文章编号:1000-7601(2019)03-0256-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.03.34

基于标准化降水蒸散指数的甘肃省干旱时空特征分析

李 亮[1,2,3],Pich Linvolak[1,2,3],蔡焕杰[1,2,3]

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为明确气候变化条件下甘肃省不同时间尺度的干旱特征,选用 1951-2015 年甘肃省 33 个气象站点逐日气象数据,计算了不同时间尺度的标准化降水蒸散指数 SPEI,同时结合 Mann-Kendall 突变检验、复小波分析、经验正交函数分解、旋转经验正交函数分解等方法,对甘肃省 65 a 来干旱时空格局特征进行了分析。结果表明:在年际变化趋势方面,甘肃省干旱情势为由干变湿再变干,近年干旱趋势逐渐加重;四季均呈现由干变湿然后变干的趋势,近年春季变干趋势显著;干旱强度在全省范围内主要为轻旱和中旱等级,并表现为局域性轻旱和全域性中旱。在周期性变化方面,甘肃省的干旱时间周期性强弱依次为 39、13、7、22 a 尺度,但不同时间尺度表现出了不同的干湿震荡规律。在空间格局方面,甘肃省整体上呈西北部干旱缓解、东南部干旱加剧的趋势;春季干旱加剧最明显,冬季次之,夏季和秋季干湿状况基本相似。按照干旱区域敏感性强弱可将甘肃省分为东南地区东部(Ⅰ区)、西北地区(Ⅱ区)、中部地区(Ⅲ区)和东南地区西部(Ⅳ区),其中Ⅲ区呈干旱缓解趋势,其他地区基本呈干旱加剧的趋势。

关键词:干旱;标准化降水蒸散指数(SPEI);时空特性;经验正交函数;旋转经验正交函数;甘肃省

中图分类号:S161.4 **文献标志码**:A

Analysis of spatio-temporal distribution of drought characteristics based on SPEI in Gansu Province

LI Liang[1,2,3], Pich Linvolak[1,2,3], CAI Huan-jie[1,2,3]

(1.*Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering of Northwest A & F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
2.*The Chinese Arid Area Research Institute of Water-saving Agriculture*, *Northwest A & F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
3.*College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A & F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: To better understand the spatio-temporal distribution of drought characteristics under climate change in different time scales in Gansu Province, daily data from 33 meteorological stations for the period of 1951-2015 were used in this study. The standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) was established combining with Mann-Kendall mutation test, complex wavelet analysis, empirical orthogonal function (EOF) and rotated empirical orthogonal function (REOF) method to analyse the spatial and temporal patterns of drought in the past 65 a in Gasnu Province. The results showed that in terms of the inter-annual SPEI changes, it showed a trend to become humid and then dry, and in recent years the drought trend has gradually increased. On the other hand, it was getting wet from dry firstly and then being dry in all of seasons, especially spring ($P<0.05$) from the seasonal perspective. The drought coverage and the intensity of drought appeared as the features of the local slight drought and domain moderate drought mainly at the annual scale in Gansu. In the time cycle, the time periods in Gansu were 39, 13, 7 a and 22 a in turn decrease on periodicity, but it appeared different oscillation of dry and wet in different time scales. Spatially, the northwestern regions had a humid trend, but it was drier in the southeastern part of Gan-

收稿日期:2018-08-09 **修回日期**:2019-04-22

基金项目:国家重点研发计划“西北典型农区高效节水灌溉技术与集成应用”(2016YFC0400201)

作者简介:李亮(1994-),男,湖北汉川人,硕士研究生,研究方向为区域干旱与作物需水。E-mail:liliangzero@ nwafu.edu.cn

作者简介:蔡焕杰(1962-),男,河北藁城人,教授,博士生导师,主要从事农业节水与水资源高效利用研究。E-mail:caihj@ nwafu.edu.cn

su on the contrary. Most regions were getting dry in spring ($P<0.05$) and winter, and it was similar of dry and wet zones in summer as well as autumn in terms of spatial distribution. According to the strength of arid sensitivity in Gansu, it can be divided into 4 sub-regions: Eastern district of southeastern region (Ⅰ sub-region), northwestern region (Ⅱ sub-region), central region (Ⅲ sub-region) and western district of southeastern region (Ⅳ sub-region). Drought in Ⅲ sub-region was gradually alleviated, and others showed a trend of being drier.

Keywords: drought; SPEI; temporal and spatial characteristics; EOF; REOF; Gansu Province

水分收支平衡状态严重影响着陆地生态系统的稳定性,而水分亏缺过多时发生的旱灾,是全世界极为严重的自然灾害之一[1]。随着环境的升温,由地表干湿状况表现的水分盈亏规律也变得复杂多变,对农业产生了严重影响,因此对水分盈亏规律的研究逐渐受到重视。研究表明,地区干旱化在全球范围内均有存在,且非洲和欧亚大陆受旱最为严重[2],造成了巨大的经济损失。干旱作用区域广、发生频率高、作用机理复杂、持续时间长[3],特别是在中国西北地区,其干旱形势渐趋严峻。甘肃省位于我国东部季风区、西北干旱区和青藏高寒区三大自然区域的交汇处,气候条件复杂,干旱发生概率高、范围广,严重威胁着地区农业经济的发展[4]。因此,在气候变化情境下,研究甘肃省干旱特征及其时空格局,对于该地区生态环境及社会经济的可持续发展具有实际意义。

以往对于干旱的研究常采用降水距平指数、相对湿润度指数或标准化降水指数(standardized precipitation index,SPI),但 SPI 也仅涉及降水因素,忽略了水分盈亏和气温的影响[5]。而标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index,SPEI)的基础数据序列是降水与蒸散的差值,综合了降水和蒸散发的影响,同时可实现多时间尺度的地区干旱状况评价[6]。SPEI 能更客观描述地表干湿状况变化,既对温度敏感,还具备 SPI 的多时空比较优点,适于气候变暖条件下干旱特征的分析[7],并广泛用于地区干旱评价[8-10]。但对于 SPEI 中蒸散发量,许多学者[11-13]主要用仅考虑温度因素的 Thornthwaite 公式[14]计算,而联合国粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 公式[15],同时考虑作物生理特征与空气动力学参数变化,精度高、应用广,并能更合理描述中国西北地区干湿特征[16]。

已有学者[5,9,12-13]利用 SPEI 指数对中国部分区域进行干旱特征分析,但在甘肃省还需进一步研究应用。此外,采用基于 Penman-Monteith 公式的 SPEI 进行干旱特征分析的报道也较为缺乏。因此,本文以 SPEI 指数为干旱指标,分析甘肃省 1951-2015 年干旱发生特征、时间演变与周期性规律,同时分析其空间分布特征,以期为甘肃省水资源优化配置、水热状况的科学评估及干旱的检测预警和防灾减灾提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区域及资料

甘肃省地处中国西北内陆(32°11′~42°57′N,92°13′~108°46′E),纵横跨度大,占中国总面积的 4.72%。海拔差距悬殊,高山、盆地、平川、沙漠和戈壁等兼而有之,是山地型高原地貌。全省气候类型多样,从南向北包括亚热带季风气候、温带季风气候、温带大陆性(干旱)气候和高原高寒气候等 4 大气候类型。年降雨量在 36.6~734.9 mm 之间,基本由东南至西北递减。降水受季风影响较大,多集中在夏季,占全年总降水量的 50%以上。平均气温 0~15℃,大部分地区气候干燥,干旱、半干旱地区占总面积的 75%[17]。

本文使用甘肃省 1951 年 3 月-2016 年 2 月(文中以 1951-2015 年表示)逐日气象观测资料,包括日照时数、10 m 高度处风速、日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水量、日相对湿度等,气象观测资料均来自中国气象数据网(http://data.cma.cn/)。为保证气象资料的有效性,剔除缺测较多的站点,选取记录较为完整的 33 个气象站点的资料,并对存在部分缺失的资料进行插补订正。气象站点分布于全省范围内,见图 1。

历史典型干旱事件资料来源于中国气象数据网的“农业气象灾情旬值数据集”,由于统计资料缺乏,本文仅整理了甘肃省 1991-2011 年 18 次较严重干旱事件的发生时间、范围和强度资料。

1.2　气象资料预处理

1.2.1　一级处理　如果较少数据缺测,存在两种状况,即若缺测序列≤5 d,利用近几日数据线性插值插补;若 5 d<缺测序列<30 d,利用同一日的多年平均值补齐[18]。然后采用 Penman-Monteith 公式 ET_{0PM}[15]计算ET_0。

1.2.2　二级处理　如果较长序列数据缺测,并导致无法采用 Penman-Monteith 公式,但可用 FAO56 提

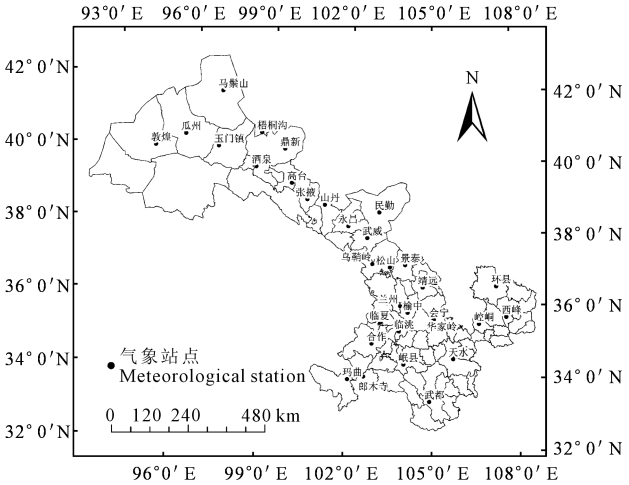


图 1 甘肃省气象站点分布图

Fig.1 Distribution map of meteorological station in Gansu Province

供的缺失日照时数、相对湿度和(或)风速时的计算式ET_{0D}[15]计算潜在蒸散量的,先利用两式分别计算已有数据得ET_{0PM}和ET_{0D}序列,再利用线性拟合得到式(2),并据此计算ET_0。

$$ET_{0D} = 0.0023(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (1)$$

$$ET_{0PM} = b + a \cdot ET_{0D} \quad (2)$$

式中,ET_{0D} 为由 FAO56 提供的缺失日照时数、相对湿度和(或) 风速时计算的潜在蒸散量[15](mm);T_{mean} 为平均温度(℃);T_{max} 为最高气温(℃);T_{min} 为最低气温(℃);R_a 为大气层顶部所接收的太阳辐射量($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$);$ET_{0PM}$ 为 Penman - Monteith 公式计算的潜在蒸散量(mm);a、b 为常数。

1.2.3 三级处理 根据地理相似性假设[19],即地理间距离越近,站点气象条件越相似,进行数据的插补处理。

(1) 如果本站多年数据缺测,并且采用二级处理无法计算ET_0 的,首先利用本站已有数据计算ET_0,然后计算与本站对应年限一致的相邻或基础条件相似站点的蒸散量ET_{0a},寻找与本站ET_0 的线性关系,利用式(3) 插补本站缺测年的ET_0。

$$ET_0 = b + a \cdot ET_{0a} \quad (3)$$

式中,ET_0 为相邻或基础条件相似站点的蒸散量(mm)。

(2) 如果本站多年降水量缺测,参考相关文献[19-22],得到与本站对应年限一致相邻的或基础条件相似的站点的ET_0、$P^{1/3}$、$T_{mean}^{1/3}$、RH_{mean} 与本站降水量立方根$P_0^{1/3}$ 存在显著性线性关系,所以可利用式(4) 进行本站缺失降水量 P 的恢复。

$$P_0^{1/3} = b + a_1 \cdot ET_0 + a_2 \cdot P^{1/3} + a_3 \cdot T_{mean}^{1/3} + a_4 \cdot RH_{mean} \quad (4)$$

式中,P_0 为本站降水量(mm);P 为邻站降水量(mm);RH_{mean}为邻站平均相对湿度;a_1、a_2、a_3、a_4 为常数。

1.3 SPEI 计算及分析方法

1.3.1 标准化降水蒸散指数的计算 标准化降水蒸散指数(SPEI),是通过计算某时段降水量与潜在蒸散量的差值序列,然后对该序列进行正态标准化得到 SPEI 指数,并根据其偏离平均状态的程度分析干旱状况[23]。其计算过程详见参考文献[8, 18]。

本文计算得到 33 个站点 1、3、6、12 个月时间尺度的 SPEI,但主要分析尺度为 3 个月的春季(3-5 月)、夏季(6-8 月)、秋季(9-11 月)、冬季(12 月-次年 2 月)SPEI-3,和 12 个月的年际(3 月-次年 2 月)SPEI-12,其它尺度的 SPEI 用于与典型干旱事件进行比较和验证。根据国家气象干旱等级标准[24],分为 5 个干旱等级:无旱(-0.5<SPEI),轻旱(-1.0<SPEI≤-0.5),中旱(-1.5<SPEI≤-1.0),重旱(-2.0<SPEI≤-1.5),特旱(SPEI≤-2.0)。

1.3.2 Mann-Kendall 突变检验 Mann-Kendall 突变检验是一种非参数统计检验方法,计算简便,且不需要样本遵从一定的分布,不受少数异常值的干扰,很适合于类型变量和顺序变量的分析。计算过程详见相关文献[25]。

1.3.3 小波分析 小波分析能清晰地揭示出潜藏在降水、气温等非平稳时间序列中的变化周期,反映其在不同时间尺度中的变化趋势,并能对时间序列未来发展趋势进行定性和定量估计[26-27]。本文在 Matlab R2016b 软件平台的支持下,采用对称性延拓方法减小“边界效应”,选取 Morlet 复值小波计算小波系数,并利用 Surfer14 软件绘制小波系数实部和系数模的等值线图,同时以小波方差分析甘肃省年均 SPEI 指数的周期震荡特征。

1.3.4 气候倾向率及干旱评价指标计算 本文采用气候倾向率值对甘肃省的干旱变化趋势进行评价,同时利用干旱发生频率、干旱强度和干旱站次比[28]等指标对甘肃省干旱特征进行评价。气候倾向率及各指标具体计算方法详见参考文献[18]。

1.3.5 经验正交函数 EOF 和旋转经验正交函数 REOF 分析方法 为进一步得到甘肃省干湿状况时空特征,选用所有 33 个站点 65 a 的 SPEI 组成的二维矩阵,采用 EOF[29]和 REOF[30]分解分析。EOF 方法是对包含随时间改变空间点的场分解,将其时空变化特征分离,展开得到主要特征向量,可最大限度表征整个气候变量场的变率结构;但 EOF 也有局

限性,即特征向量空间分布受所取范围和取样大小的影响。REOF 分解建立在 EOF 分析基础上,利用方差极大旋转变换将方差贡献集中在较小区域,使得空间分布结构清晰,且反映出不同地域的变化及分布状况,同时取样误差也小得多。EOF 和 REOF 的具体推导过程详见相关文献[31]。

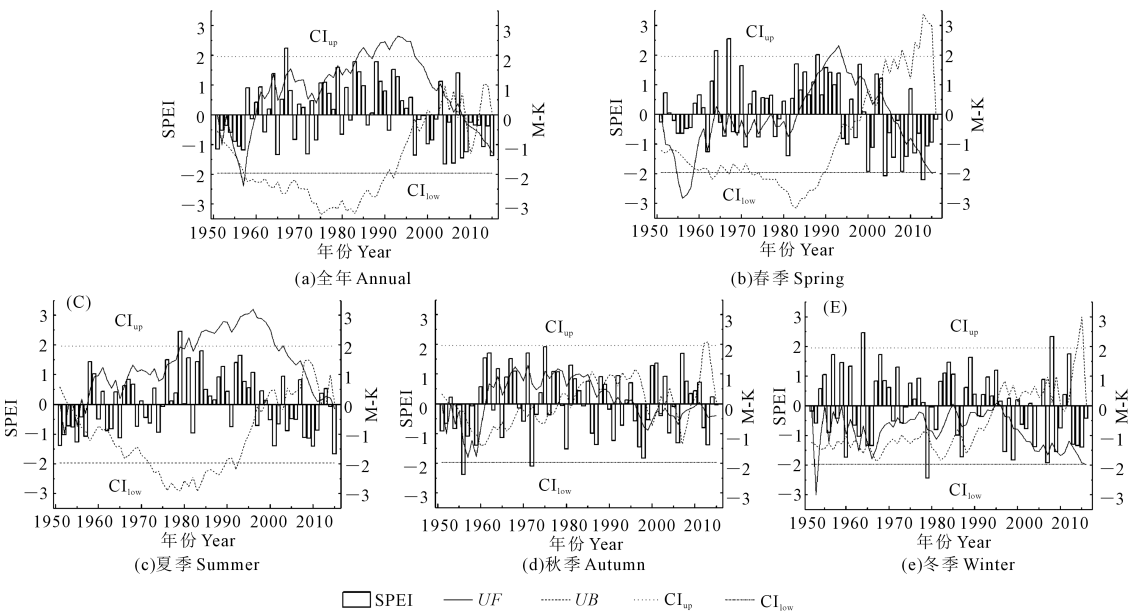
2　结果与分析

2.1　甘肃省 SPEI 及干旱的时间格局特征

1951-2015 年甘肃省 SPEI 指数波动变化,基本呈先上升后下降趋势(图 2(a)),即由干旱变为湿润状态,再变为干旱状态。依据 Mann-Kendall 检验顺序统计量 *UF* 和逆序统计量 *UB* 的曲线交点(突变点),整个时段可分为前期(1951-1957 年)、中期(1958-2004 年)以及后期(2004-2015 年)。干旱指数在前期均为负值,普遍呈干旱状态。中期前半段(1958-1975 年)正负交替变化,正常年份主要集中在 60 年代后期;后半段(1976-2004 年)除少数年份为干旱状态外,其他年份均为显著的湿润状态,且 *UF* 值在 1983 至 1997 年超过 $\alpha=0.05$ 的临界线,表明这段时间湿润趋势显著提升,但其后出现了长时段持续干旱,表明甘肃省渐趋干旱化。后期为近 65 a 来最干旱的时期,并出现 *UF* 和 *UB* 曲线的多次相交,说明干旱状态呈不稳定变化,但整体上呈干旱加剧态势,应加强地区的防旱抗旱工作。

图 2(b)~图 2(e)为不同季节甘肃 SPEI 的年际变化及 M-K 突变检验,表明四季均为先变湿后变干趋势,但秋季和冬季近年干旱化趋势相对缓和。春季 SPEI 指数呈明显的先上升后下降趋势,据 M-K 检验将整个时段分为前期干旱期(1951-1959 年)、中期湿润期(1960-2003 年)和后期干旱期(2004-2015 年)。春季中期湿润期前半段(1960-1980 年)基本为正负交替变化,后半段 SPEI 指数普遍为正,表现出明显的湿润状态;春季后期呈明显的干旱化态势。夏季除时段中期(1975-1995 年)为持续湿润状况外,其余时期均表现为干湿交替变化,干旱得到缓解。秋季 SPEI 变化相对平稳,但年际间变异性大,出现了较多的极端状况,近年秋季干旱渐趋缓和。冬季 SPEI 呈正负交替变化,并表现为持续的不显著波动变化,但整体上为下降趋势,表明冬季甘肃省渐趋干旱。

从干旱发生强度及干旱站次比的年际变化可知(图 3),甘肃省受旱干旱强度及干旱站次比变化规律都表现为年际间差异明显,并呈先降后升的变化趋势,与 SPEI 年均和季节变化规律(图 2)一致。1958 至 2005 年干旱强度基本为中旱,而在 1958 年前和 2005 年后基本为重旱,说明近年来甘肃省干旱程度加重。近 65 a 甘肃省干旱站次比年际差异大,在 3%~94%之间波动,从侧面说明了干旱发生的区域差异。其中有 33 a 站次比≥50%,达到全域性干旱标准,且基本为中旱及以上等级;有 8 a 发生区域性干旱(50%>站次比≥33%);有 5 a 发生部分区域性干旱(33%>站次比≥25%);有 18 a 发生局域性干旱(25%>站次比≥10%)。



注:CI_{up} 和 CI_{low} 分别为显著水平 $\alpha=0.05$ 时的上限和下限。

Note: CI_{up} and CI_{low} are the upper and lower limits at significant levels $\alpha=0.05$, respectively.

图 2　1951-2015 年甘肃省全年、春季、夏季、秋季和冬季 SPEI 值年际变化及 M-K 突变检验曲线

Fig.2　Annual variation of SPEI in annual, spring, summer, autumn, winter, and their M-K test results in Gansu, 1951-2015

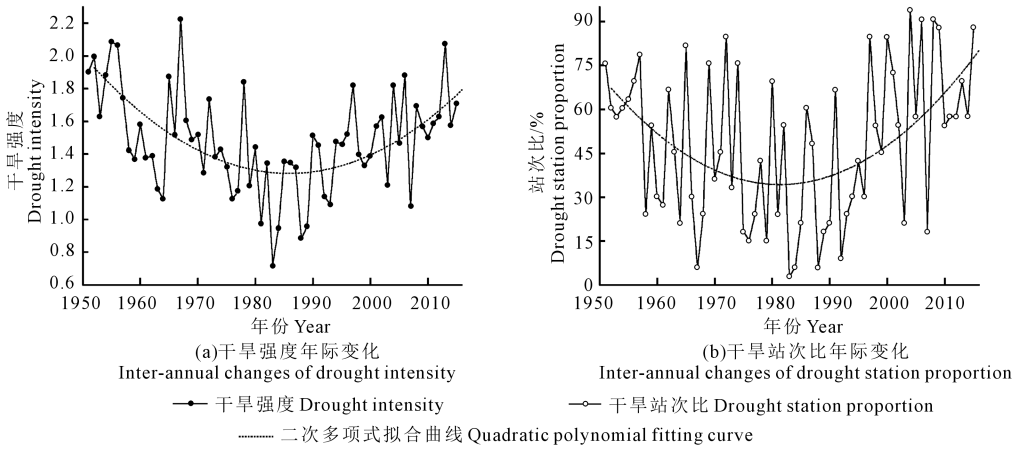


图 3 1951-2015 年甘肃省干旱强度和站次比变化

Fig.3 Variation of drought intensity and drought stations proportion in Gansu from 1951 to 2015

2.2 甘肃省年 SPEI 及干旱的周期性特征

由甘肃省 65 a 年均 SPEI 小波实部图(图 4(a))可知,整个时域中存在 27~50、17~26、12~16 a 和 4~9 a 的多重时间尺度 SPEI 变化。其中 27~50 a 尺度周期震荡最为明显,且随时间尺度降低,SPEI 表现的“干-湿”交替渐趋频繁,周期震荡更加复杂,对应的气候突变点也相应增加。表明 65 a 来 SPEI 的变化周期并不固定,而是以 4 种不同长短的多周期相互嵌套形式变化。从年 SPEI 小波变换的 27~50 a 尺度周期变化过程来看:湿润期出现在 1960s、1980s 中期至 1990s 中期及 2010s;干旱期出现在 1950s、1970s 至 1980s 早期及 1990s 后期至 2000s 后期。湿润期和干旱期的时间分布结果基本与前文(图 2(a))一致。根据不同时间尺度分析近年甘肃省 SPEI 变化发现:27~50 a 和 4~9 a 时间尺度趋于变湿,17~26 a 和 12~16 a 时间尺度则有变干趋势。大尺度反映了干旱变化的年代际背景,小尺度则反映了大尺度背景下干旱情况的详细变化。

小波系数的模是不同时间尺度变化周期所对应的能量密度在时间域中分布的反映,系数模的值越大,说明其所对应尺度的周期性就越强。所以由区域年 SPEI 指数小波系数的模(图 4(b))可知,在不同时间尺度上 SPEI 的周期性和信号强弱各不相同。27~50 a 尺度周期性最显著,是影响未来该地区年 SPEI 的主要时间尺度,其中 36~42 a 尺度周期性最强,且集中体现在 1950s 后期至 1990s 前期;12~16、4~9、17~26 a 尺度周期性依次减小。

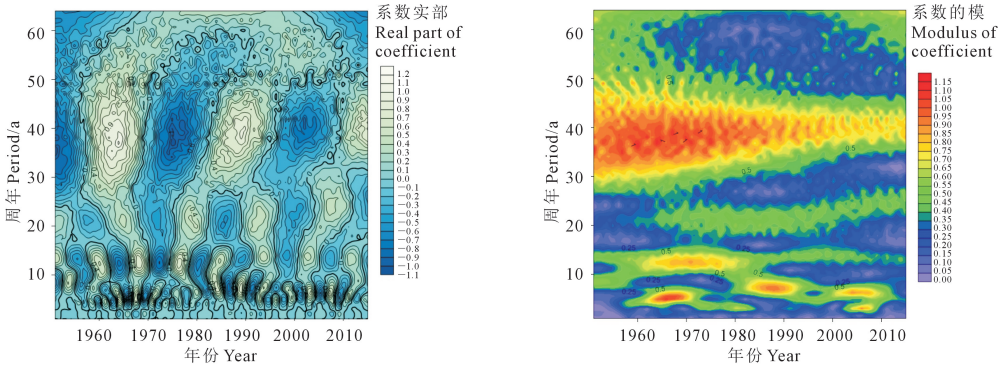
由图 5 可知,小波方差存在明显的 4 个峰值,它们依次对应 39、13、7 a 和 22 a 的时间尺度,说明 39 a 左右时间尺度的周期震荡最强,为甘肃省年 SPEI 变化的第一主周期;13 a 时间尺度对应着第二峰值,为第二主周期,第三、第四峰值分别对应 7 a 和 22 a 的时间尺度,它们依次为第三和第四主周期。说明在整个时间域内,上述 4 个周期的波动控制着甘肃省年 SPEI 的变化特征。

为进一步说明甘肃省年 SPEI 交替变化的波动性,绘制前两个主周期对应的 Morlet 小波系数的实部随时间变化过程线(图 6)。可见,SPEI 随主周期尺度的变化呈现出长周期主导下的长、短周期震荡叠加,震荡幅度基本随主周期尺度逐渐减弱,这种多重尺度和幅度的周期震荡特征与气候过程的非线性、非平稳性特征相一致。不同时间周期尺度上具体年份对应的相位不同,说明从不同时间周期上考察甘肃省整体上是偏湿还是偏干对应具体年份将得出不同的结论。

2.3 甘肃省 SPEI 及干旱的空间格局特征

甘肃省地形复杂,海拔差距悬殊,气候类型多样,造成各气象要素时空分布不均,干旱情势的空间分布也变得复杂化。图 7(a)为甘肃省年尺度 SPEI 的气候倾向率空间分布,除少数站点外,整体呈西北部干旱减轻、东南部干旱加剧的趋势。甘肃西北部马鬃山地区虽干旱趋势较高,但其他大部分地区均为较缓和的湿润趋势,最高为瓜州地区 SPEI 气候倾向率达 $0.54\cdot(10a)^{-1}$;而东南部除玛曲和景泰地区为较高湿润趋势外,大部分地区呈较明显的干旱趋势,郎木寺和松山地区 SPEI 气候倾向率可达 $-0.54\cdot(10a)^{-1}$。

如图 7(b)~7(e)所示,不同季节 SPEI 气候倾向率的空间差异明显,但整体上普遍呈西北地区干旱趋缓,东南地区干旱加剧的分布状况。春季干旱加剧趋势最显著,冬季次之,夏季和秋季湿润与干旱趋势分布基本持平,但存在极端干旱和极端湿润趋势地区,可能是在夏季和秋季地区间降水量分布差异较大导致。春季除少数站点外,整体干旱加剧,



(a)Morlet小波变换系数实部的时频分布
Real part time-frequently distribution of Morlet wavelet transform coefficients

(b)Morlet小波变换系数模的时频分布
Time-frequency distribution for the modulus of Morlet wavelet transform coefficients

图 4　Morlet 小波变化系数实部和模的时频分布

Fig.4　Time-frequency distribution for the modulus and the modulus square of Morlet wavelet transform coefficients

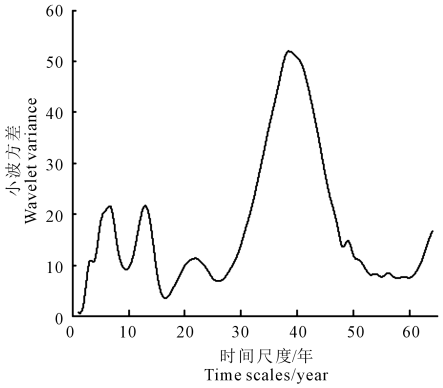
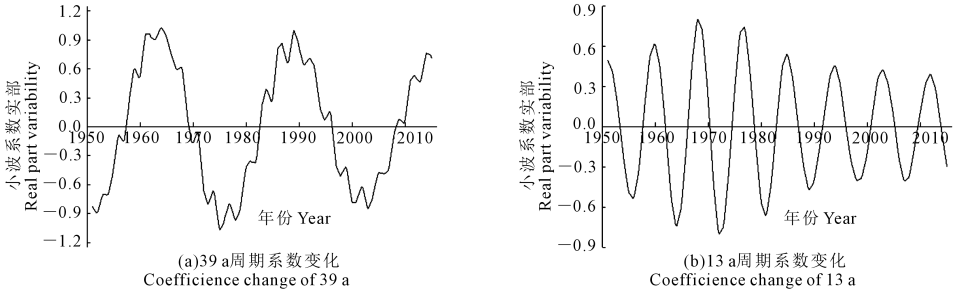


图 5　小波方差图

Fig.5　Wavelet transformation variance

以甘肃鼎新、松山、天水和郎木寺最明显,干旱趋势达-0.38~-0.56·(10a)$^{-1}$;夏季除甘肃景泰、永昌、玛曲和瓜州地区干旱减轻外,其它地区均为干旱加剧趋势,东南部郎木寺 SPEI 气候倾向率达最大-0.52·(10a)$^{-1}$,表现显著;秋季在西北部瓜州地区干旱缓解趋势较明显,可达 0.54·(10a)$^{-1}$,干旱加剧的情况普遍出现于甘肃东南部地区;冬季除少数站点外,全区基本为干旱加剧的趋势,SPEI 气候倾向率达-0.34~-0.43·(10a)$^{-1}$,存在于甘肃武都、岷县、兰州和松山地区,而干旱减轻仅在甘肃省玉门镇、高台和景泰等地区表现显著。



(a)39 a周期系数变化
Coefficience change of 39 a

(b)13 a周期系数变化
Coefficience change of 13 a

图 6　甘肃省 SPEI 指数变化的 39 a 和 13 a 特征时间尺度小波实部过程线

Fig.6　The real part variability of wavelet transformation of SPEI changes in Gansu (period=39 a, 13 a)

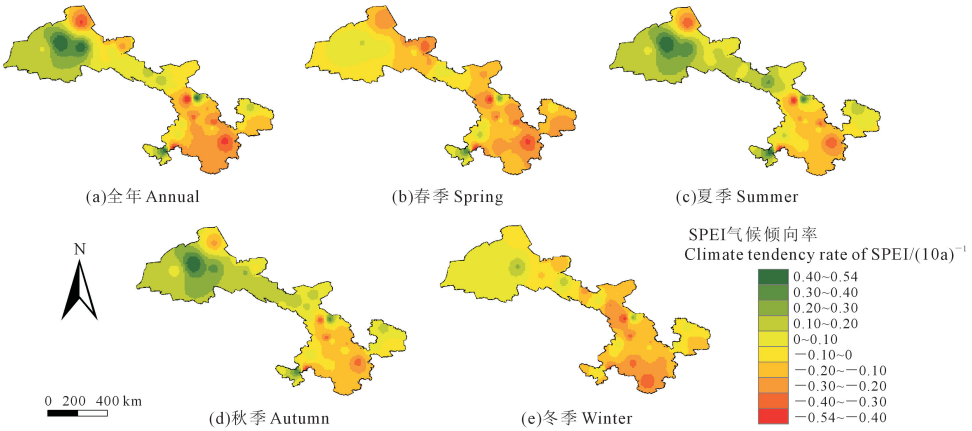


图 7　1951-2015 年甘肃省 SPEI 气候倾向率空间分布

Fig.7　Climate tendency rate spatial distribution of SPEI in Gansu from 1951 to 2015

从甘肃省不同干旱等级发生频率的空间分布(图 8)可知,整体上中旱发生频率最高,且在山丹、西峰及其附近地区最易出现,达 20.00%~26.15%;而轻旱在张掖、瓜州、崆峒及武都地区较易出现,敦煌及郎木寺地区发生频率较低。发生重旱的区域主要集中于郎木寺、岷县和武都等地区,此外,瓜州地区也较易发生重旱,但发生频率普遍低于 17%。特旱发生频率分布相对均匀,在玉门镇、玛曲、马鬃山和景泰地区发生频率较高。综上可知,甘肃省发生不同干旱等级的频率分布有比较明显的区域分布,表明其气象要素变异性大。从整体上可以看出,甘肃中部和西北部地区以轻旱和中旱为主,而东南部发生各种等级干旱可能性都较高,因此在甘肃东南部应做好防旱抗旱工作。

2.4 甘肃省 SPEI 及干旱的 EOF、REOF 分析

为进一步分析甘肃省干旱时空分布状况,对其 33 个站点 65 a 的 SPEI 组成的二维矩阵进行 EOF 和 REOF 分解。首先进行经验正交函数 EOF 分解,获得的 SPEI 前 8 个特征值的方差贡献(表 1),EOF 分解的前 8 个主要载荷向量累积方差贡献率达 82.34%,第 1 模态方差贡献率最大为 37.61%,第 2 模态为15.80%,随后均小于 8.00%并依次减小。

对 EOF 分解的载荷向量采取方差极大旋转,即 REOF 分解,并对旋转后前 5 个载荷向量场进行分析,其累计方差贡献率为 64.55%,且每个载荷向量方差贡献率均在 10%以上,然后获取其空间分布状况图(图 9(a)~9(e))。干旱敏感区的划分原则[32-33]是使 SPEI 的变化在相同分区内相似,且在不同分区内有显著差异。具体为:(1)同一载荷向量场中同一敏感区内,测站多于 4 个,同时载荷≥0.4且地理上连成一片。(2)同一载荷向量场中,若有地理上不连续的多块区域符合上面规定,则划为多个不同敏感区。(3)若在某载荷向量场中,载荷≥0.4 的站数少于 4 个,或地理上连成一片的站点少于 4 个,则判定为无对应敏感区。而这些载荷较大站点,按其与其他载荷向量场的密切度进行划归。(4)对于个别测站按上述原则可能同时归于两个或以上相邻敏感区的,将其归于载荷最大区域。

据此,甘肃省可划为 4 个干旱敏感区域(图 9(f))。Ⅰ区为甘肃西部地区,共 9 个站点,包括天水、陇南、平凉和庆阳等地区;Ⅱ区为甘肃中部地区,共 7 个站点,包括肃南、肃北、玉门和金塔等地区,另添加分类的安西和敦煌等地区;Ⅲ区为甘肃东北部北区,共 7 个站点,包括张掖、山丹、永昌、民勤、武威等地区,另添加古浪、景泰和靖远等地区;Ⅳ区为甘肃东北部南区,共 7 个站点,包括天祝、永登、兰州、榆中和临夏等地区,另添加夏河、玛曲和碌曲等地区。

由 REOF 分解得到的前 5 个旋转载荷向量(图 9(a)~9(e))及其时间系数(图 9(g)~9(k))可知,REOF1 高值区在甘肃东南部东区(Ⅰ区),其极值中心在崆峒和西峰地区,可达 0.86,说明该地区干旱相关性最好;若空间载荷值与时间系数乘积为正,代表该区域偏湿,反之偏干;那么结合两者来看,Ⅰ区旱情呈不显著加剧,平均增幅为$-0.04\cdot(10a)^{-1}$,且持续出现干湿交替状况,1990s 中期至 2000s 后期呈较强的偏干特征,典型年份为 2004 年和 2006 年。REOF2 表明甘肃西北部(Ⅱ区)干旱相关性较好,极值中心位于酒泉、金塔和梧桐沟地区,最高达 0.88,为干旱最敏感区域;Ⅱ区 1951-2016 年呈干旱加剧趋势但不显著,增幅为$-0.10\cdot(10a)^{-1}$,在 2004-2015 年前后干旱程度较高,典型年份为 2004 年和 2013 年。REOF3 有多个极值中心,但站点少、不连续,无法划分区域。REOF4 高值中心位于甘肃中部(Ⅲ区),整体为干湿交替变化,但随时间进程呈不显著变湿趋势,幅度为 $0.12\cdot(10a)^{-1}$。REOF5 高值区位于甘肃东南部西区(Ⅳ区),极值中心位于乌鞘岭地区,达$0.79\cdot(10a)^{-1}$;结合时间系数曲线表明Ⅳ区干旱不显著加剧,65 a 持续性干湿交替出现,1990s 后期至 2000s 前期保持较强偏干特征,典型年份为 2001 年和 2002 年。

表 1 基于 EOF 和 REOF 分析的甘肃省 SPEI 前 8 个模态的方差贡献

Table 1 Contribution of variance of top eight modesin EOF and REOF analysis based on SPEI in Gansu

模态 Mode	EOF		REOF	
	方差贡献率/% Contribution of variance	累积方差贡献率/% Accumulated contribution of variance	方差贡献率/% Contribution of variance	累积方差贡献率/% Accumulated contribution of variance
1	37.61	37.61	15.39	15.39
2	15.80	53.40	13.24	28.64
3	7.75	61.16	13.12	41.76
4	5.85	67.01	12.30	54.06
5	4.69	71.70	10.49	64.55
6	4.08	75.78	7.77	72.33
7	3.51	79.29	5.40	77.72
8	3.05	82.34	4.62	82.34

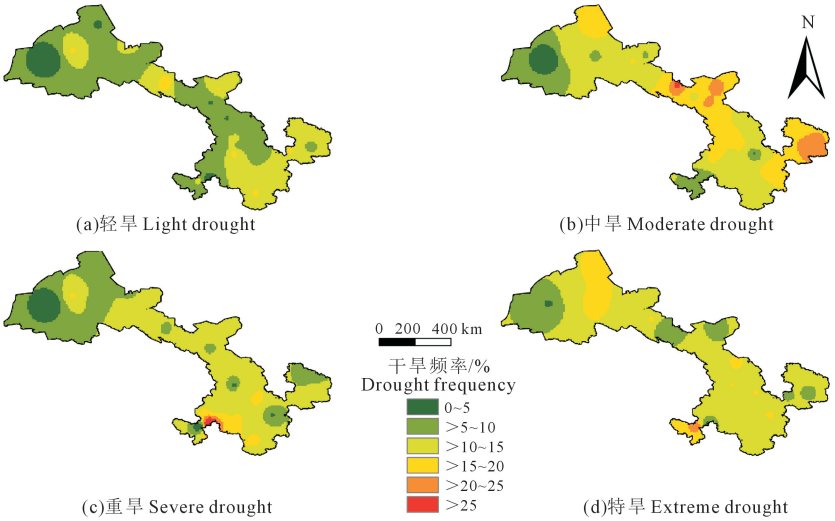


图 8　1951-2015 年甘肃省不同干旱等级发生频率分布

Fig.8　Spatial distribution of different drought degrees in Gansu from 1951 to 2015

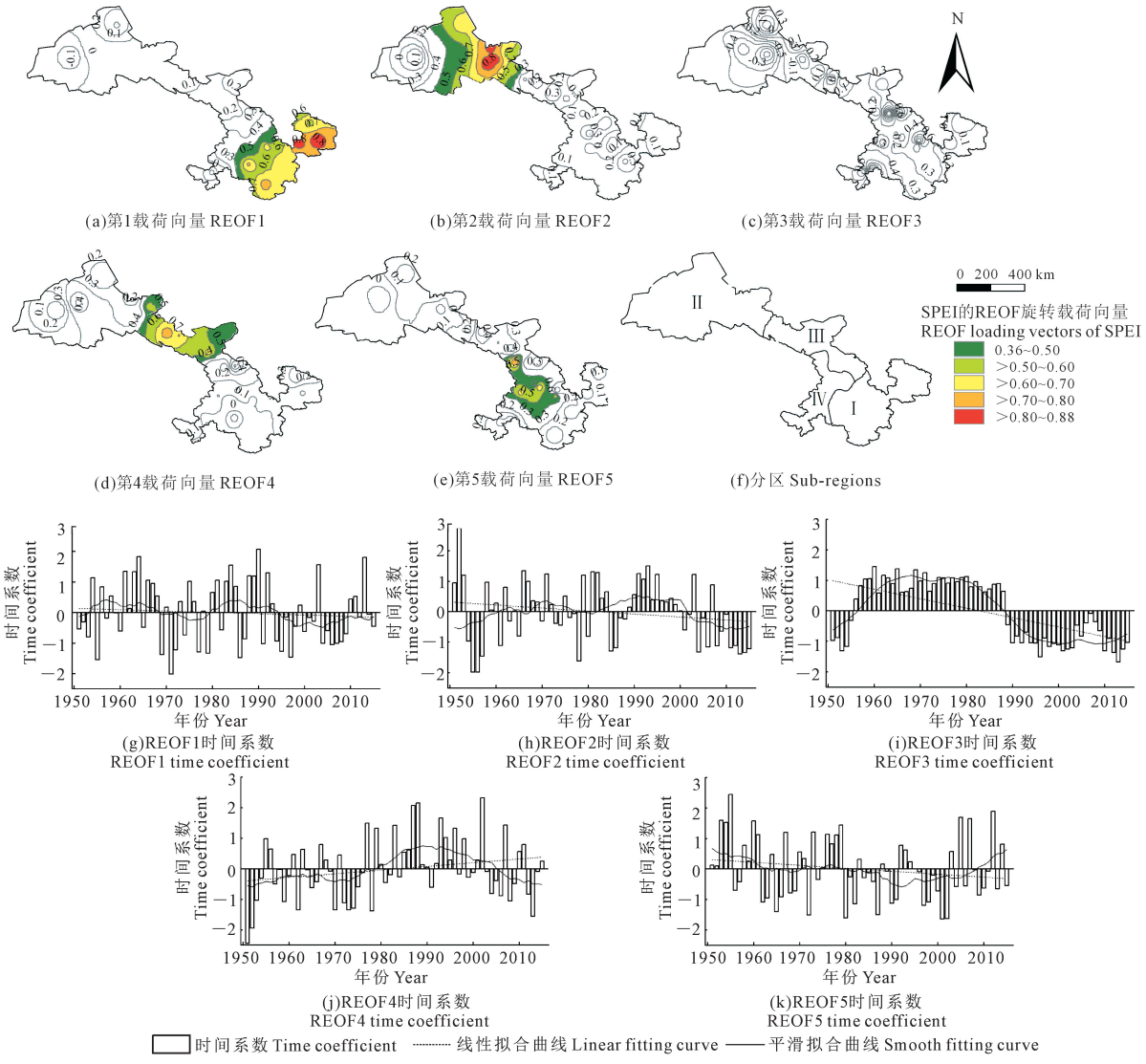


图 9　1951-2015 年甘肃省干旱 REOF 分析前 5 个模态和时间系数及分区变化

Fig.9　Drought spatial distribution, sub-regions, and time coefficients of REOF 1~5 in Gansu from 1951 to 2015

3 讨 论

本文首先利用时间序列的插补理论,插补了部分缺失的气象数据。然后采用 FAO56 提供的 Penman-Monteithp 公式以及相关的简化公式,并结合公式间的线性关系计算ET_0,对 65 a 甘肃省 SPEI 时空格局特征进行了研究分析,指出在气候变化背景下,甘肃省近年呈干旱加剧趋势。该结论与任培贵等[11]基于 Penman-Monteith 公式的 SPEI 对中国西北地区气象干旱变化趋势分析的研究结果基本一致,均主要表现为甘肃西部地区偏湿,东南部地区偏干,但在具体地区上的干旱强度分布范围表现出了不同,可能主要是由于区域站点数量偏少导致空间分布差异,后续研究可以考虑利用遥感等技术获取的数据代替站点资料,以提高结果的计算精度。

近些年的高度场和风场有利于南风增强,使得南面印度洋的水汽向北输送,西风虽偏弱,但也使得西、北方向大西洋和北冰洋的部分水汽输送增强,更有利于甘肃地区降水的增多。而全球的显著变暖,使得热带印度洋水温上升,蒸发水汽极其旺盛,也使得从阿拉伯海向中国西北部输送水汽有所增加;但水循环加快、降水量变化和温度升高是非线性的,而降水量增加于何地则受天气形势影响很大,故难以做出正确的先期预测[34]。这导致甘肃省东南部降水量增加小于蒸发量的显著增加,呈现暖干趋势,所以发生重旱和特旱的风险较高,任余龙等[35]的研究也表现了对于以上区域相似特征的描述;西北部降水量显著增加大于蒸发量的增加,呈现暖湿趋势,但地表蒸散量大,所以更易出现旱情(轻旱和中旱),与陈丽丽等[4]得到的结论基本一致;中部则由于原有的极端干旱性质,其地表实际蒸发水汽很少,从而限制了降水的增加,表现出不稳定变化。基于甘肃省的干旱情势特征,对于如何正确理解并掌握干旱时空差异的产生机制,及如何应对和预测干旱的发生从而实现人与自然的可持续发展,将成为将来研究的重点。

SPEI 的适用性分析在中国主要针对全国[1, 36]、华南[37]、东北[5]和华北[38]等地区进行了探讨,而关注甘肃省 SPEI 适用性的研究相对较少。表 2 为 1991-2015 年“农业气象灾情旬值数据集”中记录的甘肃省典型干旱事件,对照计算出的 SPEI 可以知道,数据集中记录的典型干旱事件的发生时间、地点和强度与同期同地区 SPEI 表征的干旱事件基本一致,表明 SPEI 能够较好地反映出甘肃省的历史典型干旱事件,进一步说明该指数在甘肃省对干旱事件的评价有一定的指示功能。

气候系统是一个多时间尺度系统,所以对应于 SPEI 在时频中也会存在多层次时间尺度结构与局部化特征[27]。本文通过 Morlet 复值小波对 SPEI 进行时频分析,说明了长时间序列不同尺度上 SPEI 的变化特征,揭示隐含的周期震荡,以及多时间尺度下 SPEI 的波动变化,并可依据小波实部显示的周期变化初步判定 SPEI 指数发生突变的范围[39]。而 Mann-Kendall 法不仅检测到 SPEI 序列统计显著的升降趋势以及突变特性,还明确指出了发生突变的时刻。虽然两种方法自身都还存在着一些缺陷:母小波函数的选取直接影响小波变换结果,Mann-Kendall 法适合于对均值突变的检验,都会影响结果的可靠性。但两种方法各有所长,最终将两种方法的研究结果相互验证,互为补充,可以得出比较准确的结论,为甘肃省防旱减灾提供相关参考。

4 结 论

本文利用 1951-2015 年甘肃省 33 个气象站点逐日气象观测数据,结合气象数据的插补原理,并利用基于 Penman-Monteith 公式计算得到不同时间尺度的 SPEI,分析了甘肃省 SPEI 时序变化规律及周期性特征,讨论了甘肃省干旱空间分布格局特征。结果如下:

(1)甘肃省年均 SPEI 在 1957 年和 2004 年前后发生突变,结合图形变化表明甘肃省呈现先由干变湿,然后再由湿变干的变化趋势,并且四季也基本呈先由干变湿再变干的趋势,近几年除秋季外均呈不显著变干趋势。全区干旱强度基本为中旱和重旱,特旱的情况无规律显现;干旱等级及发生范围为全域性中旱和局域性轻旱。

(2)甘肃省年均 SPEI 的复小波分析结果表明,存在 4 个主周期,按照周期性大小排序依次为 39、13、7、22 a 时间尺度。不同尺度周期表现了不同的干湿震荡规律,总体为由无明显规律剧烈震荡的小尺度向有明显规律震荡的大尺度变化。小尺度的交替变化隐藏嵌套在大尺度更为宏观的结构中,同时也说明结合时间尺度研究 SPEI 动态趋势是十分必要的。

(3)甘肃省整体上呈西北部干旱趋势缓解、东南部干旱加剧的趋势。春季干旱显著加剧,冬季次之,夏季和秋季干湿趋势空间分布较均匀。甘肃中部和西北部地区以轻旱和中旱为主,东南部发生重旱和特旱相对较多。REOF 结果表明,甘肃省主要存在 4 个干旱敏感区域,中部地区(Ⅲ区)干旱状况呈缓解趋势,其他地区均呈现干旱加剧趋势,西北地区(Ⅱ区)和东南地区西部(Ⅳ区)干旱发生的风险相对更明显。

表 2　近年来甘肃省典型干旱事件与同期 SPEI 验证比较

Table 1　Verification of drought events and SPEI in Gansu over last decade

发生时间 Duration	发生范围 Scale	灾害描述 Hazard description	标准化降水蒸散指数 SPEI
1991 年 9 月中旬-12 月	环县、崆峒、泾川、张家川	中旱,部分地区轻旱或重旱 MD, some LD to SD	环县 10-12 月:-1.25;崆峒 10-12 月:-1.64
1992 年 3-6 月	白银、安定、环县、通渭、崆峒、泾川、天水、张家川	轻到重旱 LD to SD	崆峒 2-4 月:-0.78;西峰 3-4 月:-0.72;天水 2-4 月:1.20
1993 年 4-5 月	环县、泾川、天水	轻旱,部分为中旱或重旱 LD, some MD or SD	环县 4-6 月:-1.16
1994 年 5 月中旬-6 月中旬	靖远、安定、环县、通渭、崆峒、泾川、文县、天水、张家川	中到重旱 MD to SD	靖远 3-5 月:-1.05;环县:3-5 月:-1.41;崆峒 3-5 月:-1.47;天水 3-5 月:-1.27
1995 年 5-7 月	敦煌、靖远、安定、环县、通渭、崆峒、西峰、泾川、岷县、天水	轻到重旱 LD to SD	靖远 3-6 月:-1.76;环县 5-7 月:-1.36;崆峒 5-7 月:-1.93;西峰 5-7 月:-3.08;岷县 5-7 月:-2.30;天水 5-7 月:-1.48
1996 年 4-6 月	环县、泾川、天水	轻到中旱 LD to MD	天水 4-6 月:-0.84
1997 年 5 月下旬-7 月	靖远、安定、环县、西峰、泾川、天水、张家川	轻到重旱 LD to SD	靖远 5-7 月:-2.17;环县 5-7 月:-1.62;西峰 5-7 月:-2.77;天水 5-7 月:-1.69
1999 年 3 月中旬-4 月中旬	安定、环县、崆峒、通渭、泾川、天水	轻到重旱 LD to SD	环县 2-4 月:-1.06;崆峒 2-4 月:-1.32;天水 2-4 月:-0.94
2000 年 4-7 月	安定、环县、崆峒、西峰、泾川、天水	轻到重旱 LD to SD	环县 5-7 月:-1.18;崆峒 4-6 月:-1.38;西峰 5-7 月:-1.79;天水 5-7 月:-2.14
2001 年 5-8 月上旬	安定、环县、崆峒、天水	轻到重旱 LD to SD	环县 5-7 月:-1.55;崆峒 5-7 月:-1.26;天水 5-7 月:-0.75
2002 年 6 月中旬-8 月	安定、天水	中到重旱 MD to SD	天水 6-8 月:-1.83
2004 年 4-7 月	永登、安定、环县、静宁、通渭、灵台、镇原、泾川、宁县、秦安	轻到重旱 LD to SD	环县 5-7 月:-1.24
2005 年 4-6 月	榆中、安定、环县、通渭、西峰、镇原、秦安	中到重旱 MD to SD	环县 4-6 月:-2.06;西峰 4-6 月:-1.81
2006 年 4-7 月	白银、安定、环县、通渭、镇原、泾川、两当	轻到重旱 LD to SD	环县 5-7 月:-1.14;9-11 月:-1.78
2007 年 4-7 月	安定、环县、静宁、通渭、崆峒、西峰、灵台、镇原	轻到重旱 LD to SD	环县 4-6 月:-2.52;崆峒 5-7 月:-1.66;西峰 4-6 月:-2.07
2008 年 6-7 月	会宁、安定、环县、西峰、灵台	中到重旱 MD to SD	会宁 5-7 月:-0.97;环县 6-8 月:-1.54;西峰 5-7 月:-1.82
2009 年 5-8 月	安定、环县、静宁、崆峒、西峰、镇原、泾川、天水	轻到重旱 LD to SD	环县 5-7 月:-1.43;崆峒 6-8 月:-1.43;西峰 5-7 月:-1.13;天水 6-8 月:-2.18
2011 年 4-6 月	安定、环县、静宁、通渭、西峰、镇原、秦安、天水	轻到重旱 LD to SD	环县 3-5 月:-2.48,6-8 月:-1.58;西峰 4-6 月:-2.42;天水 4-6 月:-2.19

注:LD:轻度干旱;MD:中度干旱;SD:重度干旱。

Note: LD:Light drought,MD:Moderate drought,SD:Severe drought,ED:Extreme drought.

参 考 文 献:

[1] Wang W, Zhu Y, Xu R, et al. Drought severity change in China during 1961-2012 indicated by SPI and SPEI[J].2015,75(3):2437-2451.

[2] 符淙斌,马柱国.全球变化与区域干旱化[J].大气科学,2008,32(4):752-760.

[3] 钱正安,吴统文,宋敏红,等.干旱灾害和我国西北干旱气候的研究进展及问题[J].地球科学进展,2001,16(1):28-38.

[4] 陈丽丽,刘普幸,姚玉龙,等.1960-2010 年甘肃省不同气候区 SPI 与 Z 指数的年及春季变化特征[J].生态学杂志,2013,32(03):704-711.

[5] 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.

[6] Miah M G, Abdullah H M, Jeong C. Exploring standardized precipitation evapotranspiration index for drought assessment in Bangladesh [J]. Environmental Monitoring and Assessment,2017,189(11):547.

[7] 张运福,房一禾,龚强.基于 SPEI 指数的辽宁省生长季干旱时空特征[J].生态学杂志,2017,36(1):190-197.

[8] 陈少丹,张利平,汤柔馨,等.基于 SPEI 和 TVDI 的河南省干旱时空变化分析[J].农业工程学报,2017,33(24):126-132.

[9] 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.

[10] Beguería S, Vicente-Serrano S M, Reig F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring[J],2014,34(10):3001-3023.

[11] 任培贵,张勃,张调风,等.基于 SPEI 的中国西北地区气象干旱变化趋势分析[J].水土保持通报,2014,34(1):182-187.

[12] 闫研,李忠贤.基于 SPEI 指数分析华中地区近 40a 干旱时空分布特征[J].气象科学,2015,35(5):646-652.

[13] 赵林,于家烁,薄岩,等.基于 SPEI 的湖北省近 52 年干旱时空格局变化[J].长江流域资源与环境,2015,24(7):1230-1237.

[14] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review,1948,38(1):55-94.
[15] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56,1998:300.
[16] 刘珂,姜大膀.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.
[17] 李栋梁,刘德祥.甘肃气候.第 1 版.[M].北京:气象出版社,2000:1-3.
[18] 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.
[19] 余威.气象相似性网络构建及缺失气象要素数据的插补[D].重庆:西南大学,2015.
[20] 司鹏,郝立生,罗传军,等.河北保定气象站长序列气温资料缺测记录插补和非均一性订正[J].气候变化研究进展,2017,13(1):41-51.
[21] 庞新生.缺失数据插补处理方法的比较研究[J].统计与决策,2012,(24):18-22.
[22] 彭思岭. 气象要素时空插值方法研究[D].长沙:中南大学,2010.
[23] Hernandez E A, Uddameri V. Standardized precipitation evaporation index (SPEI)-based drought assessment in semi-arid south Texas [J]. Environmental Earth Sciences,2014,71(6):2491-2501.
[24] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.GBT20481-2017 气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2018.
[25] 田甜,黄强,郭爱军,等.基于标准化降水蒸散指数的渭河流域干旱演变特征分析[J].水力发电学报,2016,35(2):16-27.
[26] 刘盈曦,彭贵芬,陈先刚,等.香格里拉未来 50a 主要气候环境要素变化预估——基于小波分析和多元 VAR 回归预估模型[J].资源科学,2016,38(9):1754-1767.
[27] 胡永宁,王林和,张国盛,等.毛乌素沙地 1969-2009 年主要气候因子时间序列小波分析[J].中国沙漠,2013,33(2):390-395.
[28] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等.基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征[J].农业工程学报,2010,26(7):50-59.
[29] Norh 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.
[30] Denbo D W, Allen J S. Rotary empirical orthogonal function analysis of currents near the Oregon Coast[J]. American Meteorological Society,1984,14(1):35-46.
[31] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术.第 1 版.[M].北京:气象出版社,1999:280.
[32] 屠其璞,邓自旺,周晓兰.中国近 117 年年平均气温变化的区域特征研究[J].应用气象学报,1999,10(S1):35-43.
[33] 杨素英,孙凤华,陈岩.近 45a 东北地区春季降水异常的气候特征[J].南京气象学院学报,2005,28(2):197-204.
[34] 施雅风,沈永平,李栋梁,等.中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].第四纪研究,2003,23(2):152-164.
[35] 任余龙,石彦军,王劲松,等.1961-2009 年西北地区基于 SPI 指数的干旱时空变化特征[J].冰川冻土,2013,35(4):938-948.
[36] 庄少伟,左洪超,任鹏程,等.标准化降水蒸发指数在中国区域的应用[J].气候与环境研究,2013,18(5):617-625.
[37] 李伟光,侯美亭,陈汇林,等.基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究[J].自然灾害学报,2012,21(4):84-90.
[38] 张玉静,王春乙,张继权.基于 SPEI 指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析[J].生态学报,2015,35(21):7097-7107.
[39] 杨义,舒和平,马金珠,等.基于 Mann-Kendall 法和小波分析中小尺度多年气候变化特征研究——以甘肃省白银市近 50 年气候变化为例[J].干旱区资源与环境,2017,31(5):126-131.

(上接第 249 页)

参 考 文 献:

[1] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-845.
[2] Taghizadeh-Mehrjardi R, Minasny B, Sarmadian F, et al. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran[J]. Geoderma, 2014,213:15-28.
[3] Scudiero E, Skaggs T H, Corwin D L. Comparative regional-scale soil salinity assessment with near-ground apparent electrical conductivity and remote sensing canopy reflectance[J]. Ecological Indicators,2016, 70:276-284.
[4] Ghassemi F, Jakeman A J, Nix H A. Salinisation of land and water resources: Human causes, extent, management and case studies[M]. Sydey: NSW University Press, 1995:1-3.
[5] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等.盐碱地可持续利用研究综述[J].地理学报,2011,66(5):673-684.
[6] Eldeiry A A, Garcia L A. Detecting soil salinity in alfalfa fields using spatial modeling and remote sensing [J]. Soil Science Society of America Journal,2008,72(1):201-211.
[7] Cai S M, Zhang R Q, Liu L M, et a1. A method of salt affected soil information extraction based on a support vector machine with texture features [J]. Mathem and Computer Modelling, 2010, 51 (11/12): 1319-1325.
[8] 余海英,李廷轩,周健民.设施土壤盐分的累积、迁移及离子组成变化特征[J].植物营养与肥料学报,2007,13(4):642-650.
[9] 张飞,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等.干旱区绿洲土壤盐渍化程度遥感定量评价[J].生态环境学报,2009,18(5):1822-1829.
[10] 陈碧华,孙丽,李新峥,等.新乡市大棚菜田土壤养分及盐分的演变[J].农业工程学报,2013,29(15):83-90.
[11] 孟超然,颜林,张书捷,等.干旱区长期膜下滴灌农田耕层土壤盐分变化[J].土壤学报,2017,54(6):1-9.
[12] 徐存东,程慧,王燕,等.灌区土壤盐渍化程度云理论改进多级模糊评价模型[J].农业工程学报,2017,33(24):88-95.
[13] 彭丽,王玲,刘海隆,等.干旱区绿洲灌溉条件对土壤盐分分布的影响[J].水土保持研究,2016,23(3):112-118,124.
[14] 齐智娟,冯浩,张体彬,等.河套灌区不同覆膜方式膜下滴灌土壤盐分运移研究[J].水土保持学报,2017,31(2):301-308.
[15] 罗佳,盛建东,王永旭,等.不同有机肥对盐渍化耕地土壤盐分、养分及棉花产量的影响[J].水土保持研究,2016,23(3):48-53.
[16] 徐存东.景电灌区水盐运移对局域水土资源影响研究[D].兰州:兰州大学,2010.
[17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
[18] 宋新山,邓伟,章光新,等.钠吸附比及其在水体碱化特征评价中的应用[J].水利学报,2000,(7):70-76.