

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.011

黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析

石 朋, 詹慧婕, 瞿思敏, 冯 进, 管晓祥

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:采用标准化降水指数(SPI)和标准化径流指数(SRI)刻画黄河源区气象干旱和水文干旱过程,通过唐乃亥水文站 SRI、源区 SPI 及 3 种小波分析方法揭示了 1968—2020 年黄河源区气象和水文干旱之间的周期性特征及相关性。结果表明:广义极值分布是唐乃亥水文站最适宜的流量分布函数;以 Gamma 分布和广义极值分布分别作为降水和流量的分布函数,基于距离平方倒数法计算出 SPI-9 和 SRI-1 的相关系数最高,为 0.68;连续小波变换分析表明 SPI-9 和 SRI-1 具有相同的周期特征,交叉小波变换和小波相干分析表明 SPI-9 和 SRI-1 在不同周期尺度表现出显著的正相关关系;黄河源区气象干旱向水文干旱的传播时间为 9 月,SPI-9 序列可用于水文干旱监测。

关键词:气象干旱;水文干旱;标准化降水指数;标准化径流指数;小波分析方法;黄河源区

中图分类号:P426.616;P339 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)03-0080-07

Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region//SHI Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, FENG Jin, GUAN Xiaoxiang (College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The standardized precipitation index (SPI) and the standardized runoff index (SRI) were used to characterize the meteorological and hydrological drought processes of the Yellow River source region, respectively. The SRI of the Tangnaihai hydrological station, the SPI of the Yellow River source region, and three wavelet analysis methods were used to reveal the periodic characteristics of and the correlation between meteorological and hydrological drought processes in the Yellow River source region from 1968 to 2020. The results show that the generalized extreme value distribution was the most suitable distribution function for streamflow at the Tangnaihai hydrological station. Using the Gamma distribution and generalized extreme value distribution as distribution functions of precipitation and discharge, respectively, the correlation coefficient between SPI-9 and SRI-1 was the highest, which was 0.68, based on the inverse distance weighting method. The results from continuous wavelet transform analysis show that SPI-9 and SRI-1 had the same periodic characteristics. A significant positive correlation between SPI-9 and SRI-1 at different periodic scales was found based on cross wavelet transform and wavelet coherence. The propagation time from meteorological drought to hydrological drought was nine months, and SPI-9 series could be used to monitor hydrological droughts in the Yellow River source region.

Key words: meteorological drought; hydrological drought; standardized precipitation index; standardized runoff index; wavelet analysis method; Yellow River source region

全球气候变暖背景下的干旱问题日益突出,干旱导致的水资源短缺进一步加剧了人类的用水紧张程度^[1],同时导致土地退化以及极端天气和复合型灾害的发生^[2-3]。1972—1997 年黄河经历了漫长的干涸时期,并在 20 世纪 90 年代初出现干旱历时延长、干旱频率增加的现象^[4]。1997 年在中国北方发

生的严重干旱导致黄河出现为期 226 d 的零径流,造成了严重的社会经济损失^[5]。准确表征黄河流域干旱特征及变化规律,对确保黄河流域生态保护与高质量发展具有极为重要的意义。

干旱分为 4 种类型,气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱^[4]。降水的亏缺会导致气象

基金项目:国家自然科学基金(52179011)

作者简介:石朋(1976—),男,教授,博士,主要从事流域水文模拟研究。E-mail:ship@hhu.edu.cn

通信作者:瞿思敏(1977—),女,教授,博士,主要从事流域水文模拟研究。E-mail:waniy@hhu.edu.cn

干旱,地表水及地下水的亏缺会引发水文干旱,这两类干旱对人类社会产生了广泛的影响。一般使用干旱指数来表征气象和水文干旱,标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)只需要降水序列作为输入,并且能将降水分布转化为正态分布,从而克服非标准化分布带来的差异,因此被广泛应用于气象干旱分析^[6]。同样,标准化径流指数(standardized runoff index, SRI)只需流量序列,且计算简便,因而被应用于水文干旱分析^[7]。

一般情况下首先发生气象干旱,气象干旱会向水文干旱和农业干旱传播^[8],因而越来越多的学者研究气象干旱与水文干旱之间的联系。准确描述气象干旱和水文干旱的关系可以在气象干旱的初期及时向决策管理者预警,减轻水文干旱带来的社会经济损失。Li 等^[9]采用小波分析法发现,沙颍河上游气象干旱和水文干旱之间的传播时间随季节变化明显;Dehghani 等^[10]基于阿基米德 Copula 气象干旱指数对水文干旱进行概率性预报;Yu 等^[11]研究了淮河上游嵌套流域的气象干旱到水文干旱的传播时间,发现流域越大,气象干旱引发的水文干旱持续时间越长。但是,由于不同流域降水条件及调蓄能力的不同,气象干旱到水文干旱的传播存在较大差异,目前对黄河源区开展的研究局限于气象及水文干旱特征、干旱的时空变化规律等^[12-13],黄河源区气象干旱与水文干旱的关联性及干旱传播时间尚未探明。

刘永佳等^[14]利用皮尔逊相关分析方法分析了黄土高原气象干旱到水文干旱的季节性传播规律;杨铭珂等^[15]利用皮尔逊相关分析方法,发现黔中地区不同季节气象和水文干旱的最佳时间尺度和滞后时间不同;Wang 等^[16]利用交叉小波及小波相干方法探究了黄河流域气象干旱到水文干旱的传播特征。目前研究干旱的传播规律多使用皮尔逊相关分析方法,结合 1~2 种小波方法进行干旱周期变化规律的研究,而利用多种小波方法探明区域化干旱传播特征及气象干旱与水文干旱的内在联系性的研究相对较少。

黄河源区是重要的水资源保护地,本研究聚焦黄河源区区域化气象干旱与水文干旱的关联性及水文干旱的滞后效应,侧重对黄河源区区域化规律进行研究,利用最优的 SPI- n (n 为月时间尺度, $n=1, 2, \dots, 24$) 和 SRI 拟合结果,探究黄河源区气象干旱向水文干旱的最佳传播时间,基于连续小波变换、交叉小波变换和小波相干来分析黄河源区气象干旱和水文干旱的周期性变化规律及其关联性,以期对流域干旱灾害预警及防治提供参考。

1 研究区概况与研究数据

黄河源区位于青藏高原东北部(95°50'E ~ 103°30'E, 32°30'N ~ 36°00'N),流域面积约 12.19 万 km²,主要控制水文站为唐乃亥水文站。黄河源区地势起伏较大,从西到东地势逐渐下降,平均高程约为 4425 m,多年平均降水约 510 mm^[17],汛期集中在夏季,多年平均径流量约占黄河流域的 38%。黄河源区下垫面类型主要以高寒草甸、季节性冻土和多年冻土区为主^[18],流域的水文站、气象站及水系分布如图 1 所示。

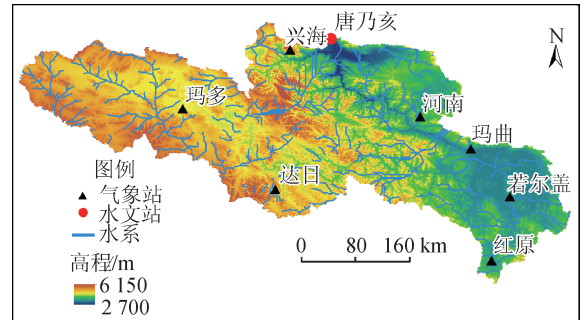


图 1 黄河源区水系分布

Fig. 1 Distribution of river system in Yellow River source region

本文采用的 90m 分辨率 SRTM DEM 原始高程数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。黄河源区内部 7 个气象站(玛多、兴海、达日、河南、玛曲、若尔盖、红原)1967—2020 年的日降水数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),经过日累加处理得到月降水数据。唐乃亥水文站 1967—2020 年的月流量资料来源于水文年鉴,数据经过严格质量控制和检查。

2 研究方法

2.1 Kolmogorov-Smirnov 检验

Kolmogorov-Smirnov (KS) 检验是一种拟合优度检验方法。根据一个给定的概率分布,利用经验累积分布函数(empirical cumulative distribution function, ECDF)和累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)之间的差异计算拟合优度。KS 检验包含一个统计量 D ,若 D 值大于某一临界值,则拒绝假设的概率分布^[19-20]。

2.2 气象干旱与水文干旱指标

SPI 是一种常见的气象干旱指标^[21],一般选用 Gamma 分布来拟合降水时间序列^[22]。SRI 被用来刻画水文干旱^[7],计算 SRI 的步骤和计算 SPI 的类似,需要将降水时间序列替换成流量时间序列,并且

分布函数因区域而异,流量序列可能适用于 Gamma 分布、皮尔逊 III 型(P-III 型)分布、广义极值(GEV)分布、对数正态(Log-Normal)分布等。

2.3 皮尔逊相关系数

皮尔逊相关系数可以表示两个变量之间的相关关系^[23],相关系数越大,表示两个变量线性相关越强,范围在 $[-1,1]$ 之间。

2.4 面平均降水量计算方法

由于降水空间分布不均匀,不同的面平均降水量计算方法可能会影响计算结果,本文挑选 3 种常用的降水空间插值方法来计算面平均降水量,分别为算术平均法、泰森多边形法和距离平方倒数法^[24]。

2.5 小波分析方法

连续小波变换可以用来分析时间序列中的局部间歇性振荡,同时可以分析出时间序列的周期性变化规律^[25];交叉小波变换和小波相干可以用来检验两个时间序列之间的相关关系,其中,交叉小波变换用来检测两个序列高能量区域的相关性^[16],小波相干则用来检测两个序列间低能量区域的相关性^[26]。

3 结果与分析

3.1 最优流量分布筛选

由于气候变化、人类活动等因素,流量的概率分布存在区域性差异^[16],需要依据实测数据筛选出最适宜的流量分布函数。本研究选择 6 种常见的分布函数^[19]来拟合唐乃亥站 1967—2020 年的月流量,包括 GEV 分布、威布尔(Weibull)分布、广义帕累托(广义 Pareto)分布、Log-Normal 分布、对数 Logistic(Log-Logistic)分布、P-III 型分布。

利用 KS 检验来验证 6 种分布函数与经验分布的逐月差异,差异程度由假设检验结果的判定参数 p 值来表征。 p 越接近 1,表示分布越接近真实情况,在 $p < 0.05$ 的阈值下^[9,23],除了广义 Pareto 分布被拒绝,其他 5 个分布均通过 KS 检验,如图 2 所示,其中红空心点代表异常值,黑实心点代表均值,箱内黑线代表中位数。

分析发现,GEV 分布 p 最小值(0.321)和平均值(0.796)都高于其他分布;Weibull 分布虽然也通过了 KS 检验,但在唐乃亥水文站的应用上并不理想;Log-Normal 和 Log-Logistic 分布拟合结果较为接近,P-III 型分布拟合结果略次于 Log-Normal 和 Log-Logistic 分布。

根据 p 值选择每个月最优的流量 CDF 如图 3 所示,GEV 分布在 6 个月份中表现出最优的性能,综

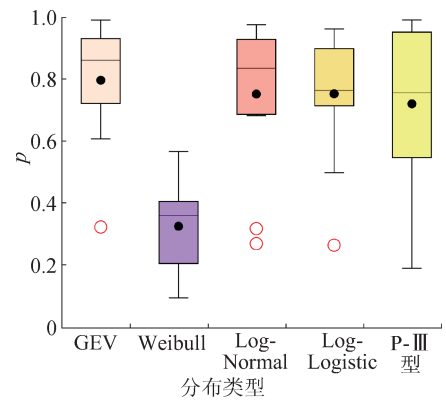


图 2 5 种分布经过 KS 检验后的 p 值

Fig. 2 p values of five distributions after KS test

合考虑选择 GEV 分布作为最优流量 CDF 进行后续计算。

3.2 SPI 和 SRI 的计算

由于降水具有空间不均匀性^[27],为了使计算更切合实际,减少降水输入的不确定性,利用算术平均法、泰森多边形法和距离平方倒数法分别处理 1967—2020 年的月降水量,得到流域月尺度面降水量。

根据 3 种降水插值方法得到的月尺度流域面降水量,使用 Gamma 分布计算气象干旱指数 SPI- n ($n = 1, 2, \dots, 24$)。以往的研究结果表明^[14],1 月尺度的 SRI 指数最具有代表性,所以最优流量分布利用 GEV 分布函数,计算水文干旱指数 SRI-1。利用皮尔逊相关系数,分析由 3 种降水插值方法计算的 SPI- n 与 SRI-1 之间的相关关系。结果表明,3 种方法得出的 SPI-9 与 SRI-1 拟合效果最优,皮尔逊相关系数分别为 0.68、0.67、0.68,3 种方法计算结果较接近,黄河源区气象干旱向水文干旱的传播时间为 9 月。基于以上结果,本次研究选择距离平方倒数法进行后续研究。

基于距离平方倒数法计算的 SPI-9 和基于 GEV 分布函数计算的 SRI-1 如图 4 所示。由于 SPI-9 采用了累计 9 月的降水进行计算,为了保证流量序列和降水序列的一致性,降水和流量序列统一取 1968—2020 年。根据 SPI 和 SRI 的值划分干湿等级^[14],结果表明,SPI-9 和 SRI-1 表征的干湿程度基本一致,气象干旱与水文干旱发生年份几乎重叠。黄河源区在 1969—1971 年和 1973 年发生了严重气象干旱和适度水文干旱事件,在 1977—1978 年发生了严重气象干旱和水文干旱事件,在 1985—2005 年间歇性地发生了气象和水文干旱事件,每次发生干旱的持续时间较长,在 2003 年发生了极端气象和水文干旱事件,在 2005—2020 年发生干旱的严重程度减小,干旱发生频率也较 1985—2005 年减少。周帅

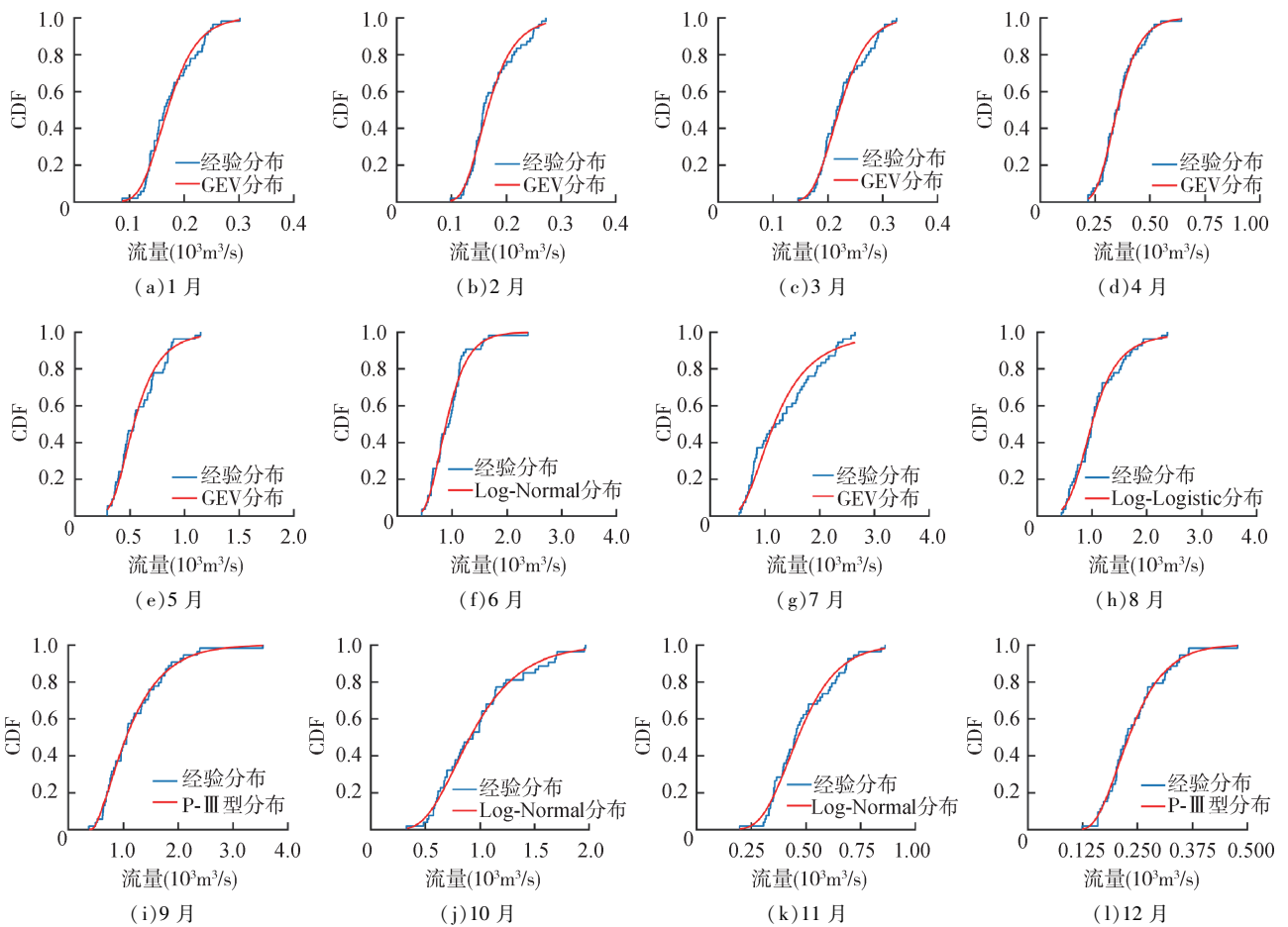


图3 月径流最优分布函数

Fig. 3 Optimal distribution function of monthly runoff

等^[5]指出 2005 年以后由于降水减少幅度缓解的原因,黄河流域干旱严重程度减小,这与本文的研究结论一致。

3.3 气象干旱和水文干旱关联性

先用连续小波变换分析气象干旱和水文干旱的周期性变化规律,再用交叉小波变换分析高能量区域的气象干旱和水文干旱的联系,对于低能量区域,则选择小波相干法分析两者的联系。

图 5 给出了 1968—2020 年 SPI-9 和 SRI-1 的连续小波功率谱,图中影响锥表示不受小波光谱边缘效应影响的彩色区域,粗轮廓线表示相对于红色噪声的 95% 置信水平。结果表明,对于 SPI-9 序列,在 95% 的置信水平下,1972 年 5 月至 1978 年 2 月、1988 年 3 月至 1992 年 2 月、1997 年 12 月至 2002 年 10 月、2002 年 10 月至 2008 年 12 月的小波高功率分别在 37 ~ 50 月、29 ~ 42 月、12 ~ 16 月、18 ~ 26 月之间,持续时间约为 4 ~ 6 a。1971 年 9 月至 1973 年 4 月、1988 年 7 月至 1990 年 2 月、2015 年 5 月至 2017 年 9 月的小波高功率都在 17 ~ 22 月之间,持续时间较短,约为 2 a。对于 SRI-1 序列,在 1978—2016 年间,2 ~ 8 月周期的小波功率值较大,持续时间较短,表现为准周期的间歇性振荡。SRI-1 最明显的周期是 78 ~ 105 月,持续时间是 1977 年 6 月至 1986 年 7 月。SRI-1 在 1988 年 9 月至 1992 年 2 月的

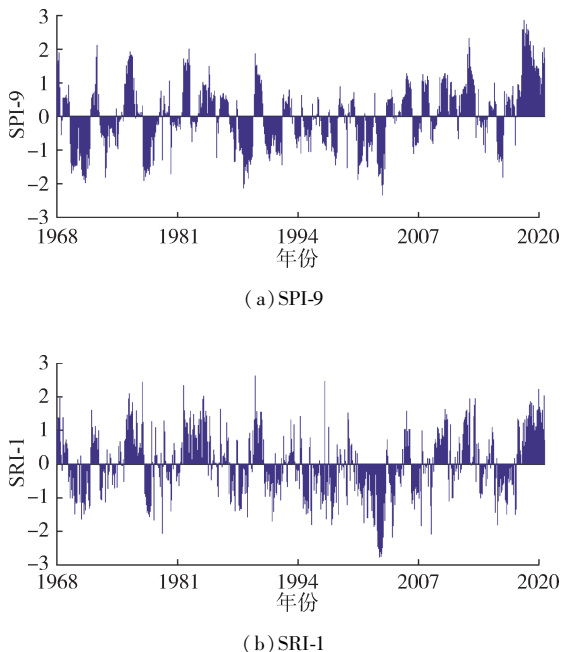


图4 1968—2020 年 SPI-9 和 SRI-1 的时间序列

Fig. 4 Time series of SPI-9 and SRI-1 from 1968 to 2020

小波高功率在 37 ~ 47 月之间,与 SPI-9 在相同时间段的周期性较接近。

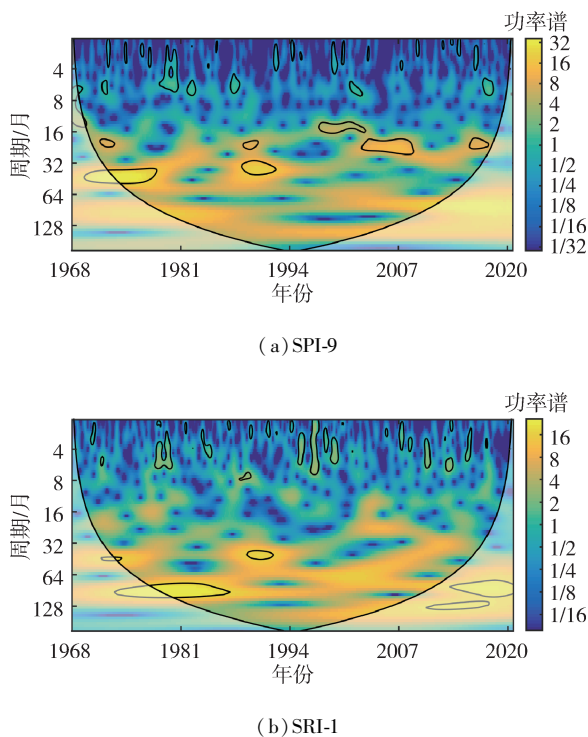


图 5 SPI-9 和 SRI-1 的连续小波功率谱
Fig. 5 Continuous wavelet power spectra of SPI-9 and SRI-1

在 37 ~ 42 月的周期, SPI-9 和 SRI-1 序列都在 1988 年 9 月至 1992 年 2 月有较高的功率值,说明黄河源区的气象干旱和水文干旱具有相似的周期特征。

图 6(a) 为 SPI-9 和 SRI-1 的交叉小波功率谱图,向右箭头表示 SPI-9 和 SRI-1 序列相位变化相同,向左箭头表示两序列相位变化相反。SPI-9 和 SRI-1 序列在 1973 年 4 月至 1979 年 4 月和在 1978 年 9 月至 1984 年 8 月分别呈现出 37 ~ 53 月和 83 ~ 105 月的显著正相关,在 1987 年 8 月至 1994 年 3 月间呈现出 31 ~ 50 月的显著正相关,在 2002 年 3 月至 2009 年 6 月间呈现出 14 ~ 25 月的显著正相关。SPI-9 和 SRI-1 的小波相干图如图 6(b) 所示,向右的黑色箭头表明 SPI-9 和 SRI-1 序列具有相同的相位,且存在比较连续的小波显著相干,具体表现在 1971—2016 年。SRI-1 的振荡可以较好地用 SPI-9 来表述,周期为 16 ~ 176 月不等。

连续小波分析、交叉小波分析和小波相干分析结果表明,在不同的时间段, SPI-9 和 SRI-1 均存在明显的相关性, SPI-9 序列可以用于黄河源区的水文干旱监测。

4 结 论

a. 选择的 6 种分布中,广义 Pareto 分布函数被

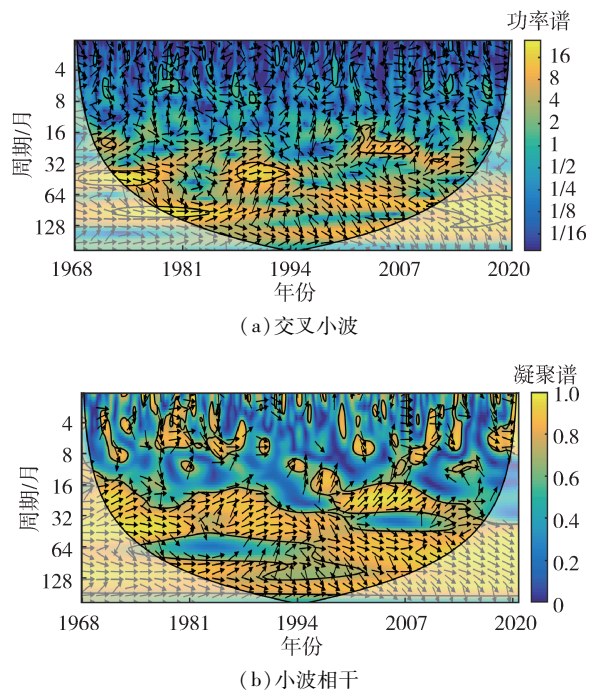


图 6 SPI-9 和 SRI-1 的交叉小波及小波相干分析结果

Fig. 6 Analysis results of cross wavelet and wavelet coherence of SPI-9 and SRI-1

KS 检验拒绝,其他 5 种分布均通过检验, GEV 分布表现最优,然后依次是 Log-Normal 分布、Log-Logistic 分布、P-III 型分布, Weibull 分布表现最差。

b. 3 种降水插值方法中,算术平均法、泰森多边形法、距离平方倒数法计算结果接近,在黄河源区适用效果均良好。由距离平方倒数法计算的 SPI-9 和 GEV 分布计算的 SRI-1 拟合效果最优,皮尔逊相关系数为 0.68,气象干旱和水文干旱发生的年份基本一致,两者存在密切联系。

c. 连续小波变换分析表明 SPI-9 和 SRI-1 具有类似的周期特征。交叉小波变换表明 SPI-9 和 SRI-1 在 1973 年 4 月至 1979 年 4 月、1978 年 9 月至 1984 年 8 月、1987 年 8 月至 1994 年 3 月、2002 年 3 月至 2009 年 6 月分别呈现出 37 ~ 53 月、83 ~ 105 月、31 ~ 50 月、14 ~ 25 月的显著正相关。小波相干表明 SPI-9 能较好地表述 SPI-1 的振荡性,在 1971—2016 年呈现出 16 ~ 176 月的周期。

参考文献:

[1] 马明卫,韩宇平,严登华,等.特大干旱事件灾害孕育机理及影响研究进展[J].水资源保护,2020,36(5):11-21. (MA Mingwei, HAN Yuping, YAN Denghua, et al. Research progress on the mechanism and influence of extreme drought-induced disasters [J]. Water Resources Protection, 2020,36(5):11-21. (in Chinese))

[2] 金佳鑫,肖园园,金君良,等.长江流域极端水文气象事

- 件时空变化特征及其对植被的影响[J]. 水科学进展, 2021, 32(6): 867-876. (JIN Jiaxin, XIAO Yuanyuan, JIN Junliang, et al. Spatial-temporal variabilities of the contrasting hydrometeorological extremes and the impacts on vegetation growth over the Yangtze River basin [J]. Advances of Water Science, 2021, 32(6): 867-876. (in Chinese))
- [3] AGHAKOUCHAK A, CHIANG F, HUNING L S, et al. Climate extremes and compound hazards in a warming world [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2020, 48: 519-548.
- [4] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [5] 周帅, 王义民, 畅建霞, 等. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1231-1241. (ZHOU Shuai, WANG Yimin, CHANG Jianxia, et al. Research on spatio-temporal evolution of drought patterns in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10): 1231-1241. (in Chinese))
- [6] 肖祖香, 朱双, 罗显刚, 等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 515-520. (in Chinese))
- [7] 吴志勇, 程丹丹, 何海, 等. 综合干旱指数研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 36-45. (in Chinese))
- [8] 李昱, 席佳, 张弛, 等. 气候变化对澜湄流域气象水文干旱时空特性的影响[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 508-519. (LI Yu, XI Jia, ZHANG Chi, et al. Impact of climate change on the spatio-temporal characteristics of meteorological and hydrological drought over the Lancang-Mekong River Basin [J]. Advances of Water Science, 2021, 32(4): 508-519. (in Chinese))
- [9] LI Q, HE P, HE Y, et al. Investigation to the relation between meteorological drought and hydrological drought in the upper Shaying River Basin using wavelet analysis [J]. Atmospheric Research, 2020, 234: 104743.
- [10] DEGHANI M, SAGHAFIAN B, ZARGAR M. Probabilistic hydrological drought index forecasting based on meteorological drought index using Archimedean copulas [J]. Hydrology Research, 2019, 50(5): 1230-1250.
- [11] YU M, LIU X, LI Q. Responses of meteorological drought-hydrological drought propagation to watershed scales in the upper Huaihe River Basin, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(15): 17561-17570.
- [12] 马明卫, 程玉佳, 崔惠娟, 等. 黄河唐乃亥站径流干旱多变量联合特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 1-9. (MA Mingwei, CHENG Yujia, CUI Huijuan, et al. Multivariate characteristics of streamflow drought at Tangnaihai station of the Yellow River [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(5): 1-9. (in Chinese))
- [13] WANG Y, QUAN Q, SHEN B. Spatio-temporal variability of drought and effect of large scale climate in the source region of Yellow River [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2019, 10(1): 678-698.
- [14] 刘永佳, 黄生志, 方伟, 等. 不同季节气象干旱向水文干旱的传播及其动态变化[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 93-102. (LIU Yongjia, HUANG Shengzhi, FANG Wei, et al. Propagation and dynamic change of meteorological drought to hydrological drought in different seasons [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 93-102. (in Chinese))
- [15] 杨铭珂, 贺中华, 任荣仪. 黔中地区气象水文干旱演变特征及其响应关系[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 264-274. (YANG Mingke, HE Zhonghua, REN Rongyi. Evolution characteristics of meteorological and hydrological drought and their response relations in central Guizhou [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 264-274. (in Chinese))
- [16] WANG F, WANG Z, YANG H, et al. Comprehensive evaluation of hydrological drought and its relationships with meteorological drought in the Yellow River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124751.
- [17] 张成凤, 刘翠善, 王国庆, 等. 基于 Budyko 假设的黄河源区径流变化归因识别[J]. 中国农村水利水电, 2020(9): 90-94. (ZHANG Chengfeng, LIU Cuishan, WANG Guoqing, et al. Attribution of runoff variation for the Yellow River source region based on the Budyko hypothesis [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(9): 90-94. (in Chinese))
- [18] 文军, 蓝永超, 苏中波, 等. 黄河源区陆面过程观测和模拟研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(6): 575-585. (WEN Jun, LAN Yongchao, SU Zhongbo, et al. Advances in observation and modeling of land surface processes over the source region of the Yellow River [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(6): 575-585. (in Chinese))
- [19] VICENTE-SERRANO S M, LÓPEZ-MORENO J I, BEGUERÍA S, et al. Accurate computation of a streamflow drought index [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(2): 318-332.
- [20] MASSEY F J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness

- of fit[J]. Journal of the American Statistical Association, 1951, 46(253): 68-78.
- [21] WU H, SVOBODA M D, HAYES M J, et al. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(1): 65-79.
- [22] 顾学志,叶磊,赵铜铁钢,等. 中国日降水量的概率分布[J]. 水利学报,2021,52(10):1248-1262. (GU Xuezhi, YE Lei, ZHAO Tongtiegang, et al. Probability distribution of daily precipitation in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(10): 1248-1262. (in Chinese))
- [23] WILKS D S. Statistical methods in the atmospheric sciences[M]. Cambridge: Academic Press, 2011.
- [24] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004.
- [25] GRINSTED A, MOORE J C, JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series [J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11(5/6): 561-566.
- [26] 张菁,张珂,王晟,等. 陕甘宁三河源区 1971—2017 年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):288-294. (ZHANG Jing, ZHNG Ke, WANG Sheng, et al. Spatiotemporal variation analysis of extreme precipitation in the Three River Source Area of the Shaanxi-Gansu-Ningxia Contiguous Region from 1971 to 2017 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021,49(3):288-294. (in Chinese))
- [27] 薛丰,石朋,胡健伟,等. 降雨输入不确定性对 SWAT 模型径流模拟的影响研究[J]. 中国农村水利水电,2017(10):23-27. (XUE Feng, SHI Peng, HU Jianwei, et al. Study on effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on runoff modeling based on SWAT model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(10):23-27. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-20 编辑:俞云利)

(上接第 49 页)

- [19] 杨默远,潘兴瑶,刘洪禄,等. 基于文献数据再分析的中国城市面源污染规律研究[J]. 生态环境学报,2020,29(8):1634-1644. (YANG Moyuan, PAN Xingyao, LIU Honglu, et al. Urban non-point pollution characteristics in China: a meta-analysis [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(8):1634-1644. (in Chinese))
- [20] 曾家俊,麦叶鹏,李志威,等. 广州天河智慧城 SWMM 参数敏感性分析[J]. 水资源保护,2020,36(3):15-21. (ZENG Jiajun, MAI Yepeng, LI Zhiwei, et al. Sensitivity analysis of SWMM parameters in Guangzhou Tianhe wisdom city [J]. Water Resources Protection, 2020,36(3):15-21. (in Chinese))
- [21] 梅超,刘家宏,王浩,等. SWMM 原理解析与应用展望[J]. 水利水电技术,2017,48(5):33-42. (MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Introduction of basic principle and application prospect for SWMM [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2017,48(5):33-42. (in Chinese))
- [22] 秦攀,雷坤,乔飞,等. 子汇水区划分精度对 SWMM 模拟城市非点源的影响[J]. 环境科学与技术,2016,39(6):179-186. (QIN Pan, LEI Kun, QIAO Fei, et al. Impact of sub-catchment size delineation on urban non-point source pollution simulation using SWMM [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(6):179-186. (in Chinese))
- [23] 胡良宇,戎贵文,汪星,等. 初期弃流后板房屋面雨水污染物质量浓度衰减规律[J]. 水资源保护,2021,37(3):102-107. (HU Liangyu, RONG Guiwen, WANG Xing, et al. Attenuation rule of rainwater pollutant concentration on slab roof after split-flow of first flush runoff [J]. Water Resources Protection,2021,37(3):102-107. (in Chinese))
- [24] 马勇,顾正华,王庭辉,等. 基于 SWMM 的山丘城区防洪排涝能力分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):499-505. (MA Yong, GU Zhenghua, WANG Tinghui, et al. Analysis of flood control and drainage capacity of hilly city based on SWMM [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021,49(6):499-505. (in Chinese))
- [25] 孔宇,孙巍,李小龙,等. 河道海绵建设中 SWMM-MIKE 11 耦合模型的构建及应用思路[J]. 水资源保护,2021,37(6):74-79. (KONG Yu, SUN Wei, LI Xiaolong, et al. Building and application idea of SWMM-MIKE 11 coupling model in sponge river construction [J]. Water Resources Protection,2021,37(6):74-79. (in Chinese))
- [26] 雷向东,赖成光,王兆礼,等. LID 改造对城市内涝与面源污染的影响[J]. 水资源保护,2021,37(5):131-139. (LEI Xiangdong, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Influence of LID adaptation on urban flooding and non-point source pollution [J]. Water Resources Protection,2021,37(5):131-139. (in Chinese))
- [27] 唐磊,车伍,赵杨. 基于低影响开发的合流制溢流污染控制策略研究[J]. 给水排水,2013,49(8):47-51. (TANG Lei, CHE Wu, ZHAO Yang. Research on overflow pollution control strategy of confluence system based on low impact development [J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 49(8): 47-51. (in Chinese))

(收稿日期:2021-11-16 编辑:王芳)