

不同降雨条件下生态护坡 减流减沙效应对比研究

董楚宁^{1,2}, 周 曾^{1,2*}, 陈文猛³, 金 秋⁴, 钱 钧³, 龚 政^{1,2}

(1. 江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点试验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 4. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:生态护坡技术逐渐广泛应用于边坡防护工程中,目前国内尚缺乏生态护坡水力侵蚀规律的研究。为更好地模拟自然降雨条件下 Enkamat® 型生态护坡产流产沙规律,设置持续性降雨、间歇性降雨及变降雨强度不同降雨条件下试验,分析径流含沙量及泥沙累积侵蚀量随降雨历时变化规律;设置降雨强度为 120 mm/h,坡度 25° 下 Enkamat® 7220 + 植被、Enkamat® 7020 + 植被、Enkamat® 7220 + 植被根系、Enkamat® 7020 + 植被根系、仅植被、仅根系、裸坡 7 组不同试验组次,分析并得出加筋植草型生态护坡产流产沙规律及其减流减沙特性,验证了 Enkamat® 型生态护坡水土防护效果的优越性,为江苏沿海垦区生态软防护工程提供理论支撑。

关键词:生态护坡;减流减沙;水力侵蚀;模拟降雨

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2020)04-0010-05

Comparative study on runoff and sediment reduction effect of ecological slope protection under different rainfall conditions

DONG Chuning^{1,2}, ZHOU Zeng^{1,2*}, CHEN Wenmeng³, JIN Qiu⁴, QIAN Jun³, GONG Zheng^{1,2}

(1. *Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu*; 2. *College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu*; 3. *Jiangsu Institute of Water Resources and Hydropower Research, Nanjing 210017, Jiangsu*; 4. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu*)

Abstract: Ecological slope protection technology is gradually widely used in slope protection engineering. At present, there's still a lack of research on water erosion law of ecological slope protection in China. In order to better simulate the law of runoff and sediment generation of Enkamat R ecological slope protection under natural rainfall conditions, experiments were conducted under different rainfall conditions with. The variation of runoff sediment concentration and sediment accumulation erosion with rainfall duration was analyzed. Seven different test groups of Enkamat R7220 + vegetation, Enkamat R7020 + vegetation, Enkamat R7220 + vegetation root system, Enkamat R7020 + vegetation root system, only vegetation, only root system, bare slope were set with the rainfall intensity as 120 mm/h and the slope at 25°. The law of runoff and sediment generation of reinforced grass-type ecological slope protection and its characteristics of water and sediment reduction were analyzed, the superiority of the soil and water protection effect of Enkamat R-type ecological slope protection was verified, which could provide theo-

收稿日期:2019-10-30

基金项目:江苏省水利重大技术攻关项目(2017011);江苏省海洋科技创新项目重大专项(HY2018-1)

作者简介:董楚宁(1994—),男,硕士研究生,研究方向为生态护坡。

通信作者:周曾(1986—),男,教授,博士,研究方向为水利工程及海岸工程。E-mail: zeng.zhou@hhu.edu.cn

retical support for ecological soft protection projects in Jiangsu coastal reclamation areas.

Key words: ecological slope protection; runoff and sediment reduction; water erosion; simulated rainfall

1 研究背景

江苏沿海垦区土壤具备高盐分、低植被覆盖度的特点,土壤颗粒以粗粉砂和细砂为主,土壤有机质含量低,结构性较差,在夏季长历时强降雨条件下极易发生水力侵蚀,为改善垦区水土流失问题,现考虑引用加筋植草型生态护坡技术来对垦区渠道边坡进行坡面生态防护^[1-2]。加筋植草型生态护坡技术是指在原有植被覆盖基础上,对植被根系加筋,维持植被根系稳定的同时,更好地稳固泥沙颗粒,从而提高边坡抗侵蚀性^[3-4]。其优势在于其开放性和保护生物多样性,对于生物的栖息环境影响较小,能够给工程应用区域提供更加合理的生物配置,同时促进水生态系统的平衡和自我修复,也能够满足对改善渠道边坡土壤条件及环境问题的需求^[5-6]。

加筋植草型生态护坡防护机制在于通过地表以上植被削弱雨滴击溅及径流紊动,增大坡面水力糙度,减小水流流速降低坡面冲刷,水土保持毯与根系、土壤紧密结合,提高坡面土壤抗剪强度,从而提高边坡稳定性^[7-9]。目前国内外针对加筋生态护坡水力特性的研究已有很多成果,通过大量物理模型及现场试验,通过分析抗剪抗冲性能来探讨坡面达到侵蚀状态时最大径流流速及土壤-根系-材料复合体抗剪强度阈值等,但现有研究针对加筋生态护坡产流产沙规律及减流减沙特性的成果仍较少^[10-12]。在天然降雨条件下,降雨历时,降雨强度等均是随机、不规律的^[13],为更好地探讨降雨条件下生态护坡水力侵蚀规律及减流减沙效应,验证加筋植草型生态护坡在江苏沿海垦区的适用性及其水土防护的优越性,本文采用室内模拟降雨试验,分别研究持续性降雨、变雨强降雨、间歇性降雨条件下水力侵蚀规律;设计不同工况下试验组次,对比分析不同护坡类型及天然裸坡产流产沙规律。

2 研究方法

2.1 试验准备

试验在江苏省水利科学研究院沿海降雨大厅试验基地完成,降雨大厅内所采用的人工降雨模拟装置主要由供水系统、控制系统和管道系统组成,该系统可在 15 m × 8 m 的面积内完成降雨作业。

其中降雨喷头距变角度钢槽高度约 20 m,共分为 3 个降雨区域,每个降雨区域均可独立操控,降雨强度在 20 ~ 180 mm/h 范围内变化,可设置微雨、小雨、中雨、大雨、暴雨及组合降雨强度。该套人工降雨试验设备可模拟 98% 近似度自然降雨,本试验应用变角度钢槽来模拟自然状态下垦区渠道边坡,由千斤顶驱动调整钢槽角度在 0° ~ 30° 变化直至满足试验需求,钢槽尺寸为 4 m × 2 m × 0.5 m。变角度钢槽顶端设有直径 5 cm 的出水口,用来连接水土流失测量仪并监测径流量及流失泥沙数据。

本试验研究背景区域位于江苏沿海垦区,垦区土壤含盐量较高,因此植被选择上考虑耐盐植被,最终选择狗牙根,狗牙根植被耐盐性较好,具有发达的根状茎和细长的匍匐茎,匍匐茎在坡面上穿插交织,能够很好得固定表层土体。坡面以上茎叶部分,可增大水力糙率,减小径流水体近底水流流速,狗牙根根系埋深在土壤中,可通过蒸腾作用吸收土体水分,进而在土体内部产生吸力,有利于维持土体稳定。狗牙根植被播种到萌芽约 7 d,生长发育成熟约 50 d。

Enkamat ® 型材料是一种由聚酰胺单丝纤维制成的三维网垫结构形式材料,对环境无毒害,耐紫外线、耐化学攻击,具有超过 95% 的孔隙率,由于其三维开孔结构和较高的孔隙率,可以阻滞泥沙颗粒的移动,确保表面填土的整体性和稳定性,同时 Enkamat ® 型材料也能创造有利于狗牙根草种发芽的微观环境,促进植被快速生长发育,在边坡形成根系-材料复合防护体系。

2.2 试验设计

试验设置持续性降雨、间歇性降雨及变降雨强度 3 组对照试验,坡度均设置为 25°,其中持续性降雨设置降雨历时 90 min,降雨强度 160 mm/h;间歇性降雨单组试验分 3 次进行,试验总历时 150 min,降雨强度 120 mm/h,每次降雨 30 min,每次降雨时间的间隔均为 30 min;变降雨强度试验依次设置 160 mm/h、80 mm/h、120 mm/h 降雨强度交替试验,单个降雨强度下模拟降雨历时 30 min,本组实验总历时 90 min,试验每隔 5 min 记录径流含沙量及泥沙侵蚀量,分析径流含沙量及泥沙累积侵蚀量随降雨历时变化规律。

对比试验统一设置降雨强度为 120 mm/h,坡度

统一调整至 25° , 共使用 7 台变角度钢槽, 装置表面材料铺设情况分别为 Enkamat® 7220 + 植被, Enkamat® 7020 + 植被, Enkamat® 7220 + 植被根系, Enkamat® 7020 + 植被根系, 仅植被, 仅根系, 裸坡。共设置 7 组对比试验, 从边坡表面冲刷情况、径流含沙量及泥沙累计侵蚀量、减流抗冲刷特性几个方面对比分析, 验证 Enkamat® 材料结合植被的水土防护效果。

3 结果分析

3.1 不同降雨条件下泥沙浓度变化

分析图 1 试验结果, 持续性降雨条件下, 径流含沙量先随降雨历时增大而增大, 因降雨强度较大, 大量坡面泥沙发生起动, 悬浮在水体中, 泥沙浓度上升趋势很明显, 在 25 min 时上升至峰值。随着模拟降雨的继续进行, 泥沙浓度曲线回落并发生波动, 整体呈下降的趋势, 这是因为在强降雨条件下, 坡面泥沙侵蚀方式发生改变, 大量原边坡表面泥沙悬浮在水体中被径流搬运, 新露出的泥沙层较原表面松散泥沙更难被侵蚀, 导致坡面泥沙供给能力降低, 因此泥沙浓度整体呈下降趋势, 随着侵蚀过程的继续, 在降雨后期阶段, 强烈的坡面局部冲刷则是泥沙浓度发生波动的主要因素, 由于坡面泥沙发生大量侵蚀, 坡面局部由 Enkamat® 型材料露出, 增强了对径流的阻滞作用, 这也是泥沙浓度整体下降的原因。

变雨强降雨条件下, 前期泥沙浓度同样先突然上升, 达到峰值后发生回落, 曲线变化趋势与持续性降雨保持一致。而在 30 min 后, 因降雨强度由 160 mm/h 突然降低至 80 mm/h, 泥沙浓度下对随降雨强度变化响应很强烈, 30 ~ 35 min 泥沙浓度有明显下降趋势。由于 Enkamat® 型生态护坡具有良好的蓄水效应, 此时边坡仍处于饱和入渗条件, 而降雨强度降低, 导致坡面径流量及径流紊动条件减弱, 径流挟沙能力下降, 因此在 30 ~ 60 min 降雨阶段, 径流泥沙含沙量在较低的数值附近波动。当降雨历时 60 min 后, 增大降雨强度至 120 mm/h, 泥沙浓度先整体下降, 说明在该阶段, 坡面侵蚀方式发生变化, 随着新的侵蚀过程继续发生, 泥沙浓度再次升高, 达到峰值后回落, 并且在 120 mm/h 降雨强度下达到的峰值远超过 80 mm/h 降雨强度下泥沙浓度峰值。

分析间歇性模拟降雨试验结果, 可看出该组试验单次降雨过程中, 泥沙浓度随降雨历时变化趋势

与前组试验趋势保持一致, 也是先上升后回落。而在 65 min 时观测到泥沙浓度数值比 30 min 时仅略有下降, 且大于 5 min 时泥沙浓度值, 原因在于 Enkamat® 型生态护坡具有良好的蓄水效应, 因此, 即使每 2 次试验时间间隔 30 min, 在第 2 次降雨时, 仍可很快达到边坡渗透条件, 产生径流从而发生坡面侵蚀。观察 3 次试验泥沙浓度变化规律, 第 1 次试验和第 2 次试验泥沙浓度峰值相差不大, 而第 3 次试验泥沙浓度远小于前 2 次, 原因也在于坡面侵蚀方式发生了变化。

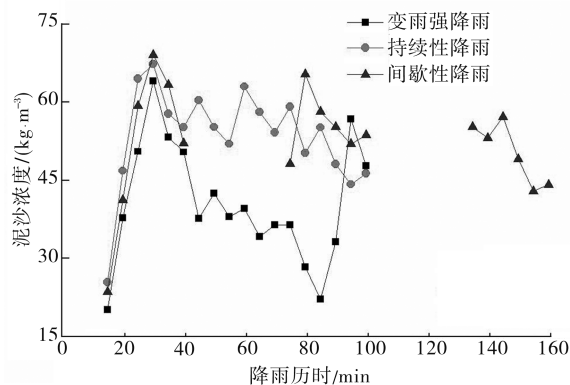


图1 泥沙浓度随降雨历时变化规律

3.2 不同降雨条件下泥沙侵蚀量变化

分析图 2 试验结果, 在持续性降雨条件下, 降雨泥沙侵蚀量随降雨历时而增大, 但随着降雨历时的继续, 因降雨强度较大, 坡面侵蚀方式会逐渐发生改变, 泥沙侵蚀量增大幅度略减小。

变雨强降雨条件下, 坡面泥沙侵蚀量随降雨强度增加整体呈增大趋势, 且泥沙侵蚀量增大幅度对降雨强度改变的响应较强烈, 在 80 mm/h 降雨阶段, 泥沙侵蚀量增大幅度明显降低, 而在 120 mm/h 降雨阶段下, 泥沙侵蚀量侵蚀增加幅度又随着降雨强度增大而升高。

在间歇性降雨条件下, 单组中 3 次试验泥沙侵蚀量均随降雨历时增大而增大, 单次试验始末泥沙侵蚀量差值分别为 4.13 kg、5.05 kg、2.11 kg, 可看出第 3 次泥沙侵蚀量差值小于前 2 次。结合图 1 中泥沙浓度变化趋势, 第 3 次试验中泥沙浓度整体较前 2 次降低, 验证了第 3 次试验泥沙侵蚀量差值最小的原因是坡面侵蚀方式发生改变, 泥沙供给能力降低, 表面泥沙在该阶段较难冲刷, 所以在第 3 次降雨试验中, 泥沙侵蚀量增大速率减缓。

3.3 坡面冲刷情况对比

由于 Enkamat® 材料与狗牙根植被同土壤的有机结合, 提高了边坡截流能力和保水能力, 从开始

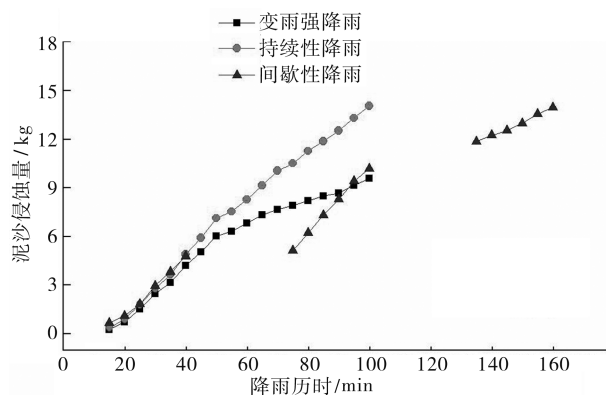


图2 泥沙侵蚀量随降雨历时变化规律

降雨约3 min后,达到边坡土壤渗透条件产生表面径流,有 Enkamat®材料及植被组合防护的边坡表面径流分布相对均匀,水流流速因植被阻滞作用而减小,水体紊动较弱,在降雨过程前中期未产生剧烈的局部冲刷,直至降雨后期产生局部冲刷,坡脚处侵蚀最严重,存在 Enkamat®材料出露现象,但整体侵蚀情况不是特别剧烈。

未施加任何防护措施的裸坡在降雨条件下,雨滴直接作用在边坡表面,启动了部分表面泥沙颗粒,随着较大降雨强度下降雨过程的进行,很快(约120 s)坡面开始产生径流,径流流速随着降雨历时增大而加快,且边坡表层土壤含水率增大至饱和后,土壤特性发生变化,抗剪强度降低,而径流量及径流水深逐渐增加,径流对边坡表面的冲刷越来越剧烈,随着降雨过程的继续,坡面发生严重的局部冲刷,如下图因局部冲刷产生了3条明显的沟,坡面受到严重侵蚀。2种工况最终冲刷结果对比,见图3。



图3 生态护坡及裸坡工况下最终冲刷结果对比图

3.4 不同工况下径流含沙量变化

设置坡度25°,降雨强度120 mm/h,分析组不同布置工况下径流水体含沙量随降雨历时变化趋势如图4所示,Enkamat®7020及Enkamat®7220型生态护坡工况下径流含沙量随时间变化趋势相对平稳,其他几组工况条件下径流含沙量降雨前期

迅速增高后,达到峰值后趋于平稳,整体均略有下降,峰值处裸坡条件下径流含沙量整体约是 Enkamat®型生态护坡4.5倍,且始终远远高于其他工况。

在降雨进行20 min后,除 Enkamat®7220及7020型生态护坡工况,其他5组工况下径流含沙量均回落,其中裸坡工况下径流含沙量回落较显著,这是因为裸坡工况在降雨20 min后坡面侵蚀方式发生了改变,坡面泥沙供给能力降低。在仅保持植被根系条件下,径流含沙量与裸坡工况差值较大,原因狗牙根根系具有固土作用,提高了土壤的稳定性。对比 Enkamat®7020及7220+根系工况与仅种植狗牙根植被工况,三者径流量变化趋势及差值相差不大,这说明 Enkamat®材料本身也具有固土作用,能够提高边坡稳定性。

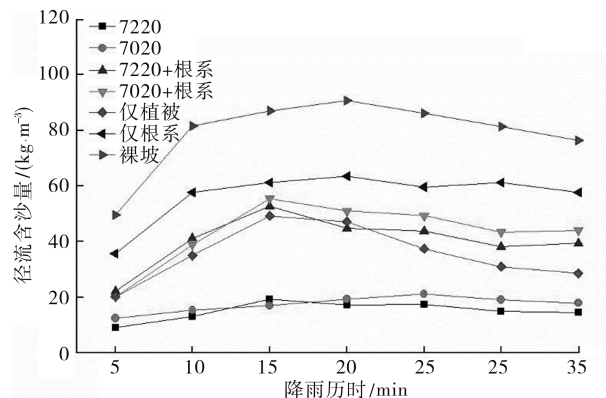


图4 不同工况下径流含沙量随时间变化规律

3.5 不同工况下泥沙侵蚀量变化

设置坡度25°,降雨强度120 mm/h,分析组不同布置工况下泥沙侵蚀量随降雨历时变化趋势,分析各工况下径流含沙量随时间变化规律如图5所示,7组工况在整个试验降雨过程中,随着降雨过程的继续,泥沙侵蚀量始终保持增大趋势,裸坡工况在降雨前期泥沙侵蚀量增大幅度最大,在降雨后10 min阶段,Enkamat®7220及7020型生态护坡工况泥沙侵蚀量增加趋势变缓,说明 Enkamat®型生态护坡主要侵蚀阶段在降雨过程的前中期。Enkamat®7220型生态护坡最终泥沙侵蚀量略高于 Enkamat®7020型工况,这说明 Enkamat®7220型生态护坡防护效果整体略好于 Enkamat®7020,而 Enkamat®型生态护坡最终泥沙侵蚀量约为裸坡工况最终泥沙侵蚀总量30%,这很好地验证了 Enkamat®型生态护坡在固土、提高边坡稳定性上具有良好效果。

3.6 减流特性

本组试验对照裸坡及 Enkamat®型生态护坡,

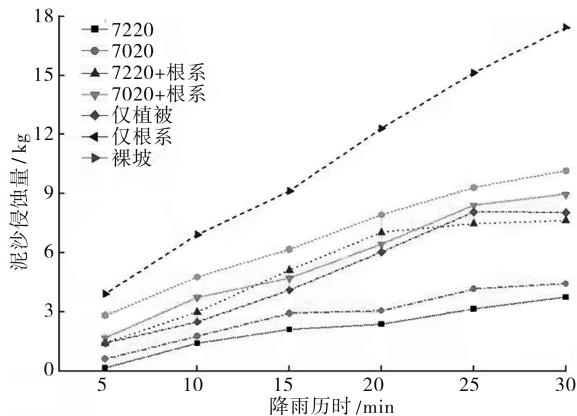


图5 不同工况下泥沙侵蚀量随降雨历时变化规律

控制坡度 25° , 降雨强度 120 mm/h , 降雨量 80 mm 下做冲刷对比试验, 通过水土流失仪监测整个降雨过程中累积径流量随时间变化规律。

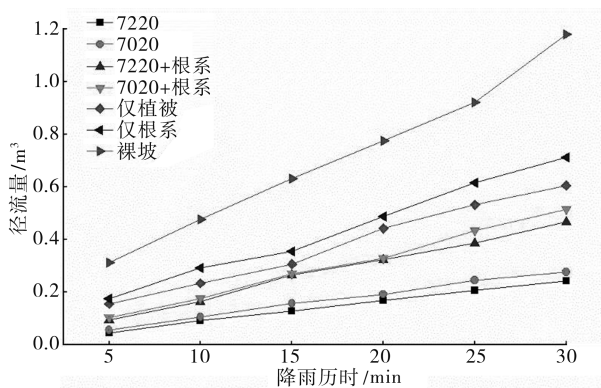


图6 不同工况下径流量随降雨历时变化规律

分析图6结果可看出: 不同工况下, 径流量均随降雨历时增大而增大。而在 30 min 降雨过程结束时, 不同工况下坡面产流情况差别较大。其中裸坡产流量约为仅种植植被护坡2倍, 这体现了植被生态护坡的保水能力, 裸坡产流量约为 Enkamat® 型生态护坡6倍, 说明植被—材料—土壤三者的结合,

更好得发挥出生态护坡的蓄水截流特性。

3.7 减沙特性

本组试验对照裸坡及 Enkamat® 型生态护坡, 控制坡度 25° , 降雨强度 120 mm/h , 降雨量 80 mm 下做冲刷对比试验。结合图4, 各组工况下径流含沙量在降雨历时 20 min 后呈降低趋势, 将本组试验前 20 min 泥沙侵蚀量占总泥沙侵蚀量百分比结果列于表1。

分析表1中数据, 暴雨条件下, 降雨历时进行至 20 min 时, 各工况坡面泥沙侵蚀量几乎均占总泥沙侵蚀量 70% 以上, 坡面泥沙流失过程主要发生在降雨中期前。 20 min 后至降雨结束, 各工况下泥沙侵蚀量占总坡面泥沙流失量比重约 $8\% \sim 30\%$, 这是因为在暴雨条件下, 降雨后期阶段坡面侵蚀方式发生了变化。而该时刻各工况泥沙侵蚀量相差较大, 说明不同水土防护措施的布置, 影响坡面侵蚀过程, 侵蚀方式发生改变的阶段也不同。

4 结 语

本文通过模拟降雨冲刷试验, 对比不同降雨条件及不同工况下边坡产流产沙规律, 验证了加筋生态护坡在江苏沿海垦区的适用性及水土保持效果的优越性, 为垦区生态软防护工程提供了理论依据, 最终得出以下结论:

(1) 降雨强度的改变影响 Enkamat® 型生态护坡坡面侵蚀过程, 坡面从较弱侵蚀逐渐向局部强烈冲刷过渡, 会逐渐伴随产生新的侵蚀方式;

(2) Enkamat® 材料本身也具有对于表层泥沙颗粒的稳固作用, Enkamat® 型生态护坡在降雨过

(下转第19页)

表1 不同工况下前 20 min 泥沙侵蚀量占总侵蚀量百分比

工况	坡度/ $(^\circ)$	降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	20 min 泥沙侵蚀量/kg	总泥沙侵蚀量/kg	百分比/%
7220	25	120	2.37	3.75	63.20
7020	25	120	3.06	4.43	69.07
7220 + 根系	25	120	7.04	7.63	92.27
7020 + 根系	25	120	6.44	8.97	71.79
仅植被	25	120	6.04	8.04	75.12
仅根系	25	120	7.93	10.16	78.15
裸坡	25	120	12.31	17.42	70.67

程中径流含沙量随降雨历时增大而升高,后略下降并趋于平稳;

(3) Enkamat®型生态护坡主要侵蚀阶段仍在前中期, Enkamat® 7220型生态护坡防护效果略好于 Enkamat® 7020, Enkamat®型生态护坡最终泥沙侵蚀量约为裸坡工况最终泥沙侵蚀总量30%,说明 Enkamat®型材料具有很好的水土防护效果;

(4) 降雨量相同情况下, Enkamat®型生态护坡由于其良好的蓄水效应减少了坡面径流量,坡面产流量约为裸坡条件下17%;

(5) 变降雨强度试验及间歇性降雨试验很好地验证了降雨强度影响坡面侵蚀方式,也反映出 Enkamat®型生态护坡具有很好的蓄水特性。

参考文献:

- [1] 仲亚婷, 张文太, 李建贵, 等. 用人工模拟降雨研究不同土壤类型的产沙特征[J]. 安徽农业大学学报, 2017(3):465-470.
- [2] 黄旭华, 孔琼菊, 黄丽丽. 降雨条件下不同土壤类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. 南昌工程学院学报, 2017(4):45-47.
- [3] 黄月华, 周成, 李红梅. 降雨中有植被覆盖土坡大孔隙结构对边坡稳定性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2018(3):132-137.
- [4] 王桂尧, 周欢, 夏旖琪, 等. 草类根系对坡面土强度及崩解特性的影响试验[J]. 中国公路学报, 2018

(2):234-241.

- [5] 李宝建. 生态护坡中植物根系与土作用机理研究[D]. 海口:海南大学, 2017.
- [6] Álvarez - Mozos J, Abad E, Giménez R, et al. Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 1: Effects on runoff and soil loss[J]. Catena, 2014, 118: 168-178.
- [7] 沈庆双. 草本植物加固边坡的试验探究[D]. 北京:中国地质大学, 2018.
- [8] 张琪琳, 王占礼, 王栋栋, 等. 黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2017(10):1093-1101.
- [9] 徐毅, 赵刚. 土工垫加筋生态护坡草皮抗剪性能试验研究[J]. 江苏水利, 2019(2):21-27.
- [10] Álvarez - Mozos J, Abad E, Goñi M, et al. Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 2: Influence on the establishment and growth of vegetation[J]. Catena, 2014, 121(4):195-203.
- [11] Thornton C, Jentsje V D M, Scholl B, et al. TESTING LEVEE SLOPE RESILIENCY AT THE NEW COLORADO STATE UNIVERSITY WAVE OVERTOPPING TEST FACILITY: International Conference, 2013[C].
- [12] 降雨条件下三维土工网垫植草护坡水力侵蚀特性试验研究[D]. 济南:山东大学, 2016.
- [13] 彭遥, 周蓓蓓, 陈晓鹏, 等. 间歇性降雨对黄土坡地水土养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2018(3): 54-60.