生的沉淀物,进行烘干称重后获得波浪侵蚀量,并计算波浪侵蚀率( $E$ )。

$$E = \frac{M}{A \times T} \quad (3)$$

式中:  $E$  为波浪侵蚀率,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ;  $M$  为冲刷槽内泥沙烘干后的质量,  $\text{kg}$ ;  $A$  为坡面表面积,  $\text{m}^2$ ;  $T$  为冲刷时间,  $\text{min}$ 。

使用 Excel 2022 软件对数据进行收集整理, 采用 SPSS 2016 软件进行显著性和回归性分析, Origin 2022 软件进行图形绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 水体浑浊度

各试验条件下, 水体浑浊度值随着时间的增加呈先增加后减小并趋于稳定的变化趋势, 碎石含量和坡度均对水体浑浊度造成影响(图 2)。整体来看,

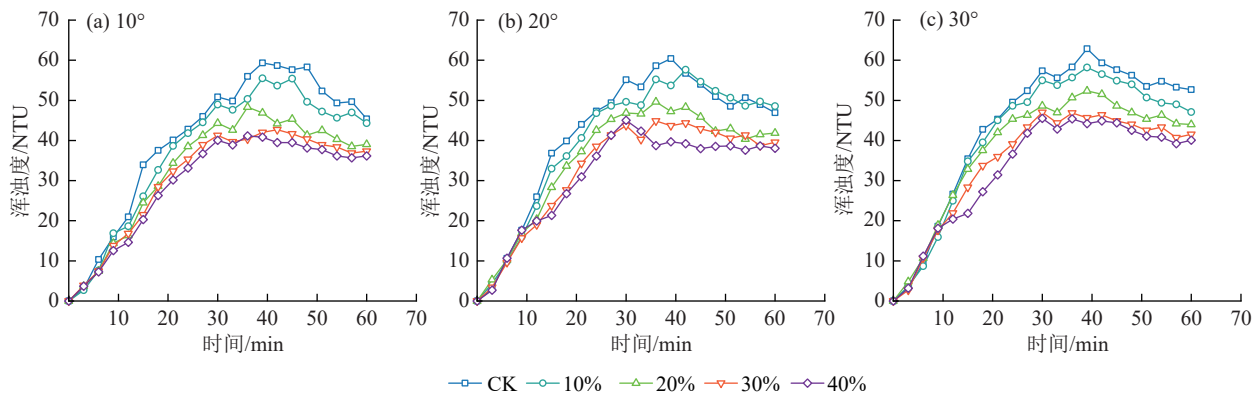


图 2 不同碎石含量对浑浊度的影响

Fig. 2 Effects of different gravel contents on water turbidity

### 2.2 波浪侵蚀率

波浪侵蚀率受碎石含量和坡度的显著影响, 随着碎石含量的增加和坡度的减小而显著减小(图 3) ( $p < 0.05$ )。较 CK 组, 10%、20%、30% 和 40% 碎石含量的波浪侵蚀率分别减少 11.24%~15.82%、20.94%~22.72%、34.19%~37.59% 和 40.47%~42.85%, 表明波浪侵蚀率随碎石含量的增加而持续减小。在 CK 组、30° 坡面试验条件下出现最大侵蚀率 [ $0.61 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ], 最小侵蚀率 [ $0.28 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ] 出现在 40% 碎石含量、10° 坡面试验条件下。在同一坡度下, 碎石含量与波浪侵蚀率呈现显著的指数函数关系, 各坡度的决定系数  $R^2 > 0.97$ , 说明碎石含量能够很好地解释各坡度条件下波浪侵蚀率的变化。此外, 在同一碎石含量下, 波浪侵蚀率随着坡度的减小而减小, 相较 30° 坡度, 10° 坡体的波浪侵蚀率减小 7.67%~19.73%。进一步拟合分析发现, 指数函数可以很好地描述波浪侵蚀率与碎石含量和坡度的关系 [公式 (4),  $R^2 = 0.95$ ,  $F = 387.84$ ,  $p < 0.01$ ]。从公式 (4) 中可以发现, 碎石含量前面的常数值远大于坡度前面的常数值, 说明碎石含量对波浪侵蚀的影响远大于坡度影响。

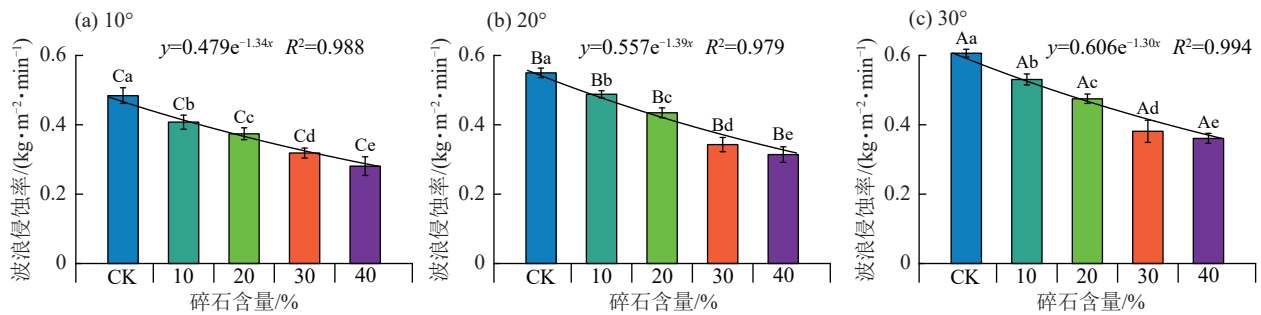
水体浑浊度变化趋势表现为前 30 min 快速上升, 随后缓慢增加至峰值后又缓慢减小并趋于稳定, 表明试验前期侵蚀速率较大而后期侵蚀速率有所减小。各试验条件下, 最大平均浑浊度值出现在 CK 组 30° 坡面, 达到 43.27 NTU; 最小平均浑浊度值发生在 40% 碎石含量 10° 坡面, 为 30.23 NTU。碎石土坡面明显降低水体浑浊度值, 较 CK 组, 10%、20%、30% 和 40% 碎石含量的平均浑浊度值分别降低 3.64%~7.55%、13.17%~18.44%、23.66%~25.55% 和 24.14%~25.93%, 表明坡体碎石含量增加可有效降低浑浊度值, 能够减少坡面土体因波浪侵蚀进入水体。此外, 坡度减小会降低水体浑浊度, 相较 30° 坡度, 10° 坡度的水体浑浊度值减小 0.82%~15.52%。

$$E = 0.432e^{0.012S - 1.395G} \quad (4)$$

式中:  $S$  为坡度, ( $^\circ$ );  $G$  为碎石含量, (%)。

### 2.3 孔隙水压力

孔隙水压力是指土体孔隙中的水所承受的压力, 孔隙水压力的累积变化直接影响土体的强度、变形和稳定性。孔隙水压力受碎石含量和坡度的显著影响, 随着碎石含量的增加和坡度的减小而显著减小(图 4) ( $p < 0.05$ )。较 CK 组, 10%、20%、30% 和 40% 碎石含量坡面的孔隙水压力分别降低 1.74%~7.66%、7.12%~15.28%、14.79%~23.28% 和 19.13%~30.47%, 说明坡体内碎石含量增加能有效减少孔隙水压力的累积。最大孔隙水压力 (0.91 kPa) 和最小孔隙水压力 (0.58 kPa) 分别出现在 CK 组、30° 坡面和 40% 碎石含量、10° 坡面试验条件下。此外, 坡度减小也在一定程度上能够减少孔隙水压力, 相较 30° 坡度, 10° 坡体的孔隙水压力减小 7.41%~48.38%。对各试验条件下不同深度的孔隙水压力进行分析发现, 孔隙水压力随深度增加呈现递减趋势, 顺序为浅层 > 中层 > 深层, 相较浅层, 深层的孔隙水压力降低 2.68%~28.32%。



注:图柱上方不同大写字母表示不同坡度下波浪侵蚀率差异性显著( $p<0.05$ );不同小写字母表示不同碎石含量下波浪侵蚀率差异性显著( $p<0.05$ )。下同。

图 3 不同碎石含量对波浪侵蚀率的影响

Fig. 3 Effects of different gravel contents on wave erosion rate

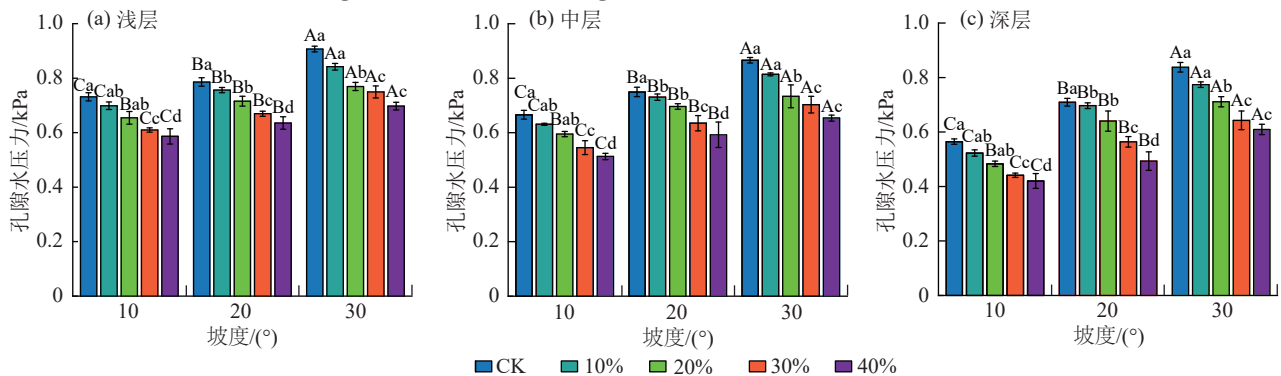


图 4 不同碎石含量和坡度对孔隙水压力的影响

Fig. 4 Effects of different gravel contents and slope on pore water pressure

2.4 波浪侵蚀影响因素相关性

相关性分析(表 1)表明,波浪侵蚀率与浑浊度值和孔隙水压力呈极显著正相关( $p<0.01$ ),与坡度则呈不显著正相关( $p>0.05$ ),而与碎石含量呈极显著负相关( $p<0.01$ )。各因素相关性系数从大到小的顺序为浑浊度值>碎石含量>孔隙水压力,表明浑浊度值能够很好地表征波浪侵蚀率的变化,碎石含量增加是造成波浪侵蚀减少的主要原因,且各深度的孔隙水压力均能够较好地反映波浪侵蚀率的变化。

表 1 波浪侵蚀率与影响因素相关性

Table 1 Correlation analysis between wave erosion rate and influencing factors

指标	坡度	浑浊度值	孔隙水压力			碎石含量
			1#	2#	3#	
相关性系数	0.429	0.970**	0.879**	0.860**	0.870**	-0.884**

注: \*为显著性相关( $p<0.05$ ); \*\*为极显著相关( $p<0.01$ )。

3 讨论

水体浑浊度值主要受侵蚀携带的泥沙进入水体和泥沙沉降的影响,随着时间的增加呈现先增加后减小并趋于稳定的变化趋势。在试验初期,波浪直接冲击坡面表层土壤,导致土壤颗粒被快速剥离并进入水体形成悬浮颗粒;同时,土壤颗粒被波浪上爬回流携带迁移,使得浑浊度值在此阶段快速上升<sup>[4]</sup>。之后随着波浪的持续冲刷,部分土壤颗粒淤积在坡面

中下部,导致实际坡度减小,从而分散了波浪冲击能量,造成侵蚀速率减缓,因此,水体浑浊度出现下降趋势<sup>[20-21]</sup>。相关性分析表明,波浪侵蚀率与浑浊度呈极显著正相关,证实浑浊度能够很好地表征波浪侵蚀率的变化。坡体碎石含量增加能够在一定程度上降低浑浊度值,与碎石影响波浪侵蚀过程并减少波浪侵蚀有关。

碎石土坡面可有效减小 11.24%~42.85% 的波浪侵蚀率,与碎石改变坡体结构和影响波浪侵蚀过程有关。碎石与土壤颗粒相互嵌合形成更稳定的骨架结构,承受波浪作用带来的荷载并传递应力,从而减小波浪作用力对土体稳定性的破坏<sup>[22]</sup>; 随试验历时增加碎石裸露在坡体表面不仅可以消减波浪能量,而且会增大坡面粗糙度从而阻碍波浪的上爬和回流,造成流速降低并削弱其剥离和搬运土壤颗粒的能力<sup>[16,23]</sup>。此外,碎石的不透水性减少坡面土壤与波浪的接触面积并提升坡面土体的抗侵蚀能力,从而减小波浪侵蚀率。韩珍等<sup>[11]</sup>研究指出,碎石混合改变土壤的物质组成和结构增强土壤抗蚀性和抗冲性,可有效减少土壤侵蚀;李魁等<sup>[12]</sup>研究发现,在连续降雨条件下,碎石可有效减少堆积体坡面产沙。降雨侵蚀过程中裸露碎石可以降低雨滴击溅动能和分散径流冲刷动能,并延长雨水在坡面的滞留时

间,使得雨水大部分以入渗和壤中流的形式存在,造成输沙能力下降,从而减少侵蚀率<sup>[24]</sup>。值得注意的是,部分研究<sup>[25-26]</sup>表明,碎石含量增加促进坡面降雨侵蚀,与碎石影响坡面产流及碎石周围容易形成具有剥蚀能力较强的涡流有关<sup>[27]</sup>。而在波浪侵蚀过程中,碎石能有效减少孔隙水压力的累积,碎石土骨架可增加土体稳定性抵抗波浪周期性能量冲击<sup>[22]</sup>。此外,碎石显著改变波浪侵蚀过程:在入射阶段,粗糙表面可以耗散或者反射波浪能量;在上爬阶段,碎石间隙中产生摩擦耗能持续消耗波浪能量,同时拦截波浪掀起的泥沙颗粒;在回流阶段,粗糙度增大能有效减缓波浪回流速度,减少回流携带的侵蚀泥沙量,从而降低波浪侵蚀率<sup>[4]</sup>。波浪侵蚀率随着坡度减小而减小,是因为坡面倾角的减小降低波浪上爬的冲击能量和入射角度,波浪作用面更为广泛,减慢波浪上爬和回流的速度,从而减弱其对土壤颗粒的剥离和搬运能力,因而减少侵蚀率<sup>[6]</sup>。

分析碎石对坡面波浪侵蚀的影响机制(图5):首先,土体中碎石减少土壤总孔隙度,使水分运动通道曲折化,延长水分流动路径,减缓孔隙水压力的传导速度<sup>[28]</sup>;其次,土体中碎石的存在形成新的非毛管孔隙,非毛管孔隙的增加,促进坡体内水分快速排出,缩短水分滞留时间,从而减缓孔隙水压力的累积<sup>[10]</sup>。碎石与土壤形成刚性骨架,可以承担更多有效荷载,提高坡体抗剪强度,总应力不变,孔隙水压力减小,坡体稳定性增强。孔隙水压力随坡度减小而减小,因为水流在坡面流动路径变长水力梯度减小,水分更易通过垂向渗透排出,减少水分滞留时间,降低孔隙水压力。

坡体内孔隙水压力的降低可以增加有效应力并有效提高土壤抗剪强度,从而提高坡体稳定性<sup>[29]</sup>。波浪的周期性荷载使饱和土体内部孔隙水压力增加,当孔隙水压力上升到与土体有效应力持平后,则降低颗粒间的接触应力,导致土体发生液化失去原有强度,造成土壤颗粒间接触点减少,在重力和波浪冲击作用下降低土体强度并产生变形,从而导致坡体失稳<sup>[30]</sup>。因此,土体中碎石可减少孔隙水压力的累积,减少波浪对坡体的周期性破坏作用,从而减少波浪侵蚀。相关性分析也表明,波浪侵蚀率与孔隙水压力呈极显著正相关,证实孔隙水压力是影响波浪侵蚀率的关键因素。经过一段时间后,碎石裸露于坡表,对坡面进行物理覆盖作用,一方面减少表层土壤与波浪的接触面积,有效消散波浪能量,降低波浪对坡面的直接作用力;另一方面,增加坡面粗糙度,阻碍波浪的上爬和回落过程,通过摩擦作用降低波浪上爬回流流速,削弱波浪对土壤颗粒分离和运输的能力<sup>[16]</sup>。

本研究评估了不同碎石含量和坡度对浑浊度值、波浪侵蚀率和孔隙水压力的影响,结果表明,碎石含量增加抑制波浪侵蚀。然而,在控制水土流失和改善区域生态环境方面,植被恢复措施仍具有不可替代的作用<sup>[3]</sup>。植物根系可以通过缠绕碎石、胶结土颗粒等方式固化土体<sup>[16]</sup>,但现有研究主要关注植被措施对波浪侵蚀的影响,较少考虑含碎石土环境下植物对波浪侵蚀的控制效果。因此,未来研究可进一步探讨消落带适生植物对含碎石土坡面波浪侵蚀的影响,以期库区消落带生态恢复重建提供更全面的科学依据。

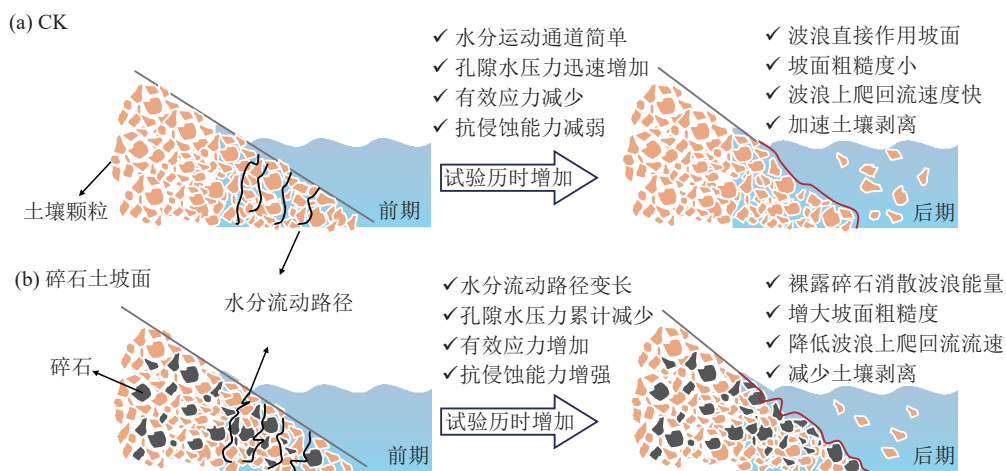


图 5 碎石土坡面减少侵蚀的影响机制

Fig. 5 Influencing mechanisms of erosion reduction on gravelly soil slopes

## 4 结论

1) 浑浊度值随碎石含量的增加而逐渐下降,下降幅度为 3.64%~25.93%,随坡度的减小而下降

0.82%~15.52%。孔隙水压力随碎石含量的增加显著降低,总体降低幅度为 1.74%~30.47%;随深度的增加降低 2.68%~28.32%,随坡度的减小降低

7.41%~48.38%。

2) 波浪侵蚀率随碎石含量的增加显著减小,减小11.24%~42.85%,且在40%碎石含量下侵蚀率达到最小;随着坡度的减小显著减小,减小7.67%~19.73%;基于碎石含量-坡度的波浪侵蚀拟合公式可为后续监测消落带波浪侵蚀提供量化依据,制定相应的防护措施。

3) 波浪侵蚀率与浑浊度和孔隙水压力呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),而与碎石含量呈极显著负相关( $p < 0.01$ )。本研究可为研究三峡库区消落带碎石土坡面侵蚀控制提供理论指导。

#### 参考文献:

- [1] BAO Y H, GAO P, HE X B. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir: A unique geomorphological unit [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 14-24.
- [2] 贺秀斌,鲍玉海.三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展[J].*中国水土保持科学*,2019,17(4):160-168.  
HE X B, BAO Y H. Research advances on soil erosion and ecological restoration in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(4): 160-168.
- [3] 饶洁,唐强,冯韞,等.三峡水库消落带生境特征与植被恢复模式[J].*水土保持学报*,2024,38(1):310-318.  
RAO J, TANG Q, FENG Y, et al. Habitat condition and vegetation restoration patterns in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1): 310-318.
- [4] 谷举,刘刚,师宏强,等.采用模拟试验研究水位涨落影响下的坡面波浪侵蚀过程[J].*中国水土保持科学*, 2020, 18(1): 49-56.  
GU J, LIU G, SHI H Q, et al. Using simulated experiments to study the processes of wave-induced slope erosion under different water level-fluctuation conditions [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(1): 49-56.
- [5] 肖海,张文琪,夏振尧,等.狗牙根覆盖对三峡库区消落带波浪作用力和侵蚀的影响[J].*中国水土保持科学(中英文)*,2024,22(4):34-40.  
XIAO H, ZHANG W Q, XIA Z Y, et al. Influence of *Cynodon dactylon* cover on the wave force and wave erosion of purple soil in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(4): 34-40.
- [6] 王力,陈珂珊,王世梅,等.基于能量守恒理论的波浪侵蚀土质岸坡范围预测方法[J].*工程科学与技术*, 2023, 55(5): 169-180.  
WANG L, CHEN Y S, WANG S M, et al. Prediction
- method of wave-induced erosion range on soil bank slopes based on energy conservation theory [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 55(5): 169-180.
- [7] GERIVANI H, SAVARI S. Influence of wave force direction on cliff profiles: Formulation and observation in a case of horizontally layered cliffs in the northern coast of Gulf of Oman [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(16): e498.
- [8] CHANG F Q, SHU Z L. A model for calculating the erosion distance of soft sea cliff under wave loading [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2018, 37(7): 69-77.
- [9] OZEREN Y, WREN D G, REBA M L. Wave-induced erosion of soil embankment in laboratory flume [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 147(4): e04021011.
- [10] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等.含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J].*水科学进展*, 2014, 25(2): 189-195.  
WANG X Y, WANG T W, CAI C F, et al. Processes of rainfall infiltration, runoff and sediment yield on purple soil slope containing rock fragments [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 189-195.
- [11] 韩珍,王小燕,李馨欣.碎石含量影响下紫色土坡面径流流速变化过程及土壤侵蚀的阶段性[J].*中国农业大学学报*, 2016, 21(10): 102-108.  
HAN Z, WANG X Y, LI X X. Processes of runoff velocity and stages of soil erosion under the effect of rock fragment content [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(10): 102-108.
- [12] 李魁,王文龙,李建明.工程堆积体流速及产沙特征对坡长及砾石作用响应[J].*水土保持学报*, 2023, 37(5): 48-56.  
LI K, WANG W L, LI J M. Response of velocity and sediment production characteristics of spoil heaps to slope length and gravel action [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 48-56.
- [13] 陈卓鑫,王文龙,康宏亮,等.砾石对红壤工程堆积体边坡径流产沙的影响[J].*生态学报*, 2019, 39(17): 6545-6556.  
CHEN Z X, WANG W L, KANG H L, et al. Effects of gravel on runoff and sediment yield of red soil engineering accumulation slopes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(17): 6545-6556.
- [14] 赵满,王文龙,郭明明,等.含砾石风沙土堆积体坡面径流产沙特征[J].*土壤学报*, 2019, 56(4): 847-859.  
ZHAO M, WANG W L, GUO M M, et al. Runoff and sediment yielding characteristics of slopes of stacks of gravels containing aeolian sandy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 847-859.
- [15] 中华人民共和国交通运输部.水运工程模拟试验技术规范:JTS/T 231—2021[S].北京:人民交通出版社,2021.

- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231—2021[S]. Beijing: China Communications Press, 2021.
- [16] 肖海, 陈珠宝, 夏振尧, 等. 碎石及狗牙根覆盖对坡面波浪侵蚀影响研究[J]. 草业学报, 2025, 34(1): 55-65.  
XIAO H, CHEN Z B, XIA Z Y, et al. Wave dissipation and erosion reduction under the combined effect of gravel and *Cynodon dactylon* cover [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(1): 55-65.
- [17] 唐敏, 杨春华, 雷波. 基于 GIS 的三峡水库不同坡度消落带分布特征[J]. 三峡环境与生态, 2013, 35(3): 8-10.  
TANG M, YANG C H, LEI B. Spatial distribution investigation on the water-level-fluctuating zone slopes in Three Gorges Reservoir areas based on GIS [J]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2013, 35(3): 8-10.
- [18] 付旭辉, 王硕, 唐定丹, 等. 三峡库区典型河段近岸波浪特征研究: 以巫山大宁河为例[J]. 人民珠江, 2020, 41(6): 32-38.  
FU X H, WANG S, TANG D D, et al. Study on the characteristics of near-shore waves in the typical section of the Three Gorges Reservoir area: A case study of Daning River [J]. Pearl River, 2020, 41(6): 32-38.
- [19] LIANG S X, SUN Z C, CHANG Y L, et al. Evolution characteristics and quantization of wave period variation for breaking waves [J]. Journal of Hydrodynamics, 2020, 32(2): 361-374.
- [20] 单铁兵, 杨建民, 李欣, 等. 波浪入射角度对立柱周围波面扰动特性的影响研究[J]. 船舶力学, 2016, 20(10): 1234-1243.  
SHAN T B, YANG J M, LI X, et al. Incident angle effects on wave disturbance characteristics around column [J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(10): 1234-1243.
- [21] 王力, 张晨宇, 王世梅, 等. 波浪侵蚀诱发碎石土岸坡变形的模拟试验研究[J]. 泥沙研究, 2023, 48(4): 45-52.  
WANG L, ZHANG C Y, WANG S M, et al. Simulation and test study on wave-induced erosion and deformation of gravelly soil bank slope [J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(4): 45-52.
- [22] WANG L, LI Q L, CHEN Y, et al. Model test study on wave-induced erosion on gravelly soil bank slope [J]. Natural Hazards, 2023, 119(3): 1665-1682.
- [23] LV J R, LUO H, XIE Y S. Impact of rock fragment size on erosion process and micro-topography evolution of cone-shaped spoil heaps [J]. Geomorphology, 2020, 350: e106936.
- [24] 祝怀春, 高儒学, 戴全厚, 等. 喀斯特区工程堆积体坡面产流特征对降雨强度的响应[J]. 水土保持学报, 2025, 39(3): 70-77.  
ZHU H C, GAO R X, DAI Q H, et al. Response of runoff production characteristics of the slope of engineering accumulation to rainfall intensity in karst areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3): 70-77.
- [25] 赵冰琴, 胡鑫凯, 高儒章, 等. 碎石含量对三峡库区坡耕地土壤氮磷流失特征的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(3): 127-137.  
ZHAO B Q, HU X K, GAO R Z, et al. Effects of gravel contents on the soil nitrogen and phosphorus loss of sloping farmland in Three Gorges Reservoir of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(3): 127-137.
- [26] 王雪松, 谢永生, 陈曦, 等. 模拟降雨条件下工程堆积体产流产沙特征研究[J]. 泥沙研究, 2015, 40(4): 74-80.  
WANG X S, XIE Y S, CHEN X, et al. Study on runoff and sediment yield of a spoil pile under simulated rainfall condition [J]. Journal of Sediment Research, 2015, 40(4): 74-80.
- [27] 王小燕, 李朝霞, 徐勤学, 等. 砾石覆盖对土壤水蚀过程影响的研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 115-120.  
WANG X Y, LI Z X, XU Q X, et al. Review of effects of rock fragment cover on soil water erosion processes [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(1): 115-120.
- [28] 李叶鑫, 史东梅, 吕刚, 等. 工程堆积体入渗特征及入渗模型适宜性评价[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 86-91.  
LI Y X, SHI D M, LV G, et al. Infiltration characteristics and suitability evaluation of infiltration model of the typical engineering accumulation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 86-91.
- [29] FALOYE O T, AJAYI A E, ZINK A, et al. Effective stress and pore water dynamics in unsaturated soils: Influence of soil compaction history and soil properties [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 211: e104997.
- [30] XIAO H, LIU D Y, GAO F, et al. Evaluating the influence of *Cynodon dactylon* on the wave force and wave erosion in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area [J]. Ecological Engineering, 2024, 202: e107233.