

不同形态工程堆积体产流产沙对比研究

张文博¹, 吕佼容², 谢永生^{1,2}, 骆汉^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过室内模拟降雨试验, 研究了二维平面和三维锥状两种堆积体坡面在不同砾石含量条件下的产流产沙特征。结果表明: (1) 坡面流速和单位面积径流率随产流时间呈“快速增大—缓慢增大—稳定波动”的变化过程; (2) 平均流速和单位面积平均径流率随砾石含量的增加而减小; 砾石含量相同时, 二维平面坡面的流速和径流率大于三维锥状坡面; (3) 二维平面坡面剥蚀率随产流时间呈“稳定—减小—稳定波动”的变化过程; 三维锥状坡面剥蚀率呈“增大—稳定波动”的变化过程; (4) 单位面积侵蚀量随砾石含量的增加先增大后减小; 砾石含量相同时, 二维平面坡面的侵蚀量大于三维锥状坡面。

关键词: 工程堆积体; 堆积形态; 砾石; 降雨

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2020)03-0049-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.03.008

Comparative Study on Runoff and Sediment Yielding in Different Morphological Engineering Accumulations

ZHANG Wenbo¹, LÜ Jiaorong², XIE Yongsheng^{1,2}, LUO Han^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In this paper, the characteristics of runoff and sediment yield of two-dimensional plane and three-dimensional cone-shaped slopes under different gravel contents were studied through the indoor simulated rainfall test. The results showed that: (1) The slope velocity and runoff rate per unit area showed a trend of “rapid increase, slow increase and stable fluctuation” with the runoff time. (2) The average flow velocity and average runoff rate per unit area decreased with the increase of gravel contents. When the gravel content was the same, the velocity and runoff rate of two-dimensional plane slope were larger than those of three-dimensional cone slope. (3) The denudation rate of two-dimensional plane slope presented a change process of “stable, decreasing and stable fluctuation” with the runoff time. The denudation rate of three-dimensional cone-shaped slope presented a process of “augmented, stable fluctuation”. (4) The amount of erosion per unit area increased first and then decreased with the increase of gravel contents. With the same gravel content, the erosion amount of two-dimensional plane slope was larger than that of three-dimensional cone slope.

Keywords: engineering accumulations; accumulation body morphology; gravel; rainfall

工程堆积体是由生产建设活动产生的弃土、弃渣等混合而成的松散土石混合物, 具有组成物质复杂、结构分散、边坡陡、抗冲性差等特点^[1]。因其形成方式及物质组成的特殊性, 工程堆积体外部形态及侵蚀特征与原生地貌差异较大^[2], 在降雨过程中极易引发强烈的土壤侵蚀, 现已成为生产建设项目新增水土流失的主要来源之一^[3]。

砾石的存在会改变堆积体坡面形态特征及土壤

理化性质, 进而影响坡面水文过程和侵蚀特性^[4]。针对含砾石堆积体坡面侵蚀产沙特征, 已有学者从坡面入渗^[5]、产流产沙^[4]及水动力学特性^[6]等方面展开大量试验研究。康宏亮等^[7]、史倩华等^[8]、李建明等^[9]研究表明, 土壤中砾石的存在具有显著的减沙效应, 但对产流量的影响存在差异: 风沙土^[7]和红壤^[8]堆积体坡面产流量随砾石含量增加先减小后增大, 在10%砾石含量处存在阈值, 壤土质^[9]堆积体坡面产流

收稿日期: 2019-11-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(41601300)

第一作者: 张文博(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: wbzhang96@163.com

通信作者: 谢永生(1960—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: ysxie@ms.iswc.ac.cn

骆汉(1985—), 男, 硕士生导师, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: hanl@ms.iswc.ac.cn

量受砾石含量影响较小。坡面产流产沙特征主要取决于其径流的水动力学特性^[10],通过对两者关系的研究有助于深入分析坡面水蚀过程及侵蚀机理,张乐涛等^[6]、牛耀彬等^[11]研究认为,土壤剥蚀率和径流功率之间存在良好的线性函数关系,径流功率是描述土壤侵蚀过程的最佳参数,是坡面侵蚀的动力根源;史冬梅等^[12]认为,径流剪切力可用来描述黄沙壤和紫色土的坡面剥蚀率;刘俊娥等^[13]认为,过水断面单位能是与土壤剥蚀率关系最好的水动力学参数。可见,不同土壤类型、砾石含量条件下对土壤剥蚀率与水动力学参数关系的描述上存在差异,且以往研究大多是选取矩形土槽装填坡面来模拟堆积体下垫面进行试验,即研究的是二维平面坡面的侵蚀特征,而野外实际工程堆积体往往具有独特的三维立体结构^[14],其表面为类似于锥体表面的曲面,二者形态的差异会使坡面径流运移路径及径流能量的分配发生改变^[15],进而影响坡面侵蚀特征。目前仅有部分研究^[16-17]对具有锥状形态堆积体坡面的产流产沙特征进行了研究,但其所模拟的堆积体尺寸较小、坡长较短,坡面侵蚀以面蚀为主,未涉及沟蚀阶段的侵蚀特征。

基于此,本研究通过室内模拟降雨试验,利用矩形土槽和堆积平台分别模拟二维平面和三维锥状堆积体坡面,研究 2 种形态坡面在产流产沙等方面的异同,以探究堆积体形态对侵蚀特征的影响。

1 材料与方 法

1.1 试验装置与材料

试验于 2017 年 5—9 月在中国科学院水土保持研究所人工模拟降雨大厅下喷区进行,采用 2 种装置来模拟不同形态堆积体坡面。二维平面堆积体坡面采用坡度可调的矩形钢槽(长 4.2 m、宽 1 m、高 0.5 m)装填土壤进行模拟,见图 1(a)。设计土槽装土厚度为 40 cm,底层 10 cm 纯土夯实,容重为 1.5 g/cm³左右;上层 30 cm 采用传送带将土石混合体送至钢槽上方后自由落下,对其表面进行刮平处理,坡面土壤容重为 1.04~1.10 g/cm³。装填完成后静置 24 h 待槽内土石自然沉降后开始试验,试验时坡度调为 33°。三维锥状堆积体坡面采用一正方形堆积平台(3.5 m×3.5 m)进行模拟,其中两邻边设有直角三角形挡板(长 3.5 m×高 2.5 m),另外两邻边设有倾斜的集流槽与出水口相连,见图 1(b)。试验时利用传送带将土石混合体送至平台上方后自由落下,经人工微调后形成底边半径 3.5 m,坡长 4.2 m,坡度(33±1)°的 1/4 锥状堆积体坡面,坡面土壤容重为 1.04~1.10 g/cm³。装填完成后静置 24 h 待堆积体

坡面土石自然沉降后开始试验。

试验所用土壤为取自江西南昌的红壤,按国际土壤质地划分为黏土。经分析测定该土壤中颗粒的组成为:土壤粒径为<0.002,0.002~0.02,0.02~0.05,0.05~0.25,0.25~0.5,0.5~2 mm 的质量百分含量依次为 19.66%,37.96%,18.68%,18.36%,5.13%,0.31%;装土前将土壤过 10 mm 筛,并通过均匀洒水或阴干的方法确保土壤含水率保持在 13%~15%。试验所用砾石为陕西杨凌周边采石场的硅质石灰岩,直径 2~3 cm,呈不规则多面体形状,为常见的工程建设砾石。



图 1 二维平面堆积体坡面(a)和三维锥状堆积体坡面(b)

1.2 试验方法

试验采用室内人工模拟降雨的方法进行,设置 2 种堆积体坡面,根据江西省小时降雨特征选取 1.5 mm/min 为本试验控制雨强,结合堆积体野外调查结果^[12]设计 0,10%,20%,30%,40% 5 个砾石含量(质量百分数),各处理重复试验 2 次,共计 20 场次降雨。试验开始前先用塑料布将装填好的堆积体遮盖,多点率定雨强至 1.5 mm/min,控制误差不超过 5%。待雨强稳定后迅速揭开塑料布并开始计时,当坡面水流由上而下呈层流状流至出水口时视为产流开始,记录产流时间并重新计时进行试验观测。产流后前 3 min 每隔 1 min 接 1 次径流泥沙样,之后每隔 3 min 接 1 次泥沙样,试验历时 60 min。在坡面上距离坡顶 0.5~3.5 m 处由上至下分设 3 个 1 m 长的观测坡段,在接样同时用高锰酸钾染色法测定 3 个断面的流速,其平均值为此时此刻堆积体坡面流速。降雨结束后将泥沙样烘干(105 °C)至恒重后称重,获得泥沙重量。

1.3 数据处理

(1)土壤剥蚀率(Dr):坡面径流在单位时间以及单位面积上所运移的泥沙总量,计算公式为:

$$Dr = \frac{M}{S \cdot t}$$

式中: Dr 为土壤剥蚀率(g/(m²·s)); M 为测量时段(t)内的产沙量(g); S 为堆积体坡面的面积(m²)。

(2)径流剪切力(τ):即径流冲刷力,是引起坡面土壤颗粒分离并输移的主要动力。计算公式为:

$$\tau = \gamma_m \cdot g \cdot R \cdot J$$

式中: τ 为径流剪切力(Pa 或(N/m²)); γ_m 为浑水密度

(kg/m^3),可通过径流含沙量进行单位换算获得; g 为重力加速度($9.8 \text{ m}/\text{s}^2$); R 为水力半径(m),本试验条件下可近似用水深 h 代替; J 为水力能坡, $J=(L \cdot \sin \theta - (V^2/2g))/L$ (m/m); L 为坡长; θ 为坡度。

(3)径流功率(w):水流作用于单位面积上的土体所消耗的功率,计算公式为:

$$w = \tau \cdot V$$

式中: w 为水流功率($\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$); V 为坡面径流平均流速(m/s)。

(4)过水断面单位能(E):以过水断面最低点做基准面的单位水重的动能和势能之和,计算公式为:

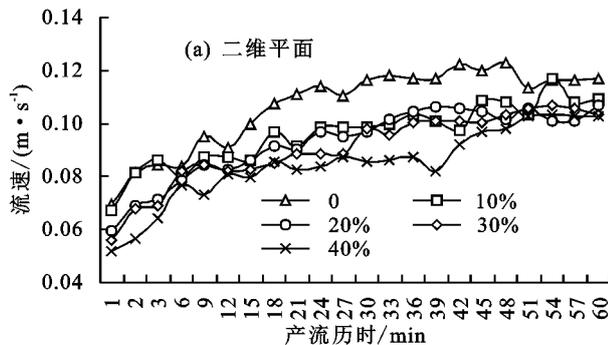
$$E = \frac{a \cdot V^2}{2g} + h$$

式中: E 为过水断面单位能(m); a 为校正系数,取为1; h 为径流深度(m)。

(5)土壤可蚀性参数(K_r):反映土壤可蚀性的程度, K_r 较大时,土壤颗粒更易被坡面径流所剥离,水流中含沙量增高,输沙能力很快达到饱和,反之亦然。在 WEEP 侵蚀预报模型对坡面侵蚀的研究中,土壤开始被水流剥离时,最大可能剥蚀率 D_c 可表示为:

$$D_c = K_r \cdot (\tau - \tau_c)$$

式中: K_r 为土壤可蚀性参数(s/m); D_c 为最大可能



剥蚀率($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); τ 和 τ_c 分别为径流最大剪切力和土壤临界抗剪切应力(Pa)。

2 结果与分析

2.1 堆积体坡面径流特征

2.1.1 坡面流速的变化 试验条件下,2种形态坡面流速随产流时间呈先快速增大后缓慢增加至稳定波动的变化(图2)。二维平面坡面流速在产流后0~9 min内快速增大,之后缓慢波动增加,在产流30~48 min后趋于稳定,流速在0.052~0.123 m/s范围变化,变异系数为0.122~0.168;对于三维锥状坡面,纯土体坡面流速随产流时间持续增大,各含砾石坡面流速在产流15~21 min后逐渐趋于稳定波动,流速在0.044~0.091 m/s范围变化,变异系数为0.070~0.133。同一砾石含量条件下,二维平面坡面流速较大,是三维锥状坡面的1.35~1.48倍;在同一坡面形态下,各砾石含量(0~40%)坡面平均流速分别为0.079~0.107,0.068~0.096,0.064~0.093,0.063~0.090,0.057~0.085 m/s,坡面流速随砾石含量的增加呈减小趋势,含砾石坡面流速是纯土体坡面的0.73~0.90倍。相关性分析表明,堆积体形态与坡面流速之间显著相关,对其的影响大于砾石含量的影响。

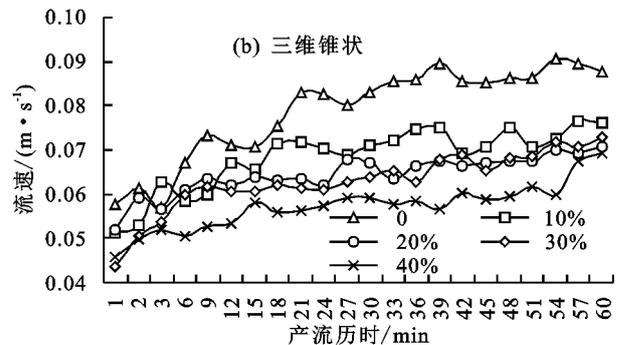


图2 坡面流速随产流时间的变化

2.1.2 单位面积径流率的变化 由图3可知,试验条件下堆积体坡面单位面积径流率随产流时间呈先快速增大后趋于稳定波动的变化趋势。二维平面坡面径流率在产流后12~27 min内增大,之后稳定波动;三维锥状堆积体坡面径流率在产流后9~15 min内快速增大,之后稳定波动,在同一砾石含量条件下,三维锥状坡面较二维平面坡面径流率增长的时间缩短,趋于稳定的时间提前;二维平面坡面单位面积径流率变化范围为0.85~1.69 $\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,三维锥状坡面的变化范围为0.62~1.20 $\text{L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$,当砾石含量相同时,二维平面坡面单位面积径流率大于三维锥状坡面,是其1.25~1.42倍。在同一形态坡面下,砾石含量变化对单位面积径流率增长速率的影响不大,但径流率随砾石含量的增加而减小,含砾石坡面单位面积径流率是纯土体坡面的0.80~0.98倍。相关性分析表明,堆积体形态对坡面径

流率的作用大于砾石含量的影响。

2.2 堆积体坡面产沙特征

2.2.1 剥蚀率的变化 各处理条件下坡面剥蚀率随产流时间的变化过程见图4。二维平面坡面剥蚀率在产流开始后3~6 min内保持稳定,之后开始减小,在产流27~42 min后稳定波动,剥蚀率随产流时间呈“稳定—减小—稳定波动”的变化过程,剥蚀率开始减小和达到稳定的时间随砾石含量的增加而提前,且随着砾石含量的增加坡面剥蚀率先增大后减小,在30%处存在阈值;三维锥状坡面剥蚀率在产流开始后12~30 min内增大,之后趋于稳定波动,剥蚀率随产流时间呈“增大—稳定波动”的变化趋势,剥蚀率随砾石含量的增加先增大后减小,在20%处存在阈值。当砾石含量相同时,二维平面坡面的平均剥蚀率大于三维锥状坡面,是其1.21~2.30倍。

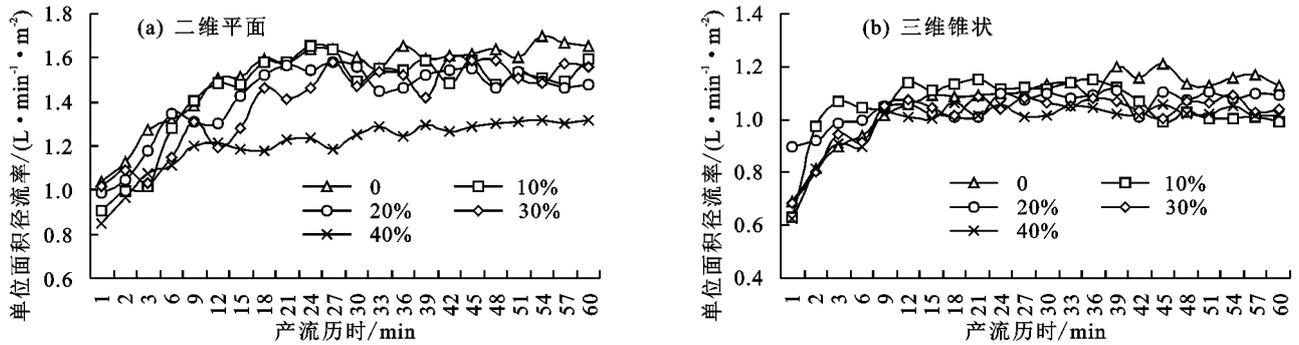


图 3 单位面积径流率随产流时间的变化

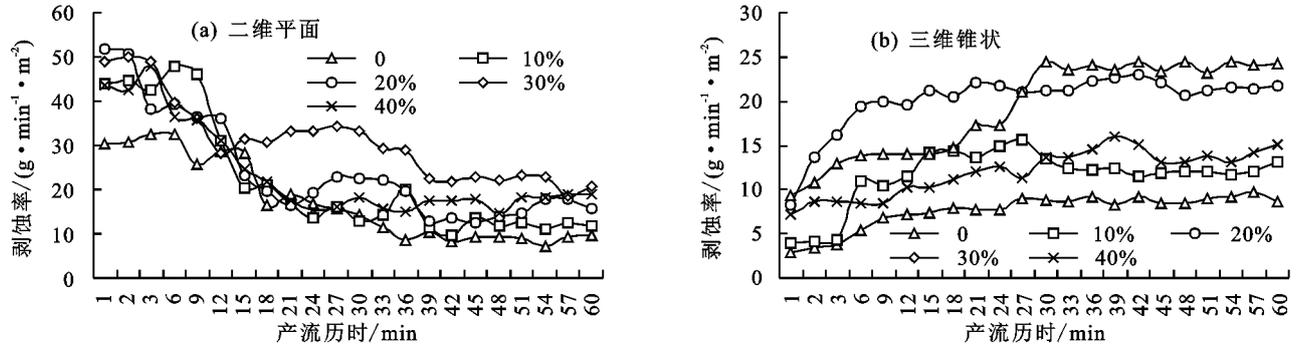


图 4 坡面剥蚀率随产流时间的变化

为分析堆积体形态、砾石含量这 2 个因素对坡面剥蚀率的影响,现对降雨中后期较为稳定阶段的剥蚀率进行单因素方差分析,结果见表 1。可知堆积体形态对剥蚀率具有极显著的影响 ($P < 0.01$),堆积体形

态对剥蚀率的贡献率为 63.83%,砾石含量对其的贡献率为 36.17%,因此在试验条件下,堆积体形态对剥蚀率大小起决定性作用,而砾石含量对剥蚀率的影响相对较小。

表 1 堆积体形态、砾石含量对剥蚀率影响的显著性分析

变量	来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著性	因子贡献率/%
剥蚀率	堆积体形态	231.040	1	231.040	48.705	0.002	63.83
	砾石含量	192.570	4	48.705	10.149	0.023	36.17
	误差	18.975		48.142			
	总计	4015.471					

2.2.2 单位面积侵蚀量的变化 试验条件下堆积体坡面单位面积侵蚀量的变化特征见图 5。就砾石含量对侵蚀量的影响而言,同一形态坡面下单位面积侵蚀量随砾石含量的增加先增大后减小,砾石的存在可促进坡面产沙。由图 5 可知,二维平面坡面单位面积侵蚀量从大到小所对应的的砾石含量依次为 30% > 20% > 40% > 10% > 0,其坡面侵蚀量分别是纯土坡面的 1.66,1.45,1.23,1.14 倍;三维锥状坡面单位面积侵蚀量从大到小所对应的的砾石含量依次为 20% > 30% > 40% > 10% > 0,坡面侵蚀量分别是纯土坡面的 2.27,2.20,1.37,1.36 倍。即砾石含量对侵蚀量的影响存在阈值,二维平面坡面在 30%砾石含量时存在阈值,三维锥状坡面在 20%处存在阈值。当砾石含量相同时,二维平面坡面单位面积侵蚀量是三维锥状坡面的 1.25~1.94 倍,坡面形态与侵蚀量之间的相关系数为 0.677 ($P < 0.05$),坡面形态与侵蚀量之间显著性相关。

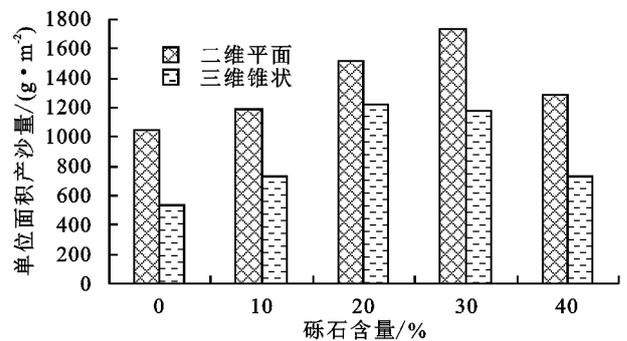


图 5 单位面积侵蚀量随砾石含量的变化

2.3 堆积体坡面流水动力学特征

坡面水动力学特性变化规律是阐明坡面土壤侵蚀过程的基础,点绘试验条件下径流剪切力、径流功率、过水断面单位能与剥蚀率之间的关系,见图 6~8。由图可知,堆积体坡面剥蚀率与各水动力学参数之间均可用线性函数关系描述,分析各水动力学参数与剥蚀率的控制方程,可知坡面形态的不同会对堆积体侵蚀临界值和可蚀性参数产生影响。试验条件下,二维平面

和三维锥状坡面发生侵蚀的坡面临界剪切力分别为 4.04×10^{-3} , 5.85×10^{-3} Pa, 相应的土壤可蚀性参数分别为 4.15, 3.40 s/m; 临界径流功率分别为 8.19×10^{-4} , 1.08×10^{-3} N/(m·s), 相应的土壤可蚀性参数分别为 56.30, 48.50 s^2/m^2 ; 临界过水断面单位能分别为 7.46×10^{-4} , 1.02×10^{-3} m, 相应的土壤可蚀性参数分别为 879.30, 596.60 $\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。三维锥状坡面与二维平面坡面相比, 侵蚀临界动力参数增大, 土壤可蚀性参数降低, 土壤抗径流冲刷能力增强, 即在相同条件下, 二维平面坡面较三维锥状坡面更易被径流冲刷侵蚀。分析各相关方程可知, 试验条件下土壤剥蚀率与各水动力学参数之间均有良好的线性函数关系, 就方程拟合结果而言, $r(\text{径流功率}) > r(\text{径流剪切力}) > r(\text{过水断面单位能})$, 即径流功率是描述堆积体坡面侵蚀过程的最佳水动力学参数。

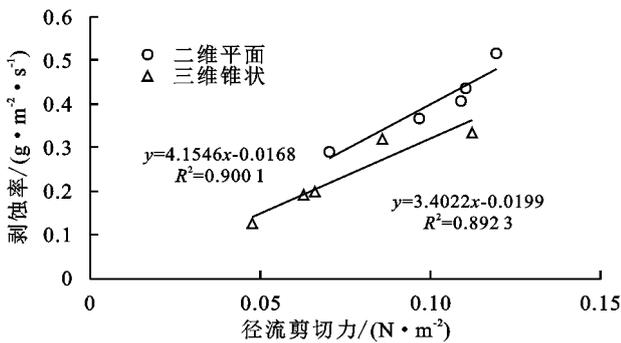


图 6 堆积体剥蚀率与径流剪切力的关系

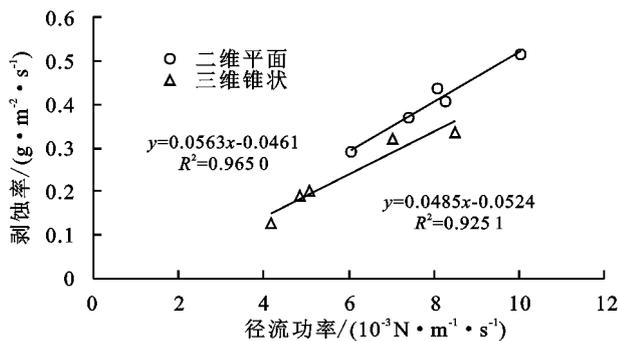


图 7 堆积体剥蚀率与径流功率的关系

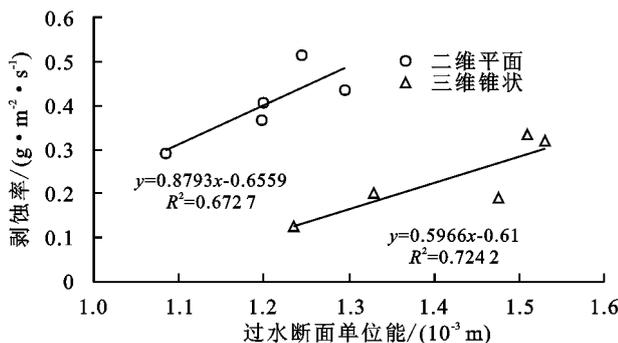


图 8 堆积体剥蚀率与过水断面单位能的关系

3 讨论

本研究通过室内模拟降雨试验研究了二维平面

和三维锥状 2 种形态坡面在降雨过程中的产流产沙特征。

就产流特征而言, 试验条件下坡面流速(图 2)和单位面积径流率(图 3)随产流时间呈先增加后稳定波动的变化趋势, 这一变化过程与相关学者^[3,8]的研究结果相近。分析认为, 在产流初期土壤含水率较低, 降雨消耗于入渗后形成径流, 随着降雨持续坡面土壤入渗率开始减小、产流增加, 坡面流速和径流率也随之增大^[3]; 之后坡面表层土壤水分趋于饱和并向下层运移, 同时坡面结皮的形成也阻碍了大面积侵蚀的发生, 坡面入渗逐渐稳定, 流速和径流率也趋于稳定。混入土壤的砾石可通过改变土体入渗能力、坡面粗糙度及坡面形态等^[5]影响坡面产流特征。试验条件下, 堆积体坡面流速和单位面积径流率随砾石含量的增加而减小, 这与李建明等^[9]的研究结果相似, 这是因为砾石的存在使得土壤孔隙度增大、坡面入渗增加, 导致径流量减小, 同时砾石增加了坡面粗糙度, 延长坡面径流运移路径、分散径流动能, 两方面的作用使得流速和径流率随砾石含量的增加而减小。堆积体坡面产流不仅与砾石含量相关, 还受坡面形态的影响。三维锥状坡面“上尖下圆”的扇形曲面与二维平面坡面的矩形相比, 上方汇水面积减小, 同时径流向下游流动时沿坡面两侧分散的趋势加剧, 使得三维锥状坡面与二维平面坡面相比径流的汇集作用降低、径流动能减小, 导致坡面流从急流转变为缓流, 坡面流速与径流率也减小。

就产沙特征而言, 2 种形态坡面剥蚀率随产流时间的变化过程存在较大差异(图 4), 二维平面坡面剥蚀率随产流时间呈“稳定—减小—稳定波动”的变化趋势, 与王仁新等^[18]利用土槽装填模拟坡面的研究结果相似。这是因为产流初期坡面土壤含水量小、土壤粘结性较弱, 径流可迅速将坡面表层分散的土粒冲刷带走, 坡面剥蚀率较大; 随着降雨持续, 坡面易被侵蚀的细小颗粒逐渐减少, 而大颗粒不易被冲刷带走, 同时坡面结皮的形成增强了土壤抗蚀能力, 此时剥蚀率呈减小趋势; 最终土壤含水率趋于饱和, 坡面径流稳定, 径流侵蚀力和土壤抗蚀力达到相对平衡, 剥蚀率呈稳定波动状态^[19]。而三维锥状坡面剥蚀率随产流时间呈“增大—稳定波动”的变化趋势。分析认为, 锥状曲面分散坡面径流, 在产流初期坡面径流侵蚀力较小, 随着降雨持续, 径流侵蚀力随径流能量的增加而增大, 此时剥蚀率呈增加趋势; 之后坡面径流达到稳定阶段, 径流侵蚀力不再增大, 剥蚀率趋于稳定, 这一过程与戎玉博等^[19]对锥状堆积体坡面侵蚀速率的

研究结果相近。

试验条件下,单位面积侵蚀量随砾石含量的增加先增大后减小,砾石的存在可促进坡面产沙(图5)。这是因为红壤黏粒较多,在降雨过程中极易形成一层致密的结皮层防止雨滴击溅与径流冲刷对坡面的侵蚀,而砾石的存在会破坏土表结构、降低土壤颗粒间的黏结强度,同时坡面结皮层的形成难度增大、强度降低,导致坡面土壤可蚀性增强,侵蚀量随之增大^[20];当砾石含量进一步增加超过某一阈值时,坡面易蚀性土壤颗粒减少、裸露砾石形成保护层增强坡面抗蚀性和抗冲性,减缓侵蚀^[7],两方面的作用使得堆积体侵蚀量随着砾石含量的增加而减小。而当砾石含量相同时,二维平面坡面侵蚀量大于三维锥状坡面,坡面形态的差异会导致侵蚀量不同。分析认为,二维平面较三维锥状坡面更易形成动能较大的集中流,径流的紊动性也较大,所以径流剥蚀及挟沙能力也更强^[21];且三维锥状坡面阻力系数较大,与二维平面坡面相比径流用于克服阻力所消耗的能量增加、用于侵蚀和泥沙输移的能量减小^[22],土壤侵蚀力较弱,所以在相同条件下,二维平面坡面更易被径流冲刷侵蚀。

4 结论

(1)坡面流速和单位面积径流率均随产流时间呈“快速增大—缓慢增大—稳定波动”的变化过程,坡面形态对两者的影响大于砾石含量的影响;

(2)平均流速和单位面积平均径流率随砾石含量的增加而减小;砾石含量相同时,二维平面坡面的流速和径流率大于三维锥状坡面;

(3)二维平面坡面剥蚀率随产流时间呈“稳定—减小—稳定波动”的变化过程;三维锥状坡面剥蚀率随产流时间呈“增大—稳定波动”的变化过程;

(4)单位面积侵蚀量随砾石含量的增加先增大后减小;砾石含量相同时,二维平面坡面的侵蚀量大于三维锥状坡面。

参考文献:

[1] 丁文斌,史冬梅,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.

[2] 高儒学,戴全厚,甘艺贤,等.土石混合堆积体坡面土壤侵蚀研究进展[J].水土保持学报,2018,32(6):1-8.

[3] 戎玉博,白玉洁,王森,等.含砾石锥状工程堆积体坡面径流侵蚀特征[J].水土保持学报,2018,32(1):109-115.

[4] 陈卓鑫,王文龙,康宏亮,等.砾石对红壤工程堆积体边坡径流产沙的影响[J].生态学报,2019,39(17):1-12.

[5] 吕佼容,张文博,胡锦涛,等.连续降雨条件下不同砾石含量工程堆积体土壤侵蚀[J].水科学进展,2019,30(2):210-219.

[6] 张乐涛,高照良,田红卫.工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J].农业工程学报,2013,29(24):94-102.

[7] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.陕北风沙区含砾石工程堆积体坡面产流产沙试验[J].水科学进展,2016,27(2):256-265.

[8] 史倩华,王文龙,郭明明,等.模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J].应用生态学报,2015,26(9):2673-2680.

[9] 李建明,王文龙,黄鹏飞,等.黄土区生产建设工程堆积体石砾对侵蚀产沙影响[J].泥沙研究,2014(4):10-17.

[10] 张光辉.坡面水蚀过程水动力学研究进展[J].水科学进展,2001,12(3):395-402.

[11] 牛耀彬,高照良,刘子壮,等.工程措施条件下堆积体坡面土壤侵蚀水动力学特性[J].中国水土保持科学,2015,13(6):105-111.

[12] 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.

[13] 刘俊娥,王占礼,高素娟,等.黄土坡面片蚀过程动力学机理试验研究[J].农业工程学报,2012,28(7):144-149.

[14] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体的类型与特征[J].中国水土保持科学,2013,11(1):88-94.

[15] 王雪松,申卫博,谢永生,等.赣北地区工程堆积体侵蚀水动力机理研究[J].水力发电学报,2015,34(11):59-68.

[16] 王雪松,谢永生.模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水动力特征[J].农业工程学报,2015,31(1):117-124.

[17] 景民晓,谢永生,李文华.不同土石比例弃土堆置体产流产沙模拟研究[J].水土保持学报,2014,28(3):78-82.

[18] 王仁新,何丙辉,李天阳,等.汶川震区滑坡堆积体坡面土壤和侵蚀率及水动力学参数研究[J].土壤学报,2016,53(2):375-386.

[19] 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.

[20] 王雪松,谢永生,陈曦,等.砾石对赣北红土工程锥状工程堆积体侵蚀规律的影响[J].泥沙研究,2015(1):67-74.

[21] 李朝栋,李占斌,马建业,等.不同长度小麦秸秆覆盖下黄土耕地坡面流水动力学特性[J].农业工程学报,2017,33(4):153-160.

[22] 张洋,李占斌,王飞,等.坡沟系统水动力因子的坡长效应研究[J].水土保持学报,2018,32(2):97-103.