

不同土地利用方式下赤红壤坡面土壤侵蚀特征

李桂芳¹, 杨任翔¹, 谢福倩², 梁志鑫², 安娟³

(1.广西大学农学院, 南宁 530004; 2.广西壮族自治区水土保持监测站, 南宁 530023;

3.山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院, 山东 临沂 276005)

摘要: 为探究降雨和土地利用对南方赤红壤坡面侵蚀特征的影响, 通过天然降雨观测试验, 定量分析不同土地利用方式(坡耕地、果园、人工草地和撂荒地)下坡面径流和侵蚀泥沙特征, 探讨降雨类型及土地利用对坡面侵蚀产沙的影响以及降雨特征参数与坡面水沙指标间的关系。结果表明: (1) 2018年研究区降雨主要集中在5—9月, 且每月降雨量主要由一场或几场暴雨及大暴雨组成; (2) 坡耕地坡面年径流量和年侵蚀量均最大, 分别是果园、人工草地以及撂荒地处理下的3.4、8.0、6.0倍和340.5、1 605.3、1 720.3倍; (2) 次降雨下, 坡面径流量在年内表现为前期平稳, 后期波动增加, 侵蚀量表现为前期波动较大, 后期变化相对平稳, 且侵蚀产沙主要集中在前期; (3) 不同土地利用方式下, 暴雨及大暴雨产生的径流量均占年径流量的75%以上, 坡耕地、果园、人工草地以及撂荒地处理下由暴雨和大暴雨产生的侵蚀量分别占年侵蚀量的99.1%、71.8%、52.3%和51.6%; (4) 降雨量和最大30 min降雨强度是影响赤红壤坡面侵蚀最重要的降雨特征参数, 降雨历时和植被覆盖度均显著影响果园、人工草地及撂荒地坡面径流量。研究结果有助于明晰南方赤红壤区不同土地利用现状土壤侵蚀特征, 为区域水土保持提供参考依据。

关键词: 降雨; 土地利用; 赤红壤; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0101-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.015

Slope Soil Erosion Characteristic of Lateritic Red Soil Under Different Land Use Types

LI Guifang¹, YANG Renxiang¹, XIE Fuqian², LIANG Zhixin², AN Juan³

(1.College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004; 2.Guangxi Water and Soil Conservation

Monitoring Section, Nanning 530023; 3.Shandong Key Laboratory of Water and Soil Conservation and

Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005)

Abstract: In order to explore the impact of rainfall and land use on the slope soil erosion characteristics of lateritic red soil in South China, the runoff and erosion sediment characteristics of different land use types (slope farmland, orchard, artificial pasture and abandoned land) were analyzed quantitatively through the observation experiment of natural rainfall, and the impact of rainfall types and land use on the erosion and sediment yield of slope, as well as the relationships of rainfall parameters and slope water and sediment were discussed. The results showed that the rainfall in 2018 was mainly from May to September, and the monthly rainfall was constituted by one or several rainstorms and heavy rainstorms. (2) The annual runoff and erosion of slope farmland were the largest, and the runoff amount of farmland was about 3.4, 8.0 and 6.0 times of orchard, artificial pasture and abandoned land, respectively, and the sediment yield of slope farmland was about 340.5, 1 605.3 and 1 720.3 times of orchard, artificial pasture and abandoned land, respectively. (3) Runoff amount on the slope surface kept a stable level during the early period of the year, then the fluctuation increased during the late period of the year, while the trend of sediment yield was opposite to that of runoff amount, and the erosion and sediment yield were mainly concentrated in the early period. (4) Runoff generated by heavy rainstorm and large heavy rainstorm accounted for more than 75% of the annual runoff for all land use types, while the erosion generated by heavy rainstorm and large heavy rainstorm accounted for 99.1%, 71.8%, 52.3% and 51.6% of the annual erosion for slope farmland, orchard, artificial pasture

收稿日期: 2019-08-26

资助项目: 广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA138024); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD17195060); 国家自然科学基金项目(41301292)

第一作者: 李桂芳(1987—), 女, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀及其环境效应研究。E-mail: lifangdyx@163.com

通信作者: 安娟(1982—), 女, 博士, 讲师(校聘教授三级), 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: anjuan0715@126.com

and abandoned land, respectively. (5) Rainfall amount and maximum rainfall intensity in 30 min were the most important parameters for soil erosion, and rainfall duration and vegetation coverage also significant affected runoff amount for orchard, artificial pasture and abandoned land. The results were helpful to clarify the soil erosion characteristic of lateritic red soil under different land use status and provide reference for regional water conservation of South China.

Keywords: rainfall; land use; lateritic red soil; soil erosion

水土流失直接或间接导致土壤肥力下降、水质恶化、生态破坏,进而影响当地居民经济与生活。降雨是导致坡面水土流失最主要的影响因素,是引起土壤侵蚀的先决条件和主要动力^[1]。降雨等级^[2]、降雨强度^[3]、降雨量、降雨历时^[4]等降雨特征参数均对坡面侵蚀过程具有重要影响。自然降雨条件下,暴雨是引起产流产沙的主要降雨类型^[4],Wang 等^[5]研究指出,暴雨产生的侵蚀量占年侵蚀量的 50% 以上。不同耕作措施或土地利用方式下,降雨对坡地侵蚀特征的影响存在明显不同^[6],坡地具备较好的植被覆盖,能够有效抵御暴雨侵蚀^[7]。土地利用方式主要通过影响土壤性质^[8]、植被覆盖度^[9-10]等影响土壤侵蚀特征。长期观测试验研究^[11]指出,红壤坡地不同土地利用方式下,农作区的泥沙流失量与径流量均最大;彭宏佳等^[12]研究指出,自然降雨条件下,喀斯特地区裸地和自然草地的径流系数最大;在大雨量、高强度降雨事件下,耕地和裸地单位面积产沙量明显大于经果林和自然草地;Patin 等^[13]研究认为,自然降雨条件下,与柚木处理相比,长期休耕处理可以有效提高土壤入渗速率,从而降低侵蚀量;同时还指出,不同土地利用类型对坡面侵蚀的影响与地表草被类型、生长状况及地面覆盖度密切相关。对于同一土地利用方式,研究区域、土壤类型、降雨特征等因素不同时,其对坡地土壤侵蚀的影响存在明显差异。因此,有必要针对不同研究区土地利用及降雨特征展开深入研究,明晰不同降雨特征下土地利用对坡面侵蚀的影响。

赤红壤是我国亚热带主要的土壤类型之一,分布总面积约为 $1.78 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[14],是我国热带地区旱粮、糖、油、果、林生产的重要基地^[15]。我国赤红壤分布区降雨特征具有年降雨量高、降雨侵蚀力强、降雨侵蚀力年内分配相对比较分散等特征^[16]。在南方高温多雨条件下,赤红壤及其母质易于风化流失,导致土壤贫瘠、砂化,水土流失严重,再加上该地区土地利用及复种指数均较高,导致赤红壤坡面与其他区域土壤侵蚀特征存在明显差异。不同土地利用方式下赤红壤坡面土壤物理、化学及生物学性质存在明显差异^[15],但赤红壤区土壤侵蚀特征,尤其是不同土地利用方式下坡面水土流失特征尚不清晰。目前,对南方高降雨量、高降雨频次以及高降雨侵蚀力条件下赤红

壤坡面土壤侵蚀特征的研究鲜有报道。本研究以广西赤红壤区果园、坡耕地、人工草地以及撂荒地坡面为研究对象,分析自然降雨条件下坡面侵蚀输沙特征、降雨等级、降雨特征参数等对坡面产流产沙的影响,探讨不同土地利用类型下赤红壤坡面侵蚀输沙特征,同时获得影响赤红壤坡面侵蚀产沙的主要降雨特征参数。研究结果可为南方赤红壤区水土流失防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西南宁市良庆区那马镇木棉麓小流域($108^{\circ}19'00''$ — $108^{\circ}19'24''\text{E}$, $22^{\circ}37'26''$ — $22^{\circ}37'55''\text{N}$),属于亚热带湿润季风气候,干、湿季节明显,年均降水量 1 232.2 mm,其中 4—9 月降水占全年降水量的 80% 以上。年均气温 21.8 ℃,年均日照时间 1 687.6 h,年均有霜期 28 d。流域内主要为荒草和灌丛、人工营造或自然恢复的桉树、马尾松等人工林和次生林,以及芒果、龙眼、荔枝等经果林。木棉麓小流域属于南方红壤丘陵区,是广西红壤丘陵区内的典型小流域^[17],试验区土壤为赤红壤,土层厚度为 100—150 cm,土壤 pH 4.5~5.5,有机质含量 2%~3%,土壤容重 1.2~1.3 g/cm³。土壤母质主要由第四纪砂质岩类风化物发育而成,成土母岩以沉积岩为主,且多为砂质岩,裸露地表土为砂质土^[17]。

1.2 材料与方法

1.2.1 试验小区布设 本试验小区为 2012 年建立在木棉麓水土保持科技示范园内的标准径流小区。径流小区统一布设在山坡中部,土地利用方式、规格及管理措施等见表 1。径流小区内坡面横向平整,坡度和土壤条件均一,各径流小区均配有砖砌围埂和保护带。径流小区下方设有圆形集流桶和分流桶,以承接小区径流泥沙样。

1.2.2 试验步骤 采用野外径流小区水文观测法。自然降雨观测时间为 2018 年 1 月 1 日至 12 月 31 日。每次降雨结束后,利用水尺测定(测定不同的 3 个位置取平均数)集流桶和分流桶水深,以此计算地表径流量。采用搅拌舀水取样、全剖面采样器取样方法,利用 1 000 mL 径流瓶在径流池中取径流泥沙样品,每次取 3 个重复样,烘干法测定其中泥沙含量。

参照《径流小区和小流域控制站监测手册》计算总径流量和土壤流失量等参数。

表 1 试验小区

土地利用类型	坡度/(°)	坡宽/m	坡长/m	植被类型	管理措施	植被覆盖/%
果园	16.5	5	20	7 年生杧果	不定期除草、施肥、翻耕、浇水等	65~81
坡耕地			20	木薯		0~83
人工草地			10	象牙草		3~95
撂荒地			10	自然植被	无	0~90

在径流小区附近配备有人工雨量站和数字气象站,用于收集气象资料。降雨资料的记录包括日降雨量、降雨过程摘录(5 min 间隔)、次降雨起止时间、降雨历时、雨量、平均雨强、最大 30 min 降雨强度(I_{30})等参数。降雨过程中如果间歇时间连续超过 6 h,则视为 2 次降水事件。按照中国气象降雨等级^[18]划分为降雨等级(表 2)。

表 2 降雨等级划分标准 单位:mm

降雨等级	12 h 降雨量	24 h 降雨量
小雨	0.2~0.5	<10
中雨	5~15	10~25
大雨	15~30	25~50
暴雨	30~70	50~100
大暴雨	70~140	100~200
特大暴雨	>140	>200

2 结果与分析

2.1 降雨特征分析

2018 年研究区总降雨量为 1 211.5 mm,各月降雨量见图 1。研究区降雨主要集中在 5—9 月,占全年降雨量的 84.0%,其中 7 月降雨量最大,5 月次之,分别为 316.8, 266.2 mm,各占全年总降雨量的 26.1%和 22.0%。

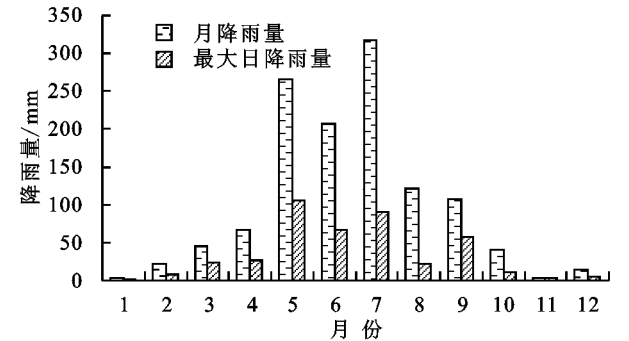


图 1 试验区 2018 年各月降雨量

由表 3 可知,试验区全年径流小区产流的降雨次数为 21 场(3 月 1 日至 9 月 16 日),总侵蚀性降雨总量为 992.4 mm,占全年降雨量的 81.9%。侵蚀性降雨的降雨量变化范围为 2.0~125.8 mm,平均雨强为 0.9~76.8 mm/h, I_{30} (最大 30 min 降雨强度)则在 1.6~89.6 mm/h 波动变化。按照中国气象降雨等级划分,21 场侵蚀性降雨以中雨及其以上降雨类型为主,其中中雨、大雨、暴雨降雨次数均占侵蚀性降雨总数的 23.8%(各 5 场),大暴雨占 13.8%(共 3 场),中

雨及其以上降雨总量分别占侵蚀性降雨总量的 9.0%,13.2%,37.5%和 35.3%。表明暴雨及大暴雨是研究区侵蚀性降雨的主要类型(总占比 72.8%)。此外,21 场侵蚀性降雨中 I_{30} 最大为 89.8 mm/h,超过 30 mm/h 的降雨场次占 47.6%(共 10 场),其中 I_{30} 超过 50 mm/h 的降雨有 5 场。与红壤区、黄土区、紫色土等研究区^[2,6,19]相比,本研究区次降雨量,尤其是 I_{30} 远大于其他研究区。

由图 1 和表 3 还可看出,研究区 3—9 月降雨主要由 1 场或者几场暴雨或大暴雨组成,例如,9 月仅 16 日的 1 次暴雨降雨量占全月总降雨量的 78.0%。表明研究区降雨具有集中度高、侵蚀性降雨频次高、降雨侵蚀力强^[20]等特征。由研究区 2018 年侵蚀性降雨分布还可以看出,赤红壤坡面对侵蚀性降雨的响应与其他研究区存在明显不同^[2,4],在以后的研究中有必要针对赤红壤区侵蚀性降雨特征展开深入探讨。

表 3 研究区侵蚀性降雨特征参数

降雨时间 (月-日)	降雨 历时/h	降雨量/ mm	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	I_{30} / (mm·h ⁻¹)	降雨 等级
03-01	0.1	6.4	76.8	12.9	小雨
03-18	5.5	28.4	5.2	27.0	大雨
04-15	3.2	20.2	6.4	25.0	中雨
04-21	0.3	3.8	15.2	7.7	小雨
04-26	3.8	2.0	1.0	1.6	小雨
04-29	12.5	10.8	0.9	7.3	中雨
05-02	7.6	37.0	4.9	18.9	大雨
05-07	2.8	29.2	10.3	31.8	大雨
05-08	11.3	74.0	6.5	74.9	暴雨
05-13	9.0	110.0	12.2	89.8	大暴雨
06-01	25.3	87.6	5.4	63.6	暴雨
06-24	39.8	125.8	7.7	77.7	大暴雨
07-07	13.3	18.8	2.2	16.1	中雨
07-13	20.3	71.2	5.1	51.2	暴雨
07-18	1.0	16.8	16.8	32.2	中雨
07-24	25.2	114.8	4.6	39.5	大暴雨
07-26	10.4	37.4	5.7	37.5	大雨
08-11	5.5	22.4	4.1	16.9	中雨
08-14	26.6	36.4	6.3	21.8	大雨
08-23	19.2	55.8	19.2	28.2	暴雨
09-16	43.3	83.6	1.9	47.1	暴雨

2.2 不同土地利用方式下坡面侵蚀特征

由表 4 可知,不同土地利用方式下赤红壤坡面产流产沙特征存在明显不同。坡面年径流量、径流系数均表现为坡耕地>果园>撂荒地>人工草地,表明土地利用方式对赤红壤坡面产流存在明显不同的影响。试验期间,不同径流小区年径流量为 174.5~1 401.6 m³/hm²,坡耕地年径流量分别是果园、人工草地和撂荒地的 3.4,8.0,6.0 倍,坡耕地年径流系数最高,为 0.116,人工草地最低,仅 0.014,表明人工草地和撂荒地坡面产流的降低效果较为明显,其中人工草地的减流效果最好。人工草地与撂荒地由于其草种以及人工介入抚育与自然生长的不同,使其对坡面径流量的影响不同,Li 等^[21]研究指出,牧草等地上生物量较大的草类可以显著增加降雨入渗,减低坡面径流量。此外,在年降雨量及年侵蚀降雨量基本接近的情况下,本文果园和撂荒地坡面年径流量远小于彭浩等^[22]对湘中红壤的研究结果,可能的原因是:一方面土壤类型的不同;另一方面是不同研究区降雨特征存在较大差异。Wang 等^[5]研究指出,不同的降雨类型下坡面径流系数存在明显不同,次降雨特征对坡面径流具有显著影响。

表 4 不同土地利用方式下径流小区年径流泥沙量

土地利用 类型	年径 流深/mm	径流 系数	年径流量/ (m ³ ·hm ⁻²)	年侵蚀量/ (kg·hm ⁻²)
果园	41.3	0.034	412.9	162.2
坡耕地	140.2	0.116	1401.6	55221.5
人工草地	17.5	0.014	174.9	34.4
撂荒地	23.5	0.019	235.2	32.1

与坡面径流量相比,坡面侵蚀泥沙量变化差异更为明显。坡面年侵蚀量整体表现为坡耕地>果园>人工草地>撂荒地。坡面年侵蚀量为 32.1~55 221.5 kg/hm²,坡耕地年侵蚀泥沙量分别是果园、人工草地和撂荒地的 340.5,1 605.3,1 720.3 倍。种植象牙草的人工草地坡面的侵蚀量与自然生长杂草撂荒地的年侵蚀量基本持平,表明对于赤红壤坡面,坡耕地仍是研究区坡面侵蚀泥沙的主要来源,其对侵蚀泥沙量的增加作用比径流量更为明显。人工草地及撂荒地由于具有较好的植被覆盖度,可以增加降雨入渗、减少坡面径流及有效减缓坡面径流流速,从而显著降低坡面侵蚀泥沙量^[23]。本文的研究结果与焦菊英等^[7]对黄土的研究结果相比,赤红壤的坡面侵蚀量整体上远小于黄土坡面的侵蚀量。

此外,果园的年侵蚀量虽然显著低于坡耕地的年侵蚀量,但明显高于人工草地和撂荒地的年侵蚀量,约为二者的 3 倍。彭浩等^[22]对红壤区经果林小区的观测结果与本文果园年侵蚀量接近,表明对于南方地

区,果园坡面的侵蚀量不容忽视。广西是我国最主要的热带水果生产基地,2017 年广西芒果的栽培面积和产量均位于全国第 1 位,而广西现有芒果园大多数建立在丘陵山地和坡地上,90%以上的果园依赖自然降雨以维持其生长与发育^[24],大规模坡地果园的水土流失问题目前尚未得到足够的重视。

2.3 赤红壤坡面侵蚀年输沙特征

为进一步探讨土地利用类型对坡面侵蚀输沙的影响,对 21 场侵蚀性降雨下坡面产流产沙特征进行分析(图 2)。由图 2a 可知,次降雨条件下,坡耕地的坡面径流量远大于果园和其他处理,坡耕地坡面径流量在年内分布表现为 3—5 月基本平稳(0.9~10.2 m³/hm²),5—7 月波动较大(5.9~389.4 m³/hm²),7—9 月呈波动增加趋势(8.6~131.1 m³/hm²)。本文中坡耕地种植作物为木薯,木薯是热带地区主要的薯类作物之一,生长周期较长(约 10 个月),行距在 1.0 m 左右,株型呈伞型,成熟期离地面最近的留存叶距离地面 1.0 m 以上^[25]。在广西地区,木薯在 4 月初开始种植,前期生长较慢,6 月之前处于幼苗期,坡面的植被覆盖度较低,再加之地表无其他植被,使得降雨主要用于产流,故其次降雨条件下坡面径流量均明显高于其他处理。

与坡耕地径流量变化趋势不同,果园、人工草地和撂荒地处理下坡面径流量的年内变化趋势基本一致,表现为 3—5 月相对较为平稳,5—9 月呈波动增加趋势。整体上,果园坡面径流量大于人工草地和撂荒地,径流量为 2.4~84.0 m³/hm²,在年内存在明显的峰值(5 月 13 日和 9 月 16 日)。撂荒地和人工草地径流量变化趋势基本一致,分别为 0.5~30.8,0.3~48.7 m³/hm²。不同土地利用方式下坡面径流量的年内变化特征主要受 2 方面的因素影响:一方面与侵蚀性降雨在年内的分布有关(表 3),5 月之前研究区侵蚀性降雨以中小雨为主,降雨量及 I_{30} 均相对较小,而 5 月以后,侵蚀性降雨的降雨量迅速增加,由于土壤本身的持水能力有限,导致坡面径流量明显增加;另一方面,与坡面植被的生长状况及地表覆盖特征有关,在 3—5 月,果园、人工草地和撂荒地由于牧草、杂草等均处于生长早期,植被覆盖度差异不大,而后期由于果园采取不定期除草,使得人工草和撂荒地的覆盖度明显高于果园,导致次降雨下坡面径流量存在差异。Patin 等^[13]研究指出,与休耕地相比,由于地表裸露及土壤入渗速率降低,导致坡耕地及柚木等土地利用下坡面径流量和侵蚀量均显著增加;同时作者还指出,不同时期、不同地表覆盖度下坡面对降雨的响应存在明显不同,受地表覆盖物、植被生长状况等因素综合影响,与本文研究结果相符。

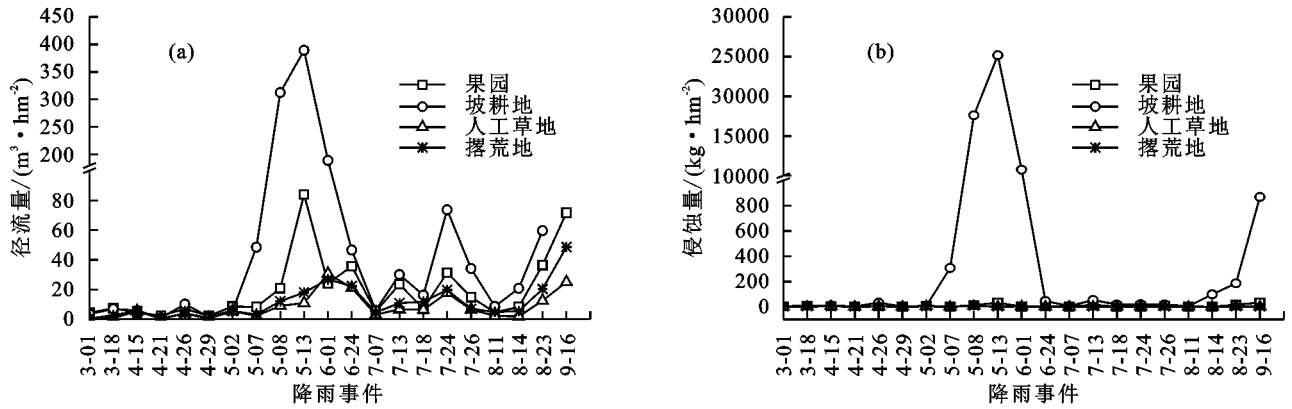


图2 次降雨条件下赤红壤坡面产流输沙特征

次降雨条件下,不同土地利用方式下侵蚀输沙均呈现波动变化趋势(图 2b)。坡耕地不同降雨条件下坡面侵蚀量明显高于其他土地利用类型。对坡耕地而言,6 月前为木薯的幼苗期,行间距较大^[25],使得木薯坡耕地植被覆盖度进一步降低,导致在 5—6 月高强度侵蚀性降雨中产生严重的水土流失;而后期虽然木薯植被覆盖度有所增加,但是由于其地表无植被覆盖,且木薯作为块根作物,其根系对土壤的抗蚀能力增加有限,使得坡面侵蚀量仍明显高于人工草地和撂荒地。果园坡面侵蚀量均高于撂荒地和人工草地,在年内呈明显的波动变化趋势。撂荒地和草地坡面侵蚀量在年内表现为 3—6 月波动变化,6—10 月侵蚀量显著降低,表明与坡耕地相比,果园、人工草地和撂荒地均可以有效降低坡面侵蚀量,且人工草地和撂荒地对坡面侵蚀量的降低效果更好。此外,本研究 5 月 13 日次降雨下果园坡面侵蚀量较大的主要原因是:在 5 月 10 日前后果园小区采取了人工除草,扰动了地表,导致地表覆盖度显著降低,在强降雨时产生了较大的侵蚀量。Vijith 等^[9]研究指出,虽然林地整体年侵蚀量较小,但是不适当的采伐及管理措施导致的裸露区域面积仅占研究区的 4%,但其侵蚀量却占研究区侵蚀总量的 28%。本文中果园的不定期除草等措施,导致地表覆盖状态发生改变,遇到较强降雨时,将加剧坡面侵蚀,因此,在农业管理中需合理安排农事活动,避免严重侵蚀事件的发生。

2.4 降雨等级对赤红壤坡面产流产沙的影响

土地利用方式对坡面侵蚀输沙存在显著影响,但是降雨等级和 I_{30} 等也对坡面侵蚀过程具有重要影响。21 场侵蚀性降雨中,除几场大降雨坡面侵蚀量较大,其余次降雨条件下主要随着次降雨量和 I_{30} 增加而增加(图 3 和表 3)。由图 3a 可知,不同土地利用方式下,各降雨等级对坡面年径流量的贡献率基本接近。坡耕地、果园、人工草地及撂荒地处理下,暴雨及大暴雨产生的径流量分别占全年总径流量的 87.9%, 79.4%, 76.7% 和 76.1%,其中,对坡耕地而言,5 月 8 日、5

月 13 日以及 6 月 1 日暴雨及大暴雨产生的径流量占全年径流量的 63.6%,表明不同土地利用方式下,暴雨及大暴雨降雨是赤红壤坡面径流的主要来源。

对比不同等级降雨下坡面径流系数(图 3b)可知,不同等级降雨的坡面径流系数与土地利用方式密切相关。小雨、中雨、大雨、暴雨及大暴雨下坡面径流系数呈现先增加后降低的趋势。该结果与郑江坤等^[2]的研究结果基本一致。不同降雨等级下,坡耕地坡面径流系数均明显高于其余处理,且不同降雨等级间差异较大;而果园、人工草地及撂荒地径流系数在不同降雨等级间差异相对较小,表明与坡耕地相比,果园、人工草地和撂荒地均能有效降低降雨产流率,且对暴雨及大暴雨的降低作用更为明显,其中人工草地和撂荒地等草被覆盖处理下对暴雨及大暴雨的拦截效果较好。草被覆盖下的坡面产流率较低的原因:一方面是由于植被有效降低地表结皮产生,增加表层土壤入渗速率^[26];另一方面,地表植被可以有效降低坡面径流速^[21],从而降低降雨的产流率。

与不同降雨等级下坡面径流量占比不同,不同土地利用方式下,各降雨等级产生的侵蚀量占比存在较大差异。坡耕地由暴雨和大暴雨产生的侵蚀量占年总侵蚀量的 99.1%(图 3c),其中仅 5 月 8 日(暴雨)、5 月 13 日(大暴雨)和 6 月 1 日(暴雨)3 场降雨产生的侵蚀量占坡耕地全年侵蚀量的 96.9%,表明坡耕地坡面侵蚀主要由暴雨及大暴雨引起。本文坡耕地年侵蚀量与 Dai 等^[6]对红壤坡耕地的研究结果相比,赤红壤坡耕地的年总侵蚀量与红壤坡耕地基本接近,红壤不同坡面处理下均是暴雨及以上类型降雨的坡面侵蚀量和径流量显著大于其他降雨等级。

果园、人工草地以及撂荒地年侵蚀量主要由大雨和暴雨导致,二者产生的侵蚀量分别占年侵蚀量的 82.2%, 84.3% 和 91.0%(图 3c)。小雨、中雨和大暴雨降雨下坡面侵蚀占年侵蚀量的比例基本接近。由 2.1 的分析可知,小雨、中雨和大暴雨的降雨量分别占年侵蚀性降雨的 9.0%, 13.2% 和 35.3%,但小雨和中雨

主要发生在 1—4 月,大暴雨主要发生在 5—6 月。受年初坡面统一除草及牧草生长的影响,1—4 月果园、人工草地及撂荒地坡面植被覆盖度相对较小,导致在 2018 年 1—4 月较小的降雨等级下仍有侵蚀的发生;6 月以后,作物生长进入旺盛期,植被覆盖度增加,坡面侵蚀量降低,即使在大暴雨下坡面侵蚀量也仅果园稍有增加,人工草地及撂荒地均无明显增加,表明作物生长周期对坡面侵蚀具有显著影响。对于类似广西地区,年降雨侵蚀力相对分散的区域,作物生长前期坡面土壤侵蚀的防治尤为重要。此外,研究结果还表明,大雨及其以上降雨是造成赤红壤坡面土壤侵蚀严重的主要降雨等级,但覆盖有草被的径流小区有效降低高强度降雨产生的侵蚀量,能够抵御更高强度的降雨。

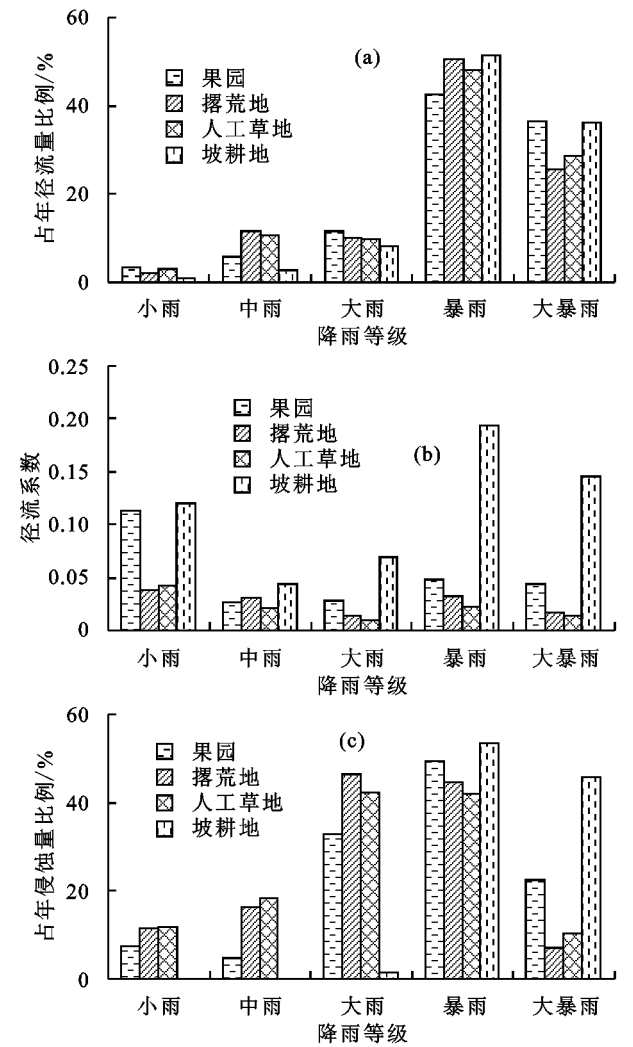


图 3 不同土地利用类型下各降雨等级坡面径流量和侵蚀泥沙量占比

2.5 不同土地利用方式下影响赤红壤坡面产流产沙的降雨特征参数

为进一步分析不同土地利用类型下影响坡面侵蚀产沙的因素,对不同土地利用类型下坡面水沙指标与降雨特征参数和植被覆盖度进行了相关分析(表 5)。结果表明,不同土地利用类型下,影响坡面水沙

的因素存在明显不同。对于坡耕地而言,坡面侵蚀量、径流量及含沙浓度与 I_{30} 均表现为极显著相关,与降雨量表现为显著相关,表明高强度、大降雨量是造成坡耕地土壤侵蚀的主要原因;降雨量和 I_{30} 显著影响果园坡面侵蚀量和径流量,而人工草地和撂荒地降雨量和 I_{30} 仅显著影响其坡面径流量,对坡面侵蚀量无显著影响。果园、人工草地及撂荒地降雨历时均显著影响其坡面径流量和含沙量。此外,不同土地利用类型下坡面水沙参数与次降雨平均降雨强度均无显著相关,故在表格中未列出。

表 5 不同土地利用类型下坡面水沙指标与降雨特征参数和植被覆盖度的相关分析

土地利用类型	水沙指标	降雨历时	降雨量	I_{30}	植被覆盖度
果园	侵蚀量	0.318	0.456 *	0.510 *	0.374
	径流量	0.565 *	0.771 *	0.721 **	0.479 *
	含沙量	-0.471 *	-0.407	-0.306	-0.051
	径流系数	-0.146	-0.220	-0.251	0.140
坡耕地	侵蚀量	-0.003	0.480 *	0.725 **	-0.227
	径流量	0.197	0.629 **	0.808 **	-0.088
	含沙量	0.068	0.478 *	0.714 **	-0.216
	径流系数	-0.069	0.177	0.348	-0.244
人工草地	侵蚀量	0.058	0.177	0.211	-0.280
	径流量	0.759 **	0.790 **	0.645 **	0.358
	含沙量	-0.498 *	-0.451 *	-0.382	-0.655 *
	径流系数	-0.126	-0.232	-0.266	-0.157
撂荒地	侵蚀量	-0.074	0.129	0.268	-0.050
	径流量	0.792 **	0.725 **	0.589 *	0.700 **
	含沙量	-0.580 **	-0.499 *	-0.369	-0.463 *
	径流系数	-0.068	-0.208	-0.232	-0.012

注: $n=21$; * 表示显著相关($p<0.05$); ** 表示极显著相关($p<0.01$)。

果园坡面水沙参数主要与降雨量、降雨历时和植被覆盖度呈显著相关。Pan 等^[27]研究指出,对于陕西枣园,在较大的降雨强度和降雨量条件下,降雨强度和降雨量显著影响果园土壤的入渗过程,与本文研究结果相符。对于人工草地和撂荒地,降雨量、降雨历时及 I_{30} 、植被覆盖度均与坡面侵蚀量无显著关系,降雨量主要影响坡面径流量,进而影响坡面水沙特征;植被覆盖度主要通过影响坡面径流含沙量,进而影响坡面侵蚀过程^[28]。由人工草地和撂荒地植被覆盖度与坡面径流量呈显著相关关系,与坡面含沙量呈显著负相关关系,表明该土地利用类型下,在增加径流量的同时,植被覆盖度的增加并未导致坡面侵蚀加剧。说明无论是自然植被还是人工草地均可以有效降低赤红壤坡面侵蚀量。Rodrigo-Comino 等^[26]研究认为,增加坡面植被覆盖度可以显著增加土壤入渗量,进而降低径流量,与本文的研究结果不

一致。可能的原因是本研究区雨季的降雨频次相对较密集,2018 年 4—9 月,研究区月降雨日数均在 8 天以上,其中 6,7,8 月降雨日数达到 14,22,15 天,坡面土壤在雨季长期处于较高的含水量(20%以上),当地表覆盖度较好时,后期降雨的径流量明显增加(图 2a)。Wang 等^[29]的研究也指出,连续相同降雨强度条件下,当降雨强度较高(>40 mm/h)时,除第 1 场降雨对坡面产流产生显著影响外,后期降雨对坡面径流量的影响均无明显差异,表明植被覆盖度对坡面径流的影响与研究区的降雨量、降雨频次和前期降雨等相关,不能偏离降雨特征去简单地判定植被覆盖对坡面产流的影响。从长期来看,土地利用方式的改变必将导致土壤性质发生改变^[30],从而影响坡面水蚀过程^[8],而本文并未对土壤理化进行分析,在以后的研究中应加强此方面的研究,从而更好地探讨土地利用方式对赤红壤坡面侵蚀的影响机制。

3 结论

(1)2018 年研究区侵蚀性降雨主要集中在 5—9 月。不同土地利用方式下,坡面年径流量为 174.5~1 401.6 m³/hm²,坡面年侵蚀产沙量为 32.1~55 221.5 kg/hm²,坡面产流产沙均呈现为坡耕地最大,果园次之;次降雨条件下,人工草地和撂荒地坡面减流减沙效果较好。

(2)坡耕地、果园、人工草地及撂荒地由暴雨及大暴雨产生的径流量均占全年总径流量的 75%以上;坡耕地由暴雨和大暴雨产生的侵蚀量占年总侵蚀量的 99.1%,果园、人工草地以及撂荒地由大雨和暴雨产生的侵蚀量占全年侵蚀量的 82.2%,84.3%和 91.0%。人工草地及撂荒地可以显著降低暴雨及大暴雨下的产流产沙。

(3)坡耕地和果园坡面侵蚀量、径流量与降雨量和 I_{30} 均表现为显著或极显著的相关关系;而人工草地和撂荒地降雨量和 I_{30} 仅显著影响坡面径流量。在降雨特征参数中,降雨量和 I_{30} 是影响坡面产流的关键因子,其对坡面产沙的影响主要与土地利用方式及地表覆盖度相关。

参考文献:

[1] Seeger M, Errea M P, Begueria S, et al. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees [J].*Journal of Hydrology*,2004,288(3):299-311.

[2] 郑江坤,杨帆,王文武,等.不同降雨等级下耕作措施对坡地产流产沙的影响[J].*中国水土保持科学*,2018,16(1):38-45.

[3] Wu X L, Wei Y J, Wang J G, et al. Effects of soil type

and rainfall intensity on sheet erosion processes and sediment characteristics along the climatic gradient in central-south China[J].*Science of The Total Environment*, 2018,621:54-66.

[4] 张兴刚,王春红,程甜甜,等.山东省药乡小流域侵蚀性降雨分布特征[J].*中国水土保持科学*,2017,15(1):128-133.

[5] Wang W T, Yin S Q, Xie Y, et al. Effects of four storm patterns on soil loss from five soils under natural rainfall[J].*Catena*,2016,141:56-65.

[6] Dai C T, Liu Y J, Wang T W, et al. Exploring optimal measures to reduce soil erosion and nutrient losses in southern China [J]. *Agricultural Water Management*, 2018,210:41-48.

[7] 焦菊英,王志杰,魏艳红,等.延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J].*农业工程学报*,2017,33(13):159-167.

[8] Wei O Y, Wu Y Y, Hao Z C, et al. Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development [J].*Science of The Total Environment*,2018,613/614:798-809.

[9] Vijith H, Hurmain A, Dodge-Wan D. Impacts of land use changes and land cover alteration on soil erosion rates and vulnerability of tropical mountain ranges in Borneo[J].*Remote Sensing Applications: Society and Environment*,2018,12:57-69.

[10] 张兴昌,邵明安,黄占斌,等.不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响[J].*生态学报*,2000,20(6):1038-1044.

[11] 涂安国,谢颂华,李英,等.长期野外监测红壤裸露坡地侵蚀性降雨分布及产沙分析[J].*农业工程学报*,2019,35(7):129-135.

[12] 彭宏佳,吴起鑫,任斐鹏,等.喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应[J].*农业环境科学学报*,2018,37(4):756-765.

[13] Patin J, Mouche E, Ribolzi O, et al. Effect of land use on interrill erosion in a montane catchment of Northern Laos: An analysis based on a pluri-annual runoff and soil loss database[J].*Journal of Hydrology*,2018,563:480-494.

[14] 张凤荣.土壤地理学[M].北京:中国农业出版社,2001:142.

[15] 张池,高云华,陈旭飞,等.不同土地利用方式对赤红壤理化性质的综合影响[J].*自然资源学报*,2013,28(12):2140-2149.

[16] 殷水清,薛筱婵,岳天雨,等.中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究[J].*农业工程学报*,2019,35(9):105-113.

[17] 沈利娜,王春林,何衍海,等.广西木棉麓小流域水土保持科技示范园规划[J].*广西科学院学报*,2010,26(2):202-205,212.

[18] 谢颂华,曾建玲,杨洁,等.南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应[J].*农业工程学报*,2010,26(9):81-86.

- (1):99-106.
- [11] Canellas L P, Silva S F, Olk D, et al. Foliar application of herbaspirillumseropedicae and humic acid increase maize yields[J].Journal of Food Agriculture and Environment,2015b,13(1):146-153.
- [12] 彭玲,刘晓霞,何流,等.不同黄腐酸用量对‘红将军’苹果产量、品质和¹⁵N—尿素去向的影响[J].应用生态学报,2018,29(5):1412-1420.
- [13] 刘增兵,赵秉强,林治安.熔融造粒腐植酸尿素的缓释性能研究[J].植物营养与肥料学报,2009,15(6):1444-1449.
- [14] 李泽丽,刘之广,张民,等.控释尿素配施黄腐酸对小麦产量及土壤养分供应的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):115-124.
- [15] 于占东,宋述尧.稻草配施生物菌剂对大棚连作土壤的改良作用[J].农业工程学报,2003,19(1):177-179.
- [16] 杨修一,耿计彪,张务帅,等.控释氮、钾肥不同用量对盆栽棉花产量及生理特性的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):80-84.
- [17] Kuang W, Gao X, Tenuta M, et al. Soil property and cotton productivity changes with nutrient input intensity in the Taklimakan desert of China[J].Arid Land Research and Management,2018,32(4):421-437.
- [18] 李伶俐,马宗斌,张东林,等.盛铃期补施钾肥对不同群体棉花光合特性和产量品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(5):662-666.
- [19] 马强,张民,李子双,等.铜基营养叶面肥提高棉花光合特性、产量及其防病效果[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):125-136.
- [20] 何孝英,朱春华,李进学,等.腐植酸叶面肥对柠檬叶挥发油的含量、化学成分组成及抗氧化活性的影响[J].腐植酸,2018(6):59.
- [21] 刘小金,徐大平,杨曾奖,等.脱落酸对檀香幼苗生长、光合及叶片抗氧化酶活性的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(3):57-62.
- [22] 郭文琦,陈兵林,刘瑞显,等.施氮量对花铃期短期渍水棉花叶片抗氧化酶活性和内源激素含量的影响[J].应用生态学报,2010,21(1):53-60.
- [23] 哈丽哈什·依巴提,张炎,李青军,等.施肥对棉花养分吸收、分配、利用和产量的影响[J].中国土壤与肥料,2018(2):61-66.
- [24] 陈竹君,刘春光,周建斌,等.不同水肥条件对小麦生长及养分吸收的影响[J].干旱地区农业研究,2001,19(3):30-35.
- [25] 沈其荣,徐国华.小麦和玉米叶面标记尿素态¹⁵N的吸收和运输[J].土壤学报,2001,38(1):67-74.
- [26] 杨兴洪,邹琦,赵世杰.遮荫和全光下生长的棉花光合作作用和叶绿素荧光特征[J].植物生态学报,2005,29(1):8-15.
- (上接第 107 页)
- [19] 王帅兵,宋娅丽,王克勤,等.不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J].农业工程学报,2018,34(13):160-169.
- [20] 周怡雯,戴翠婷,刘窑军,等.耕作措施及雨强对南方红壤坡耕地侵蚀的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):49-54.
- [21] Li C J, Pan C Z. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall[J].Journal of Hydrology,2018,558:90-103.
- [22] 彭浩,李忠武,刘春,等.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[J].水土保持学报,2019,33(2):60-67.
- [23] 张锐波,张丽萍,钱婧,等.雨强和植被覆盖度对坡地侵蚀产沙影响强度研究[J].自然灾害学报,2017,26(5):206-212.
- [24] 苏伟强,王小媚,任惠,等.广西杧果产业发展现状及对策探讨[J].热带农业工程,2018,42(5):38-40.
- [25] 王玉梅,刘子凡,黄洁,等.株行距配置对木薯生物量和产量性状的影响[J].南方农业学报,2014,45(8):1369-1374.
- [26] Rodrigo-Comino J, Taguas E, Seeger M, et al. Quantification of soil and water losses in an extensive olive orchard catchment in Southern Spain[J].Journal of Hydrology,2018,556:749-758.
- [27] Pan D L, Song Y Q, Dyck M, et al. Effect of plant cover type on soil water budget and tree photosynthesis in jujube orchards[J].Agricultural Water Management,2017,184:135-144.
- [28] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报,2017,33(15):119-125.
- [29] Wang Y F, You W, Fan J, et al. Effects of subsequent rainfall events with different intensities on runoff and erosion in a coarse soil[J].Catena,2018,170:100-107.
- [30] 秦伟,曹文洪,郭乾坤,等.植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J].生态学报,2017,37(14):4905-4912.