

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdcq.2019.0059

任贤月,穆振侠,周育琳.基于不同蒸散方法的SPEI在天山南北坡气象干旱的差异性分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):48-55. REN X Y, MU Z X, ZHOU Y L. The differences of meteorological drought of SPEI on the north and south slopes of Tianshan Mountains with different evapotranspiration methods[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 48-55. (in Chinese)

基于不同蒸散方法的SPEI在天山南北坡 气象干旱的差异性分析

任贤月,穆振侠,周育琳

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要:为更好的研究与指导天山南北坡干旱灾害的预警与应对,采用Penman-Monteith、器测法和Thornthwaite方法确定潜在蒸散量(PET),并分别计算相应的标准化降水蒸散指数(SPEI),分别记为SPEI-PM、SPEI-SJ和SPEI-TH,探讨1960—2016年气象干旱时空变化特征与分析不同蒸散方法下干旱指数的差异性,并评估与历史干旱事件的相符性。结果表明:从趋势变化分析可知,天山南北坡在SPEI-SJ和SPEI-PM指数下呈现湿润化和干旱面积率下降的特征,SPEI-TH指数则相反;空间频率分析显示SPEI-SJ和SPEI-PM指数下研究区年和季节尺度上干旱发生频率一致,即春、夏干旱频发、秋季次之、冬季最少,而SPEI-TH指数下干旱发生频率在各时间变化特征相差不大,SPEI-SJ和SPEI-PM指数下干旱发生频率在空间上保持一致,局部区域存一定的偏差,总体与干旱强度变化趋势一致;基于历次干旱事件可知,SPEI-PM指数对于1986年前的旱灾有较为准确的描述,而SPEI-SJ指数仅针对1990年后对干旱有较准确的描述,SPEI-TH指数对干旱的监测能力较差。综合分析表明SPEI-PM指数对历史干旱事件监测适用性较好,20世纪90年代后,SPEI-SJ指数对干旱的监测有重要的参考价值。

关键词:气象干旱;天山南北坡;SPEI;不同蒸散方法;干旱事件

中图分类号:P429 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The differences of meteorological drought of SPEI on the north and south slopes of Tianshan Mountains with different evapotranspiration methods

REN Xianyue, MU Zhenxia, ZHOU Yulin

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The spatial and temporal variations of meteorological drought on the north and south slopes of Tianshan mountains in Xinjiang from 1960 to 2016 were investigated with three sets of standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), based on three different methods to estimate the potential evapotranspiration (PET). They were Penman-Monteith method (SPEI-PM), instrument measurement (SPEI-SJ) and Thornthwaite method (SPEI-TH). The results showed: Both the SPEI-SJ and SPEI-PM indexes showed a wetting trend and a decrease of drought-area, but the SPEI-TH index showed an opposite trend; The SPEI-SJ and SPEI-PM indexes had the same occurrence frequency of drought on the annual and seasonal scales, i. e., drought occurred more frequently in the spring and summer seasons, followed by autumn, and the least in winter season. However, the drought frequency of SPEI-TH did not show significant differences in various time scales. The spatial patterns of

收稿日期:2018-11-16 修回日期:2019-01-15 网络出版时间:2019-04-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190419.1457.002.html>

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2018D01A16)

作者简介:任贤月(1993—),女,新疆巴州人,主要从事水文水资源研究。E-mail:2366572553@qq.com

通信作者:穆振侠(1980—),男,山东莒县人,副教授,主要从事水文水资源研究。E-mail:muzhenxia@126.com

drought frequency from the SPEI-SJ and SPEI-PM indices were consistent. There was a difference of drought frequency in local regions, which was the same as drought intensity variation; SPEI-PM had a relatively higher accuracy before 1986, while SPEI-SJ only had a higher accuracy after 1990 in comparison with observed drought events. SPEI-TH was the worst index to reflect drought events. Overall, SPEI-PM was the most suitable index for monitoring historical drought events, and SPEI-SJ could add some values for monitoring drought after 1990s.

Key words: meteorological drought; north and south slopes of Tianshan Mountains; SPEI; different evapotranspiration methods; drought events

干旱作为常见的自然灾害之一,严重地影响了人类生产、生活、社会经济的发展和生态环境的改善。随着全球气候的变暖,干旱强度和频率的增加,各地区干旱化问题越来越严重。新疆作为全球气候变化最为敏感的地区,受气候环境变化的影响,气候干燥、蒸发量大,水资源匮乏且时空分布极不均匀,气象干旱频发且情况愈发严峻^[1]。深入了解新疆地区气象干旱的时空变化特征,对于防灾减灾及风险的管理具有重大意义。

近年来,气象干旱受到广大学者的关注,但多处于干旱指标适用性研究阶段,且所建立的不同干旱指标不具有通用性。如国外学者大多是分析干旱指数在某一地区的适用性^[2-4];或深入探究干旱与气候因子的关系^[5];关于多种潜在蒸发对干旱的差异性分析研究较少^[6]。国内学者苗正伟等^[7]基于 SPEI 对区域干旱的时空演变特征进行研究,也有部分学者基于各类干旱指数对新疆气象干旱进行了研究^[1,8-10]。虽然 SPEI 对干旱具有较为准确的捕捉能力,但一般研究中涉及潜在蒸散量的计算仅基于 Penman-Monteith 或 Thornthwaite 法,对于哪种潜在蒸散法更为适用并无明确的结论。刘珂^[11]在中国区域范围内对两种潜在蒸散方法的 SPEI 指数进行了差异性分析,但对新疆区域的研究仅限于新疆北部、西部等大致方向上的差异性分析。目前在新疆地区利用多种蒸散方法开展气象干旱的评估方面的研究还较少。本文基于气象数据和历史典型干旱事件,借助 Penman-Monteith、器测法和 Thornthwaite 三种蒸散方法计算天山南北坡的 SPEI 指数,并对天山南北坡气象干旱时空演变特征的差异性进行分析。

1 数据和方法

1.1 数据来源

借助中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/site/index.html>) 提供的新疆天山南北坡 27 个气象站点数据,其中北坡 14 个气象站点(阿拉山口、博乐、北塔山、温泉、精河、乌苏、蔡家湖、奇台、伊宁、尼

勒克、昭苏、乌鲁木齐、天池和达坂城气象站)、南坡 13 个气象站点(巴仑台、巴音布鲁克、焉耆、阿克苏、拜城、沙雅、轮台、库车、尉犁、库尔勒、柯坪、阿拉尔和铁干里克气象站),以 1960—2016 年的日尺度数据(要素包括气温、风速、湿度、日照时数、气压和蒸发)作为研究基础数据,进行相应干旱指数的确定。历史典型干旱事件资料来源于 1960—2016 年新疆统计年鉴。

1.2 研究方法

1.2.1 不同蒸散方法的选取

本研究借助 Penman-Monteith 法^[12]、器测法和 Thornthwaite 法^[6]计算 1960—2016 年的标准化降水蒸散指数^[13](SPEI),分别记为 SPEI-PM、SPEI-SJ、SPEI-TH。其中,器测法是收集研究区建站以来不同类型 E601 和直径 20 m 蒸发皿的器测资料,借助两者同步观测数据,全部折算成 E601 的蒸发量。基于不同方法确定的干旱指数进行干旱等级的划分,并计算干旱频率、干旱强度和干旱站次比^[14-16]。

1.2.2 干旱等级的划分

干旱等级的划分参考气象干旱等级规范^[17],SPEI 指数的干旱等级划分标准为无旱 ($SPEI > -0.5$)、轻旱 ($-1 < SPEI \leq -0.5$)、中旱 ($-1.5 < SPEI \leq -1$)、重旱 ($-2 < SPEI \leq -1.5$) 与特旱 ($SPEI \leq -2$)。分别计算 1、3、12 个月尺度的标准化降水蒸散指数,根据相应干旱等级划分的依据分析研究区干旱时空演变特征。

2 结果与讨论

2.1 干旱时间变化特征的差异分析

2.1.1 SPEI 年际变化分析

基于不同方法计算研究区不同尺度 SPEI 指数,并进行年际变化特征分析,见图 1(a)。由图可以看出,天山南北坡在 SPEI-PM 和 SPEI-SJ 指数下呈现明显的变湿趋势,从两者线性变化趋势倾向率可知,SPEI-PM 指数下研究区变湿趋势更明显。

SPEI-TH 指数显示研究区呈弱的干旱化的态势,这与以往的研究结论一致^[11]。通过对季节尺度分析可知,三套 SPEI 指数在春、夏季的趋势变化与年尺度一致;秋季,三套 SPEI 指数均呈变湿趋势;SPEI-TH 指数在冬季表现为变干的特征。研究区在年和季节尺度下 SPEI-PM 和 SPEI-SJ 指数均表现为变湿的演变特征,区别在于 SPEI-PM 指数下变湿态势更强;在不同尺度 SPEI-TH 指标下,研究区都呈变干的特征,可能原因是 Thornthwaite 法高估了气温增加的影响。

2.1.2 站次比分析

确定基于不同 SPEI 指数的年尺度干旱站次比的变化趋势,见图 1(b),站次比的变化也可反映出干旱面积的变化,两者是同步的。从图中可以看出,研究区在 SPEI-PM 和 SPEI-SJ 指数下干旱站次比

呈明显的下降趋势,说明干旱面积率在下降,且以 1985 年为界,干旱站次比明显下降;SPEI-TH 指数下研究区干旱站次比呈弱的增大趋势,同时以 1985 年左右为界发生明显的突变。统计分析三套干旱指数下的平均干旱站次比由 1985 年前 50%左右突降至 1985 年后的 10%左右,究其原因是整个天山南北坡在 1985 年以后降水量偏多。

通过对季节尺度上的干旱站次比进行分析发现,天山南北坡四季 SPEI-PM 和 SPEI-SJ 指数下的干旱站次比与年尺度变化特征一致,同时干旱面积率呈逐年下降的趋势,发生干旱的面积呈显著减小的趋势,该结果与近年来的新疆气象干旱研究的结论一致^[18]。在 SPEI-TH 指数下研究区干旱站次比仅在秋季呈现出弱的上升趋势,其他季节变化特征不明显。

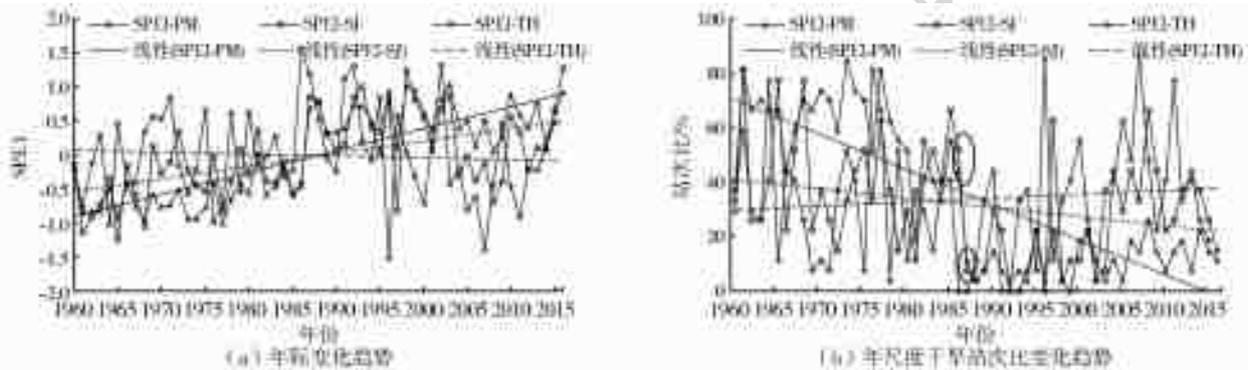


图 1 不同 SPEI 年变化趋势和年尺度干旱站次比的变化趋势

Fig. 1 Time series of drought indices and ratio of station to number of droughts events from three SPEI indices

2.1.3 季节干旱频次分析

统计研究区 1960—2016 年三套 SPEI 指数在四季平均发生各等级的干旱次数和干旱频率(表 1)。由表 1 可知,总体上三套指数表明研究区以发生轻旱为主(频次为 92 次,占各等级干旱的 46%),并在春季和秋季发生频次最高(为 28 次),冬季最低(为 16 次);其次为中旱(频次为 59 次,占各等级干旱的 30%);重特旱发生频次较低(分别为 30 和 17 次,占各等级干旱的比例分别为 15%和 9%),且以夏季发生次数(分别为 13 次、11 次)最高。

四季中,夏季干旱频次最高(为 65 次),发生干旱频次最高的为 SPEI-SJ 指数确定的干旱指标,最低的为 SPEI-TH 指数;春季干旱频次较低(为 61 次),发生干旱频次最高的为 SPEI-SJ 指数,最低的为 SPEI-TH 指数,与夏季情况相同;秋季干旱频次较低(为 45 次),SPEI-TH 干旱频率较高(发生频次为 18,占比为 40%);冬季干旱频次最低(为 27 次),其中发生干旱频次最高的为 SPEI-TH 指数,最低的为 SPEI-SJ 指数,相应干旱指标反映的情况与春、

表 1 研究区内各类干旱发生次数

Tab. 1 Number of drought events area

类型	干旱次数(频率/%)			
	轻旱	中旱	重旱	特旱
PM 春	9(45)	7(35)	3(15)	1(5)
SJ 春	11(50)	7(32)	3(14)	1(5)
TH 春	8(42)	6(32)	3(16)	2(11)
PM 夏	6(27)	7(32)	4(18)	5(23)
SJ 夏	8(33)	6(25)	6(25)	4(17)
TH 夏	8(42)	6(32)	3(16)	2(11)
PM 秋	9(56)	5(31)	2(13)	0(0)
SJ 秋	8(73)	2(18)	1(9)	0(0)
TH 秋	9(50)	6(33)	2(11)	1(6)
PM 冬	5(83)	1(17)	0(0)	0(0)
SJ 冬	2(100)	0(0)	0(0)	0(0)
TH 冬	9(47)	6(32)	3(16)	1(5)

夏季相反;三套干旱指标的结果表明:整体上 SPEI-TH 指数下干旱频次最高(为 75 次),且在各等级干旱发生频次中均高于 SPEI-PM 指数和 SPEI-SJ 指

数确定的干旱发生频次;SPEI-SJ 指数下干旱发生频次最低(为 59 次)。

2.2 干旱空间变化特征的差异分析

2.2.1 干旱频率分析

依据 57 年来的各季节各站点的干旱频率,得到干旱频率的空间分布图,加权平均各站点干旱频率得到研究区各季节尺度的干旱频率,从天山南北坡 1960—2016 年三套 SPEI 指数年和季节尺度干旱频率的空间分布图(图 2)可以发现,整体上看,SPEI-PM 指数下平均年尺度、春、夏、秋、冬季发生干旱的频率分别为 35.15%、34.96%、39.70%、27.55%、10.98%;SPEI-SJ 指数下平均年尺度、春、夏、秋、冬季发生干旱的频率分为 32.68%、37.43%、42.04%、19.82%、4.74%;SPEI-TH 指数下平均年尺度、春、

夏、秋、冬季发生干旱的频率分为 33.33%、33.98%、33.27%、32.36%、32.81%;SPEI-TH 指数下年尺度和季节尺度上干旱发生频率差异极小,而 SPEI-PM、SPEI-SJ 指数下均显示四季中春、夏干旱频发,秋季次之,冬季最少,以往学者对新疆干旱的研究中也得出此类结论^[1]。从 SPEI-PM 指数下的干旱频率空间分布图可知,不同尺度下发生干旱频率的空间分布较为均匀,总体秋季呈现出干旱频率较大的态势,原因是局部站点空间分布不均所致;SPEI-SJ 指数下发生干旱频率在年尺度与各季节尺度上的空间分布规律一致;SPEI-TH 指数下发生干旱频率空间分布规律在不同尺度上较为均匀,总体上冬季呈现出干旱频率较低的态势,原因同样是站点空间分布不均所致。

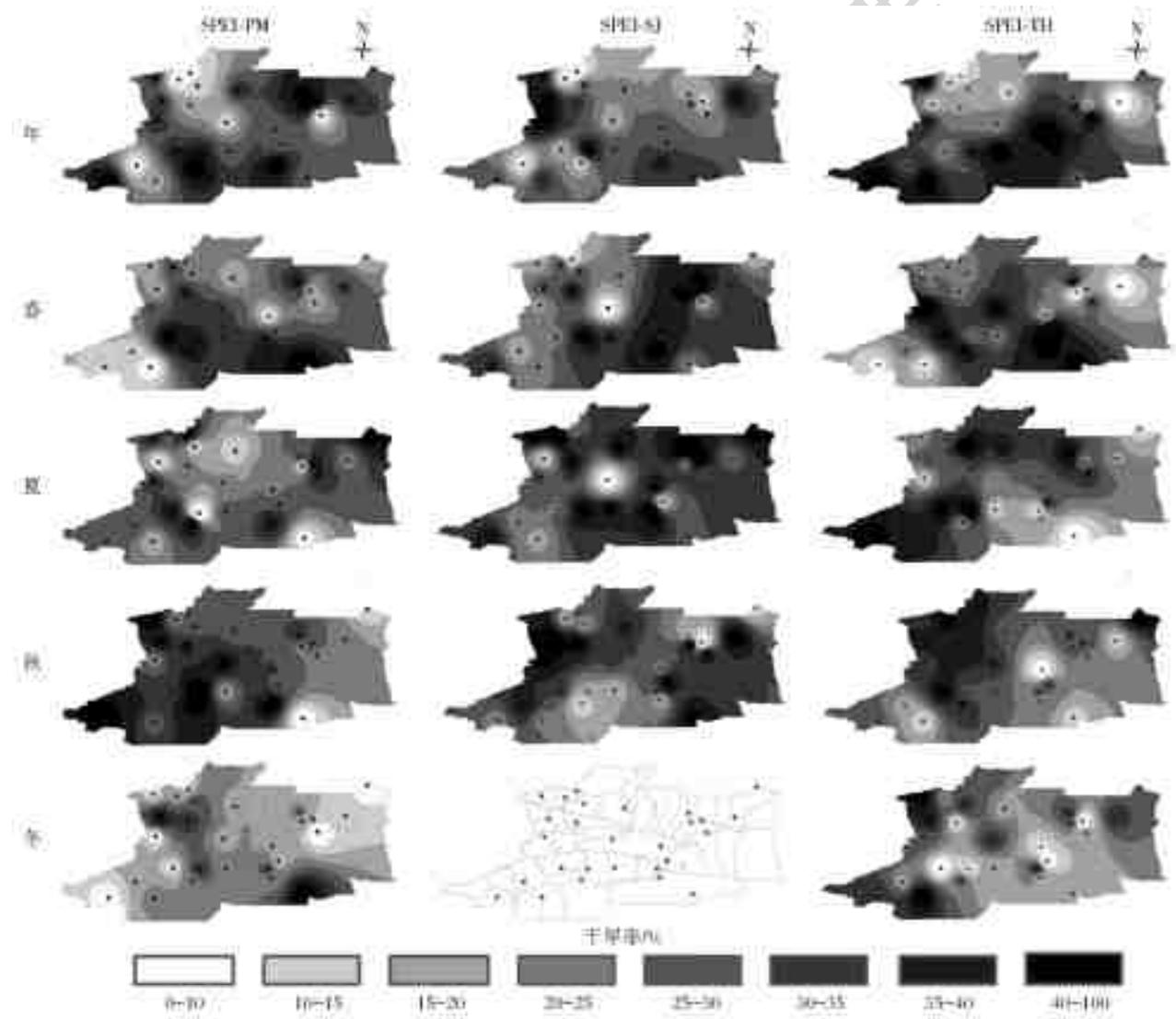


图 2 基于不同 SPEI 的研究区不同尺度干旱频率空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of drought frequency at different time scales

年尺度上,SPEI-PM 指数和 SPEI-SJ 指数下发生干旱频率的分布整体趋势相同,局部干旱频率高

低有差异,SPEI-PM 指数下发生干旱的频率较高且分布较广,发生干旱频率大于 40% 的区域主要分

布在天山南坡的柯坪、沙雅、尉犁地区,北坡仅在乌鲁木齐;从 SPEI-SJ 指数下发生干旱频率分布图中可知,伊犁地区发生干旱的频率较高,且干旱频率 40% 以上的区域主要分布在天山北部的昭苏、伊宁地区,南坡的库车地区;SPEI-TH 指数下干旱发生频率较大,分布范围较广,且都集中在天山南坡,其中干旱频率在 40% 以上的区域主要分布在天山南坡大部分地区以及北坡的温泉和达坂城地区。

从季节尺度上分析可以发现,春季,在 SPEI-PM 指数下发生干旱频率的空间分布特征与 SPEI-TH 指数下的基本一致,但总体上 SPEI-TH 指数下发生干旱的频率要高于 SPEI-PM 指数确定的,主要差异在于干旱频率在 40% 以上的区域分布不同;SPEI-PM 指数下发生干旱的频率在 40% 以上的区域主要分布在天山中南部的拜城、铁干里克地区和天山东北部地区;SPEI-TH 指数下发生干旱的频率在 40% 以上的区域主要分布在天山中南部地区;SPEI-SJ 指数下发生干旱的频率在 40% 以上的区域主要分布在天山南部和天山东北部地区。在夏季, SPEI-PM 指数下发生干旱的频率在 40% 以上的区域主要为沙雅、阿拉山口、北塔山;SPEI-SJ 指数下发生干旱的频率在 40% 以上的区域基本上涵盖了天山南坡及北坡的大部分地区;SPEI-TH 指数下发生干旱的频率在 40% 以上的区域主要分布在天山南北坡的西南及北部区域。秋季,从 SPEI-PM 指数下发生干旱频率空间分布图中可知,天山南坡的巴音布鲁克、沙雅、库车、尉犁和柯坪区域干旱频率明显较高,多在 30%~

40%,其他区域发生干旱的频率较低,多在 20%~30%;SPEI-TH 指数下发生干旱的频率在 40% 以上的区域分布趋势与 SPEI-SJ 指数下的基本一致,主要分布在天山西部和南北坡东部地区。冬季, SPEI-PM 指数下发生干旱的频率在 40% 以上的区域主要为伊宁和铁干里克;SPEI-SJ 指数下发生干旱的频率基本为 10% 以下,可能原因是冬季的实际水面蒸发量为零或忽略不计,造成基于实际水面蒸发计算的潜在蒸发偏小;SPEI-TH 指数下发生干旱的早频率在 40% 以上的区域主要分布在温泉和伊宁、阿拉尔地区。

2.2.2 干旱强度趋势分析

统计分析三套气象干旱指数月尺度各站点的强度趋势,并绘制出其空间分布特征(图 3)。可以看出,整体上三套 SPEI 指数表现出以天山南坡变干为主的规律,北坡干旱规律不明显,其中 SPEI-TH 指数下变干的趋势最明显。从 SPEI-PM 指数下的强度趋势空间分布图可知,天山南坡的阿克苏与巴音布鲁地区、北坡的北塔山地区强度趋势为负值,即这三个地区 57 年来有极不显著的变干趋势;SPEI-SJ 指数下的强度趋势空间分布图显示天山南坡的阿克苏、轮台和焉耆地区以及北坡的精河地区强度趋势为负值,表明有变干趋势;SPEI-TH 指数下的强度趋势空间分布图显示天山南坡的阿克苏、沙雅、轮台、达坂城、焉耆、库尔勒和尉犁等大部分地区强度趋势为负值,呈现变干的趋势,这可能是由于天山南坡温度较高,而 Thornthwaite 法计算的潜在蒸散量夸大了温度对气象干旱的影响。

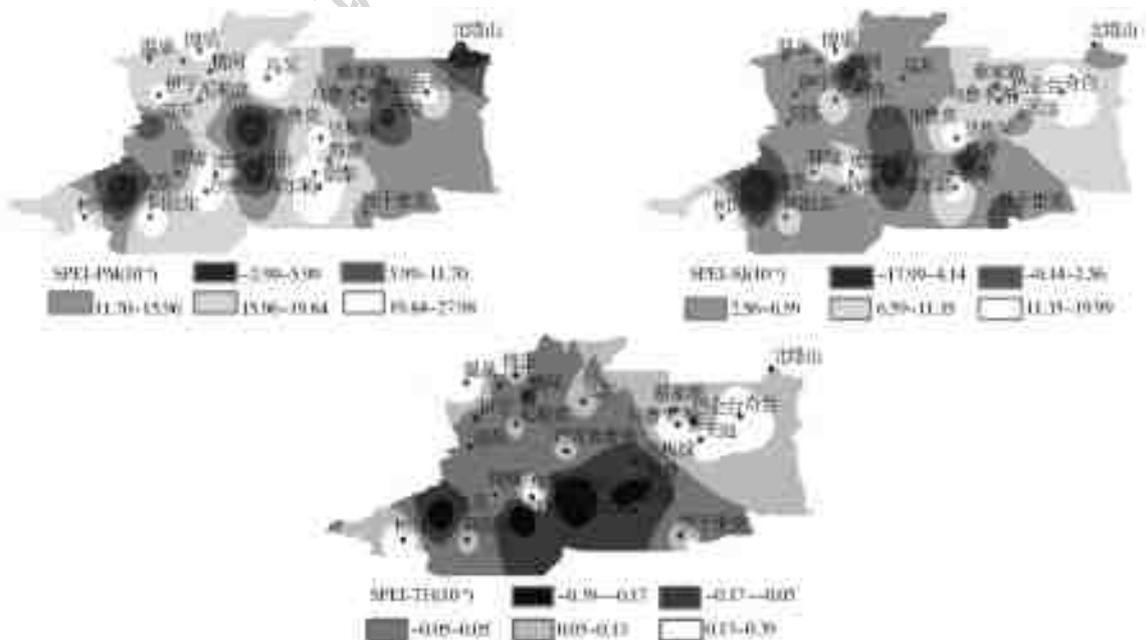


图 3 基于不同 SPEI 的研究区月尺度干旱强度趋势的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of monthly drought intensity trends

2.3 与历次干旱事件相符性分析

统计三套干旱指数 1960—2016 年发生干旱(重

旱和特旱)的月份,并与历史典型干旱事件进行对比

(表 2)。57 年来, SPEI-PM 指数仅能表现出 1986

表 2 SPEI-PM、SPEI-SJ 和 SPEI-TH 对 1960—2016 年历史典型干旱的识别

Tab. 2 Comparison of SPEI-PM, SPEI-SJ and SPEI-TH with historical typical droughts from 1960 to 2016

SPEI-PM			SPEI-SJ			SPEI-TH		
干旱事件	峰值	干旱强度	干旱事件	峰值	干旱强度	干旱事件	峰值	干旱强度
1961(5)	1961(5)	2.5	1960(5)	1960(8)	2.3	1962(5)	1962(5)	2.1
1961(6)		2.2	1960(6)		2.5	1963(1)		1.8
1962(5)	1962(7)	2.2	1960(7)	2.6	1963(3)	1963(3)		1.9
1962(6)		2.1	1960(8)	2.6	1968(5)		1.7	
1962(7)		2.3	1961(4)	2.1	1974(7)	1974(7)		2.1
1962(8)	1963(7)	2.0	1961(5)	3.0	1979(10)	1979(10)		2.0
1963(6)		2.1	1961(6)	2.8	1980(11)	1980(11)		2.3
1963(7)	2.1	1961(7)	1961(5)	2.7	1984(8)	1984(8)		2.3
1964(6)	1964(6)	2.1	1961(8)	2.6	1986(7)	1986(7)		2.0
1965(5)	1965(5)	2.1	1961(9)	2.0	1987(8)	1987(8)		1.8
1965(8)	1965(8)	2.0	1962(4)	1.8	1990(6)	1990(6)		2.2
1967(6)	1967(6)	2.1	1962(5)	1962(5)	2.9	1991(9)	1991(9)	2.0
1968(5)	1968(7)	2.2	1962(6)	2.8	1994(11)	1994(11)		2.5
1968(6)		2.3	1962(8)	1.9	1997(4)		2.1	
1968(7)		2.3	1965(5)	1965(5)	2.3	1997(9)	1997(10)	1.7
1968(8)		2.0	1965(8)	2.0	1997(10)		2.5	
1969(7)	1969(8)	2.1	1967(6)	1967(6)	1.7	2001(3)		1.8
1969(8)		2.2	1968(5)	1968(5)	2.0	2001(5)	2001(11)	1.8
1970(5)	1970(6)	2.2	1968(7)	1.9	2001(11)		1.9	
1970(6)		2.3	1974(5)	1974(7)	2.1	2002(8)	2002(8)	2.3
1971(5)	1971(6)	2.1	1974(7)	2.5	2005(3)	2005(3)	1.6	
1971(6)		2.3	1980(8)	1980(8)	1.9	2006(8)	2006(10)	1.9
1973(7)	1973(7)	2.6	1984(8)	1984(8)	2.1	2006(10)		2.4
1973(8)		2.3	1985(7)	1985(7)	1.9	2007(4)	2007(4)	1.8
1974(5)		1.9	1986(7)	1986(7)	2.1	2008(3)		2.1
1974(6)	1974(7)	2.2	1990(6)	1990(6)	1.9	2008(5)	2008(5)	2.2
1974(7)		2.7	1997(4)	1997(4)	2.1	2008(6)		2.0
1975(5)	1975(5)	2.3	2004(6)	2004(6)	2.1	2009(4)		1.8
1977(4)	1977(6)	1.9	2006(8)	2006(8)	2.3	2009(10)	2009(10)	1.9
1977(5)		2.2	2008(6)	2008(6)	2.2	2012(4)	2012(4)	1.8
1977(6)		2.2	2009(6)	2009(6)	2.3	2013(3)		2.3
1977(8)		2.1	2009(7)	2009(6)	2.1	2013(10)	2013(3)	2.1
1978(7)	1978(8)	2.0	2011(7)	2011(7)	2.2	2015(7)	2015(7)	2.2
1978(8)		2.2	2014(7)	2014(7)	2.4	2016(3)		1.9
1979(8)	1979(8)	2.1	2015(7)	2015(7)	2.3	2016(4)	2016(9)	1.8
1980(7)	1980(7)	2.4				2016(9)		2.4
1984(8)	1984(8)	2.3						
1985(7)	1985(7)	2.4						
1986(7)	1986(7)	2.2						

注:加黑数据表示与历史典型干旱一致。

年以前的干旱事件,如 1974、1978、1980、1985 和 1986 年的重大干旱事件,可能原因是潜在蒸散量的减小和年均降水量的增加所致;通过对研究区气象要素规律分析发现,1985 年后部分气象要素呈下降趋势(风速、气压、日照时数等),且天山南北坡降水量在 1985 年后明显增加趋势,干旱事件发生的概率在降低。SPEI-SJ 指数对于 1986 年之前发生干旱事件表现能力与 SPEI-PM 指数一样,所描述的干旱事件与历次发生的干旱事件基本一致,而对个别年份的干旱事件没有体现出来,如 1978 年的干旱事件,可能原因是 1978 年夏季的干旱发生在局部地区,平均到整个研究区时造成干旱强度的降低,但 SPEI-SJ 指数对 20 世纪 90 年代后典型干旱事件的描述较为准确,基本与历次干旱事件的发生时间一致。SPEI-TH 指数对 2000 年之前的干旱事件描述较为准确,但对 21 世纪初的干旱事件描述过于频繁,且将 2016 年描述为重旱,与历史干旱事件不符,可能原因是 Thornthwaite 方法夸大了近年来气温的升高对气象干旱的影响。总体上,三套干旱指数对 1986 年前的干旱事件描述较为准确,对 1986 年后干旱事件的描述差异较大,而 SPEI-PM 指数基本上对 1986 年后的干旱事件发生没有表现出来;SPEI-SJ 指数对于 2008 年、2009 年和 2014 年干旱事件的描述基本与历次典型大旱一致;SPEI-TH 指数仅对 2008 年和 2009 年的干旱事件具有准确的描述,但明显高估了 2000 年后干旱事件发生的频次。

3 结 论

本文借助不同 PET 计算研究区 SPEI 指数,探讨了 SPEI-TH、SPEI-SJ 和 SPEI-PM 指数对天山南北坡气象干旱特征描述的差异性,并结合历史旱灾事件对比分析三种干旱指数对历史干旱事件的描述能力,主要结论如下。

(1)SPEI-PM 指数和 SPEI-SJ 指数都揭示天山南北坡湿润化的趋势,且二者确定的干旱影响面积逐年下降,SPEI-TH 指数却表现出研究区干旱化的趋势。为了探究其发生的原因,将研究区分为天山南坡和天山北坡两个区域,分别分析 SPEI-TH 指数的变化趋势,结果表明 SPEI-TH 指数在天山南坡显示出显著的变干趋势,而在天山北坡显示出弱的变湿趋势,从而导致研究区总体呈现变干趋势,其发生的原因可能是 Thornthwaite 法高估了温度增加对潜在蒸散量的影响,且天山南坡的温度较高、降水量偏少,导致基于 Thornthwaite 法计算的潜在蒸

散量偏大。

(2)三套干旱指数均显示轻旱在四季中发生次数最多;中旱在春夏秋发生频次相当,冬季发生次数较少;重旱和特旱在夏季发生次数较多,春季次之,秋季冬季最少。SPEI-PM 指数和 SPEI-SJ 指数在四季中的春、夏干旱频发,秋季次之,冬季最少;SPEI-TH 指数显示各季节干旱频率并无较大区别,且与历史实情不符。

(3)空间尺度上,SPEI-PM 指数和 SPEI-SJ 指数下发生干旱频率的空间分布趋势基本一致,局部地区干旱频率值的高低有一定差异;从 SPEI-TH 指数干旱频率空间分布图可知,干旱频率高值发生在天山南坡大部分地区;从干旱强度趋势的空间分布可知,天山南坡局部地区(如阿克苏、轮台、焉耆等地)呈现变干的趋势,加之温度的升高,造成在 SPEI-TH 指数下天山南坡地区呈现干旱化的趋势。

(4)结合历史典型干旱事件,SPEI-PM 指数对 1986 年前的历史典型干旱事件描述较为全面,且较为准确;SPEI-SJ 指数对 1990 年后的历史典型干旱事件的刻画较为准确;SPEI-TH 指数呈现出 21 世纪初干旱事件发生较多,不符合历史实情。

参考文献(References):

- [1] 吴燕锋. 北疆近 52 年气象干旱时空演变特征[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2016. (WU Y F. Spatiotemporal variation of meteorological drought in north Xinjiang Province from 1961 to 2012[D]. Urumqi, Xinjiang Agricultural University, 2016. (in Chinese))
- [2] GIDEY E, DIKINYA O, SEBEGO R, et al. Using drought indices to model the statistical relationships between meteorological and agricultural drought in raya and its environs, northern Ethiopia[J]. *Earth Systems & Environment*, 2018 (6): 1-15. DOI: 10. 1007/s41748-018-0055-9.
- [3] GIDEY E, DIKINYA O, SEBEGO R, et al. Modeling the spatio-temporal meteorological drought characteristics using the standardized precipitation index (SPI) in raya and its environs, northern Ethiopia[J]. *Earth Systems & Environment*, Published online; 2018. DOI: 10. 1007/s41748-018-0057-7.
- [4] JOHN K, JOHN A D. The quantification of drought: An evaluation of drought indices. [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83 (8): 1167-1180. DOI: 10. 1175/1520-0477-83. 8. 1167.
- [5] ABDOURAHAMANE Z S, ACAR R. Analysis of meteorological drought variability in Niger and its connection with climate indices [J]. *Hydrological Sciences*

- Journal, 2018; 2150-3435 (Online). DOI: 10. 1080/02626667. 2018. 1489542.
- [6] DUAN Q Y Z M. Sensitivity of potential evapotranspiration estimation to the Thornthwaite and Penman - Monteith methods in the study of global drylands[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34 (12): 1381-1394. DOI:10. 1007/s00376-017-6313-1.
- [7] 苗正伟,徐利岗,路梅. 基于 SPEI 指数的京津冀地区干旱特征分析[J]. *人民黄河*, 2018, 40(7):51-57. (MIAO Z W, XU L G, LU M. Analysis of drought characters based on SPEI index in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Yellow River*, 2018(7). (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2018. 07. 012.
- [8] YAO J, ZHAO Y, CHEN Y, et al. Multi-scale assessments of droughts: A case study in Xinjiang, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 444-452. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2018. 02. 200.
- [9] 潘淑坤,张明军,汪宝龙,等. 近 51 年新疆 S 干旱指数变化特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(3): 32-39. (PAN S K, ZHANG M J, WANG B L, et al. Study on the drought index variation for Xinjiang in recent 51 years[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(3): 32-39. (in Chinese))
- [10] 李思诺,翁白莎,严登明,等. SPI 和 SPEI 在阿克苏河流域的适用性分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(1): 101-107. (LI S N, WENG B S, YAN D M, et al. Applicability analysis of SPI and SPEI in Aksu River basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27 (1): 101-107. (in Chinese)) DOI: 10. 11705/j. issn. 1672-643X. 2016. 01. 18.
- [11] 刘珂,姜大勝. 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. (LIU K, JIANG D P. Analysis of dryness/wetness over China using standardized precipitation evapotranspiration index based on two evapotranspiration algorithms[J]. *Atmospheric Sciences*, 2015, 39 (1): 23-36. (in Chinese)) DOI: 10. 3878/j. issn. 1006-9895. 1402. 13265.
- [12] 许迪,蔡林根,王少丽,等. 农业持续发展的农田水土管理研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2000. (XU D, CAI L G, WANG S L, et al. *Agricultural sustainable development of farmland soil and water management research*[M]. China Water & Power Press, 2000. (in Chinese))
- [13] 张煦庭,潘学标,徐琳,等. 基于降水蒸发指数的 1960—2015 年内蒙古干旱时空特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(15): 190-199. (ZHANG X T, PAN X B, XU L, et al. Analysis of spatio-temporal distribution of drought characteristics based on SPEI in Inner Mongolia during 1960-2015 [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (15): 190-199. (in Chinese)) DOI: 10. 11975/j. issn. 1002-6819. 2017. 15. 025.
- [14] KHADR M. Temporal and spatial analysis of meteorological drought characteristics in the upper Blue Nile River region[J]. *Hydrology Research*, 2017, 48(1): 265-276. DOI: 10. 2166/nh. 2016. 194.
- [15] CHENG Q, GAO L, CHEN Y, et al. Temporal-spatial characteristics of drought in Guizhou Province, China. Based on multiple drought indices and historical disaster records[J]. *Advances in Meteorology*. 2018, 2018: 1-22. DOI: 10. 1155/2018/4721269.
- [16] YAN Z, ZHANG Y, ZHOU Z, et al. The spatio-temporal variability of droughts using the standardized precipitation index in Yunnan, China[J]. *Natural Hazards*, 2017, 88(13): 1-20. DOI: 10. 1007/s11069-017-2904-5.
- [17] GB/T 20481-2017, 气象干旱等级[S](GB/T 20481-2017, Grades of meteorological drought[S] (in Chinese))
- [18] 石彦军,任余龙,李耀辉,等. 标准化降水指数在新疆极端干旱事件中的应用[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(4): 523-528. (SHI Y J, REN Y L, LI Y H, et al. Application of the extreme drought events in Xinjiang from the standard precipitation index [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2014, 50(4): 523-528. (in Chinese)) DOI: 10. 13885/j. issn. 0455-2059. 2014. 04. 014.