

江苏省沿海平原沙土区典型河沟边坡土壤侵蚀试验研究

曲丽莉^{1,3}, 郭红丽², 李盟², 吴芳², 梁音¹,
朱绪超¹, 田芷源¹, 代梦梦^{1,3}, 袁久芹⁴

(1.土壤与农业可持续发展国家重点实验室,中国科学院南京土壤研究所,南京 210008;2.江苏省水文水资源勘测局,南京 210005;3.中国科学院大学,北京 100049;4.盐城市大丰区堤防管理处,江苏 盐城 224100)

摘要:为探明江苏省沿海平原沙土区河沟边坡土壤侵蚀过程并建立预测模型,在 4 个坡度和 2 个雨强条件下,对江苏省沿海平原沙土区典型河沟边坡土壤开展人工模拟溅蚀试验和微区模拟降雨试验,了解河沟边坡土壤溅蚀特征,明确河沟边坡产流产沙过程,并利用传递函数方法分别建立了溅蚀率、产流强度和产沙强度的估算模型。结果表明:(1)河沟边坡土壤溅蚀率随降雨强度及坡度的增大而增加,土壤溅蚀率与降雨强度和坡度之间呈线性关系;(2)河沟边坡的产流过程总体上呈现出先增大后波动稳定的趋势,产流强度随着坡度的增大而减小;产沙过程总体上呈先快速增加后波动减小,最后趋于稳定的趋势,产沙强度随着坡度的增大而增加;产流强度和产沙强度均随雨强的增大而增大;(3)利用传递函数建立的方程预测溅蚀率,产流强度和产沙强度具有较高的精度,方程的调整 R^2 分别可达 0.97, 0.91 和 0.72。研究结果可加深对江苏省平原地区河沟边坡土壤侵蚀规律的认识,并为建立土壤侵蚀预报模型和水土流失治理提供理论依据。

关键词: 溅蚀; 坡面侵蚀; 河沟边坡; 模拟降雨; 传递函数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0042-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.005

Experimental Study on Soil Erosion of Typical Riverbank in Coastal Plain Sandy Area of Jiangsu Province

QU Lili^{1,3}, GUO Hongli², LI Meng², WU Fang², LIANG Yin¹,

ZHU Xuchao¹, TIAN Zhiyuan¹, DAI Mengmeng^{1,3}, YUAN Jiuqin⁴

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; 2.Jiangsu Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Nanjing 210005; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 4.Yancheng Dafeng District Dike Management Office, Yancheng, Jiangsu 224100)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the soil erosion process on the riverbank and establish the prediction models. Under the conditions of four slope gradients and two rainfall intensities, artificial simulated splash erosion test and micro area simulated rainfall test were carried out on typical riverbank in coastal plain sandy soil area of Jiangsu Province, so as to understand the characteristics of soil splash erosion, clarify the production process of runoff and sediment. The estimation models of splash erosion rate, runoff intensity and sediment yield intensity were established using the transfer function method. The results showed that: (1) The soil splash erosion rate on the riverbank increased with the increasing of rainfall intensity and slope gradient. There was a linear relationship between soil splash erosion rate and rainfall intensity and slope gradient. (2) The runoff production process on the riverbank generally showed a trend of increasing first and then fluctuating and stabile, and the runoff production intensity decreased with the increasing of slope gradient. In general, the sediment yield process increased rapidly first and then decreased with fluctuation, and finally tended to be stable. The sediment yield intensity increased with the increasing of slope gradient. The intensity of runoff and sediment both increased with the increasing of rainfall intensity. (3) The equation established by transfer function had high accuracy in predicting splash erosion rate, runoff intensity and sediment yield intensity, and the adjustment R^2 of the equation could reach 0.97, 0.91 and 0.72, respectively. The results could deepen

收稿日期: 2021-09-21

资助项目: 江苏省水利科技项目(2019039); 江苏省水文局科技服务项目(JSSW201911005)

第一作者: 曲丽莉(1997—), 女, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: qulili@issas.ac.cn

通信作者: 梁音(1963—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持生态恢复研究。E-mail: yliang@issas.ac.cn

the understanding of the law of soil erosion on riverbank in plain area of Jiangsu Province, and provide a theoretical basis for establishing soil erosion prediction model and soil erosion control.

Keywords: splash erosion; slope erosion; river ditch slope; simulated rainfall; transfer function

降雨造成的侵蚀产沙是水土流失、土地退化及面源污染等全球性环境问题的重要原因之一。雨滴击打土壤表面造成的土壤溅蚀是坡面水蚀过程的开端,溅蚀导致土体分散^[1-2],土壤颗粒被薄层水流运移,在运动的过程中冲击坡面产生片蚀。雨水冲刷引起的产流与产沙过程一直是国内外专家学者研究坡面土壤侵蚀的主要内容^[3],目前,对于坡面产流产沙的影响因素方面已有大量研究。其中,降雨特征、地形特征及土壤特征等被认为是影响坡面侵蚀的主要因素^[4-6]。降雨强度是侵蚀动力的主要来源^[7],雨滴通过对土壤颗粒的击溅、搬运等作用对侵蚀产生重要影响。Yan 等^[8]研究表明,降雨强度是影响产流量和产沙量最重要的因素,并且表明雨强 $>0.8\text{ mm/min}$ 时才能造成地表土壤侵蚀;Wu 等^[9]认为,降雨强度越大,产流量和产沙量呈幂函数增长趋势。坡度作为水土流失方程中的重要因子^[10],是地表其他形态存在的前提和条件,它通过制约降雨径流侵蚀力的大小和土壤物质的稳定性引起径流、侵蚀泥沙的变化^[11]。Defersha 等^[12]认为,在一定范围内坡面产沙量随着坡度的增大而增加;郑子成等^[13]认为,随坡度增大,地表产流量呈先减小后增大的变化趋势。土壤理化性质是影响土壤侵蚀和土壤抗蚀性能的重要内在因素,土壤容重、含水量、有机质及团聚体含量等都对土壤侵蚀影响显著^[14]。

坡度和雨强是影响坡面土壤侵蚀的重要外在因素,关于坡度和雨强对坡面侵蚀过程影响因素的研究主要集中在南方红壤区^[15]、黄土高原区^[16]和东北黑土区^[17]等大尺度坡耕地,而缺乏对于平原沙土区河沟边坡小尺度的产沙产流研究。江苏省水土流失主要分布在丘陵山区和平原沙土区,全省轻度以上水土流失面积 $6\,279\text{ km}^2$,其中平原沙土区水土流失面积占全省水土流失面积的 36% ^[18],是省水土保持重点治理区。江苏平原沙土区地形平坦,理论上不具备水土流失的地形条件,因此,在水土流失监测和计算中常被忽略。由于区域内降雨量多、雨强大、土壤结构疏松、抗侵蚀能力弱等原因,河沟边坡土壤侵蚀严重。江苏省地处江淮沂沭泗五大河流下游,境内河网密布,水系发达,水域面积占比高达 16.9% ,有乡级、县级及流域级河道共 $22\,700$ 余条,河沟边坡产生的水土流失不容忽视。河沟边坡的坡面通常不长,但坡度较大,加上沙土本身特殊的物理、化学性质,降雨时,表土颗粒很快被分离、溅散,片蚀和沟蚀活跃,引起河坡毁坏、坍塌,最终导致河道淤塞,影响沿岸引排水、

航运与防洪安全,威胁人们的生产生活。

相比于其他水土流失类型区,关于江苏省平原沙土区水土流失的研究主要集中于水土流失现状、形成原因、危害和治理措施等方面,缺乏对河沟边坡产流产沙过程及影响因素的研究,限制了对河沟边坡水土流失过程的认识和对河沟边坡水土流失的有效治理。因此,本文采用人工模拟降雨试验方法,以江苏平原沙土区河沟边坡土壤为对象,研究不同雨强和坡度条件下坡面土壤侵蚀的过程和特征,并分析其主要影响因素,以加深对平原地区河沟边坡土壤侵蚀规律的认识,为平原沙土区河沟边坡水土流失治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

江苏省平原沙土区主要被分为 3 大区:黄河故道沙土区、沿海平原沙土区和通南高沙土区(图 1)。沿海平原沙土区系滨海淤涨而成,面积较大,盐城市是沿海平原沙土区中面积最大的市,大丰区位于沿海平原沙土区的中心位置,在该沙土区具有典型的代表性。大丰区位于江苏省东部($32^{\circ}56'—33^{\circ}36'N$, $120^{\circ}13'—120^{\circ}56'E$),属亚热带与暖温带的过渡地带,雨量充沛,气候温和。全区年平均气温 $14.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $1\,042\text{ mm}$,雨日 71 天,无霜期 213 天,日照时间 $2\,238.9\text{ h}$ 。大丰区地形平坦,地质为湖相、河相、海相三者交替的沉积物,土壤类型主要为粉砂土。境内河网密布,沟渠纵横,现有大中小河 4.5 万条,总长 2.4 万 km ,为苏北平原水网地区的典型代表^[19]。

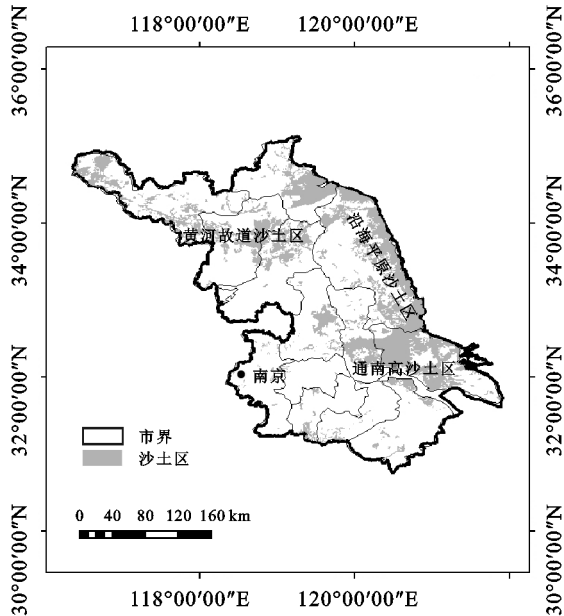


图 1 沙土区位置

1.2 试验土壤

本研究中用到的土壤样品包括两部分:基本理化性质分析土样和人工模拟降雨土样,均采自江苏省盐城市大丰区 1 个典型河沟边坡。基本理化性质分析土样包括原状土样和散土土样,在选择的边坡利用 100 cm^3 环刀在坡上和坡下部位采集 4 个原状土样,烘干法测定土壤容重;利用土钻在坡上和坡下部位采集 0—20 cm 表土,按照四分法制成散土土样,实验室处理后,利用激光粒度仪测定颗粒组成、重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量。供试土壤容重为 1.28 g/cm^3 ,砂粒、粉粒、黏粒的含量分别为 64.76%, 24.01%, 11.24%, 有机质含量为 8.59 g/kg。人工模拟降雨土样取自上述相同地方,利用挖掘机挖取河沟边坡表层 0—50 cm 土壤 2 t,运输至江西省鹰潭红壤生态实验站开展模拟降雨试验。人工模拟降雨试验包括 2 个部分:一是模拟溅蚀试验,试验土壤不做过筛处理,分散较大的土块,剔除石子及草根,填入 400 cm^3 (直径 10 cm, 高 5 cm) 环刀,控制土壤容重为 1.35 g/cm^3 ,为保证土样初始含水量相同,将环刀浸泡 12 h 达到饱和,取出晾晒 6 h 后开始试验;二是微区模拟降雨试验,将土样分层填入径流槽,边填土边洒水压实,以减小边际效应,充分压实土槽边缘土壤后开始试验。

1.3 试验设计与方法

试验于 2020 年 9 月在江西省中国科学院鹰潭红壤生态实验站进行。使用便携式人工模拟降雨机进行模拟降雨,降雨装置主要包括喷头、支架、水泵、水压表等设备。降雨喷头采用美国 Spraying system 公司的 Fulljet 系列实心锥形喷头,型号为 Fulljet1/

2HH-30WSQ 和 Fulljet 1/2HH-50WSQ。当喷头高度达到 3 m、水压为 60 kPa 时,这 2 个喷头可分别产生 1.5、2.5 mm/min 的降雨,雨滴降落速度和动能大小与自然降雨接近,在喷头正下方 2 m^2 范围内降雨均匀系数 $>85\%$ 。

人工模拟溅蚀试验采用改进的 Morgan 溅蚀盘,直径为 51 cm,盘深 5 cm,其中装土盘位于正中心,直径为 11 cm,收集盘位于装土盘外侧(图 2a)。根据研究区气象局近 30 年的降雨资料,将雨强设定为 1.5、2.5 mm/min,采用手动调节坡度,将坡度设置为 0°, 10°, 20° 和 30°。通过雨强和坡度 2 个变量的组合设置,每个条件 3 次重复,4 个溅蚀盘同时试验,共进行降雨试验 6 场,每场降雨持续 10 min,降雨结束后收集溅蚀盘收集盘内的水沙样品,静置 24 h 后倒去上清液,放入烘箱内 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干后测定溅蚀量。

微区模拟降雨试验采用自行设计的液压式变坡径流槽(图 2b)。径流槽前部设计有三角形出水口,用于收集坡面径流含沙水样,径流槽底部设计有液压泵,用于调节坡度。将坡度设定为 10°, 20°, 30° 和 40°,雨强设定为 1.5、2.5 mm/min。通过坡度和雨强 2 个变量的组合设置,每个条件 2 次重复,共进行降雨试验 16 场。试验开始前,用遮雨布盖住径流槽率定雨强,达到设计雨强时移走遮雨布并开始计时,记录初始产流时间。开始产流后每 2 min 取 1 次泥沙样品,持续降雨 30 min,每场降雨共采集水沙样品 15 个。将水沙样品带入实验室测定每个样品的质量,静置 24 h 后倒去上清液,放入烘箱内 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干后测定产沙量。

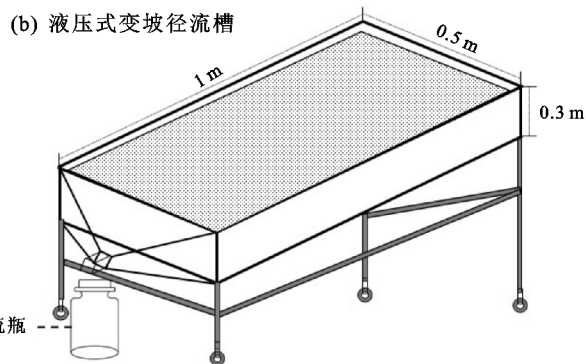
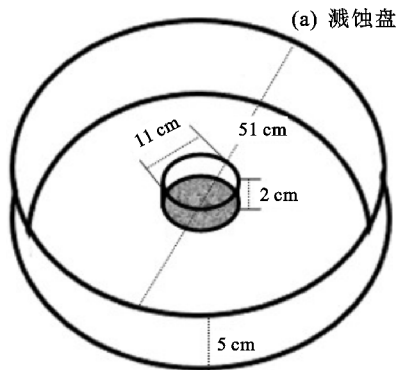


图 2 溅蚀盘和液压式变坡径流槽示意

1.4 传递函数

传递函数是将具有线性特征对象的关系通过某种算法(如回归分析、最优规划法、神经网络、分类回归树、分形机理等)表达的一种有效方法。多元线性回归在土壤科学、生态学和农业等领域被广泛用于建立变量的传递函数^[20]。因此,本研究将坡度和雨强等变量以及其常见转换(指数、对数、倒数和平方转换

等)作为自变量进行逐步回归分析,建立溅蚀率、产流强度和产沙强度的传递函数为:

$$Y = a_0 + (a_1 X_1 + a_2 X_2) + (a_3 \log X_1 + a_4 \log X_2) + (a_5 X_1^{-1} + a_6 X_2^{-1}) + (a_7 X_1^{0.5} + a_8 X_2^{0.5}) + (a_9 X_1^2 + a_{10} X_2^2) + a_{11} X_1 X_2 \quad (1)$$

式中:Y 为因变量(本研究中为溅蚀率、产流强度和产沙强度); A_0 为截距; $a_1 \sim a_{10}$ 为回归系数; X_1 、 X_2 为自

变量(本研究中为坡度和雨强)。

使用调整 R^2 和均方根误差 (RMSE) 来评价模型的优劣为:

$$R^2_{\text{adj}}=1-(1-R^2)(\frac{N-1}{N-M-1})$$

(2)

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N(X_{i,\text{mea}}-X_{i,\text{est}})^2}{N}}$$

(3)

式中: N 为样本数量; M 为自变量的数量; R^2 为决定系数; $X_{i,\text{mea}}$ 和 $X_{i,\text{est}}$ 分别为 i 处的测量值和预测值。 R^2_{adj} 值越大, RMSE 值越小, 表示模拟效果越好。

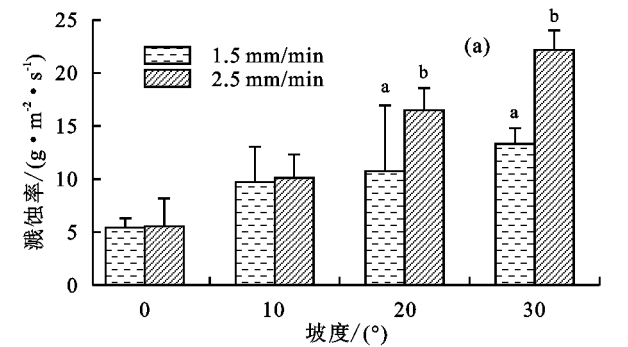
1.5 统计分析

使用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据的初步整理、分析; 使用 SPSS 19.0 软件进行变量的描述性统计分析、差异显著性分析; 利用 Origin 2017 软件作图。

2 结果与分析

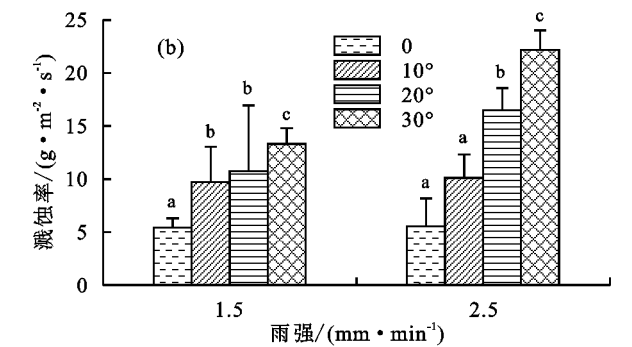
2.1 土壤溅蚀特征与模拟

溅蚀率是普遍用来描述土壤击溅侵蚀的特征指标^[21]。图 3a 为 2 种雨强 (1.5, 2.5 mm/min) 下河沟边坡土壤在不同坡度 (0, 10°, 20° 和 30°) 条件下的土壤溅蚀率。在降雨强度为 1.5 mm/min 时, 坡度为 10°, 20° 和 30° 的溅蚀率分别比坡度为 0 的高 79.34%, 98.52% 和 145.57%; 在降雨强度为 2.5 mm/min 时, 坡度为 10°, 20° 和 30° 的溅蚀率分别比坡度为 0 的高 82.97%, 198.55% 和 301.45%。



在坡度为 20° 和 30° 时, 2 种雨强条件下的溅蚀率存在显著差异 ($P < 0.05$)。刘和平等^[22] 认为, 溅蚀率随着坡度的增长呈先增加后减小的趋势, 临界坡度为 35°, 本试验设置最大坡度为 30°, 在转折点之前趋势与其一致, 说明在降雨强度相同的情况下, 一定范围内溅蚀率随着坡度的增大而增加。这是由于雨滴在击打地表时, 降雨动能转化为垂直于坡面的打击力和平行于坡面的剪切力^[2,23], 随着坡度的增加, 作用于土壤表面的雨滴侧向剪切分力增加, 致使土壤抗溅蚀分散能力减弱, 同时在重力作用下土壤颗粒之间的黏结力减弱, 坡面稳定性降低^[24], 使土壤颗粒更容易发生位移, 导致溅蚀搬运量增大。从增长幅度来看, 在大雨强条件下, 溅蚀率随坡度增长的速度更大, 说明坡度在大雨强条件下对溅蚀率的影响更明显。

图 3b 展示了 4 种坡度 (0, 10°, 20° 和 30°) 条件下河沟边坡土壤在 2 种雨强 (1.5, 2.5 mm/min) 下的土壤溅蚀率。降雨强度从 1.5 mm/min 增加到 2.5 mm/min 时, 坡度为 0, 10°, 20° 和 30° 的溅蚀率分别增加 1.84%, 3.91%, 53.25% 和 66.49%。这是由于随着降雨强度的增大, 雨滴动能变大, 雨滴对于土壤颗粒的打击力变大, 也增大了地表径流, 使土壤颗粒更易被分散和输移。从增长幅度来看, 在较大的坡度条件下, 溅蚀率随雨强的增长速度更快。



注: 图 a 不同字母表示溅蚀率在同一坡度、不同雨强间差异显著 ($P < 0.05$); 图 b 不同字母表示溅蚀率在同一雨强、不同坡度间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 不同坡度和雨强条件下土壤溅蚀特征

以雨强和坡度以及其常用转换形式作为自变量进行逐步回归分析, 建立溅蚀率的传递函数模型 (表 1)。

溅蚀率与坡度的拟合方程调整 R^2 可达到 0.7, 而溅蚀率与雨强的拟合方程调整 R^2 仅为 0.45, 这可能与试验设置的雨强数量较少有关。溅蚀率与坡度和雨强的综合影响拟合方程调整 R^2 可达到 0.97, 显著高于坡度或雨

强独立因子的模拟效果, 这主要是因为该方程包含更多变量的信息, 可以更好地刻画变量与溅蚀率之间的关系。利用 2/3 样本 (16 个) 重新建立溅蚀率与坡度及雨强的模型, 剩余 1/3 样本 (8 个) 用于模型的检验和校正, 自变量为坡度, 雨强、坡度及雨强 3 个函数的均方根误差分别为 6.54, 7.60 和 5.04。

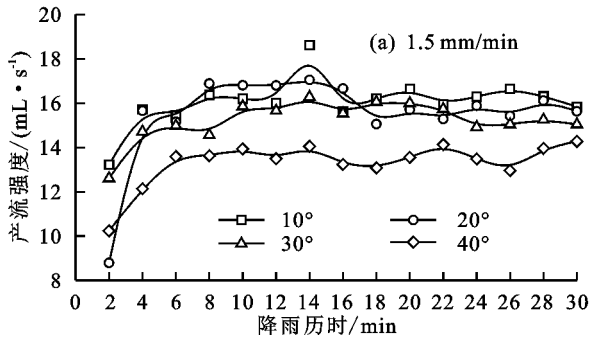
表 1 溅蚀率传递函数拟合

拟合因子	传递函数	R^2_{adj}
坡度	$E_s=5.328+0.417P$	0.70
雨强	$E_s=2.175+6.72R$	0.45
雨强×坡度	$E_s=8.495-2.403\ln R-1.729P^{-1}+0.002P^2-0.36P+0.328PR$	0.97

注: E_s 表示溅蚀率 ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); P 表示坡度 ($^\circ$); R 表示降雨强度 (mm/min)。

2.2 坡面产流特征与模拟

坡面径流是土壤颗粒运移的载体,坡面侵蚀产沙量和径流量关系密切。坡面一旦产生径流,松散的土壤颗粒易随径流输出坡面,造成土壤侵蚀^[25]。由图 4 可知,各曲线总体上表现出先增大后波动稳定的趋势。这是因为在降雨初始阶段,土壤含水量未达到饱和,土壤入渗率较大,从而使得坡面产流强度较低。随着降雨过程的进行,坡面土体吸水饱和后,土壤入渗较少且稳定,使得产流强度在降雨后期保持相对稳定



定^[15]。在 2 种降雨强度下,坡面产流强度总体上均随着坡度的增大而减小,但产流强度的起伏变化幅度随着坡度的增加而增大,这主要是因为坡度的增大使径流的流速增大,径流的紊乱性增大^[26]。从产流强度达到相对稳定所需的时间来看,降雨强度为 1.5 mm/min 的径流在 10~14 min 内达到峰值(图 4a),并趋于稳定;而降雨强度为 2.5 mm/min 的径流在 6~10 min 内即达到峰值并趋于稳定(图 4b),说明降雨强度越小,径流响应的延迟时间越长。

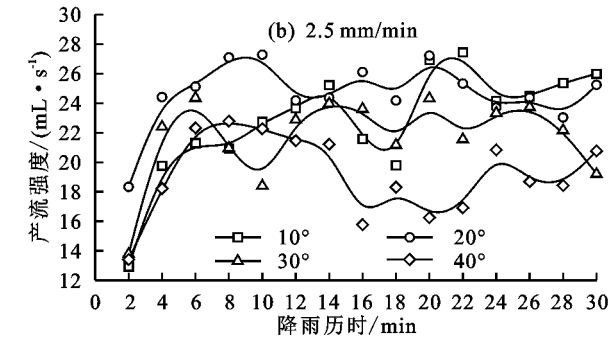


图 4 不同坡度下坡面产流过程

图 5a 为 2 种雨强(1.5,2.5 mm/min)下河沟边坡土壤在不同坡度(10°,20°,30°和 40°)条件下的产流强度。由图 5a 可知,在 2 种降雨强度下,产流强度总体上随着坡度的增长呈下降趋势,这与魏小燕等^[27]的研究结果类似;且在 2 种降雨强度下,坡度为 40°的产流强度显著低于坡度为 10°~20°时的产流强度。这可能是由于不同坡度条件下形成的表土结皮程度不同。土壤结皮是由于雨滴打击或者径流压实作用在土壤表面形成的致密层,坡度越小,雨滴对土壤的垂直击打分力越大,地表大颗粒团聚体在雨滴击溅的作用下被分散的数量更多,细颗粒重新排列组合导致形成结皮的程度越大。土壤结皮的形成导致土壤表面光滑且入渗率降低^[28],因此坡

度较小时,径流受到的阻力小,入渗少,进而导致坡面产流强度增大,产流量增加。

图 5b 为 4 种坡度(10°,20°,30°和 40°)条件下河沟边坡土壤在 2 种雨强(1.5,2.5 mm/min)下的产流强度。当降雨强度从 1.5 mm/min 增加到 2.5 mm/min 时,坡度为 10°,20°,30°和 40°的平均产流强度分别增加 43.75%,58.85%,42.71%和 46.15%,且在所有坡度条件下,2 种雨强间的产流强度均存在显著差异。这主要是因为试验过程中降雨强度大于土壤入渗强度,形成了超渗产流。在大雨强条件下,试验微区在单位时间、单位面积内承接的总降雨量较大,而入渗速率没有明显增大,从而导致径流量增大。

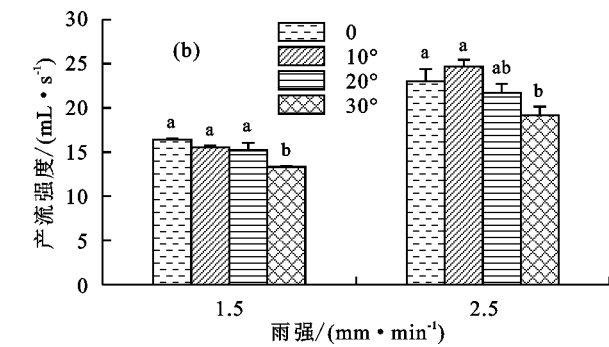
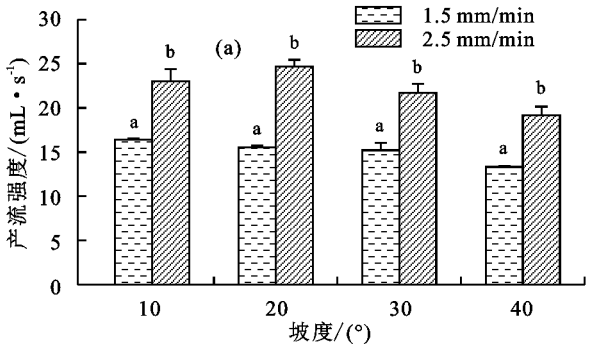


图 5 不同坡度和雨强条件下产流强度特征

建立产流强度的传递函数模型见表 2。产流强度与坡度间的拟合方程调整 R^2 为 0.43,与雨强的拟合方程调整 R^2 为 0.78,与坡度和雨强的综合影响拟合方程调整 R^2 为 0.91,说明传递函数模型可以

较好地揭示坡度与雨强及产流量之间的关系。利用 62.5%样本(10 个)重新建立产流强度与坡度及雨强的模型,37.5%样本(6 个)用于模型的检验和校正。自变量为坡度、雨强和坡度及雨强 3 个函数的均方根

误差分别为 4.75,3.32 和 1.58。

2.3 坡面产沙特征与模拟

图 6 为河沟边坡土壤在 2 种降雨强度下不同坡度间的产沙过程。由图 6 可知,各曲线总体呈现出先快速增加后波动减小,最后趋于稳定的过程。这是由于在降雨初期,土壤入渗量大,径流量小,所以携沙能力也较小。随着降雨的持续,土壤含水量趋于饱和,径流量逐渐增大,其携沙能力也相应变强,所以产沙

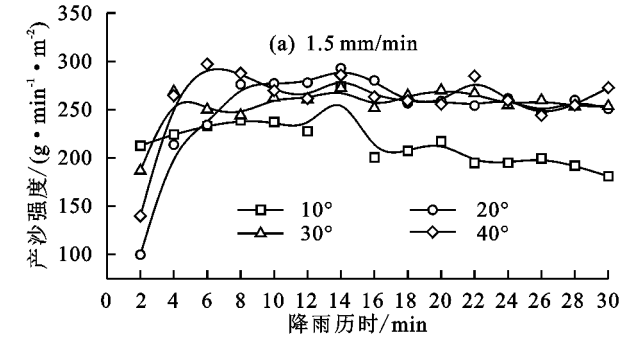
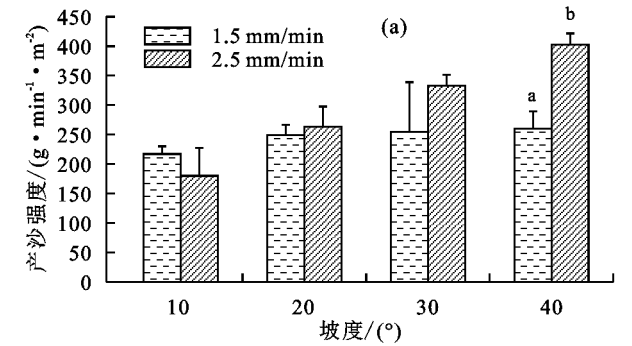


图 6 不同坡度下坡面产沙过程

图 7a 为 2 种雨强(1.5,2.5 mm/min)下河沟边坡土壤在不同坡度(10°,20°,30°和 40°)条件下的产沙强度。在降雨强度为 1.5 mm/min 时,坡度为 20°,30°和 40°的产沙强度比坡度为 10°的产沙强度分别提高 14.74%, 17.30%和 19.75%;在降雨强度为 2.5 mm/min 时,坡度为 20°,30°和 40°的产沙强度比坡度为 10°的产沙强度分别提高 31.87%,66.79%和 101.60%,且坡度为 30°和 40°的产沙强度与 10°和 20°之间存在显著差异($P<0.05$),说明坡面产沙强度随坡度的增大而增加。这是由于随着降雨的持续,坡度较小的坡面更易形成结皮,表土结皮在增加径流量的同时,径流搬运土壤颗粒的能力也大大增强,最终导致产沙量增多。



注:图 a 不同字母表示产沙强度在同一坡度、不同雨强间差异显著($P<0.05$);图 b 不同字母表示产沙强度在同一雨强、不同坡度间差异显著($P<0.05$)。

图 7 不同坡度和雨强条件下产沙强度特征

建立产沙强度的传递函数模型见表 3。产沙强度与坡度间的拟合方程调整 R^2 为 0.58,与雨强的拟合方程调整 R^2 为 0.49,与坡度和雨强两者的综合影响拟合方程调整 R^2 为 0.72,说明基于雨强和坡度建立的传递函数模型可以很好地预测产沙强度。

强度随之增加。

表 2 产流强度传递函数拟合

拟合因子	传递函数	R^2_{adj}
坡度	$F=11.98+57.142P^{-1}-0.005P^2+0.315P$	0.43
雨强	$F=8.74+35.152\log R$	0.78
雨强×坡度	$F=13.664-56.704P^{-1}-0.001P^2-0.227P+7.028R$	0.91

注: F 表示产流强度 (mL/s); P 表示坡度 (°); R 表示降雨强度 (mm/min)。

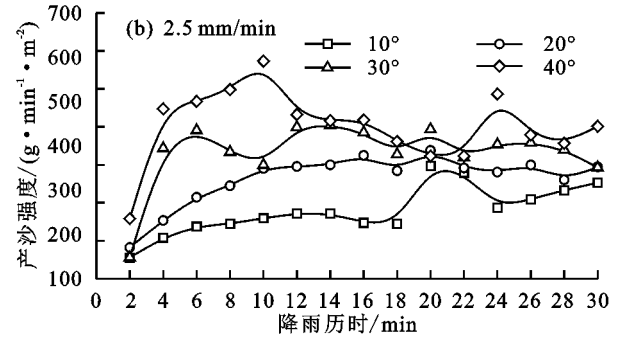
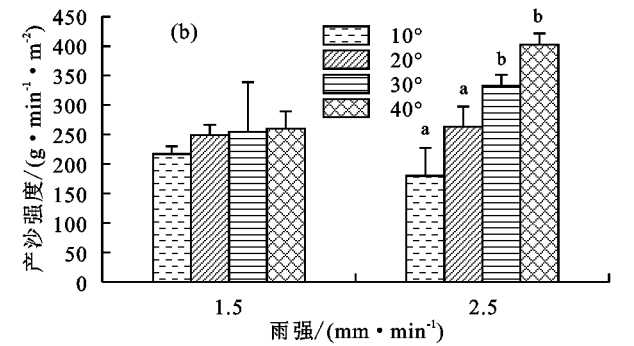


图 7b 为 4 种坡度(10°,20°,30°和 40°)条件下河沟边坡土壤在 2 种雨强(1.5,2.5 mm/min)下的产沙强度。在 2 种降雨强度下,产沙强度总体上随着坡度的增大而增加,当降雨强度从 1.5 mm/min 增加到 2.5 mm/min 时,坡度为 10°,20°,30°和 40°的平均产沙强度分别增加 21.23%,5.32%,31.10%和 55.21%。表明相同坡度条件下,总体上产沙强度随着雨强的增大呈增大的趋势,已有研究^[29-30]的结论相同。一方面是因为雨强的增大导致坡面径流量的增大,增强径流的输沙能力;另一方面是因为雨强越大,降雨动能越高,雨滴对土壤的冲击力越大,最终导致产沙量增大。



注:图 a 不同字母表示产沙强度在同一坡度、不同雨强间差异显著($P<0.05$);图 b 不同字母表示产沙强度在同一雨强、不同坡度间差异显著($P<0.05$)。

图 7 不同坡度和雨强条件下产沙强度特征

坡面产沙量一直是国内外专家学者研究坡面土壤侵蚀的重点关注内容,因此利用 62.5%样本(10 个)重新建立产沙强度与坡度及雨强的模型,37.55%样本(6 个)用于模型的检验和校正。产沙强度的预测值和实测值见图 8。从图 8 可以看出,拟合线和

1:1线相对接近,调整 R^2 为 0.74,精度验证参数优于 坡度或雨强独立因子建立的模型。

表 3 产沙强度传递函数拟合

拟合因子	传递函数	R^2_{adj}	RMSE
坡度	$Y=676.672-2498.791P^{-1}+0.437P^2-24.183P$	0.58	64.59
雨强	$Y=80.568+96.846R$	0.49	95.08
雨强×坡度	$Y=169.905-812.866P^{-1}+0.033P^2-0.728P+49.579R$	0.72	74.66

注: Y 表示产沙强度($g/(min \cdot m^2)$); P 表示坡度($^\circ$); R 表示降雨强度(mm/min)。

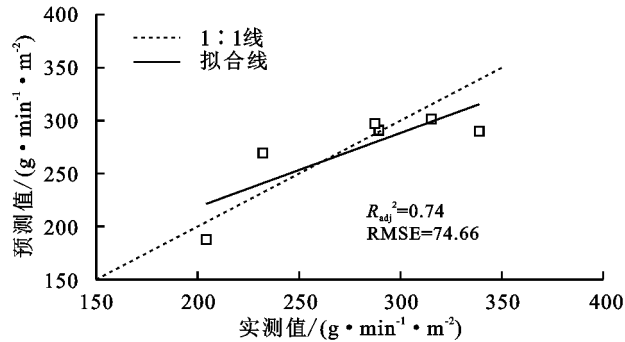


图 8 产沙强度的预测值和实测值

3 结论

(1)河沟边坡土壤溅蚀率在一定的范围内随降雨强度及坡度的增大而增加,土壤溅蚀率与降雨强度和坡度之间呈线性关系。

(2)河沟边坡的产流过程总体上呈现出先增大后波动稳定的趋势,产流强度随着坡度的增大而减小;产沙过程总体上呈先快速增加后波动减小,最后趋于稳定的趋势,产沙强度随着坡度的增大而增加;产流强度和产沙强度均随雨强的增大而增大。

(3)本研究通过多元回归分析获得了以坡度、雨强为输入因子的溅蚀率、产流强度和产沙强度传递函数模型(R^2 为 0.43~0.97),可为江苏省沿海平原沙土区建立土壤侵蚀预报模型和水土流失治理提供参考。

参考文献:

[1] Nives Z, Lisbeth L J, Peter S, et al. Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall[J].Catena,2021,196:e104827.

[2] Zhang X C, Zheng F L, Chen J, et al. Characterizing detachment and transport processes of interrill soil erosion[J].Geoderma,2020,376:e114549.

[3] 谢哲芳,张光辉,刘如心,等.人工模拟降雨供水水质对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):18-23.

[4] Ni S M, Zhang D Q, Cai C F, et al. Exploring rainfall kinetic energy induced erosion behavior and sediment sorting for a coarse-textured granite derived soil of south China[J].Soil and Tillage Research,2021,208:e104915.

[5] Liu D D, She D L, Yu S E, 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.

[6] Cao L X, Liang Y, Wang Y, et al. Runoff and soil loss from *Pinus massoniana* forest in southern China after simulated rainfall[J].Catena,2015,129:1-8.

[7] 温永福,高鹏,穆兴民,等.野外模拟降雨条件下径流小区产流产沙试验研究[J].水土保持研究,2018,25(1):23-29.

[8] Yan Y J, Dai Q H, Yuan Y F, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China[J].Geoderma,2018,330:30-40.

[9] Wu L, Peng M L, Qiao S S, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield characteristics of bare loess soil[J].Springer Berlin Heidelberg,2018,25(4):3480-3487.

[10] 王丽园,查轩,黄少燕,等.不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):40-44.

[11] 康静雯,陈晓燕,赵宇,等.人工模拟降雨条件下紫色土坡地产流产沙特征研究[J].西南师范大学学报,2014,39(3):131-135.

[12] Defersha M B, Quraishi S, Melesse A. The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia[J].Hydrology and Earth System Sciences,2011,15:141-145.

[13] 郑子成,秦凤,李廷轩.不同坡度下紫色土地表微地形变化及其对土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2015,31(8):168-175.

[14] 朱乐红,唐科明,李豪,等.土壤理化性质对土壤侵蚀影响研究综述[J].现代农业科技,2018(14):189-191,197.

[15] 王欣,朱绪超,梁音,等.新型 W-OH 材料对南方典型侵蚀土壤入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(6):123-131.

[16] Wang L H, Dalabay N, Lu P, et al. Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall[J].Soil and Tillage Research,2017,166:147-156.

[17] 晋文娟.坡度对黑土坡面产流产沙影响效应的实验室模拟研究[D].长春:东北师范大学,2015.

[18] 张洋.江苏省水土流失重点防治区划分研究[D].南京:南京农业大学,2013.

[19] 张凯奇,夏飞,王海波.盐城市第Ⅲ防洪区典型河流水质分析[J].江苏水利,2021(3):31-34.

- [9] 陈洪松,杨静,傅伟,等.桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J].农业工程学报,2012,28(16):121-126.
- [10] 王恒松,熊康宁,刘云.喀斯特区地下水土流失机理研究[J].中国水土保持,2009(8):11-14,64.
- [11] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.
- [12] 周念清,李彩霞,江思珉,等.普定岩溶区水土流失与土壤漏失模式研究[J].水土保持通报,2009,29(1):7-11.
- [13] 张信宝,王世杰,曹建华.西南喀斯特山地的土壤硅酸盐矿物物质平衡与土壤流失[J].地球与环境,2009,37(2):97-102.
- [14] Zhou J, Tang Y Q, Yang P, et al. Inference of creep mechanism in underground soil loss of karst conduits I. Conceptual mode[J]. Natural Hazards, 2012, 62(3): 1191-1215.
- [15] 冯腾,陈洪松,张伟,等.桂西北喀斯特坡地土壤¹³⁷Cs的剖面分布特征及其指示意义[J].应用生态学报,2011,22(3):593-599.
- [16] 彭旭东.喀斯特高原坡地浅层孔(裂)隙水土漏失过程及特征研究[D].贵阳:贵州大学,2018.
- [17] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等.碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J].地球与环境,2007,35(3):202-206.
- [18] 伏文兵,戴全厚,严友进.喀斯特坡耕地及其浅层孔(裂)隙土壤侵蚀响应试验研究[J].水土保持学报,2015,29(2):11-16,22.
- [19] 甘艺贤.人工模拟降雨下喀斯特裸露坡耕地溶质迁移特征试验研究[D].贵阳:贵州大学,2018.
- [20] 蔡雄飞,王济,雷丽,等.不同雨强对我国西南喀斯特山区土壤侵蚀影响的模拟研究[J].水土保持学报,2009,23(6):5-8.
- [21] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.喀斯特坡地裸露心土层产流产沙模拟研究[J].土壤学报,2017,54(3):545-557.
- [22] 王玉宽,王占礼,周佩华.黄土高原坡面降雨产流过程的试验分析[J].水土保持学报,1991,5(2):25-31.
- [23] 杨智,戴全厚,黄启鸿,等.典型喀斯特坡面产流过程试验研究[J].水土保持学报,2010,24(4):78-81.
- [24] 雷珊,魏兴萍.喀斯特坡地不同地表微地貌产流产沙模拟研究[J].三峡生态环境监测,2019,4(3):80-88.
- [25] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-43.
- [26] 周春衡,陈洪松,付智勇,等.土壤大孔隙形态对喀斯特区水土漏失过程的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):70-76.
- [27] Dai Q H, Peng X D, Yang Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the karst rocky desertification area[J]. Catena, 2017, 152: 218-226.
- [28] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.喀斯特裸坡产流产沙过程试验研究[J].生态学报,2017,37(6):2067-2079.
- [29] 熊康宁,李晋,龙明忠.典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J].地理学报,2012,67(7):878-888.
- [30] 王玲.陡坡地水蚀过程与泥沙搬运机制[D].陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2016.
- [31] 郝燕芳,佟帆.侵蚀泥沙颗粒特征研究进展[J].水土保持学报,2020,34(1):1-7.

(上接第 48 页)

- [20] Zhu X C, Shao M A, Tang X Z, et al. Spatiotemporal variation and simulation of vegetation coverage in a typical degraded alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. Catena, 2020, 190: e104551.
- [21] 周一杨,王恩姮,陈祥伟.模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚体分选特征[J].水土保持学报,2008,22(6):176-179.
- [22] 刘和平,符素华,王秀颖,等.坡度对降雨溅蚀影响的研究[J].土壤学报,2011,48(3):479-486.
- [23] Ruhollah R A, Majid M, Mohammad H F, et al. Experimental investigation of rain-induced splash and wash processes under wind-driven rain[J]. Geoderma, 2019, 337: 1164-1174.
- [24] Ghahamani A, Ishikawa Y, Gomi T, et al. Downslope soil detachment-transport on steep slopes via rain splash[J]. Hydrology Process, 2011, 25(15): 2471-2480.
- [25] 甘艺贤,戴全厚,伏文兵,等.基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征[J].应用生态学报,2016,27(9):2754-2760.
- [26] 朱高立,王雪琪,李发志,等.秸秆覆盖对崩积体坡面产流产沙影响的模拟试验[J].土壤,2017,49(3):601-607.
- [27] 魏小燕,毕华兴,霍云梅.不同土壤坡面产流产沙特征对比分析[J].水土保持学报,2016,30(4):44-48.
- [28] 吴秋菊,吴佳,王林华,等.黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响[J].土壤学报,2015,52(2):303-311.
- [29] Almeida W S, Seitz S, Oliveira L F C, et al. Duration and intensity of rainfall events with the same erosivity change sediment yield and runoff rates[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(1): 69-75.
- [30] Deng L Z, Zhang L P, Fan X J, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield from hill slopes with weathered granite[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(31): 32559-32573.