

DOI:10.11686/cyxb2024134

http://cyxb.magtech.com.cn

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. 草业学报, 2025, 34(1): 55—65.

XIAO Hai, CHEN Zhu-bao, XIA Zhen-yao, et al. Wave dissipation and erosion reduction under the combined effect of gravel and *Cynodon dactylon* cover. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(1): 55—65.

## 碎石及狗牙根覆盖对坡面波浪侵蚀影响研究

肖海<sup>1,2,3</sup>, 陈珠宝<sup>1</sup>, 夏振尧<sup>1,2,3</sup>, 朱庆文<sup>1</sup>, 刘德玉<sup>1</sup>, 向瑞<sup>1</sup>, 张伦<sup>1,2,3\*</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:**波浪侵蚀是三峡库区消落带的主要侵蚀类型, 植被、碎石均可有效的控制波浪侵蚀, 但是碎石—植被协同作用下对波浪侵蚀的影响尚不清楚。本研究通过设置3种狗牙根覆盖度和9种碎石条件, 以裸坡为对照, 利用波浪冲刷试验分析不同条件下波压力和波浪侵蚀率, 揭示碎石单一因素、植被单一因素和碎石—植被协同作用下对波浪侵蚀的影响。研究表明: 碎石覆盖单一因素可有效消能26.49%~86.52%、减蚀8.70%~73.91%, 波压力、侵蚀率随碎石粒径减小、覆盖厚度增加而减小。植被覆盖单一因素可有效消能4.10%~46.36%、减蚀19.56%~77.17%, 波压力、侵蚀率随覆盖度增加而减小。碎石—植被协同措施消能减蚀效果优于单一措施, 碎石—植被协同作用可有效消能28.95%~94.74%、减蚀28.20%~80.43%, 协同措施下波压力、侵蚀率随碎石粒径的增大而增加却随碎石覆盖厚度、狗牙根覆盖度的增大而减小, 在碎石粒径5~10 mm、碎石覆盖厚度60 mm、狗牙根覆盖度60%~70%时效果最好。多因素方差分析表明协同措施中波压力、侵蚀率的减少是碎石覆盖和植被覆盖的综合作用结果, 其中对波压力的影响程度为碎石覆盖厚度>碎石粒径>植被覆盖度, 而对波浪侵蚀率的影响程度为植被覆盖度>碎石层厚度>碎石粒径。本研究表明碎石—植被协同措施能有效达到消能减蚀的作用, 可以作为岸坡土体波浪侵蚀控制的可持续性生态友好型的治理技术。该研究结果可以为消落带生态治理与生态重建实践提供指导和借鉴。

**关键词:**碎石; 狗牙根; 波浪压力; 波浪侵蚀率; 消落带

## Wave dissipation and erosion reduction under the combined effect of gravel and *Cynodon dactylon* cover

XIAO Hai<sup>1,2,3</sup>, CHEN Zhu-bao<sup>1</sup>, XIA Zhen-yao<sup>1,2,3</sup>, ZHU Qing-wen<sup>1</sup>, LIU De-yu<sup>1</sup>, XIANG Rui<sup>1</sup>, ZHANG Lun<sup>1,2,3\*</sup>

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

**Abstract:** Wave erosion is one of the main ecological and environmental problems in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area. As single factors, the presence of plants and gravel can effectively control wave erosion. However, it is unknown how the combination of these control measures affects wave erosion. Therefore, wave experiments were conducted under three levels of *Cynodon dactylon* cover (20%—30%, 40%—50%, 60%—70%) and nine different gravel conditions (three thicknesses of gravel cover, 20, 40 and 60 mm; and three gravel particle sizes, 5—10, 10—15, and 15—20 mm). The bare slope without gravel and plant cover served as the control check (CK). The effects of plant cover and gravel as single and combined factors on wave erosion were

收稿日期: 2024-04-22; 改回日期: 2024-06-05

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

作者简介: 肖海(1988—), 男, 湖南安仁人, 副教授, 博士。E-mail: oceanshawctgu@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lunz@ctgu.edu.cn

explored by measuring the wave pressure and wave erosion rate in each treatment. The results indicated that gravel decreased the wave pressure by 26.49%–86.52% and the wave erosion rate by 8.70%–73.91%, compared with values for the CK. The wave pressure and wave erosion rate decreased as the gravel particle size decreased and as the gravel cover increased. The presence of *C. dactylon* decreased the wave pressure by 4.10%–46.36% and the wave erosion rate by 19.56%–77.17%, compared with values for the CK. The wave pressure and wave erosion rate decreased with increasing cover of *C. dactylon*. The wave pressure and wave erosion rate decreased by 28.95%–94.74% and 28.20%–80.43%, respectively, under the combined effects of gravel and *C. dactylon*. Also, under the combined effects, the wave pressure and wave erosion rate increased with increasing gravel particle size, and decreased with increasing gravel thickness and cover of *C. dactylon*. Compared with the single effect, further reductions of wave pressure and wave erosion rate under the combined effects were attributed to the synergistic effects of plant and gravel cover. The largest reductions in wave pressure and wave erosion rate were obtained with a gravel particle size of 5–10 mm, gravel cover thickness of 60 mm, and *C. dactylon* cover of 60%–70%. Multivariate analysis of variance showed that the combined effect of gravel and *C. dactylon* cover synergistically reduced the wave pressure and wave erosion rate. The factors were ranked, from highest degree of influence on wave pressure to lowest, as follows: gravel cover thickness>gravel particle size>plant cover; and from highest degree of influence on wave erosion rate to lowest, as follows: plant cover>gravel cover thickness>gravel particle size. Our results show that gravel and vegetation work synergistically to reduce wave energy and erosion, and can be used as a sustainable and ecologically friendly treatment to control wave erosion on sloping banks. These findings provide guidance and reference data for the ecological management and ecological reconstruction of the water-level fluctuation zone in water reservoirs.

**Key words:** gravel; *Cynodon dactylon*; wave pressure; wave erosion rate; water-level fluctuation zone

消落带因水库周期性的水位涨落而形成,干湿交替作用导致土壤抗侵蚀能力下降,且在降水径流、波浪冲刷以及重力的单一或复合侵蚀作用下,土壤侵蚀过程复杂,水土流失严重<sup>[1]</sup>。研究表明长江干流和支流消落带平均侵蚀模数分别为 54050 和 9191 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,是三峡库区平均侵蚀模数的 16 和 3 倍<sup>[2]</sup>。其中,波浪侵蚀占总侵蚀的 70% 以上,是消落带最主要的水力侵蚀形式,对库区消落带侵蚀产生了重要影响<sup>[3]</sup>。严重的土壤侵蚀影响了水库蓄水能力、植物栖息地和生物多样性,对当地社会和环境造成了一系列负面影响<sup>[4]</sup>。

植被作为治理水土流失、改善生态环境的主要措施,通过改变近地表特性以及地上和地下部分共同影响土壤侵蚀过程,能够有效地减少土壤侵蚀<sup>[5-6]</sup>。研究表明,恰当的植被配置可以有效减弱波浪能量并减少波浪侵蚀<sup>[7]</sup>。Beeson 等<sup>[8]</sup>调查发现无植被河岸带比有植被的河岸带土壤侵蚀量多 5 倍。崔敏等<sup>[9]</sup>研究发现与裸土岸坡相比,植被覆盖可降低 92.36% 的土壤侵蚀量。钟荣华等<sup>[10]</sup>研究表示狗牙根(*Cynodon dactylon*)具有较强的减蚀效果,平均减蚀效应可达 97.8%。现有试验大多是将裸坡与成熟植被坡面进行对比,而实际上植物生长需要一定时间,植物生长前期难以发挥减蚀作用,仍会发生严重的土壤侵蚀。因此需要选择一种能在前期有效发挥减蚀作用,并能让植物有充足生长空间的措施。

保护岸坡土壤基质是构建植被的前提和基础<sup>[11]</sup>。目前,岸坡土体保护技术主要以硬质护坡工程措施为主,尽管能够很好地减蚀护岸,但却阻断了土壤与外界环境的有机联系,无法为植物提供生长环境,难以契合“绿水青山”的时代要求<sup>[12]</sup>。而单一植被恢复措施在消落带水位涨落和波浪协同作用条件下的减蚀护岸效果有限,因此,如何结合工程措施和植被措施,提出消落带土体侵蚀“工程—生态协同防控”技术,势必成为消落带岸坡侵蚀治理和环境保护亟须解决的关键问题。碎石广泛存在于自然界中,不仅取材容易、成本低,而且其覆盖于坡面具有良好的护坡减蚀效果。丁洁等<sup>[13]</sup>发现碎石护坡具有良好的稳定性,能够有效降低波浪爬高,进而减小波浪侵蚀。Wang 等<sup>[14]</sup>分析发现碎石层在不淹没、部分淹没和淹没 3 种工况下均可以显著削弱波浪冲击波,具有很好的消能

减蚀效果。Yuan等<sup>[15]</sup>提出了一种新的碎石颗粒削减波浪冲击的三维细观模型,并通过试验验证发现碎石形状、尺寸对波浪衰减能力有很大影响。可见,碎石对岸坡侵蚀具有明显的减缓作用,同时相关研究表明碎石相互之间存在一定的孔隙,能够为植物生长提供空间。此外,碎石覆盖还能有效抑制土壤水分蒸发,保证植物生长所需的水分<sup>[16]</sup>。因此,碎石覆盖具备消能减蚀能力和与植被兼容特性,将碎石与植被相结合有望发挥碎石前期减蚀作用并为植被提供生长空间,这为实现工程—生态协同消浪减蚀提供可靠支撑。但目前关于碎石—植被协同作用下对波浪侵蚀的影响机制尚不清晰。

因此,选用三峡库区消落带典型紫色土和自然恢复下优势物种狗牙根为研究对象,考虑到自然状态下不同区域植被覆盖度的差异以及碎石粒径和厚度的消能减蚀效果差异明显,设置不同植被盖度坡面条件和碎石组合,以裸坡为对照,利用波浪冲刷试验分析不同条件下波压力和波浪侵蚀率,研究碎石单一因素、植被单一因素和两者协同作用下对波浪侵蚀的影响,为消落带生态治理与生态重建实践提供指导和借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选取紫色土为试验材料,取自湖北省宜昌市秭归县水田坝乡(110°38′—110°44′ E, 30°10′—30°21′ N),为三峡库区消落带代表性土壤类型<sup>[17]</sup>。土壤采样前清除地表植被残落物及固体杂块,对表层土壤进行采集并将所采集的土壤运至三峡库区地质灾害教育部重点实验室,风干后过5 mm筛并清除植物根系等杂质后备用。经测定,土壤容重为 $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,土壤pH为6.67,有机质含量为 $6.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,黏粒( $<0.002 \text{ mm}$ )、粉粒( $0.002\sim 0.050 \text{ mm}$ )、砂粒( $0.050\sim 2.000 \text{ mm}$ )含量分别为15.25%、26.52%、58.23%。狗牙根为禾本科多年生草本植物,根茎蔓延力很强,茎节能生根且通过芽发育形成新分株,广铺地面<sup>[18]</sup>,具有很强的耐淹、抗旱能力,是三峡库区消落带优势植物<sup>[19]</sup>,因此本研究选择狗牙根作为试验植物。碎石为天然岩石破碎制得,首先将碎石运回三峡大学地质灾害与防治中心后使用清水冲洗且除去杂质后晾干,依据野外实际调查并考虑植物生长需求以及碎石减蚀效果,筛分形成3种不同粒径(5~10 mm、10~15 mm、15~20 mm)备用。

试样制备于自制铁制种植槽(0.75 m×0.50 m×0.26 m)中,种植槽底部带有直径为5 mm的透水孔,装土前铺设细纱布以保持透水性能并确保土壤不流失。考虑到碎石—植被协同措施中的碎石需直接覆盖于土壤表面,若采用种子萌发后进行移栽的方式,实施过程较为复杂,也不利于后续技术现场实施,因此本研究采用播种方式进行。于2021年9月进行试样制备,对于单一植物措施,首先将紫色土按照设定密度填充于种植槽中,随后进行浇水饱和,待土壤充分湿润后将不同数量的狗牙根种子均匀播撒至土壤表面,然后再在表面覆盖一层干土使其置于土壤内部以防止种子内水分蒸发影响发芽率。对于单一碎石措施,将紫色土按照设定密度填充于种植槽中,同样对试样进行浇水饱和和处理以避免初始条件不一致而导致试验结果不准确,然后再将设定粒径和厚度的碎石均匀覆盖于紫色土表面。对于碎石—植被协同措施,则在种子与种植土混合均匀撒播至坡面后,将碎石按照设定粒径与厚度均匀覆盖于紫色土表面。考虑碎石无法直接固定于坡面,采用孔径为5 mm金属网铺设于坡面以固定碎石,同时在其他坡面条件下也铺设金属网以消除其影响。3种措施采用相同的养护方式,即种子发芽期早晚浇水,每3~5 d浇水一次,持续2个月左右,之后置于室外自然生长。在此期间,及时清除种植槽内的杂草和害虫,以确保植物有更好的生长条件。后期通过ERDAS Imagine 2012进行图像采集大致确定植被盖度,并于正式试验前2个月(2022年7月)通过将植物连根拔除的方式调整盖度,得到设计盖度,正式试验前复核盖度以确保各坡面盖度仍在设计盖度范围内。

### 1.2 试验设计

对于碎石单一措施,考虑植物生长需求以及碎石减蚀效果,基于野外调查并结合前人的研究成果<sup>[20]</sup>,设置20 mm( $T_1$ )、40 mm( $T_2$ )和60 mm( $T_3$ )3种碎石覆盖厚度;5~10 mm( $S_1$ )、10~15 mm( $S_2$ )和15~20 mm( $S_3$ )3种碎石粒径以形成等粒级碎石覆盖措施。对于植物单一措施,考虑植被盖度对坡面侵蚀影响<sup>[21]</sup>,本研究设置3个狗牙根覆盖度20%~30%( $C_1$ )、40%~50%( $C_2$ )和60%~70%( $C_3$ )分别模拟低、中、高植被覆盖度3种坡面条件以形成不同植物措施。对于碎石—植被协同措施,将设置的9种碎石条件(3种粒径、3种覆盖厚度)以及3种狗牙根覆盖条

件进行交叉组合,即在植物措施上覆盖不同粒径和厚度组合下的碎石以形成协同措施。所有措施均以裸土坡面(CK)为对照,且每种处理设置3个重复。

波浪冲刷槽(7.5 m×0.5 m×1.5 m)参照《水运工程模拟试验技术规范》(JTS/T 231-2021)<sup>[22]</sup>自行设计,其中试验波浪冲刷水槽由钢框架和有机玻璃组成,包括造波系统和数据采集系统(图1)。波浪冲刷槽由调速电机(Y90L-2,上海力超电机有限公司)、时间继电器(AE200H-2-1PH-2.2G,杭州伟森电气技术有限公司)、造波板(自制)、开关组合(KCD4-201N,深圳市佳锐斯科技有限公司)、压力传感器(CYY22,西安微正电子科技有限公司)和数据采集仪(CYY3055,西安微正电子科技有限公司)等组成,可产生不同波高和周期的波浪。数据采集系统由3个精度为0.005 kPa的高精度压力传感器组成,分别放置在种植槽表面测量波压力。在种植槽内土壤表面放置3个传感器(编号为1#、2#和3#)采集产生的波压力,1#传感器位于水位以下,2#传感器位于30 cm水位处,3#传感器位于水位以上,3个传感器均沿坡面相隔10 cm,分别采集波浪在边坡下部、中部和上部的波压力。

由于三峡库区岸坡消落带坡度主要集中在 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ <sup>[23]</sup>,故将模拟坡面坡度参数设为 $20^{\circ}$ 。同时,依据长江干流波浪高度大部分为0~12 cm,而三峡库区近岸的浪高变化最频繁,波高大多集中在4~8 cm<sup>[24]</sup>,因此将试验波高设定为8 cm。此外,波浪的破碎和能量损失与波浪周期有关<sup>[25]</sup>,为减少波浪周期对土壤侵蚀产生的影响,故将波浪周期恒定为1 s。

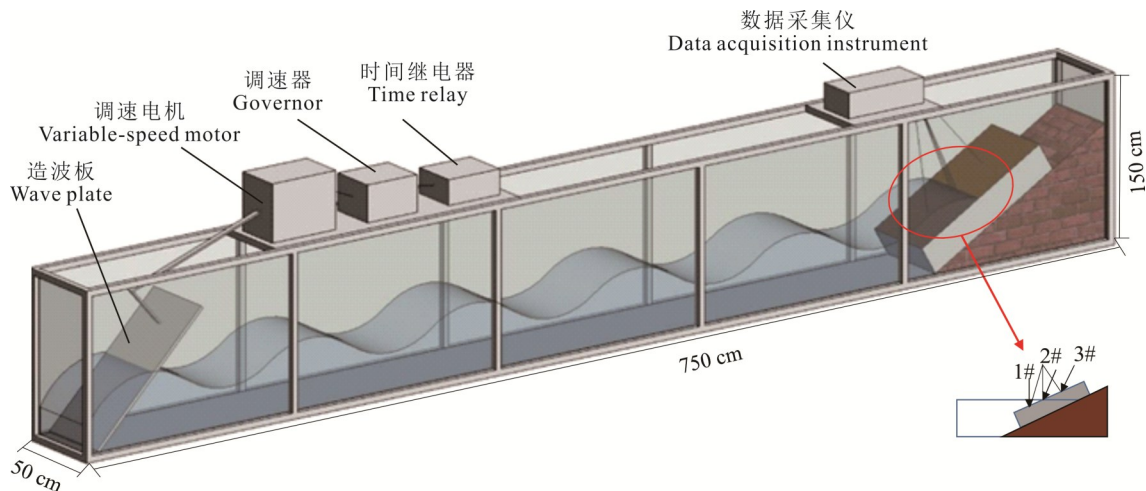


图1 波浪冲刷槽示意

Fig. 1 Schematic of wave scouring trough

### 1.3 试验流程

波浪冲刷试验于2022年9月在三峡库区地质灾害教育部重点实验室进行。为了模拟消落带岸坡受长期水位消涨的真实生境以及消除前期含水率的影响,试验开始前,首先将种植槽进行充分饱和,随后将其移出晾干直至没有水滴漏出后称量其质量 $M_1$ ,再将种植槽放置在波浪冲刷槽中,并将传感器(与数据采集系统相连)安装在指定位置。其次,将波浪冲刷槽充水至设计水位(本研究中设置为30 cm)。然后启动波浪冲刷槽,通过数据采集系统获得波压力。具体而言,在波浪率定过程中,使用一块木板放置于种植槽前以保护试样,待率定结束后拿开木板并正式开始试验,试验持续时间为60 min。试验完成后,打开排水口,收集所有沉积物和水,并将种植槽移出晾干直至没有水滴漏出后再次称量其质量 $M_2$ 。试验过程中持续采集波压力,并选取作用时间长且稳定的波压力数据用于后续分析以消除偶然因素影响。每组波浪试验重复3次,并计算平均值用以试验分析。

### 1.4 数据处理与统计分析

本研究采用波浪侵蚀率,表征不同措施下的减蚀效果。试验过程中通过称量法计算试样冲刷前后质量差获取冲刷量<sup>[7]</sup>,然后通过下式计算波浪侵蚀率( $E$ ):

$$E = \frac{M_1 - M_2}{A \times T}$$

式中： $E$ 为波浪侵蚀率( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )； $M_1$ 为冲刷前模拟坡面质量( $\text{g}$ )； $M_2$ 为冲刷后模拟坡面质量( $\text{g}$ )； $A$ 为样品表面积( $\text{m}^2$ )； $T$ 为波浪侵蚀时间( $\text{min}$ )。

采用Microsoft Excel 2016进行数据处理和计算,采用Origin 2021进行图形绘制,采用SPSS 22.0软件对不同措施条件下数据进行多因素方差分析(multivariate analysis of variance)并评估碎石、狗牙根对波浪侵蚀率、波压力的贡献率,利用最小显著差异法(LSD)检验显著性,显著水平设为0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 单一措施的影响

**2.1.1 碎石覆盖对波压力和侵蚀率的影响** 波压力与侵蚀率均受到碎石粒径和厚度的显著影响,随着碎石粒径的增大,波压力和波浪侵蚀率均呈逐渐增大的变化趋势,而随着碎石厚度的增加均呈逐渐减小的变化趋势(图2)。相比CK,波压力随着碎石粒径减少和厚度的增大分别减小了16.85%~88.30%和26.49%~86.52%;且在同一条件下,各传感器波压力呈递减趋势,顺序依次为下部(1#)、中部(2#)和上部(3#),说明碎石粒径减小或覆盖厚度增加均可削弱波浪作用于坡面的能量。此外,相比CK,碎石覆盖条件下波浪侵蚀率减小了8.70%~73.91%,表明碎石覆盖具有较好的减少波浪侵蚀的效果。结果表明,在碎石粒径为5~10 mm、覆盖厚度为60 mm的组合时消能减蚀效果最好。

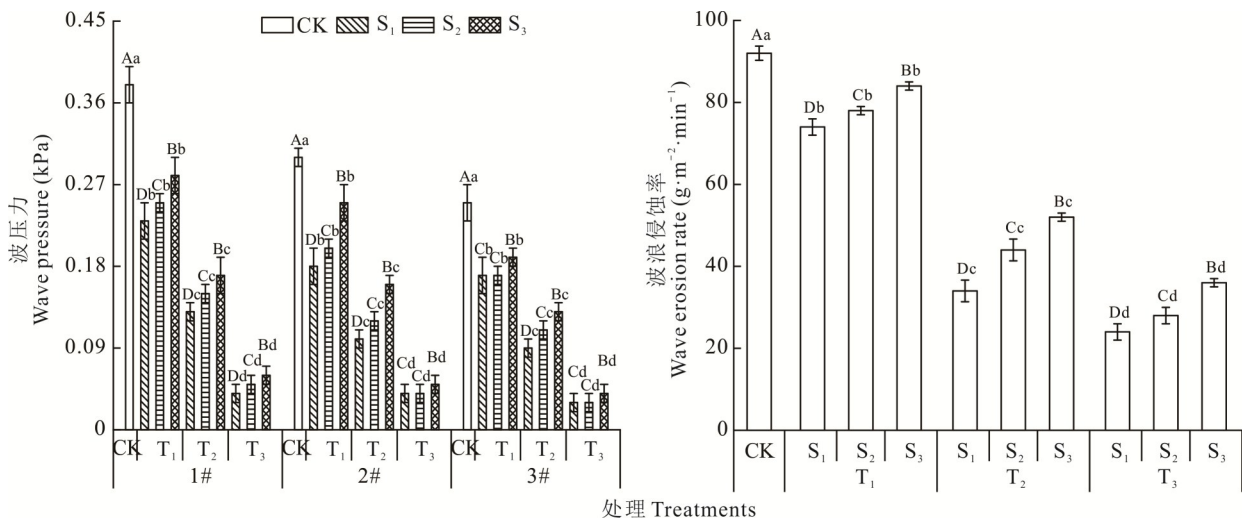


图2 单一措施中不同碎石覆盖处理对波压力和侵蚀率的影响

Fig. 2 Effect of different gravel cover treatments on wave pressure and wave erosion rate in single measure

CK: 裸坡 Bare slope; T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>: 碎石覆盖厚度分别为20、40和60 mm The gravel cover thickness are 20, 40 and 60 mm, respectively; S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>: 碎石粒径分别为5~10 mm、10~15 mm和15~20 mm The particle sizes of the gravel are 5–10 mm, 10–15 mm and 15–20 mm; 1#: 传感器位于水位以下 The sensor is located below the water level; 2#: 传感器位于30 cm水位处 The sensor is located at the water level of 30 cm; 3#: 传感器位于水位以上 The sensor is located above the water level. 不同大写字母表示CK及相同碎石覆盖厚度不同碎石粒径下差异显著,不同小写字母表示CK及相同碎石粒径不同碎石覆盖厚度下差异显著( $P < 0.05$ )。下同。Different capital letters indicate the significance differences among CK and different gravel particle sizes under the same gravel coverage thickness, and different lowercase letters indicate the significance CK and differences among different gravel coverage thicknesses under the same gravel particle size ( $P < 0.05$ ). The same below.

**2.1.2 植物覆盖对波压力和侵蚀率的影响** 波压力与侵蚀率均受到狗牙根覆盖度的显著影响,随狗牙根覆盖度增加,波压力和波浪侵蚀率均呈逐渐减小的变化趋势(图3)。相比于CK,波压力随着狗牙根覆盖度的增加而减小了4.10%~46.36%,说明植被覆盖可以有效削减波浪的冲击力,且随覆盖度增加作用越明显。此外,相比于CK,波浪侵蚀率随狗牙根覆盖度的增加而减小了19.56%~77.17%,可见狗牙根覆盖可有效对岸坡土体进行加固,同时覆盖度增加能进一步减少波浪侵蚀,在覆盖度为60%~70%时效果最好。

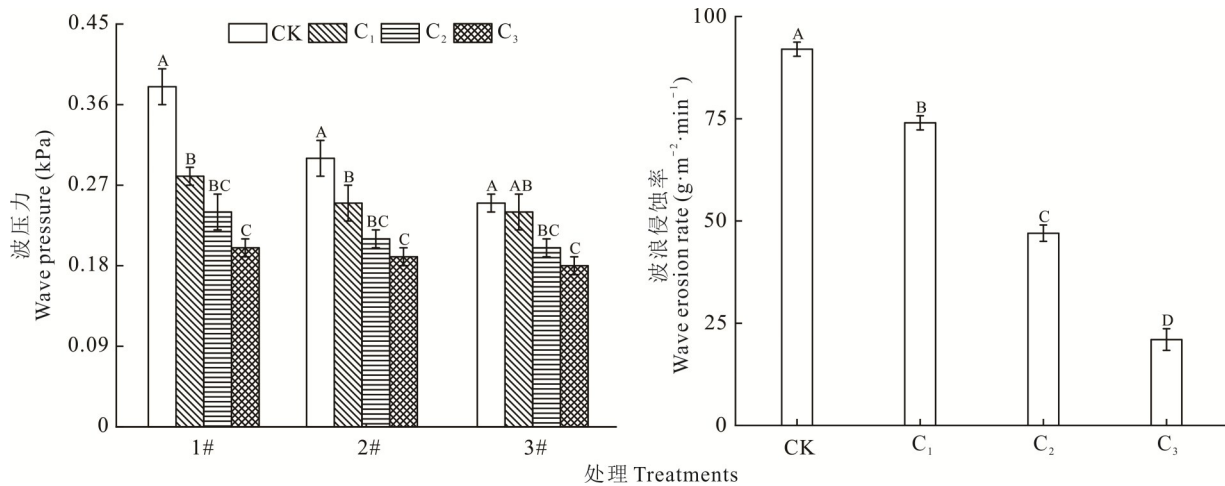


图3 单一措施中不同狗牙根覆盖处理对波压力和侵蚀率的影响

Fig. 3 Effect of different *C. dactylon* cover treatments on wave pressure and wave erosion rate in single measure

不同大写字母表示不同植物覆盖度下差异显著 ( $P < 0.05$ )。Different uppercase letters indicate significant differences among different plant coverages ( $P < 0.05$ ).  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  分别表示狗牙根覆盖度为 20%~30%、40%~50% 和 60%~70%。  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  represent *C. dactylon* coverage are 20%–30%, 40%–50% and 60%–70%, respectively. 下同 The same below.

## 2.2 协同措施对波压力和侵蚀率的影响

碎石—狗牙根覆盖协同措施下波压力和侵蚀率随碎石粒径的增大而增大,而随着碎石覆盖厚度、狗牙根覆盖度的增大而减小,整体上协同措施的消能减蚀性能均优于单一措施(图4)。相较于CK,随碎石粒径、覆盖厚度和狗牙根覆盖度的增加,波压力减小幅度为 28.95%~94.74%,侵蚀率减小幅度为 28.20%~80.43%,整体减小幅度大于单一碎石作用和单一植被作用,说明碎石—狗牙根覆盖协同措施能够更好地消散波压力和减小波浪侵蚀。与单一碎石覆盖相比,协同 20%~30%、40%~50% 和 60%~70% 狗牙根覆盖度时波压力进一步降低了 3.57%~82.14%、0.00%~84.00% 和 0.00%~87.50%。相较于仅植被覆盖,协同碎石粒径为 5~10 mm、10~15 mm 和 15~20 mm 时波压力进一步降低了 25.00%~88.89%、17.86%~87.50% 和 3.57%~85.00%。与单一碎石覆盖相比,协同 20%~30%、40%~50% 和 60%~70% 狗牙根覆盖度下波浪侵蚀率进一步降低了 6.98%~79.07%、1.37%~80.82% 和 3.13%~81.25%。相较于仅植被覆盖,协同碎石粒径为 5~10 mm、10~15 mm 和 15~20 mm 时侵蚀率进一步降低了 10.81%~51.35%、9.10%~43.60% 和 4.76%~38.89%。结果表明,在碎石粒径为 5~10 mm,碎石覆盖厚度为 60 mm,狗牙根覆盖度为 60%~70% 时减蚀效果最好。

## 2.3 协同措施下碎石与狗牙根覆盖的多因素方差分析

多因素方差分析表明碎石覆盖厚度、碎石粒径、植被覆盖度及其交互作用均对波压力和侵蚀率有一定影响(表1),碎石粒径、碎石覆盖厚度、植被覆盖度的单一因素和部分综合作用对波压力和波浪侵蚀率有显著影响 ( $P < 0.05$ )。对不同位置的波压力贡献率最高的因子为碎石覆盖厚度,其次为碎石粒径和植被覆盖度。三者对 1# 波压力的贡献率依次为 43.77%、30.26% 和 24.75%,对 2# 和 3# 波压力的贡献率分别为 43.16%、30.68%、24.34% 和 39.71%、32.47%、26.48%,表明碎石覆盖对波压力的影响优于植被覆盖度。而对波浪侵蚀率贡献率最高的因子为植被覆盖度,贡献率为 45.59%,其次为碎石覆盖厚度和粒径,贡献率分别为 42.17% 和 7.92%,表明植被覆盖对土壤减蚀的效果更加明显。

## 3 讨论

与CK相比,波压力呈随碎石粒径减小和覆盖厚度增加而降低的变化规律,碎石覆盖能够有效减少 16.85%~88.30% 的波压力,这与碎石覆盖时能够有效消耗波浪作用于坡面的能量有关<sup>[26]</sup>。波浪作用于碎石坡面时将破碎成为沿石缝的股流,导致波浪能量被消减,从而降低波浪作用于坡面的波压力<sup>[26]</sup>,这与Wang等<sup>[27]</sup>认为碎石含量提高能增强坡面抗侵蚀能力结论相同。同时,碎石粒径越小且覆盖厚度越大,碎石层中空隙相对越

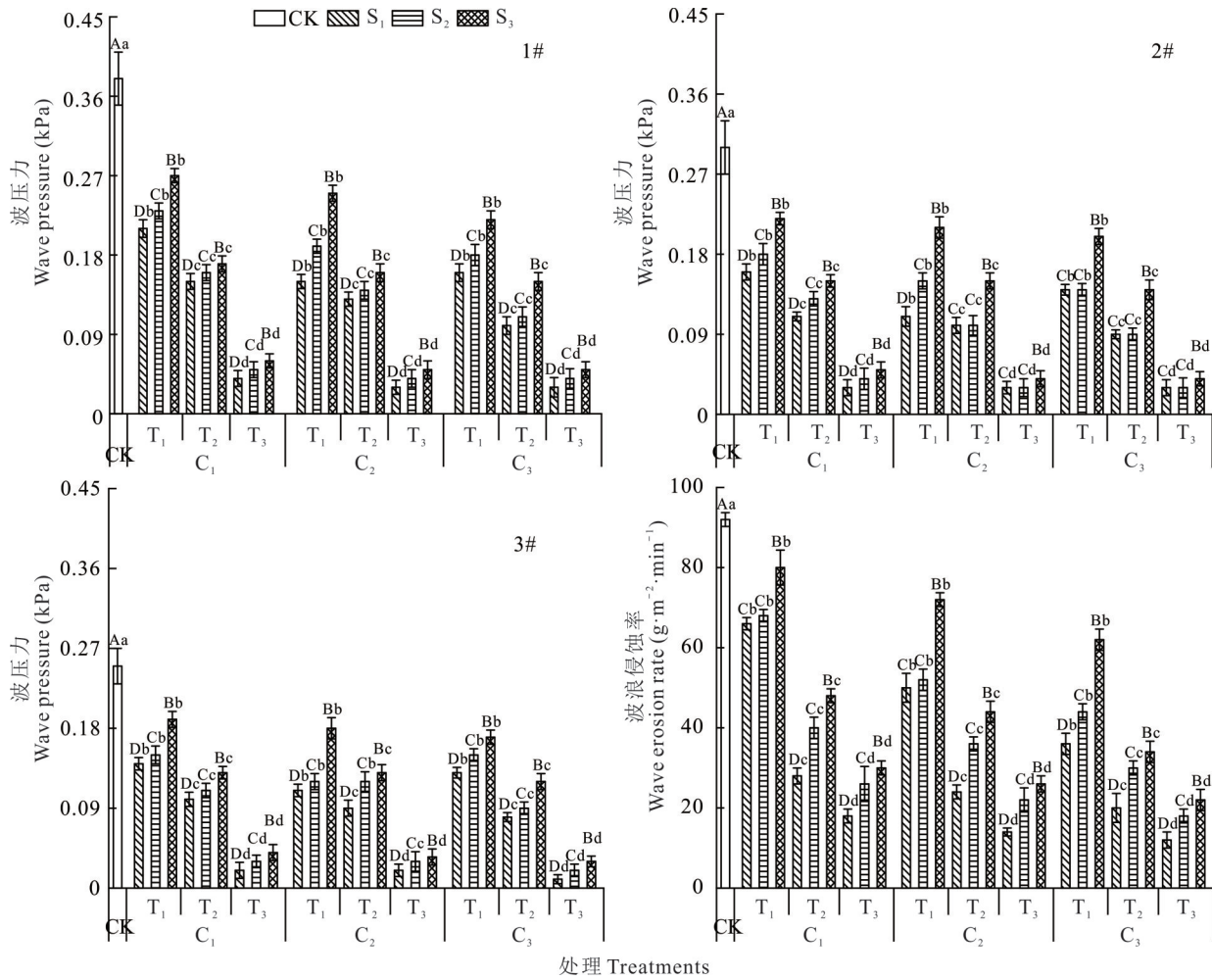


图 4 协同措施中不同碎石-狗牙根覆盖处理对波压力和侵蚀率的影响

Fig. 4 Effect of different gravel-C. dactylon cover treatments on wave pressure and wave erosion rate in synergistic measures

表 1 各因子对波压力、侵蚀率影响的多因素方差分析

Table 1 Multivariate analysis of variance of the influence of each factor on wave pressure and wave erosion rate

项目 Item	指标 Indicators	T	S	C	T×S	T×C	C×S	T×C×S
1#波压力	F 值 F value	554.09	383.14	313.38	5.58	1.38	1.35	6.06
1# wave pressure	P 值 P value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.89	0.75
	贡献率 Contribution rate (%)	43.77	30.26	24.75	0.44	0.11	0.11	0.48
2#波压力	F 值 F value	314.61	223.68	177.43	7.44	2.69	1.04	1.08
2# wave pressure	P 值 P value	0.00	0.00	0.03	0.00	0.05	0.40	0.41
	贡献率 Contribution rate (%)	43.16	30.68	24.34	1.02	0.37	0.14	0.15
3#波压力	F 值 F value	529.75	433.11	353.24	5.90	8.74	1.47	0.67
3# wave pressure	P 值 P value	0.00	0.00	0.02	0.00	0.42	0.97	0.71
	贡献率 Contribution rate (%)	39.71	32.47	26.48	0.44	0.66	0.11	0.05
侵蚀率	F 值 F value	233.98	43.97	252.98	1.14	10.00	8.75	3.02
Erosion rate	P 值 P value	0.00	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.01
	贡献率 Contribution rate (%)	42.17	7.92	45.59	0.21	1.80	1.58	0.54

T: 碎石厚度 Gravel thickness; S: 碎石粒径 Gravel particle size; C: 植被覆盖度 Vegetation coverage.

少,波浪通过碎石层进入坡面的路径被延长,碎石层对波浪能量耗散的作用进一步增强,使得土壤表层的波压力明显降低<sup>[28]</sup>,而Foss等<sup>[29]</sup>对不同类型砾石抵抗波浪侵蚀的结论也证明了这一点。此外,随碎石粒径减小和覆盖厚度增加,波浪侵蚀率比CK减少了8.70%~73.91%,与梁洪儒等<sup>[30]</sup>研究降水条件下的减蚀结果相似。一方面,碎石覆盖在坡面直接与波浪接触,消散了大量的波浪能量<sup>[31]</sup>,波压力减小使得对波浪用于土壤侵蚀的能量减小,从而减小对坡面土壤的剥离<sup>[30]</sup>;另一方面,坡面碎石覆盖能够增加坡面粗糙度,阻碍波浪的上爬和回落,使得更多被剥离的土壤被拦截并沉积于碎石层中<sup>[32]</sup>,进而减少对坡面土壤的侵蚀。因此,碎石覆盖能够保护下方的土壤表面免受波浪直接冲击,同时能拦截分离大部分被波浪卷走的土壤颗粒,从而降低波浪侵蚀率。

狗牙根覆盖时产生的波压力比CK减少了4.10%~46.36%,且波压力呈随狗牙根覆盖度增加而降低的变化趋势。狗牙根覆盖时,地上部分茎、叶对波浪产生一定的阻挡效果,减小波浪能量,从而降低波浪作用于坡面的波压力<sup>[33]</sup>。狗牙根覆盖度越高,其地上的茎、叶越多,从而增加了坡面粗糙度,且狗牙根丰富的叶片能在波浪作用过程中自由变形,消散部分的波浪能量,降低水流流速和波浪爬升高度,从而保护叶片下方的土壤免受波浪的直接影响<sup>[34]</sup>。因此,狗牙根覆盖度越高,其茎叶数量增加,从而消散波浪冲击能量的能力越强,波压力就越低<sup>[35]</sup>。狗牙根覆盖度增加侵蚀率比CK减少了19.56%~77.17%,这与钟荣华等<sup>[10]</sup>研究的狗牙根能够有效减少波浪侵蚀的结论相似。一方面狗牙根茎、叶的消能作用能够消减波压力,从而减少土壤侵蚀的水流分离和能量输送<sup>[34]</sup>;另一方面较高的覆盖度其地下根系含量也较高,植物根系与土壤颗粒之间的相互挤压、缠绕和穿插等作用形成了根—土复合体<sup>[36]</sup>,增加土体迁移阻力并削弱波浪冲击力,从而减少侵蚀率<sup>[37]</sup>。此外,狗牙根为柔性植物,其地上部分在波浪冲击作用下会被冲倒并紧贴在坡面上,可以进一步削弱波浪对坡面的直接冲击,进而降低波浪在坡面上爬升和回落时释放的能量,从而有效地减少波浪对坡面的侵蚀<sup>[38]</sup>。

整体上碎石—狗牙根覆盖协同措施的消能减蚀性能均优于单一措施,且与单一措施下的规律相同,波压力和侵蚀率均随碎石粒径增大而增加,而随碎石覆盖厚度、狗牙根覆盖度的增加而降低。协同措施下的波压力比CK减少了28.95%~94.74%,碎石覆盖厚度产生的影响明显高于碎石粒径和植被覆盖度。协同措施时,一方面狗牙根通过其茎、叶,缓冲波浪的冲击力,减少了部分波浪能量;另一方面碎石增大坡面粗糙度,碎石层可以先吸收部分波浪能量,进一步消散波浪能量<sup>[34]</sup>。碎石覆盖于土壤表层,在坡面形成了拦截波浪的屏障,覆盖厚度越高,波浪直接冲击到坡面的可能性越小<sup>[39]</sup>。更高的碎石覆盖厚度增加了水流进入坡表的路径,强化了碎石消能作用<sup>[28]</sup>,因此,碎石覆盖厚度的贡献最高。而碎石粒径变小可以减少碎石之间的间隙,从而会增加波浪上爬和回落的流动摩擦,减少波浪的能量<sup>[32]</sup>;狗牙根则是其上茎叶对波浪能量的消散作用<sup>[35]</sup>,相比坚硬的碎石更为柔软,因此对消能的贡献相对更小。此外,碎石—狗牙根覆盖协同措施下的波浪侵蚀率比CK减少了28.20%~80.43%,植被覆盖度对波浪侵蚀率的贡献最高。与消能作用不一样,狗牙根除了地上的茎、叶协同碎石消散了波浪冲击坡面大部分能量外,其根系能够加固土壤,提高土体抵抗侵蚀的能力,发挥减少侵蚀的作用,因此,植物地上地下的综合作用使得对坡面的减蚀作用要优于碎石覆盖。

本研究评估了狗牙根协同碎石对紫色土坡面波压力、波浪侵蚀率的影响,但本研究只考虑了在20°坡度时单一波浪条件下碎石覆盖和狗牙根的协同消能减蚀效果。考虑到波高、波浪周期等波浪参数、坡度以及植被类型对波浪作用下消能减蚀效果存在明显差异,因此,后续可以充分考虑不同因子,开展波浪冲刷下碎石—植被覆盖协同作用下的消能减蚀研究,为工程—生态协同消浪减蚀提供更可靠的科学支撑。

#### 4 结论

碎石单一因素、植被单一因素和两者协同措施下均具有良好的消能减蚀效果。与CK相比,碎石覆盖单一因素可有效消能26.49%~86.52%、减蚀8.70%~73.91%,植被单一因素可有效消能4.10%~46.36%、减蚀19.56%~77.17%,整体上协同措施消能减蚀效果均优于单一措施,碎石—植被覆盖协同作用可有效消能28.95%~94.74%、减蚀28.20%~80.43%。在碎石粒径5~10 mm、碎石覆盖厚度60 mm、狗牙根覆盖度60%~

70%组合消能减蚀效果最佳,可以充分发挥碎石和植被的协同作用。波压力、波浪侵蚀率的减少是碎石覆盖和植被覆盖的综合作用结果,对波压力影响程度最大的为碎石覆盖厚度,而植被覆盖度对波浪侵蚀率的影响程度最大。

### 参考文献 References:

- [1] Zhou Y J, Qiu J X, Wang J, *et al.* Assessment of eco-environmental vulnerability of water-level fluctuation belt in Three Gorges Reservoir Area. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6726—6733.  
周永娟, 仇江啸, 王姣, 等. 三峡库区消落带生态环境脆弱性评价. *生态学报*, 2010, 30(24): 6726—6733.
- [2] He X B, Bao Y H. Research advances on soil erosion and ecological restoration in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(4): 160—168.  
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. *中国水土保持科学*, 2019, 17(4): 160—168.
- [3] Ye C, Li S Y, Zhang Y L, *et al.* Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 191(1): 366—372.
- [4] Vietz G J, Lintern A, Webb J A, *et al.* River bank erosion and the influence of environmental flow management. *Environmental Management*, 2018, 61(3): 454—468.
- [5] Liu X H, Chen Y, Yan Z H, *et al.* The effects of grass hedgerow roots on shear strength and scouring resistance of root-soil complexes in the purple soil region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(11): 98—107.  
刘泉宏, 湛芸, 颜哲豪, 等. 紫色土区草篱根系对其根—土复合体抗剪和抗冲性能的影响. *草业学报*, 2021, 30(11): 98—107.
- [6] Zhao Y R, Cao Y X, Yang C C, *et al.* Hydrological effects of highway vegetation slope model under artificial rain conditions. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 24—33.  
赵娅如, 曹雲翔, 杨成参, 等. 人工降雨条件下高速公路植被边坡模型水文效应测试. *草业学报*, 2024, 33(3): 24—33.
- [7] Bao Y H. Characteristics of soil erosion in water level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment Chinese Academy of Sciences, 2009.  
鲍玉海. 三峡水库消落带土壤侵蚀特征研究. 成都: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2009.
- [8] Beeson C, Doyle P. Comparison of bank erosion at vegetated and no-vegetated channel bends. *Journal of the American Water Resources Association*, 1995, 31(6): 983—990.
- [9] Cui M, Liu C S, Chen X M, *et al.* Research on effect of anti-erosion by planting vetivers in Donggang Lake shore. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2017, 50(4): 531—535.  
崔敏, 刘川顺, 陈曦濛, 等. 东港湖岸种植香根草抵抗波浪侵蚀的效应研究. *武汉大学学报(工学版)*, 2017, 50(4): 531—535.
- [10] Zhong R H, He X B, Bao Y H, *et al.* Role of *Cynodon dactylon* L. and *Hemarthria altissima* in wave attenuation and erosion control. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 133—140.  
钟荣华, 贺秀斌, 鲍玉海, 等. 狗牙根和牛鞭草的消浪减蚀作用. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 133—140.
- [11] Zhang X B. Thinking about geomorphologic evolution of slopes in hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(3): 1—4, 9.  
张信宝. 关于三峡水库消落带地貌变化之思考. *水土保持通报*, 2009, 29(3): 1—4, 9.
- [12] Wang J, Zhao W W, Liu Y, *et al.* Effects of plant functional traits on soil conservation: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(9): 3355—3364.  
王晶, 赵文武, 刘月, 等. 植物功能性状对土壤保持的影响研究述评. *生态学报*, 2019, 39(9): 3355—3364.
- [13] Ding J, Dong Y F. Characteristics of wave-structure interaction of PBA revetment. *Port & Waterway Engineering*, 2022(4): 21—24, 75.  
丁洁, 董永福. 聚氨酯碎石护坡波浪作用特性. *水运工程*, 2022(4): 21—24, 75.
- [14] Wang Z, Gu B W, Yuan Q, *et al.* Wave dissipation performance of granular media based on three-dimensional meso-model. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(14): 15607—15613.
- [15] Yuan Q, Kong X Z, Zhang J H, *et al.* Three-dimensional mesoscopic modelling of shock wave propagation and attenuation in gravel granular filter. *Powder Technology*, 2021, 394: 838—852.
- [16] Cai Y K, Li Y, Feng H. Effects of gravel-sand mulching degree and size on soil moisture evaporation. *Journal of Soil and Water*

- Conservation, 2014, 28(6): 273–277, 297.
- 蔡永坤, 李毅, 冯浩. 不同砂石覆盖度和粒径对土壤水分蒸发的影响. 水土保持学报, 2014, 28(6): 273–277, 297.
- [17] Wu D, Feng W B, Shi Q L. A physical model study of the effect of the flexible vegetation on wave height attenuation and along the way of flow structure. Yellow River, 2014, 36(12): 79–81, 84.
- 吴迪, 冯卫兵, 石麒麟. 柔性植物消浪及沿程阻流特性试验研究. 人民黄河, 2014, 36(12): 79–81, 84.
- [18] Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China. Beijing: Science Press, 1996.
- 中国科学院中国植物志编委会. 中国植物志. 北京: 科学出版社, 1996.
- [19] Hong M, Guo Q S, Nie B H, *et al.* Responses of *Cynodon dactylon* population in hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir area to flooding-drying habitat change. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 2829–2835.
- 洪明, 郭泉水, 聂必红, 等. 三峡库区消落带狗牙根种群对水陆生境变化的响应. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2829–2835.
- [20] Chen S H, Xie Z K, Wang Y J, *et al.* Moisture storage effect of gravel mulch with different grain size on watermelon field. Journal of Desert Research, 2005, 25(3): 433–436.
- 陈士辉, 谢忠奎, 王亚军, 等. 砂田西瓜不同粒径砂砾石覆盖的水分效应研究. 中国沙漠, 2005, 25(3): 433–436.
- [21] Wu L, Mu X M, Gao P, *et al.* Effects of vegetation coverage on runoff and sediment yield in the loess plateau. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 133–138, 144.
- 吴蕾, 穆兴民, 高鹏, 等. 黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响. 水土保持研究, 2019, 26(6): 133–138, 144.
- [22] Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M. O. T. Technical code of modelling test for port and waterway engineering, JTS/T 231-2021. Beijing: China Communication Press, 2021.
- 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范, JTS/T 231-2021. 北京: 人民交通出版社, 2021.
- [23] 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. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2013, 35(3): 8–10, 20.
- 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. 三峡环境与生态, 2013, 35(3): 8–10, 20.
- [24] 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. Pearl River, 2020, 41(6): 32–38.
- 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. 人民珠江, 2020, 41(6): 32–38.
- [25] Liang S, Sun Z, Chang Y, *et al.* Evolution characteristics and quantization of wave period variation for breaking waves. Journal of Hydrodynamics, 2020, 32(2): 1–14.
- [26] 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. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(5): 169–180.
- 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. 工程科学与技术, 2023, 55(5): 169–180.
- [27] Wang L, Li Q L, Chen Y, *et al.* Model test study on wave-induced erosion on gravelly soil bank slope. Natural Hazards, 2023, 119(3): 1665–1682.
- [28] Li W C, Ma D X, Jia Z J, *et al.* Soil environmental effects of gravel-sand mulched field: research progress and prospects. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(2): 278–288.
- 李王成, 马东祥, 贾振江, 等. 砾石覆盖下的农田土壤环境效应: 研究进展与展望. 江西农业大学学报, 2024, 46(2): 278–288.
- [29] Foss O, Blenkinsopp C E, Bayle P M, *et al.* Comparison of dynamic cobble berm revetments with differing gravel characteristics. Coastal Engineering, 2023, 183: 104312.
- [30] Liang H R, Yu X X, Fan D X, *et al.* Effect of gravel-sand mulching on slope runoff and sediment yield. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 57–61.
- 梁洪儒, 余新晓, 樊登星, 等. 砾石覆盖对坡面产流产沙的影响. 水土保持学报, 2014, 28(3): 57–61.
- [31] Michele S, Nobuhisa K. Remaining capacity of low-crested rubble mounds damaged by breaking waves in surf zone. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2022, 148(6): 1–15.
- [32] Tang S Q, She D L. Synergistic effects of rock fragment cover and polyacrylamide application on erosion of saline-sodic soils. Catena, 2018, 171: 154–165.
- [33] Kervroëdan L, Armand R, Rey F, *et al.* Trait-based sediment retention and runoff control by herbaceous vegetation in

- agricultural catchments: a review. *Land Degradation Development*, 2021, 32(3): 1077–1089.
- [34] Yu F, Wang D C, Sun W P, *et al.* Impacts of grass planting density and components on overland flow hydraulics and soil loss. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(1): 234–249.
- [35] 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. *Ecological Engineering*, 2024, 202: 107233.
- [36] Cao Y Y, Su X M, Zhou Z C, *et al.* Spatial differences in, and factors influencing, the shear strength of typical herb root-soil complexes in the loess plateau of China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(5): 94–105.  
曹玉莹, 苏雪萌, 周正朝, 等. 黄土高原典型草本植物根-土复合体抗剪性能的空间差异性及其影响因素研究. *草业学报*, 2023, 32(5): 94–105.
- [37] Wei Y, Liu Y B, Liu X H, *et al.* Study on shear strength of root-soil composite of *Dolichos lablab* and *Medicago sativa* in purple soil region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(8): 82–90.  
魏艳, 刘有斌, 刘泉宏, 等. 紫色土区拉巴豆和紫花苜蓿根-土复合体抗剪性能研究. *草业学报*, 2023, 32(8): 82–90.
- [38] Zhu Z H, Chen Z L, Li L, *et al.* Response of dominant plant species to periodic flooding in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir (TGR), China. *Science of the Total Environment*, 2020, 747: 141101.
- [39] Liu D D, She D L. Can rock fragment cover maintain soil and water for saline-sodic soil slopes under coastal reclamation? *Catena*, 2017, 151: 213–224.