

含砾石锥状工程堆积体坡面径流侵蚀特征

戎玉博¹, 白玉洁¹, 王森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: 以关中地区的重质土壤为试验材料, 利用自制的堆积平台模拟散乱锥状工程堆积体的堆积过程及形态建造实体模型, 在人工模拟降雨的条件下, 研究了 4 个降雨强度下(1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm/min)不同砾石质量分数(0, 10%, 20%, 30%, 40%)锥状工程堆积体坡面的径流产沙特征。结果表明: (1) 径流率和流速随时间呈现出先快速增加后缓慢增长至稳定的变化趋势, 雨强和砾石含量对径流率和流速均有显著性影响, 其中雨强对两者的贡献率较大, 起决定性作用; (2) 平均径流率和平均流速随雨强的增大而增加, 与雨强呈极显著的正相关关系, 随砾石含量的增加而减小, 与砾石含量呈极显著的负相关关系; (3) 雨强为 1.0 mm/min 时, 侵蚀速率先快速增加后逐渐趋于稳定; 雨强 ≥ 1.5 mm/min 时, 侵蚀速率呈持续增长的变化趋势, 雨强为 2.0, 2.5 mm/min 时, 在降雨中后期侵蚀速率突变式增加; (4) 侵蚀总量随雨强的增大呈指数型增加的趋势, 随砾石含量的增加呈负对数型减小的趋势。

关键词: 工程堆积体; 砾石; 径流; 侵蚀速率

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0109-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.018

Characteristics of Slope Runoff Erosion on the Cone Shaped Engineering Accumulation with Gravel

RONG Yubo¹, BAI Yujie¹, WANG Sen², 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 order to study the characteristics of slope runoff and sediment yield on the cone shaped engineering accumulation, a self-made platform was used to simulate the three-dimensional pyramidal engineering accumulation, and indoor artificially simulated rainfall experiments with different rainfall intensities (1.0, 1.5, 2.0 and 2.5 mm/min) were carried out. The heavy soil in Guanzhong area was used as test material, and different mass percentages of gravel (0, 10%, 20%, 30%, and 40%) were set. The results showed that: (1) The runoff rate and flow velocity increased rapidly first and then slowly increased to the stable with the time trend, the rainfall intensity and gravel content both had significance influence on runoff rate and flow velocity, and the rainfall intensity played a decisive role; (2) The mean runoff rate and flow velocity had very significant positive correlation with rainfall intensity and very significant negative correlation with gravel concentration; (3) When the rainfall intensity was 1.0 mm/min, the erosion rate first increased rapidly and then tended to be stable, when the rainfall intensity was greater than 1.5 mm/min the erosion rate showed a trend of continuous growth, while when the rainfall intensities were 2.0 and 2.5 mm/min, the erosion rate increased abruptly in the middle and late stages of rainfall; (4) The total amount of erosion showed an exponential increase trend with the increasing of rainfall intensity and a logarithm decrease trend with the increasing of gravel content.

Keywords: engineering accumulation; gravel; runoff; erosion rate

随着我国国民经济的发展, 生产建设项目不断增加, 在生产过程中不可避免地产生了大量的弃土弃渣堆置体即工程堆积体。作为人为水土流失最严重的地貌单元, 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, 其土质疏松、植物及有机质缺乏、抗冲抗蚀性极差, 且由于土石混合体各组分之间存在着复杂的相互作用, 在降雨条件下, 堆积体边坡会发生特殊的岩土侵蚀, 与原生地貌的侵蚀方式

收稿日期: 2017-08-17

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)

第一作者: 戎玉博(1992—), 男, 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: 谢永生(1960—), 男, 博士, 研究员, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: ysxie@ms.iswc.ac.cn

或程度存在较大差异。近年来,堆积体坡面的径流侵蚀特征受到了越来越广泛的关注,张乐涛等^[1]采用野外放水冲刷的方法研究了工程堆积体陡坡坡面的产流产沙特征;史冬梅等^[2]研究了具有不同土石比的紫色土工程堆积体和沙壤土工程堆积体的边坡物理性质、侵蚀动力及产沙过程;史倩华等^[3]、李建明等^[4-5]、康宏亮等^[6-7]分别以红壤、重壤和轻壤为试验材料,采用室内模拟降雨试验的方法对不同土壤类型含砾石工程堆积体的坡面的产流产沙特性进行了研究。然而已有的研究多采用传统野外径流小区或者人工装填土槽的方法来模拟工程堆积体下垫面,即利用平面二维形态模拟工程堆积体,而赵暄等^[8]的研究表明实际存在的工程堆积体尤其是点状工程形成的堆积体具有特定的三维立体形态,形态的差异会改变径流在坡面的分配,从而对坡面的径流侵蚀特征产生影响,虽然已有相关学者注意到这一问题,采用正太比尺缩小的方法对含砾石工程堆积体的三维形态进行了仿真模拟,得到了相应的结论^[9-12],但由于空间的限制,所研究的堆积体尺寸较小,坡长较短(高 0.8 m,坡长 1.47 m),坡长的限制使得坡面水流为薄层水流,侵蚀方式为溅蚀和面状侵蚀,并不能反映出野外真实堆积体在强降雨条件下侵蚀方式由面蚀到沟蚀的发育过程。为此笔者结合前人的调查数据,利用自制的堆积平台,对具有三维立体形态的野外工程堆积体进行 1:1 仿真模拟,研究了不同降雨强度下、不同砾石质量分数的散乱锥状工程堆积体坡面的产流产沙特征。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验土壤取自陕西省杨凌区,属重质黄土,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^[13]。试验开始前先将土壤中的块石和杂草除去,以 10 mm 作为土石的分界线^[14],对土壤进行筛分,首先按照赵暄等^[15]在堆积体下垫面概化中的分级标准对土壤进行颗粒分析,粒径组成 $<0.2, 0.2\sim 2, 2\sim 5, 5\sim 10$ mm 的质量含量分别为 4.16%,42.88%,33.91%,19.05%,与工程堆积体坡面组成物质多呈正偏态的结论相符,土壤符合工程堆积体坡面土壤的粒径组成特点。利用激光粒度分析仪对粒径 <0.2 mm 的土粒进行分析, $<0.01, 0.05\sim 0.01, 0.10\sim 0.05, 0.25\sim 0.10, 0.5\sim 0.25, 2\sim 0.5$ mm 粒径组成分别为 65.38%,21.37%,9.78%,1.23%,0.41%,1.82%,有机质质量含量为 0.88%。试验所用砾石取自陕西省杨凌周边的采石场,为硅质石灰岩,是工程上常用的建筑用石,直径为 2~3 cm,呈不规则的

多面体形状,硬度大,吸水渗水性小,几乎不透水。由于土壤的前期含水量会对侵蚀状况产生影响,试验开始前采用洒水或阴干的方法控制土壤的含水量为 13%~15%,并将土壤和砾石混合均匀以此来模拟工程堆积体的坡面组成物质。

1.2 堆积形态和堆积平台

根据赵暄等^[8]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体,常见于规模较小的点状工程中(图 1)。

试验平台为一自制的正方形钢质平台,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 m,高为 2.5 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°)并和出水口相连以保证径流泥沙及时排出。关中平原地区近 80%的弃土堆积体坡长集中在 2.5~5.5 m,结合试验平台条件,设计堆积体坡长 4.2 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体运送到 2.8 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 锥状工程堆积体的形态,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,最终堆积体斜坡长为 4.2 m,半径为 3.5 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。平台及堆积效果如图 1 所示。

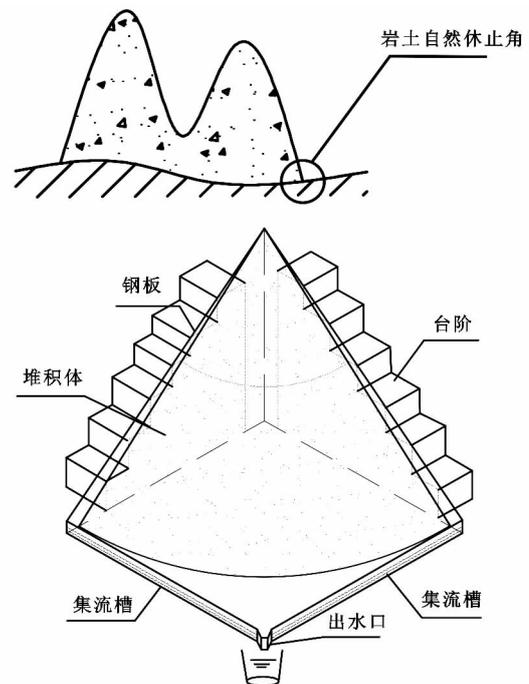


图 1 堆积形态和堆积平台示意

1.3 试验方法

试验于 2016 年 7—9 月在中科院水利部水土保

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^[16]。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^[15],本文设计 0, 10%, 20%, 30%, 40% 共 5 个砾石质量百分含量,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,试验选取 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,先用塑料布对堆积体进行遮盖,在堆积体四周及其顶部共 5 个位置处放置雨量筒对雨强进行率定,待到雨强均匀且稳定之后(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%),揭开塑料布并开始计时,当径流呈层流状态从上而下流至出水口时视为产流开始,记录产流时间并重新开始计时,前 3 min 每隔 1 min 接 1 次径流泥沙样,之后每隔 3 min 接 1 次径流泥沙样,在接样的同时,分别在距坡顶 0.5~1.5, 1.5~2.5, 2.5~3.5 m 的斜坡面上选择明显的径流用高锰酸钾染色法测量 3 个坡段的流速。试验共计历时 90 min,试验结束后采用烘干法(105 °C)测量泥沙重量。

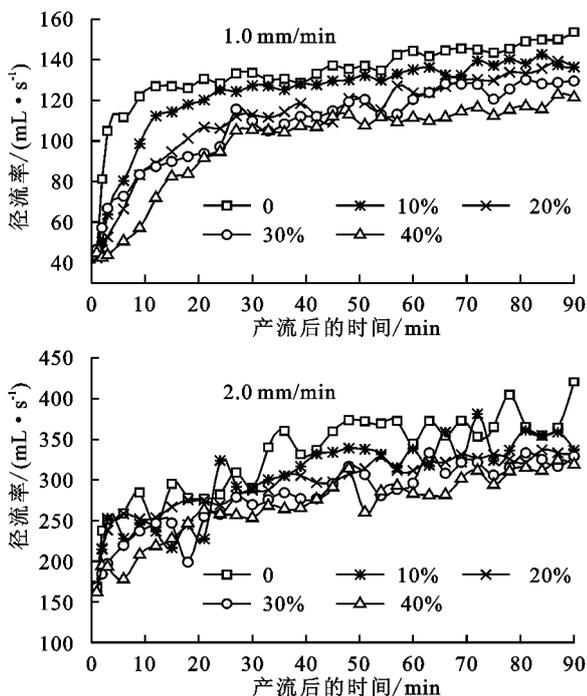


图 2 不同处理下径流率的变化过程

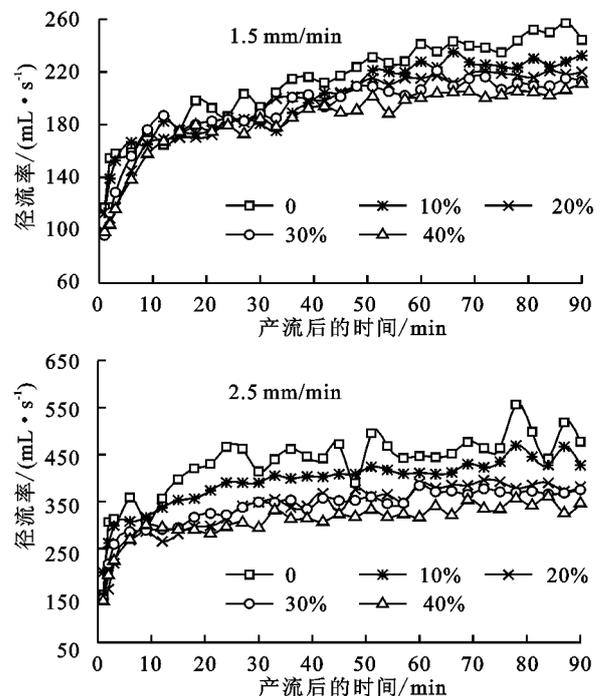
2.2 坡面流速的变化特征

各降雨条件下,不同砾石含量的堆积体坡面流速均呈现出先快速增长后缓慢波动增加至稳定的趋势(图 3)。产流 10 min 内,流速快速增大,10~50 min 流速呈缓慢波动增加的状态,50 min 之后流速趋于稳定。快速增长阶段,流速的增长速率为 0.102~0.156 m/s²,随着降雨强度的增加,平均流速分别为 0.031~0.045, 0.040~0.059, 0.054~0.070, 0.058~0.075 m/s,呈逐

2 结果与分析

2.1 径流率的变化特征

由图 2 可知,各雨强条件下,不同砾石含量的工程堆积体径流率随时间的变化趋势基本一致,即“快速增长—缓慢增大—趋于稳定”3 个阶段。中小雨强时(1.0, 1.5 mm/min),径流率在产流后 15~25 min 内快速增加,在 45~50 min 后逐渐趋于稳定,大雨强时(2.0, 2.5 mm/min),径流率在产流后 10~15 min 快速增加,在 30~35 min 后逐渐趋于稳定,随着雨强的增加,径流率快速增长的时间缩短,趋于稳定的时间提前。快速增长阶段:高砾石含量(20%, 30%, 40%)坡面的径流增长速率和径流率均较小,是同一雨强下低砾石含量(0, 10%)坡面的 0.51~0.86, 0.76~0.92 倍。缓慢增加阶段:同一雨强下,各砾石含量之间的径流率的增长速率差异不明显,而径流率则表现为高砾石含量坡面小于低砾石含量坡面,是低砾石含量坡面的 0.78~0.93 倍。径流率趋于稳定阶段:由于大雨强条件下坡面出现了明显的细沟侵蚀以及崩塌现象,径流率随时间的变化波动较大,变异系数为 0.032~0.071,是中小雨强的 1.41~2.40 倍。



渐增大的变化趋势,同一雨强下,高砾石含量坡面流速较小,是低砾石含量的 0.78~0.83 倍。缓慢增长阶段,坡面流速变化缓慢,增长速率为 0.012~0.024 m/s²,随着降雨强度的增大,平均流速分别为 0.040~0.056, 0.054~0.082, 0.074~0.094, 0.077~0.106 m/s,同一雨强下,高砾石含量坡面流速是低砾石含量的 0.77~0.84 倍。流速趋于稳定阶段,随着降雨强度的增加,平均流速分别为 0.048~0.063, 0.060~0.091, 0.081~0.105,

0.082~0.112 m/s, 变异系数分别为 0.029~0.071, 0.031~0.083, 0.044~0.062, 0.023~0.070, 同一雨强下高砾石含量坡面流速较小, 变异系数较大, 分别是低砾石含量坡面的 0.82~0.85, 1.20~2.34 倍。

2.3 坡面径流特征

通过 SPSS19.0 软件, 利用方差分析的方法, 研究雨强和砾石含量对径流率和流速影响的显著性和贡献率(表 1)。根据方差分析的结果可知, 降雨强度、砾石含量及雨强和砾石含量的交互作用对径流率

和流速均有显著影响($p < 0.05$), 雨强、砾石含量、雨强和砾石含量的交互作用及误差对径流率的贡献率为 78.18%, 4.03%, 1.71%, 16.07%, 对流速贡献率分别为 55.08%, 14.72%, 0.89%, 29.31%。雨强对径流率和流速的影响较大, 对径流率和流速变化起主导作用, 而砾石含量对径流率和流速的影响相对较小, 且就砾石含量对两者的影响而言, 砾石含量对流速的影响大于对径流率的影响。将整个试验过程的平均径流率(R)和平均流速(V)汇总(表 2)。

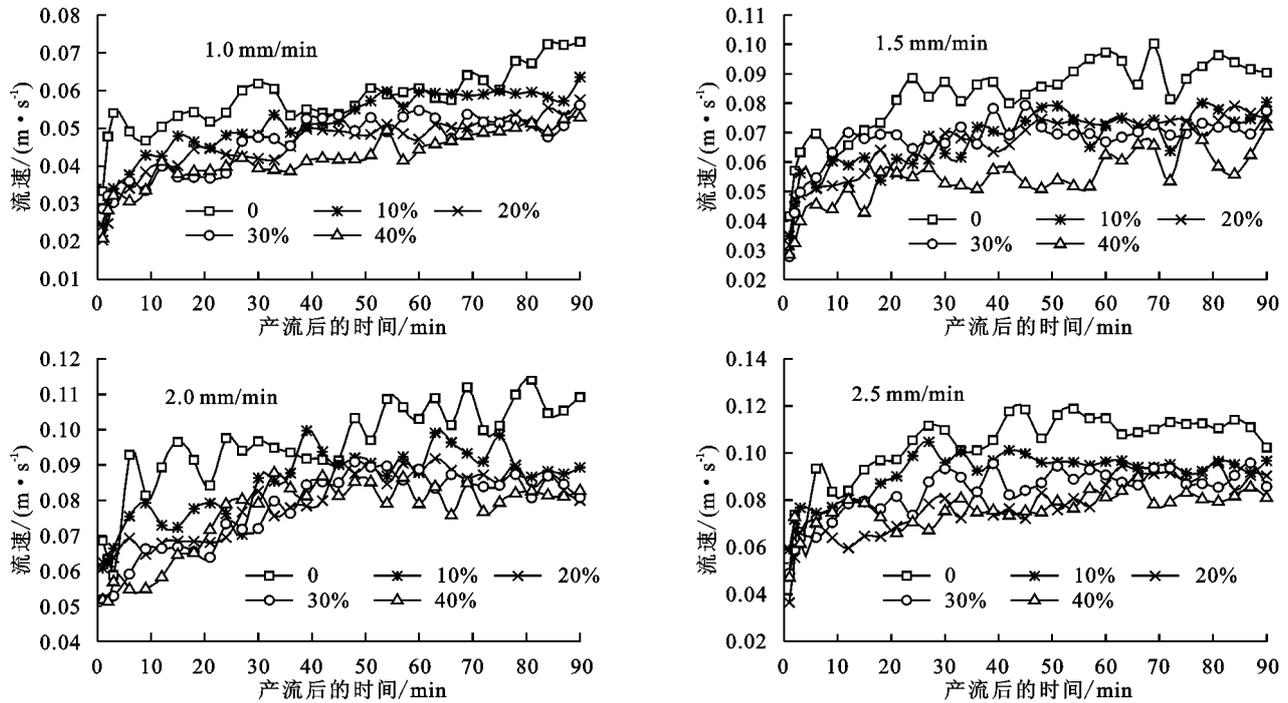


图 3 不同处理下流速的变化特征

表 1 基于方差分析的雨强、砾石含量对径流率、流速影响的显著性及贡献率

变量	来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性	因子贡献率/%
径流率	雨强	5612273.73	3	1870757.911	1037.463	0.000	78.18
	砾石含量	296076.75	4	74019.188	41.049	0.000	4.03
	交互	144868.38	12	12072.365	6.695	0.000	1.71
	误差	1117986.63		1803.204			16.07
	总计	43932762.79					
流速	雨强	0.141	3	0.047	401.269	0.000	55.08
	砾石含量	0.038	4	0.009	81.216	0.000	14.72
	交互	0.004	12	0.000	2.610	0.002	0.89
	误差	0.072		0.000			29.31
	总计	3.476					

表 2 各个处理条件下的平均径流率和平均流速

砾石含量/%	降雨强度/(mm·min ⁻¹)							
	1.0		1.5		2.0		2.5	
	R/ (mL·s ⁻¹)	V/ (m·s ⁻¹)	R/ (mL·s ⁻¹)	V/ (m·s ⁻¹)	R/ (mL·s ⁻¹)	V/ (m·s ⁻¹)	R/ (mL·s ⁻¹)	V/ (m·s ⁻¹)
0	146.5	0.058	243.6	0.082	370.3	0.096	474.8	0.103
10	137.1	0.051	227.3	0.067	344.6	0.085	429.1	0.091
20	131.1	0.045	217.6	0.066	326.8	0.079	379.3	0.077
30	126.4	0.046	212.0	0.067	318.8	0.077	367.3	0.083
40	115.3	0.042	204.1	0.054	303.0	0.075	336.0	0.076

砾石含量相同时,2.5 mm/min 雨强的平均径流率是 1.0 mm/min 时的 3.24,3.13,2.89,2.90,2.91 倍,平均流速是 1.0 mm/min 时的 1.75,1.61,1.71,1.74,1.70 倍,平均径流率和平均流速均随着雨强的增大而增加。降雨强度相同时,40%砾石含量的平均径流率较纯土坡面减小 10.38%,9.31%,10.16%,16.32%,流速较纯土坡面减小 24.84%,33.57%,23.10%,27.07%。利用 Spss19.0 软件对数据进行偏相关分析发现,平均径流率和平均流速与砾石含量的相关系数分别为 -0.784,-0.812,平均径流率和平均流速与降雨强度的相关性系数分别为 0.98,0.93,显著性水平 p 均小于 0.01,雨强与径流率和流速有着极显著的正相关关系,而砾石的存在则起着显著削弱径流率和流速的作用。对数据进行多元线性回归分析可得:

$$R = -15.406 + 181.955I - 163.395W$$

$$R^2 = 0.966 \text{ Sig.} = 0.000$$

$$V = 0.043 + 0.26I - 0.56W$$

$$R^2 = 0.883 \text{ Sig.} = 0.000$$

式中: I 为降雨强度(mm/min); W 为砾石含量,用小数表示; R 为稳定径流率(mL/s); V 为稳定流速(m/s)。

2.4 侵蚀速率的变化特征

由图 4 可知,雨强为 1.0 mm/min 时,侵蚀速率(E_v)和时间(t)之间存在着明显的对数函数关系($E_v = A \ln(t) + B$,其中 A, B 为常数, R^2 为 0.64~0.93),侵蚀速率在降雨开始后 10~25 min 内快速增长,之后缓慢增大至稳定。雨强为 1.5 mm/min 时,当砾石

含量 $\leq 10\%$ 时,侵蚀速率随着降雨时间的延续呈现出二项式增长的趋势($E_v = At^2 + Bt + C$,其中 A, B, C 为常数, R^2 为 0.90~0.96),砾石含量 $\geq 20\%$ 时,侵蚀速率和时间则存在着明显的幂函数关系($E_v = At^b$, A 为常数, $b = 0.326 \sim 0.377$, R^2 为 0.91~0.94),侵蚀速率随降雨历时的延长持续增加,砾石含量 $\leq 10\%$ 在降雨中后期增幅逐渐增大,侵蚀速率增长剧烈,砾石含量 $\geq 20\%$ 时,增幅呈随时间逐步减小;雨强为 2.0 mm/min 时,各砾石含量的侵蚀速率均随着降雨时间的延长呈现出指数型增加的趋势($E_v = Ae^{bt}$, A, b 为常数, R^2 为 0.82~0.96),指数增长率 b 的值随砾石含量的增加由纯土堆积体时的 0.021 减小为 40%时的 0.010,侵蚀速率随降雨历时的延续逐步增加,且增长幅度随着时间的延续逐渐增大,随着砾石含量的增加逐步减小,对图像进行分析发现:产流初期,各砾石含量间的侵蚀速率差异较小,随着降雨时间的延续,差异逐渐明显,最终在试验后期(80~90 min),侵蚀速率由裸露坡面(砾石含量为 0)时的 666.01 g/min 下降为了砾石含量为 40%时的 152.43 g/min。雨强为 2.5 mm/min 时,砾石含量 $\leq 30\%$,侵蚀速率随时间延续迅速增加,且当时间 ≥ 60 min 后,侵蚀速率突变式增加且波动较大,这是由于在试验后期坡面随机出现的崩塌和滑坡所致。而砾石含量为 40%时,侵蚀速率较小且变化相对平稳,说明砾石的覆盖,产生铠甲效应,增加了堆积体的抗蚀性,进而减少了崩塌和滑坡的产生。

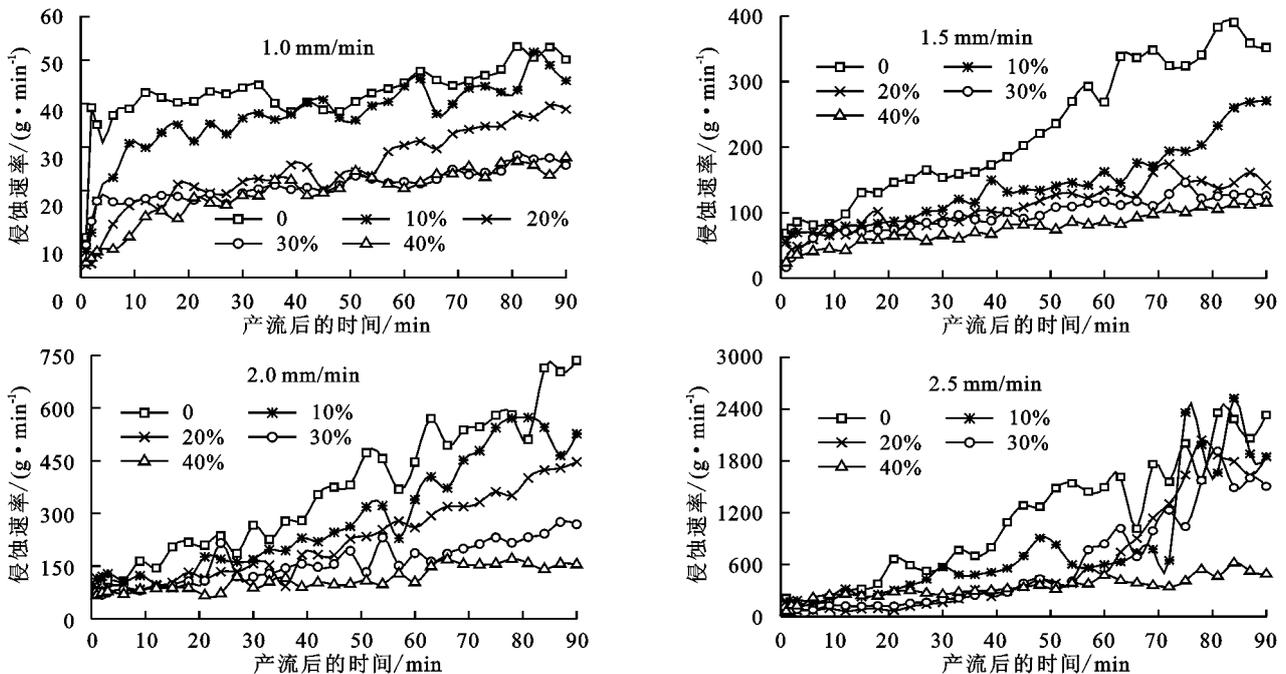


图 4 不同处理下侵蚀速率的变化特征

由于侵蚀速率在整个降雨过程中随时间的变化幅度较大,为了更精确地研究雨强、砾石这两个因素对侵蚀速率的影响,对降雨中后期较为稳定的侵蚀速率进行

方差单变量分析,结果如表 3 所示。雨强、砾石含量及雨强和砾石含量的交互作用对侵蚀速率均有极显著性的影响($p < 0.01$),其中雨强的贡献率为 67.16%,砾石

含量的贡献率为 7.89%，雨强和砾石含量的交互作用的贡献率为 7.85%，雨强的贡献率远大于砾石含量及其

两者的交互作用的贡献率，对侵蚀速率起决定性作用，而砾石含量对侵蚀速率的影响相对较小。

表 3 基于方差分析的雨强、砾石含量对侵蚀速率影响的显著性及贡献率

变量	来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性	因子贡献率/%
侵蚀速率	雨强	14212.017	3	4737.339	287.520	0.000	67.16
	砾石含量	1728.806	4	432.201	26.231	0.000	7.89
	交互	1852.947	12	154.412	9.372	0.000	7.85
	误差	3295.309		16.477			17.11
	总计	34198.442					

2.5 总侵蚀量的变化特征

由图 5 可知，各处理条件下，侵蚀总量的变化特征。就雨强对侵蚀的影响而言，当砾石含量相同时，1.5~2.5 mm/min 雨强的侵蚀总量是 1.0 mm/min 的 3.80~5.33, 5.61~8.93, 16.98~28.98 倍，雨强与侵蚀总量的偏相关系数为 0.861 ($p < 0.01$)，雨强和侵蚀总量之间存在着极显著的正相关关系，对数据进行拟合发现，相同的砾石含量下，总侵蚀量随着降雨强度的增加呈指数型增长的趋势 ($M = Ae^{bt}$, M 为侵蚀总量, A, b 为常数, 其中 $A = 256.22 \sim 617.36$, $b = 1.77 \sim 2.12$; $R^2 = 0.95 \sim 0.98$)。就砾石的影响而言，降雨强度相同时，含砾石堆积体 (10%~40%) 的侵蚀量是纯土堆积体的 0.63~0.88, 0.49~0.60, 0.43~0.54, 0.30~0.47 倍，砾石含量和侵蚀总量的偏向关系系数为 -0.579 ($p < 0.01$)，砾石含量和侵蚀总量之间存在着极显著的负相关关系，对数据进行拟合发现，4 个降雨强度下，砾石含量和侵蚀总量呈负对数函数关系 ($M = A \ln(W) + B$, W 为砾石质量百分数, A, B 为常数, $R^2 = 0.93 \sim 0.98$)。

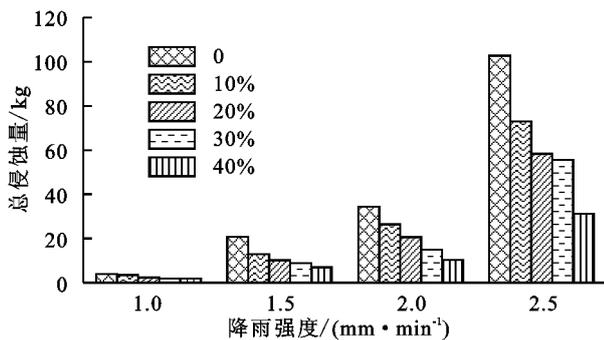


图 5 不同雨强条件下总侵蚀量随砾石含量的变化

3 讨论

试验以杨凌重质壤土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产流产沙特征。就产流特征而言，试验条件下径流率和流速均呈现出先快速增加后缓慢增长直至稳定的变化趋势，这是因为试验条件下坡面径流主要以超渗产流的方式进行，降雨消耗于入渗后形成径流，产流初期，土壤的含水率迅速增加，入渗率快速减小，坡面径流量增大，径流率和流速呈快速增大的趋势，之后随着降雨的持续土壤表层的水分逐渐趋于饱和并向下层运移，土

壤的入渗率呈缓慢减小的趋势，此时径流率和流速缓慢增长，最终土壤水分饱和，入渗率达到稳定，径流率和流速趋于稳定，这一现象和大部分学者^[3-4,6]的研究结论相类似。砾石的存在一方面增加了土壤中的大孔隙，促进入渗而使得坡面径流减小；一方面使得水流的弯曲度增加，下渗过水断面减小，抑制入渗从而坡面径流增大，这两方面的综合作用使得砾石对坡面径流的影响较小，对径流率和流速的贡献率相对较小。本试验中堆积体坡面的径流率和流速随着砾石含量的增加呈减小的变化趋势，这和史东梅等^[2]对黄沙壤堆积体，李建明等^[5]、景民晓等^[17]、陈磊等^[11]对黄土区重质土壤工程堆积体的研究结果相类似，而与王雪松等^[18]、史倩华等^[3]对赣北红土堆积体的研究不同。分析认为，造成这种差异的原因在于，本次试验选用的是粒径为 2~3 cm 具有多个棱角的破口石，为了模拟野外工程堆积体的形成过程，并未对土壤进行压实处理使得土壤质地疏松多孔，堆积完成后部分砾石位于堆积体表面，从而使得土壤中的大孔隙增多，降雨过程砾石表面形成的径流以及砾石间的霍顿流由砾石下面及其周边的大孔隙吸收，且存在于坡面的砾石在坡面逐渐形成阻碍水流运动的一个个小凸起，分散了径流动能，最终径流率和流速随砾石含量的增加而减小。而王雪松等^[18]、史倩华等^[3]所研究的赣北红土黏粒较多，降雨过程中砾石与土壤形成良好的结皮层，削弱了砾石对土体结构的影响，从而其产流特征与本文有所差异。

就产沙特征而言，试验条件下侵蚀总量随降雨强度的增加而增大，随砾石含量的增加而减小。降雨强度增大，雨滴对坡面的打击能力增强，坡面径流侵蚀力增大，侵蚀量相应增加；降雨强度相同时，砾石的存在一方面使得径流率和流速减小，侵蚀力减弱，一方面砾石增加了坡面的粗糙度，改变了坡面土壤的物理性质，增加了土壤的抗蚀性，侵蚀量随之减小。侵蚀总量的变化趋势与李建明等^[5]、景民晓等^[17]对黄土区重质土壤堆积体的研究相类似，但侵蚀的具体发展过程即侵蚀速率随时间的变化趋势，本文与两者存在较大差异，李建明^[5]采用人工装填土槽的方法对工程堆积体坡面进行模拟，先装填土槽，然后将坡度升高的方法与直接自然堆置所形成的堆积体不同，这种方法所形成的坡面稳定性更高，不易产生滑塌等重力侵蚀，且其分层装填并对中下层土壤

进行的夯实处理使得坡面土壤抗蚀性增强,降雨初期径流将土壤表层的可蚀性土粒带走后就难以对更深层的土壤进行侵蚀,侵蚀速率呈逐渐减小的变化趋势,景民晓等^[17]虽采用了自然堆置的方法模拟了工程堆积体,但其所研究的堆积体尺寸较小,侵蚀方式以面蚀为主,整个侵蚀过程并未有细沟和滑塌现象的发生,侵蚀速率呈波动稳定的变化趋势。而本文采用自然堆置的方法所模拟的散乱锥状工程堆积体,坡面土质疏松,可蚀及易蚀土量大,加之堆置完成后,坡度为自然休止角,土石混合体处于即将产生滑塌的临界状态,坡面极不稳定,雨强为 1.0 mm/min 时降雨初期径流侵蚀力逐渐增强,侵蚀速率随之增加,之后径流的侵蚀力和土壤的抗蚀性达到相对平衡的状态,由于堆积体可蚀及易蚀的土体多,不会出现可蚀性土粒减少的情况,土壤以一定的速率被径流冲刷带走,侵蚀速率达到稳定的状态;雨强 ≥ 1.5 mm/min 时,产流初期侵蚀速率逐渐增加,随着降雨的持续,土壤含水率逐渐增大,含水率的增加不仅增加了土体沿坡向方向的重力分力,而且降低黄土的抗剪切强度,减小了土体的黏结力和内摩擦角^[19],由于坡面本就处于边坡角度等于土壤内摩擦角的临界状态,随着内摩擦角的减小,堆积体边坡大于内摩擦角,坡面逐渐出现滑塌等重力侵蚀现象,重力侵蚀的发生使得坡面细沟迅速扩展,加之边坡崩塌滑落下来的泥沙,侵蚀速率随之迅速增大。许炯心^[20]研究表明,重力侵蚀量与沟道水力搬运能力具有很强的耦合关系,雨强为 2.0, 2.5 mm/min 时,重力侵蚀和水流的搬运能力相互促进,侵蚀速率呈现出持续增加的状态,在降雨后期,崩塌和滑坡等重力侵蚀剧烈,土体随机片状滑落,侵蚀速率呈突变式增大的趋势。

4 结论

(1)堆积体坡面径流率和流速均随时间呈现出“快速增加—缓慢增加—趋于稳定”的变化趋势,雨强和砾石含量对径流率和流速均有显著性影响,且雨强对两者的贡献率较大,对坡面的径流变化起决定性作用。

(2)径流率和流速随着降雨强度的增加而增大,降雨强度相同时,随砾石含量的增加而减小,平均径流率和流速与雨强呈显著的正相关关系而与砾石含量呈显著的负相关关系。

(3)不同降雨条件下,侵蚀速率随时间的延续分别呈现出对数型(1.0 mm/min 雨强)、二项式、幂函数(1.5 mm/min 雨强)和指数型(2.0 mm/min 雨强)的变化趋势,雨强和砾石含量对侵蚀速率均有显著性影响,且雨强对侵蚀速率贡献率较大,对侵蚀速率的变化起决定性作用。

(4)侵蚀总量与降雨强度之间有着极显著的正相关关系,与砾石含量呈极显著的负相关关系,砾石含量相同时,侵蚀总量随降雨强度的增加呈指数型增加

的变化趋势,雨强相同时,侵蚀总量随砾石含量的增加呈对数型减小的变化趋势。

参考文献:

- [1] 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.
- [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] 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.
- [4] 李建明,王文龙,李宏伟,等. 黄土区工程堆积体石砾对流速及产沙影响试验研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 64-74.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [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] 景民晓,谢永生,李文华,等. 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.
- [10] 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.
- [11] 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]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 6-10.
- [12] 丁亚东,谢永生,景民晓,等. 轻壤土散乱锥状堆置体侵蚀产沙规律研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 31-36.
- [13] 盛贺伟,蔡强国,孙莉英. 黄土质地对坡面侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 31-35.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [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] 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.
- [19] 胡明鉴,汪稔,张平仓. 斜坡稳定性及降雨条件下激发滑坡的试验研究:以蒋家沟流域滑坡堆积角砾土坡体为例[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 454-457.
- [20] 许炯心. 黄土高原的高含沙水流侵蚀研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 27-34.