

基于 SPEI 的中国西北地区气象干旱变化趋势分析

任培贵, 张勃, 张调风, 李小亚, 陈乐, 卢李朋

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 中国西北地区深居欧亚大陆腹地, 是同纬度最干旱的地区之一, 如果持续干旱, 将对该地区社会经济发展产生严重的影响。因此, 深入研究西北地区的干旱特征, 为制定改善生态环境, 促进西北经济发展有着重要的意义。标准化降水蒸散指数(SPEI)将温度对蒸散的影响融合在内, 是全球气候变暖背景下研究干旱的新理想指标。采用 1959—2011 年西北地区 149 个具有代表性的气象站点的资料, 对西北地区近 53 a 干旱时空变化进行分析。结果表明, 西北地区普遍存在干旱现象。从年际变化来看, 该区呈变干趋势, 1996 年发生突变。从季节的变化来看, 春、夏、秋明显变干, 冬季有变湿趋势; 变湿趋势不明显。春、夏、秋季发生突变, 冬季突变不明显。从空间变化来看, 春、夏秋大部分地区呈变干趋势, 冬季大部分呈变湿趋势。与年鉴资料对比的结果进一步证明 SPEI 指数在西北地区具有较好的适用性。

关键词: SPEI; 西北地区; 干旱趋势; 季节变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0182-06

中图分类号: S157

Trend Analysis of Meteorological Drought Change in Northwest China Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

REN Pei-gui, ZHANG Bo, ZHANG Tiao-feng, LI Xiao-ya, CHEN Le, LU Li-peng

(College of Geographic and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Northwest China lies in the Eurasia hinterland, which is one of the driest regions as compared with the areas in the same latitude. If drought persists, it will have a severe impact on social and economic development of the northwest region. Therefore, study of drought characteristics in Northwest China is of great significance to the eco-environment improvement and the promotion of economic development in the region. Standardized precipitation evapotranspiration index(SPEI) combining the influence of temperature on evapotranspiration is a new ideal indicator in the research on drought under the background of global warming. The data from 149 representative meteorological stations in Northwest China in 1959—2011 were used to analyze the temporal and spatial variation of drought. Results showed that drought was a universally existed fact in the northwest. From the inter-annual perspective, the region showed a drought trend with an abrupt change in 1996. Form the seasonal changes, the weather became drought in spring, summer and autumn, and had a humid tend in winter, which is not obvious. Worsening trend occurred in spring, summer and autumn, but was not obvious in winter. Spatially, most regions had a drought trend in spring and summer and a humid tend in winter. Compared with almanac data, SPEI, as a drought index, is confirmed to be applicable in Northwest China.

Keywords: SPEI; Northwest China; drought trend; seasonal changes

干旱是指水分收支不平衡时形成的一种水分短缺现象, 是全球最严重的自然灾害之一。近年来, 在气候变暖背景下, 干旱已成为一个严重危及人类生存的环境问题, 从而引起了科学界的普遍关注。IPCC

报告指出 20 世纪末以来, 全球增温普遍升高, 温度升高导致地表蒸散量加强, 降水呈现出很强的区域性^[1], 从而使干旱趋势进一步加剧。中国西北地区深居欧亚大陆腹地, 主要受纬度西风、亚洲季风以及高

收稿日期: 2013-05-16

修回日期: 2013-05-31

资助项目: 国家自然科学基金项目“水资源约束下的黑河流域土地利用覆盖变化模拟研究”(40961038); 生态经济学省级重点学科(5001-021); 西北师范大学知识与科技创新工程项目(NWNU-KJXG-03-66)

作者简介: 任培贵(1987—), 男(汉族), 甘肃省庆城县人, 硕士研究生, 研究方向为区域环境与资源开发。E-mail: renpeigui@163.com。

通信作者: 张勃(1963—), 男(汉族), 甘肃省华池县人, 博士, 教授, 主要从事区域环境与资源开发教学与研究。E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn。

原季风的扰动^[2-4],是同纬度最干旱的地区之一^[5],同时西北地区也是生态脆弱区和气候变化敏感区^[6],如果干旱进一步加强,将使得该区出现缺水、沙漠化加剧、生态环境恶化等问题,进而影响本区的社会经济发展。因此,在全球变暖背景下,深入研究西北地区干旱的演变特征,为及时制定改善生态环境状况的决策、调整区域农业种植制度和促进西北经济可持续发展有着十分重要的意义。

干旱指数是反映地面干湿状况的一个指标^[7],各干旱指数的研究机理不尽相同,在每个地区的适用性也不一样,所以客观、合理地选择干旱指标,对于干旱的研究具有重要的现实意义^[8]。近年来,众多学者从降水、蒸散量等方面运用气象干旱指数对研究区的干旱演变特征进行了分析,主要分为两类:一类是研究降水量的分布规律,以 SPI 和 Z 指数为代表^[9],另一类是研究形成干旱的各个物理过程,以相对湿度指数(MI)和帕默尔干旱指数(PDSI)为代表^[10]。但经过研究证明这些干旱指数都存在一定的局限性^[11]。Vicente—Serrano 等^[12-13]提出了标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI),该指数通过降水和蒸散量来反映干旱的程度,是全球变暖背景下研究干旱的新的理想指标。SPEI 指数被许多专家和学者用来研究干旱的变化特征,如石崇等^[14]用 SPEI 干旱指数对东半球陆地干旱变化特征进行了研究,李伟光等^[15-16]运用该指数分析了中国华南的干旱变化特征,王文举等^[17]用该指数分析了湖北省的干旱演变特征,王林等^[18]基于 SPEI 干旱指数分析了近百年来西南地区干旱的演变特征,结果表明该指数能很好地反映研究区的干旱状况。SPEI 干旱指数在西北地区还没有被运用过,因此有必要把该指数用在西北地区对其干旱进行研究,一是验证在西北地区的适用性,二是分析本地区干旱的演变特征。

1 数据来源和分析方法

1.1 研究区概况

中国西北地区(73°25′—110°55′E 和 31°35′—49°15′N)包括新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西以及内蒙古的西部,面积约占国土面积的 30%。由于该区深居内陆,水分供给主要靠大气降水,四周多高山,来自海洋的湿润气流很少能够到达,因而,成为同纬度最干旱的地区之一^[19]。加之本区气温和降水受到地貌和气候类型复杂性的影响,年均气温和降水从东南向西北呈逐渐减小趋势,分布很不均匀^[20],最终使西北地区成为一个多气候类型共存的区域,导致干旱在时空上

表现出多变性。由于干旱的复杂性,使得该区的植被从东南向西北依次为草原—荒漠草原—荒漠的特征。

1.2 数据来源

本文收集了中国气象局整编的西北地区 173 个国家标准气象站点 1959—2011 年的逐月常规观测数据,包括月降水和月平均气温等资料。我们对研究期多年数据资料进行了严格的质量控制和筛选,对部分不合理和缺失数据进行了必要的处理,最终选取了 173 个站点中的 149 个作为研究对象,建立了 1959—2011 年气象因子的时间序列。

1.3 SPEI 指数计算过程

SPEI 计算过程如下:

第 1 步:计算潜在蒸散量(P_{ET})。Vicente—Serrano 推荐的是 Thornthwaite 方法:

$$P_{ET} = 16.0 \times \left(\frac{10T}{H} \right)^A \quad (1)$$

式中: P_{ET} ——潜在蒸散量; T ——月平均温度(°C); H ——年热量指数; A ——常数。

第 2 步:计算逐月降水量与蒸散量的差值:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

式中: D_i ——降水量与蒸散量的差值; P_i ——月降水量(mm); PET_i ——月蒸散量。

第 3 步:采用 3 个参数的 log-logistic 概率分布对 D_i 数据序列进行正态化,计算每个数值对应的 SPEI 指数:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (3)$$

式中: $F(x)$ ——概率密度函数; x ——概率密度函数自变量;参数 α, β, γ 的计算如下:

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2} \quad (5)$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta) \quad (6)$$

式中: Γ ——阶乘函数; $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ ——数据序列 D_i 的概率加权矩:

$$\omega_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i \quad (7)$$

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N} \quad (8)$$

式中: ω_s ——数据序列 D_i 的概率加权矩; N ——参与计算的月份个数。

最后对累计概率密度进行标准化:

$$P = 1 - F(x) \quad (9)$$

当累计概率 $P \leq 0.5$ 时:

$$\omega = \sqrt{-2\ln(P)} \quad (10)$$

$$SPEI = \omega - \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} \quad (11)$$

式中： $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ ——参数。

当 $P > 0.5$ 时：

$$P = 1 - P \quad (12)$$

$$SPEI = -(\omega - \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3}) \quad (13)$$

1.4 SPEI 指数干旱等级划分

前人对各干旱指数进行了干旱等级的划分,但关于 SPEI 干旱阈值目前还没有一个统一的标准。李伟光等^[16]用 SPEI 指数的不同干旱阈值对全国和华南地区的干旱演变进行了分析研究,王琳等^[18]基于 SPEI 干旱指数自定义的干旱等级分析了近百年来西南地区干旱的演变特征,结果和历史干旱事件基本符合。在本文中我们参考李伟光等^[15]对全国划分的干旱等级,初步划分 SPEI 指数的干旱等级(表 1)。

表 1 SPEI 指数干旱等级划分

干旱等级	极端干旱	中度干旱	轻度干旱	正常年份
SPEI	≤ -2	$-2 \sim -1$	$-1 \sim -0.5$	$-0.5 \sim 0$

2 结果与分析

2.1 SPEI 的年际和四季变化特征

为了揭示干旱在年际和不同季节的具体情况,分别分析了 1959—2011 年西北地区年际和四季的干旱波动情况。从图 1 可以看出,西北地区近 53 a 来平均 SPEI 值呈下降趋势,下降率为 0.16/10 a;1996 年之前 SPEI 值波动较平缓,1996 年之后 SPEI 迅速下降,其速率达 0.362/10 a。从四季变化可以看出,春季呈下降趋势,以 0.147/10 a 的速率下降,西北地区处在高压脊内,经常受到西风带的影响,所以造就了该区春季降水少,地面升温快,风大,潜在蒸散量大等气候特点。夏季呈下降趋势,以 0.111/10 a 的速率下降,初夏的时候西北地区高空受副热带高压活动的影响,因而南支波动减弱,导致此时本区域为相对少雨干旱季节。秋季呈下降趋势,以 0.127/10 a 的速率下降,因为在西北地区 10 月后每年几乎有一次强烈的极地冷空气向南扩散,从而使得大气环流形势发生巨大变化,导致西太平洋副热带高压南退,西风带环流活动频繁,冬季环流形势加强,从而使降水减少,出现少雨干旱的气候类型。冬季 SPEI 呈上升趋势,其速率为 0.11/10 a,可能冬季温度低蒸发少所致^[21]。年际和春、夏、秋季的 SPEI 值均呈缓慢下降趋势,从而说明干旱有缓慢加重之趋势。

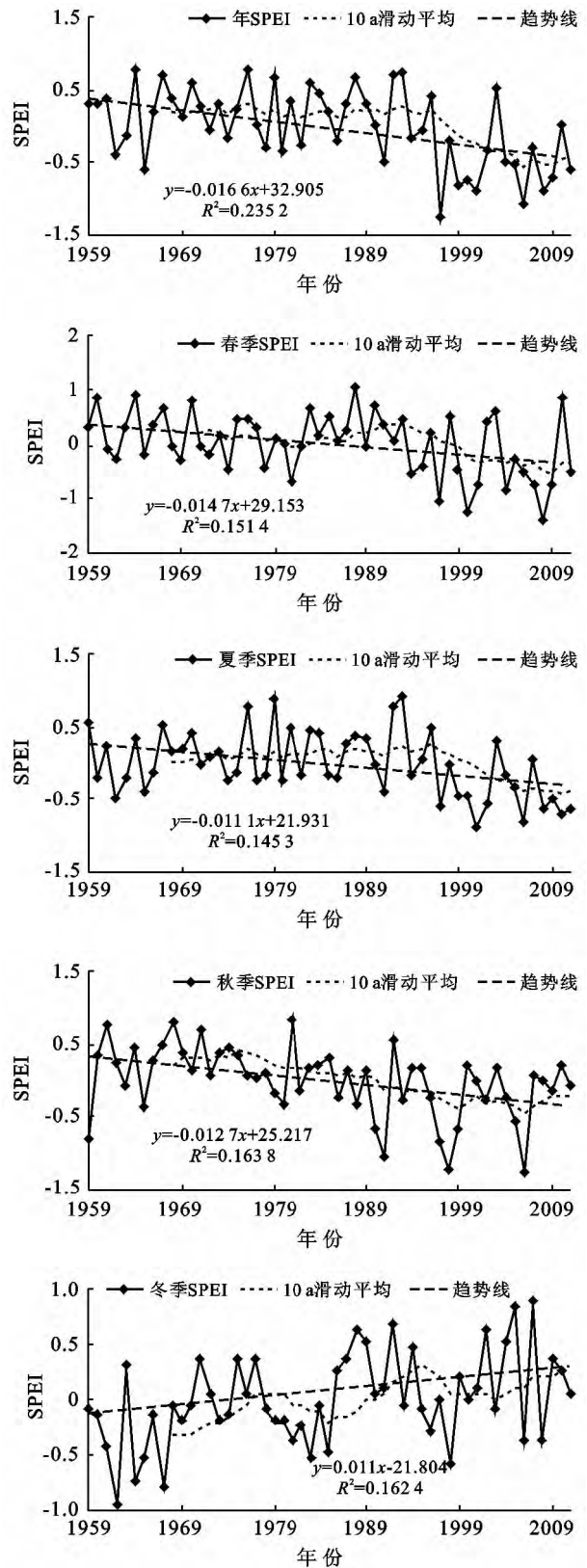


图 1 1959—2011 年西北地区干旱年际和四季变化趋势

2.2 SPEI 年际和四季突变检验

分析图 2 可知,西北地区近 53 a 来全区平均 SPEI 指数整体呈现出持续下降的趋势,从 2006 年至今这种下降趋势超过了显著性水平 0.05 临界线。在

显著水平 0.05 的临界线内,UF 和 UB 曲线相交于 1996 年,这是西北地区平均 SPEI 指数突变的开始。分析图 2a 可知,西北地区春季平均 SPEI 指数在 1970—1989 年呈现下降趋势,1989—1994 年略有上升趋势,但从 1994 年至今呈下降趋势,且在 2007 年达到了下降趋势 0.05 的显著水平;UF 和 UB 相交于 1998 年前后,说明 1998 年是个突变年份。由图 2b 可知,夏季平均 SPEI 指数在 1967—1999 年呈现上升趋势,上升趋势不明显,从 1999 年至今呈现下降趋势,在 2008 年下降趋势达到了 0.05 的显著水平;UF 和 UB 相交于 2005 年前后,说明 2005 年是个突变年份。由图 2c 可知,秋季从 20 世纪 70 年代后期开始,平均 SPEI 指数呈下降趋势,且在 1997 年以后这种下降趋势超过了显著性水平 0.05 的临界线,说明西北地区秋季干旱化趋势明显;UF 和 UB 相交于 1980 年前后,说明 1980 年是个突变年份。由图 2d 可知,冬季平均 SPEI 指数从 20 世纪 70 年代开始上升,甚至在 2005 年达到了 0.05 的显著水平;突变不明显。综上可知,西北地区除冬季外都有明显的变干趋势,突变发生的年份不一致,近 10 a 干旱有明显加重趋势。

2.3 SPEI 的空间变化特征

中国西北地区气温和降水量时空变化上均存在不平衡性,加之受到地貌及气候类型的影响,其干旱发生在空间分布上也表现出一定的复杂性。图 3 为西北地区 1959—2011 年四季 SPEI 线性变化趋势空间分布图,不同季节的干旱演变在空间上差异性较大;夏季干旱加重趋势最显著,春季和秋季次之,冬季甚至以减轻趋势为主,这可能是因为冬季温度低蒸发量小所致。由图 3a 可知,春季,除新疆和青海局部地区(占站点总数的 10%)干旱呈减轻趋势外,其余大部分地区呈现不同程度的加重趋势,新疆南部、宁夏以及陕西、甘肃和内蒙古的大部分地区干旱以 0.15~0.3/10 a 的趋势加重。由图 3b 可知,夏季,新疆西南部、青海中部、陕西南部地区干旱有不同程度的减轻趋势,占全部站点的 23%;其余大部地区以加重趋势为主,其中新疆东南部、内蒙古西部和青海西北部的干旱趋势达到 0.15~0.3/10 a,在新疆、甘肃和青海的交界处干旱趋势甚至高达 0.3~0.45/10 a。由图 3c 可知,秋季,除新疆、青海、内蒙古的局部地区(占站点总数的 16%)干旱有减轻趋势外,其余大部分地区呈现不同程度的加重之趋势,其中新疆东南部与青海西北部交界的地区干旱趋势显著,高达 0.3~0.57/10 a。由图 3d 可以看出,冬季,除陕西南部外,其余各地区(占站点总数的 58%)都呈不同程度的减轻趋势,减轻趋势不显著。

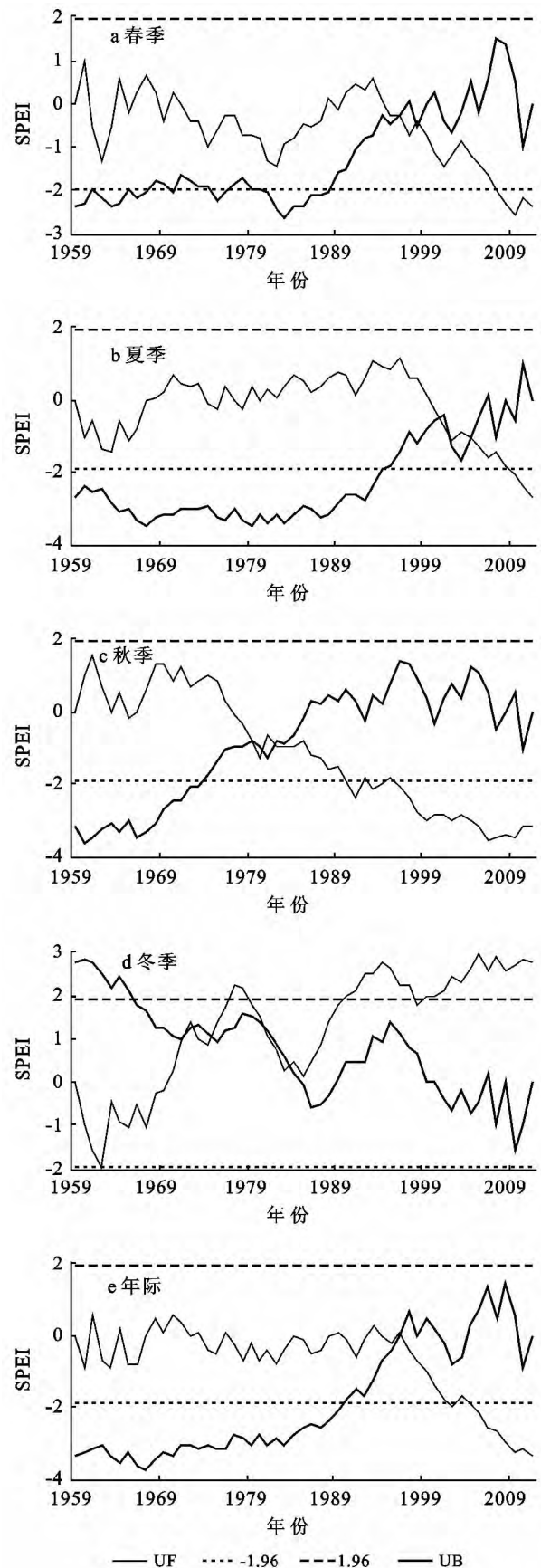


图 2 1959—2011 年西北地区 SPEI 年际和四季变化及 M-K 突变检验曲线
注:虚线为 $\alpha=0.05$ 显著性水平临界线。

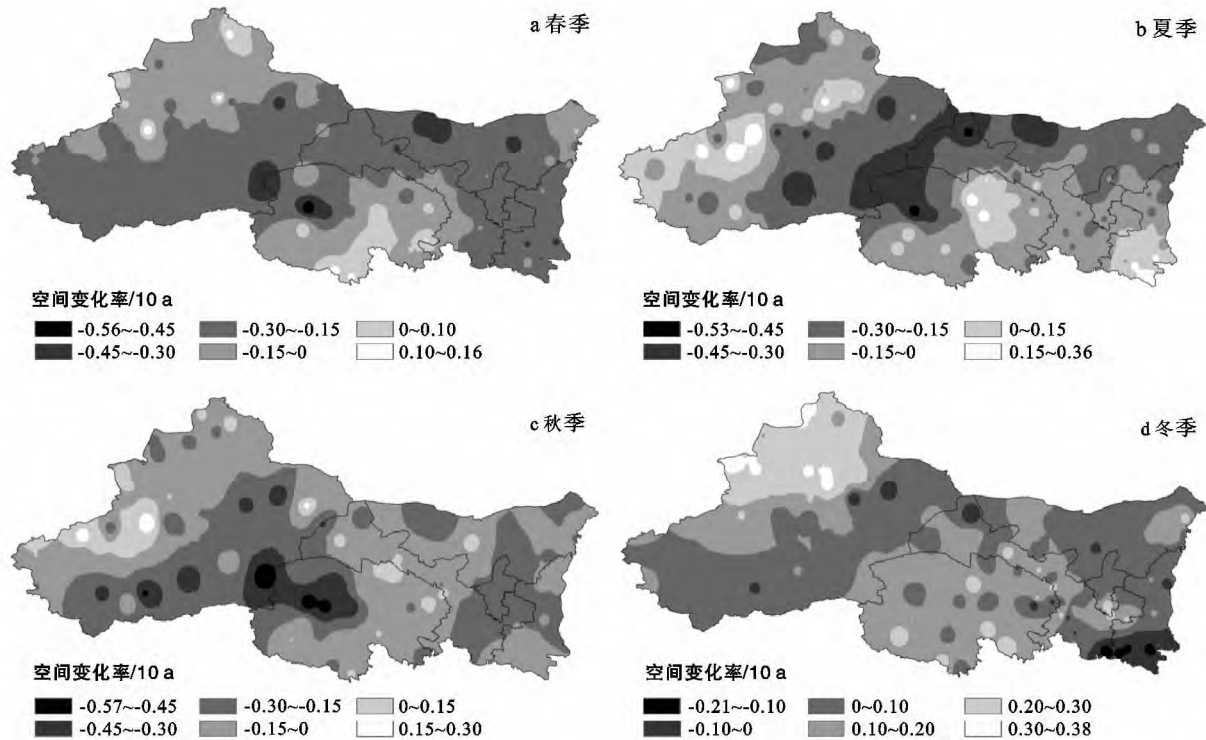


图 3 1959—2011 年中国西北地区四季 SPEI 线性变化趋势空间分布

2.4 SPEI 指数在西北地区的适用性

本文应用 SPEI 干旱指数对西北地区近 53 a 来干旱特征及其时空演变进行了分析,由于该指数是首次运用到西北地区,所以有必要验证 SPEI 指数在西北地区的有效性,以便能更可靠地反映本研究区的实际干旱情况,这里我们采用 SPEI 干旱指数和历史干旱事件进行对比的方法,观测其再现能力。采用《西北干旱监测指标数据集》^[22]作为验证资料,该数据集记载了西北地区 1971—2008 年各种干旱指数在西北地区的使用性,同时还给出了历史上一些干旱事件。本文随机选择了两个干旱年份和两个正常年份与数据集进行对比。结果表明,该指数可以反映 1972 年春季和 2000 年春季西北地区的干旱形势,而 1995 年夏季和 2007 年冬季西北地区也基本没有发生干旱,这与西北地区的实际情况基本一致,只是在细节上有一定的差异。这里给出了 1972 年春季,1995 年夏季,2000 年春季,2007 年冬季西北干旱分布情况(图 4)。

通过与该数据集对比,结果显示 1972 年春季,1995 年夏季,2000 年春季,2007 年冬季西北地区 SPEI 的分布与数据集所反映的干旱分布状况基本是一致的。1972 年春季青海中部新疆内蒙古和陕西局部地区发生干旱,1995 年夏季除新疆南部、青海中西部、陕西南部和内蒙古东部的局部地区发生轻微干旱外,全区绝大部分地区没有出现干旱,2000 年春季除青海外几乎整个西北地区发生了严重的春旱,2007

年冬季整个西北地区几乎没有出现干旱状况,这些都与西北地区实际情况基本一致。以上分析表明,SPEI 指数在表征西北地区干旱方面具有较好的适用性,同时也说明该数据集具有较好的适用性。

3 结论

(1) 时间上,从年际变化趋势来看,通过对 1959—2011 年西北地区平均 SPEI 指数的年际变化分析,可知西北地区平均 SPEI 指数整体呈现出持续下降的趋势,1996 年该指数发生突变,下降趋势明显,2006 年至今这种下降趋势超过了显著性水平 0.01 临界线,这和杨建平等^[23]的研究结果基本一致。春季、夏季干旱明显加重,都达到了 0.05 的显著性检验;秋季干旱化更明显,甚至 1997 年通过了 0.01 的显著性检验;冬季的 SPEI 指数呈现上升趋势,说明冬季干旱呈减轻趋势,这可能是冬季温度低蒸发少所致,这和靳立亚等^[24]研究中国西北地区干湿状况时得到的结果基本一致。

(2) 空间上,春季、夏季西北地区大部分干旱以加重趋势为主,其中新疆的南部、内蒙古、甘肃和青海的西北部干旱趋势加重明显,达到了 0.15~0.3/10 a,夏季新疆、甘肃和青海的交界处变干趋势甚至高达 0.3~0.45/10 a;秋季该区域干旱也以加重趋势为主,但趋势不明显;冬季除个别地区外,大部分呈干旱减轻趋势。

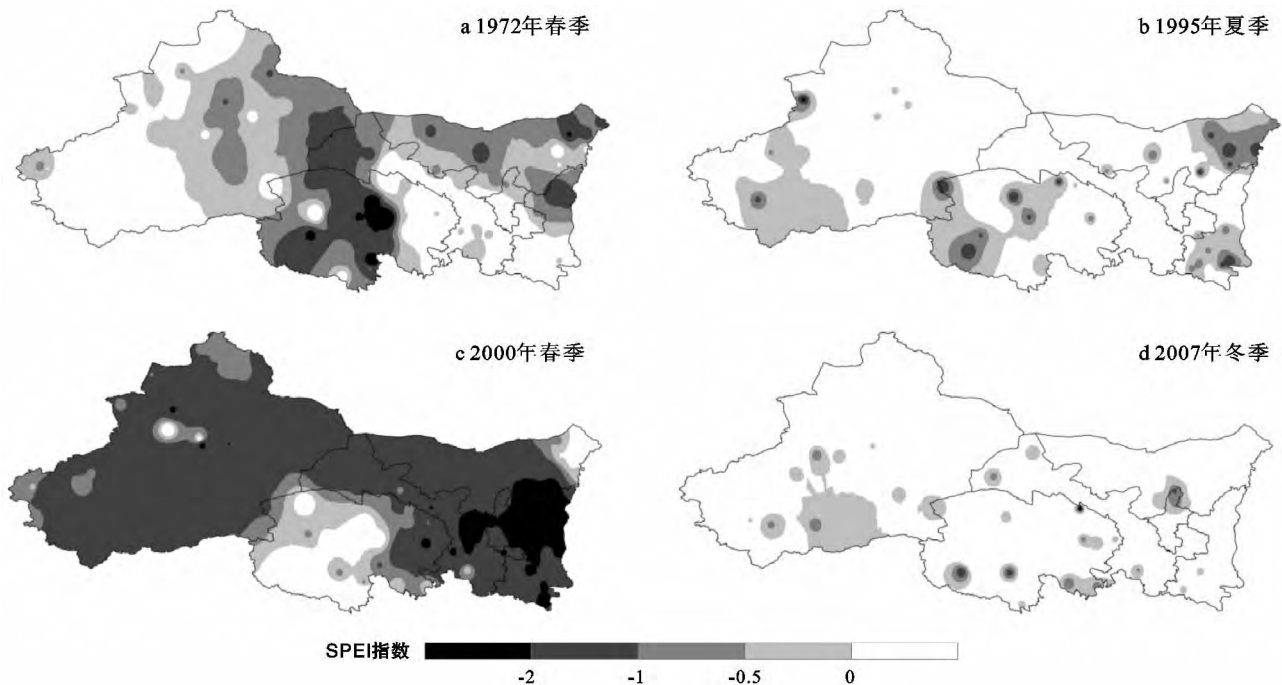


图 4 1972 年春季,1995 年夏季,2000 年春季,2007 年冬季西北地区的 SPEI 指数分布

(3) 本文随机选择了 4 个时间段的干旱事件,通过与《西北干旱监测指标数据集》对比,其结果基本一致,说明 SPEI 指数在西北地区有很好的实用性,另一方面说明该数据集有较好的使用性。

西北地区深居内陆,远离海洋,四周又有高山阻挡,来自海洋的潮湿气流难以到达,所以形成了同纬度最干旱的地区之一。加之本区域地形和气候类型复杂,气温空间变异大,降水不均匀,因而导致干旱在时空分布上呈现出很大的差异性。同时,天文因素、人类活动也可能影响该区的干旱。

本文的不足之处:(1) Vicente—Serrano 推荐用 Thornthwaite 方法计算潜在蒸散量在计算短时间尺度时存在一定的局限性。(2) 干旱是由于降水量少、蒸散量大或两者作用的结果,没有做更详细的探究。(3) 应该在西北地区尝试划分适合本区域的干旱等级,以便更好地反映干旱的真实状况。这些问题将在以后的研究中做进一步的探讨。

[参 考 文 献]

[1] IPCC. Climate change 2001: The Science basis[M]// Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

[2] 龚道溢,王绍武. 北半球冬季纬向平均环流的结构及对我国气候的影响[J]. 地理科学,2001,21(2):108-112.

[3] 汤懋苍,白重瓌,冯松,等. 本世纪青藏高原气候的三次突变及与天文因素的相关[J]. 高原气象,1998,17(3):

250-257.

[4] 王可丽,江灏,赵红岩,等. 中国西北地区水汽的平流输送和辐合输送[J]. 水科学进展,2006,17(2):164-169.

[5] 张强,胡隐樵,曹晓彦,等. 论西北干旱气候的若干问题[J]. 中国沙漠,2000,20(4):357-362.

[6] 谢金楠,李栋梁,董安祥,等. 甘肃省干旱气候变化及其对西部大开发的影响[J]. 气候与环境研究,2002,7(3):359-369.

[7] 侯英雨,何延波,刘钦火,等. 干旱检测指数研究[J]. 生态学杂志,2007,26(2):892-897.

[8] 王劲松,郭江勇,倾继祖,等. 一种 K 干旱指数在西北地区春旱分析中的应用[J]. 自然资源科学,2007,22(5):709-717.

[9] 袁文平,周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展,2004,19(6):982-991.

[10] 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,2003,58(S):117-124.

[11] 刘庚山,郭安红,安顺清,等. 帕默尔干旱指数及其应用研究进展[J]. 自然灾害学报,2004,13(4):21-27.

[12] Vicente-Serrano S M, Begueria S, Lopez-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.

[13] Vicente-Serrano S M, Begueria S, Lopez-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]. Hydrometeor, 2010,11(4):1033-1043.

(下转第 192 页)

- [2] 李思思,洪松,刘行健. 国际气候变化研究趋势[J]. 气候变化研究进展,2011,7(1):73-76.
- [3] 戴洋,罗勇,李秀萍. 从 2009 年度 Nature 杂志看气候变化研究进展[J]. 气候变化研究进展,2010,6(2):154-156.
- [4] 陈隆勋,朱文琴,王文,等. 中国近 45 年来气候变化的研究[J]. 气象学报,1998,56(3):257-271.
- [5] 高翔,白红英,张善红,等. 1959—2009 年秦岭山地气候变化趋势研究[J]. 水土保持通报,2012,32(1):207-211.
- [6] 王劲松,费晓玲,魏锋. 中国西北近 50 a 来气温变化特征的进一步研究[J]. 中国沙漠,2008,28(4):724-732.
- [7] 黄建平,季明霞,刘玉芝,等. 干旱半干旱区气候变化研究综述[J]. 气候变化研究进展,2013,9(1):9-14.
- [8] 杜希溪,李锐,王飞. 渭河流域近 50 年来气候舒适度对气候变化的响应[J]. 水土保持通报,2013,33(2):53-57.
- [9] 裴彬. 近 30 年来甘肃气候变化趋势及其对干湿状况的影响[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(9):90-94.
- [10] 武金慧,李占斌,沈中原. 甘肃省近 50 年降水量及气候变化趋势研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(11):24-29.
- [11] 张谋草,段金省,李宗,等. 气候变暖对黄土高原塬区农作物生长和气候生产力的影响[J]. 资源科学,2006,28(6):46-50.
- [12] 刘彦随,刘玉,郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J]. 中国生态农业学报,2010,18(4):905-910.
- [13] 韦惠兰,欧阳青虎. 气候变化对中国半干旱区农民生计影响初探:以甘肃省半干旱区为例[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(1):117-121.
- [14] 张强,邓振镛,赵映东,等. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J]. 生态学报,2008,28(3):1210-1218.
- [15] 姚玉璧,王润元,赵鸿,等. 甘肃黄土高原不同海拔气候变化对马铃薯生育脆弱性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(2):52-58.
- [16] 姚玉璧,王毅荣,李耀辉,等. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J]. 资源科学,2005,27(5):146-152.
- [17] 孟秀敬,张士锋,张永勇. 河西走廊 57 年来气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报,2012,67(11):1482-1492.
- [18] 姚玉璧,王润元,杨金虎,等. 黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响[J]. 生态学报,2012,32(16):2630-2638.
- [19] 杨强,覃志豪,王涛,等. 榆林地区 1970—2010 年气候因子变化特征分析[J]. 干旱区地理,2012,35(5):695-707.
- [20] 李博. 生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2000:33-37.
- [21] 胡庭兴. 低效林恢复与重建[M]. 北京:华文出版社,2002.
- [22] 国家林业局长防办,四川省林业勘察设计研究院. 低效林改造技术规程(LY/T 1690—2007)[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [23] 张涛,全小川,惠谦,等. 低效(质)林改造的方法与效果分析[J]. 林业勘查设计,2004(3):30-31.
- [24] 程杰,呼天明,程积民. 黄土高原半干旱区云雾山封禁草原 30 年植被恢复对气候变化的响应[J]. 生态学报,2010,30(10):2630-2638.
- [25] 王鹏祥,杨金虎,张强,等. 近半个世纪来中国西北地面气候变化基本特征[J]. 地球科学进展,2007,22(6):649-656.
- [26] 王静,韩永翔,尉元明. 甘肃省雨养农业区气候变暖背景下秋粮生产脆弱性研究[J]. 干旱地区农业研究,2006,24(1):15-19.
- [27] 李兴茂,倪胜利,王立明. 陇东旱塬区降雨量演变与冬小麦产量和生长发育变化关系的探讨[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(2):28-31.

(上接第 187 页)

- [14] 石崇,刘晓东. 1947—2006 年东半球陆地干旱化特征:基于 SPEI 数据的分析[J]. 中国沙漠,2012,32(6):1691-1701.
- [15] 李伟光,易雪,侯美婷,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.
- [16] 李伟光,侯美婷,陈汇林,等. 基于标准化蒸散指数的华南干旱趋势研究[J]. 自然灾害学报,2012,21(4):84-90.
- [17] 王文举,崔鹏,刘敏,等. 近 50 年湖北省多时间尺度干旱演变特征[J]. 中国农业通报,2012,28(29):279-284.
- [18] 王林,陈文. 近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征[J]. 气象科技进展,2012,2(4):21-26.
- [19] 施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京:气象出版社,2003.
- [20] 丁一汇. 中国西北地区气候与生态环境概论[M]. 北京:气象出版社,2001.
- [21] 曹雯,申双和,段春峰,等. 中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量成因[J]. 生态学报,2012,32(6):3394-3402.
- [22] 中国气象局兰州干旱气象研究所[M]. 西北干旱检测指标数据集. 2011.
- [23] 杨建平,丁永建,陈仁升,等. 近 50 年来中国干湿气候界限的 10 年际波动[J]. 地理学报,2002,57(6):655-661.
- [24] 靳立亚,李静,王新,等. 近 50 年来中国西北地区干湿状况的时空分布[J]. 地理学报,2004,59(11):847-854.