

三峡库区典型农业小流域次降雨产沙过程及其影响因素

崔 璨¹, 王小燕¹, 孙宁婷¹, 陈方鑫¹, 陈晓燕¹, 龙 翼²

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 为探究引起三峡库区农业小流域土壤侵蚀的主要次降雨因子, 通过天然降雨观测资料, 分析忠县石盘丘小流域 2019 年侵蚀性降雨年内分布特征和典型次降雨条件下 A 和 B 2 个集水区产沙过程的变化规律, 采用相关性分析方法, 揭示次降雨产沙的主要影响因素。结果表明: (1) 全年 119 场降雨资料中, 有 19 场为侵蚀性降雨。全年侵蚀性中雨共发生 10 次, 是侵蚀性降雨中最常见的降雨类型。暴雨及以上降雨是造成研究区产沙量最大的降雨类型。(2) 在典型中雨、大雨和暴雨产沙事件中, B 集水区产沙量分别是 A 集水区的 5.13, 1.66, 7.56 倍。对 3 场典型次降雨产沙过程进行分析发现, B 集水区产沙过程线随降雨历时的延长, 变化程度更剧烈。(3) 各 PI_n 因子与研究区产沙量的相关性系数大小排序为 $PI_{30} > PI_{10} > PI_{15} > PI_{60} > PI_5 > PI_{90} > PI$ 。对各类降雨因子与研究区的产沙量进行相关性分析, 系数大小排序为 $P > PI_n > I_n > I > T$ 。A、B 集水区产沙量与次降雨量 P 和 PI_{30} 均存在极显著正相关性。总之, 在三峡库区开展水土保持工作时, 要加强对暴雨及以上降雨造成农业小流域水土流失的监测与预警响应能力; P 和 PI_{30} 能较好地反映三峡库区天然次降雨对农业小流域侵蚀产沙的影响; 对天然降雨条件下的次降雨侵蚀力进行估算时, 可将 PI_{30} 作为主要参考因子; 农林水复合生态系统与结构简单的传统农耕模式相比, 具有更丰富多元的层次结构, 不仅能全面开发利用小流域的农业资源, 更有利于保持水土, 且其对降雨环境变化的适应性也更强。

关键词: 三峡库区; 农业小流域; 侵蚀性降雨; 产沙过程; 降雨量; 次降雨侵蚀力

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0017-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2021.01.003

Sediment Yield Process and Its Influencing Factors Under Sub-rainfall in Typical Agricultural Small Watershed, Three Gorges Reservoir Area

CUI Can¹, WANG Xiaoyan¹, SUN Ningting¹, CHEN Fangxin¹, CHEN Xiaoyan¹, LONG Yi²

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041)

Abstract: In order to explore the main sub-rainfall factors that cause soil erosion in the agricultural small watershed of the Three Gorges Reservoir area, the study selected the Shipanqiu small watershed located in the heart of the Three Gorges Reservoir area as the research area, and analyzed the distribution characteristics of erosive rainfall in 2019 and the variation law of sediment yield process in catchment A and catchment B under typical sub-rainfall, and the correlation analysis method was used to explore the main influencing factors of sediment erosion caused by sub-rainfall. The results showed that: (1) Of the 119 rainfall events for the whole year, 19 were erosive events, including 10 erosive moderate rainfall events. The erosive moderate rainfall was the most common type in erosive rainfall events. Rainstorm and above is the type that caused the largest amount of sediment in the study area. (2) In the typical moderate rain, heavy rain and rainstorm sediment yield events, the amount of sediment yield in catchment B was 5.13, 1.66 and 7.56 times that of catchment A respectively. The analysis of the sediment yield process of three typical sub-rains showed that the variation of sediment yield line in catchment B was more dramatic with the extension of rainfall duration. (3) The correlation coefficient of PI_n factors and the amount of sediment yield in the study area ranked as

收稿日期: 2020-06-01

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(XDJK2017B025); 重庆市基础科学与前沿技术研究专项(cstc2017jcyjAX0296); 重庆市技术创新与应用示范项目(社会民生类重点研发项目)(cstc2018jscx-mszd0340); 重庆市大学生创新训练项目(S201910635010)

第一作者: 崔璨(1997—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与生态环境研究。E-mail: 870476701@qq.com

通信作者: 王小燕(1983—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀机理与水土保持研究。E-mail: youblue@swu.edu.cn

$PI_{30} > PI_{10} > PI_{15} > PI_{60} > PI_5 > PI_{90} > PI$. Correlation analysis of various rainfall factors and the amount of sediment yield in the study area ranked as $P > PI_n > I_n > I > T$. There was a very significant positive correlation between the amount of sediment yield and the indicators P and PI_{30} in catchment A and B. To sum up, when carrying out soil and water conservation work in the three Gorges reservoir area, it is necessary to strengthen the ability of monitoring and early warning response to soil and water loss in agricultural small watershed caused by rainstorm and above. P and PI_{30} can reflect the impact of natural sub-rainfall on sediment yield in small watersheds of Three Gorges reservoir well. When estimating the rainfall erosivity of natural sub-rainfall, PI_{30} can be used as the main reference factor. Compared with the traditional farming mode with simple structure, agroforestry-water complex ecosystem has a richer and more diverse structure, which can not only fully develop and utilize agricultural resources in small watershed, but also be more conducive to soil and water conservation, and it is also more adaptable to the changes of rainfall environment.

Keywords: Three Gorges Reservoir area; agricultural small watershed; erosive rainfall; sediment yield process; rainfall amount; sub-rainfall erosivity

三峡库区是我国重要的水利工程战略要地,也是我国西南地区的生态涵养区,库区的土壤侵蚀问题一直受到国内外学者的关注。三峡库区的地形起伏大,每年雨季降雨相对集中,有雨量多、雨强大等特点。库区主要土壤类型紫色土富含矿质养分,肥力较高,是重要的耕作土壤资源^[1],但其土层浅薄、母岩疏松,抗蚀性弱,再加上不利的气候特点,使得库区土壤侵蚀问题十分严峻。农业小流域^[2]是库区在季节性暴雨中发生水土流失的主要区域^[1]。这些农业小流域在三峡库区分布广泛,它们共同的特点是面积小,地形复杂,经营管理方式和农作物种类十分相似。因此,研究典型农业小流域在次降雨条件下土壤侵蚀的产沙过程及其影响因素是探索小流域土壤侵蚀防治的关键。

降雨是导致土壤侵蚀发生的主要因素^[3],体现在降雨量^[4-5]、降雨强度^[6-7]、降雨历时^[8]和降雨侵蚀力^[9-10]等多种因子对坡面产沙的影响。由于天然降雨难以掌控,精确观测一场完整天然降雨并及时采样的难度也较大,因此国内外研究者主要通过人工模拟降雨试验^[11-12],从坡面径流泥沙迁移规律、坡面土壤侵蚀理论和细沟侵蚀发育规律等方面的研究中取得大量成果^[13],但想要通过人工设备模拟出与天然降雨完全相同的降雨环境是很难实现的,因此也有研究者以天然日降雨观测资料为基础,对降雨因子影响坡面^[14]或小流域^[15]产流产沙的作用进行研究,对于天然次降雨条件下小流域产沙过程的研究还较少。此外,由于降雨特征、地形地貌、土壤类型以及植被覆盖等因素存在差异,导致不同地区影响土壤侵蚀的主要降雨因子略有不同:在重庆紫色土丘陵坡地,研究者认为降雨量 P 是坡面产沙的主要影响因子^[11];在赣中红黏土区坡面径流场的研究^[16]表明,侵蚀量分别与降雨侵蚀力 R 、降雨动能 E 等因子相关性极显著;王改玲等^[17]对晋北黄土区某径流观测场的数据进行

研究发现,降雨量和 10 min 最大降雨强度的复合降雨因子 PI_{10} 对产沙量综合影响作用最强。针对紫色土区农业小流域相关研究成果尚待补充的问题,本文选取了位于三峡库区腹心的忠县石盘丘小流域为研究区,对其 2019 年侵蚀性降雨分布特征和典型次降雨条件下小流域产沙过程的变化规律进行分析,并将产沙量与次降雨因子进行相关性分析,进而探究次降雨侵蚀产沙的主要影响因素,以期为三峡库区农业小流域水土流失预测与防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

石盘丘小流域(108°10'E, 30°25'N)位于重庆市忠县石宝镇,属三峡库区中游,毗邻长江干流,是川东平行岭谷地貌单元。流域内海拔为 119~780 m,地势南部偏低北部偏高,属丘陵区;多年平均降水量为 1 100 mm,属湿润季风气候类型,每年 4—10 月为雨季,降水量约占全年降雨总量的 70%。石盘丘小流域的经营方式以农业为主,土壤类型主要为中性紫色土,根据国际制土壤质地分级标准判断,其天然林地、经济林和旱耕地中主要为砂质和粉砂质壤土,有透气性好、质地适中、肥力较高等特点,因此适宜耕作,但由于渗水速度快,韧性差,在农业耕作中易发生侵蚀。

小流域下设有 A 和 B 2 个集水区,面积分别为 31.59, 19.49 hm²,其中 A 集水区的土地经营方式呈“坡顶天然林地、坡中旱地、坡脚沟谷水田,镶嵌蓄水塘堰”的格局特点,坡顶林地草木茂盛,植物种类繁多,坡中旱地主要种植红薯、玉米、油菜、胡豆等三峡库区常见农作物,水田以稻田为主,为典型的农林水复合生态系统;而 B 集水区的土地利用方式仅为常规农业耕作,坡顶为大片柑桔经济林,坡中和坡下以旱耕地为主,作物类型与 A 集水区相似(图 1)。虽然 A、B 集

水区都以农业为主,但在具体的经营管理模式上却不同,传统农耕模式在以坡耕地为主要耕作地类的三峡库区易引发大量的水土流失和农业面源污染^[1],而契合“山水林田湖草”理念,且逐渐被推广的新农耕模式——农林水复合生态系统更有利于减少侵蚀,使面源污染得到有效控制^[18],因此将 A、B 集水区作为对比研究,有利于具体分析 2 种模式对相同降雨环境响应的区别。A、B 集水区各地类占比情况见表 1。

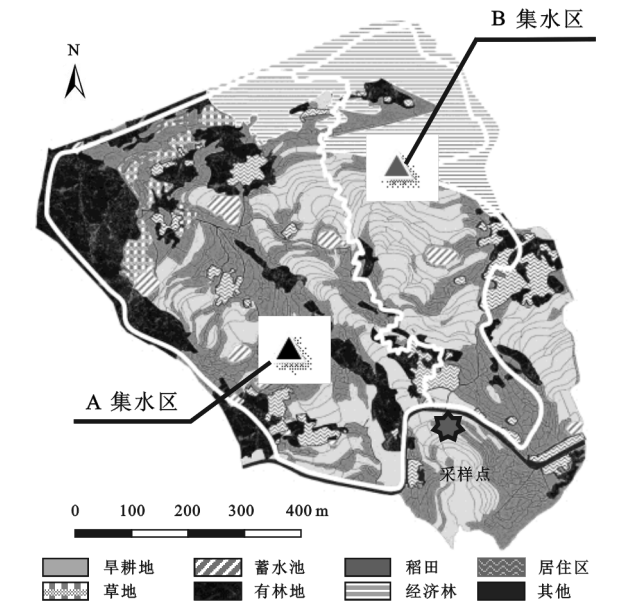


图 1 研究区土地经营方式

表 1 研究区土地利用情况

土地利用 类型	A 集水区		B 集水区	
	土地	面积	土地	面积
	面积/hm ²	占比/%	面积/hm ²	占比/%
旱耕地	9.47	29.98	6.35	32.58
稻田	7.98	25.26	7.39	37.92
有林地	8.19	25.93	1.35	6.93
经济林	2.02	6.39	2.13	10.93
草地	1.18	3.74	—	—
居住区	1.65	5.22	1.70	8.72
蓄水池	0.68	2.15	0.18	0.92
其他	0.42	1.33	0.39	2.00
合计	31.59	100.00	19.49	100.00

注：—表示无对应的土地利用类型。

石盘丘小流域内地形地貌、土地利用方式以及土壤类型在三峡库区腹地较为典型,具备小流域把口水文站、标准气象观测场等设施,可作为基本土壤侵蚀研究单元,对三峡库区小流域次降雨产沙过程及其影响因素进行研究分析。

1.2 样品采集与数据分析

降雨数据均来源于重庆忠县的中国科学院三峡库区水土保持与环境研究站石盘丘小流域,布设有翻斗式雨量计作为降雨观测仪器,可实时记录 2019 年 1—12 月试验小流域内每场降雨的降雨量、降雨历时等

数据。雨量较大时,观测时间间隔为 5~10 min;雨量较小时,观测时间间隔为 10~60 s;降雨过程量精确到 0.2 mm。在此基础上可计算出每场降雨的平均雨强、各时段最大雨强、雨量与时段雨强的复合参数等相关数据,供侵蚀性降雨年内分布特征、次降雨产沙过程描述以及降雨因子与土壤流失量的相关性分析使用。

每逢侵蚀性降雨即在 A、B 集水区出口断面处采集径流泥沙样,采样点三角堰上的流量计会每隔 5 min 测定流量,水位发生变化后即开始人工采样;从降雨开始,每隔 10 min 接 1 次样,雨量较大时加密采样,待降雨量变小后依次改为每 15, 30, 60 min 接 1 次样,直至降雨结束后,再采集 2~3 次,作为 1 场完整的降雨过程样。每次采样都用容积为 10 L 的标准塑料桶收集径流泥沙样,待泥沙沉淀后,将泥沙样转入 500 mL 塑料瓶,及时统一带回实验室,用烘干法测定样品的泥沙量,作为该场降雨的产沙量。

1.3 数据处理

本研究观测资料均来自天然降雨,将降雨时间间隔不超过 6 h,或连续 6 h 内降雨量>1.2 mm 的降雨视为 1 场降雨^[19]。降雨初期不会即刻产生径流,导致土壤侵蚀的发生,只有当降雨强度超过土壤入渗速率,产生地表径流来冲刷和搬运土壤时的降雨才是造成土壤侵蚀的主要贡献者^[20],此时的降雨即为侵蚀性降雨。2019 年共收集到石盘丘小流域 119 场降雨资料,19 场侵蚀性降雨的产流资料以及 A、B 集水区各 10 场侵蚀性降雨产沙资料;使用 Google Earth Pro、Arcgis 等软件绘制研究区土地经营方式图;使用 Excel 2019 进行数据处理及绘制相关图表;采用 SPSS 24.0 软件对 A、B 集水区产沙量与多个降雨因子进行相关性分析,相关性分析参数为 Pearson 相关系数。

2 结果与分析

2.1 侵蚀性降雨年内分布特征

2019 年长江流域降水量接近常年,三峡库区未发生极端的洪涝或干旱灾害,因此本研究所获得的降雨资料具有一定代表性。根据我国气象部门通常采用的降雨强度分级标准^[4],经统计,2019 年研究区共收集到的 119 场天然降雨中有小雨 82 场,中雨 28 场,大雨 7 场,暴雨及以上降雨 2 场。小雨和部分中雨通常不会造成土地生产力的破坏,因此需要根据一定标准,来区分侵蚀性降雨和普通降雨。本文选取次降雨量≥10 mm 的条件^[21],作为判定该场降雨是侵蚀性降雨的标准。

由表 2 可知,3,6,10 月均有 3 次侵蚀性降雨,但 6 月的累计侵蚀性雨量为 68.2 mm,远高于 3 月或 10 月的侵蚀性雨量。侵蚀性降雨量最多的月份为 8 月,累计侵蚀性雨量占全年侵蚀性降雨总量的 31.9%。

6,7,8 月的侵蚀性降雨次数之和占全年侵蚀性降雨总次数的 36.8%、侵蚀性雨量之和占全年侵蚀性降雨总量的 52.9%，均高于其他连续月份,可见侵蚀性降雨主要集中在夏季,而夏季地表土壤水分蒸发最严重,表土较为干燥,此时土壤的抗蚀性与抗冲性原本就弱^[22],再加上集中的侵蚀性降雨,更易发生土壤侵蚀。

由图 2 可知,虽然暴雨及以上降雨的发生次数最少,为全年侵蚀性降雨总次数的 10.5%,但作为侵蚀强度最大的降雨类型,其累计降雨量也达到 138.2 mm,占全年侵蚀性降雨总量的 31.9%,可见不能因为暴雨及以上降雨不常发生,而小觑其对农业小流域土地资源的极强破坏性。全年共有 10 场侵蚀性中雨,占全年侵蚀性降雨总次数的 52.6%,为侵蚀性降雨中最常见的降雨类型,累计降雨量 134.0 mm,占全年侵蚀性降雨总量的 31.0%。因此在三峡库区农业小流域开展水土流失防治工作时,不仅要重点关注暴

雨及以上降雨的侵蚀产沙作用,同时也不能忽视侵蚀性中雨的降雨过程对流域产流产沙的影响。

表 2 侵蚀性降雨逐月分布

月份	侵蚀性 降雨次数/ 次	占全年侵蚀性 降雨总次数的 比值/%	侵蚀性 降雨量/ mm	占全年侵蚀性 降雨总量的 比值/%
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	3	15.8	36.0	8.3
4	2	10.5	34.6	8.0
5	2	10.5	24.8	5.7
6	3	15.8	68.2	15.8
7	2	10.5	22.6	5.2
8	2	10.5	138.2	31.9
9	1	5.3	19.0	4.4
10	3	15.8	46.2	10.7
11	1	5.3	43.0	9.9
12	0	0	0	0
合计	19	100.0	432.6	100.0

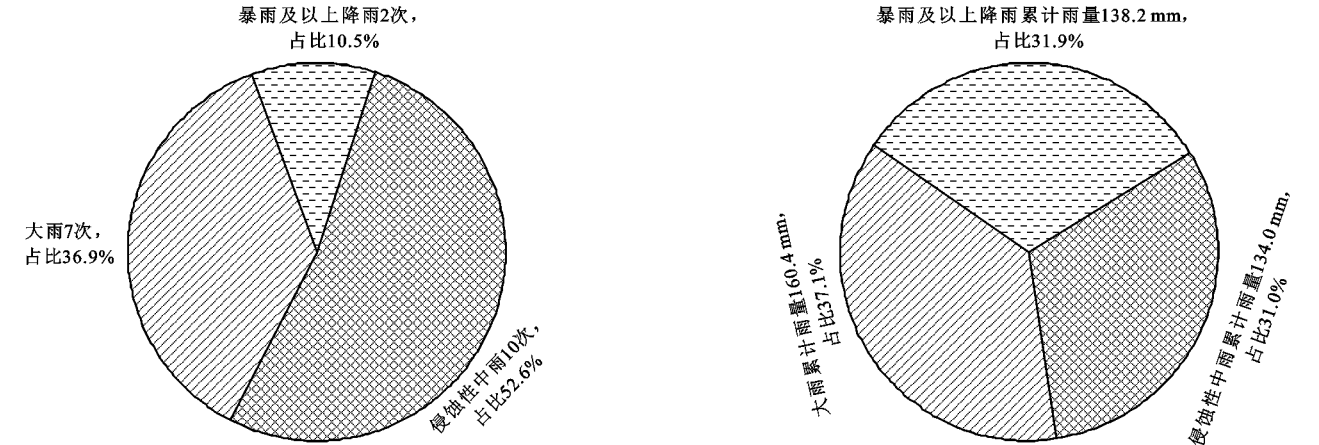


图 2 各雨强级别侵蚀性降雨分布

2.2 典型次降雨产沙过程

本研究共收集到 2019 年 A、B 集水区各 10 场侵蚀性降雨产沙资料及其对应的集水区出口断面径流资料。综合研究区 2019 年侵蚀性降雨分布特征:(1) 6,8 月为侵蚀性降雨集中的月份;(2) 侵蚀性降雨最

常见的降雨类型为中雨和大雨;(3)暴雨及以上降雨引起剧烈土壤侵蚀的潜力最大^[8];(4)小雨通常不会造成土地生产力的破坏^[21]等情况,从 10 场产沙数据中筛选出 3 场最具代表性的典型次降雨产沙过程进行分析,降雨事件详情见表 3。

表 3 典型次降雨的产流产沙总量

场次	降雨时间 (月-日)	降雨强度 分级	次降 雨量/mm	降雨 历时/min	径流量/m ³		泥沙量/kg	
					A	B	A	B
1	06-11	中雨	20.2	985	748.97	1523.90	33.61	172.56
2	06-05	大雨	29.2	255	54.78	147.13	13.52	22.38
3	08-06	暴雨	38.4	490	745.93	1491.69	78.96	597.02

2.2.1 典型中雨产沙过程 由图 3 可知,本场降雨属间歇型降雨^[23],第 1 个连续降雨时段并未有径流产生,雨水主要通过入渗进入地下。由于降雨强度较小,在第 2 个连续降雨时段中,降雨持续了 75 min 后土壤水分才渐渐饱和,B 集水区开始产流,30 min 后 A 集水区出口断面也出现了降雨导致的产流(除去小

流域日常产流)。A、B 集水区产沙过程线的变化趋势基本一致,产沙峰值分别为 2.28,0.46 kg,均出现在降雨开始后的 735 min,与雨量过程线有错峰现象,产沙峰值均相对于雨量峰值延后 20 min。由于 A、B 集水区面积分别为 31.59,19.49 hm²,且它们的土壤类型皆以紫色土为主,但在本场降雨中,B 集水区的水土

流失情况比 A 集水区严重,产流量为 $1\,523.9\text{ m}^3$,是 A 区产流量 748.97 m^3 的 2.03 倍;产沙量为 172.56 kg ,是 A 区产沙量 33.61 kg 的 5.13 倍。

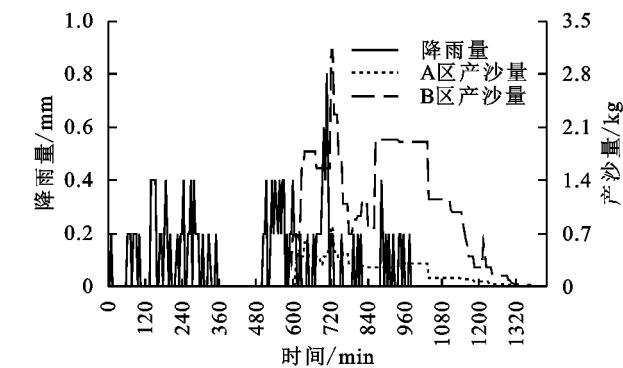


图 3 典型中雨产沙过程

2.2.2 典型大雨产沙过程 由图 4 可知,本场降雨也属间歇型降雨^[23],在第 2 个连续降雨时段开始 20 min 后,2 个集水区出口断面同时出现了降雨导致的产流产沙。A 区产沙峰值为 1.28 kg ,B 区产沙峰值为 1.32 kg ,几乎同时出现在降雨开始后的 210 min;它们的产沙过程线也与雨量过程线的变化趋势大致接近,但有 25 min 的滞后现象,可见雨量雨强与集水区产沙量关系密切。

B 区的产流量为 147.13 m^3 ,是 A 区 54.78 m^3 的 2.69 倍;B 区产沙量为 22.38 kg ,是 A 区 13.52 kg 的 1.66 倍。同为 6 月的降雨,虽然本场降雨总量为 29.2 mm ,大于上 1 场中雨的 20.2 mm ,但本场降雨条件下研究区整体的产流产沙总量却明显小于上 1 场中雨的产流产沙量,特别是 B 集水区,差距尤其明显,可见除雨量外,降雨历时对小流域产流产沙的影响^[8]也不能忽视,尽管雨量、雨强都不大,但历时较长同样会加剧小流域的水土流失。

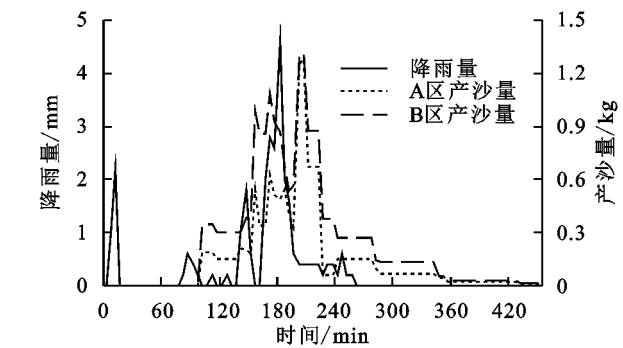


图 4 典型大雨产沙过程

2.2.3 典型暴雨产沙过程 不同于前 2 场降雨在降雨初期没有发生侵蚀,本场降雨在初期即迎来雨量峰值 13.8 mm ,由于降雨强度超过了土壤入渗速率,很快使 A、B 集水区开始了产流产沙。雨量过程线与 2 个集水区的产沙过程线均呈倒“V”形,有错峰现象:雨量峰值出现 60 min 后,A、B 集水区相继出现了产沙峰值,分别为 $5.82,76.17\text{ kg}$ (图 5)。

A、B 集水区的产沙峰值与产沙总量均差异显著。在降雨初期,B 集水区的产沙量明显高于 A 集水区,这与 B 集水区的土地经营方式过于单一有关。在强降雨条件下,由于 B 集水区仅有的成规模植被覆盖地类为经济林,林内树种单一,缺乏相应水土保持措施,使土壤理化性质恶化,极易发生水土流失^[24]。其余地类以旱耕地为主,长期耕作不仅破坏自然植被,还严重扰动土体,使其稳定性降低。表层土壤被大颗粒雨滴溅散后,与其他地面松散物质一起被迅速产生的地表径流冲刷搬运^[25],相比之下 B 区的土壤侵蚀更严重。由于 A 集水区是农林水复合生态系统,坡顶林地的林冠层可以实现对雨水的再分配作用^[26],与地面的枯枝落叶层一同减少雨滴对地表土壤的打击。同时,林地的枯落物层也增加了地面粗糙度,延长了土壤入渗时间,还可以形成低洼蓄水区,不至于从坡顶就形成漫流。此外,A 集水区中分散的蓄水堰塘对坡面径流泥沙同样起到就地拦蓄、保护农田的作用^[27]。

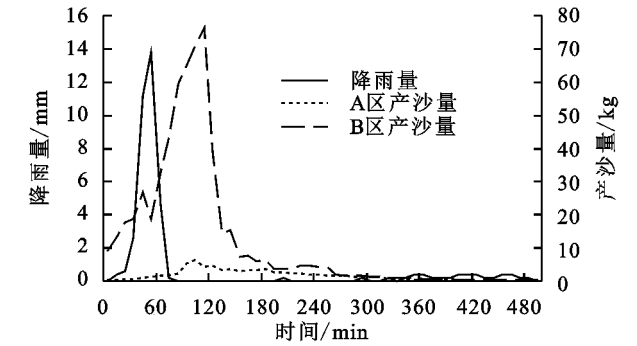


图 5 典型暴雨产沙过程

在表 3 中对比 2 个集水区在典型暴雨和典型中雨条件下各自产流产沙量的差异发现,虽然产流量非常接近,但 A 集水区在典型暴雨条件下的产沙量是在典型中雨条件下产沙量的 2.35 倍,B 集水区在典型暴雨条件下的产沙量是典型中雨条件下产沙量的 3.46 倍,即典型暴雨产流的平均输沙浓度大于典型中雨产流。对比图 3 和图 5 可知,典型暴雨的平均雨强和各时段最大雨强都显著高于典型中雨,且典型暴雨在降雨初期即发生产流产沙,土粒刚经过高强度雨滴溅散,被地表径流搬运,而典型中雨在降雨后期才开始产流产沙,并且产流前经过 2 h 没有降雨的空档期,地表土壤可能出现板结。因此,虽然产流量接近,但 2 个集水区在典型暴雨条件下的产沙量与输沙浓度较典型中雨更大。

此外,在典型中雨、大雨和暴雨产沙事件中,B 集水区产沙量分别是 A 集水区的 5.13、1.66、7.56 倍。对 3 场典型次降雨产沙过程进行分析发现,B 集水区产沙过程线随降雨历时的延长,变化程度更剧烈。可见 A 集水区的农林水复合生态系统比 B 集水区的传统农耕模式更有利于保持水土,其对降雨环境变化的

适应性也明显优于 B 集水区。

基于已有实测资料,采用产沙量估算模型^[28],对研究区 2019 年全年各类侵蚀性降雨的产沙总量进行估算。由表 4 可知,暴雨及以上降雨是对研究区发生剧烈土壤侵蚀贡献最大的降雨类型,在开展水土保持工作时要对其重点关注,此外也不能忽视侵蚀性中雨的降雨过程对三峡库区农业小流域产流产沙的影响。

表 4 研究区内各侵蚀性降雨产沙总量

集水区	产沙 指标	侵蚀性 中雨	大雨	暴雨及 以上降雨	合计
A	产沙量/kg	215.97	74.27	284.17	574.41
	占总产沙量的比值/%	37.6	12.9	49.5	100.0
B	产沙量/kg	1108.83	122.94	2148.65	3380.42
	占总产沙量的比值/%	32.8	3.6	63.6	100.0

2.3 次降雨产沙影响因素

通过上文对典型次降雨产沙过程的分析,可以初步得出影响石盘丘小流域 A、B 集水区侵蚀产沙的次降雨因子有次降雨量、次降雨历时、降雨强度和降雨侵蚀力等众多指标,本节通过对上述降雨因子与 A、B 集水区的次降雨产沙量进行相关性分析,进一步探明研究区天然次降雨对小流域产沙的主要影响因素。

降雨侵蚀力是表征降雨引发土壤侵蚀潜力大小的指标^[29-30]。由于天然降雨过程十分复杂,通过观测很难直接得知降雨侵蚀力,只能利用它与其他因子间的关系间接计算获得,这些因子即为降雨侵蚀力指标。在前人^[11,29,31]研究基础上,结合已有的次降雨资料,本文选择雨量与平均雨强的复合因子 PI ,以及雨量与各时段最大雨强的复合因子 PI_5 、 PI_{10} 、 PI_{15} 、 PI_{30} 、 PI_{60} 、 PI_{90} 作为研究对象,与产沙量进行相关性分析(表 5),进一步选出研究区在天然降雨条件下次降雨侵蚀力指标的最优组合参数。

将上述各降雨因子与石盘丘小流域 A、B 集水区的产沙量进行相关性分析,结果见表 5。由于试验农业小流域在天然降雨条件下的采样难度较大,获得完整的降雨产沙资料不多,因此需要在已有完整的产流产沙数据基础上,剔除历时较短或产流产沙量较小的降雨,以此来减小试验误差、提高数据有效性,在此过程中筛选出了涵盖小雨、中雨、大雨和暴雨 4 种雨强质量较高的典型产沙过程数据以供相关性分析。

由表 5 可知, PI_n 因子与石盘丘小流域 A、B 集水区产沙量的相关性系数大小排序为 $PI_{30} > PI_{10} > PI_{15} > PI_{60} > PI_5 > PI_{90} > PI$ 。A 集水区中, PI_{30} 、 PI_{15} 和 PI_{10} 与产沙量表现为极显著正相关;B 集水区中仅有 PI_{30} 与产沙量表现为极显著正相关。因此对三峡库区农业小流域在天然降雨条件下的次降雨侵蚀力进行估算时,可将 PI_{30} 作为主要参考因子,这与王万忠等^[31]对全国各地

降雨侵蚀力指标计算进行综合分析后得出的结论相符;与史东梅等^[11]提出在紫色土丘陵区可将 EI_5 或 PI_5 作为降雨侵蚀力 R 值的简易算法结论不同,原因可能是本文的降雨资料来自天然降雨,而史东梅等^[11]是通过人工模拟降雨试验得出结论。本文得出在众多 PI_n 因子中, PI_{30} 与产沙量的相关性最高,今后可以进一步研究通过 PI_{30} 来简易估算紫色土区天然降雨条件下的次降雨侵蚀力。

表 5 产沙量与次降雨因子相关系数

次降雨因子	产沙量	
	A 集水区	B 集水区
PI	0.752 *	0.721 *
PI_5	0.841 *	0.814 *
PI_{10}	0.913 * *	0.890 *
PI_{15}	0.910 * *	0.887 *
PI_{30}	0.937 * *	0.917 * *
PI_{60}	0.879 *	0.852 *
PI_{90}	0.829 *	0.778 *
P	0.965 * *	0.961 * *
T	0.433	0.477
I	0.575	0.543
I_5	0.717 *	0.685
I_{10}	0.843 *	0.815 *
I_{15}	0.838 *	0.810 *
I_{30}	0.889 *	0.863 *
I_{60}	0.813 *	0.782 *
I_{90}	0.690	0.658

注:相关分析参数为 Pearson 相关系数,数据样本数 $N=4$; P 为次降雨量; T 为降雨历时; I 为平均降雨强度; I_n 为时段最大降雨强度; PI_n 为降雨侵蚀力指标; *、*、* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平(双侧)上显著相关。

将各类降雨因子与石盘丘小流域 A、B 集水区的产沙量进行相关性分析,相关性系数大小排序为 $P > PI_n > I_n > I > T$ 。A、B 集水区产沙量与次降雨量 P 均存在极显著正相关性。降雨侵蚀力指标 PI_{30} 与产沙量的相关程度仅次于降雨量 P ,且复合因子 PI_n 与产沙量相关性系数均高于对应的 I_n ,表明降雨量与降雨侵蚀力对描述石盘丘小流域天然次降雨产沙过程有重要作用,且相比于其他因子, P 和 PI_{30} 能更好地反映三峡库区天然次降雨对小流域侵蚀产沙的影响。

3 结论

(1) 忠县石盘丘小流域 2019 年共有 10 场侵蚀性中雨,占侵蚀性降雨总场次的 52.6%,为侵蚀性降雨中最常见的类型。暴雨及以上降雨造成的 A、B 集水区产沙量分别占其各自全年侵蚀性降雨总产沙量的 49.5% 和 63.6%,是对研究区土壤侵蚀贡献最大的降雨类型,在三峡库区开展水土保持工作时,要加强对其造成农业小流域水土流失的监测与预警响应能力。

此外也不能忽视侵蚀性中雨的降雨过程对三峡库区农业小流域产流产沙的影响。

(2)在众多降雨因子中, P 和 PI_{30} 与产沙量的相关性最高,均表现为极显著正相关,因此能更好地反映三峡库区天然次降雨对小流域侵蚀产沙的影响。降雨量与降雨侵蚀力对描述石盘丘小流域天然次降雨产沙过程有重要作用。对三峡库区农业小流域在天然降雨条件下的次降雨侵蚀力进行估算时,可将 PI_{30} 作为主要参考因子。

(3)在典型中雨、大雨和暴雨产沙事件中,B 集水区产沙量分别是 A 集水区的 5.13,1.66,7.56 倍。对 3 场典型次降雨产沙过程进行分析发现,B 集水区产沙过程线随降雨历时的延长,变化程度更剧烈。可见农林水复合生态系统与结构简单的传统农耕模式相比,具有更丰富多元的层次结构,不仅能全面开发利用小流域的农业资源,更有利于保持水土,且其对降雨环境变化的适应性也更强。

参考文献:

[1] 曹瑞霞,刘京,邓开开,等.三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征[J].环境科学,2019,40(12):5330-5339.

[2] 王宏,徐娅玲,张奇,等.沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征[J].环境科学,2020,41(10):4547-4554.

[3] 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.

[4] 李桂芳,杨任翔,谢福倩,等.不同土地利用方式下赤红壤坡面土壤侵蚀特征[J].水土保持学报,2020,34(2):101-107,230.

[5] 许海超,李子君,林锦阔,等.燕山土石山区降雨和下垫面条件对坡面侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2016,34(1):46-53.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Bellocchi G, Diodato N. Rainfall erosivity in soil erosion processes [J].Water,2020,12(3):e722.

[10] 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.

[11] 史东梅,卢喜平,蒋光毅.紫色丘陵区降雨侵蚀力简易

算法的模拟[J].农业工程学报,2010,26(2):116-122.

[12] Kinnell P I A. The influence of time and other factors on soil loss produced by rain-impacted flow under artificial rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2020, 587: e125004.

[13] 张晶玲,周丽丽,马仁明,等.天然降雨条件下横垄与顺垄坡面产流产沙过程[J].水土保持学报,2017,31(5):114-119.

[14] 马鹏.降雨因素对坡面产流产沙影响的研究[D].重庆:西南大学,2013.

[15] 付友行,廖晓勇.三峡库区紫色小流域侵蚀性降雨特征[J].西南农业学报,2019,32(1):184-188.

[16] 魏静,马洪超.降雨对红黏土区土壤侵蚀的影响[J].西部大开发,2019,4(7):52-55,60.

[17] 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.

[18] 王军,钟莉娜.生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用[J].生态学报,2019,39(23):8702-8708.

[19] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.

[20] Nouhou-Bako A, Darboux F, James F, et al. Rainfall erosivity in interrill areas: Insights about the choice of an erosive factor [J].Catena,2019,180:24-31.

[21] 史东梅,江东,卢喜平,等.重庆涪陵区降雨侵蚀力时间分布特征[J].农业工程学报,2008,24(9):16-21.

[22] 周文洁,魏天兴,刘广全,等.陕北典型退耕地沙棘群落与土壤因子的耦合关系[J].中国水土保持科学,2020,18(2):1-9.

[23] 李毅,邵明安.间歇降雨和多场次降雨条件下黄土坡面土壤水分入渗特性[J].应用生态学报,2008,19(7):1511-1516.

[24] 马好.迁西县经济林坡地水土流失治理技术及效果[J].河北林业科技,2019(4):12-16.

[25] 杨帆,张洪江,程金花,等.基于模拟降雨的北京褐土坡地土壤团粒流失特征试验[J].农业机械学报,2016,47(8):137-145,215.

[26] 宗桦.森林乔木冠层雨水再分配特征及机制研究综述[J].世界林业研究,2019,32(1):28-35.

[27] 张利超,谢颂华,喻荣岗,等.小流域治理中蓄水池工程设计探讨[J].人民长江,2019,50(1):148-152.

[28] 孟志华,孟阵.黄河内蒙古段十大孔兑产沙量估算模型分析[J].水电能源科学,2015,33(10):76-78.

[29] Wischmeier W H. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation [J].Soil Science Society of America Journal,1959,23(3):246-249.

[30] Serio M A, Carollo F G, Ferro V. Raindrop size distribution and terminal velocity for rainfall erosivity studies: A review [J].Journal of Hydrology,2019,576:210-228.

[31] 王万忠,焦菊英,赫小品,等.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布(Ⅰ)[J].水土保持学报,1995,9(4):5-18.