江西省生产建设项目弃土弃渣土壤侵蚀定量研究

房焕英[1]，谢颂华[1]，黄鹏飞[1]，刘 英[2]

(1.江西省水土保持科学研究院，江西 南昌 330029；2.江西农业大学，江西 南昌 330045)

摘 要：[目的] 对江西省生产建设项目弃土弃渣土壤侵蚀状况进行研究，为定量研究该区自然降雨条件下弃土弃渣土壤侵蚀规律和生产建设项目土壤侵蚀预测提供科学依据。[方法] 采用基于 K 均值分类法，将研究区降雨划分为 A(极大雨量、较长降雨历时、中雨强、低频次)、B(中雨量、中等降雨历时、小雨强、高频次)、C(大雨量、长降雨历时、大雨强、低频次)、D(中雨量、短降雨历时、极大雨强、高频次)4 种类型，并依托江西省德安县国家水土保持生态科技园内的 8 种弃土弃渣径流试验小区，开展弃土弃渣土壤侵蚀定量研究。[结果] 通过 1 a 内 43 场侵蚀降雨小区观测，结果表明：① A，D 雨型是导致弃土弃渣产流输沙的主要类型，B 雨型影响最小，C 雨型则介于 A，D 雨型之间。② 红砂岩红壤(HSY)，第四纪红黏土(SJHT)，紫色土(ZSYY)，煤矸石(MGS)，房渣土(FZT)，其产流输沙间呈显著相关性；稀土尾矿(XYWK)，花岗岩红壤(HGY)，电厂灰渣(DCHZ)，则不具有显著的水沙关系；③ 不同弃土弃渣次降雨产沙量以大雨量以上雨型占比最高，均 60%以上，最高达 97%以上。[结论] 建议生产实践中预测或监测裸露弃土弃渣时，宜根据实际需求选取不同类型降雨开展，最主要预测或观测 50 mm 以上大雨量侵蚀量，以提高预测准确度，大幅减少监测成本，提高监测效率。

关键词：生产建设项目；弃土弃渣；土壤侵蚀

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2019)02-0131-07 **中图分类号**：S157.1

文献参数：房焕英，谢颂华，黄鹏飞，等.江西省生产建设项目弃土弃渣土壤侵蚀定量研究[J].水土保持通报，2019，39(2)：131-137. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.021；Fang Huanying，Xie Songhua，Huang Pengfei，et al. Quantitative study on soil erosion of waste residue from production and construction project in Jiangxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(2)：131-137.

Quantitative Study on Soil Erosion of Waste Residue from Production and Construction Project in Jiangxi Province

Fang Huanying[1]，Xie Songhua[1]，Huang Pengfei[1]，Liu Ying[2]

(1. *Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation*，*Nanchang*，*Jiangxi* 330029，*China*；2. *Jiangxi Agricultural University*，*Nanchang*，*Jiangxi* 330045，*China*)

Abstract：[Objective] The main objective of this paper is to quantitatively study soil erosion status of waste residue (such as spoil and slag) from production and construction project under natural rainfall conditions, and provide reference for soil erosion prediction in Jiangxi Province. [Methods] Based on K-means method, the local rainfall was classified into four types: A(maximum rainfall, long rainfall duration, moderate rain intensity, low frequency), B(medium rainfall, medium rainfall duration, light rain intensity, high frequency), C (large rainfall, long rainfall duration, heavy rain intensity, low frequency), and D(medium rainfall, short rainfall duration, extremely heavy rain intensity, high frequency medium rainfall). In addition, the 8 kinds of spoil ground runoff test plots were chosen to carry out quantitative research on soil erosion of spoil in the National Soil and Water Conservation Ecological Science and Technology Park of De'an County, Jiangxi Province. [Results] Through the observation of 43 erosive rainfall in 1 year, the results show that: ① The rainfall pattern of A and D are the main types, B has the least influence, and C falls in between A and D. ② There is significant correlation between runoff and sediment for red sandstone(HSY), stencil red clay

收稿日期：2018-06-07 **修回日期**：2018-09-26

资助项目：江西水利科技项目“江西省小流域治理水土保持工程技术标准研究”(KT201517)；江西水利科技项目“红壤弃土体坡面侵蚀特征研究”(KT201422)；江西水利科技项目(KT201617)

第一作者：房焕英(1986—)，女(汉族)，山东省济宁市，硕士，工程师，主要从事水土保持方面的研究工作。E-mail：289681987@qq.com。

通讯作者：谢颂华(1978—)，男(汉族)，江西省赣县人，博士，教授级高级工程师，主要从事水土保持方面的研究工作。E-mail：1078251110@qq.com。

(SJHT), purple soil (ZSYY), coal gangue(MGS), slag soil(FZT). ③ The rain pattern above large rainfall will lead to the highest sediment yield from the single abandoned waste residue. [Conclusion] When the bare abandoned soil and slag are predicted or monitored in production practice, different types of rainfall should be selected to carry out according to the actual demand, and the largest amount of large-scale rainfall over 50 mm is predicted or observed so as to improve the prediction accuracy and reduce the monitoring cost and improve the monitoring efficiency.

Keywords: production and construction projects; spoil ground slag; soil erosion

随着经济社会的不断发展,江西省生产建设项目数量将继续保持一定规模。然而,大面积的开采和排废不仅破坏和扰动原始地面,还产生大量弃土弃渣体,使之成为开发建设中形成的最主要地面组成物质之一,亦是一个水—土—生物重新组合的人为塑造地貌单元[1-2]。弃土弃渣产生的水土流失主要体现为岩石、土壤、土状物、泥状物、废渣、尾矿、垃圾等多种物质的破坏、侵蚀、搬运和沉积,是一种典型的人为加速侵蚀[3]。由于其物质组成复杂、结构松散、内聚力小、相互联结弱,且含有一定量的砾石(粒径>2 mm),故发生侵蚀的方式与原地貌有很大的差异[4-5]。有研究[6]显示,堆积体边坡坡面可蚀性是破坏前土壤的10倍~100倍。可见,生态环境保护面临的形势十分严峻,如何解决生产建设活动造成的水土流失问题已迫在眉睫,而研究不同类型生产建设活动造成的土壤侵蚀规律、并采取不同的水土流失防治技术则是该问题解决的前提,因此,在各类生产建设活动中开展不同类型边坡和弃土、弃渣的土壤侵蚀定量研究显得尤为重要。

诸多学者[1,7-9]针对弃土弃渣土壤侵蚀展开了大量研究,采用模拟降雨、放水冲刷、径流小区观测等方法,主要围绕产流产沙特性、水动力学参数、侵蚀速率预测等进行。研究表明,土壤侵蚀是多种自然因素与社会因素共同作用的结果,降雨是主要动力[10-11],侵蚀程度与雨型密切相关[12-13],不同雨型因雨量、雨强及降雨历时等不同导致土壤侵蚀过程发生改变[14]。不同地区因气候背景差异呈现不同降雨特征,与土壤侵蚀间也存在不同关系,而我国关于次降雨类型划分下的土壤侵蚀规律研究,多见于西北黄土高原区[15],南方红壤区有待进一步加强。此外,当前在生产建设项目水土保持方案编制中,弃土弃渣的土壤侵蚀预测大多采用类比法,水土保持监测中则大多采用经验值估筛,缺乏对其长期定量研究。因此,本研究依托江西水土保持生态科技园,开展生产建设项目边坡及弃土水土流失定量研究,旨在为生产建设项目水土流失防治提供理论依据。本研究对实现江西生态立省、绿色发展的目标,推动江西省生态文明试验区建设有着重要的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于江西省九江市德安县的江西水土保持生态科技园,地处江西北部德安县燕沟小流域、鄱阳湖水系博阳河西岸,位于东经 115°42′38″—115°43′06″,北纬 29°16′37″—29°17′40″之间,总面积 80 hm^2。属亚热带季风气候区,气候温和,四季分明,雨量充沛,光照充足,且雨热基本同期。多年平均降雨量 1 350.9 mm,受季风影响季节分配极不均匀,形成明显干湿季。最大年降雨量 1 807.7 mm,最小年降雨量 865.6 mm。多年平均气温 16.7 ℃,年日照时数 1 650~2 100 h,无霜期 245~260 d。科技园位于我国红壤中心区域,属全国土壤侵蚀二级类型区的南方红壤区,在江西省和南方红壤丘陵区具有典型代表性。地貌类型为浅丘岗地,土壤母质主要是泥质岩类风化物、第四纪红黏土的红壤。地带性植被现存多为人工营造的针叶林、常绿阔叶林、竹林、针阔混交林、常绿落叶混交林、落叶阔叶林等。

1.2 试验装置与设计

园区布设径流小区,填装 8 种不同类型的弃土弃渣(表 1)。小区四周设置围埂,用于防止坡面地表径流进出,宽 0.12 m,较弃土体上方平台地表高出 0.3 m,且埋入弃土体深度为 0.45 m。护埂采用砖砌石砂浆抹面,回填弃土需经初步夯实;护埂顶部做成向外 45°的单侧倾角斜刃,防止雨水滴溅入小区。小区下边缘修筑与之齐平的横向集流槽,收集径流及泥沙引入径流桶。

依据当地 50 年一遇最大 24 h 暴雨雨量,设计为 3 级分流(A,B,C 桶),均为底面直径 80 cm 和高 90 cm,采用 1.2 mm 厚镀锌铁板打造而成;A,B 径流桶于 60 cm 高处装 7 孔分流孔,孔径 5 cm,其中,A 桶 6 份排出,中间 1 份流入 B 桶,B 桶与 A 桶一样,中间一份进入 C 池。径流桶均进行了率定,桶壁皆贴有水尺,桶底安装有放水阀门。为阻止地表径流进出,试验小区周边设置围埂,以拦挡外部径流。小区下面修筑横向集水槽,承接小区径流及泥沙,并通过 PVC 塑胶管引入径流桶。

表 1　弃土弃渣小区基本情况

弃土弃渣类型	土体来源地	坡长/m	坡宽/m	坡度/(°)	有机质/(g·kg^{-1})	机械组成/%			容重/(g·cm^{-3})
						黏粒(<0.002 mm)	粉(砂)粒(0.05～0.002 mm)	砂粒(2.0～0.05 mm)	
花岗岩发育的红壤(HGY)	修水县	10	5	45	2.83	26.14	39.74	34.12	1.25
红砂岩发育的红壤(HSY)	鹰潭市	10	5	45	0.63	25.37	26.38	48.25	1.56
第四纪红黏土发育的红壤(SJHT)	江西省德安县	10	5	45	11.25	5.09	0	94.91	1.39
紫色页岩发育的紫色土(ZSYY)	南丰县	10	5	45	2.83	11.12	20.22	68.66	1.51
稀土尾矿(XTWK)	定南县	10	5	45	5.34	21.28	48.63	30.09	1.37
煤矸石(MGS)	德安县	10	5	45	58.60	14.38	18.49	67.12	—
房渣土(FZT)	德安县	10	5	45	18.80	23.54	15.35	61.10	—
电厂灰渣(DCHZ)	九江电厂	10	5	45	33.41	20.99	21.99	57.02	1.04

1.3　数据观测

1.3.1　*降雨数据*　降雨过程数据通过布设在科技园气象站内的虹吸式自计雨量计获取,观测周期为 2015 年 8 月至 2016 年 7 月。本研究降雨指降雨量在 10.0 mm 以上的产流降雨[16]。根据次降雨量分为 4 个等级降雨事件,即小雨量(10～24.9 mm)、中雨量(25～49.9 mm)、大雨量(50～100 mm)和极大雨量(>100 mm)。

1.3.2　*径流泥沙数据*　次降雨结束后,人工及时采集径流泥沙样。①径流桶中水位通过观测水尺刻度直接读取,径流量采用体积公式计算;②悬移质取样:先读取刻度表,获得桶中水的体积。然后,将桶中水搅匀,在不同点取适量水至小桶中,再将小桶水搅匀,舀取 100 ml 至量杯,倒入铝盒,48 h 后烘干,计算整桶水中的干泥沙重;③推移质取样:将集水槽中泥沙整体称湿重,再用 100 ml 铝盒取样进行烘干;桶中泥沙先读水刻度,然后取水样测试其中悬移质,再将水全部取出后读出泥沙湿重刻度,得出上部水的体积,下部泥沙再取样烘干称重。

1.4　数据分析

数据整理及制图采用 Excel 软件,指标相关性及差异显著分析采用 SPSS 统计软件,利用 K 均值分类法对次降雨事件进行分类,本文选取降雨量、降雨历时、平均雨强 3 个指标作为降雨特征值。

2　结果与分析

2.1　降雨特征及类型划分

所有降雨中只有部分发生地表径流进而引起土壤侵蚀,对于发生真正意义上土壤流失的这部分降雨称为侵蚀性降雨[17],本研究降雨是指降雨量在 10.0 mm 以上的产流降雨[16]。

利用 2015 年 8 月至 2016 年 7 月间在江西水土保持生态科技园试验区观测获得的 43 场次侵蚀性降雨的降雨量和降雨历时随降雨类型的分布(图 1),分析降雨特征及其季节性分布规律。

试验期间侵蚀性降雨总量为1 845.70 mm,占全部观测降雨量(2 098.20 mm)的 87.97%,且降雨量的变化差异大。侵蚀性降雨相对集中,且降雨量和降雨历时相对更大(长)的降雨事件主要集中分布在 2016 年 4—7 月间。小雨量和中雨量事件最多,大雨量事件相对较少,极大雨量事件则最少。

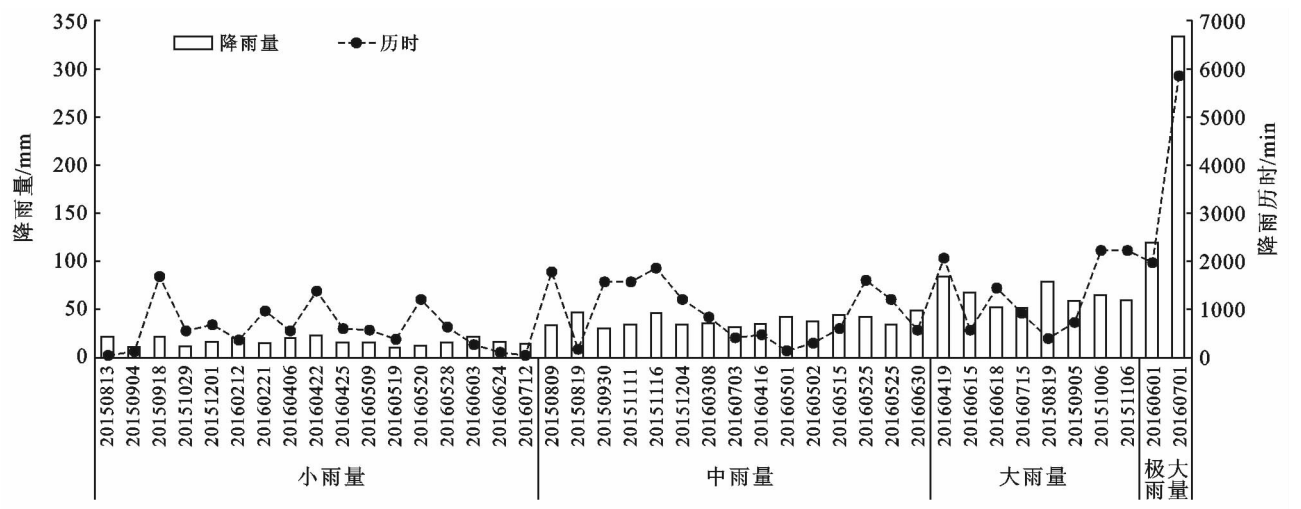


图 1　降雨量和降雨历时随降雨类型的分布

本文选取降雨量、降雨历时、平均雨强 3 个指标作为降雨特征值，将观测期侵蚀性降雨进行 K 均值分类(表 2)，4 类雨型分别记为 A 型降雨、B 型降雨、C 型降雨、D 型降雨。根据 4 类雨型特征值的聚类中心，就降雨量而言，顺序为：A＞C＞D＞B；就降雨历时而言，顺序为：A＞C＞B＞D；就平均雨强而言，顺序为：D＞C＞A＞B。可见，A 型降雨主要由极大雨量、较长降雨历时、中雨强、低频次降雨事件组成，B 型降雨主要由中雨量、中等降雨历时、小雨强、高频次降雨事件组成，C 型降雨主要由大雨量、长降雨历时、大雨强、低频次降雨事件组成，D 型降雨主要由中雨量、短降雨历时、极大雨强、高频次降雨事件组成。

表 2 最终聚类中心

指 标	聚类			
	1	2	3	4
降雨量/mm	382.4	32.8	71.6	43.2
降雨历时/min	6 430	1 477	2 066	570
雨强/(mm·h^{-1})	2.5	1.4	3.2	4.4
频 次	1	9	6	15

2.2 弃土弃渣坡面产流输沙总量特征

4 种降雨类型在 2015 年 8 月至 2016 年 7 月引起弃土弃渣坡面产流与土壤流失的总量特征如图 2 所示。

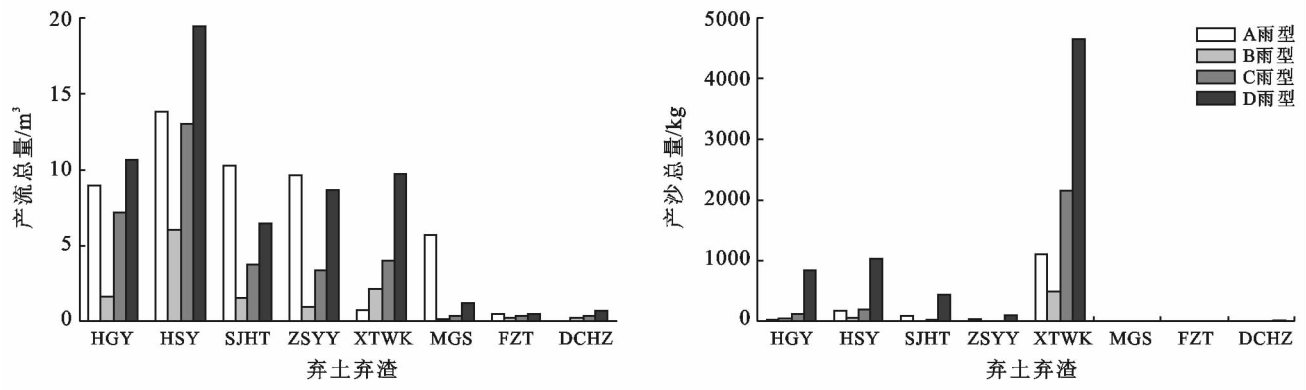


图 2 弃土弃渣坡面产流与土壤流失的总量特征

由图 2 可见，不同类型弃土弃渣的坡面产流产沙特征明显。弃土产流总量排序为：HSY＞HGY＞ZSYY＞SJHT，全年坡面侵蚀量排序为：HSY＞HGY＞SJHT＞ZSYY；弃渣产流总量排序为：XTWK＞MGS＞FZT＞DCHZ，全年坡面侵蚀量排序为：XTWK＞DCHZ＞MGS＞FZT。弃土产流量远高于弃渣，但土壤侵蚀量却远低于弃渣中的 XTWK。4 种弃土中，HSY 产流输沙量处于领先地位，保水能力差、易被侵蚀，ZSYY 则相对抗侵蚀能力较强；4 种弃渣中，XTWK 产流输沙量最大，尤其输沙量在并不高的产流条件下输出量很大。方差分析显示，在显著水平 $p<0.05$ 条件下，HSY 产流输沙量较大，其产流量与另三种弃土产流量差异显著，产沙量与 SJHT，ZSYY 存在显著性差异，HGY 与 ZSYY 也呈显著性差异；弃渣中 XTWK 产流输沙量很大，其产流量与 FZT，DCHZ 差异显著，产沙量与另 3 种均存在显著性差别。可见，弃土中的 HSY、弃渣中的 XTWK 易侵蚀、保持水土能力最差，产生危害的指数高，需注意防范治理。

2.3 弃土弃渣坡面产流输沙对雨型的响应

不同雨型及次降雨事件下，不同类型弃土弃渣产流输沙特征如图 3 所示。由图 3 可知，对弃土而言，不同雨型下的坡面径流总量为 HGY 和 HSY 呈：D＞A＞C＞B 特征，SJHT 和 ZSYY 呈：A＞D＞C＞B 特征；全年坡面侵蚀量为 HGY 呈：D＞C＞B＞A，HSY 呈：D＞C＞A＞B，SJHT 和 ZSYY 呈：D＞A＞C＞B。在次降雨事件中，A 雨型对平均产流量影响最大，另 3 种雨型的影响在各类弃土中则差异不明显；平均土壤侵蚀量则是花岗岩受 D 雨型影响较大，另 3 种弃土受 A 型雨影响较大。对弃渣而言，不同雨型下的坡面径流总量为 XTWK 和 DCHZ 呈：D＞C＞B＞A 特征，MGS 呈：A＞D＞C＞B，FZT 呈：D≈A＞C＞B；全年坡面侵蚀量则各种弃渣呈现不同特征，但均为 D 型雨下产沙量最大。在次降雨事件中，无论产流还是产沙基本呈 A 雨型下量最大、B 雨型下量最小的特征。可见，B 雨型对弃土弃渣坡面产流输沙影响最小；A 和 D 则是导致弃土弃渣产流输沙的主要雨型，其引起的产流占比在 70%以上，输沙量占比在 68%以上。就次降雨平均产流量，弃土受 A 雨型的影响远高于弃渣，平均土壤侵蚀量则是 XTWK 受降雨影响程度最大。

2.4 弃土弃渣坡面的降雨、产流和土壤侵蚀关系

通过对 2015 年 8 月至 2016 年 7 月侵蚀性降雨事件统计分析，构建不同弃土弃渣下降雨特征、坡面产流量与坡面土壤侵蚀量的 Pearson 相关矩阵(表 3)。

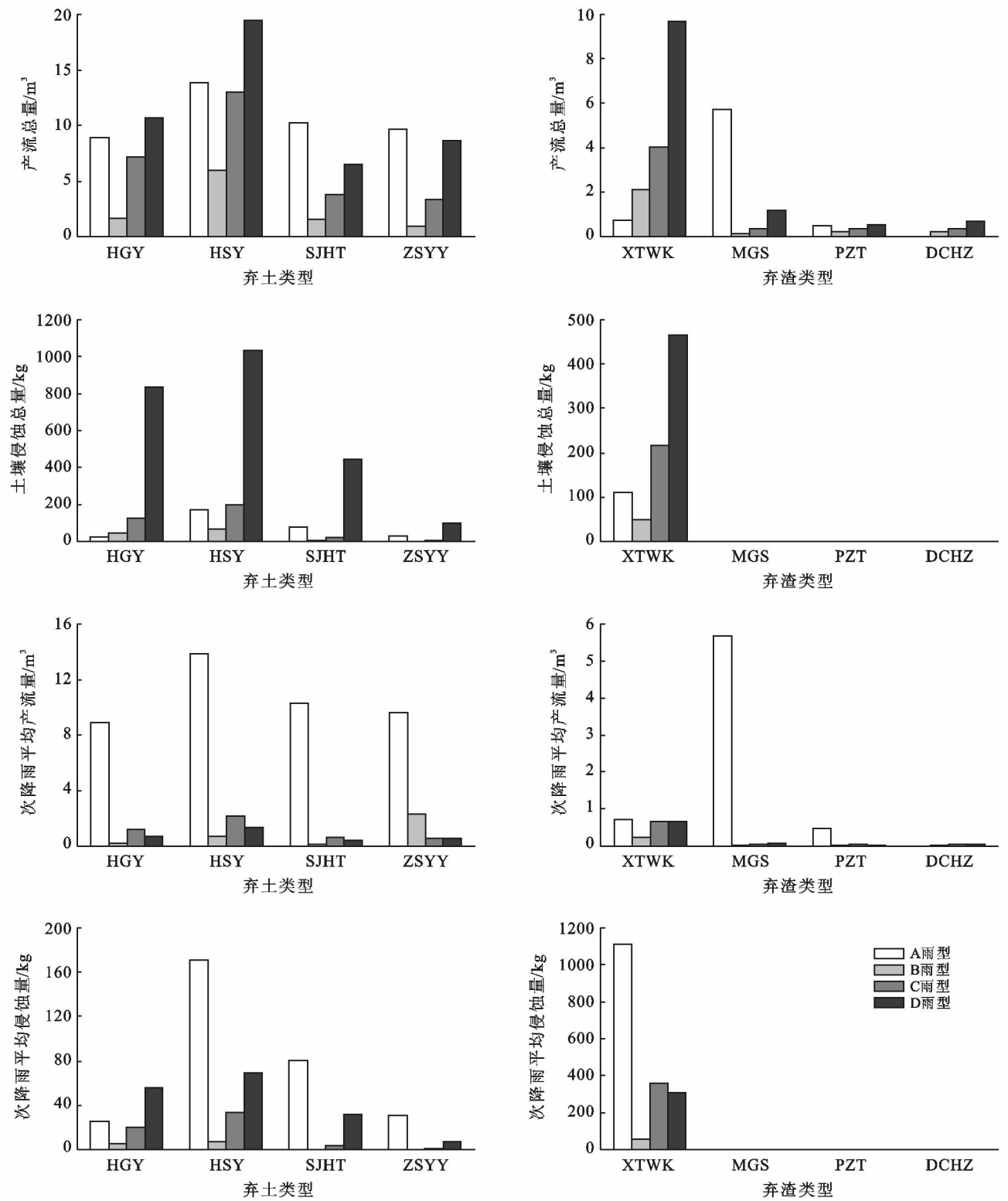


图 3　弃土弃渣坡面产流输沙对雨型的响应

降雨量与弃土、MGS,FZT 产流量在 $p<0.01$ 水平下呈显著正相关,与 HGY,DCHZ 产沙量相关性不显著。降雨历时与产流量间的关系与降雨量的表现相同,与产沙量间的关系则是弃土、XTWK 和 DCHZ 与降雨历时相关性不显著。雨强与弃土弃渣产流量均不具显著相关性,与弃土产沙量有显著相关性(HGY 显著水平为 $p<0.05$,其余为 $p<0.01$)、与弃渣相关性不显著。

表 3 不同弃土弃渣坡面产流、土壤侵蚀量与降雨特征的 Pearson 相关系数矩阵

项目	降雨量	降雨历时	雨强	HGY 产流	HGY 产沙	HSY 产流	HSY 产沙	SJHT 产流	SJHT 产沙	ZSYY 产流	ZSYY 产沙	XTWK 产流	XTWK 产沙	MGS 产流	MGS 产沙	FZT 产流	FZT 产沙	DCHZ 产流	DCHZ 产沙
降雨量	1	0.816**	0.041	0.978**	0.188	0.980**	0.564**	0.970**	0.445*	0.966**	0.589**	0.321	0.696**	0.923**	0.713**	0.961**	0.594**	0.15	0.049
降雨历时		1	−0.309	0.724**	−0.219	0.780**	0.086	0.799**	0.029	0.736**	0.200	0.006	0.325	0.807**	0.396*	0.829**	0.500**	−0.154	−0.076
雨强			1	0.160	0.420*	0.095	0.538**	0.086	0.451**	0.147	0.484**	0.339	0.230	0.026	0.276	0.014	−0.035	0.332	0.042

注：*，** 分别表示 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平显著相关。

在显著水平下(包括 $p<0.01$ 和 $p<0.05$)，就相关系数而言，降雨量与各类坡地产流量之间排序为：HSY＞HGY＞SJHT＞ZSYY＞FZT＞MGS，与坡地产沙量之间排序为：MGS＞XTWK＞FZT＞ZSYY＞HSY＞SJHT。降雨历时与各类坡地产流量之间排序为：FZT＞MGS＞SJHT＞HSY＞ZSYY＞HGY，与坡地产沙量之间为：FZT＞MGS。雨强与坡地产沙量之间为：HSY＞ZSYY＞SJHT＞HGY。由此可以看出，降雨特征值对弃土弃渣产流输沙影响程度的强弱。

在所有侵蚀性降雨下，对不同类型弃土弃渣的水沙关系进行 Pearson 相关分析显示，ZSYY，MGS，HSY，FZT 在 $p<0.01$ 水平下相关性显著，SJHT 在 $p<0.05$ 水平下显著相关，说明这 5 种弃土弃渣水沙关系较稳定。对所有弃土弃渣水沙关系进行拟合，拟合结果表明，MGS 产流量与土壤侵蚀量之间的相关系数 R^2 最大；其次是 ZSYY，HSY 则相对减小，FZT 拟合效果不好，而 DCHZ 和 XTWK 拟合关系则很差。

3 讨 论

通过分析雨型与弃土弃渣产流输沙关系发现，不同类型的自然降雨下弃土弃渣表现出不同的保持水土能力。红砂岩发育红壤弃土(年侵蚀量为 31 648.4 t/km^2)、稀土尾矿弃渣(年侵蚀量为 171 533 t/km^2)其水土流失在各类侵蚀性降雨下均较为严重，这可能由于红砂岩发育的红壤其黏粒含量相对较低、红砂岩团聚体结构差导致抗蚀性较差[18]，稀土尾矿则与孔隙度较大、透水性强、保水性能差、松软易塌等有关[19]；紫色页岩发育土体(年侵蚀量为 3 123.6 t/km^2)一般由于团聚体结构易被破坏抗侵蚀能力较弱，本研究相对而言保持水土能力较好，可能由于其入渗率相对较高造成；煤矸石、房渣土和电厂灰渣 3 种弃渣年侵蚀量均在土壤侵蚀允许值内(其中，房渣土弃渣最小，为 11.6 t/km^2)，3 种土体大粒径的砂粒均较多，可能因其较大孔隙度水分入渗产生壤中流所致，该类弃渣在实际中应以植被恢复为主，而非减蚀为主要目的。4 种雨型中，A 雨型为大雨量、较长降雨历时、中雨强、低频次降雨，D 雨型为中雨量、短降雨历时、极大雨强、高频次降雨，实测数据表明此类降雨侵蚀力较强，比如弃土弃渣总产流量受二者影响较大，次降雨产流量则是 A 雨型影响非常大；弃土弃渣侵蚀总量 D 雨型影响占比非常高，次降雨事件中 A 雨型影响更为突出，虽发生次数少但却有较强土壤侵蚀力。有时一次极端降雨产生的土壤侵蚀量在全年占比可能会达到 60％以上[20]，但房渣土和电厂灰渣则抵御此类雨型侵蚀的能力较强。

该区域全年降雨主要集中于 4—7 月份，以中小雨量和中雨量事件最多，但大雨量以上降雨造成的土壤侵蚀量占比却很高，4 种弃土均占到了总侵蚀量的 68％以上(其中，第四纪红黏土发育红壤弃土最大，为 90.94％)，4 种弃渣均占到了总侵蚀量的 64％以上(其中，煤矸石弃渣最大，为 97.10％)，说明现实中只需分析观测大雨以上类型的降雨侵蚀量占比及其与中小雨侵蚀量数量级差异，基本可预测其全年侵蚀量。不同弃土弃渣单场降雨产沙量则以大雨量以上的雨型产沙量占比最高，均在 60％以上，最高可达 97％以上。因此，进行裸露弃土弃渣预测或监测时，关键掌握大雨量以上降雨类型的侵蚀量，不仅可提高预测准确度，亦可大幅度减少监测成本。煤矸石、房渣土和电厂灰渣等弃渣则在防治设计时，除必要的安全拦挡措施外，应注重恢复植被为主，而不宜过多采用工程减蚀措施。另则，由于侵蚀性降雨尤其降雨量和降雨历时相对更大(长)的降雨事件主要集中在 4—7 月份，各类生产建设项目应重视临时性水土保持措施的布置，否则易发生严重水土流失甚至诱发崩塌、滑坡，对周边地区水土资源造成巨大危害和破坏。

4 结 论

(1) 降雨类型分为 4 类：A 型雨呈极大雨量、较长降雨历时、中雨强、低频次特点，B 型雨呈中雨量、中等降雨历时、小雨强、高频次特点，C 型雨呈大雨量、长降雨历时、大雨强、低频次特点，D 型雨呈中雨量、短降雨历时、极大雨强、高频次特点。其中，A 和 D 雨型是导致弃土弃渣产流输沙的主要类型。

(2) 8 种类型弃土弃渣年侵蚀量分别为，花岗岩红壤为 21 861 t/km^2，红砂岩红壤为 31 648.4 t/km^2，第四纪红黏土为 12 477.4 t/km^2，紫色土为 3 123.6

t/km^2,稀土尾矿为 171 533.2 t/km^2,煤矸石为 37.2 t/km^2,房渣土为 11.6 t/km^2,电厂灰渣为 145.4 t/km^2。

(3) 根据降雨类型对弃土弃渣侵蚀性作用差异,可分为两种情况,一类包括红砂岩红壤、第四纪红黏土、紫色土、煤矸石、房渣土,其产流输沙间呈显著相关性;其中,红砂岩红壤产流输沙量大,水土流失严重,紫色土和房渣土则相对而言抵抗水土流失的能力较强。另一类包括稀土尾矿、花岗岩红壤、电厂灰渣,不具有显著的水沙关系;其中,稀土尾矿产流量中等但却又极高的输沙量,抵抗侵蚀能力非常差,电厂灰渣则相对而言抵抗水土流失的能力较强。

(4) 生产建设项目进行裸露弃土弃渣预测或监测时,关键掌握大雨量以上降雨类型的侵蚀量,可提高预测准确度,及大幅度减少监测成本。侵蚀性降雨事件主要集中在 4—7 月份,各类生产建设项目应重视临时性水土保持措施的布置,否则易发生严重水土流失甚至诱发崩塌、滑坡,对周边地区水土资源造成巨大危害和破坏。

(5) 不足与展望。关于生产建设项目土壤侵蚀研究目前还存在一些不足:物质组成复杂的弃土弃渣研究相对缺乏;影响因素研究多集中于单一降雨/径流侵蚀动力而忽略了重力等因子,水土流失机制还不清楚;应多开展长期野外径流小区监测试验;南方红壤区生产建设项目水土流失预测模型开发还相对滞后。今后发展趋势应将近景摄影测量技术、三维激光扫描技术等高新技术应用于生产建设项目边坡及弃土弃渣水土流失量预测。

[参 考 文 献]

[1] 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.

[2] 杨波,王文龙,郭明明,等.模拟降雨条件下弃渣体边坡不同防护措施的减水减沙效益[J].土壤学报,2017,54(6):1357-1368.

[3] 王文龙,李占斌,李鹏,等.神府东胜煤田开发建设弃土弃渣冲刷试验研究[J].水土保持学报,2004,18(5):68-71.

[4] 刘菲,唐红梅.重庆库区工程弃渣泥石流形成机理[J].重庆交通大学学报:自然科学版:2010,29(4):620-623,640.

[5] 朱元骏,邵明安.不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究[J].农业工程学报,2006,22(2):64-67.

[6] Riley S J. Aspects of the differences in the erodibility of the waste rock dump and natural surfaces, Ranger Uranium Mine, Northern Territor, Australia[J]. Applied Geography, 1995,15(4):309-323.

[7] 郭明明,王文龙,李建明,等.神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测[J].土壤学报,2015,52(5):1044-1057.

[8] 丁文斌,史东梅,何文健,等.放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性[J].农业工程学报,2016,32(18):153-161.

[9] 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.

[10] 张黎明,林金石,于东升,等.南方不同类型土壤侵蚀量与降雨各因子的关系研究[J].水土保持通报,2011,31(2):10-14.

[11] 王改玲,王青杵,石生新.晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2013,27(1):1-5.

[12] 韩勇.侵蚀性降雨雨型对黄土区浅沟坡面侵蚀特征的影响[D].北京:中国科学院研究生院,2016.

[13] Shen Haiou, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope[J]. Soil & Tillage Research, 2016,155:429-436.

[14] 陈绍宇.有关红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规模的探究[J].资源节约与环保,2016,27(5):173.

[15] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.

[16] 秦伟,左长清,郑海金,等.赣北红壤坡地土壤流失方程关键因子的确定[J].农业工程学报,2013,29(21):115-125.

[17] 王万忠.黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究[J].水土保持通报,1984,8(2):58-63.

[18] 唐翔宇,杨浩,赵其国,等.红砂岩母质红壤侵蚀作用的^{137}Cs法初步研究[J].水土保持研究,2002,9(1):121-125.

[19] 周桂香.稀土尾矿区桉树人工林土壤抗蚀性研究[D].江西 南昌:江西农业大学,2012.

[20] Benhur M, Faris J, Malik M, et al. Polymers as soil conditioners under consecutive irrigations and rainfall [J]. Soil Science Society of America Journal, 2015,53(4):1173-1177.