

大别山南麓裸地小区径流泥沙过程对降雨特征的响应

钟祎珣¹, 张晓明¹, 高超², 王谦¹, 欧阳曙光³, 陈炳全³

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 湖北省水土保持监测中心,
武汉 430019; 3. 湖北省黄冈市水土保持与农田水利科研所, 湖北 黄冈 438600)

摘要: 作为水土流失重点预防保护区, 大别山南麓裸地坡面水土流失严重, 为探究该区典型裸地坡面径流泥沙对降雨的响应, 利用自动化径流泥沙监测设备对裸地径流小区的降雨—径流—泥沙过程进行监测。以 2020 年全年侵蚀性降雨数据为基础, 依据降雨峰值时序划分雨型, 分析了 4 种雨型的累计产流产沙特征和次降雨的径流泥沙特征, 并建立了累计产流产沙的最优函数模型。结果表明: (1) 大别山南麓降雨事件的 I_{30} 是影响降雨事件的泥沙量和径流系数的重要因素; 前期集中型和中期集中型降雨事件的泥沙量与前 48 h 内的降雨量呈显著正相关。(2) 不同雨型下产流产沙过程有显著差异, 但径流泥沙指标的差异不显著。不同雨型下累计产流产沙的最优模型为 Logistic 模型。(3) 不同雨型下, 雨强、产流率和产沙率的变化趋势和峰值出现规律存在一致性, 也存在产沙产流过程滞后于雨强变化过程的现象, 产沙滞后多出现在前期集中型降雨, 产流滞后多出现在中期集中型和后期集中型降雨。研究结果揭示了降雨—产流—产沙相互关系, 对该区域坡面水土流失防治具有一定的科学指导意义。

关键词: 次降雨; 雨型; 径流泥沙过程; 自动化监测; 裸地径流小区

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)04-0132-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.018

Response of Runoff and Sediment Process to Rainfall Characteristics in Bare Land Plots in Southern Foot of Dabie Mountain

ZHONG Yixun¹, ZHANG Xiaoming¹, GAO Chao²,

WANG Qian¹, OUYANG Shuguang³, CHEN Bingquan³

(1. School of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070; 2. Hubei Soil and Water Conservation Monitoring Center, Wuhan 430019; 3. Institute of Soil and Water Conservation and Water Conservancy, Huanggang, Hubei 438600)

Abstract: As a key soil erosion prevention reserve, the bare slope of the southern foothills of Dabie Mountain has serious soil erosion. In order to explore the response of runoff and sediment to rainfall on typical bare land slopes, the rainfall-runoff-sediment process of bare land runoff plots was monitored by automatic runoff and sediment monitoring equipment. Based on the annual erosive rainfall data in 2020, the rainfall patterns were divided according to the rainfall peak time series. The characteristics of cumulative runoff and sediment yield of the four rainfall patterns and the runoff and sediment characteristics of individual rainfall were analyzed, and the optimal function model was established. The results showed that: (1) The maximum 30 min rainfall intensity was an important factor affecting the sediment volume and runoff coefficient of rainfall events in the southern foot of Dabie Mountains. There was a positive correlation between the rainfall and sediment load in the first 48 hours of initial and middle concentrated rainfall events. (2) There were significant differences in the process of runoff and sediment yield under different rainfall patterns, but the difference of runoff and sediment indexes was not significant. The optimal model of cumulative runoff and sediment yield under different rainfall patterns was Logistic model. (3) Under different rainfall patterns, the variation trend and peak value occurrence rule of rainfall intensity, runoff rate and sediment yield rate were

收稿日期: 2023-01-30

资助项目: 生产建设项目中水文数据筛选新技术(20212614C03); 国家自然科学基金项目(41771307, 41201271); 长江科学院开放研究基金项目(CKWV2017522/KY); 华中农业大学“湖北省大学生创新创业训练计划”项目(S202110504059)

第一作者: 钟祎珣(1998—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀机制研究。E-mail: zhongyixun@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 张晓明(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事崩岗及土壤侵蚀研究。E-mail: zxm_huanong@webmail.hzau.edu.cn

consistent, and the process of sediment yield lagged behind the process of rainfall intensity. The lag of sediment yield mostly occurred in the early stage of concentrated rainfall, and the lag of runoff mostly occurred in the middle and late stage of concentrated rainfall. The results can reveal the relationship between rainfall-runoff-sediment yield, which has certain scientific guiding significance for the prevention and control of soil and water loss on the slope in this area.

Keywords: individual rainfall; rain pattern; runoff-sediment process; automatic monitoring; bare land runoff plot

大别山区是我国水土流失较为严重的区域之一,水土流失对当地生态、社会、经济效益造成威胁。降雨是地表径流的重要来源,土壤侵蚀的主要动力,近年来,关于天然降雨条件下坡面产流产沙过程研究已经取得不少成果,降雨特性与坡面土壤侵蚀量的相关研究从定性步入量化阶段。张晶玲等^[1]研究连续型降雨与间歇型降雨条件下横垄和顺垄玉米径流形成和泥沙迁移规律显示,连续型降雨过程呈“W”或“V”形,产沙形态呈“W”或“M”形;王子豪^[2]对刈割后的退耕坡面研究发现,不同刈割强度坡面的径流率与侵蚀速率随历时均呈幂函数增长,累积产流量、累积产沙量与降雨历时之间幂函数关系显著,降雨强度对坡面产流量的贡献率分别为43.50%;闫胜军等^[3]拟合黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型下的不同时段雨强(I_{30} 、 I_{20} 、 I_{10})与产流量的EXP函数显示, I_{30} 的拟合效果最佳,与平均雨强呈3次函数关系;李赛^[4]对鲁中山地不同雨型天然次降雨的径流泥沙过程进行了描述,建立了产流率—产沙率和雨强—产流率的线性回归模型。综上可知,研究降雨产流产沙的分析方法主要为建立指标间的函数关系。研究区域集中在黄土高原区、南方红壤区、东北黑土区、紫色土丘陵地区、鲁中山地地区和喀斯特地区,而湖北大别山区的研究成果较少。

在研究次降雨对径流泥沙的影响时首先对雨型进行分类,分类的方式有:(1)12 h/24 h降雨分级标准,如小雨、中雨、大雨、暴雨等;(2)以降雨特征指标聚类,常用的聚类指标有降雨量、降雨历时、最大30 min雨强等;(3)以降雨事件的降雨过程特征划分,如降雨强度峰值的时序、个数等^[5]。方式(1)是研究中最常见的分类方法^[4,6],研究已得出了普遍的结论。方式(2)是近10年来研究侵蚀性降雨产流产沙过程的重要方法^[7],与方式(1)相比,除了降雨量,更多径流泥沙的主要影响因子被用于分类,得到的分类结果更具有科学性。方式(3)多用于人工降雨试验,研究相同土壤侵蚀力下不同雨强峰值及其历时对产流产沙过程的影响,已有研究^[8-10]表明,降雨模式对径流和土壤侵蚀有显著的影响。而天然次降雨研究过程中鲜少以此种方式分类,因为天然降雨过程中,雨强

随降雨的历时存在变异性,而且降雨、水沙变化的过程数据获取不易。

目前径流小区泥沙收集方法多为人工搅拌集流池取样,而可用的自动测量仪器少,全自动监测的设备难以准确统计每次降雨径流、泥沙的过程数据^[11]。综上所述,受制于传统方法,天然次降雨产流、产沙过程规律的研究不充分。针对大别山区天然降雨径流产沙过程特征的研究成果较少的问题,本文选取湖北省罗田县的典型裸地坡面径流小区为研究对象,利用HL-3型自动化监测设备监测裸地径流小区的水土流失过程数据,探究天然次降雨的径流与侵蚀泥沙对降雨过程的响应,建立降雨—产流—产沙关系函数,揭示降雨径流与侵蚀输沙的规律。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

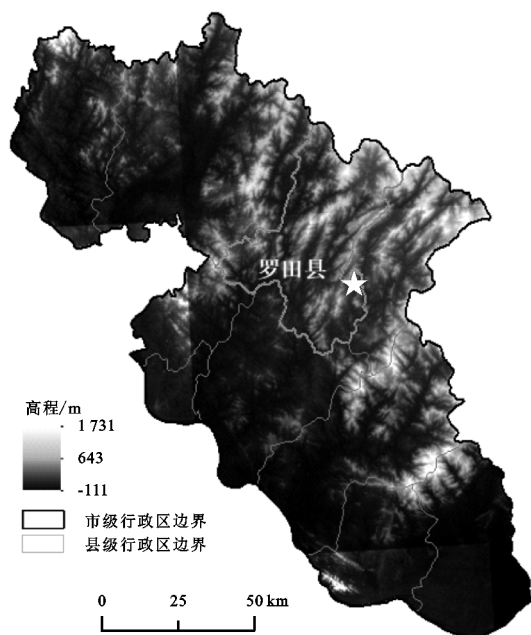
研究区位于湖北省罗田县石桥铺综合观测站,具体位置为115°35′23″N,30°46′03″E(图1)。该站位于罗田县匡河镇石桥铺,地处湖北省大别山南麓,水土保持三级分区为桐柏大别山山地丘陵水源涵养保土区,属北亚热带季风气候,冬干夏湿,春暖秋凉。全县多年平均降水量1330 mm,降雨(≥ 0.1 mm)时间在115~147天,降雨主要集中在6—9月,土壤类型以黄棕壤、棕壤为主。

本文选取石桥铺综合观测站裸地径流小区为研究对象,原因概括为3点:(1)相较于其他土地利用方式,裸地缺少地表植被,拦蓄坡面径流和泥沙的能力最弱,水土流失明显加剧^[12];(2)不同地表覆盖情况、不同雨量大小下的产流产沙差异较大^[13],裸地小区下的降雨—径流—产沙的规律更明显、具普遍性,因此裸地径流小区通常是对照组,本文的结论可为后续不同下垫面的土壤侵蚀研究提供参考;(3)罗田是一个“八山一水一分田”的山区,大别山区内山高坡陡、岩石破碎,土壤垂直节理发育,存在着地表植被覆盖较少,甚至裸露的情况,可近似看成裸地。裸地小区的坡度为15°,长20 m,宽5 m,土壤类型为黄棕壤,在水热充足的季节有杂草生长。

1.2 监测设备

HL-3型径流泥沙自动监测系统由长春合利水土

保持科技有限公司生产。该系统由降雨自动识别系统(翻斗式雨量计)、径流泥沙收集装置(集流桶)、数据采集控制系统和数据分析处理系统组成,能实现自动识别降雨、自动记录降雨产流产沙过程,并将数据通过 GPRS 发往云服务器。测量原理为全量收集并称重。邹玉梦^[14]研究流量和含沙量对该自动监测系统测量精度的影响发现,在不同流量水平下,90%的径流测量相对误差在±5%内,泥沙测量误差范围在±25%内,在不同含沙量下,径流测量相对误差在±5%内,泥沙相对误差在±15%内。径流、泥沙误差在可接受的范围内,故认为本文的数据是可信的。



注:图为黄冈市的 DEM 影像,五角星的位置为黄冈罗田县石桥铺综合观测站。

图 1 研究区概况

1.3 数据获取与研究方法

从湖北省水土保持监测系统网站(<http://slt.hubei.gov.cn/sbjc/a/login>)上获取黄冈罗田县石桥铺综合观测站 2020 年全年的次降雨产流产沙过程数据:包括从降雨起始时间至结束时间全过程中每隔 5 min 记录 1 次的累计产流、累计产沙量、累计降雨量、时段雨强和土壤湿度。通过原始数据计算产流率、产沙率、平均降雨强度、最大 30 min 雨强(I_{30})、最大 10 min 雨强(I_{10})、径流系数和侵蚀性降雨事件前 48 h 内的降雨量。

以殷水清等^[15]的雨型分型为依据对石桥铺站点 2020 年的降雨事件进行分型,将累计降雨特征数据做归一化处理,作量纲为一的累计降雨历时和累计降雨量的平滑曲线散点图,根据曲线的形态和 1:1 线的交点位置判断该次降雨的雨型为前期集中型、中期集中型、后期集中型或均匀分布型。通过相关性分析,分析不同雨型降雨与径流、泥沙指标间的相关关系。通过曲线拟合,概括不同雨型累计产流和累计产

沙的变化规律,通过 R^2 和赤池信息准则选出最优拟合模型。相关研究^[5]中,累计水沙与降雨历时的关系拟合较少,降雨量与径流量、泥沙量的关系拟合较多,多拟合为线性函数或幂函数关系模型。累计产流和累计产沙的关系采取 Logistic 方程、Boltzmann 方程、ExpDec1 方程、ExpGrow1 方程、Allometric1 方程、Exp2p 方程和 Linear 方程进行拟合描述。选取单次典型降雨事件,详细分析降雨—产流—产沙过程变化特征,同时证明对雨型数据概括分析的合理性。

赤池信息准则(AIC)被广泛应用于估算模型拟合数据的优良性中,当有多个模型符合曲线变化规律时,AIC 值越小,模型拟合越优,AIC 值最小的模型是同一组可供选择的模型中可取的最佳模型。其标准表现形式为:

$$AIC = 2k - 2\ln L$$

式中: k 为变量的具体数量(1, 2, 3, ..., n); L 为极大似然函数。

使用 Excel 2020 软件处理数据,计算降雨、径流、泥沙指标;采用 SPSS 20 软件进行统计学分析;利用 Origin 2022b 软件绘图。

1.4 次降雨事件的筛选

自然界的降雨过程复杂,一般情况下,降雨间隔时间在 6 h 以上可视为 2 次降雨事件^[15],为了尽可能反映径流泥沙对降雨的响应,本文选取典型次降雨事件时尽可能避免前期连续降雨和次降雨历时过长。但该地区全年降雨频繁,难以完全避免前期降雨的影响。最终选取 2020 年典型前期集中型降雨 2 场(8 月 10 日和 11 月 18 日)、中期集中型 2 场(8 月 18 日和 9 月 10 日)、后期集中型 1 场(7 月 30 日)、均匀分布型 1 场(11 月 24 日)。次降雨的降雨特征及径流小区的产流产沙情况见表 1。

2 结果与分析

2.1 全年次降雨的降雨特征

2020 年有记录的降雨事件有 158 场,其中造成土壤流失的侵蚀性降雨有 28 场,各种雨型分布的频次与殷水清等^[15]研究中长江Ⅱ区降雨分型占比的结果一致。侵蚀性降雨集中在 6—8 月,其侵蚀量占全年的 84.01%。其中<10 mm 的降雨事件 8 次,10~25 mm 的 4 次,25~50 mm 的 8 次,50~100 mm 的 6 次。其中低于 25 mm 降雨量的 12 次降雨产生的土壤侵蚀量占全年的 14.6%,而 50~100 mm 降雨量的 6 次降雨事件导致全年 48.1%的土壤侵蚀量。引起侵蚀的最小降雨量为 2.6 mm,显著低于研究中普遍认为的侵蚀性降雨量标准(一般为 12 mm^[16]),该场降雨的平均雨强为 5.571 mm/h;引起侵蚀的最小径流量为 2 L,该场降雨的平均雨强为 11.143 mm/h。虽然降雨量、径流量小,但降

雨历时短,雨强大,也可能产沙。由此可知,降雨频繁月量和径流量的相对大小不能决定产沙与否,当雨强够份的大雨量降雨事件是全年土壤侵蚀的主要来源;降雨大,则可能产生侵蚀。

表 1 次降雨径流泥沙情况汇总表

降雨量/ mm	降雨 历时/min	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	径流 总量/L	泥沙 总量/kg	径流系数/ (L·mm ⁻¹)	雨前土壤 湿度/%	雨后土壤 湿度/%	前 48 h 内 降雨量/L	<i>I</i> ₃₀ / (mm·h ⁻¹)	<i>I</i> ₁₀ / (mm·h ⁻¹)	观测日期 (年-月-日)	降雨过程 分型
9.8	166	3.542	8	0.472	0.008	20.1	23.7	0.2	10.0	24.0	2020-02-06	中期
9.2	1227	0.450	18	0.508	0.019	21.4	23.4	1.0	7.2	13.2	2020-02-15	—
2.6	28	5.571	214	2.442	0.795	33.3	33.4	0	5.2	4.8	2020-04-23	前期
46.4	1086	2.564	695	0.919	0.145	34.1	36.8	2.4	28.4	60.0	2020-06-12	前期
37.8	923	2.457	694	0.022	0.177	34.1	36.8	48.2	25.6	70.8	2020-06-13	前期
106.8	1783	3.594	4576	18.014	0.414	32.7	41.9	15.6	25.6	33.6	2020-06-21	前期
64.8	1045	3.721	2113	12.997	0.315	36.9	39.0	106.8	34.4	40.8	2020-06-22	中期
92.0	2929	1.885	607	0.570	0.064	31.4	38.3	0	22.0	25.2	2020-06-27	均匀
45.8	1267	2.169	508	1.514	0.107	32.3	37.3	0	21.6	30.0	2020-07-02	前期
299.4	3720	4.829	16349	8.337	0.527	35.1	40.5	45.8	43.6	100.8	2020-07-04	后期
29.2	315	5.562	828	7.732	0.274	33.5	38.5	11.8	41.6	60.0	2020-07-26	中期
41.0	320	7.688	1661	3.132	0.391	37.1	37.6	29.2	31.6	36.0	2020-07-27	前期
25.0	353	4.249	400	4.008	0.155	35.2	38.5	5.2	19.6	38.4	2020-07-29	中期
33.0	151	13.113	586	21.099	0.172	36.8	42.2	30.2	19.6	26.4	2020-07-30	后期
73.0	1017	4.307	1552	29.171	0.205	23.6	39.4	0	43.6	81.6	2020-08-08	后期
61.6	274	13.489	2734	36.974	0.429	36.2	39.9	73.0	70.4	79.2	2020-08-10	前期
11.6	169	4.118	6	3.561	0.005	33.2	37.1	0.2	12.0	20.4	2020-08-12	中期
5.2	28	11.143	2	2.341	0.004	27.9	27.8	0	7.6	14.4	2020-08-17	前期
6.2	23	16.174	7	3.631	0.011	27.1	27.2	5.2	11.6	30.0	2020-08-18	中期
18.2	323	3.381	26	2.464	0.014	26.9	35.4	0.2	24.8	31.2	2020-08-20	前期
4.8	281	1.025	4	0.710	0.008	34.1	33.7	18.2	2.8	4.8	2020-08-21	—
19.8	97	12.247	44	2.779	0.021	30.4	37.3	0	32.0	72.0	2020-08-25	前期
54.8	970	3.390	67	2.612	0.012	19.2	34.6	0	11.6	14.4	2020-09-10	中期
53.6	1812	1.775	158	9.488	0.028	34.0	35.4	36.0	10.8	13.2	2020-09-16	前期
32.0	364	5.275	106	5.230	0.032	28.2	34.4	1.0	22.0	55.2	2020-11-18	前期
6.6	430	0.921	8	3.201	0.012	32.1	34.4	1.2	1.6	3.6	2020-11-24	均匀
21.8	701	1.866	57	4.894	0.025	33.1	34.4	7.8	5.6	6.0	2020-11-25	前期
9.6	1073	0.537	4	2.143	0.004	26.4	26.8	0	1.6	3.6	2020-12-29	后期

注:降雨过程分型一栏中出现—表示降雨累计曲线特征不明确,无法分类到任何一种雨型中;下划线字体标记的降雨事件是不同雨型中选出的典型次降雨事件。

2.2 裸地产沙对雨型的响应

不同雨型的降雨产流产沙特征见表 2。同种雨型次降雨的降雨量的标准差大、数值分散,其他指标的数据均是如此。对数据进行单因素方差分析结果

显示,除了后期集中型的降雨量和径流总量与前期、中期相比有显著性差异外,其他降雨、径流、泥沙指标均没有显著性差异,基于本文 1 年的降雨数据可知雨型对径流泥沙指标影响不显著。

表 2 不同雨型的降雨径流泥沙指标

降雨 类型	降雨 历时/min	降雨量/ mm	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	<i>I</i> ₃₀ / (mm·h ⁻¹)	径流 总量/L	径流系数/ (L·mm ⁻¹)	泥沙 总量/kg	频次	占总频次的 比例%
前期集中型	692.77±630.92	37.89±27.42a	5.63±4.18	23.94±16.94	882.69±1364.89a	0.20±0.24	6.94±10.19	13	46.43
中期集中型	434.43±406.68	28.77±22.93a	5.82±4.62	20.11±12.77	489.86±778.38a	0.11±0.14	5.00±4.13	7	25.00
后期集中型	1490.25±1545.25	103.75±133.03b	5.70±5.30	27.10±20.42	4622.75±7843.52b	0.23±0.22	15.19±12.21	4	14.29
均匀分布型	1679.5±1767.06	49.30±60.39ab	1.40±0.68	11.80±14.42	307.50±423.56ab	0.04±0.04	1.89±1.86	2	7.14

注:表中数据均为平均值±标准差,根据 LSD 检验,后跟任何相同字母处理的平均值在 95%置信水平上没有显著差异。

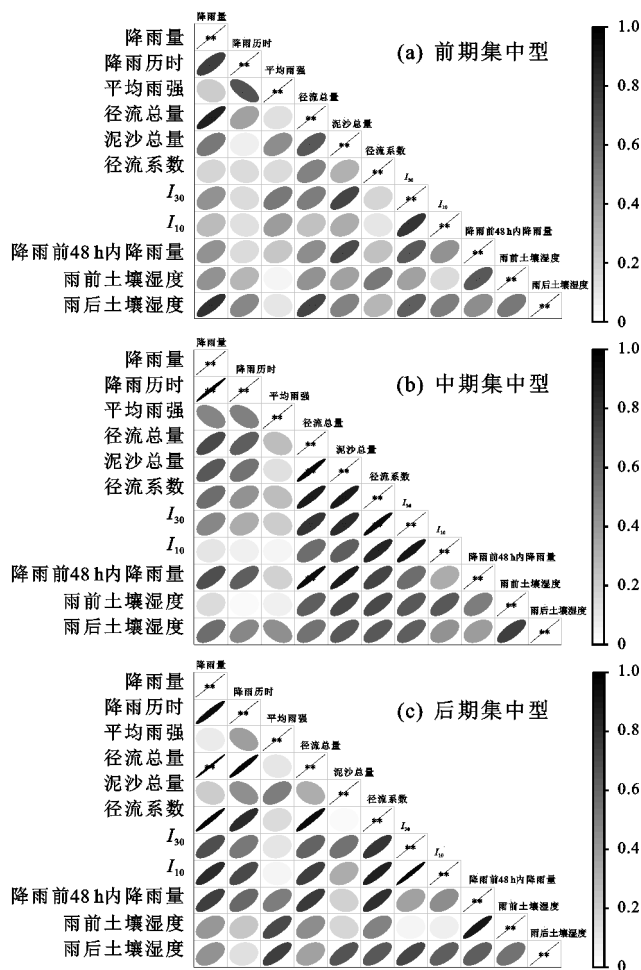
2.3 降雨径流泥沙特征的关系

为探究降雨、径流、泥沙指标间的关系,对前期、中期和后期集中型 3 种雨型各指标做相关性分析(图

2)。3 种雨型下,*I*₃₀ 和 *I*₁₀ 均表现出较强的相关性,且 *I*₃₀ 与其他指标的相关性更好,为避免重复计算可以只选取 *I*₃₀ 这个最大雨强指标。除后期集中型降雨

外,降雨历时和降雨量、降雨前 48 h 内降雨量与泥沙量在 $p \leq 0.01$ 水平下呈显著正相关, I_{30} 和产沙量的相关性较高。除中期集中型降雨外,径流量和降雨量在 $p \leq 0.01$ 水平下呈显著正相关。

前期集中型:降雨历时和平均雨强在 $p \leq 0.05$ 水平呈负相关, I_{30} 与泥沙量在 $p \leq 0.01$ 水平呈显著正相关。说明降雨事件前期是短暂的高强度降雨,历时越长平均雨强越小,集中的雨强即 I_{30} 很大程度地决定产沙量。



注:利用 pearson 相关分析,相关性显示为椭圆形,形状方向朝右前方为正、左前方为负,颜色深浅对应系数大小,短轴越短,相关性越强;* 表示差异显著($p < 0.05$), ** 表示差异极显著($p < 0.01$)。

图 2 降雨、径流泥沙指标热点图

中期集中型:降雨量和降雨历时在 $p \leq 0.01$ 水平呈显著正相关。径流系数和径流量、泥沙量、最大雨强呈显著正相关,其中 I_{30} 是影响径流系数的主要因子,前人^[17]也得出相似的研究结果。径流系数是一段时间内径流总量与降水总量的比值,降水总量和径流总量的差值取决于植物截流、填洼、入渗和蒸发。对于裸地小区而言,入渗对径流系数的影响较植物截流和填洼的作用更大。径流系数和径流量的显著正相关说明入渗量与总降雨量的比值随总降雨量的增

大而减小,入渗量不随总降雨量同比例增大,是因为总入渗量是有限的。随着降雨过程的发生,前期降雨逐渐将土壤蓄满,少有径流产生,到中期集中降雨时几乎不再入渗而转化为径流,泥沙也在这期间增大。

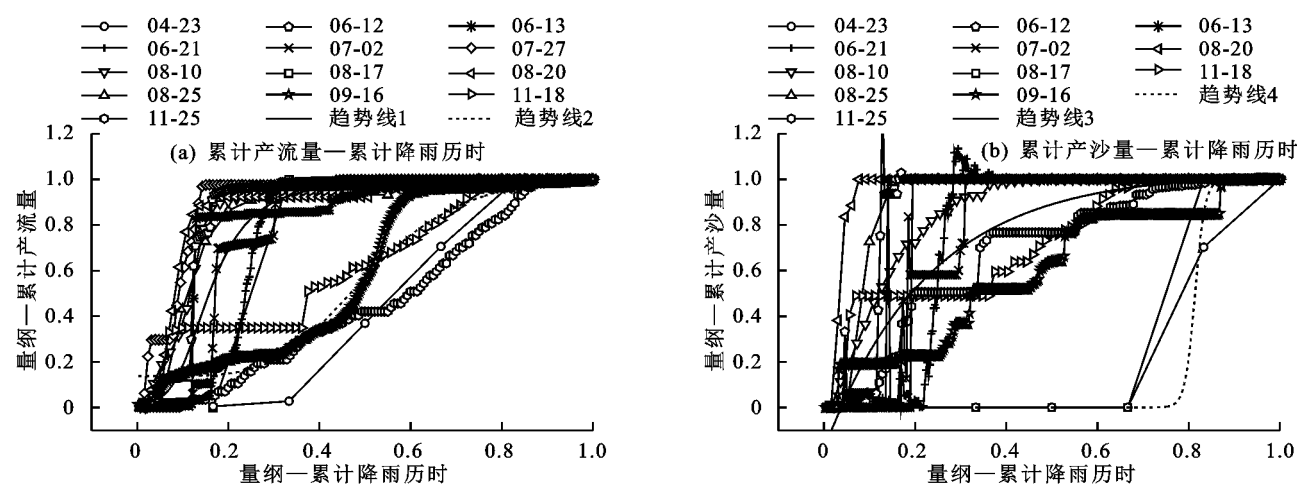
后期集中型:径流总量和降雨量、降雨历时相关性高,是因为降雨集中在后期,降雨历时越长表明前中期的降雨时间也越长,土壤蓄水越多,越接近饱和,在后期集中降雨时径流量便会增大。降雨量与径流系数在 $p \leq 0.05$ 的水平上呈正相关,其原因和中期集中型一致。

分析可知, I_{30} 是本区域最佳的最大时段雨强指标,影响泥沙量和径流系数;径流系数和径流量、降雨量的相关性是因为蓄满产流;前 48 h 内的降雨量对前期型和中期型降雨事件泥沙量有明显影响。

2.4 累计水沙过程与累计降雨历时的关系

本文全年侵蚀性降雨场次的降雨量与径流量可拟合为线性函数、指数函数和幂函数模型,计算 AIC 值依次为 392.943, 383.241, 368.867, R^2 依次为 0.894, 0.925, 0.955, 均表明幂函数为最佳拟合模型,幂函数方程符合 $y = 0.3408x^{1.8652}$ 。

分析不同雨型量纲为一的累计产流量、累计产沙量和累计降雨历时的曲线发现,每种雨型都呈现明显的规律,不同雨型水沙曲线规律的差异明显。虽然图 3 中的 13 次降雨事件同为前期集中型降雨,但曲线聚集形成 2 条规则的趋势线,图 3a 中的趋势线 1 是从起始时刻开始快速增长,约呈 75° 的直线,在降雨历时 30% 左右时就已经累积 90% 的径流量。趋势线 2 增长缓慢约呈 45° 的直线,在历时 30% 时,累计产流不超过 40%。虽然图 3b 也表现出 2 条明显的分化趋势线,但趋势线 2 附近的部分降雨事件在图 3b 中的曲线更接近趋势线 3,趋势线 3 符合大多数降雨事件的累计泥沙规律,在累计历时 50% 时对应的累计产沙超过 60%。趋势线 4 只有 2 场(4 月 23 日和 8 月 17 日),这 2 次降雨事件的降雨历时是所有前期型降雨最短的,只有 28 min。整体而言,前期型降雨事件的产沙曲线较产流曲线规律性更弱,但出现分歧的产流规律在产沙过程中得以统一。由表 3 可知,根据 AIC 值和 R^2 判断,Logistic 方程为拟合趋势线 1, 2 和 3 的最优模型,王思思等^[18]利用 Logistic 方程拟合绿地累计产流量,也有利用相似的 Logical 模型拟合降雨过程的径流泥沙累积量关系^[5]。虽然趋势线 4 拟合为 Logistic 和 Boltzmann 方程的 R^2 高,但 Logistic 方程拟合失败且有较大的 AIC 值, AIC 值更低的 Allometric1 方程为最佳拟合函数。可知 AIC 值具有更优模型的筛选能力。采用 Logistic 最佳拟合函数对 8 月 10 日和 11 月 18 日典型单次降雨事件进行拟合检验,拟合效果较好(表 4)。



注:图 b 中 7 月 27 日的散点折线有明显不正常的上下波动,故剔除。

图 3 量纲一累积产流产沙—历时曲线特征关系(前期型)

表 3 前期型降雨产流产沙过程函数拟合

趋势线	拟合方程	模型拟合优度	
		R^2	AIC
1	Logistic	0.836	-4904.65
	Boltzmann	0.835	-4899.71
	ExpDec1	0.804	-4681.34
	Linear	0.896	-2510.71
2	Logistic	0.927	-2711.47
	Allometric1	0.896	-2508.11
	Logistic	0.725	-5774.18
3	Boltzmann	0.724	-5765.68
	ExpDec1	0.709	-5676.23
	Logistic(failed)	0.957	-1.59
4	Boltzmann	0.957	-1.59
	Allometric1	0.816	-14.78

中期型降雨的初始产流产沙时刻在整场历时的 18%附近,与累计产流相比累计产沙曲线“S”形上升部分的历时更短,斜率更大。累计历时在 50%处时,降雨事件的累计产流为 35%~95%,而累计产沙为 65%~100%。表明降雨历程前期径流中泥沙较多而后期径流中泥沙减少。中期集中型的累计产流产沙曲线趋势明显,均拟合为 Logistic 方程,图 4a 趋势线

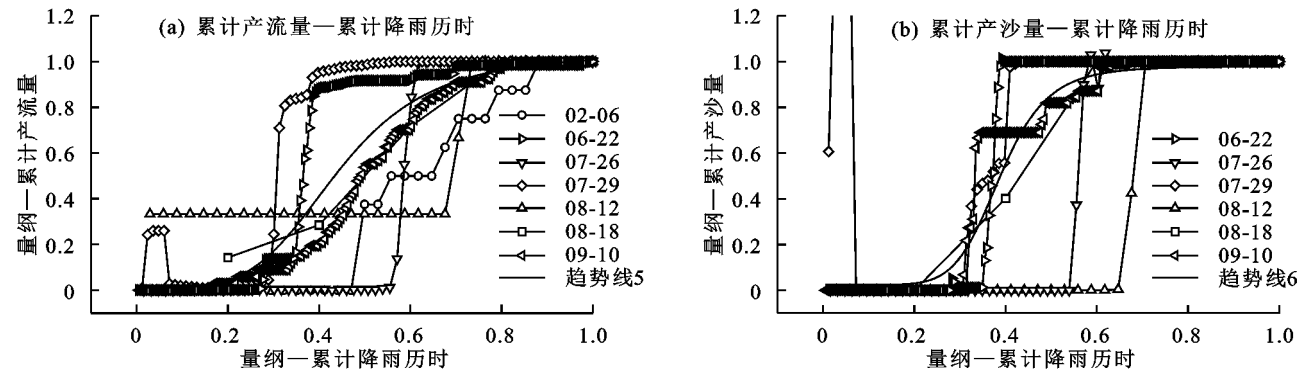
5 满足 $y = 1.037 - \frac{1.025}{[1 + (\frac{x}{0.444})^{4.331}]}$, $R^2 = 0.819$, 图

4b 趋势线 6 满足 $y = 0.979 - \frac{0.956}{[1 + (\frac{x}{0.389})^{7.500}]}$, $R^2 =$

0.769。采用 Logistic 最佳拟合函数对 9 月 10 日典型单次降雨事件的拟合效果很好(表 5)。

表 4 前期型单次降雨产流产沙过程函数拟合

观测日期 (年-月-日)	累计产流 拟合模型	拟合方程	R^2	累计产沙 拟合模型	拟合方程	R^2
2020-08-10	Logistic	$y = 0.998 - \frac{0.920}{[1 + (\frac{x}{0.115})^{3.990}]}$	0.992	Logistic	$y = 1.025 - \frac{0.984}{[1 + (\frac{x}{0.127})^{2.256}]}$	0.995
2020-11-18	Logistic	$y = 1.446 - \frac{1.238}{[1 + (\frac{x}{0.676})^{2.113}]}$	0.945	Logistic(failed)	$y = 10.704 - \frac{10.681}{[1 + (\frac{x}{51.274})^{0.562}]}$	0.891



注:图 b 中 2 月 6 日的散点折线有明显不正常的上下波动,故剔除。

图 4 量纲一累积产流产沙—历时曲线特征关系(中期型)

表 5 中期型单次降雨产流产沙过程函数拟合

观测日期 (年-月-日)	累计产流 拟合模型	拟合方程	R^2	累计产沙 拟合模型	拟合方程	R^2
2020-09-10	Logistic	$y=1.027-\frac{1.008}{[1+(\frac{x}{0.509})^{5.758}]}$	0.998	Logistic	$y=0.987-\frac{1.014}{[1+(\frac{x}{0.360})^{6.223}]}$	0.969

图 5a 中后期集中型降雨事件的累计产流曲线变化规律统一,呈指数型增长,产流时间在历时的 40% 附近,最后历时 20%,其产流从 40% 增长到 100%; 图 5b 中累计产沙曲线变化规律不统一,7 月 30 日前期突然性地产沙,后期均匀且快速地产沙,另外 3 场降雨事件则是在 20% 甚至更短的时间内完成 40% 的

产沙,将次降雨事件的产沙产流过程对应分析发现,产沙突增的时刻与产流突增在同一时刻。根据 AIC 值和 R^2 判断,Boltzmann 方程为拟合趋势线 7 的最优模型,Logistic 方程为拟合趋势线 8 的最优模型(表 6)。采用上述最佳拟合函数对 7 月 30 日典型单次降雨事件的拟合效果很好(表 7)。

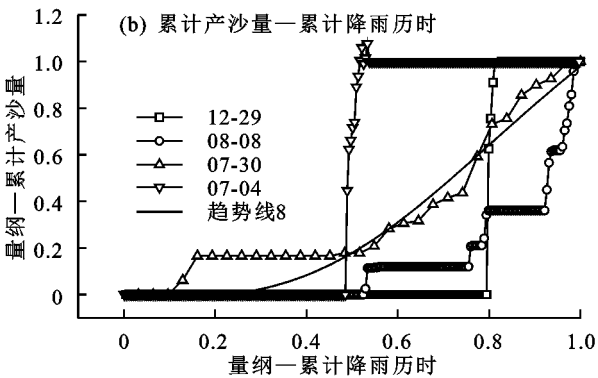
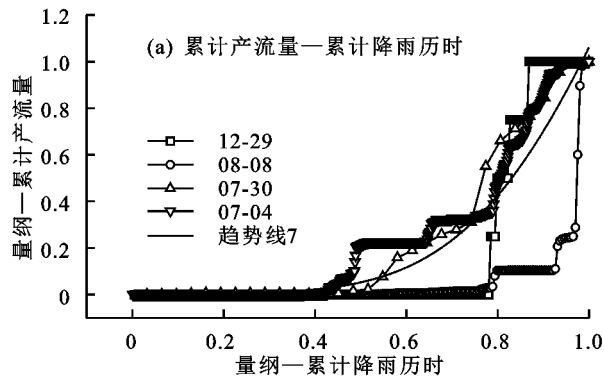


图 5 量纲一累积产流产沙—历时曲线特征关系(后期型)

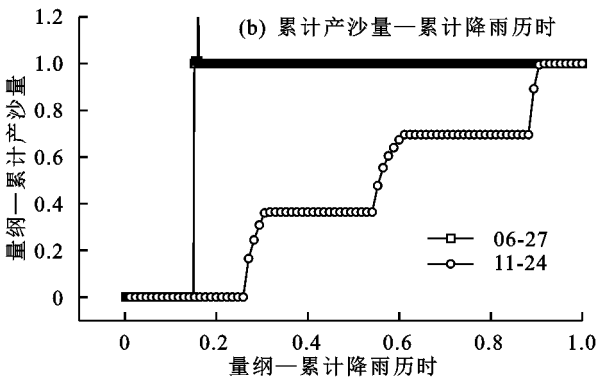
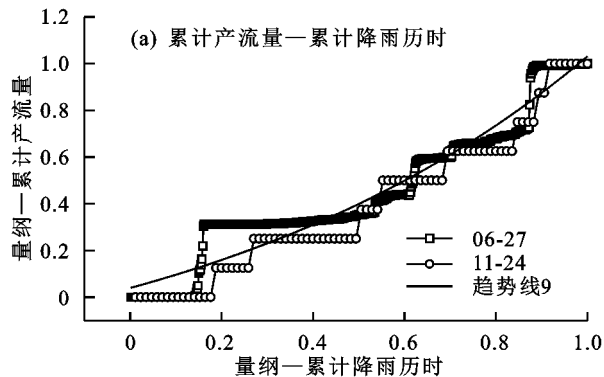
表 6 后期型降雨产流产沙过程函数拟合

趋势线	拟合方程	模型拟合优度	
		R^2	AIC
7	Allometric1	0.810	-4711.16
	Boltzmann	0.811	-4720.10
	Logistic	0.810	-4709.06
	Logistic	0.644	-3038.68
8	Boltzmann	0.643	-3038.24
	Allometric1	0.591	-2876.86

图 6 中均匀分布型累计产流曲线呈阶梯式均匀增长,2 条累计产沙曲线规律不统一,其中 11 月 24 日降雨事件的曲线也呈阶梯式增长。根据 AIC 值和 R^2 判断,ExpGrow1 和未在表 8 列出的 Boltzmann、Logistic 方程的结果较好,但其拟合不收敛,ExpDec1 为趋势线 9 的最佳拟合模型。11 月 24 日单次降雨事件以 ExpDec1 函数拟合能获得好的拟合效果(表 9)。

表 7 后期型单次降雨产流产沙过程函数拟合

观测日期 (年-月-日)	累计产流 拟合模型	拟合方程	R^2	累计产沙 拟合模型	拟合方程	R^2
2020-07-30	Boltzmann	$y=1.128-\frac{1.130}{1+e^{\frac{x-0.792}{0.093}}}$	0.991	Logistic	$y=1.331-\frac{1.213}{[1+(\frac{x}{0.830})^{6.067}]}$	0.969



注:2 条累计产沙曲线规律不统一,不进行趋势线拟合。

图 6 量纲一累积产流产沙—历时曲线特征关系(均匀型)

表 8 均匀型降雨产流产沙过程函数拟合

趋势线	拟合方程	模型拟合优度	
		R^2	AIC
9	ExpDec1	0.934	-3462.68
	ExpGrow1(failed)	0.934	-3460.68
	Allometric1	0.925	-3275.32

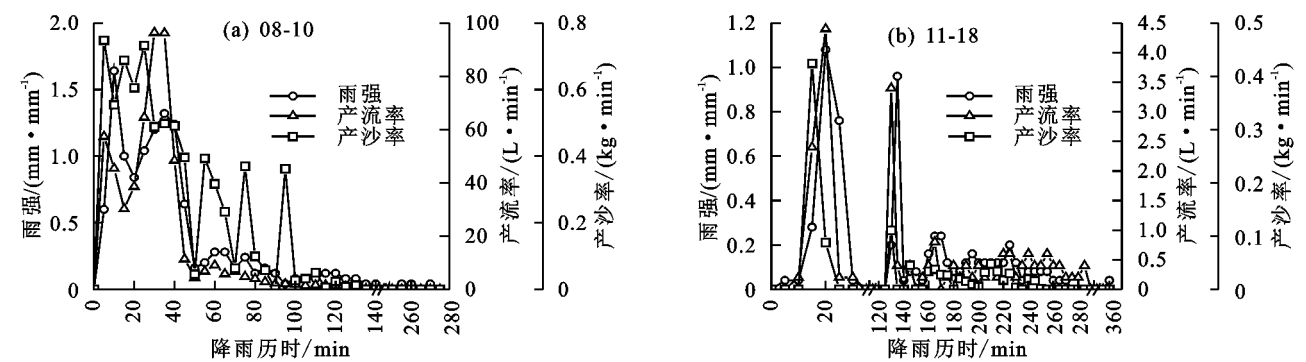
2.5 次降雨的时段雨强和产流率、产沙率的变化

由图 7~图 10 可知,中雨的时段雨强、产流率和产沙率均较小;大雨降雨过程的时段雨强、产流率和产沙率峰值明显,且均大于中雨。虽然 2 场降雨的产流率和产沙率较低,但降雨历时长,侵蚀泥沙量较大;由于降雨初期雨强大,前期型的初始产流产沙时间明显小于中雨

和大雨,前期型的时段雨强明显大于另外 2 种雨型。由图 7 可知,8 月 10 日的时段雨强和产流率大致呈单峰形曲线变化,降雨刚开始 10 min 雨强和产沙率便达到峰值,产流产沙过程在降雨开始立即启动,40 min 时产流率达到峰值,雨强和产流率在 50 min 急速减小,随后仅在 0 附近小幅度波动,50~100 min 内产沙率在 0~0.4 kg/min 内大幅波动,随后几乎趋近于 0。上述现象说明产沙并不会随着雨强和径流的大幅度减小立即减小,存在滞后现象。11 月 18 日的降雨事件中雨强、产流率和产沙率的变化时间同步、频率一致,在 20,130 min 处经历短暂的峰值,随后 3 项指标均保持在较低水平。

表 9 均匀型单次降雨产流产沙过程函数拟合

观测日期 (年-月-日)	累计产流 拟合模型	拟合方程	R^2	累计产沙 拟合模型	拟合方程	R^2
2020-11-24	ExpDec1	$y = -0.497 + 0.470 * e^{-\frac{x}{0.852}}$	0.969	—	—	—

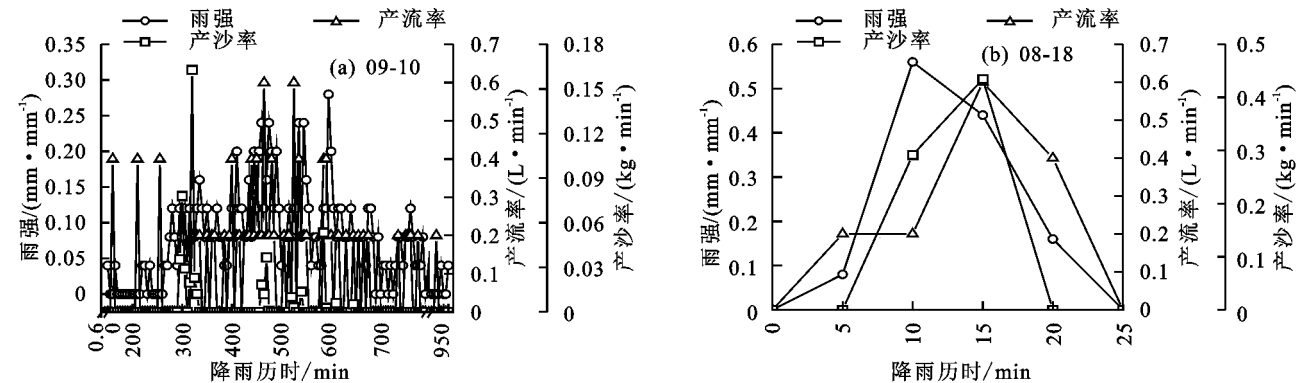


注:8月10日145~250 min内雨强、产流率和产沙率均在0附近变化,故直接将其隔断;11月18日35~115,290~350 min内雨强、产流率和产沙率均在0附近变化,故直接将其隔断。

图 7 雨强、产流率和产沙率(前期集中型)

由图 8 可知,中期集中型即中期雨量集中、雨强较大,9 月 10 日降雨事件的 270~690 min 时段的雨强大于前后时段的雨强,在 460,540,610 min 附近有 3 个较明显峰值,此时产流率、产沙率与雨强变化一致。产沙过程在 290 min 处才开始,310 min 便达到

峰值 0.17 kg/min,此后的产沙过程不连贯,有 3 处产沙率突增,峰值均在 0.06 kg/min 下,650 min 后停止产沙。8 月 18 日的降雨历时段,3 条曲线增长趋势同步,均是从 0 增大达到峰值后减小为 0。



注:9月10日0~150,790~935 min内雨强在0.04 mm/min及以下,产流率和产沙率均为0,故直接将其隔断。

图 8 雨强、产流率和产沙率(中期集中型)

由图 9 可知,后期型降雨事件雨强、产流率和产沙率曲线变化规律和前期型相反,大幅度波动和峰值集中在后期,产流率和产沙率随雨强的增长而增长。在 0~65 min 时段,雨强突增后逐渐减小,只有 20

集中在后期,产流率和产沙率随雨强的增长而增长。在 0~65 min 时段,雨强突增后逐渐减小,只有 20

min 处出现短暂的产流产沙,其他时刻均为 0。70 min 后才出现明显的径流和泥沙,明显晚于前期型和中期型径流出现的时间。

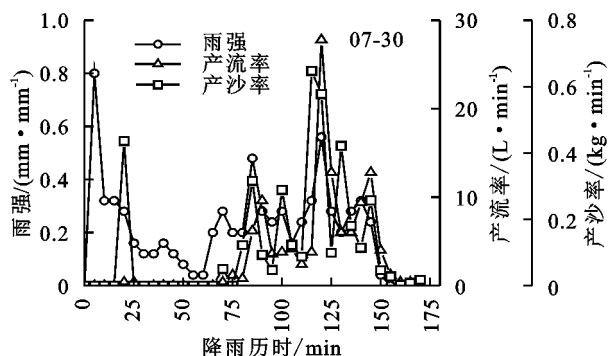
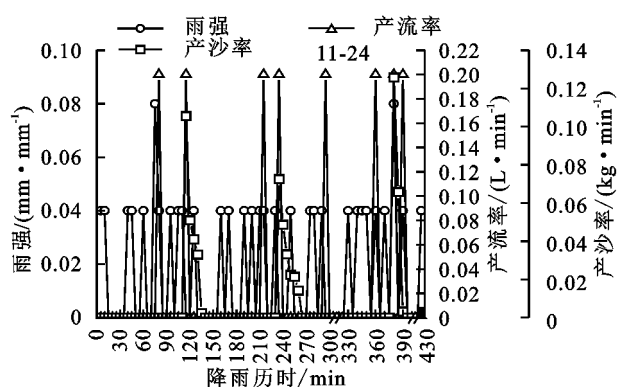


图 9 雨强、产流率和产沙率(后期集中型)

由图 10 可知,均匀型降雨事件 3 种曲线总体变化幅度不大,雨强均匀,产流和产沙过程不连贯,总共 8 次产流过程,3 次产沙过程。产流率和产沙率均是立即增大又立即减小,产沙率在 115,240,385 min 处达到峰值,随后的 10~20 min 内逐渐降低至 0,这是累计产沙曲线呈阶梯状的原因。



注:305~320,400~420 min 时雨强、产流率和产沙率均为 0,为突出变化显著时段的规律,故将其隐藏。

图 10 雨强、产流率和产沙率(均匀分布型)

结合分析发现,不同雨型的累计产流产沙曲线的差别显著,不同雨型的雨强、产流率和产沙率随时间变化曲线有鲜明的特征,这表明不同雨型对产流产沙过程的影响显著,以雨强集中出现的时序划分雨型是可行的。无论是哪种雨型的降雨,降雨产流产沙遵循一定的变化规律:(1)雨强、产流率和产沙率的变化同步,即当降雨强度大幅度增大时,产流率会即刻增大或在 1 个观测时间间隔后大幅提高,在大量降雨下土壤表面迅速产生径流,由于径流的冲刷作用,产生一定泥沙,故产沙量也对应增大,并产生相应峰值。(2)产沙或产流过程滞后于雨强变化过程,产流滞后通常出现在除前期型外的其他雨型降雨历时的前段,产沙滞后通常在前期集中型降雨事件降雨历时的后段出现。

3 讨论

全年侵蚀性降雨场次的降雨量与径流量拟合为幂

函数模型,即降雨量越大,径流量越大,但泥沙量与降雨量、径流量间不存在类似规律,如 8 月 10 日次降雨事件,随径流量的显著增大,泥沙量并未显著增大,由前文相关性分析可知,前期集中型和中期集中型降雨事件前 48 h 内的降雨量与泥沙量又呈正相关或呈负相关,联系本次降雨前 48 h 内有 73 mm 的降雨量可知,是间歇性降雨的发生影响侵蚀量,自然条件下的降雨大多不连续,出现许多的间歇性二次降雨现象。李霞等^[19]通过室内模拟试验证实,在细沟侵蚀发生的条件下,第 1 次降雨的侵蚀越剧烈,二次降雨所产生的细沟侵蚀量就越少。正是由于前一场降雨的存在,导致后一场降雨的侵蚀泥沙量降低^[20]。结合黄棕壤的性质可以解释为黏重的表层土壤在强降雨的持续冲刷下,团聚体崩解破碎成较小粒级颗粒,一方面堵塞孔隙,导致导水率降低^[21],径流急剧增加;另一方面,细小颗粒物被冲刷殆尽,裸露出的土壤黏性较强,需要进一步的冲刷破坏,所以产沙量在出现第 1 次峰值后迅速减小,且对后续降雨径流的响应不那么显著。

由图 4~图 10 可知,雨型对产流产沙的过程有显著影响,可以认为依据雨量集中的时序划分雨型是合理的,但除了后期集中型的降雨量和径流总量与前期、中期相比有显著性差异外,其他指标均没有显著性差异,这是因为分类过程不涉及到传统分类中的降雨量、降雨历时等,一种雨型中任何降雨量、降雨历时都会出现,因为自然过程是随机的^[22]。

在前人^[1,5]的研究中,产流、产沙滞后的现象是普遍存在的,影响因素包括连续型/间歇型降雨、土地利用方式、前期降雨、雨强、降雨峰值次数等。张晶玲等^[1]研究发现,间歇性降雨下,横垄和顺垄的水沙与雨强均在首次产流时出现错峰现象,再出现产流时错峰不明显。顺垄在连续型降雨下不存在错峰、在间歇型降雨下存在错峰是受前期降雨和雨强影响。陆芳春等^[5]监测杭州市典型小流域降雨的水沙过程发现,完全单峰型降雨的产流峰值和产沙峰值滞后于雨强峰值。本文中简化峰值的次数为峰值集中的时间,故除均匀分布型降雨,另外 3 种类型均出现水沙峰值滞后于雨强峰值的现象。只考虑雨型因素,前期型降雨更容易出现超渗产流,因为雨量集中在前期较短的时间内^[23],趋势线 1 的径流量在历时的 30% 时便达到 90%,几乎不存在产流滞后,而泥沙滞后是因为径流量减少后,泥沙从坡面汇集、运移需要一段时间;中期和后期型降雨更容易出现蓄满产流,因为这 2 种雨型均存在一段几乎不产流的降水入渗时间,中期型初始产流时刻在整场历时的 18% 处,后期型初始产流时刻约为 40%,产流滞后于雨强变化,而这 2 种雨型的径流不会过早结束,所以不存在产沙滞后。上述因素

中,最有可能影响裸地初始产流时间的变量是土壤含水率和雨强^[24],但受限监测数据时间间隔稍大,不能精确得到产流时间,所以缺少其关系研究。

然而,本文的研究也存在一定的局限性,自动化设备监测的过程数据虽然全面,但却无法记录降雨条件下坡面侵蚀形态的变化,导致在机制上的分析还不够深入。此外,本研究仅利用雨量集中时序这一特征划分雨型类别,并未考虑同一雨型下不同的降雨量、降雨历时和间歇性降雨对于径流泥沙响应过程的影响。在积累多年数据,缩短监测时间间隔的基础上,加强对降水产流产沙过程的细化,将雨量和峰值时序结合研究,应当是未来的研究重点。

4 结论

(1)降雨产沙过程受不同土壤性质、降雨条件的综合影响。 I_{30} 是影响降雨事件泥沙量和径流系数的重要因素;前期集中型和中期集中型降雨事件泥沙量与前48 h内的降雨量呈显著正相关;雨型对产流产沙过程有显著的影响,故根据雨量集中的时序划分雨型开展研究是有意义的,但不同雨型的降雨产流产沙特征指标之间没有显著性差异。

(2)根据 R^2 及AIC值确定不同雨型下量纲为一的累计产流产沙的最优模型为Logistic方程,除均匀分布型产流曲线的最佳拟合函数为ExpDec1方程、后期集中型产流曲线拟合为Boltzmann方程外,其他产流产沙过程用Logistic方程均能取得较好结果。

(3)总体而言,不同雨型下,雨强、产流率和产沙率的变化趋势和峰值出现规律存在一致性;也存在产沙产流过程滞后于雨强变化过程的现象,其中前期集中型降雨的产沙过程滞后于雨强,发生在整场雨的后期,中期、后期集中型降雨的产流过程滞后于雨强,发生在整场雨的前期。

致谢:感谢湖北省水土保持监测中心提供的2020年径流泥沙自动化监测小区监测数据,感谢湖北省黄冈市水土保持与农田水利科研所对本研究的大力支持。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王子豪.退耕坡面产流产沙对植被刈割强度的响应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [3] 闫胜军,郭青霞,闫瑞,等.不同土地利用类型下水土流失特征及雨强关系分析[J].水土保持学报,2015,29(2):45-49.
- [4] 李赛.鲁中山地天然降雨对径流小区产流产沙的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2016.
- [5] 陆芳春,李钢,张锦娟.小流域典型降雨过程的水沙关系

- 分析[J].科技通报,2018,34(7):52-56.
- [6] 崔璨,王小燕,孙宁婷,等.三峡库区典型农业小流域次降雨产沙过程及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(1):17-23.
- [7] 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].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
- [8] 徐相忠,刘前进,张含玉.降雨类型与坡度对棕壤垄沟系统产流产沙的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):56-62,71.
- [9] Almeida W S, Seitz S, Oliveira L F C, et al. Duration and intensity of rainfall events with the same erosivity change sediment yield and runoff rates[J]. International Soil and Water Conservation Research,2021,9(1): 69-75.
- [10] Alavinia M, Saleh F N, Asadi H. Effects of rainfall patterns on runoff and rainfall-induced erosion[J]. International Journal of Sediment Research,2019,34(3): 270-278.
- [11] 展小云,曹晓萍,郭明航,等.径流泥沙监测方法研究现状与展望[J].中国水土保持,2017(6):13-17.
- [12] 杜轶,郭青霞,郭汉清,等.汾河上游不同土地利用方式对坡地水土流失的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):44-51.
- [13] 王玲莉,张富,胡彦婷,等.侵蚀性降雨分类及植被类型对产流产沙的影响[J].人民黄河,2021,43(10):109-113.
- [14] 邹玉梦.径流泥沙自动化监测模拟研究[D].武汉:华中农业大学,2019.
- [15] 殷水清,王杨,谢云,等.中国降雨过程时程分型特征[J].水科学进展,2014,25(5):617-624.
- [16] 梁越,焦菊英,黄土高原小流域产沙性降雨标准分析[J].中国水土保持科学,2019,17(3):8-14.
- [17] 刘志伟,李胜男,郭燕红,等.青藏高原原林错流域高寒草原坡面产流特征及其影响因素[J].生态学杂志,2021,40(8):2388-2399.
- [18] 王思思,侯爽,王榕.城市绿地产流影响因素与径流系数取值的多方法比较[J].环境工程,2021,39(12):84-90,242.
- [19] 李霞,金鑫,谢斯琴,等.间歇降雨对红壤坡面土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):96-102.
- [20] 张建文,李鹏,高海东,等.覆沙坡面微地形变化与侵蚀产沙的响应关系[J].干旱区研究,2020,37(3):757-764.
- [21] 陈芳,王硕,吴新亮,等.不同侵蚀程度下地带性土壤的结构及渗透性能分析[J].农业工程学报,2014,30(22):137-146.
- [22] 许启慧,于长文,张金龙,等.基于芝加哥算法的河北省四城市短历时暴雨极值特点分析[J].暴雨灾害,2018,37(3):288-292.
- [23] 段剑,刘窑军,汤崇军,等.不同下垫面红壤坡地壤中流对自然降雨的响应[J].水利学报,2017,48(8):977-985.
- [24] 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.