

# 渭河流域降雨与降雨侵蚀力变化的原因分析

马 岚, 黄生志, 黄 强, 薛 祺, 李 沛, 刘赛艳

(西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安理工大学, 西安 710048)

**摘要:** 研究降雨与降雨侵蚀力的时空变化特征及其原因对流域土壤侵蚀监测、评估、预报和治理具有重要意义。以干旱半干旱的渭河流域为研究对象, 采用 Mann-Kendall 检验分析了降雨与降雨侵蚀力的变化趋势; 采用启发式分割法对流域降雨量与降雨侵蚀力进行了变异诊断; 采用交叉小波分析探究了 ENSO(厄尔尼诺—南方涛动)、北极涛动、太阳黑子与降雨以及降雨侵蚀力的联系。结果表明: (1) 降雨和降雨侵蚀力均呈下降趋势; (2) 华山站和西吉站的降雨量存在变异点, 华山站和临洮站的降雨侵蚀力存在变异点, 渭河流域部分站点的雨量和雨力的一致性被破坏; (3) ENSO、北极涛动、太阳黑子可能会影响降雨与降雨侵蚀力的产生, 其中太阳黑子的影响最强, ENSO 次之, 北极涛动最弱。研究结果有助于指导渭河流域黄土高原地区的农业生产、水土保持建设和生态修复等工作。

**关键词:** 降雨; 降雨侵蚀力; 渭河流域; 变异诊断; 交叉小波

中图分类号: P467; X16

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0174-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.01.028

## Causes Analyzing of the Change of Rainfall and Rainfall Erosivity in Weihe River Basin

MA Lan, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, XUE Qi, LI Pei, LIU Saiyan

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

**Abstract:** The study about the temporal and spatial variation characteristics of rainfall and rainfall erosivity and theirs causes was significant to monitor, evaluate, forecast and govern local soil erosion. The Wei River basin, a typical arid and semi-arid area in China, was selected as a case study. The change trends of rainfall and rainfall erosivity were analyzed by Mann-Kendall test. The heuristic segmentation algorithm was employed to detect the mutation points of the rainfall and rainfall erosivity in the Wei River basin. The cross-wave analysis method was used to explore the relationship between ENSO (El Niño-Southern Oscillation), Arctic Oscillation, Sunspot and rainfall as well as rainfall erosivity. Results indicated that: (1) Rainfall and rainfall erosivity both showed downward trends; (2) There were change points in the rainfall series at Huashan and Xiji stations, and change points in the rainfall erosivity series at Huashan and Lintao stations, and these change points implied that the consistency of rainfall amount and intensity at some stations in the Weihe River Basin was destroyed; (3) All of ENSO, Arctic Oscillation and Sunspot variations showed strong impacts on the rainfall and rainfall erosivity variations, and the impacts followed the order of Sunspot > ENSO > Arctic Oscillation. The results would be helpful to guide the agricultural production, the construction of soil and water conservation and ecological restoration of the Weihe River basin.

**Keywords:** rainfall; rainfall erosion; the Wei River basin; variation diagnosis; cross wavelet analysis

随着全球气候的变化, 水循环速率持续增加, 随之引发了愈来愈频繁的干旱和洪水灾害<sup>[1-4]</sup>, 并引起了国内外水文学者的广泛关注。国内外学者对于变化环境下降雨的研究主要聚焦于雨量的研究<sup>[5-6]</sup>, 包

括月、季节、年以及年际降雨量的时空分布特征<sup>[7-8]</sup>。这些研究对于揭示降雨量对变化环境的响应规律具有重要的意义, 有助于指导区域的水资源规划与管理。值得一提的是, 降雨除了是区域重要的水资源来

收稿日期: 2017-09-01

资助项目: 国家自然科学基金项目(51709221); 陕西省水利科技计划项目(2017slkj-19); 国家重点实验室培育项目(2016ZZKT-11); 国家重点研发计划项目(2017YFC0405901-2)

第一作者: 马岚(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 505979758@qq.com

通信作者: 黄生志(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要从事干旱的形成及传播机理、水文预报、变异诊断与重构等研究。E-mail: huangshengzhi7788@126.com

源外,也是导致某一地区土壤侵蚀的主要动力因素之一,是影响水力侵蚀过程的最重要因素。相对全部的降雨而言,产生地表径流的那一部分的降雨即为侵蚀性降雨,一般而言取日雨量大于 12 mm 的降雨作为侵蚀性降雨<sup>[9]</sup>。降雨侵蚀力是指由于降雨导致土壤侵蚀的潜在能力。对比降雨量的研究,变化环境下雨力的研究明显不够。

国外对降雨侵蚀力的相关研究涉及的较早。美国学者 Wischmeier 等<sup>[10]</sup>研究表明,与土壤流失量关系最为紧密的是降雨的总动能( $\Sigma E$ )及其 30 min 最大雨强( $I_{30}$ )的乘积。在我国,从 20 世纪 80 年代也展开了降雨侵蚀力方面的相关研究。早前有关其变化特征的研究<sup>[11]</sup>重点在于揭示降雨侵蚀力在气候变化的情景下对气象因素(降雨、气温)改变响应的灵敏度。刘滨辉等<sup>[12]</sup>、章文波等<sup>[13]</sup>通过分析中国降雨侵蚀力的空间分布特征,发现降雨量的空间分布与降雨侵蚀力相似。经查阅相关文献可以看出,目前对于降雨侵蚀力方面的国内外研究均以揭示降雨侵蚀力在变化环境下的时空变化特征为目的。然而,降雨侵蚀力变化的驱动机制尚未揭示。已有研究<sup>[14-17]</sup>表明,大气环流异常因子如 ENSO(厄尔尼诺—南方涛动)、太阳黑子、北极涛动等对降雨量有重要的影响。基于此,本文尝试通过分析 ENSO、太阳黑子、北极涛动等因素对降雨侵蚀力的影响,并比较它们之间影响的强弱,来揭示降雨与降雨侵蚀力变化的驱动机制。本研究以干旱半干旱的渭河流域为研究对象。渭河流域的泾河流域水土流失严重,生态环境脆弱。因此,开展该流域变化环境下降雨侵蚀力的时空变化包括变化模式,原因以及影响的研究有助于揭示区域降雨侵蚀力对变化环境的响应特征,从而指导渭河流域的生态修复与治理。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

渭河作为关中地区的第一大河,发源于甘肃省渭源县的鸟鼠山,覆盖陕西、宁夏、甘肃 3 省,是黄河最大支流<sup>[18]</sup>。全长 818 km,流域总面积 134 800 km<sup>2</sup>,主要有泾河和洛河两条分支。渭河流域位于大陆性季风气候区,是干旱和湿润地区的过渡区域,夏季多雨且炎热,冬季少雨且寒冷。其北部为黄土高原,南部为秦岭山脉,因此形成了西高东低的地势,降水分布由东南向西北递减,南部地区降水量充沛,随着地势的下降,降水量不断减少,年内分配不均匀且年际的变化较大,最大年降水量可达到最小年降水量的 2.5 倍,汛期降水量大致可占到全年降水量的近 3/4,常以暴雨或秋季连阴雨的形式呈现<sup>[19]</sup>。渭河流域最冷时的月平均气温大致是(-3)~(-1)℃,最热时

可达 23~26℃,温差在 26~28℃左右<sup>[20]</sup>。

### 1.2 数据来源

本研究采用 1960—2008 年渭河流域及其周边地区 21 个观测站的逐日降雨资料,对其中某些观测站的个别缺失数据进行延长插补,最终确定选用 1960—2008 年的数据进行分析计算。以上数据均来源于中国气象科学数据共享服务网,所有数据在使用之前均进行了三性审查,且均通过了三性审查。

### 1.3 研究方法

1.3.1 降雨侵蚀力计算 一般而言,用降雨强度和降雨动能的乘积来表征降雨侵蚀力<sup>[21]</sup>。世界上目前使用最普遍的降雨侵蚀力指标为  $EI_{30}$ <sup>[22]</sup>。但是在计算  $EI_{30}$  时需要次降雨过程资料,不易获取,计算复杂,鉴于此,众多学者们构建了一种简易的计算模型,通过气象站常规的降雨资料估算降雨侵蚀力,如基于日、旬、月以及年降雨量来计算降雨侵蚀力<sup>[23-26]</sup>。相比较而言,日降雨量资料能够更加充分的显示区域的降雨信息,计算的结果也就更加准确。

本研究采纳第一次全国水利普查水土保持专项普查中所选取的降雨侵蚀力算法,该算法是在王云璋等<sup>[18]</sup>、章文波等<sup>[25-26]</sup>提出的降雨侵蚀力估算模型基础上改进得到的。计算公式为:

$$\bar{R}_k = \sum_{i=1}^N (\alpha \sum_{j=1}^M P_{d_{ikj}} \beta) \quad (1)$$

$$\alpha = 21.239\beta^{-7.3967} \quad (2)$$

$$\beta = 0.6243 + \frac{27.346}{P_{d_0}} \quad (3)$$

$$\bar{P}_{d_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{12} \sum_{j=1}^M P_{d_{ikj}} \quad (4)$$

$$\bar{R} = \sum_{k=1}^{12} \bar{R}_k \quad (5)$$

式中: $\bar{R}_k$ 为第  $k$  个月的降雨侵蚀力((MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)); $N$ 为计算数据序列长度,本文中为 49 a; $M$ 为第  $i$  年第  $k$  月侵蚀性降雨次数; $P_{d_{ikj}}$ 为第  $i$  年第  $k$  月第  $j$  次侵蚀性降雨量(mm),取日降雨量 $\geq 12$  mm 作为侵蚀性降雨; $\alpha$ 、 $\beta$ 为模型参数,通过公式(2)、公式(3)和公式(4)估算; $\bar{P}_{d_0}$ 为侵蚀性降雨的多年平均值(mm); $\bar{R}$ 为多年平均降雨侵蚀力(MJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a))。

1.3.2 启发式分割算法 时间序列  $x(t)$  由  $N$  个点组成,此中有一个分割点  $i$ ,它从序列的左边开始沿该序列方向向右边移动,将  $i$  点左、右两边的平均值分别记作  $\mu_1(i)$  和  $\mu_2(i)$ ,其标准差分别是  $s_1(i)$  和  $s_2(i)$ ,则  $i$  点的合并偏差  $SD(i)$  可表示为<sup>[27-29]</sup>:

$$S_D = \left( \frac{(N_1 - 1)s_1^2 + (N_2 - 1)s_2^2}{N_1 + N_2 - 2} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

式中： $N_1$ 、 $N_2$  分别表示  $i$  点左、右两边的点数。

其中， $i$  点左、右两边子序列均值的差异可用  $t$  检验统计值  $T(i)$  来检验<sup>[30]</sup>：

$$T = \left| \frac{\mu_1(i) - \mu_2(i)}{S_D} \right| \tag{7}$$

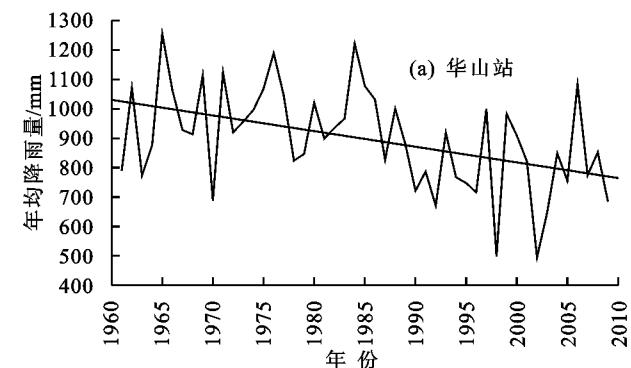
$T$  值愈大，表示该点左、右两边子序列的差别愈显著。其中，与  $T(i)$  的最大值  $T_{\max}$  相对的统计显著性  $P(T_{\max})$  的计算公式为<sup>[30]</sup>：

$$P(t_{\max}) \approx \{1 - I_{\lfloor v/(v + t_{\max}^2) \rfloor}(\delta v, \delta)\}^\eta \tag{8}$$

通过蒙特卡洛模拟可得： $\eta = 4.19 \ln N - 11.54$  且  $\delta = 0.40$ 。其中， $N$  表示该序列的长度， $v = N - 2$ ， $I_x(a, b)$  是不完全  $\beta$  函数。首先设置临界值  $P_0$ ，当  $P(T_{\max}) \geq P_0$  时，则可在该点处将序列分为左右两个均值相差较大的子序列，若不然则不分割<sup>[30]</sup>。获得新序列后，继续进行迭代操作，重复之前的步骤，至子序列的长度小于  $l_0$  ( $l_0$  为最小分割尺度) 时不再分割。这样便可将原序列分为均值不同的几个子序列，分割的点即是该序列的均值变异点。一般而言， $P_0$  的值域为  $0.50 \sim 0.95$ ， $l_0$  的取值应大于或等于  $25$ <sup>[31]</sup>。在不停地对分割点范围调整后，便可实现对该时间序列不同尺度上的变异检测<sup>[27]</sup>。

1.3.3 交叉小波 小波变换和交叉谱分析的联合构成了交叉小波分析，它是在时频域中分析两个信号相关性的方法<sup>[32]</sup>。交叉小波变换的信号耦合较好，分辨能力较强，有利于对耦合信号在时频域中的分布状况与位相关系进行描述，但对于揭示时频空间两个时间序列低能量区还存在一定不足<sup>[33-35]</sup>；而交叉小波凝聚谱可以更有效的探究两者在低能量区的显著相关性<sup>[32,36]</sup>。不同的气象和水文要素间的交叉小波分析，旨在从多时间尺度探寻它们在时频域中的相关性。本文采用交叉小波功率谱进行分析，交叉小波功率谱可以反映两个序列在小波变换后具有相同能量谱的区域，来揭示两序列在不同时频域上相互作用的显著性<sup>[37]</sup>。交叉小波功率谱振荡的能量愈强，即其谱值愈高，表示该周期的振荡通过信度检验也愈显著。

两个时间序列  $x(t)$  和  $y(t)$  间的交叉小波功率谱



(XWT)可定义为：

$$W_{XY}(a, \tau) = C_X(a, \tau) C_Y^*(a, \tau) \tag{9}$$

式中： $C_X(a, \tau)$  是  $x(t)$  的小波变换系数； $C_Y^*(a, \tau)$  是  $y(t)$  小波变换系数的复共轭。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨与降雨侵蚀力空间变化特征

2.1.1 降雨的时空变化 根据渭河流域多年平均降雨资料，将其降雨量的特征值汇总如表 1 所示。用 ArcGIS 软件中的反距离加权法插值做出渭河流域 1960—2008 年多年平均降雨量的空间分布图。由图 1 可知，渭河流域多年平均降雨量从西北到东南递增。在空间上形成了以华山和佛坪为中心的两个明显的高值区。

用 Mann-Kendall 检验法分析降雨量的趋势变化，并用 ArcGIS 绘制其趋势变化图。由图 1 可知，三角符号向上表示检验值为正，即上升趋势，三角符号向下表示检验值为负，即下降趋势，中间有“·”表示变化显著的。渭河流域 21 个站点 1960—2008 年降雨量均呈现下降的趋势，其中华山站和华家岭站(图 2)降雨量的变化趋势显著。

表 1 渭河流域多年平均降雨量特征值

单位:mm		
特征值	站点	多年平均降雨量
最大值	佛坪	908.69
最小值	西吉	408.91
平均值		581.11

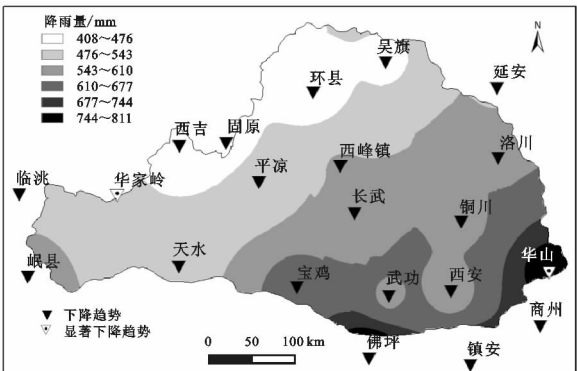


图 1 渭河流域降雨量时空变化

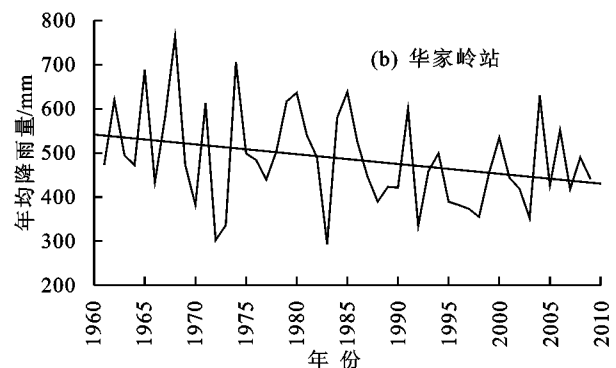
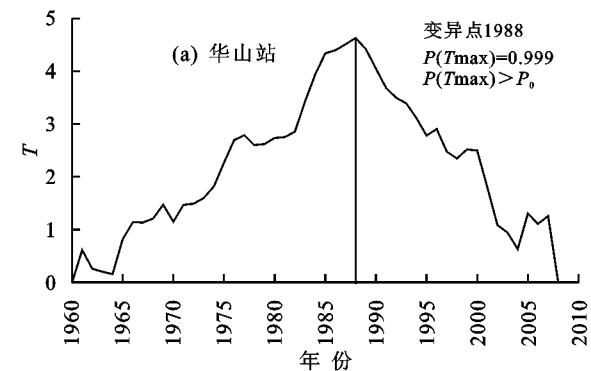


图 2 降雨量趋势显著变化站点

利用启发式分割法对渭河流域的降雨量进行变异诊断,发现在渭河流域 21 个站点中,华山站和西吉站存在变



异点,其余各站均无变异点。由此表明,华山和西吉站的降雨量序列存在明显变化,其一致性已被破坏(图 3)。

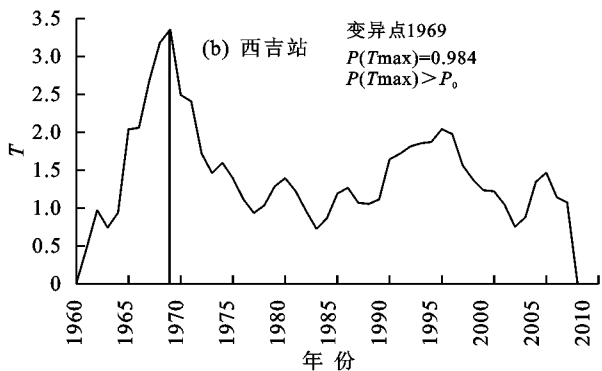


图 3 降雨量变异诊断

2.1.2 降雨侵蚀力的时空变化 渭河流域降雨侵蚀力的分布不均匀,且各站点年际差异显著。结合公式(1)~公式(5)可得到降雨侵蚀力的多年平均值,渭河流域多年平均降雨侵蚀力特征值见表 2。由此可知,在不同区域,年降雨侵蚀力差异及变动范围都比较大,其中佛坪站最为明显,为  $4\,428.53\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ ,西吉站最小,为  $973.78\text{ MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$ ,前者是后者的 4.5 倍。在渭河流域,西北部以西吉为中心的区域降雨侵蚀力年际差异大,东南部以华山为中心的区域年际差异较小。

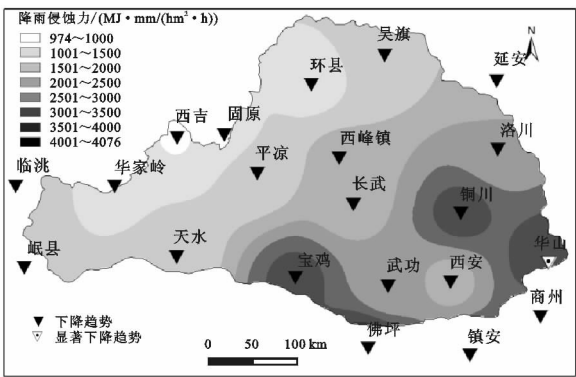


图 4 渭河流域多年平均降雨侵蚀力时空分布

表 2 渭河流域多年平均降雨侵蚀力特征值		
单位: $\text{MJ}\cdot\text{mm}/(\text{hm}^2\cdot\text{h})$		
特征值	站点	多年平均降雨侵蚀力
最大值	佛坪	4428.53
最小值	西吉	973.78
平均值		2302.64

用 ArcGIS 软件中的反距离加权法插值做出渭河流域 1960—2008 年多年平均降雨侵蚀力的空间分布图。由图 4 可知,渭河流域多年平均降雨侵蚀力从西北到东南逐渐增加,与渭河流域的降雨量分布大致相同<sup>[24]</sup>。在空间上形成两个明显的高值区和两个低值区,其中在流域东南部地区形成以华山为中心的高值区,南部形成以佛坪为中心的高值区,西北地区形成以西吉为中心的低值区,北部地区形成以环县为中心的低值区。

用 Mann-Kendall 检验法分析降雨侵蚀力的趋势变化,并用 ArcGIS 绘制其趋势变化图。由图 4 可以看出,渭河流域 21 个站点 1960—2008 年降雨侵蚀力均呈现下降的趋势,其中华山站(图 5)降雨侵蚀力变化趋势显著。

利用启发式分割法对渭河流域的降雨侵蚀力进行变异诊断,经变异诊断分析发现,在渭河流域 21 个站点中,华山站和临洮站存在变异点,如图 6 所示,其余各站点均无变异点。由此表明,华山和临洮两站的降雨侵蚀力序列存在明显的变化,其一致性已被破坏。

由以上研究结果显示,渭河流域年均降雨量和降雨侵蚀力均呈现逐渐下降的趋势,多年平均降雨量和降雨侵蚀力均是由东南到西北逐渐减小,在空间上的分布特征基本一致。

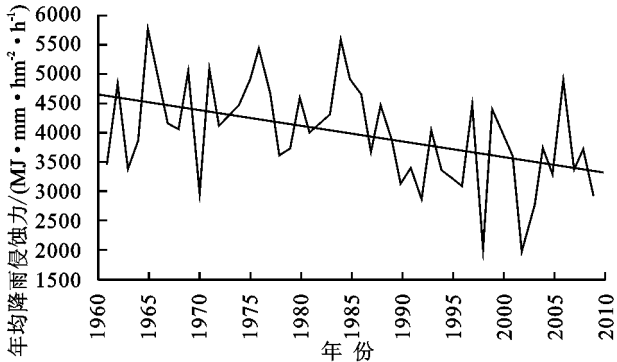


图 5 华山站降雨侵蚀力趋势变化

2.2 降雨量变化的原因分析

利用交叉小波判别两个序列间在时频域内的关系,分别对 ENSO、北极涛动以及太阳黑子与降雨量的关系进行了分析(图 1~图 2)。图中颜色的深浅代表能量密度的相对变化,浅色代表能量密度的峰值,深色代表能量密度的谷值,表现了主导波动组分时频变换的局部性和动态性特点,黑色细实线代表小波影响锥线的边界,其内部是有效的谱值区;区域内黑色粗实线代表通过显著性水平  $\alpha=0.05$  的 95% 的置信度区间。图中箭头方向反映其影响因素和降雨量的相位关系,其中,由左向右的

箭头表示两者变化同相位,呈正相关关系;由右指向左的箭头表示反相位,呈负相关关系;由下向上的箭头表示其

影响因素变化超前降雨侵蚀力变化  $90^\circ$ ,即 3 个月,由上向下的箭头表示落后降雨侵蚀力变化 3 个月<sup>[38]</sup>。

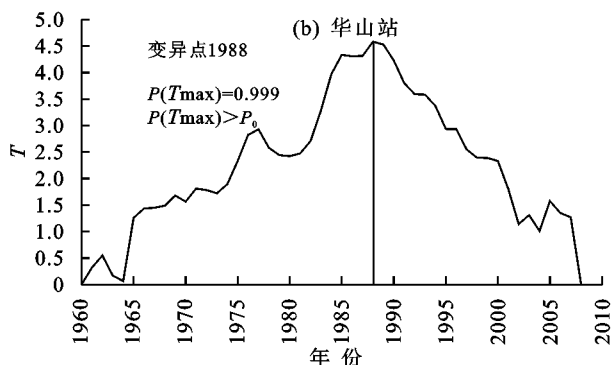
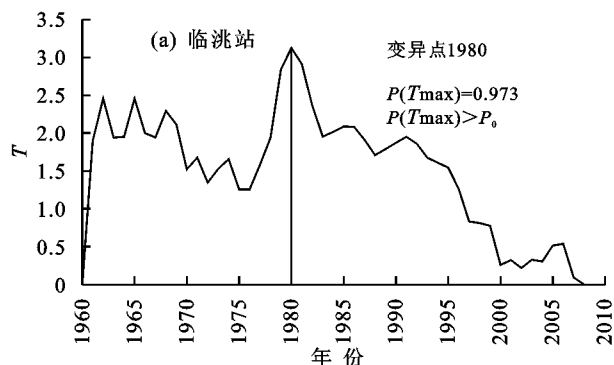


图 6 降雨侵蚀力变异诊断

2.2.1 ENSO 对降雨量影响 由图 7 可知,ENSO 对降雨量有着一定的影响。具体来说,ENSO 与整个渭河流域的降雨量在 1963—1972 年间存在着周期为 2 年左右的显著负相关关系,且通过了置信度为 95% 的检验;在 1982—1992 年间存在着周期为 3~6 年左右的显著负相关关系(图 7a)。

此外,ENSO 与泾河流域的降雨量在 1964—1966 年间存在周期为 1 年左右的显著负相关关系,

且通过了置信度为 95% 的检验;在 1982—1993 年间存在周期为 4~6 年的显著负相关关系,且通过了置信度为 95% 的检验(图 7b)。

ENSO 与渭河上游降雨量在 1962—1973 年间存在周期为 2~4 年的显著负相关关系,且通过了置信度为 95% 的检验;在 1977—1992 年间存在周期为 4~6 年的显著负相关关系,且通过了置信度为 95% 的检验(图 7c)。

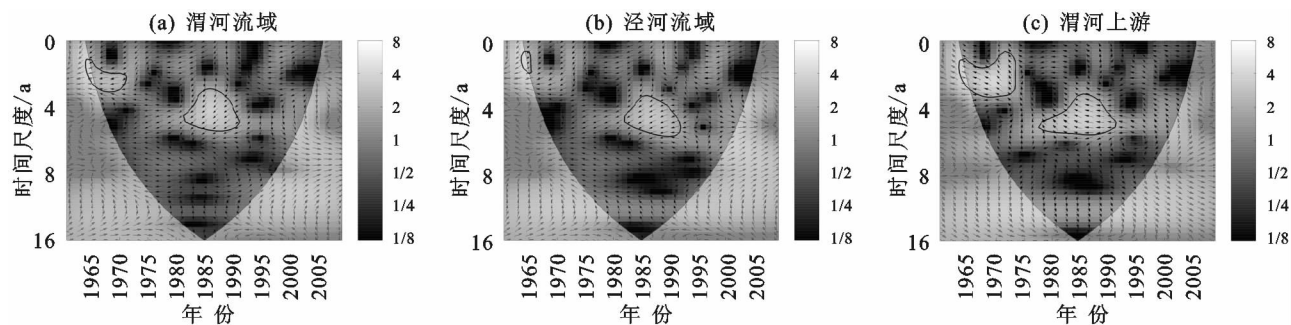


图 7 年均降雨量与 ENSO 指数的交叉小波能量谱

2.2.2 北极涛动对降雨量的影响 由图 8 可知,北极涛动与降雨量之间存在一定的相关性。具体来说,北极涛动与整个渭河流域的降雨量在 1961—1971 年间存在周期为 1~3 年的显著正相关关系,且通过了置信度为 95% 的检验;在 1984—1986 年间存在周期为 4 年左右的显著负相关关系,且通过了置信度为 95% 的检验(图 8a)。

泾河流域的降雨量与北极涛动之间也存在着相关性,在 1961—1969 年间存在周期为 2 年左右的显著正相关关系,且通过了置信度为 95% 的检验(图 8b)。

此外,北极涛动与渭河上游降雨量在 1961—1975 年间存在周期为 2~4 年的显著正相关关系,且通过了置信度为 95% 的检验(图 8c)。

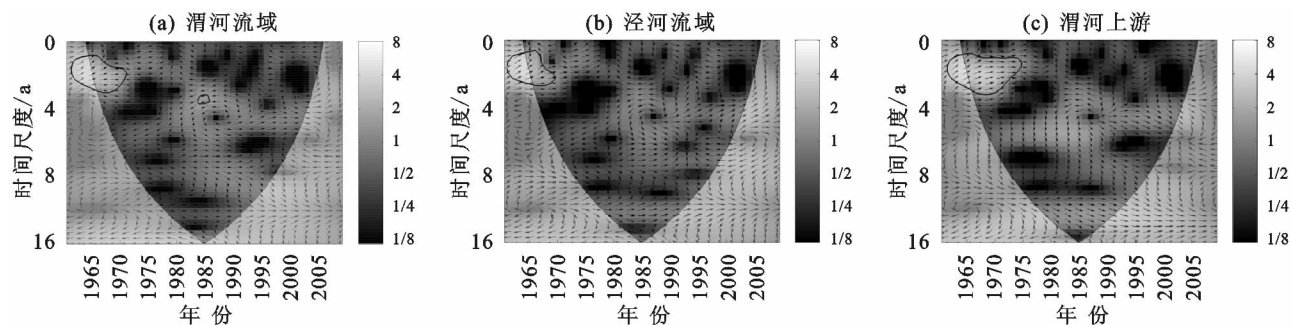


图 8 年均降雨量与北极涛动的交叉小波能量谱

2.2.3 太阳黑子对降雨量的影响 由图 9 可知,太阳黑子与降雨量之间有较强的相关性。具体来说,太

阳黑子与整个渭河流域的降雨量在 1961—1965 年存在周期为 2 年左右的显著负相关关系;在 1965—

2008 年存在周期为 7~12 年的显著负相关关系,且通过了置信度为 95%的检验(图 9a)。

相同地,太阳黑子与泾河流域的降雨量在 1960—1962 年间存在周期为 2 年左右的显著负相关关系;在 1960—2008 年间存在周期为 7~12 年的显著负相关关系,且通过了置信度为 95%的检验(图 9b)。

此外,太阳黑子与渭河上游降雨量在 1962—

1964 年间存在周期为 2 年左右的显著负相关关系;在 1978—1982 年间在周期为 6 年左右的显著负相关关系;1965—1982 年存在周期为 10~13 年显著负相关关系,1975—1992 年存在周期为 8~9 年显著负相关关系,在 1982—2003 年间存在周期为 10~13 年显著正相关关系(图 9c),且均通过了置信度为 95%的检验。

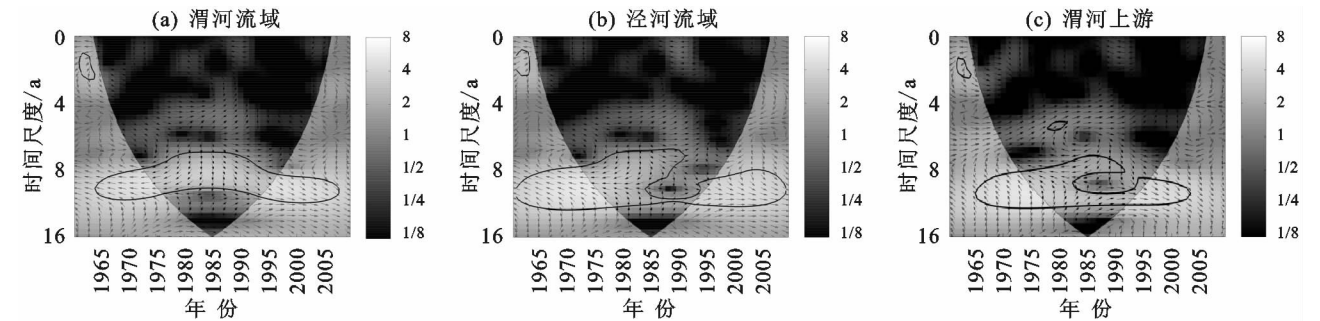


图 9 年均降雨量与太阳黑子的交叉小波能量谱

2.3 降雨侵蚀力变化的原因分析

2.3.1 ENSO 对降雨侵蚀力的影响 由图 10 可知,ENSO 对降雨侵蚀力的影响较为显著。具体来说,ENSO 与整个渭河流域的降雨侵蚀力在 1965—1966 年间存在周期为 1 年左右的显著负相关关系,且通过了置信度为 95%的检验;在 1983—1992 年间存在周期为 4~6 年的显著负相关关系,且通过了置信度为 95%的检验(图 10a)。

同样地,ENSO 与泾河流域的降雨侵蚀力在 1983—1991 年间存在着周期为 4~6 年的显著负相

关关系,且通过了置信度为 95%的检验;在 1963—1972 年间存在着周期为 3 年左右的显著负相关关系;在 1993—2006 年间存在着周期为 9~12 年的显著正相关关系(图 10b)。

除此之外,ENSO 与渭河上游降雨侵蚀力在 1965—1975 年间存在周期为 1~4 年的显著负相关关系,且通过了置信度为 95%的检验;在 1978—1992 年间存在周期为 4~6 年的显著负相关关系,且通过了置信度为 95%的检验(图 10c)。

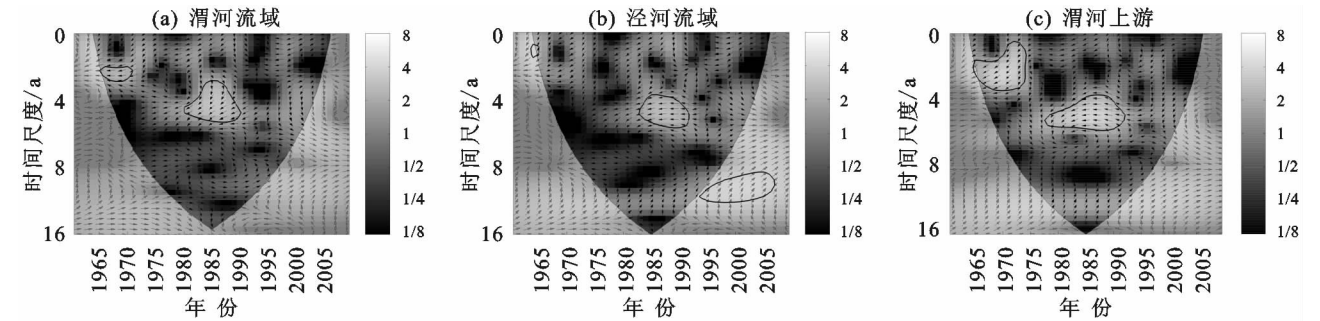


图 10 年均降雨侵蚀力与 ENSO 指数的交叉小波能量谱

2.3.2 北极涛动对降雨侵蚀力的影响 由图 11 可知,北极涛动对降雨侵蚀力有着一定的影响。具体来说,北极涛动与整个渭河流域的降雨侵蚀力在 1962—1972 年间存在周期为 1~3 年的显著正相关关系,且通过了置信度为 95%的检验;在 1982—1985 年间存在周期为 4 年左右的显著负相关关系,且通过了置信度为 95%的检验(图 11a)。

同样地,北极涛动与泾河流域的降雨侵蚀力在 1960—1970 年间存在周期为 1~3 年的显著正相关关系,且通过了置信度为 95%的检验(图 11b)。

除此之外,北极涛动与渭河上游降雨侵蚀力在 1962—1975 年间存在周期为 1~4 年的显著正相关关系,且通过了置信度为 95%的检验;在 1980—1986

年间存在周期为 6 年左右显著正相关关系,且通过了置信度为 95%的检验(图 11c)。

2.3.3 太阳黑子对降雨侵蚀力的影响 由图 12 可知,太阳黑子对降雨侵蚀力有显著的影响。具体来说,太阳黑子与整个渭河流域的降雨侵蚀力在 1962—1963 年存在周期为 2 年左右的显著负相关关系;在 1967—1983 年存在周期为 7~12 年的显著负相关关系,在 1983—2005 年存在周期为 7~12 年的显著正相关关系,且通过了置信度为 95%的检验(图 12a)。

同样地,太阳黑子与泾河流域的降雨侵蚀力在 1960—1963 年间存在周期为 2 年左右的显著负相关关系;在 1962—1985 年间存在周期为 8~12 年的显著负相关关系,在 1985—2008 年存在周期为 8~

12 年的显著正相关关系,且通过了置信度为 95% 的检验(图 12b)。

除此之外,太阳黑子与渭河上游降雨侵蚀力在 1973—1983 年间存在周期为 5~7 年的显著正相关关系(图 12c);在 1982—1992 年间在周期为 7~8 年的显著负

相关关系;在 1968—1973 年间存在周期为 10~13 年显著负相关关系,1973—2005 年存在周期为 10~13 年显著正相关关系(图 12c),且均通过了置信度为 95% 的检验。由此可知,太阳黑子的总体变化周期大致为 11 年左右,与已有研究结果相符<sup>[39]</sup>。

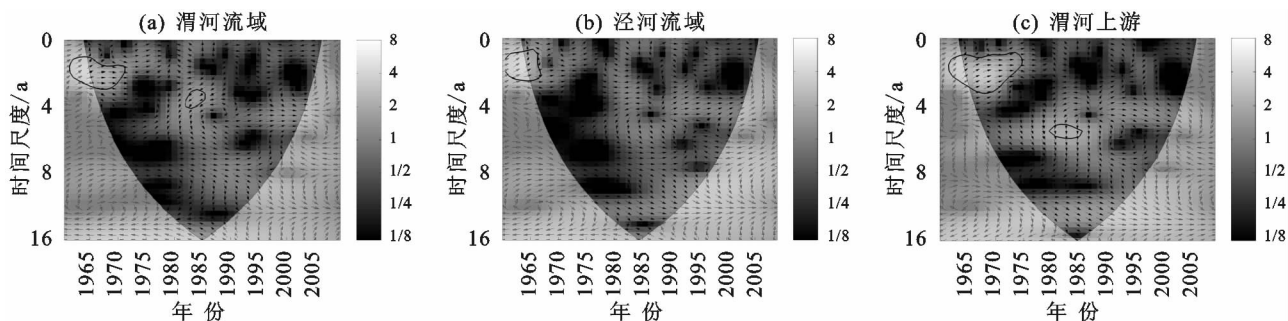


图 11 年均降雨侵蚀力与北极涛动的交叉小波能量谱

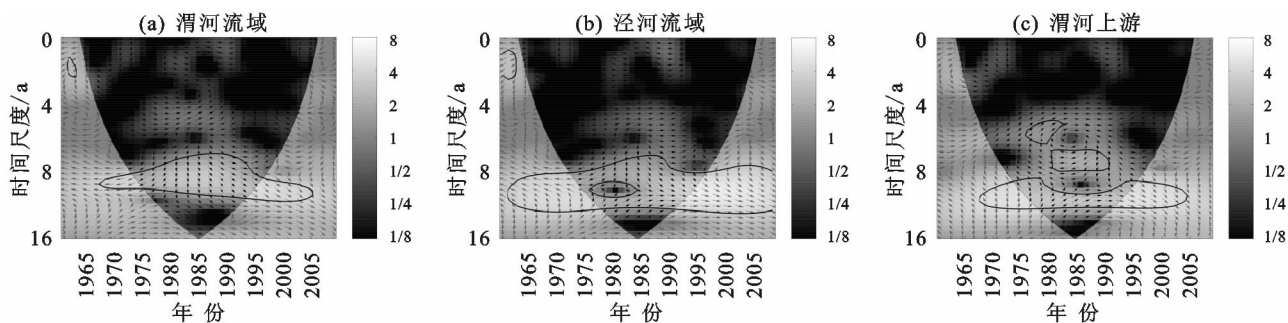


图 12 年均降雨侵蚀力与太阳黑子指数的交叉小波能量谱

由以上结果可以看出,降雨侵蚀力以及降雨量与大气环流异常有着密切的联系,且 ENSO、北极涛动、太阳黑子对降雨量和降雨侵蚀力的影响大致相似,其周期和相关性基本相同。对于降雨量和降雨侵蚀力的影响,太阳黑子最强,ENSO 次之,北极涛动最弱。由一些事实可知,太阳黑子活动会显著的影响地球上的太阳辐射,从而致使气压梯度产生变化,随之引发大气环流变化,影响降雨等气候<sup>[40]</sup>。ENSO 会影响大气环流,导致从澳大利亚干旱到南亚季风和全球热带气团的活动异常<sup>[41]</sup>,使极端降雨事件发生的频率上升<sup>[42]</sup>。ENSO 的活动会增大降雨侵蚀力,由此导致土壤侵蚀风险增加<sup>[43]</sup>。在 IPCC 报告中指出,强降雨事件出现频率越高,降雨侵蚀力也越大,进一步增加了土壤的侵蚀率<sup>[44]</sup>。鉴于北极涛动距离亚洲较近,因此对其天气、气候有着显著的影响。北极涛动指数 $>0$  时,会对极区冷空气向南部延伸产生限制,增加降水量;指数 $<0$  时,冷空气能够向南扩展,减小降水量<sup>[45]</sup>,进而导致降雨侵蚀力发生改变。

### 3 结论

(1)渭河流域年均降雨量以及降雨侵蚀力均存在由东南向西北递减的趋势,其中,降雨量在空间上形成了以华山为中心和佛坪的两个明显的高值区,佛坪站的降雨量最大,西吉站的最小;降雨侵蚀力在空间

上形成两个明显的高值区和两个低值区,佛坪站的降雨侵蚀力最强,西吉站的降雨侵蚀力最弱。

(2)通过 Mann-Kendall 检验发现,近 50 年来渭河流域的降雨量和降雨侵蚀力均存在明显的下降趋向,在 21 个站点中,华山站和华家岭站的降雨量以及华山站的降雨侵蚀力达到了 0.05 显著性水平检验。通过启发式分割法得到,华山站和华家岭站的降雨量分别在 1988 年和 1969 年出现了一个显著的变异点,华山站和临洮站的降雨侵蚀力分别在 1980 年和 1988 年出现了一个显著的变异点,其一致性遭到了破坏。其余各站点均不存在变异点。

(3)由交叉小波成因分析可以看出,ENSO、北极涛动、太阳黑子对降雨量和降雨侵蚀力均有一定的影响,其中太阳黑子影响最为显著,ENSO 也有一定的影响,北极涛动的影响较弱。

总体来说,降雨量与降雨侵蚀力的时空变化特征和驱动力分析均存在很强的一致性。由此说明,渭河流域的雨量和雨力联系密切。本文的研究可为降雨侵蚀力的预测和成因分析预测提供一定的科学依据,在目前气候多变的情况下,能够有效减少由极端气候事件引起的影。但是,对于太阳黑子、ENSO 以及北极涛动如何对降雨及降雨侵蚀力产生影响,其影响机制还需更加深入的研究。



## 参考文献:

- [1] 张强,韩兰英,张立阳,等.论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略[J].地球科学进展,2014,29(1):80-91.
- [2] 方建,杜鹃,徐伟,等.气候变化对洪水灾害影响研究进展[J].地球科学进展,2014,29(9):1085-1093.
- [3] Ayantobo O O, Li Y, Song S B, et al. Spatial comparability of drought characteristics and related return periods in mainland China over 1961—2013 [J]. Journal of Hydrology, 2017, 550(6): 549-567.
- [4] Halgamuge M N, Nirmalathas A. Analysis of large flood events: Based on flood data during 1985—2016 in Australia and India [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017, 24(9): 1-11.
- [5] 高继卿,杨晓光,董朝阳,等.气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析[J].农业工程学报,2015,31(12):99-110.
- [6] 闵岫,钱永甫.我国近40年各类降水事件的变化趋势[J].中山大学学报(自然科学版),2008,47(3):105-111.
- [7] 朱晓炜,杨建玲,崔洋,等.1961—2009年西北地区东部降水时空分布及成因[J].干旱区研究,2013,30(6):1094-1099.
- [8] 赵安周,朱秀芳,刘宪锋,等.1965—2013年渭河流域降水时空变化分析[J].自然资源学报,2015,30(11):1896-1909.
- [9] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等.1960—2009年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J].地理研究,2013,32(2):245-256.
- [10] 吴伟.内蒙古科尔沁右翼中旗土壤侵蚀特征研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [11] Boardman J, Favis-Mortlock D T, Nearing M A. Climate change and soil erosion in Britain [J]. The Geographical Journal, 1993,159(2): 179-183.
- [12] 刘滨辉,刘燕玲.黑龙江省降雨侵蚀力空间分布规律[J].中国水土保持科学,2009,7(2):63-68.
- [13] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.
- [14] 黄翀,张强,肖名忠. ENSO、NAO、IOD 和 PDO 对珠江流域降水的影响研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),2016,55(2):134-142.
- [15] Xiao M Z, Zhang Q, Singh V P. Influences of ENSO, NAO, IOD and PDO on seasonal precipitation regimes in the Yangtze River basin, China [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(12): 3556-3567.
- [16] 曹永强,刘佳佳,高璐.近54年来辽西北地区降水与太阳黑子关系研究[J].地理科学,2015,35(8):1027-1032.
- [17] 张肖南,史兴民,杨尚英.西安夏、秋季降水与太阳黑子的关系[J].干旱区研究,2013,30(3):485-490.
- [18] 王云璋,王国庆,王昌高.近十年渭河流域降水特点及其对径流影响的初步分析[J].人民黄河,1998,20(10):4-6.
- [19] 王国庆,王云璋.渭河流域产流产沙模型及径流泥沙变化原因分析[J].水土保持学报,2000,14(4):22-25.
- [20] 和宛琳,徐宗学.渭河流域气温与蒸发量时空分布及其变化趋势分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2006,42(1):102-106.
- [21] 李良冬,高鹏,穆兴民,等.辽河流域降雨侵蚀力的时空变化分析[J].中国水土保持科学,2009,7(2):69-73.
- [22] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. Transaction American Geophysical Unionism, 1958, 39(2): 285-291.
- [23] 张建国,范建容,王玉宽,等.重庆市降雨侵蚀力(R值)的时空分布特征[J].水土保持研究,2004,11(1):56-59.
- [24] 胡续礼,潘剑君,杨树江,等.几种降雨侵蚀力模型的比较研究[J].水土保持通报,2006,26(1):68-70.
- [25] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003,25(1):35-41.
- [26] 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.
- [27] 陈广才,谢平.基于启发式分割算法的水文变异分析研究[J].中山大学学报(自然科学版),2008,47(5):122-125.
- [28] 李海彬,张小峰,胡春宏,等.基于B-G分割算法的河川年输沙量突变分析[J].水利学报,2010,41(12):1387-1391.
- [29] 封国林,龚志强,董文杰,等.基于启发式分割算法的气候突变检测研究[J].物理学报,2005,54(11):5494-5499.
- [30] 黄生志,黄强,王义民,等.渭河径流年内分配变化特征及其影响因子贡献率分解[J].地理科学进展,2014,33(8):1101-1108.
- [31] 龚志强.基于非线性时间序列分析方法的气候突变检测研究[D].江苏扬州:扬州大学,2006.
- [32] Labat D. Cross wavelet analyses of annual continental fresh water discharge and selected climate indices [J]. Journal of Hydrology, 2010, 385(1/4): 269-278.
- [33] Maraun D, Kurths J. Cross wavelet analysis: Significance testing and pitfalls [J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11(4): 505-514.
- [34] 董林垚,陈建耀,付丛生,等.西江流域径流与气象要素多时间尺度关联性研究[J].地理科学,2013,33(2):209-215.
- [35] 杨若文,曹杰,黄玮,等.太阳常数与太阳黑子数关系的交叉小波分析[J].科学通报,2009,54(7):871-875.
- [36] Adamowski J, Prokoph A. Determining the amplitude and timing of stream flow discontinuities: A cross wavelet analysis approach [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(5):2782-2793.
- [37] 刘友存,刘志方,郝永红,等.基于交叉小波的天山乌鲁木齐河出山径流多尺度特征研究[J].冰川冻土,2013,35(6):1564-151572.
- [38] 张洪波,俞奇骏,陈克宇,等.基于小波变换的径流周期与 ENSO 事件响应关系研究[J].华北水利水电学院学报,2016,37(4):59-66.