

洪水过程下的砂页岩山区小流域 污染物-水文响应规律

黄一鸣^{1,2}, 王志刚^{1,2*}, 王家乐^{1,2}, 李肖^{1,2}, 段文刚^{1,2}, 刘纪根^{1,2}

(1. 水利部西南山区中小河流与山洪灾害野外科学观测研究站, 430010, 武汉; 2. 长江科学院水土保持研究所, 430010, 武汉)

摘要:为揭示砂页岩山区小流域洪水驱动下污染物的输移特征与滞后机制,本研究监测了赤水河支流七里坎小流域2025年汛期洪水事件,系统分析了氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、总磷(TP)和总悬浮固体(TSS)的浓度变化及输出通量和滞后模式,并结合冗余分析识别了污染物的关键控制因子及输移路径差异。结果表明: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与TP的事件最大/最小浓度比值范围分别为1.3~3.0和1.3~3.8,而TSS比值达12.7~871.0,反映出颗粒物对洪水过程响应更为敏感。输移路径上, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 部分来源于壤中流及地下水补给,浓度峰多滞后于流量峰;TP以颗粒态形式存在,受地表侵蚀作用驱动显著,浓度峰出现较早;TSS则主要受远坡及沟道等慢响应源区控制,浓度峰滞后现象最为普遍。控制因子识别表明, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度主要受降雨强度影响,TSS浓度与前期土壤含水量关联密切,其输出通量由事件历时主导。滞后特征方面, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP的滞后指数(HI)与降雨强度呈正相关,而TSS的HI及冲刷指数(FI)则与洪峰流量及前期条件呈正相关。研究结果可为砂页岩山区小流域污染防控与水环境管理提供科学依据。

关键词:洪水过程;山区小流域;水文响应;污染物输移;滞后模式;面源污染;砂页岩

Pollutant-hydrological response patterns in a sandstone-shale mountainous catchment under flood events

HUANG Yiming^{1,2}, WANG Zhigang^{1,2*}, WANG Jiale^{1,2}, LI Xiao^{1,2}, DUAN Wengang^{1,2}, LIU Jigen^{1,2}

(1. Southwestern Mountainous Small and Medium-sized Rivers and Flash Floods Observation and Research Station, Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China; 2. Soil and Water Conservation Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: To reveal the transport characteristics and hysteresis mechanisms of pollutants driven by floods in a sandstone-shale mountainous catchment, this study monitored flood events during the 2025 wet season in the Qilikan Catchment, a tributary of the Chishui River. The variations in concentration, export fluxes, and hysteresis patterns of ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), total phosphorus (TP), and total suspended solids (TSS) were systematically analyzed, and redundancy analysis was employed to identify the key controlling factors for pollutants and the differences in their transport pathways. The results show that the event-based maximum/minimum concentration ratios for $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP range from 1.3 to 3.0 and 1.3 to 3.8, respectively, while that for TSS ranges from 12.7 to 871.0, reflecting that particulate matter is more sensitive to flood processes. Regarding transport pathways, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ originates partly from interflow and groundwater recharge, with its

收稿日期:2026-03-25 修回日期:2026-04-30

作者简介:黄一鸣,助理工程师,主要研究方向为小流域水土保持。

通信作者:王志刚,正高级工程师,主要研究方向为陆域生态与水环境效应、城市水土保持与工程水土流失防治、水土保持信息化等。E-mail: wangzg@mail.crsri.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41101191)。

concentration peaks generally exhibiting hysteresis relative to the flow peaks. TP, primarily in particulate form, is significantly driven by surface erosion, with its concentration peaks appearing relatively early. TSS is mainly controlled by slow-response source areas such as distant hillslopes and gullies, exhibiting the most prevalent hysteresis in sediment concentration peaks. The identification of controlling factors reveals that $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration is mainly influenced by rainfall intensity, while TSS concentration is closely related to antecedent soil moisture, and its export flux is dominated by event duration. In terms of hysteresis characteristics, the hysteresis index (HI) of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP is positively correlated with rainfall intensity, whereas the HI and flushing index (FI) of TSS are positively correlated with peak flow and antecedent conditions. The research results can provide scientific evidence for pollution control and water environment management in sandstone-shale mountainous catchments.

Keywords: flood event; mountainous catchment; hydrological response; pollutant transport; hysteresis pattern; non-point source pollution; sandstone-shale

中图分类号: TV11+S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2026)10-0046-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2026.10.006

一、引言

洪水过程是山区小流域溶质(如氮、磷等)及颗粒物从陆地向水体迁移的关键驱动力。洪水对表层土壤和基岩裂隙的强烈淋溶冲刷,导致过量养分进入河道,可能引发水体富营养化,其所挟带的大量泥沙也反映了流域水土流失强度,并可能破坏河道的调蓄结构与水生生态完整性。因此,开展基于洪水过程的污染物-水文响应规律研究,对于保障流域水质安全和维持生态系统稳定具有重要意义。

洪水涨落过程中,污染物浓度与流量间的异步变化所产生的滞后效应,是揭示流域养分与泥沙输移机制的关键窗口。通过刻画浓度-流量滞后回线轨迹,可有效辨识污染物输移路径及其来源:顺时针型反映坡面快速冲刷,逆时针型表明地下径流延迟释放或河床持续补给,“8”字形与复杂型则暗示多源复合贡献。随着滞后指数等量化指标的引入,该方法已能够定量支撑多事件、多参数的对比分析,推动污染溯源研究向更精确方向发展。

结合洪水事件内变化与事件间差异,分析污染物浓度、输出通量及滞后模式,可识别降雨强度、径流量与前期土壤含水量等关键水文控制因子。受地质构造、土地利用与污染源空间分布等本底特征的制约,污染物往往呈现出显著的区域差异。在陡峭湿润的砂页岩山区,洪水频发常诱发快速产流与强烈侵蚀,但相关研究仍相对匮乏。研究区七里坎小流域位于赤水河水系典型砂页岩山区,未经人工调蓄与工业化扰动,是研究近自然洪水过程的理想载体。针对汛期水土流失与农

业面源污染对当地水环境的威胁,本研究旨在分析氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、总磷(TP)和总悬浮固体(TSS)在洪水过程中的浓度变化及输出通量特征,通过滞后分析判别污染物来源与输移路径,使用冗余分析识别影响养分与泥沙动态变化的主要控制因子。

二、研究区概况

1. 区位、气候与下垫面特征

七里坎小流域位于赤水河支流水系内,流域面积 11.23 km^2 ,地处贵州省西北部的赤水市天台镇。该区域属亚热带季风性湿润气候,雨热同期,年均温度 18°C ,年均降水量 1289 mm ,其中70%以上的降水集中在6月—9月的丰水期。研究区主要地貌类型为高原峡谷和山原峡谷,主要岩体为砂页岩,主要土壤类型为紫色土。土壤中粉粒、砂粒和黏粒比例分别占全部土壤质地的50.2%、30.3%和19.5%,植被类型为亚热带常绿阔叶林。

2. 地形、植被与水系结构

研究区地形坡度范围为 $0.04^\circ\sim 65.69^\circ$,平均坡度为 16.97° ,整体地势较为陡峭,有利于坡面径流快速形成与土壤侵蚀的发生。植被盖度空间分异明显,研究区平均值为68.23%,其中森林覆盖区盖度最高可达100%,而部分裸露坡地及耕作区盖度较低($<30\%$),低盖度区是水土流失与面源污染的主要贡献区域。流域内河道上游发育一条主沟道和一条子沟道,沟谷深切,汇流路径较短,易引发山洪。主沟道比降较大,介于 $25.15\%\sim 27.50\%$,较大的比降赋予水流较强的输沙能力,是洪水迅速涨落、

泥沙及污染物快速输移的重要动力条件。

三、材料与方方法

1. 数据采集

2025年汛期,赤水河干流下游监测到1场洪水事件(7月9日—18日),水位与瞬时流量数据源自赤水水文站。7月6日—12日,七里坎小流域共监测到4场洪水事件,水文水质数据通过野外观测站采集。其中,气象数据由地面自动气象站采集,频率5 min/次,指标包括降雨量、气温和相对湿度等。径流数据由超声波雷达流量计采集,频率5 min/次,指标包括水位、瞬时流量和累计流量等。土壤含水量由土壤水分自动监测系统以4 h/次的频率采集。径流中NH₄⁺-N与TP浓度由氨氮-总磷在线监测仪以4 h/次的频率采集,TSS浓度由激光测沙仪以15 min/次的频率采集。

2. 数据处理与分析

将4场洪水事件分别命名为事件A、B、C、D。基于气象数据,计算降雨特征、径流特征和前期条件参数,包括降雨历时、降雨量、平均降雨强度、30 min最大降雨强度、洪水径流历时、总径流量、洪峰流量、基流流量、前3 d降雨量和前3 d平均土壤含水量(见表1)。

基于径流水质数据,计算洪水事件中NH₄⁺-N、TP和TSS的基流浓度和事件径流浓度范围。将水文与水质数据结合,计算事件径流中NH₄⁺-N、TP和TSS的加权平均浓度、平均输出通量和洪水径流负荷比。

加权平均浓度的计算公式为:

$$C_w = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{C_i Q_i + C_{i+1} Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i} \quad (1)$$

式中, C_w为洪水事件径流中污染物的加权平均浓度, mg/L或g/L; C_i、C_{i+1}为相邻采集时刻的污染物浓度, mg/L或g/L; Q_i、Q_{i+1}为与C_i、C_{i+1}对应的相邻径流流量, m³/s; Δt_i为相邻时刻的时间间隔, h; n为采集次数。

平均输出通量的计算公式为:

$$F_m = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{C_i + C_{i+1}}{2} \cdot \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i \quad (2)$$

式中, F_m为径流中污染物的平均输出通量, g/h或kg/h; t_{flood}为洪水事件历时, h。

洪水径流负荷比的计算公式为:

$$R_f = \left(\frac{C_{base} \cdot Q_{base} \cdot t_{flood}}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{C_i + C_{i+1}}{2} \cdot \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中, R_f为洪水径流中污染物负荷占总径流的比例; C_{base}为基流中污染物浓度, mg/L或g/L; Q_{base}为基流流量, m³/s。

洪水事件期间,污染物浓度(C)与径流流量(Q)的滞后效应由滞后指数(HI)与冲刷指数(FI)定量表征。HI适用于表征Q从基流时开始上升,达峰后再降回初始值的滞后循环,在此过程中C增加或减少。为便于事件间比较,首先将C和Q进行标准化处理:

$$C_{norm}(t) = \frac{C(t) - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad (4)$$

式中, C_{norm}(t)为t时刻污染物浓度的标准化值,取值范围为0~1; C(t)为t时刻的污染物浓度, mg/L; C_{max}和C_{min}分别为洪水事件中污染物浓度的最大值和最小值, mg/L。

$$Q_{norm}(t) = \frac{Q(t) - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (5)$$

式中, Q_{norm}(t)为t时刻流量的标准化值,取值范围为0~1; Q(t)为t时刻的流量值, m³/s; Q_{max}和Q_{min}分别为洪水事件中流量的最大值和最小值, m³/s。

然后,在根据实际采集频率确定的区间[i, j]上,计算函数C_{norm}(Q)的上升段(r)和下降段(f)的定积分A_{r, [i, j]}和A_{f, [i, j]}差值:

$$\Delta A_{[i, j]} = A_{r, [i, j]} - A_{f, [i, j]} = \int_i^j C_{r, norm}(Q) dQ - \int_i^j C_{f, norm}(Q) dQ \quad (6)$$

式中, ΔA_[i, j]为区间[i, j]内上升段与下降段的定积分之差;

表1 小流域洪水事件的水文参数

洪水事件	日期	降雨历时(h)	降雨量(mm)	平均降雨强度(mm/h)	30 min最大降雨强度(mm/h)	洪水径流历时(h)	总径流量(m ³)	洪峰流量(m ³ /s)	基流流量(m ³ /s)	前3 d降雨量(mm)	前3 d平均土壤含水量
A	7月6日—7日	4.6	35.5	7.7	44.4	18.4	30 422.9	1.1	0.065	0	0.291
B	7月7日—8日	0.3	23.2	77.3	46.4	23.5	108 997.5	15.7	0.232	35.5	0.300
C	7月8日—11日	16.3	49.7	3.0	18.0	56.8	453 417.0	20.4	0.252	58.7	0.322
D	7月11日—12日	1.4	7.4	5.3	14.6	22.5	40 344.8	0.9	0.240	50.1	0.370

$A_{r,[i,j]}$ 和 $A_{f,[i,j]}$ 分别为函数 $C_{r,norm}(Q)$ 和 $C_{f,norm}(Q)$ 在区间 $[i,j]$ 内计算的定积分; i,j 分别为积分的下限和上限。

最后,将所有区间的 $\Delta A_{[i,j]}$ 求和得HI:

$$HI = \sum_{k=1}^n \Delta A_{[i,j]} \quad (7)$$

式中, k 为参与求和的区间序数; n 为区间总数;HI的取值范围为 $-1 \sim 1$,其绝对值表示滞后回线的大小。

FI被用于描述基流流量和洪峰流量之间的污染物浓度差异,同样经过标准化处理:

$$FI = C_{Q_{peak,norm}} - C_{Q_{base,norm}} \quad (8)$$

式中, $C_{Q_{peak,norm}}$ 和 $C_{Q_{base,norm}}$ 分别为洪峰流量和基流流量的标准化污染物浓度;FI的取值范围为 $-1 \sim 1$ 。FI>0表示上升段的污染物浓度升高,说明存在冲刷作用;反之说明存在稀释作用。

本研究使用冗余分析探究了水文参数与水质参数的输出及滞后特征关系。水文参数由Pearson相关分析筛选,作为冗余分析的解释变量。数据处理与统计分析使用SPSS Statistics 26.0和Excel 16.0,图表绘制使用Origin 10.1和Canoco 5.0。

四、结果与讨论

1. 洪水事件的水文特征

本研究中,除事件A因与事件B连续发生而提前结束外,其余洪水事件均始于降雨、止于流量回落至低于基流增幅20%,洪水径流则界定于流量超过基流增幅20%之后。图1表明,七里坎小流域洪水事件与赤水河干流的响应过程差异显著。干流洪水事件历时达222.2 h,洪峰出现于7月10日3:30,水位达231.68 m,相应洪峰流量为5100 m³/s。七里坎小流域洪水事件的最大洪峰(7月9日14:05)则出现在事件C中,水位和流量分别为0.85 m和20.4 m³/s,较干流洪峰提前了13.4 h。

4场小流域洪水事件中,事件B的平均降雨强度(77.3 mm/h)和30 min最大降雨强度(46.4 mm/h)最大,事件D的前3 d平均土壤含水量最高(0.370),事件C则在其余水文参数中均取得最大值。事件C之所以产生比雨强最大的事件B更持续且显著的径流

响应,在于其高雨量和长历时充分激活了汇流路径,同时其更大的基流流量与前期降雨量提供了更为充足的水分来源。事件A的各项降雨特征参数均大于事件D,但总径流量与径流历时反而不及,说明在降雨强度尚未达到流域超渗产流阈值时,前期土壤含水量对径流产生的影响超过外部降雨条件,是决定产流规模的关键制约因素。

2. 洪水事件水质参数的输出特征

4场洪水事件中污染物浓度与径流量的响应关系呈现不同类型(见图2、图3)。事件A与事件D的TSS浓度变化趋势与径流量基本一致,峰值滞后时间较短,分别为1.9 h和1 h,表明颗粒物主要受水力冲刷控制,响应迅速。但在溶质方面,事件A的NH₄⁺-N和TP浓度整体呈上升趋势,而事件D则保持平稳。这可能源于两者前期条件的差异:事件A发生前土壤干燥,初期径流以冲刷为主,随着汇流路径激活,后期淋溶作用增强导致溶质浓度持续上升;事件D则因前期土壤含水量高,径流产生迅速且以饱和流为主,溶质浓度在径流全过程被充分稀释而保持平稳。

事件B表现出明显的滞后特征,污染物浓度峰值均大幅滞后于径流量。其中,TSS峰值滞后8.4 h, NH₄⁺-N和TP峰值更是滞后达12.4 h。高强度降雨使

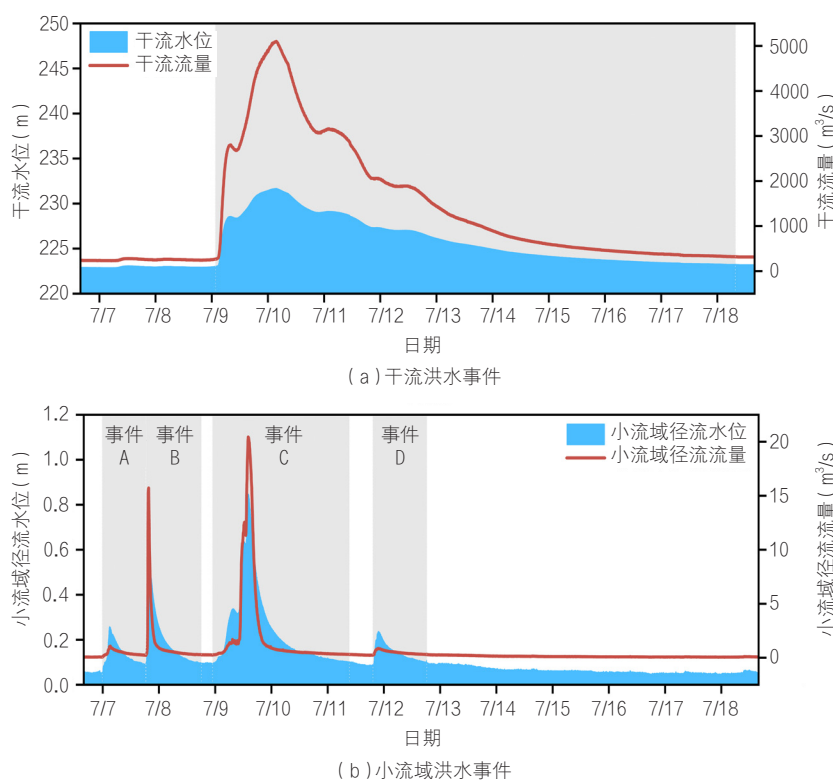


图1 洪水期间赤水河干流与七里坎小流域径流水位、流量的时序变化

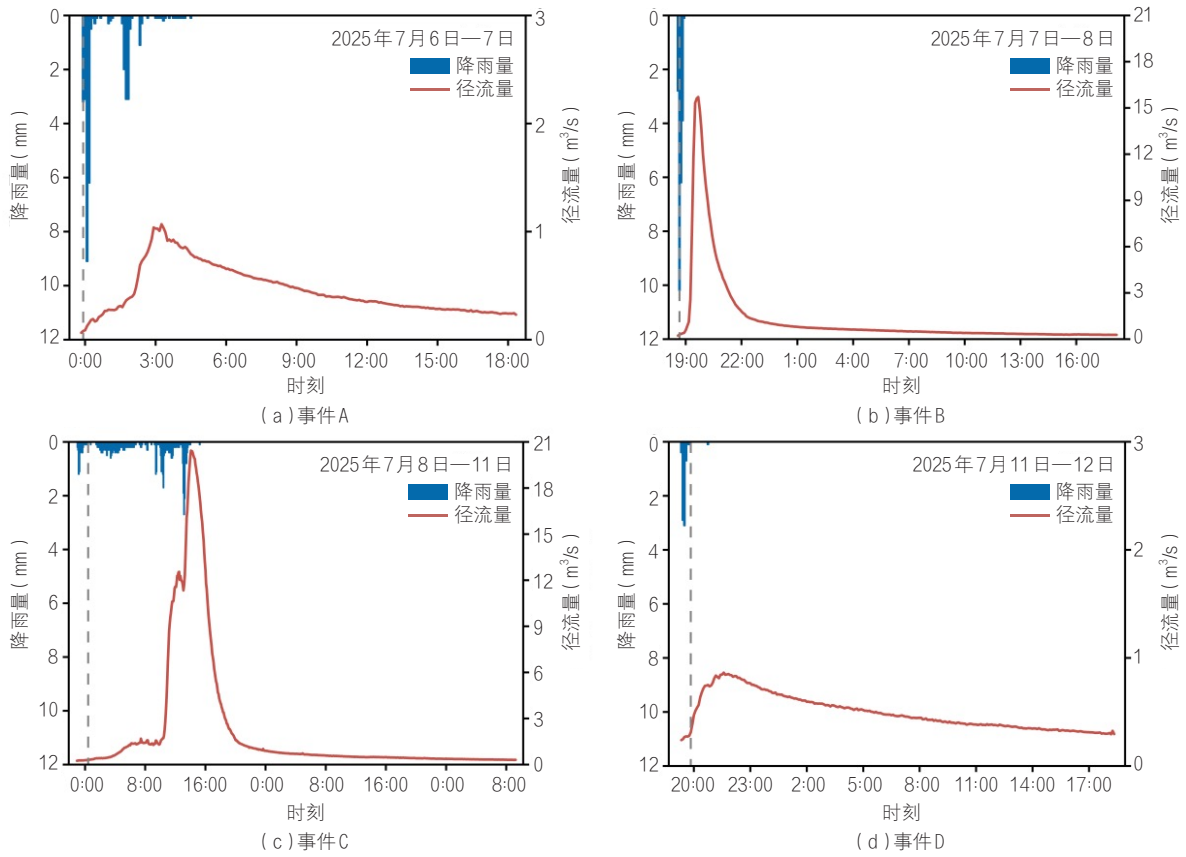


图2 洪水事件中降雨量、径流量的时序变化

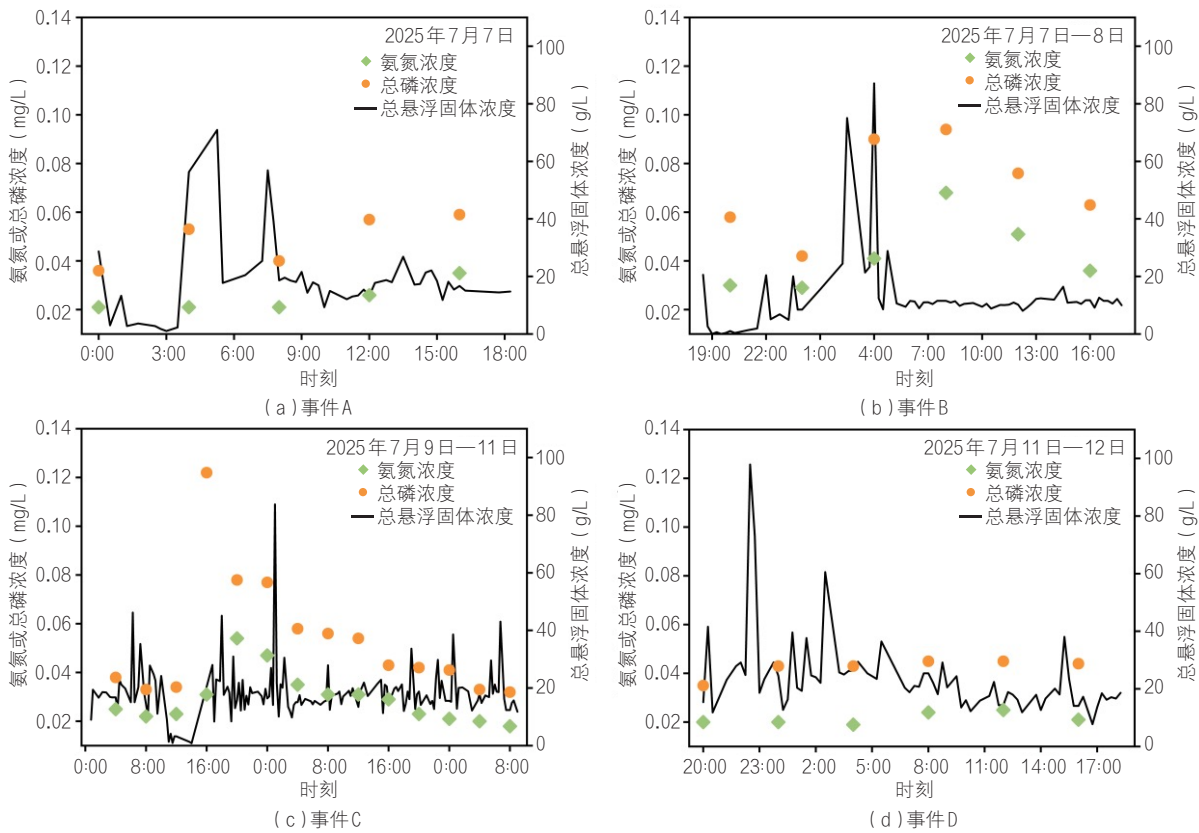


图3 洪水事件中氨氮、总磷和总悬浮固体浓度的时序变化

颗粒物在雨滴击溅下剥离,却因历时过短未能被径流及时带走,而地表径流消退后,汇流路径上滞留的污染物才由后续缓慢的漫流挟带至出口,导致浓度峰值严重滞后。事件C则呈现差异化滞后,TSS滞后时间最长(10.9 h),而 NH_4^+-N 滞后5.9 h和TP滞后1.9 h的响应相对较快。这归因于长历时径流持续淋溶表土促进了溶质的快速迁移,而颗粒物需依赖平缓径流对远源沉积物的缓慢冲刷,输移过程更为滞后。

不同洪水事件中, NH_4^+-N 和TP的事件最大/最小浓度比值较小且变化平稳(NH_4^+-N :1.3~3.0;TP:1.3~3.8),而TSS比值显著更高且事件间差异明显,事件A~D分别为70.9、871.0、93.0和12.7(见表2)。这表明溶质在流域内的供给相对稳定,而颗粒物的来源和运移变异性大,浓度对洪水响应更敏感。 NH_4^+-N 、TP和TSS的最大加权平均浓度分别出现在事件B(0.034 mg/L)、C(0.074 mg/L)和D(25.6 g/L)中,而三者的最大平均输出通量(272.8 g/h、613.8 g/h和97 200.5 kg/h)则全部集中于事件C。这基于事件

C的最大径流量主导了所有污染物的输出负荷,反映出径流量是控制污染物输出通量的最终决定因素。

从洪水径流负荷比来看,事件A、B、C中洪水径流对溶质输移的贡献显著高于基流,而事件D中两者相近。这表明洪水径流虽在多数事件中对溶质输移起主导作用,但这一地位易受高前期土壤含水量而削弱。此外,事件B和D的洪水径流泥沙负荷占比仅分别为45.0%和28.9%,均低于基流,说明颗粒物输移对降雨特性同样敏感,短降雨历时(事件B)或高前期土壤含水量(事件D)均可能导致洪水径流输沙贡献偏低。

3.洪水事件水质参数的滞后特征

4场小流域洪水事件的水质参数呈现逆时针形(占比1/2)、“8”字形(1/3)和复杂型(1/6)三种滞后模式(见表3)。其中,仅有事件B的 NH_4^+-N 和TP出现正HI值(0.05、0.13)及负FI值(-0.13、-0.02)。从过程来看,事件B流量上升期和下降期前半段的溶质浓度持续下降,表明强烈的稀释效应掩盖了潜在的污

表2 洪水事件径流中氨氮、总磷和总悬浮固体的输出特征

输出特征	事件	氨氮	总磷	总悬浮固体
基流浓度 (mg/L 或 g/L)	A	0.022	0.045	20.5
	B	0.035	0.059	20.6
	C	0.025	0.039	15.4
	D	0.020	0.036	14.9
洪水事件径流浓度范围 (mg/L 或 g/L)	A	0.021~0.035	0.036~0.059	1.0~70.9
	B	0.029~0.068	0.042~0.094	0.1~87.1
	C	0.018~0.054	0.032~0.122	0.9~83.7
	D	0.019~0.025	0.035~0.045	7.7~97.9
加权平均浓度 (mg/L 或 g/L)	A	0.023	0.050	18.8
	B	0.034	0.062	6.4
	C	0.029	0.074	10.2
	D	0.021	0.043	25.6
平均输出通量 (g/h 或 kg/h)	A	40.1	83.9	31 707.4
	B	183.9	309.4	31 303.9
	C	272.8	613.8	97 200.5
	D	37.7	75.5	45 871.0
洪水径流负荷比 (%)	A	87.2	87.5	84.9
	B	84.1	84.1	45.0
	C	91.7	94.2	85.6
	D	54.1	58.7	28.9

注:氨氮和总磷的浓度单位均为mg/L,输出通量单位为g/h;总悬浮固体的浓度单位均为g/L,输出通量单位为kg/h。

染物补给过程。短历时高强度降雨结束后,径流量恢复平稳,富含 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的壤中流与地下水补给占比上升,同时磷素已大量进入河道,二者共同导致溶质浓度在事件末期迅速升高,形成“8”字形滞后。

事件A、C、D中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的FI普遍低于TP,反映了两者来源与响应机制的差异。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 部分来自壤中流与地下水,输移明显滞后于地表径流,浓度峰延迟出现。TP则以颗粒态为主,流量上升段受地表侵蚀与坡面冲刷强烈驱动,大量颗粒迅速进入河道,待易冲刷的颗粒源耗尽或沉降后浓度下降。

所有事件TSS的HI值均小于0,表明研究区泥沙浓度峰普遍滞后于流量峰,TSS主要受远坡与深沟等慢响应源区控制,而地表即时冲刷的贡献有限。值得注意的是,前期土壤含水量最高的事件D,其FI值为4场事件中唯一的正值,可能与饱和流主导的产流机制提供了相对快速的TSS源补给有关。

受山区坡陡流急的地貌控制,小流域汇流时间极短,洪水响应较干流更敏感,常呈现洪峰高、涨势猛的洪水特征。这一水文背景下,降雨特征、径流特征及前期条件参数对污染物输移与滞后的耦合作用更趋复杂。冗余分析表明,轴1和轴2共同解释了响应变量中的绝大多数变异,其中输出特征为99.9%,滞后特征为96.2%。由图4a可知, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的加权平均浓度受降雨强度影响较大,因其提供的快速淋溶和优先流动力可将表土 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 直接冲刷入河。TSS的加权平均浓度与前期土壤含水量的相关性更高,其平均输出通量则受事件历时主导,反映出高前期土壤含水量与长事件历时共同

保障了产流和持续径流,为泥沙提供了充足来源和稳定输移载体。

已有研究表明,高强度降雨对土壤表面的击溅作用及其触发的优先流,能够增强富集于表土溶质的源释放强度并激活快速输移通道,从而缩短溶质浓度峰相对于流量峰的滞后时间。本研究中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP的HI值与降雨强度的正相关关系印证了这一机制(见图4b)。与溶质不同,TSS主要受远坡与深沟等慢响应源区控制,其输移需依赖前期水分激活远处与深处的泥沙源区,维持较高的流域连通性,并借助足够大的流量提供持续动力。这体现为TSS的HI及FI值与洪峰流量及前期条件的正相关关系。此外,小流域所处的砂页岩地区具有土壤薄、沟道长与易风化等特点,有利于优先流发育和远源泥沙形成,为理解该区域不同污染物输移机制的差异性提供了重要的地貌背景支撑。

五、结论

本研究基于2025年汛期洪水监测数据,分析了砂页岩山区小流域 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP和TSS的输出特征。受下垫面影响,溶质($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP)供给相对稳定(最大/最小浓度比值分别为1.3~3.0和1.3~3.8),而颗粒物(TSS)来源变异性大,对洪水响应更敏感(最大/最小浓度比值12.7~871.0)。降雨历时、降雨量和前期土壤含水量是主导洪水水文特征的关键因素。

滞后分析揭示了污染物输移路径差异。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 部分来自壤中流与地下水,浓度峰滞后;TP以颗粒态为主,

表3 洪水事件中水质参数的滞后特征

水质参数	事件	滞后指数(HI)	冲刷指数(FI)	滞后模式
氨氮	A	-0.11	0	逆时针形
	B	0.05	-0.13	“8”字形
	C	-0.55	0.17	逆时针形
	D	-0.23	0	“8”字形
总磷	A	-0.05	0.74	“8”字形
	B	0.13	-0.02	“8”字形
	C	-0.66	0.93	逆时针形
	D	-0.48	0.80	逆时针形
总悬浮固体	A	-0.21	-0.40	逆时针形
	B	-0.02	-0.01	复杂型
	C	-0.14	-0.10	逆时针形
	D	-0.05	0.14	复杂型

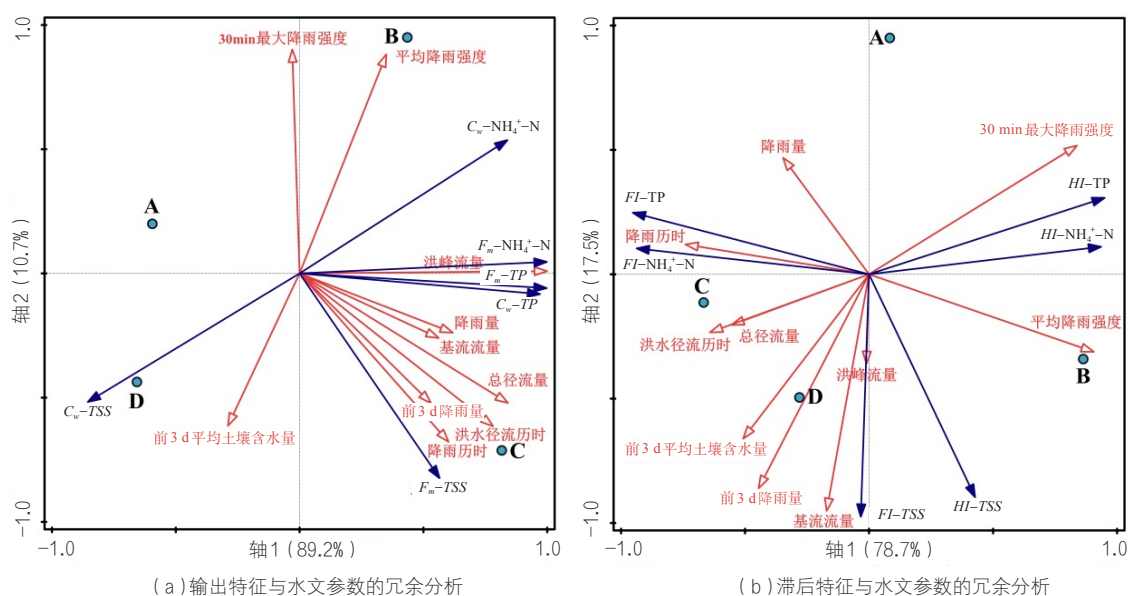


图4 洪水事件水质参数的输出特征及滞后特征与水文参数的冗余分析

受地表径流快速冲刷,浓度峰较早;TSS主要受慢响应源区控制,滞后最为普遍。冗余分析表明, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度受降雨强度主导,而TSS浓度与前期土壤含水量密切相关且输出通量受事件历时控制,说明泥沙释放需依赖高前期土壤含水量激活流域连通性,并由长历时洪水持续冲刷输移。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP的HI值与降雨强度正相关,而TSS的HI及FI值与洪峰流量及前期条件正相关,体现了砂页岩山区小流域连通性与径流动力对泥沙输移的双重制约。

综上,本研究揭示了砂页岩山区小流域洪水过程中污染物的响应规律及控制机制,可为该区域污染控制与水环境管理提供科学依据。未来需进一步开展对各种氮/磷组分的洪水事件尺度监测和机制研究,以深化对污染物迁移转化规律的认识。

参考文献:

- [1] 周平,汤璞,何希山,等.小流域山洪灾害预警及危险区分析[J].南昌工程学院学报,2025,44(4):14-20+49.
- [2] WANG L, LI Y, WU J J, et al.Effects of the Rainfall Intensity and Slope Gradient on Soil Erosion and Nitrogen Loss on the Sloping Fields of Miyun Reservoir[J].Plants, 2023, 12(3):423-429.
- [3] 姚仕明,何子灿.长江中下游江湖演变规律及其影响效应[J].长江科学院院报,2025,42(1):1-10.
- [4] SPEIR S L, ROSE L A, BLASZCZAK J R, et al.Catchment

concentration - discharge relationships across temporal scales: A review[J].WIREs Water, 2024, 11(2): e1702.

- [5] 杨彩玲,胡砚霞,于兴修,等.孟良崮小流域径流与磷素传输动态关系[J].水土保持学报,2025,39(1):46-55.
- [6] 刘晓荣,杜新忠,刘新茹,等.典型降雨事件下流域磷流失特征与影响因素[J].长江科学院院报,2025,42(5):81-87+103.
- [7] 李冲,檀康达,郑文波,等.白洋淀流域厚包气带硝态氮迁移转化过程及其主控因素[J].中国生态农业学报(中英文),2025,33(2):314-323.
- [8] 杨源峰,韦慧,王建羽,等.喀斯特区两种岩性发育土壤入渗特征及其影响因素[J].农业现代化研究,2023,44(6):1103-1116.
- [9] 顾再柯,黄森,黄金权,等.赤水市大石河小流域不同土地利用类型汛期产流产沙特征[J].中国水土保持,2025(1):68-71+75.
- [10] 张多鹏,刘洋,李正飞,等.长江上游支流赤水河流域底栖动物物种多样性与保护对策[J].生物多样性,2023,31(8):60-72.
- [11] 张蒙,胡桂清,张文太,等.长期植被覆盖对紫色土坡面减流减沙能力的影响[J].水土保持研究,2024,31(5):164-172.
- [12] 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.

- [13] LI X, WANG J, LIN J, et al. Hysteresis analysis reveals dissolved carbon concentration-discharge relationships during and between storm events[J]. *Water Research*, 2022, 226: 119220.
- [14] 薛志春, 刘绍辰, 李永坤, 等. 永定河斋堂水库流域产流规律及前期降雨影响分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(5): 625-631.
- [15] 史志华, 刘前进, 张含玉, 等. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1117-1127.
- [16] 王正发, 刘昆让, 侯精明, 等. 不同空间尺度下径流控制率与污染物负荷削减率协同关系——以陕西省西安市西咸新区为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2025, 47(3): 526-536.
- [17] 石浩洋, 杨文俊, 郭辉, 等. 水沙调控背景下长江中游水沙变化及水体营养环境特征分析[J]. *中国水利*, 2025(21): 25-31.
- [18] 陈咏诗, 朱海, 杨旭, 等. 沙颍河下泄污水的降解与稀释特性对西淝河取水口水质的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(6): 29-36.
- [19] WINTER C, NGUYEN T V, MUSOLFF A, et al. Droughts can reduce the nitrogen retention capacity of catchments[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, 27(1): 303-318.
- [20] 邱业, 曲芝旭, 韩玉国, 等. 模拟降雨条件下肥料类型对坡面磷素流失的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 106-112.
- [21] 淡彩虹, 许欢欢, 王兵, 等. 模拟降雨下前期含水量对黄绵土坡面产流产沙过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 31-36.
- [22] 孙生龙. 面向山溪性河流洪水的城镇防洪规划研究[J]. *水利科技与经济*, 2025, 31(7): 134-139.
- [23] 苏童童, 阳辉, 王基扬, 等. 我国优先流影响因素及其生态水文效应研究进展[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2025, 33(11): 2107-2117.
- [24] 赵利祥, 郭忠录, 聂小飞, 等. 极端降雨事件对南方红壤区径流和输沙的影响——基于赣江支流濂江上游流域的长序列分析(1984—2020年)[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(6): 2133-2143.
- [25] 张昭, 祝良玉, 李光耀, 等. 表征雨水在土体裂隙内优势入渗过程的解析模型[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(9): 1831-1840.
- [26] 徐勤学, 李洋洋, 付智勇, 等. 西南喀斯特流域泥沙来源研究进展[J]. *地质学报*, 2025, 99(11): 3701-3711.
- [27] 王晓摇, 樊秀峰, 简文彬, 等. 碎石土细颗粒迁移特征及优先流形成路径[J]. *工程地质学报*, 2024, 32(2): 387-396.

责任编辑 杨文杰