

# 渭河流域极端降雨变化趋势及其对水沙情势的影响

邱德勋<sup>1,2</sup>, 穆兴民<sup>1,2,3</sup>, 赵广举<sup>1,2,3</sup>, 高鹏<sup>1,2,3</sup>

(1.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**为探究渭河流域极端降雨变化趋势及其对水沙情势的影响,采用非参数趋势检验、突变检验和连续小波变换诊断了渭河流域 1960—2019 年的极端降雨指数及径流输沙序列的变异特征,通过双累积曲线法和相关分析法定量评估了流域极端降雨对水沙变化的影响。结果表明:各极端降雨指数呈阶段性波动变化,总体上 PRCPTOT, RX5day 和 RX1day 呈不显著下降趋势, R95pTOT, SDII 和 FSPTOT 呈不显著上升趋势。各极端降雨指数均存在以 4~6 a, 11~12 a, 28~29 a 为周期的变化特征。径流与输沙量均呈显著减少趋势,分别在 1993 年、1999 年发生突变,其中径流存在 5 a 和 12 a 的周期。各极端降雨指数均与径流、输沙量正相关,相比之下,输沙量与各极端降雨指数之间的相关系数偏低。极端降雨变化对径流与输沙量的减少具有重要影响。其中, PRCPTOT 对径流减少的影响最大(29.65%), 其次是 RX5day(25.68%) 和 FSPTOT(25.95%)。PRCPTOT 对输沙量减少的影响也是最大的(10.02%), 其次是 RX5day(7.12%)。综上,渭河流域水沙情势的变化受极端降雨的显著影响。

**关键词:**渭河流域; 水沙; 极端降雨

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)06-0065-08

## Effects of Precipitation Extremes Change on Streamflow and Sediment Load in Weihe River Basin

QIU Dexun<sup>1,2</sup>, MU Xingmin<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Guangju<sup>1,2,3</sup>, GAO Peng<sup>1,2,3</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to explore the trend of extreme rainfall and its impact on water and sediment regime in the Weihe River Basin, we used nonparametric trend analysis, abrupt change analysis and continuous wavelet transform to diagnose the variation characteristics of extreme rainfall index, runoff and sediment transport in the Weihe River Basin from 1960 to 2019. Moreover, we quantitatively evaluated the impact of extreme rainfall on water and sediment variation in the Weihe River Basin through double cumulative curve method and correlation analysis method. The results show that: The extreme rainfall indices fluctuate over time; On the whole, PRCPTOT, RX5day, and RX1day show downward trend ( $p > 0.05$ ), while R95pTOT, SDII and FSPTOT show upward trend ( $p > 0.05$ ). In addition, each extreme rainfall index has the periodic variation characteristics of 4~6 years, 11~12 years, and 28~29 years. The annual streamflow and annual sediment load show a significant decreasing trend, with abrupt changes in 1993 and 1999, respectively. The streamflow has periods of 5 years and 12 years. On the time scale of 12 years, the changes of streamflow and extreme rainfall indices are basically synchronous. Each index is positively correlated with streamflow and sediment load. By contrast, the correlation between sediment load and extreme rainfall index is low. Extreme rainfall changes have an important impact on the reduction of runoff and sediment load. PRCPTOT has the greatest impact on streamflow reduction (29.65%), followed by RX5day (25.68%) and FSPTOT (25.95%). Similarly,

收稿日期: 2021-08-17

修回日期: 2021-09-09

资助项目: 国家自然科学基金“黄土高原水土保持措施潜力及其对河流水沙的调控机制”(U2243211)

第一作者: 邱德勋(1997—), 男, 山东临沂人, 在读硕士, 研究方向为水土保持与流域生态水文。E-mail: qiudexun97@163.com

通信作者: 高鹏(1976—), 男, 陕西扶风人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与流域生态水文研究。E-mail: gaopeng@ms.iswc.ac.cn

PRCPTOT also has the greatest impact on the reduction of sediment load (10.02%), followed by RX5day (7.12%). In a word, the change of water and sediment regime in the Weihe River Basin is significantly affected by extreme rainfall.

**Keywords:** Weihe River Basin; streamflow and sediment load; extreme rainfall

径流泥沙变化是生物地球化学过程的重要组成部分,也是影响流域生态系统健康的关键因素<sup>[1]</sup>。近年来,黄河径流和输沙量都呈显著下降趋势<sup>[2-3]</sup>,水沙关系发生重大调整,对流域的防洪、水利工程建设、生态环境保护等产生重要影响,直接关系到未来黄河高质量发展规划及工程决策<sup>[4-5]</sup>。相关研究表明,降雨特别是极端降雨事件对流域水沙的产生与演变具有重要影响<sup>[1,6]</sup>。黄土高原地区大部分径流是由汛期(6—9月)的暴雨产生的<sup>[7]</sup>,渭河汛期输沙量占全年输沙总量的近 90%<sup>[8]</sup>。绝大多数的水土流失源于少数几场极端降雨事件<sup>[9]</sup>。2017 年无定河流域“7·26”特大暴雨引发高含沙洪水,导致白家川水文站最大洪峰流量达到 4 500 m<sup>3</sup>/s<sup>[10]</sup>。2016 年西柳沟流域“8·17”暴雨导致龙头拐站产生历史第 5 大洪峰流量、第 2 大次洪洪量的洪水过程<sup>[11]</sup>。极端降雨是导致黄土高原地区土壤侵蚀的重要原因<sup>[12]</sup>。在极端降雨作用下,径流系数和侵蚀模数均要高于对应的多年平均值<sup>[13]</sup>。目前,大规模的梯田、林草以及淤地坝等水土保持措施建设被认为是黄河中游水沙减少的主要因素<sup>[14]</sup>。然而,极端降雨事件会削弱水土保持措施的减水减沙效益<sup>[15-16]</sup>,甚至出现负效应<sup>[17]</sup>。在全球变化的背景下,极端降雨事件的频率和强度不断增加<sup>[18-19]</sup>。目前从流域尺度分析极端降雨事件的变化对径流与输沙的影响仍较为少见<sup>[13]</sup>。孙维婷<sup>[20]</sup>研究表明,延河流域极端降雨对径流、输沙量的影响在不同时期存在较大差异。钟科元等<sup>[6]</sup>定量评估了松花江流域极端降雨变化对输沙量的影响。

渭河是面积最大、来水量最多的黄河一级支流,是典型的多泥沙河流,水沙年际变化大,年内分配不均<sup>[21]</sup>。渭河流域是我国西北地区主要的粮食产区和重要的工商业区,也是我国重要饮用水、工业用水和灌溉水源地<sup>[22]</sup>。进入 21 世纪以来,渭河流域极端降雨事件频繁出现,引发严重的洪涝灾害<sup>[23]</sup>。目前,众多研究表明渭河流域年降雨量、径流与输沙量均呈减少趋势,且流域水沙变化是降雨等气候因素与人类活动共同作用的结果<sup>[24-27]</sup>。然而,关于渭河流域极端降雨的时间序列分析及其对径流与输沙的影响鲜有报道。基于此,本文以渭河流域为研究对象,基于流域内及其周边共 24 个气象站的 1960—2019 年逐日降水数据和华县、状头水文站的年径流、输沙数据,选取

6 个极端降雨指数,采用 Mann-Kendall 检验、Sen's 斜率估计、Pettitt 突变检验、小波分析、双累积曲线等方法分析流域内极端降雨、径流和输沙的变化趋势,定量评估不同极端降雨指数对渭河水沙变化的影响,研究结果旨在为渭河流域水土流失治理和水土资源优化配置提供参考。

## 1 研究区概况

渭河是黄河最大的支流,发源于甘肃省定西市渭源县鸟鼠山,流经陇西、武山、甘谷、天水等地,于宝鸡市进入陕西省,流经咸阳、西安、渭南等地,最后在渭南市潼关县汇入黄河(图 1)。渭河主干流全长约为 818 km,流域总面积约为 135 000 km<sup>2</sup>。渭河的两条主要支流为泾河和北洛河,流域面积分别约为 45 421, 26 905 km<sup>2</sup>。渭河流域(103.5°—110.5°E, 33.5°—37.5°N)整体呈不对称扇形,地势西高东低,海拔为 322~3 919 m。渭河流域北部为黄土高原,南部为秦岭,西部为黄土丘陵沟壑区,东部为关中平原。该地区属于温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年平均降水量约 610 mm,其中 60%以上的降水出现在 7—10 月,年平均气温在 7.8~13.5℃。华县、状头水文站分别位于渭河、北洛河的下游,控制渭河流域 98%的面积。

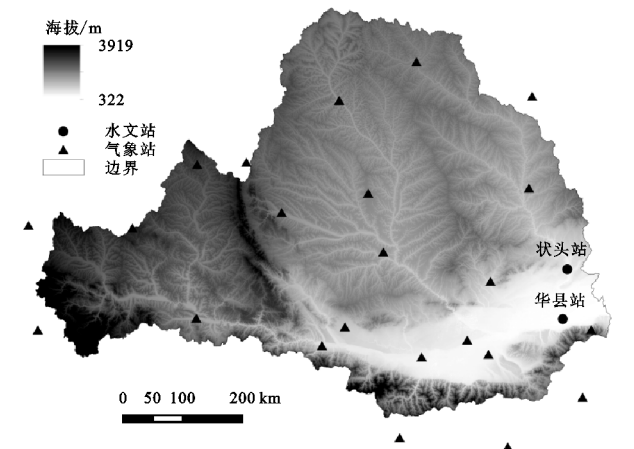


图 1 研究区位置及站点分布

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

渭河流域及周边 24 个气象站 1960—2019 年逐日降水资料来源于中国国家气象数据共享服务网

(<http://data.cma.cn>)。对于单个站点降水数据的短期缺测,采用邻近站点的降水量平均值插补,缺测 3 d 及以上的数据用-99.99 代替。数据经过极值检验、时间一致性检验和均一化检验,并且通过 RClimDex 软件进行质量检验。华县、状头水文站 1960—2019 年径流、输沙数据来源于《中国河流泥沙公报》和《黄河流域水文年鉴》。本研究将华县、状头以上的流域称为渭河流域,华县与状头水文站的径流之和与输沙

表 1 本研究使用的极端降雨指数的定义

序号	指数	缩写	定义	单位
1	年总降水量	PRCPTOT	年日降水量之和	mm
2	强降水总量	R95pTOT	日降水量>95%分位值的总降水量	mm
3	最大连续 5 d 降水量	RX5day	年 5d 连续日降水量的最大值	mm
4	最大 1 d 降水量	RX1day	年日降水量的最大值	mm
5	降水强度	SDII	雨天平均降水量(雨天降水量与降水天数的比值)	mm/d
6	汛期降水量	FSPTOT	6 月 1 日—9 月 30 日降水量	mm

2.2.2 Mann-Kendall 趋势检验 Mann-Kendall(M-K)非参数趋势检验被广泛用于检验水文气象要素时间序列的变化趋势。然而,该方法未能消除原始时间序列中自相关的影响。因此,本研究采用预置白方法<sup>[28]</sup>对数据进行预处理,消除原始时间序列的自相关性,得到新的时间序列,之后采用 M-K 趋势检验对新序列进行趋势分析。统计量  $Z$  的正(负)值表示序列上升(降低)趋势。当  $Z$  的绝对值大于 1.96,2.58 时,表示其分别通过了  $\alpha=0.05$  和  $\alpha=0.01$  显著性检验。

2.2.3 Sen's 斜率估计 Sen's 斜率估计是一种非参数检验法,可以估计序列变化趋势幅度大小。对于时间序列  $x_i=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ ,Sen's 斜率计算公式为:

$$\beta=\text{median}\left(\frac{x_j-x_i}{j-i}\right),\forall j>i$$

(1)

式中:median 为取中值函数。 $\beta>0$  表明序列呈上升趋势; $\beta=0$  表明序列趋势不明显; $\beta<0$  表明序列呈上升趋势。

2.2.4 Pettitt 突变检验 Pettitt 是一种基于秩的非参数变点检测方法,通过检验时间序列均值发生显著变化的时间来确定突变时间,可有效避免数据分布特征的影响以及异常值的干扰。对于样本容量为  $N$  的时间序列,构建统计量:

$$U_{t,N}=U_{t-1,N}+\sum_{j=1}^N\text{sgn}(x_t-x_j)$$

(2)

式中: $t=2,\cdots,N$ 。令  $x_t-x_j=\theta$ ,则  $\text{sgn}\theta$  值由下式确定:

$$\text{sgn}=\begin{cases}+1 & \theta>0 \\ 0 & \theta=0 \\ -1 & \theta<0\end{cases}$$

(3)

统计量  $U$  为第 1 个样本的元素值超过第 2 个样

量之和代表整个渭河流域的径流与输沙量。

2.2 研究方法

2.2.1 极端降雨指数选取 根据世界气象组织推荐的极端降雨指数,综合考虑其含义,选取了其中 5 个极端降雨指数。此外,汛期降雨量(FSPTOT)对流域侵蚀产沙具有重要影响<sup>[6]</sup>。因此,本研究选取 PRCPTOT,R95pTOT,RX5day,RX1day,SDII 和 FSPTOT 共 6 个极端降雨指数(表 1)。

本元素值的次数。如果在某年出现突变,则将该年作为分割点,时间序列被分为突变前与突变后两部分。

2.2.5 连续小波变换 连续小波变换具有自适应特性的时频域窗口,通过不断调节时域和频域窗口大小,能够揭示时间序列中信号变化的周期特性。本文采用 Morlet 小波函数,定义如下:

$$\psi(t)=\pi^{-1/4}e^{i\omega_0t}e^{-t^2/2}$$

(4)

式中: $t$  为时间; $\omega_0$ 为无量纲频率,一般取  $\omega_0=6$ 。对于离散时间序列  $X_n(n=1,\cdots,N)$ ,其连续小波变换定义如下:

$$W_n^X(s)=\sqrt{\frac{\delta_t}{s}}\sum_{i=1}^nx_i\psi\left[\frac{(i-n)\delta_t}{s}\right]$$

(5)

式中: $W_n^X(s)$ 为小波变换系数; $\delta_t$  为时间步长; $s$  为比例因子。通过小波方差可判断时间序列的周期特性,通过不同时间尺度的小波实部变化,可判断时间序列的变化特征。

2.2.6 双累积曲线 双累积曲线是时间序列分析中的一种常用方法<sup>[29]</sup>,目前被广泛用于流域水沙变化归因分析的研究。本文采用极端降雨指数-径流量/输沙量累积值,按照相同的时间步长绘制双累积曲线,分析极端降雨指数变化对流域水沙变化的影响。首先,根据突变点前实测资料,建立累积极端降雨指数-径流/输沙量回归方程;然后,将突变点后的极端降雨指数累积值代入回归方程,计算累积径流/输沙量的拟合值;最后,计算突变点后累积径流/输沙量与拟合累积径流/输沙量的均值之差,即为人类活动影响的量。

3 结果与分析

3.1 极端降雨指数变化趋势

近 60 a 来,渭流域各极端降雨指数均呈波动变化



(图 2)。M-K 检验表明,各指数的  $Z$  统计量绝对值均小于 1.96,未通过 0.05 显著性水平检验。其中,PRCPTOT,RX5day,RX1day 呈不显著下降趋势( $-1.96 < Z < 0$ ),而 R95pTOT,SDII 和 FSPTOT 呈不显著上升趋势( $0 < Z < 1.96$ )(表 2)。各极端降雨指数年际波动变化具有一定的相似性,大致可分为 4 个阶段:1960—1972 年,除 SDII 有所上升,其余各极端降雨指数均呈波动下

降趋势;1972—1983 年,除 SDII 先下降后上升,其余各极端降雨指数均呈波动上升趋势;1983—1997 年,除 RX1day 先下降后上升,各指数表现出明显下降趋势;2010 年之后,各指数均呈小幅波动上升趋势。总体上,R95pTOT 的波动变化最明显,变差系数达到 0.487。小波方差结果表明,各极端降雨指数均存在 2 个小周期(4~6 a 和 11~12 a)和 1 个大周期(28~29 a)的变化特征(图 3)。

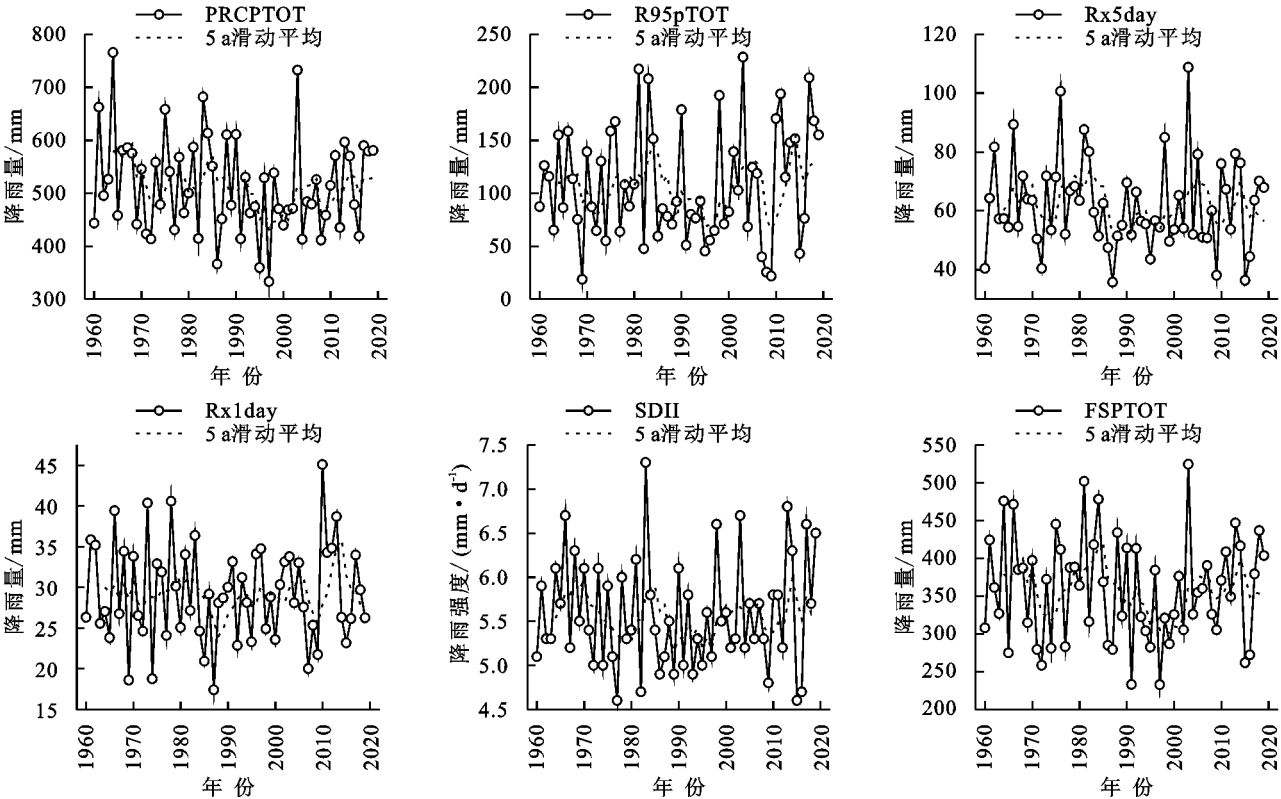


图 2 渭河流域 1960—2019 年极端降雨指数的年际变化

表 2 渭河流域 1960—2019 年极端降雨指数年际变化趋势

极端降雨指数	均值	变差系数	Z 值	Sen's 斜率
PRCPTOT	513.365	0.173	-0.670	-0.421
R95pTOT	107.820	0.487	0.376	0.172
RX5day	61.751	0.241	-0.631	-0.059
RX1day	29.240	0.201	-0.057	-0.002
SDII	5.575	0.109	0.102	0.000
FSPTOT	358.871	0.189	0.032	0.041

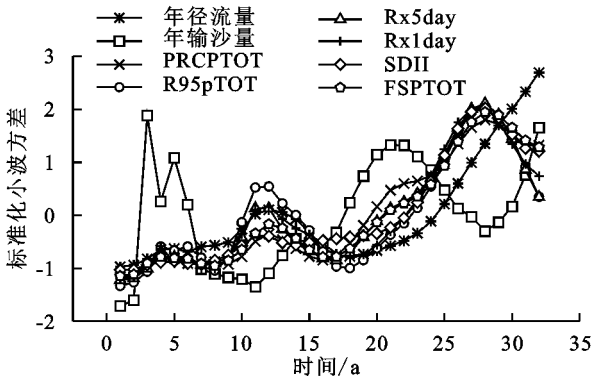


图 3 极端降雨指数与径流输沙的标准化小波方差

3.2 径流与输沙量变化趋势

近 60 a 渭河流域年径流与年输沙量均呈减少趋势(图 4),年均变化速率分别为  $-8.81 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$  和  $-8.95 \times 10^2 \text{ t/a}$ ,M-K 检验表明, $Z$  统计量绝对值均大于 2.58,通过 0.01 显著性水平检验。其中,输沙量减少趋势较径流更为显著,且波动性更大,二者的变差系数分别为 0.831,0.483。Pettitt 突变检验表明,径流与输沙量分别在 1993 年和 1999 年发生突变(表 3)。小波周期性分析发现,径流存在 5 a 和 12 a 的周期,这与极端降雨指数的 2 个小周期相似。然而,输沙量的周期性变化与径流及各极端降雨指数差异较大。在此基础上,本文进一步计算了径流与极端降雨指数在 12 a 时间尺度上的标准化小波变换实部(图 5)。当小波实部为正值时,对应的径流与极端降雨处于偏多期,负的小波实部对应的径流与极端降雨处于偏少期<sup>[30]</sup>。当小波实部为 0 时,表明径流和极端降雨处在丰枯变化的转换点。由图 5 可以看出,在 12 a

时间尺度上,渭河流域径流与极端降雨指数的变化基本同步。1960—1970 年,径流的波动小于极端降雨指数;1970—1992 年,径流较极端降雨指数波动更大;从 90 年代中期往后,径流的波动幅度始终小于极端降雨指数。二者的波动强弱变化反映了不同时期径流变化的主导因素并不一致。

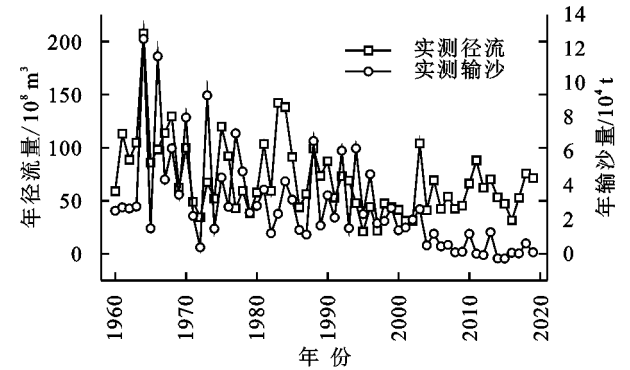


图 4 渭河流域 1960—2019 年径流与输沙量年际变化

表 3 渭河流域 1960—2019 年径流与输沙量年际变化趋势

指标	均值	变差系数	Z 值	Sen's 斜率	突变年份
径流量	70.227	0.483	-3.068	-0.698	1993
输沙量	3.189	0.831	-5.747	-0.072	1999

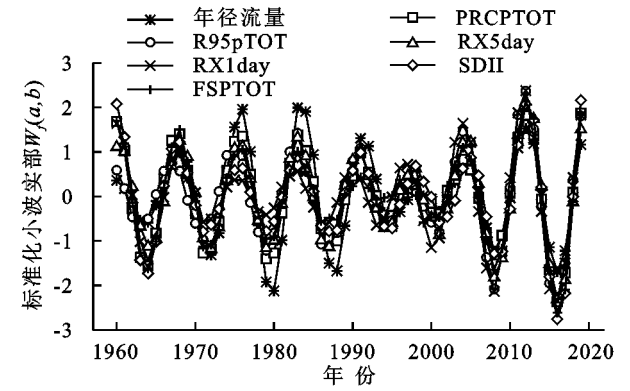


图 5 极端降雨指数与径流在 12 a 尺度下的  
标准化小波实部变化曲线

### 3.3 极端降雨指数对径流与输沙量变化的影响

3.3.1 径流、输沙量与极端降雨指数的相关性分析  
将径流的研究时段分为 3 个时期:1960—2019 年、1960—1993 年(突变点前期)和 1994—2019 年(突变点后期)。对不同时期内的径流与极端降雨指数进行相关分析,判断极端降雨变化对流域径流过程的影响(表 4)。结果表明,1960—2019 年和 1994—2019 年,除 RX1day 外,其余极端降雨指数与径流均呈显著的正相关( $p<0.05$ ),其中,PRCPTOT 与径流的相关系数最大,分别达到 0.80、0.83。而在突变之前(1960—1993 年),RX1day、RX5day 与径流之间的相关性均偏弱,未通过 0.05 显著性检验。PRCPTOT 与径流之间的相关性同样最强,相关系数为 0.88。此

外,值得注意的是,在 3 个时期内 FSPTOT 与径流之间的相关性也较强,相关系数均超过 0.60,仅次于 PRCPTOT。因此,可以认为 PRCPTOT 和 FSPTOT 是影响流域径流变化的主要极端降雨指数,而 RX1day 的影响相对较小。

将输沙量的研究时段也分为 3 个时期:1960—2019 年、1960—1999 年(突变点前期)和 2000—2019 年(突变点后期)。表 5 为不同时期内的输沙量与极端降雨指数的相关分析结果。与径流相比,总体上输沙量与各极端降雨指数之间的相关系数偏低。1960—2019 年,PRCPTOT、SDII 和 FSPTOT 与输沙量呈显著的正相关( $p<0.05$ ),其中 PRCPTOT 与输沙量的相关性最大,相关系数为 0.42。1960—1999 年,除 R95pTOT 和 RX5day,其余各指数与输沙量呈显著的正相关( $p<0.05$ ),其中 FSPTOT 与输沙量之间的相关系数最大,为 0.56。而在突变点后期(2000—2019 年),仅 RX5 day 与输沙量呈显著的正相关( $p<0.05$ )。从 3 个时期的相关系数平均值来看,PRCPTOT 和 FSPTOT 对流域输沙量变化的影响相对较大。

极端降雨 指数	表 4 不同时期径流与极端降雨指数的相关系数		
	1960—2019 年	1960—1993 年 (突变点前期)	1994—2019 年 (突变点后期)
PRCPTOT	0.80 **	0.88 **	0.83 **
R95pTOT	0.46 **	0.57 **	0.67 **
RX5day	0.32 *	0.22	0.70 **
RX1day	0.20	0.23	0.37
SDII	0.49 **	0.61 **	0.62 **
FSPTOT	0.67 **	0.71 **	0.81 **

注:\*表示通过 0.05 显著性检验;\*\*表示通过 0.01 显著性检验,下同。

极端降雨 指数	表 5 不同时期输沙量与极端降雨指数的相关系数		
	1960—2019 年	1960—1999 年 (突变点前期)	2000—2019 年 (突变点后期)
PRCPTOT	0.42 **	0.55 **	0.31
R95pTOT	0.12	0.28	0.32
RX5day	0.20	0.25	0.55 *
RX1day	0.22	0.33 *	0.39
SDII	0.28 *	0.45 **	0.28
FSPTOT	0.38 **	0.56 **	0.38

3.3.2 极端降雨指数对径流与输沙量影响的定量评估  
采用极端降雨指数-径流和极端降雨指数-输沙量双累积曲线法定量分析了极端降雨对渭河水沙变化的影响(图 6)。以突变点前期为基准期,以突变

点后期为变化期。由表 6 可知,渭河流域变化期较基准期径流减少  $3.245 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,减少幅度达到 38.50%。各极端降雨指数的变化对 1993 年以后径流减少的影响在 7.67%~29.65%,其中 PRCPTOT 的影响最大,为 29.65%,其次是 RX5day 和 FSPTOT,贡献率分别为 25.68%,25.95%,R95pTOT 变化量对输沙量的影响最低(7.67%)。从表 7 可以看出,与基准期相比,渭河流域变化期的输沙量减少  $3.09 \times 10^4 \text{ t}$ ,减少

幅度达到 73.22%。各极端降雨指数的变化对 1999 年以后输沙量减少的影响在 -12.19%~10.02%,其中 PRCPTOT 的影响最大,为 10.02%,其次是 RX5day (7.12%),FSPTOT 变化量对输沙量的影响最低,仅有 0.40%。值得注意的是,R95pTOT 对输沙量减少的贡献率为负值(-12.19%),这说明输沙量在减少的同时,R95pTOT 在增加,此时人类活动的贡献率超过 100%。

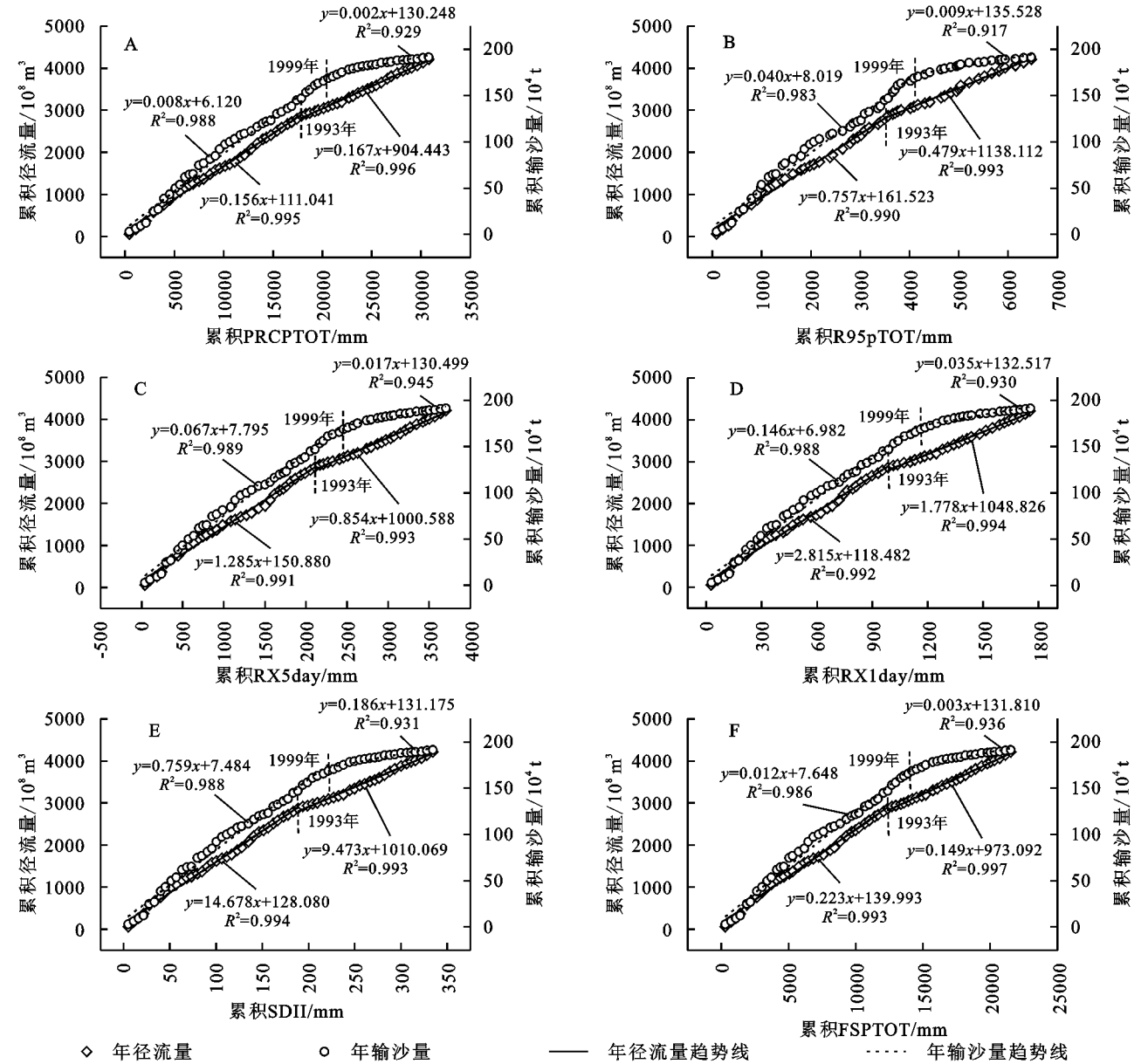


图 6 渭河流域 1960—2019 年极端降雨指数与径流、输沙量的双累积曲线

4 讨论

渭河流域水沙情势的变化是气候变化与人类活动综合作用的结果。在气候变化方面,此前的研究多关注年降雨量变化对水沙的影响,这可能会高估低强度、非侵蚀降雨的作用<sup>[6]</sup>。本研究进一步定量评估了

极端降雨变化对径流输沙的影响,提高了归因分析的准确性。相关分析表明,径流、输沙量与各极端降雨指数均呈正相关,但相比于径流,输沙量与极端降雨的相关性总体上偏低。这可能是由于径流直接来源于降雨,而泥沙的产生、输移、沉积过程更加复杂,与降雨的变化不一定具有同步性<sup>[3]</sup>。本研究发现,输沙

量的周期特性与径流、极端降雨指数差异较大,这可能与水沙异源有关<sup>[31]</sup>。另外,输沙量受气候和人类活动的影响比径流更加复杂,也是导致输沙量的周期变化呈现独特变化态势的重要原因<sup>[32]</sup>。

表 6 渭河流域极端降雨指数对径流量减少的贡献率				
极端降雨指数	时段	实测径流/ 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	计算径流/ 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	贡献率/%
PRCPTOT	1960—1993	84.29	80.02	29.65
	1994—2019	51.84	74.67	
R95pTOT	1960—1993	84.29	77.48	7.67
	1994—2019	51.84	81.80	
RX5day	1960—1993	84.29	78.32	25.68
	1994—2019	51.84	75.96	
RX1day	1960—1993	84.29	79.41	12.57
	1994—2019	51.84	80.21	
SDII	1960—1993	51.84	79.22	15.15
	1994—2019	84.29	79.37	
FSPTOT	1960—1993	51.84	79.20	25.95
	1994—2019	84.29	75.87	

表 7 渭河流域极端降雨指数对输沙量减少的贡献率				
极端降雨指数	时段	实测输沙/ 10 <sup>4</sup> t	计算输沙/ 10 <sup>4</sup> t	贡献率/%
PRCPTOT	1960—1999	4.22	4.27	10.02
	2000—2019	1.13	3.91	
R95pTOT	1960—1999	4.22	4.29	-12.19
	2000—2019	1.13	4.60	
RX5day	1960—1999	4.22	4.31	7.12
	2000—2019	1.13	4.31	
RX1day	1960—1999	4.22	4.00	1.59
	2000—2019	1.13	4.41	
SDII	1960—1999	4.22	4.39	4.92
	2000—2019	1.13	4.07	
FSPTOT	1960—1999	4.22	4.45	0.40
	2000—2019	1.13	4.21	

本研究结果表明,渭河流域 6 个极端降雨指数对径流和输沙量减少的影响在 7.67%~29.65%和 -12.19%~10.02%,均未超过 50%,说明流域水沙减少的主要驱动因素是人类活动等其他因素,这与前人的研究结果一致<sup>[7,25-27]</sup>。对黄河中游无定河<sup>[33]</sup>、延河<sup>[34]</sup>、皇甫川等<sup>[35]</sup>流域的研究也得到类似结果。20 世纪 90 年代以来,黄土高原地区退耕还林(草)和水库、淤地坝建设等水土保持措施的大规模实施,减蚀拦沙效益明显,是驱动渭河流域水沙减少的主要因素<sup>[14]</sup>。此外,经济社会发展导致城市和工业用水增加,对水沙变化的影响也不容忽视<sup>[7]</sup>。

5 结 论

(1) 各极端降雨指数呈阶段性波动变化,总体上 PRCPTOT,RX5day 和 RX1day 呈不显著下降趋势,R95pTOT,SDII 和 FSPTOT 呈不显著上升趋势。各极端降雨指数均存在以 4~6 a,11~12 a 和 28~29 a 为周期的变化特征。

(2) 径流与输沙量均呈显著减少趋势,分别在 1993 年和 1999 年发生突变。径流存在 5 a 和 12 a 的周期,与极端降雨指数的 2 个小周期基本一致。然而,输沙量的周期性变化与径流及各极端降雨指数差异较大。

(3) 各极端降雨指数均与径流、输沙量正相关。与径流相比,总体上输沙量与各极端降雨指数之间的相关系数偏低。

(4) 各极端降雨指数的变化对径流减少的影响在 7.67%~29.65%,其中 PRCPTOT 的影响最大,贡献率为 29.65%,其次是 RX5day (25.68%) 和 FSPTOT (25.95%)。各极端降雨指数的变化对输沙量减少的贡献率在 -12.19%~10.02%,其中 PRCPTOT 的影响最大,为 10.02%,其次是 RX5day (7.12%)。

参考文献:

[1] Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. Nature Geoscience, 2015,9:38-41.

[2] 胡春宏,张晓明.论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J].水利学报,2018,49(9):1028-1039.

[3] 姚文艺,高亚军,张晓华.黄河径流与输沙关系演变及其相关科学问题[J].中国水土保持科学,2020,18(4):1-11.

[4] 胡春宏.黄河水沙变化与治理方略研究[J].水力发电学报,2016,35(10):1-11.

[5] 穆兴民,赵广举,高鹏,等.黄河未来输沙量态势及其适用性对策[J].水土保持通报,2020,40(5):328-332.

[6] 钟科元,郑粉莉,吴红艳,等.松花江流域极端降雨变化对流域输沙量的影响[J].农业机械学报,2017,48(8):245-252,321.

[7] Gao P, Geissen V, Ritsema C J, et al. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River basin, China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013,17:961-972.

[8] 朱恒峰,赵文武,康慕谊,等.水土保持地区人类活动对汛期径流影响的估算[J].水科学进展,2008,19(3):400-406.

[9] 周佩华,王占礼.黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J].水土保持学报,1992,6(3):1-5.



- [10] 卢寿德,卢广毓,巩琳.无定河流域2017年“7·26”暴雨洪水特征分析[J].人民黄河,2018,40(12):25-27,32.
- [11] 雷成茂,李焯,郭邵萌.2016年黄河西柳沟“8·17”暴雨洪水分析[J].人民黄河,2017,39(11):63-65.
- [12] KEO Soksamngang,何洪鸣,赵宏飞,等.黄土高50余年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2018,25(2):1-7.
- [13] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵沟壑区极端降雨事件及其对径流泥沙的影响[J].干旱区地理,2007,30(6):896-901.
- [14] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近70年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,34(2):112-119.
- [15] 韩丹丹,穆兴民,高鹏,等.极端降雨条件下大理河流域水沙特征对比分析[J].中国水土保持科学,2019,17(6):61-68.
- [16] 王光谦,张长春,刘家宏,等.黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析[J].泥沙研究,2006(2):10-16.
- [17] 韩勇,郑粉莉,徐锡蒙,等.子午岭林区浅层滑坡侵蚀与植被的关系:以富县“7·21”特大暴雨为例[J].生态学报,2016,36(15):4635-4643.
- [18] Diffenbaugh N S, Singh D, Mankin J S, et al. Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017,114(19):4881-4886.
- [19] Du M, Zhang J, Yang Q, et al. Spatial and temporal variation of rainfall extremes for the North Anhui Province Plain of China over 1976—2018[J]. Natural Hazards, 2020,105:1-21.
- [20] 孙维婷.延河流域极端降雨时空变化及其对水沙变化的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [21] 张倩,延军平.渭河下游水沙变化趋势分析[J].干旱区资源与环境,2007,21(9):35-40.
- [22] Chang J X, Wang Y M, Istanbuluoglu E, et al. Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River Basin, China[J]. Quaternary International, 2015,380/381:169-179.
- [23] 邹磊,余江游,王飞宇,等.渭河流域极端降雨时空演变规律及其对大气环流因子的响应[J].干旱区研究,2021,38(8):764-774.
- [24] 冯星,郭建青,孙东永,等.近55 a渭河流域气候变化[J].干旱区地理,2018,41(4):718-725.
- [25] 白云鹏,赵广举,张丽梅,等.近55年来渭河流域输沙变化及驱动因子分析[J].水土保持学报,2020,34(4):91-97.
- [26] 徐瑞瑞,高鹏,穆兴民,等.渭河流域水沙时空变化及其对人类活动的响应[J].人民黄河,2020,42(3):17-24.
- [27] 赵静,黄强,刘登峰.渭河流域水沙演变规律分析[J].水力发电学报,2015,34(3):14-20.
- [28] Yue S, Pilon P, Phinney B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J]. Hydrological Processes, 2002,16(9):1807-1829.
- [29] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.
- [30] 穆兴民,宋小燕,高鹏,等.哈尔滨站径流、输沙的多时间尺度特征[J].自然资源学报,2011,26(1):135-144.
- [31] 陈发中,戴明英,吴卿.渭河水沙变化及特性分析[J].人民黄河,1999,21(8):18-20,48.
- [32] 刘晓琼,刘彦随,李同昇,等.基于小波多尺度变换的渭河水沙演变规律研究[J].地理科学,2015,35(2):211-217.
- [33] Li B Q, Liang Z M, Zhang J Y, et al. Attribution analysis of runoff decline in a semiarid region of the Loess Plateau, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018,131:845-855.
- [34] Wu J W, Miao C Y, Yang T T, et al. Modeling streamflow and sediment responses to climate change and human activities in the Yanhe River, China[J]. Hydrology Research, 2018,49:150-162.
- [35] 赵广举,穆兴民,温仲明,等.皇甫川流域降水和人类活动对水沙变化的定量分析[J].中国水土保持科学,2013,11(4):1-8.