

DOI: 10.5846/stxb202006161564

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.

Wang J R, Sun C J, Zheng Z J, Li X M. Drought characteristics of the Loess Plateau in the past 60 years and its relationship with changes in atmospheric circulation. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5340-5351.

近 57 年来黄土高原干旱特征及其与大气环流的关系

王佳瑞^{1,2}, 孙从建^{1,2,*}, 郑振婧^{1,2}, 李晓明^{1,2}

1 山西师范大学, 地理科学学院, 临汾 041000

2 山西省资源环境与信息化管理院士工作站, 临汾 041000

摘要:通过黄土高原地区 52 个气象站点 1961—2017 年的气象资料,利用不同尺度的标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)和标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)对该区 57 年来干旱的时空变化特征进行了分析,并利用交叉小波变换探讨了干旱指标与大气环流的遥相关分析,得到了以下结论:(1)时间变化上,黄土高原 57 年来不同干旱指标均呈下降趋势,整体逐渐变干旱。但 SPEI6 指标较 SPI6 指标相比,干旱年份更多,干旱特征更明显,说明 SPEI 的计算由于考虑了蒸散发输入因此结果偏重。不同指标均显示,1999 年以来,黄土高原地区干旱时有发生,但整体有降低的趋势。(2) SPEI6 和 SPI6 的站次比和干旱强度最高点都出现在 1999 年,但 SPEI6 的站次比和干旱强度的变化幅度更剧烈,且出现全域性干旱的年份(5 年)也多于 SPI6(3 年);SPEI12 相较于 SPI12,站次比和干旱强度较为相似,都在 1966 年达到顶峰,虽然出现全域性干旱的年份 SPEI12(9 年)多于 SPI12(3 年),但 SPI12 的干旱强度更高。(3)平原区的汾渭平原是轻旱多发区,河套平原、宁夏平原易发生中旱,同时宁夏平原还是重旱多发区。丘陵区西部的中宁、同心两地易发生重旱,乌审旗出现特旱。山地区干旱频率普遍较高,尤其是西部山地区的乌鞘岭重旱、特旱频发。(4)SPEI 指数对环流指数的变化更敏感。AMO 对区域各干旱指标的影响较小,ENSO、WPI 对 SPI6、SPEI6 有显著的响应;而 PNA 对 6 个月尺度的干旱指标(SPI6、SPEI6)影响较小,对 12 个月尺度的干旱指标(SPI12、SPEI12)影响较大。区域干旱是一个复杂的自然现象,为了进一步探索不同干旱指标在不同区域的运用,必要时可采用多种指标,从不同角度比较多种干旱指标的相似性,从而避免单一指标对结果的局限性。

关键词:黄土高原;标准化降水指数;标准化降水蒸散指数;交叉小波变换(XWT);遥相关

Drought characteristics of the Loess Plateau in the past 60 years and its relationship with changes in atmospheric circulation

WANG Jiarui^{1,2}, SUN Congjian^{1,2,*}, ZHENG Zhenjing^{1,2}, LI Xiaoming^{1,2}

1 School of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, China

2 Shanxi Provincial Resources Environment and Information Management Academician Workstation, Linfen 041000, China

Abstract: Based on the long time series (during the period of 1961—2017) of meteorological data from 52 meteorological stations of the Loess Plateau, the spatiotemporal characteristics of regional drought were analyzed by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration indices (SPEI) with 2 time scales. The results showed that (1) during past 57 a, the drought of the study area has presented a significant decrease trend, which indicated the study area being more and more drier. Comparing the result of SPI6 and SPEI6, the SPEI6 index has more drought years than the SPI6 index. This difference is caused by taking the input of evapotranspiration as a variable in SPEI calculation. Despite the characteristics of drought occurred frequently in the Loess Plateau since 1999, the overall trend of

基金项目:山西省留学归国基金项目(2020-092);山西师范大学研究生双语课程建设计划项目(YJSSY201904);山西省应用基础研究计划项目(201901D211388)

收稿日期:2020-06-16; 网络出版日期:2021-04-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suncongjian@sina.com

drought is still decreasing. (2) The station ratio and drought intensity of SPEI6 and SPI6 both appeared in 1999, but the variation of the station ratio and drought intensity of SPEI6 was more dramatic comparing to SPI6, and there were more years (5 years) of global drought than SPI6 (3 years). Comparing to SPI12, the station number ratio and drought intensity of SPEI12 are more strongly correlated, and both reached their peak in 1966. Although SPEI12 (9 years) has more years of global drought than SPI12 (3 years), the drought intensity of SPI12 higher. (3) In the plain area, the Fenwei Plain is a light drought-prone area, the Hetao Plain and the Ningxia Plain are prone to moderate drought, while the Ningxia Plain is a drought-prone area. Zhongning and Tongxin in the west of the hilly area are prone to severe droughts. There is an extreme drought in Wushen Banner. The frequency of drought is generally higher in mountainous areas, especially in the western mountain area of Wushaoling. (4) The SPEI index is more sensitive to changes in the circulation index and Atlantic multidecadal oscillation (AMO) is more sensitive to regional droughts. The impact of the indicators is small. El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and Western Pacific Index (WPI) have direct responses to SPI6 and SPEI6; while Pacific North America Index (PNA) has a small impact on the 6-month-scale drought indicators (SPI6, SPEI6), and has a greater impact on the 12-month-scale drought indicators (SPI12, SPEI12). Regional drought is a complex natural phenomenon. In order to further explore the application of different drought indicators in different regions, the multiple indicators can be used when necessary, and the similarity of multiple drought indicators can be compared from different angles, so as to avoid the limitation of a single indicator to the results.

Key Words: the Loess Plateau; SPI; SPEI; XWT; remote correlation

干旱是一种水量长期相对亏缺的自然现象^[1],现已成为全世界共同面对并急需解决的难题。干旱有着发生面积广、持续时间长、影响范围大的特点^[2],会导致区域水资源短缺,水资源供需矛盾加剧,生物多样性锐减,农作物减产等严重后果,是影响区域经济社会可持续发展及人民生活水平的重要桎梏。因此,认识并分析区域干旱时空分布特征对保障国家的粮食生产安全及农业的可持续发展有重要的现实意义^[3]。

目前,常用的干旱指标的计算方法有帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)^[4]、标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)^[5]和标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)^[6]等。其中,PDSI由Palmer在1965年提出^[7],是一种基于地表水平衡原理的干旱指标,但其计算过程较为复杂,在干旱定义上具有较强的主观性,不宜大范围使用^[8];标准化降水指数(SPI)由McKee在1993年提出^[9],该方法简单易行且可以多尺度呈现,只需运用降水数据进行计算,但在全球气候变暖的大环境下,气温同样成为干旱指标的重要依据,基于此Vicente-Serranotal等人在2010年提出了标准化降水蒸散指数(SPEI)^[10],其以SPI为基础,综合了SPI和PDSI的优点,具有较好的应用前景^[11]。应用不同的干旱指数,研究者在欧洲、亚洲、美洲等地开展了众多关于区域干旱的评估,同时近年来一些学者对黄河流域的干旱时空特征及其影响因素做了部分研究;王飞等^[12]运用SPEI指数发现黄河流域近年来干旱呈增加趋势;孙艺杰等^[13]发现1960—2016年黄土高原的干旱与SPEI指数呈整体下降趋势,且利用主成分分析法得出印度洋偶极子指数(Indian Ocean Dipole Index, IOD)对黄土高原干旱解释率较高;裴文涛等^[14]发现厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)的强弱对河西地区的干旱事件有一定影响。同时相关研究表明,大尺度环流对气候也有一定的影响;赵盼盼等^[15]研究发现ENSO对渭河利于气象具有显著影响;马京津等^[16]发现东亚夏季风的南风北界的年际变化对华北地区水汽输送有重要影响;赵思文等^[17]发现太平洋年代际振荡指数(Pacific Interdecadal Oscillation Index, PDO)和ENSO对我国华北地区夏季降雨存在关联;赵树云等^[18]发现华北雨季降雨的多少与厄尔尼诺现象和拉尼娜现象的变换有关。现有的研究主要聚焦于个别典型区域的干旱评价,涉及整个黄土高原的相关研究使用的方法也仅仅局限于单一指标,缺少针对不同地形区的多指标评价,需要加强不同干旱指数的适用性和对比研究。在全球气候变化背景下,区域干旱特征与大气环流间的关系目前尚不清楚。

黄土高原的地理位置十分重要,地处我国季风与非季风的交汇处,属干旱与半干旱地区^[19],降水变率大且降水多集中在夏秋两季^[20]。由于自然因素和人为因素^[21-22]的共同作用,导致该区域干旱频发,区域社会经济可持续发展受到严重威胁。因此研究黄土高原干旱时空分布特征及其与大尺度环流间的相互关系已成为决策者迫切关注的焦点,这对农业生产的指导、农业方针的制定以及灾害风险评估都具有重要意义。

1 研究区概况

黄土高原(图1)地处中国中部偏北,主要包括日月山以东,太行山以西,秦岭以北,长城以南的地区^[23],横跨山西、陕西、甘肃、青海、内蒙古、宁夏及河南等7个省及自治区。黄土高原主要有河套平原、汾渭平原、宁夏平原、太行山地、吕梁山地、中部丘陵沟壑区、西部山地区组成,地处我国第二级阶梯上^[24]。研究区属于大陆性季风气候,半湿润半干旱区,降雨主要集中在夏秋两季,降水变率大,植被主要以温带落叶阔叶为主,该区同时也是世界上最大的黄土堆积区,水土流失严重,加上人类不合理的乱砍乱伐,使得黄土高原成为生态环境最为脆弱的区域,是全国水土保持综合治理的重点区域^[25]。该地区自然灾害频发,尤其以干旱和洪涝最为突出。

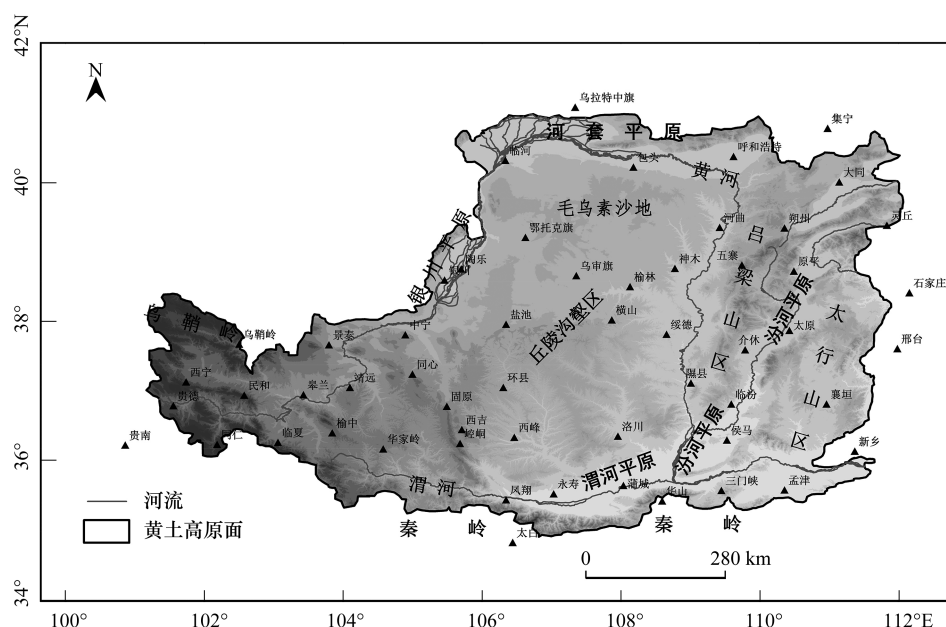


图1 黄土高原范围及不同地形区的划分图

Fig.1 Range of the Loess Plateau and division of different terrain areas

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文所使用的气象数据下载自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括1961—2017年研究区及临近的52个站点(图1)的逐日降水量、平均风速、平均气温、日最高气温、日最低气温、日照时数、相对湿度、年内日序数等。计算得到该区域57年的SPI6、SPEI6、SPI12和SPEI12的值,并整理出不同地形区不同干旱指标的值。气象环流因子数据:西太平洋指数(WPI)、太平洋北美指数(PNA)、北大西洋涛动(NAO)、厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)、北极涛动(AO)、大西洋年代际振荡(AMO)下载于美国国家海洋和大气管理局NOAA气象预报中心。

2.2 研究方法

2.2.1 标准化降水指数计算方法

标准化降水指数 SPI 是美国科学家 McKee 在 1993 年开发的干旱指数^[9],该指数采用分布概率来描述降水量变化,然后再对偏态概率分布的降水量进行正态标准化处理,求得 SPI 值^[26-27]。

2.2.2 标准化降水蒸散指数

由 Vicente-Serranotal 等人在 2010 年提出的标准化降水蒸散指数 SPEI 是一个同时考虑了降水和蒸散的干旱指数^[10]。蒸散量采用 Penman-Monteith 模型计算,通过计算逐月降水量与潜在蒸散的差值,建立不同时间尺度的水分盈亏累积序列,由于存在正负数值,采用三个的参数 log-logistic 概率分布函数对累计概率密度进行标准化处理,得到相应的多尺度 SPEI 指数,具体计算过程参见文献^[28]。本文将 SPI 和 SPEI 按照表 1 进行了等级划分。

表 1 SPI/SPEI 干旱等级划分
Table 1 SPI/SPEI drought classification

等级 Grade	干旱类型 Type of drought	SPI ⁽¹⁾ / SPEI ⁽²⁾	等级 Grade	干旱类型 Type of drought	SPI ⁽¹⁾ / SPEI ⁽²⁾
1	轻旱	-1<SPI/SPEI≤-0.5	3	重旱	-2<SPI/SPEI≤-1.5
2	中旱	-1.5<SPI/SPEI≤-1	4	特旱	SPI/SPEI≤-2

(1) SPI:标准化降水指数 Standardized Precipitation Index; (2)SPEI:标准化降水蒸散指数 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

2.2.3 区域干旱评估指标

从干旱发生频率^[29]、干旱发生站次比^[30]和区域干旱强度^[31]等 3 个方面评价较大范围内的区域干旱变化。

2.2.4 交叉小波变换

本文运用交叉小波变换^[32-33](XWT)来分析不同尺度的干旱指标与大气环流(WPI、PNA、NAO、ENSO、AO、AMO)因子之间的关系。

3 结果分析

3.1 不同指标的干旱时间变化特征

图 2 显示,1961—2017 年四个干旱指标起伏明显,旱涝交替频繁,但整体都呈下降趋势,说明研究区整体呈现变干旱的趋势,以 1999 年为节点划分为两个阶段:1961—1999 年干旱发生较少,2000—2017 年进入全面干旱期,旱涝指数基本上属于低位振荡,但整体上有降低的趋势。

过去 57 年间,基于 SPI6 指标分析显示(图 2),在 1999 年、2000 年和 1997 年研究区呈现干旱,SPI6 指数分别达到-0.67、-0.65、-0.55,但属于轻旱;基于 SPI12 指标分析显示(图 2),在 1966 年(-0.77)、1987 年(-0.64)、2000 年(-0.76)、2001 年(-0.51)和 1992 年(-0.50)发生干旱,均属于轻旱级别。

SPEI 指数的下降速率较 SPI 更为明显,但两种 SPEI 指标都呈现自 1999 年增加的趋势,表明研究区自 1999 年以来,干旱频次有增加的趋势,其中 1999 年是这一时期最为干旱的一年。

SPI 和 SPEI 两种指标的尺度对干旱的反映程度有所不同,时间尺度越大,干旱变化幅度越小,其值变化程度也较小。研究区在 1961—2017 年间,SPEI6 指标下出现干旱的年数为 8 年,而基于 SPI6 指标出现的年份为 4 年,因此 SPEI6 较 SPI6 相比,计算结果偏重,干旱变化趋势更为明显,干旱程度更深,干旱的年份也更多。SPEI12 与 SPI12 也呈现同样的结果,这可能是因为 SPEI 指标考虑了蒸散发因素的关系。而相同时间尺度的干旱指标间具有较为相似的变化趋势。根据《气象灾害大典》的记载^[34],黄土高原在 1972、1974、1977、1978、1980、1986、1997 和 1999 年为干旱较为频繁的年份,本文研究发现基于 SPEI12 指标在 1966、1978、1980、1986、1999、2000、2005、2006 和 2009 年发生干旱,基本符合《气象灾害大典》的实际情况,这说明 SPEI12 比较

适合作为该区域进行干旱研究的指标。

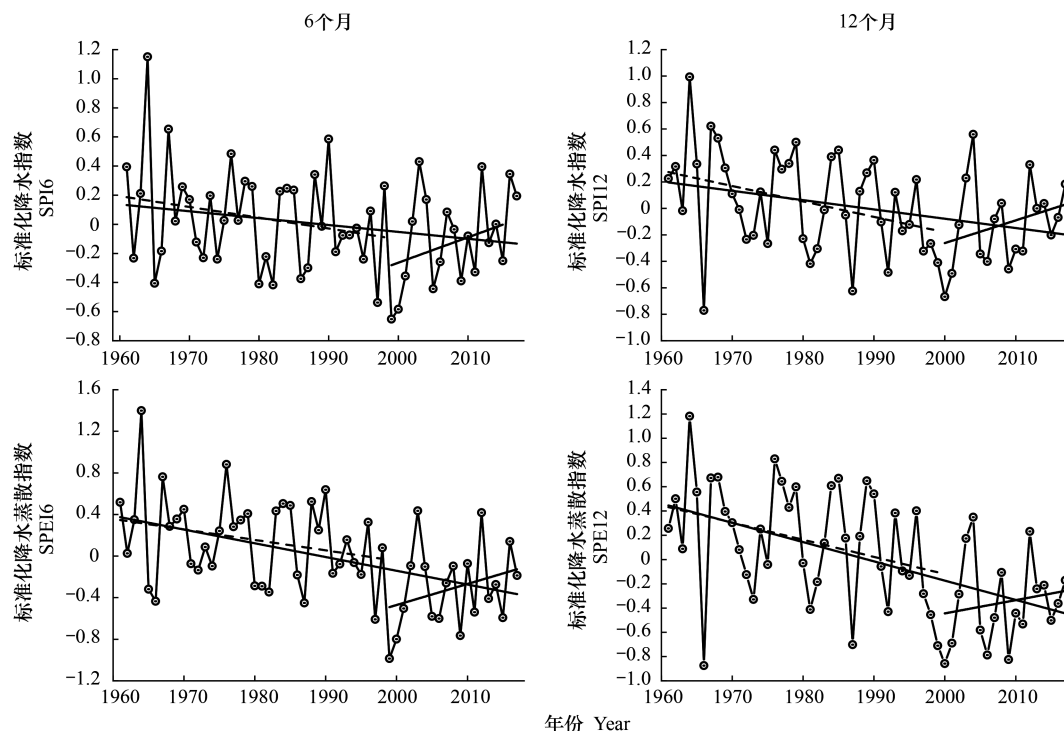


图2 1961—2017年黄土高原SPI6、SPI12、SPEI6、SPEI12变化图

Fig.2 SPI6, SPI12, SPEI6, and SPEI12 changes in the Loess Plateau from 1961 to 2017

SPI: 标准化降水指数 Standardized Precipitation Index; SPEI: 标准化降水蒸散指数 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

3.2 不同指标下的年度干旱特征

从整体来看(图3),研究区不同干旱指标的站次比和干旱强度均呈上升趋势,这说明研究区1961—2017年间发生干旱的覆盖范围和干旱发生的强度都呈增加趋势,且二者呈现出显著的正相关性,不同指标的分析结果显示:

基于SPI6分析显示(图3),该区域只有1999年和2000年发生全域性干旱,分别有59.65%和54.39%的站点出现干旱,有11年出现区域性干旱,有5年出现部分区域性干旱,有15年出现局域性干旱;干旱强度最高值出现在2000年(0.65)和1999年(0.60)最高,均属于轻度干旱,研究区大部分地区干旱强度不明显。基于SPI12分析显示,发生全域性干旱的年份有1966年、1987年和2000年(其中1966年的站次比达到63.16%),有12年出现区域性干旱,有8年出现部分区域性干旱,有15年出现局域性干旱;干旱强度以2000年(1.15)和1982年(1.10)最高,属中度干旱。

基于SPEI6分析显示(图3),有5年出现全域性干旱(1999年最高,为75.44%),有8年出现区域性干旱,有4年出现部分区域性干旱,有12年出现局域性干旱;从干旱强度看,研究区未发生重度、中度干旱,只有部分年份发生轻度干旱(1999年最高,为0.95),大部分年份干旱不明显。基于SPEI12分析显示,有9年出现全域性干旱(1966年最高,为68.42%),有11年发生区域性干旱,有5年发生部分区域性干旱,有11年出现局域性干旱;干旱强度以1966年(0.90)最高,属轻度干旱。

综上,SPEI6较SPI6相比,年际变化趋势、站次比及干旱强度的高值出现年份都极为相似,但SPEI6的站次比和干旱强度的变化幅度更剧烈。基于SPEI6,研究区出现全域性干旱的年份有5年,而基于SPI6指标只有3年,且SPEI6干旱覆盖范围更大,最大站次比为75.44%,而SPI6指标最大站次比只有59.65%。SPI12与SPEI12比较发现,站次比和干旱强度二者变化趋势亦大致相同,都在1966年达到顶峰,但SPEI12的全域性

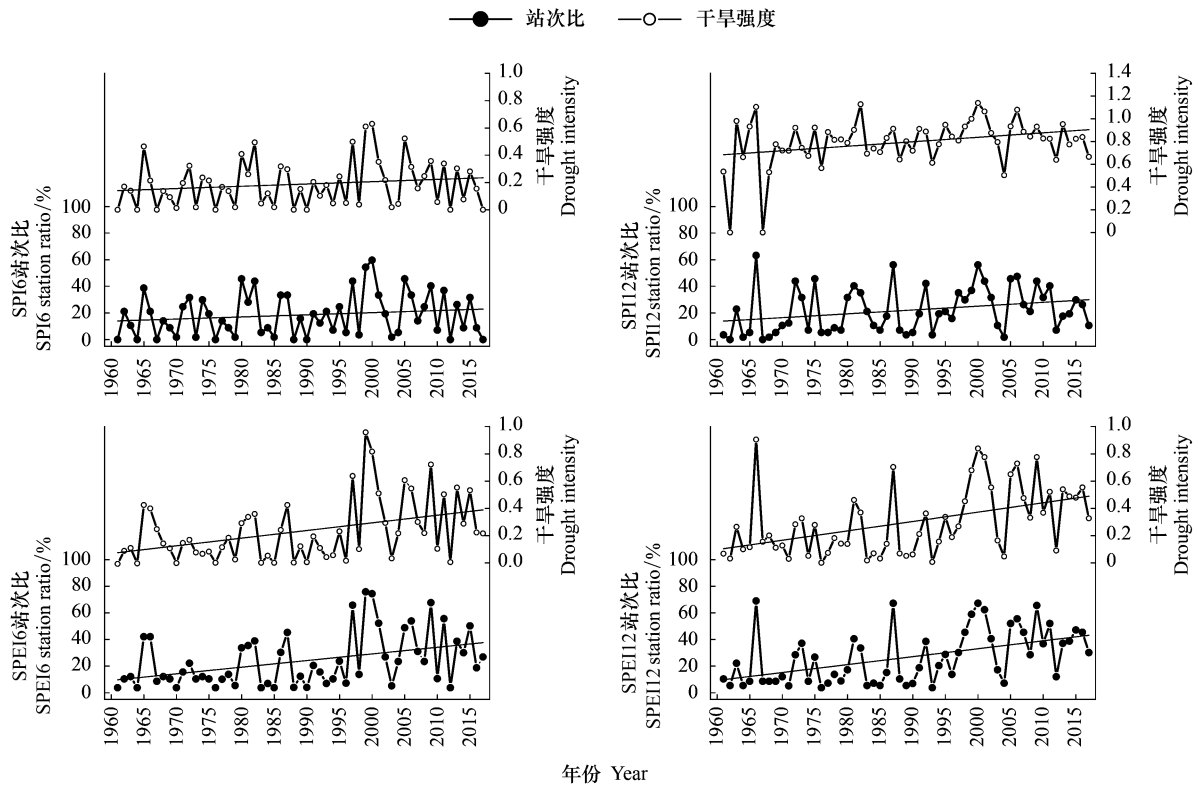


图3 1961—2017 年黄土高原区 SPI6、SPI12、SPEI6、SPEI12 站次比和干旱强度变化

Fig.3 Based on the SPI6, SPI12, SPEI6, and SPEI12 indicators, the change of the percent of drought station and drought strength during 1961—2017 in the Loess Plateau Area

干旱的年份为 9 年, 峰值更高, 为 68.42%, 而基于 SPI12 对应的只有 3 年和 63.16%。但是干旱强度却是 SPI12 更高, 多个年份出现中度干旱, 而基于 SPEI12 指标未出现中度干旱。

3.3 不同地形区域各干旱指标的比较

以往研究表明, 黄土高原内部不同地形区域气候变化差异显著^[32], 通过对于研究区不同地形区多种干旱指标对比分析发现(图 4、图 5), 基于 SPI6 和 SPEI6: 在山地区, 两种指标都呈现黄土高原西部山地区为干旱多发区, 主要以轻旱和中旱为主; 在黄土高原中部的丘陵区, 两种指标所显示的干旱频率也大致相同; 而在平原区, SPI6 和 SPEI6 的结果显示在宁夏平原和汾河平原呈现干旱的态势。基于 SPI12 和 SPEI12, 在整个黄土高原地区干旱发生的区域较为一致, 黄土高原各地形区干旱发生的频率更高, 对干旱的表征也更强烈, 干旱的影响范围也更大。

为了详细分析黄土高原不同地形区的干旱频率, 本文将干旱事件划分为轻旱、中旱、重旱、特旱四个等级^[35](图 4、图 5)。

对比两种指标同时发现: 平原地区的汾渭平原、宁夏平原和河套平原为轻旱频率高发区, 其中以汾渭平原最为突出; 而宁夏平原和河套平原等地为中旱频率的高发区; 重旱的高发区集中于宁夏平原和渭河平原部分地区, 其中宁夏平原发生重旱的频率更高。丘陵地区的轻旱在中部及东西两侧发生频率较高, 中旱在丘陵区的中部、西部是高发区, 重旱主要位于丘陵区西侧的中宁、同心两地, 特旱仅在中部的乌审旗出现。黄土高原西侧的山地区是干旱较为严重的区域, 不同级别干旱事件在该区域均有发生。除西部山区外, 山地地区轻旱主要出现在秦岭北部、吕梁山, 中旱在太行山附近时有发生, 重旱在乌鞘岭地区频发。基于不同指标共同发生干旱的地区, 当地政府要加强农田水利基础设施的维修管理和农村饮水工程建设, 组织好抗旱应急工程和节水改造, 并大力推广耐旱作物种植。

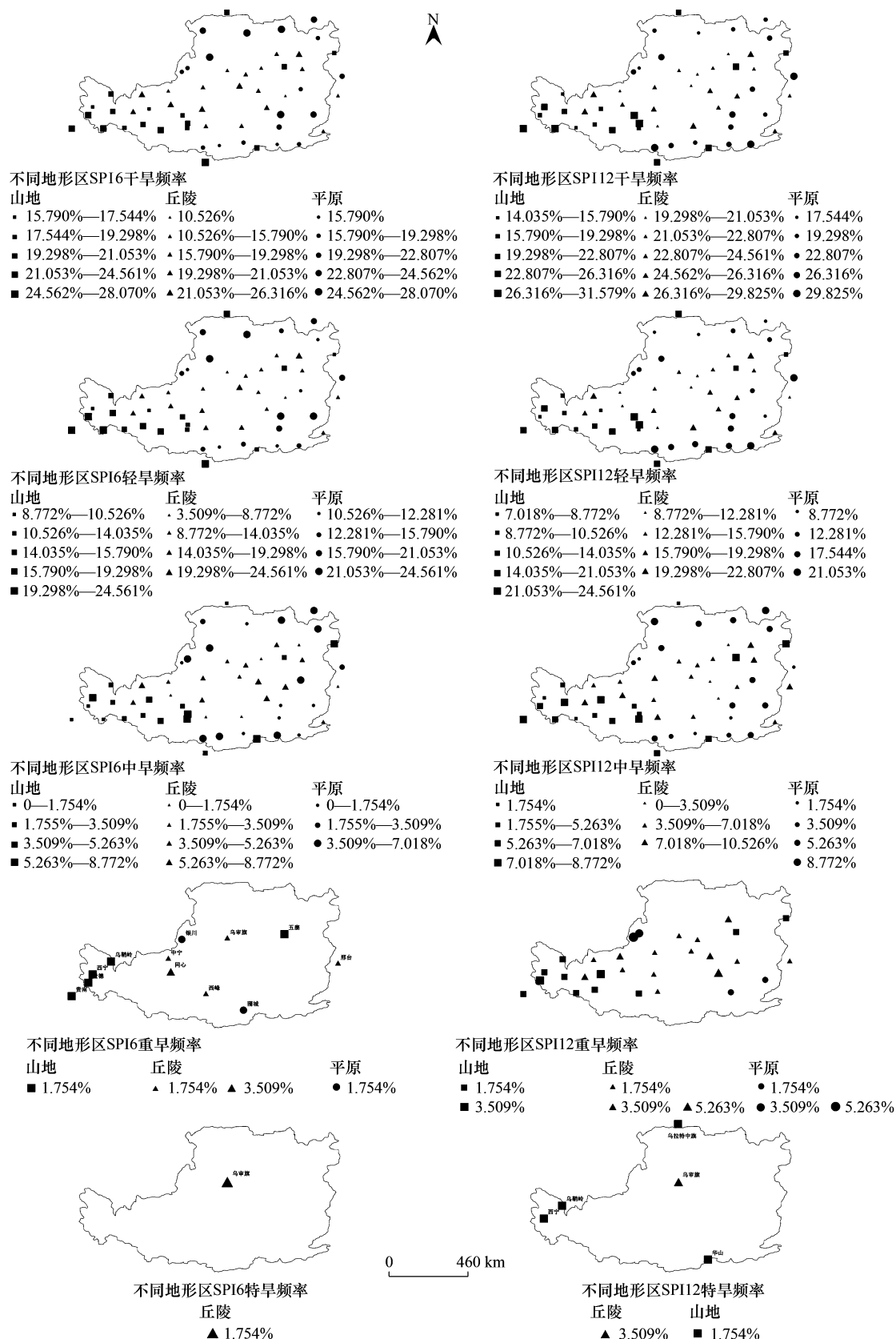


图4 黄土高原基于SPI6、SPI12不同地形区的干旱频率分布图

Fig.4 Distribution of drought frequency in different terrain areas based on SPI6 and SPI12 on the Loess Plateau

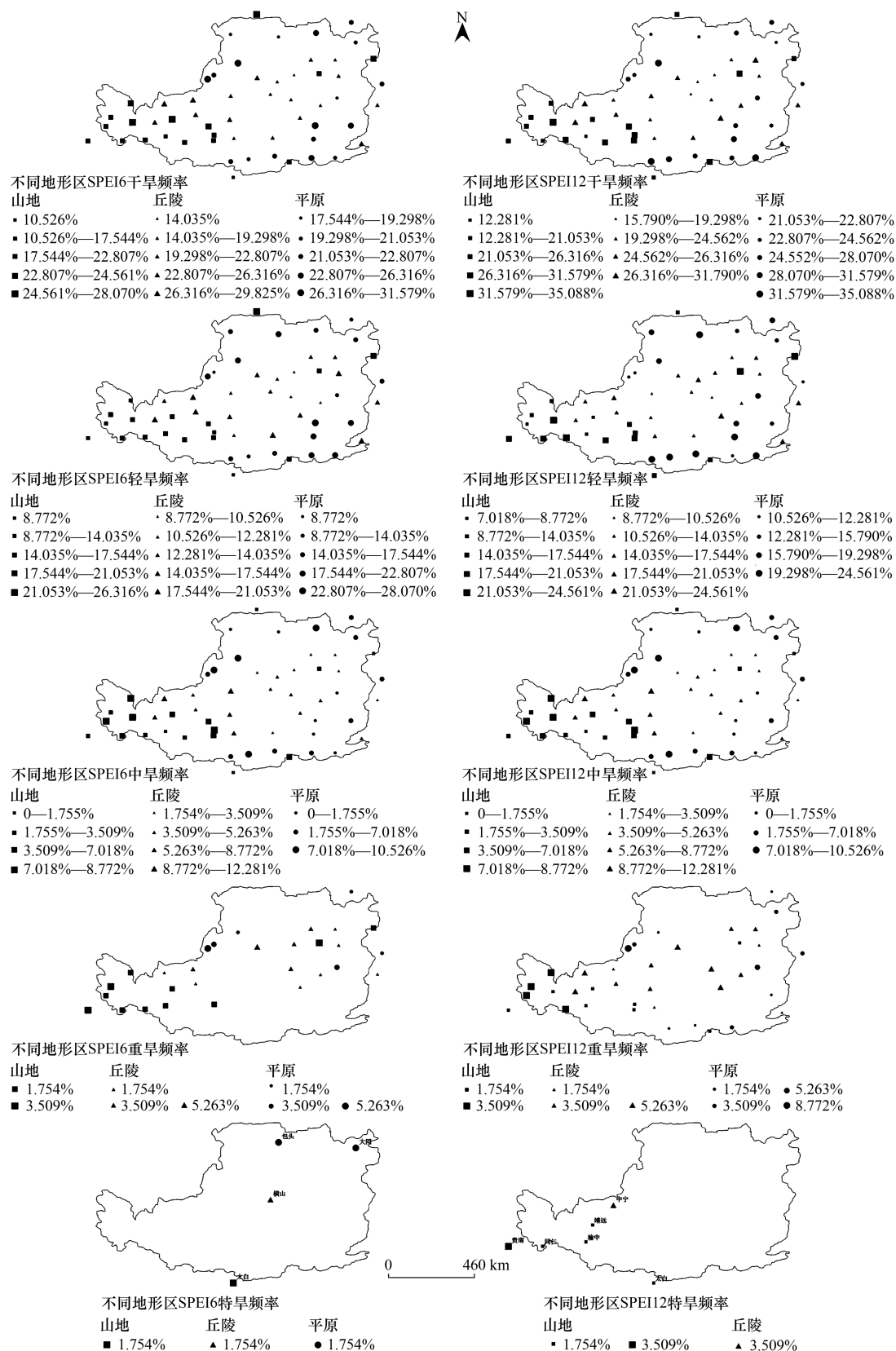


图 5 黄土高原基于 SPEI6、SPEI12 不同地形区的干旱频率分布图

Fig.5 Distribution of drought frequency in different terrain areas based on SPEI6 and SPEI12 on the Loess Plateau

4 讨论与结论

4.1 讨论

为了进一步分析黄土高原地区干旱分布特征与大尺度环流间的关系,本文将不同干旱指标与不同大气环流因子通过交叉小波的方法进行了遥相关分析,结果如图 6 显示:

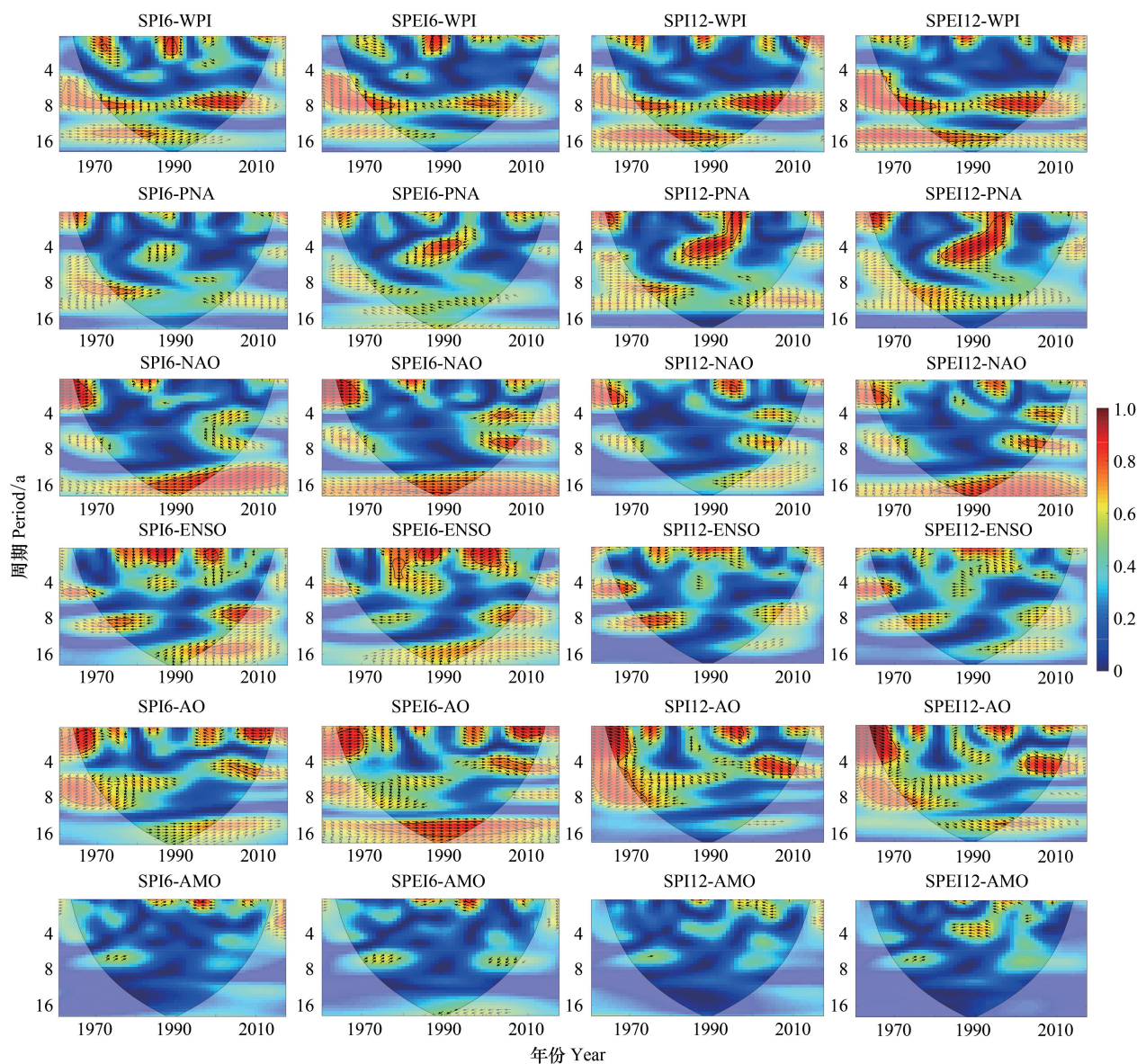


图 6 不同环流因子与不同干旱指标的交叉小波功率谱

Fig.6 Cross wavelet power spectrum of different circulation factors and different drought indicators

WPI:西太平洋指数 PNA:太平洋北美指数 NAO:北大西洋涛动指数 ENSO:厄尔尼诺和南方涛动的合称 AO:北极涛动 AMO:大西洋多年代际振荡 Period:时期

4.1.1 基于 SPI6、SPEI6 与不同环流因子的遥相关关系

分析结果显示;SPI 6 和 SPEI 6 与 WPI 在 1987—1991 年和 1970—1980 年分别表现出周期为 0—2.5 a 的显著共振关系和 7—8 a 的共振关系,二者各自为 0.4—2.3 a 的提前期和 1.5—2.3 a 的滞后期;和 SPI 6 相比,SPEI 6 与 WPI 的相关性更强,在 1995—2002 年二者存在周期为 7—8 a 的显著的负位相共振关系,SPEI 6 滞

后 WPI 约 2.9—3.3 a。SPEI 6 与 PNA 在 1985—1994 年存在周期为 3.5—5.0 a 的负位相共振关系,SPEI 6 提前 PNA 约 2.0—3.3 a;SPI 6 和 SPEI 6 与 NAO 在 1964—1970 年和 1985—2000 年都存在正位相共振关系,此外,SPEI 6 与 NAO 的相关性更强,二者不仅在 2000—2008 年存在负位相共振关系,在 2003—2006 年仍存在周期为 3.0—5.0 a 的显著的正位相共振关系,SPEI 6 滞后 NAO 约 0.4—0.6 a。SPI 6 和 SPEI 6 与 ENSO 关系密切,除在 1984—1989 年间都存在 0—2.0 a 的负共振关系,且都提前 ENSO 约 0—1.3 a 外,两种指标对 ENSO 的响应也各有不同;SPI 6 在 1998—2000 年存在周期为 0—2.0 a 的显著的负位相共振关系,SPI 6 提前 ENSO 约 0—1.3 a,而同一时期 SPEI 6 对 ENSO 的响应不如 SPI 6 强烈,但 SPEI 6 在 1976—1980 年存在显著的共振关系,SPEI 6 提前 ENSO 约 0.8—3.0 a。SPI 6 和 SPEI 6 与 AO 在 1965—1970 年和 2001—2010 年存在正位相共振关系,在 2006—2010 年存在负位相共振关系,但 SPEI 6 对 AO 的响应更为明显,在 1980—2000 年存在正位相的共振关系;SPI 6 和 SPEI 6 与 AMO 存在较弱的相关性。

4.1.2 基于 SPI12、SPEI12 与不同环流因子的遥相关关系

SPI 12 和 SPEI 12 与 WPI 在 1970—1980 年、1995—2008 年和 1980—1992 年分别存在周期为 6.0—8.0 a、7.0—10.0 a 和 14.0—16.0 a 的正、负、正位相的共振关系;SPI 12 和 SPEI 12 与 PNA 的关系较为密切,在 1982—1998 年存在周期为 0.5—6.0 a 的显著的负位相共振关系,二者提前 PNA 约 0.3—3.8 a,此外在 1964—1966 年同样存在相同的共振关系,但 PNA 对 SPI 12 的响应更为明显,在 1974—1980 年二者存在周期为 9.0—11.0 a 的正位相共振关系,SPI 12 滞后 PNA 约 1.0—1.2 a;与 SPEI 12 相比,SPI 12 和 NAO 的相关性较弱,SPI12 在 1995—1996 年存在周期为 1.0—2.0 a 的显著负位相共振关系,SPI 12 滞后 NAO 约 180°,滞后期约为 0.5—1.0 a,SPEI 12 不仅在 2005—2009 年存在周期为 3.0—4.0 a 的显著正位相共振关系,还在 2001—2008 年和 1983—1999 年分别表现出负、正位相共振关系;基于 ENSO 因子,SPI 12 的相关性强于 SPEI 12,二者在 1968—1970 年存在周期为 3.0—4.0 a 的正位相共振关系,SPI 12 和 SPEI 12 均提前 ENSO 约 3.5—4.4 a,此外,SPI 12 与 ENSO 在 1972—1980 年存在相关性,而 SPEI 12 未表现出;SPI 12 和 SPEI 12 与 AO 无显著相关性,但 AO 对 SPI 12 的响应强于 SPEI 12;与半年干旱指标相同,AMO 对 SPI 12 和 SPEI 12 无明显相关性。

综上所述:SPI6 和 SPEI6、SPI12 与 SPEI12 整体上对 WPI、ENSO、PNA 及 NAO 等环流因子具有较高的相关性,但在个别年份 SPI 对大气环流因子的遥相关的强弱略低,如 PNA、NAO 和 ENSO 都很好的印证了这一点。WPI 和 ENSO 对 SPI6 和 SPEI6 的相关性强于 SPI12 和 SPEI12 的相关性;PNA 对 SPI12 和 SPEI12 的相关性反而强于 SPI6 和 SPEI6。

大量研究结果证明,大尺度环流因子的变化对我国北方地区的降水和气温造成一定的影响:当 WPI 处于不显著的时段,我国冬季的气温、降水与 WPI 之间的相关性较弱^[36]。当 PNA 处于负位相,夏季西太平洋副高减弱,导致黄土高原地区水分异常,冷暖空气在上方交汇较少,降水偏少,夏季易旱^[37];1964—1966 年、1988—1995 年 PNA 主要处于负位相^[38],导致研究区夏季降水较少,导致区域干旱,这与本文结果相符。当冬季 NAO 偏强时,北方地区春季降水偏少,区域干旱加剧^[39]。ENSO 的波动已被证明对于黄土高原地区的干旱产生一定的影响^[40],厄尔尼诺现象导致海温异常升高,气象干旱频发;1986—1987 年、1997—1998 年发生厄尔尼诺现象,研究区干旱加剧,这与本文结果相近。当 AO 位于高指数位相时,黄土高原地区夏季风减弱,降水变少,从而加剧了区域干旱^[41]。

4.2 结论

本文通过研究黄土高原不同干旱指标的年际变化和干旱特征,及其与大尺度环流因子的遥相关分析,可以得到以下结论:

(1)时间变化上,在 1961—2017 年间,黄土高原不同干旱指标均呈下降趋势,整体逐渐变干旱。SPEI6 指标下出现干旱的年数为 8 年,SPI6 为 4 年,SPEI6 较 SPI6 相比,计算结果偏重,干旱变化趋势更为明显,干旱程度更深,干旱的年份也更多,SPEI12 与 SPI12 也呈现同样的结果,而四种指标共同显示,2000 年以来,黄土高原地区干旱频发,但整体有降低趋势。

(2) 1961—2017 年, SPEI6 较 SPI6 相比, 站次比和干旱强度最高点都出现在 1999 年, 但 SPEI6 的站次比和干旱强度的变化幅度更剧烈。基于 SPEI6, 研究区出现全域性干旱的年份有 5 年, 而基于 SPI6 指标只有 3 年, 且 SPEI6 干旱覆盖范围更大, 最大站次比为 75.44%, 而 SPI6 指标最大站次比只有 59.65%。SPI12 相较于 SPEI12, 站次比和干旱强度较为相似, 都在 1966 年达到顶峰, 但基于 SPEI12 分析显示, 研究区出现全域性干旱的年份为 9 年, 峰值更高, 为 68.42%, 而基于 SPI12 对应的只有 3 年 (63.16%)。干旱强度却是 SPI12 指标更高, 多个年份出现中度干旱, 而基于 SPEI12 指标未出现中度干旱。

(3) 平原区的汾渭平原是轻旱多发区, 宁夏平原、河套平原易发生中旱, 宁夏平原同时也是重旱多发区。丘陵区西部的中宁、同心两地重旱高发, 特旱频发的地区在丘陵区中部的乌审旗。山地区干旱频率普遍较高, 尤其是西部山地区为主, 此外, 秦岭北部、吕梁山轻旱频发, 太行山中旱频发, 西部山区的乌鞘岭出现重旱、特旱。

(4) SPEI 对环流指数的变化更敏感。AMO 对黄土高原不同地形区不同干旱指标的影响较小, 而 ENSO、WPI 对 SPI6、SPEI6 有显著的响应; PNA 对 6 个月尺度的干旱指标 (SPI6、SPEI6) 影响小, 对 12 个月尺度的干旱指标 (SPI12、SPEI12) 影响大。

总之, 区域干旱是一个复杂的自然现象, SPEI 与 SPI 对黄土高原气象干旱的年际变化、区域干旱站次比和干旱强度存在一定差异, 这可能是因为 SPI 仅仅考虑了降水因素, 而 SPEI 在 SPI 基础上将蒸散发因素加入所导致的差异, 但是两种干旱指标均能大致说明区域气象干旱的时空变化。由于不同的干旱指数需要不同的水热因子和气象因子, 因此需要进一步探索不同干旱指标在不同区域的运用, 必要时可采用多指标, 从而避免单一指标对结果的局限性。

参考文献 (References):

- [1] Wang L N, Zhu Q K, Zhao W J, Zhao X K. The drought trend and its relationship with rainfall intensity in the Loess Plateau of China. *Natural Hazards*, 2015, 77(1): 479-495.
- [2] 张建华, 王志豪, 王玉贵. 基于 SPEI 指数的甘肃河东地区近 56 年干旱时空变化分析. *农村经济与科技*, 2018, 29(13): 41-43.
- [3] 魏堃, 张勃, 吴乾慧, 马尚谦, 马彬, 崔艳强. 基于日尺度 SPEI 的江淮海平原冬小麦生育阶段干旱特征分析. *干旱区地理*, 2019, 42(5): 1085-1093.
- [4] Ficklin D L, Letsinger S L, Gholizadeh H, Maxwell J T. Incorporation of the Penman-Monteith potential evapotranspiration method into a Palmer Drought Severity Index Tool. *Computers & Geosciences*, 2015, 85: 136-141.
- [5] He Y, Ye J Y, Yang X Y. Analysis of the spatio-temporal patterns of dry and wet conditions in the Huai River Basin using the standardized precipitation index. *Atmospheric Research*, 2015, 166: 120-128.
- [6] Stagge J H, Tallaksen L M, Gudmundsson L, Van Loon A F, Stahl K. Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 2015, 35(13): 4027-4040.
- [7] Palmer W C. Meteorological Drought. Weather Bureau Research Paper NO. 45. Washington: U.S. Department of Commerce.
- [8] 姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 岳平, 陆登荣, 肖国举, 王洋, 刘林春. 黄土高原陆地表层最大可能蒸散量的变化特征. *生态环境学报*, 2011, 20(S2): 1189-1195.
- [9] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales//The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology Boston, MA: American Meteorological Society, 1993, 17(22): 179-183.
- [10] 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.
- [11] López-Moreno J I, Vicente-Serrano S M, Zabalza J, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, Azorin-Molina C, Morán-Tejeda E. Hydrological response to climate variability at different time scales: a study in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*, 2013, 477: 175-188.
- [12] Wang F, Wang Z M, Yang H B, Zhao Y. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow River basin based on SPEI. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(8): 1098-1111.
- [13] 孙艺杰, 刘宪锋, 任志远, 李双双. 1960—2016 年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素. *地理研究*, 2019, 38(7): 1820-1832.
- [14] 裴文涛, 陈栋栋, 薛文辉, 张国斌. 近 55 年来河西地区干旱时空演变特征及其与 ENSO 事件的关系. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(1):

250-258.

- [15] 赵盼盼, 吕海深, 王春艳. ENSO 事件对渭河流域气象干旱和水文干旱的影响. 水电能源科学, 2018, 36(8): 9-13.
- [16] 马京津, 于波, 高晓清, 李洁. 大尺度环流变化对华北地区夏季水汽输送的影响. 高原气象, 2008, 27(3): 517-523.
- [17] 赵思文, 李俊乐, 刘多文, 全美兰, 李祥明, 田琳, 马骁颖, 王磊. PDO 和 ENSO 与我国华北地区夏季降水的关系分析. 江西农业学报, 2016, 28(7): 121-125.
- [18] 赵树云, 陈丽娟, 崔童. ENSO 位相转换对华北雨季降水的影响. 大气科学, 2017, 41(4): 857-868.
- [19] 张耀宗, 张勃, 刘艳艳, 张多勇. 1960—2013 年黄土高原地区干湿界线时空变化特征. 中国农业资源与区划, 2019, 40(6): 1-7.
- [20] 肖蓓, 崔步礼, 李东昇, 常学礼. 黄土高原不同气候区降水时空变化特征. 中国水土保持科学, 2017, 15(1): 51-61.
- [21] 张永瑞, 张岳军, 靳泽辉, 康喜. 基于 SPEI 指数的黄土高原夏季干旱时空特征分析. 生态环境学报, 2019, 28(7): 1322-1331.
- [22] 段晨宇. 黄土高原植被对土壤储水量和土壤干层的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [23] 陈昌毓. 古今黄土高原的生态环境变化. 大自然, 2014, (5): 74-75.
- [24] 王平. 基于 CLM 模型的植被变化对黄土高原气温和降水影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [25] 聂斌斌. 水土保持生态修复区域差异研究——以福建和陕西为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [26] 刘小刚, 冷险险, 孙光照, 彭有亮, 黄一峰, 杨启良. 基于 1961—2100 年 SPI 和 SPEI 的云南省干旱特征评估. 农业机械学报, 2018, 49(12): 236-245, 299-299.
- [27] 林慧, 王景才, 黄金柏, 蒋陈娟. 基于 SPI 和 SPEI 的淮河中上游流域气象干旱时空分布特征对比研究. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 59-67.
- [28] 王芝兰, 李耀辉, 王素萍, 冯建英, 王劲松. 1901—2012 年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1666-1673.
- [29] 王盈盈, 王志良, 张泽中, 李艳玲. 基于 SPEI 的贵州省分区干旱时空演变特征. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 119-128.
- [30] 郭伟, 李莹, 杜莉丽. 基于 SPI 的山西省 1972—2012 年春夏干旱特征及对玉米产量的影响分析. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 230-236, 265-265.
- [31] 周扬, 李宁, 吉中会, 顾孝天, 范碧航. 基于 SPI 指数的 1981—2010 年内蒙古地区干旱时空分布特征. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1694-1706.
- [32] Sun C J, Zheng Z J, Chen W, Wang Y Y. Spatial and temporal variations of potential evapotranspiration in the loess plateau of China during 1960-2017. Sustainability, 2020, 12(1): 354.
- [33] 王亚敏, 张勃, 郭玲霞, 戴声佩, 王兴梅. 地磁 Ap 指数与太阳黑子数的交叉小波分析及 R/S 分析. 地理科学, 2011, 31(6): 747-752.
- [34] 温克刚, 丁一汇. 中国气象灾害大典 综合卷. 北京: 气象出版社, 2008.
- [35] 李红梅, 周秉荣, 申红艳, 肖宏斌. 青海高原干旱时空分异特征及发生风险研究. 山地学报, 2019, 37(2): 230-239.
- [36] 李春晖, 管兆勇, 何金海, 梁建茵. 西太平洋海温和南方涛动与中国冬季气候异常关系年代际变化的对比分析. 应用气象学报, 2005, 16(1): 105-113.
- [37] 赵强, 严华生, 张谨文. 影响陕西夏季旱涝的北半球前期大气环流特征. 干旱气象, 2012, 30(4): 546-554.
- [38] 杨丹宁. 太平洋北美型遥相关(PNA)事件的变化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [39] 邵太华, 张耀存. 冬季北大西洋涛动对中国春季降水异常的影响. 高原气象, 2012, 31(5): 1225-1233.
- [40] 孙艺杰, 刘宪锋, 任志远, 李双双. 1960—2016 年黄土高原多尺度干旱特征及影响因素. 地理研究, 2019, 38(07): 1820-1832.
- [41] 据建华, 吕俊梅, 任菊章. 北极涛动年代际变化对华北地区干旱化的影响. 高原气象, 2006, 25(1): 74-81.