

不同介质陡坡降雨侵蚀产沙试验研究

管新建^{1,3}, 姚文艺², 李占斌¹, 申震洲²

(1. 西安理工大学 水电学院, 陕西 西安 710049; 2. 黄河水利科学研究院,
河南 郑州 450003; 3. 郑州大学, 环境与水利学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 通过比较分析了邙山黄土和粉煤灰在 25° 陡坡、人工模拟降雨条件下的侵蚀特点, 得到以下结论, 不同介质不同雨强条件下的侵蚀小区, 降雨初期径流量都较小, 随着降雨时间的延长, 径流量、产沙量逐渐增大; 当降雨进行到一定时间段时, 径流量、产沙量会出现激增点, 此后径流量、产沙量急剧增加, 经过一段时间后, 径流量、产沙量达到相对稳定状态; 在不同的下垫面介质和不同雨强条件下, 侵蚀小区的径流量、产沙量激增点和它们达到稳定的时间有很大的差异, 随着雨强的增加, 激增点及稳定时刻都会大大提前; 坡面产沙量激增点及相对稳定时间一般滞后径流量的激增点及相对稳定时间约 1~3 min; 粉煤灰基本上能在较小雨强条件下模拟出邙山黄土在较大雨强时才能体现出来的侵蚀特点。

关键词: 陡坡; 不同介质; 侵蚀产沙; 激增点; 相对稳定状态

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)06-0012-04

中图分类号: S157.1

Experimental Study on Erosion Characteristics of Different Materials on Steep Slope Under Artificial Rainfall

GUAN Xin-jian^{1,3}, YAO Wen-yi², LI Zhan-bin¹, Shen Zhen-zhou²

(1. School of Water Conservancy and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou, He'nan 450003, China; 3. School of Environment and Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou, He'nan 450002, China)

Abstract: Through the analysis of the erosion characteristics of Mt. Mang loess and the coal ash on 25° slope, little runoff was found at the beginning of rainfall under the conditions of different materials and different rainfall intensities. As rainfall continued, runoff and sediment increased gradually and then reached sharply high values. After the process continued for a few minutes, they dropped to a steady state. The sharp value and steady time were very different under different materials and different rainfall intensities and occurred early when rainfall intensity increased. Generally, the sharp value and steady time for sediment occurred 1~3 min less than runoff. In addition, the erosion characteristics of light coal ash are the same as those of loess under high rainfall intensity.

Keywords: steep slope; different materials; erosion and sediment; sharp value; steady state

自从 1877 年德国土壤学家 Wollny 开始研究土壤侵蚀的一个多世纪以来, 各国学者在土壤侵蚀规律研究方面作了大量工作^[1-7]。早期的研究多侧重于野外径流小区的试验观测, 开展了相同下垫面不同降雨条件下的侵蚀产沙特征, 或者相同降雨条件下不同下垫面的侵蚀产沙特征。近几年水利部以及国家重点科技攻关项目均安排了重大科研项目对以上问题进行研究^[8-10], 室内模拟试验方面, 目前在大暴雨模拟技术, 原状土与扰动土的相似性, 模型选用比尺及

边界条件相似性, 薄层水流流速、流量及含沙量的量测, 以及室内模拟水保措施等技术方面虽开展了一些研究, 但还没有取得突破性的进展, 尚未形成成熟的技术, 还缺乏对黄土高原室内实体比尺模型的模拟理论和技术的系统研究^[11-12], 因此, 模拟理论、技术和方法是制约黄土高原模型建设的关键。为此, 首先开展单一坡面人工模拟降雨条件下野外原型与室内模型间侵蚀产沙特征的对比研究, 探索室内模型建造选用的合理几何比尺, 以及室内试验测量与野外实测

收稿日期: 2007-07-11 修回日期: 2007-09-10

资助项目: 黄委会基础研究项目“黄土高原实体动床模型模拟理论与技术研究”; 国家自然科学基金项目(40371075); 黄河水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(HKY-JBYW-2007-31)

作者简介: 管新建(1973-), 男(汉族), 河南省确山县人, 博士, 主要从事水土保持及水资源研究。E-mail: gxj1016@zzu.edu.cn.

参数的相似比尺,找出室内试验规律与野外原型试验观测结果的相关关系,探讨有关相似律及其模拟的关键技术,为下一步坡沟系统室内模拟的开展奠定基础显得尤为迫切。本文首先对陡坡条件下不同下垫面介质的侵蚀产沙特点的相似性进行了试验研究,以期对相似比尺模型的建立提供基础和支撑。

1 实验设计

1.1 试验模型设计及人工模拟降雨

在郑州北郊“模型黄河”试验基地根据黄土高原坡面坡度特征构建了室内坡面模型,模拟降雨径流小区选择了 25° 的坡度,径流小区面积为 $1.5\text{ m}\times 5\text{ m}$,裸坡。人工模拟降雨试验采用两联单喷头对喷式降雨器,降雨雨滴组成与天然降雨接近,喷头孔径 $1\sim 8\text{ mm}$,最大雨滴直径可达 5 mm ,降雨喷头距地面高度约为 15 m ,每个喷头降雨覆盖面积约为 $3\sim 4\text{ m}^2$,均匀系数可以达到 75% 以上。

根据降雨器的孔口直径大小以及压力表调节水压来调节降雨强度,几台降雨器联合运用后,降雨强度变化范围为 $0.3\sim 3.5\text{ m}\text{m}/\text{min}$,可模拟黄土高原

的正常降雨条件;试验的多余流量由回流系统重新输送至储水池,节约水源。为了保证试验在相对无风的情况下进行,试验场地建设了挡风设备,且试验时选择一天中早上 $5\sim 9$ 时和下午 4 时之后风较小的时段进行。

1.2 试验材料、设计与方法

1.2.1 试验材料 试验用土为郑州邙山附近农地表层黄土,粉煤灰为河南平顶山姚孟电厂生产,从其物理性质来看,它是一种散粒状物质,是燃煤或矸石电厂的排弃物,颜色灰白色至黑色。在其形成过程中,由于表面张力作用其颗粒大部分为空心微珠,微珠表面凹凸不平,极不均匀,微孔较小,一部分因在熔融状态下互相碰撞而连接,形成粗糙表面,棱角较多的蜂窝状粒子,颗粒粒径在 $1\ 000\sim 10\ \mu\text{m}$ 之间的约占 85% 以上。而且其粒度较细,细度为 7.0% ,比重为 $2.1\text{ g}/\text{cm}^3$,低于土壤颗粒的密度,容重 $0.65\text{ g}/\text{cm}^3$,比表面积 $2\ 800\text{ cm}^2/\text{g}$,含水率为 0.1% ,在粒径上相当于砂级。粉煤灰吸附气态水的能力和吸水的能力与土壤大致相同。黄土和粉煤灰的颗粒组成如表1所示。

表1 黄土和粉煤灰的各级粒径组成

%

材料	粒径范围/mm						
	>1.0	$1\sim 0.25$	$0.25\sim 0.05$	$0.05\sim 0.01$	$0.01\sim 0.005$	$0.005\sim 0.001$	< 0.001
邙山黄土	0	1.05	35.45	43.4	3.2	6.4	10.5
粉煤灰	0	0.51	37.2	41.29	11	8	1

1.2.2 试验设计与方法 试验在宽为 150 cm ,长 500 cm 的试验土槽内进行。先在冲刷槽下部铺填天然沙,以保持试验用土的透水状况接近天然坡面,再在其上部填 $40\sim 50\text{ cm}$ 厚的黄土或粉煤灰,填料结束后,将坡面整平以保证每次试验其边界条件基本一致,并用烘干法和环刀法分别测定土壤含水量及容重,使试验槽内的土壤含水量控制在 11% 左右,干容重控制在 $1.2\text{ g}/\text{cm}^3$ 左右。试验产流后每 2 min 收集一次浑水样,采用置换法求其含沙量。坡面流速采用染色剂法(KMnO_4),并沿坡面径流方向布设 5 个断面,分断面观测。

2 结果与讨论

2.1 不同介质在不同降雨条件下的径流量变化

对图1进行比较分析后发现,无论是粉煤灰还是邙山黄土,其径流量都有以下大致规律:降雨初期的径流量都较小,随着降雨时间的延长,径流量逐渐增大;当降雨进行到一定时间段时,径流量会出现激增点,此后径流量急剧增加,经过一段时间后,径流量达

到相对稳定状态。但是在不同的下垫面介质和不同雨强条件下,其径流量的激增点和达到稳定的时间有很大的差异。

从图1中可以看到,邙山黄土在雨强较小时(如 $I=0.45, 0.76\text{ mm}/\text{min}$),激增点出现的时间较晚,降雨进行到 20 min 左右时径流量才开始急剧增大,并且径流量也没有要达到稳定的趋势。但是邙山黄土在较大雨强(如 $I=0.95, 1.23\text{ mm}/\text{min}$),降雨进行到 $5\sim 10\text{ min}$ 时,径流开始出现激增点,径流量增加到一定程度后,降雨及坡面的人渗产流达到相对稳定状态,径流量表现为大致持平的状态。由以上分析可知,随着降雨强度的增大,坡面径流出现激增点的时间提前,坡面侵蚀达到相对稳定的时间缩短。同时可以看到粉煤灰也具有与邙山黄土基本相似的规律:即随着降雨强度的增加,坡面径流也会出现激增点,且随着雨强的增大,激增点出现的时间提前,粉煤灰在雨强为 $0.36\text{ mm}/\text{min}$ 时,由于雨强较小,粉煤灰的人渗量较大,因此坡面径流非常小,当降雨进行到 28 min 时径流才开始出现激增点。然后随着雨强的增

大,径流的激增点出现时间开始大大提前,粉煤灰在雨强为 0.52 和 0.75 mm/min 时,激增点分别在降雨进行到 10 和 5 min 时开始出现,然后径流在一段时间内剧烈增加,当雨强为 0.52 mm/min 时,降雨进行到 15 min 后径流量达到相对稳定状态,而雨强为 0.75 mm/min 的降雨则提前到 10 min 时达到稳定状态。综合以上分析,可以得到以下规律:在雨强一

定时,坡面径流量随着降雨时间的延长一般先缓慢增加,然后出现激增点,径流量急剧增加,经过一段时间后降雨达到稳定状态,径流量达到相对稳定状态。在各种条件相对稳定时,随着降雨强度的增大,坡面径流量出现激增点的时间会逐渐提前,径流量达到相对稳定的时间也会提前。粉煤灰也是如此规律,且其提前和增加的趋势更加明显。

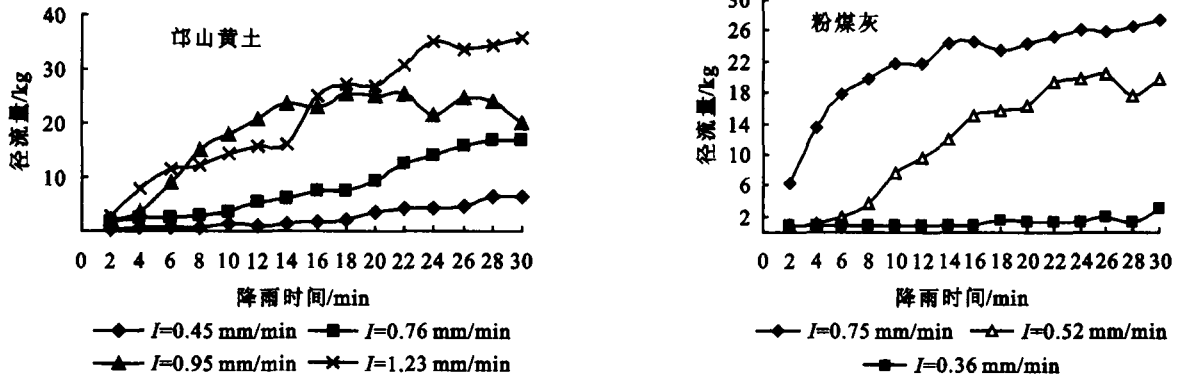


图 1 不同介质在不同降雨条件下的径流量随时间变化

2.2 不同介质在不同降雨条件下的产沙量与含沙率的变化

经过对坡面的产沙量和径流含沙率进行比较分析,从图 2 的比较中可以看到,首先邙山黄土的产沙量和含沙率的变化趋势较吻合,而对于粉煤灰,二者之间的吻合性较弱,但这并不说明粉煤灰的模拟效果就一定不好,因为产沙量与含沙率之间没有必然的联系。对图 2 进行比较分析后发现,产沙量或含沙率曲线中会出现突然增加的现象,这是由于坡面降雨过程中产生的跌坎或滑坡导致的产沙量突然增加,从而影响径流量的含沙率。但是坡面的产沙量和含沙率仍有以下规律可循,在雨强一定的条件下,坡面产沙量和径流含沙率有以下特征。产沙量与径流含沙率随降雨时间的延长而逐渐增大,当降雨进行到一定时间段时出现激增点,但产沙量激增点一般要比径流量激

增点滞后 2~3 min,持续增加一段时间后会达到产沙量或含沙率的相对稳定状态,甚至出现下降趋势。邙山黄土在雨强逐渐增大的条件下,坡面产沙出现激增点以及达到相对稳定状态的时间会逐渐提前,但都会比径流量激增点出现的时间晚 2~3 min,例如,当 $I=0.76$ mm/min 时,坡面产沙的激增点及达到相对稳定的时间分别为 20 min,26 min,而当 $I=0.95$ mm/min 时,则提前到 8 min,18 min。粉煤灰随着降雨时间的延长以及降雨强度的增加也具有类似趋势。例如,当 $I=0.52$ mm/min 时,坡面产沙的激增点及坡面达到相对稳定的时间为 10 min 和 22 min,当 $I=0.75$ mm/min 时提前到 4 min 和 16 min,且其出现时间比径流量出现激增点或达到相对稳定的时间晚 1~2 min,这是由于径流与产沙的不同步造成的产沙滞后现象。

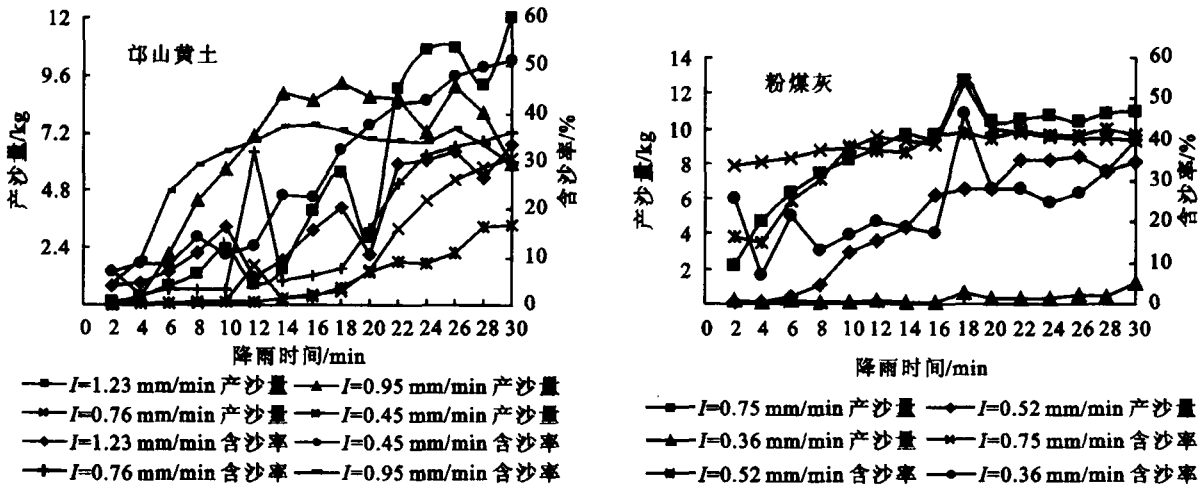


图 2 不同介质在不同降雨条件下的产沙量与含沙率随时间的变化

将邛山黄土与粉煤灰比较后发现,粉煤灰与邛山黄土侵蚀特点基本上具有相似性,且粉煤灰可以在较小雨强条件下模拟出邛山黄土在较大雨强条件下的侵蚀特点,其具体的相似程度有待进一步的探讨。

2.3 不同介质在不同降雨条件下的累积侵蚀量变化

为了进一步研究邛山黄土和粉煤灰的侵蚀特点,笔者对侵蚀小区的累积侵蚀量进行了比较分析。从图3中可以看出,随着降雨时间的延长,累积侵蚀量只出现激增点,没有出现后来的相对平缓的趋势,这

可能是由于降雨后期的侵蚀产沙量过大,远大于以前的侵蚀基数造成的。

邛山黄土累积侵蚀量随着降雨强度的增加,激增点出现的时间提前,但激增点出现以后的增加趋势变缓,这也是由于后来的侵蚀量过大,以前的侵蚀基数过小造成的。粉煤灰的变化趋势与邛山土在较大雨强时的侵蚀规律基本相似,也从侧面反映了粉煤灰具有在较小雨强条件下模拟邛山黄土在较大雨强条件下侵蚀特征的能力。

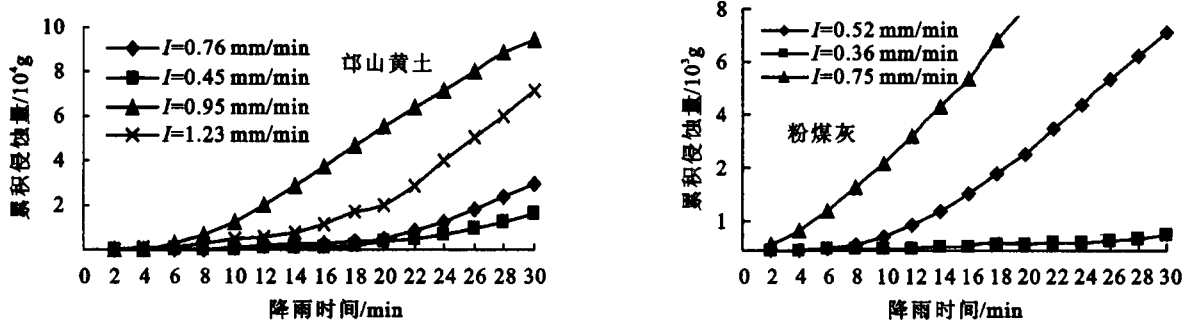


图3 不同介质在不同降雨条件下的累积侵蚀量随时间的变化

3 结论

通过分析邛山黄土和粉煤灰在人工模拟降雨条降下的侵蚀特点,得到以下结论。(1)不同介质不同雨强条件下的降雨初期,小区径流量都较小,随着降雨时间的延长,径流量、产沙量逐渐增大;当降雨进行到一定时间段时,径流量、产沙量会出现激增点,此后径流量急剧增加,经过一段时间后,径流量、产沙量达到相对稳定状态。(2)在不同的下垫面介质和不同雨强条件下,其径流量、产沙量激增点和它们达到稳定的时间有很大的差异,随着雨强的增加,激增点及稳定时刻都会大大提前。(3)坡面产沙量激增点及相对稳定时间一般滞后径流量的激增点及相对稳定时间约1~3 min。(4)粉煤灰基本上能在较小雨强条件下模拟出邛山黄土在较大雨强时才能体现出来的侵蚀产沙特点。

[参考文献]

[1] 王礼先. 水土保持学[M]. 北京:中国林业出版社, 1995.
 [2] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安:陕西人民出版社, 1997.
 [3] Poesen J W, Torri D, Bunte K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review[J]. *Catena*, 1994, 23: 141—166.

[4] Bunte K, Poesen J W. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of noncohesive sediment by shallow overland flow[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29 (5): 1415—1424.
 [5] Poesen J W, Vandaele K, Wesemael B V. Gully erosion: importance and model implications, Modeling Soil Erosion by Water[J]. *NATO ASI Series*, 1998, 155: 285—311.
 [6] Larson W E, Lindstrom M J, Schumacher T E. The role of severe storm in soil erosion: A problem needing consideration[J]. *J. Soil and Water Cons*, 1997, 52 (2): 90—95.
 [7] Olson K R, La R, Norton L D. Evaluation of methods to study soil erosion—productivity relationships[J]. *J. Soil and Water Cons*, 1994, 49(6): 586—590.
 [8] 刘昌明. 黄河下游断流的径流序列分析[J]. *地理学报*, 2000(3): 257—265.
 [9] 程义. 延河洪水输沙特征分析[J]. *水土保持学报*, 1992, 6(2): 35—40.
 [10] 张胜利. 略论黄河中游水沙变化及水土保持减沙效益[J]. *水土保持通报*, 1994, 14(3): 8—10.
 [11] 李敏. 模型黄土高原建设与研究的若干问题探讨[J]. *中国水土保持*, 2005(12): 7—9.
 [12] 徐向舟, 张红武. 坡面水土流失比尺模型相似性的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 25—27.