

DOI: 10.5846/stxb201311272825

张玉静,王春乙,张继权.基于 *SPEI* 指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析.生态学报,2015,35(21): - .

Zhang Y J, Wang C Y, Zhang J Q. Analysis of the Spatial and Temporal Characteristics of Drought in the North China Plain Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): - .

基于 *SPEI* 指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析

张玉静¹, 王春乙^{1,*}, 张继权²

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081

² 东北师范大学城市与环境科学学院/自然灾害研究所, 长春 130024

摘要: 气候变化的背景下, 华北地区干旱化趋势不断加剧。本研究利用华北冬麦区 45 个气象站 1961—2010 逐月温度与降水数据, 选取标准化降水蒸散指数 *SPEI* (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) 作为区域干旱指数进行华北冬麦区近 50 年干旱时空特征分析。研究表明: (1) 近 50 年来华北地区平均温度明显上升, 研究区整体呈现干旱化加剧趋势。华北地区平均 *SPEI* 指数对于典型干旱年份的表征准确, 与历史资料相符合。(2) 华北不同区域之间增温率不同, 导致干旱化趋势存在差异。通过对典型站点的分析, 发现增温率越大的区域干旱化趋势越严重。(3) 不同等级干旱发生的站次比能够较好地反映不同年型干旱的发生特点。对 *SPEI* 指数矩阵的 EOF 分析结果显示华北地区典型的干旱时空分布特征, 第一模态呈现全区旱涝变化一致型的分布形式, 高值区包括山东西部、河南北部、河北南部地区, 表明这些地区对干旱的反应最为敏感。时间系数序列未显示出明显的变化趋势; 第二模态呈现南北相反的分布型, 河北及山东的大部分地区空间系数均为正值, 而河南大部分地区为负值。时间系数序列整体呈下降趋势, 表明研究区北部干旱化趋势加剧, 南部干旱化有所缓解; 第三模态呈现东西相反的分布形式, 这种分布特征的变化趋势不明显。

关键词: *SPEI* 指数, 华北地区, 干旱, 时空分布特征, 气候变化

Analysis of the Spatial and Temporal Characteristics of Drought in the North China Plain Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

ZHANG Yujing¹, WANG Chunyi^{1,*}, ZHANG Jiquan²

¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

² College of Urban and Environmental Sciences/Natural Disaster Research Institute, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

Abstract: The North China Plain is one of the most severely drought affected areas in China, with global warming intensifying aridification in this alluvial plain. Drought may be attributed to multiple factors, among which precipitation and temperature are the most important. It is widely recognized that the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (*SPEI*) is advantageous for both spatial-and temporal-scale characteristic assessments; thus, it is a better index for evaluating the evolution of drought in the North China Plain due to climate change than other drought indices, such as the Palmer Drought Severity Index (*PDSI*), Standardized Precipitation Index (*SPI*), and *Z* index. In this study, monthly mean precipitation and temperature data from 45 meteorological stations in the North China Plain were used to calculate the *SPEI* index and investigate the spatial and temporal characteristics of drought in the North China Plain from 1961 to 2010. The analysis produced the following results. First, during the last 5 decades, a significant increase in temperature and a slight decrease in precipitation occurred in the North China Plain, resulting in a general aridification trend throughout the region. The drought time series in the North China Plain may be characterized from the analysis based on the *SPEI* index,

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2011BAD32B00-04)

收稿日期: 2013-11-27; 网络出版日期: 2015-04-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wcy@cms1924.org

and was consistent with existing publications. Second, a noticeable warming tendency with a mean warming rate that exceeds the national average level occurred in North China. Diverse aridification tendencies characterized the North China Plain because of variable warming rates. An analysis of typical stations showed that the more noticeable the warming, the deeper the intensity of aridification. Third, the drought feature may be well formulated using the ratio of weather stations with different drought intensities. Empirical orthogonal function (EOF) analysis was conducted based on a 12-month-scale *SPEI* index of the 45 meteorological stations from 1962 to 2010, and the top three eigenvectors were selected to explore the spatial and temporal distribution of drought occurrence in the North China Plain according to their spatial and temporal coefficients. The first mode shows consistency in the entire region, and it is the most important spatial distribution indicator of drought in the North China Plain. High values emerged in the middle of the region, including the western part of Shandong and the northern and southern parts of Henan, demonstrating that these areas are more sensitive to drought. There was no clear tendency in the time coefficient of the first mode. The second mode shows contrasts between the southern and northern parts of the North China Plain, which are consistent with the distribution of warming rate. The time coefficients show that drought in the northern part of the plain has been aggravated, whereas drought in the southern part has been alleviated, which may be due to differences in the warming rates throughout the research region. Warming rates in the northern part of the North China Plain are higher, so the aridification tendency is far more severe than that in the southern part of the North China Plain. The third mode contrasts the tendency between the eastern and western parts of the North China Plain, showing no significant tendency in the time coefficient.

Key Words: *SPEI* index, North China Plain, Drought, Spatial and temporal characteristics, Climate change

干旱是影响我国华北地区农业生产和经济发展最严重的气象灾害。近 50 年来,在全球变暖的背景下,华北地区蒸散量增加^[1],干旱面积不断扩大^[2]。研究表明,降水减少和温度升高是导致华北地区干旱化程度加剧的主要原因^[3]。在实际研究当中,由于干旱形成原因和影响因素的不同,导致干旱指数的选取无法统一,大大降低了区域干旱程度的可比性。目前国际上常用的帕默尔指数 *PDSI* (Palmer drought severity index) 可以较好的监测区域干旱程度^[4],并且对温度的响应比较灵敏。但是 *PDSI* 指数仍然存在一定的局限性,比如计算过程中需要确定干旱和湿润期的起止时间、时间尺度单一、参数难以区域化推广以及对土壤干旱的反映不够灵敏等^[5-6]。标准化降水指数 *SPI* (Standardized Precipitation Index) 也是气象上常用的干旱指数^[7-9]。*SPI* 具有多时间和多空间尺度的特性,能够进行区域间干旱状况的比较,但是它无法反映温度对干旱趋势变化的影响。在分析了二者优缺点的基础上,Vicente-serrano 等提出了一个新的干旱指数——标准化降水蒸散指数(*SPEI*)。*SPEI* 集合了以上两个指数的优点,既融合了降水和温度对于区域干旱的影响,同时具有多时间和多空间尺度的特性,因此可以对某一区域旱涝分布情况进行分析。*SPEI* 指数不仅考虑了与干旱直接相关的降水条件的影响,同时也考虑了温度波动对干旱程度的影响,这样比单纯考虑降水的 *SPI* 指数、*Z* 指数及降水距平指数等对干旱的反映具有更强的实际意义。*SPEI* 指数计算方便,需要的气象数据容易获得,不需要像气象业务上常用的 *PDSI* 指数和 *CWDI* (Crop Water Deficiency Index) 指数一样需要大量的经验参数输入和模型运算。同时构建了简单的降水蒸散模型,增强了指标的机理性,消除了地域、植被、地形等差异对指标的影响,因此非常适合全球变暖背景下区域干旱变化趋势的监测。已有学者将 *SPEI* 指数应用到我国部分区域干旱研究中^[10-12],但是在华北地区的应用还未曾见到。华北地区是我国受干旱威胁最严重的地区之一,因此将 *SPEI* 指数应用到华北地区的干旱评估中有利于系统地了解区域旱涝演变趋势,这对于保障华北地区粮食安全生产和经济平稳发展具有重要意义。

1 资料与方法

1.1 研究区与数据

研究区位于 110°E—123°E, 31°N—43°N, 包括北京、天津、河北、山东以及河南五省市有冬小麦种植的区域。

域(图 1)。本研究采用的气象数据为研究区资料记载完备的 45 个气象站点(其中北京和天津各一个站,河北 8 个站,山东 17 个站,河南 18 个站),1961—2010 年逐月降水量与月平均气温数据。

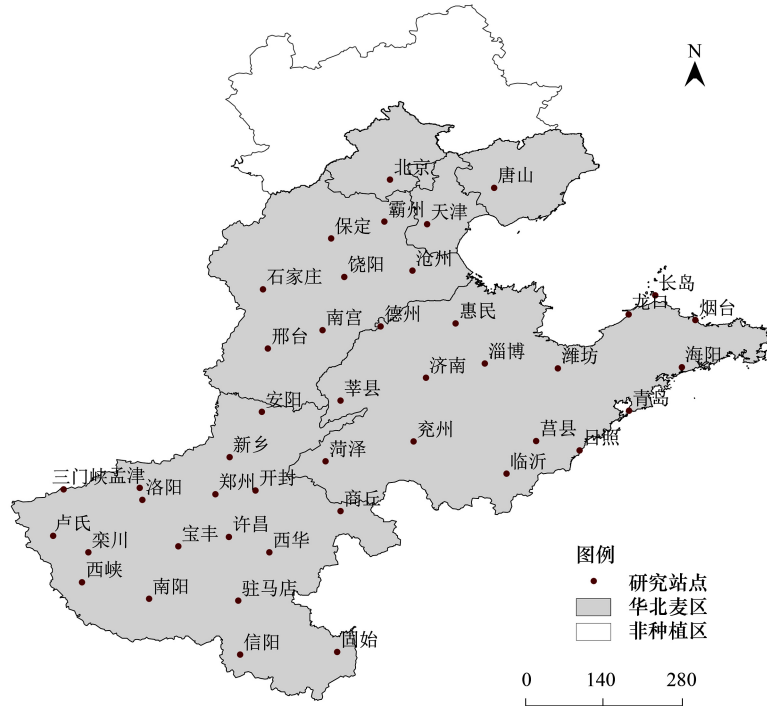


图 1 研究区域范围和站点分布图

Fig. 1 Study area and distribution of stations

1.2 研究方法

1.2.1 SPEI 指数构建方法

标准化降水蒸散指数(SPEI)是 Vicente-Serrano 等提出的气候干旱指数。SPEI 指数计算比较简便,要求的输入资料少。计算步骤如下^[6]:

第一步,计算逐月潜在蒸散量。采用 Thornthwaite 方法:

$$PET = 16K \left(\frac{10T_i}{H} \right)^a \quad (1)$$

式中 T_i 为月平均气温, I 为年总加热指数,由 12 个月的月平均加热指数 h_i 累加得到:

$$H = \sum_{i=1}^{12} h_i \quad (2)$$

其中:

$$h_i = \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514} \quad (3)$$

a 是一个由 H 决定的系数:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} H^3 - 7.71 \times 10^{-5} H^2 + 1.79 \times 10^{-2} H + 0.492 \quad (4)$$

K 由纬度和月份序数决定,

$$K = \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{NDM}{30} \right) \quad (5)$$

其中 N 为最大日照时数, NDM 为每月的天数。

第二步,计算逐月降水量与蒸散量的差额:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (6)$$

D_i 是计算的时间尺度内降水与蒸散差额的累计值, $D_{i,j}^k$ 为第 i 年第 j 个月开始, k 个月内的累积降水蒸散差额。

$$\begin{cases} D_{i,j}^k = \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^j D_{i,l} & j < k \\ D_{i,j}^k = \sum_{l=j-k+1}^j D_{i,l} & j \geq k \end{cases}$$

第三步, 对 D_i 数据序列进行拟合。研究发现, 三参数的 log-logistic 概率分布函数的拟合效果最好。

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (7)$$

其中参数 α, β, γ 可以采用线性矩 (L-moment) 方法拟合获得:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \\ \alpha &= \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)} \\ \gamma &= w_0 - \alpha\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta) \end{aligned}$$

$\Gamma(\beta)$ 是关于 β 的 Gamma 函数。由此可以得到 D_i 的概率密度的累积概率密度函数:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (8)$$

第四步, 对累积概率密度进行正态标准化。超过某个 D_i 值的概率为 $P = 1 - F(x)$, 概率加权矩 $w = \sqrt{-2\ln(P)}$ 。

$$\text{当 } P \leq 0.5 \text{ 时, } SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (9)$$

$$\text{当 } P > 0.5 \text{ 时, } P = 1 - P, SPEI = -\left(\frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \right)$$

式中常数 $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$ 。SPEI 是一个标准化的变量, 其平均值为 0, 标准差为 1, SPEI 等于 0 的点对应 D 序列 log-logistic 概率分布累积概率达到 50%。

表 1 给出了国际上通用的基于 SPEI 指数的干旱等级划分标准, 利用该标准, 即可以确定站点在某一年发生干旱的程度。

表 1 标准化降水蒸散指数 (SPEI) 对应的干旱等级划分

Table 1 Drought degrees based on standardized precipitation evapotranspiration (SPEI) index in North China Plain					
干旱等级 Drought degree	无旱 No drought	轻微干旱 Mild drought	中等干旱 Moderate drought	严重干旱 Severe drought	极端干旱 Extreme drought
SPEI 值 SPEI value	$(-0.5, 0]$	$(-1.0, -0.5]$	$(-1.5, -1.0]$	$(-2.0, -1.5]$	$(-\infty, -2.0]$

1.2.2 M-K 检验

对华北地区平均温度和降水时间序列的变化趋势检验可以采用曼-肯德尔 (M-K) 方法^[13]。M-K 法是一种非参数统计检验方法, 其优点是不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 其计算方法如下:

对于具有 n 个样本量的时间序列 x , 构造一秩序列:

$$sk = \sum_{i=1}^k ri, k = 2, 3, \dots, n, \quad (10)$$

其中

$$r_i = \begin{cases} +1, & \text{当 } x_i \geq x_j, \\ 0, & \text{当 } x_i < x_j, \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i。$$

秩序列 s_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计值。

假设时间序列随机独立,定义统计量

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}}, \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

式中 $UF_1 = 0$, $E(s_k)$, $\text{var}(s_k)$ 是累计数 s_k 的均值和方差,

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \\ \text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \end{cases} \quad k = 2, 3, \dots, n。 \quad (12)$$

UF_i 为标准正态分布,给定显著性水平 α ,若 $|UF_i| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。 $UB_k = -UF_k$ ($k = n, n-1, \dots, 1$),如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

1.2.3 EOF 分析方法

对 45 个研究站点近 50 年的 SPEI 指数矩阵进行经验正交分解,可以了解华北冬麦区的干湿分布状况及其变化趋势。经验正交函数(EOF)^[13]在气象资料分析中广泛应用。它没有固定的函数,并且能在有限区域对不规则分布的站点执行快速的展开与收敛,将变量场的信息集中在少数几个模态上,分离出具有一定物理意义的空间结构。对于一个由 m 个台站 n 次观测组成的变量场,通过 EOF 分解,把原变量场 X_{mn} 分解为相互正交的空间函数 V_{mi} 与时间函数 T_{in} 的乘积之和: $X_{mn} = V_{mi} \cdot T_{in}$ 。主成分是按照方差贡献率的大小排列的,代表了要素场几种最基本的分布形式,因此可以用前几个空间函数和对应时间函数的线性组合对原始场做出估计和解释。

2 结果与分析

2.1 近 50 年华北地区增温趋势及其对于干旱化程度的影响

对华北地区近 50 年平均降水和温度进行 M-K 检验(图 2),可以清楚的看到二者随时间的变化趋势。华北地区年平均降水量(图 2.a)自 1964 年以来呈现波动式减少。而华北地区年平均温度(图 2.b)自 1972 年以来有一明显的增暖趋势。1998 年开始这种增暖趋势通过了 95% 的信度检验,后期甚至超过了 99% 的信度水平,表明华北地区年平均气温的上升趋势十分显著。平均温度的 UF 曲线与 UB 曲线相交于 1992 年,可以认为是温度突变开始的时间点。温度的升高将会增大地表蒸散量,而降水的减少会造成降水与蒸散的差额进一步增大,两者综合作用的结果将会加剧华北地区的水分亏缺程度。

从华北地区近 50 年 SPEI 指数的变化情况(图 3)来看,研究区整体呈现干旱化趋势。1960 年代初期, SPEI 以正指数为主,华北平原处于近 50 年最湿润的时期。1960 年代后期主要以干旱为主。1970 年代除个别年份外,华北地区多数年份气候比较湿润。1980 年代 SPEI 指数呈正负交替出现。1990 年代,尤其是 1992 年华北地区平均温度发生突变以来,由于温度上升趋势非常明显, SPEI 指数为负值的年份显著增多,表明华北地区旱象趋于频发。荣艳淑等的研究结果指出的典型干旱年份如 1965 年、1972 年、1986 年、1997 年及 2001 年,以及几个典型干旱时期如 1965—1967 年、1980—1981 年、1991—1992 年、1999—2002 年以及 2006—2007 年在 SPEI 指数时间序列中均得到较好的体现^[14],这反映了 SPEI 指数在华北地区旱涝趋势分析中具有较好的适用性。

IPCC 第四次评估报告中给出近 100 年全球平均气温约上升 0.74°C ^[15],我国近 50 年来平均温度升高

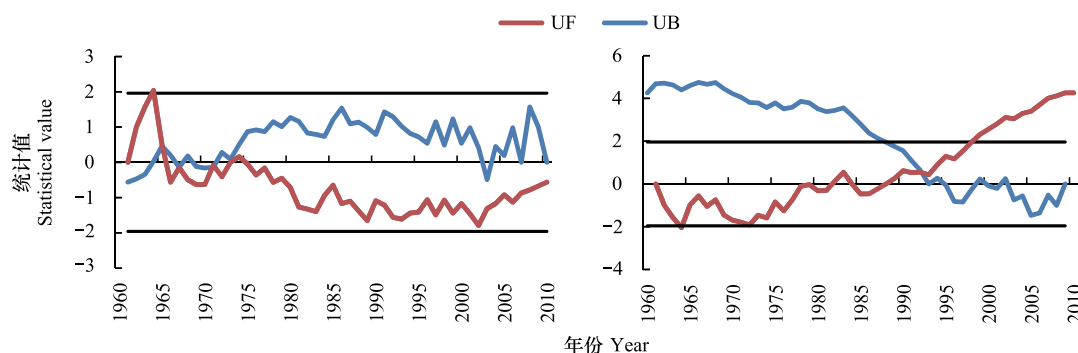


图 2(a) (b) 华北地区平均降水量的 M-K 检验曲线;华北地区平均温度的 M-K 检验曲线

Fig.2(a) (b) M-K test for mean annual precipitation in North China Plain; M-K test for mean annual temperature in North China Plain

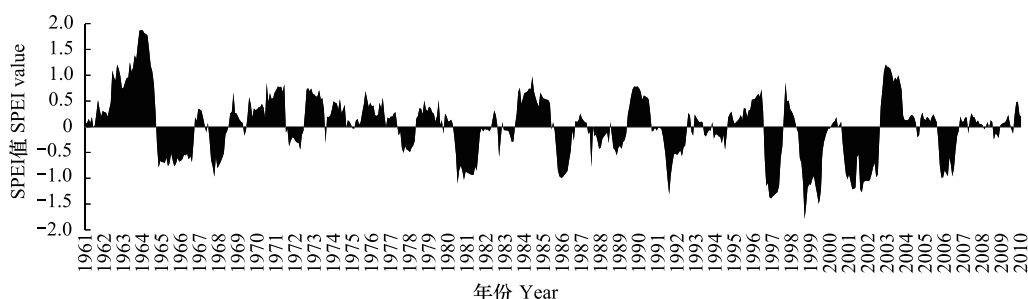


图 3 华北地区 1961—2010 年 SPEI 指数时间序列

Fig.3 Time series of SPEI from 1961 to 2010 in North China Plain

注:标准化降水蒸散指数 SPEI,英文全称为 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

1.1 $^{\circ}\text{C}$, 增温率为 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。我国华北地区明显变暖,且平均增温率超过全国的增温率。如图 4 所示,华北平原的增温率在区域内部存在较大的差异,整体呈现由南向北逐渐升高的趋势。升温率最大的地区位于北京及河北北部,达到 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 以上。另外河北大部分地区,山东东部升温率数值也较大,超过全国平均水平。河南西部地区虽然也有一定程度的变暖,但是升温率很低,在 $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 以下,低于全国平均增温率。研究表明,气候变化造成的温度升高对我国华北地区冬小麦的需水量影响很大^[16],因此华北地区气温升高会加剧华北冬麦区干旱状况。

根据不同地区增温率的差异,分别选取 1961—2010 年保定、临沂、许昌的 12 个月尺度的 SPEI 指数时间序列值进行比较(图 5)。可以明显看出,增温率越大的地区,近 50 年干旱化趋势越明显。增温率较高的保定地区有明显的干旱化趋势,尤其是 2000 年以来持续干旱。临沂增温率界于保定和许昌之间,也表现出了一定的干旱化趋势,但是不如保定明显。许昌的增温率较低,在图中看来并无明显的干旱化趋势,2000 年以后湿润年份反而增多。

2.2 基于 SPEI 指数的华北地区旱涝时空分布特征

将华北地区 1962—2010 年各站点的 SPEI 值按照表 1 中列出的干旱等级标准进行干旱等级划分,将每一年不同等级干旱发生的站点数在一张图(图 6)上表示出来,可以清晰的展示不同年型干旱的发生特点。1964 年是历史上干旱程度最轻的一年,只有 7% 的站点发生干旱,且干旱程度均在中等以下。此外,1971 年、1985 年和 2004 年干旱程度均较轻,发生各等级干旱的累积站点数在 50% 以下,且均未达到重度干旱等级。其余年份发生干旱的站点比例均达到全部站点的 50% 以上,1997 年、1999 年及 2002 年全部站点均发生了不同等级的干旱,而且重度以上等级干旱的比例在 60% 以上。除此以外 1966 年、1968 年、1981 年、1992 年以及 1997—2002 年也发生了非常严重的全域性干旱。其中 1997—2002 年是干旱程度最严重的时期,每年都有 93% 以上的站点发生不同程度的干旱,而且发生极端干旱和严重干旱的站点数占全部站点数的比例均在 40% 以上。

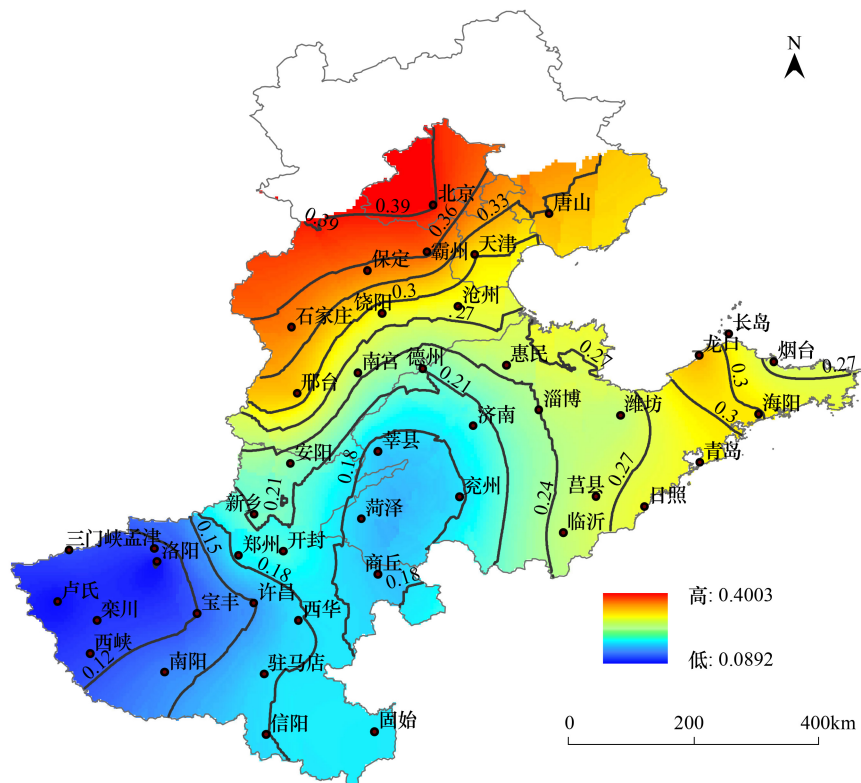


图 4 华北地区增温率空间分布

Fig.4 Distribution of warming rate in North China Plain

注: 标准化降水蒸散指数 SPEI, 英文全称为 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

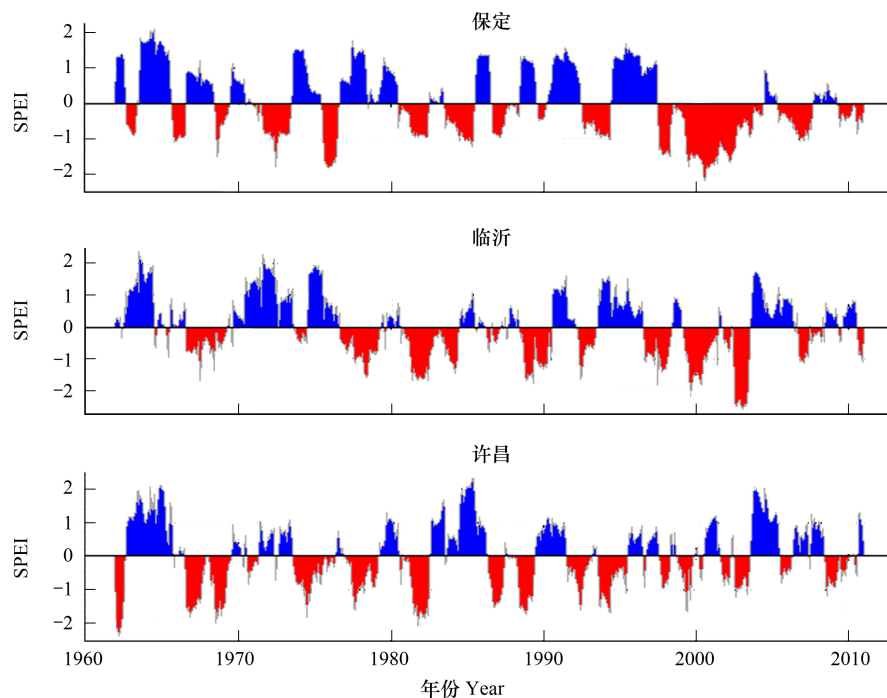


图 5 华北地区不同增温率代表站 SPEI 指数时间序列

Fig.5 Time series of SPEI in three typical stations with different warming rates in North China Plain

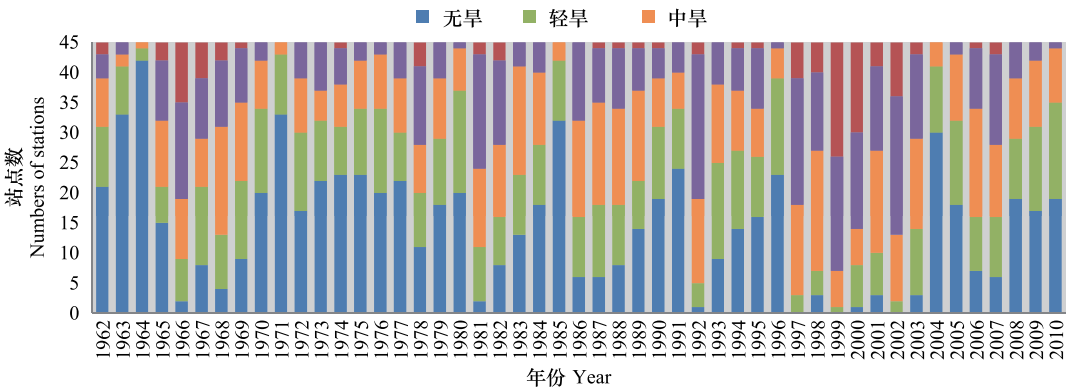


图6 华北地区 1962—2010 年不同等级干旱事件发生站点数
Fig.6 Number of stations that different grades of drought occurred from 1962 to 2010 in North China Plain

对华北冬麦区 45 个气象站点 1961—2010 年的 SPEI 值组成的矩阵进行经验正交分解,得到相互正交的特征向量,代表华北冬麦区相互独立的旱涝空间分布类型。方差贡献率按照从大到小的顺序排列,贡献率越大的特征向量,其模态对应的旱涝分布形式越典型。每一模态的极大值中心就是旱涝变化的敏感中心。时间系数可以作为空间系数的权重,来反映某一年对该种旱涝空间分布的贡献率大小。时间系数的绝对值越大,表示这一年该分布形式越典型。表 2 列出了前三个特征向量对应的方差贡献率。

表 2 华北地区基于 SPEI 指数的 EOF 分析前三个模态方差贡献率

模态 Mode	1	2	3
方差贡献率/% Contribution of variance	40.34	14.06	8.93
累积方差贡献率/% Accumulated contribution of variance	40.34	54.41	63.34

EOF 分析的前三个特征向量方差累积贡献率达到 63.34%,已经可以反映华北地区干旱发生的主要空间分布特征。其中第一特征向量的方差贡献率达到 40.34%,是华北地区干旱分布的最重要形式。第一模态对应的空间系数(图 7.a)均为正值,说明华北地区干旱分布特征具有全区一致性,即全区偏湿或全区偏干。第一模态空间系数的高值中心位于莘县、菏泽、德州、郑州等地,高值区包括山东西部、河南北部、河北南部地区,表示这些地区干旱发生的变率最大,对干旱的反应最为敏感。第一模态对应的时间系数(图 7.b)显示了这种分布特征随时间的变化情况。由于第一模态的空间系数均为正值,那么时间系数为正值的年份二者乘积也为正,表示这一年属于全区偏湿型,典型年份有 1964 年及 2003 年,其中 1964 年为全区偏湿最典型的一年。时间系数为负值的年份表示这一年属于全区偏干型,严重的干旱年份主要出现在 1980 年以后,其典型年份有 1981 年、1986 年、1997 年、1999 年、2001 年、2002 年以及 2006 年。从时间系数来看,这种分布形式并无明显发展趋势。

第二特征向量的方差贡献率为 14.06%,也是华北地区干旱空间分布一个比较重要的形式。第二模态的空间分布(图 8.a)呈现南北相反的格局,空间系数的数值北正南负,主要呈现纬向的分布特征。北部中心在天津、霸州、保定等地,河北及山东的大部分地区空间系数均为正值。而以驻马店、卢氏、南阳等地为中心的河南大部分地区空间系数为负值。在这种分布形式下,华北北部偏干,那么南部就会偏湿,反之亦然。近 50 年里比较典型的北湿南干的年份(图 8.b)有 1966 年、1978 年。北干南湿的年份主要是 1983 年、1989 年、2000 年。由时间系数趋势线可以看到,1980 年代以后,时间系数为负值的年份增多,且时间系数绝对值变大,其线性趋势通过了 0.05 的显著性检验,说明研究区表现出明显的北部干旱化加剧而南部干旱有所缓解的趋势。

除了前两个贡献率较大的特征向量以外,第三特征向量对应的空间模态也能对华北地区干旱的空间分布

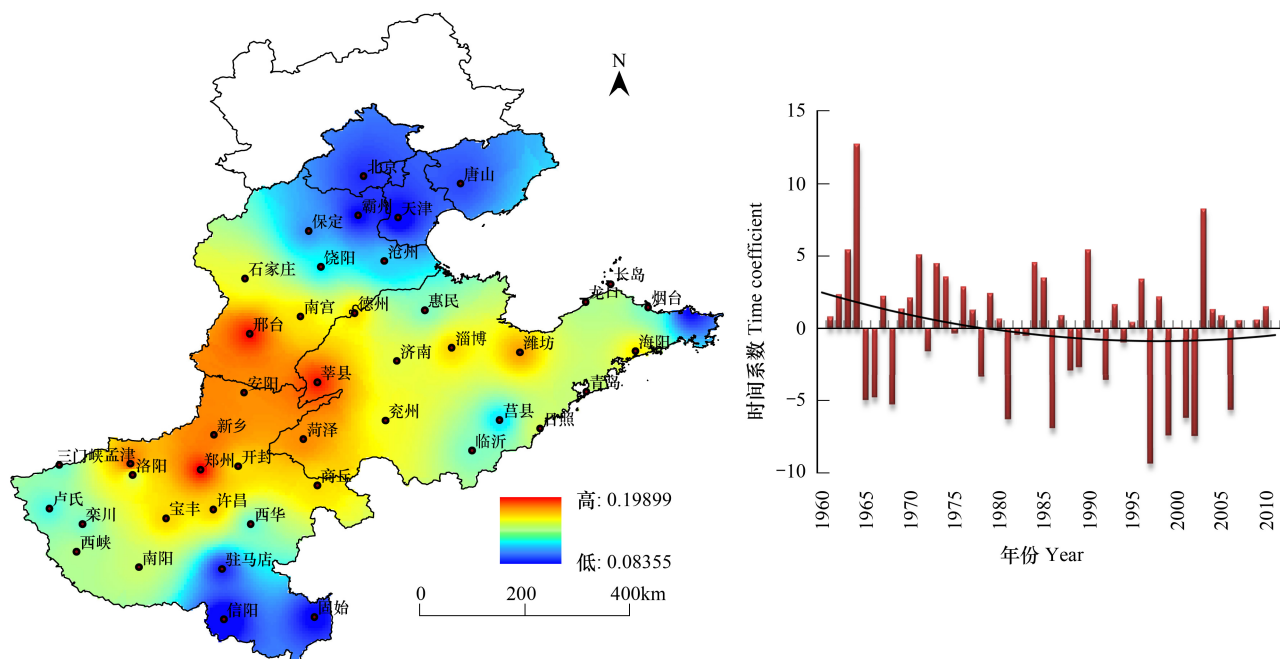


图 7(a) (b) 华北干旱第一模态空间分布;第一模态对应的时间系数

Fig.7(a) (b) Spatial distribution of the first EOF mode of drought in North China Plain; Time coefficients of the first EOF mode

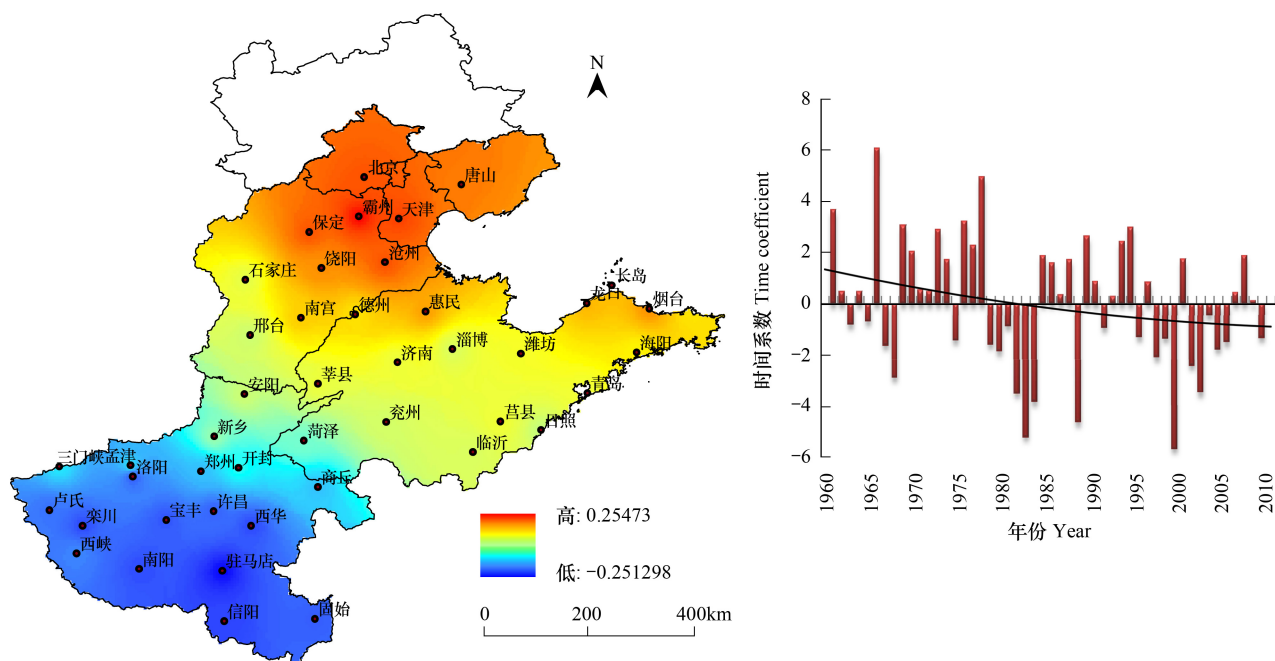


图 8(a) (b) 华北干旱第二模态空间分布;第二模态对应的时间系数

Fig.8(a) (b) Spatial distribution of the second EOF mode of drought in North China Plain; Time coefficients of the second EOF mode

做出一定的解释。从空间分布(图 9.a)上来看,第三模态呈现东南沿海高而西北地区低的形式,主要呈现经向的分布特征,二者具有相反的变化趋势。也就是说,东南地区比较湿润的年份,西北地区相对会比较干燥。第三模态空间分布的正值中心位于威海、青岛、日照、莒县等山东沿海地区,而负值中心位于石家庄、保定等河北北部地区。第三模态对应的时间系数(图 9.b)绝对值普遍比较小,其中典型的东南偏湿而西北偏干的年份

为 1965 年、2007 年,而 1977 年、1988 年是东南偏干西北偏湿的代表年份。其时间系数先减小后增大,1976 年—1996 年主要是以东南偏干西北偏湿为主,其余年份多以东南偏湿而西北偏干为主,这种分布形式的变化趋势不明显。

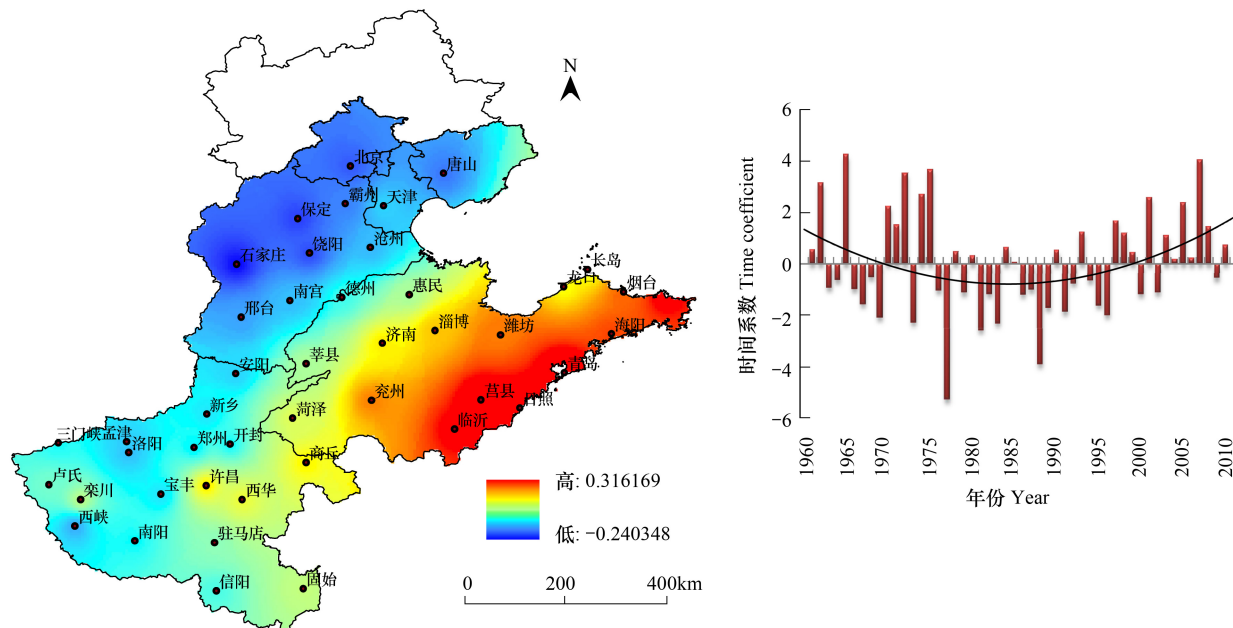


图 9(a) (b) 华北干旱第三模态空间分布;第三模态对应的时间系数

Fig.9(a) (b) Spatial distribution of the third EOF mode of drought in North China Plain; Time coefficients of the third EOF mode

3 结论与讨论

SPEI 指数在华北地区的干旱监测与分析中具有较好的适用性。*SPEI* 指数能够准确地识别气候变暖背景下研究区干旱发生年份,并且可以较好的反映不同分布型的旱涝演变趋势。本文基于 *SPEI* 指数特点对华北地区近 50 年旱涝空间展布情况及随时间变化的趋势进行了详细分析,取得的主要结论如下:

(1) 近 50 年华北冬麦区呈现明显的增暖趋势,其增温率超过全国平均水平,反映在 *SPEI* 指数的时间序列上,*SPEI* 为负值的年份增多,且绝对值增大,说明干旱发生的频率加大、程度加重。然而华北不同地区之间增温率存在显著差异,呈现北高南低的分布形式。研究区西北部的北京、保定等地增温率最大,西南部的三门峡、洛阳、卢氏等地增温率最小。文中选择的三个来自不同增温率地区代表站点的 *SPEI* 时间序列显示了不同增温率对干旱化趋势的影响,增温率越大的地区,干旱化趋势越显著。因此具有较高增温率的地区需要加强干旱趋势的监测和预测,以减少干旱带来的不利影响。

(2) 根据 *SPEI* 的干旱等级标准,分别统计了近 50 年研究区逐年发生不同等级干旱的站次比。从结果来看,只有 1964 年、1971 年、1985 年和 2004 年全区干旱程度较轻,其余年份均有 50% 以上的站点发生干旱。1966 年、1968 年、1981 年、1992 年以及 1997—2003 年均发生了严重的全域性干旱,站次比都在 90% 以上。对华北地区 45 个气象台站 1962—2010 年的 *SPEI* 指数矩阵进行 EOF 分析,其空间系数和对应的时间系数的变化情况展示了华北地区干旱发生的主要时空分布特征及其变化趋势。第一模态反映了全区一致的旱涝分布特征,即全区普遍偏湿或普遍偏干。第一模态的时间系数无明显变化趋势。第二模态反映了华北地区南部干旱分布相反的情况,其时间系数变化趋势表明,研究区干旱化程度有北部加剧,南部减轻的趋势,这与华北地区南北增温率的差异有关。北部地区增温率比南部地区高,因此干旱化趋势远较南部更为严重。第三模态反映了华北干旱随经度的分布情况,其时间系数也无明显变化趋势。

(3)作者对华北地区几个不同增温率的站点(如郑州,石家庄等)进行了 *SPEI* 与 *SPI* 指数的比较(图略),结果表明温度的升高(降低)确实会导致干旱程度的加重(减轻),反映出温度对干旱化趋势的影响。在这个意义上讲,*SPEI* 指数普遍优于国内广泛应用的 *Z* 指数、*SPI* 指数和降水距平等干旱指数。*SPEI* 指数计算过程比 *PDSI* 指数和 *CWDI* 指数更方便,同时构建了简单的降水蒸散模型,增强了指标的机理性。*SPEI* 指数本身的一个重要优越性在于其多时空尺度的特点,不同生产部门可以根据实际需要灵活的选用不同时空尺度上的指标值以反映气象干旱、农业干旱、水文干旱以及社会经济干旱的发生发展。对于同一个地区而言,干旱受水分亏缺程度及持续时间的共同影响,这些在 *SPEI* 指数里都能得到较好的反映。

参考文献 (References):

- [1] 刘园,王颖,杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响规律. 生态学报, 2010, 30(4): 923-932.
- [2] 王志伟,翟盘茂. 中国北方近 50 年干旱变化特征. 地理学报, 2003, 58(增刊): 61-68.
- [3] 马柱国,符淙斌. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439.
- [4] Dai A G, Trenberth K E, Qian T T. A global dataset of palmer drought severity index for 1870-2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(6): 1117-1130.
- [5] Alley W M. The palmer drought severity index: limitations and assumptions. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, 23(7): 1100-1109.
- [6] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [7] 袁文平,周广胜. 标准化降水指数与 *Z* 指数在我国应用的对比分析. 植物生态学, 2004, 28(4): 523-529.
- [8] 黄晚华,杨晓光,李茂松,张晓煜,王明田,代姝玮,马洁华. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50-59.
- [9] 王林,陈文. 近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征. 气象科技进展, 2012, 2(4): 21-26.
- [10] 李伟光,易雪,侯美亭,陈汇林,陈珍莉. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 643-649.
- [11] 熊光洁,王式功,尚可政,庄少伟,张志薇. 中国西南地区近 50 年夏季降水的气候特征. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 48(4): 46-52.
- [12] 苏宏新,李广起. 基于 *SPEI* 的北京低频干旱与气候指数关系. 生态学报, 2012, 32(17): 5467-5475.
- [13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版). 北京: 气象出版社, 2007: 63-65, 103-117.
- [14] 荣艳淑. 华北干旱. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 74-84.
- [15] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis, summary for policy makers. IPCC WGI Fourth Report, Paris, 2007.
- [16] 刘晓英,林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响. 水利学报, 2004, (2): 77-87.