

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2021.0067

张璇,王佳刚,许杨,等. 滦河流域干湿变化及大尺度气候因子影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(4):636-644,668. ZHANG X,WANG J G,XU Y,et al. Variations of dryness/wetness and responses to large scale climate factors based on SPI in Luanhe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(4):636-644,668. (in Chinese)

滦河流域干湿变化及大尺度气候因子影响

张璇^{1,2},王佳刚¹,许杨¹,郝增超¹,郝芳华¹

(1. 北京师范大学水科学研究院城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室,北京 100875;

2. 北京师范大学中国绿色发展协同创新中心,北京 100875)

摘要:利用经验正交函数、小波变换等方法,基于标准化降水指数分析滦河流域 1957—2016 年的干湿变化趋势,研究流域干湿变化典型场的时空和周期特征,并通过对比大尺度气候因子对不同典型场的影响差异,讨论滦河流域干湿变化的气候成因。结果表明:滦河流域干湿条件在 1989 年发生突变,干旱有加剧趋势且在研究时段内年际干旱事件频发;流域干湿变化表现为两种典型模态,模态 1 呈现出全区一致性的空间分布,以及流域干旱程度增加的时间变化特征,两种模态在时间变化上均存在 1.5~4.0 a 主周期;对流域干湿变化影响最强烈的是 ENSO,其次是 AO 和 NAO,而 AMO 和 PDO 影响最弱。上述气候因子指数对干湿场的影响主要体现在改变流域干湿一致性。

关键词:标准化降水指数;经验正交函数;小波变换;干湿变化;大尺度气候因子

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



IPCC 第 5 次评估报告指出,气候变暖是毋庸置疑的事实。气候变暖导致降水、径流、蒸散发的改变,必然会对气候的干湿状况产生重要影响^[1]。滦河流域位于京津冀地区北部,季风气候特征明显,干湿气候转换频繁,是气候变化敏感区和生态脆弱区^[2],气候干湿情况对该地区生态安全的影响不容忽视。

目前,国内外常用于旱涝定义和监测的指标有降水距平百分率、Palmer 干旱指数、标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)等^[3-5]。其中, SPI 由于只需要降水资料,计算简便,具有多时间尺度的特性,因此在干湿状况的分布特征、时空变异及驱动因子研究中得到广泛的应用^[6]。研究区内已有的研究^[7]表明, SPI 在滦河流域具有较好的适应性,全流域在汛期存在干旱加剧趋势,东南部趋势显著^[8]。在干湿变化时空信息提取及变异研究方面,经验正交函数(empirical orthogonal function,

EOF)分析法可以在保持原有信息尽量不损失的前提下,减少原始气象场的维度,因此具有明显的优势^[9]。基于 EOF 法,杨晓静等^[10]对比分析了东北三省的旱涝空间分布特征,研究发现黑龙江省同时受干旱和雨涝风险最大,辽宁省与吉林省次之。刘佳旭等^[11]在云南省旱涝时空格局的研究表明,该地区旱涝呈现整体一致性特征,可能受到地形、季风、大气环流等多种因素的影响。由于地形、下垫面、大气和海温等影响^[12],气候干湿时间序列是一种隐含着周期振动的随机过程,小波变换常用于揭示多时间尺度的周期及趋势等特性^[13]。Rezaei 等^[14]研究发现太平洋 10 年涛动对伊朗乌尔米亚湖降水、土壤湿度的影响比厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)更大。李沛等^[15]研究表明太阳黑子对渭河流域农业干旱发展过程的影响强于 ENSO 和北极涛动等大气环流异常因子。

收稿日期:2020-12-14 修回日期:2021-04-26 网络出版时间:2021-05-06

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210506.1245.002.html

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508901);国家自然科学基金(41907157)

作者简介:张璇(1984—),女,河南南阳人,高级工程师,博士,主要从事流域水环境管理、绿色发展与环境规划、面源污染与管理控制等研究。E-mail: xuan@bnu.edu.cn

上述研究重点关注了干湿演变特征及气候因子的影响分析,或是对旱涝时空格局的分解研究,但对流域干湿特征进行时空分解及其变化的影响因素的研究相对较少。由于滦河流域是华北地区的重要水源区和气候过渡带,研究其干湿场典型模态的特征及对大尺度气候因子的响应具有重要意义。本文采用SPI分析滦河流域干湿变化趋势,利用经验正交函数分解干湿场并探讨其时空特征和周期性,应用交叉小波分析大尺度气候因子与典型场干湿状况的响应关系,以期对滦河流域旱涝灾害的客观评估和准确预测提供参考,进而减轻极端气候事件带来的损失并增强人们对气候变化的适应性。

1 研究区与研究数据

1.1 研究区概况

滦河发源于河北省张家口的巴彦古尔图山脉北麓,地理坐标 $115^{\circ}\text{N}\sim 120^{\circ}\text{N}$, $39^{\circ}\text{E}\sim 43^{\circ}\text{E}$,全长 888 km,流域面积 4.683 万 km^2 ,见图 1。滦河流域是海河流域的四大水系之一,水系成羽状,其主要支流有伊逊河、武烈河、瀑河、洒河、青龙河等^[7]。流域中上游地区属于温带大陆性气候,下游地区属于温带季风气候,冬季寒冷干燥,夏季主要受西太平洋副热带高压影响,炎热多雨。地势西北高东南低,流域上游为坝上、围场高原区,中游为冀北燕山丘陵区,下游为燕山山前平原和滦河三角洲平原。

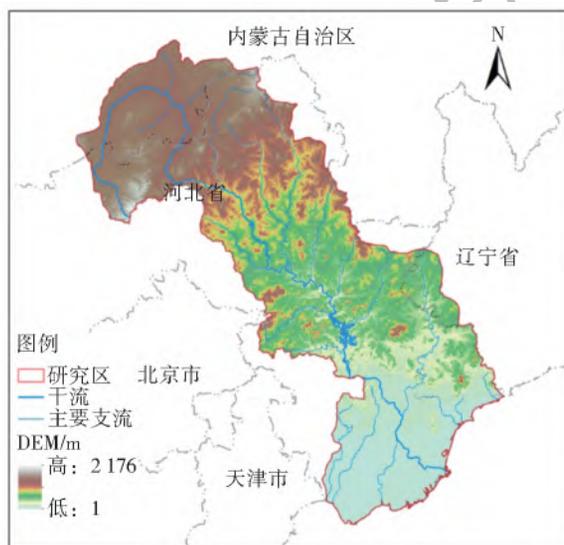


图 1 滦河流域基本信息

Fig.1 Basic information of Luanhe River basin

1.2 研究数据

研究主要使用到气象站点实测数据和全球大尺度气候因子数据。气象数据来源于中国气象局气象数据中心(<http://data.cma.cn>),包括滦河流域及

其周边 9 个气象站点 1957—2016 年逐月降水量资料,时间跨度为 60 a。基于泰森多边形法,利用气象站点间中垂线将流域分割成若干个子区域,计算其面积权重作为相应站点的权重,从而获得流域雨量^[16],结合 SPI 进行干湿分析。

6 种大尺度气候因子指数资料均来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)地球系统研究实验室(<https://esrl.noaa.gov>),数据起止时间为 1957—2016 年,时间尺度为逐月。其中:太平洋年代际涛动(PDO)反映了太平洋 20°N 以北区域海表温度的长期振荡;北大西洋年代际涛动(AMO)反映了北大西洋区域海表温度的交替变化;北极涛动(AO)反映了北半球中纬度地区到北极地区的气压形势差的变化;北大西洋涛动(NAO)反映了冰岛低压与亚速尔高压之间的海平面气压差;南方涛动指数(SOI)指东南太平洋与印度洋及印尼地区之间的海平面气压差;厄尔尼诺与南方涛动(ENSO)是发生于赤道东太平洋地区的风场和海面温度振荡,在海洋方面表现为厄尔尼诺-拉尼娜的转变,在大气方面表现为南方涛动。Nina 3.4 和 SOI 均为表征 ENSO 事件的指数^[14]。

2 研究方法

2.1 标准化降水指数

标准化降水指数(SPI)用于表征某一时段内某地区的干湿状况,其计算原理是将长时间序列的月尺度降水转换为标准正态分布^[17-18]。一般将降水量采用 Γ 分布拟合后,经标准化处理,根据世界气象组织(WMO)的 SPI 用户指南,最终计算得到 SPI 并划分干湿等级^[19]。Mann-Kendall 方法(M-K 法)是 WMO 推荐的一种非参数统计检验方法,已经广泛应用于检验各种气象要素的时间序列的长期趋势^[20-21]。计算 12 个月尺度的 SPI 指数(SPI_{12}),利用 M-K 法分析流域干湿特征的演变规律。

2.2 经验正交函数

经验正交函数(EOF)分析也称特征向量分析,EOF 法将变量的初始数据集线性转换为多个不相关变量集,从而减少数据维度,更方便理解并做进一步处理与分析,现已在地质学、气象学等领域得到广泛应用^[22-23]。将气象要素场按自然正交展开,表示为

$$X(t,s) = \sum_{k=1}^M c_k(t) u_k(s) \quad (1)$$

式中: $X(t,s)$ 为场中第 s 个格点上的第 t 次观测值,可以看作是 M 个时间函数 $c_k(t)$ 和空间函数 $u_k(s)$ 的线性组合。根据 North 等^[24]提出的计算特征值误差范围进行显著性检验。

2.3 小波变换

2.3.1 连续小波变换

干湿变化的周期振荡采用小波分析,用于表达时间序列在时频域中的局部特征。连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)常用于分析时间序列的局部间歇性振荡,已广泛应用于气候变化与水文循环领域^[15,25]。小波基的种类较多,本文采用 Morlet 小波能量谱对 EOF 分解的主要时间变量时频特点进行分析^[26],其定义为复指数波和高斯包络的乘积,公式为

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\frac{1}{2}\eta^2} \quad (2)$$

式中: $\psi_0(\eta)$ 是 Morlet 小波; η 是无量纲时间; i 是虚数单位; ω_0 是无量纲频率,当 ω_0 取 6 时 Morlet 小波在时间和频率定位之间提供了良好的平衡。具有均匀时间步长 Δt 的时间序列 $x_k (k=1, 2, \dots, N)$ 的 CWT 定义为

$$W_{n,x}(s) = \sqrt{\frac{\Delta t}{s}} \sum_{k=1}^N x_k \psi_0 \left[(k-n) \frac{\Delta t}{s} \right] \quad (3)$$

式中: $W_{n,x}(s)$ 是小波变换系数; n 是时间因子, s 是尺度因子,分别是连续小波的两个维度; k 为时间序列的次序。在时间域上对关于 s 的所有小波变换系数的平方进行积分,即为小波方差。小波方差随尺度 s 的变化过程,即小波方差图,反映了波动的能量随尺度的分布,可确定时间序列中存在的主要时间尺度,即主周期。

2.3.2 交叉小波变换

交叉小波变换(cross wavelet transform, XWT)是将小波变换和交叉谱分析两种方法结合产生的新型信号技术,该方法揭示了时频域中 2 个时间序列的能量共振和协方差分布^[25,27-28]。采用 XWT 分析大尺度气候因子与 EOF 分解的主要时间变量的多尺度相关。对于时间序列 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 与 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$,假设 $W_{n,x}(s)$ 和 $W_{n,y}(s)$ 分别为 2 个变量在频率尺度下的连续小波变换系数,那么交叉小波谱可以表示为

$$W_{n,XY}(s) = W_{n,x}(s) W_{n,y}^*(s) \quad (4)$$

式中: $W_{n,y}^*(s)$ 为 $W_{n,y}(s)$ 的复共轭; $|W_{n,XY}(s)|$ 为交叉小波的功率谱,其密度值越大,表明两者具有共同的高能量区,彼此相关性显著。

3 结果与讨论

3.1 干湿变化趋势

采用 M-K 法对 1957—2016 年 SPI_{12} 进行趋势分析和突变检验,显著性水平为 0.05。M-K 统计量持续减小,滦河流域干湿条件在 1989 年发生突变并

且干旱趋势愈加严重,见图 2。结合突变前后流域干湿事件的数量统计,1989 年前滦河流域相对湿润,整体上旱涝事件交替发生,流域 29 年次极涝事件均发生在这段时间,同时期发生了 2 年次极旱事件,影响到 1972 年和 1980—1984 年。1989 年后流域干旱事件强度增大,年际干旱事件频发,共发生 17 年次重旱和极旱事件,流域总干旱年份达到 78 年次,占总旱涝年次的 67.2%,见表 1。

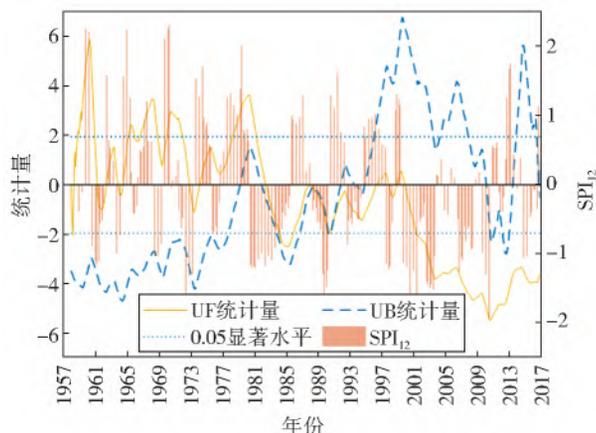


图 2 SPI_{12} 序列及其 M-K 检验

Fig. 2 M-K test of SPI_{12}

表 1 不同时段各类型干湿事件数量统计

Tab. 1 Number of various types of dryness/wetness events in different periods

SPI 值	类型	突变前后时段干湿事件数量		变化率/ %
		1957—1988 年	1989—2016 年	
$(-\infty \sim -2.0]$	极旱	2	2	0
$(-2.0 \sim -1.5]$	重旱	5	15	200.0
$(-1.5 \sim -1.0]$	中旱	58	61	5.2
$(-1.0 \sim 1.0)$	正常	212	229	8.0
$[1.0 \sim 1.5)$	中涝	46	29	-37.0
$[1.5 \sim 2.0)$	重涝	11	9	-18.2
$[2.0 \sim \infty)$	极涝	29	0	-100.0

注:采用逐月 SPI_{12} 序列来划分干湿等级,因此各等级的干湿事件总数为 12×59 ,共计 708 个事件。

研究结果与史料较为一致^[29-30],1963 年海河南系特大暴雨造成海河流域特大洪水,海河流域有 104 个县(市)受灾,全流域淹没农田 440 万 hm^2 ,直接经济损失达 60 亿元。1979 年,滦河下游大水成灾。1972 年旱灾是滦河流域历史上罕见的大旱,承德地区春夏连旱,干旱面积占耕地面积的 80%,受灾面积 1 907 km^2 。1980—1984 年,滦河流域连续干旱,承德地区成灾面积累计 6 353 km^2 ,唐山地区受旱面积累计 8 493 km^2 。1997—2005 年,流域又出现连续干旱。2009 年夏季,承德市八县三区均不同程度遭受旱灾。

3.2 典型模态的干湿变化特征

3.2.1 干湿变化的时间变化和空间分布

采用 EOF 法对 SPI_{12} 进行时空分解,得到滦河流域干湿变化的空间函数和时间函数。前 2 个空间函数特征值的累积贡献率为 72.3%,表明前两个模态可以解释滦河流域 1957—2016 年干湿场的主要特征。

应用反距离加权法^[31]对空间函数进行插值,见图 3。图 3(a)中,EOF₁ 均为正值,表明模态 1 的空间变化具有一致性,即全流域一致偏于干旱或偏于湿润,说明全流域干湿分布可能受同一因素(如大尺度气候因子)影响较大,张利平^[32]指出海河流域夏

季水汽经向输送的演变可能与夏季风的年代际变化有关。此外,该模态的高值中心位于流域中下游交界处,说明若全流域偏旱时,则中下游交界处旱情更显著。图 3(b)中,EOF₂ 以中游的冀北燕山丘陵为界,向东南为正值区,向西北为负值区,正值中心出现在下游平原唐山市乐亭县,负值中心出现在上游坝上、围场高原区,说明该模态下流域干湿分布为区域性特征,结合图 1 的高程信息,可能是流域地形对降水空间分布差异产生的影响。东南季风经过沿海平原时形成降雨中心,受中部燕山山脉的阻挡,在流域中上游形成较少的降水,从而形成了上下游不同的降水格局和相反的变化态势^[33]。

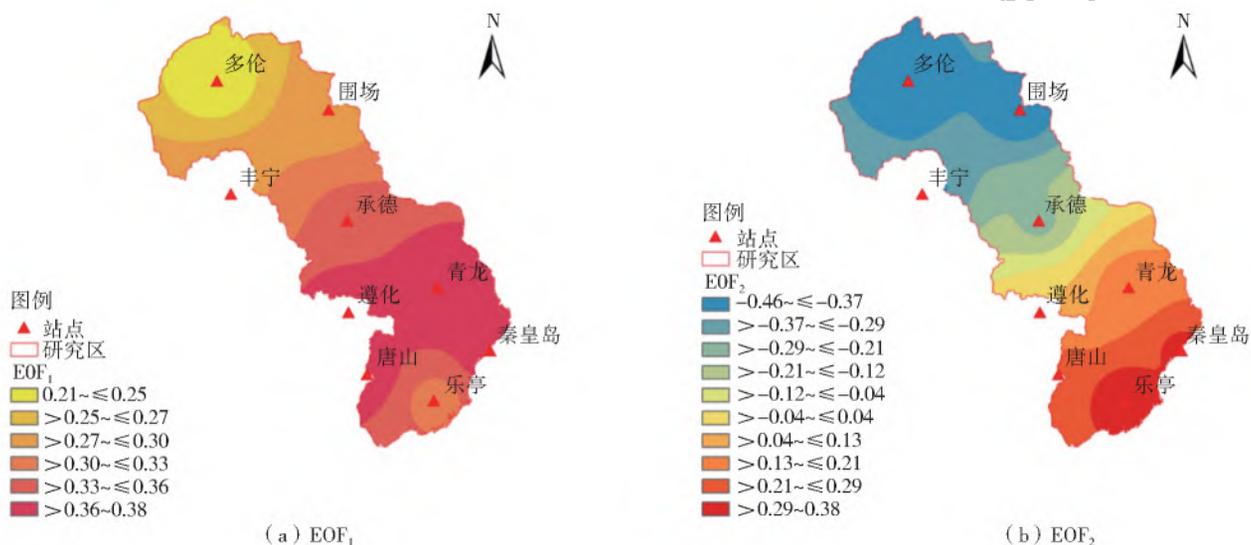


图 3 干湿场第一、第二特征向量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of EOF₁ and EOF₂

综上,滦河流域干湿场表现为 4 种类型:模态 1 决定全年全流域干旱或者全流域湿润;模态 2 决定全年西北地区干旱而东南地区湿润,或者西北地区湿润而东南地区干旱。

采用 M-K 法分析两种模态的时间变化趋势见图 4,显著性水平为 0.05。时间变量(PC)系数符号决定模态的方向,正号表示与模态同方向,系数绝对值越大表明模态越典型。对流域干湿场 4 种主要空间特征的年份分布进行统计,1957—2016 年干湿场的分布情况:以模态 1 为主,有 39 a, 占总年数 66.1%,且 PC₁ 斜率为 -0.054,说明流域干旱程度有增加的趋势;模态 2 出现 3 a, 占总年数 5.1%, PC₂ 趋势未通过显著性检验。

3.2.2 干湿变化的周期特征

滦河流域干湿场 PC₁、PC₂ 的 Morlet 小波时频图及小波方差变化过程见图 5。图 5(a)中,细凹实线表示影响锥,在该曲线外的能量谱由于受到边界

效应的影响而不予考虑,粗实线表示通过了 0.05 置信水平下的显著性检验。

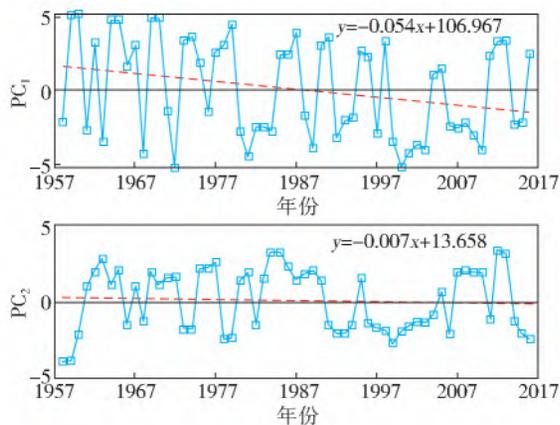


图 4 干湿场第一、第二主成分的时间变化

Fig. 4 Temporal variations of PC₁ and PC₂

图 5(a)表明, PC₁ 在 1962—1979 年, 1987—1996 年, 1998—2001 年以及 2009—2013 年呈现出 1.5~4.0 a 的 年 际 振 荡 特 征, 此 外 1957—2016 年 表

现出显著的 0.5~1.0 a 间歇性振荡以及更高频率下的功率。图 5(b)小波方差图证实了 PC_1 存在 2.5 a 和 4.0 a 主周期,但 1969—2005 年的 11 a 主周期未通过显著性检验。图 5(c)表明, PC_2 在 1963—1967、

1978—1980、1983—1986 以及 2008—2014 年呈现出显著的 1.5~4.0 a 周期,图 5(d)小波方差图证实了 PC_2 存在 2.5 a 和 4.0 a 主周期。结果表明, PC_1 和 PC_2 时频结构具有相似性,均存在 1.5~4.0 a 主周期。

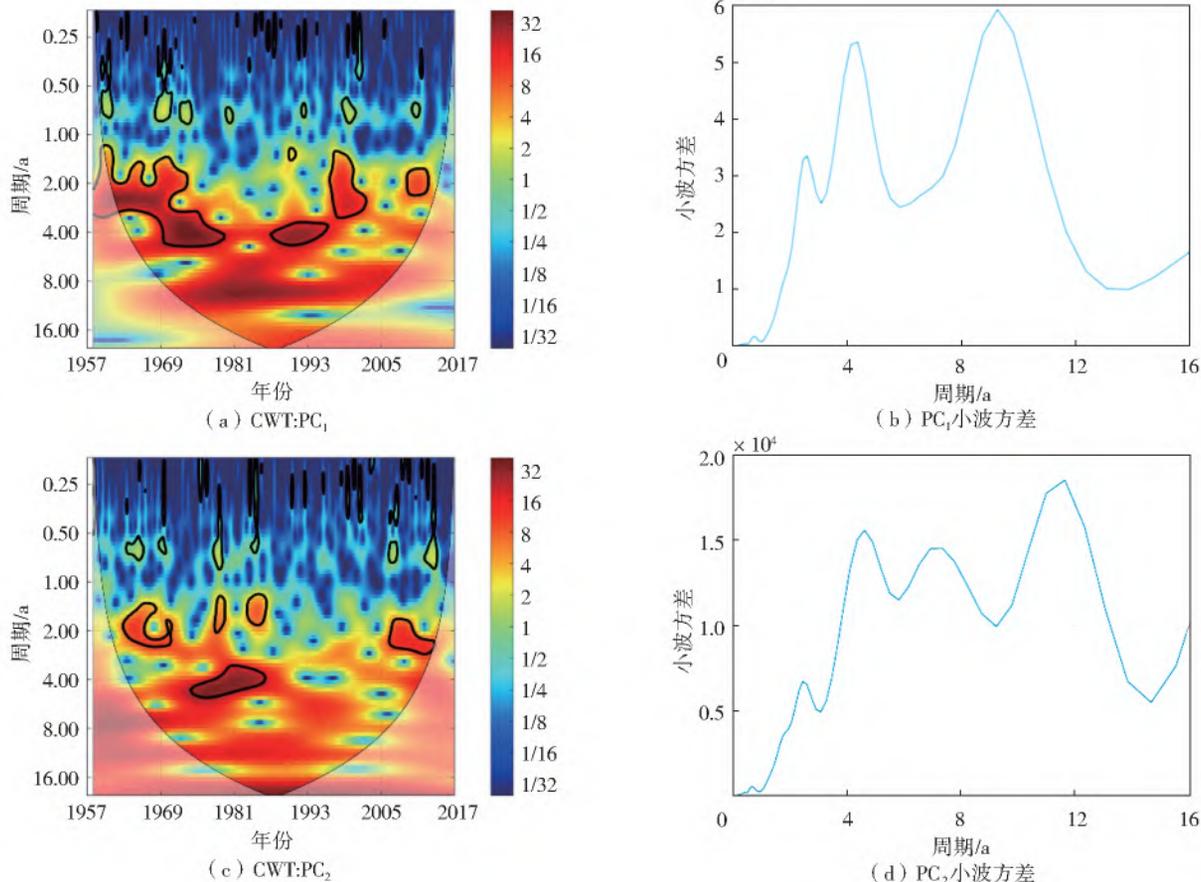


图 5 干湿场 PC_1 、 PC_2 的连续小波变换功率谱及小波方差图

Fig. 5 CWT power spectrum and wavelet variance diagram of PC_1 and PC_2 of dryness/wetness fields

3.3 大尺度气候因子的影响

采用交叉小波变换法评价大尺度气候因子与 PC_1 和 PC_2 在时频域的共振周期及相位关系,按照共振周期的数量降序排列,见图 6 和图 7。图中黑色实线表示显著性水平 $\alpha=0.05$ 的 95% 的置信区间,箭头表示两种时间序列的相位关系:→表示相位角为 0,两种序列同相位变化;←表示相位角为 π ,两种序列反相位变化。

图 6(a)、6(b)表明,Nina 3.4 和 SOI 均与 PC_1 表现出相似的时频结构,在 1961—2012 年中均存在连续的 1.5~6.0 a 周期;两幅图的高能区呈现出相反的相位关系,表明 Nina 3.4 和 SOI 对 PC_1 具有相似周期和相反影响效果。其中:1961—1981、1991—2002 和 2003—2012 年,Nina 3.4 与 PC_1 存在 1~4 a 显著的负相关关系;1982—1990 年的 3~6 a 区间呈现正相关关系。图 6(c)~(f)表明,与 NAO 相比,AO 对 PC_1 具有相似且更强的影响。AMO 和 PDO 与 PC_1 具有的共振周期较不明显,其相关性较弱。

图 7(a)、7(b)表明 Nina 3.4 与 PC_2 的时频关系与 PC_1 类似,Nina 3.4 和 SOI 均与 PC_2 表现出相似的时频结构,同样在 1961—2012 年中存在连续的 1.5~6.0 a 周期,并且相位关系相反,其中,1981—1990 年的准 4 a 周期中,Nina 3.4 与 PC_2 是典型的负相关关系。图 7(c)~(f)表明,AO 和 NAO 对 PC_2 的影响具有一定的相似性,而 AMO 和 PDO 与 PC_2 的相关性较弱。

对比图 6(a)、6(b)和图 7(a)、7(b),滦河流域干湿变化的两种典型模态与 Nina 3.4 和 SOI 均有密切联系,二者对干湿场具有相似的 1.5~6.0 a 周期但是相反的相关关系。Nina 3.4 指数为正数或 SOI 为负数,对应厄尔尼诺事件,它以 2~7 a 的周期不断循环。比较图 6(c)、6(d)和图 7(c)、7(d),AO 和 NAO 对干湿场的影响较为一般,主要体现在 2~4 a 周期的相位关系上。AO 和 NAO 具有一定的相似性,对北半球的气温和降水等都有显著影响^[34]。对比图 6 和图 7,6 种大尺度气候因子与 PC_1 的时频关系与 PC_2 类似,但是图 6 中通过显著性检验

的小波功率谱范围较图 7 更广,且功率更强。综上,对干湿变化的影响最大的是 Nina 3.4 和 SOI,其次是 AO 和 NAO,而 AMO 和 PDO 对干湿变化的相关性最弱;

上述大尺度气候因子指数对流域干湿场的影响主要体现在模态 1 上,即改变流域干湿一致性。模态 2 可能更多地受到地形等其他因素的影响。

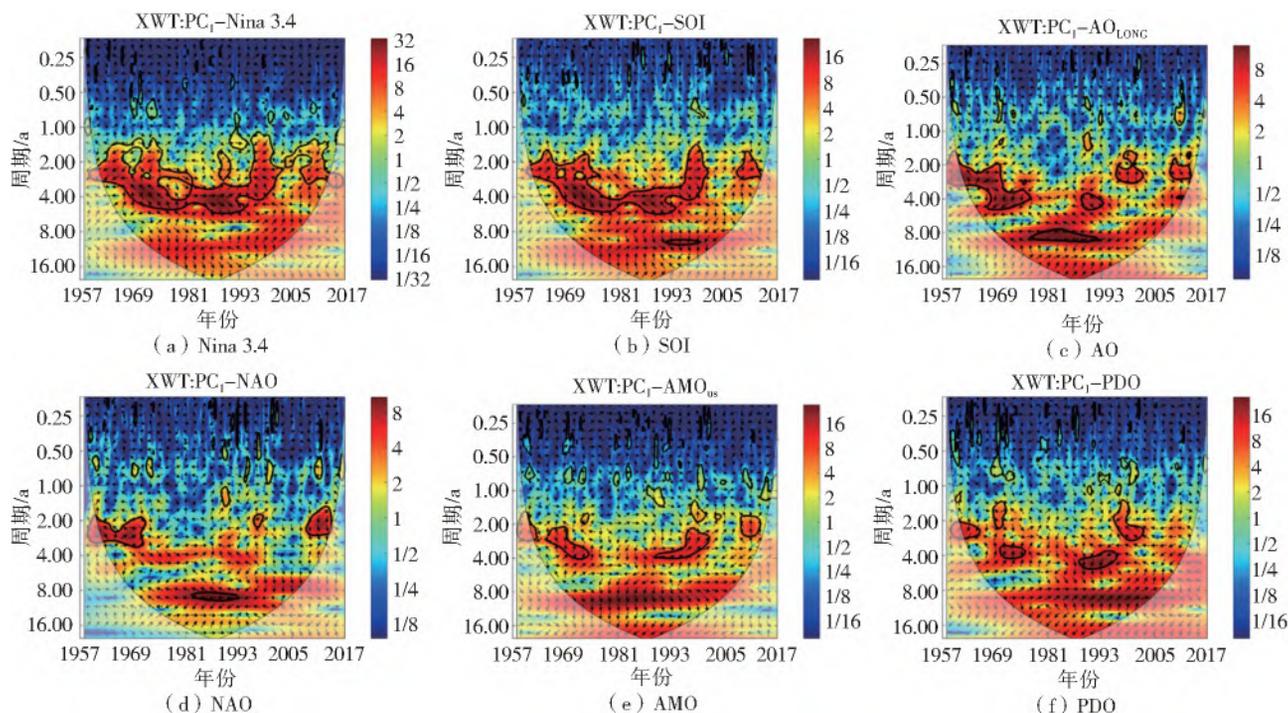


图 6 干湿场 PC_1 与大尺度气候因子的交叉小波变换功率谱

Fig. 6 XWT power spectrum of PC_1 of dryness/wetness fields

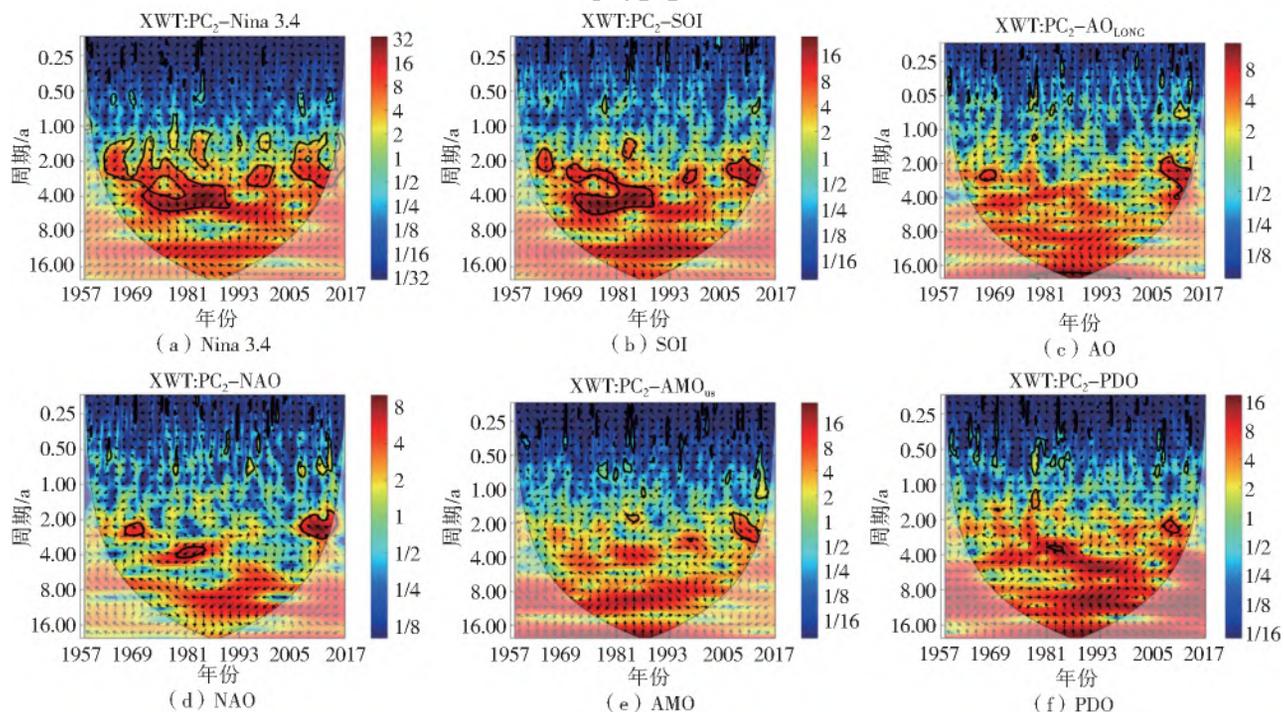


图 7 干湿场 PC_2 与大尺度气候因子的交叉小波变换功率谱

Fig. 7 XWT power spectrum of PC_2 of dryness/wetness fields

4 结论与展望

(1) 滦河流域干湿条件在 1989 年发生突变,突变前流域旱涝事件交替发生,突变后流域干旱趋势

进一步增强且年际干旱事件频发。

(2) 滦河流域干湿演变表现为全区干湿一致性和流域上下游相反型共两种典型模态,其累积贡献率达到 72.3%,流域干湿场以全区干湿一致性为

主,其时间变量的趋势表明,流域干旱程度有增加趋势;两个模态的时间变量具有相似的时频结构,均存在 1.5~4.0 a 主周期。

(3)表征 ENSO 事件的 Nina 3.4 和 SOI 与两种模态均存在 1.5~6.0 a 周期;对滦河流域干湿场影响最为显著的是 ENSO,其次是 AO 和 NAO,与 AMO 和 PDO 的相关性最弱;6 种气候因子指数对流域干湿场的影响主要体现在改变流域干湿一致性。

采用 SPI 刻画滦河流域的干湿特征,总体变化与以往学者^[35]对华北地区干旱趋势加剧的判断一致,但是研究中忽视了气候变暖及其导致的蒸发增大对于干旱加剧的重要影响。未来可选用不同的复合干旱指数,进一步研究流域不同时间尺度的干湿特性,分析太阳活动和大尺度气候因子对干湿变化的影响,从大气环流和海温异常的影响机制方面展开研究。

参考文献(References):

- [1] SALAS J D, ANDERSON M L, PAPALEXIOU S M, et al. PMP and climate variability and change: A review [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2020, 25 (12): 3120002. DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002003.
- [2] 李冲,张璇,吴一帆,等.京津冀生态屏障区景观格局变化及其对水源涵养的影响[J]. *中国环境科学*. 2019, 39(6):2588-2595. (LI C, ZHANG X, WU Y F, et al. Landscape pattern change of the ecological barrier zone in Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on water conservation[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39 (6): 2588-2595. (in Chinese)) DOI: 10.31497/zrzyxb.20200717.
- [3] YANG P, XIA J, ZHANG Y D, et al. Comprehensive assessment of drought risk in the arid region of north-west China based on the global palmer drought severity index gridded data[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 627: 951-962. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.234.
- [4] WANG Y D, LIU X L, REN G X, et al. Analysis of the spatiotemporal variability of droughts and the effects of drought on potato production in northern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 264: 334-342. DOI:10.1016/j.agrformet.2018.10.019.
- [5] NDEHEDEHE C E, AGUTU N O, FERREIRA V G, et al. Evolutionary drought patterns over the Sahel and their teleconnections with low frequency climate oscillations[J]. *Atmospheric Research*, 2020, 233:104700. DOI:10.1016/j.atmosres.2019.104700.
- [6] ZHU Y, WANG W, SINGH V P, et al. Combined use of meteorological drought indices at multi-time scales

- for improving hydrological drought detection[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 571:1058-1068. DOI:10.1016/j.scitotenv.2016.07.096.
- [7] 马海娇,严登华,翁白莎,等.典型干旱指数在滦河流域的适用性评价[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(4):728-734. (MA H J, YAN D H, WENG B S, et al. Applicability of typical drought indexes in the Luanhe River basin [J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30 (4): 728-734. (in Chinese)) DOI:10.13866/j.azr.2013.04.016.
- [8] 王怡璇,陈伏龙,冯平,等.滦河流域多时间尺度干旱时空特征分析[J]. *高原气象*, 2020, 39(2):265-268. (WANG Y X, CHEN F L, FENG P, et al. Temporal and spatial characteristics of drought on multiple time scales in the Luanhe River basin[J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39 (2): 265-268. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00034.
- [9] WANG Z, LI J, LAI C, et al. Does drought in China show a significant decreasing trend from 1961 to 2009? [J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 579: 314-324. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.098.
- [10] 杨晓静,徐宗学,左德鹏,等.东北三省近 55 a 旱涝时空演变特征[J]. *自然灾害学报*, 2016, 25(4):9-19. (YANG X J, XU Z X, ZUO D P, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of drought-waterlogging in three provinces of northeast China in past 55 years [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(4):9-19. (in Chinese)) DOI:10.13577/j.jnd.2016.0402.
- [11] 刘佳旭,李九一,李丽娟,等.基于降水数据的云南省近 61 年旱涝特性研究[J]. *热带气象学报*, 2018, 34(1):68-77. (LIU J X, LI J Y, LI L J, et al. A study on characteristics of drought and flood based on precipitation data in Yunnan Province over the past 61 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2018, 34(1):68-77. (in Chinese)) DOI:10.16032/j.issn.1004-4965.2018.01.007.
- [12] 许武成,马劲松,王文.关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述[J]. *气象科学*, 2005(2):212-220. (XU W C, MA J S, WANG W. A review of studys on the influence of ENSO events on the climate in china[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2005(2):212-220. (in Chinese))
- [13] 桑燕芳,王栋,吴吉春,等.水文时间序列小波互相关分析方法[J]. *水利学报*, 2010, 41(11):1272-1279. (SANG Y F, WANG D, WU J C, et al. Wavelet cross-correlation method for hydrologic time series analysis [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(11):1272-1279. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.11.002.

- [14] REZAEI A, GURDAK J J. Large-scale climate variability controls on climate, vegetation coverage, lake and groundwater storage in the Lake Urmia watershed using SSA and wavelet analysis[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 724: 138273. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138273.
- [15] 李沛, 黄生志, 黄强, 等. 变化环境下渭河流域农业干旱形成与发展过程的时空特征研究[J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(4): 131-141. (LI P, HUANG S Z, HUANG Q, et al. Spatiotemporal characteristics of the formation and development of agricultural drought in Weihe River basin under changing environment[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(4): 131-141. (in Chinese)) DOI: 10.13577/j.jnd.2019.0414.
- [16] 王杰, 李占玲. 基于熵权的 TOPSIS 综合评价法在大气环流模式优选中的应用[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2020, 18(2): 14-21. (WANG J, LI Z L. Application of entropy weighted TOPSIS method for selection of general circulation models [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(2): 14-21. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0023.
- [17] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[A]. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*[C]. Boston, 1993.
- [18] HUSAK G J, MICHAELSEN J, FUNK C. Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications[J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(7): 935-944. DOI: 10.1002/joc.1441.
- [19] SVOBODA M, HAYES M, WOOD D. Standardized precipitation index user guide[M/OL]. [2020-10-30]. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=13682.
- [20] 孙秋慧, 徐国宾, 马超, 等. 基于 SPI 干旱指数的海口市干旱变化特征研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(4): 58-65, 81. (SUN Q H, XU G B, MA C, et al. Study on the characteristics of drought in Haikou City based on standardized precipitation index [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(4): 58-65, 81. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0097.
- [21] CUI L, WANG L, QU S, et al. Spatiotemporal extremes of temperature and precipitation during 1960-2015 in the Yangtze River basin (China) and impacts on vegetation dynamics[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 136(1/2): 675-692. DOI: 10.1007/s00704-018-2519-0.
- [22] 丁裕国. EOF 在大气科学研究中的新进展[J]. *气象科技*, 1993(3): 10-19. (DING Y G. Advance in EOF in atmospheric science research [J]. *Meteorological Science and Technology*, 1993(3): 10-19. (in Chinese)) DOI: 10.19517/j.1671-6345.1993.03.002.
- [23] 邹磊, 余江游, 夏军, 等. 基于 SPEI 的渭河流域干旱时空变化特征分析[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(2): 329-338. (ZOU L, YU J Y, XIA J, et al. Temporal-spatial variation characteristics of drought in the Weihe River basin based on SPEI [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(2): 329-338. (in Chinese)) DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2020.02.06.
- [24] NORTH G, BELL T, CAHALAN R, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7): 699-706. DOI: 10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2.
- [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. DOI: 10.5194/npg-11-561-2004.
- [26] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61-78. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0061:APGTWA>2.0.CO;2.
- [27] 陈文华, 徐娟, 李双成. 怒江流域下游地区气象与水文干旱特征研究[J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 2019, 55(4): 764-772. (CHEN W H, XU J, LI S C. A study on the characteristics of hydrological and meteorological droughts in the lower Nu River [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(4): 764-772. (in Chinese)) DOI: 10.13209/j.0479-8023.2019.034.
- [28] 邢广君, 崔弼峰. 贵州省干旱变化特征及其与大气环流关系[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(6): 75-85. (XING G J, CUI B F. Drought characteristics variations and its relationship with atmospheric circulation in Guizhou Province [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(6): 75-85. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0138.
- [29] 水利部海河水利委员会. 海河流域水旱灾害[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2009. (Haihe River Water Conservancy Commission, MWR. Flood and drought disasters in the Haihe River basin [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2009. (in Chinese))
- [30] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018. (China Ministry of

- Water Resources, Bulletin of flood and drought disasters in China [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2018. (in Chinese))
- [31] ZHOU Z, SHI H, FU Q, et al. Is the cold region in Northeast China still getting warmer under climate change impact? [J]. Atmospheric Research, 2020, 237:104864. DOI:10.1016/j.atmosres.2020.104864.
- [32] 张利平. 华北地区陆气水循环时空演化规律研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (ZHANG L P. Research on evolution law of land-atmosphere hydrological cycle in north China [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese)) DOI:10.7666/d.Y745601.
- [33] 董满宇, 王磊鑫, 李洁敏, 等. 1960—2017 年滦河流域降水集中度与集中期时空变化特征 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(4): 468-475. (DONG M Y, WANG L X, LI J M, et al. Spatial-temporal variations in intra-annual precipitation concentration degree and precipitation concentration period in Luanhe River basin from 1960 to 2017 [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(4): 468-475. (in Chinese)) DOI: 10.16360/j.cnki.jb-nuns.2019.04.008.
- [34] THOMPSON D W J, WALLACE J M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(9): 1297-1300. DOI: 10.1029/98GL00950.
- [35] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439. (MA Z G, FU C B. Basic facts of drought in northern China from 1951 to 2004 [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, (20): 2429-2439. (in Chinese))

Variations of dryness/wetness and responses to large scale climate factors based on SPI in Luanhe River basin

ZHANG Xuan^{1,2}, WANG Jiagang¹, XU Yang¹, HAO Zengchao¹, HAO Fanghua¹

(1. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Green Development Institute, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Luanhe River basin is located in the north of Beijing-Tianjin-Hebei area with obvious monsoon climate characteristics and frequent dryness/wetness variations. It is an ecologically fragile area and is sensitive to climate change. Under the background of climate warming, it is of great significance to study the characteristics of typical dryness/wetness field modes and their responses to large-scale climate factors. The existing research focused on the analysis of the evolution characteristics of dryness/wetness and the impacts of climate factors, or the decomposition of the spatial and temporal patterns of drought and flood. However, there are relatively few studies on the spatiotemporal decomposition of dryness/wetness characteristics and the periodic identification and impact of climate factors.

The standardized precipitation index (SPI) was used to analyze the dryness/wetness change trend of Luanhe River basin from 1957 to 2016. The Mann-Kendall method was used to test the evolution trend of dryness/wetness characteristics. The empirical orthogonal function (EOF) decomposition was used to decompose the dryness/wetness field, and its temporal and spatial characteristics and periodicity were discussed. The cross-wavelet analysis was used to analyze the response relationship between large-scale climate factors and typical dryness/wetness conditions. The reference was provided for objective assessment and accurate prediction of drought and flood disasters in Luanhe River basin, so as to reduce the losses caused by extreme climate events and enhance people's adaptability to climate change.

In the study on the trend of wet and dry changes in the Luanhe River basin, the Mann-Kendall method was used to analyze the trend and abrupt changes of SPI₁₂ (12-month SPI) from 1957 to 2016. The wet and dry conditions in the basin had abrupt changes in 1989 and the drought trend became more serious. Before 1989, there were 29 years of extreme waterlogging events in the basin, and 2 years of extreme drought events, affecting 1972 and 1980-1984. After 1989, the intensity of drought events in the basin increased, and inter-annual drought events occurred frequently, with a total of 27 years of severe and extreme drought events. In the study of the characteristics of dryness/wetness changes in the typical modalities of the Luanhe River basin, the EOF method was used to decompose SPI₁₂ in time and space, and the cumulative contribution rate of the first two spatial function eigenvalues was 72.3%. The distribution of dryness/wetness fields from 1957 to 2016 is dominated by mode 1, and the slope of PC₁ (the first principal component) is -0.054, indicating that the degree of drought in the basin has an increasing trend. The continuous wavelet transform power spectrum and the wavelet variance graph show that the time-frequency structure of PC₁ and PC₂ in the dryness/wetness fields are similar, and both have a 1.5 to 4.0 year main period. In the study of the influence of

(下转第 668 页)

off decline and water quality deterioration in the upper Yongding River basin.

Conclusions (1) The carrying capacity of water resources and water environment are seriously insufficient in the upper Yongding River basin. How to improve the water use efficiency regards to the limited water resources, and how to coordinate the relationship between water resources, ecology and social economic development are highly needed for regional sustainable development and ecological civilization in the upper Yongding River basin. (2) Under the influence of climate change and human activities, the mechanism of water cycle and the process of pollutant migration and transformation will change significantly. How to reveal hydrological cycle and solute migration in the basin under changing environment, and evaluate and predict their effects are hotspots for water security research. (3) Strengthening monitoring, promoting data sharing and improving the models of coupling simulation of water quantity and quality are necessary for water resources research. (4) The upper Yongding River basin has a large drainage area and spans five different provinces. How to plan and promote the comprehensive river basin management is still a key issue which needs to be solved urgently.

Key words: climate change; land use change; evapotranspiration; surface runoff; water quality; non-point source pollution

(上接第 644 页)

large-scale climate factors on the dryness/wetness fields in Luanhe River basin, the resonant period and phase relationship between large-scale climate factors and PC_1 and PC_2 in time-frequency domain are evaluated by cross wavelet transform. The two typical modes of dryness/wetness changes in Luanhe River basin are closely related to Nina 3.4 and SOI (Southern Oscillation Index), and they have similar 1.5-6.0-year period but opposite correlation to the dryness/wetness fields. The influence of AO (Arctic Oscillation) and NAO (North Atlantic Oscillation) on the dryness/wetness fields is general, which is mainly reflected in the phase relationship of 2-4 year period.

Conclusions (1) The dryness/wetness conditions of the Luanhe River basin experienced abrupt changes in 1989. Before the abrupt change, the basin was relatively humid, and drought and flood events occurred alternately; after the abrupt change, the drought trend in the basin is further strengthened, and interannual drought events occurred frequently; (2) The dryness/wetness evolution of the Luanhe River basin showed two modes: the same type of dryness/wetness in the whole area and the reverse type of upstream and downstream in the basin, with a cumulative contribution rate of 72.3%. The dryness/wetness field of the river basin was of the same type of dryness/wetness in the whole area. The trends of the time variables of the two modalities show that the degree of drought in the basin has an increasing trend; the two time variables have a similar time-frequency structure, and both have a 1.5 to 4.0 year main cycle; (3) Nina 3.4 and SOI, which characterize ENSO (El Niño/Southern Oscillation) events, and the two modes both have a period of 1.5 to 6.0 years; ENSO has the most significant impact on the spatial and temporal distribution of dryness and wetness in the Luanhe River basin, followed by AO and NAO, which are related to the weakest AMO and PDO; the impact of the six climatic factors on the basin's dryness/wetness fields is mainly reflected in changing the basin's dryness/wetness consistency

Key words: standardized precipitation index; empirical orthogonal function (EOF); wavelet transform; dryness/wetness variations; large scale climate factors