

不同干旱指数在新疆哈巴河地区旱情评价中的应用研究

鞠彬¹, 曾明², 徐国梁¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 水利部长江水利委员会水文局水文情报预报中心, 湖北 武汉 430010)

摘要: 利用新疆哈巴河地区 1962–2014 年间的气象资料, 比较分析多时间尺度的标准化降水指数 (*SPI*) 和标准化降水蒸发指数 (*SPEI*) 在该地区的适用性, 并基于两种干旱指数计算结果分析哈巴河地区 53a 间的干旱演变特征。结果表明: 各时间尺度 (年、季、月) 下的 *SPI* 指数与 *SPEI* 指数呈现显著性相关; 单月小尺度下, *SPEI* 指数评价干旱事件等级较实际情况要严重, *SPI* 指数在实际使用中更具优势; 12 月长时间尺度下, *SPI* 指数和 *SPEI* 指数均体现出巴河地区干旱逐步减轻的趋势, 在气候变暖大背景下考虑气温变化的 *SPEI* 指数较 *SPI* 指数更符合当地实际; 各季节尺度下, *SPI* 和 *SPEI* 指数发生各干旱等级事件的比例相差不大, 实际使用中建议春夏季使用 *SPI* 指数, 夏秋季使用 *SPEI* 指数或修正过的 *SPI* 指数, 同时需要重点关注夏秋季干旱。

关键词: 标准化降水指数; 标准化降水蒸发指数; 多时间尺度; 干旱评价; 新疆哈巴河地区

中图分类号: S423

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0237-07

Application research of different drought indexes for drought assessment in Habahe region of Xinjiang

JU Bin¹, ZENG Ming², XU Guoliang¹

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. Hydrological Information Forecast Center of Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: In this paper, the applicability of the multi-timescale standardized precipitation index (*SPI*) and standardized precipitation evaporation index (*SPEI*) were analyzed, and the 53 years of drought evolution characteristics was evaluated using the meteorological data from 1962 to 2014 at Habahe region, Xinjiang. The results showed that, there was significant correlation between the *SPI* and *SPEI* indexes at different timescales of 12-month, 3-month and 1-month. At the monthly scale, *SPEI* index evaluated more serious level than actual condition of drought event, and *SPI* index was better in practical use. At the 12-month scale, drought severity decreased indicated both by the *SPI* index and *SPEI* indexes. The *SPEI* index, which considered the temperature changes under the global warming background, was in more practical use. The occurrence ratio of drought events in different seasons differed small when denoted by the *SPI* and *SPEI* indexes. In practical use, *SPI* index is applicable in the spring and winter, while *SPEI* or revised *SPI* indexes are applicable in the summer and autumn. Meantime there is a need to focus on the summer and autumn droughts.

Key words: standardized precipitation index (*SPI*); standardized precipitation evapotranspiration index (*SPEI*); multi-time scale; drought assessment; Habahe region of Xinjiang

1 研究背景

干旱对社会经济的危害极大, 已经成为中国最主要的自然灾害之一。干旱指数是开展地区干旱监测、

科学评估干旱风险的重要依据^[1]。目前国内外干旱评价指数已有不少, 如标准化降水指数 (*SPI*)^[2]、标准化降水蒸发指数 (*SPEI*)^[3]、帕默尔干旱指数 (*PDSI*)^[4]、*CI* 指数^[5]、干旱强度指数^[6]、水分亏缺指

数^[7]和地表湿润指数^[8]等。*PDSI*指数对中长期干旱的反映能力较好,而对短期干旱难以反映,计算也较复杂。而干旱强度指数、水分亏缺指数和地表湿润指数,虽然计算简单,但和*PDSI*指数一样缺乏空间比较的基础,降低了干旱指数之间的可比性与地区旱情监测的连续性^[9]。*SPI*指数计算简便,具有多长时间尺度特征,在各个领域和各个时段均可有效反映旱涝状况,得到了广泛的应用。*SPEI*指数是在*SPI*基础上构建了适用气候变化背景下的干旱指数,在全球各区域的应用检验中也得到了很好的验证^[10]。综上所述,*SPI*指数和*SPEI*指数具有空间一致性、多时间尺度等优势,是目前进行干旱研究的重要工具。但目前对于*SPI*指数与*SPEI*指数之间的优缺点对比研究较少,依然缺乏足够的实例分析。

我国新疆地区气候条件较为特殊,干旱对农牧业生产有很大影响,但迄今为止对其气候变化下干旱演变特征的相关研究较少且不深入^[11]。近半个世纪以来,国内外学者大多运用统计学方法和单一干旱指数进行新疆地区年尺度下的干旱研究,对运用多种干旱指数进行月、季节尺度上的干旱变化特征研究甚少,同时缺乏最新的新疆地区干旱演变情况分析。因此,在全球气候变暖的大背景下,有必要对新疆地区开展最新的干旱研究,以期全面了解该地区干旱特征及演变规律。

为此,以新疆哈巴河地区为典型研究区,基于1962–2014年逐月降水、气温等气象观测资料,采用*SPI*指数、*SPEI*指数分析该地区不同时间尺度、不同干旱等级的演变特征与季节干旱变化特征,并对两种干旱评价指数在哈巴河地区的适应性进行实例分析研究,以望对新疆干旱地区干旱变化规律和发展趋势有更进一步的认识,同时为区域干旱监测与预警、风险管理提供科学手段。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

哈巴河地区位于我国新疆阿尔泰山南麓,地区总面积为8 166.6 km²。哈巴河地区多年平均气温为3.95℃,多年平均降水量为189.8 mm,且降水多集中于夏秋二季。境内为典型的寒温带大陆性干旱气候特征,是我国干旱频发的地区之一^[12],但地区干旱监测与研究手段依然十分落后。哈巴河地区畜牧业发达,且以草原放牧为主,但由于降水空间分布不均衡,水资源开发利用程度有限,一旦发生干旱,势必严重威胁草场和作物的生长,甚至影响到人畜

饮水^[13]。

2.2 数据来源

选取地区内典型气象站点—哈巴河气象站(48.05°N,86.4°E)1962–2014年的逐月降水、气温等气象资料进行分析,并分别统计为季节、年尺度下的气象资料。数据来源于中国气象数据共享网提供的哈巴河站气候资料月值数据集。采用*SPI*、*SPEI*指数进行哈巴河地区干旱指数适用性研究,分别计算各季节、不同时间尺度下的*SPI*和*SPEI*,并分析其干旱变化特征。哈巴河地区位于国际河流额尔齐斯河流域中部,参考额尔齐斯河流域特点,哈巴河地区每年的3–5月为春季,6–8月为夏季,9–11月为秋季,12月至次年2月为冬季。

研究所采用的哈巴河地区的干旱史料摘录于《中国气象灾害大典—新疆卷》^[14]和《新中国农业60年统计资料》^[15],详细历史干旱资料见表1。

表1 哈巴河地区干旱历史资料

年份	受旱区域	持续时间	干旱级别
1963	哈巴河全区	1963年底至1964年春	重旱
1974	哈巴河地区 农田受灾	全年	大旱,其中 秋旱严重
1981	哈巴河全区	夏秋连旱	轻旱
1991	哈巴河全区	4–7月	轻旱
1996	哈巴河全区	春夏连旱	轻旱
2000	哈巴河全区	6–7月	轻旱

2.3 研究方法

2.3.1 *SPI*指数方法 从数学角度来讲,*SPI*(Standardized Precipitation Index)是基于单个雨量站的一次降雨事件的累计频率,*SPI*方法中利用了伽玛函数来表示降雨序列的随机分布。鉴于*SPI*方法在中国应用较为广泛,其基本原理与计算方法可参见相关国家标准《气象干旱等级 GB/T20481–2006》^[16]和相关参考文献^[17]。*SPI*计算式为:

$$\left\{\begin{array}{l} SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1t + c_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3}\right) \\ \quad 0 < H(x) \leq 0.5 \\ SPI = t - \frac{c_0 + c_1t + c_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3} \\ \quad 0.5 < H(x) \leq 1.0 \end{array}\right. \quad (1)$$

式中: t 为与降水累积概率 $H(x)$ 有关的中间变量,当 $0 < H(x) \leq 0.5$ 时, $t = \sqrt{\ln\left\{\frac{1}{[H(x)]^2}\right\}}$,当 0.5

$< H(x) \leq 1$ 时, $t = \sqrt{\ln\left\{\frac{1}{[1 - H(x)]^2}\right\}}$; $c_0、c_1、c_2、d_1、d_2、d_3$ 均为常数项, $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$; $H(x)$ 为雨量站一次降雨事件的累积概率; 由此可以计算出地区各单站的 SPI 指数。

2.3.2 $SPEI$ 指数方法 $SPEI$ (Standardized Precipitation Index) 指数方法是在 SPI 的基础上提出了一个新的干旱指数。该指数基于降水和温度数据, 结合了 $PDSI$ 及 SPI 的计算方法, 有机地集成了 $PDSI$ 指数对蒸发需求变化(温度波动和趋势所造成)的灵敏性和 SPI 指数计算简单和多时空的自然属性, 是监测干旱化及研究增温影响干旱化过程较为理想的干旱指数。

$SPEI$ 指数方法基本原理与具体计算方法可参考文献[18]。 $SPEI$ 计算式为:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \tag{2}$$

式中: W 为与概率分布函数有关的中间变量, 当 $P \leq 0.5$ 时, $W = \sqrt{-2\ln(P)}$, 当 $P > 0.5$ 时, $W = \sqrt{-2\ln(1 - P)}$, $SPEI$ 的符号被逆转; 其中 $P = 1 - F(x)$, $F(x)$ 为概率分布函数; $C_0、C_1、C_2、d_1、d_2、d_3$

均为常数项, $C_0 = 2.515517, C_1 = 0.802853, C_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$ 。干旱划分等级参照 McKee 等^[2]提出的旱涝等级标准, 详见表 2。

表 2 $SPI、SPEI$ 指数的旱涝等级划分

序号	SPI	$SPEI$	等级/强度
1	> -0.5	> -0.5	正常
2	$(-1.0, -0.5]$	$(-1.0, -0.5]$	轻度干旱
3	$(-1.5, -1.0]$	$(-1.5, -1.0]$	中度干旱
4	$(-2.0, -1.5]$	$(-2.0, -1.5]$	重度干旱
5	≤ -2.0	≤ -2.0	极度干旱

3 结果与分析

3.1 不同干旱指数相关性分析

SPI 和 $SPEI$ 因能监测不同时间尺度下的干旱特征而被广泛使用, 图 1 为各时间尺度下 SPI 与 $SPEI$ 的相关关系。经计算, 哈巴河地区月、季、年尺度下 SPI 和 $SPEI$ 相关系数分别为 0.9127、0.8955、0.8538, 且皆呈显著相关关系($p < 0.01$), 二者在反映干旱发生状况时, 具有较好的一致性。并且随着研究时间尺度的增大, SPI 和 $SPEI$ 之间相关性呈递减趋势。

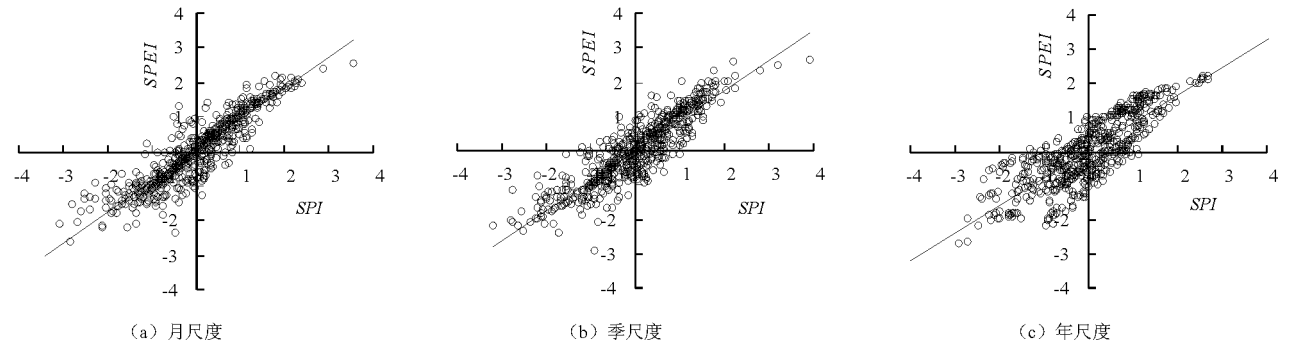


图 1 SPI 与 $SPEI$ 指数的相关关系

3.2 不同时间尺度干旱指数比较

$SPI、SPEI$ 指数均具有多时间尺度特征, 可进行 1、3、6、12、24 个月等多种尺度下的干旱特征分析, 因文章篇幅有限, 本次仅选择 1、12 个月的时间尺度进行具体分析。

图 2 是哈巴河地区单月和 12 月尺度 $SPI、SPEI$ 指数的长序列过程线。由图 2 可知, 不同时间尺度下的 $SPI、SPEI$ 值对干旱评价存在差异。从图 2(a)、2(b)可以看出, 单月尺度的干旱指数 $SPI_1、SPEI_1$ 沿

着 0 值上下剧烈震荡, 旱涝频率变化快, 且 SPI_1 指数的正负波动范围较 $SPEI_1$ 指数波动范围要大。对于 SPI_1 而言, 其中 1963、1974、1981、1991、1996 年间由于降水量较少所引起的干旱能够被识别出, 但 2000 年实测干旱事件未被标识, 分析 2000 年 1 - 12 月的降水量可知, 6 - 7 月的干旱是由前期降水较少引起, 故小时间尺度的 SPI_1 并未识别出此次干旱; 而 $SPEI_1$ 可以识别 1963、1974、1981、1991、1996、2000 年间的干旱, 但整体干旱评估较实际情况要严重些,

分析可能是因为哈巴河地区干旱事件持续时间较长,小时间尺度的 $SPEI_1$ 仅以 1 个月尺度进行分析,造成评估偏严重的情况。从图 2(c)、2(d) 可以看出,随着时间尺度的增加, SPI 指数的正负波动范围较 $SPEI$ 指数波动范围大的情况依然存在。长时间尺度的 SPI 、 $SPEI$ 指数旱涝变化比较稳定,可以很好标识长期干旱和持续时段,更好地反映哈巴河地区干旱的长期影响。此外, SPI_{12} 过程线呈现明显的上升趋势,可见单纯从长时间降水尺度角度考虑,哈巴河地区的干旱正在逐步减轻,有益于当地的农业和牧业的发展。而对于 $SPEI_{12}$ 而言,存在明显的旱涝周期性,且正常或湿润年份较早年要多,总体偏旱程度减轻,但与 SPI 相比幅度大为较小,这主要是由于 $SPEI$ 较 SPI 多考虑了温度、蒸发的影响,哈巴河地区属于干旱地区,蒸发量大,势必导致评价结果较 SPI 指数要严重,更符合当地的干旱实际,同时也说明哈巴河地区气温这一要素对于干旱评价而言也是非常重要的因素。

对不同时间尺度 SPI 、 $SPEI$ 指数计算结果进行整理,统计不同时间尺度下发生各类干旱事件的频次与频率,如图 3 所示。由图 3 可以看出, SPI_1 指数无旱、轻旱、中旱、重旱、极旱等干旱等级事件发生的频次分别为 448、95、50、24、19 次,在不同干旱等级事件中对应的百分比分别为 70.4%、14.8%、8.0%、3.8%、3.0%; $SPEI_1$ 指数无旱、轻旱、中旱、重旱、极旱等干旱等级事件发生的频次分别为 431、100、77、19、9 次,在不同干旱等级事件中对应的百分比分别为 67.8%、15.7%、12.1%、3.0%、1.4%; SPI_{12} 指数无旱、轻旱、中旱、重旱、极旱等干旱等级事件发生的频次分别为 441、94、40、30、20 次,在不同干旱等级事件中对应的百分比分别为 70.6%、15.0%、6.4%、4.8%、3.2%; $SPEI_{12}$ 指数无旱、轻旱、中旱、重旱、极旱等干旱等级事件发生的频次分别为 437、99、49、33、7 次,在不同干旱等级事件中对应的百分比分别为 69.9%、15.8%、7.8%、5.3%、1.1%。

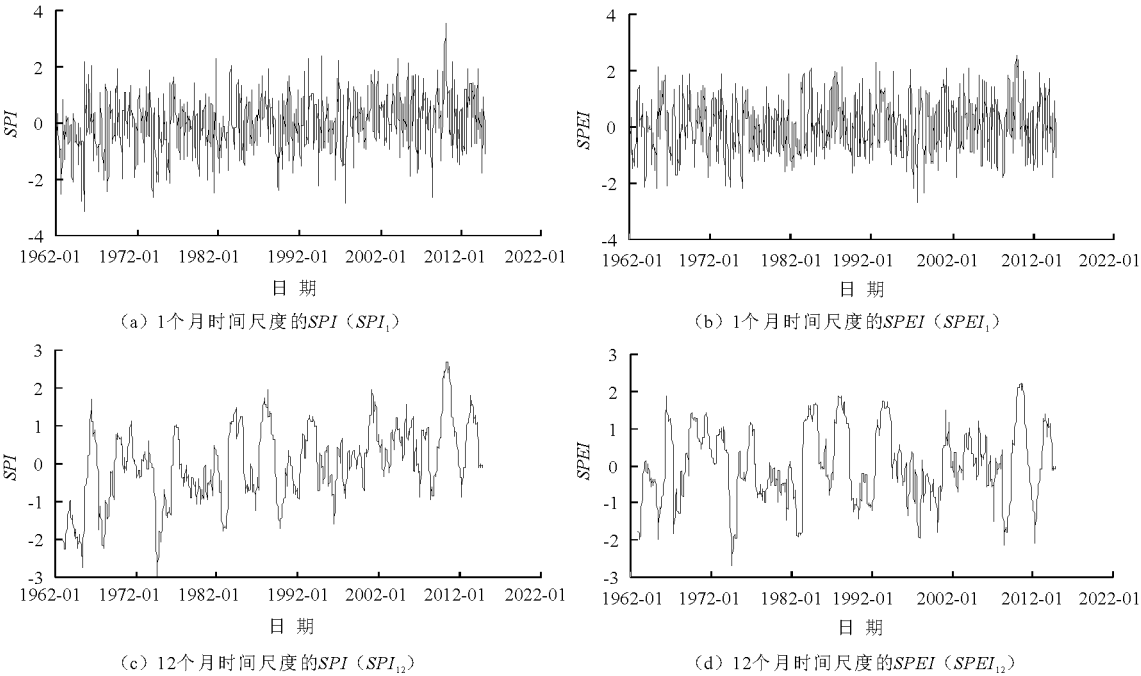


图2 1962-2014年哈巴河地区SPI、SPEI多时间尺度分析

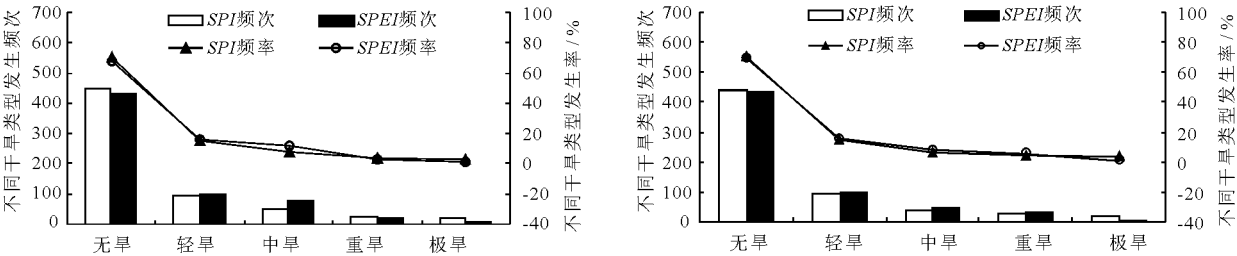


图3 单月和12个月SPI、SPEI指数发生各类干旱事件的频次与频率

随着干旱等级的不断加重,哈巴河地区相应干旱事件所对应的百分比基本呈现逐渐减少的趋势,未发生干旱事件所占比例远远高于轻旱、中旱及重旱事件所占比例之和,不同时间尺度未发生干旱事件比例平均约占 69.7%。总体而言,哈巴河地区短期轻旱发生较多,比较适合使用小尺度 SPI 指数进行分析研究,而长时间尺度的 SPEI 指数较 SPI 多考虑了温度、蒸发的影响,更适合当地长期干旱的监测与分析。

3.3 不同季节干旱指数比较

新疆地区年内降水分布不均,易发生季节性干旱事件,为更好地分析季节性干旱,对季节性 SPI、SPEI 指数进行分析。图 4(a~d)为 4 个季节 SPI 和 SPEI 干旱指数变化过程。分析 53a 各季节干旱指数变化过程,可以发现不同季节干旱指数间的年际变化幅度与趋势差别显著。

春季, SPI 指数与 SPEI 指数年际变化过程几乎相同,两干旱指标的趋势度分别为 0.36/10a、0.37/10a,都呈现出一定程度的湿润化趋势;春季 SPI 指数与 SPEI 指数 1962~1998 年间发生多次干

旱事件,其中 SPEI 最小值为 1963 年的 -2.92,其余年代较均匀,1998 年之后基本无干旱发生。夏季, SPI 指数与 SPEI 指数年际变化过程存在差异,两指数趋势度分别为 0.12/10a、-0.04/10a, SPEI 指数较 SPI 指数发生小幅度的干旱化趋势,分析原因可能为夏季蒸发量大,导致两指标计算结果有较大出入;同时可以看出两指数均呈现出较大的波动变化,旱涝变幅明显,夏季干旱依然严重。

秋季, SPI 指数与 SPEI 指数趋势度分别为 0.27/10a、0.04/10a,由于秋季蒸发, SPEI 较 SPI 而言湿润化趋势不明显;1996 年之前, SPI 指数与 SPEI 指数变化过程相差不大,60、70 年代发生持续性干旱,但 1996 年之后, SPEI 指数较 SPI 更为干旱,两者差异较大。冬季, SPI 指数与 SPEI 指数年际变化过程几乎一致,两指数趋势度均为 0.36/10a,说明由于冬季蒸发量少,仅考虑降水因素的 SPI 与考虑降水、气温的 SPEI 计算结果十分接近,冬季气温要素对干旱影响较弱;冬季以 1982 年为界,1982 年以前干旱较为集中且严重,1982 年以后,冬季干旱大大减轻。

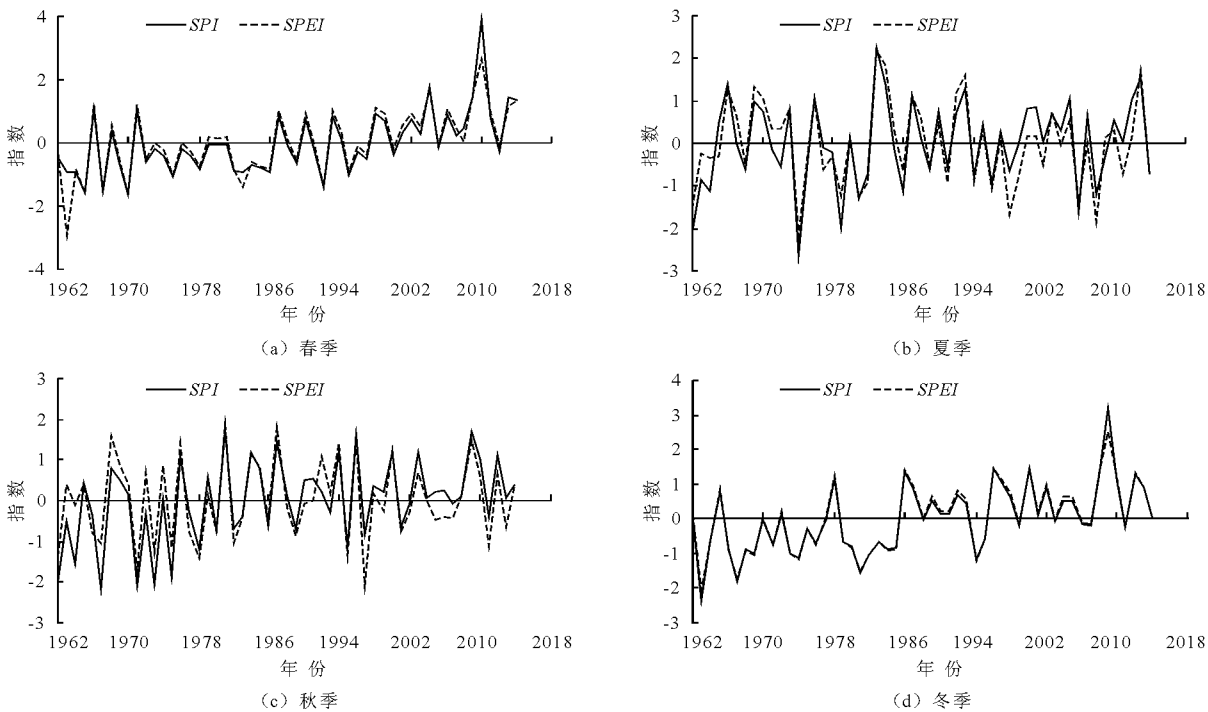


图 4 春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d) SPI 和 SPEI 值变化

统计季节 SPI、SPEI 指数中发生无旱、轻旱、中旱、重旱、极旱等各类不同干旱等级事件的频次与百分比,统计结果如表 3、表 4 所示。SPI 指数不同季节发生轻旱级别以上干旱的年份约占 26.4%~

35.9% 之间,平均约 18a 左右,同时夏季更易发生中旱及以上干旱事件。SPEI 指数不同季节发生轻旱级别以上干旱的年份约占 28.3%~35.9% 之间,平均约 17a 左右, SPI 和 SPEI 发生干旱等级事件的比

例相差不大。

总体而言,春冬两季 *SPEI* 指数计算结果与 *SPI* 指数十分接近,两季节气温对干旱的影响不大,实际运用中可考虑使用简单便捷的 *SPI* 指数替代 *SPEI* 指数进行使用。夏秋两季,干旱地区气温高,蒸发量大,*SPEI* 指数与 *SPI* 指数相差较大,建议使用 *SPEI* 指数或对 *SPI* 指数进行修正后再使用。同时可以看出,春冬两季,发生不同程度的湿润化趋势,呈现干旱有所好转的迹象,但夏秋两季湿润化程度不明显或发生一定程度的干旱加重趋势,两季更易发生中旱及以上干旱事件,同时考虑到夏秋季是一年农作物和牧场的主要生长成熟期和麦田的收墒期,今后需重点关注夏、秋季的干旱。

表 3 哈巴河地区四季 *SPI* 指数发生各类干旱事件的频次与频率

干旱等级	春季		夏季		秋季		冬季	
	频次	频率/%	频次	频率/%	频次	频率/%	频次	频率/%
无旱	35	66.04	35	66.04	39	73.58	34	64.15
轻旱	12	22.64	10	18.87	6	11.32	12	22.64
中旱	3	5.66	4	7.55	2	3.77	4	7.55
重旱	3	5.66	2	3.77	3	5.66	2	3.77
极旱	0	0	2	3.77	3	5.66	1	1.89

表 4 哈巴河地区四季 *SPEI* 指数发生各类干旱事件的频次与频率

干旱等级	春季		夏季		秋季		冬季	
	频次	频率/%	频次	频率/%	频次	频率/%	频次	频率/%
无旱	38	71.70	35	66.04	37	69.81	34	64.15
轻旱	8	15.09	10	18.87	6	11.32	11	20.75
中旱	3	5.66	4	7.55	8	15.09	5	9.43
重旱	3	5.66	3	5.66	1	1.89	2	3.77
极旱	1	1.89	1	1.89	1	1.89	1	1.89

4 结 论

基于新疆哈巴河地区 1962 – 2014 年的月气象资料,运用两种干旱指数(*SPI*、*SPEI*) 分别计算了不同时间尺度、不同季节下的指数值,根据历史干旱记载资料,分析两种干旱指数在哈巴河地区的适用性,并分析了哈巴河地区 1962 – 2014 年间的干旱演变过程与趋势特征,得出以下结论:

(1)研究结果显示多时间尺度 *SPI* 指数与 *SPEI* 指数皆可较好地监测干旱变化,与记载的流域实际干旱较为符合。哈巴河地区发生各类干旱事件的比例为 30% 左右,短期轻旱事件发生较多,比较适合

使用小尺度 *SPI* 指数进行分析,而由 12 个月时间尺度的 *SPI*、*SPEI* 指数均可看出,哈巴河地区干旱正逐步有所减轻,有益于当地农业和牧业的发展。但考虑到气温变化的 *SPEI* 指数较 *SPI* 指数更符合当地实际,更适合当地长期干旱的监测与分析。

(2)从四季 *SPI*、*SPEI* 指数均可看出,不同季节 *SPI* 和 *SPEI* 发生干旱等级事件的比例相差不大;且春、冬两季两者评价结果十分接近,呈现干旱逐步好转的迹象;夏、秋两季由于地区气温高,蒸发量大,导致 *SPEI* 指数计算结果较 *SPI* 指数要严重,今后需重点关注夏、秋季的干旱;实际运用中,推荐春、冬季使用计算简便的 *SPI* 指数,夏、秋季使用 *SPEI* 指数或者修正过的 *SPI* 指数。

(3)小尺度 *SPI* 指数资料易获取,计算简单便捷,对于短期干旱有较高的适用性;中长时间尺度的 *SPEI* 指数综合考虑了降水和气温因素,可以反映地区旱涝程度及其持续时间,适用于长期干旱的响应。在实际使用中,需要根据具体情况对两种指数进行组合使用。同时两种方法结合气象降水预报,可以提高干旱预测精度与及时性,可为哈巴河地区水资源量评估和农业气象干旱监测服务。

本文所采用的相关研究方法思路也可作为气候相似区干旱研究、水资源评估提供参考。

参考文献:

[1] 杨金虎,张 强,王劲松,等. 近 60a 来中国西南春季持续性干旱异常特征分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 215 – 222.

[2] McKee T B, Doesken N J, Kliest J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C] // . Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, USA: American Meteorological Society, 1993: 179 – 184.

[3] 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.

[4] Palmer W C. Meteorological Drought [M]. Washington DC: Department of Commerce Weather Bureau,1965.

[5] 郑秋红,杨霏云,罗蒋梅. 3 种常用农业气象干旱指数及其在实际应用中的修订[J]. 中国农学通报, 2015,31(9) :252 – 256.

[6] 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.

[7] 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.
- [8] Ma Zhuguo, Fu Congbin. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004[J]. Science Bulletin, 2006, 51(23):2913-2925.
- [9] 赵铭,张雪洋,包玉龙,等. 基于2种标准化干旱指数分析秦皇岛近50年干旱状况[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3):246-251.
- [10] 刘可晶,王文,朱烨,等. 淮河流域过去60年干旱趋势特征及其与极端降水的联系[J]. 水利学报, 2012, 43(10):1179-1187.
- [11] 庄晓翠,张林梅,阿志肯,等. 阿勒泰地区暖季蒸发变化特征及与气象因子的关系[J]. 干旱气象, 2009, 27(3):213-219.
- [12] 鞠彬,叶文,胡丹. 新疆额尔齐斯河流域降水量变化特征及趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4):1-5.
- [13] 鞠彬,胡丹. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法在额尔齐斯河流域的适用性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(5):106-111.
- [14] 温克刚,史玉光. 中国气象灾害大典. 新疆卷[M]. 北京:气象出版社, 2006.
- [15] 中华人民共和国农业部. 新中国农业60年统计资料[M]. 北京:中国农业出版社, 2009.
- [16] 张强,邹旭恺,肖风劲,等. GB/T20481-2006 气象干旱等级[S]. 北京:中国标准出版社, 2006:12-17.
- [17] 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[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4):523-529.
- [18] 王芝兰,李耀辉,王素萍,等. 1901-2012年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6):1666-1673.

(上接第236页)

- [3] 郑颖人,叶海林,黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8):1714-1723.
- [4] Matsui T, San K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1):59-70.
- [5] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3):343-346.
- [6] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6):835-840.
- [7] 栾茂田,武亚军,年延凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3):1-8.
- [8] Eberhardt E E. Twenty-ninth Canadian geotechnical colloquium: The role of advanced numerical methods and geotechnical field measurements in understanding complex deep-seated rock slope failure mechanisms[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(4):484-510.
- [9] 史石荣,陈林杰,余超. 基于强度折减法的高烈度地震区边坡稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(2):273-276.
- [10] 陈国庆,黄润秋,周辉,等. 边坡渐进破坏的动态强度折减法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4):1140-1146.
- [11] 郑颖人,叶海林,肖强,等. 基于全动力分析法的地震边坡与隧道稳定性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(S1):279-285.
- [12] Li Xinpo, He Siming. Seismically induced slope instabilities and the corresponding treatments: the case of a road in the Wenchuan earthquake hit region[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 6(1):96-100.
- [13] Wang Fawu, Cheng Qiangong, Lynn H, et al. Preliminary investigation of some large landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan Province, China[J]. Landslides, 2009, 6(1):47-54.
- [14] 郑颖人,叶海林,黄润秋,等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2):173-180.
- [15] 郭院成,陈涛,钱辉. 基于强度折减的边坡动力安全系数确定方法研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(S2):117-120.
- [16] 吴应祥,刘东升,宋强辉,等. 基于有限元强度折减法的边坡动力稳定性可靠性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7):2084-2090.
- [17] 徐光兴,姚令侃,李朝红,等. 边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6):918-923.