

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.04.002

# 海涂围垦区盐碱粉壤土坡面径流剥蚀过程影响试验

余冬立<sup>1,2</sup>,唐胜强<sup>1,2</sup>,房凯<sup>3</sup>,刘冬冬<sup>1,2</sup>,王鹏<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,江苏 南京 210098;  
2. 河海大学农业工程学院,江苏 南京 210098; 3. 宿迁市水务局,江苏 宿迁 223800)

**摘要:**为探讨盐碱土边坡径流-侵蚀过程规律,通过人工模拟土槽径流冲刷试验定量分析坡度和上方来水流量对海涂围垦区盐碱粉壤土边坡径流剥蚀过程的影响。试验结果表明:上方来水流量和坡度对径流剥蚀速率均有显著正效应且互相制约,剥蚀速率与坡度和径流量存在幂指数函数关系;坡面单宽径流能耗随坡度和上方来水流量的增大均显著增大( $P<0.01$ ),单宽径流能耗 $e_w$ 与上方来水流量 $q$ 、坡度 $\theta$ 存在幂指数函数关系;在坡度 $5^{\circ}\sim15^{\circ}$ 条件下,临界单宽径流能耗为 $15\sim40\text{ J}/(\text{h}\cdot\text{m})$ ,而在高坡度 $20^{\circ}\sim40^{\circ}$ 条件下,临界单宽径流能耗接近零;剥蚀速率与单宽径流能耗之间存在显著线性关系( $R^2=0.82$ ),海涂盐碱粉壤土边坡只需较小径流能耗即可剥蚀表层土壤。

**关键词:**海涂围垦区;盐碱土边坡;径流-侵蚀过程;冲刷试验;剥蚀速率;径流能耗;临界单宽径流能耗

**中图分类号:**S152.7      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-1980(2018)04-0290-06

## Study on the soil detachment process for saline-alkali silty loam slopes in a coastal reclamation area

SHE Dongli<sup>1,2</sup>, TANG Shengqiang<sup>1,2</sup>, FANG Kai<sup>3</sup>, LIU Dongdong<sup>1,2</sup>, WANG Peng<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, China;  
2. College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
3. Suqian Water Conservancy Bureau, Suqian 223800, China)

**Abstract:** In order to study the runoff-erosion process of saline-alkali silty loam slopes in a coastal reclamation area, a series of runoff scouring experiments were conducted to investigate the effects of slope gradient and upstream inflow on the soil detachment process. The results showed that the slope gradient and upstream inflow both had positive effects on the detachment rate but their effects were mutually restricted. The relationships between soil detachment rate, inflow scouring rate and slope gradient can be expressed by a power exponential function. The runoff energy consumption of unit width increased significantly with the increasing of upstream inflow rate and slope gradient ( $P < 0.01$ ). In addition, the relationships between the runoff energy consumption of unit width  $e_w$ , upstream inflow rate  $q$  and slope gradient  $\theta$  can also be expressed by the power exponential function. The critical runoff energy consumption of unit width was  $15\sim40\text{ J}/(\text{h}\cdot\text{m})$  for slopes between  $5^{\circ}$  and  $15^{\circ}$ , while it was zero for slopes between  $20^{\circ}$  and  $40^{\circ}$ . There was significant linear relationship between the soil detachment rate and the runoff energy consumption of unit width and the relationship can be expressed by the following function:  $R^2=0.82$ . Soil detachment started when the runoff energy consumption of unit width was very small for saline-alkali soil slopes in the coastal reclamation area.

**Key words:** coastal reclamation area; slope of saline alkali soil; runoff erosion process; inflow scouring experiments; detachment rate; runoff energy consumption; critical runoff energy consumption of unit width

**基金项目:**国家自然科学基金(51679062,41471180);江苏省国土资源科技项目(KJXM2016003);江苏省水利科技项目(2016008)

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

**引用本文:**余冬立,唐胜强,房凯,等.海涂围垦区盐碱粉壤土坡面径流剥蚀过程影响试验[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):290-295.

SHE Dongli, TANG Shengqiang, FANG Kai, et al. Study on the soil detachment process for saline-alkali silty loam slopes in a coastal reclamation area[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(4): 290-295.

水土流失是当今世界普遍关注的重大生态环境问题之一,且土壤侵蚀机理研究已成为水土保持学科研究热点。目前,随着试验手段的提升,侵蚀过程研究逐渐从定性转向定量,主要集中探讨侵蚀发生的内在因素和动力学机理<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀过程主要包括土壤颗粒分散剥离,泥沙转移和沉积 3 个连续过程,而该过程的产生和发展是径流能量消耗的结果<sup>[2]</sup>。因此,能耗理论在描述坡面土壤侵蚀过程方面具备较大优势,各国学者都开展过相关研究。Hoton<sup>[3]</sup>从摩阻力概念出发,提出流态稳定条件下,单位时间内水流流过 1 m 长、1 m 宽的坡面时克服摩阻力所做的功等于流速与水流质量的乘积。李占斌等<sup>[4]</sup>基于能量守恒原理,通过变坡土槽冲刷试验,探索了缓坡条件下水土界面的能量消耗过程,为坡面径流动力过程的描述提出了新思路。

沿海滩涂围垦区(简称“海涂围垦区”)开发是我国沿海发展重要战略之一。海涂围垦区 60% 以上面积被用作农业开发,为加速土壤脱盐改碱,其配套水利工程建设中产生了大量的开挖坡面,如土质沟渠(河)边坡等。由于成陆过程中受海水浸渍影响,海涂围垦区土壤主要为高钠盐淤泥质粉砂壤土,土壤抗蚀能力弱,加之当地降雨丰沛,坡面土壤侵蚀严重,导致边坡不稳定,易于诱发坡面土体滑动或坍塌<sup>[5]</sup>。近年来,笔者针对海涂围垦区高钠盐含量影响下坡面土壤水沙运移过程的特殊性,通过系列试验与模型模拟研究,分析了降雨特征、坡度、土壤钠盐含量等因素对盐碱粉壤土坡面颗粒随地表径流侵蚀过程的影响及其水动力学机制,提出了利用碎石覆盖调控高钠盐土边坡水分入渗、径流水文路径和产流产沙过程的边坡防护思路<sup>[5-8]</sup>。目前尚无文献从能耗理论对海涂围垦区盐碱粉壤土边坡侵蚀过程进行分析。因此,针对海涂盐土钠盐含量高和沙性强的特点,笔者拟采用上方来水模拟冲刷方法对海涂围垦区盐碱粉壤土径流剥蚀率和径流能耗进行深入研究。该研究旨在弥补对盐碱土边坡水土流失过程动力学机理研究的不足,为沿海滩涂边坡防护与生态建设提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤于 2012 年 3 月采自江苏省如东县东凌垦区,该区位于北纬 32°12′~32°36′、东经 120°42′~121°22′,自 2007 年围垦,濒临黄海,地势平坦低洼,海拔高度 3.5~4.5 m,以亚热带湿润季风气候为主,多年平均降雨量 1 026 mm,68% 的降雨集中在 5—9 月,日平均气温 14.8℃,多年平均潜在蒸发量 1 343.5 mm。海涂围垦区灌排工程(河、沟、渠等)边坡多为短陡坡,土层厚度 1 m 左右,因此供试土壤取自研究区表层 100 cm,经自然风干、去除石块等杂质后过孔径为 2 mm 筛备用。土壤基本性质指标如下:有机质质量比 3.26 g/kg,电导率(1:5 土水比浸提)5.98 ms/cm,钠离子质量比 1.60 g/kg,交换性钠百分比(ESP)68.9;黏粒(<0.002 mm)、粉砂粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~0.25 mm)质量分数分别为 8.5%、52.9%和 38.6%,土壤为粉壤土(USDA 质地分级),土壤密度变化在 1.3~1.5 g/cm<sup>3</sup> 之间。

1.2 试验设计

试验于 2014 年 3 月 27 日至 5 月 13 日在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进行,采用室内土槽冲刷方法完成。试验在可调节坡度的有机玻璃制水槽上进行,由上方来水系统、水槽和土槽三部分组成(图 1)。为保障试验时稳定出流,水槽上方为定水头供水池,通过调节水泵阀门来控制上方来水流量,可调节流量范围为 160~1 600 L/h;水槽规格 300 cm×30 cm,可调坡度范围为 0°~45°;水槽下方距水箱 2.5 m 处开一长方形孔,用于安装土槽,土槽规格长 30 cm、宽 20 cm、高 10 cm,土槽底部钻若干小孔,使其透水状况接近天然坡面。本研究目的是分析冲刷条件下坡度和上方来水流量对盐土坡面剥蚀速率的影响,土槽规格设置较小可消除径流输沙过程对土壤剥蚀速率的影响<sup>[9]</sup>,且类似土槽已广泛应用于相关研究中,例如,王军光等<sup>[10]</sup>采用土槽规格即是长 0.39 m、宽 0.1 m、高 0.09 m。

试验过程中,首先在土槽底面垫 1 层粗棉纱布(厚度可忽略不计),将供试土壤分为 2 层填入土槽,每层厚度 5 cm,土层总厚度为 10 cm。土壤干密度控制在 1.45 g/cm<sup>3</sup>。分层填土时保证土壤压实状况均匀,通过

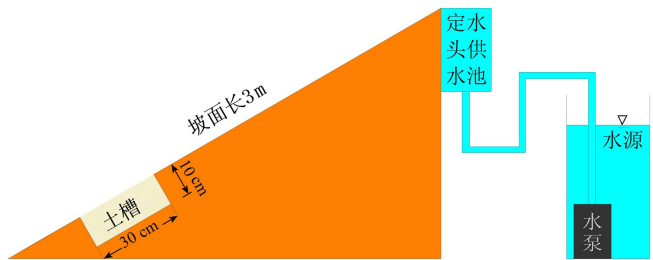


图 1 坡面侵蚀试验装置示意图  
Fig. 1 Diagrammatic sketch of the slope erosion experimental setup

刮毛下层土壤表面来避免层与层之间出现缝隙。装填完成后,将上层土壤表面刮平。在土槽表面均匀洒水,以保持土壤表层接近饱和且初始含水量条件基本一致,静置 24 h 后用于试验。洒水时注意先在土壤表面铺上粗纱布,以避免对土壤表面造成击溅破坏。试验开始后,在水槽出口处放置塑料瓶用来收集径流泥沙。

选取边坡坡度和上方来水流量 2 个因素进行试验处理。海涂围垦区降雨强度变异大,且多以暴雨为主,最大雨强可达 100 mm/h 以上。为模拟较大变化范围雨强引起径流冲刷下海涂盐土边坡径流剥蚀过程,试验选取 6 个上方来水流量:160 L/h、200 L/h、300 L/h、400 L/h、600 L/h 和 800 L/h。海涂围垦区灌排工程边坡坡度多变化在 5°~40°之间,且研究区新开挖排水河沟年淤积深度达 1 m 左右<sup>[5]</sup>,河沟清淤和边坡侵蚀冲刷的综合作用导致河沟边坡坡度年际间变化显著,因此试验选取 5°、10°、15°、20°、30°和 40° 6 个坡度来分析较大坡度变化范围内盐土坡面的径流剥蚀过程。试验开始前都要进行放水调试,通过微调以保证水槽左右两边高度一致,得到理想的均匀水流。试验开始后,每隔 20 s 收集 1 次径流泥沙量,并通过烘干法测定径流泥沙含量;采用染色法测定坡面径流流速,每隔 40 s 滴 10 mL 高锰酸钾,并利用相机录像以记录径流状况并测量坡面径流优势流速。根据课题组前期研究结果,坡面径流流态为层流,因此将坡面径流优势流速乘以 0.67 作为坡面径流流速<sup>R<sup>[11-12]</sup></sup>。试验设计初,通过预试验确定径流冲刷历时,预试验结果表明,由于盐土结构差,抗冲刷能力极弱,随着土壤分离过程的进行,土样下切深度会急剧增大,土样下切对水流形态的影响逐渐加剧。为了减小土样下切对土壤分离速率的影响<sup>[13]</sup>,每个试验处理历时控制为 360 s。试验重复 3 次。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel、KMPlayer 和 Image-ProPlus 6.0 软件进行分析。土壤剥蚀率采用烘干称重法进行测定:待塑料瓶中泥沙完全沉淀后,倒掉表层清液,泥沙冲洗干净倒进烘盒,烘盒置于烘箱(105℃)直至烘干;通过精度为 0.01 g 的电子天平称重计算出径流量和产沙量。径流剥蚀率是单位时间(h)、单位面积(m<sup>2</sup>)上土壤在径流作用下被剥蚀掉的颗粒质量(kg),根据之前计算得到的产沙量,除以土槽面积和时间即为径流剥蚀速率  $D_r$ (kg/(m<sup>2</sup>·h))。

径流流速计算通过 KMPlayer 软件每隔 100 ms 对冲刷录像截图,然后对染色图片用 Image-ProPlus 6.0 软件测特定时段内的径流长度(测量精度为 0.01 cm),以此计算特定时刻的平均径流流速。在边坡某一断面处,径流在  $t$  时刻的总能耗计算公式如下<sup>[1]</sup>:

$$\sum E_c = \int_0^t \int_0^l \left[ \rho q g l \sin \theta + \frac{1}{2} \rho q v_1^2 - \rho q g (l - l_x) \sin \theta - \frac{1}{2} \rho q v_x^2 \right] dx dt$$

(1)

式中: $t$ ——试验时间,min; $\sum E_c$ ——坡面径流在  $t$  时刻的总能耗,J; $\rho$ ——水的密度,g/cm<sup>3</sup>; $q$ ——上方来水流量,L/h; $g$ ——重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $l$ ——边坡坡长,m; $\theta$ ——边坡坡度,°; $v_1$ ——坡面顶端的径流流速,m/s; $q'$ ——任意断面处的径流流量,L/h; $l_x$ ——边坡某一断面到坡顶的距离,m; $v_x$ ——某一断面处的径流流速,m/s。

本研究中, $l$  取 0.3 m,土槽出口处设  $l_x=l$ ,通过计算得到的  $t$  时刻土槽顶端平均径流流速  $v_1$ 、土槽出口处径流量  $q'$  和平均径流流速  $v_x$ ,可以计算土槽出口处  $t$  时刻的总能耗,总径流能耗除以径流宽度和试验历时  $t$  即为单宽径流能耗  $e_w$ (J/(h·m))。本文中的径流剥蚀速率  $D_r$  和单宽径流能耗  $e_w$  均为土槽出口处的计算值。

将 3 次重复试验测定的剥蚀速率和径流速率作平均处理,得出不同坡度和上方来水流量条件下海涂盐土边坡径流剥蚀速率和径流速率;将整个试验 108 个数据点的径流剥蚀速率和单宽径流能耗等通过 SPSS 进行偏相关分析得出其与坡度和上方来水流量的偏相关系数,通过非线性拟合( $P<0.01$  水平)得出坡度、上方来水流量和径流剥蚀速率和单宽径流能耗的函数关系。

2 结果与分析

2.1 坡度和上方来水流量对海涂盐土边坡径流剥蚀速率的影响

图 2 表示海涂盐土边坡土壤剥蚀过程中坡面形态变化状况(仅展示 300 L/h 上方来水流量下 3 个不同坡度坡面形态随冲刷历时的变化状况)。定性分析结果表明:在低坡度条件下,随着冲刷历时进行,盐土坡面剥蚀细沟形态不明显;在高坡度条件下,随着冲刷历时的增加,盐土坡面由于受径流剪切力作用逐渐产生较明显的细沟,而细沟的发育加剧了水流的集中,进而引起更多泥沙被剥蚀。从图 2 也可以看出,随着坡度增大,细沟产生的时间越早,细沟密度、深度等越明显。

径流剥蚀速率随坡度和上方来水流量的增大均显著增大( $P<0.01$ )(图 3)。 $\theta=5^\circ$ 时, $q=800$  L/h 处理下

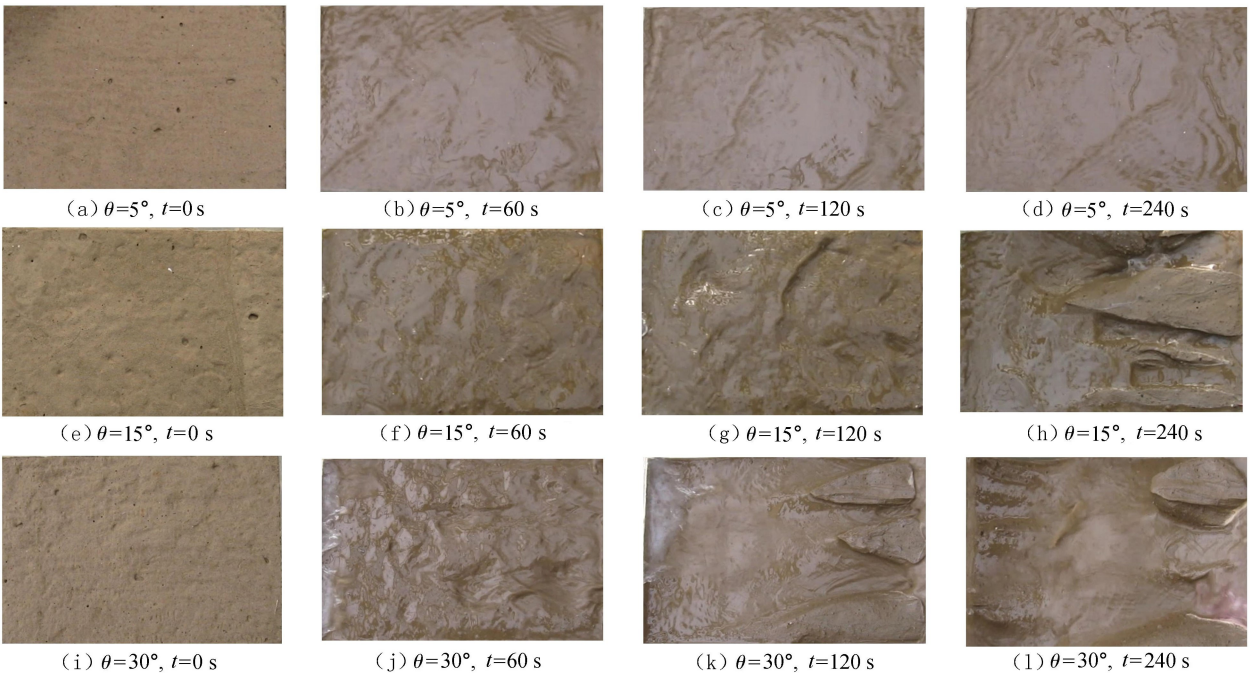


图 2 海涂盐土边坡剥蚀过程中的坡面形态变化状况 ( $q=300\text{ L/h}$ )

Fig. 2 Variation of the slope morphology of saline-alkali soil during the detachment processes ( $q=300\text{ L/h}$ )

的径流剥蚀速率是  $q=160\text{ L/h}$  时的 50.4 倍;随着坡度增大,不同上方来水流量之间的相对差异变小, $\theta=40^\circ$  时, $q=800\text{ L/h}$  处理下的径流剥蚀速率仅是  $q=160\text{ L/h}$  时的 1.8 倍。随着流量增大,不同坡度之间的相对差异变小。 $q=160\text{ L/h}$  时, $40^\circ$  边坡的径流剥蚀速率是  $5^\circ$  边坡的 326.7 倍; $q=800\text{ L/h}$  时, $40^\circ$  边坡的径流剥蚀速率仅是  $5^\circ$  边坡的 11.7 倍。结果表明,上方来水流量和坡度对径流剥蚀速率均有正效应且互相制约。

上方来水流量和坡度对径流剥蚀速率的影响呈下述曲线形式: $D_r=f(\theta)f(q)$ ,其中  $f(\theta)$  是坡度对剥蚀速率的影响函数,而  $f(q)$  是上方来水流量对剥蚀速率的影响函数(图 3)。进一步拟合分析结果表明, $D_r$  与  $q$  和  $\theta$  存在函数关系: $D_r=45.6q^{0.53}\tan\theta^{0.89}$ 。该结果与前人研究成果保持一致,剥蚀速率与坡度和径流量存在显著的幂指数函数关系<sup>[14-15]</sup>。进一步偏相关分析表明: $\theta$  与  $D_r$  的偏相关系数是 0.94 ( $P<0.01$ ),而  $q$  与  $D_r$  的偏相关系数是 0.83 ( $P<0.01$ ),表明相比于上方来水流量,坡度对剥蚀速率的直接影响较大。其次, $D_r$  与  $R$  和  $\theta$  也存在函数关系: $D_r=51.9R^{0.53}\tan\theta^{0.91}$ ,该结果与模拟降雨条件下围垦区盐土边坡剥蚀率研究结论一致<sup>[7,16]</sup>。

2.2 坡度和上方来水流量对海涂盐土边坡单宽径流能耗的影响

坡面单宽径流能耗随坡度和上方来水流量的增大均显著增大( $P<0.01$ )(图 4)。 $\theta=5^\circ$  时, $q=800\text{ L/h}$  处理下的单宽径流能耗是  $q=160\text{ L/h}$  时的 3.96 倍; $\theta$  增大到  $40^\circ$  时, $q=800\text{ L/h}$  处理下的单宽径流能耗是  $q=160\text{ L/h}$  时的 4.69 倍。随着流量的增大,不同坡度处理之间的相对差异也越大。 $q=160\text{ L/h}$  时, $40^\circ$  边坡的单宽径流能耗是  $5^\circ$  边坡的 5.95 倍; $q=800\text{ L/h}$

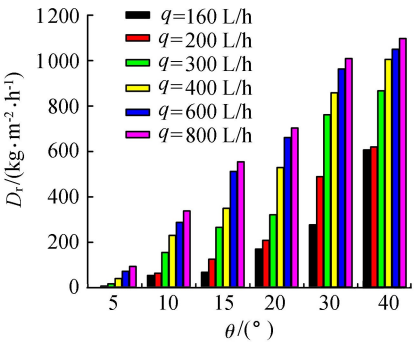


图 3 上方来水流量和坡度对径流剥蚀速率的影响

Fig. 3 Effects of slope gradient and upstream inflow rate on the soil detachment rate

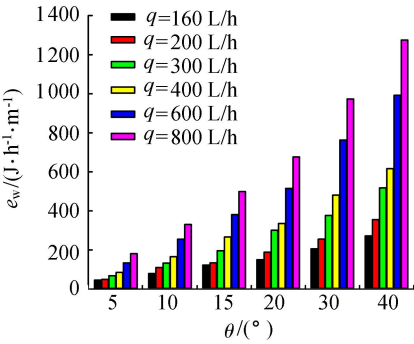


图 4 上方来水流量和坡度对单宽径流能耗的影响

Fig. 4 Effects of slope gradient and upstream inflow rate on the runoff energy consumption of unit width

时,40°边坡单宽径流能耗是5°边坡的7.05倍。结果表明,上方来水流量和坡度对单宽径流能耗均有正效应且相互促进。

上方来水流量和坡度对单宽径流能耗的影响呈现曲线形式: $e_w=f(\theta)f(q)$ ,其中 $f(\theta)$ 是坡度对单宽径流能耗的影响函数,而 $f(q)$ 是上方来水流量对单宽径流能耗的影响函数(图4)。进一步拟合分析结果表明, $e_w$ 与 $q$ 和 $\theta$ 存在函数关系: $e_w=2.4q^{0.95}\tan\theta^{0.83}$ 。类似的, $e_w$ 与 $R$ 和 $\theta$ 存在下述函数关系: $e_w=6.0R^{0.92}\tan\theta^{0.88}$ 。 $\theta$ 与 $e_w$ 的偏相关系数是0.878( $P<0.01$ ),而 $q$ 与 $e_w$ 的偏相关系数是0.861( $P<0.01$ )。该结果表明,相比于上方来水流量,坡度对单宽径流能耗的直接影响较大。过去的研究表明坡度对黄土的单宽径流能耗影响存在临界值21°~24°<sup>[16]</sup>,然而,本研究中坡度对海涂盐碱土坡面单宽径流能耗的影响不存在临界值。原因在于,相比于黄壤土,海涂盐土土壤黏粒含量低(质量分数仅为8.5%),土壤团聚体结构差,抗冲刷侵蚀能力差,径流剥蚀速度随着坡度的增加而增大,径流中的泥沙含量增多,挟沙运移过程消耗的能量也可能随之增加。

2.3 海涂盐土边坡单宽径流能耗与剥蚀速率的关系

在坡面冲刷时,土壤本身具有一定的抗侵蚀能力,只有当单宽径流能耗超过临界径流能耗时才会发生剥蚀。因此 $D_r$ 与 $e_w$ 的关系式可以设定为: $D_r=K(e_w-e_c)$ (式中 $K$ 为土壤可蚀性参数, $e_c$ 为临界单宽径流能耗)。对不同坡度条件下 $D_r$ 与的 $e_w$ 数据进行分析结果表明(表1),不同坡度条件下径流 $D_r$ 和 $e_w$ 之间均存在显著线性关系。在低坡度(5°~15°)条件下, $e_c$ 为15~40 J/(h·m),而在高坡度(20°~40°)条件下, $e_c$ 接近零。该结论与李鹏等<sup>[17]</sup>在黄土坡面上模拟冲刷试验得出的结论不同,黄土坡面 $e_c$ 达300~36120 J/(h·m)。海滩围垦区盐土坡面的土壤可蚀性参数系数平均值为1.18<sup>[7]</sup>,而黄土坡面上拟合出的土壤可蚀性参数系数为0.0023<sup>[18]</sup>,盐碱粉壤土与黄壤土可蚀性相差近500倍,表明海涂盐土团聚体结构差,黏粒含量低,抗蚀能力远远小于黄土<sup>[7-8]</sup>,因而 $e_c$ 极小。该结论与海涂围垦区盐土边坡的实际情况较相符。对剥蚀速率与单宽径流能耗的所有数据进行分析结果表明,二者之间存在明显的线性关系( $R^2=0.82$ ): $D_r=1.18(e_w-0)$ 。海涂盐土边坡临界单宽径流能耗平均值为0,对于海涂盐土边坡只需微小的径流能耗就可以剥蚀土壤表层泥沙,该结果类似于RHEM模型的基本假设<sup>[19]</sup>,可为基于物理过程的盐土侵蚀模型研究提供理论支撑,在盐土侵蚀模型中假设临界单宽径流能耗为零,可为减少模型参数率定工作量提供依据<sup>[20]</sup>,课题组构建的基于物理过程的降雨-径流-侵蚀模型SSEM已采用该假设,初步取得较好的预测效果<sup>[21]</sup>。

表1 单宽径流能耗  $e_w$  与剥蚀速率的拟合分析结果

Table 1 Statistical regression results of the relationship between runoff energy consumption of unit width  $e_w$  and detachment rate

| $\theta/(^{\circ})$ | 拟合公式                  | $R^2$ | $K$  | $e_c/(\text{J}\cdot(\text{h}\cdot\text{m})^{-1})$ |
|---------------------|-----------------------|-------|------|---------------------------------------------------|
| 5                   | $D_r=0.69(e_w-38.24)$ | 0.98  | 0.69 | 38.24                                             |
| 10                  | $D_r=1.16(e_w-17.07)$ | 0.90  | 1.16 | 17.07                                             |
| 15                  | $D_r=1.29(e_w-24.56)$ | 0.93  | 1.29 | 24.56                                             |
| 20                  | $D_r=1.17(e_w-0)$     | 0.89  | 1.17 | 0                                                 |
| 30                  | $D_r=1.29(e_w-0)$     | 0.47  | 1.29 | 0                                                 |
| 40                  | $D_r=1.31(e_w-0)$     | 0.45  | 1.31 | 0                                                 |
| 总体数据                | $D_r=1.18(e_w-0)$     | 0.82  | 1.18 | 0                                                 |

3 结 论

- a. 上方来水流量和坡度对径流剥蚀速率均有正效应且互相制约( $P<0.01$ )。剥蚀速率 $D_r$ 与上方来水流量 $q$ 、坡度 $\theta$ 存在幂指数函数关系: $D_r=45.6q^{0.53}\tan\theta^{0.89}$ 。
- b. 上方来水流量和坡度对单宽径流能耗均有正效应且相互促进。单宽径流能耗与上方来水流量 $q$ 、坡度 $\theta$ 存在函数关系: $e_w=2.4q^{0.95}\tan\theta^{0.83}$ 。相比于上方来水流量,坡度对单宽径流能耗的直接影响较大。
- c. 径流剥蚀速率和单宽径流能耗之间存在显著线性关系。坡度5°~15°条件下,临界单宽径流能耗为15~40 J/(h·m),而在高坡度(20°~40°)条件下,临界单宽径流能耗接近零。剥蚀速率与单宽径流能耗之间存在显著线性关系: $D_r=1.18(e_w-0)$ 。海涂盐土边坡临界单宽径流能耗平均值为零,表明只需微小径流能耗即可引起表层土壤剥蚀。

参考文献:

[1] 申震洲,姚文艺,李勉,等. 黄土坡面径流能耗与土壤剥蚀率影响因子[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(6): 9-13. (SHEN Zhenzhou, YAO Wenyi, LI Mian, et al. Influence factors of runoff energy consumption and denudation amount on loess slope[J]. Science of Soil & Water Conservation, 2009, 7(6): 9-13. (in Chinese))

- [ 2 ] HAYSINE P B, OSE C W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 2. rill flow[J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(1): 245-250.
- [ 3 ] HOTON E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1941, 5(C): 399-417.
- [ 4 ] 李占斌, 鲁克新, 丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 5-8. (LI Zhanbin, LU Kexin, DING Wenfeng. Experimental study on dynamic processes of soil erosion on Loess slope[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2002, 16(2): 5-8. (in Chinese))
- [ 5 ] SHE Dongli, FEI Yuanhang, LIU Zhipeng, 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 ] SHE Dongli, LIU Dongdong, MENG Jiajia, et al. Hydrological responses on saline-sodic soil slopes in a coastal reclamation area of China[J]. *Catena*, 2016, 144: 130-140.
- [ 7 ] LIU Dongdong, SHE Dongli, YU Shuangen, et al. rainfall intensity and slope gradient effects on sediment losses and splash from a saline-sodic soil under coastal reclamation[J]. *Catena*, 2015, 128: 54-62.
- [ 8 ] 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. (SHE Dongli, LIU Dongdong, PENG Shizhang, et al. Hydrodynamic characters of runoff in soil erosion processes on drainage-irrigation engineering slope of farmland in coastal region[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2014, 28(1): 1-5. (in Chinese))
- [ 9 ] 张光辉. 冲刷时间对土壤分离速率定量影响的实验模拟[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 1-4. (ZHANG Guanghui. Experimental simulation on effects of scouring time on soil detachment rate[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2002, 16(2): 1-4. (in Chinese))
- [ 10 ] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 坡面冲刷过程中红壤分离速率定量研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(01): 96-100. (WANG Junguang, LI Zhaoxia, CAI Chongfa, et al. Research of red soil aggregate abrasion degree of different layers in overland flow[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(1): 96-100. (in Chinese))
- [ 11 ] LUK S H, MEZ W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow[J]. *Soil Technology*, 1992, 5(4): 289-301.
- [ 12 ] 陈丽燕, 雷廷武, 啜瑞媛. 坡面薄层水流优势流速研究[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(5): 130-137. (CHEN Liyan, LEI Tingwu, CHUO Ruiyuan. Studies on peak velocity of shallow water flow on slopes[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(5): 130-137. (in Chinese))
- [ 13 ] NEAING M A, BADFOD J M, PAKE S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(2): 351-357.
- [ 14 ] GABIELS D. The effect of slope length on the amount and size distribution of eroded silt loam soils: shot slope laboratory experiments on interrill erosion[J]. *Geomorphology*, 1999, 28(1): 169-172.
- [ 15 ] FOX D M, BYAN B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient[J]. *Catena*, 2000, 38(3): 211-222.
- [ 16 ] 郑加兴, 余冬立, 徐翠兰, 等. 不同雨强和坡度条件海涂盐土边坡侵蚀细沟发育过程[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(4): 313-318. (ZHENG Jiaxing, SHE Dongli, XU Culan, et al. Evolution process of erosion rill on saline soil slope in coastal reclamation with different rainfall intensities and slope gradients[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2015, 43(4): 313-318. (in Chinese))
- [ 17 ] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(4): 444-449. (LI Peng, LI Zhanbin, ZHENG Liangyong. Hydrodynamics process of soil erosion and sediment yield by runoff on loess slope[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(4): 444-449. (in Chinese))
- [ 18 ] 丁文峰, 李占斌, 崔灵周. 黄土坡面径流冲刷侵蚀试验研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(2): 99-101. (DING Wenfeng, LI Zhanbin, CUI Lingzhou. Study on runoff scouring erosion on Loess slope surface[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2001, 15(2): 99-101. (in Chinese))
- [ 19 ] AL H O Z, PIESON F B, NEAING M A, et al. Concentrated flow erodibility for physically based erosion models: temporal variability in disturbed and undisturbed rangelands[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(7): 342-343.
- [ 20 ] NEAING M A, LANE L J, ALBETS E E, et al. Prediction technology for soil erosion by water: status and Research needs[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(6): 1702-1711.
- [ 21 ] LIU Dongdong, SHE Dongli, SSEM: a model for simulating runoff and erosion of saline-sodic soil slopes under coastal reclamation[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 561: 960-975.