

DOI: 10.5846/stxb202107191951

张善红, 齐贵增, 苏凯, 周林燕, 孟清, 白红英. 近 60 年秦岭山地旱涝变化规律. 生态学报, 2022, 42(12): 4758-4769.

Zhang S H, Qi G Z, Su K, Zhou L Y, Meng Q, Bai H Y. Changes of drought and flood in the Qinling Mountains in the last 60 years. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4758-4769.

近 60 年秦岭山地旱涝变化规律

张善红^{1,2,3}, 齐贵增^{1,3}, 苏 凯^{1,3}, 周林燕^{1,3}, 孟 清^{1,3}, 白红英^{1,3,*}

1 西北大学城市与环境学院, 西安 710127

2 商洛学院城乡规划与建筑工程学院, 商洛 726000

3 西北大学陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127

摘要: 随着极端气候变化, 山地灾害频发。基于秦岭山地 32 个气象站点的实测数据, 以标准化降水蒸散指数 (SPEI) 为旱涝量化指标, 研究了过去 60 年秦岭山地旱涝时空变化特征、频率、周期等变化规律, 结果表明: (1) 1960—2019 年, 秦岭山地年 SPEI 指数以 0.124/10a 的速度下降, 其中, 90.23% 的面积呈显著下降趋势, 1.96% 的面积呈显著上升趋势, 并在 1990 年发生干旱突变; 秦岭北坡的干旱化趋势大于南坡, 且高海拔地区干旱化更为明显。 (2) 突变前秦岭山地湿润比例平均值为 36.94%, 突变后下降为 18.19%; 干旱比例由突变前的 17.64% 急剧上升到突变后的 38.19%; 突变前 30 年秦岭山地极端干旱事件、严重干旱事件极少发生, 发生频率几乎为 0; 突变后 30 年严重干旱和极端干旱事件发生频率增加, 秦岭南北坡极端湿润和严重湿润事件近乎销声匿迹。 (3) 整体上, 太阳黑子与秦岭山地旱涝变化以显著负相关关系为主; ENSO 事件对秦岭山地的旱涝变化影响较大, 在 La Nina 年易发生洪涝事件, 在 El Niño 年易发生干旱事件; 在不同时域范围内, 海表温度距平 (SSTA) 对秦岭山地旱涝变化的影响不同: 1990 年以前, SPEI 与 SSTA 存在显著的负相关关系; 1990 年后, SPEI 与 SSTA 存在 5—6 年的强凝聚性共振周期, 且 SPEI 滞后 SSTA 约 1/4 周期。

关键词: 标准化降水蒸散指数; ENSO; 太阳黑子; 交叉小波分析; 秦岭山地

Changes of drought and flood in the Qinling Mountains in the last 60 years

ZHANG Shanhong^{1,2,3}, QI Guizeng^{1,3}, SU Kai^{1,3}, ZHOU Linyan^{1,3}, MENG Qing^{1,3}, BAI Hongying^{1,3,*}

1 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

2 College of Urban, Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo 726000, China

3 Key Laboratory of Shaanxi Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract: With the global environmental change, extreme climate events occur frequently and meteorological disasters become more and more serious, and mountain disasters are frequent. Based on the long-term monitoring data from 32 meteorological stations in the Qinling Mountains, we conducted a study using the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) as a quantitative indicator of drought and flooding. We have studied the spatial and temporal characteristics, frequency, and periodicity of drought and flood in the Qinling Mountains over the past 60 years. The results showed that: (1) from 1960 to 2019, the annual SPEI index in the Qinling Mountains decreased at a rate of 0.124/10 a. Of which, 90.23% of the area showed a significant decreasing trend and 1.96% showed a significant increasing trend, and aridity mutation occurred in 1990. The aridity trend of the northern slopes of the Qinling Mountains was greater than that of the southern slopes, and the aridity was more obvious at high altitudes. (2) The average wetness ratio of the Qinling Mountains was 36.94% before the mutation, and decreased to 18.19% after the mutation. The aridity ratio increased

基金项目: 陕西省国际科技合作与交流计划重点项目 (2020KWZ-010); 商洛市气候适应型城市重点实验室开放研究基金项目 (SLSYS2019019); 陕西省青年高校创新团队

收稿日期: 2021-07-19; 网络出版日期: 2022-02-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongyingbai@163.com

sharply from 17.64% before the mutation to 38.19% after the mutation. The frequency of extreme drought events and severe drought events in the Qinling Mountains in the 30 years before the mutation was almost zero; the frequency of severe drought and extreme drought events increased in the 30 years after the mutation, and the extreme wetness and severe wetness events on the north and south slopes of the Qinling Mountains nearly disappeared. (3) On the whole, there is a negative correlation between sunspots and drought and flood changes in the Qinling Mountains. ENSO events had a greater impact on drought and flood changes in the Qinling Mountains, and were prone to flood events in La Nina years and drought events in El Niño years. The impact of SSTA (Sea surface temperature anomaly) on drought and flood changes in the Qinling Mountains is different in different time domains; before 1990, there was a significantly negative correlation between SPEI and SSTA; After 1990, there was a strongly cohesive resonance cycle of 5—6 a between SPEI and SSTA, and SPEI lags SSTA by about 1/4 cycle. These findings would be of important reference value for the prevention of droughts and floods on the southern and northern slopes of the Qinling Mountains, and the development of forestry and agriculture in the Qinling Mountains.

Key Words: standardized precipitation evapotranspiration index; ENSO; sunspot; cross wavelet analysis; Qinling Mountains

随着全球环境变化,极端气候事件频发,气象灾害日趋严重,灾害风险逐渐加大,其中,旱涝灾害是影响范围最广的气象灾害类型^[1],不仅破坏人类生存环境,造成水土流失及农作物受灾减产,还对人类健康和社会稳定造成威胁^[2]。IPCC 第五次评估报告指出^[3],全球几乎所有地区都出现了地表温度持续上升的现象,并且最近 30 年地表温度的增暖幅度持续加大;近 100 年来我国气候增温率达到 1.52℃/100a,超过世界平均水平。全球变暖使大气环流发生异常,极端降水事件发生,在此背景下,全球旱涝影响范围进一步扩大,全球干旱发生频率增加,旱涝灾害问题成为气候学界研究的热点^[4-6]。

秦岭地处我国暖温带和亚热带的生态过渡带,是我国中部最重要的生态屏障及全球生物多样性最丰富的地区之一,是重要的气候和南北地理分界线,是中国气候变化研究的重点和热点区域^[7]。近些年来随着全球气候变化和人类活动的影响,秦岭山地气候变化的特征表现出以下几个特征:①气温上升显著。近 60 年来秦岭南北坡气温均呈上升趋势,秦岭南北气候增暖主要表现在 20 世纪 90 年代之后^[8-9];②极端气温对海拔的依赖性不同。秦岭极端气温的变暖率随海拔升高而增大,高海拔区域极端气温频率和强度的变化最明显,中海拔区域极端气温持续时间的变化最明显^[10];③秦岭山地极端降水的持续性呈现减少趋势,降水强度呈增加趋势。秦岭山地降水时间短、强度大,尤其在秦岭南坡表现最明显,易发生洪水灾害^[11];④春季暖干化趋势显著。近 60 年来秦岭山地春季表现为暖干化趋势,其中 1994—2008 年是干旱化程度高、频率高的时间段^[12]。

目前对旱涝灾害的研究主要集中在 3 个方面:一是旱涝指标的确定。目前应用最广泛,适应性最好,且反映旱涝最理想的指数为标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)。该指数兼顾帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)和标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)的优点,适合多尺度、多空间比较的优点^[13-14]。二是旱涝灾害的时空分布规律及成因研究。Yu 等^[15]采用 SPEI 指数对中国旱涝时空特征进行分析,发现 20 世纪 90 年代末期中国干旱强度增加,东北和华北干旱发生次数最频繁,华南也表现出干旱化趋势;Voice 等^[16]基于全球环流模式对澳大利亚海表温度距平(Sea surface temperature anomaly, SSTA)指数与旱涝的关系进行研究,发现两者关系非常密切,当东太平洋处于厄尔尼诺暖期时,对干旱影响更为强烈;也有学者^[17-19]认为青藏高原热力抬升作用影响到亚洲大部分区域,夏季高原的加热作用通过激发异常的大气环流,使得中亚、西北和华北的干旱事件加剧。近些年来,关于厄尔尼诺/南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)、大气环流、太阳黑子对旱涝灾害的关系研究逐渐成为热点,普遍认为这些因素对旱涝灾害的变化起着非常重要的作用^[20-26]。三是研究 SPEI 指数对农业和林业的影响。张华等^[27]研究西北地区植被变化对干旱的响应,结果表明植被生长状况在大部分区域与 SPEI 呈现

不同程度的正相关;曹乐瑶等^[28]研究了森林生长对气候干旱的响应,结果表明森林生长对气候干旱的响应有正有负,且在不同月份、不同时间尺度上正负响应有所不同;Jiang 等^[29]对中国牧区不同时间尺度下植被生长对干旱的响应进行了研究,结果表明森林对较长时间尺度的干旱比较敏感,而草地和农田对较短时间尺度的干旱有关系;Qi 等^[30]研究结果表明,秦岭山地植被归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)变化与秦岭干湿变化密切相关,植被年 NDVI 与春季 SPEI 绝大多数面积呈正相关,且随海拔上升植被对干湿变化的敏感有差异。

秦岭是中国南北地理环境的重要分界线,是气候变化的敏感区。在全球变暖的大背景下,基于秦岭南北坡 32 个气象站点的气象数据,探讨秦岭南北坡旱涝时空分布特征,引入交叉小波和小波相干分析法,更好地揭示秦岭山地旱涝变化与各因子之间在不同周期尺度上的时频位相关关系,旨在为秦岭南北坡的旱涝防治,秦岭林业和农业发展提供科学依据,为秦岭山、水、林、田、湖、草生态保护工程提供有力的理论指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

秦岭山地横亘于我国中部地区呈东西走向的巨大山脉,其大体上与我国 1 月 0℃ 等温线、800mm 等降水量线重合^[7],是湿润季风气候与半湿润季风气候的分界线,也是北亚热带常绿落叶阔叶林混交林与暖温带落叶阔叶林的分界线,是重要的气候和南北地理分界线,是全球生物多样性关键地区之一,同时这座横亘东西的巨大山脉又是气候变化区域响应的敏感区^[31]。秦岭山地的高山、中山地貌一般海拔在 1500—3000m,导致气候山地多样,呈现出明显的山地垂直分带特征^[7],随着海拔的上升,依次呈现暖温带、中温带、寒温带等垂直气候带(南坡在暖温带以下有北亚热带)。气候带的垂直地带性,相应植被也呈现明显的垂直分带特征。本文研究的秦岭山地为陕西省境内的秦岭腹地,地处 105°30′—111°05′E, 32°40′—34°35′N 之间,西起嘉陵江,东与伏牛山相接,北以渭河为界,南以汉江为边,东西横贯于陕西省南部,包括陕西省的六市 32 个县区,见图 1。

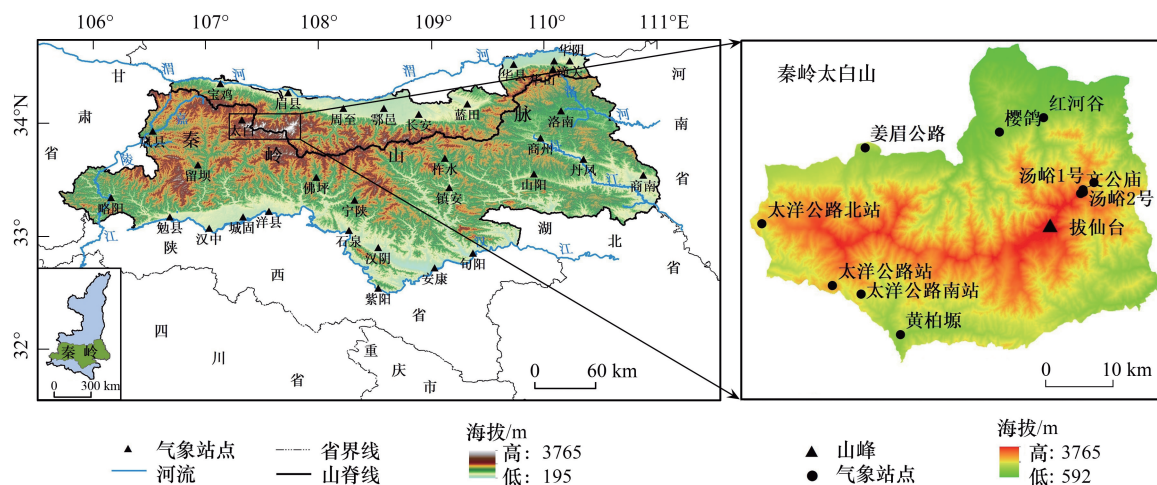


图 1 研究区气象站点

Fig.1 Spatial distribution of meteorological stations in the study area

1.2 资料来源

本文所采用的气象数据来源于陕西省气象局,包括 1960—2019 年秦岭山地 32 个气象站点逐日气温和降水数据以及太白山中高海拔的 11 个自动气象站 2013—2015 年逐日气温、降水数据。其中 1960—2019 年日值数据有部分站点数据缺测,为保证研究数据的完整性和连续性,缺测数据通过站点已有数据与邻近站点数据采用回归方法^[32]进行插补,部分缺测站点结果如图 2(图 2 为部分所缺站点与邻近站点数据的一致性检

验)所示。由图 2 可以看出,缺测数据站点与临近站点的数据一致性良好, R^2 均大于 0.97 以上,说明采用临近站点的插补方法是可行的。

数字高程 (DEM) 数据分辨率为 $30\text{m}\times 30\text{m}$,来源于国家基础地理信息中心; ENSO 数据来自美国海洋气象局 NOAA (<http://www.cpc.noaa.gov>), ENSO 事件选用赤道中、东太平洋 El Niño3.4 区的海表温度距平 (Sea surface temperature anomaly, SSTA) 指数进行表征^[23]; 太阳黑子数据来源于美国天文观测网站公布的太阳黑子相对数。

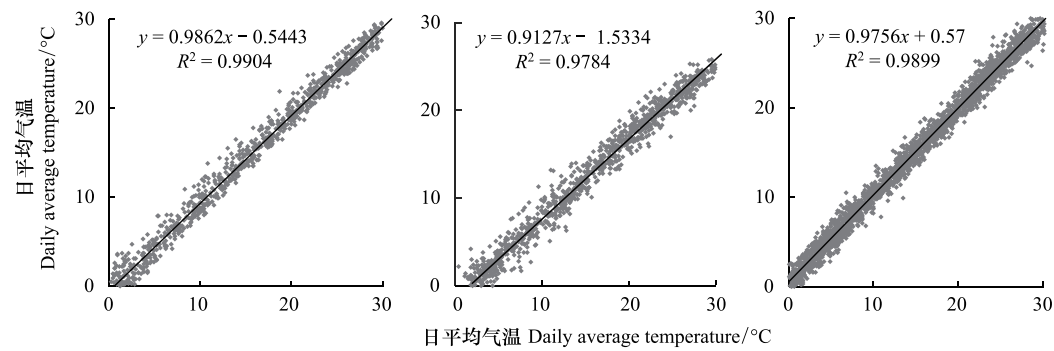


图 2 部分缺测站点与临近站点的数据一致性检验
Fig.2 Data consistency test between lack of measured data site and adjacent site

1.3 研究方法

1.3.1 标准潜在蒸散发指数 SPEI

Vicente-Serrano 等^[33]提出标准化降水蒸散指数 (SPEI), 兼顾帕尔默干旱指数 (PDSI) 和标准化降水指数 (SPI) 的优点, 适合多尺度、多空间比较的优点。SPEI 表征全球变暖背景下干旱的变化特征, 在全球各地区有较好应用^[34—36]。具体计算过程参见以下参考文献^[33,37]。秦岭山地的旱涝等级划分参考 GB/T20481—2006《气象干旱等级》, 并借鉴刘珂和蒋大勝^[38]的划分方法, 具体标准见表 1。

表 1 标准化降水蒸散指数 (SPEI) 对应的旱涝等级
Table 1 SPEI grades for drought and flood

等级 Grade	SPEI 值 SPEI value	旱涝程度 Degree of drought and flood	等级 Grade	SPEI 值 SPEI value	旱涝程度 Degree of drought and flood
4	$[2, +\infty)$	极端湿润	-1	$(-1.0, -0.5]$	轻度干旱
3	$[1.5, 2.0)$	严重湿润	-2	$(-1.5, -1.0]$	中等干旱
2	$[1.0, 1.5)$	中等湿润	-3	$(-2.0, -1.5]$	严重干旱
1	$[0.5, 1.0)$	轻度湿润	-4	$(-\infty, -2.0]$	极端干旱
0	$(-0.5, 0.5)$	正常			

SPEI: 标准化降水蒸散指数 Standardized precipitation evapotranspiration index

1.3.2 Anuplin 插值方法及验证

Anusplin 空间插值法, 是由澳大利亚学者 Hutchinson 基于薄盘光滑样条函数理论开发, 该软件通过多个影响因子进行空间插值, 更加适用于长时间序列的气象要素插值处理^[39], 并且在复杂山地环境下, 插值精度误差小^[40], 研究表明 Anusplin 对气象数据的插值相于其他插值法更加准确^[41], 因此本文选用了 Anusplin 对秦岭山地各站点 SPEI 进行空间插值。采用交叉验证方法选取中高海拔站点和中低海拔站点数据, 运用平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 2 个参数评估 SPEI 数据的插值精度。中高海拔站点验证: 采用太白山地区 2013—2015 年 11 个中高海拔区自动气象站点数据对 Anusplin 法空间插值结果进行检验; 中低海拔站点验证: 从 32 个站点中每次随机预留 3 个站点作为验证, 剩余 29 个站点用来建立插值模型, 共取 4 次, 得到

12 个验证点,用来评估中低海拔地区插值验证精度。表 2 插值结果精度最大年份、最小年份以及中间年份的验证结果,SPEI 插值结果在中低海拔处、中高海拔插值良好,满足研究需要。

表 2 SPEI 空间插值结果检验
Table 2 Results of SPEI spatial interpolation of the Qinling Mountains

站点验证 Interpolation validation	年份 Year	平均绝对误差 Mean absolute error (MAE)	均方根误差 Root-mean-square error (RMSE)
中高海拔区 Middle and high altitude area	2013	0.136	0.172
	2014	0.041	0.061
	2015	0.242	0.315
中低海拔区 Middle and low altitude areas	1971	0.014	0.129
	1991	0.121	0.162
	1981	0.158	0.184

1.3.3 相关性分析

使用交叉小波变换(XWT)与小波相干变换(WTC)分析秦岭山地 SPEI 与 ENSO、太阳黑子的关系。交叉小波变换^[42]是一种将小波变换和交叉谱分析结合的一种新的信号分析技术,可以从多时间尺度研究两个时间序列在时域频中的相互关系。该方法可以揭示两个不同时段尺度上的相关性和一致性,并能再现时频空间中的相位关系。小波相干谱是用来衡量两个时间序列在时频域中局部相关的低值区,两者在小波相干谱中也可能对应着显著的相关性。小波相干谱的检验采用蒙特卡洛检验法。具体使用方法,见参考文献^[42]。

在使用交叉小波变换对秦岭山地 SPEI 研究的基础上,结合小波相干谱,更能准确地得出秦岭山地 SPEI 及其影响因子特征指数的时间序列的时频位相关系^[43]。

2 结果与分析

2.1 1960—2019 年秦岭山地旱涝变化

2.1.1 秦岭山地 SPEI 指数时间变化趋势

图 3 为秦岭山地平均 SPEI 指数年际变化趋势及其 Mann-Kendall 检验结果。由图 3 可以看出,1960—2019 年,秦岭山地年平均 SPEI 指数以 0.124/10a 的速度下降,干旱趋势明显增强,1990 年秦岭山地发生干旱突变。突变前的 30 年洪涝事件相对较多,而突变后的 30 年干旱频繁发生,干旱事件大于洪涝事件。在 0.05 的置信度水平下,由 UF 曲线可知,1960—2019 年秦岭年平均 SPEI 指数呈现波动变化,并于 1990 年发生下降突变,且在 2000—2019 年间(除 2011—2013 年)达显著下降趋势,而在突变之前,无论是干旱事件还是洪涝事件基本未达到显著变化。

2.1.2 秦岭山地 SPEI 指数空间变化趋势

通过对 1960—2019 年秦岭山地各站点的 SPEI 值进行 Anusplin 插值,得到 60 张 SPEI 的空间分布图,采用线性倾向分析的方法,得到秦岭山地每个栅格上年 SPEI 变化倾向率并进行显著性分析(图 4)。由图 4 秦岭 SPEI 倾向率可知,秦岭山地 SPEI 的变化率介于-0.350/10a 到 0.086/10a 之间,倾向率大于 0 的地区占总面积的 4.17%,倾向率小于 0 的地区占总面积的 95.83%。由 SPEI 倾向率显著性检验可知,秦岭山地 90.23% 的面积显著下降趋势($P \leq 0.1$),5.17%不显著下降;2.64%不显著上升;1.96%显著上升。

其中,秦岭南、北坡的年均 SPEI 指数分别以 0.121/10a 和 0.171/10a 的速度下降,表明北坡的干旱化趋势大于南坡。其中北坡的周至、鄠邑、宝鸡的干旱化程度较大,其 SPEI 指数变化率分别为-0.179/10a、-0.129/10a、-0.172/10a;南坡 SPEI 指数倾向率下降较明显的地区为镇安、柞水和城固,分别是-0.179/10a、-0.194/10a 和-0.172/10a;而南坡的商南、安康和略阳表现出较微弱的湿润化特征,倾向率为 0.063/10a、0.022/10a 和 0.013/10a。

参考《陕西秦岭生态环境保护纲要》中依据生态系统基本特征对秦岭高、中、低海拔的划分,将秦岭划分

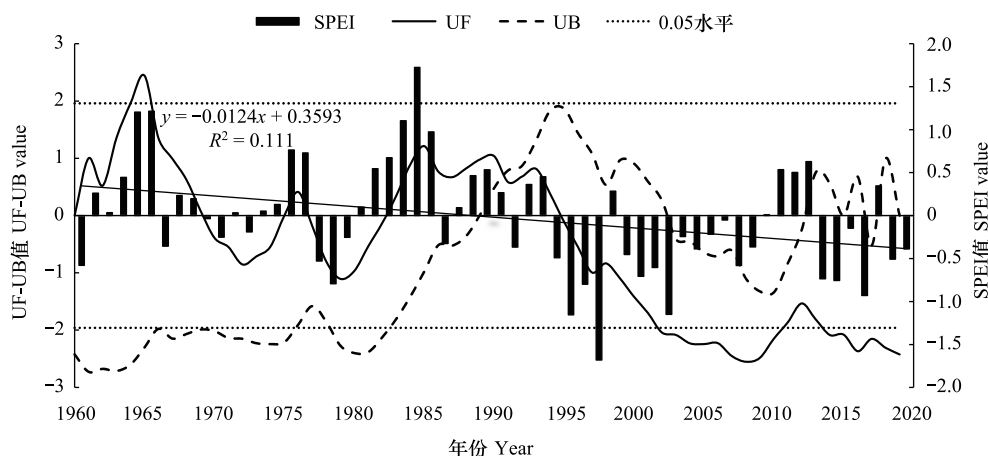


图3 1960—2019 年秦岭山地 SPEI 值年际变化及 M-K 突变检验

Fig.3 Interannual variation of SPEI value and M-K mutation test in Qinling Mountains from 1960 to 2019

SPEI: 标准化降水蒸散指数 Standardized precipitation evapotranspiration index; M-K: Mann-Kendall; UF, Forward standard normal distribution; UB, Backward standard normal distribution; 在给定显著性水平 $\alpha=0.05$, 统计量 UF 和 UB 的临界值为 ± 1.96 ; UF>0, 表示序列呈上升趋势; 反之, 呈下降趋势, 大于或小于 ± 1.96 , 表示上升或下降趋势显著

为<1500m、1500—2600m 和>2600m 3 个海拔区域^[10], 并在 3 个海拔区内提取 SPEI 倾向率。结果发现, <1500m、1500—2600m 和>2600m 3 个区间范围的平均倾向率分别为-0.111/10a、-0.193/10a 和-0.286/10a, 说明高海拔地区旱涝状况对气候变化更为敏感。

综上所述, 整个秦岭山地干旱化趋势显著, 且北坡的干旱化趋势大于南坡; 高海拔地区 SPEI 指数呈现明显的下降趋势, 即高海拔地区干旱更加敏感。

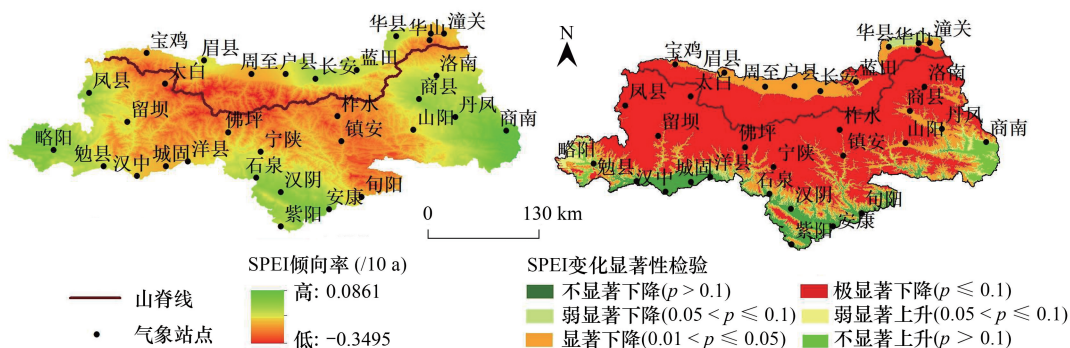


图4 1960—2019 年秦岭山地年均 SPEI 倾向率与显著性空间分布

Fig.4 Spatial distribution of SPEI tendency rate and its significance in the Qinling Mountains

2.2 秦岭南北旱涝发生频率变化特征

按照 SPEI 旱涝等级划分标准(表 1)将 SPEI 指数划分为不同的旱涝级别, 并分为 6 个年代际变化进行分析, 结果见表 3。由表 3 可以看出, 秦岭南北的干旱发生频率呈上升趋势, 洪涝发生频率呈下降趋势, 20 世纪 80 年代之前, 秦岭北坡的洪涝发生频率大于南坡, 20 世纪 80 年代开始, 秦岭北坡的干旱发生频率大于南坡。20 世纪 60—70 年代秦岭南坡和北坡地区均由湿润向干旱发展, 且秦岭北坡的涝灾频率大于秦岭南坡; 20 世纪 80 年代秦岭南坡均以湿润为主, 且秦岭南坡的涝灾频率大于北坡; 20 世纪 90 年代到 21 世纪的前 10 年, 秦岭地区湿润事件呈现断崖式下降, 旱灾频率和等级明显增加, 秦岭北坡的干旱事件由 12.50% 上升到 48.33%, 南坡由 6.67% 剧增到 41.67%, 北坡的干旱程度大于秦岭南坡; 2010—2019 年秦岭地区开始转向湿润,

但其干旱程度仍高于 20 世纪 60 年代干旱,且北坡的干旱程度大于秦岭南坡。

秦岭地区 1960—2019 年 SPEI 指数在 1990 年发生降低突变,值得注意的是,突变前 30 年(1960—1989 年)秦岭地区整体湿润比例平均值为 36.94%,突变后 30 年(1990—2019 年)湿润比例平均值下降为 18.19%;干旱比例平均值由突变前的 17.64%急剧上升到突变后的 38.19%,表明 1990 年以后,秦岭由湿润转向干旱的趋势明显。此外,突变发生前秦岭南北坡极端干旱事件从未发生,严重干旱事件也很罕见,突变后严重干旱和极端干旱事件发生频率较高;同时,突变后秦岭南北坡极端湿润和严重湿润事件近乎销声匿迹,1990—2019 年只发生 3 次严重湿润事件。

表 3 1960—2019 年秦岭南北旱涝发生频率/%

Table 3 Frequency of drought and flood in the Qinling Mountains from 1960 to 2019

年份 Year	1960—1969		1970—1979		1980—1989		1990—1999		2000—2009		2010—2019	
旱涝程度 Degree of drought and flood	NS	SS	NS	SS	NS	SS	NS	SS	NS	SS	NS	SS
极端湿润 Extreme wet	0.83	0.00	0.00	0.00	1.67	4.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
严重湿润 Serious wet	7.50	5.83	0.83	0.00	12.50	6.67	0.00	0.00	0.83	0.00	0.83	0.83
中等湿润 Moderate wet	6.67	5.83	10.00	0.00	15.00	15.00	0.83	1.67	8.33	7.50	8.33	10.83
轻度湿润 Mild wet	25.83	22.50	15.83	11.67	22.50	30.83	9.17	13.33	4.17	4.17	21.67	13.33
湿润发生频率 Wet frequency	40.83	34.17	26.67	11.67	51.67	56.67	10.00	15.00	13.33	11.67	30.83	25.00
正常频率 Normal frequency	41.67	46.67	51.67	56.67	35.83	36.67	45.83	44.17	38.33	46.67	40.83	49.17
轻度干旱 Mild drought	11.67	15.83	13.33	29.17	12.50	6.67	20.00	20.00	25.83	20.00	10.83	15.83
中度干旱 Moderate drought	5.00	3.33	7.50	2.50	0.00	0.00	7.50	10.83	19.17	20.00	11.67	8.33
严重干旱 Serious drought	0.83	0.00	0.83	0.00	0.00	0.00	6.67	8.33	3.33	1.67	5.00	1.67
极端干旱 Extreme drought	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	1.67	0.00	0.00	0.83	0.00
干旱发生频率 Drought frequency	17.5	19.17	21.67	31.67	12.50	6.67	44.17	40.83	48.33	41.67	28.33	25.83

NS: 秦岭北坡 Northern slopes of the Qinling Mountains; SS: 秦岭南坡 Southern slopes of the Qinling Mountains

3 秦岭山地旱涝变化周期与成因分析

3.1 秦岭山地旱涝周期

采用 Morlet 小波对秦岭年 SPEI 值进行周期分析,结果如图 5。小波变换系数实部时频图中,正小波代表 SPEI 指数偏大时期,表示湿润条件,负小波代表 SPEI 指数偏小时期,表示干旱条件。由图 5 秦岭 SPEI 的小波周期图可以看出,秦岭山地主要存在 23 年的中长周期及 9 年左右的短周期,大尺度的周期嵌套着小尺度的周期变化,且不同周期对应的 SPEI 指数偏大偏小情况不同。23 年尺度的中长周期,其周期信号具有全域性特点,周期信号最强,小波系数等值线闭合值高,是秦岭山地 SPEI 指数序列的最大周期变化。9 年左右的周期变化,周期信号具有局域性特征,以 1995 为界,周期振荡在 1960—1995 年表现最明显。由图 5 秦岭 SPEI 小波分析方差可知,秦岭山地 SPEI 干旱指数序列的小波方差有 2 个峰值,对应周期分别为 23 年和 9 年。其中 23 年尺度的小波方差值远大于 9 年尺度对应的小波方差峰值,表明 23 年的周期振荡最为明显,为第一主周期,9 年周期为次周期。该结论与小波实部时频图得到结论基本一致。

3.2 秦岭山地旱涝变化的成因分析

影响气候旱涝的直接原因是气温和降水的异常,而气温和降水变化的原因可能与热带海洋表面温度、大气环流、太阳活动等综合因素的影响。本文就太阳黑子变化、海表温度距平指数(SSTA)、ENSO 事件分析秦岭山地旱涝变化的成因。

3.2.1 太阳黑子的影响

图 6 为秦岭山地 1960—2019 年 SPEI 与太阳黑子的交叉小波计算结果。由图 6 交叉小波能量谱可知,秦岭年 SPEI 与太阳黑子存在一个显著的共振周期振荡,大约为 8—10 年周期(1965—1994 年)。其中 1960—

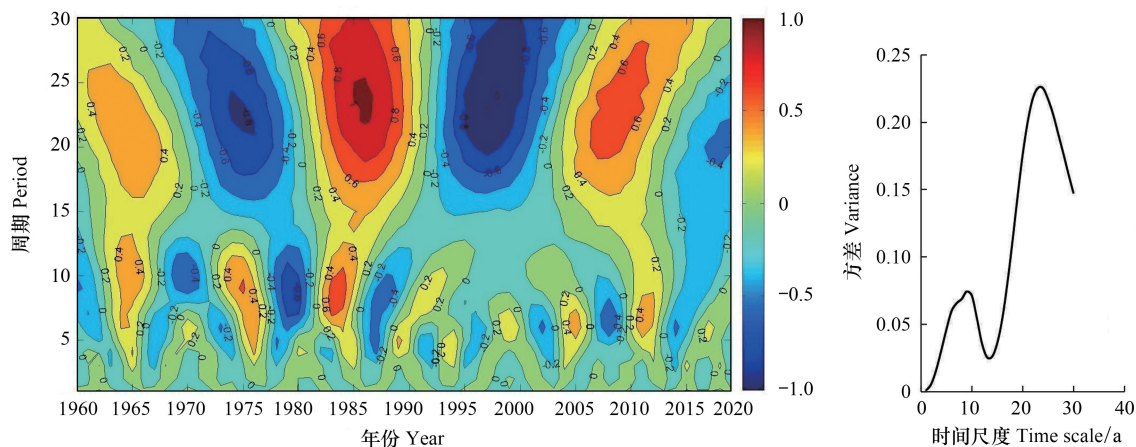


图 5 1960—2019 年秦岭山地 SPEI 指数小波分析图

Fig.5 Wavelet analysis of SPEI index in the Qinling Mountains from 1960 to 2019

1984 期间相位向上偏左,近似负相关;1985—1994 期间,相位向上偏右,近似正相关。由图 6 交叉小波凝聚谱可以看出,交叉小波凝聚谱弥补了交叉小波能量谱在低能区相关性分析的不足,交叉小波凝聚谱有着较大的时频域空间,SPEI 与太阳黑子序列在有效谱区内存在 3 个周期,5—6 年周期(1963—1975 年)、3 年周期(1975—1978 年)和 2 年周期(1994—2005 年)。5—6 年周期相位差向上偏左,近似负相关;3 年周期 SPEI 变化相位比太阳黑子提前 90° ;2 年周期 SPEI 变化与太阳黑子呈负相关。可见太阳黑子相对数在不同的时间尺度上对旱涝变化影响不同,在 1960—1984 年和 1994—2005 年太阳黑子与秦岭干旱呈负相关,而在 1985—1994 年呈正相关关系,整体上太阳黑子相对数与秦岭旱涝干旱基本呈负相关关系。

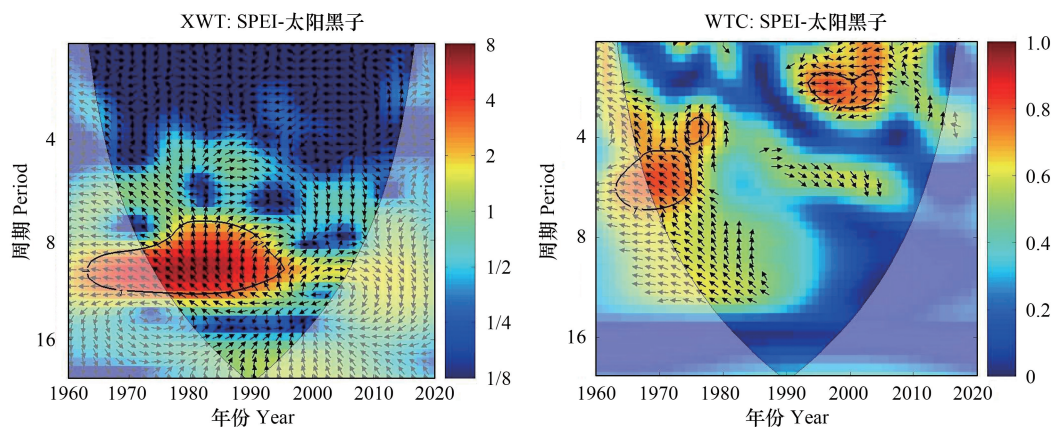


图 6 秦岭年 SPEI 与太阳黑子的交叉小波能量谱、交叉小波凝聚谱

Fig.6 Cross wavelet power and wavelet coherence between SPEI and sunspot in the Qinling Mountains

黑色实线圈闭合区域为通过置信水平为 95% 的标准背景谱检验;箭头表示相位关系, $\leftarrow$ 表示两个序列变化呈负相关关系, $\rightarrow$ 表示位正相关关系; $\uparrow$ 表示 SPEI 变化滞后太阳黑子变化位相 90° , $\downarrow$ 表示 SPEI 变化相位超前太阳黑子 90° ;XWT:交叉小波变换 Cross wavelet transform; WTC:小波变换相干法 Wavelet transform coherence

3.2.2 海洋表面温度距平指数(SSTA)的影响

图 7 为秦岭山地 1960—2019 年 SPEI-1 与 SSTA-1 的交叉小波计算结果。由图 7 SPEI 与 SSTA 序列的交叉小波能量谱可知,SPEI 与 SSTA 存在两个显著的共振周期振荡,分别是 2—3 年周期(1962—1970 年)和 4—6 年周期(1982—2007 年)。前者相位差向下偏左,近似负相关;后者分为两个阶段,其中 1982—1990 年相位

向上偏左,近似负相关,1991—2007 年秦岭山地 SPEI 滞后 SSTA 约 1/4 周期。结合 SPEI 与 SSTA 序列交叉小波凝聚谱可以发现,两序列具有的凝聚性最强的周期为 5—6 年的年际共同变化周期(1995—2012 年),位相差为垂直向上,SPEI 滞后 SSTA 约 1/4 周期,约 1.25—1.5 年;2012 年后位于有效谱区外,但 2012 年后在有效谱区外出现显著正相位高能量振荡,表明 2012 年后秦岭 SPEI 受到东太平洋 El Niño 3.4 区的海表温度变化的影响依然很强烈。

综上所述,在 1990 年以前,SPEI 与 SSTA 存在 2—3 年周期(1962—1970 年)和 4—6 年周期(1982—1990 年)的显著负相关共振周期,即随着海温的增加,SPEI 呈现下降趋势;1990 年以后,SPEI 与 SSTA 具有凝聚性最强的 5—6 年的年际共同变化周期(1995—2018 年),且秦岭山地 SPEI 滞后 SSTA 约 1/4 周期。说明在不同时域范围内,SSTA 对秦岭山地旱涝变化的影响不同。

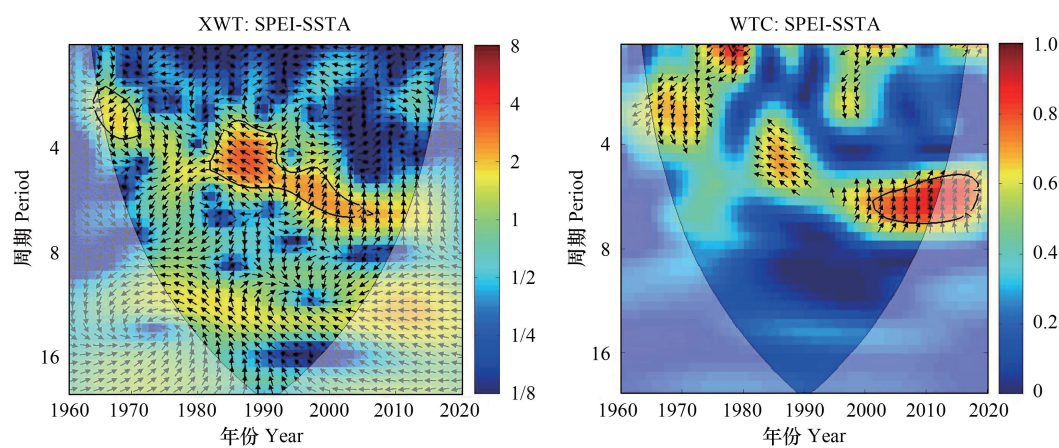


图 7 秦岭年 SPEI 与 SSTA 的交叉小波能量谱、交叉小波凝聚谱

Fig. 7 Cross wavelet power (left) and wavelet coherence (right) between SPEI and SSTA in the Qinling Mountains

黑色实线圈闭区域为通过置信水平为 95% 的标准背景谱检验;箭头表示相位关系,←表示两个序列变化呈负相关关系,→表示为正相关关系;↑表示 SPEI 变化相位滞后 SSTA 变化相位 90°,↓表示 SPEI 变化相位超前 SSTA 变化相位 90°;SSTA: 海表温度距平 Sea surface temperature anomaly

3.2.3 ENSO 与 SPEI 值的关系

根据中国国家气象中心(National center of China)提供的厄尔尼诺/拉尼娜事件判别方法并参考其他文献的划分结果^[22-23],统计 1960—2019 年 ENSO 事件。El Niño 事件年共有 14 次,La Nina 事件年共有 22 次。图 8 为 ENSO 事件强度与事件年 SPEI 值的关系,在 La Nina 事件年,SPEI 指数相对较大,整个区域多数处于湿润期;在 El Niño 事件年及其前后 1 年,SPEI 值相对偏小,整个区域基本处于干旱期。在该区域 60 年间 15 次干旱事件(SPEI 值<0.5)中,有 10 次发生在 El Niño 事件年及其前后 1 年;在 60 年间的 16 次洪涝事件(SPEI 值>0.5),其中有 9 次发生在 La Nina 事件年。在 1990 年突变前,El Niño 事件 6 次,La Nina 事件 14 次,La Nina 事件多于 El Niño 事件,突变前湿润年多于干旱年;在 1990 年突变后,El Niño 事件 10 次,La Nina 事件 8 次,El Niño 事件大于 La Nina 事件,突变后干旱年多于湿润年。这说明,ENSO 事件对秦岭山地的旱涝事件影响非常显著,在 La Nina 年易发生洪涝事件,在 El Niño 年易发生干旱事件,或者发生在 El Niño 年前后一年,地处西北地区的秦岭山脉同样会受到热带太平洋地区气温和水温变化的影响。

4 讨论与结论

4.1 讨论

全球变化使得全球干旱呈现增强趋势,且局地干旱更加剧烈^[44-46],秦岭山地作为中国南北过渡带,是气候变化的敏感区^[47-48]。本文研究 1960—2019 年秦岭山地旱涝变化的空间差异时,发现秦岭山地的干旱状况

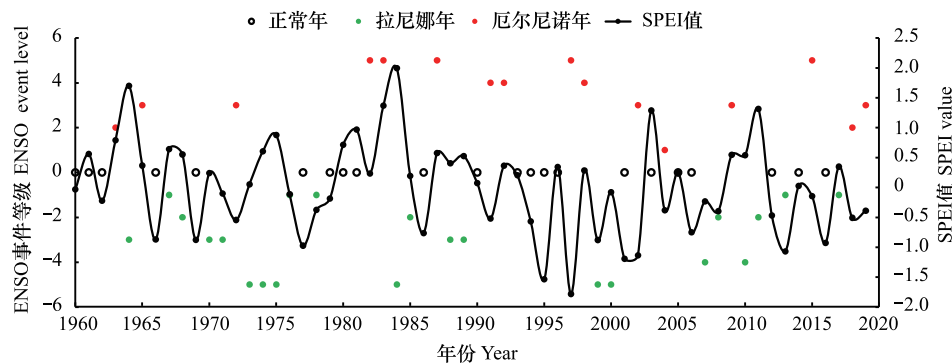


图 8 ENSO 事件与秦岭山地 SPEI 值关系

Fig.8 The relationship between ENSO events and SPEI value over Qinling Mountains from 1960 to 2019

ENSO:厄尔尼诺/南方涛动 El Niño-Southern Oscillation

尤其是 20 世纪 90 年代以来秦岭山地的严重干旱和极端干旱事件异常强烈,且秦岭北坡的干旱程度大于秦岭南坡,这与以往研究的结论一致^[49-50]。有研究认为,这种状况可能是因为秦岭具有强烈的阻隔作用,南方的水汽很难越过秦岭到达秦岭北坡,使得秦岭北坡的气候比较干燥,南坡的气候比较湿润^[37,51];另一方面这种南北空间分异的原因也可能是东亚夏季对流层温度年代转折的原因^[47,52]。1992 年后,中国 35°N 以北年代际变暖,35°N 以南的地区对流层温度年代际变冷。秦岭以北关中地区位于 35°N 过渡区,秦岭以南地区位于 35°N 以南地区。东亚夏季对流层温度年代际的转折,对秦岭以北地区(尤其是关中平原)增温具有放大作用,对秦岭南坡增温具有削弱作用^[53]。这两方面的原因,使得秦岭 SPEI 发生干旱突变后,秦岭北坡的干旱程度大于秦岭南坡。

另外,通过研究发现秦岭山地高海拔地区 SPEI 指数呈现明显的下降趋势,即高海拔地区干旱更加敏感。有研究表明^[54],随着气候变暖,高海拔地区的植被对温度的控制可能正在变缓,但干旱正成为森林生长的一个更重要的限制,特别是对中高海拔森林和易于干旱的林地和灌木林地。秦岭高海拔地区的太白红杉为适应生境变化正向高山灌丛、裸岩分布处迁移,林线附近的幼龄林随处可见;而巴山冷杉却出现大面积退化甚至死亡现象,尤其是在其上限区域更为严重^[55]。这与该地区近些年来的干旱加剧是否有关?也可能是不同植被类型对干旱的敏感不同。

秦岭山地 SPEI 与太阳黑子交叉小波计算得出,太阳黑子相对数在不同的时间尺度上对秦岭山地旱涝变化影响不同,这与赵小娟和延军平^[56]利用月降水量计算的旱涝指数与太阳黑子在 80 年代前呈负相关,80 年代后呈正相关,以及与王鹏涛^[57]统计的 1961—2013 年时间段内,总体在太阳黑子谷值年附近出现涝情频率略高,在太阳黑子峰值年附近出现旱情频率远远高于涝情基本一致。有个别时间段内二者之间的相关性不一致,造成这种差异的原因可能是由于研究范围、选取的资料、数据的处理方法不同有一定关系。ENSO 对我国的降水影响显著。当 El Niño 强时,全年降水偏少,易发生干旱事件^[58-59];而 La Nina 强时,夏秋降水偏多,易发生洪涝事件^[59]。秦岭位于中国东部季风区,是北亚热带和暖温带的分界线,影响其干旱演变的机理和因素均比较复杂,后续研究应该明确更多影响因子,进一步探究多因子对秦岭山地旱涝变化的影响,从而对该地区林业和农业的生产提供建议。

4.2 结论

(1) 1960—2019 年,秦岭山地年 SPEI 指数以 0.124/10a 的速度在下降,1990 年为干旱的突变年。其中,90.23%的面积呈显著下降趋势,1.96%的面积呈显著上升趋势;秦岭南、北坡的年 SPEI 指数倾向率分别为 -0.075/10a 和 -0.128/10a,秦岭北坡的干旱化趋势大于南坡,且高海拔地区的 SPEI 变化趋势更为明显。

(2) 秦岭南坡和北坡地区旱涝发生频率变化总趋势较为一致,表现出旱灾增加而涝灾减少,突变前 30 年

秦岭山地整体湿润比例平均值为 36.94%, 突变后 30 年下降为 18.19%, 而干旱比例平均值由突变前的 17.64% 急剧上升至突变后的 38.19%, 即 1990 年后, 秦岭由湿润转向干旱的趋势明显。突变前 30 年秦岭南北坡极端干旱事件、严重干旱事件极少发生, 发生频率几乎为 0; 突变后 30 年严重干旱和极端干旱事件发生频率增加, 秦岭南北坡极端湿润和严重湿润事件近乎销声匿迹。

(3) 太阳黑子与秦岭山地旱涝变化以显著负相关关系为主; ENSO 事件对秦岭山地的旱涝变化影响较大, 在 La Nina 年易发生洪涝事件, 在 El Niño 年易发生干旱事件, 或者发生在 El Niño 年前后一年; 在不同时域范围内, SSTA 对秦岭山地旱涝变化的影响不同: 1990 年以前, SPEI 与 SSTA 存在显著的负相关关系; 1990 年后, SPEI 与 SSTA 存在 5—6 年的强凝聚性共振周期, 且 SPEI 滞后 SSTA 约 1/4 周期。

参考文献 (References):

- [1] 李英杰. 陕西省旱涝灾害多时空尺度特征与趋势判断[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017.
- [2] 曹永强, 路洁, 李玲慧. 基于 SPEI 指数的辽宁省多尺度旱涝特征分析. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(2): 210-220.
- [3] IPCC. Climate change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [4] Dai A G, Trenberth K E, Qian T T. A global dataset of Palmer drought severity index for 1870—2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(6): 1117-1130.
- [5] 赵林, 武建军, 吕爱锋, 刘晓晨, 刘明. 黄淮海平原及其附近地区干旱时空动态格局分析——基于标准化降雨指数. 资源科学, 2011, 33(3): 468-476.
- [6] 石崇, 刘晓东. 1947—2006 年东半球陆地干旱化特征——基于 SPEI 数据的分析. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1691-1701.
- [7] 白红英, 刘康, 王俊, 李书恒. 气候变化背景下秦岭山地植被响应与适应. 北京: 科学出版社, 2019.
- [8] Zhao T, Bai H Y, Yuan Y, Deng C H, Qi G Z, Zhai D P. Spatio-temporal differentiation of climate warming (1959-2016) in the middle Qinling Mountains of China. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(4): 657-668.
- [9] 周旗, 卞娟娟, 郑景云. 秦岭南北 1951—2009 年的气温与热量资源变化. 地理学报, 2011, 66(9): 1211-1218.
- [10] 张扬, 白红英, 苏凯, 黄晓月, 孟清, 郭少壮. 1960—2013 年秦岭陕西段南北坡极端气温变化空间差异. 地理学报, 2018, 73(7): 1296-1308.
- [11] 孟清, 高翔, 白红英, 张扬, 王辉源. 1960—2015 年秦岭地区极端降水的时空变化特征. 水土保持研究, 2019, 26(6): 171-178, 183-183.
- [12] 齐贵增, 白红英, 孟清, 赵婷, 郭少壮. 1959—2018 年秦岭南北春季气候时空变化特征. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1079-1091.
- [13] 李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展. 生态学报, 2014, 34(5): 1043-1052.
- [14] 高蓓, 姜彤, 苏布达, 朱娴韵, 王艳君. 基于 SPEI 的 1961-2012 年东北地区干旱演变特征分析. 中国农业气象, 2014, 35(6): 656-662.
- [15] Yu M X, Li Q F, Hayes M J, Svoboda M D, Heim R R. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: 1951—2010? International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 545-558.
- [16] Voice M E, Hunt B G. A study of the dynamics of drought initiation using a global general circulation model. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(D6): 9504-9520.
- [17] Wu G X, Liu Y M, Zhang Q, Duan A M, Wang T M, Wan R J, Liu X, Li W P, Wang Z Z, Liang X Y. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian Climate. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(4): 770-789.
- [18] Wu G X, Liu Y M, He B, Bao Q, Duan A M, Jin F F. Thermal controls on the Asian summer monsoon. Scientific Reports, 2012, 2: 404.
- [19] Liu Y M, Hoskins B H, Blackburn M. Impact of Tibetan orography and heating on the summer flow over Asia. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2007, 85B: 1-19.
- [20] 张丽艳. 近 56 年来京津冀地区气象干旱时空变化特征[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018.
- [21] 卢爱刚, 葛剑平, 庞德谦, 何元庆, 庞洪喜. 40 年来中国旱灾对 ENSO 事件的区域差异响应研究. 冰川冻土, 2006, 28(4): 535-542.
- [22] 马露, 杨东, 钱大文. ENSO 事件对山东省区域降水量及干旱指数的影响. 中国农业气象, 2015, 36(6): 666-673.
- [23] 贾艳青, 张勃. 1960—2017 年中国北方气候干湿变化及其与 ENSO 的关系. 地理科学, 2020, 40(12): 2115-2124.
- [24] Shi B L, Zhu X Y, Hu Y C, Yang Y Y. Drought characteristics of Henan province in 1961-2013 based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(3): 311-325.
- [25] 姚蕊, 夏敏, 孙鹏, 温庆志, 刘果锦, 梁媛媛. 淮河流域干旱时空演变特征及成因. 生态学报, 2021, 41(1): 333-347.
- [26] 王佳瑞, 孙从建, 郑振婧, 李晓明. 近 57 年来黄土高原干旱特征及其与大气环流的关系. 生态学报, 2021, 41(13): 5340-5351.
- [27] 张华, 徐存刚, 王浩. 2001—2018 年西北地区植被变化对气象干旱的响应. 地理科学, 2020, 40(6): 1029-1038.
- [28] 曹乐瑶, 周涛, 罗惠, 李铮, 徐培培, 刘霞. 森林覆盖率在森林生长对气候干旱响应上的调节作用. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2019, 55(2): 240-247.
- [29] Jiang P, Ding W G, Yuan Y, Ye W F. Diverse response of vegetation growth to multi-time-scale drought under different soil textures in China's pastoral areas. Journal of Environmental Management, 2020, 274: 110992.
- [30] Qi G Z, Bai H Y, Zhao T, Meng Q, Zhang S H. Sensitivity and areal differentiation of vegetation responses to hydrothermal dynamics on the

- northern and southern slopes of the Qinling Mountains in Shaanxi province. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 31(6): 785-801.
- [31] 陆福志, 鹿化煜. 秦岭一大巴山高分辨率气温和降水格点数据集的建立及其对区域气候的指示. *地理学报*, 2019, 74(5): 875-888.
- [32] 时光训, 丁明军. 近 40 a 来长江流域 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温的时空变化特征. *热带地理*, 2016, 36(4): 682-691.
- [33] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [34] Byakatonda J, Parida B P, Moalafhi D B, Kenabatho, P K. Analysis of long term drought severity characteristics and trends across semiarid Botswana using two drought indices. *Atmospheric Research*, 2018, 213: 492-508.
- [35] Tong S Q, Lai Q, Zhang J Q, Bao Y H, Lusi A, Ma Q Y, Li X Q, Feng Z. Spatiotemporal drought variability on the Mongolian Plateau from 1980-2014 based on the *SPEI*-PM, intensity analysis and Hurst exponent. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 1557-1565.
- [36] Zhang Y J, Yu Z S, Niu H S. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index is highly correlated with total water storage over China under future climate scenarios. *Atmospheric Environment*, 2018, 194: 123-133.
- [37] 李英杰, 延军平, 刘永林. 秦岭南北气候干湿变化与降水非均匀性的关系. *干旱区研究*, 2016, 33(3): 619-627.
- [38] 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. *大气科学*, 2015, 39(1): 23-36.
- [39] 刘志红, McVicar T R, Li L T, Van Nie T G, 杨勤科, 李锐, 穆兴民. 基于 ANUSPLIN 的时间序列气象要素空间插值. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(10): 227-234.
- [40] Hutchinson M F, McKenney D W, Lawrence K, Pedlar J H, Hopkinson R F, Milewska E, Papadopol P. Development and testing of Canada-wide interpolated spatial models of daily minimum-maximum temperature and precipitation for 1961—2003. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(4): 725-741.
- [41] 姜晓剑, 刘小军, 黄芬, 姜海燕, 曹卫星, 朱艳. 逐日气象要素空间插值方法的比较. *应用生态学报*, 2010, 21(3): 624-630.
- [42] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, 11(5/6): 561-566.
- [43] 洪梅, 刘科峰, 张栋, 张韧, 葛晶晶. 基于交叉小波分析方法的西太平洋副热带高压年际变率与热带海温及大气环流异常的相关性研究. *热带气象学报*, 2020, 36(2): 166-179.
- [44] Piao S L, Ciais P, Huang Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [45] Huang J P, Ji M M, Xie Y K, Wang S S, He Y L, Ran J J. Global semi-arid climate change over last 60 years. *Climate Dynamics*, 2016, 46(34): 1131-1150.
- [46] Cook B I, Smerdon J E, Seager R, Coats S. Global warming and 21st century drying. *Climate Dynamics*, 2014, 43(9/10): 2607-2627.
- [47] 白红英, 马新萍, 高翔, 侯钦磊. 基于 DEM 的秦岭山地 1 月气温及 0°C 等温线变化. *地理学报*, 2012, 67(11): 1443-1450.
- [48] 李双双, 芦佳玉, 延军平, 刘宪峰, 孔锋, 王娟. 1970—2015 年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义. *地理学报*, 2018, 73(1): 13-24.
- [49] 宋春英, 延军平, 张立伟. 陕西秦岭南北旱涝灾害时空变化趋势分析. *干旱区研究*, 2011, 28(6): 944-949.
- [50] 胡小晖. 全球变化下秦岭南北气候变化及其环境效应的比较研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2001.
- [51] 周丹, 张勃, 任培贵, 张春玲, 杨尚武, 季定民. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50a 干旱特征分析. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 677-688.
- [52] 张丽霞, 周天军. 20 世纪 90 年代初东亚夏季对流层温差的年代际转折及成因. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(9): 1394-1408.
- [53] 张善红, 白红英, 齐贵增, 梁佳, 赵婷, 孟清. 1960—2019 年秦岭气候带界限的变化研究. *自然资源学报*, 2021, 36(10): 2491-2506.
- [54] Pompa-García M, González-Cázares M, Gazol A, Camarero J J. Run to the hills: Forest growth responsiveness to drought increased at higher elevation during the late 20th century. *Science of the Total Environment*, 2021, 772: 145286.
- [55] 邓晨晖, 白红英, 马新萍, 黄晓月, 赵婷. 2000—2017 年秦岭山地植被物候变化特征及其南北差异. *生态学报*, 2021, 41(3): 1068-1080.
- [56] 赵小娟, 延军平. 不同诱灾因子对秦岭南北旱涝灾害影响. *灾害学*, 2009, 24(3): 57-60.
- [57] 王鹏涛. 秦岭南北旱涝变化特征及趋势判断[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015.
- [58] 高涛涛, 殷淑燕, 王水霞. 基于 *SPEI* 指数的秦岭南北地区干旱时空变化特征. *干旱区地理*, 2018, 41(4): 761-770.
- [59] 李双双, 杨赛霓, 刘宪峰. 1960—2013 年秦岭—淮河南北极端降水时空变化特征及其影响因素. *地理科学进展*, 2015, 34(3): 354-363.