

# 砾石覆盖条件下盐碱土边坡降雨侵蚀水动力学特征

陈心逸<sup>1,2</sup>, 李丽<sup>3</sup>, 余冬立<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098; 3. 南京江地土地开发咨询服务有限责任公司, 南京 210024)

**摘要:** 为了探究砾石覆盖对盐碱土坡面侵蚀的减沙效应, 通过室内模拟降雨试验, 研究不同坡度和雨强条件下降雨径流水动力学特征及产沙受砾石覆盖的影响。试验坡度选取 15° 和 30°, 雨强选取 92, 119 mm/h, 坡面砾石覆盖度分别为 0, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 采用染色示踪法测定坡面径流流速。结果表明: 不同坡度和雨强条件下, 水流产沙率随坡面砾石覆盖度增大先增后减; 雷诺数与弗劳德数均随砾石覆盖度增大呈先增后减的抛物线趋势, 曼宁糙率、Dracy-Weisbach 阻力系数、坡面径流剪切力和径流功率均与坡面砾石覆盖度呈线性正相关; 径流功率预测产沙率效果较好, 二者呈对数关系 ( $R^2=0.47$ )。

**关键词:** 砾石覆盖; 模拟降雨试验; 水动力学参数; 坡面侵蚀

**中图分类号:** S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)01-0116-05

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.019

## Hydrodynamic Characteristics of Rainfall Runoff on Saline-alkali Slope Covered by Gravel

CHEN Xinyi<sup>1,2</sup>, LI Li<sup>3</sup>, SHE Dongli<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098; 3. Nanjing River Land Development Advisory Service Co. Ltd., Nanjing 210024)

**Abstract:** A series of simulated rainfall experiments were conducted to investigate the reducing effect of gravel cover on erosion of saline slope. The effects of gravel coverage on hydrodynamic characteristics of runoff and unit sediment load were analyzed under different slope gradients (15° and 30°) and rainfall intensities (92 and 119 mm/h). The cover rates of gravel were 0, 10%, 20%, 40%, 60% and 80%, respectively. The flow rate was measured by dyeing tracer method. Unit sediment load increased first and decreased then with the increasing of gravel coverage under different slopes and rain intensities. The changing tendency of Reynolds number and Froude number versus gravel coverage was determined by parabola curve. Manning roughness, Dracy-Weisbach resistance coefficient, the stream average shear force and the stream power had positive liner relationship with the gravel coverage. The stream power predicted sediment load rate well, and these two were logarithmic ( $R^2=0.47$ ).

**Keywords:** gravel coverage; simulated rainfall experiment; hydrodynamic parameters; slope erosion

水土流失已成为普遍关注的生态环境问题之一。近年来,沿海滩涂水利工程建设边坡侵蚀问题逐渐受到重视<sup>[1-3]</sup>。由于滩涂成陆过程受海水渗杂影响,土壤积盐过程早于成陆过程,滩涂土壤主要是高钠盐粉壤土,结构差,砂性强。同时当地雨量丰沛,土壤侵蚀严重,边坡失稳,易造成坡面土体滑动或坍塌等后果<sup>[4-5]</sup>。根据对盐碱土坡面侵蚀过程规律的研究与认识,提出控制边坡侵蚀的措施是沿海滩涂开发必须解决的现实问题<sup>[6-7]</sup>。

坡面砾石覆盖可作为控制边坡侵蚀的一种潜在措施<sup>[1]</sup>。土壤中砾石存在影响土壤水蚀过程,认识砾石覆盖作用下的侵蚀过程对提出边坡侵蚀控制措施具有重要意义。Jomaa 等<sup>[8]</sup>研究表明,嵌入砾石可在一定程度上保护土壤表面免受雨滴击打,阻碍坡面径流,降低坡面产沙能力。Jomaa 等<sup>[9]</sup>研究表明,砾石覆盖能有效降低高雨强下雨滴对土壤溅蚀。符素华等<sup>[10]</sup>研究表明,土壤侵蚀量随砾石覆盖度增加呈负指数递减。不同类型土壤,其结构稳定性与土壤抗侵

收稿日期: 2017-09-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(51679062, 41471180); 江苏省国土科技项目(KJXM2017032); 江苏省青蓝工程支持计划项目; 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

第一作者: 陈心逸(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事农田水土过程研究。E-mail: 964410516@qq.com

通信作者: 余冬立(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农田水土过程与侵蚀控制研究。E-mail: shedongli@hhu.edu.cn

蚀特性差异较大,因此砾石覆盖在控制土壤侵蚀过程中的作用存在差异。王小燕等<sup>[11]</sup>研究表明,砾石覆盖能有效减小紫色土坡面径流速率,增大入渗速率;而 Smets 等<sup>[12]</sup>研究表明,砾石覆盖对粉砂壤淋溶土坡面入渗速率影响较小。目前,我国在这方面的研究主要集中于西北黄土、东北黑土及南方红壤土等,而针对砾石覆盖对沿海地区盐碱土边坡侵蚀过程影响的研究较少。海涂盐碱土孔隙水中含有大量  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  等可溶盐离子,在黏土结构—水—电解质系统的相互作用下具有特殊的水文特性,而坡面砾石覆盖可进一步加剧盐碱土边坡降雨侵蚀水动力学机制的复杂性。本文主要研究不同降雨强度、坡度条件下砾石覆盖对盐土边坡侵蚀水动力学过程的作用,探究产沙率与砾石覆盖度的关系,从而为有效指导海涂围垦区边坡防护建设提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤材料

试验土壤于 2015 年 6 月采自江苏省东台市条子泥垦区( $32^{\circ}33'—32^{\circ}57'N$ ,  $120^{\circ}07'—120^{\circ}53'E$ )。该区自 2012 年开始围垦,濒临黄海,海拔高度为 1.4~5.1 m,地处亚热带季风及温带季风气候带之间,多年平均降雨量 1 060 mm,日温  $15^{\circ}\text{C}$ ,蒸发量 880 mm。土壤砂粒(粒径 0.25~0.05 mm)、粉粒(粒径 0.05~0.002 mm)和黏粒(粒径<0.002 mm)的质量分数分别为 57.4%,40.3%,2.3%,交换性钠离子含量为 4.6 cmol/kg,交换性钠百分比为 63.2%,电导率为 4.26 mS/cm(1:5 土水比),根据盐碱土判别准则<sup>[13]</sup>,供试土壤为盐碱粉壤土。

### 1.2 试验设计

研究通过人工模拟降雨试验完成,采用 4 m 高下喷式降雨装置,降雨强度通过压力表调节。试验在可调坡度钢制土槽上进行,土槽长×宽×高=200 cm×100 cm×30 cm。考虑围垦区边坡坡度的实际范围为  $5^{\circ}—40^{\circ}$ ,坡度选定为 2 个典型坡度:  $15^{\circ}$  和  $30^{\circ}$ ,土槽中间用隔板隔开完成 2 次重复。试验土样经自然风干后过 4 mm 筛,充分混合均匀。试验过程中,为保证试验土槽的透水状况接近天然坡面,土槽底部铺厚 4.5 cm 的砂石,砂石上铺 0.5 cm 厚纱布。将过筛后的土样分两层装入土槽,每层 5 cm,边填边压实。为确保土层间的连通性,刮毛下层土壤表面,控制土壤容重为  $1.3\text{ g/cm}^3$ 。装填完成后,在土壤表面嵌入砾石,嵌入深度 2 cm。试验采用的砾石主要为海涂围垦区建筑垃圾碎石,平均直径 4 cm,嵌入坡面后,砾石呈规则三角形排列。试验选定 0, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% 共 6 种砾石覆盖度。装填完成后,调节土槽坡度和降雨器压力表,进行降雨试验。选定降

雨强度为 92, 119 mm/h。考虑不同土壤初始含水量条件下坡面侵蚀水动力学过程受砾石覆盖影响有差异,分两阶段降雨,第 1 阶段 50 min,降雨结束后用干净的塑料薄膜覆盖坡面(防止土壤蒸发和外界污染),24 h 后进行第 2 次降雨,持续 50 min。

坡面产流后,每隔 1~4 min 收集 1 次坡面径流过程样,并采用烘干法测定径流泥沙含量。采用高锰酸钾染色剂法结合数码摄像机录像与 IPP 图像处理分析方法,每隔 5~8 min 测定坡面水流速度<sup>[3]</sup>。试验过程中降雨水温  $18—22^{\circ}\text{C}$ 。根据实测降雨强度资料与径流资料,计算坡面水流动力学参数<sup>[4]</sup>,包括水流雷诺数( $Re$ )、弗劳德数( $Fr$ )和曼宁糙率系数( $n$ )。试验数据采用 Excel 和 SPSS 19.0 软件进行分析处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡面砾石覆盖对径流产沙率的影响

砾石覆盖对盐碱土边坡侵蚀过程的作用受降雨强度和坡度影响。由图 1 可知,坡度  $30^{\circ}$  条件下,产沙率随砾石覆盖度增大呈先增后降的抛物线趋势,降雨强度为 119 mm/h,平均产沙率最大值出现在 20% 覆盖度,为  $15.89\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,最小值出现在 80% 覆盖度,为  $8.51\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ;降雨强度为 92 mm/h,平均产沙率最大值出现在 40% 覆盖度,为  $10.05\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,最小值出现在 0 覆盖度,为  $3.78\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。坡度  $15^{\circ}$  条件下,平均产沙率随砾石覆盖度增大变化不显著,92 mm/h 雨强条件下平均产沙率为 2.45~5.97  $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,119 mm/h 雨强条件下平均产沙率为 2.73~6.36  $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。坡度一定,高雨强(119 mm/h)条件下坡面平均产沙率随砾石覆盖度增加较低雨强(92 mm/h)条件下变化更显著;雨强一定,坡度  $30^{\circ}$  较  $15^{\circ}$  平均产沙率受砾石覆盖度影响更显著。分析原因,坡度较小条件下,坡面承雨量较大,砾石覆盖护坡保土效应削弱,产沙率随砾石覆盖度增大变化不显著;坡度较大情况下,随砾石覆盖度增大,水流趋于平缓,且砾石间有限的间距可截流降雨溅起泥沙颗粒,减少径流携带泥沙来源,故产沙率减小<sup>[10]</sup>。

### 2.2 坡面砾石覆盖对径流水动力学参数的影响

雷诺数和弗劳德数是描述径流流态的关键性水动力学参数,坡面径流可视作明渠水流,根据明渠水流流态判别方法<sup>[14]</sup>,临界雷诺数为 500,试验条件下,坡面径流雷诺数范围为 5.91~17.62,故所有处理条件下的坡面水流均为层流。临界弗劳德数为 1,试验条件下弗劳德数取值范围为 1.60~9.13,故本试验中所有坡面水流均为急流。

由图 2 可知,不同坡度、雨强条件下,径流雷诺数和弗劳德数均随砾石覆盖度增加呈先升后降的抛

物线趋势,表明砾石覆盖度较高条件下,坡面径流逐渐趋缓,坡面产沙减少。坡度一定,高雨强条件下弗劳德数随坡面砾石覆盖度变化更显著;雨强一定,坡度  $30^\circ$  下弗劳德数变化更显著。张光辉等<sup>[15]</sup>研究认为坡面流态主要受下垫面状况、流量及水深影响。因此,砾石覆盖度较小情况下,水流稳定性主要受雨滴击打作用影响,紊乱程度增大;砾石覆盖度增大,削弱了雨滴击打作用,水流趋于平缓。而坡度、雨强较高条件下,坡面径流流态变化显著,受砾石覆盖度影响更明显。

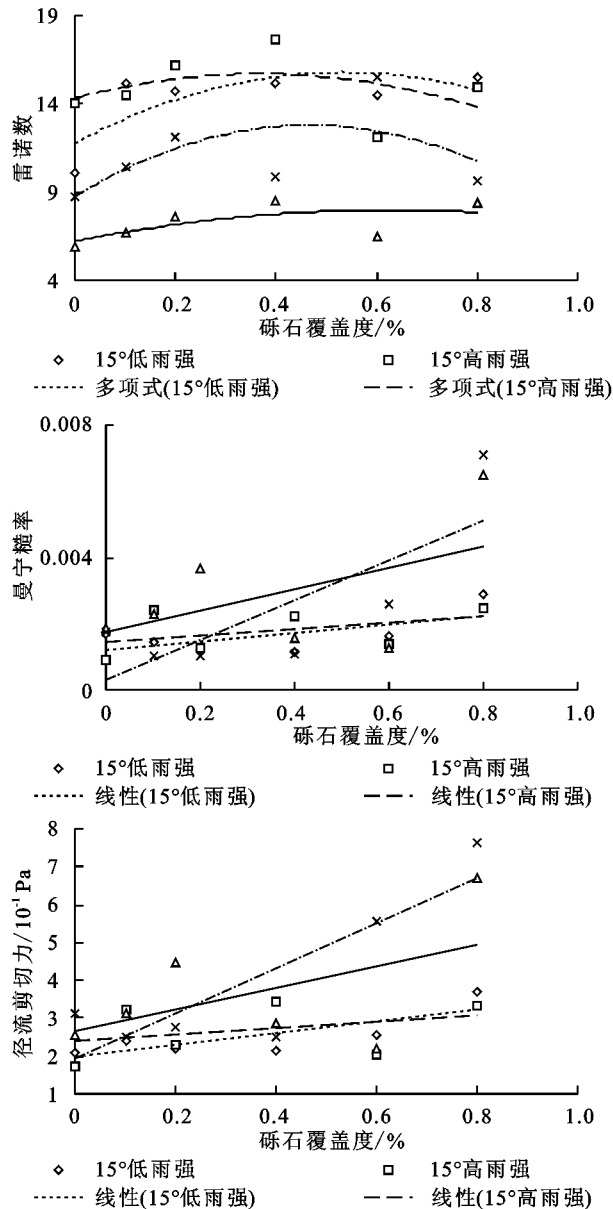


图 2 坡面砾石覆盖对径流水动力学参数的影响

曼宁糙率是反映坡面对水流阻滞作用的参数<sup>[15]</sup>,Dracy-Weisbach 阻力系数间接表征坡面粗糙程度。曼宁糙率和 Dracy-Weisbach 阻力系数计算结果表明,随坡面砾石覆盖度增大,坡面径流所受阻力呈线性上升趋势。坡度为  $15^\circ$ ,2 个雨强条件下,砾石覆盖度增加到 80%,坡面径流曼宁糙率相对于无覆

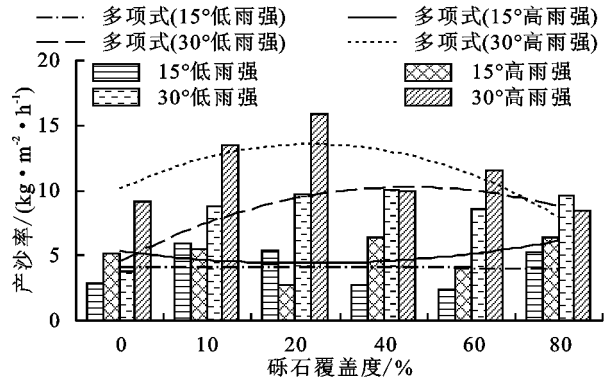
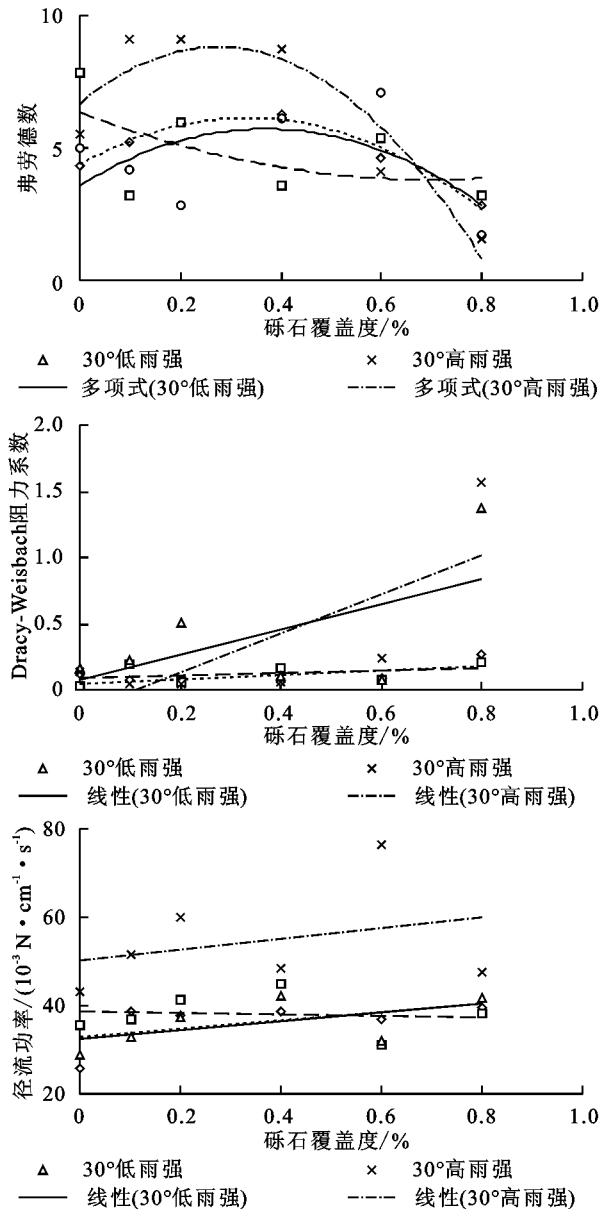


图 1 围垦区盐碱土坡面产沙率受砾石覆盖的影响



盖坡面分别增大 1.68,2.75 倍;坡度为  $30^\circ$ ,2 个雨强条件下,砾石覆盖度增加到 80%,坡面径流曼宁糙率分别增大 3.46,4.03 倍。由图 2 可知,坡度一定,高雨强条件下曼宁糙率受砾石覆盖度影响更显著;雨强一定, $30^\circ$  坡度曼宁糙率随砾石覆盖度增大更明显。同一坡度条件下,高雨强条件下 Dracy-Weisbach 阻

力系数随坡面砾石覆盖度增大而增大的幅度更明显;雨强一定,30°坡度下 Dracy-Weisbach 阻力系数增幅更显著。由于  $n$  和  $f$  均为坡度、径流水深、流速的函数,与坡度、径流水深成正比,与流速成反比,而随砾石覆盖度增大,径流速度显著降低,故曼宁糙率和 Dracy-Weisbach 阻力系数均随砾石覆盖度增大而增大,径流所受阻力增大,且高坡度条件下,水流阻力受砾石覆盖的影响更为明显。

坡面径流沿坡面向下运动的过程中,在其运动方向上产生剪切力,影响土壤冲刷,破坏土壤原有结构、分散土壤颗粒,进而携带分散的土壤颗粒,使其伴随水流运动被输出坡面。径流功率即单位面积水体势能随时间的变化率,表征了一定高度的水体顺坡流动时具有的势能<sup>[16-17]</sup>,径流功率超过临界值( $\omega_r$ )时,土壤侵蚀开始<sup>[14]</sup>。由图 2 可知,径流剪切力和径流功率在试验条件下均随砾石覆盖度的增大而线性增大,且高雨强和高坡度条件下,其增幅更为明显。因此,随砾石覆盖度增大,径流剥蚀能力显著增大。

2.3 坡面水流产沙速率与水力学参数的关系

由表 1 可知,产沙率与径流功率有显著相关关

系,这与 Guo 等<sup>[18]</sup>的研究结论相一致。单位径流功率公式最早应用于明渠水流,相关试验证明,水流功率可用来描述坡面侵蚀产沙<sup>[19]</sup>,王瑄等<sup>[16]</sup>、肖培青等<sup>[20]</sup>和 Zhang 等<sup>[21]</sup>的试验结果也对此理论的应用提供了依据。

由图 3 可知,随径流功率( $\omega$ )的增大,产沙率( $R_s$ )呈对数上升趋势。通过回归拟合可得到产沙率与径流功率之间的经验公式为: $R_s = 10.56\ln(x) - 31.73(R^2 = 0.47)$ ,这与 Guo 等<sup>[18]</sup>试验得出产沙率与径流功率呈线性正相关关系结论不相符。海涂围垦区盐碱土特殊理化性质可能是造成差异的原因<sup>[22]</sup>。计算可得砾石覆盖条件下沿海地区盐碱土边坡侵蚀的临界径流功率为  $2.02 \times 10^{-2} \text{ N}/(\text{cm} \cdot \text{s})$ 。此值远小于覃超等<sup>[23]</sup>试验得出的细沟侵蚀的临界径流功率。根据吴淑芳等<sup>[24]</sup>研究结果,产沙能耗与土壤类型有关,而盐碱土边坡主要为粉壤土,粉粒含量高,土壤结构差,且试验雨强较大,砾石覆盖干扰降雨后土壤结皮,从而使坡面径流剥蚀土壤所需能量减小,故临界径流功率较小。此结论可为海涂围垦区盐碱边坡的侵蚀预报提供依据。

表 1 平均产沙率与水力学参数相关性

参数	雷诺数	弗劳德数	曼宁糙率	达西系数	径流剪切力	径流功率	产沙率
雷诺数	1	-0.043	-0.227	-0.275	-0.143	0.264	-0.347
弗劳德数		1	-0.768**	-0.646**	-0.675**	0.168	0.293
曼宁糙率			1	0.979**	0.940**	0.107	0.146
达西系数				1	0.909**	0.107	0.177
径流剪切力					1	0.424*	0.344
径流功率						1	0.674**
产沙率							1

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; N=24。

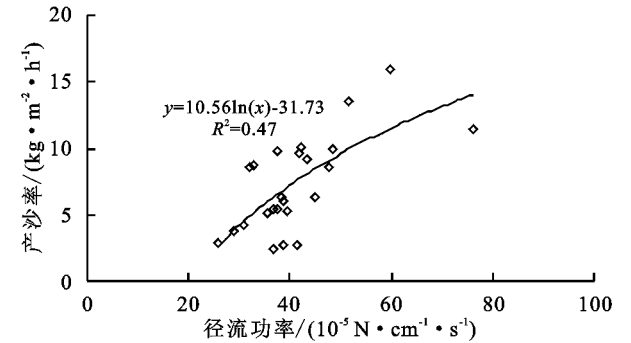


图 3 产沙率与径流功率关系

加呈指数递减,且随降雨强度增加土壤溅蚀量受砾石覆盖影响减小。对于高雨强、陡坡情况,砾石覆盖对坡面产沙率影响更显著,产沙率随砾石覆盖度增大先增后减。盐碱土坡面砂性强,结构松散,易受水流侵蚀,且试验雨强较大,坡面无植被条件,低砾石覆盖度增大水流紊乱程度,破坏土壤表层结构,使产沙率增大,而高砾石覆盖度可降低径流紊乱程度,尽管径流剪切力随砾石覆盖度增大线性增大,但坡面粗糙程度随砾石覆盖增大而增大更为显著,影响土壤颗粒的迁移、剥离和输送,从而有效降低坡面产沙。

坡面受水流侵蚀的临界水动力条件是坡面侵蚀判断的基础,径流功率可较好表征坡面产沙,所得临界径流功率远小于黄土边坡细沟侵蚀、工程堆积体坡面侵蚀等临界功率。坡面土壤条件、雨强和坡度均对临界水力学条件有一定影响<sup>[28-29]</sup>。盐碱坡面土壤结构差,降雨强度较大均降低临界水动力条件。本试验重点研究了砾石覆盖条件下盐碱坡面侵蚀产沙,建立了试验条件下的坡面产沙公式,但水流功率理论在盐碱土边坡侵蚀预测的实践中应用较少,且考虑土壤容重、降雨特征及土壤初始水分含量的差异,模拟降雨

3 讨论

本研究通过模拟降雨试验对比了不同雨强,坡度条件下砾石覆盖对盐碱土坡面侵蚀的影响。研究表明,径流水动力学参数及产沙率受砾石覆盖影响。经典水力学将坡面侵蚀分为土壤颗粒剥离、运输和沉积 3 个过程,坡面产沙受径流冲刷作用、土壤抗侵蚀能力及地面物质补充等因素影响<sup>[25]</sup>。梁洪儒等<sup>[26]</sup>研究表明,砾石覆盖对坡面有保护作用,坡面土壤侵蚀量随砾石覆盖度增加呈负指数减少,且在小降雨强度下减沙效果更明显。而王葆等<sup>[27]</sup>研究表明,土壤溅蚀量随砾石覆盖度增

试验结果不能直接适用于海涂垦区野外坡面侵蚀预测。Fang 等<sup>[30]</sup>对亚热带山区小流域砾石土壤 5 年产沙动态研究表明,此时间跨度砾石覆盖对土壤产沙有负效应。因此,长历时条件下砾石覆盖对盐碱边坡侵蚀水动力学机制影响需要进一步探索,坡面产沙临界水动力条件的相关研究有待进一步加深。

## 4 结论

(1)产沙率与砾石覆盖度呈抛物线关系,先增后减,变化趋势受雨强和坡度影响,高坡度、高雨强条件下,平均产沙率受砾石覆盖度影响更显著。

(2)坡面径流雷诺数( $Re$ )较小,为 5.91~17.62,弗劳德数( $Fr$ )为 1.60~9.13,均随砾石覆盖度先增后减,径流紊乱程度先增后减。曼宁糙率( $n$ )、Dracy-Weisbach 阻力系数( $f$ )、坡面径流剪切力( $\tau$ )和径流功率( $\omega$ )均与坡面砾石覆盖度线性正相关。

(3)平均产沙率与径流功率显著相关,径流功率可用于预测高钠盐碱边坡降雨侵蚀产沙率,经验公式为: $R_s = 10.56 \ln(x) - 31.73 (R^2 = 0.47)$ 。然而水流功率理论于盐碱土边坡侵蚀预测的实践应用较少,需进一步探究。

### 参考文献:

- [1] Liu D, She D. Can rock fragment cover maintain soil and water for saline-sodic soil slopes under coastal reclamation? [J]. Catena, 2017, 151: 213-224.
- [2] Liu D, She D. Sodicty effects on hydrological processes of sodic soil slopes under simulated rainfall [J]. Hydrological Processes, 2017, 31(5): 981-994.
- [3] She D, Liu D, Meng J, et al. Hydrological responses on saline-sodic soil slopes in a coastal reclamation area of China [J]. Catena, 2016, 144: 130-140.
- [4] 余冬立,刘冬冬,彭世彰,等.海涂围垦区排灌工程边坡土壤侵蚀过程的水动力学特征[J].水土保持学报, 2014,28(1):1-5.
- [5] She D, Fei Y, Liu Z, et al. Soil erosion characteristics of ditch banks during reclamation of a saline/sodic soil in a coastal region of China: Field investigation and rainfall simulation [J]. Catena, 2014, 121: 176-185.
- [6] 王资生.滩涂围垦区的水土流失及其治理[J].水土保持学报,2001,15(5):50-52.
- [7] 刘广明,杨劲松,姜艳.江苏典型滩涂区地下水及土壤的盐分特征研究[J].土壤,2005,37(2):163-168.
- [8] Jomaa S, Barry D A, Heng B C P, et al. Influence of rock fragment coverage on soil erosion and hydrological response: Laboratory flume experiments and modeling [J]. Water Resources Research, 2012, 48(5): 213-223.
- [9] Jomaa S, Barry D A, Heng B C P, et al. Effect of antecedent conditions and fited rock fragment coverage on soil erosion dynamics through multiple rainfall events[J]. Journal of Hydrology, 2013,484(7):115-127.
- [10] 符素华,路炳军,叶芝茜.地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2010,24(2):15-18.
- [11] 王小燕,李朝霞,蔡崇法.砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J].水科学进展,2012,23(1):38-45.
- [12] Smets T, López-Vicente M, Poesen J. Impact of sub-surface rock fragments on runoff and interrill soil loss from cultivated soils [J]. EarthSurface Processes & Landforms, 2011, 36(14): 1929-1937.
- [13] Yao R, Yang J, Gao P, et al. Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area [J]. Soil & Tillage Research, 2013, 128: 137-148.
- [14] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.坡面薄层水流水动力学特性试验[J].农业工程学报,2014,30(15):182-189.
- [15] 张光辉,刘宝元,李平康.槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J].水土保持通报,2007,27(6):56-60.
- [16] 王瑄,李占斌,李雯,等.土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟实验[J].农业工程学报,2006,22(2):185-187.
- [17] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟与细沟间水流水动力学特性研究[J].泥沙研究,2013(6):45-52.
- [18] Guo T, Wang Q, Li D, et al. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion [J]. Catena, 2013, 107: 145-153.
- [19] Yang C T. Sediment transport, river morphology, and river engineering [J]. Handbook of Environmental Engineering, 2014, 15: 339-371.
- [20] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.植被影响下坡面侵蚀临界水流能量试验研究[J].水科学进展,2011,22(2):229-234.
- [21] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. Transport capacity estimation [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1291-1297.
- [22] 陈倩,余冬立,章二子,等.海涂盐碱地工程边坡土壤抗冲刷性能试验研究[J].农业现代化研究,2016, 37(5): 964-971.
- [23] 覃超,吴红艳,郑粉莉,等.黄土坡面细沟侵蚀及水动力学参数的时空变化特征[J].农业机械学报,2016,47(8):146-154.
- [24] 吴淑芳,吴普特,宋维秀,等.黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究[J].土壤学报,2010,47(2):223-228.
- [25] 崔文滨,李鹏,李占斌,等.径流功率理论在黄土坡面侵蚀产沙计算中的应用[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(9):103-107.
- [26] 梁洪儒,余新晓,樊登星,等.砾石覆盖对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):57-61.
- [27] 王葆,马俊明,程金花,等.华北土石山区砾石覆盖对土壤溅蚀的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(5):93-98.
- [28] 丁文斌,史东梅,何文健,等.放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性[J].农业工程学报,2016,32(18):153-161.
- [29] 李鹏,李占斌,郑良勇.黄土陡坡径流侵蚀产沙特性室内实验研究[J].农业工程学报,2005,21(7):42-45.
- [30] Fang N F, Shi Z H, Chen F X, et al. Discharge and suspended sediment patterns in a small mountainous watershed with widely distributed rock fragments [J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 238-248.