

汇流强度、坡度及侵蚀泥沙颗粒分形对工程堆积体坡面侵蚀的影响

冯志倩¹, 娄永才¹, 齐星圆², 高照良^{1,3}, 李永红³, 张帅¹

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.中兵勘察设计研究院有限公司,北京 100053;3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了探讨汇流强度、坡度和侵蚀泥沙颗粒分形对堆积体坡面土壤侵蚀的影响,选用 3 种土壤(风沙土、红土、塬土),4 个汇流强度(8,12,16,20 L/min),在 3 个坡度(28°,32°,36°)堆积体坡面上进行野外径流冲刷模拟试验。结果表明:(1)汇流强度和坡度的交互作用对坡面平均流速的影响最大。3 种土壤坡面流速均随汇流强度的增加递增 1.00~1.49 倍,均随坡度增加递增 0.99~1.29 倍。(2)汇流强度、坡度、土壤颗粒分形维数三者之间的交互作用对坡面平均产流率影响最大,而汇流强度对径流量影响最大。3 种土壤下垫面坡面产流率、径流量均随汇流强度的增加而增加,分别递增 1.09~6.10,1.05~5.74 倍,均随坡度增加而增加,分别递增 0.80~2.59,0.82~2.59 倍。(3)汇流强度和坡度的交互作用对产沙率和产沙量影响最大。3 种土壤坡面产沙率、产沙量均随汇流强度的增加而增加,分别递增 1.17~5.67,1.17~5.20 倍,均随坡度增加而增加,分别递增 0.96~3.32,0.94~7.54 倍。研究结果可为不同土质的工程堆积体坡面土壤侵蚀预测及流失防控提供理论参考。

关键词: 汇流强度;坡度;土壤颗粒分形;土壤侵蚀;工程堆积体

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)03-0127-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.03.018

Influence of Flow Intensity, Slope and Soil Particle Fractal Dimension on Slope Erosion of Engineering Accumulation Body

FENG Zhiqian¹, LOU Yongcai¹, QI Xingyuan², GAO Zhaoliang^{1,3}, LI Yonghong³, ZHANG Shuai¹

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;*

2. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., LTD., Beijing 100053; 3. Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to investigate the effects of flow intensities, slope gradient and fractal dimension of erosion sediment particles on soil erosion on slope surface of accumulation body, three soils (aeolian sandy soil, red soil and Lou soil) and four flow intensities (8, 12, 16 and 20 L/min) were selected. Field runoff scouring simulation experiments were carried out on three slopes (28°, 32° and 36°). The results showed that: (1) The interaction of flow intensity and slope had the greatest influence on the average velocity of slope. The velocity of slope flow of the three soils increased by 1.00 ~ 1.49 times with the increase of flow intensities and 0.99 ~ 1.29 times with the increase of slope. (2) The interaction among flow intensities, slope and fractal dimension of soil particles had the greatest influence on the average runoff yield on slope, while flow intensity had the greatest influence on runoff. The runoff rate and runoff yield of the three soils increased with the increase of flow intensities by 1.09 ~ 6.10 and 1.05 ~ 5.74 times respectively, and increased with the increase of slope by 0.80 ~ 2.59 and 0.82 ~ 2.59 times respectively. (3) The interaction between the intensities of flow and slope had the greatest influence on the sediment yield and sediment yield. The sediment rate and sediment yield of three soils increased with the increase of flow intensities, increased by 1.17 ~ 5.67 and 1.17 ~ 5.20 times respectively, and increased by 0.96 ~ 3.32 and 0.94 ~ 7.54 times respectively with the increase of slope gradients. These research results could provide a theoretical reference for soil erosion

收稿日期:2020-11-02

资助项目:国家自然科学基金项目(41671283,41807066);国家重点研发计划项目(2016YFC0501706-02)

第一作者:冯志倩(1995—),女,硕士研究生,主要从事工程建设区人为侵蚀过程研究。E-mail:15248013504@163.com

通信作者:高照良(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事农业水土工程和荒漠化防治研究。E-mail:gzl@ms.iswc.ac.cn

prediction and loss control of engineering accumulation slope with different soil properties.

Keywords: flow intensity; slope; fractal of soil particles; soil erosion; engineering accumulation body

传统侵蚀方式造成的水土流失量在水土流失量体系中所占比例逐渐减小,人类在工程建设和生产运行过程中造成的水土流失问题随着社会经济的快速发展愈加凸显^[1],且成为制约经济社会可持续发展的重要因素^[2]。生产建设活动中人为堆置弃土弃渣形成的工程堆积体是典型的人工重塑地貌单元,压实平台作为堆积体主要的产流区,平台汇流对堆积体坡面土壤侵蚀起着至关重要的作用^[3];平台汇流能显著影响堆积体坡面侵蚀产沙过程,导致坡面土壤流失量随汇流强度的增加而增加^[4];平台汇流作为堆积体坡面径流侵蚀动力的传输纽带和基本的侵蚀泥沙输移载体,其直接作用于坡面土壤侵蚀的各个环节,本质上是汇流改变了堆积体坡面下部的水文输入条件,调节了径流侵蚀力在坡面的分配^[5]。已有研究^[6]表明,平台汇流对堆积体坡面土壤侵蚀的影响远大于降雨。下垫面构成要素不同导致工程堆积体坡面土壤侵蚀方式和过程存在明显的差异性^[1,7-8],坡度是影响坡面径流侵蚀的重要因素之一,相同汇流强度或降雨条件下,不同坡度所造成的土壤侵蚀程度也存在差异性,探讨坡度与坡面土壤侵蚀之间的关系,对土壤侵蚀预报和水土保持规划都具有重要意义^[9]。

已有研究在单一或不同质地工程堆积体坡面土壤侵蚀的特点、规律、过程和机理方面取得了一定的成果,马美景等^[10]对红壤坡面径流侵蚀过程研究发现,上方来水流量越大,薄层径流冲刷作用越强烈,径流含沙量随时间变化波动越剧烈;黄旭华等^[11]研究我国最具代表的 4 种侵蚀性土壤(红壤、紫色土、黑土和黄土)坡面侵蚀产沙规律发现,4 种土壤的坡面平

均产沙强度均随雨强和坡度的增大而增大;倪世民等^[12]对不同质地坡面的土壤侵蚀速率进行了研究发现,土壤质地对土壤侵蚀速率具有明显的影响,相同试验条件下使土壤侵蚀速率呈现“单峰状”分布,在 50% 含沙量的坡面最大。但传统分析汇流强度(或雨强)、坡度和下垫面因素对堆积体坡面土壤侵蚀的影响大多是基于单一^[13-15]或不同土壤颗粒分形维数^[1,8,16]条件下建立相应的经验公式,未量化土壤颗粒分形维数对堆积体坡面产流产沙的影响,也并未考虑因素之间交互作用的影响,而分形理论在描述土壤等不规则非均质且具有自相似特征的复杂几何形体方面有其独特的优势^[17],用土壤粒径分布分形维数可以反映土壤质地的差异和土壤的通透性,把分形理论引入到土壤侵蚀研究中可以在一定程度上使其定量化^[18]。鉴于此,本文基于分形理论,采用土壤颗粒分形维数用于表征不同质地堆积体的下垫面^[19],从而量化下垫面对堆积体坡面土壤侵蚀的影响,探讨汇流强度、坡度和分形维数及其交互作用与堆积体坡面产流产沙的关系,以期对堆积体坡面土壤侵蚀的预测及模型构建提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验红土采自江西省新建县境内“枫生高速”的弃土堆积体;壤土采自陕西省“西宝高速”杨凌段的弃土堆积体;风沙土采自陕西省靖边县境内“榆靖高速”的弃土堆积体。试验用土自然风干后过 10 mm 筛剔除大的石块和杂质后回填试验小区,以保证下垫面的相对均一性,减小试验误差。供试土壤物理性质见表 1。

表 1 供试土壤物理性质

土壤质地	粒径组成/%					容重/ (g · cm ⁻³)	质量 含水率/%
	<0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~0.05 mm	0.05~0.1 mm	0.1~2.0 mm		
红土	29.90	28.87	19.19	9.36	12.68	1.30	21.03
壤土	20.26	30.05	38.45	9.77	1.47	1.25	21.25
风沙土	9.94	16.50	29.29	32.16	12.11	1.29	10.71

1.2 试验设计

综合采样区多年降雨气象资料及暴雨频率特征,试验最终选定 8,12,16,20 L/min 汇流强度(对应的降雨强度分别为 1.0,1.5,2.0,2.5 mm/min)。基于前期野外实地调查,工程堆积体边坡坡度主要集中在 26°~35°^[20],因此设计试验坡度为 28°,32°和 36°,具有一定的代表性。试验场次共计 36 场,每场时长为 45 min。

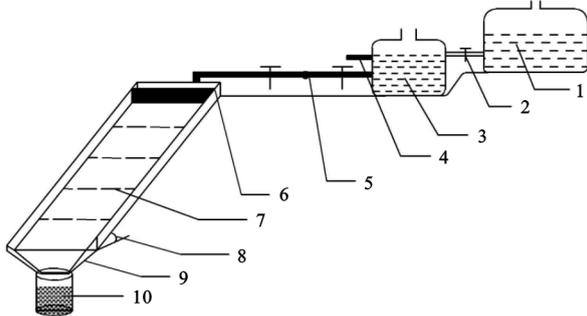
1.3 试验方法

试验于 2017 年 6—9 月在中国科学院水利部水土

保持研究所杨凌岭后试验站(34°19′24″N,107°59′36″E)进行。试验小区规格为 8.0 m×1.0 m×0.5 m(长×宽×高),试验采用放水冲刷的方式,通过恒压供水以保证溢流槽均匀出流(图 1),利用调节阀与水表配合进行流量率定,通过稳流槽获得平稳、恒定的出流。

试验开始前,为保证下垫面前期土壤含水量一致,对坡面进行均匀洒水,直至坡面即将产流为止,用塑料膜覆盖静置 24 h,使水分自由下渗接近自然状态的土壤水分分布状况。测得红土、壤土和风沙土堆

积体容重变化范围分别为 1.25~1.32, 1.23~1.27, 1.28~1.31 g/cm³, 土壤质量含水率变化范围分别为 17.88%~22.04%, 19.17%~22.78%, 9.75%~15.02%。为确保汇流速度的准确度, 每次正式试验开始前率定放水流量 3 次, 以保证实际汇流强度与设计值之间的误差不超过 5%。试验分 4 个断面测量流速和流宽, 前 3 min 内每隔 1 min 测量 1 次, 以后隔 3 min 测量 1 次, 同时用精度为 1 mL 的 1 000 mL 采样瓶收集径流泥沙样品, 用置换法计算产流和产沙量。采用 Malvern Mastersizer 2000 型激光粒度仪分析土壤颗粒机械组成。



注: 1 为蓄水桶; 2 为水阀; 3 为恒压桶; 4 为溢流管; 5 为流量计; 6 为溢流槽; 7 为观测断面; 8 为试验小区; 9 为坡度; 10 为集流桶。

图 1 试验小区及冲刷装置示意

1.4 数据分析

(1) 土壤颗粒分形维数: 采用王国梁等^[21]提出的体积分形维数, 计算公式为:

$$\lg \frac{V(r < R)}{V_t} = (3 - D) \lg \frac{R}{\lambda_v} \quad (1)$$

式中: $V(r < R)$ 为粒径小于 R 的累积颗粒体积; V_t 为各粒径颗粒体积之和; R 为筛分粒径范围的平均值即区间上下限的算术平均值; λ_v 为粒径分级中最大粒级的平均值; D 为颗粒体积分形维数。计算得红土、壤土和风沙土堆积体土壤颗粒分形维数分别为 2.76, 2.66, 2.52, 用土壤分形维数表征不同堆积体的下垫面。

将试验数据分成 2 组, 1 组 26 场数据基于分形维数、坡度、汇流强度进行模型构建, 另外 1 组 10 场数据用于模型验证。选用相对偏差 PBIAS、决定性系数 R^2 、纳什效率系数 NSE 验证拟合方程的有效性。具体计算公式为:

$$\text{PBIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \times 100\% \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (3)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

式中: RE 为相对误差 (%); R^2 为决定性系数; NSE

为纳什效率系数; O_i 为实测值; P_i 为预测值; \bar{O} 为平均实测值; \bar{P} 为平均预测值; n 为样本数。

本文利用 Excel 2010 软件和 SPSS 23.0 软件进行数据统计、分析, 利用 Origin 2018 软件进行数据绘图。

2 结果与分析

2.1 不同下垫面工程堆积体坡面流速变化特征

从不同汇流强度下工程堆积体坡面平均流速变化(图 2)可知, 汇流强度为 8~20 L/min 时, 28°~36° 红土、壤土和风沙土堆积体坡面平均流速变化分别介于 0.17~0.28, 0.19~0.29, 0.23~0.32 m/s。分析红土、壤土和风沙土 12 场次的坡面平均流速, 风沙土堆积体坡面平均流速最大, 为 0.28 m/s, 分别是红土和壤土的 1.22, 1.17 倍。同一坡度下, 各堆积体坡面平均流速随汇流强度的增加而增加, 递增幅度分别介于 1.03~1.49, 1.00~1.48, 1.01~1.34 倍; 不同汇流强度下各堆积体坡面平均流速存在一定的差异性。汇流强度相同时, 36° 和 32° 各堆积体坡面平均流速分别是 28° 的 0.99~1.29, 0.97~1.28, 1.02~1.24 倍。

为进一步明确汇流强度(I)、坡度(S)、土壤颗粒分形维数(D)、汇流强度—坡度(IS)、汇流强度—土壤颗粒分形维数(ID)、坡度—土壤颗粒分形维数(SD)和汇流强度—坡度—土壤颗粒分形维数(ISD)等对堆积体坡面流速的影响, 随机选取 26 场试验数据, 运用交互效应分析方法^[22], 回归分析流速与上述指标的关系, 结果表明, 流速与坡度(S)、土壤颗粒分形维数(D)和汇流强度—坡度(IS)三者呈极显著线性函数关系(公式(5))。由于各指标间的计量单位和数量级不同, 使得各指标之间不能进行综合分析, 因此对回归方程进行标准化处理(公式(6)), 结果为:

$$V = 0.002S - 0.206D + 0.171 \times 10^{-3} IS + 0.656 \quad (5)$$

$$V_s = 0.174S - 0.509D + 0.638IS \times 10^{-3} \quad (6)$$

$$(R^2 = 0.909, P < 0.01, n = 26)$$

式中: V 为平均流速 (m/s); V_s 为 V 标准化值 (单位); D 为土壤颗粒分形维数 (红土为 2.76, 壤土为 2.66, 风沙土为 2.52); S 为坡度 (28°, 32°, 36°); I 为汇流强度 (8, 12, 16, 20 L/min)。拟合方程 F 检验均达到 $P < 0.01$ 极显著水平, 各参数的 t 检验均达 $P < 0.01$ 的极显著水平。由(公式(7))可知, 坡度对平均流速的影响最小, 汇流强度和坡度的交互作用对坡面平均流速的影响最大。

为验证公式(5)预测坡面径流流速的效果, 选取剩余 10 场试验数据进行验证, 结果(图 3)表明, 公式(5)方程预测值与模拟值的相对偏差(PBIAS)为 -1.150%, 决定性系数(R^2)为 0.788, 纳什效率系数(NSE)为 0.837。通常认为, 当 $R^2 > 0.6$ 且纳什效率

系数 $NSE > 0.5$ 时模型预测精度在可接受范围。因此,认为公式(5)符合模型有效性验证的基本要求,对

预测不同汇流强度、坡度和土壤颗粒分形维数下堆积体坡面径流流速变化具有一定的参考价值。

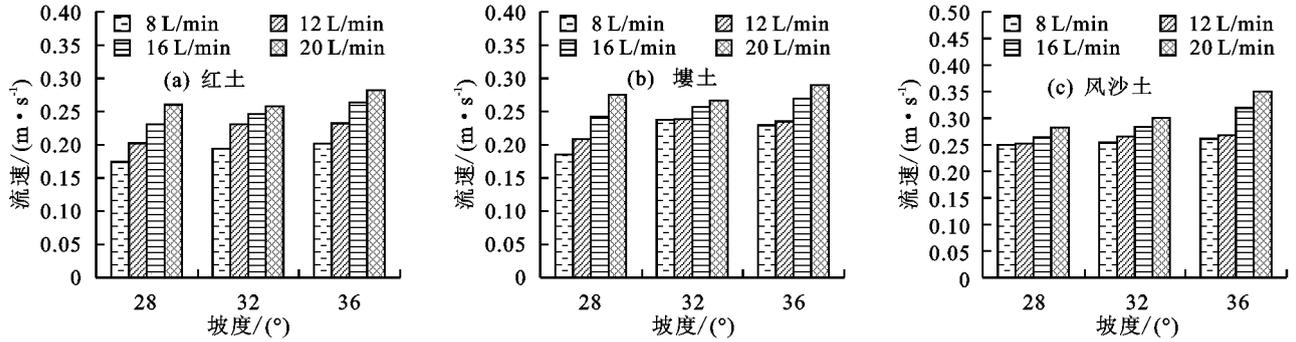


图 2 不同汇流强度下堆积体坡面流速变化特征

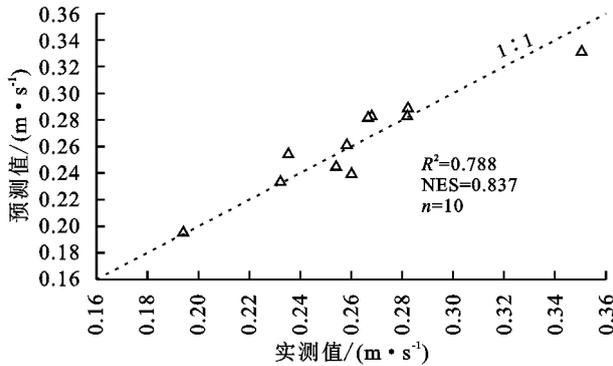


图 3 堆积体坡面流速的预测值和实际观测值

2.2 不同下垫面工程堆积体坡面产流变化特征

2.2.1 工程堆积体坡面产流率变化特征 由不同汇流强度下红土、壤土和风沙土堆积体坡面平均产流率变化(图 4)可知,汇流强度为 8~20 L/min 时,28°~36°红土、壤土和风沙土堆积体坡面平均产流率变化分别介于 2.58~19.80, 4.83~23.03, 6.13~22.42 L/min, 分析红土、壤土和风沙土 12 场次的坡面平均流速,风沙土堆积体坡面平均产流率最大为 22.42 L/min,分别是红土和壤土的 1.13, 1.11 倍。同一坡度下各堆积体坡面平均产流率均随着汇流强度的增加而逐渐增加,递增幅度分别介于 1.09~6.10, 1.41~3.94, 1.28~3.66 倍;不同汇流强度所对应的坡面平均产流率之间因土壤质地的不同而表现出一定的差异性。汇流强度相同时,36°和 32°各堆积体坡面平均产流率分别是 28°的 1.01~2.59, 1.02~1.22, 0.80~2.26 倍。

为进一步明确汇流强度(I)、坡度(S)、土壤颗粒分形维数(D)、汇流强度—坡度(IS)、汇流强度—土壤颗粒分形维数(ID)、坡度—土壤颗粒分形维数(SD)和汇流强度—坡度—土壤颗粒分形维数(ISD)等对堆积体坡面产流率的影响,随机选取 26 场试验数据回归分析平均产流率与上述指标的关系,结果表明,产流率与土壤颗粒分形维数(D)和坡度—汇流强度—土壤颗粒分形维数(ISD)呈极显著线性函数关系(公式(7))。消除量纲影响后的标准化回归拟合结

果见公式(8)。

$$R = -12.165D + 0.012ISD + 29.034 \quad (7)$$

$$R_s = -0.228D + 0.874ISD \quad (8)$$

$$(R^2 = 0.817, P < 0.001, n = 26)$$

式中: R 为平均产流率(L/min); R_s 为 R 标准化值; D 为土壤颗粒分形维数(红土为 2.76, 壤土为 2.66, 风沙土为 2.52); S 为坡度(28°, 32°, 36°); I 为汇流强度(8, 12, 16, 20 L/min)。拟合方程 F 检验均达到 $P < 0.01$ 极显著水平,参数 D 的 t 检验为 $P < 0.05$ 显著水平,参数 ISD 的 t 检验为 $P < 0.01$ 极显著水平。由公式(8)可知,汇流强度(I)、坡度(S)、土壤颗粒分形维数(D)三者之间的交互作用对坡面平均产流率影响最大。

为验证公式(7)预测坡面径流产流率的效果,选取剩余 10 场试验数据进行验证,结果(图 5)表明,公式(7)方程预测值与模拟值的相对偏差(PBIAS)为 3.077%,决定性系数为 0.960,纳什效率系数为 0.956,表明方程可以用来预测不同汇流强度、坡度和土壤颗粒分形维数下堆积体坡面平均产流率变化。

2.2.2 工程堆积体坡面径流量变化特征 由红土、壤土和风沙土堆积体坡面径流量和产沙量(表 2)可知,汇流强度为 8~20 L/min 时,28°~36°红土、壤土和风沙土堆积体坡面径流量变化分别介于 123.09~897.17, 227.22~1 048.25, 276.29~1 057.20 L, 对比分析红土、壤土和风沙土 12 场次的平均坡面径流量可知,风沙土堆积体坡面平均坡面径流量最大为 582.82 L,是红土的 1.25 倍,风沙土的 1.04 倍。同一坡度条件下,红土、壤土和风沙土堆积体坡面径流量均随汇流强度的增加而显著增加,递增幅度分别介于 1.05~5.74, 1.33~4.57, 1.28~3.52 倍;汇流强度 8 L/min 与 16, 20 L/min 所对应的坡面径流量之间差异性显著($P < 0.05$)。同一汇流强度下,36°和 32°各堆积体坡面径流量分别是 28°的 0.98~2.59, 1.01~1.44, 0.82~1.47 倍。

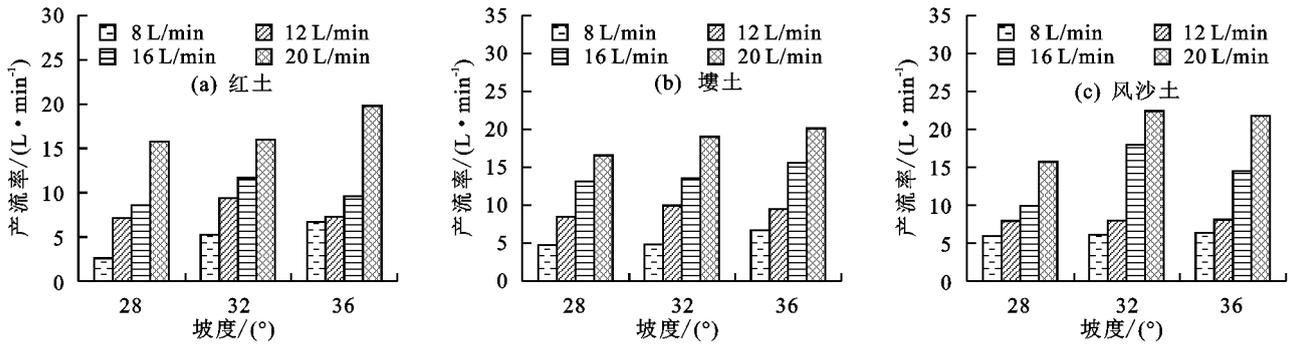


图4 不同汇流强度下堆积体坡面产流率变化特征

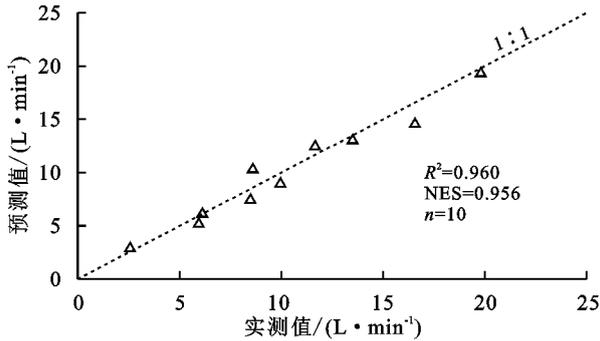


图5 堆积体坡面径流产流率的预测值和实际观测值

为进一步明确汇流强度(I)、坡度(S)、土壤颗粒分形维数(D)、汇流强度坡度(IS)、汇流强度—土壤颗粒分形维数(ID)、坡度—土壤颗粒分形维数(SD)和汇流强度—坡度—土壤颗粒分形维数(ISD)等对堆积体坡面径流量的影响,随机选取26组数据回归分析径流量与上述指标的关系,结果表明,径流量与坡度(S)、土壤颗粒分形维数(D)和汇流强度—坡度(IS)呈极显著线性函数关系(公式(9))。消除量纲影响后的标准化回归拟合结果见公式(10)。

$$Q = 157.528I + 10.618S - 41.803DI - 472.381 \quad (9)$$

$$Q_s = 2.976I + 0.147S - 2.093DI \quad (10)$$

$(R^2 = 0.884, P < 0.01, n = 26)$

式中: Q 为径流量(L); Q_s 为 Q 的标准化值; D 为土壤颗粒分形维数(红土为2.76,壤土为2.66,风沙土为2.52); S 为坡度($28^\circ, 32^\circ, 36^\circ$); I 为汇流强度(8,12,16,20 L/min)。拟合方程 F 检验均达到 $P < 0.01$ 极显著水平,参数 S 的 t 检验为 $P < 0.05$ 显著水平,其余各参数的 t 检验为 $P < 0.01$ 极显著水平。由公式(10)可知,汇流强度(I)对径流量影响最大,其次是汇流强度和土壤颗粒分形维数的交互项(DI),坡度对径流量的影响最小。

为验证公式(9)预测坡面径流流速的效果,选取剩余10场试验数据进行验证,结果(图6)表明,公式(9)方程预测值与模拟值的相对偏差(PBIAS)为7.285%,决定性系数为0.903,纳什效率系数为

0.849,表明方程可以用来预测不同汇流强度、坡度和土壤颗粒分形维数下堆积体坡面径流量变化。

表2 不同下垫面堆积体坡面径流量和产沙量

汇水强度/ ($L \cdot min^{-1}$)	坡度/ ($^\circ$)	径流量/ L			产沙量/ kg		
		红土	壤土	风沙土	红土	壤土	风沙土
8	28	123.09	227.22	276.29	57.88	93.46	107.15
8	32	254.51	229.34	300.28	92.36	88.13	172.37
8	36	319.35	327.74	300.56	134.85	149.34	171.66
12	28	341.88	391.30	472.72	130.02	141.23	172.85
12	32	442.79	462.33	385.51	194.26	182.93	201.48
12	36	335.76	436.51	386.60	153.25	192.89	230.70
16	28	403.34	591.46	585.26	121.02	229.85	263.30
16	32	547.65	634.85	838.54	248.04	276.52	446.43
16	36	465.20	704.28	686.09	295.10	359.38	378.65
20	28	706.74	751.50	717.78	123.45	291.09	341.74
20	32	745.73	1048.25	1057.20	303.82	458.09	506.03
20	36	897.17	908.89	987.02	424.72	459.10	487.67

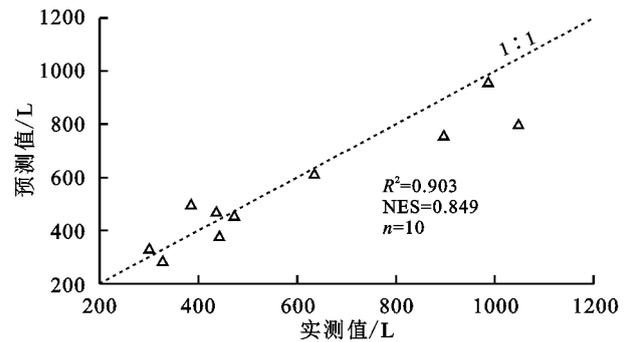


图6 堆积体坡面径流量的预测值和实际观测值

2.3 不同下垫面工程堆积体坡面产沙变化特征

2.3.1 工程堆积体坡面产沙率变化特征 由图7可知,汇流强度为8~20 L/min时,红土、壤土和风沙土堆积体坡面平均产沙率变化分别介于0.88~10.25,1.90~10.38,2.26~11.10 kg/min,分析红土、壤土和风沙土12场次的坡面平均产沙率,风沙土堆积体坡面平均产沙率最大为6.05 kg/min,分别是红土和壤土的1.45,1.14倍。红土、壤土和风沙土堆积体坡面平均产沙率均随着汇流强度的增加而增加,递增幅度分别介于1.17~3.83,1.58~5.67,1.21~3.37倍,汇流强度8 L/min与16,20 L/min所对应的坡面径流量之间差

异性显著($P < 0.05$)。28°坡红土、壤土和风沙土堆积体坡面平均产沙率分别为 0.88~3.37, 1.90~6.43, 2.26~7.60 kg/min, 同一汇流强度下 32°和 36°堆积体坡面平均产沙率分别是 28°的 1.25~3.32, 0.96~1.61, 1.18~2.43 倍。

为进一步明确汇流强度(I)、坡度(S)、土壤颗粒分形维数(D)、汇流强度—坡度(IS)、汇流强度—土壤颗粒分形维数(ID)、坡度—土壤颗粒分形维数(D)和汇流强度—坡度—土壤颗粒分形维数(ISD)等对堆积体坡面平均产沙率的影响, 随机选取 26 组数据回归分析平均产沙率与上述指标的关系, 结果表明, 产沙率与土壤颗粒分形维数(D)和汇流强度—坡度(IS)呈极显著线性函数关系(公式(11))。消除量纲影响后的标准化回归拟合结果见公式(12)。

$$E = -7.326D + 0.017IS + 16.980 \quad (11)$$

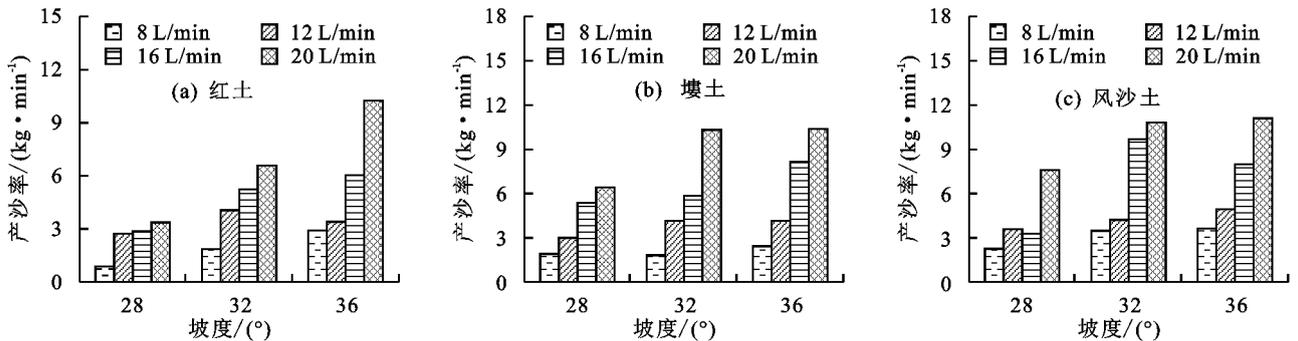


图 7 不同汇流强度下堆积体坡面产沙率变化特征

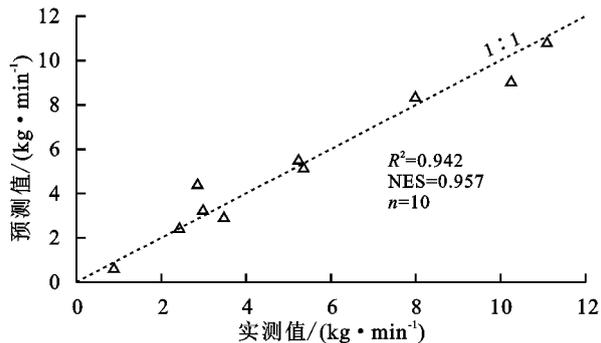


图 8 堆积体坡面产沙率的预测值和实际观测值

2.3.2 工程堆积体坡面产沙量变化特征 由表 2 可知, 汇流强度为 8~20 L/min 时, 28°~36°红土、壤土和风沙土堆积体坡面产沙量变化分别介于 17.88~424.72, 93.46~459.10, 107.15~506.03 kg, 分析红土、壤土和风沙土 12 场次的平均坡面产沙量, 可知风沙土堆积体坡面平均产沙量最大为 290.00 kg, 是红土和风沙土的 1.5, 1.19 倍。3 种土壤颗粒分形维数堆积体坡面产沙量均随汇流强度的增加而显著增加, 递增幅度分别介于 2.09~3.29, 1.29~5.20, 1.17~3.19, 汇流强度 8 L/min 与 12 L/min 所对应的坡面产沙量之间无显著差异($P > 0.05$)。28°坡红土、壤土

$$E_s = -0.260D + 0.873IS \quad (12)$$

$$(R^2 = 0.792, P < 0.001, n = 26)$$

式中: E 为平均产沙率(kg/min); E_s 为 E 的标准化值; D 为土壤颗粒分形维数(红土为 2.76, 壤土为 2.66, 风沙土为 2.52); S 为坡度(28°, 32°, 36°); I 为汇流强度(8, 12, 16, 20 L/min)。拟合方程 F 检验均达到 $P < 0.01$ 极显著水平, 各参数的 t 检验均达 $P < 0.01$ 的显著水平。由(公式 12)可知, 汇流强度和坡度的交互项(IS)对平均产沙率影响大于土壤颗粒分形维数(D)。

为验证公式(11)预测坡面径流流速的效果, 选取剩余 10 场试验数据进行验证, 结果(图 8)表明, 公式(11)方程预测值与模拟值的相对偏差(PBIAS)为 0.994%, 决定性系数为 0.942, 纳什效率系数为 0.957, 表明方程可以用来预测不同汇流强度、坡度和土壤颗粒分形维数下堆积体坡面平均产沙率变化。

和风沙土堆积体坡面产沙量分别在 17.88~130.02, 93.46~291.09, 107.15~341.74 kg, 同一汇流强度下, 36°和 32°坡堆积体坡面产沙量分别是 28°的 1.18~3.44, 0.94~1.60, 1.17~1.70 倍。由表 2 可知, 红土堆积体坡面平均产流量、产沙量均显著小于壤土和风沙土, 原因可能是: 汇流强度与土壤入渗能力的对比关系决定和影响土壤的入渗特性, 红土以蓄满产流为主, 产流时间慢, 坡面径流损失较多^[23], 且表面糙度大, 径流的水力摩阻系数大, 坡面径流流速和径流剪切力小, 对坡面的切割能力弱。壤土和风沙土则以超渗产流为主, 产流时间快, 相比红土其土壤黏粒含量低, 土壤颗粒间黏结力较差, 随着冲刷历时的增长, 侵蚀沟发育明显, 坡面径流进一步汇集, 流速和径流剪切力随之增加, 径流对坡面的破坏作用增强。

为进一步明确汇流强度(I)、坡度(S)、土壤颗粒分形维数(D)、汇流强度—坡度(IS)、汇流强度—土壤颗粒分形维数(ID)、坡度—土壤颗粒分形维数(SD)和汇流强度—坡度—土壤颗粒分形维数(ISD)等对堆积体坡面产沙量的影响, 随机选取 26 组数据回归分析产沙量与上述指标的关系, 结果表明, 产沙

量与土壤颗粒分形维数(D)和汇流强度-坡度(IS)呈极显著线性函数关系(公式(13))。消除量纲影响后的标准化回归拟合结果见(公式(14))。

$$S = -440.245D + 0.688IS + 1097.965 \quad (13)$$

$$S_s = -0.361D + 0.834IS \quad (14)$$

$$(R^2 = 0.816, P < 0.001, n = 26)$$

式中: S 为产沙量(kg); S_s 为 S 的标准化值; D 为土壤颗粒分形维数(红土为2.76, 壤土为2.66, 风沙土为2.52); S 为坡度($28^\circ, 32^\circ, 36^\circ$); I 为汇流强度(8, 12, 16, 20 L/min)。拟合方程 F 检验均达到 $P < 0.01$ 极显著水平,各参数 t 检验也均达到 $P < 0.01$ 极显著水平。由公式(14)可知,汇流强度和坡度的交互项(IS)对产沙量的影响大于土壤颗粒分形维数(D)。

为验证公式(13)预测坡面径流流速的效果,选取10场试验数据进行验证,结果(图9)表明,公式(13)方程预测值与模拟值的相对偏差(PBIAS)为0.139%,决定性系数为0.980,纳什效率系数为0.916,表明方程可以用来预测不同汇流强度、坡度和土壤颗粒分形维数下堆积体坡面产沙量变化。

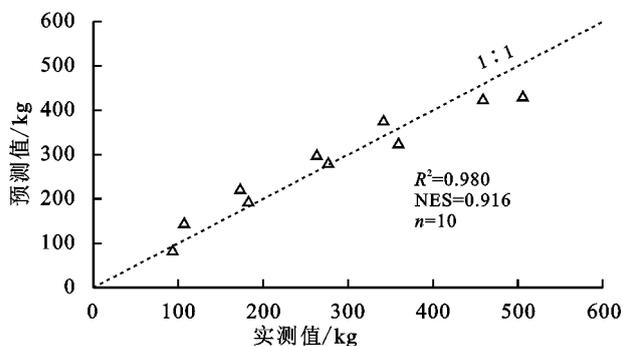


图9 堆积体坡面产沙量的预测值和实际观测值

3 结论

(1) 汇流强度和坡度的交互作用对坡面平均流速的影响最大。3种土壤中风沙土平均流速最大(0.28 m/s),是红土和壤土的1.22, 1.17倍,3种土壤坡面流速均随汇流强度的增加递增1.00~1.49倍,均随坡度增加递增0.99~1.29倍。

(2) 汇流强度、坡度、土壤颗粒分形维数三者之间的交互作用对坡面平均产流率影响最大,而汇流强度对径流量影响最大。风沙土平均产流率(22.42 L/min)和径流量(582.82 L)分别是红土和壤土的1.13, 1.11倍和1.25, 1.04倍;3种土壤随坡面汇流强度的增加坡面产流率、径流量分别递增1.09~6.10, 1.05~5.74倍,坡度增加时产流率和径流量分别递增0.80~2.59, 0.82~2.59倍。

(3) 汇流强度和坡度的交互作用对产沙率和产沙量影响最大。风沙土平均产沙率(6.05 kg/min)、产沙量

(290.00 kg)分别是红土和壤土的1.45, 1.14倍和1.50, 1.19倍。3种土壤随汇流强度的增加坡面产沙率、产沙量分别递增1.17~5.67, 1.17~5.20倍,坡度增加时产沙率和产沙量分别递增0.96~3.32, 0.94~7.54倍。

(4) 堆积体坡面土壤侵蚀并非受单一因素的影响,而是多种因素综合作用的结果,同时也表明堆积体坡面土壤侵蚀是一个复杂的过程,因此在构建堆积体坡面土壤侵蚀模型时除了考虑单个因素的影响外,更应该考虑因素之间交互作用的影响。

参考文献:

- [1] 李建明, 牛俊, 王文龙, 等. 不同土质工程堆积体径流产沙差异[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 187-194.
- [2] 邢青青. 浅谈生态修复在水土保持建设中的优化作用[J]. 珠江水运, 2020(17): 86-87.
- [3] Zhang L T, Gao Z L, Li Z B, et al. Downslope runoff and erosion response of typical engineered landform to variable inflow rate patterns from upslope [J]. Natural Hazards, 2016, 80(2): 775-796.
- [4] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 145-153.
- [5] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 黄土丘陵区堆积体边坡对方来水的侵蚀响应[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 811-819.
- [6] Pei T, Xu X Y, Pan C Z, et al. Impacts of rainfall and inflow on rill formation and erosion processes on steep hillslopes [J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 24-39.
- [7] 赵满, 王文龙, 郭明明, 等. 含砾石风沙土堆积体坡面径流产沙特征[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 847-859.
- [8] 丁文斌, 李叶鑫, 史东梅, 等. 两种工程堆积体边坡模拟径流侵蚀对比研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 558-569.
- [9] 郭军权, 王文龙. 坡度对浅沟侵蚀产沙的野外放水冲刷试验影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 87-92, 212.
- [10] 马美景, 王军光, 郭忠录, 等. 放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 365-374.
- [11] 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, 36(4): 45-47, 53.
- [12] 倪世民, 张德谦, 冯舒悦, 等. 不同质地重塑土坡面水沙定量关系研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1336-1346.
- [13] 戎玉博, 骆汉, 谢永生, 等. 雨强对工程堆积体侵蚀规律和细沟发育的影响[J]. 泥沙研究, 2016(6): 12-18.
- [14] 张翔, 高照良, 卢茜. 土堆积体坡面细沟形态及其沿程分布特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 53-59.
- [15] 牛耀彬, 高照良, 李永红, 等. 工程堆积体坡面细沟形态发育及其与产流产沙量的关系[J]. 农业工程学报,

2016,32(19):154-161.

- [16] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等.不同土石比的工程堆积体边坡径流侵蚀过程[J].农业工程学报,2015,31(17):152-161.
- [17] 张佳瑞,王金满,祝宇成,等.分形理论在土壤学应用中的研究进展[J].土壤通报,2017,48(1):221-228.
- [18] 蔡新民,丁新新,潘健,等.分形理论在土壤科学研究中的应用[J].防护林科技,2011(6):8-13.
- [19] 刘继龙,马孝义,付强,等.陕西杨凌土壤粒径分布体积分形维数特征分析及预测[J].灌溉排水学报,2012,31(3):59-62.
- [20] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体下垫面仿真模拟标准化参数[J].水土保持学报,2012,26(5):229-234.
- [21] 王国梁,周生路,赵其国.土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J].土壤学报,2005,42(4):545-550.
- [22] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等.降雨强度、坡度及坡长对细沟侵蚀的交互效应分析[J].中国水土保持科学,2011,9(6):8-13.
- [23] 张媛静,张平仓,丁文峰.黄土与紫色土坡面侵蚀特征对比试验研究[J].水土保持通报,2010,30(4):60-62.
- (上接第 126 页)
- [13] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, et al. Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts[J]. Soil and Tillage Research,2004,81(2):253-263.
- [14] Adnan M, Xu M G, Syed A A S, et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China [J].Journal of Environmental Management,2020,270:e110894.
- [15] 张会慧,王世标,王均睿,等.三江平原湿地不同利用方式对土壤理化性质及团聚体组成的影响[J].生态学报,2019,38(6):1679-1687.
- [16] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water - stable aggregates in soils [J].European Journal of Soil science,1982,33(2):141-163.
- [17] 武均,蔡立群,齐鹏,等.不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J].中国生态农业学报,2015,23(3):276-284.
- [18] 徐香菇,汪景宽.土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J].土壤通报,2017,48(6):1523-1529.
- [19] Tang F K, Cui M, Lu Q, et al. Effects of vegetation restoration on the aggregate stability and distribution of aggregate-associated organic carbon in a typical karst gorge region [J].Solid Earth,2016,7(3):2213-2242.
- [20] 白秀梅,韩有志,郭汉清.庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征[J].生态学报,2014,34(7):1654-1662.
- [21] Ahmad E H, Demisie W, Zhang M. Effects of land use on concentrations and chemical forms of phosphorus in different-size aggregates [J].Eurasian Soil Science,2017,50(12):1435-1443.
- [22] 区晓琳,陈志彪,陈志强,等.亚热带侵蚀红壤区植被恢复过程中土壤团聚体化学计量特征[J].土壤学报,2018,55(5):1156-1167.
- [23] 郑子成,何淑勤,王永东,等.不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J].水土保持学报,2010,24(3):170-174.
- [24] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2013,33(15):4674-4682.
- [25] 杜臻杰,樊向阳,吴海卿,等.施用生物质炭和猪场沼液对潮土团聚体及氮素形态影响研究[J].灌溉排水学报,2015,34(9):20-23,27.