

三峡库区野外模拟降雨条件下弃渣场土壤侵蚀特性

张家铭, 左鸿鹏, 邵晓泉, 范志军, 周晓宇, 胡舫瑞

(中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: [目的] 揭示三峡库区弃渣场土壤侵蚀规律, 为该地区弃渣场的土壤侵蚀治理提供依据。[方法] 通过现场搭建径流小区并采用人工模拟降雨的方法进行研究。[结果] 降雨量同侵蚀量存在极显著的线性关系; 降雨强度同渣场产流时间呈极显著的幂函数关系, 同径流含沙率呈极显著的指数函数关系; 渣场表层较高的细砾石含量, 一定程度上可以减少溅蚀与面蚀量, 但在强降雨或持续降雨条件下会促进坡面沟蚀的发育; 渣场侵蚀具有一定季节分布, 非雨季时, 渣场侵蚀以面蚀与轻微沟蚀为主, 坡面主要发育为细沟与浅沟, 侵蚀量较少; 雨季时, 渣场坡面浅沟迅速转化为切沟, 泥沙流失严重。[结论] 研究区渣场侵蚀具有一定的季节性, 渣场施工时应根据气候特征适当调配, 主动避开雨季, 并在雨季前完成渣场的水土保护设置; 采取相应防护措施抑制或减缓雨季沟蚀的发育是研究区渣场水土保持防护的重点。

关键词: 弃渣场; 土壤侵蚀; 流失特征; 人工降雨; 侵蚀规律

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0007-05

中图分类号: S157.1

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.067

Soil Erosion Characteristics of Dumping Sites Under Simulated Rainfall Conditions in Three Gorges Reservoir Region

ZHANG Jiaming, ZUO Hongpeng, SHAO Xiaoquan, FAN Zhijun, ZHOU Xiaoyu, HU Fangrui

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to reveal the soil erosion characteristics of dumping sites in Three Gorges reservoir region in order to provide basis for the management in this area. [Methods] Run-off plots were constructed and simulated artificial rainfall was used in this research. [Results] A significant linear relationship was found between rainfall and erosion amount. The rainfall intensity showed a significant power function correlation with the runoff time, while it showed an exponential regression correlation with the sand content. Fine gravel with high concentration in the dumping sites surface soil reduced the splash and sheet erosions in some extent, however, it intensified the gully erosion under the condition of heavy or continuous rainfall. Furthermore, soil erosion in the dumping sites presented seasonal variations. During the dry season, soil erosion was dominated by sheet erosion and slight gully erosion, and the erosion amount was little. In contrast, in wet season, shallow grooves were converted into ditches rapidly, and the erosion became more severe. [Conclusion] As soil erosion in dumping sites of Three Gorges reservoir region changes seasonally, constructions can be done according to the changes of season to avoid the rainy season. Taking the protective measures to prevent or slow down the development of gully erosion in the rainy season is the focus of soil and water conservation in the study area.

Keywords: dumping sites; soil erosion; erosion characteristics; artificial rainfall; erosion rule

随着生态环境对建设活动的进一步制约, 生产建设项目区新增水土流失越来越受到研究者的关注。研究表明, 弃渣堆积体对公路建设过程中土壤流失总量的贡献达 78%~90%, 弃渣场已成为基建工程中

重要的新增水土流失源^[1-2]。不少学者针对弃土场土壤侵蚀进行了研究。马春燕等^[3]探讨了水电站弃渣场的水土流失过程, 发现产流率随供水的动态变化整体呈增长趋势, 可用幂函数方程描述; 径流含沙量同

收稿日期: 2014-04-10

修回日期: 2014-06-10

资助项目: 湖北省交通运输厅科技项目“三峡库区公路弃土场设计与施工技术研究”(2011-700-3-18)

第一作者: 张家铭(1976—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程、地质工程方面研究。E-mail: zjmm@163.com。

通信作者: 左鸿鹏(1989—), 男(汉族), 山西省平遥县人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: rishengcaoxi@163.com。

供水时间可用对数相关方程来描述。

苏芳莉等^[4]探讨了雨强、坡度同径流量之间的关系,认为雨强可改变径流规律,小雨强时径流量增加较平缓而大雨强时呈波动性增加;董建志等^[5]认为小雨强下弃渣场径流显著受到土壤干容重及坡度的影响,而随雨强的增加,坡度及土壤干容重对径流的影响逐渐被降雨所覆盖。孙飞云等^[6]认为弃土场坡面土壤特性受降雨击溅和径流冲刷的影响,进而影响径流和渗流途径,造成坡面产流的不一致性。何凡等^[7]认为弃土场坡面土体稳定性差,侵蚀量随坡度增加会大幅上升;受到汇水面积影响,侵蚀量由坡顶到坡脚逐渐增大。

目前,在渣场水土流失量与降雨、坡度、坡长等侵蚀影响因子的关系等方面的研究已取得了不少进展,但对侵蚀过程中侵蚀沟的形成发育及相应特征涉及较少,也缺乏定量考虑土壤性质对侵蚀量的影响,且尚未提出有广泛适用性的侵蚀量预测模型。

本文通过现场搭建径流小区并采用人工模拟降雨的方法,研究宜巴高速公路弃渣场土壤侵蚀与其影响因素之间的关系,并在此基础上探讨弃渣场侵蚀沟发展规律。拟为三峡库区公路建设过程中土壤流失量的预测和水土保持措施的合理布设提供指导。

1 研究区概况

石门垭弃渣场位于宜昌到巴东线 ZK119+100 左侧 100 m,处于秭归县水田坝镇境内,占地 7.53 hm²,设计弃方量为 7.20×10⁵ m³,坡高比为 1:1,渣场为机械堆填,主要为粉砂质泥岩和长石石英砂岩。按照中国土壤侵蚀分区^[8],该地区土壤侵蚀以水力侵蚀为主,因此本研究对象为渣场水力侵蚀。秭归县降水主要集中于夏半年,春夏两季降水总量约占全年的 72%,秋季占 22%,而冬季降水量仅占全年的 6%。6—8 月仅 3 月的降水量几乎占全年的 1/2。全年的降水日数中,以小雨为主,约占总数的 75%,随降水强度的增加,降水日数逐步减少。全年平均暴雨日数为 3 d 左右,主要分布在 4—10 月,集中出现在 6—8 月。其余时间没有暴雨出现。

2 研究方法

2.1 土壤侵蚀观测

在石门垭弃渣场设 3 个径流小区进行土壤侵蚀研究。由于地形条件所限,未按标准径流小区规格进行布设,设置的小区有效面积为 4 m×4 m,四周采用 PVC 板材同外界隔断,下边界设有导流槽、集流桶用以收集侵蚀泥沙,为便于观察侵蚀的发展,坡面上方

采用无弹性绳临空架设 30 cm×30 cm 的方格网。对选定的小区进行土壤密度、含水量及植被盖度的测定。试验区基本情况见表 1。

表 1 试验小区基本情况

小区编号	坡度/(°)	密度/ (kg·m ⁻³)	含水量/%	盖度
1 [#]	43	1 167	1.8	0
2 [#]	42	1 210	1.1	0
3 [#]	43	1 095	1.5	0

2.2 降雨设备及观测

人工模拟降雨试验是小尺度研究的常用手段^[9],可以克服天然降雨每年次数有限且具有偶然性的缺点,方便快速地测定不同条件下径流、泥沙变化规律。自制降雨设备由 GG 型小流量标准喷头(日本喷涂系统株式会社所生产,孔径 1 mm),控制阀,增压泵,支架,水表等组成,水源为山沟汇集的雨水,通过控制喷头及降雨时间来调整降雨强度及降雨量,实际雨强由 CR2 型翻斗式电脑数字雨量计配合水表来测定。根据试验区降雨特性及降雨强度划分标准^[10],设置 6 种雨强,具体情况见表 2。

表 2 人工模拟降雨参数

降雨类别	小雨	中雨	大雨
降雨强度/(mm·min ⁻¹)	0.2 0.35 0.45 0.55 0.65 0.85		
降雨时间/min	60 45 45 45 45 35		

2.3 土壤侵蚀测定

通过计算集流桶内泥沙量来测定侵蚀总量^[11],侵蚀泥沙量分两部分组成,一部分为沉积于导流槽、集流桶内的泥沙,此部分泥沙基本由细砂以上的大颗粒组成,可直接烘干称重;另一部分为分散于侵蚀径流中的细砂粒、黏粒,须通过取均匀水样,通过测其含沙量来测定,两部分和为总的泥沙侵蚀量。

通过 IPP(image—pro plus)软件测定沟蚀量。IPP 可提供多种的测量参数,如目标面积、长短径等^[12]。试验前,在试验区对面视线良好的区域定点安装高分辨率单反相机,以记录降雨过程中土壤侵蚀的全过程。通过 IPP 软件对土壤侵蚀过程照片进行分析量测,获得坡面侵蚀的变化数据,并结合试验过程的现场记录进行校对整理。

3 结果与分析

3.1 降雨对渣体侵蚀的影响

为克服量纲不同的影响,分析之前已将数据进行标准化处理。将标准化数据通过 SPSS 软件做皮尔

逊相关分析,结果显示降雨量、降雨强度同次降雨侵蚀量之间的相关性系数均大于 0.9,表明降雨量、降雨强度同侵蚀量之间存在显著的线性相关性(表 3)。

表 3 降雨量、降雨强度同侵蚀量之间相关性分析

试验小区	降雨量同土壤侵蚀量		降雨强度同土壤侵蚀量	
	相关性	显著性	相关性	显著性
1 [#]	0.997	0.000	0.976	0.000
2 [#]	0.965	0.002	0.996	0.000
3 [#]	0.961	0.002	0.997	0.000

注:显著性系数小于 0.05 时表示显著相关;小于 0.01 时表示极显著相关。

3.1.1 降雨量同土壤侵蚀量的关系 根据皮尔逊相关分析,3 个小区的次降雨土壤侵蚀量同降雨量之间存在极显著的线性关系,表明不考虑其他因素时,降雨量达到一定程度后渣场土壤侵蚀量随降雨量的增加呈线性增加(图 1)。

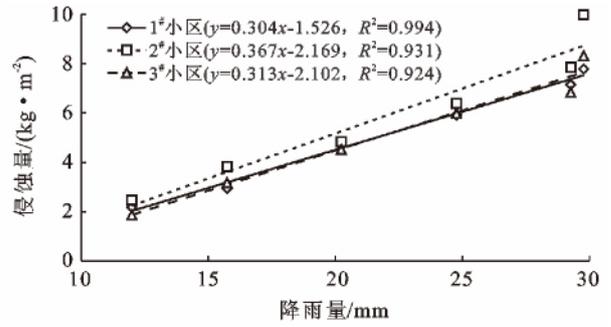


图 1 降雨量与土壤侵蚀量间的关系

3.1.2 降雨强度同土壤侵蚀量的关系 降雨强度同土壤侵蚀量之间也存在显著的线性相关关系,但降雨强度的效用突出表现在雨滴的击溅作用及对坡面径流的影响上。为突出降雨强度的特点,从渣场坡面产流时间及径流含沙率来探讨降雨强度同土壤侵蚀之间的关系。各小区坡面产沙时间及径流含沙率情况(表 4)。

表 4 各小区坡面产流时间及径流含沙率

降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	1 [#] 小区		2 [#] 小区		3 [#] 小区	
	产流时间/min	含沙率/%	产流时间/min	含沙率/%	产流时间/min	含沙率/%
0.20	25	7.21	23	8.87	21	7.81
0.35	17	7.62	21	9.61	16	8.03
0.45	13	9.96	18	10.60	15	9.52
0.55	9	10.90	7	11.96	11	10.96
0.65	6	11.16	9	12.26	8	11.63
0.85	5	13.56	6	14.85	8	12.94

以渣场次降雨坡面产流时间为因变量、降雨强度为自变量做一元回归分析,结果表明产流时间同降雨强度存在幂函数关系(图 2),且 3 个小区的相关系数均大于 0.8,表明拟合关系好。因降雨强度均小于 1,故幂函数均为单调减函数,即随降雨强度的增大,渣场产流时间逐渐减少,当降雨强度达到一定值,产沙时间达到相对稳定的状态,这时单位时间坡面的入渗量达到饱和。

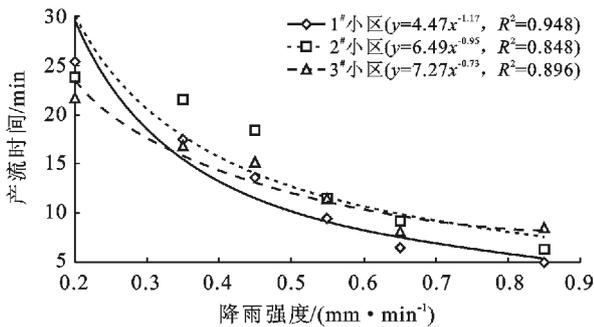


图 2 不同雨强下渣场产流时间

以次降雨径流含沙率为因变量、降雨强度为自变量做一元回归分析,结果表明二者之间存在指数函数关系(图 3),且 3 个小区的相关系数均大于 0.9,说明拟合关系良好。指数函数为单调增函数,随降雨强度的增加,径流含沙率逐渐增大。这是因为随降雨强度的增加,单位时间雨水对坡面的冲刷作用增强,更多的细颗粒甚至中、粗颗粒被径流冲刷携带,导致径流含沙率增加。

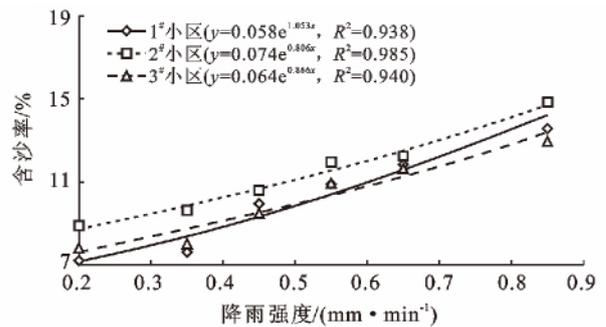


图 3 不同雨强下径流含沙率

弃渣场为破碎土石堆积体,一般具有砾石含量高、颗粒间空隙大、欠固结等特点。试验选取的 3 个小区为机械堆填所成,坡度基本相同(表 1),且过程中未采取其他密实措施,故渣体表层密实度基本一致。因此,相同条件下砾石含量高的 2# 小区可以提供更多供细小粗颗粒移动的通道(空隙),这也是图 3 中 2# 小区含沙率高于其他小区的原因。

3.2 土壤粒径级配同渣场土壤侵蚀的关系

3 个径流小区的弃渣粒径情况见表 5。按国际制土壤颗粒划分标准,单粒直径 >2 mm 的称其为砾石,3 个小区砾石含量均超过 30%,2# 小区甚至超过 40%。参照《建筑地基基础设计规范》(GB—2007),3

个小区的弃渣均属于砾砂。

水蚀分为溅蚀、面蚀和沟蚀 3 种。由表 5 可知,2# 小区侵蚀量最大但溅蚀、面蚀量最少,3# 小区侵蚀量最少但溅蚀、面蚀量最多,1# 小区侵蚀量与溅蚀、面蚀量居中;3# 小区径流量最多,1# 小区次之,2# 小区最少。3 个小区粒径组成基本相同,但 2# 小区的 2~20 mm 细砾石含量高于其他小区。

对比分析可知,较高的细砾石含量可以在一定程度上减少渣场的径流量及溅蚀、面蚀量,这是因为砾石含量高,颗粒间空隙增大,利于雨水的下渗,减少坡面径流,从而减少侵蚀量;沟蚀量同细砾石含量之间存在一定正相关性。

表 5 径流小区粒径级配特征

试验 小区	侵蚀量/ kg	径流量/ L	溅蚀与 面蚀/kg	沟蚀量/ kg	原样粒径累积百分含量/%				
					>20 mm	>10 mm	>5 mm	>2 mm	≤ 2 mm
1#	44.30	141.7	9.30	35.08	5.28	7.62	13.46	33.94	66.06
2#	52.52	126.5	7.52	44.10	7.79	15.55	23.56	42.77	57.23
3#	41.65	143.1	11.66	29.98	4.15	7.79	10.92	31.15	68.85

3.3 渣场侵蚀特征

3.3.1 渣场侵蚀类别 沟蚀的发展过程为细沟、浅沟和切沟。降雨过程中通过定点设置的高分辨率相机记录坡面侵蚀的全过程,结合现场记录及后期 IPP 软件的分析,确定了各小区不同阶段的侵蚀类型,侵蚀沟的发生发展过程以及相应的侵蚀量。渣场土壤侵蚀中,沟蚀的侵蚀量所占比例最大,均超过了各小区侵蚀总量的 70%,其中 2# 小区的沟蚀侵蚀量达到了总量的 87%,1# 小区次之(79%),3# 小区最少(72%)。

3.3.2 渣场侵蚀沟特征 细沟的形成意味着面蚀的结束沟蚀的开始。为方便统计,参照江玉林等^[13]的研究并结合试验情况,将沟深、宽均不足 5 cm 的沟划分为细沟,大于 5 cm 且沟深小于 10 cm 的沟划为浅

沟,将沟宽大于 15 cm 沟深超过 10 cm 且有明显沟沿、沟坡和沟底的沟划分为切沟(表 6)。

由表 6 可知,渣场沟蚀同降雨强度有密切关系。中、小雨强时,雨滴的直径与能量有限,对颗粒的击打冲刷力有限,坡面首先在凹陷或地势较低处出现小细沟,细沟渐向两端发育,但深、宽度发育较慢。降雨条件变化不大时,细沟发育渐至稳定,偶有细沟发育为浅沟。当雨强增大时,雨滴的直径与能量增大,对颗粒的击打冲刷力用增强,同时雨水下渗不及,坡面径流进一步增多、流速加快,细沟渐发育为浅沟,直至达到新的平衡。浅沟的规模较细沟增大的了很多,径流量与侵蚀量均成倍增加。浅沟的侵蚀量为细沟的 2.44 倍。但在降雨条件不变的情况下,浅沟发育较稳定,向切沟发展的趋势并不明显。

表 6 石门坝弃渣场小区侵蚀状况

类别	小雨期间		中雨期间		大雨期间		总计	
	侵蚀沟数量/条	累积侵蚀量/kg	侵蚀沟数量/条	累积侵蚀量/kg	侵蚀沟数量/条	累积侵蚀量/kg		
1# 小区	细沟	0~7	1.32	7~13	1.86	13~9	2.45	5.63
	浅沟	0~1	1.24	1~3	3.71	3~5	6.19	11.14
	切沟	0	0	0~1	6.11	1~2	12.21	18.32
2# 小区	细沟	0~9	1.23	9~14	1.65	14~11	2.06	4.94
	浅沟	0~3	2.94	3~5	3.89	5~6	8.83	15.66
	切沟	0	0	0~2	7.38	2~4	16.14	23.52
3# 小区	细沟	0~7	1.01	7~13	1.81	13~9	2.63	5.45
	浅沟	0~1	0.99	1~4	3.94	4~5	5.91	10.84
	切沟	0	0	0~1	4.56	1~2	9.13	13.69
累积降雨量/mm	27.75		74.25		29.75		131.75	

雨强度达到一定值时,单位时间作用于坡面的雨量远大于排水量,坡面细、浅沟内流量增大、流速加快,沟沿及沟岸的泥沙受到的浮力与冲刷力增大,大量颗粒随径流迁移,浅沟快速发育形成切沟,导致短时间内大量泥沙流失。由表6可知,3个侵蚀小区最终共生成了6条切沟,侵蚀量却达到总量的53%,故沟蚀同降雨强度存在较强的正相关关系,切沟往往发生于几场大雨或暴雨期间。在相同降雨条件下,2#小区的切沟的数量与侵蚀量均高于其他2个小区,这是因为渣体细砾石含量高,相同降雨条件下,雨水下切较快,导致局部高差较大,加速了沟蚀的发展。

在中、小雨强下渣场侵蚀以面蚀与轻微沟蚀为主,坡面主要发育细沟与浅沟,侵蚀量不大;而在强降雨下,坡面浅沟会在短时间内迅速发育转化切沟,一旦切沟形成,侵蚀量便会快速增加,且砾石含量越高,泥沙流失越严重。结合研究区降雨特性,可知该地区渣场侵蚀具有较明显的季节性。6—8月的降雨量几乎占全年的1/2,且全年的大、暴雨几乎均出现在此期间,所以渣场侵蚀主要发生在夏季,尤其是在多日连续降雨或暴雨条件下,坡面沟蚀发育,泥沙流失严重。其他时间,由于降雨较少且主要为小强度降雨,渣场侵蚀相对较少。

4 结论

研究区渣场侵蚀具有一定的季节性,非雨季时,降雨较少且强度有限,渣场侵蚀以面蚀与轻微沟蚀为主,侵蚀量较少;雨季时,在持续降雨或强降雨下,渣场坡面浅沟迅速转化为切沟,泥沙流失严重。所以,渣场施工时应根据气候特征适当调配,主动避开雨季,并在雨季前完成渣场的水土保护设置。

降雨量同渣场侵蚀量之间存在极显著的线性关系。不考虑其他因素时,降雨量达到一定程度后侵蚀量随降雨量的增加呈线性增加。降雨强度对渣场侵蚀量的影响主要体现在产流时间与径流含沙量上,产流时间同降雨强度存在极限值的幂函数关系,径流含沙量同降雨强度存在极显著的指数函数关系。

弃渣场表层较高的细砾石含量可以减少径流量及溅蚀、面蚀量,故在以面蚀与轻微沟蚀为主的非雨

季时可以有效减缓渣场侵蚀。但在在雨季强降雨或持续降雨条件下,表层较高的细砾石含量导致雨水下切块,增大局部高差,加速坡面沟蚀的发育。结合研究区降雨特征及侵蚀特性,渣场水土保持防护的重点为采取相应防护措施抑制或减缓雨季沟蚀的发育。

[参考文献]

- [1] Xu Xibao, Yan Tan, Yang Guishan, et al. Soil Erosion in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Soil Research, 2011(49):212-222.
- [2] 简明华. 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.
- [3] 马春艳, 王占礼, 寇晓梅, 等. 工程建设弃土弃渣水土流失过程试验研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(3): 78-82.
- [4] 苏芳莉, 范昊明, 安晓奇, 等. 辽宁棕壤区开发建设项目弃土流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 63-66.
- [5] 董建志, 张科利, 刘宏远, 等. 公路弃土场坡面产流特征及过程模拟[J]. 泥沙研究, 2012(4):53-57.
- [6] 孙飞云, 杨成永, 刘世海, 等. 铁路工程大型弃土场水蚀特征天然降雨试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 115-118.
- [7] 何凡, 尹婧, 陈宗伟, 等. 青海省公路弃土场土壤侵蚀规律天然降雨试验研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 131-134.
- [8] 杨新. 中国土壤侵蚀分区及土壤流失调查[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4):131-136.
- [9] 吴光艳, 祝振华, 成婧, 等. 人工模拟降雨特性对坡面产流产沙量的影响研究[J]. 节水灌溉, 2011(6):44-47.
- [10] 国家气象局. 降水强度等级划分标准[S]. (2008-10-07). http://www.gov.cn/ztl/2008tffy/content_1113935.htm.
- [11] 陈宗伟, 江玉林, 张洪江. 高速公路弃土场边坡沟蚀规律研究:以湖北沪蓉西高速公路为例[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(S1):6-10.
- [12] 张季如, 祝杰, 黄丽, 等. 土壤微观结构定量分析的IPP图像技术研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(4): 80-83.
- [13] 江玉林, 张洪江. 公路水土保持[M]. 北京:科学出版社, 2008.