

# 基于 SPEI 的新疆干旱变化特征分析

阿迪拉·阿布都热合曼<sup>1</sup>, 咎梅<sup>1,2\*</sup>

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆乌鲁木齐 830054; 2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830054)

**摘要** 以新疆 55 个国家气象站 1961—2015 年逐日气温和降水数据, 采用季尺度下的标准化降水蒸散指数(SPEI), 以国家划分的气象干旱等级为判别标准, 分析新疆干旱过程。结果表明, 近 55 年新疆轻旱次数呈西北多东南少的趋势分布; 中旱次数呈西北和东北多、南部偏少的趋势; 重旱次数呈准噶尔盆地、吐鲁番盆地和塔里木盆地东部干旱次数偏高, 其余地区较低的趋势; 特旱次数呈南多北少的分布趋势。近 55 年新疆干旱影响范围及干旱强度极差较大, 且两者呈正相关。农作物平均受灾率与影响范围年际变化具有较高的一致性。通过 REOF 时空分布将新疆分成 3 个模式: 第一模式呈北疆与南疆相反格局的特征; 第二模式高值区位于北疆北部, 负值区位于新疆西南部; 第三模式表现为新疆东西部呈相反格局的状态。各模式干旱强度随时间变化趋势也不同。

**关键词** 标准化降水蒸散指数(SPEI); 干旱; REOF; 时空分布特征

**中图分类号** P 429 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2022)11-0178-06

**doi:** 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.11.046



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Analysis of Drought Change Characteristics in Xinjiang Based on SPEI

Adila · Abudurehman<sup>1</sup>, ZAN Mei<sup>1,2</sup> (1. School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054; 2. Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Areas, Urumqi, Xinjiang 830054)

**Abstract** Based on the daily temperature and precipitation data from 55 national meteorological stations in Xinjiang from 1961 to 2015, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) at the seasonal scale was used to analyze the drought process in Xinjiang with the meteorological drought grades classified by the country as the criterion. The results showed that the number of light droughts in Xinjiang in the past 55 years showed a trend of more in the northwest and less in the southeast; the number of moderate droughts was more in the northwest and northeast and less in the south. The number of severe drought was higher in the Junggar Basin, Turpan Basin and eastern Tarim Basin, and lower in other areas. The number of special drought was more in the south and less in the north. The range and intensity of drought in Xinjiang in the last 55 years were significantly different, and the two were positively correlated. The average disaster rate of crops had a high consistency with the interannual variation of the affected area. Xinjiang was divided into three modes based on the spatial and temporal distribution of REOF. The first mode was the opposite pattern of northern Xinjiang and southern Xinjiang. The high value region of the second mode was located in the north of northern Xinjiang, and the negative value region was located in the southwest of Xinjiang. The third mode showed that the pattern of east and west of Xinjiang was opposite. The variation trend of drought intensity of each mode was also different with time.

**Key words** Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); Drought; REOF; Temporal and spatial distribution characteristics

干旱是自然界中频发的一种灾害现象, 其影响范围广, 持续时间长, 造成的灾难性后果严重影响我国农业生产、粮食安全与社会经济发展<sup>[1-2]</sup>。IPCC 报告中指出, 自 20 世纪以来全球普遍升温, 蒸发量大幅度增加, 干旱趋势增强<sup>[3]</sup>。我国干旱、半干旱区开展不同尺度的区域干旱检测与风险评估有利于改善地区干旱现象、提高地区生态系统的自我恢复能力。干旱指数是开展区域干旱检测与风险评估的有效手段之一<sup>[4]</sup>。

鉴于造成干旱现象的因素错综复杂, 为了更好地研究干旱, 也为了能更准确地表示干旱的严重程度, 各国学者都提出了专门用于干旱监测的指标。当前关于干旱指标的研究较多, 其中应用较广泛的气象干旱指标有标准化降水指数(SPI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)、气象干旱综合指数(MCI)、帕默尔干旱指数(PDSI)等, 各指标都有各自不同的优劣势<sup>[5-9]</sup>。Vicente-Serrano 等<sup>[10]</sup>提出的 SPEI 指数, 是在 SPI 指数的基础上, 结合 SPI、PDSI 指数的优点, 综合考虑了

降水的蒸散发影响, 且从多时间尺度角度比较分析, 适用性更佳, 逐步成为气象干旱监测中较理想的工具之一。目前利用不同干旱指标对新疆进行干旱变化特征的研究较多, 但利用季尺度数据对研究区进行干旱时空变化特征及干旱灾情的研究较少, 3 个月时间尺度可反映季节干旱状况, 12 和 24 个月可分别反映年际、年代际干旱状况。新疆作为我国国土空间面积最大的区域, 地处西北边陲, 气候干燥、降水稀少且水资源十分匮乏, 干旱现象频发, 严重制约了当地社会经济发展, 加大了与我国内陆地区的发展差距, 基于此, 笔者利用 3 个月尺度的 SPEI 指数, 定量分析新疆干旱现象发生的时空演化规律, 厘清新疆发生干旱的基本特征, 为新疆的干旱监控、预警、防范与减灾工作提供理论借鉴和科学依据。

## 1 资料与方法

**1.1 研究区概况** 新疆维吾尔自治区地处 73°29'54"~96°23'03"E, 34°20'11"~49°10'55"N, 位于我国西北。全疆总面积为 166×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 占全国总面积的 1/6<sup>[11]</sup>。新疆属于典型的温带大陆性气候, 年均降水量远低于沿海地区。山脉与盆地相间排列构成了新疆“三山夹两盆”的地貌特征, 由北至南分别是阿尔泰山、准噶尔盆地、天山山脉、塔里木盆地和昆仑山。以天山山脉为界形成了南北疆差异显著的气候特征。在全球气候变暖的背景下, 加剧了新疆的干旱特征, 进而造成干旱灾害频繁发生, 严重威胁着新疆社会经济发展。

**基金项目** 新疆维吾尔自治区重点实验室招标课题(XJDX0909-2021-01); 新疆师范大学博士科研启动基金项目(XJNUBS2003)。

**作者简介** 阿迪拉·阿布都热合曼(1995—), 女, 维吾尔族, 新疆伊宁人, 硕士研究生, 研究方向: 资源环境遥感。\* 通信作者, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事干旱区生态环境与遥感应用研究。

**收稿日期** 2021-12-24

**1.2 数据来源** 该研究的气象站观测数据来源于中国气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/site/index.html>),选取了新疆 55 个国家气象站点的平均气温和降水等数据。数据来

源准确、可靠性高、研究期数据完整。其中 SPEI 数据集及各站点经纬度、海拔等数据来源于相关文献<sup>[12]</sup>。该研究选用的新疆区域气象站点分布如图 1 所示。

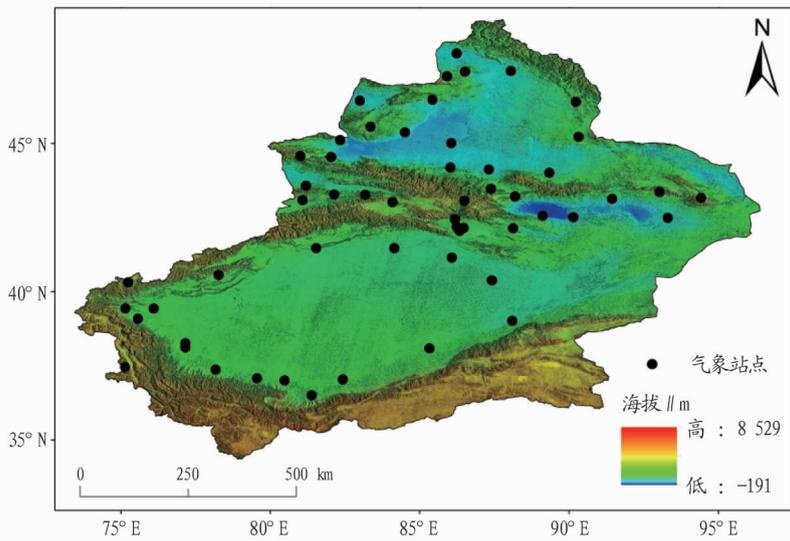


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)的计算方法<sup>[13]</sup>。

(1) 利用 Thornthwaite 方法,综合考虑气温因素的影响来计算潜在蒸散量(PET),公式如下:

$$PET = 16.0 \times \left( \frac{10T_i}{H} \right)^a \quad (1)$$

式中,  $T_i$  为月平均气温,  $H$  为年热量总和,  $a$  为常数。

(2) 计算降水与潜在蒸散量的差值。计算公式如下:

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

式中,  $P_i$  为月降水量,  $PET_i$  为月潜在蒸散量。

(3) 对数据序列进行正态化处理,由于  $D_i$  序列可能存有负值,采用 log-logistic 概率分布对  $D_i$  进行拟合,并求累计函数。计算公式如下:

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

式中,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  分别为尺度参数、形状参数、Origin 参数,均用线性矩方法拟合得到。

(4) 利用正态逆变换求出 SPEI。计算公式如下:

$$W = \sqrt{-2\ln(P)} \quad (4)$$

$$SPEI = W - \frac{C_0 - C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (5)$$

式中,  $C_0 = 2.515517$ ,  $C_1 = 0.802853$ ,  $C_2 = 0.010328$ ,  $d_1 = 1.432788$ ,  $d_2 = 0.189269$ ,  $d_3 = 0.001308$ 。当  $P > 0.5$  时,  $P$  值取  $1-P$ <sup>[14]</sup>。

**1.3.2 干旱强度的运算。**据国家气候中心最新发布的气象干旱等级(GB/T 20481—2006)<sup>[15]</sup>中对干旱过程及强度的定义:当 SPEI 指数持续 10 d 为轻旱以上等级时,可被判定为一次干旱过程。干旱强度定义为一次干旱过程累计的 SPEI 指

数之和,其值越小,干旱过程越强。SPEI 指数具有多时间尺度的特征,SPEI-3 即季尺度的数值,能够较明确地表示季节性土壤湿度的演变特征。统计新疆地区 1961—2015 年 SPEI-3 的数值,结合新疆特有地形地貌条件,以及前人的研究也表明 SPEI 指数具有较好的区域适用性,因此 SPEI 指数作为干旱评估研究标准是合理的,结果也是可参考的。SPEI 指数的干旱等级划分见表 1。

表 1 SPEI 气象干旱等级的划分

Table 1 Classification of SPEI meteorological drought grades

等级 Grade	SPEI 值 SPEI value	类型 Type
1	> -0.5	无旱
2	> -1.0 ~ -0.5	轻旱
3	> -1.5 ~ -1.0	中旱
4	> -2.0 ~ -1.5	重旱
5	≤ -2.0	特旱

**1.3.3 干旱影响范围的确定。**基于站点的 SPEI 对干旱影响范围进行计算。SPEI 值达到轻旱及以上等级的台站数 ( $N_i$ ) 与总站数 ( $N$ ) 之比,即 SPEI 值 ≤ -0.5 时就表示有干旱的发生,作为不同级别干旱影响范围的指标,其反映干旱面积大小。将干旱影响范围超过 90% 的定义为大范围干旱。计算公式为:

$$R_i = \frac{N_i}{N} \times 100\% \quad (6)$$

**1.3.4 正交函数方法。**经验正交函数(EOF)和旋转经验正交函数(REOF)是分析气象要素时空分布特征时广泛使用的统计方法<sup>[16-19]</sup>。正交函数方法能将同时随时间及空间变化的某要素场进行分解,将其分解为仅随空间变化的空间模态和仅随时间变化的时间系数的线性组合。采用 EOF 方法,

根据 EOF 原理进行分解,对任意标准化气象矩阵  $X$  可展开下列矩阵运算<sup>[20]</sup>:

$${}_m X_n = ({}_m V_k \times \sqrt{\lambda_k}) \times \left( \frac{1}{\sqrt{\lambda_k}} \times {}_k T_n \right) = {}_m L_k \times {}_k F_n \quad (7)$$

式中,  ${}_m L_k$  是空间特征向量矩阵,  ${}_k T_n$  是时间系数,  ${}_m V_k$  是空间特征向量矩阵,  ${}_k F_n$  是主成分阵,  $\lambda_k$  为  ${}_m X_n$  的相关系数阵  ${}_m R_n$  的特征值。

REOF 基于 EOF 对载荷特征向量场进行方差极大旋转变换,使旋转空间向量场上各空间点旋转一个或几个,与 EOF 方法相比,它解决了不能明确表示不同地理区域特征的局限。旋转后所得的典型空间分布更好地反映了不同地理区域的变化情况,也反映了不同区域的相关分布状况。该研究对干旱过程强度进行 REOF 分析,所采用的空间插值方法为克里金插值。

## 2 结果与分析

### 2.1 新疆不同等级干旱次数空间分布

从新疆不同等级年干旱次数空间分布(图 2)可以看出,1961—2015 年各气象站点轻旱等级年平均干旱次数大体呈西北多东南少的趋势分布,发生轻旱次数最少的站点为十三间房,为 274 次。哈密地区西部及吐鲁番市轻旱次数偏少,小于 299 次;研究区南部焉耆、拜城,北部的布尔津、巩留等 16 个站点轻旱次数在 298~311 次;研究区西北、西南及东部的吉木乃、塔城、乌鲁木齐、莎车等 23 个站点发生轻旱次数在 311~323 次;轻旱次

数在 323~335 次的 12 个站点多数分布在天山山脉及阿尔泰山脉周边,其余少数站点全疆零星散布。

研究区各站点中旱等级年干旱次数的分布趋势并不明显,大体呈西北和东北多、南部偏少的趋势。发生中旱次数最少的站点为巴音郭楞蒙古自治州西部的轮台站(48 次);发生中旱次数最多的站点为伊犁州的新源站(89 次);发生中旱次数较少(48~64 次)的站点大多分布在南疆地区,站点数为 13 个;中旱次数在 64~80 次的站点均匀分布在全疆各地,发生中旱次数较多的站点在北疆的布尔津、新源以及南疆的拜城等 7 个站点。

研究区各站点重旱等级年干旱次数空间分布明显,准噶尔盆地、吐鲁番盆地周边及塔里木盆地东部地区干旱次数偏高,其余地区较低。发生重旱次数最多的站点为哈密地区的十三间房站点(62 次),最少的站点为和静站(25 次)。发生重旱次数在 25~39 次的站点数为 38 个,发生重旱次数在 39~61 次的站点数为 15 个。

研究区各站点特旱等级年干旱次数呈南多北少的趋势分布,发生干旱次数最多的站点为莎车站(29 次),最少的站点为十三间房(5 次)。吉木乃、博乐、巴音布鲁克、塔什库尔干等 21 个站点发生干旱次数为 5~14 次;发生干旱次数在 14~19 次的站点数为 17 个;发生重旱次数较多的站点集中在新疆南部地区,有 15 个站点发生干旱次数在 19~28 次。

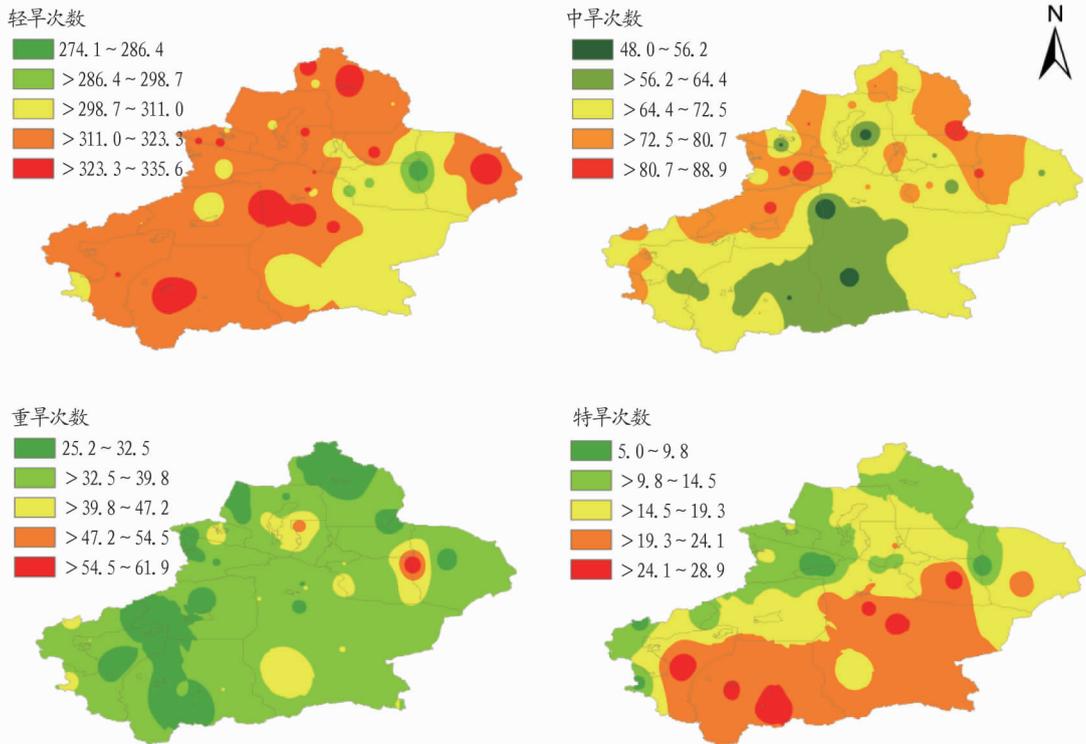


图 2 1961—2015 年新疆不同等级年干旱次数空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of annual drought frequency of different grades in Xinjiang from 1961 to 2015

### 2.2 新疆干旱影响范围年际变化特征及干旱灾情分析

根据气象干旱过程及干旱强度的定义,经站点比例计算得到近 55 年新疆地区干旱影响范围。由图 3a 可知,研究区干旱影

响范围( $R_i$ )极差较大,超过 90%;影响较小的干旱范围在 1987、1992 和 1993 年出现,分别为 0、3.6%、0;影响较大的干旱范围出现在 1997 和 2008 年,分别为 98.1%、92.7%;近 55

年平均干旱影响范围为 46.3%。从平均累计强度(SPEI)分析干旱过程的年际特征,由图 3b 可知,干旱强度的极差也较大,干旱强度最弱的年份出现在 1987 年,累计强度为 529.5;最强的干旱强度年出现在 1997 年,为-625.3。干旱影响范

围与区域平均累计强度年际变化特征彼此一致,说明大多数情况下干旱强度及其影响范围呈现正相关,干旱强度越强,影响范围越广,干旱强度越弱其影响范围也越小。

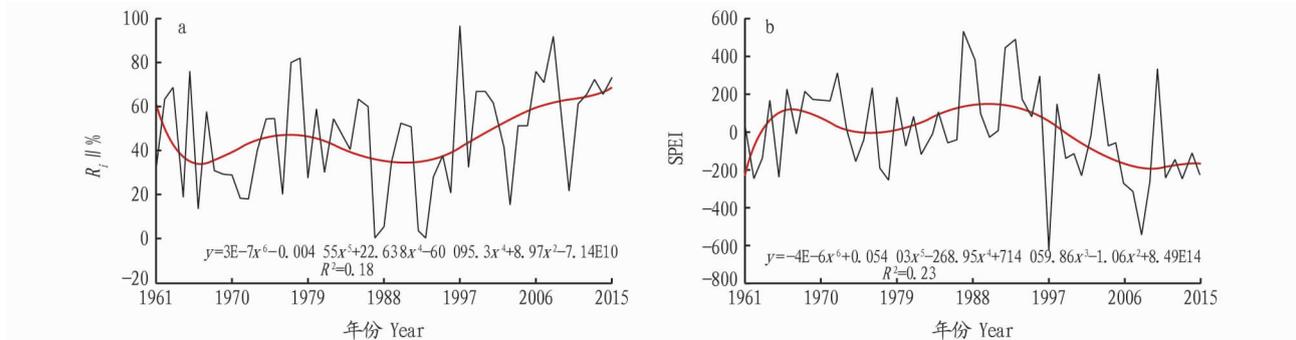


图 3 1961—2015 年新疆干旱影响范围 (a) 和区域平均累计强度 (b) 年际变化

Fig. 3 The interannual variation of Xinjiang drought affected range (a) and regional average cumulative intensity (b) from 1961 to 2015

旱灾对新疆农业发展影响较大。气象、农业及水文干旱为干旱的 3 种类型,其中气象干旱与农业干旱的关联性较高,从某种程度上来说,农业干旱是气象干旱的进一步发展。受旱面积和受灾率作为农业干旱指标,能够较全面地反映农业受灾情况<sup>[21]</sup>。因资料年代受限,在此仅讨论 1990—2008 年全疆受旱面积情况<sup>[22]</sup>。从全疆 1990—2008 年灾情平均情况(图 4)来看,2008 年农作物年均受旱面积最大,超过 80×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>;2002 年全疆农作物受旱面积最小,在 2×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup> 以下,其余年份受旱面积均在 2×10<sup>4</sup>~50×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>。由于新疆面积广,气候条件特殊,因而导致年份间受灾面积相差较大,该研究以农作物受旱面积占受灾面积的百分率来代表当年农业干旱受灾率,分析干旱对农业生产产生的影响。从 1990—

2008 年农作物平均受灾率(图 4)来看,2004、2006、2008 年均超过了 50%,其对应的干旱影响范围分别为 50.9%、76.3%、92.7%,这与上述的影响范围年际变化特征具有较高的一致性;平均受灾率较低的年份出现在 1992、1993、1998、1999、2002 和 2003 年,这些年份干旱影响范围分别为 3.6%、0、30.9%、67.2%、45.4%、14.5%,其中 1992、1993 和 2002 年的平均受灾率与干旱影响范围年际变化特征一致性较高,部分年份一致性较低。SPEI 指数能够较好地反映不同时间尺度干旱的评估,但由于 SPEI 主要考虑的是气象因子,没有考虑到其他人为因素的影响,因而可能导致了部分年份一致性较低的情况。

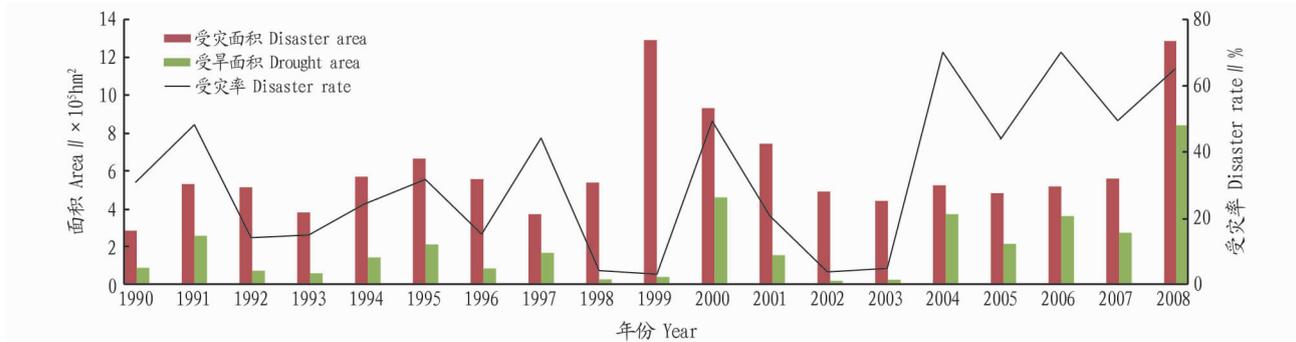


图 4 1990—2008 年新疆受灾面积、受旱面积及干旱受灾率

Fig. 4 Disaster area, drought area and drought disaster rate in Xinjiang from 1990 to 2008

### 2.3 新疆干旱强度时空特征

2.3.1 干旱强度空间模态。根据该研究定义得到近 55 年来新疆出现的所有干旱过程,计算新疆 55 个气象站点逐年所有干旱过程的累计强度,将 MCI 指数矩阵先进行 EOF 分解,然后再对前 5 个分量进行 REOF 处理并分析,得到 REOF 结果(表 2)。从表 2 可看出,REOF 前 5 个模态累计方差贡献率达到了 66.37%。

图 5 为对新疆 SPEI 指数进行 REOF 分析的前 3 个空间模态的分布情况,从图中可看出,第一模态表现出以北天山为分界线,新疆北部与南部呈现相反格局的空间分布特征;

表 2 REOF 前 5 个模态的方差贡献

Table 2 The variance contributions of the first 5 modes of REOF

模态 Mode	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%
1	24.76	24.76
2	16.23	40.99
3	9.84	50.83
4	9.23	60.06
5	6.31	66.37

REOF 特征向量值最小值为-0.015,方差贡献率为 24.76%,

高值区位于东疆地区和南疆地区,说明基于季尺度的 SPEI 来说,南疆为新疆干旱指数变化敏感的中心地区。第二模态表现为正中心区在北疆阿勒泰、塔城地区以及准噶尔盆地北部,位于研究区东南方向的库木库勒盆地为过渡区,负值中心在新疆西南以及东部部分地区,方差贡献率为 14.24%。第三模态表现为新疆西部与东部呈现相反格局的模式,高值

区在新疆西部,其位于天山西部高值区的伊犁河谷地区的水汽主要来自大西洋,而南疆地区近些年来的湿润化也较为明显,据前人研究,由于新疆独特的地形作用,北冰洋和西伯利亚沼泽水汽通过阿尔泰山和天山的缺口,导致水汽从中灌入,进而使南疆西部出现较湿润的气候。

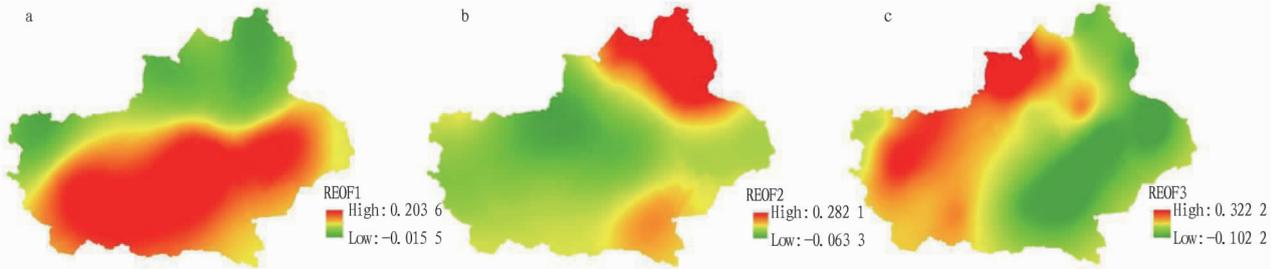


图5 1961—2015年新疆干旱强度 REOF 前3个载荷量空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of the first three loads of drought intensity REOF in Xinjiang during 1961–2015

**2.3.2 各模态时间系数变化。**据 REOF 分解出来的 3 个空间模态对应的时间序列,结合“2.2”干旱影响范围年际变化特征的内容,分析近 55 年来新疆各模态干旱强度随时间的变化特征。

REOF1 突出表现了南疆的正值区,对应的时间序列(图 6a)在 1961—1965 年处于正负值间变化的趋势;1966—1996 年基本上处于在正值区域飘浮变化的趋势,说明在这段时间新疆进入了相对干旱缓解的阶段。其中达到正值区的典型年份是 1972、1976、1987、1992 和 1996 年;1997—2015 年处于在负值区域变化的趋势,这说明这段时间新疆变干趋势明显,典型干旱年份为 2001、2007—2009、2013 年,从图 5a、图 6a 可看出,南北疆处于变化相反的格局,自 20 世纪 90 年代末期,北疆处于较干旱的变化趋势。

模态高值区位于北疆北部地区,对应的时间序列(图 6b)在 1961—1967 年处于正负值间变化不定的趋势;1968—1973 年处于在正值间变化的趋势,其典型年份为 1969 年,说明在这段时间干旱有变缓趋势;1974—2001 年处于长期在正负值间变换的阶段,北疆西北部、南疆除东南部外的大部分地区都处于干旱状态,典型干旱年份为 1982、1997 年。

REOF3 空间模态(图 5c)表现为新疆东西部呈相反的格局,高值区主要位于北疆西部、南疆西南部。由时间序列变化趋势(图 6c)可知,1961—1980 年处于正负值间振荡变化的趋势;1981—2015 年,除少数年份外,大部分年份处于正值区域,典型年份为 1987 年。这说明 20 世纪 80 年代后,干旱趋势得到了明显缓解,且造成了东干西湿的局面,近些年来西北地区的湿润化也确实得到了前人的验证<sup>[23-24]</sup>。

REOF2 空间分布特征(图 5b)与 REOF1 相差较大,第二

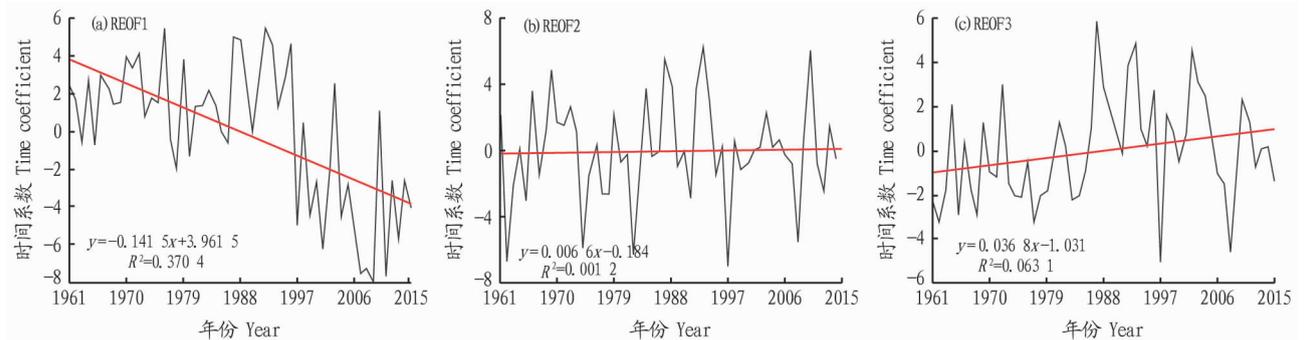


图6 1961—2015年新疆干旱强度 REOF 前3个载荷量时间系数变化

Fig. 6 Changes of the time coefficients of the first three loads of drought intensity REOF in Xinjiang during 1961–2015

### 3 讨论与结论

标准化降水蒸散指数(SPEI)为主要考虑蒸散发影响的气象干旱指数,新疆地形条件复杂、气候多变,该研究仅从气象角度来分析干旱特征,并未从灌溉或社会经济因素考虑。因此该研究的干旱影响范围与农作物实际受旱情况一致性有待探讨。总体上,通过 SPEI 分析得出,1961—2015 年新疆不同等级年干旱次数空间分布明显;通过计算 SPEI 干旱强

度,较好地反映了近 55 年来新疆干旱影响范围年际变化特征与干旱灾情之间的关系;基于 SPEI 指数,用 REOF 方法将新疆分成了 3 个模态,并与其对应的时间系数进行了对比讨论。具体得出以下结论:

(1)近 55 年新疆轻旱次数呈西北多东南少的趋势分布;中旱次数分布趋势不明显,大体呈西北和东北多、南部偏少的趋势;重旱次数空间分布明显,准噶尔盆地、吐鲁番盆地及

塔里木盆地东部干旱次数偏高,其余地区较低;特旱次数呈南多北少的分布趋势。

(2)近 55 年新疆干旱影响范围及干旱强度极差较大,且两者呈正相关。从 1990—2008 年灾情情况来看,2008 年农作物受旱面积最大,2002 年受旱面积最小。农作物平均受旱率与影响范围年际变化具有较高的一致性。

(3)通过 REOF 将新疆分成 3 个模态,第一模态呈北疆与南疆相反格局的特征,其时间系数表明,自 20 世纪 90 年代末期以来,北疆处于较干旱的变化趋势;第二模态高值区位于北疆北部,负值区位于新疆西南部,时间系数表明其经历了干旱缓解期到长期干旱的变化;第三模态表现为新疆东西部呈相反格局的状态,其时间系数表明 20 世纪 80 年代后期干旱趋势得到了明显的缓解。

### 参考文献

[1] 沈国强,郑海峰,雷振锋. 基于 SPEI 指数的 1961—2014 年东北地区气象干旱时空特征研究[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5882—5893.

[2] 张祺,许德合,丁严. 基于 SPEI 和对空立方体的中国近 40 年干旱时空模式挖掘[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 194—201.

[3] 滕怀颀,冯克鹏. 基于 SPEI 干旱指数的西北地区干旱时空分布[J]. 农业与技术, 2021, 41(8): 887—893.

[4] 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.

[5] 李治国,朱玲玲,张延伟,等. 基于 SPI 指数的近 55 年河南省干旱时空变化特征[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(10): 237—242.

[6] 谢坤,丁明军,张华敏,等. 基于 SPEI 指数的鄱阳湖流域近 60 a 干旱时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 2015—2027.

[7] 成青燕,高晓清,林纾,等. 基于 MCI 指标的甘肃省近 50 年干旱特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 211—218.

[8] 宋琳琳,张强,任余龙,等. PDSI 及 sc\_PDSI 干旱指数在中国西南地区适用性分析[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 242—251.

[9] 沈彦军,李红军,雷玉平. 干旱指数应用研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 128—133, 186.

[10] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I, et al. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of climate, 2010, 23(7): 1696—1718.

[11] 潘素敏,张明军,王圣杰. 新疆夏季云下二次蒸发对雨滴稳定同位素影响的定量研究[J]. 干旱区地理, 2018, 41(3): 488—498.

[12] 姚俊强,毛灼峰,胡文峰,等. 1961—2015 年新疆区域 SPEI 干旱指数数据集[J]. 中国国家冰川冻土沙漠科学数据, 2019, 4(3): 112—121.

[13] 张茵,张喜亮,李金建,等. 基于 SPEI 的四川省盆地季节性干旱时空变化特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(5): 242—250, 256.

[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级: GB/T 20481—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级: GB/T 20481—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

[16] NORTH G R, BELL T L, CAHALAN R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Monthly weather review, 1982, 110(7): 699—706.

[17] 施能. 气象科研与预报中的多元分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 1995.

[18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.

[19] 程麟钧,王帅,官正宇,等. 中国臭氧浓度的时空变化特征及分区[J]. 中国环境科学, 2017, 37(11): 4003—4012.

[20] 李家启,申双和,刘俊,等. 重庆地区地闪活动空间分布及其趋势分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(5): 77—84.

[21] 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.

[22] 新疆维吾尔自治区统计局, 国家统计局新疆调查总队. 新疆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018: 33—155.

[23] 姚旭阳,张明军,张宇,等. 中国西北地区气候转型的新认识[J/OL]. 干旱区地理, 2021—10—18 [2021—11—22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20211018.1255.004.html>.

[24] 李明,孙洪泉,苏志诚. 中国西北气候干湿变化研究进展[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1180—1194.

(上接第 166 页)

[14] 路茂涛,鲍淑娟. 刺梨多糖对小鼠抗应激功能和免疫功能的影响[J]. 广州中医药大学学报, 2002, 19(2): 141—142.

[15] CHEN G J, KAN J Q. Characterization of a novel polysaccharide isolated from *Rosa roxburghii* Tratt fruit and assessment of its antioxidant *in vitro* and *in vivo* [J]. International journal of biological macromolecules, 2018, 107: 166—174.

[16] WANG L, LI C, HUANG Q, et al. *In vitro* digestibility and prebiotic potential of a novel polysaccharide from *Rosa roxburghii* Tratt fruit [J]. Journal of functional foods, 2019, 52: 408—417.

[17] 王峙力,王鑫,韩烁,等. 甜玉米芯硒多糖的制备及对淀粉酶抑制作用[J]. 包装工程, 2021, 42(21): 33—41.

[18] WU P H, HAN S C, WU M H. Beneficial effects of hydroalcoholic extract from *Rosa roxburghii* Tratt fruit on hyperlipidemia in high-fat-fed rats [J]. Acta cardiologica sinica, 2020, 36(2): 148—159.

[19] XIONG Q P, HUANG S, CHEN J H, et al. A novel green method for deproteinization of polysaccharide from *Cipangopaludina chinensis* by freeze-thaw treatment [J]. Journal of cleaner production, 2017, 142: 3409—3418.

[20] HUANG G L, CHEN Y, WANG X Q. Extraction and deproteinization of pumpkin polysaccharide [J]. International journal of food sciences and nutrition, 2011, 62(6): 568—571.

[21] 宁奇,孙培冬,曹光群,等. 山药粘液质多糖的酶法脱蛋白工艺及其性能研究[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(9): 118—124.

[22] 王琚,董文宾,杨美莲,等. 富硒茶中硒蛋白冻融法辅助提取工艺优化[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 211—215.

[23] ZHANG L M, ZHANG Q, ZHENG Y Q, et al. Study of Schiff base formation between dialdehyde cellulose and proteins, and its application for the

deproteinization of crude polysaccharide extracts [J]. Industrial crops & products, 2018, 112: 532—540.

[24] SONG Z Y, HU Y D, QI L K, et al. An effective and recyclable deproteinization method for polysaccharide from oyster by magnetic chitosan microspheres [J]. Carbohydrate polymers, 2018, 195: 558—565.

[25] EGIRANI D, LATIF M T, WESSEY N, et al. Preparation and characterization of powdered and granular activated carbon from *Palmae* biomass for mercury removal [J]. Applied water science, 2021, 11(1): 1—11.

[26] 朱晟,朱家文,陈葵. 树脂吸附法从发酵液中提取红霉素的工艺研究[J]. 化学工程, 2017, 45(1): 22—26.

[27] HATANO K I, KIKUCHI S, NAKAMURA Y, et al. Novel strategy using an adsorbent-column chromatography for effective ethanol production from sugarcane or sugar beet molasses [J]. Bioresource technology, 2009, 100(20): 4697—4703.

[28] 张达成,秦允荣. 银耳多糖的活性炭脱色工艺研究[J]. 广东化工, 2019, 46(16): 40—42.

[29] 方晓晖,但德苗,钱时权,等. 红皮火龙果皮多糖过氧化氢脱色工艺及抑菌活性研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 149—153, 181.

[30] 张晓萌,张发宇,余金卫,等. 粉末活性炭联合柱层析法纯化藻蓝蛋白的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(4): 554—558.

[31] 李松丽. 反胶束技术萃取茶多糖[D]. 上海: 华东理工大学, 2012: 63.

[32] 周奕犁,王瑞,高逢明,等. 刺梨果渣膳食纤维的体外吸附性能[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(2): 187—191.

[33] 张妍,刘太林. 苯酚-硫酸法与蒽酮-硫酸法测定麦冬中麦冬多糖含量的比较研究[J]. 现代食品, 2018(18): 95—102.

[34] 王艾平,周丽明. 考马斯亮蓝法测定茶籽多糖中蛋白质含量条件的优化[J]. 河南农业科学, 2014, 43(3): 150—153.

[35] 陈穆彦,赵文阳,王云峰,等. 刺梨多糖脱色工艺研究[J]. 微量元素与健康研究, 2012, 29(5): 19—20.