

# 含砾石锥状工程堆积体侵蚀水动力学特性和细沟形态特征

戎玉博<sup>1</sup>, 王森<sup>2</sup>, 白玉洁<sup>1</sup>, 骆汉<sup>1,2</sup>, 谢永生<sup>1,2</sup>, 王爱娟<sup>3</sup>

(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; 3. 水利部水土保持监测中心, 北京 100053)

**摘要:** 采用人工模拟降雨的方法, 以陕西关中地区的重质土壤和工程中常见的破口石为试验材料, 模拟散乱锥状工程堆积体的堆积过程和堆积形态, 研究了不同砾石质量含量(0, 10%, 20%, 30%, 40%)散乱锥状工程堆积体在不同降雨强度下(1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm/min)的侵蚀水动力学特性和细沟形态特征。结果表明: (1) 流速和径流强度随雨强的增加而增大, 随砾石含量的增加而减小, 雨强和砾石对两者均有显著影响, 其中雨强的影响较大, 起控制性作用; (2) 坡面径流处于层流、缓流的状态, 雷诺数和弗劳德数随雨强的增加而增大, 随砾石含量的增加而减小; (3) 剥蚀率随雨强的增加呈指数型增大, 相同降雨强度下, 随砾石含量的增加线性减小, 径流剪切力、水流功率、单位水流功率、过水断面单位能与剥蚀率显著相关且呈幂函数的关系, 其中水流功率相关性最好, 拟合优度最高, 是描述侵蚀动力机制的最优因子; (4) 随着降雨强度的增加, 细沟出现的时间提前, 沟宽、沟深、沟长和细沟密度逐渐增加, 雨强相同时, 随着砾石含量的增加, 细沟出现的时间推迟, 且逐渐变窄、变浅, 细沟下切侵蚀减弱。

**关键词:** 工程堆积体; 砾石; 降雨; 侵蚀; 水动力学; 细沟

**中图分类号:** S157.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2018)02-0134-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.020

## Characteristics of Hydrodynamics and Rill Morphology of Tapered Engineering Piles with Gravel

RONG Yubo<sup>1</sup>, WANG Sen<sup>2</sup>, BAI Yujie<sup>1</sup>, LUO han<sup>1,2</sup>, XIE Yongsheng<sup>1,2</sup>, WANG Aijuan<sup>3</sup>

(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; 3. The Center of Soil and Water Conservation Monitoring, Beijing 100053)

**Abstract:** Engineering piles is a special man-made geomorphic unit and has been found much more serious in soil erosion. The studying of hydrodynamic process in the engineering piles is of great necessity, for the engineering piles with three-dimensional is quite different from the traditional slope. In this paper, a self-made platform was used to simulate the three-dimensional pyramidal engineering piles and an indoor artificially simulated rainfall experiment was carried out under different rainfall intensities (1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm/min) to study the hydrodynamic process and shape characteristics of rills of engineering piles with different mass percentage of gravel (0, 10%, 20%, 30%, 40%). The results showed that: (1) Flow velocity and runoff intensity increased with the increase of rain intensities and decreased with the increase of gravel contents. Both the rainfall intensity and gravel contents had the significant influences on flow velocity and runoff intensity, and the influence of rainfall intensity was greater. (2) The runoff was in the laminar and subcritical flow state, and Reynolds number and Froude number increased with the increase of rain intensities and decreased with the increase of gravel contents. (3) Erosion detachment rate increased exponentially with the increase of rainfall intensities, and decreased linearly with the increase of gravel contents, there were significant power function relationships between erosion detachment rate and shear stress, stream power, unit flow power and unit energy of water-carrying, among which stream power had the best relationship, indicating it was the optimal factor to

收稿日期: 2017-10-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(41601300); 西部青年学者 B 类项目(XAB2015B06); 西北农林科技大学基本科研业务费项目(2452016107); 水利部综合事业局拔尖人才项目

第一作者: 戎玉博(1992—), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: 953830328@qq.com

通信作者: 骆汉(1985—), 男, 助理研究员, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: hanl@iswc.ac.cn

describe soil erosion. (4) The rill occurring time advanced and the length, width, depth of rill increased with rainfall intensities increasing, while the rill occurring time was delayed, the depth and width of rill decreased gradually with the increase of gravel contents under the same rainfall intensity.

**Keywords:** engineering piles; gravel; rainfall intensity; erosion; hydrodynamic; rill

中国是世界上水土流失最为严重的国家之一,水土流失是坡面物质和径流相互作用的结果,而径流是坡面产生侵蚀的主导因素,侵蚀产沙量和产沙特征主要取决于径流水动力学特性<sup>[1]</sup>,因此深入了解坡面侵蚀水动力学特性是研究坡面侵蚀特征和规律的前提和基础。作为人为水土流失最为严重的地貌单元<sup>[2]</sup>,工程堆积体是一种典型的由土壤、不同粒径碎石以不同比例组成的松散土石混合物,其坡面组成物质结构不均匀、土质松散、植物根系与有机质缺乏、抗蚀抗冲性差<sup>[3]</sup>,且由于土石混合物各组分在外力荷载作用下差异较大,相互之间存在着极其复杂的相互作用,其坡面的侵蚀水动力学特性与原生地貌有着很大的差异。目前,已有学者对工程堆积体坡面的水动力学特性进行了研究,张乐涛等<sup>[4]</sup>、李永红等<sup>[5]</sup>采用原位放水冲刷试验的方法对工程堆积体坡面土壤侵蚀水动力学特性进行了研究;李宏伟等<sup>[6]</sup>采用人工模拟降雨试验的方法对含砾石的黄绵土工程堆积体坡面水动力学参数及其产沙效应进行了研究;康宏亮等<sup>[7]</sup>研究了北方风沙区砾石对工程堆积体坡面径流水动力学特性的影响。然而上述学者的研究主要采用室外径流小区和室内人工装填土槽的方法对工程堆积体下垫面进行模拟,即以某一矩形坡面作为研究对象,研究尺度依然停留在“面”的尺度上,而赵暄等<sup>[8]</sup>的研究表明野外真实的工程堆积体,尤其是点状工程所形成的堆积体具有特定的三维立体形态,坡面形态的差异使得降雨能量在坡面各个部位分配的比重和坡面的径流路径发生改变,从而导致工程堆积体坡面与传统方法所形成的矩形平面的侵蚀水动力学特性有很大的区别。对此王雪松等<sup>[9-10]</sup>利用自制的堆积平台采用正态比尺缩小的方法对散乱锥状工程堆积体进行仿真模拟,研究了赣北红土区锥状工程堆积体坡面的侵蚀水动力学特性,但其所研究的堆积体体积较小,坡长较短,由于坡长的限制,坡面水流为薄层流,侵蚀方式为面蚀,并不能真实反映野外工程堆积体在暴雨条件下由面蚀到沟蚀的侵蚀发育过程,研究结果具有一定的局限性。

综上所述,目前大多数学者对工程堆积体的研究忽略了形态因素的影响,即使已有学者考虑到了形态的影响,但所研究的堆积体坡长较小,无法准确反映野外堆积体真实的侵蚀过程。鉴于此,作者结合前人的调查资料,利用自制的堆积平台对野外堆积体下垫面进行

1:1 仿真模拟,研究了含砾石锥状工程堆积体在不同降雨条件下的侵蚀水动力学特性及细沟形态特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 堆积形态

根据赵暄等<sup>[8]</sup>对生产建设项目弃土堆积体概化的结果,以点状工程中最常见的散乱锥状工程堆积体为研究对象。散乱锥状工程堆积体为圆底尖顶,形态近似锥状的弃土堆,坡度为自然休止角,组成物质为土石混合物,常见于规模较小的点状工程中,一般多由小型挖掘机等机械设备在施工现场周围随意堆置,或用小型后卸式卡车经短途运输后倾倒入堆置,堆积基底一般为较平坦的自然地面。野外工程堆积体示意图 1(a)。

### 1.2 堆积平台

试验平台为一自制的正方形钢制平台,平台的有效堆积面积为  $3.5\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 。在正方形平台两邻边竖立两面底边长  $3.5\text{ m}$ 、高为  $2.5\text{ m}$  的直角三角形钢板。平台另外两边设有倾斜的排水沟槽,平台底部略微倾斜( $5^\circ$ )并与出水口相连,以保证径流和泥沙及时排出。关中平原地区近 80% 的弃土堆积体坡长集中在  $2.5\sim 5.5\text{ m}$ <sup>[11]</sup>,坡度为堆置作业结束后岩土的自然休止角。结合试验平台条件,设计堆积体坡长为  $4.2\text{ m}$ ,坡度为土石混合体的自然休止角,为了还原野外堆积体的形成过程,利用传送带将土石混合物运送到  $2.8\text{ m}$  的高度处后自然堆置而下,由于平台两侧有钢板的阻隔,堆积体成  $1/4$  锥体的形状,堆置作业结束后人工进行微调以实现真实堆积体的仿真模拟,最终堆积体斜坡长  $4.2\text{ m}$ ,半径  $3.5\text{ m}$ ,坡度为其自然休止角(实测值为  $(33 \pm 1)^\circ$ )。装土之前,在试验平台钢板内侧贴几层纱布,以减少边缘效应对试验结果的影响,堆积平台及堆积体示意图 1(b)。

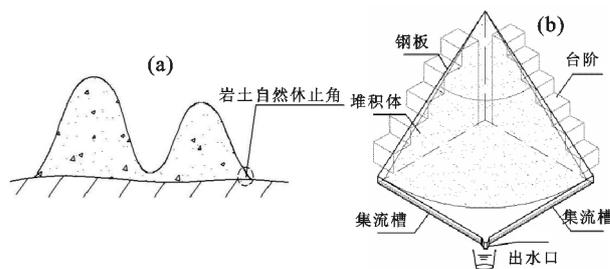


图1 野外堆积体形态及试验平台示意

### 1.3 试验材料

试验所用土壤为取自陕西杨凌的重质土壤,按国际制质地划分为粉黏土质地,是褐土经人为长期耕

种,施肥熟化所形成的农业土壤,天然孔隙较小,粒间结合力小,稳定性差,容易被侵蚀。以 10 mm 作为土石的分界线<sup>[12]</sup>,在试验前,将土中的杂草、块石除去,并过 10 mm 筛对土壤进行处理,利用激光粒度分析仪对土粒进行分析,土壤粒径为 2~0.5,0.5~0.25,0.25~0.10,0.10~0.05,0.05~0.01,<0.01 mm 的质量百分含量分别为 1.82%,0.41%,1.23%,9.78%,21.38%和 65.38%,土壤的有机质含量为 0.88%。由于土壤前期含水量对土壤的侵蚀状况有一定影响,试验采取阴干或洒水的方法控制土壤的含水量为 13%~15%,容重为土石混合物自然堆置而下所形成的自然容重(实测全土容重为 1.04~1.19 g/cm<sup>3</sup>)。试验所用砾石是取自陕西省周至县境内采石场的硅质石灰岩,为工程上常见的建筑用石,直径 2~3 cm,属碱性岩石,抗压能力强,具有较好的化学稳定性,呈不规则多面体形状,多棱角,表面粗糙,硬度大,吸水渗水性小,几乎不透水。试验开始前,将砾石和处理过后的土壤混合均匀,以此来模拟野外含有砾石的工程堆积体。

#### 1.4 试验方法

试验于 2016 年 7—9 月在陕西省水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅的下喷区进行,下喷区降雨高度 18 m,能够满足雨滴下落的终点速度,雨强的可调节范围为 30~350 mm/h,降雨均匀度可达 80%以上<sup>[13]</sup>,由于 90%以上的野外工程堆积体的砾石质量百分含量在 40%以下<sup>[11]</sup>,本试验设计 0,10%,20%,30%,40%共 5 个砾石质量百分含量,且根据气象资料并结合当地暴雨事件中出现的最大降雨强度,选取 1.0,1.5,2.0,2.5 mm/min 4 个具有代表性级别的雨强。试验开始前先用塑料布将堆积体进行遮盖,并在堆积体的四周及顶部 5 个位置对雨强进行率定,控制 5 个雨量筒所测雨强误差不超过 10%,率定结果与设计雨强误差不大于 5%,以保证实际降雨强度的准确性和稳定性。水流呈层流状态由上而下流至出水口时视为产流开始,记下产流时间并重新开始计时,试验共计 90 min,产流后前 3 min 每分钟接 1 次泥沙样,之后每隔 3 min 接 1 次泥沙样。在距离坡顶 0.5~1.5,1.5~2.5,2.5~3.5 m 的斜坡面上设置 3 个坡段,接样的同时,选择明显的股流,采用高锰酸钾染色法,利用精度为 0.01 s 的秒表记录水流流经各坡段所用的时间,得到径流表层流速,在表层流速的基础上乘以修正系数  $k$ <sup>[14]</sup>(层流, $k=0.67$ ;过渡流, $k=0.70$ ;紊流, $k=0.80$ )得到断面平均流速,并用测针测量径流的水深。当坡面产生细沟后,记录细沟出现时间,之后每隔 3 min 用精度为 1 mm 的刻度尺测量沟长,并沿沟长方面,每隔 5 cm 测量 1 次沟宽和

沟深,记录最大沟宽和沟深。试验结束后采用烘干法(105 °C)测量泥沙重量。

#### 1.5 数据处理

(1)雷诺数( $Re$ ):表征惯性力与黏滞力比值的无量纲参数,判断层流、紊流的定量标准,当  $Re$  小于某一临界值时,径流各流层的液体质点有条不紊,互不掺混做直线运动,称之为层流,当  $Re$  超过此临界值时,称之为紊流,计算公式为:

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu}$$

式中: $V$  为流速(m/s); $R$  为水力半径(m),对于薄层水流,可近似用水深代替; $\nu$  为水流黏滞性系数(m<sup>2</sup>/s),是水流温度的函数。

(2)弗劳德数( $Fr$ ):判别急流、缓流的定量标准,表明水流惯性力和重力的比值。当  $Fr > 1$  时,表明径流的惯性力作用超过重力,径流不断加速,为急流,反之为缓流。计算公式为:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$$

式中: $h$  为径流深度(m); $g$  为重力加速度(9.8 m/s<sup>2</sup>)。

(3)Darcy-Weisbach 阻力系数( $f$ ):沿坡面向下运动过程中受到的来自水土界面的阻滞水流运动的力的总称,计算公式为:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2}$$

式中: $J$  为水力能坡, $J = (L \cdot \sin \theta - (V^2/2g))/L$  (m/m); $L$  为坡长(m); $\theta$  为坡度(°)。

(4)径流剪切力( $\tau$ ):径流剪切力是反映径流在运动时对坡面土壤侵蚀力大小的参数,可以克服土粒之间的黏结力,使得土粒分散,从而为径流侵蚀土壤提供物质来源,计算公式为:

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

式中: $\tau$  为径流剪切力(Pa 或(N/m<sup>2</sup>)); $\gamma_m$  为浑水的密度(kg/m<sup>3</sup>),考虑了含沙量的影响。

(5)水流功率( $w$ ):水流功率表征作用于单位面积水流所消耗的功率,反映水流流动时挟沙能力的参数,计算公式为:

$$w = \tau \cdot V$$

式中: $w$  为水流功率,是水流剪切力和流速的函数,包含了水流剪切力和流速的影响(N/(m·s))。

(6)单位水流功率( $P$ ):作用于泥沙床面的单位重量水体所消耗的功率,计算式为:

$$P = V \cdot J$$

式中: $P$  为单位水流功率(m/s)。

(7)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。

(8) 土壤剥蚀率 ( $D_r$ ): 坡面单位时间单位面积上输移的泥沙总量, 计算式为:

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

式中:  $D_r$  为土壤剥蚀率( $g/(m^2 \cdot s)$ );  $M$  为测量时段

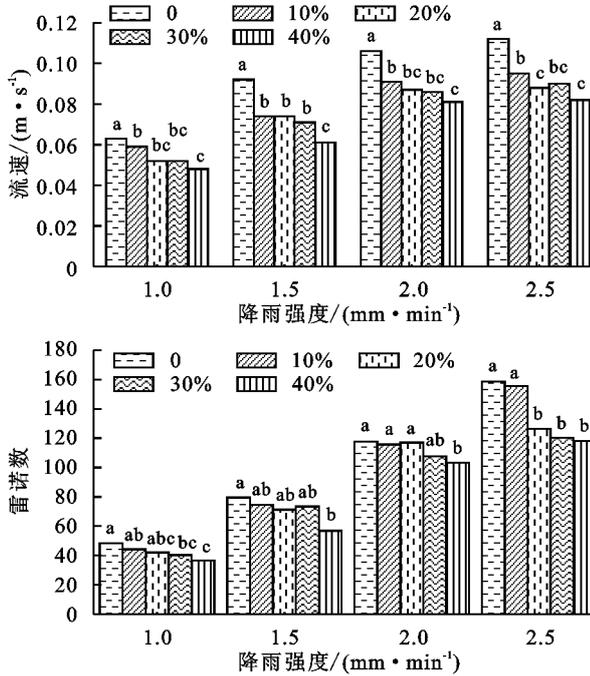


图 2 坡面径流水动力学参数变化特征

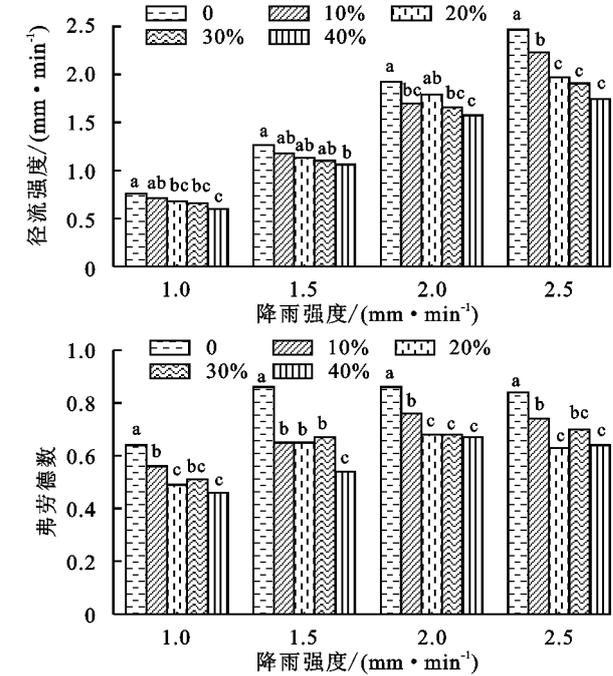
就流速和径流强度而言, 平均流速和平均径流强度随着降雨强度的增加而增大, 两者与雨强的偏相关系数分别为 0.932 和 0.982, 与雨强呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ), 雨强为 2.5 mm/min 时, 流速是其他雨强的 1.61~1.75 倍, 径流强度是其他雨强的 2.89~3.24 倍; 降雨强度相同时, 平均径流率和平均流速总体随砾石含量的增加呈减小的变化趋势, 两者与砾石含量的偏相关系数分别为 -0.808 和 -0.762 ( $p < 0.01$ )。利用 SPSS 19.0 软件对整个试验过程中的流速和径流强度进行方差分析 (表 1), 结果表明, 降雨强度和砾石含量对流速和径流强度均有显著性影响 ( $p < 0.05$ )。两两比较后发现, 各雨强条件下的流速和径流强度之间均存在显著性差异, 而当降雨强度相同时, 不同砾石含量之间流速的差异性表现为纯土坡面流速显著高于含砾石坡面流速, 40% 砾石含量坡面流速显著小于其他坡面流速, 而 10%, 20% 和 30% 砾石含量的坡面流速差异不明显; 不同砾石含量之间径流强度差异性表现为 40% 砾石含量坡面的径流强度显著小于其他坡面, 纯土坡面径流强度较其他坡面大, 但差异不明显。综上所述, 流速和径流强度随

( $t$ ) 内的产沙量 ( $g$ );  $S$  为堆积体的面积 ( $m^2$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 坡面径流水动力学特性

坡面径流水动力学特性是研究坡面土壤侵蚀过程机理的基础<sup>[15]</sup>, 表征坡面径流水动力学特性的参数主要有流速、径流强度、雷诺数和弗劳德数, 各处理条件下次降雨坡面径流水动力学参数见图 2。



降雨强度的增加而增大, 随砾石含量的增加而减小, 降雨强度对两者的影响较大, 对流速和径流强度的变化起控制性作用, 贡献率为 55.08% 和 78.19%, 砾石含量对两者影响较小, 贡献率为 14.72% 和 4.03%。

就流态和流型而言, 试验条件下雷诺数的变化范围为 36.5~158.6, 远小于 500 (明渠及河道的临界值), 坡面径流为层流状态, 弗劳德数的变化范围为 0.46~0.86, 水流惯性力小于重力, 坡面径流为缓流。平均雷诺数和平均弗劳德数与降雨强度相关系数分别为 0.98 和 0.74, 呈极显著正相关关系 ( $p < 0.01$ ), 2.5 mm/min 雨强的雷诺数和弗劳德数分别是 1.0 mm/min 雨强时的 2.98~3.51 倍和 1.27~1.37 倍, 与砾石质量分数偏相关系数分别为 -0.74 和 -0.75, 呈极显著负相关关系 ( $p < 0.01$ ), 40% 砾石质量分数堆积体的雷诺数和弗劳德数较纯土堆积体坡面分别减小 13.32%~28.61% 和 22.71%~36.90%。对整个试验过程中的雷诺数和弗劳德数进行方差分析 (表 1) 表明, 雨强和砾石含量对两者均有显著影响 ( $p < 0.05$ ), 其中雷诺数随降雨强度的增加显著增大, 降雨强度相同时, 不同砾石含量之间的差异性表现为 40% 砾石含量坡面径流雷诺数显著小于其

他砾石含量,其他砾石含量之间则为纯土坡面径流雷诺数较高,但相互之间差异并不明显。对于弗劳德数而言,1.0 mm/min 雨强坡面径流的弗劳德数显著小于其他雨强,1.5,2.0,2.5 mm/min 雨强坡面弗劳德数之间不存在显著性差异,降雨强度相同时,纯土坡面弗劳德数显著大于含砾石坡面,含砾石坡面中高砾石含量坡面弗劳德数较小,但各砾石含量之间的差异性

较小。综上所述,试验条件下,堆积体坡面的径流状态为缓流、层流,且雷诺数和弗劳德数总体随雨强的增加而增大,随砾石含量的增加而减小,雨强对雷诺数的影响较大,对雷诺数的变化起控制性作用,贡献率为 78.13%,砾石含量对其影响较小,贡献率为 3.11%,雨强和砾石含量对弗劳德数的影响相对较小,贡献率分别为 24.92%和 26.81%。

表 1 基于方差分析的各因子对工程堆积体坡面径流水动力参数影响的显著性和贡献率

变量	来源	显著性	因子贡献率/%	变量	来源	显著性	因子贡献率/%
流速	雨强	0.000	55.08	雷诺数	雨强	0.000	78.83
	砾石含量	0.000	14.72		砾石含量	0.000	3.11
	交互	0.002	0.89		交互	0.000	2.09
	误差		29.31		误差		15.96
径流强度	雨强	0.000	78.19	弗劳德数	雨强	0.000	24.92
	砾石含量	0.000	4.03		砾石含量	0.000	26.81
	交互	0.000	1.72		交互	0.000	2.69
	误差	0.000	16.07		误差		45.59

## 2.2 侵蚀动力学特征

径流剪切力、水流功率、单位水流功率和过水断面单位能是表征坡面径流侵蚀力大小的基本参数,为

了探讨试验条件下坡面的侵蚀特征和侵蚀动力学机理,现将剥蚀率、径流含沙率及其上述侵蚀动力学参数汇总见表 2。

表 2 侵蚀动力学参数汇总

降雨强度/ (mm·min <sup>-1</sup> )	砾石 含量/%	剥蚀率/ (g·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	径流剪切力/ (N·m <sup>-2</sup> )	水流功率/ (N·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	单位水流功率/ (m·s <sup>-1</sup> )	过水断面 单位能/10 <sup>-3</sup> m	阻力 系数
1.0	0	3.65	6.06	0.359	0.0314	0.99	10.59
	10	3.13	6.99	0.357	0.0278	0.98	13.92
	20	2.10	5.96	0.271	0.0247	0.97	17.93
	30	1.80	5.75	0.264	0.0250	0.95	17.06
	40	1.69	4.84	0.203	0.0228	0.93	20.34
1.5	0	19.04	7.81	0.642	0.0447	1.29	5.95
	10	12.03	8.46	0.564	0.0363	1.31	10.39
	20	9.33	7.71	0.506	0.0357	1.26	10.34
	30	8.16	7.52	0.503	0.0364	1.26	9.83
	40	6.48	7.09	0.385	0.0295	1.18	14.93
2.0	0	31.51	9.70	0.928	0.0521	1.72	5.84
	10	19.00	9.89	0.836	0.0460	1.63	7.55
	20	24.51	9.84	0.778	0.0430	1.71	9.47
	30	13.78	9.25	0.711	0.0419	1.61	9.47
	40	9.71	9.08	0.685	0.0410	1.59	9.77
2.5	0	93.61	12.47	1.280	0.0558	2.08	6.24
	10	66.90	12.44	1.132	0.0495	1.97	7.99
	20	52.92	10.65	0.828	0.0421	1.85	11.08
	30	50.55	9.96	0.822	0.0452	1.81	9.00
	40	28.76	8.22	0.625	0.0414	1.75	10.72

就雨强对各参数的影响而言,砾石含量相同时,随着降雨强度的增加,剥蚀率呈指数型增大的趋势( $R^2 = 0.83 \sim 0.96, p < 0.05$ ),水流剪切力、水流功率、单位水流功率和过水断面单位能与降雨强度之间的偏相关系数分别为 0.943, 0.951, 0.936 和 0.989,呈

极显著正相关关系( $p < 0.01$ )。对具体数据进行分析发现,随着降雨强度的增加,水流剪切力、水流功率、单位水流功率和过水断面单位能分别增大 69.81%~98.74%, 208.47%~266.31%, 70.05%~81.16% 和 88.95%~108.90%,且砾石含量较高时(30%,40%)增

幅较小,是低砾石含量(0%,10%)的 0.71~0.89 倍;阻力系数与雨强的偏相关系数为-0.791,呈极显著负相关关系( $p < 0.01$ ),随降雨强度的增加,阻力系数减小了 38.20%~47.30%。

就砾石对各参数的影响而言,水流剪切力、水流功率、单位水流功率以及过水断面单位能与砾石含量的偏相关系数分别为-0.709,-0.815,-0.797 和-0.714,呈极显著负相关关系( $p < 0.01$ ),随着砾石含量的增加,分别减小

8.16%~34.11%,26.22%~51.12%,21.25%~33.98%和 6.78%~15.68%;阻力系数与砾石含量的偏向关系数为 0.735,呈极显著正相关关系( $p < 0.01$ ),随着砾石含量的增加,阻力系数增大了 62.21%~92.17%。

为了研究土壤侵蚀的机理,探究各侵蚀动力参数对土壤侵蚀的影响,将剥蚀率( $D_r$ )和径流剪切力( $\tau$ )、水流功率( $w$ )、单位水流功率( $P$ )和过水断面单位能( $E$ )的关系点绘见图 3。

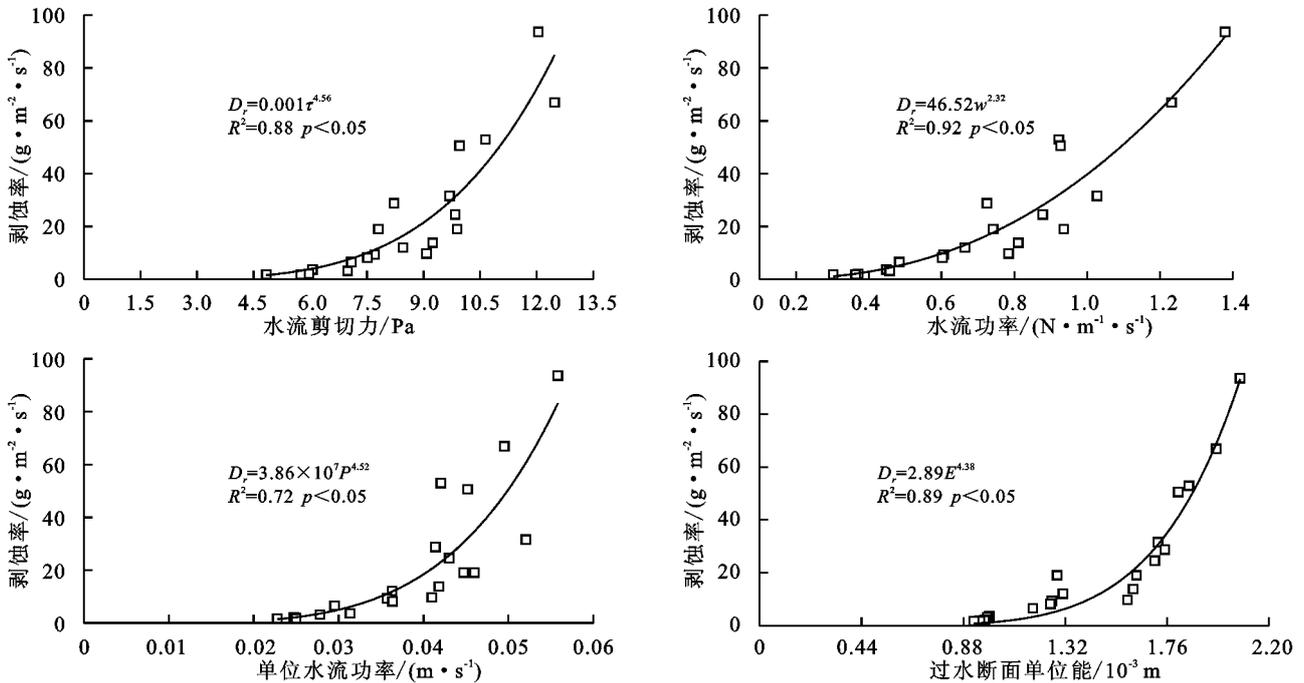


图 3 侵蚀动力学参数和剥蚀率之间的关系

次降雨剥蚀率( $D_r$ )与径流剪切力( $\tau$ )、水流功率( $w$ )、单位水流功率( $P$ )、过水断面单位能( $E$ )之间存在着极显著的正相关关系,相关系数  $r$  表现为: $r_w(0.891) > r_E(0.856) > r_\tau(0.855) > r_P(0.786)$ ,水流功率和剥蚀率的相关性最好,是描述堆积体侵蚀动力机制的最优因子。对试验数据进行回归分析可得,径流剪切力、水流功率、单位水流功率和过水断面单位能与土壤剥蚀率之间均呈显著的幂函数关系( $p < 0.05$ ),剥蚀率随各参数的增加而增大,且增幅逐渐加大,在侵蚀动力参数较大时,剥蚀率呈急剧增加的变化趋势,幂函数的确定系数  $R^2$  分别为 0.88,0.92,0.72 和 0.89,水流功率的拟合优度最好。

化趋势,幂函数的确定系数  $R^2$  分别为 0.88,0.92,0.72 和 0.89,水流功率的拟合优度最好。

### 2.3 含砾石锥状工程堆积体细沟发育特征

试验过程中发现,当降雨强度为 1.0,1.5 mm/min 时,堆积体的侵蚀方式主要为面状侵蚀,整个降雨过程中,坡面没有出现明显的细沟;当降雨强度为 2.0,2.5 mm/min 时,随着降雨时间的持续,细沟开始出现并逐渐发育,侵蚀方式由以面状侵蚀为主逐渐转变为面状侵蚀和细沟侵蚀共存。各处理条件下细沟出现的时间见表 3。

表 3 各处理条件下细沟出现的时间

项目	2.0/(mm·min <sup>-1</sup> )					2.5/(mm·min <sup>-1</sup> )					
	砾石含量/%	0	10	20	30	40	0	10	20	30	40
细沟出现的时间/min		34.16	39.00	39.31	41.16	47.96	9.89	19.80	28.50	32.50	45.90

细沟出现的时间随雨强的增大而减小,减小的幅度分别为 74.08%,49.23%,27.50%,14.83% 和 4.30%。雨强为 2.0 mm/min 时,随着砾石含量的增加,细沟出现的时间由 34.16 min 增加为 47.96 min,雨强为 2.5 mm/min 时,细沟出现的时间由 9.89 min

增长为 45.90 min。由此表明,砾石的存在使细沟出现的时间推迟,并且砾石含量较小时,细沟出现的时间受雨强的影响较大,而砾石含量较大时,雨强的影响减弱,细沟出现的时间差异减小。

细沟的形态发育特征见表 4。降雨强度相同时,随

着砾石含量的增加,细沟的最大沟宽和最大沟深总体减小,宽深比增加。这表明降雨强度相同时,随着砾石含量的增加,细沟逐渐变窄、变浅,下切侵蚀减弱。雨强为 2.0 mm/min 时,最大沟长和细沟密度随砾石含量的变化规律表现为 20% > 10% > 0 > 40% > 30%,雨强为 2.5 mm/min 时则表现为 20% > 0 > 30% > 10% > 40%,两者均在砾石含量为 20% 时达到最大值,其他砾石含量之间的变化规律并不明显。2.5 mm/min 雨强的最大沟宽、

最大沟深、最大沟长和细沟密度较 2.0 mm/min 雨强均有所增加,平均增幅分别为 29.2%,81.9%,101.5% 和 135.8%,雨强越大,细沟发育越完全,且雨强对沟宽的影响相对较小而对沟长影响较大。对侵蚀总量和最大沟宽、最大沟深、细沟密度进行相关性分析,其相关系数分别为 0.70,0.93 和 0.73,显著性水平  $p$  为 0.026,0.000 和 0.001,侵蚀量和最大沟宽、最大沟深和细沟密度之间均呈现显著的正相关关系。

表 4 不同处理下坡面细沟形态的发育特征

降雨强度/ (mm · min <sup>-1</sup> )	砾石 含量/%	细沟 条数	最大 沟宽/cm	最大 沟深/cm	最大 沟长/cm	宽 深比	细沟密度/ (cm · m <sup>-2</sup> )
2.0	0	2	27	19	144	1.40	20.88
	10	3	19	10	150	1.57	24.26
	20	3	22	14	233	2.04	34.06
	30	2	17	8	90	2.13	12.13
	40	2	10	6	105	3.00	13.09
2.5	0	4	28	28	290	1.33	59.10
	10	3	22	20	190	1.62	29.81
	20	4	24	18	280	1.89	74.27
	30	2	20	16	272	2.05	46.71
	40	2	20	14	270	2.14	23.40

### 3 讨论

以杨凌重质土壤和工程中常用的破口石为试验材料,模拟野外工程堆积体的堆积过程和堆积形态,在室内模拟降雨的条件下,研究了含砾石锥状工程堆积体的坡面侵蚀动力学特性及细沟形态特征。就产流特征而言,流速和径流强度随着雨强的增加而增大,随砾石含量的增加而减小,且雨强对两者的影响较大,贡献率较高,而砾石含量对两者的影响相对较小,这与李建明等<sup>[16]</sup>、景民晓等<sup>[17]</sup>、陈磊等<sup>[18]</sup>对黄土区重质土壤堆积体的研究结果相类似,而和王雪松等<sup>[19]</sup>、史倩华等<sup>[20]</sup>对红壤的研究不同,这可能是由于土壤性质不同所致:红土黏粒较多,在降雨条件下易与砾石形成结皮。试验条件下坡面径流处于层流、缓流的状态,且雷诺数和弗劳德数均随砾石含量的增加而减小,康宏亮等<sup>[7]</sup>、李宏伟等<sup>[6]</sup>也得到了相类似的结论,但就具体数值而言,本文所得数值较小,这可能是由于与其利用人工装填土槽所形成的矩形下垫面不同,本文中的锥状工程堆积体有着特定的三维形态,一方面堆积体“上尖下圆”的形态使得坡面的上部汇水面积减小,径流总量减小,另一方面堆积体坡面为一曲面而非平面,径流在向下流动的同时有着向两侧运动的趋势,分散了径流从而使得径流的汇集作用降低,最终雷诺数和弗劳德数的具体数值偏小。

就产沙特征而言,试验条件下剥蚀率随降雨强度的

增加而增大,随砾石含量的增加而减小,径流剪切力( $\tau$ )、水流功率( $\omega$ )、单位水流功率( $P$ )以及过水断面单位能( $E$ )和土壤剥蚀率之间相关性较好,且均呈现出显著的幂函数关系,这与王雪松等<sup>[10]</sup>对赣北红土的研究类似。但是相比较而言,当  $\tau$ 、 $\omega$ 、 $P$  和  $E$  较小时,侵蚀动力学参数( $\tau$ 、 $\omega$ 、 $P$ 、 $E$ )相同时,本试验条件下所获取的土壤剥蚀较小,而当  $\tau$ 、 $\omega$ 、 $P$  和  $E$  大于一定数值后,相同的侵蚀动力学参数,本文所获取的土壤剥蚀率较大,这一方面这可能与所研究的土壤类型不同有关,另一方面王雪松等<sup>[19]</sup>的研究坡面侵蚀过程表现为坡面薄层水流侵蚀,整个侵蚀过程中坡面未出现侵蚀沟。本文中侵蚀动力学参数较大时,坡面产生了明显的侵蚀沟和滑塌现象,而沟蚀和滑塌等重力侵蚀的发生使土壤剥蚀率成倍增加,从而导致侵蚀动力参数较大时,本试验所得的剥蚀率较大。康宏亮等<sup>[7]</sup>和张乐涛等<sup>[4]</sup>也对工程堆积体坡面水动力学过程进行了研究,但其研究方法均依托于矩形平整坡面,侵蚀动力学参数与剥蚀率的关系与本文存在较大差异。

目前有关含砾石工程堆积体坡面细沟发育的研究较少,试验条件下降雨强度的增加使得径流侵蚀力增大,对坡面的破坏和切割作用增强,促进细沟发育;雨强相同时,随砾石含量的增加,沟深和沟宽减小,沟长则现出先增加后减小的趋势,这可能是因为细沟的发育主要表现为溯源侵蚀和下切侵蚀两种方式,溯源

侵蚀使得细沟增长,下切侵蚀使得细沟宽度和深度增加,由于砾石容重较大,不易被径流搬移,随着径流冲刷,砾石逐渐沉积在沟底抑制了径流的下切侵蚀,沟宽和沟深减小;砾石的增多,一方面下切侵蚀减弱,径流能量更多的用于溯源侵蚀,溯源侵蚀增强,促进细沟增长;另一方面减小了径流侵蚀力增加了土壤抗冲性,抑制了细沟增长,这两方面的作用使得沟长呈现出先增加后减小的变化趋势。总体而言,砾石的存在起到了抑制细沟发育的作用。

## 4 结论

(1)流速和径流强度随雨强的增加而增大,随砾石含量的增加而减小。雨强和砾石含量对流速和径流强度均具有显著影响,其中雨强对两者影响较大,贡献率较高,对两者的变化起控制性作用,而砾石对两者的影响相对较小。

(2)试验条件下,坡面径流处于层流、缓流的状态,雷诺数和弗劳德数随雨强的增加而增大,砾石的存在使得水流流态变缓,稳定性增强,雷诺数和弗劳德数均随砾石含量的增加而减小。雨强和砾石含量对雷诺数和弗劳德数具有显著影响,其中雨强对雷诺数的影响较大,对弗劳德数的影响较小,砾石对两者的影响相对较小。

(3)剥蚀率随雨强的增加呈指数型增大,雨强相同时,随砾石含量增加线性减小。径流剪切力、水流功率、单位水流功率、过水断面单位能与剥蚀率显著相关,且呈幂函数的关系,其中水流功率与剥蚀率相关性最好,拟合优度最高,是描述侵蚀动力学机制的最优因子。

(4)细沟出现的时间随雨强的增加而减小,随砾石含量的增加而增大;雨强越大,细沟发育越完全,沟宽、沟深、沟长和细沟密度随雨强的增大而增加,雨强相同时,随着砾石含量的增加,细沟逐渐变浅、变窄,细沟的宽深比增加,下切侵蚀逐渐减弱。

### 参考文献:

[1] 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.  
 [2] 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.

[3] 蔺明华, 杜靖澳, 张瑞. 黄河中游地区开发建设新增水土流失预测方法研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(1): 61-67.  
 [4] 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.  
 [5] 李永红, 牛耀彬, 王正中, 等. 工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 83-88.  
 [6] 李宏伟, 牛俊文, 宋立旺, 等. 工程堆积体水动力学参数及其产沙效应[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 63-67.  
 [7] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 125-134.  
 [8] 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.  
 [9] 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.  
 [10] 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.  
 [11] 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.  
 [12] 徐文杰, 胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(4): 50-56.  
 [13] 郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 177-178.  
 [14] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(6): 509-515.  
 [15] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 159-165.  
 [16] 李建明, 王文龙, 黄鹏飞, 等. 黄土区生产建设工程堆积体砾石对侵蚀产沙影响[J]. 泥沙研究, 2014(4): 10-17.  
 [17] 景民晓, 谢永生, 赵暄, 等. 土石混合弃土堆置体产流产沙模拟研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 11-15.  
 [18] 陈磊, 谢永生, 田飞, 等. 模拟降雨条件下不同土石比例弃土堆置体产流产沙研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 6-10.  
 [19] 王雪松, 谢永生, 陈曦, 等. 砾石对赣北红土工程锥状堆积体侵蚀规律的影响[J]. 泥沙研究, 2015(1): 67-74.  
 [20] 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.