

湘中低山丘陵区坡面产流输沙对降雨、土壤类型及 水土保持措施的综合响应特征

彭浩^{1,2}, 李忠武^{1,2,3}, 刘春^{1,2}, 王丹阳^{1,2}, 陈佳³, 蒋婕妤^{1,2}, 张需琴^{1,2}

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学环境生物与控制教育部重点实验室, 长沙 410082;
3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 针对湘中低山丘陵区地形地貌条件多样、水土流失影响机制复杂的问题, 选取湖南省中部井头(黄壤)、秋波(紫色土)以及莲荷(红壤)3个径流场不同水土保持措施径流小区, 综合探究湘中丘陵区不同土壤类型、水土保持措施以及侵蚀性雨型等因子对坡面产流输沙规律的影响特征。结果表明: 在年降水量相近的条件下, 年径流深和年侵蚀量均为红壤>紫色土>黄壤; 各水土保持小区的减流效益较差, 但其减沙效益较好, 以黄壤草地措施、紫色土水保林以及红壤经果林和草地措施减沙效益较为明显, 年侵蚀减沙率分别达 87.89%, 55.88%, 37.99% 和 41.07%; 大雨强、短历时、低雨量、高频率的降雨占各小区侵蚀降雨场次的比例均在 50% 以上, 该类降雨也是黄壤和红壤各小区坡面产流输沙以及紫色土各小区产流的主导雨型。中雨强、长历时、高雨量、低频率降雨是引起各小区单次降雨径流泥沙流失量最大的雨型。研究结果对完善水土流失的相关理论和规律具有重要的意义, 对区域水土保持工作的开展提供了重要的指导作用和理论价值。

关键词: 径流; 输沙; 降雨; 水土保持措施; 土壤类型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0060-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.010

Comprehensive Response Characteristics of Runoff and Sediment Yield on Rainfall, Soil Type and Water Conservation Measures in Hilly Area of Central Hunan Province

PENG Hao^{1,2}, LI Zhongwu^{1,2,3}, LIU Chun^{1,2}, WANG Danyang^{1,2},
CHEN Jia³, JIANG Jieyu^{1,2}, ZHANG Xuqin^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082;

2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loss Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Based on the diverse topography and geomorphology and the complex mechanism of soil erosion in the hilly area of central Hunan Province, China, nine runoff plots with different soil and water conservation measures in three runoff fields of Jingtou (yellow soil), Qiubo (purple soil) and Lianhe (red soil) were selected to explore the effects of different erosive rainfall patterns, soil types and soil and water conservation measures on runoff and sediment transport on slopes. The results showed that the annual runoff and sediment yield decreased as the following sequence: red soil>purple soil>yellow soil under the condition of similar annual rainfall. The runoff reduction effect in each runoff plot was little, but the sediment reduction was effective. Especially, the grassland measures in yellow soil, water conservation forest in purple soil, and fruit-forest and grassland measures in red soil had obvious sediment reduction effects, and their annual reduction rates were 87.89%, 55.88%, 37.99% and 41.07%, respectively. The heavy intensity, short duration, low rainfall and high frequency rainfall accounted for more than 50% of the erosive rainfall events in each runoff plot. It was also the dominant rain type of the runoff and sediment yield in the runoff plots of yellow and red soils, as well as the dominant rain type of the sediment yield in purple soil. The moderate intensity, long duration, high precipitation and low frequency rainfall caused the largest runoff and sediment

收稿日期: 2018-10-23

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505401); 湖南省水利科技项目(湘水科计[2016]194-38)

第一作者: 彭浩(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态环境研究。E-mail: penghao@hnu.edu.cn

通信作者: 李忠武(1972—)男, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态环境研究。E-mail: lizw@hnu.edu.cn

yield in each single rainfall event in all runoff plots. These results could be of great significance for improving the relevant theories of soil erosion, and provide important guidance and theoretical value for the development of regional soil and water conservation.

Keywords: runoff yield; sediment yield; rainfall; soil and water conservation measures; soil type

水土资源是可持续发展不可替代的基础性资源,也是生态环境与农业生产的基本要素。水土流失对水土资源的开发利用、生态环境可持续发展、河湖水库的防洪及水质安全等方面有着重要影响,也是我国主要的生态环境问题之一^[1-3]。随着全国各项水土保持治理措施和模式得到有效推广应用,水土流失面积不断减少,水土保持工作已经取得显著成效,但近年来不合理的土地利用导致大量土壤随着地表径流流失,部分地区水土流失状况依然相当严重。由于气候、地质地貌和人类活动等因素的差异,不同区域的水土流失机制不尽相同。因此,有必要进一步探究不同生态区水土流失的机制和特征,因地制宜开展水土流失预防治理工作。

水土流失是一个复杂的物质迁移变化过程,受降雨特性、地形地貌、土壤类型以及植被等多因素的共同影响。降雨是水蚀区土壤侵蚀发生的主要自然驱动因子,也是诱发水土流失的先决条件^[4]。侵蚀性降雨是指能够导致土壤侵蚀发生的降雨事件,探究侵蚀性降雨对坡面径流泥沙流失的影响机制是坡面土壤侵蚀研究的基础性和前提性工作。大量研究^[5-8]表明,坡面水土流失受雨量、雨强、降雨历时等降雨因子差异的显著影响。土壤作为侵蚀的对象,土壤类型及其母质的差异会直接影响径流的产生以及泥沙的流失强度。有研究^[9]指出,红壤坡面侵蚀量显著高于相同降雨条件下的棕壤和褐土坡面,且不同母质发育土壤坡面径流泥沙对降雨的响应程度也存在较大差异^[10]。在降雨发生后,植被对雨滴的截流、根系对土壤的固定作用将间接改变雨滴对土壤的作用效益^[11-12],而工程措施对地表径流和泥沙的拦蓄将直接影响坡面产流输沙过程。水土流失是多因子聚类的结果,单一影响因子研究存在较大的局限性,且径流泥沙流失对不同因子的响应程度也存在较大差异。湘中区域作为湖南省极易发生水土流失的区域之一,成土母质母岩类型多,山地丘陵的自然条件复杂,因而有必要进一步探究该区域多因子影响下的坡面侵蚀特征及规律,为区域水土保持生态防护措施的布设和土壤侵蚀预报模型的建立提供重要的指导作用和理论价值。

基于此,本研究以湘中丘陵区衡阳县井头(黄壤)、衡东县秋波(紫色土)和邵阳市双清区莲荷(红壤)3个不同土壤类型径流场的林、草措施小区及撂

荒小区(对照)为对象,通过分析各小区的降雨以及径流泥沙流失情况,探究该区域坡面产流输沙规律对降雨、土壤类型及水土保持措施等因子的综合响应特征,对湘中丘陵区水土流失的控制和管理以及生态文明建设具有重要的理论价值和现实意义。

1 研究区概况

湘中低山丘陵区地处湖南省腹地,地形以山地丘陵为主,植被多为常绿阔叶林,区域内易蚀母质比重较大,土壤抗蚀性差。在亚热带季风气候作用下,区域内年平均气温 15.0~18.2℃,年平均降水量 1 200 mm,为全省 3 个少雨区之一,降水多集中于 4—9 月,且降水量年际变化大,高温干旱和洪涝灾害天气频繁,加速了土壤母质的风化和水土流失的进程。根据湖南省第 3 次土壤侵蚀遥感调查,湘中低山丘陵区现有水土流失面积 15 721.71 km²,占该区域面积的 17.60%。研究选取的衡阳县井头、衡东县秋波以及邵阳市双清区莲荷径流场均为湘中典型代表区域。其中,井头径流场位于衡阳县岷山乡境内,属长江流域湘江水系武水支流,中心位置为 26°55′27″N,112°13′25″E,土壤为花岗岩变质土壤,多年平均降水量 1 066.2 mm。秋波径流场位于衡东县栗木乡境内,属长江流域湘江水系二级支流,中心位置为 27°23′37″N,112°55′49″E,流域内土壤以紫色土为主,兼有第四纪红黏土,土壤理化性状较差,多年平均降水量 1 336 mm。莲荷径流场位于邵阳市双清区火车站乡境内,属长江流域资江水系,中心位置为 27°03′00″N,111°22′00″E,区内土壤类型以第四纪红黏土发育而成的地带性红壤、黄壤和第四纪松散堆积物为主,土壤质地以砂土、壤土为主,多年平均降水量 1 327.5 mm。

2 研究方法

2.1 试验径流小区

试验选取的井头(JT)、秋波(QB)和莲荷(LH)径流场均为全国水土保持信息化监测站点,且均已完成多个径流小区的布设。根据研究目的和各径流场小区布设情况,在 3 个径流场选取林地措施小区(水保林/经果林)和草地(草皮/种草)措施小区和撂荒(对照)小区(分别记为 JT1、JT2 和 JT3, QB1、QB2 和 QB3, LH1、LH2 和 LH3,共 9 个径流小区)。各小区的土壤及母质类型、水土保持措施及相关植被类型等基本情况见表 1。井头和莲荷径流场各小区均为垂直投影长 20 m,宽 5 m,面积为 100 m² 且坡度均为

10°的标准小区;秋波径流场的 QB1 为面积为 100 m²,坡度 10°的标准小区,QB2 和 QB3 为与 QB1 坡度和坡长相近的自然小区。各小区左右两侧均设置排水沟,上侧

设置截流沟,底部设置集流槽。集流槽下方均配备规格 1.5 m×1.5 m 分流箱和 1.0 m×1.0 m 集流箱,用于收集降雨期间的径流及侵蚀泥沙。

表 1 径流小区基本情况

径流场	小区 编号	坡长/ m	坡宽/ m	坡度/ (°)	坡位	土壤 类型	成土 母质	水土保持 措施	植被 种类	植被 覆盖度/%
井头	JT1	20	5	10.0	坡中部	黄壤	风化花岗岩	水保林	圆柏	75
	JT2	20	5	10.0	坡中部	黄壤	风化花岗岩	绿化草皮	马尼拉草	95
	JT3	20	5	10.0	坡中部	黄壤	风化花岗岩	撂荒	无	30
秋波	QB1	20	5	10.0	坡中部	紫色土	紫色页岩风化物	水保林	枫香、龙须草	80
	QB2	—	—	13.5	坡中部	紫色土	紫色页岩风化物	种草、谷坊	芦竹	75
	QB3	—	—	15.5	坡中部	紫色土	紫色页岩风化物	撂荒	无	10
莲荷	LH1	20	5	10.0	坡脚	红壤	第四季红黏土	经果林	金钱橘、黑麦草	83
	LH2	20	5	10.0	坡脚	红壤	第四季红黏土	绿化草皮	马尼拉草	97
	LH3	20	5	10.0	坡脚	红壤	第四季红黏土	撂荒	无	56

注:QB1、QB2 径流小区为不规则自然小区,根据 GPS 测量,面积分别为 145.0、152.5 m²。

2.2 降雨及径流泥沙观测

通过径流小区附近设置的翻斗式自记雨量计记录降雨过程中雨量、雨强等参数,每 5 min 记录 1 次。每次降雨产流结束后,立即读取分流池和集流池内的水尺,取 3 次读数的平均值乘以池底面积计算得出地表径流量(m³),将其除以小区面积得出径流深(mm)。然后,人工将池水充分搅拌均匀,取 1 000 mL 浑水样 3 份,静置过滤后,在 102 ℃烘干称重,干重除以水样体积即为含沙率,取平均含沙率与地表径流量的乘积为该次降雨的土壤侵蚀量。本研究降雨及径流泥沙等基础资料观测收集于 2015 年 1—12 月。

2.3 数据处理

利用 IBM SPSS 20.0 和 Excel 2012 软件进行差异性分析、相关性分析等数据处理分析,利用 Origin Pro 9.0 软件进行制图。

3 结果与分析

3.1 区域侵蚀性降雨特征及坡面年产流输沙特征

3.1.1 侵蚀性降雨特征 2015 年黄壤(井头)、紫色土(秋波)和红壤(莲荷)小区所在径流场年降雨量分别为 1 288.6、1 404.6、1 246.5 mm,均在其多年平均降水量±25%范围内,属平水年。相同降雨条件下,黄壤 JT2 小区共产生侵蚀降雨 12 场,累积侵蚀降水量 471.9 mm,占年降水量的 36.62%,明显低于同一径流场 JT1 和 JT3 小区侵蚀降雨 19 场,累积侵蚀降水量 793.0 mm,占年降水量的 61.54%。黄壤各小区侵蚀性降雨占年降水量的比值与同一纬度喀斯特黄壤区的 35%~55%基本一致^[13-14];紫色土各小区年侵蚀降水均为 20 场,累积侵蚀降水量 636.7 mm,占年降水量的 45.33%,略低于川西紫色土区的 60%^[15];红壤各小区年侵蚀降水均为 40 场,累积侵蚀降水量 966.2 mm,占年降水量的 77.51%,与赣北红壤区的 78.52%相近^[16]。根据湖南省多个观测站

点的统计资料,全省近 50 年平均侵蚀降水量占全年降水量的 74.40%^[17],除红壤小区与该值较为接近外,黄壤和紫色土各小区该比值均偏低,这一结果可能受土壤和区域降雨特征差异等因素的影响。

3.1.2 不同土壤和水土保持措施小区坡面年产流输沙特征 根据 3 个径流场降雨资料及各小区侵蚀性降雨下坡面产流输沙量,可得研究区侵蚀降雨特征和不同水土保持措施小区的年产流输沙量(表 2)。在相近年降水量条件下(1 246.5~1 404.6 mm),湘中丘陵区 3 个不同土壤类型径流场坡面径流泥沙流失量存在显著差异。红壤、紫色土和黄壤径流场的坡面年平均径流深和年平均土壤侵蚀量均呈依次减小的特征,其中年平均径流深为红壤(219.49~304.17 mm)>紫色土(112.41~123.00 mm)>黄壤(13.28~43.82 mm),年平均土壤侵蚀量为红壤(1162.59~1972.89 t/km²)>紫色土(134.20~297.45 t/km²)>黄壤(4.85~40.05 t/km²)。

在相同降雨和土壤条件下,不同水保措施小区的径流输沙量也存在较大差异。黄壤 JT2 小区的径流深和土壤侵蚀量均明显低于 JT1 和 JT3,其减流率和减沙率可达 61.84%和 87.89%,可见 JT2 铺设的绿化草皮水土保持效益较为明显;紫色土不同水保措施小区的径流深差异不大,均为 110~120 mm,但 QB1 土壤侵蚀量明显低于 QB2 和 QB3。可见,尽管 QB1 水保林减流效益较差,但其保土能力较好,减沙率可达 55.88%,而 QB2 人工种草和谷坊措施的组合水土保持能力不足。此外,坡度是坡面径流泥沙流失的重要影响因素,有研究^[18]表明,在紫色土区 5°~25°径流小区中,径流深和泥沙流失量均呈总体上升趋势。尽管 QB1、QB2 和 QB3 小区的坡度存在一定差异,但因其差异较小,对坡面年径流深和年侵蚀量的影响有限;红壤小区 LH1 和 LH2 的径流深均高于 LH3,但其

侵蚀量均明显低于 LH3, 减沙可达 37.99% 和 41.07%, 这说明 LH1 经果林和 LH2 绿化草皮措施虽然不能减少坡面径流的产生, 但能有效减少坡面土壤的流失。结合以上不同水土保持措施小区年径流输沙特征来看, 在不同土壤条件下相近水土保持措施(水

保林与经果林, 铺设草皮与种草), 以及同一土壤条件下不同水土保持措施(林地措施与草地措施)的水土保持效益均存在较大差异。总体来说, 尽管各不同水土保持措施小区减流效益较差, 但均能在一定程度上减少坡面土壤侵蚀的产生。

表 2 不同水土保持措施小区侵蚀性降雨特征、年径流深和年侵蚀量

径流 小区	年降 雨量/mm	年侵蚀 降雨量/mm	占年降雨量 比例/%	侵蚀性降雨 次数/次	径流深/ mm	土壤侵蚀量/ (t·km ⁻²)
JT1	1288.6	793.0	61.54	19	43.82	39.48
JT2	1288.6	471.9	36.62	12	13.28	4.85
JT3	1288.6	793.0	61.54	19	34.80	40.05
QB1	1404.6	636.7	45.33	20	112.41	134.20
QB2	1404.6	636.7	45.33	20	113.60	263.94
QB3	1404.6	636.7	45.33	20	123.00	297.45
LH1	1246.5	966.2	77.51	40	278.34	1223.32
LH2	1246.5	966.2	77.51	40	304.17	1162.59
LH3	1246.5	966.2	77.51	40	219.49	1972.89

3.2 不同土壤和水土保持措施小区次降雨坡面平均产流输沙特征

由于土壤类型、水土保持措施和植被等下垫面因素的差异, 各小区坡面平均产流量和输沙量对侵蚀性次降雨的响应情况不尽相同(表 3)。从不同土壤类型的径流场来看, 黄壤、紫色土和红壤小区次降雨平均径流系数分别为 0.04~0.08, 0.23~0.25, 0.26, 平均径流深分别为 1.21~2.31, 5.62~6.15, 5.49~7.61 mm, 平均含沙量分别为 0.25~1.06, 1.10~2.17, 3.69~8.81 g/L, 平均土壤侵蚀量分别为 0.38~2.11, 6.71~14.87, 29.06~49.32 t/km²。可见, 次降雨平均径流系数、平均径流深、平均含沙量和平均土壤侵蚀量均呈现红壤>紫色土>黄壤的趋势, 与年径流深和年侵蚀量的特征一致。

表 3 不同水土保持措施小区坡面次降雨径流泥沙平均流失量

径流 小区	平均径流 系数	平均 径流深/mm	平均含沙量/ (g·L ⁻¹)	平均侵蚀量/ (t·km ⁻²)
JT1	0.08(0.05) ^b	2.31(0.73) ^c	0.85(0.27) ^d	2.08(1.40) ^c
JT2	0.04(0.03) ^b	1.21(0.73) ^c	0.25(0.23) ^d	0.38(0.37) ^c
JT3	0.07(0.05) ^b	1.83(0.90) ^c	1.06(0.44) ^d	2.11(1.98) ^c
QB1	0.23(0.11) ^a	5.62(1.78) ^{ab}	1.10(0.67) ^d	6.71(6.48) ^c
QB2	0.23(0.10) ^a	5.68(1.77) ^{ab}	2.05(1.33) ^{cd}	13.20(12.11) ^c
QB3	0.25(0.11) ^a	6.15(1.56) ^{ab}	2.17(1.35) ^c	14.87(12.14) ^c
LH1	0.26(0.13) ^a	6.96(6.09) ^{ab}	4.27(1.52) ^b	30.58(29.75) ^b
LH2	0.26(0.13) ^a	7.61(6.42) ^a	3.69(1.40) ^b	29.06(28.74) ^c
LH3	0.26(0.13) ^a	5.49(4.97) ^b	8.81(3.11) ^a	49.32(47.97) ^a

注: 同一指标各数字后不同字母表示不同径流小区显著差异($P<0.05$); 括号内数字表示标准差。

在同一径流场相同土壤和降雨条件下, 不同水土保持措施小区次降雨坡面平均产流输沙量也存在较大差异。黄壤 JT2 小区次降雨坡面平均径流系数、平均径流深、平均含沙量和平均土壤侵蚀量均远小于同一径流场的 JT1 和 JT3, 次降雨平均径流泥沙流失较少。紫色土

不同水土保持措施小区次降雨坡面平均径流系数和平均径流深的差异较小, QB2 次降雨坡面平均土壤侵蚀量和平均含沙量略低于 QB3, 但 QB1 次降雨坡面平均土壤侵蚀量和平均含沙量均明显低于 QB3, 次降雨减沙效益较为明显。红壤不同水土保持措施小区次降雨平均径流系数相同, 但 LH1 和 LH2 次降雨坡面平均径流深均远大于 LH3。然而 LH1 和 LH2 次降雨坡面平均土壤侵蚀量和平均含沙量均远低于 LH3, 次降雨减沙效益明显。可见, 在相同侵蚀降雨条件下, 各小区次降雨坡面次降雨平均产流输沙与其年径流深和年侵蚀量的特征也基本一致。

3.3 不同降雨类型对坡面产流输沙的影响

3.3.1 侵蚀性降雨类型划分 为进一步研究侵蚀性降雨对坡面径流泥沙的影响, 选取次降雨量、次降雨平均雨强和次降雨历时作为降雨特征指标, 利用 K-均值聚类^[19]将研究区内的 79 场降雨分为 3 类, 分别记为 A、B、C 雨型(表 4)。各类雨型的特征指标差异显著, 其中降雨量和降雨历时的 P 值均小于 0.001, 降雨强度的 P 值小于 0.01, 均满足分类要求。根据各降雨类型特征值的聚类中心来看, 在降雨量上为 C 类>B 类>A 类; 在降雨历时上表现为 C 类>A 类>B 类; 在雨强上表现为 B 类>C 类>A 类。其中 A 类降雨是小雨强、长历时、低雨量、低频率的降雨; B 类降雨是大雨强、短历时、低雨量、且频率较高的降雨; C 类降雨是中雨强、长历时、高雨量、且频率较低的降雨。

3.3.2 不同降雨类型坡面累积径流泥沙特征 根据雨型划分和次降雨坡面径流泥沙流失情况, 可得不同雨型下各小区坡面产流输沙的总量特征(表 5)及其占年径流深和年侵蚀量的比值(图 1、图 2)。在各黄壤小区, 不同雨型引起的坡面累积产流输沙量均呈现 B 类>C 类>A 类特征。B 类降雨占总侵蚀性降雨

场次的 52.63%~54.54%，产生的径流深和侵蚀量分别占各小区总径流深和总侵蚀量的 53.66%~64.75%和 54.96%~69.85%。在各紫色土小区，不同雨型引起各小区坡面累积产流均呈 B 类>C 类>A 类特征，累积输沙量均呈现 C 类>B 类>A 类特征。B 类降雨占总侵蚀性降雨场次的 55%，为各小区贡献 43.24%~47.64%的径流，而占总侵蚀性降雨场次 30%的 C 类降雨为各小区贡献 58.96%~65.28%

表 4 侵蚀性降雨类型划分

降雨类型	特征值			变异系数			发生频次
	降雨量/mm	降雨历时/h	平均雨强/(mm·h ⁻¹)	降雨量	降雨历时	平均雨强	
A	20.57	30.42	0.70	0.39	0.37	0.34	11
B	21.96	7.81	4.20	0.42	0.60	0.86	53
C	66.33	33.76	2.39	0.22	0.46	0.44	15

表 5 不同侵蚀性降雨类型下各径流小区产流输沙累积量

降雨类型	径流小区	降雨场次	累积径流深/mm	累积侵蚀量/(t·km ⁻²)
A	JT1	2	3.43	2.06
	JT2	1	0.61	0.09
	JT3	2	1.83	1.65
	QB1	3	18.23	15.40
	QB2	3	17.70	23.02
	QB3	3	17.90	24.63
	LH1	6	31.78	104.10
	LH2	6	35.68	103.21
	LH3	6	26.32	183.59
B	JT1	10	23.51	23.51
	JT2	6	8.60	2.92
	JT3	10	20.32	22.01
	QB1	11	48.61	35.70
	QB2	11	50.50	68.63
	QB3	11	58.60	97.44
	LH1	32	198.62	834.20
	LH2	32	217.92	803.35
	LH3	32	154.78	1322.26
C	JT1	7	16.88	13.92
	JT2	4	4.07	1.19
	JT3	7	12.66	16.39
	QB1	6	45.57	83.10
	QB2	6	45.40	172.29
	QB3	6	46.50	175.39
	LH1	2	47.94	285.03
	LH2	2	50.57	256.03
	LH3	2	38.39	467.04

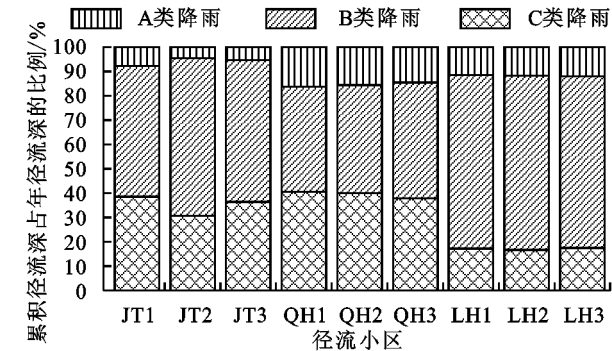


图 1 不同降雨类型坡面累积径流深占年径流深的比值

的侵蚀量。在各红壤小区，坡面产流输沙量均呈现 B 类>C 类>A 类的特征。B 类降雨占总侵蚀性降雨场次的 80%，为各小区贡献 70.52%~71.64%的径流以及 67.02%~69.10%的土壤侵蚀。综合来看，B 类雨型是各小区的主要侵蚀降雨类型，占各小区侵蚀性降雨场次的 50%以上，也是黄壤和红壤小区坡面产流产沙以及紫色土小区产流的主导雨型，C 类降雨是导致各紫色土小区土壤侵蚀发生的主导雨型。

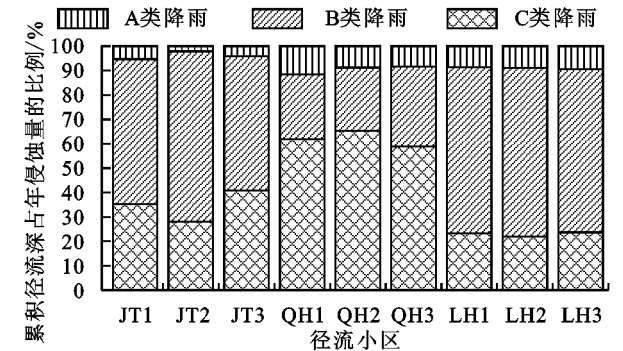


图 2 不同降雨类型坡面累积径流深占年侵蚀量的比值

3.3.3 不同降雨类型次降雨坡面平均产流输沙特征

各径流小区在不同土壤、雨型和水保措施下坡面次降雨平均产流量与平均输沙量存在较大差异(图 3、图 4)。不同水保措施黄壤小区在同一雨型下坡面平均径流深和平均侵蚀量均呈 JT1>JT3>JT2 特征；从不同雨型来看，黄壤各小区坡面平均径流量和平均土壤侵蚀量均呈 B 类≈C 类>A 类特征。不同水保措施紫色土小区在同一雨型下次降雨平均径流深差异较小，但平均侵蚀量差异较大，呈 QB3>QB2>QB1 特征；从不同雨型来看，紫色土各小区坡面平均径流量和平均土壤侵蚀量均呈 C 类>A 类>B 类特征。不同水保措施红壤小区在同一雨型下坡面次降雨平均径流深呈 LH2>LH1>LH3 特征，平均土壤侵蚀量均呈 LH3>LH1>LH2 特征；从不同雨型来看，红壤各小区次降雨平均径流量和次降雨平均土壤侵蚀量均呈 C 类>B 类>A 类特征。总体来说，C 类降雨在不同水保措施小区的次降雨平均径流量和次降雨平均土壤侵蚀量均高于其他雨型，是单次降雨引起径流泥沙流失量最大的雨型。

3.4 降雨特征因子与径流泥沙流失的相关性分析

通过对各小区次降雨特征因子(次降雨量、次降雨历时、次降雨平均雨强 $I_{平均}$ 、次降雨最大 30 min 雨强

I_{30} 、次降雨前 3 天降雨量、降雨量与最大 30 min 雨强的乘积 PI_{30})与对应的径流量和侵蚀量进行 Pearson 相关分析(表 6),可以看出不同土壤类型和水土保持措施坡面径流泥沙对降雨因子的响应情况存在较大差异。在黄壤各小区中,各降雨因子与径流量、侵蚀量均无显著相关性,说明各影响因子间作用机理复杂,任何单项因素均难以准确反映各坡面径流深和土壤侵蚀量的状况。在紫色土各小区中,降雨量、降雨历时以及 PI_{30} 与径流量、侵蚀量均呈极显著相关($P<0.01$),相关系数在 0.50~0.85;在红壤各小区中,降雨量和 PI_{30} 与径流量、侵蚀量均呈极显著相关($P<0.01$),且相关系数均大于 0.70。紫色土和红壤各小区径流深、侵蚀量与降雨量、 PI_{30} 均显著相关,表明坡面产流输沙受降雨量和降雨侵蚀力^[20]的影响较大,即一般在雨量较大、降雨侵蚀力较强的条件下,这些小区坡面产生的径流量和泥沙流失量也较大。不同土壤类型和水土保持措施小区的径流深与侵蚀量呈均极显著相关($P<0.01$),且相关性均在 0.750 以上,说明各小区的土壤侵蚀量受地表径流影响较大,且水沙关系均较为稳定。

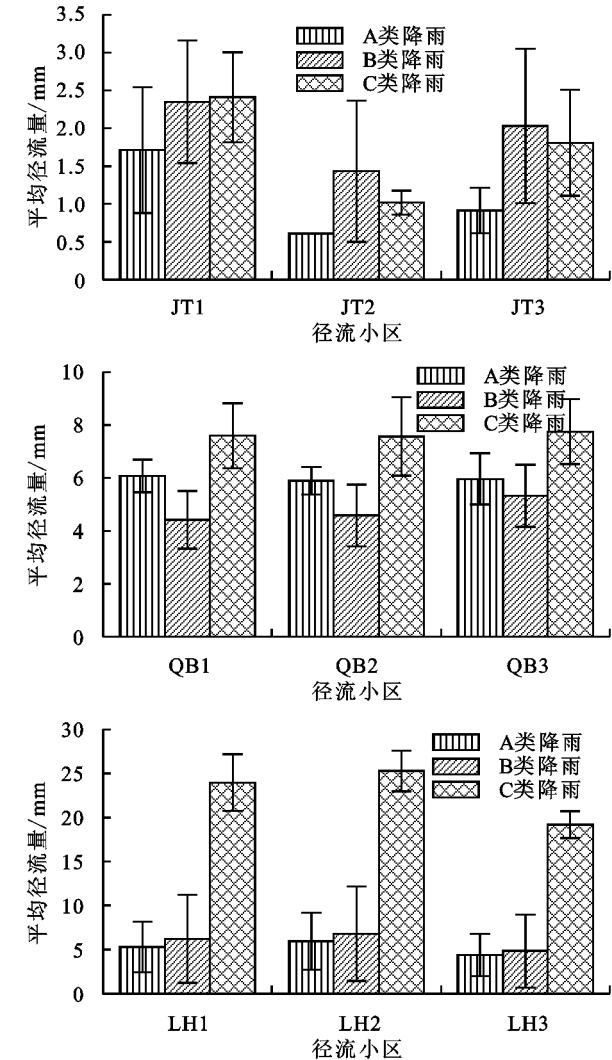


图 3 不同雨型次降雨坡面平均径流量

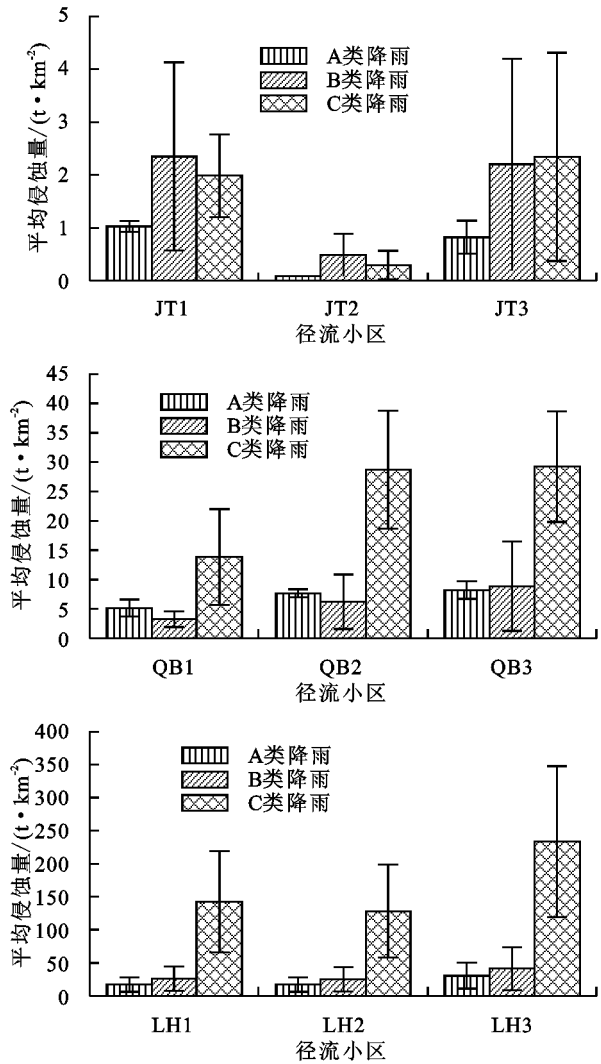


图 4 不同雨型次降雨坡面平均侵蚀量

4 讨论

4.1 降雨类型对坡面产流输沙的影响

降雨是地表径流产生的前提条件,降雨和地表径流是水蚀区侵蚀发生的主要驱动力和载体。前人^[18,21-22]对黄土高原、西南喀斯特地区、南方红壤区等区域的次降雨雨型与土壤侵蚀进行了大量的研究,将侵蚀性降雨划分为 3~5 类,但普遍认为高强度、短历时的降雨是造成各区域侵蚀发生的重要雨型。根据本研究对湘中低山丘陵区侵蚀降雨的雨型划分,可以看出雨强小、历时长、雨量低且频率低的 A 类降雨,侵蚀能力较弱,对坡面年径流深和年侵蚀量的贡献有限。尽管在该区域较为常见的雨强大、历时短、雨量低的 B 类降雨对土壤的破坏时间持续短,单次降雨造成的径流和泥沙流失有限,但由于其出现频率较高,进而累积径流量和土壤侵蚀量大,应重点防范^[8]。雨强适中、历时长且雨量高的 C 类降雨将直接导致对坡面土壤的持续破坏,从而导致较强烈的径流泥沙流失。尽管其出现频率较低,但带来的水土流失不容忽视。

表 6 不同水土保持措施小区坡面次降雨径流泥沙与降雨特征参数的相关分析

径流小区	径流参数	降雨量	降雨历时	I 平均	I_{30}	前期降雨量	PI_{30}	径流深
JT1	径流深	0.287	-0.039	0.281	0.304	-0.354	0.291	0.872**
	侵蚀量	0.162	-0.090	0.202	0.434	-0.242	0.291	
JT2	径流深	-0.016	-0.086	-0.077	0.245	-0.183	0.046	0.928**
	侵蚀量	-0.025	0.028	-0.189	0.219	0.094	0.033	
JT3	径流深	0.004	-0.102	-0.057	0.145	0.262	0.111	0.860**
	侵蚀量	0.020	0.114	-0.030	0.149	0.391	0.062	
QB1	径流深	0.734**	0.738**	-0.070	0.287	0.270	0.687**	0.768**
	侵蚀量	0.778**	0.585**	-0.106	0.360	0.107	0.742**	
QB2	径流深	0.757**	0.717**	-0.086	0.339	0.352	0.707**	0.835**
	侵蚀量	0.839**	0.620**	-0.075	0.489*	0.534*	0.815**	
QB3	径流深	0.754**	0.624**	0.020	0.403	0.359	0.705**	0.850**
	侵蚀量	0.812**	0.583**	-0.056	0.380	0.616**	0.709**	
LH1	径流深	0.868**	0.065	0.311	0.272	0.230	0.717**	0.864**
	侵蚀量	0.844**	0.016	0.224	0.280	0.104	0.725**	
LH2	径流深	0.854**	0.068	0.320*	0.265	0.257	0.706**	0.844**
	侵蚀量	0.825**	0.020	0.207	0.274	0.134	0.708**	
LH3	径流深	0.859**	0.070	0.317*	0.283	0.236	0.723**	0.867**
	侵蚀量	0.834**	0.020	0.244	0.293	0.110	0.731**	

注：* 表示在 $P<0.05$ 水平（双侧）上显著相关；** 表示在 $P<0.01$ 水平（双侧）上极显著相关。

4.2 土壤类型对径流场径流泥沙的影响

土壤作为地表径流产生的界面以及侵蚀过程中被破坏的对象,受区域气候、地形、植被和人类活动等因素的影响,土壤及其母质的性质对地表径流泥沙的流失起着重要的作用^[9-10]。根据不同母质发育的土壤的物理性黏粒含量来看,花岗岩类风化物发育的土壤,黏粒含量较低,在 30%左右,质地多为沙壤至中壤土;紫色砂页岩类风化物发育土壤的黏粒含量在 40%左右,质地多为壤土;第四纪红土发育的土壤,黏粒含量在 50%左右,质地多为重壤至黏土^[23]。井头径流场各小区土壤均为风化花岗岩黄壤,其土层深厚,质地偏沙,透水性好。黄壤各小区较低的径流系数(0.04~0.08)表明其坡面截流能力强,降雨径流转化率低,能有效减少坡面地表径流,且较低的径流含沙量也减少了土壤侵蚀量。秋波径流场各小区土壤均为紫色页岩风化物形成的紫色土,以粉壤质为主,多为重壤土,虽然径流系数较高,但含沙量较低,也在一定程度上减少坡面泥沙的流失。而莲荷径流场各小区土壤均为第四纪红黏土土壤,其质地较黏重,为重壤至黏土,土体紧实,通水透气性较差。红壤遇水易膨胀形成糊状,产生结皮效应,导致降雨过程中下渗较慢,易形成地表径流,并带走大量表层土壤^[24]。较高的径流系数和含沙量使得红壤各小区的径流深和侵蚀量远高于黄壤和紫色土各小区。尹先平等^[25]对赣江源区不同土壤的抗蚀性研究表明,红壤的抗蚀性远小于黄壤和紫色土,这一结果与本研究相一致,说明不同土壤条件下,坡面侵蚀的显著差异与土壤自身的抗蚀性存在较大联系。

4.3 水土保持措施对坡面产流输沙的影响

在相同降雨条件和土壤条件下,不同水保措施呈现不同的水土保持能力,这主要与植被种类、不同植被

的配置方式以及植被覆盖度等因素相关^[19,26]。在黄壤小区中,草地植被覆盖率高,减流减沙效益较明显,而由单一 2 年生圆柏构成的林地措施小区的保水固土能力不足,较植被覆盖率较高的撂荒对照小区相比,土壤侵蚀量没有明显减少。在紫色土小区中,林草措施组合的水保林以及草地和谷坊组合的草地措施均不同程度地减少了径流和泥沙的流失。尤其是茂盛的枫香和龙须草组合的高植被覆盖率林草措施减少了 50%以上的侵蚀量,水保效益明显。在红壤小区中,尽管林草措施组合的经果林和覆盖绿化草皮的草地措施径流深均未能减少坡面径流的产生,但因其较高的郁闭度和植被盖度,有效减少了雨滴对表层土壤的滴溅作用^[11],减少了 30%以上的土壤侵蚀量。由此可以看出,较单一树种的幼林地相比,林草措施组合的成熟经果林和水保林能更好地减少侵蚀的产生,且在一定程度上提高植被郁闭度,大幅降低径流泥沙的流失^[26]。

5 结论

(1)土壤类型对于坡面年产流输沙量和次降雨条件下径流泥沙的流失均有重要影响。在年降水量相近的条件下(1 246.5~1 404.6 mm),不同土壤类型坡面年径流深、年侵蚀量、次降雨平均径流系数、平均径流深、平均含沙量和平均土壤侵蚀量均呈红壤>紫色土>黄壤的特征。

(2)相同土壤类型和侵蚀降雨条件下,不同水保措施小区次降雨坡面平均产流输沙量存在较大差异。尽管各水保措施的减流效益均较差,但减沙效益较好,以黄壤绿化草皮措施、紫色土林草混交的水保林以及红壤林草混交的经果林和绿化草皮措施小区的减沙效益较为明显,减沙率可达 87.89%,55.88%,37.99%和 41.07%。

(3)大雨强、短历时、低雨量的降雨是不同土壤类

型和水保措施小区的主导降雨类型,占各径流小区侵蚀性降雨场次的50%以上,且该类降雨也是黄壤和红壤各小区坡面产流产沙以及紫色土各小区产流的主导雨型,应重点防范。此外,中雨强、长历时、高雨量的降雨是引起各小区单次降雨径流泥沙流失量最大的雨型,也应引起重视。

参考文献:

- [1] 宋江平,李忠武,刘春,等. 湘北红壤低山丘陵区典型水土流失治理模式径流泥沙效应[J]. 水土保持学报, 2018,32(1):32-38.
- [2] 史志华,王玲,刘前进,等. 土壤侵蚀:从综合治理到生态调控[J]. 中国科学院院刊, 2018,33(2):198-205.
- [3] 湛芸,何丙辉,赵秀兰,等. 小江流域农地水土流失对水体富营养化的影响[J]. 水土保持学报, 2010,24(4):32-43.
- [4] 江森华,谢锦升,王维明,等. 闽北不同土地利用方式与不同降雨强度对水土流失的影响[J]. 中国水土保持科学, 2012,10(4):84-89.
- [5] 杨学震,钟炳林,谢小东,等. 丘陵红壤的土壤侵蚀与治理[M]. 北京:中国农业出版社, 2005:23-52.
- [6] 胥哲明,杨晓明. 降雨特征因子与坡面土壤侵蚀关系分析[J]. 宁夏农林科技, 2011,52(10):92-94.
- [7] 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.
- [8] 余长洪,李就好,陈凯,等. 砖红壤区降雨因子对产流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2015,22(1):17-20.
- [9] 郭新送,宋付朋,高杨,等. 模拟降雨下3种类型土壤坡面的泥沙流失特征及其养分富集效应[J]. 水土保持学报, 2014,28(3):23-26.
- [10] 徐铭泽,杨洁,刘窑军,等. 不同母质红壤坡面产流产沙特征比较[J]. 水土保持学报, 2018,32(2):34-39.
- [11] 卜建霞,叶功富,尤龙辉,等. 福建省长汀县不同土地利用方式降雨产流产沙特征[J]. 水土保持研究, 2017,24(4):1-5.
- [12] 马琦,王琦. 几种草被植物的水土保持效应研究[J]. 草业学报, 2005,22(10):72-74.

(上接第59页)

- [18] 范荣生,李占斌. 坡地降雨溅蚀及输沙模型[J]. 水利学报, 1993,6:24-29.
- [19] 汤立群. 坡面降雨溅蚀及其模拟[J]. 水科学进展, 1995,6(4):304-310.
- [20] 马仁明,王军光,李朝霞,等. 降雨过程中红壤团聚体粒径变化对溅蚀的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2013,22(6):779-785.
- [21] 胡伟,郑粉莉,边锋. 降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响[J]. 生态学报, 2016,36(15):4708-4717.
- [22] 秦越,程金花,张洪江,等. 雨滴对击溅侵蚀的影响研究[J]. 水土保持学报, 2014,28(2):74-78.

- [13] 张文源,王百田,杨光敏,等. 喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J]. 生态环境学报, 2014,23(11):1776-1782.
- [14] 杜波,唐丽霞,潘佑静,等. 贵州喀斯特地区侵蚀性次降雨产流产沙特征研究[J]. 西南林业大学学报, 2016,36(5):111-117.
- [15] 李林育,王志杰,焦菊英. 紫色丘陵区侵蚀性降雨与降雨侵蚀力特征[J]. 中国水土保持科学, 2013,11(1):8-17.
- [16] 郑海金,杨洁,左长清,等. 红壤坡地侵蚀性降雨及降雨动能分析[J]. 水土保持研究, 2009,16(3):30-33.
- [17] 谢红霞,邝美娟,隋兵,等. 湖南省近50年侵蚀性降雨及降雨侵蚀力特征研究[J]. 南阳理工学院学报, 2012,4(4):108-113.
- [18] 马星,郑江坤,王文武,等. 不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J]. 水土保持学报, 2017,31(2):17-21.
- [19] 王小博,朱永清,吴宜进,等. 不同植被下降雨类型对红壤坡地土壤侵蚀特征的影响[J]. 水土保持研究, 2017,24(2):6-11.
- [20] 王万忠,焦菊英,郝小品,等. 中国降雨侵蚀力R值的计算与分布(D)[J]. 水土保持学报, 1995,9(4):5-18.
- [21] Fang N F, Shi G H, Li I, et al. The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed[J]. Catena, 2012, 99(12):1-8.
- [22] 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.
- [23] 湖南省农业厅. 湖南土壤[M]. 北京:农业出版社, 1989:247-248.
- [24] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等. 雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报, 2004,41(4):632-635.
- [25] 尹先平,周运超,罗明,等. 赣江源区主要土壤抗蚀性能对比[J]. 中国水土保持科学, 2010,8(2):8-14.
- [26] 戴金梅,查轩,黄少燕,等. 不同植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2017,31(3):33-38.

- [23] Leguédais S, Bissonnais Y. Size fractions resulting from an aggregate stability test, interrill detachment and transport[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004,29(9):1117-1129.
- [24] 程琴娟,蔡强国,胡霞. 不同粒径黄绵土的溅蚀规律及表土结皮发育研究[J]. 土壤学报, 2007,44(3):392-396.
- [25] Legout C, Leguédais S, Bissonnais Y, Le, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. Geoderma, 2005,124(3):279-292.
- [26] Fu Y, Li G L, Zheng T H, et al. Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action[J]. Catena, 2017,150:154-160.