

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.03.002

基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析

王卫光^{1,2}, 黄茵^{1,2}, 邢万秋^{1,2}, 魏佳^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于海河流域 31 个气象站 1961—2017 年逐日气象资料、美国国家环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)再分析数据集, 计算了多时间尺度标准化降水蒸散指数(SPEI), 分析了海河流域 1961—2017 年干旱时空演变特征, 并结合流域夏季 500 hPa 等位势高度场分析了流域干旱演变特征的环流成因。结果表明: 1961—2017 年海河流域有轻微干旱趋势, 且长历时干旱主要集中于 1980—2017 年, 但干旱强度呈减弱趋势, 春末(5、6 月)湿润化趋势显著, 夏季(7、8 月)干旱化趋势显著; 空间分布上, 海河流域内 57.4% 的区域呈现干旱化趋势, 19.0% 的区域呈现干旱减弱趋势, 全流域夏季呈显著干旱化趋势; 蒙古高压增强、西太平洋副热带高压西移、南扩以及增强的环流特征不利于水汽输送及降水形成, 高压系统的增强和水汽输送的减少是流域夏季干旱化趋势的原因之一。

关键词: 标准化降水蒸散指数; 干旱; 大气环流; 海河流域

中图分类号: TV125; P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2020)03-0008-06

Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI // WANG Weiguang^{1,2}, HUANG Yin^{1,2}, XING Wanqiu^{1,2}, WEI Jia^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the daily meteorological data of 31 meteorological stations in Haihe River Basin from 1961 to 2017 and reanalysis data set of NCEP and NCAR, the multi time scale standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) is calculated, and the temporal and spatial evolution characteristics of drought in Haihe River Basin from 1961 to 2017 are analyzed. Combined with the 500 hPa geopotential height field in summer, the circulation causes of the characteristics of the basin drought evolution are analyzed. The results show that there is a slight drought trend in the Haihe River Basin from 1961 to 2017, and the long-term drought is mainly concentrated in 1980—2017, but the drought intensity is weakening, and there is a significant wetting trend at the end of spring (May and June), and a significant drought trend in summer (July and August). In terms of spatial distribution, 57.4% of the area in Haihe River Basin shows a drought tendency, 19.0% of the area shows a trend of drought weakening, and the whole basin shows a significant drought tendency in summer. The intensified of the Mongolian high, the westward movement and southward expansion of the Western Pacific subtropical high and the enhanced circulation characteristics are not conducive to water vapor transport and precipitation formation. The enhancement of high pressure system and the decrease of water vapor transport are the main reasons for the trend of summer drought trend in the basin.

Key words: standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); drought; atmospheric circulation; Haihe River Basin

近年来,随着气候变化和经济发展,干旱逐渐成为对人类社会造成巨大损失的自然灾害之一^[1-2]。在全球变暖的影响下,干旱频率和强度均显著增大,

极端和严重干旱灾害自 20 世纪 90 年代后日益严重^[3]。20 世纪 70 年代后期以来,我国华北和东北地区的持续干旱不仅困扰我国农业生产,而且严重

基金项目:国家自然科学基金(51779073);江苏省杰出青年基金(BK20180021)

作者简介:王卫光(1979—),男,教授,博士,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail: wangweiguang2016@126.com

制约了我国经济发展^[4-5]。由于干旱导致的大规模损失,针对干旱演变及其成因的研究在水文学科中的地位日益上升。

目前在干旱评估、干旱监测及其量化研究方面,众多学者提出了多种干旱指数,这些指数大体上分为两类,一类是仅基于降水的单一指数,如标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)^[6];另一类是基于降水以及其他气象要素(如水量平衡)的综合指数,如帕默尔指数(Palmer drought severity index, PDSI)^[7]。由于 SPI 仅基于降水变异性大大高于气温和潜在蒸散发等变量的假设,没有考虑水分的支出,在全球变暖的气候情景下适用性不广;PDSI 的局限性在于其参数对不同区域的敏感性较高,且计算方案中土壤湿度的取值在观测资料缺乏地区存在较大的不确定性,这在一定程度上限制了 PDSI 在区域干湿变化研究中的应用。考虑到以上两大类干旱指数的弊端,2010 年 Vicente-Serrano 等^[8]提出了标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI),SPEI 既考虑了水量平衡,并且具有多尺度、计算简便等优点,在干旱评估研究中具有更加明显的优势,便于在资料较少的情况下,对地区干湿变化进行分析,可根据 SPEI 不同尺度对不同需水情况的干旱进行分析^[8-10]。

海河流域(34°N~43°N、112°E~120°E)地处温带半湿润、半干旱大陆性季风气候带^[11],由于气候及流域地形因素影响,该流域具有降水量区域性差异大、年际变化率大、潜在蒸散发量大等半干旱气候特征。近年来,海河流域旱涝灾害频发,已严重影响了地区经济发展,该地区的干旱演变问题也引起了广泛关注。本文利用海河流域气象资料计算 1961—2017 年的 SPEI,分析海河流域的干旱演变特征和发生规律,并通过典型干旱趋势时期的 500 hPa 等位势高度场变化探讨大气环流变化对海河流域干旱变化的作用。

1 研究数据

气象数据来源于中国气象数据共享服务中心(<http://cdc.nmic.cn/>)提供的地面气候资料日值数据集,包含逐日降水、最高温度、最低温度、风速、光照时数、相对湿度、气压等数据。本文共选取海河流域内部 31 个气象站(图 1)1961—2017 年的气象数据,缺失值采用相邻日期的数据插值得到。

大气环流分析采用来自美国气象环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)再分析数据集的 500 hPa 等位势高度格点数据,精度为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

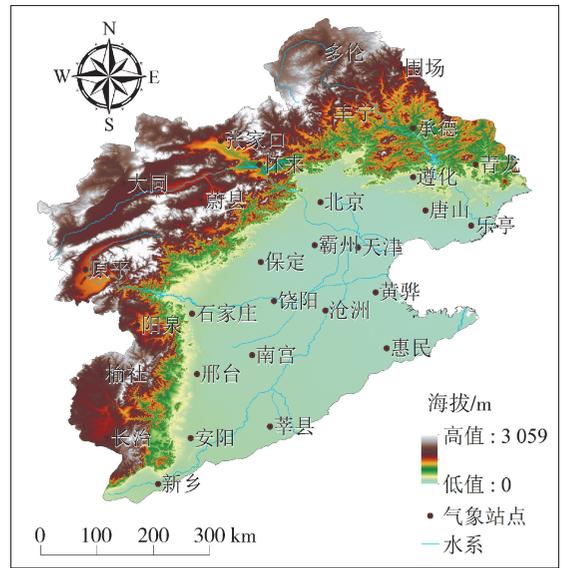


图 1 海河流域地形及气象站点分布

Fig. 1 Topography and meteorological station distribution in Haihe River Basin

2 研究方法

2.1 SPEI

SPEI 以 SPI 为基础,以降水与潜在蒸散发的差值作为输入量,采用 Log-Logistic 分布拟合其经验频率,将累计概率值序列进行正态标准化得到。SPEI 考虑了除降水外的其他气象要素,具有多时间尺度的特征,可以考虑不同类型的干旱。如 1 月尺度 SPEI(SPEI-1)可反映月尺度上的旱涝发生情况;3 月尺度 SPEI(SPEI-3)可反映季节的干湿情况,更长时间尺度的 SPEI 可反映干湿情况的持续状况,春夏秋冬四季干旱情况分别由 5 月、8 月、11 月和次年 2 月的 SPEI-3 表示;年尺度干旱情况由每年 12 月的 12 月尺度 SPEI(SPEI-12)表示。计算 SPEI 的过程中,首先计算逐月潜在蒸散量,本文采用国际粮农组织(FAO)建议的 Penman-Monteith 公式^[12]进行日潜在蒸散量 ET_p 的计算:

$$ET_p = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: R_n 为地表净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; G 为土壤热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; t 为平均气温, $^{\circ}\text{C}$; u_2 为 2 m 处的风速, m/s ; e_s 为饱和水气压, kPa ; e_a 为实际水气压, kPa ; Δ 为饱和水气压曲线斜率, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$; γ 为干湿表常数, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ 。

根据逐日潜在蒸散量累加计算逐月潜在蒸散量,并计算得出逐月降水量与潜在蒸散发的差值 D_i :

$$D_i = P_i - ET_{pi} \quad (2)$$

式中: P_i 为月降水量, mm; ET_{pi} 为月潜在蒸散发量, mm。

采用 Log-Logistic 分布对 D_i 进行拟合, 然后对其累积概率值进行标准化, 最终可得到不同时间尺度的 SPEI。根据 Vicente-Serrano 提出 SPEI 时定义的干湿等级标准划分流域干湿等级^[8]。

2.2 趋势及突变分析

对海河流域 1961—2017 年 SPEI 时间序列采用 Man-Kendall (M-K) 无参数检验进行趋势分析。M-K 检验适用于水文、气象数据且计算简便, 通常用于检验序列的趋势性^[13], 假设时间序列数据 $\{X_t\}$ ($t=1, 2, \dots, n$) 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本, 定义统计量 S 为

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j) \quad (3)$$

式中 $\text{sign}()$ 为符号函数, 当 $X_i - X_j$ 小于、等于或大于 0 时, 分别为 -1 、0 或 1。根据统计量 S 的取值范围计算趋势 Z 值, 计算公式为

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

当 $|Z| \geq Z_{0.05} = 1.96$ 时, 表明该序列趋势显著, 置信度为 95%; 当 $|Z| \geq Z_{0.10} = 1.64$ 时, 表明该序列趋势较为显著, 置信度为 90%; Z 为其余值时表示该序列趋势不显著。

3 结果与分析

3.1 多尺度 SPEI 时间序列变化

海河流域 1961—2017 年 SPEI-1、SPEI-3、SPEI-12 时间序列如图 2 所示, 短时间尺度下, SPEI 波动频繁, 表示流域短时段内呈现干湿频繁交替特征, 且无明显趋势; 随着时间尺度增大, SPEI 波动明显减小, 且干旱历时增加。短时间尺度中, SPEI 对降水、气温及日照时长等气象因子的变化反应都较为敏感^[14], 且强降水将导致较大水分收支差值波动, 因此呈现出频繁的干湿交替变化, 而时间尺度增长后, 短时段内的强降水无法决定流域的干湿程度, 此时 SPEI 能够更好反映累积降水与潜在蒸散发差值变化, 体现出流域干旱的长期演变特征。

综合 SPEI-1、SPEI-3 及 SPEI-12 时间序列, 海河流域在 1963—1965 年经历了强度最大的湿润和干旱事件, 分别在 1976 年、1990 年、1995 年和 2003 年左右发生了较长时间的湿润事件, 在 1980 年和 2000 年左右发生了历时极长的干旱事件。SPEI-12

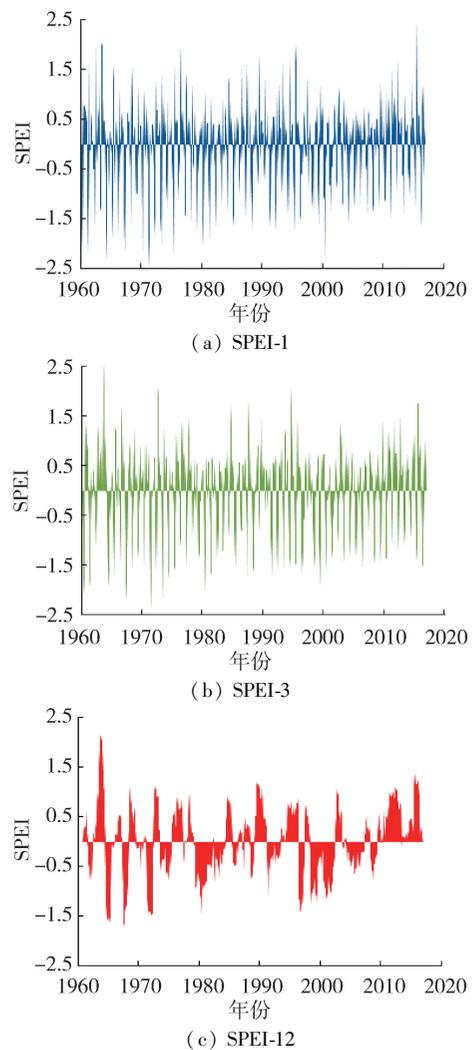


图 2 海河流域 1961—2017 年 SPEI-1、SPEI-3 和 SPEI-12 时间序列

Fig. 2 SPEI-1, -3 and -12 time series in Haihe River Basin from 1961 to 2017

时间序列中, 干旱在 20 世纪 80 年代后发生频次明显增多且分布较为集中, 1980 年 4 月至 1985 年 4 月连续 60 个月, SPEI-12 均为负值, 其中 22 次轻微干旱, 2 次中度干旱, 1 次特别干旱; 1999 年 5 月至 2003 年 6 月连续 50 个月, SPEI-12 均为负值, 其中 27 次轻微干旱, 7 次中度干旱, 与前一时段长历时干旱相比, 此次干旱中未出现重度干旱, 但中度干旱与轻度干旱的频次明显增加。

3.2 长尺度干旱的时空分布特征

1961—2017 年海河流域年际干旱情况如图 3 所示, 共有 10 年发生干旱 (SPEI 小于 -0.5), 其中 6 年为轻度干旱, 均发生于 1980 年后; 另 4 年为中度干旱, 其中 3 次发生于 1965—1973 年。10 年干旱中有 70% 发生于 1980 年后, 但强度基本低于 1980 年前发生的干旱。海河流域 1961—2017 年水量收支缺失呈上升趋势, 流域内干旱强度均呈减小趋势, 干旱频率呈增长趋势。

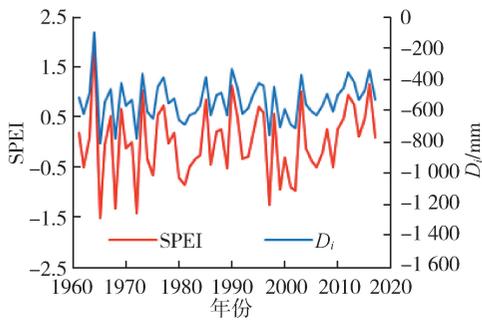


图3 海河流域1961—2017年年际SPEI与年际 D_i
Fig. 3 Annual SPEI and D_i of Haihe River Basin from 1961 to 2017

对流域内31个气象站点的SPEI-12序列进行M-K检验,将趋势检验结果在空间上进行反距离权重插值,得到的空间栅格数据如图4所示(图中M-K趋势检验值为负值表示SPEI值有减小趋势,干旱程度加重;正值表示SPEI值有增大趋势,湿润程度增加)。流域内57.4%的地区呈现显著干旱加重趋势(通过置信度为90%的显著性检验),主要分布于流域西南、东部地区以及流域北部。流域内19.0%的区域呈现较为显著干旱减弱趋势(通过置信度为90%的显著性检验),位于流域南部平原及流域北部的个别地区。综上,1961—2017年流域大部分地区呈现干旱加重趋势,以流域西南部地区和东北平原地区最为明显,流域内干旱减弱的区域较少,集中于南部。

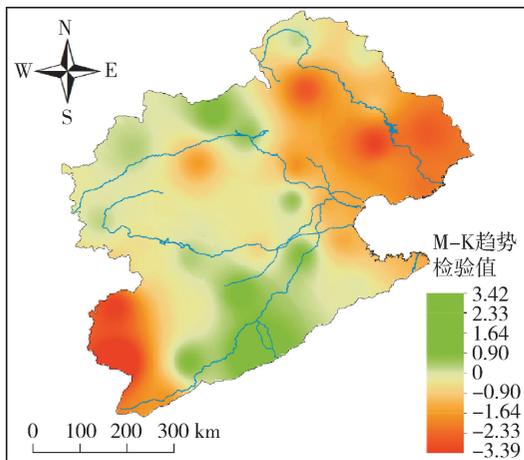


图4 海河流域1961—2017年SPEI-12趋势空间分布
Fig. 4 SPEI-12 trend spatial distribution of Haihe River Basin from 1961 to 2017

3.3 短尺度干旱的时空分布特征

海河流域降水具有季节性特征,且春季降水偏少,常有春旱发生^[15],为分析流域季尺度的旱涝时空演变情况,依据SPEI的多时间尺度特征采用5月、8月、11月和次年2月的SPEI-3值分别代表春、夏、秋、冬四季干旱情况,图5为海河流域1961—

2017年季节干旱变化及其线性趋势。1961—2017年,春季和秋季SPEI呈现线性上升趋势,且经检验流域春季、秋季SPEI的M-K趋势检验值分别为2.94和3.23,呈现显著上升趋势,表明春季和秋季海河流域整体以湿润化趋势为主,但在1980年和2000年左右春季SPEI出现了明显下降,2001年发生了重度干旱(SPEI值低于-1.5)。夏季SPEI呈现梯度为0.65%/a的线性下降趋势,且经检验夏季SPEI的M-K趋势检验值为-1.72,呈显著下降趋势,表明夏季流域整体以干旱加重趋势为主。冬季SPEI序列未被检验出显著变化趋势,但其线性梯度为正值,表明冬旱呈不明显减轻的趋势;冬季SPEI序列的振幅较小,无明显干湿交替现象。春季、秋季干旱减弱以及夏季干旱的增强与前人的研究结果基本相同^[16-17],表明SPEI能较好地表征流域干湿变化特征。

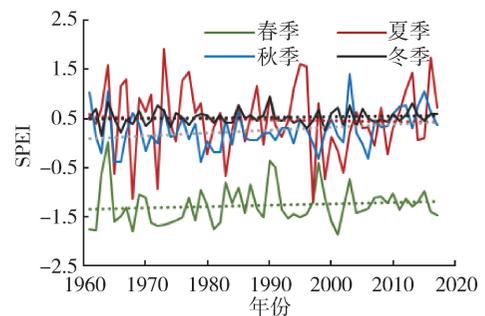


图5 海河流域1961—2017年季节干旱变化
Fig. 5 Seasonal drought changes in Haihe River Basin from 1961 to 2017

从月尺度干旱变化趋势(图6)可看出,月干旱变化趋势的时间分布与季节干旱趋势相符,大部分地区SPEI下降趋势显著的月份主要集中在夏季7月和8月,即大陆性季风气候降水集中的月份^[11];流域部分地区3月SPEI呈现显著下降趋势。5月和6月流域内75%的地区SPEI呈现显著上升趋势,该时期为春末夏初,此时段内降水相较于初春大幅度增加,是导致湿润化明显的主要原因;此外流域

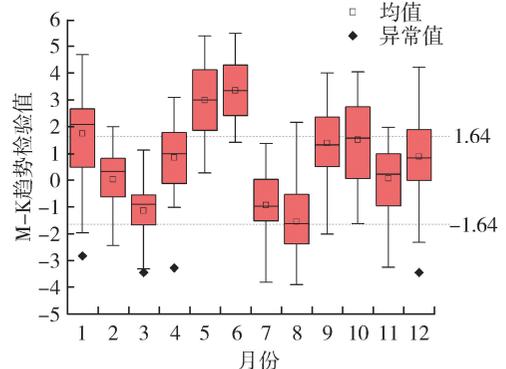


图6 海河流域1961—2017年各月干旱变化趋势
Fig. 6 Change trend of monthly drought in Haihe River Basin from 1961 to 2017

1、9、10月也有部分地区 SPEI 呈现显著增大趋势。

总之,在月、季尺度下,夏季全流域呈现干旱加重趋势,尤其是7、8月的干旱加重趋势显著;春季全流域呈现湿润化趋势,春末时期湿润化趋势显著。

3.4 干旱趋势环流成因

海河流域在降水量相对较多的夏季出现了干旱加重的趋势,而大气环流异常是形成气候变化引起干湿变化的直接原因,图7为夏季 $20^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $90^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$ 范围内500 hPa的等位势高度距平。在高纬度地区,1961—1980年以贝加尔湖和蒙古高原为中心的上空,500 hPa等位势高度距平发生了负距平到正距平的变化,而1991—2017年海河流域至乌拉尔山一带都维持正等位势高度距平,正等位势高度距平异的持续会导致高纬度和低纬度异常环流系统相互作用,削弱东亚夏季风输送的水汽,导致高温无雨,降水异常偏少。等位势高度正距平的增强将导致蒙古高压加强,加强的高压区将阻隔北部冷空气团南移,不利于海河流域夏季降水形成。除中高纬度地区蒙古高压的影响,低纬度地区的西太平洋副热带高压是对海河流域夏季降水有显著影响的环流系统^[18]。从图7可看出,1961—2017年西太平洋副热带高压系统(以5880 gpm位置及范围为代表)具有明显的位置西移、范围向南扩张且强度增加的特征,不利于来自印度洋及西太平洋的夏季风水汽输送。夏季风是亚洲水汽输送的主要渠道,是中国旱涝气候的重要影响系统,且东亚夏季风的水汽输送对华北降水有显著影响^[19],根据对图7的分

析,受高纬度地区正等位势高度距平及低纬度西太平洋副热带高压移动和增强影响,夏季风水汽输送会有减弱现象,而GAO等^[20]研究表明20世纪90年代以来东亚夏季风确实有明显减弱现象。对环流系统分析表明,高压系统的增强和水汽输送的减少是导致海河流域夏季干旱加剧的原因之一。

4 结论

a. 多时间尺度且考虑多气象要素的SPEI可较为真实地反应海河流域干旱的时空变化特征。1961—2017年海河流域有轻微干旱趋势,长历时干旱主要集中于1980—2017年,在年际尺度上,干旱强度呈减弱趋势;在月、季尺度上,夏季干旱呈现明显加重趋势,其中7、8月尤为显著,春末时期(5、6月)干旱呈现明显减弱趋势。

b. 空间变化上,对于年尺度,海河流域大部分地区以干旱化趋势为主,极少数地区呈现湿润化趋势;月尺度上,7、8月大部分地区呈现干旱加剧趋势,5、6月海河流域整体呈现干旱减弱趋势。流域内57.4%的地区呈现干旱显著加重趋势,19.0%的区域呈现干旱较为显著减弱趋势。

c. 1961—2017年蒙古高压增强、西太平洋副热带高压西移、南扩以及增强的环流特征不利于水汽输送及降水形成,高压系统增强导致来自印度洋及太平洋的水汽难以输送至流域,导致降水减少,高压系统的增强和水汽输送的减少是该区域夏季干旱化趋势的原因之一。

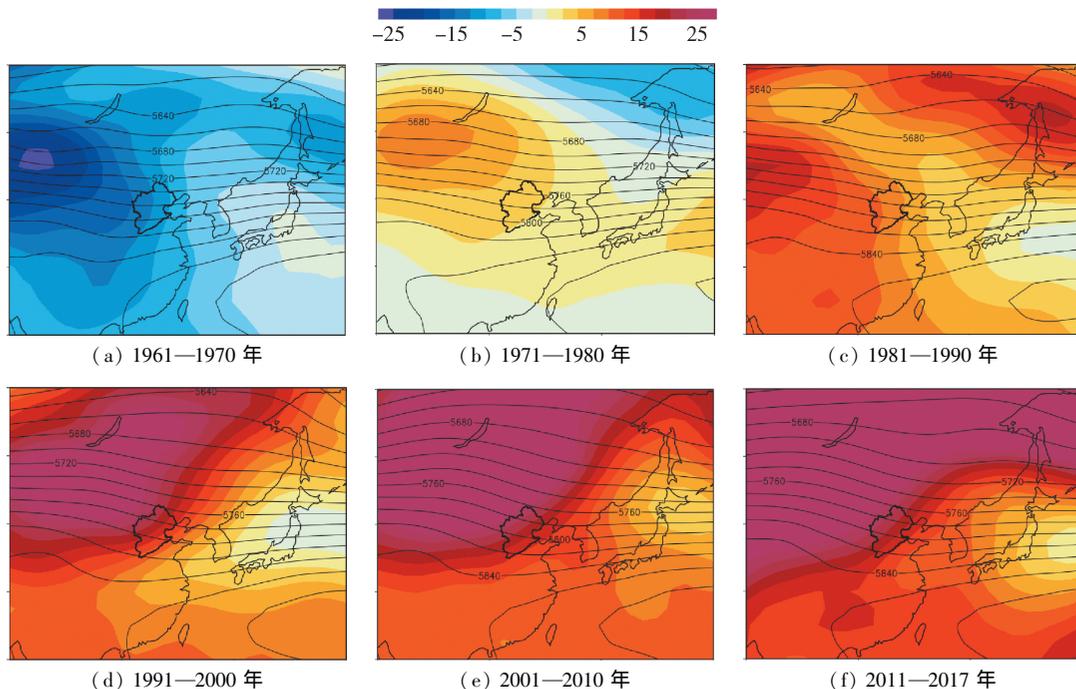


图7 海河流域1961—2017年500 hPa夏季等位势高度距平(单位:gpm)

Fig.7 Summer equipotential height anomaly of 500 hPa in Haihe River Basin from 1961 to 2017(unit: gpm)

参考文献:

- [1] DAI A. Recent climatology variability and trends in global surface humidity[J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(15): 3589-3606.
- [2] MONTASERI M, AMIRATAEE B. Comprehensive stochastic assessment of meteorological drought indices [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37:998-1013.
- [3] 符淙斌, 安芷生. 我国北方干旱化研究: 面向国家需求的全球变化科学问题[J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 271-275. (FU Congbin, AN Zhisheng. Study of aridification in Northern China: a global change issue facing directly the demand of nation [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 271-275. (in Chinese))
- [4] 李文娟, 覃志豪, 林绿. 农业旱灾对国家粮食安全影响程度的定量分析[J]. *自然灾害学报*, 2010(3): 111-118. (LI Wenjuan, QIN Zhihao, LIN Lü. Quantitative analysis of agro-drought impact on food security in China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2010(3): 111-118. (in Chinese))
- [5] MISHRA A K, SINGH V P. A review 787 of drought concepts[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [6] 杨肖丽, 郑巍斐, 林长清, 等. 基于统计降尺度和 SPI 的黄河流域干旱预测[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(5): 377-383. (YANG Xiaoli, ZHENG Weifei, LIN Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2017, 45(5): 377-383. (in Chinese))
- [7] 张林燕, 郑巍斐, 杨肖丽, 等. 基于 CMIP5 多模式集合和 PDSI 的黄河源区干旱时空特征分析[J]. *水资源保护*, 2019, 35(6): 95-99. (ZHANG Linyan, ZHENG Weifei, YANG Xiaoli, et al. Temporal-spatial characteristics of drought in source region of Yellow River based on CMIP5 multi-mode ensemble and PDSI [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(6): 95-99. (in Chinese))
- [8] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERIA S, LOPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 1696-1718.
- [9] 冯怡, 薛联青, 张敏, 等. 基于两种 SPEI 序列的淮河流域干湿特征变化[J]. *水资源保护*, 2019, 35(1): 35-40. (FENG Yi, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Change of dry-wet characteristics in Huaihe River Basin based on two SPEI sequences [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(1): 35-40. (in Chinese))
- [10] 粟晓玲, 梁箜. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. *水资源保护*, 2019, 35(4): 17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(4): 17-23. (in Chinese))
- [11] 张金堂, 乔光建. 气候变化对海河流域降水量影响机理分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(3): 77-87. (ZHANG Jintang, QIAO Guangjian. Influence mechanism analysis of climate changes on precipitation of the Haihe River Basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7(3): 77-87. (in Chinese))
- [12] WANG W, XING W, SHAO Q. How large are uncertainties in future projection of reference evapotranspiration through different approaches? [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 696-700.
- [13] WANG W, SHAO Q, PENG S, et al. Spatial and temporal characteristics of changes in precipitation during 1957-2007 in the Haihe River basin, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, 25(7): 881-895.
- [14] POTOP V, MOZNY M, SOUKUP J. Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 156: 121-133.
- [15] XING W, WANG W, SHAO Q, et al. Changes of reference evapotranspiration in the Haihe River Basin: present observations and future projection from climatic variables through multi-model ensemble [J]. *Global and Planet Change*, 2014, 115: 1-15.
- [16] YIN J, YAN D H, YANG Z Y, et al. Research on response of drought events in mountain area of Haihe River Basin based on multi-source data [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 955-959: 3026-3031.
- [17] WANG Y, LI J, FENG P, et al. A time-dependent drought index for non-stationary precipitation series [J]. *Water Resource Management*, 2015, 29(15): 5631-5647.
- [18] 钱代丽, 管兆勇, 王黎娟. 近 57 a 夏季西太平洋副高面积的年代际振荡及其与中国降水的联系[J]. *大气科学学报*, 2009, 32(5): 85-93. (QIAN Daili, GUAN Zhaoyong, WANG Lijuan. Interdecadal variations of west pacific subtropical high area and changes in summer precipitation over china in boreal summer during the last 57 years [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2009, 32(5): 677-685. (in Chinese))
- [19] DING Y, WANG Z, SUN Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. (Part I): observed evidences [J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 28(9): 1139-1161.
- [20] GAO T, WANG H. Trends in precipitation extremes over the Yellow River basin in North China: changing properties and causes [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31: 2412-2428.

(收稿日期: 2019-11-01 编辑: 熊水斌)