

# 基于标准化降水指数的北疆地区近52年旱涝变化特征

罗那那, 巴特尔·巴克, 吴燕锋

(新疆农业大学 草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052)

**摘要:** 21世纪以来极端气候事件频发,其中旱涝灾害对人类影响最为明显。该研究以北疆为例,选用标准化降水指数SPI(Standard Precipitation Index)为干旱指标,基于北疆地区23个气象站的1961—2012年逐月降水数据,运用趋势分析法、EOF法、REOF法和ArcGIS中的Kring插值工具,对其旱涝时空变化特征进行了研究。结果表明:过去52 a北疆地区气候呈湿润化趋势,年代和年际尺度上,干旱逐渐减少,雨涝则逐渐增多。年际尺度上,北疆地区不同时间尺度的SPI都呈增加趋势,表明其湿润化的趋势加强。年代尺度上,1960s和1970s干旱频次大于雨涝频次,而在1980s—2000s雨涝频次大于干旱频次。且北疆地区的旱涝在区域空间分布上呈现四种差异型,并以此划分为四个旱涝区域:北部地区(降水适宜区)、东部地区(极度干旱区)、西部地区(干旱区)和中部地区(雨涝区)。季节尺度上,中部的石河子、托里、克拉玛依和北部的福海地区都是相对湿润区域,东部的青河、北塔山和奇台地区则是相对干旱的区域。

**关键词:** SPI; 北疆地区; 旱涝; 变化特征

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)02-0293-07

## Analysis on Spatiotemporal Characteristics of Drought-Flood Based on Standard Precipitation Index in Northern Xinjiang in Recent 53 Years

LUO Nana, Batur · Bake, WU Yanfeng

(College of Grassland and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

**Abstract:** Since the beginning of the 21st century, frequent extreme weather events have occurred under a background of global climate change. This pattern reflects that the characteristics of climate change and drought and floods are one of the most serious disaster impacts on human beings. Exploring the relationship between climate change and drought/flood disasters using climate change performance characteristics has become a prime research issue. Drought/flood events have frequently taken place in northern Xinjiang, however, few studies have concerned drought and flood assessment in this area. The characteristics of drought and flood in northern Xinjiang was analyzed based on monthly precipitation data of 23 meteorological stations from 1961 to 2012 by means of different scales of standard precipitation index, combining with trend analysis, GIS spatial analysis techniques, EOF and REOF method. The results showed that there was a significantly humid trend in northern Xinjiang over the past 52 years. The frequency of drought decreased continuously during that period and specially presented the more frequency of flood from 1961 to 1980, whereas the frequency of flood continuously increased during that period and specially presented the more frequency of flood from 1981 to 2012. There were three types of spatial distribution of drought and flood in this area, which were divided into three regions: northern area (precipitation comfort zone), eastern area (extreme arid area), western area (arid area) and mid-area (waterlogging area). Similarly, Shehezi, Tuoli and Kelamayi regions are located at the center of Xinjiang and tend to be waterlogging all the year, Qinghe, Beitashan and Qitai regions are located in the eastern areas which were easy to be dry.

**Keywords:** standard precipitation index(SPI); northern Xinjiang; drought-flood; variation

收稿日期: 2016-04-25

修回日期: 2016-05-05

资助项目: 国家国际科技合作计划项目(2010DFA92720-13); 2014年度新疆研究生科研创新项目(XJGRI2014079); 新疆维吾尔自治区土壤学重点学科

第一作者: 罗那那(1989—),女,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为干旱区生态与环境。E-mail: luonan27@163.com, 15276654231

通信作者: 巴特尔·巴克(1973—),男(维吾尔族),新疆维吾尔自治区莎车县人,博士,教授,主要从事干旱区生态与环境研究。E-mail:

bateerbake@163.com

全球变暖对水资源、农业、生态环境等的影响已成为研究热点。IPCC 第五次报告中指出,1901—2012 年全球陆地和海洋平均增加了 0.89℃,其中 1951—2012 年增加了 0.72<sup>[1]</sup>。全球变暖会在一定的程度上引起水循环发生变化,使水资源的总量时空分布不均,并对气候的干湿状况和水资源的供需平衡产生影响。干旱和洪涝是中国最主要的气象灾害之一,尤其是干旱出现频率高、持续时间长、波及范围大,对国民经济特别对农业生产造成严重影响,近年来有关旱涝变化的研究受到学术界的广泛关注<sup>[2]</sup>。

国内外基于旱涝指数提出了多种计算方法,主要有帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)<sup>[3]</sup>、地表水分供应指数(Surface Water Supply Index, SWSI)<sup>[4]</sup>、标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)<sup>[5]</sup>、相对湿润指数(Relative Moisture Index, MI)<sup>[6]</sup>、综合干旱指数(Meteorological Drought Comprehensive Index, CI)<sup>[7]</sup>等干旱指数,并对区域或者全球尺度的旱涝进行了探究。其中标准化降水指数由于在计算过程中消除了降水的时空分布差异,在各个区域和各个时段都能有效地反映旱涝状况,并具有良好的稳定计算特性,其对干旱的反应灵敏,能够满足不同水资源状况分析的要求<sup>[8]</sup>,国内外学者用该方法针对不同地区开展了一些研究<sup>[9-12]</sup>,能较好的反映区域的旱涝状况。因此,本文选用 SPI 来探究北疆地区的旱涝程度。

北疆地区是典型的干旱半干旱区,干旱一直是困扰该区的主要灾害之一,也是限制当地生态环境建设和经济社会发展的主要因素之一。前人研究表明,伴随着北疆地区降水的不断增加,其湿润化趋势较为明显<sup>[13-14]</sup>,但极端降水事件也呈增加趋势。因此,亟需对暖湿化趋势下北疆的旱涝演变特征进行相关探究。本文运用标准化降水指数,以月 SPI 为基础通过计算不同尺度下的)SPI,运用 EOF 和 REOF 法探究过去 52 a 北疆地区不同尺度下旱涝的时空变化特征,以期进行新疆干旱、半干旱区旱涝状况的研究以及为全球变化背景下旱情程度和分布并采取相应措施提供理论参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

北疆地区位于新疆维吾尔自治区北部,地处天山和阿尔泰山之间,包括准格尔盆地到阿尔泰山地区。地势西、北和南部高,中部和东部低,中部是古尔班通古特沙漠。行政区划包括乌鲁木齐、吐鲁番、阿勒泰、塔城、昌吉、伊犁、博尔塔拉等地区。北疆为温

带大陆性干旱半干旱气候,区域年均气温-4~9℃,西部、南部和北部为 4~9℃,东部 10~14℃;≥10℃有效积温西部和北部为 2 500~2 900℃,南部为 3 000~3 600℃,东部 4 500~5 400℃;全年降水量 150~200 mm;全年无霜期 140~185 d,无霜期西部和北部为 140~155 d,南部 155~190 d,东部 200~240 d;年太阳总辐射量,西部、南部和北部为 5 200~5 600 MJ/m<sup>2</sup>,东部为 6 000~6 400 MJ/m<sup>2</sup>。四季分明,是北疆的一大特点。由于北疆地区气候资源相对较好,农业、畜牧业等发展迅速。

### 1.2 数据来源

降水数据源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>),包括北疆 23 个气象站点的 1961—2012 年的逐月的降水资料。并对这 23 个站点的数据都进行严格质量控制。从统计意义上看,这样长的时间序列可获得较为可信的趋势结果。本文选取布尔津、和布吉赛尔、青河、托里、温泉、博乐、阿拉山口、克拉玛依、塔城、乌苏、莫索湾、炮台、石河子、奇台、北塔山、伊宁、伊犁、乌鲁木齐、阿勒泰、富蕴、精河、吉木乃、福海 23 个气象站。

### 1.3 研究方法

McKee 等提出了一个相对简单的干旱指数,其主要是基于自然降水为分布,运用较长时间的降水量(一般应超过 30 a)资料,经过正态分布标准化变换求得 SPI 值,该指标可以分析多时间尺度(1,3,6,...,48 个月)的干旱特征,可对当地气候状况的旱涝进行监测与评估<sup>[15]</sup>。根据文献资料中的公式求得 SPI 值,再根据 SPI 值确定干旱等级标准(见表 1)。本文主要分析了 1 个月、3 个月、6 个月和 12 个月四个时间尺度旱涝特征。

表 1 标准化降水指数(SPI)旱涝分级

SPI 值	雨涝等级	SPI 值	干旱等级
极涝	2.0≤SPI	轻旱	-1.5<SPI≤-1.0
重涝	1.5≤SPI<2.0	中旱	-2.0<SPI≤-1.5
中涝	1.0≤SPI<1.5	特旱	SPI≤-2.0
正常	-1.0<SPI<1.0		

## 2 结果与分析

### 2.1 北疆地区旱涝时空变化特征

2.1.1 不同时间尺度 SPI 年际变化特征 不同时间尺度的 SPI 可以用于检测不同类型的干旱,多种时间尺度的 SPI 综合应用可实现对干旱的综合监测评估。图 1 为不同时间尺度 SPI 事件序列变化特征, SPI=1 和-1 为旱涝的阈值,其中 SPI≤-1.0 即为发生了干旱, SPI≥1.0 即为发生了雨涝。由图 1 可以看出,

SPI1 的变化率最小,随着尺度的增加,变化率逐渐变大,SPI12 的变化率最大。其中,短期内的 SPI1 和 SPI2 由于受短时间降水影响很大,可以反映出短期的旱涝变化特征。SPI3 可以反映季节尺度的干旱特征,其变化曲线较为平滑,与农业干旱关系密切;SPI6 和 SPI12 可以清楚的反映长期旱涝变化特征,并对于下层土壤水分、河流径流量、地下水位以及水库蓄水量有较好的反映。

北疆地区不同时间尺度的 SPI 都呈增加趋势,表

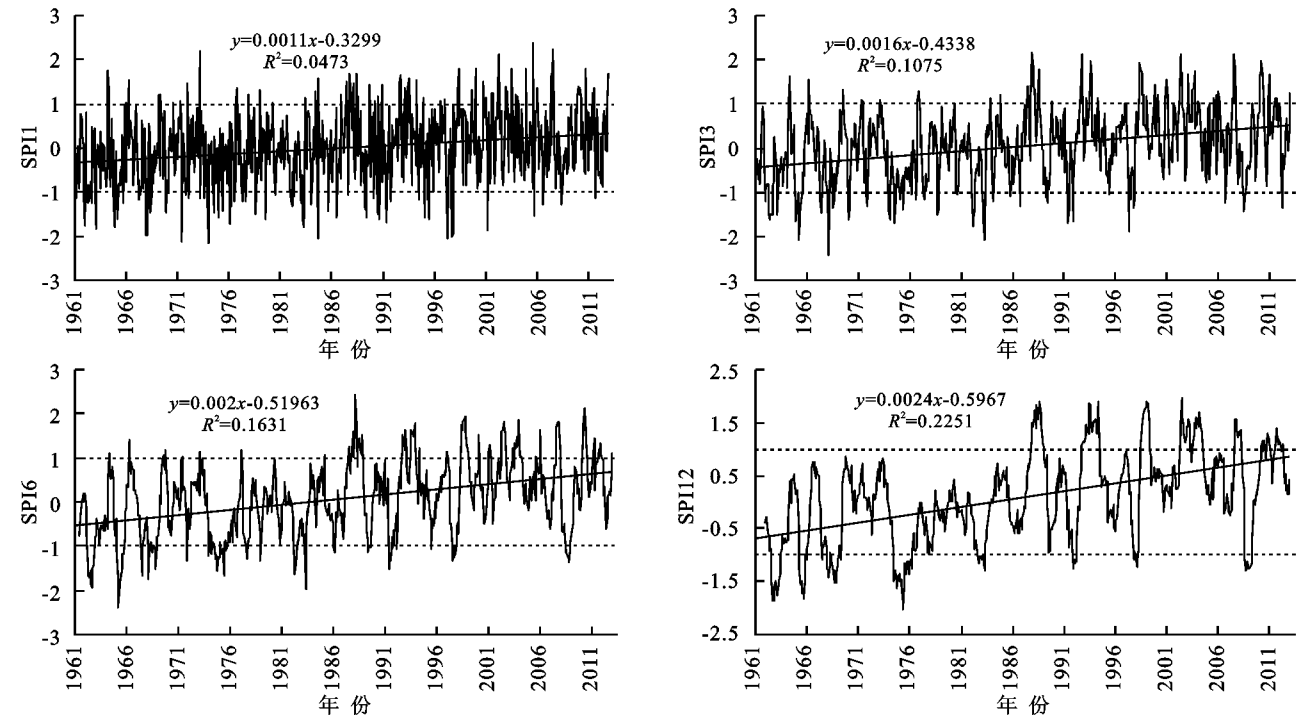


图 1 北疆地区不同尺度 SPI 指数变化特征

2.1.2 不同时间尺度 SPI 年代变化特征 表 2 为不同尺度下北疆旱涝的年代变化特征,可以看出同年代内,季节尺度和年尺度下的 SPI 指数能较为充分的反映北疆的旱涝状况,而 1 个月尺度和半年尺度的 SPI 在旱涝监测上则表现不充分。随着年代的增加,年代干旱频次都逐渐减少,在 1960s 达到年代最高值,在

明其呈湿润化的趋势。其中 SPI1 中干旱频次为 78 个月,雨涝频次为 91 个月;SPI3 中干旱频次为 85 个月,雨涝频次为 96 个月;SPI6 中干旱频次为 72 个月,雨涝频次为 111 个月;SPI12 中干旱频次为 80 个月,雨涝频次为 112 个月。可以看出,在旱涝监测上,随着时间尺度的增加,雨涝频次有所增加,而干旱频次则有所波动。四个时间尺度旱的涝涝变化都具有明显的时段性,在 1980s 之前干旱偏多、雨涝偏少,在 1980s 以后干旱偏少而雨涝偏多。

2000s 达到年代最低值;不同时间尺度下,年代雨涝频次都逐渐增加,在 1960s 达到年代最低值,在 2000s 达到年代最高值。1980s 前,干旱频次大于雨涝频次,而在 1980s 及其以后,雨涝发生频次大于干旱发生频次。因此,旱涝的年代变化表明了北疆地区明显的湿润化趋势。

表 2 不同时间尺度旱涝年代变化特征

参数	1961—1970 年		1971—1980 年		1981—1990 年		1991—2000 年		2000—2012 年	
	干旱	雨涝	干旱	雨涝	干旱	雨涝	干旱	雨涝	干旱	雨涝
SPI1	23	11	21	8	15	14	11	22	5	25
SPI3	37	13	26	16	20	27	13	31	14	33
SPI6	33	10	22	16	21	26	12	42	13	38
SPI12	43	2	21	16	25	34	11	49	12	38
平均	34	9	22.5	14	20.25	25.25	11.75	36	11	33.5

2.1.3 不同时间尺度下不同干旱等级年际变化特征 不同时间尺度下,不同干旱等级年际变化过程大致相当,都能在总体上反映具体时段的旱涝状况,但在旱涝持续时间上有多不同(图 2)。其中 SPI12 的不

同干旱等级变幅最大,能反映区域旱涝的长期变化过程。在雨涝监测上,极涝月数在 1980 年之前发生月数极少,SPI6 反映为 2 个月,SPI1,SPI3 和 SPI12 都反映仅有 1 个月;在 1980 年之后,发生月数则逐渐增

多, SPI6 和 SPI12 都反映最大频次为 5 个月, 表明雨涝发生频次和持续时间都在。四个时间尺度都表明重涝和极涝月数在 1971—1980 年偏少, 在 1990—2000 年偏多, 并且仍然呈增加趋势。正常等级月数则呈现较大的波动性, 总体变化趋于平稳。轻旱等

级月数在 1961—1983 年相对较多, 在 2000 年前后极少发生。中旱和特旱月数在 1960—1990 年相对偏多, 在 2000—2010 年发生的频次较低, 甚至连续多年无干旱发生, 尤其是特旱等级, 在 2001 年后没有发生过。

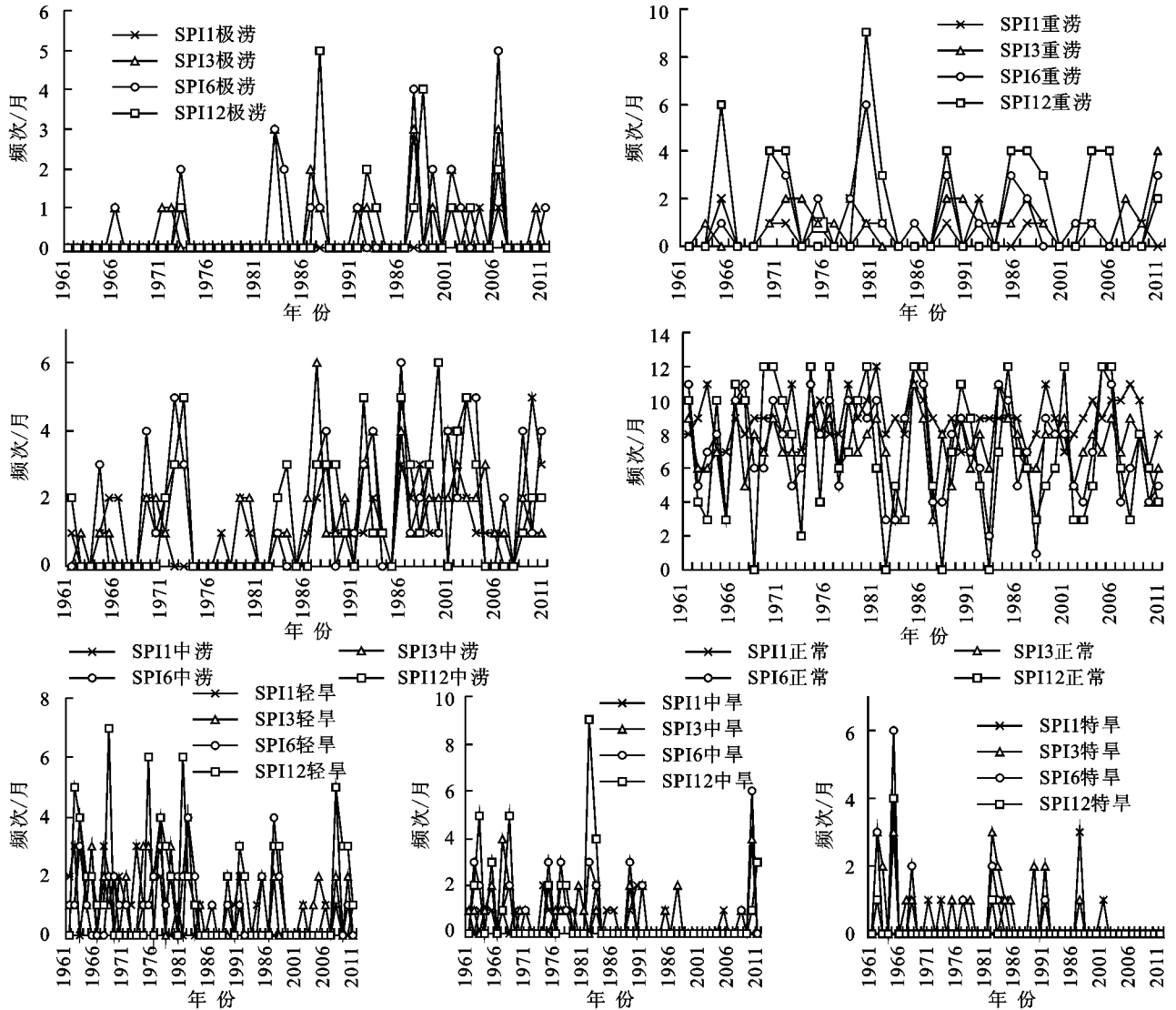


图2 北疆地区不同时间尺度下不同干旱等级年际变化特征

## 2.2 北疆地区旱涝空间变化特征

**2.2.1 旱涝年尺度空间分布特征** 北疆地区为典型的干旱半干旱区温带大陆性气候, 但是由于北疆地形地貌、土壤、水文等要素的空间差异性, 其旱涝特征在空间分布上也会有所不同。为研究北疆地区旱涝的年尺度空间分布特征, 对 SPI12 进行了 EOF 分析, 结果表明前四个特征向量占方差的 91.783%, 可以代表北疆旱涝的空间分布特征。图 3 为前四个特征向量的空间分布。第一特征向量占总方差的 68.6%, 是北疆地区干旱分布的主要形态, 呈一致的正值分布, 较大值主要集中在北疆中部的托里、克拉玛依和石河子地区, 较小值主要在东部的青河、轮台和北塔

山一带, 这是由北疆地区大尺度天气引起的降水在空间分布的差异性导致的, 所以第一特征向量所代表的空间变化特征可以视为北疆地区年尺度旱涝分布第一型, 即总体一致型<sup>[15]</sup>。

第二特征向量占总方差的 10.2%, 空间上呈现东北部—西南部相反, 自东北向西南其值逐渐变小的趋势, 正值中心分布在哈巴河、吉木乃、布尔津和阿勒泰地区, 负值中心分布在博乐和精河地区, 反映了东北部和西南部反向的旱涝趋势; 第二特征向量所代表的空间变化特征可定义为北疆地区旱涝分布第二型, 即东北部—西南部差异型。

第三特征向量占总方差的 8.4%, 其值在空间上

呈现自西北向东南递增,正值中西分布在西南的奇台、北塔山和青河地区,低值中心分布在吉木乃、和布吉赛尔、哈巴河和布尔津地区,反映了北疆地区旱涝的第三种分布类型,即西北—东南差异型。第四特征向量占总方差的 4.5%,中部石河子地区和乌鲁木齐地区是低值区,西部、北部和东部都是高值区,反映了北疆地区旱涝的第四种分布类型,即中部—边缘差异型。

为了进一步分析北疆地区的旱涝空间特征,对前

四个特征向量按最大方差进行因子旋转,旋转正交经验分解(EOF)结果表明,旋转后各特征向量的方差贡献比旋转前分布均匀,前三个特征向量分别占总方差的 36.84%,34.66%和 28.50%。按旋转后的因子载荷将北疆地区划分为四个旱涝区域:北部地区(阿勒泰、哈巴河、福海、布尔津、吉木乃、和布吉赛尔)、东部地区(青河、北塔山和奇台)、西部地区(塔城、温泉、托里、阿拉山口、伊宁、富蕴、精河、博乐)和中部地区(克拉玛依、炮台、莫索湾、乌苏、石河子和乌鲁木齐)。

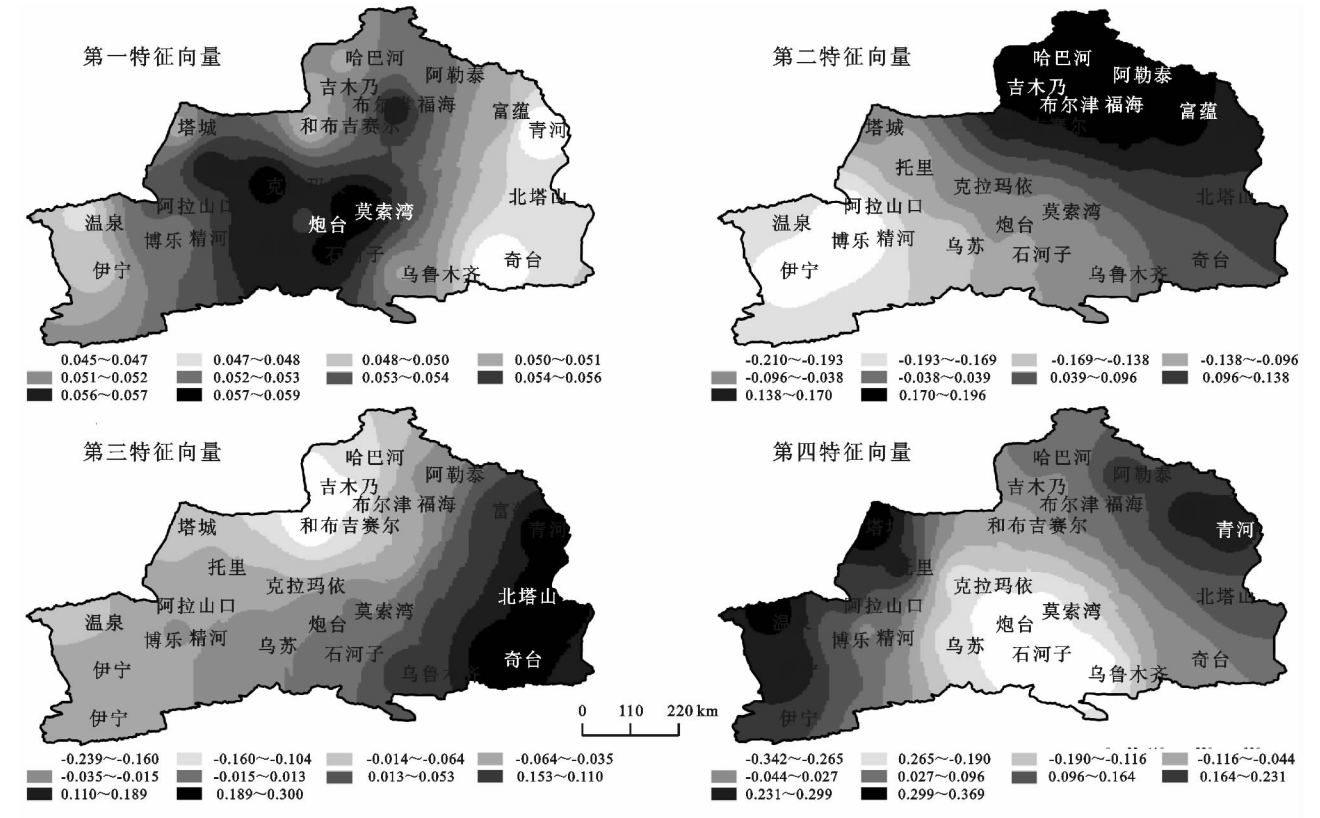


图 3 北疆地区干旱尺度 EOF 前 4 个特征向量的空间分布

2.2.2 旱涝季节空间空间分布特征 对 23 个站点的四季的 SPI 3 值进行 EOF 分析(图 4),选取第一特征向量空间分布研究不同季节的干旱空间分布特征。春季、夏季、秋季和冬季的第一特征向量分别解释了总方差的 64.50%,64.01%,57.25%和 63.57%,足以代表各季节的旱涝的空间分布特征,且其分量都为正值,表明北疆地区旱涝以及降水在空间具有很好的一致性。

春季的 SPI 3 第一特征向量有高值两个中心,分别是石河子市、乌苏、炮台、莫索湾、克拉玛依地区和托里地区、福海地区,低值中心分布在东部的奇台、青河和北塔山地区,表明春旱主要发生在东部的青河、北塔山和奇台地区,而中部的石河子地区、克拉玛依和托里地区则春涝相对多发;夏季的干旱主要分布在东部的奇台地区和西部的伊宁地区,雨涝分布在中部石河子地区、克拉玛依市、托里、中北部的和布吉赛

尔、福海、吉木乃、布尔津和哈巴河地区。秋季的干旱主要发生在东部的奇台、北塔山、青河地区和西部的伊宁地区,雨涝主要发生在中部的石河子市、乌苏、炮台、莫索湾、克拉玛依、托里、吉木乃、布尔津、福海、和布吉赛尔地区。冬季的干旱主要发生在东部的奇台、北塔山和青河地区,雨涝则主要发生在托里、克拉玛依、莫索湾、炮台、石河子、布尔吉木乃和福海地区。综合可以看出,北疆地区中部四季降水相对充足,而东部地区干旱较为严重。

### 3 讨论

1980s 为干旱向湿润的转折期,这与姜逢清<sup>[16]</sup>、贺晋云<sup>[17]</sup>、施雅风<sup>[18]</sup>的研究结果是一致的。SPI1, SPI3, SPI6 和 SPI12 值的时间序列都表明,北疆地区干旱发生较为频繁,且在 1980s 年之前更为频繁且持

续时间长,1980s 年后也有发生但大多持续时间较短;而雨涝在 1980s 年之前相对较少,在 1987 年后频发,这表明 1980s 年后北疆的湿润化趋势极为明显的。北疆气候的湿润化有利于改善北疆地区的干旱

半干旱的环境,但是,伴随着进一步的湿润化,雨涝灾害频发,甚至达到了极涝等级。其主要是由于北疆地区降水量在增加且降水的集中性在增强,从而引起极端降水事件越发频繁。

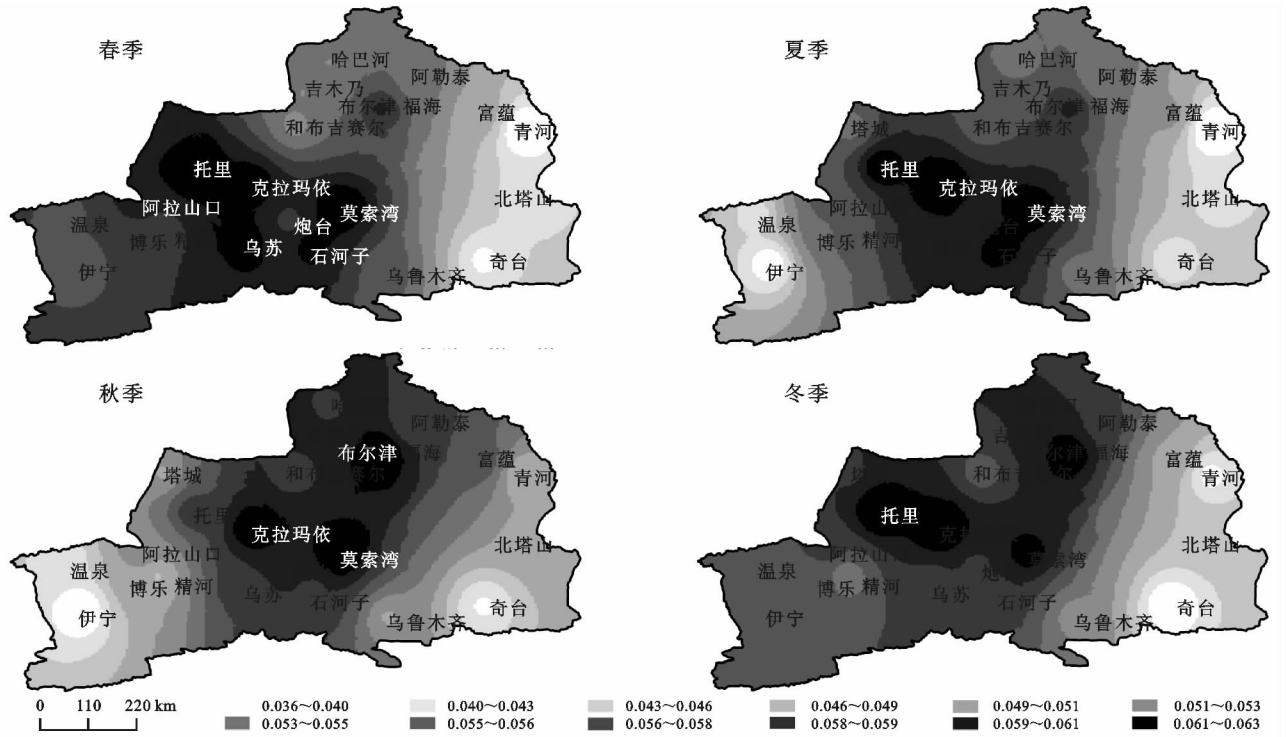


图 4 北疆地区干旱四季 EOF 第 1 特征向量的空间分布

空间上的分布来看,北疆地区旱涝整体变化趋势是一致的,都在趋于湿润化,是对全球变化的整体响应,但是由于北疆地区自然地理状况的空间异质性,空间上也呈现东北—西南、西北—东南、中部—边缘差异型<sup>[19]</sup>。四级旱涝在空间上都呈现出中部偏南的石河子地区、托里和克拉玛依地区以及北部的富蕴地区是相对多雨涝区域,东部的奇台、北塔山和青河地区是相对干旱区域。研究表明,北疆地区北部和南部是极端降水增加趋势较为明显的地区,极端降水的增加在一定程度上会导致雨涝多发。

SPI 在反映了北疆地区旱涝的时空变化特征,但是 SPI 仍存在一些不足,如降水仅仅是影响旱涝的其中一个因素,气温、蒸发、日照时数、风速等也与旱涝密切相关。SPI 以月降水量作为数据基础,不能反映区域的干旱事件的持续日数尤其是干旱产生和解除的机理。因此,结合多种气象要素和区域自然环境的空间异质性,从整体上综合探究北疆地区的旱涝时空分布特征及其内在机理需要进一步的研究工作。

## 4 结论

过去 52 a 北疆地区不同尺度下的 SPI 值都呈增加趋势,表明了北疆地区明显的湿润化趋势。不同时

间尺度的 SPI 的年际和年代变化都表明,过去 52 a 旱涝时间变化以 1980s 为分界线,1961—1980 年干旱频发且持续时间长而雨涝发生较少且持续时间短,1991—2012 年干旱发生较少且持续时间短而雨涝频发且持续时间长。

空间上分布上,年尺度的旱涝在空间上整体上不断湿润化,在区域上呈现整体一致型、东北—西南、西北—东南、中部—边缘差异型分布,并以此划分为四个旱涝区域:北部地区(降水适宜区)、东部地区(极度干旱区)、西部地区(干旱区)和中部地区(雨涝区)。季节尺度上,中部的石河子、托里、克拉玛依地区和北部的福海地区是相对湿润区域,东部的青河、北塔山和奇台地区是相对干旱的区域。

暖湿化趋势下北疆地区旱涝的变化是多种因素共同作用的结果,也会对区域的水热资源的分配尤其是农业生产的发展产生影响。因此,对其成因及其可能的影响有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Alexander L A, Simon Bindoff N L. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis Summary for Policymakers[R]. OPCC, 2013.

- [2] 王媛媛,张勃. 基于标准化降水指数的近 40a 陇东地区旱涝时空特征[J]. 自然资源学报,2012,27(12):2135-2144.
- [3] Palmer W C. Meteorological drought[M]. Washington, DC: US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [4] Shafer B A, Dezman L E. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas[C]// Proceedings of the western snow conference. Fort Collins, CO:Colorado State University, 1982,50:164-175.
- [5] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, MA: American Meteorological Society, 1993, 17(22):179-183.
- [6] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. Drought monitoring with multiple time scales[C]// Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology. Dallas, Boston, MA: American Meteorological Society, 1995:233-236.
- [7] 任建成,巩在武,郑宝枝,等. 基于 SPI 的近 30 年黄河三角洲地区旱涝时空特征[J]. 水土保持研究,2016,23(1):46-51.
- [8] 杜华明,贺胜英. 岷江流域降水特征与旱涝灾害趋势分析[J]. 水土保持研究,2015,22(1),153-157.
- [9] 张调风,张勃,王有恒,等. 基于综合气象干旱指数的石羊河流域近 50 年气象干旱特征分析[J]. 生态学报,2013,33(3):0975-0984.
- [10] 谢五三,田红,王胜,等. 基于 CI 指数的淮河流域干旱时空特征研究[J]. 气象,2013,39(9):1171-1175.
- [11] Livada I, Assimakopoulos V D. Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index(SPI)[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2007,89(34):143-153.
- [12] Vicente-Serrano S M, Begueria S, LoPez-Moreno J L. A multi-scale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-171
- [13] 热孜宛古丽·麦麦提依明,杨建军,刘永强,等. 新疆近 54 年气温和降水变化特征[J]. 水土保持研究,2016,23(2):123-127.
- [14] 韩雪云,杨青,姚俊强. 新疆天山山区近 51a 来降水变化特征[J]. 水土保持研究. 2013,20(2):139-144.
- [15] 魏义长,王纪军,张芳,等. 经验正交函数与地统计相结合分析降水时空变异[J]. 灌溉排水学报,2010,29(4):105-109.
- [16] 姜逢清,胡汝骥. 近 50 年来新疆气候变化与洪、旱灾害扩大化[J]. 中国沙漠,2004,24(1):35-40.
- [17] 贺晋云,张明军,王鹏,等. 新疆气候变化研究进展[J]. 干旱区研究,2011,29(3):499-508.
- [18] 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前进初步探讨[J]. 冰川冻土,2002,24(3):199-225.
- [19] 刘天虎,刘天龙. 集合经验模态分解下中国新疆降水变化趋势的区域特征[J]. 沙漠与绿洲气象,2015,9(4):17-24.

~~~~~

(上接第 292 页)

- [6] Shi Z H, Chen L D, Fang N F, et al. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China[J]. Catena, 2009,77(1):1-7.
- [7] Lyon S W, Walter M T, Gérard-Marchant P, et al. Using a topographic index to distribute source area runoff predicted with the SCS curve-number equation [J]. Hydrological Processes, 2004,18(15):2757-2771.
- [8] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Sciences Journal, 1979,24(1):43-69.
- [9] Ponce V M, Hawkins R H. Runoff curve number: Has it reached maturity? [J] Journal of Hydrologic Engineering, 1996,1(1):11-19.
- [10] 谢云,刘宝元,章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [11] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970,10(3):282-290.
- [12] Legates D R, McCabe G J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation[J]. Water Resources Research, 1999,35(1):233-241.