

新疆气候干湿变化特征分析*

赵慧¹, 姚俊强², 李新国¹, 陶辉³

- (1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院/新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆乌鲁木齐 830054;
2. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆乌鲁木齐 830002;
3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要: 选取1961~2015年新疆55个气象站点的逐月观测气温、降水数据, 采用标准化降水蒸散指数(SPEI), 3个月时间尺度可以反映季节的干湿变化状况, 因此采用SPEI-3分析得到近55年新疆气候的干湿变化特征。结果表明: 1) 从SPEI-3每10年干湿变化速率分析, 新疆气候整体有微弱的变干趋势, 变化速率为0.055, 表现在不同站点上的干湿变化速率有所不同, 最大的变湿速率为0.229, 最大的变干速率为0.400。2) 在1961~1987年, 处于干旱和干旱缓解期的交替期, 1987~1996年处于干旱缓解期, 其中1997年和2008年, 是较严重的干旱年份, 干旱站点数比例分别为82%和78%; 在阈值 $R_1 = -0.20$ 、 -0.30 、 -0.40 下, 1997年干旱烈度和干旱历时均达到最大值。3) EOF1特征向量值最大为0.150, 反映研究区整体干湿变化在减弱, 且有变干趋势; EOF2和REOF2是南北疆反向变化, 特征向量值最大值分别为0.210和0.250, 从线性变化趋势可看出北疆的干旱化加剧, 而南疆变干趋势减弱; EOF3和REOF3是东西相反的分布形式, 最大特征向量值均为0.320, 表现为东天山有变干趋势, 而南疆西部有干旱缓解趋势。

关键词: 干湿变化特征; 经验正交函数; 标准化降水蒸散指数; 干旱历时; 新疆

中图分类号: S162.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2020)05-0126-08

The characteristics of climate change in Xinjiang during 1961-2015

ZHAO Hui¹, YAO Junqiang², LI Xinguo¹, TAO Hui³

- (1. College of Geographic Sciences and Tourism/ Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;
2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;
3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: By using the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI), the dry-wet climate changes on the 3-month time scale in the past 55 years were documented based on monthly temperatures and precipitation data from 1961 to 2015 from 55 meteorological stations in Xinjiang. The results are shown as follows: (1) The analysis of SPEI-3 on dry and wet change rates every 10 years suggested a weak trend of dryness, with a change rate of 0.055. The dry and wet change rates varied at different sites with the maximum wet rate of 0.229 and the maximum drying rate of 0.400. (2) There existed an alternating period of drought and drought relief from 1961 to 1987 and a drought relief period from 1987 to 1996. The severe drought occurred in 1997 and 2008, with the proportions of drought sites of 82%

* 收稿日期: 2019-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(41661047); 中国沙漠气象科学基金(Sqj2017012); 新疆维吾尔自治区“天山青年”计划项目(2017Q092); 新疆维吾尔自治区高层次人才引进人才项目(Y642091, Y644131)

作者简介: 赵慧(1994年生), 女; **研究方向:** 干旱区资源与环境变化研究; E-mail: ziyuhe528@163.com

通信作者: 李新国(1971年生), 男; **研究方向:** 干旱区水土资源与环境变化及其遥感应用研究; E-mail: onlinelxg@sina.com

and 78%, respectively, under the threshold $R_1 = -0.20, -0.30, -0.40$. The drought intensity and the duration of drought reached the maximum in 1997. (3) The maximum EOF1 feature vector value was 0.150, reflecting that the overall dry and wet changes were weakening and tended to become dry in the study area. EOF2 and REOF2 showed reverse changes in northern and southern Xinjiang, with the maximum feature vector values of 0.210 and 0.250, respectively. The linear trend indicated that the drought was increasing in northern Xinjiang, while the trend of drying out was weakening in southern Xinjiang. EOF3 and REOF3 were in the opposite distribution form. The maximum feature vector value was 0.320, suggesting that the east Tianshan tended to dry out, while the western South Xinjiang showed a drought relief trend.

Key words: dry and wet change; empirical orthogonal function; SPEI index; temporal sequence; Xinjiang

干旱导致生态系统生产力降低, 是威胁我国粮食安全和经济发展最严重的气象灾害之一^[1-2]。近年来, 随着全球气候变暖愈加强烈, 全球范围内的干旱问题日趋严重^[3]。目前在干旱的发展趋势、干旱监测等研究方面, 很多学者提出了不同的指标, 比较常用的有标准化降水指数 (SPI)、帕默尔干旱指数 (PDSI) 和标准化降水蒸散指数 (SPEI), 不同的研究方法有不同的优缺点^[4-5]。Vicente-Serrano 提出的标准化降水蒸散指数 (SPEI), 是充分考虑温度和降水因子, 且运用 SPI 计算方式简便以及多时间尺度的特征再结合 PDSI 所研究的干旱方法对蒸散的优势, 成为监测气象干旱变化较为理想的工具之一^[6-7]。新疆是典型的干旱半干旱地区, 其干旱状况变化受到越来越多的关注^[8]。尽管有众多学者提出新疆气候由暖干向暖湿转型的趋势^[9-11], 但是旱灾波及到的影响范围和造成受到影响的面积呈逐年扩大趋势, 新疆因为干旱灾害而造成的损失在不断增加^[12]。利用不同干旱指标对新疆不同地区进行干旱变化研究较多, 但是针对整个新疆进行干湿变化的研究较少^[13-15]。3个月时间尺度可以反映季节的干湿变化状况, 代表气象干旱^[16]。以 SPEI-3 作为新疆干湿变化的主要指标, 结合 EOF 和游程理论, 研究新疆的干湿时空分布特征, 为进一步做好区域气候趋势预测工作积累探索可行的方法。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

新疆地处欧亚大陆腹地, 远离海洋, 干旱少雨, 降水不均匀, 形成了大陆性气候, 土地面积 166 万 km², 占中国陆域面积的 1/6^[17]。山脉与盆地

相间分布, 由北向南构成“三山夹两盆”的地貌格局, 使得新疆天山南北区域存在差异, 因此以天山山脉为界, 把新疆分为北疆和南疆, 即北疆中温带干旱区和南疆暖温带干旱区。

1.2 数据来源

选取 1961~2015 年新疆 55 个具有代表性站点的月平均气温和月降水数据, 以及各站的经度和纬度、海拔等地理信息数据。气象数据来自新疆气象信息中心, 经过了严格的数据质量控制, 可用于气候变化分析中。计算各站的 SPEI 指数, 形成新疆过去 55 年的 SPEI 干湿指数数据集, 利用该数据集研究干湿变化特征。研究区气象站点分布见图 1。

2 研究方法

2.1 SPEI 指数计算方法

计算逐月降水与潜在蒸散的差值, 构建不同时间尺度的水分盈亏量累计序列^[18]。潜在蒸散量的计算一般有 Thornthwaite 和 Penman-Monteith 等方法, Thornthwaite 法计算比较简单, 仅需要气温数据即可获得潜在蒸散量, 而 Penman-Monteith 法需要的气象参数比较多, 计算结果更加精确, 对于潜在蒸散量方法的选择上, 对 SPEI 的计算结果影响不大^[6]。Mavromatis 提出在干旱指标中, 使用简单或者复杂的方法计算潜在蒸散量提供了类似的结果^[19]。因此, 在实际应用中可以根据气象资料的可获取性来选择合适的计算方法^[10]。因此本文采用 Thornthwaite 方法, 计算近 55 a 新疆各气象站的逐月潜在蒸散量, 其计算过程详情参考文献 [18]。采用 SPEI 指数的干湿等级划分标准 (表 1), 可以确定某站点在某月发生干旱变化的程度。

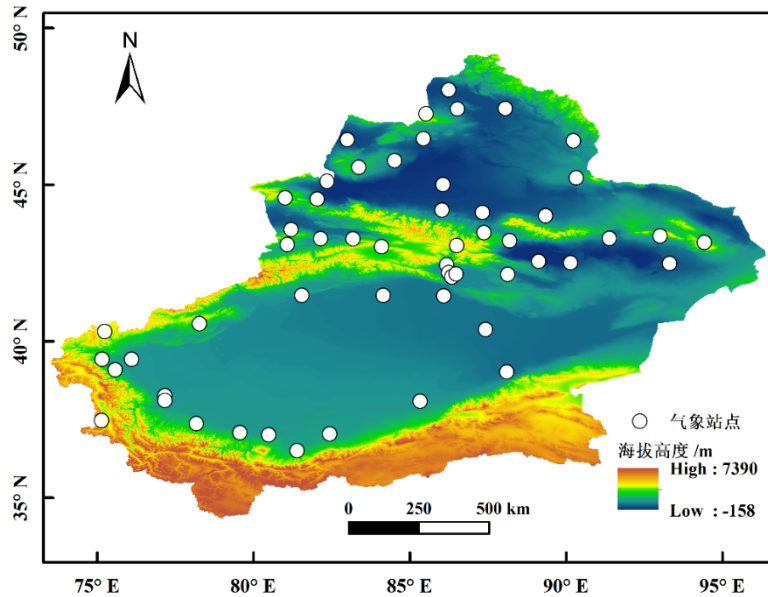


图1 新疆气象站点分布图

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Xinjiang

表1 SPEI的干湿等级划分

Table 1 Dry and wet degrees based on SPEI index

项目	极端干旱	中等干旱	轻度干旱	正常	轻度湿润	中等湿润	极端湿润
SPEI	≤ -2.0	$-2.0 \sim -1.0$	$-1.0 \sim -0.5$	$-0.5 \sim 0.5$	$0.5 \sim 1.0$	$1.0 \sim 2.0$	≥ 2.0

2.2 游程理论

在干旱的识别过程中,运用游程理论,给定一个截取水平(k)来截取一个随时间变化而变化的离散系数 X_i ($i=1, 2, \dots, n$),当 X_i 在一个或多个时段内连续大于 X_0 时,就出现正游程;反之出现负游程。在干旱研究中,负游程的长度称为干旱历时,干旱烈度为干旱历时与截取水平包围的面积^[20-21]。干旱识别过程包括小干旱的处理和干旱的合并(图2)。

① 对中小干旱的处理:当指标值小于 R_1 时,初步判断此月为干旱,在此基础上,对于历时只有1个月的干旱事件,若其干旱指标小于 R_2 ,则此月最终被确定为1次干旱过程。

② 干旱合并,当连续发生2次的干旱过程的时间间隔只有一个月,且该月内的干旱指标小于 R_0 ,则将这2次相邻干旱过程合并为1次干旱事件,干旱历时为两次干旱历时之和加1,干旱烈度为2次干旱过程的SPEI值之和,否则为2次独立干旱过程。根据SPEI干旱等级划分标准,当SPEI值小于 -0.5 时,发生轻度干旱,将截取水平 $R_2=-0.5$, $R_0=0$,为了研究游程理论在研究区标准化降水蒸散指数中的规律,对 R_1 设置3种截取水平, $R_1=-0.2$, -0.3 , -0.4 ^[22]。

2.3 EOF和REOF分析方法

经验正交函数(EOF)是气候学常用分析研究区时空变化特征的方法^[23]。应用其基本原理是对 m 个空间点 n 次观测构成的气象矩阵数据进行主成分分析变换,将其分解为空间特征向量矩阵和对应时间系数矩阵的线性组合,利用空间向量特征矩阵值和相对应的时间系数函数对原始场做出估计和解释。EOF分解方法能准确表达干旱的时间变化和空间模态,是分解干旱特征的重要手段,由此剖析的干旱具有较强的规律性和可辨识性。旋转经验正交函数(REOF)是EOF,进一步分析要素场空间分布的局部区域特征,可更好表现地域差异^[24]。

3 结果与分析

3.1 近55年新疆气候干湿变化特征

由1961~2015年新疆55个站点的SPEI-3每10年干湿变化速率可知,新疆整体有微弱的变干趋势,变化速率为0.055。在55个站点中有19个站点有变湿趋势,变湿趋势的变化速率在0.002~0.229范围内;19个变湿趋势的站点中有13个站点分布在新疆北部地区,其中乌鲁木齐站的变湿

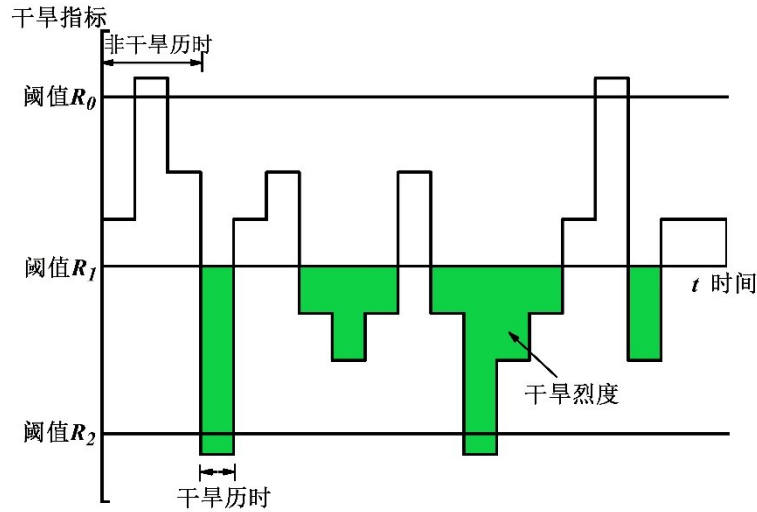


图 2 干旱识别游程图

Fig. 2 Identification of drought events using the theory of run

速率最大, 为 0.229。其余各站点都有变干趋势, 变化速率在 0.011~0.400 范围内, 七角井站的干旱变化速率最大是 0.400。

由图 3 可知, 从 1961~1987 年, SPEI 指数呈正负交替出现, 1987~1996 年 SPEI 以正指数为主,

新疆处于干旱缓解期。1997 年之后, SPEI 指数呈正负交替出现, 但从 2005~2015 来看, SPEI 负值增加。1997 年 4 月、2006 年 10 月以及 2008 年 7 月的 SPEI 值较小, 分别为 -1.99、-1.69、-1.79, 说明干旱程度严重。

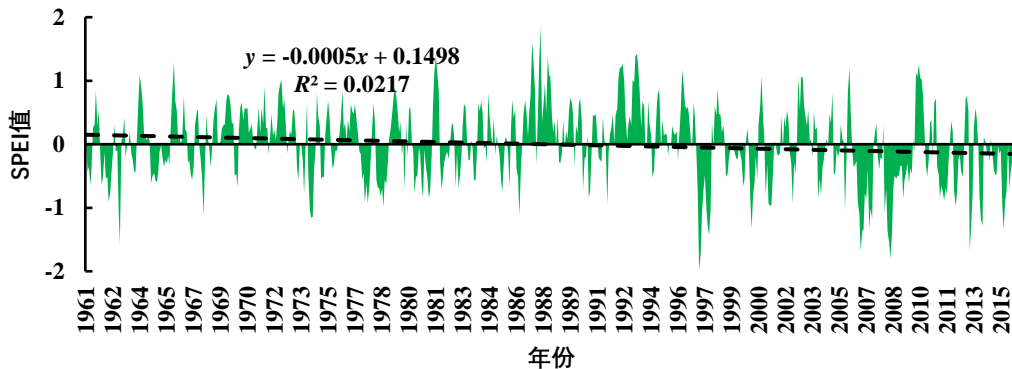


图 3 1961~2015 年新疆气候 SPEI 时间序列

Fig. 3 Time series of SPEI in Xinjiang from 1961 to 2015

3.2 新疆气候不同等级干湿分布特征

依据干湿等级标准, 对 1961~2015 年新疆各站点的 SPEI 值进行干湿等级划分, 统计每年不同等级干湿发生站点数, 可以反应出不同等级干湿变化的年际特征。从图 4 可知有 7 个年份均未发生干旱, 是相对暖湿年, 尤其是 1987 年中等湿润在各等级干湿的累计站点数达到 36%, 而 1993 年的中等和轻度湿润在各等级干湿的累计站点数达到 76%。此外, 有 28 个年份发生各等级干旱的累计站点数在 80% 以下, 均未达到中等干旱等级。在 1962 年、1997 年、2006 年和 2008 年这 4 个年份发

生干旱的站点数比例达到全部站点的 50% 以上, 而这 4 年也是新疆干旱程度严重的时期, 尤其是 1997 年和 2008 年, 干旱站点数比例分别达到了 82% 和 78%。其余 16 个年份发生干旱的站点数比例达到全部站点的 50% 以下。

3.3 新疆气候干旱历时和干旱烈度分布特征

基于游程理论设定 3 种截取水平, $R_1 = -0.2, -0.3, -0.4$ 。由图 5 可知, 3 种不同截取水平的干旱历时与干旱烈度变化趋势基本一致, 呈极显著相关 ($P < 0.01$)。1961~1970 年, 干旱烈度和干旱历时呈下降趋势, 1971~1980 年呈增加趋势,

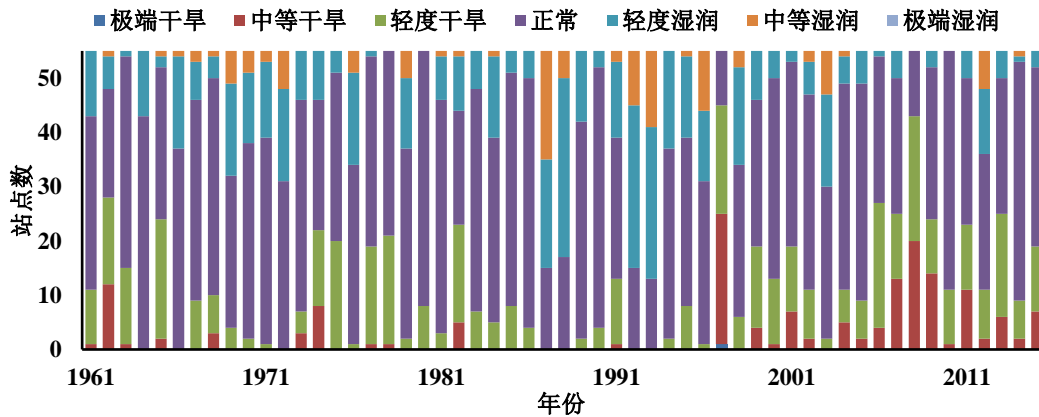


图4 1961~2015年新疆气候不同等级干湿事件发生站点数

Fig. 4 The number of stations with different levels of dry and wet events in Xinjiang from 1961 to 2015

1981~1995年呈下降趋势, 在1997年干旱烈度和干旱历时达到最大值, 2005~2015年干旱烈度和

干旱历时均增强, 尤其是2007年、2008年、2013年。

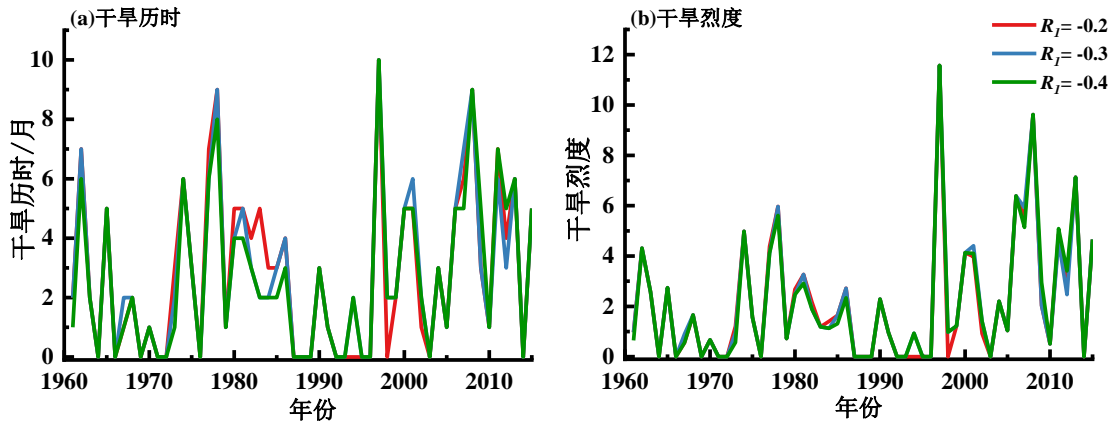


图5 1961~2015年新疆气候干旱历时及干旱烈度变化

Fig. 5 The change of Xinjiang's climate drought duration (a) and drought intensity (b) from 1961 to 2015

3.4 新疆气候干旱变化的时空分型

对SPEI组成的二维矩阵进行EOF和REOF分解。由表2可知, EOF和REOF的前4个主载荷向量累积方差贡献率均达到71.65%, 其中EOF的第1模态方差贡献率最大为37.32%, 比REOF的第1模态方差贡献率高8.76%, 第2、第3、第4模态REOF的方差贡献率均高于EOF。

由图6可知, EOF1特征向量值均为正值, 表明新疆干湿变化空间分布具有较好的一致性, 高值区位于吐鲁番、哈密盆地以及准格尔盆地西南部地区; REOF1的特征向量最小值为-0.04, 高值区位于准格尔盆地。分析EOF1和REOF1的空间分布结构随时间的变化趋势及阶段性特征, 由图7可知, EOF1和REOF1的时间变化趋势相似, 表现为1961~1986年时间系数在正负之间呈震荡变化

表2 基于EOF和REOF分析的SPEI前4个模态的方差贡献

Table 2 Variance contribution of the first four modes of SPEI based on EOF and REOF analysis

模态	EOF		REOF	
	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	37.32	37.32	28.56	28.56
2	18.59	55.91	24.07	52.63
3	10.13	66.04	10.94	63.57
4	5.61	71.65	8.08	71.65

趋势, 在此期间REOF1的变化程度高于EOF1, 而1987~1996年主要在正值区波动变化, 表明新疆在该时段处于干旱缓解期, 其中正值区域达到最大值的典型年份有1987年和1993年。从线性趋势变化来看, 新疆整体干湿变化在减弱, 且有变干

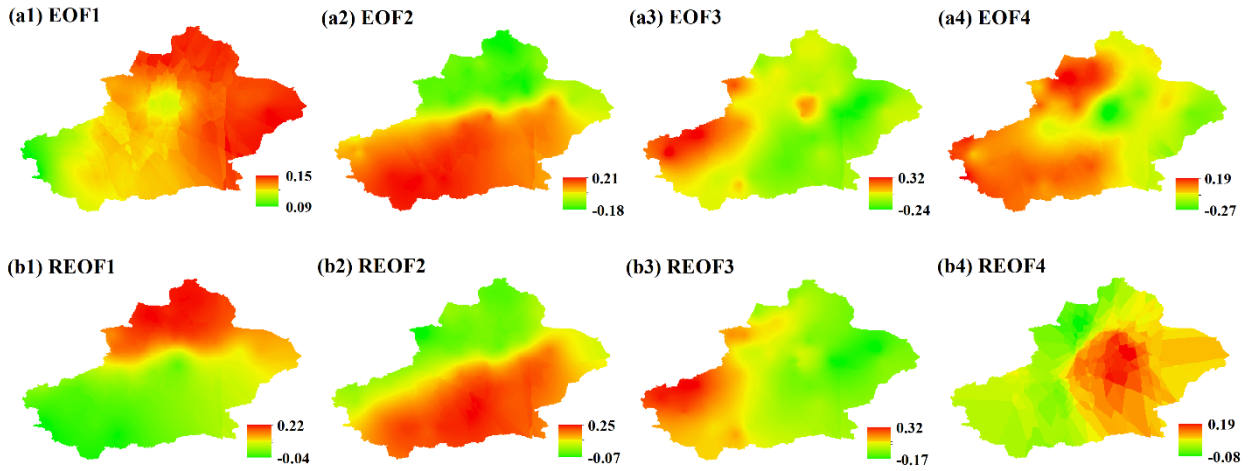


图6 1961~2015年新疆气候干湿变化EOF和REOF分析前4个模态变化
Fig. 6 Dryness/wetness spatial distribution of EOF and REOF 1~4 in Xinjiang from 1961 to 2015

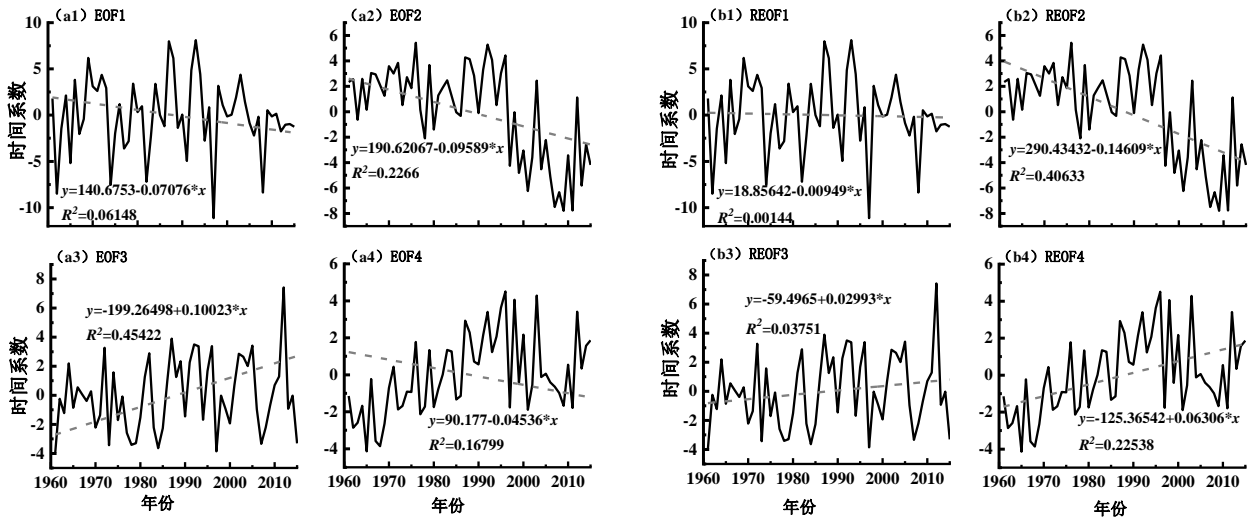


图7 1961~2015年新疆气候干湿变化EOF和REOF分析前4个时间系数变化
Fig. 7 Dryness/wetness temporal coefficients of EOF and REOF 1~4 in Xinjiang from 1961 to 2015

趋势。

EOF2和REOF2的干湿空间分布相似,空间分布特征与第一模态有着很大的差异,以天山山脉为界,呈现南北相反的格局,空间系数为北负南正型,在这种空间分布形式下,新疆表现为北湿南干或北干南湿的格局特征;REOF2的空间分布更符合天山山脉为界的分布。由EOF2和REOF2的时间系数可知:从1961~1997年新疆整体上都在正值区域,是相对干旱缓解期。以1997年开始,区域变干的态势增加,其中新疆北部有变干趋势,比较干旱的典型年份是2007、2009和2011年。从线性变化趋势可看出北疆的干旱化加剧,而南疆变干趋势减弱。

EOF3和REOF3的干湿空间分布相似,表现为新疆的东西部呈相反的格局,但该特征分布更加复杂。高值区主要位于南疆西部、伊犁河谷和中天山地区。而东天山有变干趋势。在西部地区比较暖湿的年份,东部地区相对比较干旱,由第三模态对应的时间系数可知,典型的西部偏湿而东部偏干的年份是2012年,而西部偏干东部偏湿的年份是1970年、1973年和1979年。从线性变化增长率可知,该模态干湿趋势增加,如在南疆西部有增湿现象。南疆西部的增湿已在各方面得到印证,如研究发现喀喇昆仑山地区冰川在最近十几年呈稳定或扩张状态^[25]。EOF4的空间分布高值区位于南疆西部和北疆西北部,REOF4的空间分

布的高值区与 EOF 的空间分布相反。

4 结 论

1) 1961~2015 年新疆 55 个站点的 SPEI-3 每 10 年干湿变化速率是 -0.055 , 变湿的站点数多于变干的站点数, 表现在不同站点上的干旱变化速率有所不同, 乌鲁木齐站的变湿速率最大, 为 0.229 ; 七角井站的干旱变化速率最大是 0.400 。

2) 在 1961~1987 年, 处于干旱和干旱缓解期的交替期, 1987~1996 年处于干旱缓解期。较严重的干旱年份, 是 1997 年和 2008 年, 干旱站点数比例分别为 82% 和 78% 。在阈值 $R_1=0.20$ 、 $R_2=0.30$ 、 $R_3=0.40$ 下, 均在 1997 年的干旱烈度和干旱

历时达到最大值, 不同的阈值之间有差别, 但不同的阈值识别干旱烈度和干旱历时的较大值基本一致。

3) EOF1 反应新疆干湿变化具有全区一致性; EOF2 和 REOF2 反应南北疆反向变化, 表现为北疆干旱化加剧, 南疆干旱化有所缓解的趋势; EOF3 和 REOF3 反应东西相反的分布形式, 增湿中心主要位于南疆西部、伊犁河谷和中天山地区, 但东天山有变干趋势。REOF1 在 EOF1 的基础上有展现出南北疆相反的格局, REOF2 和 REOF3 都比 EOF2 和 EOF3 的空间分布的范围小, 能更好的表现区域特征。

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.
SHEN G Q, ZHENG H F, LEI Z F. Spatiotemporal analysis of meteorological drought (1961-2014) in Northeast China using a standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5882-5893.
- [2] LI X X, JU H, SARAH G, et al. Spatiotemporal variation of drought characteristics in the Huang-Huai-Hai Plain, China under the climate change scenario [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(10): 2308-2322.
- [3] 郭树龙, 温季, 姜新. 基于 SPEI 的 1960-2015 年江汉平原旱涝规律分析及预测[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(9): 108-115.
GUO S L, WEN J, JIANG X. Using SPEI to analyze the droughts from 1960 to 2015 in Jianghan plain [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(9): 108-115.
- [4] WANG F, WANG Z, YANG H, et al. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow River basin based on SPEI [J]. Science China - Earth Sciences, 2018, 61(8): 1098-1111.
- [5] 何鑫, 吴吉东, 李颖等. 基于 SPEI 的辽西地区气象干旱时空分布特征 [J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 340-347.
HE X, WU J D, LI Y, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of meteorological drought in western region of Liaoning Province based on standardized precipitation [J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 340-347.
- [6] VICENTESERRANO S M, BEGUERIA S, LOPEZ-MORENO J I, et al. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [7] 梁丰, 刘丹丹, 王婉昭, 等. 基于 SPEI 的中国东北地区 1961-2014 年干旱时空演变 [J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 148-158.
LIANG F, LIU D D, WANG W Z, et al. Temporal and spatial distributions of drought in northeast China in 1961-2014 based on standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 148-158.
- [8] 谢培, 顾艳玲, 张玉虎, 等. 1961-2015 年新疆降水及干旱特征分析 [J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 332-339.
XIE P, GU Y L, ZHANG Y H, et al. Precipitation and drought characteristics in Xinjiang during 1961-2015 [J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 332-339.
- [9] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
SHI Y F, SHEN Y P, HU R J. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219-226.
- [10] 轩俊伟, 郑江华, 刘志辉. 基于 SPEI 的新疆干旱时空变化特征 [J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 338-344.
XUAN J W, ZHENG J H, LIU Z H. SPEI-based spatiotemporal variation of drought in Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2): 338-344.
- [11] YAO J, ZHAO Y, YU X, et al. Spatial-temporal vari-

- ation and impacts of drought in Xinjiang (Northwest China) during 1961 - 2015 [J]. *Peer J*, 2018 (6) : e4926; DOI 10. 7717/peer. 4926
- [12] 孙鹏,张强,刘剑宇,等. 新疆近半个世纪以来季节性干旱变化特征及其影响研究[J]. *地理科学*, 2014, 34 (11):1377-1385.
SUN P, ZHANG Q, LIU J Y, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in Xinjiang during past 48 years: possible causes and implications [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(11):1377-1385.
- [13] 普宗朝,张山清,王胜兰,等. 近48a新疆干湿气候时空变化特征[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(6):1563-1572.
PU Z C, ZHANG S Q, WANG S L, et al. The spatial-temporal variation characteristic of dry-wet climate in recent 48 years in Xinjiang province, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(6):1563-1572.
- [14] 陶辉,毛伟峰,黄金龙,等. 塔里木河流域干湿变化与大气环流关系[J]. *水科学进展*, 2014, 25(1):45-52.
TAO H, MAO W Y, HUANG J L, et al. Drought and wetness variability in the Tarim River basin and possible associations with large scale circulation [J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(1):45-52.
- [15] 罗青红,宁虎森,陈启民. 基于湿润指数的新疆甘家湖地表干湿状况变化趋势[J]. *干旱区研究*, 2016, 33 (5):921-926.
LUO Q H, NING H S, CHEN Q M. Trends of surface dry-wet state of Ganjiahu in Xinjiang based on humid index [J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(5):921-926.
- [16] POTOP V, MOZNY M, Soukup J. Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 156: 121-133.
- [17] 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.
FAN S M, ZHANG M J, WANG S J. Quantitative study of sub-cloud secondary evaporation effect on stable isotopes in raindrops during summer in Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(3):488-498.
- [18] 张菡,张喜亮,李金健,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): 242-251.
ZHANG H, ZHANG X L, LI J J, et al. SPEI-based analysis of temporal and spatial variation characteristics for seasonal drought in Sichuan Basin [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(5):242-251.
- [19] MAVROMATIS T. Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece [J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(7): 911-924.
- [20] 芦佳玉,延军平,李英杰. 基于SPEI及游程理论的云贵地区1960-2014年干旱时空变化特征[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2018, 45(3):363-372.
LU J Y, YAN J P, LI Y J. The temporal variation characteristics of drought in Yunnan-Guizhou area during 1960 to 2014 based on SPEI and run-length theory [J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2018, 45(3):363-372.
- [21] 杨好周,梁忠民,胡义明,等. 游程理论在云南省干旱重现期分析中的应用[J]. *水电能源科学*, 2013, 31 (12):8-12.
YANG H Z, LIANG Z M, HU Y M, et al. Application of run-length theory to drought return period analysis of Yunnan province [J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(12):8-12.
- [22] 王晓峰,张园,冯晓明,等. 基于游程理论和Copula函数的干旱特征分析及应用[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10):206-214.
WANG X F, ZHANG Y, FENG X M, et al. Analysis and application of drought characteristics based on run theory and Copula function [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (10):206-214.
- [23] 郭小芹,丁文魁,钱莉,等. 祁连山东北缘最大风速气候特征[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(3):446-453.
GUO X Q, DING W K, QIAN L, et al. Climate characteristics of the maximum wind speed in northeastern margin of Qilian Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(3):446-453.
- [24] 王兆礼,李军,黄泽勤,等. 基于改进帕默尔干旱指数的中国气象干旱时空演变分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(2):161-168.
WANG Z L, LI J, HUANG Z Q, et al. Spatiotemporal variations analysis of meteorological drought in China based on sc PDSI [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2):161-168.
- [25] ASAD F, ZHU H, ZHANG H, et al. Are Karakoram temperatures out of phase compared to hemispheric trends [J]. *Climate Dynamics*, 2017, 48 (9) : 3381-3390.