

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.041; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.041.

顾李华, 常耀文, 郭家瑜, 等. 皖西大别山区典型小流域洪水事件的雨-水-沙特征及关系研究[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):11-20.

Gu Lihua, Chang Yaowen, Guo Jiayu, et al. Study on rainfall, runoff, and sediment characteristics and their relationships of flood events in typical small watersheds of Dabie Mountain area, western Anhui Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):11-20.

皖西大别山区典型小流域洪水事件的雨-水-沙特征及关系研究

顾李华^{1,2}, 常耀文², 郭家瑜², 晋娜², 王蕴鹏², 刘霞², 师冬宏¹

(1. 安徽省水文局, 合肥 230022;

2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037)

摘要: [目的] 洪水事件是流域产流产沙的关键驱动过程, 揭示其雨-水-沙动态特征及关系对理解山区小流域泥沙运移具有重要意义。[方法] 以皖西大别山区江子河小流域为研究区域, 在分析降雨、径流、泥沙特征的基础上, 运用冗余分析、多元逐步回归分析雨-水-沙间关系, 并基于滞回分析揭示小流域泥沙运移的滞后效应。[结果] (1) 94.55% 的洪水事件集中在 3—9 月, 最大降雨、径流与含沙量出现于 7 月, 洪水事件期间径流量是全年平均径流量的 4.8 倍, 产沙模数占全年的 90% 以上, 产沙模数大于 50 t/km² 的洪水事件 (仅占 5.5%) 贡献了总产沙量的 71.2%; (2) 径流量是影响产沙量的主要影响因子, 解释力达 89.7% ($p < 0.001$), 降雨量和最大 30 min 雨强单独影响径流与含沙量, 但降雨—径流的联合指标对产沙量的解释力 ($R^2 = 0.61$) 优于单一指标。径流与泥沙间的关系更为密切; (3) 不同滞回模式的洪水事件在泥沙输移过程中表现出显著差异, 顺时针滞回模式占比最高 (45.87%), 其降雨侵蚀力和径流量显著高于其他模式; 逆时针模式的产沙模数最大, 复杂型模式的降雨量和径流量最大。[结论] 强降雨条件下泥沙的快速响应是流域侵蚀的主要形式, 产沙源地主要分布于小流域的中下游沟道区域。

关键词: 皖西大别山区; 洪水事件; 冗余分析; 江子河小流域; 滞回曲线

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0011-10

Study on rainfall, runoff, and sediment characteristics and their relationships of flood events in typical small watersheds of Dabie Mountain area, western Anhui Province

Gu Lihua^{1,2}, Chang Yaowen², Guo Jiayu², Jin Na², Wang Yunpeng², Liu Xia², Shi Donghong¹

(1. Hydrology Bureau of Anhui Province, Hefei 230022, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, Co-Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Forestry College of Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: [Objective] Flood events are the key driving process of runoff and sediment yield in watersheds. Revealing their rainfall, runoff, and sediment dynamic characteristics and relationships is of great significance for understanding sediment transport in small watersheds in mountainous area. [Methods] The small watershed in the Jiangzi River in the Dabie Mountain area of western Anhui Province was selected as the study area. Based on the analysis of rainfall, runoff, and sediment characteristics, redundancy analysis (RDA) and multiple stepwise regression were used to investigate the relationships between rainfall, runoff, and sediment. Additionally, the lag effect of sediment transport in the small watershed was revealed through hysteresis analysis. [Results] (1) 94.55% of flood events occurred between March and September, with the maximum rainfall, runoff, and sediment

收稿日期: 2025-05-03

修回日期: 2025-05-16

接受日期: 2025-06-02

资助项目: 国家自然科学基金项目 (32071840); 省级科研项目 (2024BTAFN00149); 水利部重点项目 (SBJ2018010)

第一作者: 顾李华 (1981—), 男, 江苏海安市人, 工程师, 主要从事水文预报与区域水土保持研究。E-mail: gulihua81@163.com

通信作者: 刘霞 (1971—), 女, 山东菏泽人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事水土保持监测与评价方面的研究。E-mail: liuxia@njfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

concentration observed in July. During the flood events, the runoff was 4.8 times the annual average, and the sediment yield modulus accounted for more than 90% of the annual total. Flood events with a sediment yield modulus exceeding 50 t/km², which accounted for only 5.5% of all events, contributed 71.2% of the total sediment yield. (2) Runoff was the primary influencing factor of sediment yield, explaining 89.7% of the variance ($p < 0.001$). Rainfall amount and maximum 30-minute rainfall intensity individually affected runoff and sediment concentration, but the combined rainfall-runoff indicator demonstrated greater explanatory power ($R^2 = 0.61$) for the sediment yield compared to single indicators. The relationship between runoff and sediment was particularly strong. (3) Flood events under different hysteresis models showed significant differences in sediment transport processes. The clockwise hysteresis model, which accounted for the highest proportion (45.87%), showed significantly higher rainfall erosivity and runoff compared to other models. The counterclockwise model exhibited the highest sediment yield modulus, while the complex model exhibited the highest rainfall and runoff. [Conclusion] Under heavy rainfall conditions, the rapid sediment response is the primary form of watershed erosion, with sediment sources mainly distributed in the middle and lower reaches of channels in small watersheds.

Keywords: Dabie Mountain area of western Anhui Province; flood event; redundancy analysis; small watershed in Jiangzi River; hysteresis curve

水土资源是人类赖以生存与发展的重要基础,减少水土流失、保护水土资源是实现区域可持续发展的前提。随着气候变化与人类活动的影响,极端气候事件的频率与不确定性明显增加^[1],洪水事件及其引发的水土流失也呈上升趋势。流域河网输沙往往由年内的几次洪水事件完成^[2],以长江流域为例,暴雨洪水事件的产输沙量可占全年沙量的80%以上^[3],洪水事件是诱发水土流失的主要驱动过程。因此,探索洪水事件的产流产沙特征及其关系,对优化小流域水土保持措施,指导水土资源可持续管理及生态恢复具有重要的理论和实践意义。

在洪水过程中,地表径流是泥沙输移的主要动力来源^[4]。地表径流的形成取决于降雨特征、地表下渗、包气带蒸散发及其含水量之间的关系^[5],当土壤达到饱和后产生地表径流并伴随泥沙输移。近年来,随着流域坡改梯、植被恢复等工程的实施及景观格局优化,相同径流条件下的泥沙输移量呈减少趋势^[6],然而洪水发生时的高强度降雨与径流过程的非线性耦合仍会引发显著的侵蚀-输沙过程。同时,输沙过程受小流域人类活动与景观格局的复杂性影响^[7],导致流域控制站观测的径流泥沙存在滞后效应^[8]。Williams的研究最早提出了利用径流泥沙的滞回曲线揭示悬移质含沙量的滞后效应^[9]。有研究表明利用单次洪水事件的滞回曲线能够更好地揭示流域内潜在沉积物源的空间分布^[10]。在较为湿润的气候区,滞回曲线多呈沙峰先于洪峰的顺时针特征^[11]。Hu等^[2]基于暴雨数据探索水沙关系,确定黄土高原西川河流域的滞回曲线主要呈逆时针型,洪峰先于沙峰到达流域出口,流域主要沉积物源可能

集中分布在远离出口断面的上游区域。Zou等^[12]基于30个流域的径流泥沙数据进一步验证在黄土高原的滞回曲线以逆时针滞后为主。目前相关研究多集中于黄土高原,在南方地区相对较少。然而南北方的产流机制存在差异,北方地区多以超渗产流为主,降雨充沛的南方地区则以蓄满产流为主^[13],这种差异可能导致不同的滞后效应,因此,鉴于产流机制的差异,南方地区泥沙的输移变化过程还有待探索,为南方地区水沙模拟及模型构建提供数据与理论支撑。

皖西大别山区属于桐柏大别山山地丘陵水源涵养保土区,是华东地区重要水源涵养地与生态屏障^[14]。山高坡陡的地形特点和短历时暴雨多发的气象特点使其成为安徽省水土流失集中区域之一^[15]。洪水事件频发,已成为阻碍当地生态恢复与经济严重威胁因素。诸多学者以皖西大别山区典型小流域——江子河小流域为例量化了降雨对水沙的影响。例如钟祎珣等^[16]通过划分雨型探索了典型裸地坡面径流泥沙对降雨的响应;洪雨馨等^[17]揭示了降雨和前期含水量对不同作物坡面产流产沙的影响;江雯等^[18]探究了在不同降雨条件下梯地的产流产沙特征。然而这些研究主要集中于坡面尺度,在下垫面更为复杂的小流域尺度上研究相对较少。本研究以2017—2023年江子河小流域观测的110场洪水事件数据为基础,基于冗余分析与多元逐步回归分析探索降雨、径流与泥沙间的响应关系,并通过滞回分析理解泥沙输移的滞后效应,为皖西大别山区水土流失治理与洪灾预警提供数据支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

江子河小流域位于安徽省六安市霍山县(115°52′51.6″—115°55′43.3″E,31°06′25.3″—31°08′51.03″N),水土保持三级区属桐柏大别山山地丘陵水源涵养保护区。流域面积 9.14 km²,地形西北高东南低,北、东、西三面环山,形成向南倾斜的斜长形形状,为完整型小流域,海拔高度 344.1~1 172.2 m,相对高差 828.11 m(图 1)。小流域属北亚热带湿润季风气候区,雨热同期,多年平均气温 15.6℃,多年平均降水量 1 491.2 mm,汛期 5—9 月占 65.6%,降水年际变化大,研究期最大年降水量 2 521.5 mm(2020 年),最小年降水量 989 mm(2019 年)。流域内以花岗岩、片麻岩等为主,土壤类型主要为粗骨土,土壤质地以砂质壤土为主。小流域位于淠河支流上游,属淮河水系,沟壑总长度 61.43 km,沟壑密度 6.72 km/km²,沟底平均比降 11.23%,流域宽度 5.26 km,流域形状系数 1.24。小流域的土地利用类型主要为有林地,2023 年林地面积 6.84 km²,占比 74.88%。树种主要包括马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.),毛竹(*Phyllostachys edulis*),栓皮栎(*Quercus variabilis* Blume var. *variabilis*),杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)。

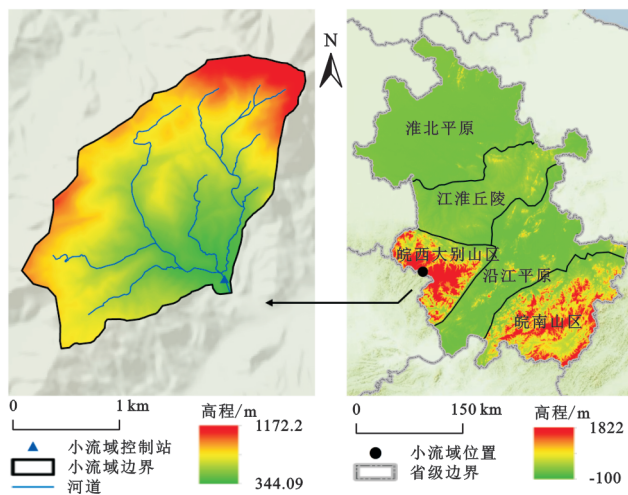


图 1 江子河小流域区位图

Fig. 1 Location map of small watershed in Jiangzi River

1.2 数据源及预处理

本研究的数据包括降雨特征数据、洪水径流泥沙特征数据,2017—2023 年共监测 110 次洪水事件的径流泥沙过程,数据源于江子河小流域综合观测站。降雨数据使用遥测雨量计(JD205-1)测得,观测步长为 60 min。通过遥测水位计(SW40)自动测报水位,用三角剖面堰流量计算公式推算流量。泥沙采用泥沙自动取样仪取样,平水期每日 8:00 取样一次,洪水

期每半小时取样一次,样品带回实验室进行过滤、烘干、称重。利用 SPSS 25.0, Excel 2021, Origin 2021 实现数据分析及制图。降雨、径流、泥沙涉及的特征指标见表 1。

表 1 洪水事件涉及的降雨、径流与泥沙特征指标
Table 1 Rainfall, runoff, and sediment characteristic indicators involved in flood events

特征指标	缩写	单位	
降雨特征指标	降雨历时	t	min
	降雨量	P	mm
	降雨强度	I	mm/h
	最大 30 min 雨强	I_{30}	mm/h
	次降雨侵蚀力	R	MJ·mm/(hm ² ·h·a)
雨前 5 日平均雨量	P_5	mm	
径流特征指标	产流历时	t_c	min
	洪峰流量	Q_p	m ³ /s
	流量	Q	m ³ /s
	径流深	H	mm
	径流系数	C	无量纲
泥沙特征指标	径流量	Q_r	m ³
	含沙量	S	kg/m ³
	产沙模数	Y_s	t/km ²

次降雨侵蚀力(R)根据 Wischmeier 的计算方法得到^[19]。计算公式如下:

$$R = EI_{30} \quad (1)$$

式中: I_{30} 为一次降雨过程中最大 30 min 雨强(mm/h); E 为一次降雨的总动能(MJ/hm²),公式如下:

$$E = \sum_{r=1}^n (e_r \cdot P_r) \quad (2)$$

$$e_r = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.082i_r)] \quad (3)$$

式中: $r = 1, 2, \dots, n$ 表示一次降雨过程按雨强分为 n 个时段; P_r 为第 r 时段雨量(mm); e_r 表示每一时段的单位降雨动能[MJ/(hm²·mm)]; i_r 是第 r 时段雨强(mm/h)。

1.3 研究方法

本研究使用冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)与多元逐步回归分析探究降雨、径流与泥沙指标之间的关系,使用滞后分析探索径流泥沙间的滞后效应。RDA 是一种研究响应变量与解释变量之间关系的约束排序方法^[20],分别将降雨指标、径流指标作为解释变量,使用 Canoco 5 软件进行 RDA,探究解释变量对响应指标(径流指标、泥沙指标)的影响。采用蒙特卡罗置换检验评估排序轴的显著性,基于前向选择变量法筛选对解释方差贡献显著的生态变量^[21],RDA 二维图采用 Canoco 5 软件绘制。

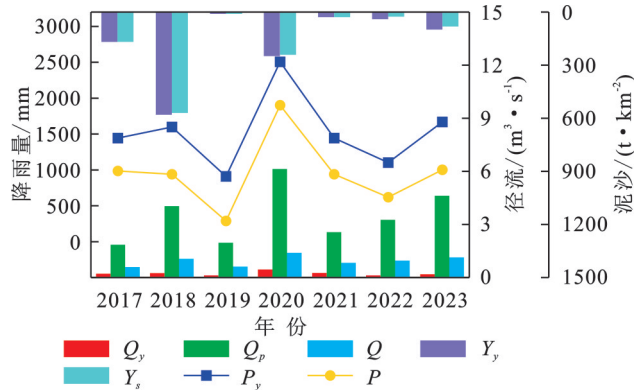
多元逐步回归是一种从多个自变量中选择对因

变量有显著影响的变量,并构建最优回归模型的统计方法。以降雨与径流特征指标为自变量,分别以径流与泥沙特征指标作为因变量进行多元回归分析,使用 R^2 评估模型的解释能力,分析过程基于 R 4.4.3 软件的“MASS”代码包实现。

滞回分析是研究洪水事件中流量(Q)与含沙量(S)之间动态关系的重要方法。通过滞回曲线(Q - S)可以揭示流域内泥沙输移特性与泥沙来源^[22]。通常情况下, Q - S 分为 4 种类型,顺时针型(CW)、逆时针型(ACW)、8 字型(FO8)和复杂型(CPX)^[23]。通过计算洪水事件的滞回系数(HI),结合 Q - S 形态判断滞回类型,HI >0 且 Q - S 形态呈顺时针为顺时针型,HI <0 且 Q - S 形态呈逆时针为逆时针型,HI 接近 0 表示 8 字型或复杂型,如果 Q - S 形态呈两条明显交叉的环线为 8 字型。本研究基于数据分析过程中的 Q - S 形态增加了线型(LIN),即洪水事件中的径流量与含沙量同增同减,变化趋势保持一致^[9]。HI 由洪水上涨阶段与回落阶段的含沙量(S)差异计算得到。公式如下:

$$HI = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{RS,i} - S_{FS,i})}{n} \quad (4)$$

式中: $S_{RS,i}$ 为洪水上涨阶段在径流为 Q 时的 S , $S_{FS,i}$ 为洪水回落阶段在径流为 Q 时的 S ; n 为样本点数量。计算与分析过程基于 R 4.4.3 软件的“tidyverse”代码包实现。

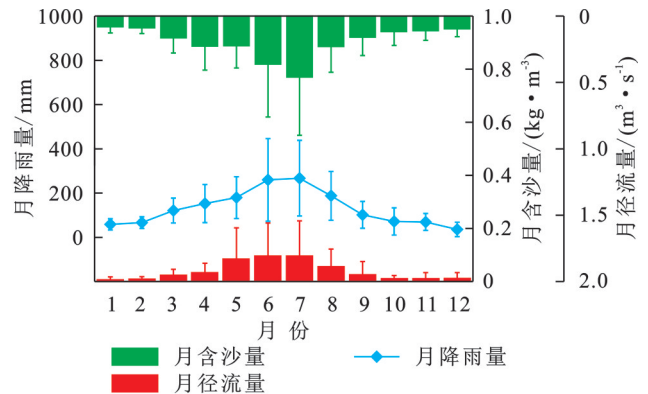


2 结果与分析

2.1 降雨径流泥沙特征

2.1.1 年际与年内尺度特征 2017—2023 年的年平均降雨量为 1 524.29 mm,年平均径流量为 0.22 m³/s,年平均产沙模数为 167.42 t/km²。2019 年发生的洪水事件仅 5 次,年降雨量与洪水事件时的降雨量是研究时段中最小的,分别为 910 mm,289.5 mm,该年的年平均径流量、洪水时的平均流量、洪峰流量、年产沙模数与洪水时产沙模数均为最小。2020 年洪水事件次数最多(25 次),其 Q_y 、 Q 、 Q_p 均为各年最高(0.43 m³/s、1.4 m³/s、6.13 m³/s)。然而,最大年产沙模数(Y_y)与洪水产沙模数(Y_s)出现在 2018 年,其中 Y_y 为 581.86 kg/m³,是其他年份平均值的 5.9 倍。洪水发生时的径流量是全年平均径流量的 4.8 倍,降雨量占全年降雨量的 59.45%,洪水事件的产沙模数贡献了全年产沙模数的 90% 以上(图 2)。

在年内尺度上,平均月降雨量为 130.84 mm,月平均流量为 0.193 m³/s,月平均含沙量为 0.038 kg/m³。降雨、径流、泥沙有着明显的季节变化,降雨主要集中于 4—8 月,月降雨量(P_m)均大于 150 mm。共 104 次洪水事件发生在 3—9 月间,占总洪水事件次数的 94.55%,仅有 6 次洪水事件发生于 10 月—次年 2 月。最大月平均降雨量为 267.2 mm,最大月径流量为 0.46 m³/s,最大含沙量为 0.1 kg/m³,均分布于 7 月(图 2)。



注: Q 表示洪水时的平均流量; Q_y 表示年平均径流量; Q_p 表示洪峰流量; Y_y 表示年产沙模数; Y_s 表示洪水事件的产沙模数; P_y 表示年降雨量; P 表示洪水事件的降雨量。

图 2 降雨、径流、泥沙特征指标的年际、年内变化特征

Fig. 2 Inter-annual and intra-annual variation characteristics of rainfall, runoff, and sediment indicators

2.1.2 洪水事件尺度特征 2017—2023 年共发生洪水事件 110 次,其中 97 次洪水事件产沙模数在 0~10 t/km²,发生频率为 88.18%,仅贡献了总产沙模数的 15.51%。10~50 t/km²间的洪水事件为 7 次,对总产沙模数的贡献率为 13.29%,>50 t/km²的洪水事件为 6 次,发生频率仅为 5.5%,但对产沙模数的贡献率达 71.2%。在径流方面,0~10 t/km²洪水事件的累积

径流深为 1 177.2 mm,径流贡献率 57.15%(图 2),径流系数为 0.25,10~50 t/km²间洪水事件的累积径流深为 296.7 mm,径流系数 0.37,>50 t/km²的洪水事件的累积径流深为 585.9 mm,径流系数 0.51。

2018 年 4 月 21 日的洪水事件为研究期内产沙模数最大洪水事件($Y_s=283.14$ t/km²),由 273 mm(P),9.7 mm/h(I)的降雨事件引发,产流历时为 48 h,径流

深为 121 mm,其高产沙模数主要归因于高径流量与高含沙量。发生于 2018 年 6 月 8 日的洪水事件含沙量最高(4.75 kg/m³),是最大洪水事件的 2 倍,但由于径流量相对较小,因此产沙模数仅为最大洪水事件的一半。随着产沙模数的下降,洪水事件的降雨、径流等特征指标均呈明显减小趋势,降雨、径流与泥沙关系密切。

2.2 降雨—径流—泥沙关系

为进一步量化降雨—径流—泥沙之间的关系,分别运用 RDA 与多元逐步回归揭示主要影响指标与建立回归模型。

2.2.1 冗余分析 RDA 结果显示,前两个 RDA 轴共解释了总方差的 68.62%,其中第一主坐标轴(轴 1)解

释了 62.38%,第二轴(轴 2)解释了 6.24%。 P 是影响径流指标最主要的影响因素,与各径流指标均呈显著的正相关关系($p < 0.01$)。 I 与 I_{30} 是影响 C 的主要因子, R 主要影响 Q_p 与 Q ,呈现显著的正相关关系。在降雨和泥沙特征指标间的分析结果中,前两个 RDA 轴累计解释了总方差的 35.73%,其中轴 1 解释了 33.69%,轴 2 解释了 2.04%, R 对泥沙特征指标的解释力为 85.3%,与 Y_s 呈现显著正相关关系,是 Y_s 的主要影响因子。 I_{30} 是 S 的主要影响因子。在径流和泥沙特征指标间的分析结果中, Q 是 Y_s 的主要影响因子。同时 Q 对泥沙特征指标的解释力达 89.7%(图 3)。综上所述, P 、 R 、 Q 是影响洪水事件泥沙的主要影响因子,相比于降雨与泥沙的关系,径流与泥沙间的关系更为密切。

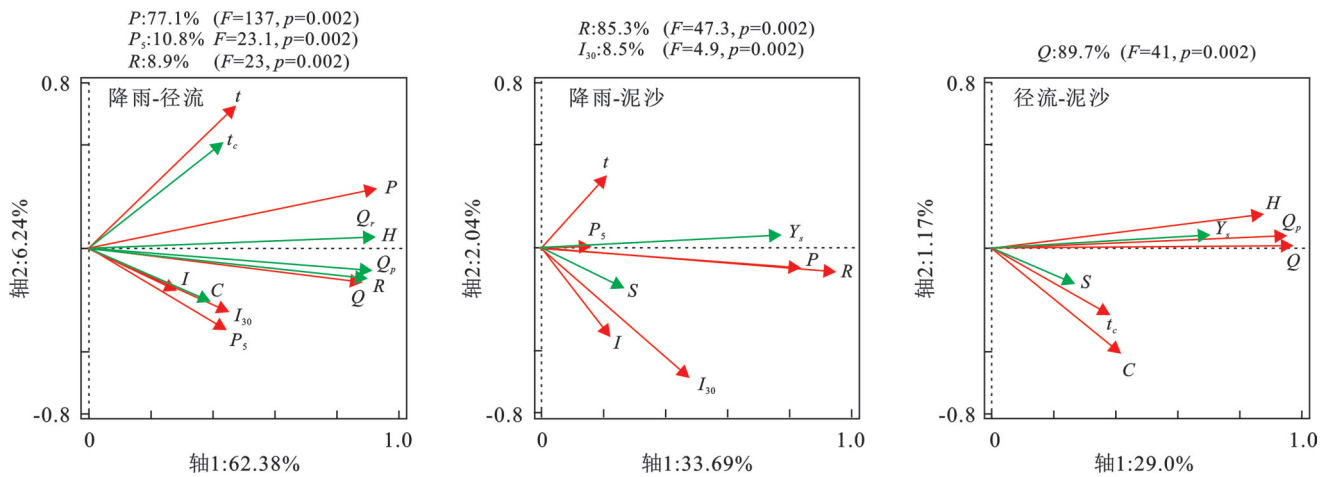


图 3 降雨、径流、泥沙间冗余分析结果

Fig. 3 Redundancy analysis results between rainfall, runoff, and sediment

2.2.2 多元逐步回归分析 总体上,降雨指标、径流指标、降雨—径流指标与 S 间的拟合关系较差,降雨、径流指标对含沙量的解释能力有限。其他降雨、径流与泥沙特征指标间的 R^2 均在 0.36 以上,且均达到极显著水平,拟合效果较好。降雨与径流指标间拟合关系整体较好,其中,降雨指标与 Q_p 、 Q 、 H 之间的拟合效果最好($R^2 = 0.87 \sim 0.90$), R 、 I_{30} 、 P 、 P_5 对径流指标的影响最为显著,表明降雨量和前期降雨条件是径流形成的关键驱动因素(表 2)。

相比于 S ,降雨、径流与 Y_s 间拟合关系更好($R^2 = 0.49 \sim 0.61$),在径流指标与 Y_s 的拟合方程中, Q 的系数为 26.57,表明径流量的增加会显著提高产沙量($R^2 = 0.49$),这与冗余分析的结果一致。降雨—径流指标与 Y_s 的 R^2 为 0.61,降雨和径流共同作用对产沙量的解释能力更强,其中 Q 和 I_{30} 是产沙量的主要影响因素(表 2)。

2.3 径流—泥沙间的滞回分析

2.3.1 不同滞回模式的降雨、径流与泥沙特征 根

据 HI 与滞回曲线,将洪水事件分为顺时针、逆时针、8 字型、复杂型与线型,其中顺时针模式的洪水事件 50 个,占比 45.87%,顺时针的 HI 平均值为 0.306,最大值为 0.596。其次为复杂型与 8 字型,分别为 24 个、12 个。滞回模式为逆时针的洪水事件较少,逆时针的 HI 平均值为 -0.216,最小值为 -0.536;8 字型、复杂型与线型的 HI 平均值分别为 0.074,0.182,0.053。

由图 4 可知,各滞回模式的降雨、径流、泥沙特征指标存在差异。作为流域主要的滞回模式,顺时针洪水事件的 R 与 I_{30} 平均值为 422.68 MJ·mm/(hm²·h·a),25.48 mm/h,明显高于其他滞回模式。顺时针模式的 H 与 Q 均显著高于逆时针,但逆时针的平均产沙模数明显高于其他滞回模式,为 14.11 t/km²,逆时针模式对泥沙贡献占比为 28.1%。复杂型模式的平均 T_c 、 P 、 Q_p 与 H 均最大,显著高于其他滞回模式。复杂型的 Y_s 仅次于顺时针的洪水事件。线型的平均 I 与 P_5 为 7.03 mm/h,13.68 mm,显著高于其他滞回模式。综上所述,平均产沙模数最大的 3 个模式依次为逆时

针、顺时针、线型。顺时针模式的降雨以高降雨侵蚀力、高 I_{30} 为特征,复杂型的降雨特征为长历时、高雨

量、高降雨侵蚀力。线型的降雨以高降雨强度与高 P_5 为特征。顺时针与复杂型的径流特征指标相对较高。

表 2 降雨、径流、泥沙特征指标间的多元逐步回归分析

Table 2 Multiple stepwise regression analysis among rainfall, runoff, and sediment indicators

自变量	因变量	拟合方程	R^2	p
降雨指标	t_c	$t_c = -1.79R + 18.64I_{30} + 25.91P + 0.34t + 740.85$	0.45	<0.001
	Q_p	$Q_p = 0.01R - 0.1I_{30} + 0.23P + 0.08P_5 + 0.37$	0.90	<0.001
	Q	$Q = 0.002R - 0.014I_{30} + 0.003P + 0.03P_5 + 0.385$	0.85	<0.001
	H	$H = 0.02R - 0.51I_{30} + 0.4P + 0.94P_5 - 0.003t - 4.57$	0.87	<0.001
	C	$C = 0.0001R + 0.01P_5 + 0.16$	0.36	<0.001
	Q_r	$Q_r = 171.94R + 4642.75I_{30} + 3682.7P + 8554.76P_5 - 23.63t - 41739.2$	0.87	<0.001
	S	$S = 0.005P - 0.0002t + 0.24$	0.08	<0.01
	Y_s	$Y_s = 0.06R - 1.04I_{30} - 0.005t + 17.47$	0.59	<0.001
径流指标	S	$S = -0.01H + 0.36Q + 0.0001t_c - 0.16$	0.07	<0.05
	Y_s	$Y_s = -32.16C + 26.57Q + 0.003t_c - 14.66$	0.49	<0.001
降雨—径流指标	S	$S = 1.205C - 0.01H + 0.01P - 0.0002t - 0.19$	0.12	<0.01
	Y_s	$Y_s = 14.09Q - 2.66Q_p + 0.004t_c + 0.07R - 1.11I_{30} - 0.01t + 9.31$	0.61	<0.001

2.3.2 不同滞回模式的典型洪水事件分析 本研究进一步选取每种滞回模式的典型洪水事件进行分析(图 5),顺时针的典型洪水事件 HI 为 0.216,含沙量与径流量在洪水事件开始 6~7.5 h 达到峰值,在上涨阶段, S/Q 大于 1,含沙量的增速大于径流量的增速,沙峰先于洪峰到达。逆时针的典型洪水事件 HI 为 -0.224,上涨阶段径流量与含沙量同时增加,含沙量与径流量在洪水事件开始 25~26 h 后达到峰值,沙峰与洪峰同时到达。与顺时针模式相比,在回落阶段,洪峰先于沙峰下降,含沙量下降速度小于洪峰。8 字型的洪水事件历时 48 h, HI 为 0.37,在上涨阶段与回落阶段, S/Q 均小于 1。复杂型的典型洪水事件历时 144 h,径流量与含沙量过程曲线呈双峰型变化,峰值分别在洪水事件开始 26 h 与 96 h 后到达。线型的洪水事件 S 与 Q 呈显著正相关关系 ($R^2=0.91$),径流量与含沙量同增同减, S/Q 在上涨阶段与回落阶段基本为 1。

3 讨论

3.1 洪水事件产流产沙特征及水沙关系

江子河小流域的洪水事件年均发生次数 15.7 次,其中 $>50 \text{ t/km}^2$ 的洪水事件发生频率仅为 5.5%,但对产沙模数的贡献率达 70% 以上。同时洪水时期的平均流量为 $0.93 \text{ m}^3/\text{s}$,是年均流量的 4.8 倍。 $>50 \text{ t/km}^2$ 的洪水事件是小流域产流产沙的主要事件。同时这种高产流产沙特征的洪水事件有明显的季节性,集中于夏季。最大月平均降雨量 267.2 mm,引发了 $0.46 \text{ m}^3/\text{s}$ 的最大月均流量和 0.096 kg/m^3 的最大月均含沙量,这种高度集中的水沙输移过程主要决定于小流域的降雨时间分布特征与小流域的地形水文特征。作为三面环山的完整型小流域,江子河小

流域汇流时间短、调蓄能力弱,径流泥沙对降雨的响应较为敏感。

降雨特征是影响洪水事件产流产沙的关键驱动因素^[24]。降雨量决定了对应洪水事件的径流量,而最大 30 min 雨强和雨前 5 日平均降雨主要影响径流系数,这与洪雨馨等^[17]的研究结果较为一致。径流系数是径流深与降雨量的比值,雨前 5 日平均降雨反映了降雨前的地表湿润程度,如果地表较为干燥,则在降雨发生时,降雨量在满足土壤入渗量后开始产生径流,径流系数相对较低,同时导致洪水峰值达到流域出口相对较晚。在本研究中,降雨侵蚀力对产沙模数的解释力达 85.3%,是产沙模数最主要的影响因子,而径流对产沙模数的解释度达 89.7%。降雨对泥沙的影响主要表现为降雨的动能和强度^[25],在降雨初期对土壤表面形成击溅侵蚀,促进了径流形成后对土壤的冲刷作用及泥沙运移,而径流是影响坡面产沙与泥沙输移的主要动力^[26]。因此,相比于降雨,径流与泥沙的关系更加密切,这与多数研究结果一致^[27]。洪水对泥沙的输移是降雨与径流综合影响的结果,本研究结果显示降雨联合径流指标构建的产沙模数回归方程优于降雨和径流单一指标构建的回归方程,这符合降雨与径流的耦合对泥沙输移过程的影响机制。

3.2 滞回模式的水沙过程滞后效应

江子河小流域的滞回模式以顺时针为主,高降雨侵蚀力、高泥沙贡献率与沙峰领先于洪峰的特性密切相关,表明强降雨条件下泥沙的快速响应是流域侵蚀的主要形式,同时产沙源地主要分布于小流域的中下游,重点集中于沟道区域。相比之下,逆时针模式虽仅占少数,但其更高的单位产沙模数 (14.11 t/km^2) 和沙峰滞后于洪峰的现象表明部分泥沙来源于小流域

中上游集水区域。虽然逆时针洪水事件较少,但同样的降雨条件下更远区域的泥沙仍能轻易地在洪峰的回落阶段被输移至流域出口,说明在上游区域可能存在易于搬运的松散堆积物。关于顺时针与逆时针两种滞回模式,有学者发现,顺时针模式在湿润气候的小流域中更常见^[28],而逆时针模式在干旱和半干旱地区更常见^[29],这与本研究的研究结果一致。盛菲等^[13]

在赣江的濂水流域研究表明洪水事件的滞回类型以8字型与复杂型为主,顺时针并不是主要的滞回模式,与本研究结果有所差异,这与小流域的下垫面及河网特征有关,其流域面积远远大于本研究的小流域面积,下垫面特征更为复杂,同时其流域存在众多中小型水库,对流域的汇流产沙过程形成干扰,使其汇流过程与沙源存在高度变异性。

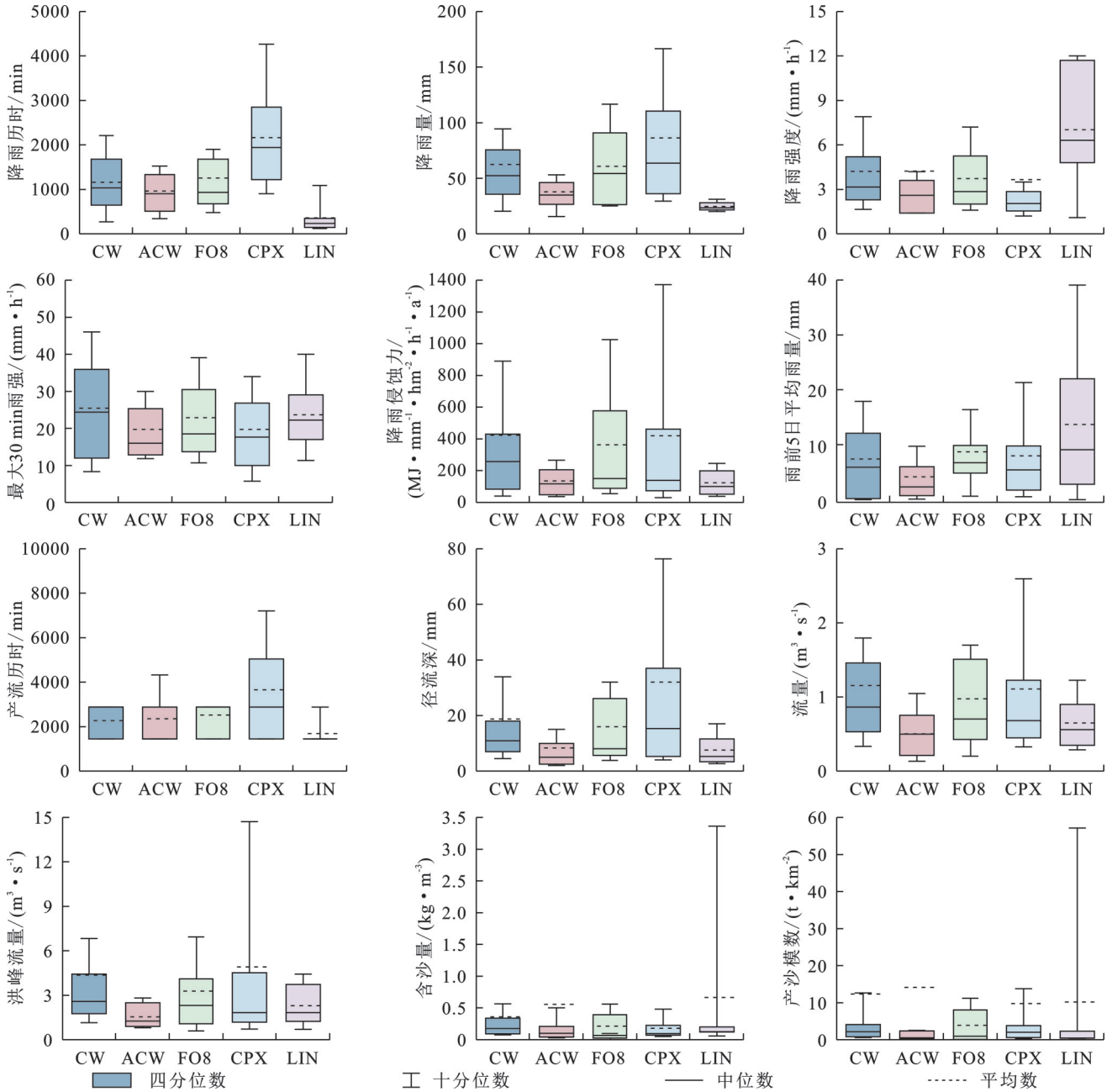


图 4 不同滞回模式的降雨、径流、泥沙指标统计特征

Fig. 4 Statistical characteristics of rainfall, runoff, and sediment indicators under different hysteresis models

复杂型滞回模式是仅次于顺时针的滞回模式,这种滞回模式体现出小流域多产沙源区并存与景观特征复杂性,流域的景观格局及其镶嵌组合特征直接影响了泥沙源的分布格局与复杂性,同时流域斑块中的泥沙是否易于输移也取决于该斑块的水文连通性^[30],进

而影响流域出口观测到的泥沙输移曲线特征。根据本研究的复杂型滞回模式的径流泥沙过程曲线(图5),复杂型存在多个洪峰与沙峰,这与Zou等^[12]的研究结果一致,可能是由于降雨事件的时空分布不均匀或降雨过程中降雨强度的变化有关,导致出现多次泥沙峰值。

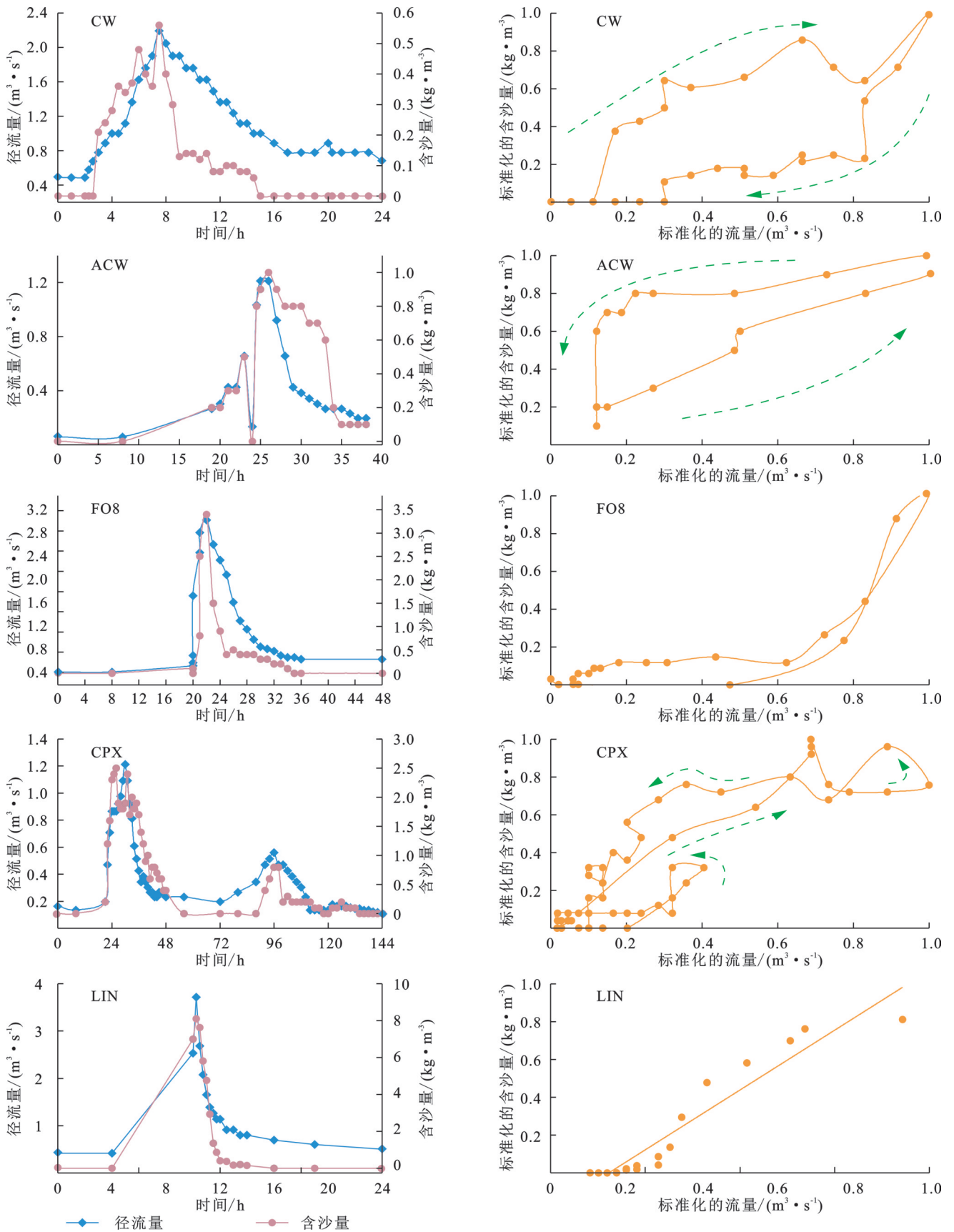


图 5 不同滞回模式的典型洪水事件径流泥沙过程及滞回曲线

Fig. 5 Runoff-sediment processes and hysteresis curves of typical flood events under different hysteresis models

滞回分析是推断小流域泥沙来源的有效途径, 然而, 滞回分析仅仅依靠洪水事件的径流与含沙量

数据的过程曲线分析小流域内产流产沙的源地, 未来可以进一步结合小流域土地利用、地形地貌、土壤

类型、水文连通性等下垫面特征进行分析,这有利于对小流域关键区域进行水土流失防治措施布设,提高小流域水土保持功能及管理效率。

4 结论

(1) 94.55%的洪水事件集中在3—9月,7月出现最大降雨、径流和含沙量,洪水事件是流域产流产沙的主要驱动力,洪水事件期间径流量是全年平均径流量的4.8倍,产沙模数占全年总量的90%以上,产沙模数大于50 t/km²的洪水事件(仅占5.5%)贡献了总产沙量的71.2%。

(2) 径流量对产沙量的解释力达89.7%($p < 0.001$),降雨量(P)和最大30 min雨强(I_{30})单独影响径流与含沙量,但降雨与径流的联合指标(如 $I_{30}+Q$)对产沙量的解释力($R^2=0.61$)优于单一指标,相比于降雨与泥沙的关系,径流与泥沙间的关系更为密切。

(3) 不同滞回模式的洪水事件在泥沙输移过程中表现出显著差异,顺时针滞回模式占比最高(45.87%),其降雨侵蚀力和径流量显著高于其他模式;逆时针模式的产沙模数最大,复杂型模式的降雨量和径流量最大。强侵蚀性降雨条件下泥沙的快速响应是流域侵蚀的主要形式,产沙源地主要分布于小流域的中下游沟道区域。

参考文献 (References):

- [1] Ge F, Zhu S P, Peng T, et al. Risks of precipitation extremes over Southeast Asia: does 1.5 °C or 2 °C global warming make a difference[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(4):044015.
- [2] Hu J F, Gao P, Mu X M, et al. Runoff-sediment dynamics under different flood patterns in a Loess Plateau catchment, China[J]. Catena, 2019, 173:234-245.
- [3] 李思璇,杨成刚,董炳江,等.长江上游高洪水期泥沙输移特性[J].长江科学院院报,2021,38(12):6-11.
Li S X, Yang C G, Dong B J, et al. Sediment transport characteristics during high floods in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(12):6-11.
- [4] 付滢,郑江坤,任雨之,等.降雨与植被变化对川中丘陵区典型小流域侵蚀产沙的影响[J].中国水土保持科学, 2019, 17(4):67-74.
Fu Y, Zheng J K, Ren Y Z, et al. Effects of rainfall and vegetation change on soil erosion and sediment yield in typical small watershed in hilly area of central Sichuan Basin[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4):67-74.
- [5] 芮孝芳.产流模式的发现与发展[J].水利水电科技进展, 2013, 33(1):1-6, 26.
Rui X F. The discovery and development of runoff formation models[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1):1-6, 26.
- [6] 刘春月,信忠保,秦瑞杰,等.1986—2018年黄土丘陵区典型小流域不同水文年水沙变化[J].水土保持研究, 2024, 31(1):126-135.
Liu C Y, Xin Z B, Qin R J, et al. Variation of runoff and sediment of the typical watershed in Loess Hilly Region in the different hydrological years during the period from 1986 to 2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1):126-135.
- [7] 郭军庭,张志强,王盛萍,等.气候和土地利用变化对潮河流域产流产沙的影响[J].农业工程学报, 2012, 28(14):236-243.
Guo J T, Zhang Z Q, Wang S P, et al. Effects of climate and land use changes on stream flow and sediment yield in Chaohe river basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(14):236-243.
- [8] Javed A, Hamshaw S D, Lee B S, et al. Multivariate event time series analysis using hydrological and suspended sediment data[J]. Journal of Hydrology, 2021, 593:125802.
- [9] Williams G P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers[J]. Journal of Hydrology, 1989, 111(1/2/3/4):89-106.
- [10] Lefrançois J, Grimaldi C, Gascuel-Oudou C, et al. Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments [J]. Hydrological Processes, 2007, 21(21):2923-2933.
- [11] Rovira A, Batalla R J. Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE SPAIN) [J]. Geomorphology, 2006, 79(1/2):58-71.
- [12] Zou Y W, Huang X, Hou M T, et al. Linking watershed hydrologic processes to connectivity indices on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2022, 216:106341.
- [13] 盛菲,刘士余,陈子惟,等.场次暴雨条件下濂水流域水沙关系探究[J].农业工程学报, 2023, 39(3):68-75.
Sheng F, Liu S Y, Chen Z W, et al. Exploration of the runoff-sediment relationship in Lianshui watershed in south Jiangxi of China under the condition of a single rainstorm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(3):68-75.
- [14] 田昌园,张红丽,汪军红,等.近30年皖西大别山土壤侵蚀时空变化及其对景观格局的响应[J].水土保持学报, 2024, 38(3):37-44.
Tian C Y, Zhang H L, Wang J H, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion and its response to landscape pattern in Dabie Mountains of western Anhui in recent 30 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):37-44.
- [15] 徐少杰,邓良,赵明松,等.安徽省1980—2020年土壤

- 侵蚀时空变化特征[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 109-116.
- Xu S J, Deng L, Zhao M S, et al. Spatial-temporal characteristics of soil erosion in Anhui Province from 1980 to 2020[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(1): 109-116.
- [16] 钟祎珣, 张晓明, 高超, 等. 大别山南麓裸地小区径流泥沙过程对降雨特征的响应[J]. 水土保持学报, 2023, 37(4): 132-141.
- Zhong Y X, Zhang X M, Gao C, et al. Response of runoff and sediment process to rainfall characteristics in bare land plots in southern foot of Dabie Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 132-141.
- [17] 洪雨馨, 姚蕊, 孙鹏, 等. 降雨和前期含水量对大别山区不同作物坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 53-59.
- Hong Y X, Yao R, Sun P, et al. Effects of rainfall and soil water content on runoff and sediment yield on different crop slopes in Dabie Mountain area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 53-59.
- [18] 江雯, 汪军红, 孙鹏, 等. 大别山区不同降雨和植被条件下梯地产流产沙特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 28-35, 43.
- Jiang W, Wang J H, Sun P, et al. Study on runoff and sediment characteristics of terrace land under different rainfall and vegetation conditions in Dabie Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 28-35, 43.
- [19] 张哲, 方政, 董智, 等. 鲁中南山区侵蚀性降雨及典型作物对坡面产流产沙影响研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2024, 46(1): 69-76.
- Zhang Z, Fang Z, Dong Z, et al. Effects of erosive rainfall and typical crops on slope runoff and sediment yield in mountainous area of central-south of Shandong Province[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2024, 46(1): 69-76.
- [20] Gao N N, Zhou J H, Zhang X L, et al. Correlation between vegetation and environment at different levels in an arid, mountainous region of China[J]. Ecology and Evolution, 2017, 7(14): 5482-5492.
- [21] 陈巧娥, 周继华, 来利明, 等. 青藏高原植被时空分布变化特征及驱动因素[J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(3): 322-335.
- Chen Q E, Zhou J H, Lai L M, et al. Spatiotemporal distribution change of vegetation and driving factors on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2025, 31(3): 322-335.
- [22] Jing T G, Zeng Y, Fang N F, et al. A review of suspended sediment hysteresis [J]. Water Resources Research, 2025, 61(1): e2024WR037216.
- [23] Tian P, Zhai J Q, Zhao G J, et al. Dynamics of runoff and suspended sediment transport in a highly erodible catchment on the Chinese Loess Plateau[J]. Land Degradation & Development, 2016, 27(3): 839-850.
- [24] 王如岩, 赵龙, 宋庆健, 等. 大汶河上游小流域降雨类型及其对产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 194-199, 209.
- Wang R Y, Zhao L, Song Q J, et al. Rainfall regimes and their influence on runoff and sediment yield at small watershed in upper reaches of dawen river[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 194-199, 209.
- [25] 马亚丽, 牛最荣, 张芮, 等. 洮河流域径流输沙演变与降雨及降雨侵蚀力的关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 90-97, 109.
- Ma Y L, Niu Z R, Zhang R, et al. Relationship between the evolution of runoff and sediment and rainfall and rainfall erosivity in the Taohe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 90-97, 109.
- [26] Zhang L T, Li Z B, Wang S S. Spatial scale effect on sediment dynamics in basin-wide floods within a typical agro-watershed: a case study in the hilly loess region of the Chinese Loess Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2016, 572: 476-486.
- [27] 王赫, 陈文祥, 李会光, 等. 南方红壤区典型水土流失治理小流域的洪水径流泥沙特征[J]. 农业工程学报, 2023, 39(15): 86-93.
- Wang H, Chen W X, Li H G, et al. Runoff and sediment characteristics of flood events in a typical soil and water conservation watershed in the red soil region of Southern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(15): 86-93.
- [28] Smith H G, Dragovich D. Interpreting sediment delivery processes using suspended sediment-discharge hysteresis patterns from nested upland catchments, southeastern Australia[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(17): 2415-2426.
- [29] 杨晨, 余冬立, 黄莹. 窟野河流域次降雨事件下水沙变化特征及其输移过程[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 52-60.
- Yang C, She D L, Huang X. Runoff and sediment characteristics and transport processes at rainfall event scale in Kuye River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 52-60.
- [30] 严增, 焦菊英, 唐柄哲, 等. 黄土丘陵沟壑区坡沟系统产流产沙对源-汇-路径格局的响应[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 118-127.
- Yan Z, Jiao J Y, Tang B Z, et al. Responses of runoff and sediment yield to the source-sink-path pattern in slope-gully system in the hill and gully Loess Plateau region, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(5): 118-127.