

文章编号: 0468-155X(2015)04-0074-07

模拟降雨条件下工程堆积体产流产沙特征研究

王雪松¹, 谢永生^{1,2}, 陈曦³, 田飞³

(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. 西北农林科技大学 资源环境学院 陕西 杨凌 712100)

摘要: 试验选取江西红壤为研究对象, 设计四种降雨强度(1.0、1.5、2.0、2.5mm/min)与四种砾石含量百分数(0%、10%、20%、30%)相组合, 在室内通过降雨试验对坡顶平台有车碾压堆积体在降雨过程中的流速、径流含沙量和侵蚀速率的变化规律进行了研究。结果表明: 堆积体坡面径流流速在整个降雨过程中大体上处于稳定波动状态, 是降雨强度和砾石含量共同作用的结果, 并得到了流速与降雨强度和砾石含量的关系式; 径流含沙量随时间变化曲线可被描述为“先增大—再小幅度减小—再稳定—再急剧减小—最后小幅度上升”的趋势, 同时分析得到了坡顶平台有车碾压堆积体出现二次侵蚀的临界时间为降雨后48min左右; 侵蚀速率随着降雨强度和砾石含量的增大均会增大, 拟合了侵蚀速率与降雨强度和砾石含量的关系式。

关键词: 模拟降雨; 流速; 砾石含沙量; 侵蚀速率

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2015.04.012

工程堆积体是指人们在生产建设过程中倾倒、堆置而成的一种弃土弃渣堆积形态。相对于原生土壤下垫面而言, 工程堆积体的表面物质较松散, 土壤结构也在搬运堆积过程中遭到破坏^[1]。随着我国开发力度的逐渐增大, 在生产建设过程中工程堆积体的水土流失状况日益受到人们的关注, 并得出了大量的试验成果^[2-6]。然而所得到的成果中, 大多是以人工填装土槽的方式来模拟生产建设项目中某个侵蚀面而获得的。根据赵暄^[7]对野外弃土堆积体形态的调查, 在室内模拟真实的堆积体来探讨水土流失规律也是十分有必要的。已有相关学者^[8-9]将重壤质的杨凌土作为试验材料在室内进行了堆积形态仿真模拟的人工降雨试验, 并得到了不同堆积形态之间的水土流失规律。但是由于南方红壤与北方黄土在性质上有着很大的差异性, 这也必然导致侵蚀规律有所不同^[10]; 同时砾石含量的不同也能通过改变土壤物理性质来影响坡面侵蚀^[11-12], 因此研究某个特定堆积形态下不同砾石含量的堆积体在不同降雨强度下的侵蚀规律对深入认识堆积体的流失机理是十分必要的。本文以赣北红土为试验材料, 以坡顶平台有车碾压为堆积形态, 在室内通过人工降雨对不同砾石含量的堆积体在不同降雨条件下的流速、径流含沙量和侵蚀速率随降雨历时变化的情况进行分析。

1 材料与方 法

1.1 试验平台及堆积体形态

试验所使用的试验平台是一尺寸为2.5m×3.0m的长方形钢制观测平台^[8]。堆积体形态选取赵

收稿日期: 2014-08-04

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201201048, 201201047)

作者简介: 王雪松(1990-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面研究。

E-mail: yubao160030@outlook.com

通讯作者: 谢永生。E-mail: ysxie@ms.iswc.ac.cn

暄^[7]在对野外调查后总结出来的5类堆积类型中坡顶平台有车碾压倾倒堆积型作为研究对象。通过人工和传送带相配合的方式完成试验材料在观测平台上的堆积,传送带主要模拟工程中将试验材料卸载到试验平台上,而后则通过人工对堆积体的形态(坡顶平台有车碾压倾倒堆积型)、坡度($33 \pm 2^\circ$)以及尺寸(图1)进行微调,确保每次降雨过程中的下垫面参数保持一致。

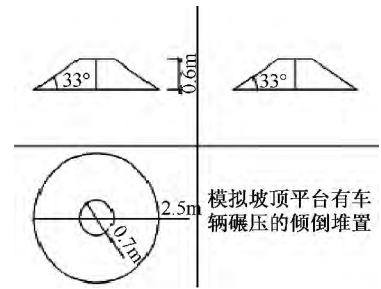


图1 试验堆积体三视图

Fig. 1 Three views of experimental pile sample

1.2 试验材料

1.2.1 试验土壤

试验所用土壤是成土母质为第四纪黏土的典型赣北红土。野外取土地点为多年荒地,地表被大量野草覆盖,在取土前先将表层杂草锄去,然后取下层土壤运回供试验用。土壤前期含水量对试验结果有很大的影响^[13],根据赵暄在野外调查的结果^[7],通过均匀洒水或者阴干的方法对试验材料前期含水率进行调节,确保含水率与野外工程堆积体含水率一致,即保持在13%~15%之间。对试验土壤进行颗粒分析,其颗粒组成见表1。

表1 试验土壤颗粒组成 单位: %

Table 1 Particle size distribution and median diameter of tested soil

unit: %

项目	<0.002mm	0.002~0.02mm	0.02~0.05mm	0.05~0.25mm	0.25~0.5mm	>0.5mm	分形维数
土样 I	19.85	38.78	19.46	17.16	4.48	0.27	16.591
土样 II	19.48	37.04	17.91	19.46	5.77	0.34	17.009
平均值	19.66	37.96	18.68	18.36	5.12	0.31	16.800

1.2.2 试验砾石

试验所用砾石是在建筑工地购得的破口石,砾石呈不规则的多面体形,直径在2~3cm之间。试验材料在观测平台上堆积前,按砾石质量百分比0%、10%、20%、30%的比例将砾石与土壤混合拌匀。

1.3 降雨系统

试验设计了1.0mm/min、1.5mm/min、2.0mm/min和2.5mm/min 4种降雨强度,配上4种砾石质量百分数,共进行16场试验。全部试验均在中国科学院水土保持研究所人工降雨大厅内的下喷区完成,此系统降雨高度为18m,满足所有降雨雨滴达到终点速度,降雨强度变化范围30~350mm/h,降雨均匀度大于80%^[14]。根据以往研究结果^[15-18],用纯净水作为降雨水源已被广泛接受,且能够得到更显著的效果。为确保降雨的均匀性以及稳定性,在进行试验前用塑料将平台上的堆积体遮盖好后,在平台的四角位置进行降雨强度的率定,直到降雨强度符合试验所要求且稳定时,试验人员迅速将塑料撤去,开始进行试验。

1.4 测量方法

1.4.1 流速的测定

试验采用高锰酸钾(KMnO_4)染色剂示踪法记录坡面径流通过一定长度(由坡顶向下延伸0.4m)所用时间来获得径流流速。在坡面开始产流后,4个试验人员在堆积体四角处同时测定流速,并求均值,即为此时刻堆积体坡面流速。试验设计时长为60min,是在堆积体坡面大范围产流后开始计时。在前3min,每隔1min测量一次流速,之后每隔3min测量一次,直到试验结束。试验过程中所测量断面的工程堆积体坡面流为薄层水流。

1.4.2 径流含沙量和侵蚀速率的测定

在坡面产流后,试验人员便开始在观测平台出水口开始接样,并记录接样时间。在前3min,每隔1min接一次,之后每隔3min接一次,直到试验结束。降雨结束后对收集的样品进行测量体积,然后烘干称重,从而获得泥沙质量。最后人工进行数据处理获得径流含沙量和侵蚀速率。径流含沙量 $R_r = \frac{m}{V}$ (R_r 为径流含沙量, g/L; m 为所接样品中泥沙的质量, g; V 为所接样品的体积, L); 侵蚀速率: $E_r =$

$\frac{m}{T}$ (E_r 为侵蚀速率 g/min ; T 为接样时间 min)。

2 结果与分析

2.1 坡面流速随时间的变化

坡面径流流速是研究坡面侵蚀水动力学要素之一,它与坡面水流的剥蚀能力、径流携沙能力等众多水力学特性息息相关。图 2 为在 4 种降雨强度下不同砾石含量堆积体的坡面流速在一场历时为 60min 的降雨过程中的变化情况。

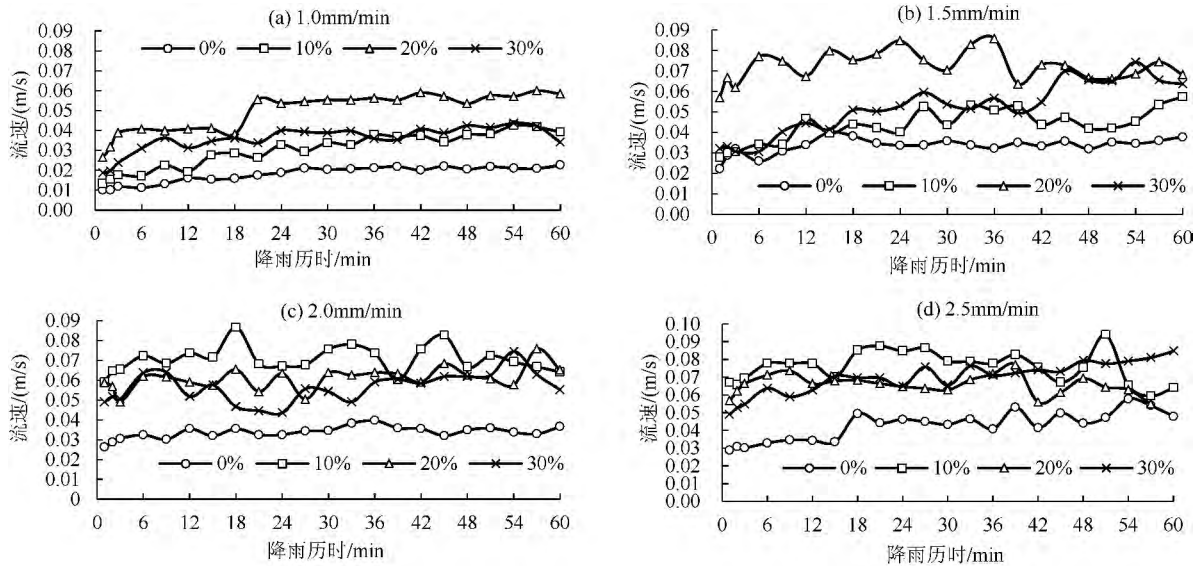


图 2 坡面流速随时间的变化

Fig. 2 Variation of flow velocity with the time

总体来看,在 4 种雨强条件下,含有砾石的堆积体坡面径流流速在整个降雨过程中均要比纯土(砾石含量 0%)的大。通过在试验过程中的观察,造成这种现象的主要原因是许多表层相对平滑的砾石镶嵌于土表。以这种形态存在于堆积体表面的砾石为径流的迁移提供了比纯土表面更光滑的基面,即减小了水流在运动过程中的摩擦力。由于堆积体坡面粗糙度更小,坡面径流在迁移过程中损失的能量也就更小,所以流速更大。同时还可以发现,4 种降雨强度下,各类型堆积体流速随时间的变化除了在前 12min 左右会有上升的趋势,而大体上均表现为波动性稳定状态。在整个降雨过程中,由于红壤的黏粒含量较高,堆积体坡面未出现明显的跌坑或者大面积的剥蚀现象,而是在降雨过程中(12min 后)形成一层结皮,这层结皮由于具有入渗性差、较致密等特点,致使其在整个降雨过程中变化微弱。至于图中曲线会出现波动是由于两方面原因造成的,一方面是由于试验人员在观测流速时不可避免会造成一定的误差;而主要原因是本试验是在模拟人工降雨条件下完成的,它不同于放水冲刷试验,下落雨滴不可避免地会对堆积体表面径流产生一定的扰动,因此在图 2 中也可以发现,雨强较大时,流速曲线的波动幅度也就较大。

2.2 降雨强度和砾石含量对流速的影响

由于本次试验堆积体坡度固定,堆积体形态尺寸也固定,所以能够影响流速的因素无非是降雨强度和砾石含量。为了便于讨论,取各个砾石含量堆积体在一场完整降雨过程中的径流流速的平均值作为讨论对象,对降雨强度和砾石含量与平均流速的关系进行研究。降雨强度和砾石含量的不同均会对堆积体径流流速造成影响(图 3)。相同砾石含量的堆积体,随着降雨强度的增大,平均流速也逐渐增大。然而当降雨强度一定时,不同砾石含量的堆积体在不同的降雨强度下表现出不同的规律。当降雨强度较小时(1.0mm/min 和 1.5mm/min),砾石含量为 20% 的堆积体的流速最大;而当降雨强度较大时

(2.0mm/min 和 2.5mm/min) 砾石含量为 10% 的堆积体的流速最大。这说明在坡度、坡长等因子固定的情况下,堆积体表现出来的流速是受降雨强度和砾石含量共同作用的结果。利用 SPSS 20.0 对数据进行多元线性拟合,得到平均流速与砾石含量和降雨强度的关系式

$$V = 0.005 + 0.02I + 0.066X, R^2 = 0.691 \quad (1)$$

式中 V 为径流流速, m/s; I 为降雨强度, mm/min; X 为砾石含量百分数, 用小数表示。

2.3 径流含沙量随时间的变化

径流含沙量是一个衡量水土流失状况的重要参数,其在模拟土壤侵蚀动力过程以及制定有效的水土流失防护措施等方面起着至关重要的作用^[19-21]。本文主要着眼于在不同降雨强度下不同砾石含量堆积体的径流含沙量在降雨过程中随时间的变化状况(图 4)。

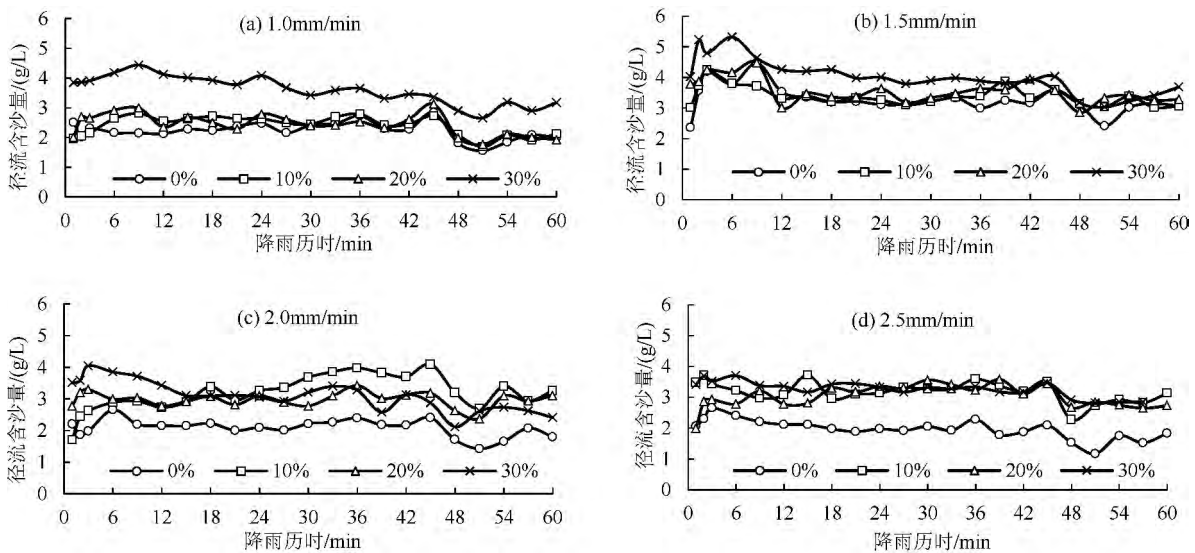


图 4 径流含沙量随时间的变化

Fig. 4 Variation of runoff sediment concentration with the time

总体来看 4 种降雨强度下径流含沙量随时间的变化可被描述为“先增大—再小幅度减小—再稳定—再急剧减小—最后小幅度上升”这几个阶段。通过对降雨过程中径流率的分析以及对坡面在整个降雨过程中的变化情况观察,这种现象主要是由坡面径流以及坡面上可被径流剥蚀搬运的泥沙含量造成的。通过对径流率的分析发现,径流率在整个降雨过程中呈稳定状态,即随着降雨历时的延续,径流变化范围很小。由于径流含沙量是产沙量与径流量的函数,当径流率呈现稳定状态时,径流含沙量即随着产沙量的变化而变化,所以径流含沙量的变化状况主要取决于坡面可蚀性土壤颗粒的含量,换言之,径流含沙量曲线也恰好反应出了坡面可蚀性土壤颗粒含量在降雨过程中的变化趋势。值得注意的是在降雨达到 48min 后曲线的变化趋势,由图 4 可以发现,无论是何种降雨强度下或者何种砾石含量下,堆积体的径流含沙量均会在 48min 前后处出现急剧的下降,而后又开始上升。这恰好是坡顶平台有车碾压堆积体坡面出现进一步侵蚀的临界时间。

2.4 侵蚀速率随时间的变化情况

4 种降雨强度下不同砾石含量堆积体的侵蚀速率随时间的变化情况见图 5,同径流含沙量随时间的变化趋势相似,侵蚀速率随时间也表现为“先增大—再小幅度减小—再稳定—再急剧减小—最后小幅度上升”这几个阶段。出现这种现象主要还是由于堆积体坡面可蚀性土壤颗粒含量的变化引起的。在降雨后期,坡脚由于径流的反复冲刷,该区域结皮破坏,出现新的侵蚀,所以侵蚀速率最后会有小幅度上

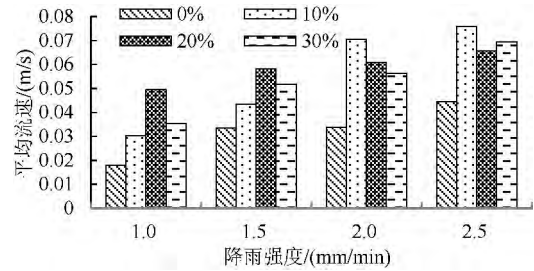


图 3 不同砾石含量和雨强下的平均流速

Fig. 3 Average velocity under different mass percentage of gravel and rainfall intensity

升。而且侵蚀速率随时间变化曲线在 48min 前后同径流含沙量曲线一样出现了先急剧下降后又上升的现象,这进一步验证了坡顶平台有车碾压堆积体坡面出现进一步侵蚀的临界时间是在降雨达到 48min 左右时。这点结论可为制定工程堆积体水土流失防护措施提供一个有效的依据。

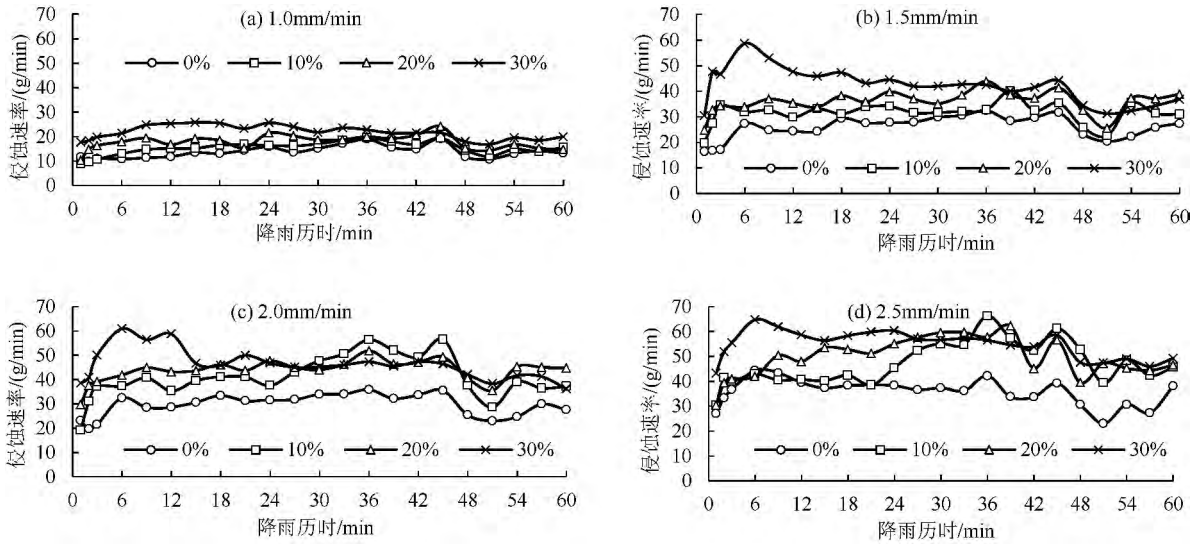


图 5 侵蚀速率随时间的变化

Fig. 5 Variation of erosion rate with the rainfall intensity

2.5 降雨强度和砾石含量对侵蚀速率的影响

在试验条件下,降雨强度和砾石含量是影响侵蚀速率的两个主要因素。为了便于讨论堆积体坡面侵蚀速率在降雨强度和砾石含量的交互影响下的变化规律,取各场降雨侵蚀速率的算术平均值作为研究对象。当降雨强度一定时,各砾石含量堆积体的侵蚀速率表现为 $30\% > 20\% > 10\% > 0\%$ (图 6)。这说明砾石在堆积体中的存在进一步促进了坡面侵蚀,且随着砾石含量的增加而逐步增大。但是根据相关研究^[22],当进一步提升砾石含量后,更大量的砾石出现在表土时,砾石会起到一层护甲的作用,防止土壤受降雨雨滴的影响,从而使侵蚀速率变小。因此,本文所得到的“侵蚀速率随着砾石含量增大而增大”的结论仅适用于砾石百分含量 $\leq 30\%$ 的坡顶平台有车碾压堆积体。同时也可以发现,无论是纯土堆积体还是含有砾石的堆积体,其侵蚀速率均会随着降雨强度的增大而增大。综上所述,堆积体在一场降雨过程中表现出来的侵蚀速率是受降雨强度和砾石含量共同作用而造成的。利用 SPSS 20.0 对试验数据进行多元线性回归分析,可得

$$E_e = -6.271 + 19.084I + 48.168X, R^2 = 0.919 \quad (2)$$

式中 E_e 为侵蚀速率 g/min ; I 为降雨强度 mm/min ; X 为砾石含量百分数,用小数表示。

3 结论

(1) 4 种降雨强度下,含有砾石的堆积体坡面径流流速在整个降雨过程中均要比纯土(砾石含量 0%)的大。除在降雨初期流速有缓慢的上升外,整体来说,各个雨强和砾石含量下的流速处于稳定波动状态。坡面径流流速是降雨强度和砾石含量共同作用的结果,利用数据拟合得到了流速与降雨强度和砾石含量的关系式。

(2) 4 种降雨强度下径流含沙量随时间的变化可被描述为“先增大—再小幅度减小—再稳定—再

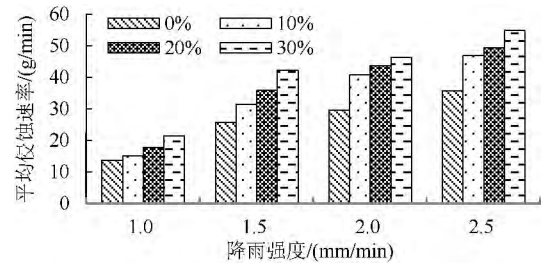


图 6 不同砾石含量和雨强下的平均侵蚀速率
Fig. 6 Average erosion rate under different mass percentage of gravel and rainfall intensity

急剧减小—最后小幅度上升”这几个阶段。同时,根据对径流含沙量特征曲线的分析得到了坡顶平台有车碾压堆积体出现二次侵蚀的临界时间,即降雨历时达到48min左右时。

(3) 试验条件下,当降雨强度一定时,各砾石含量堆积体的侵蚀速率表现为 $30\% > 20\% > 10\% > 0\%$;当砾石含量一定时,侵蚀速率表现为 $2.5\text{mm}/\text{min} > 2.0\text{mm}/\text{min} > 1.5\text{mm}/\text{min} > 1.0\text{mm}/\text{min}$ 。由于降雨强度和砾石含量的差异均会对侵蚀速率造成影响,所以拟合得到了侵蚀速率与降雨强度和砾石含量的关系式。

以上对工程堆积体降雨过程中的流速、径流含沙量以及侵蚀速率进行了分析,然而根据极端情况来看,即砾石百分含量为100%时,侵蚀速率必然为零。这就说明了含砾石堆积体的侵蚀速率不可能一直随着砾石含量的增加而增加,必然存在一个临界砾石含量值。试验设计的4种砾石含量梯度还尚不能确定这个临界值,今后还需要进行大量的研究工作。

参考文献:

- [1] 蔺明华. 开发建设项目新增水土流失研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2008:10-18.
- [2] Morgan R P C, Quilton J N, Smith R E, et al. The European Soil Erosion Model(EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from field and small catchments [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23(6):527-544.
- [3] 孙虎,唐克丽. 城镇建设中人为弃土降雨侵蚀试验研究[J]. *水土保持学报*, 1998, 4(2):29-35.
- [4] 倪含斌,张丽萍,张登荣. 模拟降雨试验研究神东矿区不同阶段堆积弃土的水土流失[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(12):2065-2071.
- [5] Clark S E, Allison A A, Sittler R A. Geographic variability of rainfall erosivity estimation and impact on construction site erosion control design [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2009, 135(4):474-479.
- [6] Meyer L D, Wischmeier W H, W H Daniel. Runoff and Revegetation of Denuded Construction Sites. *Transaction of the ASAE* [J]. *Erosion*, 1971, 14(1):138-141.
- [7] 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):91-93.
- [8] 赵暄,谢永生,王允怡,等. 模拟降雨条件下弃土堆置体侵蚀产沙试验研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3):1-7.
- [9] 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):12-15.
- [10] 张会茹. 红壤坡面与黄土坡面土壤侵蚀过程对比研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
- [11] Van Wesemael B, Poesen J, de Figueiredo T. Effects of rock fragments on physical degradation of cultivated soils by rainfall [J]. *Soil and Tillage Research*, 1995, 33(3/4):229-250.
- [12] Brakensiek D L, Rawls W J. Soil containing rock fragments effects on infiltration [J]. *Catena*, 1994, 23(1-2):99-110.
- [13] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京:化学工业出版社,2006:266-276.
- [14] 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):1-2.
- [15] Catherine Berger, Marcel Schulze, Dirk Rieke-Zapp, et al. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(12):1456-1467.
- [16] Igwe C A, Udegbonam O N. Soil properties influencing water-dispersible clay and silt in an Ultisol in southern Nigeria [J]. *International Agrophysics*, 2008, 22(4):319-325.
- [17] Shainberg I, Warring D, Laflen J M. Soil dispersibility, rain properties and slope interaction in rill formation and erosion [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(1):278-283.
- [18] Tishmack J K, Peterson J R, Flanagan D C. Use of coal combustion by products to reduce soil erosion [C]//International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, 2001:63-73.
- [19] 唐克丽. 中国土壤侵蚀与水土保持学的特点及展望[J]. *水土保持研究*, 1999, 6(2):2-7.
- [20] 郑粉莉. 浅谈我国土壤侵蚀学科亟待加强的研究领域[J]. *水土保持研究*, 1999, 6(2):26-31.
- [21] 王兆印. 泥沙研究的发展趋势和新课题[J]. *地理学报*, 1998, 53(3):245-253.
- [22] Yair A, Lavee H. Runoff generative process and runoff yield from arid talus mantles slopes [J]. *Earth Surface Processes*,

Study on runoff and sediment yield of a spoil pile under simulated rainfall condition

WANG Xue-song¹, XIE Yong-sheng^{1,2}, CHEN Xi³, TIAN Fei³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

3. College of Resources and Environment, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: Laterite in Northern Jiangxi Province was selected as the object in this study. Rain simulation experiments were conducted, which used deionized water under different mass percentage of gravel (0%, 10%, 20%, 30%) and different rainfall intensities (1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm/min). Flow velocity, sediment concentration and the erosion rate of engineering pyramidal accumulation were discussed. Results show that flow velocity stayed relatively stable during the rainfall time, which is a result of the rainfall intensity and the mass percentage of gravel. A formula of the relationship among flow velocity, rainfall intensity and mass percentage of gravel was provided. However, the relationship between the runoff sediment concentration and the rainfall time is complex, sediment concentration increased first, then decreased in low amplitude and stayed stable later; After a duration of stability, sediment concentration decreased dramatically again, but at the last of the rainfall, it appeared a gentle increase. According to the results, we found that the spoil piles got new erosion at the time of 48 min. The conclusion is that erosion rate increased with both the rainfall intensity and the mass percentage of gravel increased during a spoil pile under simulated rainfall condition.

Key words: simulated rainfall; flow velocity; mass percentage of gravel; erosion

(责任编辑: 陈绪坚、刘 峡)

《泥沙研究》征订启事

《泥沙研究》为中国水利学会泥沙专业委员会编辑出版的学术性期刊(双月刊),是全国中文核心期刊和中国科技核心期刊,是本专业最有影响力的中文学术期刊。

《泥沙研究》刊登泥沙专业方面的学术论文、专题综述和工程技术总结,主要专业范围包括:泥沙运动基本理论,河流动力学,河床演变,流域产沙,水土保持,水沙变化,河流地貌,泥沙利用,河流及航道整治,河口、港湾及海岸泥沙,水库泥沙,电站防沙,渠首防沙,渠系泥沙,工业取水与泥沙处理,泥石流,风沙,管路固体输送,工业废水对河流湖泊的污染,泥沙淤积与环境保护及生态影响,泥沙物理模型试验,泥沙数学模型计算,测试仪器与技术以及其他工程建设(如石油、化工、选矿等)中的泥沙问题。

《泥沙研究》是《中国学术期刊(光盘版)》首批入编期刊,也是中国科技论文统计源期刊,并被《中国科学引文数据库》、《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国科技期刊数据库》等重要期刊数据库收录。

本刊2015年改版,国内定价为每册20元,全年订价120元,五年订价600元。

本刊自办公开发行,期刊征订电子信箱: nsyj@iwahr.com; 联系电话: 010-68786628。

《泥沙研究》编辑部