

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.026; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.026.

杨晨, 余冬立, 黄萱. 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 Chen, She Dongli, Huang Xuan. 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.

窟野河流域次降雨事件下水沙变化特征及其输移过程

杨晨, 余冬立, 黄萱

(河海大学 农业科学与工程学院, 南京 211100)

摘要: [目的] 深入分析黄土高原粗沙区流域次降雨事件尺度下水沙动态变化特征及其输移过程, 为黄土高原粗沙区流域的水沙管理和调控提供重要科学依据。 [方法] 以黄土高原中游粗沙多沙区窟野河流域为对象, 收集 2006—2019 年间的 160 场次降雨事件水沙数据。通过运用方差分析、水沙关系曲线、滞后分析等方法, 比较位于窟野河及其子流域次降雨事件下产流输沙特征, 构建了各流域次降雨事件尺度下水沙关系曲线, 分析了水沙滞后关系及滞后指数的空间差异, 以揭示次降雨尺度下窟野河流域的水沙输移过程。 [结果] (1) 4 个流域径流相关参数无显著差异, 但泥沙相关参数差异显著; (2) 位于窟野河上游东部的新庙流域水沙相关性强, 表征外界人为干扰的参数(a)最大, 位于上游西部的王道恒塔流域泥沙浓度低, 水沙相关性弱, 表征河流本身输沙能力的参数(b)最大; (3) 新庙、王道恒塔和温家川 3 个流域的主要滞后模式为逆时针型, 泥沙来源于上游区域, 且高含沙降雨事件的滞后系数(HI)平均值多为负; 而神木流域的主要滞后模式为“8”字型, 指示泥沙来源相对接近流域出口, 且高含沙降雨事件的 HI 平均值多为正。 [结论] 窟野河嵌套流域次降雨事件尺度下水沙变化空间差异显著, 泥沙输移过程复杂, 不同子流域滞后模式揭示了泥沙来源和输移机制的空间异质性。

关键词: 次降雨事件尺度; 输移过程; 水沙关系; 滞后分析

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0052-09

Runoff and sediment characteristics and transport processes at rainfall event scale in Kuye River Basin

Yang Chen, She Dongli, Huang Xuan

(College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: [Objective] This study aims to provide significant scientific evidence for the management and regulation of water and sediment in the watersheds in coarse sand areas of the Loess Plateau by conducting an in-depth analysis of the characteristics of sediment and water dynamics and their transfer processes at the sub-rainfall event scale in the watersheds in coarse sand areas of the Loess Plateau. [Methods] Kuye River Basin in the coarse sand region of the Loess Plateau was selected as research site, water and sediment data from 160 rainfall events between 2006 and 2019 were collected. Variance analysis, sediment-rating curves, and hysteresis analysis were utilized to compare the runoff and sediment transport characteristics during sub-rainfall events in the Kuye River Basin and its sub-watersheds, to construct sediment-rating curves at the sub-rainfall event scale for each watershed, to analyze the spatial differences in the hysteresis relationship and hysteresis index of water and sediment, and to reveal the transfer processes of water and sediment in the Kuye River Basin at the sub-rainfall scale. [Results] (1) There were no significant differences in runoff-related parameters among the four watersheds, but significant differences were observed in sediment-related

收稿日期: 2024-04-12

修回日期: 2024-06-29

接受日期: 2024-07-15

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“基于流域水文连通性的面源磷流失关键源区识别”(42007053)

第一作者: 杨晨(2000—), 女, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: yc000928@163.com

通信作者: 黄萱(1992—), 女, 安徽铜陵人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: xuan@hhu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

parameters. (2) The Xinmiao watershed in the eastern upper reaches of the Kuye River showed a strong correlation between runoff and sediment, with the parameter (a) indicating the degree of external anthropogenic interference being the highest, while the Wangdaohengta watershed in the western upper reaches had a low sediment concentration and weak runoff-sediment correlation, with the parameter (b) representing the river's own sediment transport capacity being the highest. (3) The primary hysteresis pattern in the Xinmiao, Wangdaohengta and Wenjichuan watersheds was anti-clockwise, indicating that sediment originated from the upper reaches and the average value of the high sediment concentration Hysteresis Index(HI) was mostly negative. In contrast, the Shenmu Watershed's primary hysteresis pattern was 8-shaped pattern, indicating that sediment sources were relatively close to the watershed outlet, and the average HI value for high sediment concentration rainfall events was mostly positive. [Conclusion] The nested watersheds of the Kuye River exhibit significant spatial differences in water and sediment changes, and the sediment transport process is complex. The hysteresis patterns in different sub-watersheds reveal the spatial heterogeneity of sediment sources and transport mechanisms at rainfall event scale.

Keywords: rainfall event scale; transport processes; SSC-Q relationships; hysteresis analysis

黄土高原地区是中国土壤侵蚀最为严重的区域之一,其大量泥沙输入黄河中游,导致黄河成为全球含沙量最高的河流之一,其多年平均输沙量高达 16 亿 t,占全球河流泥沙总量的 6%^[1]。深入研究流域水沙动态及其输移过程,对于理解流域侵蚀作用、水沙运动规律,以及识别潜在的泥沙源区具有重要意义^[2]。但目前的研究多集中于年际尺度上的水沙变化分析^[3-5],而针对次降雨事件尺度的研究则相对较少。实际上,年际尺度的研究可能无法充分揭示次降雨事件尺度上的产流输沙特征,因为在这一尺度上,径流量和泥沙量的频率和强度变化往往比年平均值的变化更为显著^[6]。此外,个别极端降雨事件会产生黄土高原部分流域每年 40%~90%土壤流失^[7],因此,基于次降雨事件尺度的流域产流产沙的分析,对于揭示流域内部泥沙输移过程、阐明流域径流的调节机制和侵蚀产沙机制具有重要价值^[8]。

流域作为水循环相对独立的自然单元,侵蚀产沙自成完整体系:侵蚀泥沙从坡面、沟道等处经降雨径流分离,被搬运至流域出口,经历了复杂的分离、搬运和沉积过程^[9]。为了揭示流域内部侵蚀泥沙复杂的分离、搬运和沉积过程,以往研究方法包括小区观测法、野外调查法、水文资料分析法等。小区观测法方法成熟,与人工模拟降雨器结合易获得大量数据,但样地较小,无法反映环境要素和水文过程的时空变异^[10];野外调查适于从宏观上把握泥沙来源,但精度不高,且费时费力^[11];指纹识别技术是综合研究流域土壤侵蚀和泥沙输移的方法,具有便捷、经济、高效等优点,但该技术采样存在不确定性,同时也不适用于面积较大的流域^[12]。流域一般只能获得出口一个点的泥沙数据,通过降雨期间径流与泥沙的高频监测数

据揭示流域内部泥沙输移过程成为近期研究热点之一^[13-15]。滞后模式本质上揭示了次降雨事件期间流域产流与产沙的差异,是决定次降雨事件流量、流域侵蚀和泥沙输送的过程和控制因素相互作用的结果,通过分析径流-泥沙滞后曲线,发现泥沙浓度上升曲线主要取决于土壤分离过程,下降曲线主要取决于泥沙输移过程^[16],不同滞后模式可以解释泥沙输移过程在时空方面的联系和泥沙供给在时空方面的来源^[17]。通过分析嵌套流域的上下游流域水沙特征以及水沙关系的差异,可以进一步揭示流域水沙输移过程与泥沙来源分布空间特征。

作为黄河中游主要干流之一的窟野河流域,占黄河流域面积小仅为 1%,但是每年进入黄河流域的输沙量却占 6%^[18]。退耕还林还草与 20 世纪 80 年代水土保持措施等工程的大力开展,改变流域下垫面特征,同时也进一步影响径流时空分布及其变化特征。目前针对窟野河流域内水沙过程的研究多集中于年际或者年内尺度水沙变化,而对于次降雨事件尺度水沙过程研究相对缺乏。因此,本研究基于窟野河流域 2006—2019 年水沙数据,在次降雨事件尺度下,采用方差分析、水沙关系曲线、滞后分析等方法,探讨不同流域水沙关系及其滞后特征空间差异,揭示次降雨尺度下嵌套流域水沙输移过程。本研究旨在为窟野河流域的水土流失综合治理、生态环境建设提供科学依据,并为类似干旱半干旱地区流域水沙管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

窟野河位于北纬 38°28'—39°52',东经 109°00'—110°52',是黄河中游河龙区间的第二大支流,发源于

内蒙古东胜区八定沟,全长约 242 km,流域总面积约为 8 706 km²,流域高程范围为 767~1 575 m。河流穿越伊金霍洛旗、陕西府谷,最终在神木市与牯牛川支流交汇后,汇入黄河。窟野河流域地形多样,整体地势呈西北高、东南低的特点,河道因河流冲刷多形成深度达 150 m 以上呈树枝状分布沟谷。流域土壤黏粒颗粒含量少,结构松散,导致侵蚀问题较为严重,且侵蚀分布具有明显地域性,东南部地区主要被第四纪黄土所覆盖,中部地区以砂岩和砂砾岩为主,而西部地区则以砂质土为主。流域属于北温带半干旱大陆季风气候,多年平均降水量为 419 mm,降水量年内变化大,主要集

中在每年 7 月和 8 月,占全年降水量 55%~65%,降水在空间分布上呈现东南多、西北少的特点。多年平均气温为 8.2 ℃,最高气温通常出现在每年 7 月。流域土地利用类型主要由耕地、林地和草地组成,上游地区主要分布着适应干旱条件的干草原、落叶阔叶灌丛植被以及适应沙地环境的沙生植物,而下游地区则以一年生或多年生草本植物为主。在流域中部和东南部的较低地势区域,耕地较为集中,在流域东南部和西北部的较高地势区域,主要分布有林地和草地。流域内包括了 4 个子流域,各子流域出口设有水文站监测流域水沙情况,表 1 概述了 4 个子流域基本特征。

表 1 研究区 4 个子流域及水文站概况

Table 1 Overview of the four sub-basins and hydrological stations in the research area

流域	纬度(N)	经度(E)	平均海拔/m	河道长度/m	平均比降/(°)	控制面积/km ²
新庙	39°21′	110°22′	1314	68.3	6.0	1527
王道恒塔	39°04′	110°24′	1326	134.0	3.1	3839
神木	38°48′	110°30′	1286	167.6	5.5	7298
温家川	38°26′	110°45′	1256	234.9	6.1	8515

1.2 基础数据收集与处理

本研究中径流和泥沙资料均来自中华人民共和国水利部黄河水利委员会发布的《黄河水文年鉴》。由于各水文站水文数据记录事件精度、间隔不同,为保证降雨记录与洪水、泥沙要素在时间上匹配对应,分别对其进行 30 min 重采样,具体方法参照 Tian 等^[19]。径流量的测定和泥沙浓度的分析均依照国际通行水文监测标准和方法进行,确保了数据准确性和可靠性。

1.3 研究方法

1.3.1 降雨事件选取标准 本研究采用通用土壤流失方程中关于次降雨事件的划分标准,即次降雨事件被定义为连续降雨间隔时间超过 6 h,或连续 6 h 内降雨量超过 1.3 mm 的情况^[20]。这一标准有助于识别出对流域产流产沙具有显著影响的降雨事件。为了确保数据准确性,本研究排除那些可能受到前期土壤湿度影响的降雨事件,仅选取在前后 3 d 内未发生第二次降雨的次降雨事件作为有效数据。通过这种方法,从 2006—2019 年的时间段内,筛选出 160 场有效次降雨事件作为研究样本,事件在 4 个子流域中分布情况如下:新庙流域 39 场、王道恒塔流域 31 场、神木流域 40 场、温家川流域 50 场。

1.3.2 水沙关系曲线 水沙关系曲线是用来描述径流和泥沙关系的重要工具,是基于水文站实测径流和泥沙数据,通过统计回归建立关系。其中,幂函数关系因其简洁性和拟合效果被广泛使用,通过将径流量(Q)与泥沙浓度(SSC)之间的关系表达为幂函数形式,即:

$$SSC=aQ^b \tag{1}$$

式中:*a* 和 *b* 为幂函数参数,分别代表了泥沙源的供应情况以及在不同径流条件下泥沙输移能力的变化。参数 *a* 呈现了河道的侵蚀程度,较高的 *a* 值通常与侵蚀活跃、泥沙供应充足的地区相关联。参数 *b* 表征了河流的侵蚀能力和泥沙运输效率,较高的 *b* 值意味着河流对泥沙的携带和输送能力随着径流量增加而显著增强。此外,*b* 值还能表征在径流量增加时,河流从河床和河岸再次侵蚀的能力。

1.3.3 泥沙滞后类型 滞后是指一次降雨过程中泥沙浓度和径流量的非同步关系,可用于推断流域泥沙来源,并揭示流域内部泥沙输移动态过程。滞后类型主要分为 4 种:顺时针型、逆时针型、“8”字型和复合型。在顺时针滞后中,泥沙峰值先于或与径流峰值同时出现,在流量减少阶段,泥沙浓度相比增加阶段有显著下降,这表明泥沙主要来源于流域的出口附近区域。逆时针滞后则是在径流峰值先于或与泥沙峰值同时出现的情况下,流量减少阶段的泥沙浓度高于增加阶段,一般表明泥沙来源相对远离流域出口。“8”字型滞后是低流量时的逆时针循环与高流量时的顺时针循环(顺“8”字型)或低流量时的顺时针循环与高流量时的逆时针循环(逆“8”字型)的结合,通常出现在具有多个峰值的降雨事件中,表明了泥沙来源的复杂性,包括近源和远源的共同贡献。复合型滞后则不易直接推断系统的动力学特征,可能伴随泥沙稀释等现象,这种情况多由持续强降雨引起,且流域泥沙来源分散,

导致单一水文事件中出现多个泥沙峰和径流峰。

1.3.4 滞后系数(HI)计算 本研究采用改进的滞后指数来量化每场降雨的实时泥沙浓度动态,并在研究流域进行比较^[21]。如图 1 所示,该滞后指数基于归一化的径流和泥沙浓度,计算公式如下:

$$SSC_i^* = \frac{SSC_i - SSC_{\min}}{SSC_{\max} - SSC_{\min}} \quad (2)$$

$$Q_i^* = \frac{Q_i - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \quad (3)$$

式中: SSC_i 和 Q_i 分别为 i 时刻的径流量和泥沙浓度值; SSC_{\max} 和 SSC_{\min} 分别为次降雨中的最大和最小泥沙浓度; Q_{\max} 和 Q_{\min} 分别为次降雨中最大和最小径流量。通过对上升和下降段的归一化 SSC_i 和 Q_i 进行线性回归,并在 Q_i 的间隔为 10% 的值上,利用两个相邻的测量值进行插值,得到 SSC_j 。每个径流量间隔的滞后系数 HI 通过上升段 SSC_{j_rising} 减去下降段 $SSC_{j_falling}$ 得到:

$$HI = \text{mean}(SSC_{j_rising} - SSC_{j_falling}) \quad (4)$$

单次降雨事件的滞后系数 HI 是所有 HI_j 的平均值,其数值范围介于 -1~1,负值代表逆时针滞后,正值代表顺时针滞后,滞后指数的绝对值大小表征了上涨阶段和下降阶段间的差异程度。通过滞后系数 HI,可以更精确地评估流域泥沙输移的时间差异,从而为理解和预测泥沙动态提供重要信息。

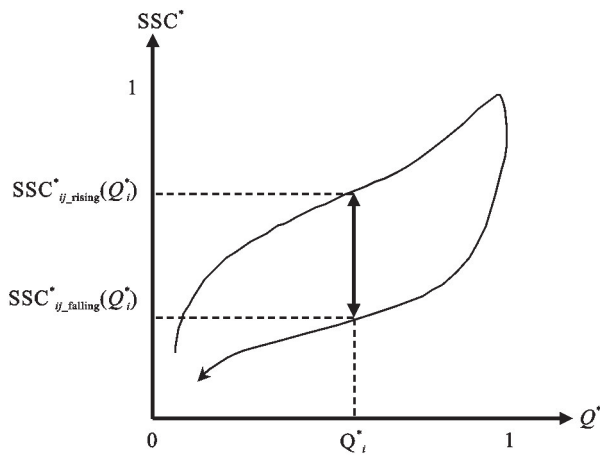


图 1 滞后系数(HI)计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of hysteresis index (HI)

2 结果与分析

2.1 产流产沙特征

4 个流域 2006—2019 年降雨过程的径流泥沙相关参数统计特征见图 2。箱型图显示了 4 个子流域洪峰流量、平均径流量、径流深度、最大泥沙浓度、平均泥沙浓度以及产沙模数变化特征。如图所示,不同流域场次降雨过程径流泥沙相关参数均呈现数量级

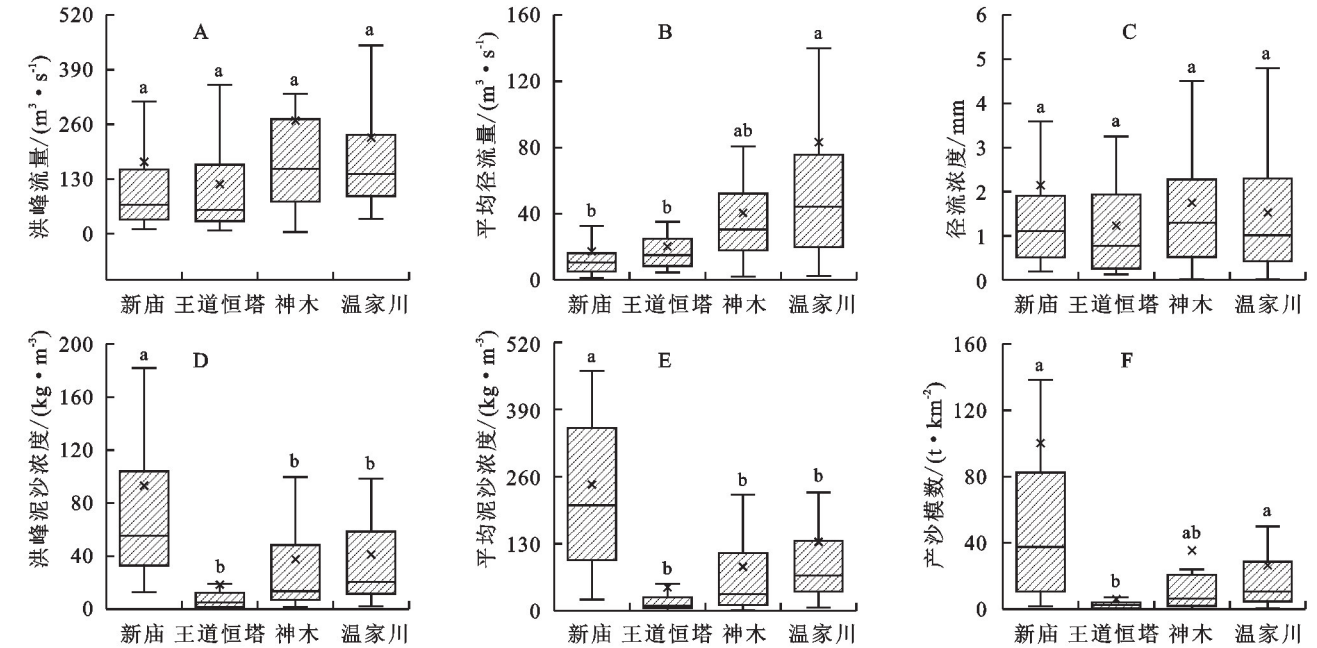
差异。从上游到下游,4 个流域的顺序依次是新庙、王道恒塔、神木和温家川。次降雨洪峰流量的平均值分别为 170.813, 117.891, 268.795, 228.362 m³/s, 平均径流量平均值分别为 17.257, 20.285, 40.459, 83.224 m³/s, 而径流深平均值分别为 2.146, 1.231, 1.750, 1.530 mm。通过分析径流相关参数,观察到平均径流量从上游到下游呈现出增加趋势,而洪峰流量和径流深度无显著差异($p > 0.05$)。最大泥沙浓度平均值从低到高依次为王道恒塔流域(18.436 kg/m³)、神木流域(37.627 kg/m³)、温家川流域(41.122 kg/m³)和新庙流域(93.167 kg/m³)。平均泥沙浓度平均值同样从低到高依次为王道恒塔流域(6.995 kg/m³)、神木流域(13.108 kg/m³)、温家川流域(20.572 kg/m³)和新庙流域(37.613 kg/m³)。产沙模数平均值从低到高依次为王道恒塔流域(5,980 kg/km²)、温家川流域(26,388 kg/km²)、神木流域(35,435 kg/km²)和新庙流域(100,219 kg/km²)。除了新庙流域外,最大泥沙浓度和平均泥沙浓度均呈现出从上游到下游递增趋势,且 4 个流域泥沙相关参数存在显著差异($p < 0.05$)。总体而言,新庙流域径流相关参数与其他 3 个流域相比无显著差异($p > 0.05$),但其泥沙相关参数显著高于其他 3 个流域($p < 0.05$)。相比之下,王道恒塔流域的径流和泥沙相关参数在 4 个流域中均处于较低水平。

2.2 水沙关系空间差异

为了深入理解并量化窟野河流域内泥沙输移过程,收集 2006—2019 年窟野河及其子流域降雨过程中径流量和泥沙浓度数据,其中新庙流域收集了 564 对,王道恒塔流域 378 对,神木流域 583 对,温家川流域 868 对,通过成对的泥沙浓度-径流量(SSC-Q)绘制水沙关系曲线(图 3)。结果表明,流域的径流量和泥沙浓度在不同时期均满足幂函数关系,拟合效果较好。4 个子流域中,新庙流域系数 a 最大,达到 2.165 9,而神木流域系数 a 最小,为 0.053。神木流域与温家川流域系数 a 相对较小,分别为 0.168 6, 0.384 8。这一结果表明新庙流域侵蚀最严重,泥沙来源充足,而神木流域侵蚀程度最轻。神木流域的指数 b 在 4 个流域中最高,为 1.093 9,流域径流侵蚀力最强,表明该流域径流对土壤的侵蚀能力最强,即使是径流量的小幅增加也可能引起土壤侵蚀的显著上升。新庙、王道恒塔和温家川流域的指数 b 分别为 0.713 5, 0.668 1, 0.734 6。从新庙至王道恒塔流域,指数 b 值沿程呈下降趋势,而从神木至温家川流域出口,指数 b 值也同样沿程下降。拟合系数

R^2 的值与 4 个流域的径流深度和泥沙浓度空间分布呈现出相似趋势,从王道恒塔流域至温家川流域, R^2 值呈现增加态势。新庙流域的 R^2 最大,为 0.54,表明该流域的水沙关系最为稳定,拟合效果最佳。相比

之下,王道恒塔流域的 R^2 最小,为 0.38,说明该流域水沙数据分布较为分散,水沙相关性较弱。神木流域和温家川流域的 R^2 值分别为 0.44,0.45,显示水沙关系从神木流域至温家川流域沿程趋于稳定。



注:箱型图中实线从上到下依次是最大值、上四分位数、中位数、下四分位数及最小值,×代表平均值,不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平上差异显著。

图 2 4 个选取子流域径流泥沙相关参数的比较

Fig. 2 Comparison of runoff and sediment related parameters in four selected sub-basins

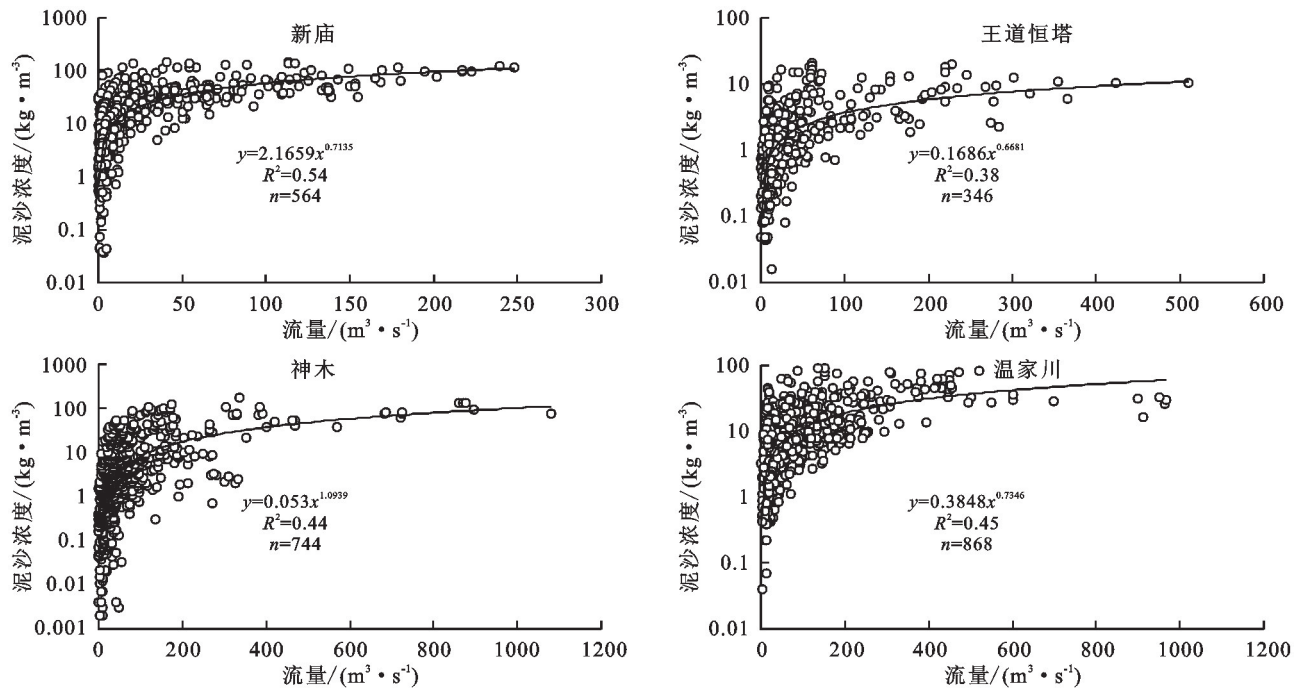


图 3 4 个选取子流域降雨过程水沙关系

Fig. 3 Relationship between runoff and sediment during rainfall processes in four selected sub-basins

2.3 径流—泥沙滞后关系分析

通过统计 4 个流域 2006—2019 年共 160 场降雨的滞后类型(表 2),结果表明,顺时针、逆时针、“8”字型和复合型滞后在所有降雨事件中的比例分别为

22%,39%,30%和 9%。这些滞后类型对总产沙量的贡献并不完全取决于它们在各流域中出现频率。根据统计数据,新庙流域的主要滞后类型为顺时针、逆时针和“8”字型,其中逆时针滞后出现频率最高

(38%),但在总产沙量中贡献比例仅为 29%。相比之下,顺时针滞后虽然频率不高(28%),却贡献了总产沙量的 54%。王道恒塔流域逆时针滞后最为常见(45%),远高于顺时针(26%)、“8”字型(19%)和复合型滞后(10%)。然而,复合型滞后尽管频率不高,却贡献了最大比例产沙量(40%)。在神木流域,顺时针和逆时针滞后发生频率相当,均占到了 28%。然而,这两种滞后类型对产沙量贡献却存在显著差异。具体来说,逆时针滞后对产沙量贡献最为显著,达到了 44%,而顺时针滞后对产沙量贡献则相对较小,仅为 5%。在温家川流域,逆时针和“8”字型滞后是主要类型,分别占据了 44%和 34%。它们对产沙量贡献也占据了主导地位,分别为 55%和 23%。顺时针和复合型滞后在该流域出现频率较低,分别为 10%和 12%,且它们对产沙量贡献也相对较小,分别为 7%和 15%。相较于其他 3 个流域,温家川流域在滞后类型分布与产沙量贡献比例中显示出较高的一致性。这些发现突显了不同滞后类型在泥沙输移过程中的作用,以及它们对流域产沙量的潜在影响。

表 2 4 个选取子流域的滞后关系数量统计

Table 2 Statistical analysis of the number of hysteresis patterns in four selected sub-basins

流域	顺时针	逆时针	“8”字型	复合型	总计
新庙	11	15	12	1	39
王道恒塔	8	14	6	3	31
神木	11	11	13	5	40
温家川	5	22	17	6	50
总计	35	62	48	15	160

通过对 4 个子流域的降雨事件进行滞后分析,发现不同流域滞后类型存在明显差异。在每个流域均观察到多个滞后类型,如图 4 所示,展示了 4 种典型径流-泥沙滞后关系。以新庙流域 2019 年 8 月 9 日降雨事件为例,分析逆时针滞后特征。这场降雨持续了约 30 h,流量和泥沙浓度的峰值几乎同时出现。在流量达到 $15.22 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,涨水阶段泥沙浓度为 $14.91 \text{ kg}/\text{m}^3$,而在落水阶段,相同流量下的泥沙浓度升至 $22.56 \text{ kg}/\text{m}^3$,高于涨水阶段,这表明在落水过程流域内仍有充足泥沙供应。王道恒塔流域 2014 年 7 月 20 日降雨事件为例则展示了顺时针滞后特征。该次降雨事件历时约 96 h,期间泥沙浓度峰值先于流量峰值出现。在径流量为 $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,涨水阶段泥沙浓度为 $2.89 \text{ kg}/\text{m}^3$,而在流量相同的情况下,落水阶段泥沙浓度降至 $0.12 \text{ kg}/\text{m}^3$,这一变化表明在落水过程中泥沙浓度下降速度较快,暗示泥沙主要来源于流域出口附近区域。神木流域 2008 年 8 月 9 日降雨事件是一个顺时

针“8”字型滞后的案例,此降雨持续了大约 38 h,在低流量(低于 $44.52 \text{ m}^3/\text{s}$)期间,涨水过程的泥沙浓度始终低于落水过程,流量超过 $44.52 \text{ m}^3/\text{s}$ 后,涨水过程泥沙浓度反超落水过程,此现象可能是因为降雨初期雨强较大,导致土壤产流方式为超渗产流,流量快速上升,从而呈现出逆时针滞回特征,随着降雨的持续,流域内泥沙逐渐被消耗,径流输沙能力开始下降,泥沙主要来自流域出口附近区域,进而转变为顺时针滞回特征。温家川流域 2017 年 7 月 22 日降雨事件呈现了复合型滞后特征。这场降雨过程中出现了 4 个流量和泥沙浓度峰值,可能是因为降雨持续时间较长,泥沙来源广泛,且在降雨过程中泥沙来源发生了多次变化。

为了进一步理解滞后指数空间差异,对不同流域的滞后指数(HI)特征值进行了计算。表 3 展示了 4 个流域滞后系数 HI 最大值、最小值和平均值,并统计了 HI 的标准差和变异系数。总体而言,新庙、王道恒塔和温家川 3 个流域主要滞后模式为逆时针滞后,其平均 HI 值均 <0 。具体来说,温家川流域平均 HI 最低,为 -0.09 ,而新庙流域平均 HI 最高,为 -0.03 。相比之下,神木流域主要滞后模式为“8”字型滞后,其中顺时针“8”字型滞后占主导地位,导致该流域平均 HI 值 >0 ,为 0.04 。

如图 5 所示,在 4 个流域中都观察到正滞后、负滞后和无滞后的降雨事件。王道恒塔流域 HI 值分布最为广泛,从 -0.51 到 0.65 不等,其变异系数为 8.73 。尽管该流域平均泥沙浓度普遍较低,但有三次降雨事件平均泥沙浓度异常高,其中两次负 HI 事件平均泥沙浓度分别为 $33.68, 55.51 \text{ kg}/\text{m}^3$,而一次正 HI 事件平均泥沙浓度为 $65.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。这表明在王道恒塔流域,负 HI 事件总体上输出的泥沙量更多,占据了主导地位。温家川流域 HI 变异系数最小,为 -2.51 ,其 HI 值主要围绕 0 值分布,范围区于 $-0.47 \sim 0.32$ 。该流域在 2006 年 8 月 9 日经历一次降雨事件,HI 值为 -0.47 ,为该流域所有降雨事件中的最低值,但此次事件平均泥沙浓度高达 $248.04 \text{ kg}/\text{m}^3$,对温家川流域产沙量贡献最大。新庙和神木流域 HI 变异系数相对较小,新庙流域总体上以负 HI 事件为主,而神木流域总体上则以正 HI 事件为主。

3 讨论

流域侵蚀产沙过程是径流携带泥沙在异质景观中运移、沉积和输出的过程,侵蚀泥沙能否从坡面、沟道等源区搬运至流域出口,主要受流域内复杂的地形

和景观结构的控制^[10]。流域出口监测的泥沙浓度受坡面的侵蚀物质和径流的携沙能力共同决定^[22]。本研究以黄河流域中游河龙区间窟野河流域为研究对象,系统地分析了不同降雨条件下嵌套流域内部水沙输移过程空间差异。4 个子流域平均径流量和洪峰流量在次降雨事件尺度上并没有显著差异,但新庙流域的平均泥沙浓度和最大泥沙浓度均显著高于其他 3

个流域($p < 0.05$),说明窟野河流域泥沙产量主要受限于泥沙的“源”供应,而非“运输”能力。此外,侵蚀产沙过程显示出明显的尺度效应^[23],泥沙产量和流域面积通常呈显著的负相关关系,即流域面积越大,单位面积的产沙量反而越小,侵蚀的泥沙越难搬运至出口^[24],研究结果也进一步验证了该观点,嵌套流域的研究也为理解流域泥沙输移过程提供了重要的实证支持。

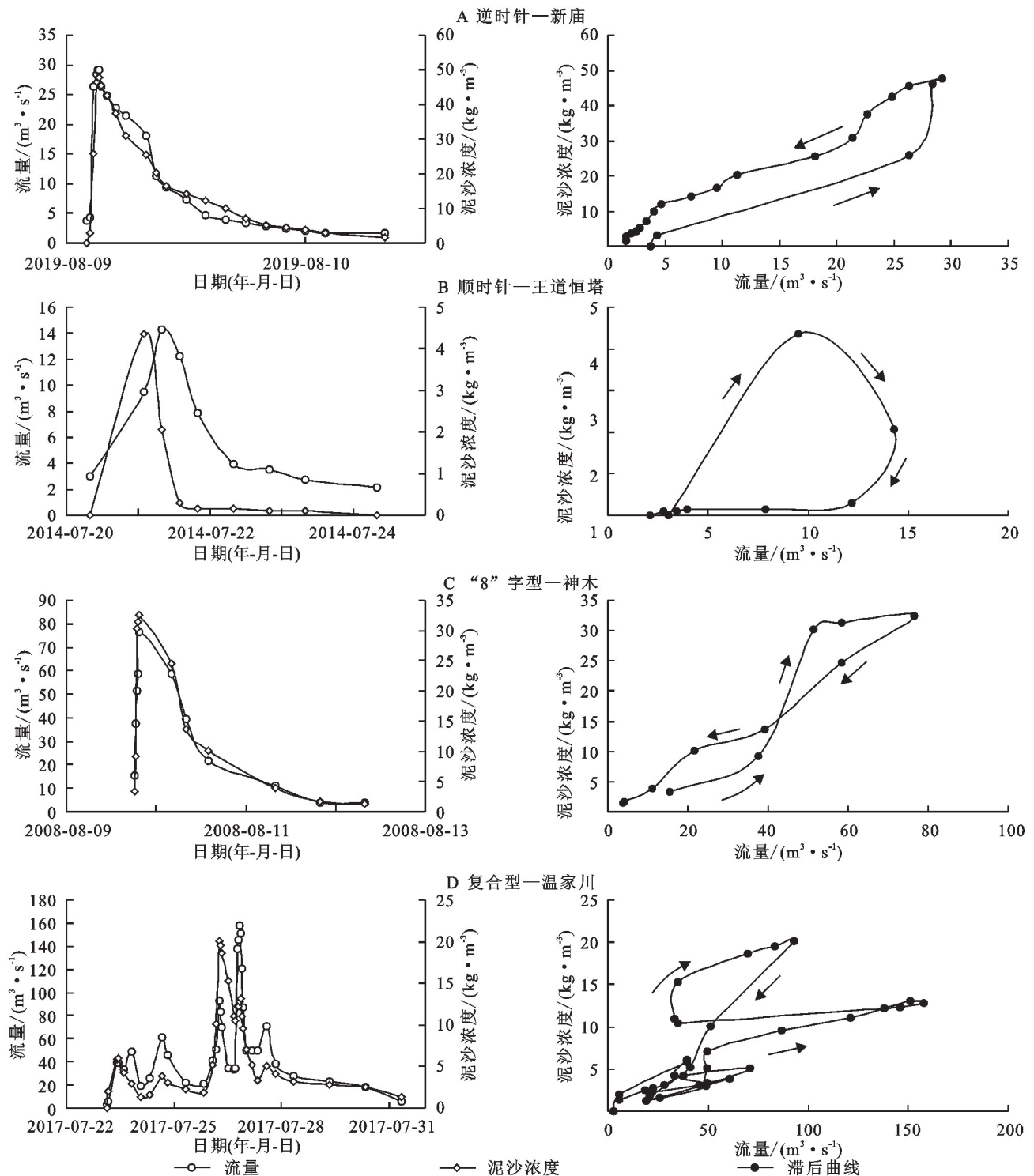


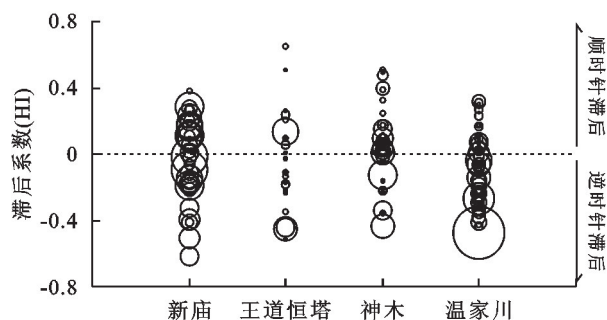
图 4 4 个选取子流域典型降雨事件下径流泥沙滞后类型

Fig. 4 Hysteresis patterns in four selected sub-basins under typical rainfall events

表3 4个选取子流域滞后系数 HI 特征

Table 3 Characteristics of HI in four selected sub-basins

流域	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
新庙	0.38	-0.61	-0.03	0.24	-7.01
王道恒塔	0.65	-0.51	-0.03	0.29	-8.43
神木	0.50	-0.44	0.04	0.24	5.50
温家川	0.32	-0.47	-0.09	0.21	-2.25



注:圆圈中心表示次降雨事件滞后系数大小,圆圈面积大小表示次降雨事件平均泥沙浓度。

图5 4个选取子流域滞后系数 HI 对比

Fig. 5 Comparison of HI for four selected sub-basins

黄土高原特有的土壤和地质条件塑造了其作为重要的沙源区的特征^[25]。在本研究中,新庙流域的泥沙相关系数显著高于其他3个流域,其系数 a 达到最大值2.1659。这一现象可能与新庙流域以丘陵地貌为主有关,该流域东南部的冲沟发育密集,土壤侵蚀问题严重。由于该地区黏性土壤颗粒含量较低,导致河道岸坡稳定性差,在降雨期间容易发生坍塌,导致泥沙产量增加。同时,由于新庙流域面积小且区域内工矿开发强度大,迁移过程中泥沙沉积发生机会相对较少,这导致该流域产生比其他3个流域更高的侵蚀活动和更丰富的泥沙来源^[22]。相比之下,神木流域的系数 a 最小为0.053,但其指数 b 达到最大值1.0939,表明神木流域具有较强的河流侵蚀能力和丰富的泥沙来源。神木流域位于黄土丘陵沟壑区,地形沟壑交错,加之流域内煤矿开发活动频繁,使得地表黄土松散且裸露,极易受到暴雨冲刷。温家川、王道恒塔以及新庙3个流域主要滞后模式为逆时针滞后,这表明这些流域远端泥沙滞后响应较为频繁且产沙量高。在上游流域,侵蚀所产生的泥沙在向下游运输的过程中,可能会因为植被覆盖或地形阻挡等因素而在途中被截留和沉积,导致下游流域出口处泥沙量减少。这种滞后模式揭示了流域内部泥沙输移过程复杂性,以及不同流域在泥沙来源和输移机制上的差异。

4 结论

(1) 在窟野河流域的研究中,除新庙子流域外,

径流深度和泥沙浓度平均值由窟野河上游至下游呈增加趋势。新庙流域径流相关参数和其他3个流域相比无显著差异($p > 0.05$),但平均泥沙浓度与产沙量显著高于其他3个流域($p < 0.05$)。相比之下,王道恒塔流域径流和泥沙相关参数在4个流域中处于最低水平。

(2) 通过水沙评级曲线分析,新庙流域的系数 a 最大,这一结果表明该流域泥沙来源较为充足;而神木流域虽然系数 a 最小,但其指数 b 在4个流域中最大,显示了较强径流搬运泥沙能力。在拟合效果方面,新庙流域 R^2 值最高,表明其水沙关系最为稳定,拟合效果最佳。

(3) 新庙、王道恒塔和温家川3个流域主要滞后模式为逆时针滞后,其HI平均值均低于零,这表明泥沙主要来源于流域上游。与此相反,神木流域主导滞后模式为“8”字型滞后,其HI平均值高于0,这一结果表明神木流域泥沙来源相对更接近流域出口。

参考文献 (References):

- [1] Nie J S, Stevens T, Rittner M, et al. Loess Plateau storage of northeastern Tibetan Plateau-derived Yellow River sediment[J]. Nature Communications, 2015, 6 (1):8511.
- [2] 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.
Shi Z H, Liu Q J, Zhang H Y, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: progress and prospects[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1117-1127.
- [3] Guo W X, Sang Y, Hu J W, et al. Characteristics and attribution analysis of runoff and sediment evolution in the Wei River mainstream, China[J]. Journal of Water and Climate Change, 2023,14(7):2432-2447.
- [4] 康靖玲,丁文峰,韩昊宇,等.不同时间尺度岔巴沟流域水沙关系变化[J].水土保持研究,2021,28(5):81-87.
Kang J L, Ding W F, Han H Y, et al. Relationship between runoff and sediment on different time scales in Chabagou watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(5):81-87.
- [5] 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.
- [6] Xu Z, Zhang S H, Zhou Y, et al. Characteristics of

- watershed dynamic sediment delivery based on improved RUSLE model[J]. *Catena*, 2022,219:106602.
- [7] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. Responses of water erosion to rainfall extremes and vegetation types in a loess semiarid hilly area, NW China[J]. *Hydrological Processes*, 2009,23(12):1780-1791.
- [8] Wang H, Chen W X, Zhou M, et al. Runoff and sediment characteristics of a typical watershed after continuous soil erosion control in the red soil region of South-eastern China[J]. *Catena*, 2023,233:107484.
- [9] 董玉婷,穆兴民,王双银,等.产流及其研究进展[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2022,43(2):21-29.
Dong Y T, Mu X M, Wang S Y, et al. Runoff generation and its research progress[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition*, 2022,43(2):21-29.
- [10] 史志华,宋长青.土壤水蚀过程研究回顾[J].水土保持学报,2016,30(5):1-10.
Shi Z H, Song C Q. Water erosion processes: a historical review[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,30(5):1-10.
- [11] Jansson M B. Determining sediment source areas in a tropical river basin, Costa Rica[J]. *Catena*, 2002,47(1):63-84.
- [12] Collins A L, Blackwell M, Boeckx P, et al. Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020,20(12):4160-4193.
- [13] De Girolamo A M, Ricci G F, Abdelwahab O M M, et al. Suspended sediment transport in Mediterranean streams: monitoring and load estimation[J]. *Water*, 2023, 15(15):2715.
- [14] Tilahun A K, Verstraeten G, Chen M, et al. Temporal and spatial variability of suspended sediment rating curves for rivers draining into the Ethiopian Rift Valley[J]. *Land Degradation & Development*, 2023,34(2):478-492.
- [15] 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.
- [16] Malutta S, Kobiyama M, Chaffe P L B, et al. Hysteresis analysis to quantify and qualify the sediment dynamics: state of the art[J]. *Water Science and Technology*, 2020,81(12):2471-2487.
- [17] Smith H G, Dragovich D. Interpreting sediment delivery processes using suspended sediment-discharge hysteresis patterns from nested upland catchments, south-eastern Australia[J]. *Hydrological Processes*, 2009,23(17):2415-2426.
- [18] 刘强,蔡学娅,刘君怡,等.黄河中游窟野河流域水沙关系变化特征及其成因分析[J].水土保持研究,2022,29(4):68-74.
Liu Q, Cai X Y, Liu J Y, et al. Variation characteristics and causes of runoff-sediment relationship in Kuye river basin in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(4):68-74.
- [19] Tian P, Feng J H, Zhao G J, et al. Rainfall, runoff, and suspended sediment dynamics at the flood event scale in a Loess Plateau watershed, China[J]. *Hydrological Processes*, 2022,36(2):e14486.
- [20] 孟泽坤,王彬, Daniel Moriasi.次降雨时空分布对流域产流产沙的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(4):69-78.
Meng Z K, Wang B, Daniel M. Effects of the spatio-temporal pattern of single storm on the runoff and sediment yield at watershed scale[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023,21(4):69-78.
- [21] Lloyd C E M, Freer J E, Johnes P J, et al. Using hysteresis analysis of high-resolution water quality monitoring data, including uncertainty, to infer controls on nutrient and sediment transfer in catchments[J]. *Science of the Total Environment*, 2016,543:388-404.
- [22] 潘雅文,马文龙,潘庆宾,等.流域侵蚀输沙空间尺度效应及其影响因素研究进展[J].水土保持研究,2022,29(3):88-97,105.
Pan Y W, Ma W L, Pan Q B, et al. Review of the scale effects of soil erosion and sediment delivery and their influencing factors[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(3):88-97,105.
- [23] Ni J P, Wei C F, D T. Effects of spatial scale on the quantitative estimation of soil erosion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005,25(8):2061-2067.
- [24] Pulley S, Collins A L. Soil erosion, sediment sources, connectivity and suspended sediment yields in UK temperate agricultural catchments: discrepancies and reconciliation of field-based measurements[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024,351:119810.
- [25] Sun P C, Wu Y P, Gao J N, et al. Shifts of sediment transport regime caused by ecological restoration in the middle Yellow River basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,698:134261.