

基于 2 种标准化干旱指数分析秦皇岛 近 50 年干旱状况

赵 铭¹, 张雪洋¹, 包玉龙¹, 赵福年²

(1. 秦皇岛市气象局, 河北 秦皇岛 066000; 2. 中国气象局 兰州干旱气象研究所,

中国气象局 干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020)

摘 要: 为了分析 SPEI 是否相对于 SPI 更适合于气候变暖背景下秦皇岛的干旱监测与评估, 为更精确地诊断该区干旱发生状况提供依据, 以河北秦皇岛 1964—2014 年逐日降水及温度资料为基础, 分析比较标准化降水指标(SPI)和标准化降水蒸散指标(SPEI)对秦皇岛干旱监测的差异及秦皇岛地区近 50 年干旱变化趋势。结果表明: 50 年来秦皇岛干旱发生的频次逐渐增多, 且干旱程度也较过去有所加重, 春季、夏季、冬季呈干旱化趋势, 秋季呈增湿趋势; 两个指数在同一季节指示的干湿状况演变趋势是一样的; 1989 年以前, 秦皇岛市气温距平值基本为负值, 在这期间 SPI 与 SPEI 数值变动趋势较为一致且在发生干旱的年份 SPI 与 SPEI 数值之间差异不大, 但在 1989 年以后, 随着秦皇岛市气温距平值由负转为连续多年正值, 两个指数差异增大, SPEI 在监测到干旱发生时, 干旱程度较 SPI 监测的结果更重也更接近实际情况, 所以得出 SPEI 更能有效地反映出全球变暖背景下秦皇岛干旱发生发展情况。

关键词: 干旱; 标准化降水指标(SPI); 标准化降水蒸散指标(SPEI); 秦皇岛市

中图分类号: S161

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)03-0246-06

Analysis of Drought Conditions in Qinhuangdao City in Recent 50 Years Based on Two Kinds of Standardized Drought Indices

ZHAO Ming¹, ZHANG Xueyang¹, BAO Yulong¹, ZHAO Funian²

(1. Qinhuangdao Meteorological Administration, Qinhuangdao, Hebei 066000,

China; 2. Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA,

Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China)

Abstract: In order to analyze whether SPEI relative to the SPI is more suitable for the context of Qinhuangdao City drought monitoring and evaluation under the background of climate warming, also for more precise diagnosis of the drought conditions, daily precipitation and temperature data from 1964 to 2014 in Qinhuangdao City Hebei Province were used to analyze and compare the difference between SPI and SPEI in their monitoring of the drought conditions and drought change tendency in nearly 50 years. The results show that the frequency of drought in nearly 50 years of Qinhuangdao City is increasing and the degree of drought becomes more serious than before. The drying trend was observed in spring, summer and winter, humidifying trend was found in autumn; two indices in the same season instructions of dry and wet condition evolution tendency are the same. Before 1989, the temperature anomaly of Qinhuangdao City was basically negative, during this period, the trend of SPI and SPEI values was consistent and the difference between SPI and SPEI was not significant in the drought years. But after 1989, with the shift of the temperature anomaly of Qinhuangdao City from negative to positive value, the difference of the two indices increased, when the drought occurred, the results of the SPEI monitoring were more serious than the SPI monitoring and closer to the actual situation, Therefore, SPEI can effectively reflect the development of drought in Qinhuangdao City in the context of global warming.

Keywords: drought; standardized precipitation index; standardized precipitation evapotranspiration index; Qinhuangdao City

干旱灾害对社会经济的发展危害极大。据估算每年因干旱造成的全球经济损失高达60~80亿美元,远远超过了其他气象灾害^[1]。随着经济的迅速发展、人口增长以及由此引起的全球气候变暖,干旱有进一步加重的趋势^[2]。

根据不同的时间尺度,干旱可分为气象干旱、农业干旱、水文干旱等。气象干旱最直观的表现就是降水量的减少,它也是引发其他类型干旱的重要因子。气象干旱通常是农业干旱的前兆,气象干旱比水文干旱出现较快。对于干旱强度的确定和评估,目前国内常用的干旱指标就有10余种,如气象干旱指标、水文干旱指标、农业干旱指标和经济干旱指标等^[3-5],这些干旱指标从大气降水、地表水、土壤墒情以及经济损失等不同角度表达了干旱的程度。就干旱形成的最直接原因而言,主要是大气降水量减少、气温偏高,因此,气象干旱指标具有普遍意义。研究表明,由于气温对地表水分收支分量——蒸散起着至关重要的作用^[6-7],对农业生产而言,不考虑变暖在干旱评估中的作用,可能低估实际干旱的程度^[8-9]以及模糊气候变化对水文循环的基本效应的评估。事实上,有关研究表明,温度在干旱形成中可能起着与降水同等重要的作用^[10],而在全球变暖背景下的干旱评估中尤为突出。为解决这一问题,研究者试图采用具有水分平衡基础的帕默尔干旱指数(PDSI)^[11],及自定义的大气干旱指数^[12]、地表湿润指数^[11]、干旱强度指数^[13]、水分亏缺指数^[14]等进行干旱监测。PDSI对中长期干旱的反映能力较好,而对短期干旱则难以反映^[15],且校正时具有不稳定性、对计算方案中参数的区域性非常敏感^[11]、计算也较为复杂,自定义的大气干旱指数将标准化的月平均气温距平与降水距平进行简单组合,不能准确反映气温通过蒸散发影响干旱的内在机制,干旱强度指数、水分亏缺指数和地表湿润指数均基于降水和蒸散发的差值或比值,计算也相对简单,然而由于空间不一致性,同PDSI一样缺乏空间比较的基础。Vicente-Serrano等^[16]通过在SPI的基础上引入潜在蒸散,构建了新的适用于气候变暖背景下干旱监测与评估的气候指数SPEI,该指数融合了PDSI对蒸散的响应及SPI空间一致性,在许多地区使用均表现出较好的干旱监测效果。

然而,作为同样的对气象要素进行标准化处理的指数,SPEI较SPI的优势如何,依然缺乏实例分析,因此本文以河北秦皇岛1964—2014年逐日降水及温度资料为基础,分析比较标准化降水指标(SPI)和标准化降水蒸散指标(SPEI)对秦皇岛气象干旱监测的差异,进一步分析SPEI是否相对于SPI更适合于气

候变暖背景下秦皇岛的干旱监测与评估,以期能为更精确地诊断该区干旱发生状况提供依据。

1 研究区概况

秦皇岛地区地处河北省的东部,位于东经118°33′—119°51′,北纬39°23′—40°37′,北依燕山,南临渤海,东临辽宁,西北分别与唐山、承德相毗。秦皇岛地区属于东部季风区暖温带湿润气候,四季分明:春季(3—5月)风力强大,降雨稀少;夏季(6—8月)盛行偏南风,气温高,湿度大,降水多,本季降水为510~585 mm,占全年的75%;平均气温为22.8~24.1℃,暴雨、大风、冰雹时有发生;秋季(9—11月)气温迅速下降,降水锐减,降水占全年的13%左右;冬季(12月至翌年2月)盛行西—西北风,天气寒冷干燥,降雪稀少。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

秦皇岛市所辖的北戴河、山海关、海港区3个市辖区和抚宁县、昌黎县、卢龙县、青龙满族自治县4个县的气候差异较小。由于抚宁、卢龙、青龙县国家气象站受迁站影响,数据序列较短,所以本文以河北秦皇岛昌黎国家气象观测站1964—2014年逐日降水及温度资料为基础,分析比较标准化降水指标(SPI)和标准化降水蒸散指标(SPEI)对秦皇岛干旱监测的差异及秦皇岛地区近50年干旱变化趋势。原始数据源于河北省气象局。

2.2 研究方法

(1) SPI的计算。由于不同时间、不同地区降水量变化幅度很大,直接用降水量很难在不同时空尺度上相互比较,而且降水分布是一种偏态分布,不是正态分布,所以在降水分析中,采用 Γ 分布概率来描述降水量的变化,算得给定时间尺度的累积概率 $H(x)$ ^[17-18],然后累积概率 $H(x)$ 可以通过下式转换为标准正态分布函数:

当 $0 < H(x) \leq 0.5$ 时,

$$Z = \text{SPI} = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad (1)$$

$$t = \sqrt{\ln\left[\frac{1}{H(x)^2}\right]} \quad (2)$$

当 $0.5 < H(x) < 1$ 时,

$$Z = \text{SPI} = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad (3)$$

$$t = \sqrt{\ln\left\{\frac{1}{[1-H(x)]^2}\right\}} \quad (4)$$

式中常数分别为: $c_0 = 2.515\ 517$, $c_1 = 0.802\ 853$,

$c_2=0.010\ 328, d_1=1.432\ 788, d_2=0.189\ 269, d_3=0.001\ 308$ 。

(2) SPEI 的计算。SPEI 以月平均气温及月(或周)降水量为输入资料,通过计算月降水量与潜在蒸散量的差值并进行正态标准化处理得到,其计算步骤与 SPI 计算类似。

首先需要基于 Thornthwaite 方法^[19-22] 计算逐月的潜在蒸散 PET,进而得出逐月的降水与蒸散的差值 D_i ,同 SPI 方法,对 D_i 数据序列进行正态化,计算每个数值对应的 SPEI。由于原始数据序列 D_i 中可能存在负值,所以 SPEI 采用了 3 个参数的 log-logistic 概率分布。log-logistic 概率分布的累积函数为 $F(x)$,然后对累积概率密度进行标准化:

$$P=1-F(x) \tag{5}$$

当 $P \leq 0.5$ 时,

$$w=\sqrt{-2\ln(P)} \tag{6}$$

$$SPEI=(w-\frac{c_0+c_1w+c_2w^2}{1+d_1w+d_2w^2+d_3w^3}) \tag{7}$$

当 $P > 0.5$ 时,

$$P=1-P \tag{8}$$

$$SPEI=-(w-\frac{c_0+c_1w+c_2w^2}{1+d_1w+d_2w^2+d_3w^3}) \tag{9}$$

式中常数分别为: $c_0=2.515\ 517, c_1=0.802\ 853, c_2=0.010\ 328, d_1=1.432\ 788, d_2=0.189\ 269, d_3=0.001\ 308$ 。

依据我国《气象干旱等级标准》(GB/T20481—

2006)及借鉴 Svoboda 等^[23] 的干旱分类,得出 SPI 和 SPEI 旱涝等级值见表 1。

表 1 干旱指数的等级划分

类型	SPI	SPEI	降水距平百分率 P (年尺度)
无旱	>-0.5	≥ -0.5	>15
轻旱	$-1.0 < SPI \leq -0.5$	$-0.8 \leq SPEI < -0.5$	$-30 < P \leq -15$
中旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$	$-1.3 \leq SPEI < -0.8$	$-40 < P \leq -30$
重旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$	$-1.6 \leq SPEI < -1.3$	$-45 < P \leq -40$
特旱	≤ -2.0	< -1.6	≤ -45

3 结果与分析

3.1 秦皇岛市降水量变化

分析秦皇岛市 1964—2014 年降水量和降水距平百分率的变化情况(图 1),过去 50 年该区降水量年际变化较大,降水量总体呈减少且趋于平稳的趋势。1989—2014 年这 26 年中有 20 年降水量低于多年平均值,尤其是 1999—2002 年连续 4 年降水量最为偏少,降水距平百分率为 $-35\% \sim -50\%$,依据我国《气象干旱等级标准》(GB/T20481—2006)中降水距平百分率对于干旱等级的划分,这 4 年的干旱为重旱甚至为特旱。此外 2004—2011 年为降水持续偏少期,但依据降水距平百分率对于干旱等级的划分,这 8 年只有轻度干旱发生。总的来说,用降水距平百分率对秦皇岛市干旱发生状况进行分析,可知 50 年来秦皇岛干旱发生的频次逐渐增多,且干旱程度也较过去有所增重。

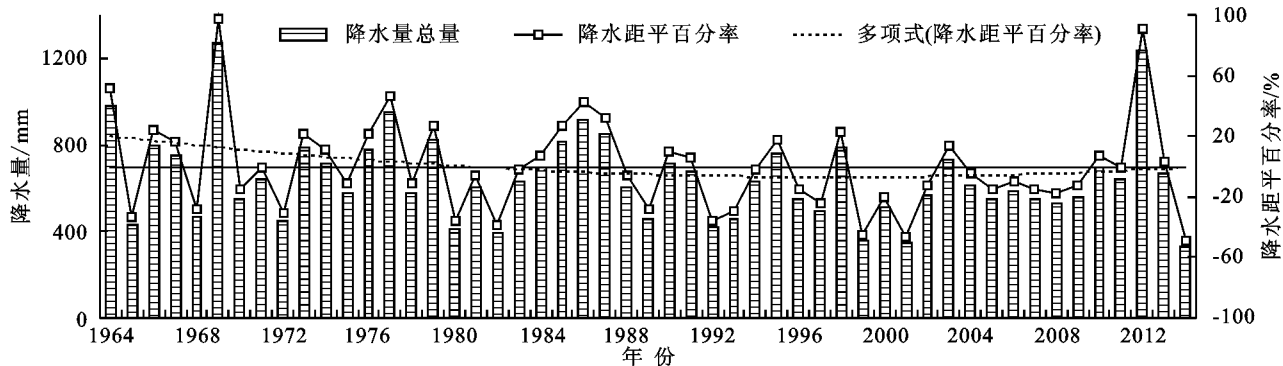


图 1 秦皇岛市 1964—2014 年降水量及降水距平百分率

3.2 SPI 和 SPEI 秦皇岛监测数据对比

以 SPI 和 SPEI 作为干旱诊断指标,分析秦皇岛市 1964—2014 年干旱发生情况。如图 2 所示,秦皇岛市气温总体上呈上升趋势。1989 年后除 2010 年由于国家气象观测站迁站导致之后温度距平值减少较为明显外,气温均高于多年平均值。1989 年之前,秦皇岛市气温距平值基本为负值,在这期间 SPI 与 SPEI 数值变动趋势较为一致,在发生干旱的年份 SPI 均比 SPEI 数值小,并且这两个指标对秦皇岛市干旱的检测 results 与降水距平百分率对于干旱状况的反

应一致,都反映出 1968 年有特旱发生,1980 年代初期有轻到中旱发生。依据历史资料记载,1982 年 5 月降水稀少,气温较高,秦皇岛发生严重春旱,影响春播作物和小麦的生长。1982 年 7 月上中旬,青龙县出现严重干旱,给农业生产造成严重损失,根据县政府农情组统计,全县绝收面积 93.324 km^2 ,减产一半的有 99.782 km^2 ,减产 3~5 成的有 64.904 km^2 ,减产 1~3 成的有 31.241 km^2 。其中干沟、三星口、木头凳、大石岭、张杖子、白家店、七道河 7 个公社绝收

面积均占全社总耕地面积的一半或以上。这次干旱全县预计减产 $9 \times 10^5 \text{ kg}$ 。1982 年 8 月秦皇岛干旱少雨,炎热少风,大田作物的籽粒形成受到影响,个别地块出现早衰现象,造成底粒,产量下降。1982 年 9 月干旱少雨,给秦皇岛小麦播种造成极大困难。岭坡地

根本无法播种,低洼地也只有浇水播种。不但使播种期推迟,也减少了播种面积。可见气温距平值基本为负值的时段在发生干旱的年份 SPI 均比 SPEI 数值小,降水距平百分率以及 SPI 和 SPEI 都能有效反映出干旱发生状况,监测效果较好。

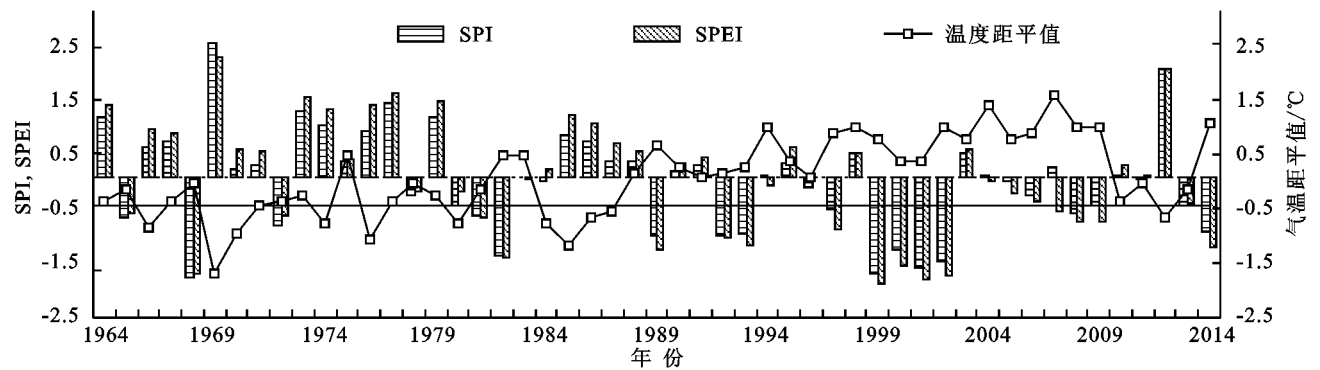


图 2 秦皇岛市 1964—2014 年 SPI 和 SPEI 变化

但是在 1989 年以后,随着秦皇岛市气温距平值由负转为连续多年正值,两个指数差异较为明显,发生干旱的年份 SPEI 指数均小于 SPI 指数,加上 SPEI 在对于干旱等级的划分上,每增加一个干旱等级的数值较 SPI 小,反映更敏感,所以 SPEI 在监测到干旱发生时,干旱程度较 SPI 监测的结果更重。以 1989 年为界限,对 1964—1988 年和 1989—2014 年分两个时段(下文分别简称为 a 时间段、b 时间段),SPI 和 SPEI 对不同类型干旱发生的频率进行对比分析。

从表 2 中可以看出:SPI 指数无旱在 a 时间段的发生频率大于在 b 时间段的发生频率,轻旱、中旱、重旱在 b 时间段发生频率均大于 a 时间段发生频率,两个时间段均未出现特旱;SPEI 指数无旱、轻旱在 b 时间段发生的频率均小于在 a 时间段发生的频率,中旱、重旱、特旱在 b 时间段发生的频率均大于或等于在 a 时间段发生的频率。总的来说,两个干旱指数除了无旱以外,其他干旱等级发生的频率随着气温距平值的升高均不同程度的增加。

表 2 SPI, SPEI 指数在两个时间段反映出的

干旱等级	各个干旱等级的频率 %			
	a 时间段		b 时间段	
	(1964—1988 年)		(1989—2014 年)	
	SPI _a	SPEI _a	SPI _b	SPEI _b
特旱	0	2	0	6
重旱	2	2	6	2
中旱	2	0	6	10
轻旱	6	6	8	6
无旱	39	39	31	27

注:SPI_a 表示 1964—1988 年 SPI 12 月尺度监测结果;SPI_b 表示 1989—2014 年 SPI 12 月尺度监测结果,SPEI 同。

另外,在 a 时间段 SPI 和 SPEI 对于干旱的划分差

异不大,只在特旱和中旱相差 2%。而在 b 时间段里,SPEI 指数反映的干旱频率在特旱和中早上明显增多,尤其是特旱,SPI 在这个时间段里没有诊断出特旱发生而 SPEI 诊断出 6%的特旱发生。以 2001 年为例,SPI 这年的数值为 -1.6,监测干旱等级为重旱,而 SPEI 数值为 -1.83,监测干旱等级为特旱。依据气象灾害灾情统计不容易界定重旱和特旱,所以另以 2007 年为例,2007 年秦皇岛气温距平值为历史最大值,SPI 这年的数值为 0.18,监测干旱等级为无旱,而 SPEI 数值为 -0.59,监测干旱等级为轻旱。依据 2007 年秦皇岛市环境状况公报,2007 年全市年平均气温比常年偏高 1.1℃,冬季气温异常高,夏季略高,春、秋季接近常年,属偏暖年份。年降水量略少,且时空分布不均,冬夏季降水偏少、春季偏多、秋季正常。夏季局地性强降水过程较多,部分时段旱情明显。年内出现干旱、冰雹和暴雨、雷电等灾害性天气,给人民生命财产造成了较严重的损失。冬季降水偏少,尤其 1—2 月份,全市大部基本无有效降水,加之气温异常偏高,土壤失墒严重,各地旱情明显。4 月上旬—5 月上旬,全市降水偏少,各地出现不同程度旱情,北部山区旱情严重,给春播生产带来不利影响。6 月初开始全市连续无降水,气温偏高,干旱现象严重影响春播作物的生长,同时给工业生产和人民生活带来困难。从上述事实可知 2007 年秦皇岛市确实有干旱发生,从两个干旱指标的判断效果来讲,SPEI 能够较好地反映该年秦皇岛干旱事实,而 SPI 判断效果较差,没有准确反映该年秦皇岛干旱状况。

分析原因,温度对于干旱的强度、范围和持续时间都有重要的影响。温度对于干旱的影响,主要是通过影响蒸发速率而实现,当温度增加时,蒸发速率一般会

加快,这会加剧干旱的严重程度,反之亦然。SPEI 和 SPI 的计算过程是完全一致的,SPI 指数仅考虑了降水对干旱的影响,而 SPEI 指数既考虑了降水的亏缺也考虑了蒸发的变化,相比 SPI 更能准确地反映秦皇岛市干旱发生的实际状况。

3.3 不同季节内 SPI 和 SPEI 演变特征反映的干湿状况对比

从连续 3 个月尺度的 SPI 和 SPEI 序列中分别取 5 月、8 月、11 月、次年 2 月的 SPI,SPEI 值作为季节干湿指示值(图 3)。春季 SPEI 呈减小趋势,SPI

较为平稳,略有减少,夏季和冬季 SPI 和 SPEI 均呈明显减小趋势,秋季 SPI,SPEI 两个指数均呈现增大的趋势,可见在同一季节两个指数指示的干湿状况演变趋势是一样的,另外从图 3 上也可以看出,SPI,SPEI 的差距春季和秋季较明显、夏季和冬季差别不大;还可以得出,近 50 年秦皇岛市不同季节干湿状况存在相反变化,秋季呈现湿润化趋势,春、夏、冬呈现不同程度的干旱化趋势,尤其是夏季,干旱化趋势较为明显。秦皇岛年际和季节内干湿变化的不一致性表明,近年来年内降水分布的不均匀性有加大趋势。

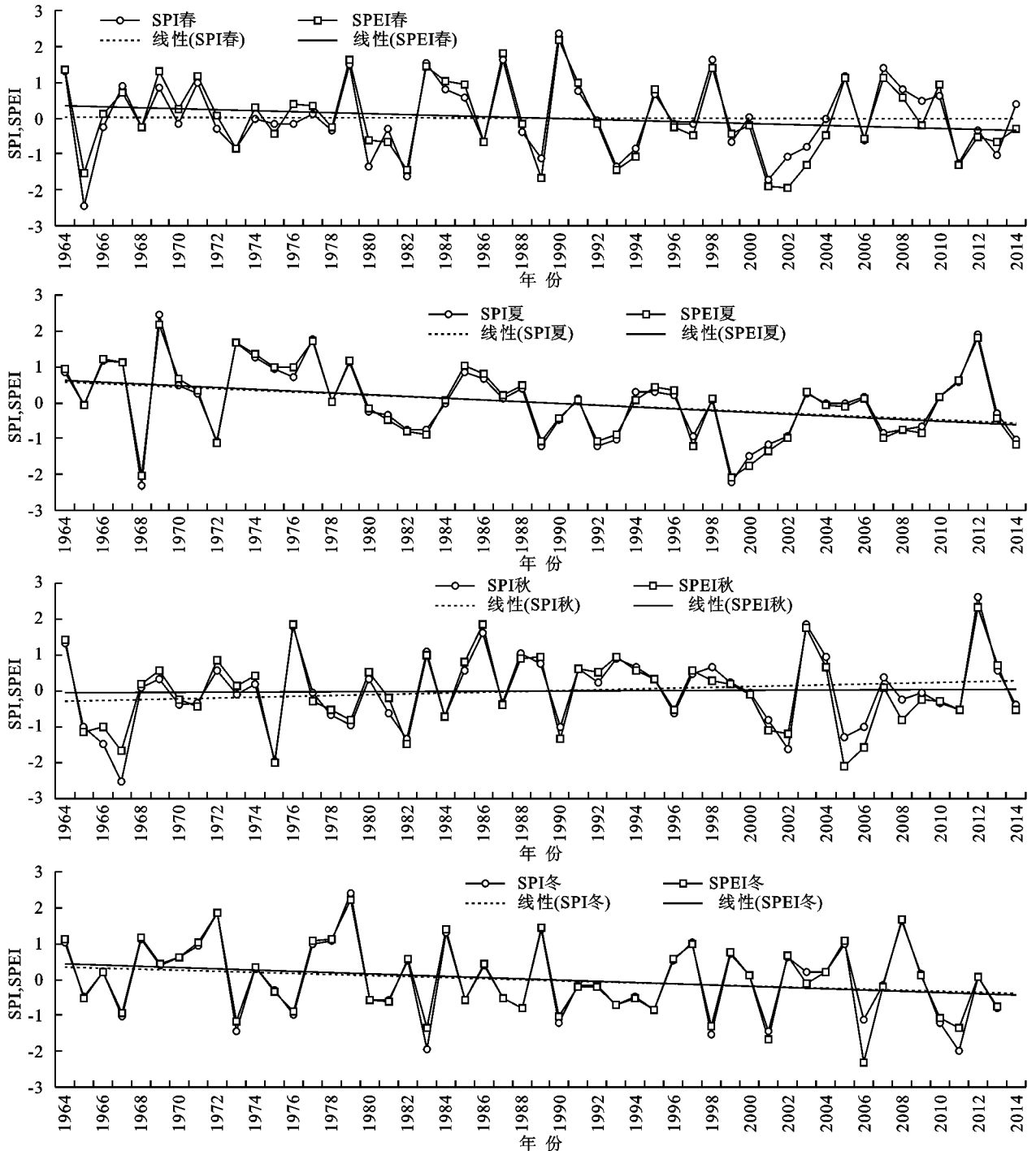


图 3 秦皇岛市 1964—2014 年不同季节内 SPI 和 SPEI 演变特征反映的干湿状况对比

4 结论

(1) 用降水距平百分率对秦皇岛市干旱发生状况进行分析,50年来秦皇岛干旱发生的频次逐渐增多,且干旱程度也较过去有所加重。

(2) 在本研究中,SPI和SPEI的比较存在一个明显的转折年份,1989年之前,秦皇岛市气温距平值基本为负值,在这期间SPI与SPEI数值变动趋势较为一致,在发生干旱的年份SPI均小于SPEI且差异不大。但在1989年以后,随着秦皇岛市气温距平值由负转为连续多年正值,两个指数差异增大,发生干旱时SPEI指数均小于SPI指数,加上SPEI在对于干旱等级的划分上,每增加一个干旱等级的数值较SPI小,反应更敏感,所以SPEI在监测的干旱程度较SPI监测的结果更重。比如2007年和2009年,SPI没有反映出干旱的发生,但是SPEI却已经诊断出有轻旱发生。说明温度变动对SPEI诊断干旱发生的影响较大,SPI指数仅考虑了降水对干旱的影响,而SPEI指数既考虑了降水的亏缺也考虑了蒸发的变化,随着秦皇岛温度逐年升高,SPEI相比SPI更能准确地反映秦皇岛市干旱发生的实际状况,更适合于进一步认识气候变暖。

(3) 秦皇岛春季SPEI呈现减小趋势,而SPI则较为平稳,略有减少,夏季和冬季SPI和SPEI均呈明显减小趋势,秋季SPI,SPEI两个指数均呈增大趋势,可见两个标准化干旱指数在同一季节指示的干湿状况演变趋势基本是一致的。

参考文献:

- [1] Wilhite D A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions[J]. *Drought: A Global Assessment*, 2000, 1: 3-18.
- [2] Qin D, Ding Y, Wang S, et al. Ecological and environmental change in west China and its response strategy [J]. *J. Adv. Earth Sci.*, 2002, 17(3): 314-319.
- [3] 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 中国水旱灾害[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [4] Keyantash J, Dracup J A, 周跃武, 等. 干旱的量化: 干旱指数的评价[J]. *干旱气象*, 2005, 23(2): 85-94.
- [5] 谭桂容, 孙照渤. 旱涝指数的研究[J]. *南京气象学院学报*, 2002, 25(2): 153-158.
- [6] 王石立, 庄立伟, 王馥棠. 近20年气候变暖对东北农业生产水热条件影响的研究[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(2): 152-164.
- [7] 卫捷, 马柱国. Palmer干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较[J]. *地理学报*, 2003(S1): 117-124.
- [8] 章大全, 张璐, 杨杰, 等. 近50年中国降水及温度变化在干旱形成中的影响[J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 655-663.
- [9] 孙力, 沈柏竹, 安刚. 中国东北地区地表干湿状况的变化及趋势分析[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(5): 542-552.
- [10] Hu Q S, Willson G D. Effects of temperature anomalies on the Palmer Drought Severity Index in the central United States[J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(15): 1899-1911.
- [11] Ma Z, Fu C. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(23): 2913-2925.
- [12] 谢安, 孙永罡, 白人海. 中国东北近50年干旱发展及对全球气候变暖的响应[J]. *地理学报*, 2003(S1): 75-82.
- [13] 魏凤英, 张婷. 东北地区干旱强度频率分布特征及其环流背景[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(3): 1-7.
- [14] 张淑杰, 张玉书, 蔡福, 等. 1961年至2007年东北地区水分盈亏变化趋势及其影响与响应[J]. *资源科学*, 2010, 32(4): 663-670.
- [15] 闫桂霞, 陆桂华, 吴志勇, 等. 基于PDSI和SPI的综合气象干旱指数研究[J]. *水利水电技术*, 2009, 40(4): 10-13.
- [16] Vicente-Serrano S M, Begueria S, López-Moreno 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] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// *American Meteorological Society: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Boston, MA, USA, 1993.
- [18] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标Z指数在我国应用的对比分析[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 523-529.
- [19] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55-94.
- [20] Vicente-Serrano S M, Begueria S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [21] 秦鹏程, 姚凤梅, 张佳华, 等. 基于SPEI指数的近50年东北玉米生长季干旱演变特征[C]// *中国气象学会. 第28届中国气象学会年会论文集*, 2011.
- [22] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [23] Svoboda M, LeCompte D, Hayes M, et al. The drought monitor[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1181-1190.