

基于 SPEI 的 1981—2017 年中国北方地区干旱时空分布特征

史尚渝^{1,2},王 飞^{1,2,3},金 凯³,丁文斌³

(1.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院大学,北京 100049;
3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘 要:基于逐日降水量实测数据以及根据 Penman-Monteith 公式获取的潜在蒸散发量,计算了中国北方地区 1981—2017 年的标准化降水蒸散指数 (SPEI),并采用 Mann-Kendall 检验及旋转经验正交矩阵 (REOF) 等方法,探讨了近 37 年来北方地区干旱时空分布特征。结果表明:(1)1981—2017 年北方地区约有 74% 的区域 SPEI 呈减小趋势,其中显著减小 ($P<0.05$) 的区域占总面积的 43%,区域平均 SPEI 趋势率为 $-0.015 \cdot a^{-1}$ ($P<0.01$),1994 年为其突变年;(2)近 37 年来,北方地区轻度干旱 ($-1.2<SPEI\leq-0.5$) 和中度干旱 ($-2<SPEI\leq-1.2$) 发生频次呈增加趋势的区域分别占总面积的 78% 和 81%,表明干旱化现象主要表现为轻度和中度干旱;(3)在研究时段内,春季干旱化最严重,冬季最弱;(4)研究区通过 REOF 方法划分的三个主要干旱特征区分别为华北、东北和西北区,其中华北区无明显趋势变化;东北区经历了干旱化到湿润化的反转;西北干旱区在研究时段内干旱化最为严重。

关键词:北方地区;干旱时空分布;SPEI;REOF
中图分类号:S166 **文献标志码:**A

Temporal and spatial characteristics of drought based on SPEI in northern China from 1981 to 2017

SHI Shang-yu^{1,2}, WANG Fei^{1,2,3}, JIN Kai³, DING Wen-bing³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China;)

Abstract: Based on the measured daily precipitation and calculated the potential evapotranspiration, using Penman-Monteith formula, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) from 1981 to 2017 in northern China was established. The Mann-Kendall test (MK) and rotating empirical orthogonal matrix (REOF) method were used to explore the temporal and spatial characteristics of drought in this region over 37 years. The results showed that: (1) About 74% of the whole region had decreasing SPEI from 1981 to 2017, and about 43% of area of whole region had a significant decrease trend. The average SPEI trend rate was $-0.015 \cdot a^{-1}$ ($P<0.01$). Moreover, the turning point of SPEI change occurred in 1994; (2) The area that the frequency of slightly arid ($-1.2<SPEI\leq-0.5$) and moderately arid ($-2<SPEI\leq-1.2$) in northern China increased over 37 years indicating that the aridification was slight and moderate; (3) The most severe aridification was in spring and the least in winter. (4) The northern China can be divided into three arid characteristic zones using REOF: Northern China arid area, northeastern China arid area, and northwestern arid area. There was no obvious trend change in the northern China arid area. The northeastern China arid area had experienced a reversal of aridification to humidification. The aridification in the northwestern arid area was the most severe.

Keywords: northern China; temporal and spatial characteristics of drought; standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); rotational empirical orthogonal matrix (REOF)

干旱是造成全球经济损失的主要自然灾害之一,每年因干旱灾害造成的经济损失占有自然灾害损失的 43%^[1-2]。据统计,仅 2016 年我国的作物受旱面积达到 0.2 亿公顷,因干旱造成的直接经济损失达 484 亿元^[3]。在我国北方地区由于气候暖化和人类活动加剧,干旱问题尤为突出,不仅给农业生产带来巨大损失,同时因干旱导致的水资源短缺、土地荒漠化等也给生态环境造成了不良影响^[4-5]。

研究干旱的指标一般可分为农业干旱指标^[6]、水文干旱指标^[7]和气象干旱指标^[8]。其中,气象干旱指标常用于研究较长时间序列的区域干旱问题^[9-10]。Palmer 干旱指数(PDSI, palmer drought severity index)是研究中常用的气象干旱指标,但是该指标的时间尺度是固定的,仅适用于表征中长期干旱变化,对突发性的干旱判断不够准确^[11]。还有一些研究中使用 Z 指数和标准化降水指数(SPI, standardized precipitation index)作为气象干旱指标,这两种干旱指标在计算过程中只涉及降水量^[5,12-13],而在全球变暖的大背景下,温度等气象要素变化所引发的潜在蒸散发的变化已经对于干旱变化产生了重要的影响,单纯考虑降水量已经无法准确地描述干旱变化趋势^[14-15]。在 SPI 的基础上, Vicente - Serrano 等提出了基于降水量和潜在蒸散发量的标准化降水蒸散指数(SPEI, standardized precipitation evapotranspiration index),该指标在考虑降水统计分布规律的基础上,又考虑了同期的地表潜在蒸散发,可以更加综合地反映区域干旱情况^[16]。在用 SPEI 分析干旱变化时,通常使用 Vicente-Serrano 推荐的 Thornthwaite 公式^[17-18],但是许多研究表明,该方法由于只考虑温度因素,计算的结果偏差较大^[19-20]。Beguería 等进一步改进了 SPEI,使用 FAO Penman-Monteith (PM)公式计算潜在蒸散发,代替 Thornthwaite 计算值^[21]。刘珂等在研究中使用 PM 和 Thornthwaite 两种方法分别计算 SPEI,并将结果对比得出:使用 PM 公式计算得到的 SPEI 能够更合理描述干旱变化,而使用 Thornthwaite 方法得出的 SPEI 过度夸大了温度对干旱变化的影响^[22]。

基于不同气象干旱指标的研究均表明我国整体呈现干旱化趋势^[23-24]。干旱化的原因主要是由于降水量减少和温度升高导致的蒸散发量增加,干旱突变年份是 1997 年^[18]。北方的主要农业区不同

程度的干旱面积均有扩大趋势,而且季节差异较为明显,在使用 Z 指数和 SPI 的研究中得出,北方地区夏秋季呈干旱化趋势,秋冬季呈湿润化趋势^[5,13],而使用 SPEI 时则发现在春季干旱化最为严重^[22],空间分布上,西北东部、华北、东北在 1951—2004 年间处于显著干旱化趋势^[4]。虽然相关研究应用不同气象干旱指标对北方地区干旱问题进行了研究,并取得了一系列的成果,但是使用 Beguería 改进的 SPEI 对北方地区干旱时空变化的研究还较少。因此,本研究利用中国北方地区 391 个气象站 1981—2017 年的逐日降水数据,结合 PM 公式计算的潜在蒸散发量,计算并分析了该地区 SPEI 的时空变化,旨在阐明我国北方地区近几十年来的干旱情况,了解干旱变化规律,进而为农业生产管理提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及数据来源

研究区域为淮河—秦岭—昆仑山以北的我国北方地区,具体范围为东经 73°50′—135°4′,北纬 32°20′—53°33′,包括华北平原、东北平原、黄土高原、内蒙古高原、塔里木盆地、准格尔盆地、柴达木盆地等地区,总面积 623.4 万 km²,地跨北京、天津等 15 个省市自治区;研究区处于温带季风气候区和温带大陆性气候区。研究中使用的数据为中国气象数据网提供的 1981—2017 年的逐日气象数据(<http://data.cma.cn/>),研究过程中主要用到了降水、温度、日照、气压、风速和相对湿度。研究区内共有气象站点 391 个,具体分布见图 1。

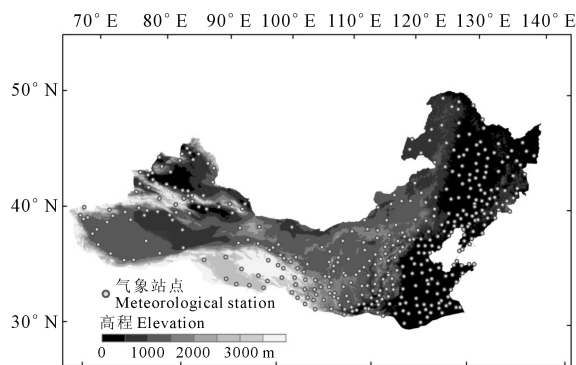


图 1 中国北方地区 391 个气象站的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of the 391 meteorological stations in Northern China

1.2 数据计算及处理方法

SPEI 采用三参数的 log-logistic 概率分布来描述某一时段降水量与潜在蒸散发量差值即水分盈缺量的变化,将偏态分布的水分盈缺量进行正态标准化,然后根据标准化后的累积分布来划分干旱等级。该指标适用于月及月以上时间尺度的干旱监测和评估。经 Beguería 改进的 SPEI 可用以下方法获取^[21]:

$$SPEI = w - \frac{C_0 + C_1 w + C_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (1)$$

式中, $w = \sqrt{-2\ln(P)}$; $C_0 = 2.515517$; $C_1 = 0.802853$; $C_2 = 0.010328$; $d_1 = 1.432788$; $d_2 = 0.189269$; $d_3 = 0.001308$; $P = 1 - F(x)$, 当 $P > 0.5$ 时, P 的值用 $1 - P$ 取代,同时计算得到的 SPEI 值正负逆转, $F(x)$ 为水分盈缺量的累积分布函数,由以下公式得到:

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

表 1 SPEI 干湿事件及分布概率

Table 1 SPEI grade standard for drought and humid

项目 Item	极端干旱 Extremely arid	中度干旱 Moderately arid	轻度干旱 Slightly arid	正常 Normal	轻度湿润 Slightly humid	中度湿润 Moderately humid	极端湿润 Extremely humid
SPEI	≤-2	-2~-1.2	-1.2~-0.5	-0.5~0.5	0.5~1.2	1.2~2	≥2
分布概率/% Probability	1.81	10.81	17.80	38.98	17.80	10.81	1.81

研究中使用的插值方法为 ANUSPLINE 软件提供的基于薄板样条函数的插值方法,插值过程中以高程为协变量,该方法适用于气象要素插值,且结果精度可靠^[27-28]。季节的划分参照气象领域常用方法,即 3-5 月为春季,6-8 月为夏季,9-11 月为秋季,12 月-次年 2 月为冬季。数据分析过程中用到的分析方法有 Mann-Kendall (MK) 检验^[29],线性回归以及旋转经验正交矩阵 (REOF)^[30-31]。研究中检验给定的显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 北方地区 SPEI 空间变化

图 2 为 1981-2017 年北方地区 SPEI 年平均和各季节平均的变化趋势分布图。从图 2a 结合表 2 可以看出,北方地区 SPEI 变化趋势整体为减小,减小的面积为 74%,显著减小的面积为 43%;SPEI 增加的面积为 26%,显著增加的面积为 6%。SPEI 减小的地区除华北平原、黄土高原部分地区和大兴安岭部分地区外均为显著减小;只有新疆北部、华北平原中部、以及东北东部地区的 SPEI 变化趋势为增加。

在季节尺度上,春季 SPEI 变化趋势空间分布与

式中, α , β 和 γ 为 log-logistic 分布函数的参数; x 为正态标准化处理后的水分盈缺量。

计算潜在蒸散发使用 PM 公式:

$$E_d = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (3)$$

式中, E_d 为日潜在蒸散发 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为表面太阳净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-1}$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-1}$); T_a 为平均气温 ($^{\circ}\text{C}$); e_s 和 e_a 分别指饱和水汽压与实际水汽压 (kPa); Δ 为饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ 为干湿表常数; u_2 为 2 m 处风速^[25]。

根据计算的 SPEI 值,参照相关研究以及北方地区的实际情况^[26],可以将各类干湿事件划分为七类,具体划分范围及分布概率见表 1。

年均变化趋势空间分布最相似,各地区变化趋势基本保持一致,同时春季也是四季中干旱化最为严重的季节,SPEI 减小的面积占总面积的 81%,显著减小的面积为 43%;SPEI 增加的面积为 19% (图 2b)。

夏季 SPEI 减小的地区主要集中在西北地区和黄土高原,其中塔里木盆地、吐鲁番盆地和河西走廊地区的 SPEI 减小趋势为显著,SPEI 减小的面积占 64%,显著减小面积为 12%;SPEI 增加的地区主要分布在天山地区、祁连山地区和东北地区北部,增加的面积占 36%,显著增加面积为 1% (图 2c)。

秋季 SPEI 变化趋势空间分布与夏季相似,不同之处在于秋季黄土高原地区 SPEI 呈增加趋势,而东北地区 SPEI 呈减小趋势;北方地区秋季 SPEI 值减小面积占总面积 67%,其中显著减小面积为 17%;SPEI 增加面积占 33%,显著增加面积为 1% (图 2d)。

冬季是四季中干旱化最不明显的季节,SPEI 减小地区主要是在华北平原、黄土高原和塔里木盆地南部,减小面积占总面积的 52%,显著减小面积为 7%;SPEI 增加地区主要在新疆中部、北部以及东北地区,增加面积占总面积的 48%,显著增加面积为 6% (图 2e)。

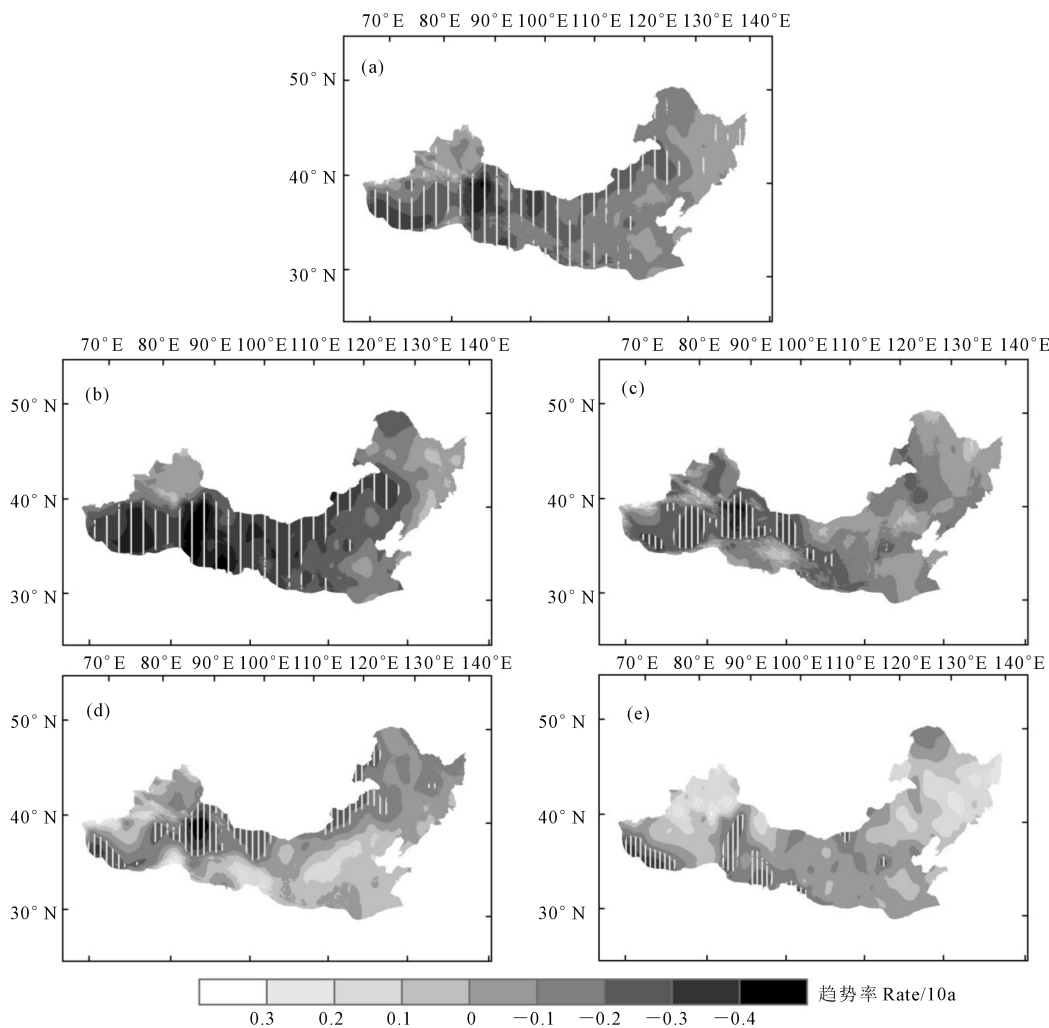


图 2 北方地区 (a) 年均及 (b) 春季、(c) 夏季、(d) 秋季、(e) 冬季 SPEI 变化趋势空间分布 (竖线区为 $P<0.05$ 的区域)

Fig.2 Spatial distribution of the trends in (a) annual, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, and (e) winter SPEI in Northern China (Areas with vertical bars indicate that the trend of SPEI is significant at the 0.05 significance level)

表 2 SPEI 及干旱等级变化趋势统计/%

Table 2 Statistics of the trends in SPEI and drought categories

项目 Items	年及各季节 SPEI 变化趋势 Trends of annual and seasons					不同干旱等级变化趋势 Trends of different arid		
	年 Annual	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	轻度干旱 Slightly arid	中度干旱 Moderately arid	极端干旱 Extremely arid
增加趋势 Increase	26	19	36	33	48	78	81	69
显著增加 Significant increase	6	0	1	1	6	17	38	4
减小趋势 Decrease	74	81	64	67	52	22	19	31
显著减小 Significant decrease	43	43	12	17	7	0	0	1

图 3 为利用每年不同等级干旱发生频次,计算得到不同等级干旱发生频次的变化趋势图。整体来看 1981—2017 年北方地区轻度干旱和中度干旱增加趋势较为明显。轻度干旱呈现增加趋势的面积为 78%,显著增加的面积为 17%,主要集中在西北地区的东部和南部(图 3a)。中度干旱呈现增加趋势的面积为 81%,显著增加的面积为 38%,仅在新疆北部东北地区东部呈现减少趋势(图 3b)。极端干旱呈现增加趋势的面积为 69%,显著增加的面

积为 4%,分布较为零散(图 3c)。

2.2 北方地区 SPEI 年际变化

北方地区平均 SPEI 在 1995 年之前较为稳定,之后波动较大,整体呈显著减小趋势,趋势率为 $-0.015 \cdot a^{-1}(P<0.01)$ (图 5a)。年均 SPEI 在 1995 年之前变化趋势不明显,在 1995 年之后,变化趋势为持续减小,且在 2000 年之后,SPEI 减小的趋势超过了 0.05 的临界线。通过 UF 线和 UB 线交点可知,年均 SPEI 变化趋势的突变点在 1994 年。

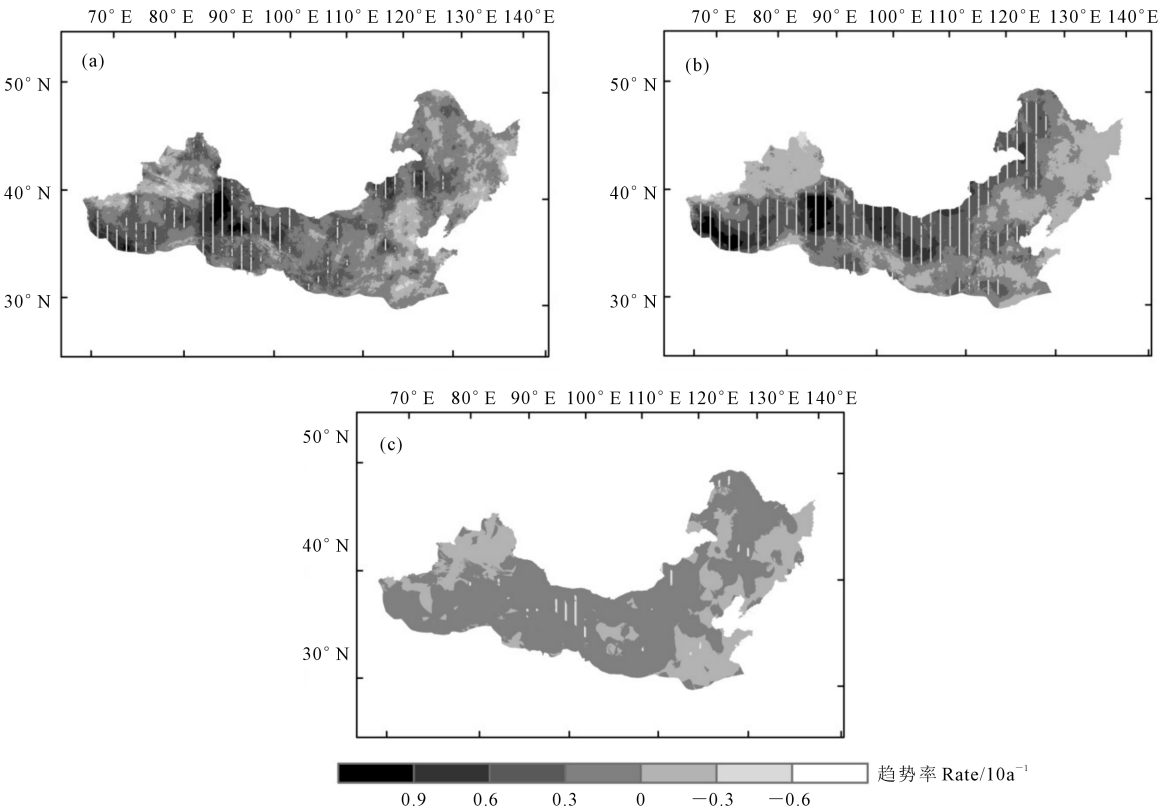
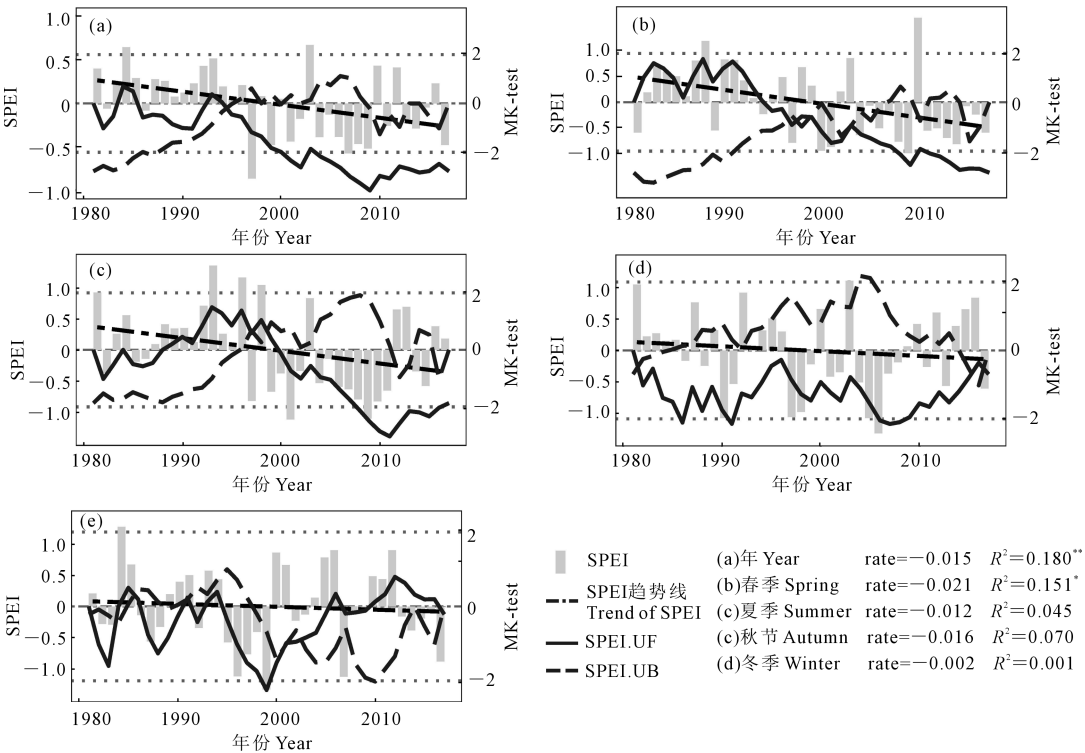


图 3 北方地区年均 (a) 轻度干旱、(b) 中度干旱和 (c) 极端干旱发生频次变化趋势空间分布 (竖线区 $P<0.05$ 的区域)

Fig.3 Spatial distribution of the trends in annual mean frequency for (a) slightly, (b) moderately, and (c) extremely arid in northern China. (Areas with vertical bars indicate that the trend of SPEI is significant at the 0.05 significance level)



注: * 和 ** 分别指在 0.05 和 0.01 显著性水平上显著;UF 和 UB 分别指正序和逆序检验曲线。

Note: * and ** mean significant at the 0.05 and 0.01 level; “UF” and “UB” mean positive and negative curves of “MK-test”.

图 4 SPEI 变化趋势及 MK 检验曲线

Fig.4 Variation trends and MK test curves of SPEI

春季是四季中 SPEI 减小趋势最为明显的季节,趋势率为 $-0.021 \cdot a^{-1}$ ($P<0.05$),表明春季干旱化在各季节中最为严重(图 5b)。结合图 5b 分析可知,春季 SPEI 变化趋势与年均变化整体保持一致,在 1993 年之后为减小趋势,趋势突变点发生在 1995 年。

夏季 SPEI 减小趋势低于年均 SPEI 减小趋势,趋势率为 $-0.012 \cdot a^{-1}$ (图 5c)。夏季 SPEI 的 MK 检验结果表明,在 1999 年之前,夏季 SPEI 变化趋势为增加,1999 年之后变化趋势为减小,且在 2010 年左右接近 0.05 临界线。UF 和 UB 线在 1996–1998 年以及 2010 年之后多次相交,前者是 SPEI 减小趋势的信号,而后者说明在 2010 年之后,夏季 SPEI 有增加趋势,表明 2010 年之后,北方地区夏季有湿润化趋势。

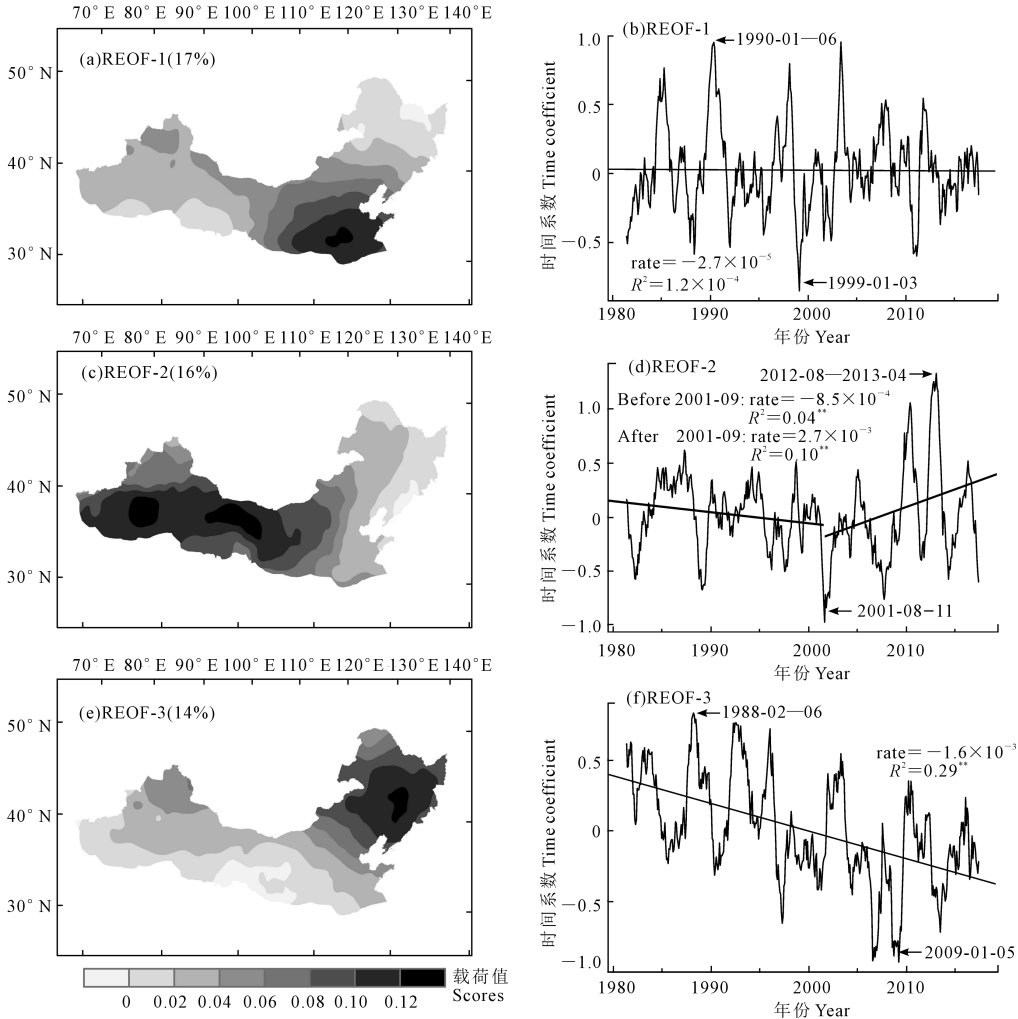
秋季 SPEI 减小趋势略高于年均 SPEI 的减小趋势,趋势率为 $-0.016 \cdot a^{-1}$ (图 5d)。分析秋季 SPEI

的 MK 检验结果可知,37 年来秋季的 SPEI 变化趋势均为减小,并在 2006—2016 年间,减小趋势超过了 0.05 临界线。秋季 SPEI 趋势突变点发生在 1983 年。

冬季 SPEI 的减小趋势是四季中最小的,趋势率为 $-0.002 \cdot a^{-1}$,表明北方地区冬季的 SPEI 最为平稳(图 5e)。分析冬季 SPEI 的 MK 检验结果可知,冬季的变化趋势并无明显规律,UF 和 UB 线始终在 0 值附近,增加和减小趋势均未超过 0.05 临界线。

2.3 北方地区干旱主要模态的特征分析

通过经验正交矩阵计算 SPEI 的特征向量,根据 North 等^[32]提出的特征根的误差范围进行显著性检验,通过显著性检验的为前三特征向量。然后用最大方差法进行旋转,得到的 3 个 REOF 特征向量方差贡献率分别为 17%,16%和 14%,累计方差贡献为 47%,对应的特征向量场空间分布和时间系数见图 5。



注: a, c 和 e 分别指第一、第二和第三特征向量; b, d 和 f 分别指对应区域的平均 SPEI 变化趋势。rate 指线性趋势率; * * 指在 0.01 显著性水平上显著。

Note: a, c, e and corresponding trends of the regional average SPEI (b, d, f) in Northern China. ‘rate’ means the linear trend of SPEI during 1981–2017. * * means significant at the 0.01 significance level.

图 5 北方地区 SPEI 旋转经验正交矩阵 (REOF) 分解结果及各区域平均 SPEI 变化趋势
Fig.5 Spatial distribution of first three REOF model and trends of regional average SPEI

3 个特征向量的方差贡献率较为接近,表明北方地区 SPEI 值变化在空间上有着明显分布差异。结合空间分布图可将北方分为华北干旱区、东北干旱区、西北干旱区 3 个干旱特征区。华北干旱区除华北平原,还包含部分黄土高原区域,该特征区的时间系数整体无明显趋势,在 2005 年之后时间系数趋于平稳,变化波动减小;典型干旱发生在 1991 年 1—3 月,典型湿润发生在 1990 年 1—6 月。东北干旱区包括东三省以及内蒙古东北部,该区域典型干旱发生在 2001 年 8—11 月,最小值出现在 2001 年 9 月,而以该时间点为界,东北干旱区发生了明显的干湿反转,由显著干旱化变为显著湿润化,典型湿润发生在 2012 年 8 月—2013 年 6 月。西北干旱区包括除新疆北部的西北大部分区域,该地区在研究时段内 SPEI 整体趋势为减小,表明该区域干旱化日益严重,典型干旱发生在 2009 年 1—5 月,典型湿润发生在 1988 年 2—6 月。

3 讨论

本研究发现我国北方地区降水量呈不显著的增加趋势,整体趋势为西北地区增加,而东北地区减少,这与陆龙骅等^[33]的研究一致,各个季节中,冬季的增加趋势显著。北方地区潜在蒸散发量则呈显著增加趋势,达到了 $1.69 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,高于 Gao 等^[34]研究中提到的 $1.07 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。而李伟光等在研究中得出随着潜在蒸散发的持续增加,北方地区的干旱情况将持续加重^[18]。

以往研究表明北方地区整体呈现干旱化趋势,这与本文研究结果一致^[4-5]。同时本研究发现,华北中部和东北地区东部有轻微变湿的趋势,这一结论和一些学者的研究结果完全相反^[4,24],造成这种现象的原因为:一是因为计算潜在蒸散发量时所使用的方法不同,马柱国等^[4]在研究中均使用 Thornthwaite 方法来计算潜在蒸散发量,该方法只考虑了温度对潜在蒸散发量的影响,计算结果偏小峰值滞后,与实际情况偏差较大,没有 PM 公式精确;二是因为在别的研究中,使用时间序列均主要为上世纪到本世纪初,根据图 6d 可知,东北干旱区在 2001 年之后有湿润化的趋势,因此使用数据的时间序列不同也是造成结果大相径庭的原因之一。而安莉娟等^[35]针对华北地区的研究中也得出,华北地区的干旱现象集中在二十世纪八十和九十年代。北方地区不同季节干旱化差异明显,研究发现四季中春季的干旱化趋势显著,这与刘珂等^[22]研究结果一致,但是有别于王志伟等^[5,13]在研究中得出的夏季和秋

季的干旱化趋势显著,原因可能是由于在其研究中,使用 Z 指数或 SPI 为气象干旱指标,这两个指标均是基于降水量计算得到的,没有考虑潜在蒸散发,因此有别于使用 SPEI 的研究结果。而在针对不同等级干旱的研究中,使用 SPEI 和 SPI 的结果则保持了一致,即北方地区干旱化主要表现为中度干旱和轻度干旱,且中度干旱更为严重,而极端干旱的发生频次虽然也呈现轻微增加趋势,但是并不显著^[13,22]。

本研究使用的气象干旱指标 SPEI 是 Vicente-Serrano 等在 SPI 的基础上提出的^[16],SPEI 的计算是利用降水量数据和使用温度数据获取的潜在蒸散发量得到,SPEI 相比其他气象干旱指标而言有诸多优点,包括计算方便、结果可靠、可用于多时间尺度的干旱研究等,是在目前干旱研究中较为理想的气象干旱指标^[8,17]。而经过 Beguería 等改进的 SPEI 则使用 PM 公式计算潜在蒸散发量,相当于在计算 SPEI 的过程中不仅考虑了降水量和温度数据,同时引入了相对湿度、气压、风速、日照时长等数据,计算的结果更加符合实际情况^[21]。然而,SPEI 的计算不涉及土壤水分和径流量等,而实际中的干旱通常是由于土壤水分过低、实际可利用水量低于实际需水量导致的^[36]。此外,SPEI 是基于特定分布标准化后得到的结果,不同区域的各类干湿事件出现的频率都是相同的,与实际情况不符,研究结果反映的是统计学意义上的干旱。因此,如何运用气象干旱指标来更准确地反应实际干旱情况,需在未来进一步研究。

4 结论

本研究基于逐日降水量实测数据以及根据 PM 公式获取的潜在蒸散发量,计算了中国北方地区 1981—2017 年的 SPEI,并据此探讨了近 37 年来北方地区干旱时空分布特征。主要结论如下:

1) 1981—2017 年我国北方地区 SPEI 整体呈下降趋势,表明干旱化现象严重。其中,干旱化面积达 74%,显著干旱化的面积为 43%;SPEI 增加的区域仅出现在新疆北部、华北地区中部和东北地区东部等地。

2) 不同等级干旱发生频次差异显著。中度干旱 ($-2 < \text{SPEI} \leq -1.2$) 发生频次呈现增加趋势的面积为 81%,增加趋势最为明显,轻度干旱 ($-1.2 < \text{SPEI} \leq -0.5$) 发生频次呈增加趋势的面积为 78%,极端干旱 ($\text{SPEI} \leq -2$) 发生频次整体也为增加趋势,增加的面积为 69%,但是显著面积仅为 4%,且分布较为分散。表明北方地区的干旱化主要表现为中度干

旱和轻度干旱。

3) 北方地区年均 SPEI 在 1995 年之前较为稳定,之后波动较大,整体呈显著减小趋势,趋势率为 $-0.015 \cdot a^{-1}$ 。北方地区干旱化的突变年份为 1994 年。春季的干旱化在四季中最为严重,SPEI 趋势率为 $-0.021 \cdot a^{-1}$ ($P<0.05$);冬季的趋势率为 $-0.002 \cdot a^{-1}$,为四季中干旱化最为轻微的季节。

4) 通过 REOF 可以将北方地区划分为华北、东北和西北干旱特征区,其中华北干旱区整体无明显变化趋势;东北干旱区经历了由干旱化向湿润化的反转;西北干旱区时间系数呈显著减小趋势,表明干旱化严重。

参 考 文 献:

[1] Trenberth K E, Dai A, Schrier G V D, et al. Global warming and changes in drought[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(1):17-22.

[2] Golnaraghi M, Etienne C, Sapir D G, et al. Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970–2012) [R]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2014.

[3] 杨新星, 王东侠. 2016 年全国旱灾及抗旱行动情况[J]. *中国防汛抗旱*, 2017,(1):30-33.

[4] 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.

[5] 王志伟, 翟盘茂. 中国北方近 50 年干旱变化特征[J]. *地理学报*, 2003, 58(s1):61-68.

[6] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. *地理学报*, 2015, 70(11):1835-1848.

[7] 胡彩虹, 王金星, 王艺璇, 李勇. 水文干旱指标研究进展综述[J]. *人民长江*, 2013, 44(07):11-15.

[8] 李忆平, 李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. *干旱气象*, 2017, 35(05):709-723.

[9] M. Svoboda, B A Fuchs, et al. Handbook of Drought Indicators and Indices[M]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2017:11-25.

[10] Wilhite, D. A., Drought as a natural hazard: Concepts and definitions[M]. London: ROUTLEDGE, 2000(1):3-18.

[11] Palmer W C. Meteorological Drought. Weather Bureau Res. Paper 45. U.S. Department of Commerce; Washington, DC, 1965. 58.

[12] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales: Proceeding of the Eighth Conference on Applied Climatology[C]. USA: American Meteorological SOCIETY, 1993:179-184.

[13] 胡子瑛, 周俊菊, 张利利, 等. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(6):1908-1919.

[14] Heim R J. A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, 83(8):1149-1165.

[15] Zou X, Zhai P, Zhang Q. Variations in droughts over China: 1951–2003[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(4):353-368.

[16] Vicenteserrano S M, Beguería S, Lópezmoreno J I. A Multiscalar

Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7):1696-1718.

[17] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(2):423-431.

[18] 李伟光, 易雪, 侯美亭, 等. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(5):643-649.

[19] 刘晓英, 李玉中, 王庆锁. 几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6):12-18.

[20] Pereira A R, Pruitt W O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 66(3):251-257.

[21] Beguería S, Vicenteserrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(10):3001-3023.

[22] 刘珂, 姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析[J]. *大气科学*, 2015, 39(1):23-36.

[23] 马柱国, 任小波. 1951–2006 年中国区域干旱化特征[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(4):195-201.

[24] 陆桂华, 闫桂霞, 吴志勇, 等. 近 50 年来中国干旱化特征分析[J]. *水利水电技术*, 2010, 41(3):78-82.

[25] Allan R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998.

[26] 中国气象科学研究院, 国家气象中心, 中国气象局预测减灾司. GB/T20481–2006 气象干旱等级[S]. 北京: 标准出版社, 2006.

[27] 刘志红, Mcvicar T R, Niel V, 等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. *气象*, 2008, 34(2):92-100.

[28] 钱永兰, 吕厚茎, 张艳红. 基于 ANUSPLIN 软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J]. *气象与环境学报*, 2010, 26(2):7-15.

[29] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann–Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 259(1):254-271.

[30] Pearson K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space [J]. *Philos. Mag.*, 1992, 2(6):559-572.

[31] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999:128-134.

[32] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7):699-706.

[33] 陆龙骅, 张德二. 中国年降水量的时空变化特征及其与东亚夏季风的关系[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(1):97-107.

[34] Gao G, Chen D, Xu C Y, et al. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960–2002[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(D11):D1120.

[35] 安莉娟, 任福民, 李韵婕, 等. 近 50 年华北区域性气象干旱事件的特征分析[J]. *气象*, 2014, 40(09):1097-1105.

[36] D’Odorico P, Porporato A. Preferential states in soil moisture and climate dynamics [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(24):8848-51.