

无定河流域极端泥沙变化特征及其影响因素

李梦楠^{1,2}, 于坤霞^{1,2}, 张翔³, 杨志⁴, 李鹏^{1,2}, 李占斌^{1,2}

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048;
2.西安理工大学旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室,西安 710048;
3.西安市智慧环保综合指挥中心,西安 710018;4.宁夏回族自治区水土保持监测总站,银川 750002)

摘要: 近几十年来,全球气候变化异常,极端水文事件频繁发生,认识极端泥沙的动态变化并探究其可能影响因素对于预防泥沙灾害具有重要的现实意义。以黄河中游无定河流域为研究对象,从量级、时间、强度和频次 4 个方面,构建最大 1 日含沙量(Sx1d)、最大 5 日含沙量(Sx5d)、年最大 1 日含沙发生时间(DSx1d)、年最大 5 日含沙发生时间(DSx5d)、年均含沙量(Sint)、强含沙量(S95p)、极强含沙量(S99p)、高含沙水流日数(S200)共 8 个极端泥沙指标,采用 Mann-Kendall 趋势检验、圆分布统计法分析极端泥沙指标的变化趋势及时间分布特征,基于 Pettitt 检验判定指标变异时间,并应用 RVA 法定量评价各指标的变化程度,最后探讨降雨侵蚀力和生态建设措施对极端泥沙变化的影响,以及造成极端泥沙变化的主要因素。结果表明:(1)1958—2018 年,无定河流域极端泥沙指标均呈显著减小趋势($p<0.05$);(2)Sx1d 的发生高峰期为 6 月 30 日至 8 月 18 日,Sx5d 的发生高峰期为 7 月 11 日至 8 月 17 日,比 Sx1d 的发生时间更为集中;(3)S200 发生中度改变,Sx1d、Sx5d、Sint、S95p 和 S99p 发生高度改变,且 S95p 和 S99p 的改变度最大,改变度达 100%,极端泥沙指标整体改变度为 83.72%,属于高度改变;(4)1963—1966 年,降雨侵蚀力的降低在一定程度上导致无定河流域极端泥沙的减少;1982—2018 年,NDVI 和年累积坝控面积(A_d)与极端泥沙指标均呈显著负相关($p<0.05$),且通径分析表明, A_d 比 NDVI 对极端泥沙指标的直接作用更大,是影响极端泥沙变化的主要因素。研究成果有助于增强对无定河流域极端泥沙变化的认识,为制定泥沙灾害防范策略提供一定的理论依据。

关键词: 无定河; 极端泥沙; 影响因素; 圆分布统计法

中图分类号:TV145 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2023)01-0114-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.017

Variation Characteristics of Extreme Sediment and Its Influencing Factors in the Wuding River Basin

LI Mengnan^{1,2}, YU Kunxia^{1,2}, ZHANG Xiang³, YANG Zhi⁴, LI Peng^{1,2}, LI Zhanbin^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2.Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 3.Intelligent Environmental Protection Integrated Command Center, Xi'an Bureau of Ecology and Environment, Xi'an 710018; 4.Ningxia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan 750002)

Abstract: In recent decades, global climate has changed abnormally and extreme hydrological events have occurred frequently. It is of great significance to understand the dynamic changes of extreme sediment and explore its possible influencing factors for preventing sediment disasters. In this study, the Wuding river basin in the middle reaches of the Yellow River was taken as the research object. From the four aspects of magnitude, time, intensity and frequency, eight extreme sediment indexes were established, including annual maximum 1-day sediment concentration (Sx1d), annual maximum 5-days sediment concentration (Sx5d), occurrence date of annual maximum 1-day sediment concentration (DSx1d), occurrence date of annual maximum 5-days sediment concentration (DSx5d), average annual sediment concentration (Sint), high sediment concentration (S95p), extremely high sediment concentration (S99p), and days of hypercon-

concentrated flows (S200). Mann-Kendall trend test and circular statistical approach were used to analyze the variation trend and time distribution characteristics of extreme sediment indexes. The change-point of indexes was determined based on Pettitt test, and the range of variability approach was used to quantitatively evaluate variation of each index. Finally, the influence of rainfall erosivity and ecological construction measures on extreme sediment changes are discussed. The results showed that: (1) From 1958 to 2018, all extreme sediment indexes of Wuding river basin showed a significant decreasing trend ($p < 0.05$). (2) The rush period of Sx1d was from June 30 to August 18, and the rush period of Sx5d was from July 11 to August 17, which was more concentrated than that of Sx1d. (3) S200 reached moderate alteration, Sx1d, Sx5d, Sint, S95p and S99p reached high alteration, and S95p and S99p had the largest alteration, with alteration of -100% . The overall change of extreme sediment indexes was 83.72% , which belonged to high alteration. (4) During 1963—1966 period, the decrease of rainfall erosivity led to a reduction of extreme sediment in the Wuding river basin to a certain extent. During 1982—2018 period, NDVI and annual cumulative value of dam control area (A_d) were significantly negatively correlated with extreme sediment indexes ($p < 0.05$), and path analysis indicated A_d had a greater direct effect on extreme sediment indexes than NDVI, which was the main factor affecting the change of extreme sediment. The research results are helpful to enhance the understanding of extreme sediment changes in Wuding river basin, and provide a theoretical basis for formulating sediment disaster prevention strategies.

Keywords: Wuding river; extreme sediment; influencing factors; circular statistical approach

在全球气候急剧变化的背景下,极端水文事件发生频次大幅增加^[1],给人类生存环境和社会经济发展带来巨大的威胁。无定河粗沙输沙量大,是黄河粗泥沙的主要来源地之一^[2],以往多数研究^[3-4]关注无定河流域泥沙的平均态与总量变化,关于极端泥沙变化的研究甚少。有研究^[5]表明,极端泥沙事件对社会造成的破坏和损失更为严重,为更好地应对极端泥沙变化对社会所带来的影响,有必要开展极端泥沙事件的变化特征及其影响因素分析研究。

早在 20 世纪 90 年代,有学者^[6]就注意到气候变化下极端事件的严重危害。近年来,随着气候变化和人类活动加剧,导致洪涝、泥沙灾害等问题愈发严重,据不完全统计^[7-8],全球由极端水文事件所造成的经济损失在过去 40 年平均上升 10 倍,已然成为当今各国政府和国内外学者共同关注的焦点。目前,国内外对极端水文事件的研究主要集中在极端降水、极端洪涝和极端干旱等方面,关于极端泥沙事件的研究并不多见。在这些极端水文事件的研究中,极端降水问题的研究成果相对较多,1999 年,世界气象组织气候变化监测和指数专家组 (ETCCDI) 提出 27 个核心气候变化指数^[9],已被广泛用于世界各地的极端降水变化分析。不同的研究组根据其特定目的建立不同的指数,例如,欧盟 STARDEX 项目^[10]提出 57 个极端气候指标等。目前关于极端泥沙事件还没有系统全面的指标体系,Richter 等^[11]提出 5 类 33 个水文变化指标 (index of hydrologic alteration, IHA),其中包含水文要素的年极值大小和年极值状况发生时间

2 类极端水文指标,已被广泛用于评估水文情势变化;Ran 等^[5]将年内日最大含沙量定义为年极端泥沙事件,对黄河上中游流域极端泥沙事件的季节性进行研究分析。上述研究中定义的极端泥沙指标属于绝对指数,指标单一,考虑到河流含沙量的地域性差异和水文变异性,还应兼顾含沙量的相对变化,特别是近几十年来,无定河流域实施大规模的水土保持措施^[12],河流泥沙发生明显变化^[13-15]。因此,有必要从多方位角度构建极端泥沙指标,分析极端泥沙的变化特征及其影响因素。

本文以黄河中游多沙粗沙区无定河流域为研究对象,从量级、时间、强度和频次 4 个方面构建极端泥沙指标,采用 Mann-Kendall 趋势检验和圆分布统计法分析极端泥沙指标的变化趋势及时间分布特征,基于 Pettitt 检验判定指标变异时间,并应用变动范围法定量评价各指标的变化程度,最后通过交叉小波变换探讨年降雨侵蚀力与极端泥沙指标的关系,同时分析生态建设措施对极端泥沙变化的影响,以及造成极端泥沙变化的主要因素。研究成果有助于深化对无定河流域极端泥沙变化的认识,为无定河流域泥沙灾害防治提供一定的科学支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文选取的研究区为无定河流域,位于黄河中游 ($37^{\circ}02'—39^{\circ}00'N, 107^{\circ}47'—110^{\circ}34'E$),其出口控制站为白家川水文站(图 1)。无定河是黄河一级支流,发源于陕西省白于山北麓,由西向东流经内蒙古鄂尔

多斯和陕西省榆林、延安地区,于清涧县河口村注入黄河。无定河干流全长 491.2 km,河道平均比降为 1.97‰,流域面积 30 261 km²。该地区属于温带大陆性季风气候,流域多年平均降水量 394.55 mm(1958—2018 年),年内降水分布不均,主要集中于汛期(6—9 月),多为短历时高强度暴雨。流域内土质疏松,植被稀少,水土流失十分严重,是黄河粗泥沙的主要来源地之一。自 20 世纪 50 年代以来,该流域逐渐开展水土保持综合治理,特别是 20 世纪 70 年代的淤地坝建设和 1999 年实行的退耕还林(草)政策,使得流域径流和泥沙发生很大变化,水土流失量明显下降,流域生态环境状况得到显著改善。

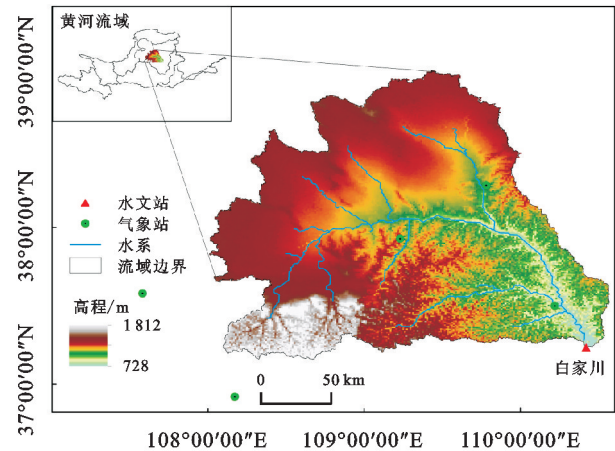


图 1 无定河流域地理位置

1.2 数据来源

本文采用的泥沙数据为无定河流域白家川水文站 1958—2018 年逐日平均含沙量,数据来源于《中华人民共和国水文年鉴 黄河流域水文资料》^[16];降雨数据为研究区 5 个气象站(榆林、横山、绥德、定边、吴

旗)1958—2018 年逐日降雨量,数据来源于中国气象科学数据共享服务平台,采用泰森多边形法将点数据转换为面数据;使用的生态建设措施数据包括无定河流域 1958—2018 年逐年新增淤地坝数目和 1958—2018 年逐年累积坝控面积,数据来自《榆林统计年鉴》^[17];使用的植被数据是 AVHRR GIMMS 和 SPOT/VEGETATION 2 种数据集的 NDVI 数据,前者来源于美国国家海洋和大气管理局发布的 GIMMS NDVI 3g 数据集,时间跨度为 1982—2015 年,空间分辨率为 8 km;后者由中国科学院资源环境科学与数据中心提供,数据时间为 1998—2018 年,空间分辨率为 1 km,采用最大值合成法生成逐年 NDVI。基于 GIMMS NDVI 与 SPOT/VEGETATION NDVI 的重叠年份构建回归方程,通过线性插值补齐 2016—2018 年 GIMMS NDVI 数据,将 NDVI 的时间跨度延伸为 1982—2018 年。

2 研究方法

2.1 构建极端泥沙指标

本文基于世界气象组织气候变化监测和指标专家组(ETCCDI)提出的气候变化指数^[9]和 Richter 等^[11]建立的水文变化指标(index of hydrologic alteration, IHA),根据本文研究内容并结合无定河流域自身特点,从量级、时间、强度和频次 4 个方面,构建最大 1 日含沙量(Sx1d)、最大 5 日含沙量(Sx5d)、年最大 1 日含沙发生时间(DSx1d)、年最大 5 日含沙发生时间(DSx5d)、年均含沙量(Sint)、强含沙量(S95p)、极强含沙量(S99p)和高含沙水流日数(S200)共 8 个极端泥沙指标,综合分析无定河流域极端泥沙变化情况,相关指标说明和定义见表 1。

表 1 无定河流域极端泥沙指标

类别	指标名称	指标代码	单位	定义
量级	最大 1 日含沙量	Sx1d	kg/m ³	年内最大 1 日含沙量
	最大 5 日含沙量	Sx5d	kg/m ³	年内连续 5 日含沙量的最大值
时间	年最大 1 日含沙发生时间	DSx1d	d	年内最大 1 日含沙量的发生时间
	年最大 5 日含沙发生时间	DSx5d	d	年内连续 5 日最大含沙量的发生时间
强度	年均含沙量	Sint	kg/(m ³ ·d)	单日含沙量≥0 kg/m ³ 的总量与日数之比
	强含沙量	S95p	kg/m ³	年内日含沙量高于 95% 阈值含沙量之和
	极强含沙量	S99p	kg/m ³	年内日含沙量高于 99% 阈值含沙量之和
频次	高含沙水流日数	S200	d	日含沙量≥200 kg/m ³ 的总日数

2.2 极端泥沙变化特征分析方法

2.2.1 Mann-Kendall 趋势检验 Mann-Kendall(M-K)趋势检验是一种非参数检验,其优点在于样本不需要服从某一特定的分布,且检验结果不受少数异常值的影响。目前,该方法已被广泛应用于水文、气象等要素时间序列的变化趋势分析,本文采用 Mann-Kendall 趋势检验分析极端泥沙指标的变化趋势,具体计算公式参考已有研究^[18-19]。

2.2.2 圆分布统计法 为了描述极端泥沙指标年最大 1 日含沙发生时间(DSx1d)、年最大 5 日含沙发生时间(DSx5d)的季节性变化特征,采用 Burn^[20]提出的圆分布统计法,首先将特定事件的发生日期(D_i)转换为角度值(θ_i):

$$\theta_i = D_i \times (\frac{2\pi}{365})$$

(1)

对于样本大小为 n 的极端水文事件,按公式确

定其平均发生日期的坐标 $\bar{x}, \bar{y}$:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \tag{2}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \tag{3}$$

极端事件发生日期的平均角由公式(4)得出:

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}} \right) \tag{4}$$

通常以 r 作为某一事件的集中趋势量度, r 计算公式为:

$$r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \tag{5}$$

r 值的范围在 0~1, r 值越接近 1, 表明事件的发生时间越集中。对于给定的置信水平 α , 如果 $r \geq r_\alpha$, 表示计算的平均角具有统计学意义, 即事件的发生日期存在集中趋势。

2.2.3 Pettitt 突变点检验 Pettitt 检验通常用于探测具有连续数据的水文、气象序列中的突变点, 该方法计算简便, 本文使用 Pettitt 检验法来识别极端泥沙指标变化的突变点, 具体计算公式见文献[21]。

2.2.4 RVA 法 为了定量分析极端泥沙指标的变异程度, 采用 Richter 等^[22]提出的变动范围法(range of variability approach, RVA)分析指标的水文改变度, 其定义为:

$$D_i = \frac{N_{oi} - N_e}{N_e} \times 100\% \tag{6}$$

$$N_e = r \times N_t \tag{7}$$

式中: D_i 为第 i 个指标的水文改变度; 以各水文指标发生概率的 75% 和 25% 作为 RVA 阈值范围; N_{oi} 为第 i 个水文指标变异后仍落于 RVA 目标阈值内的年数; N_e 为水文指标变异后预期落在目标阈值内的年数; r 为水文指标变异前落入 RVA 目标阈值内的比例; N_t 为水文指标变异后的序列观测的总年数。

为了客观说明水文指标的改变程度, Richer 等^[22]建议 $0 \leq |D_i| \leq 33\%$ 为低度改变, $33\% \leq |D_i| \leq 67\%$ 为中度改变, $67\% \leq |D_i| \leq 100\%$ 为高度改变。整体水文变化程度 D_o 。采用 Shiau 等^[23]提出的综合指数计算而得, 其公式为:

$$D_o = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i^2} \tag{8}$$

式中: n 为指标个数; D_o 的判别标准同单个指标变化程度的判定标准相同。

2.3 极端泥沙变化归因分析方法

2.3.1 降雨侵蚀力计算模型 本文采用章文波等^[24]建立的基于日降雨估算降雨侵蚀力的简易模型, 计算公式为:

$$R_i = \alpha \sum_{k=1}^m (P_k)^\beta \tag{9}$$

$$\alpha = 21.586 \beta^{-7.1891} \tag{10}$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.177}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \tag{11}$$

式中: R_i 为第 i 个半月的降雨侵蚀力; P_k 为半月时段内第 k 天的侵蚀性日降雨量(要求 $P_k \geq 12$ mm, 否则计为 0); α 和 β 为模型参数; P_{d12} 为日降雨量 ≥ 12 mm 的日平均雨量; P_{y12} 为日降雨量 ≥ 12 mm 的年平均降雨量。

2.3.2 交叉小波变换 本文使用交叉小波变换^[25]来分析无定河流域年降雨侵蚀力对极端泥沙指标的影响。交叉小波变换不仅能够分析出 2 个时间序列的相关程度, 还能揭示其在时频两域中的相位关系, 是检验 2 个时间序列之间关系的有力方法。本文将 2 个时间序列 x_n 和 y_n 的交叉小波变换定义为:

$$W_{XY}(s, t) = W_X(s, t) W_Y^*(s, t) \tag{12}$$

式中: $W_{XY}(s, t)$ 为交叉小波谱; $W_X(s, t)$ 为 x_n 的小波变换系数; $W_Y^*(s, t)$ 为 y_n 的小波变换系数的复共轭。

2.3.3 通径分析 通径分析(path analysis)是由美国学者 Wright^[26]于 1921 年提出的, 用于分析多个自变量和因变量之间的线性关系, 定量描述各自变量对因变量的直接和间接作用。本文采用通径分析, 确定年 NDVI 和年累积坝控面积分别对极端泥沙指标变化的直接作用和间接作用, 具体计算公式见文献[27]。

3 结果与分析

3.1 极端泥沙指标变化特征

无定河流域 1958—2018 年极端泥沙指标的时间序列见图 2, 其整体上均呈波动下降趋势。通过对极端泥沙指标进行 M-K 趋势检验, 分析各个指标的变化趋势, 其结果见表 2。从表 2 可以看出, 在 5% 显著水平下, 最大 1 日含沙量(S_{x1d})、最大 5 日含沙量(S_{x5d})、年均含沙量(S_{int})、强含沙量(S_{95p})、极强含沙量(S_{99p})、高含沙水流日数(S_{200})均呈显著减小趋势, 这主要是因为无定河流域自 20 世纪 50 年代以来逐渐开展大规模的水土保持工程, 如造林种草、淤地坝建设等, 有效改善流域水土流失状况。

通过计算极端泥沙指标的变异系数可知, 这 6 个指标的年际变化幅度均较大, 其中 S_{99p} 的年际变化幅度最大, 变异系数为 112.88%; S_{x1d} 的年际变化幅度最小, 变异系数为 31.32%。根据变异系数 CV 的分类标准^[28]: $CV \leq 10\%$ 表示弱变异, $10\% < CV < 100\%$ 表示中等变异, $CV \geq 100\%$ 表示强变异。除 S_{99p} 属于强变异外, 其他 5 个指标均属于中等程度变异。

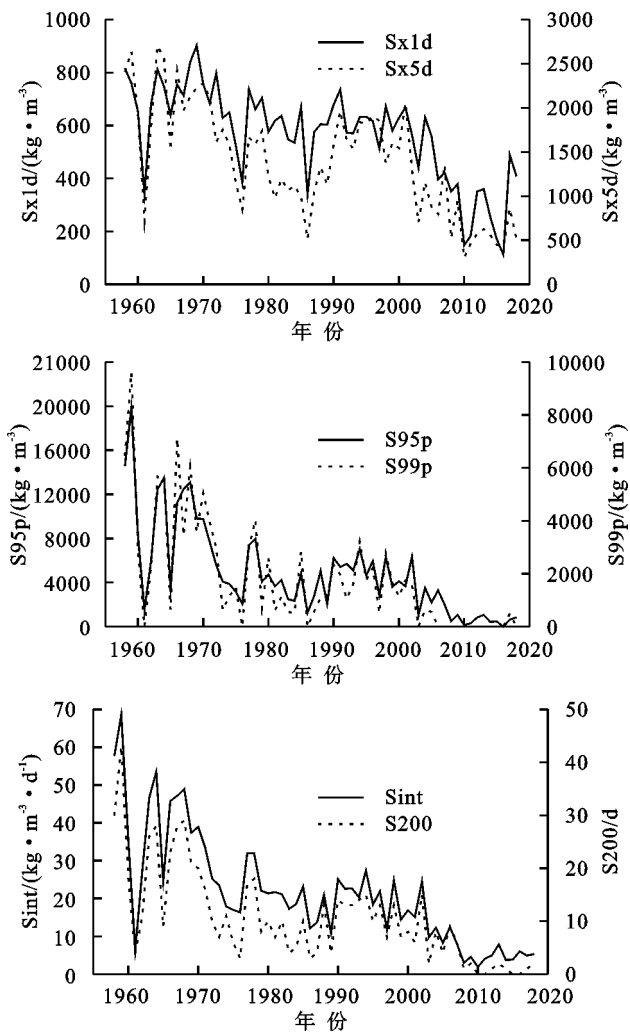
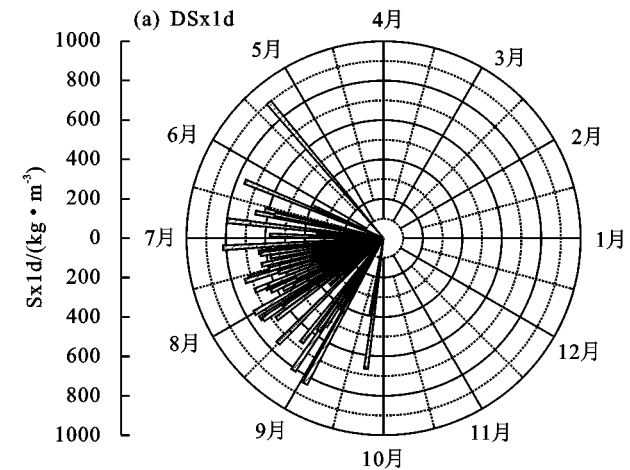


图2 无定河流域极端泥沙指标变化趋势

3.2 极端泥沙事件的时间分布特征

流域内极端泥沙事件有着一定的季节性特征,本



文采用圆分布统计法对无定河流域最大 1 日含沙量和最大 5 日含沙量的发生时间进行分析。图 3a 为年最大 1 日含沙发生时间(DSx1d)的圆分布特征,可见其大多数发生在夏季。DSx1d 的集中趋势值 $r = 0.92$,在 $\alpha = 0.05$ 的水准上,查圆形分布 r 界值表^[29], $r_{0.05} = 0.28$,显然 $r > r_{0.05}$,即认为 DSx1d 存在明显的集中趋势。DSx1d 的平均发生日期是 7 月 24 日,标准差为 24 天,年际变化小,其发生高峰期为 6 月 30 日至 8 月 18 日。

表 2 1958—2018 年无定河流域极端泥沙指标变化特征

极端泥沙指标	统计量(Z)	变化趋势	变异系数/%
Sx1d	-6.23*	显著减少	31.32
Sx5d	-5.71*	显著减少	44.68
Sint	-7.26*	显著减少	68.42
S95p	-6.18*	显著减少	83.32
S99p	-5.84*	显著减少	112.88
S200	-5.99*	显著减少	84.58

注: * 表示通过 95% 置信水平检验。

图 3b 为年最大 5 日含沙发生时间(DSx5d)的圆分布特征,可直观看出,DSx5d 比 DSx1d 的时间分布更为集中。DSx5d 的集中趋势值 $r = 0.95$,显然 $r > r_{0.05}$,表明其集中趋势显著。DSx5d 的平均发生日期是 7 月 29 日,标准差为 19 天,与 DSx1d 相比,DSx5d 的年际变化更小,发生高峰期为 7 月 11 日至 8 月 17 日,比 DSx1d 的发生高峰期更为集中,在此期间应着重预防泥沙灾害的发生。

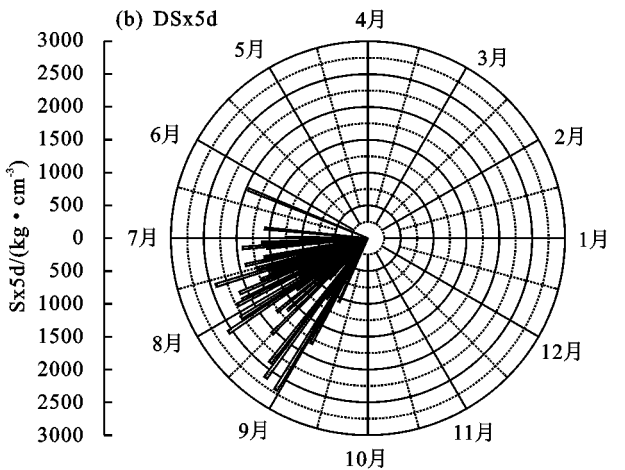


图3 极端泥沙事件平均发生日期的圆分布

3.3 极端泥沙指标变点诊断

为判定极端泥沙指标的变异时间,本文采用 Pettitt 突变点检验法,对无定河流域 1958—2018 年极端泥沙指标进行检测。由图 4 可知,最大 1 日含沙量(Sx1d)、最大 5 日含沙量(Sx5d)、年均含沙量(Sint)、强含沙量(S95p)、极强含沙量(S99p)、高含沙水流日数(S200)6 个指标均

存在显著突变年份($p < 0.05$),Sx1d、Sx5d、Sint、S95p、S99p 和 S200 的突变年份依次是 2001 年、2001 年、1996 年、2002 年、2002 年、1998 年,整体来看,极端泥沙指标的变异时间基本在 2000 年附近,这可能与该地区在 1998 年大规模实施退耕还林(草)政策有关。何毅^[30]分析黄河河潼区间 1958—2013 年输沙量的突变时间发现,在

2002 年突变前后研究区输沙量变化最大,这与本文 的极端泥沙指标变异诊断结果基本一致。

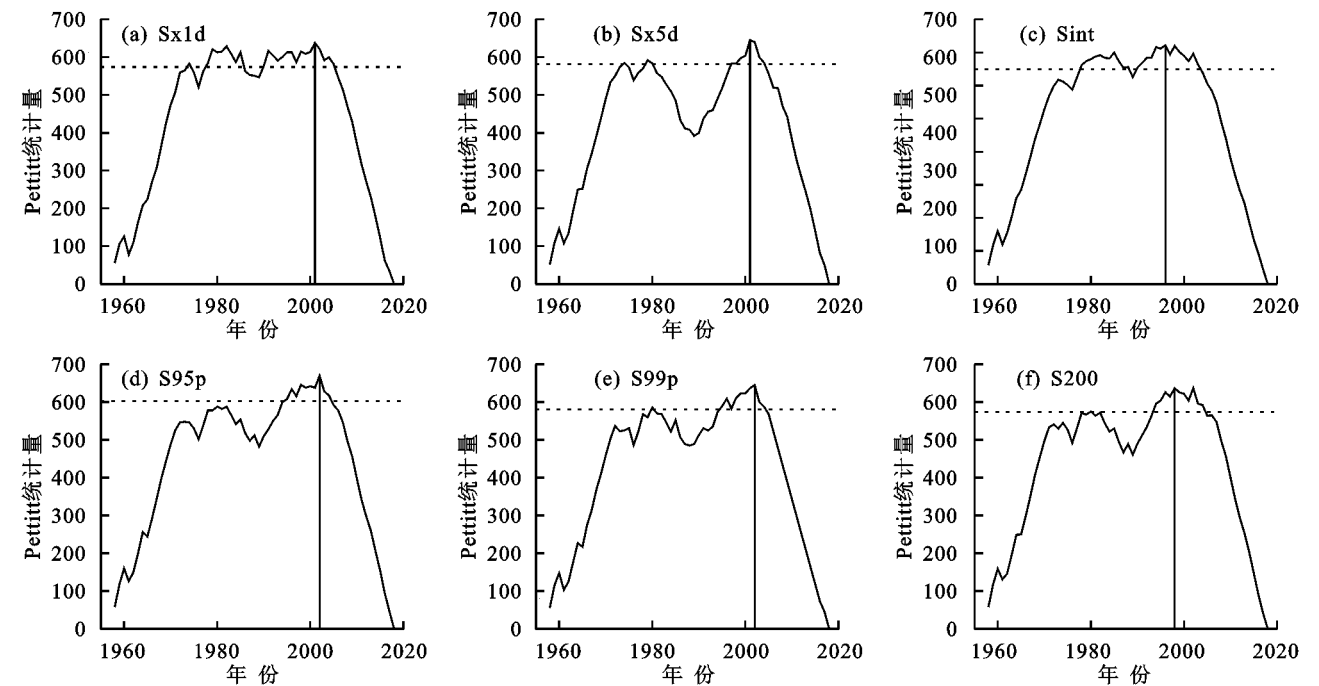


图 4 1958—2018 年无定河流域极端泥沙指标变化突变点

3.4 极端泥沙指标改变度分析

为量化极端泥沙指标受人类活动影响的改变程度,根据各指标的变异时间,将其划分为突变前和突变后 2 个时段,运用变动范围法,得到极端泥沙指标的 RVA 目标阈值和水文改变度,对比突变前后极端泥沙指标的变化情况,分析人类活动对无定河流域泥沙情势变化的影响。

表 3 列出极端泥沙指标突变前后平均值的变化及改变度,可以看出,各指标平均值都大幅减小,其中极强含沙量(S99p)变化最为显著,减幅达—95.74%。各指标水文改变度处于中高变化度,在量级指标组中,最大 1 日含沙量(Sx1d)和最大 5 日含沙量(Sx5d)均发生高度改变,改变度分别达到—78.43%,—76.47%;在

强度指标组中,年均含沙量(Sint)、强含沙量(S95p)和极强含沙量(S99p)均发生高度改变,且 S95p 和 S99p 的改变度最大,改变度达—100%,即 S95p 和 S99p 在 2002 年发生突变后,所有年份的 S95p、S99p 都低于 RVA 下限,均在阈值之外;在频次指标组中,高含沙水流日数(S200)发生中度改变,其出现次数明显减少,甚至在某些年份不出现;整体来看,发生高度改变的指标最多,为 5 个,占比达到 83.33%。采用 Shiau 等^[23]提出的综合指数来评估极端泥沙指标的整体变化程度,该方法统筹考虑所有变异指标对整体变异度的影响,计算整体改变度为 83.72%,属于高度改变,说明无定河流域大规模实施的生态建设措施对河流泥沙情势变化的影响很大。

表 3 无定河流域极端泥沙指标改变度分析

极端泥沙指标	平均值		偏差值	偏差率/%	RVA 阈值		D_i /%	改变度
	突变前	突变后			下限	上限		
Sx1d/(kg·m ⁻³)	645.36	365.88	−279.48	−43.31	577.25	729.50	−78.43	高
Sx5d/(kg·m ⁻³)	1650.66	731.06	−919.61	−55.71	1199.49	1969.40	−76.47	高
Sint/(kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	28.13	9.48	−18.65	−66.30	18.50	35.32	−82.27	高
S95p/(kg·m ⁻³)	6269.11	1144.63	−5124.49	−81.74	3630.50	7827.00	−100.00	高
S99p/(kg·m ⁻³)	2466.07	105.00	−2361.07	−95.74	877.00	3331.00	−100.00	高
S200/d	13.85	3.75	−10.10	−72.93	7.00	18.00	−57.29	中

4 讨论

4.1 降雨侵蚀力对极端泥沙变化的影响

降雨侵蚀力是导致流域水土流失的关键因素之一,本文采用章文波等^[24]建立的基于日降雨估算降雨侵蚀力的简易模型,计算无定河流域 1958—2018 年的降雨侵蚀力,并使用交叉小波变换来分析年降雨

侵蚀力对极端泥沙指标变化的影响。

从图 5 可以看出,1958—2018 年无定河流域年降雨量最小值为 177.59 mm,最大值为 630.99 mm,多年平均值为 394.55 mm,变异系数为 22.49%,变异强度属于中等程度。1958—2018 年无定河流域年降雨侵蚀力最小值为 104.24 (MJ·mm)/(hm²·h),最大值为 1 611.24 (MJ·mm)/(hm²·h),多年平均

值为 764.99 (MJ · mm)/(hm² · h), 变异系数为 46.75%, 属于中等程度变异, 说明降雨侵蚀力年际波动较大。流域内降雨量和降雨侵蚀力的年内分布十分集中, 主要发生在每年的 5—9 月^[31], 二者的年际变化基本一致, 根据 M-K 趋势检验结果, 年降雨量和年降雨侵蚀力均呈现不显著的减小趋势。

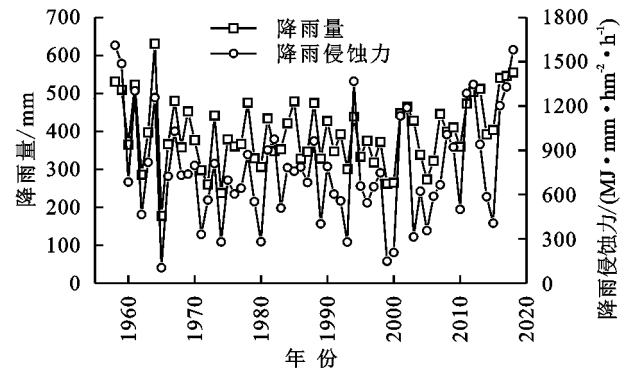


图 5 1958—2018 年无定河流域降雨及降雨侵蚀力变化

对无定河流域极端泥沙指标和年降雨侵蚀力进行交叉小波变换。由图 6 可知, 最大 1 日含沙量(Sx1d)与年降雨侵蚀力在 2002—2003 年和 2010—2013 年分

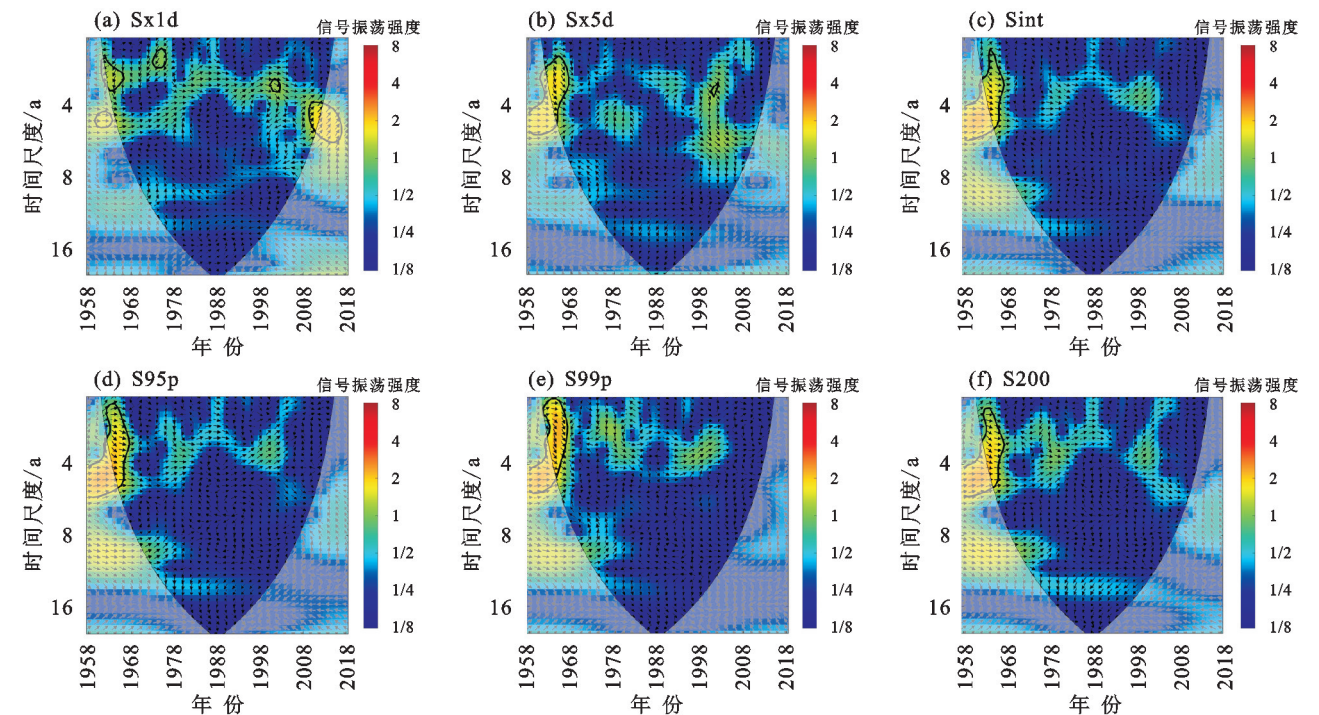


图 6 1958—2018 年无定河流域极端泥沙指标与年降雨侵蚀力的交叉小波变换

4.2 生态建设对极端泥沙变化的影响

自 20 世纪 50 年代以来, 无定河流域逐步实施生态建设措施, 主要包括造林种草、修建梯田和淤地坝建设等。从图 7 可以看出, 1998—2018 年无定河流域 NDVI 年均值整体呈显著增加趋势 ($p < 0.05$), 其中显著增加的面积占比 96.46%。这表明, 自 1999 年黄土高原实施退耕还林还草政策后, 该流域的植被状况明显改善。图 8a 为无定河流域骨干淤地坝的空间分布, 在 1958—2018 年, 该流域共修建 967 座骨干淤地坝, 其

主要建于 1960—1980 年和 2000—2010 年, 分别在 1972 年和 2006 年达到建设数量峰值 (图 8b)。根据 Han 等^[33]的研究, 淤地坝的修建对无定河输沙量的减少有重要影响, 尤其是在 1970—1979 年, 这与淤地坝的建设高峰期相吻合。本文以 NDVI 年均值反映无定河植被恢复状况, 以年累积坝控面积(A_d)代表无定河淤地坝建设情况, 探讨二者对极端泥沙变化的影响。

NDVI 和 A_d 与极端泥沙指标均呈显著负相关 ($p < 0.05$), 由于生态措施间存在较强的相关性, 关系错综复

杂,本文采用通径分析,确定 NDVI 和 A_d 对极端泥沙指标变化影响的直接作用和间接作用(表 4)。结果表明,除 NDVI 对 S_{x1d} 的直接作用较大外,其他指标中均是 A_d 的直接作用较大,且随着极端泥沙指标在量级或强度上的提升, A_d 对极端泥沙指标的直接通径系数也随之增大。综合来看, A_d 对极端泥沙指标的直接影响更大,是影响极端泥沙变化的主要因素。根据冉大川等^[34]的研究,淤地坝对无定河的减沙贡献率为 62.11%,在水土保持措施中的减沙效益最大,是主要的拦沙措施,这与本研究结果相一致。

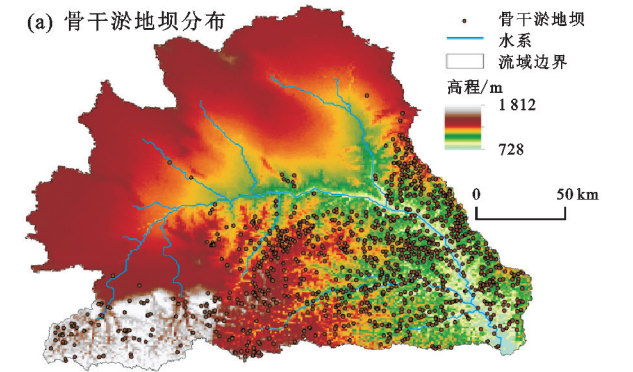


图 8 无定河流域骨干淤地坝空间分布及逐年新增淤地坝数目

表 4 年 NDVI 平均值(NDVI)和年累积坝控面积(A_d)对极端泥沙指标的通径分析				
极端泥沙指标	影响因素	直接通径系数	间接通径系数	总作用
S_{x1d}	NDVI	-0.49	-0.20	-0.69
	A_d	-0.29	-0.34	-0.63
S_{x5d}	NDVI	-0.35	-0.26	-0.61
	A_d	-0.38	-0.24	-0.62
S_{int}	NDVI	-0.30	-0.38	-0.68
	A_d	-0.54	-0.21	-0.75
S_{95p}	NDVI	-0.27	-0.33	-0.60
	A_d	-0.47	-0.19	-0.66
S_{99p}	NDVI	-0.14	-0.37	-0.51
	A_d	-0.54	-0.09	-0.63
S_{200}	NDVI	-0.24	-0.33	-0.57
	A_d	-0.47	-0.17	-0.64

5 结论

(1)在 1958—2018 年,无定河流域极端泥沙指标最大 1 日含沙量(S_{x1d})、最大 5 日含沙量(S_{x5d})、年均含沙量(S_{int})、强含沙量(S_{95p})、极强含沙量(S_{99p})、高含沙水流日数(S_{200})均呈显著减小趋势($p<0.05$)。其中, S_{99p} 属于强变异,其他 5 个指标均属于中等程度变异。

(2)年最大 1 日含沙发生时间(DS_{x1d})存在明显的集中趋势,平均发生日期是 7 月 24 日,标准差为 24 天,发生高峰期 of 6 月 30 日至 8 月 18 日;年最大 5 日含沙发生时间(DS_{x5d})的平均发生日期是 7 月

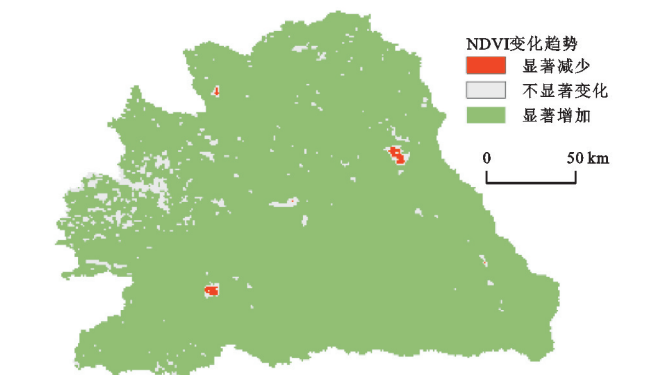
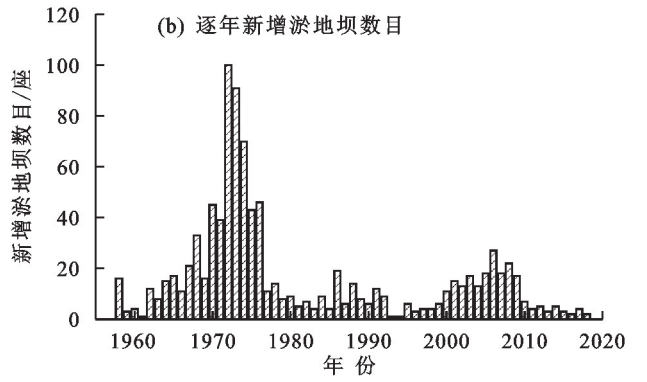


图 7 1998—2018 年无定河流域年 NDVI 变化趋势



29 日,标准差为 19 天,发生高峰期 of 7 月 11 日至 8 月 17 日,比 DS_{x1d} 的发生高峰期更为集中,在此期间应着重预防泥沙灾害的发生。

(3)高含沙水流日数(S_{200})发生中度改变,最大 1 日含沙量(S_{x1d})、最大 5 日含沙量(S_{x5d})、年均含沙量(S_{int})、强含沙量(S_{95p})和极强含沙量(S_{99p})发生高度改变,且 S_{95p} 和 S_{99p} 的改变度最大,改变度达-100%。极端泥沙指标整体改变度为 83.72%,属于高度改变。

(4)在 1963—1966 年,降雨侵蚀力的降低在一定程度上导致无定河流域极端泥沙的减少。在 1982—2018 年,NDVI 和年累积坝控面积(A_d)与极端泥沙指标均呈显著负相关($p<0.05$),通径分析结果表明, A_d 比 NDVI 对极端泥沙指标的直接作用更大,是影响极端泥沙变化的主要因素。

参考文献:

[1] Sivakumar B. Global climate change and its impacts on water resources planning and management: Assessment and challenges[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25(4): 583-600.

[2] 孙倩,于坤霞,李占斌,等.黄河中游多沙粗沙区水沙变化趋势及其主控因素的贡献率[J].地理学报, 2018, 73(5): 945-956.

[3] Zheng H Y, Miao C Y, Wu J W, et al. Temporal and spatial variations in water discharge and sediment load on the Loess Plateau, China: A high-density study[J]. Science of

- the Total Environment, 2019, 666(10): 875-886.
- [4] Wang S J, Ran L S. Analysis of dam effect on sediment yield in the Wudinghe River basin[J]. Geographical Research, 2008, 27(4): 811-818.
 - [5] Ran Q H, Zong X Y, Ye S, et al. Dominant mechanism for annual maximum flood and sediment events generation in the Yellow River basin[J]. Catena, 2020, 187(4): 104376-104387.
 - [6] Katz R W, Brown B G. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages[J]. Climatic Change, 1992, 21(3): 289-302.
 - [7] 张利平, 杜鸿, 夏军, 等. 气候变化下极端水文事件的研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1370-1379.
 - [8] 丁裕国, 郑春雨, 申红艳. 极端气候变化的研究进展[J]. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(6): 1-5.
 - [9] Karl T R, Nicholls N, Ghazi A. Clivar/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary [M]. Weather and Climate Extremes. Berlin: Springer, 1999: 3-7.
 - [10] Goodess C, Haylock M, Jones P, et al. Statistical and regional dynamical downscaling of extremes for European regions: Some preliminary results from the STARDEX project[J]. American Society of Mechanical Engineers, 2003, 5(4): 145-151.
 - [11] Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J]. Regulated Rivers Research and Management, 1998, 14(4): 329-340.
 - [12] Yu K X, Zhang X, Xu B X, et al. Evaluating the impact of ecological construction measures on water balance in the Loess Plateau region of China within the Budyko framework[J]. Journal of Hydrology, 2021, 601(10): 126596-126609.
 - [13] Rustomji P, Zhang X P, Hairsine P B, et al. River sediment load and concentration responses to changes in hydrology and catchment management in the Loess Plateau region of China[J]. Water Resources Research, 2008, 44(7): 1-17.
 - [14] Zhou Y Y, Shi C X, Du J, et al. Characteristics and causes of changes in annual runoff of the Wuding River in 1956—2009[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(1): 225-234.
 - [15] Min Z H. Research on the benefits of conservation of soil and water and sediment reduction[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2020, 450(1): 12119-12127.
 - [16] 水利部黄河水利委员会. 中华人民共和国水文年鉴 2018 第 4 卷 黄河流域水文资料 第 3 册 上 黄河中游区上段(河口镇至龙门)[M]. 郑州: 水利部黄河水利委员会刊印, 2019: 279-280.
 - [17] 榆林市统计局, 国家统计局榆林调查队. 榆林统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019: 183-184.
 - [18] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 1945, 13(3): 245-259.
 - [19] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990, 25(1): 86-91.
 - [20] Burn D H. Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures[J]. Journal of Hydrology, 1997, 202(1): 212-230.
 - [21] Pettit A. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Applied Statistics, 1979, 28(2): 126-135.
 - [22] Richter B, Baumgartner J, Wigington R, et al. How much water does a river need? [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 231-249.
 - [23] Shiau J T, Wu F C. Pareto-optimal solutions for environmental flow schemes incorporating the intraannual and interannual variability of the natural flow regime [J]. Water Resources Research, 2007, 43(6): 1-12.
 - [24] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
 - [25] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 61-78.
 - [26] Wright S. Systems of mating. I. The biometric relations between parent and offspring[J]. Genetics, 1921, 6(2): 111-123.
 - [27] Hill W G, Singh R K. Biometrical methods in quantitative genetic analysis[J]. Biometrics, 1978, 34(4): 723-731.
 - [28] 贾路, 任宗萍, 李占斌, 等. 2000—2013 年西安市植被覆盖度时空演变[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 274-279.
 - [29] Steingraber S. Living downstream: An ecologist's personal investigation of cancer and the environment[M]. New York: Da Capo Press, 2010: 337-440.
 - [30] 何毅. 黄河河口镇至潼关区间降雨变化及其水沙效应[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
 - [31] Jia L, Yu K X, Li Z B, et al. Temporal and spatial variation of rainfall erosivity in the Loess Plateau of China and its impact on sediment load [J]. Catena, 2022, 210(3): e105931.
 - [32] Liu S Y, Huang S Z, Xie Y Y, et al. Spatial-temporal changes of rainfall erosivity in the loess plateau, China: Changing patterns, causes and implications[J]. Catena, 2018, 166(7): 279-289.
 - [33] Han J Q, Gao J E, Luo H. Changes and implications of the relationship between rainfall, runoff and sediment load in the Wuding River basin on the Chinese Loess Plateau[J]. Catena, 2019, 175(4): 228-235.
 - [34] 冉大川, 左仲国, 上官周平. 黄河中游多沙粗沙区淤地坝拦减粗泥沙分析[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 443-450.