

基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究*

李伟光¹ 易 雪¹ 侯美亭² 陈汇林¹ 陈珍莉¹

(1. 海南省气候中心 海口 570203; 2. 中国气象局气象干部培训学院 北京 100081)

摘 要 标准化降水蒸散指数(SPEI)通过标准化潜在蒸散与降水的差值表征一个地区干湿状况偏离常年的程度,是分析干旱演变趋势的新理想指标,目前已经广泛应用于干旱评估、水资源管理等领域。用 SPEI 和 1951—2009 年中国区域 160 个站的月降水量及月平均气温资料,对中国 59 年来干旱化的空间分布、四季干旱趋势变化和全国极端干旱事件发生频次进行了分析,并定性分析了干旱发生的原因。结果表明,我国普遍存在干旱化的事实,西部、华北和东北地区干旱化最为显著。我国四季均呈现干旱化趋势,其中春、秋季干旱化趋势明显,夏季最近 15 年都处于干旱状态,但干旱化趋势未通过 0.05 显著性检验;另外全国极端干旱事件发生频率明显增多。东北和华北地区的降水呈现轻微减少趋势,而温度升高趋势明显,降水和温度的共同作用导致了明显的干旱化。四川盆地温度升高趋势不显著,但降水减少显著,降水较少是导致四川盆地干旱化的主要原因。降水频率的减少和集中也导致近几年极端干旱事件明显增多。我国普遍的干旱化趋势和明显增多的极端干旱事件可能对我国经济发展产生阻碍。

关键词 中国 干旱趋势 标准化降水蒸散指数 季节 极端干旱

中图分类号: S162.3; P467 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2012)05-0643-07

Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China

LI Wei-Guang¹, YI Xue¹, HOU Mei-Ting², CHEN Hui-Lin¹, CHEN Zhen-Li¹

(1. Hainan Climate Center, Haikou 570203, China; 2. China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China)

Abstract Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), calculated from the difference between potential evapotranspiration and precipitation, showed dry and wet deviations from normal conditions. This is generally used as an indicator for drought evolution trends in drought assessments, water resources management and other fields of hydrology. Using monthly mean surface air temperature and precipitation collected from 160 meteorological stations across China for 1951—2009, spatial distributions of seasonal drought trends and frequencies of extreme drought events were analyzed via SPEI. The results showed drying trends across the whole of China. The most significant drought was in the west, north and northeast of China. It was, however, wet in some regions of northern Xinjiang and the border regions of Sichuan and Yunnan. Drying trends existed for all four seasons, and were more obvious in spring and autumn. Summer was always dry in the last 15 years, although with a drying trend insignificant at the 0.05 level. Furthermore, the frequency of extreme drought increased significantly. Significant trends in temperature increase along with moderate trends in precipitation decline were noted for many stations in the northeast and north of China. The combined effects of precipitation and temperature caused significant droughts in the country. In the Sichuan Basin, precipitation significantly decreased with no significant change in temperature. Drought in Sichuan Basin was largely attributed to decreasing precipitation. In recent years, extreme drought events increased with decreasing frequencies of precipitation events in many areas of China. Widespread drought trends and significant increases in extreme drought events probably hindered China's economic development. SPEI-detected drought trends were mostly consistent with observed droughts in China, indicating that SPEI was an ideal index for monitoring drying trends.

Key words China, Drought trend, Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), Season, Extreme drought

(Received Jul. 29, 2011; accepted Dec. 28, 2011)

* 海南省自然科学基金项目(411098)和海南省气象科技项目(HN2010TDB4)资助

李伟光(1981—),男,硕士,工程师,主要从事气象干旱研究工作。E-mail: 163great@163.com

收稿日期: 2011-07-29 接受日期: 2011-12-28

干旱是影响农业生产、经济发展的最严重的自然灾害之一。研究表明,全球极端干旱面积正在扩大^[1-2]。大量的事实也揭示了中国北方地区干旱化正在加剧^[3-9]。赵海燕等^[3]通过分析农业受旱面积和播种面积资料,认为东北、内蒙古和西北地区的农业干旱有显著加重趋势。梁泽学等^[4]发现半干旱区东移,河套地区四季均表现出干旱化。路桂华等^[5]指出辽河平原-海河平原-黄土高原-四川盆地-云贵高原形成了一个干旱化带状区域,干旱频率增加,特别是20世纪90年代中期以来,干旱连年发生,旱情较为严重。马柱国等^[6]认为西北东部和华北的干旱化趋势在近15年间不断加剧,降水减少和气温升高是其主要原因。章大全等^[8]指出未来5年内干旱发生概率较大的地区主要分布在中国华北,且有持续向南扩张的趋势,降水减少仍然是中国东部干旱形成的主要因素。另有一些学者认为我国南方地区干旱的季节性特征表现为春旱和秋旱有加重趋势,而夏旱和冬旱有减轻趋势^[10]。

干旱成因复杂,易受人类活动影响。目前,研究者普遍使用干旱指数来简化复杂的干旱现象。常用的干旱指数包括Palmer干旱指数(PDSI)、作物水分指数以及标准化降水指数(SPI)等^[11]。PDSI是干旱指标研究的里程碑,其基于水分供需平衡,结合前期降水、湿度、蒸发、水文等因子,使极端干旱和湿润测量成为可能。但PDSI指数也有一些局限性,例如,主要适用于干旱、半干旱区域,在旱情等级界定上有主观因素,在判断极端旱情时可能会滞后几个月。SPI能够较好地反映干旱强度和持续时间,使得用同一干旱指标反映不同时间尺度和不同区域的干旱状况成为可能^[12],因而得到广泛应用。但SPI指数的主要缺点是其仅考虑降水资料,未考虑影响干旱的其他因素如温度、蒸散等。因为降水是决定干旱发生、发展变化和终止最重要的因素,所以在6~12个月时间尺度上SPI与PDSI一致性非常高。PDSI指标能够明显反映由于增温而出现的干旱化,而SPI却不能^[13]。

Vicente-Serrano等^[14-15]提出了标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI),该指数基于降水和蒸散,它既保留了PDSI考虑蒸散对温度敏感的特点,又具备SPI计算简单、适合多尺度、多空间比较的优点。SPEI指数特别适于检测和监测全球变暖背景下干旱的变化特征。SPEI指数一经提出就被用于各方面的干旱研究,Vicente-Serrano用该指数建立了1901—2006年全球干旱趋势的数据集^[15]以检测全球干旱分布。SPEI指数还被广泛应用于干旱评估^[16]、水文干旱分析^[17]等研究领域。

本文将SPEI指数这一计算简便、用途广泛的新干旱指数引入中国,利用我国气象站点资料,探索基于SPEI指数的中国近59年(1951—2009年)干旱化特征,系统地认识干旱化的时空趋势。

1 材料与方法

1.1 数据资料

本文所用数据资料为中国气象局国家气候中心用于气候变化监测的160个代表站在1951—2009年月降水和月平均气温资料,站点的分布见图1a。

1.2 计算方法

Vicente-Serrano的SPEI指数计算方法^[14]如下:

首先计算潜在蒸散(PET)。Vicente-Serrano推荐的是Thornthwaite方法,该方法的优点是考虑了温度变化,能较客观地得出地表潜在蒸散。

第二步用公式(1)计算逐月降水与蒸散的差值:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

式中, D_i 为降水与蒸散量的差值, P_i 为月降水量, PET_i 为月蒸散量。

第三步如同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指数。由于原始数据序列 D_i 中可能存在负值,所以SPEI指数采用了3个参数的log-logistic概率分布。log-logistic概率分布的累积函数为:

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

式中,参数 α 、 β 、 γ 分别采用线性矩的方法拟合获得:

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (4)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta) \quad (5)$$

式中, Γ 为阶乘函数, w_0 、 w_1 、 w_2 为原始数据序列 D_i 的概率加权矩。计算方法如下:

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i \quad (6)$$

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N} \quad (7)$$

式中, N 为参与计算的月份数。

然后对累积概率密度进行标准化:

$$P = 1 - F(x) \quad (8)$$

当累积概率 $P \leq 0.5$ 时:

$$w = \sqrt{-2 \ln(P)} \quad (9)$$

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \quad (10)$$

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

当 $P > 0.5$ 时:

$$P = 1 - P \quad (11)$$

$$SPEI = - \left(w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \right) \quad (12)$$

1.3 SPEI 指数干旱等级标准

SPEI 指数与 SPI 指数一样,是对表征干旱特征

量的标准化,反映的是当年干旱偏离正常年份的程度。本文中 SPEI 指数与发生频率和干旱程度一般按照以下标准进行划分(表 1)。

2 1951—2009 年全国干旱化事实的结果分析

2.1 全国气温和降水的变化趋势

利用 160 个站点的月平均气温和月降水资料,计算了每个站点温度和降水 2 个变量 1951—2009 年的线性倾向系数(图 1)。图 1a 给出了 1951—2009 年中国区域气温变化趋势空间分布图。从图 1a 可以看出,全国范围内,除新疆中部、四川盆地和川、滇交界地区有较小的气温下降趋势外,其他地区均表现增暖趋势。我国增暖的总体趋势表现为北方强南方弱,这与全球增暖的空间分布一致,且全国大部分地区增温趋势显著。中国北方地区增温率变化的分布大体上为东部大西部小,其中东北地区、华北北部地区、西北西部地区,增温率超过 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。较小增温区位于内蒙古西部和甘肃西部地区,增温率为 $0.1\sim 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。在南方(长江以南),大部分地区也表现出增温趋势,增温率为 $0.1\sim 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。在西南地区北部,包括四川盆地东部和云贵高原北部,

年平均气温呈下降趋势,但并不显著。这个区域的降温现象早在多年前就已发现^[18],20 世纪 90 年代中开始略有回暖,但在所分析的时段内仍然表现为弱降温趋势。

图 1b 为 1951—2009 年中国区域降水变化趋势空间分布图。从图 1b 可以看出,降水总的变化趋势为东部减少,西部增加。除西北地区、江淮流域、江南中部及西南西部地区外,其余地区降水均呈减少趋势,其中降水减少较多的区域为西南东部、华北中部、华南南部和东北南部。但无论减少还是增加趋势,大部分地区均未通过显著性检验,说明年降水量的变化趋势未达到显著水平。

2.2 全国 SPEI 指数的空间变化趋势

图 2 给出了 1951—2009 年中国区域 SPEI 指数变化趋势空间分布图。由图 2 可以看出,除新疆北部、西北地区东南部、四川盆地部分地区和川滇交界地区有变湿趋势外,其余各地均呈现不同程度的变干趋势,且东北、华北、新疆南部、西南部分地区干旱化趋势明显。对比图 1 可知,我国东北、华北地区、东南内陆地区的干旱化是由降水减少和温度升高共同引起的;在江淮流域、江南中部、西北

表 1 SPEI 指数干旱等级划分与累积概率
Table 1 SPEI grade standard divided for drought and its cumulative probability

	极端干旱 Extreme drought	中度干旱 Moderate drought	轻度干旱 Mild drought	正常年份 Normal
SPEI	≤ -2.0	≤ -1.0	≤ -0.5	0
累积概率 Cumulative probability (%)	2.28	15.87	30.85	50.00

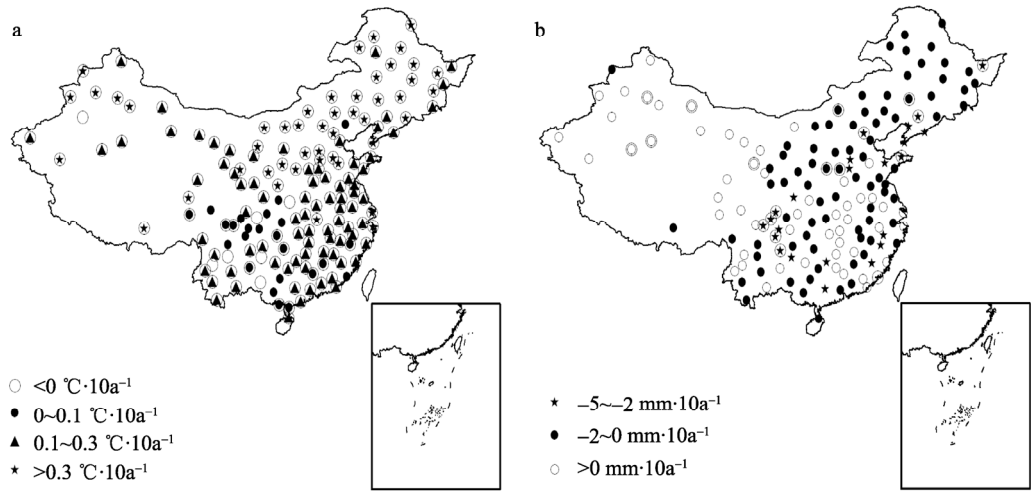


图 1 1951—2009 年中国区域年均气温(a)和降水(b)的线性变化趋势空间分布图

Fig. 1 Map of China meteorological station sites and linear trends in mean annual air temperature (a) and precipitation (b) for 1951—2009
站点外面圆圈表示通过 0.05 的显著性检验,下同。Circles around stations mean statistically significant at 95% confidence level. The same below.

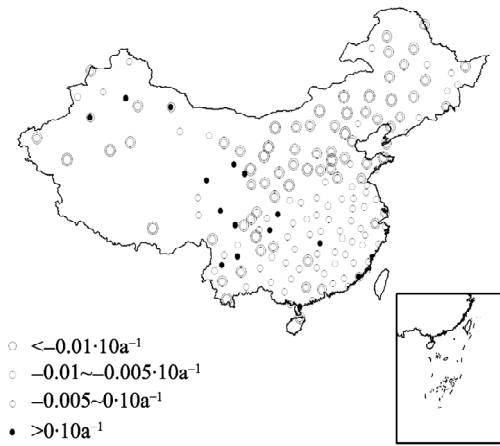


图 2 1951—2009 年中国区域 SPEI 指数的线性变化趋势空间分布图

Fig. 2 Distribution map of SPEI linear trends in China for 1951—2009

大部分地区 and 东南沿海地区, 尽管降水有轻微增加趋势, 但该地区的增温趋势更为显著, 温度升高导致蒸散加大, 使得该地区呈现变干趋势; 我国部分地区有变湿的趋势, 其中大部分是由于降水增多引起的, 尽管这些地区温度升高, 但由于降水量大于蒸散量, 而使得这些地区变湿。少部分变湿地区 (西南部分地区, 该区域未通过显著性检验) 为降水减少且温度降低的区域, 这种降温趋势对干旱强度的加大起到一定的遏制作用, 原因是温度降低引发蒸散减少, 蒸散减少将有利于地表水分的保持。由此可见, 温度在干湿变化过程中起着重要的作用。

2.2.1 全国平均 SPEI 指数年际变化及突变检测

图 3 给出了全国平均 SPEI 指数年际变化及其 Mann-Kendall (M-K) 检验曲线。由 UF 曲线可知, 近

59 年来全国平均 SPEI 指数呈现持续下降趋势, 从 1998 年至今这种下降趋势均超过了显著性水平 0.05 临界线, 甚至 2000 年以后超过 0.001 显著性水平 ($u_{0.001}=2.56$), 说明全国变干趋势显著。在显著水平 0.05 的临界线内, UF、UB 曲线相交于 1997 年, 这是全国年平均 SPEI 指数突变的开始。年平均 SPEI 指数在突变前后的平均值相差 0.185。从全国平均 SPEI 指数年际变化来看, 20 世纪 90 年代至今全国一直出现不同程度干旱, 且干旱趋势明显增强。

2.2.2 全国四季 SPEI 指数的年际变化及突变检测

图 4 给出了不同季节全国平均 SPEI 指数的年际变化及其 M-K 检验。可以看出, 我国四季均有变干趋势, 其中春、秋季变干趋势的变率最大。由图 4a 可知, 自 20 世纪 60 年代以来, 全国春季平均 SPEI 指数持续下降, 说明我国春季有变干趋势, 且到 2000 年以后这种变干趋势更为明显 (超过显著性水平 0.05 的临界线, 甚至超过 0.001 显著性水平)。在显著性水平 0.05 的临界线之间, UF、UB 曲线相交于 1996 年, 这是我国春季干旱突变的开始。由图 4b 可知, 我国夏季在 2004 年以后出现变干趋势, 但这种趋势没有超过 0.05 显著性水平。由图 4c 可知, 我国秋季从 20 世纪 80 年代开始, 有干旱化趋势, 且 1996 年以后这种趋势均大大超过显著性水平 0.05 的临界线, 表明秋季干旱趋势显著; 由 UF、UB 曲线交点可知, 1992 年是我国秋季干旱突变的开始。由图 4d 可知, 自 20 世纪 60 年代以来, UF 值一直小于 0, 说明从那时起我国冬季开始变干, 但这种干旱趋势并不明显, 未超过显著性水平 0.05 的临界线。由此可知, 我国春季和秋季有明显变干趋势, 且春季变干的开始年份要早于秋季。

2.3 1951—2009 年全国极端干旱事件频次变化趋势

极端干旱往往造成严重的自然灾害, 给农业生产及人们的日常生活带来极大威胁。因此分析了我国 1951—2009 年的极端干旱频率变化趋势。分别计

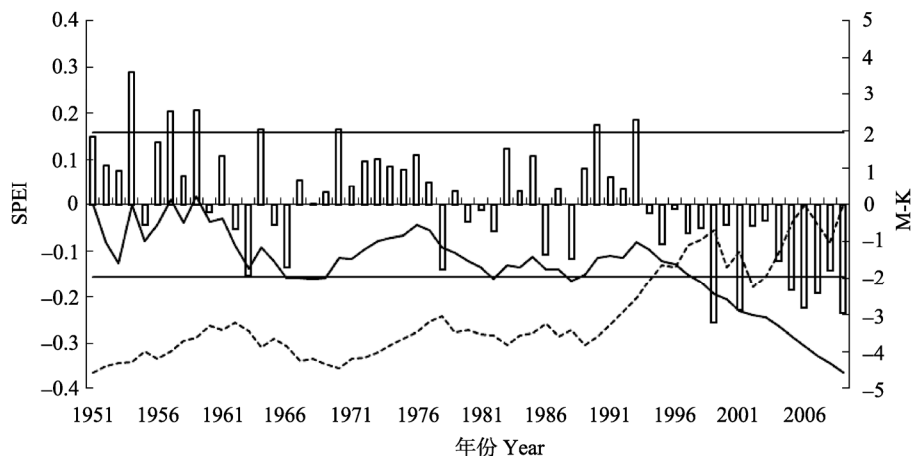


图 3 1951—2009 年全国平均 SPEI 指数年际变化及 M-K 突变检验曲线

Fig. 3 Interannual variation and Mann-Kendall test curves of average SPEI in China for 1951—2009

图中两条曲线分别为 UF (实) 线和 UB (虚) 线, 直线为 $\alpha=0.05$ 显著性水平临界线, 下同。Solid line and dashed line are UF line and UB line respectively. Horizontal line is 0.05 significance line. The same below.

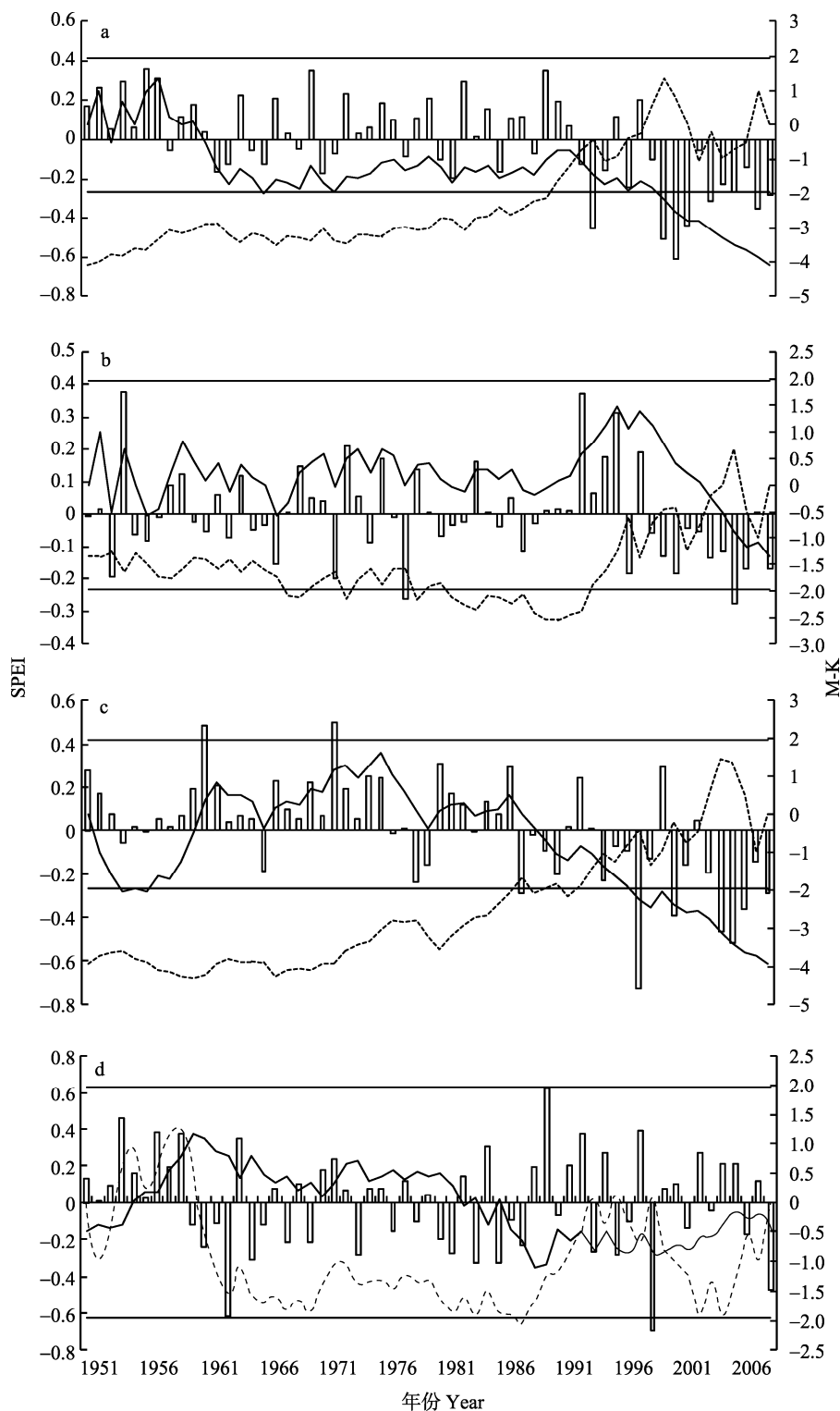


图 4 1951—2009 年 SPEI 指数春季(3—5 月, a)、夏季(6—8 月, b)、秋季(9—11 月, c)和冬季(12—2 月, d)年际变化及 M-K 检验曲线

Fig. 4 Interannual variation and Mann-Kendall test of average SPEI in spring (from March to May, a), summer (from June to August, b), autumn (from September to November, c) and winter (from December to February, d) for 1951—2009 in China

算 59 年每个站的逐月 SPEI 值, 当月 $\text{SPEI} \leq -2$ 时, 即认为极端干旱月; $\text{SPEI} \leq -1$ 时, 即认为中度干旱月。每站发生 1 次记为 1 站次, 分别计算各年代全国极端干旱发生的站次数。由图 5a 可以看出, 1951—2009 年全国极端干旱事件发生的次数明显增加, 20 世纪 70 年代

发生极端干旱的频率最小, 21 世纪初发生极端干旱的频率最大。发生极端干旱频率最大的年代和最少的年代相比, 两者相差约 4.9 倍, 说明本世纪初极端干旱事件发生频繁。极端干旱事件每 10 年增加 74 站次。由各年代月 $\text{SPEI} \leq -1$ 所发生的频次(图 5b), 可以看出

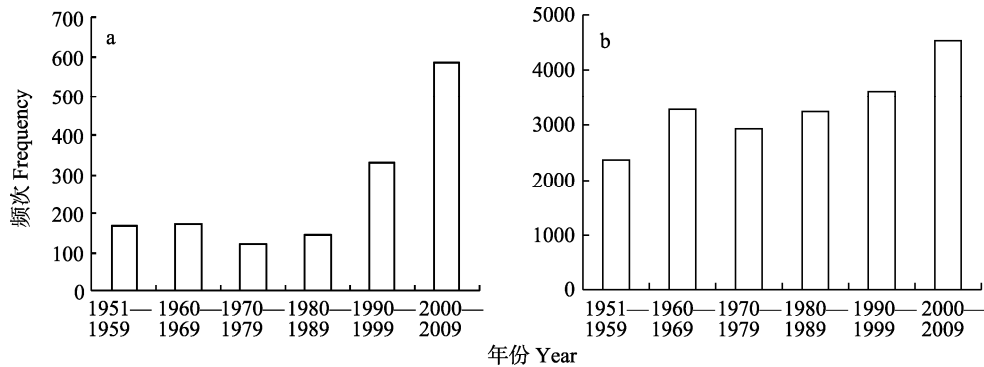


图 5 1951—2009 年全国不同年代极端干旱事件(a)和中度干旱事件(b)频次

Fig. 5 Frequency of extreme drought events (a) and moderate drought events (b) during different years for 1951—2009 in China

1951—2009 年全国年代际干旱的发生频率有一个明显的增加趋势, 其中 20 世纪 50 年代发生频率最小, 21 世纪初频率最大, 20 世纪 80 年代后逐年代际增加。但中度干旱发生频次的增长速度没有极端干旱事件增长的快。

3 讨论与结论

利用标准化降水蒸散指数(SPEI)以及全国 160 个站的月降水和月平均气温资料, 对我国干旱气候变化、四季干旱趋势以及极端干旱发生频率进行分析, 得到以下几点事实:

从空间分布上看, 1951—2009 年, 我国大部分地区增温趋势显著, 总体趋势是北方大南方小, 降水变化趋势为东部减少、西部增加, 但大部分地区变化趋势没有通过显著性检验, 这与过去研究结果一致^[18-19]。从干旱指数反应的干湿情况可以发现, 除新疆北部、西北东南部、四川盆地部分地区和川滇交界局地有变湿趋势外, 其余各地均呈现不同程度的变干趋势, 且东北、华北、新疆南部、西南部分地区干旱化趋势显著。这与前人研究结果^[3-8]基本一致。新疆北部由于降水增多^[20]而出现变湿现象, 另外, 伴随着全球升温, 该地区冰川加速消融, 地表径流增大^[21]也导致该地区变湿。本研究中, 新疆和西藏地区所用站点数量较少, 这两个地区干湿演变情况需要更多观测数据进一步分析证实。

从时间变化上看, 全国平均 SPEI 有下降趋势, 说明全国整体上呈现变干趋势, 且 1997 年是我国干旱化的突变点。20 世纪 90 年代以来, 我国干旱化趋势非常明显。四季均有变干趋势, 其中春、秋季变干明显。夏、冬季干旱化趋势相对不显著, 但近 15 年来夏季始终处于相对干旱阶段。夏季是我国大部分地区降水的主要季节, 若按这个趋势发展下去, 将严重影响我国农业生产。20 世纪 80 年代以后, 我国极端干旱发生频次明显增加, 21 世纪初全国极端干旱出现的次数比 20 世纪 90 年代多了将近 1 倍。极端干旱是产生经济损失的主要事件^[22]。近年来极端干旱事件的迅速增长, 对我国的防灾减灾措施提出了更高要求。

我国东北和华北地区的干旱化主要是温度升

高、蒸散加剧造成的。该地区降水呈现轻微减少趋势, 而温度升高趋势明显, 降水和温度的共同作用导致了明显的干旱化。另一个集中的干旱化区域是四川盆地, 该地区温度升高趋势不显著, 但降水显著减少, 降水较少导致了四川盆地区域的干旱化。温度和降水变化在干旱化事件中的作用的定量化需要进一步研究。此外, 降水频率的减少和集中^[23]也是导致极端干旱事件发生的重要原因。

标准化降水蒸散指数(SPEI)同标准化降水指数(SPI)一样, 假定所有地区发生干旱的频率相同并对数据进行标准化, 表征某一时段的干湿程度与该地区历史同时期状况的对比, 在分析不同区域的干旱趋势方面具有先天性优势。与 SPI 指数相比, SPEI 指数分析干旱演变的趋势时, 考虑了温度变化引起的水分收支变化的影响, 使得干旱及干旱化趋势结果更趋客观。与 Palmer 干旱指数(PDSI)相比, PDSI 指数只适用于半干旱半湿润气候, 而 SPEI 指数的使用范围更广。另外, SPEI 指数可进行多尺度计算, 表征不同的意义^[15], 在水资源管理方面具有非常广的应用前途^[17]。

参考文献

- [1] 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[J]. J Hydrometeor, 2004, 5(6): 1117–1130
- [2] Nicholls N. The changing nature of Australian droughts[J]. Clim Change, 2004, 63(3): 323–336
- [3] 赵海燕, 张强, 高歌, 等. 中国 1951—2007 年农业干旱的特征分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4): 201–206
- [4] 梁泽学, 江静. 中国北方地区 1961—2000 年干旱半干旱化趋势[J]. 气象科学, 2005, 25(1): 9–17
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 马柱国, 符淙斌. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征[J].

- 地球物理学报, 2005, 48(3): 519–525
- [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] 黄会平. 1949—2007 年全国干旱灾害特征、成因及减灾对策[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(11): 94–98
- [10] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 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[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50–59
- [11] Heim R R Jr. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2002, 83(8): 1149–1165
- [12] 李伟光, 陈汇林, 朱乃海, 等. 标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 178–182
- [13] Dubrovsky M, Svoboda M D, Trnka M, et al. Application of relative drought indices in assessing climate-change impacts on drought conditions in Czechia[J]. Theor Appl Climatol, 2009, 96(1/2): 155–171
- [14] Vicente-Serrano S M, Beguería 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
- [15] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: Comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index[J]. J Hydrometeor, 2010, 11(4): 1033–1043
- [16] Vicente-Serrano S M, López-Moreno J I, Lorenzo-Lacruz J, et al. The NAO impact on droughts in the Mediterranean region[J]. Advances in Global Change Research, 2011, 46: 23–40
- [17] Jaranilla-Sanchez P A, Wang L, Koike T. Modeling the hydrologic responses of the Pampanga River basin, Philippines: A quantitative approach for identifying droughts[J]. Water Resources Research, 2011, 47: W03514
- [18] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942–956
- [19] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 701–716
- [20] 胡汝骥, 马虹, 樊自立, 等. 新疆水资源对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 1–27
- [21] 柳葳, 许有鹏, 黄云. 气候变暖对新疆降水和径流影响分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(5): 597–602
- [22] 翟盘茂, 章国材. 气候变化与气象灾害[J]. 科技导报, 2004(7): 11–14
- [23] 张录军, 钱永甫. 长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 33–42