

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.011.

刘喆, 孙权, 鲁海涛, 等. 宁夏干旱的时空特征与大气环流响应关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 225-231, 239.

LIU Zhe, SUN Quan, LU Haitao, et al. Temporal and Spatial Characteristics of Droughts and Their responses to Atmospheric Circulation in Ningxia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 225-231, 239.

宁夏干旱的时空特征与大气环流响应关系

刘喆, 孙权, 鲁海涛, 王锐, 蒋鹏

(宁夏大学 农学院, 银川 750021)

摘要: [目的]探究宁夏地区干旱时空变化特征及其原因,对于干旱预防与应对决策具有重要意义。[方法]基于宁夏自治区24个气象站点逐日资料,利用标准化降水蒸散指数(SPEI)。运用MK非参数检验与反距离权重插值分析了不同尺度下的干旱时空变化,通过Person相关系数分析定量分析了宁夏干旱指数对于大气环流的响应,[结果](1)1982—2020年各尺度SPEI干旱指数经历了增大—减小—增大的过程,并在1990—2010年早频发。(2)季尺度干旱指数空间分布差异明显,春季干旱频率较大,主要分布在北部的引黄灌区,且中旱、重旱较多,春季、夏季的干旱呈明显加重趋势,秋、冬季则呈湿润趋势,但秋、冬季干旱烈度相对春、夏季更为强烈。(3)ENSO暖事件期间宁夏SPEI值有减小趋势,ENSO冷事件期间SPEI指数有增加趋势,ENSO暖事件期间相对于ENSO冷事件期间更为干旱。(4)宁夏全境受到NAO与AO指数影响明显,无滞后关系,SOI指数滞后4个月与宁夏SPEI值相关性最大,主要影响宁夏的北部地区,PDO指数滞后6个月相关性最为显著,MEI指数滞与ENSO指数分别滞后3个月与5个月相关性最好,但与宁夏地区干旱相关性较弱。[结论]干旱是宁夏的主要气象灾害,分析宁夏地区的干旱的时空变化与大气环流的响应关系,可为宁夏地区的干旱事件预防和气候变化区域适应对策提供参考。

关键词: 气象干旱; 大气环流; 干旱指数; 时空特征; 宁夏

中图分类号: P461.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0225-07

Temporal and Spatial Characteristics of Droughts and Their Responses to Atmospheric Circulation in Ningxia

LIU Zhe, SUN Quan, LU Haitao, WANG Rui, JIANG Peng

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] Exploring the spatial and temporal characteristics of drought in Ningxia region and its causes is important for drought prevention and response decisions. [Methods] Based on the daily data of 24 meteorological stations in Ningxia Autonomous Region, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) was used. The MK nonparametric test and inverse distance weight interpolation were used to analyze the temporal and spatial variation of drought at different scales, and the response of Ningxia drought index to atmospheric circulation was quantitatively analyzed by Person correlation coefficient analysis. [Results] (1) In 1982—2020, the SPEI drought index of each scale experienced the process of increasing-decreasing-increasing, and drought occurred frequently from 1990 to 2010. (2) The spatial distribution of the drought index on the seasonal scale is obviously different. The drought frequency is higher in spring, mainly distributed in the northern Yellow River irrigation area, and there are more moderate and severe droughts. The drought in spring and summer is obviously aggravating, and in autumn and winter is humid, but the drought intensity in autumn and winter is more intense than that in spring and summer. (3) The SPEI value

收稿日期: 2022-04-24

修回日期: 2022-05-18

资助项目: 国家重点研发计划“贺兰山东麓现代酿酒葡萄生产技术体系研究、集成与示范”(2019YFD1002502)

第一作者: 刘喆(1998—),男(蒙古族),内蒙古赤峰市人,硕士研究生,研究方向为气候变化与极端天气事件。E-mail: lz18395081325@163.com

通信作者: 孙权(1965—),男,内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前旗人,博士,教授,从事农业资源与环境教学与科研。E-mail: sqnxu@sina.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

of Ningxia decreased during the ENSO warm event, and the SPEI index increased during the ENSO cold event. The ENSO warm event was drier than the ENSO cold event. (4) The whole territory of Ningxia is significantly affected by the NAO and AO indices, and there is no lag relationship. The SOI index has the greatest correlation with the SPEI value of Ningxia with a lag of 4 months, which mainly affects the northern area of Ningxia. The PDO index has the most significant correlation with a lag of 6 months. The MEI index had the best correlation with the ENSO index with a lag of 3 months and 5 months respectively, but the correlation with the drought in Ningxia was weaker. [Conclusion] Drought is the main meteorological disaster in Ningxia. The analysis of the response relationship between the temporal and spatial changes of drought in Ningxia and the atmospheric circulation provides a reference for the prevention of drought events in Ningxia and regional adaptation to climate change.

Keywords: meteorological drought; atmospheric circulation; drought index; temporal and spatial characteristics; Ningxia

近 30 年来的气候的剧烈变化,尤其是干旱事件频发,对于农业生产、水文循环具有深远的影响^[1-2]。干旱是全球范围造成农作物损失最大的自然灾害,具有频率高、时间长、不确定性等特点^[3],在各类自然灾害造成的总损失中,气象灾害引起的损失约占 85%,而干旱又占气象灾害损失的 50%左右^[4]。因此研究干旱的发生规律对于农业生产与后续研究具有指导意义。

大气环流是全球范围内大规模的大气运行现象,已有研究表明大气环流对于中国西北地区气温、降水与蒸发都具有一定的影响^[5-8],这种气候现象也被称为遥相关,同时大气环流又具有周期性、持久性、预测性强与对于各地的气候影响有滞后性等特点^[9-10],对于各地的气候预测具有指导性作用,部分学者对于各气象要素对于干旱的贡献率做出了分析^[11],也有学者对于干旱与大气环流的关系进行了探讨^[12],为干旱的深入研究提供了理论基础。

已有研究表明宁夏干旱指数对于大气环流具有一定的响应^[13-15],但有关大气环流指数对于宁夏干旱影响的时滞性与空间差异性还有待完善。本文利用标准化降水蒸散指数(SPEI)分析宁夏 1982—2020 年的干旱不同尺度下的时空分布,同时利用大气环流的关键指数:ENSO(厄尔尼诺—南方涛动)事件表、NAO(北大西洋涛动)、AO(北极震荡)、ENSO 指数采用 NINO1+2 指数、MEI 指数(MEI 指数是将海温、经向风、纬向风、海平面气压、海平面附近温度以及天空云量 6 个参数通过计算得到的参数)^[16]、PDO(太平洋年际震荡)、SOI(南方涛动指数),来分析大气环流对于宁夏干旱影响的时滞性、空性影响,探讨不同因子对于宁夏干旱的遥相关影响,揭示宁夏干旱对与大气环流的耦合关系,对于宁夏的干旱预防预警具有一定程度的指导意义。

1 材料与方法

1.1 数据资料

宁夏位于中国西北部的黄河中上游地区,位于北纬 $35^{\circ}14'—39^{\circ}23'$,东经 $104^{\circ}17'—107^{\circ}39'$,地势南高北低,由北到南分为三大区;北部引黄灌区(石炭井、惠农、石嘴山、平罗、陶乐、贺兰、银川、青铜峡、灵武、吴忠、中宁、中卫)、中部干旱带(盐池、麻黄山、韦州、同心、海原、兴仁堡)、南部山区(西吉、固原、六盘山、隆德、泾源)。宁夏地处黄河水系,属于温带大陆性干旱、半干旱气候。年降雨量偏小,蒸发量大,但由于临近黄河,三面环山,形成山河相拥的环境,素有“塞外江南”的美称。

1.2 研究资料

宁夏气象资料选取中国气象局国家气象中心,为了保障时间段一致,选取 1982—2020 年的逐日气候资料,选用宁夏 24 个气象站点的降雨量、最高气温、最低气温、风速、日照时数、相对湿度数据,ENSO, SOI, PDO, MEI, NAO, AO 指数来自美国国家海洋与大气管理局。宁夏气象站点分布见图 1。

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降雨蒸散指数 本文采用不同时间尺度的 SPEI 进行分析。SPEI-1 揭示了逐月的旱涝程度,对于旱涝程度进行详细解析, SPEI-3 对于旱涝程度的季节性进行解析,按照季节划分为春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月至次年 2 月), SPEI-12 可以揭示干旱的年际变化,相对于 SPEI-1 与 SPEI-3 波动更小,趋势更加明显。利用彭曼公式计算 SPEI^[17]。

1.3.2 干旱特征分析 根据国家气象局制定的《气象干旱等级》^[18],将 SPEI 指数划分为不同的干旱等级,见表 1。

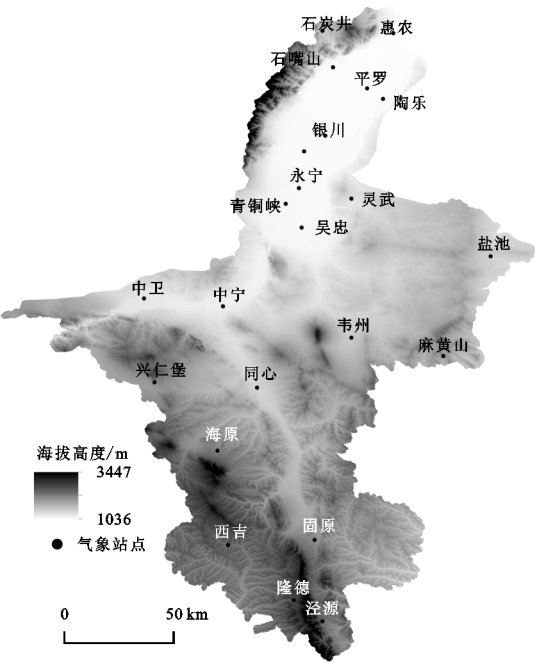


图 1 宁夏自治区气象站点分布

表 1 基于 SPEI 的干旱等级划分标准

干旱等级	特旱	重旱	中旱	轻旱	正常
SPEI	≤ -2.0	$-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1$	$-1 < \text{SPEI} \leq -0.5$	$-0.5 < \text{SPEI} \leq 0.5$

1.3.7 反距离权重插值 反距离权重插值方法 (IDW) 是基于 Tobler 定理得出的一种简单插值方法。本文在分析空间变化时采用了 IDW 插值来得到栅格数据, 公式为:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n z_i / d_i^r}{\sum_{i=1}^n 1 / d_i^r}$$

(3)

式中: Z_0 为 0 点的估计值; Z_i 为控制点 i 的 Z 值; d_i 为控制点 i 与点 0 的距离; n 为控制点的数目; r 为指定的幂数。

2 结果与分析

2.1 气象干旱时空演变特征

2.1.1 时间演变趋势性与突变性 宁夏自治区的 SPEI-1, SPEI-3 与 SPEI-12 值的时间变化规律见图 2。尺度不同的 SPEI 值对于干旱的敏感程度也不相同, 时间尺度越大, 序列的波动越小。UF 值在月、季、年时间尺度上均呈现“升高—降低—升高”的趋势, 结合 SPEI-1, SPEI-3 与 SPEI-12 分析, 在 1990—2010 年干旱频发。月尺度 SPEI 值 MK 检验的突变点发生在 1987 年、1990 年左右, 1985—2007 年 UF 曲线呈现下降趋势, 出现干旱加剧情况。季尺度 MK 检验的突变点发生在 1984 年、1986 年、

1.3.3 干旱频率分析 干旱频率 (F_i) 可以一定程度上反映研究时间段内干旱的发生程度。

$$F_i = \frac{n}{N} \times 100\%$$

(1)

式中: n 为数据序列中发生干旱的次数; N 为数据序列数。

1.3.4 干旱烈度分析

$$S = \frac{d}{D}$$

(2)

式中: d 为数据序列中发生干旱天数的 SPEI 值总和; D 为发生干旱的天数。

1.3.5 Mann-Kendall 趋势检验法 Mann-Kendall 趋势检验法是世界气象组织推荐使用时间序列分析的方法, 本文通过 Matlab 进行 MK 分析, 其中 UF 为正值代表序列为上升趋势, UF 为负值为下降趋势。

1.3.6 Person 相关性分析 利用 Person 相关系数确定大气环流指数对于宁夏干旱指数的滞后关系。

1986—2007 年 UF 曲线呈现下降趋势, 在此区间干旱加剧。年尺度突变点发生在 1987 年、1990 年左右, 在 1985—2007 年 UF 曲线呈现下降趋势, 波动较小, 干旱趋势加剧更加明显, 2007—2020 年 UF 曲线上升, 但依旧为负值, 说明干旱依旧是持续加剧。各尺度 SPEI 值整体呈现“湿润—干旱—湿润”的变化。

2.1.2 年尺度干旱空间演变特征 宁夏自治区年尺度空间干旱特征见图 3 与表 2 所示, 宁夏自治区的干旱频率为 18.45%~42.09%, 其中南部山区的干旱发生频率较大, 干旱频次为 37.89%, 北部部分地区有斑点分布, 宁夏地区干旱发生频率由大到小为轻旱>中旱>重旱, 轻旱主要发生在南部山区, 南部山区轻旱的发生频率为 25.26%, 中旱主要发生在北部引黄灌区与南部黄土丘陵区, 北部引黄灌区与南部黄土丘陵区中旱频率分别为 10.12%, 11.58%, 重旱主要发生在北部引黄灌区与中部干旱区, 北部引黄灌区与中部干旱区重旱频率分别为 4.66%, 4.39%。年尺度干旱趋势在宁夏北部地区与中部干旱区西侧干旱指数 SPEI 减小趋势较大, 减小趋势在 -0.09~0.62/10 a。年尺度的干旱烈度为 -0.04~-0.13/d, 主要分布在中部干旱带与北部引黄灌区, 干旱烈度由强到弱为中部>北部>南部。综上可知, 宁夏北部、中部干旱烈度更为强烈。

2.1.3 季尺度干旱空间演变特征 宁夏自治区季节

性空间干旱特征见图4与表3所示,春季宁夏回族自治区南部的干旱频率较大,为34.73%,但北部引黄灌区重旱发生频率相对于其他地区较高,为8.5%,有23个站点 SPEI 指数有减小趋势,西北部干旱趋势增加显著,干旱烈度在东北部地区增加明显,南部地区干旱烈度相对较轻。夏季中旱频次较高,干旱频率显著在中部干旱带,干旱频次为32.89%,有零星斑块在北部地区,有22个站点 SPEI 指数呈现减小趋势,干旱趋势上以中部地区增加显著,干旱烈度在西南部强烈。秋季在中部地区干旱频率较大,中部干旱带的干旱频次为29.82%,且轻旱频率相对较高,呈现干旱趋势的站点只有5个,分别为中卫、吴忠、银川、灵武与永宁,北部地区南侧干旱趋势增加明显,干旱烈度在南部地区较为强烈,北部地区有零星斑块分布。冬季干旱频率各地区相差不大,呈现干旱趋势站点4个,分别为中卫、同心、银川与吴忠,干旱烈度较强主要分布在中部地区东侧与北部地区北侧。干旱趋势整体来看,各季节干旱趋势增加主要分布在中部西侧与北部南侧,春季与夏季大部分地区趋向于更加干旱发展,秋季与冬季大部分地区趋向于湿润发展。

2.2 大气环流对宁夏干旱的影响

2.2.1 ENSO 事件对于宁夏干旱的影响 通过对宁夏1982—2020年的 ENSO 冷暖事件进行统计(表4),SPEI 值取历时月份的平均值。研究结果发现,SPEI 暖事件时,SPEI 月均值为-0.140,SPEI 冷事件时,SPEI 月均值为0.084,非 ENSO 年的月平均值为0.040,ENSO 冷暖事件的月均值为-0.028,从结论可以看出,ENSO 暖事件时 SPEI 月均值明显小于 SPEI 冷事件的月均值,说明 ENSO 暖事件相对于 ENSO 冷事件时期更为干旱,ENSO 冷暖事件也要大

于 SPEI 非冷暖事件的月均值,说明 ENSO 尼诺现象对于宁夏干旱具有一定的影响。

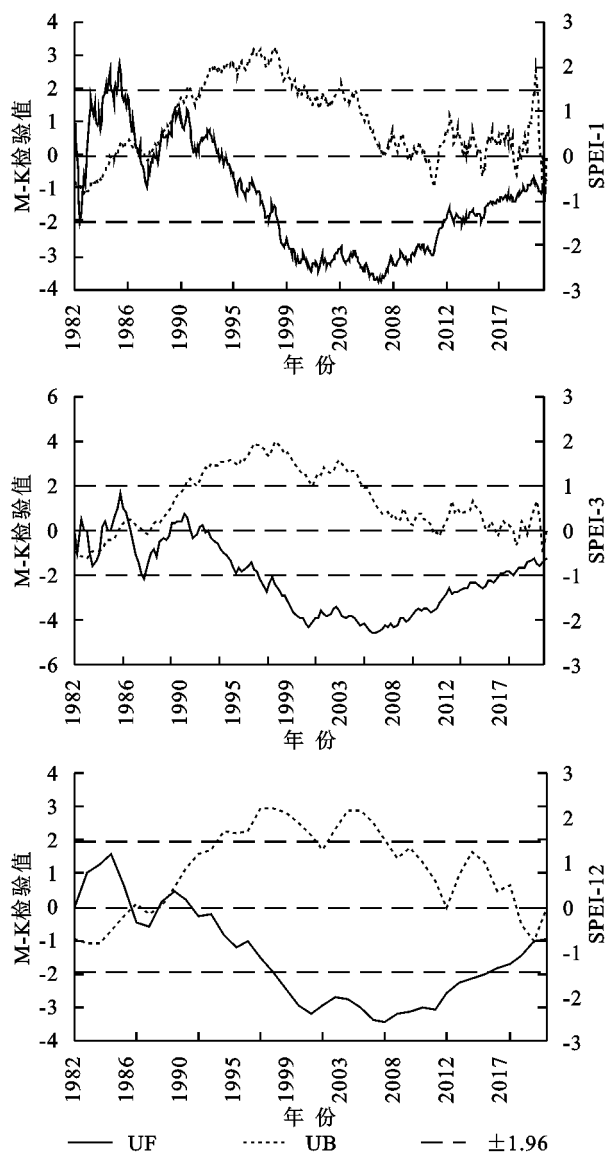


图2 多尺度 SPEI 时序变化特征

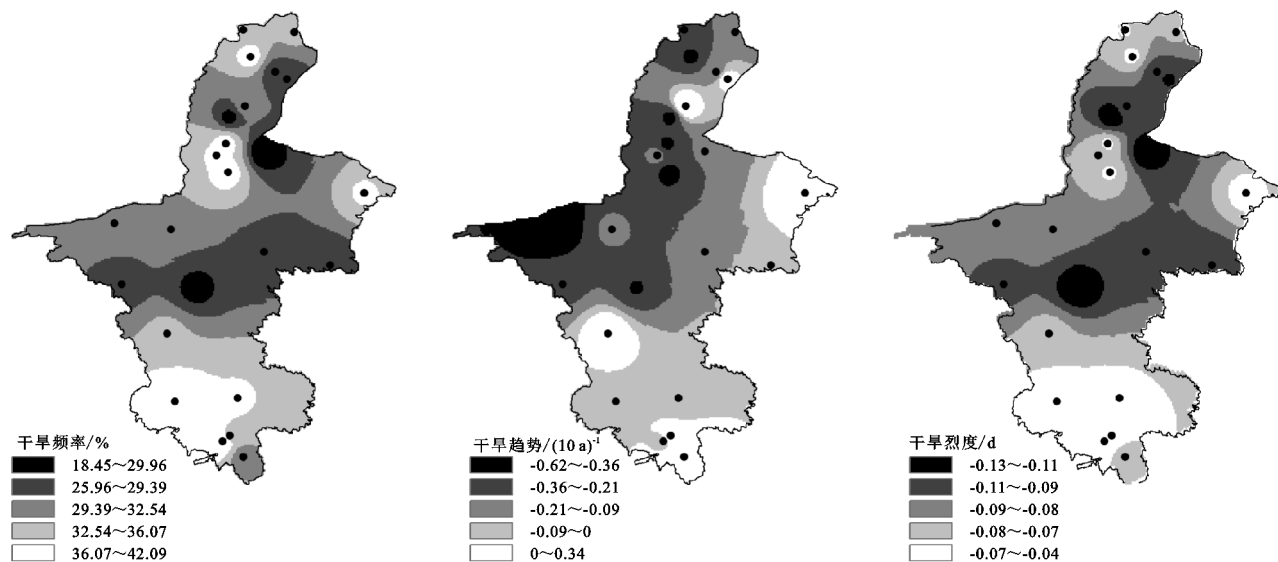


图3 宁夏回族自治区年尺度气象干旱空间特征

表 2 宁夏自治区年尺度不同类型干旱频次 %				
地区	轻旱频次	中旱频次	重旱频次	干旱频次
北部引黄灌区	17.00	10.12	4.66	31.78
中部干旱带	16.67	7.89	4.39	28.95
南部黄土丘陵区	25.26	11.58	1.05	37.89

2.2.2 干旱对环流指数的响应 利用皮尔逊(Pearson)相关统计法分析干旱指数与大气环流的相关关系,通过显著性水平检验确定影响宁夏自治区的干旱因子

(表 5)。NAO 与 AO 与宁夏自治区干旱呈现极为明显的显著正相关,AO 相关显著性略高于 NAO 指数,但却没有显著的滞后性关系,SOI 指数滞后 4 个月与宁夏自治区干旱相关最为强烈,主要影响宁夏的北部地区,与宁夏自治区干旱指数呈现显著负相关,PDO 滞后 6 个月与宁夏的干旱指数 29.16% 站点呈现正相关,在北部、中部、南部地区均有分布,MEI 指数滞后 4 个月与 ENSO 指数滞后 6 个月对于宁夏干旱指数影响最为强烈。

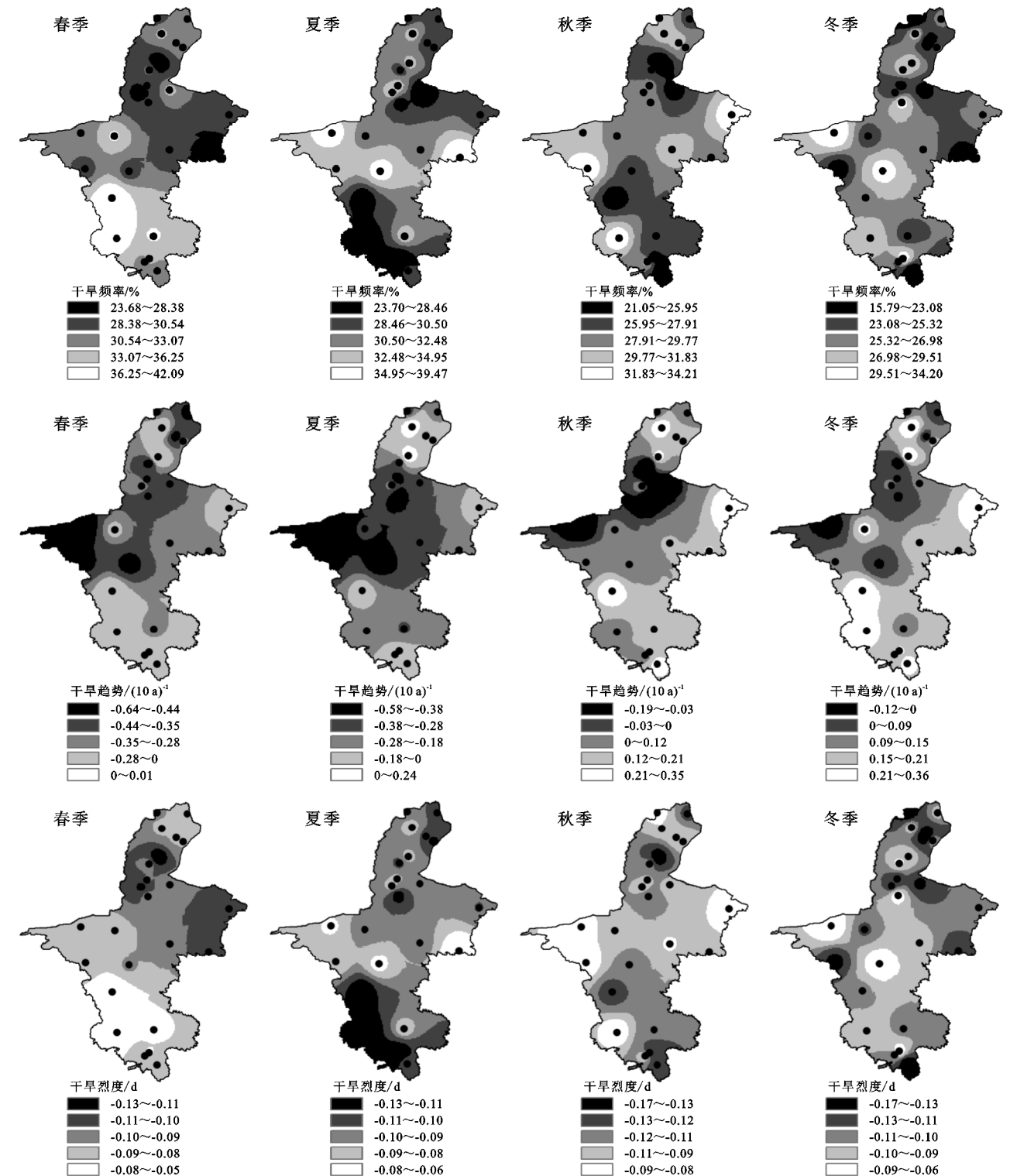


图 4 宁夏自治区季尺度气象干旱空间特征

表3 宁夏自治区季尺度不同类型干旱频次 %

季节	地区	轻旱 频次	中旱 频次	重旱 频次	干旱 频次
春季	北部引黄灌区	13.97	8.30	8.50	30.77
	中部干旱带	15.79	8.33	6.58	30.70
	南部黄土丘陵区	18.95	11.58	4.21	34.74
夏季	北部引黄灌区	12.55	12.35	5.87	30.77
	中部干旱带	12.72	14.04	6.14	32.89
	南部黄土丘陵区	8.42	14.21	5.79	28.42
秋季	北部引黄灌区	12.96	9.51	5.87	28.34
	中部干旱带	13.60	10.09	6.14	29.82
	南部黄土丘陵区	13.16	8.95	5.79	27.89
冬季	北部引黄灌区	16.40	7.29	1.62	25.30
	中部干旱带	18.86	5.26	1.32	25.44
	南部黄土丘陵区	16.84	7.37	1.58	25.79

从相关程度来看,NAO 与 AO 与干旱指数(SPEI)的相关性空间分布为南部>中部>北部。

表4 1982—2020 年 ENSO 冷暖事件及对应宁夏标准化蒸散指数(SPEI)

ENSO	起止时间(年-月)	历时/月	SPEI	ENSO	起止时间(年-月)	历时/月	SPEI
ENSO 暖事件	1982-04—1983-06	15	-0.02	ENSO 冷事件	1984-10—1985-06	9	0.54
	1986-08—1988-02	19	-0.31		1988-05—1989-05	13	0.60
	1991-05—1992-06	14	-0.09		1995-09—1996-03	7	-0.25
	1994-09—1995-03	7	-0.32		1998-07—2000-06	24	-0.64
	1997-04—1998-04	13	-0.38		2000-10—2001-02	5	-0.05
	2002-05—2003-03	11	-0.09		2007-08—2008-05	10	0.30
	2004-07—2005-01	7	0.07		2010-06—2011-05	12	-0.37
	2006-08—2007-01	6	-0.45		2011-08—2012-03	8	0.84
	2009-06—2010-04	11	0.03		2017-10—2018-03	6	-0.21
	2014-10—2016-04	19	0.07				
	2018-09—2019-06	10	0.22				
	2019-11—2020-03	5	-0.41				

本文通过 SPEI 指数描述了宁夏自治区的干旱时空关系,结果表明 1990—2010 年干旱频率较大,这与 IPCC 第五次评估报告 1983—2012 年为过去 1400 年最热的 30 年结论相一致,并通过大气环流指数描述了宁夏地区干旱对于大气环流的响应的滞后关系与空间关系,对于前期宁夏自治区的干旱研究做出了补充与深入探索,但气候的复杂性以及影响因素的多样性还需要得到进一步的探索。

4 结论

干旱是影响宁夏地区的主要气象灾害,本文以 24 个气象站点逐日数据为基础,系统化分析了宁夏干旱的时空变异特征,阐述了大气环流对于宁夏影响的滞后关系,相对于前人研究运用更加全面大气环流指数,细化了宁夏地区对于大气环流响应的空间关系,为宁夏地区的干旱事件预防和气候变化区域适应

宁夏北部 SOI 指数与 SPEI 干旱指数相关性最为显著,ENSO 与宁夏干旱指数相关性为北部>中部>南部,PDO,MEI、与宁夏干旱指数 SPEI 的相关性空间分布无明显差异。

3 讨论

宁夏地处西北内陆,属于温带大陆性干旱、半干旱气候,许多学者对于宁夏自治区干旱发生趋势做出了研究,王洁等^[19]通过计算干旱指数 SPI 揭示了宁夏的干旱时空特征,信忠保等^[20]对于宁夏温度、降水对于 ENSO 事件的滞后性进行了一定的阐述。张耀宗等^[21]对于宁夏干旱对于厄尔尼诺的事件的相关性进行了分析,并得出了宁夏的干旱对于 ENSO 事件的响应。这些研究与本文中的结论基本一致,可能由于选用指标不同而存在个别差异。

对策提供了参考。主要结论如下:

(1) 月尺度突变点出现在 1987 年、1990 年左右,季尺度突变点出现在 1984 年、1986 年,年尺度突变点出现在 1987 年、1990 年左右,1982—2020 年各尺度 SPEI 干旱指数经历了减小—增大—减小的过程,并在 1990—2010 年干旱频发。

(2) 季尺度干旱指数空间分布差异明显,春季干旱频率较大,主要分布在北部的引黄灌区,且中旱、重旱较多,季尺度的干旱趋势增加主要在宁夏北部南侧与中部西侧,春季、夏季的干旱明显加重趋势,秋、冬季有湿润趋势,秋、冬季干旱烈度相对春、夏季更为强烈,秋季主要在北部与南部干旱强烈,冬季则是在中部、北部干旱强烈。

(3) ENSO 暖事件期间宁夏 SPEI 值有减小趋势,ENSO 冷事件期间 SPEI 指数有增加趋势,ENSO 暖事件期间相对于 ENSO 冷事件期间更为干旱。

表 5 宁夏回族自治区干旱与大气环流的滞后关系

分区	站点	NAO (无滞后)	AO (无滞后)	MEI (滞后 3 个月)	PDO (滞后 6 个月)	SOI (滞后 4 个月)	ENSO (滞后 5 个月)
北部引黄灌区	惠农	0.098 *	0.137 **	0.040	0.079	−0.097 *	0.025
	石炭井	0.107 *	0.113 *	0.063	0.108 *	−0.112 *	0.077
	石嘴山	0.097 **	0.136 **	0.004	0.084	−0.050	0.031
	平罗	0.145 **	0.141 **	0.06	0.068	−0.107 *	0.060
	陶乐	0.137 **	0.124 **	0.031	0.081	−0.085	0.058
	贺兰	0.138 **	0.174 **	0.035	0.080	−0.060	0.048
	银川	0.184 **	0.189 **	0.100 *	0.103 *	−0.140 **	0.103 *
	永宁	0.171 **	0.167 **	0.083	0.096 *	−0.123 **	0.081
	灵武	0.168 **	0.18 **	0.045	0.046	−0.069	0.057
	青铜峡	0.165 **	0.184 **	0.079	0.082	−0.126 **	0.043
	吴忠	0.161 **	0.137 **	0.091 *	0.089	−0.123 **	0.084
	中宁	0.143 **	0.153 **	0.035	0.083	−0.062	0.059
	中卫	0.149 **	0.127 **	0.088	0.106 *	−0.117 *	0.114 *
	同心	0.158 **	0.155 **	0.006	0.023	−0.044	0.051
中部干旱带	海原	0.184 **	0.189 **	−0.031	0.015	−0.001	−0.009
	盐池	0.156 **	0.165 **	0.010	0.070	−0.050	0.032
	麻黄山	0.181 **	0.215 **	−0.003	0.099 *	−0.013	0.041
	兴仁堡	0.158 **	0.158 **	0.020	0.076	−0.050	0.040
	韦州	0.173 **	0.197 **	−0.013	0.032	−0.009	0.015
南部黄土丘陵区	西吉	0.17 **	0.228 **	0.041	0.066	−0.059	0.01
	固原	0.176 **	0.206 **	0.063	0.107 *	−0.081	0.046
	六盘山	0.213 **	0.234 **	0.041	0.107 *	−0.036	−0.014
	隆德	0.158 **	0.203 **	0.030	0.075	−0.043	−0.011
	泾源	0.189 **	0.227 **	0.015	0.074	−0.003	0.001

注: * 在 0.05 级别相关性显著, ** 在 0.01 级别相关性显著。

(4) 宁夏回族自治区各地域受到大气环流影响各不相同,宁夏全境受到 NAO 与 AO 指数影响明显,无滞后关系,SOI 指数滞后 4 个月与宁夏 SPEI 值相关性最大,主要影响宁夏的北部地区,PDO 指数滞后 7 个月相关性最为显著,MEI 指数滞与 ENSO 指数分别滞后 3 个月与 5 个月相关性最好,但与宁夏地区干旱相关性较弱。

参考文献:

[1] Wang F Q, Sun M, Zhou Z H. Analysis of spatial-temporal evolution of agricultural drought based on regional agricultural drought index[J]. Desalination and Water Treatment, 2018,112:351-356.

[2] 王映思,肖天贵,董雪峰.1961—2019 年中国西南地区夏季长周期旱涝急转与大气环流特征[J].高原气象,2021,40(4):760-772.

[3] 曹博,张勃,马彬,等.基于 SPEI 指数的长江中下游流域干旱时空特征分析[J].生态学报,2018,38(17):6258-6267.

[4] 吴琼,赵春雨,王大钧,李倩,伍俊艺,林蓉.1951—2014 年辽宁省气象干旱时空特征分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(03):151-157.DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2016.095.

[5] Liu S, Huang S, Huang Q, et al. Identification of the

non-stationarity of extreme precipitation events and correlations with large-scale ocean-atmospheric circulation patterns:a case study in the Wei River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2017,548:184-195.

[6] 张克新,苏志华,刘金林,等.甘肃省降水集中度的变化特征及其与环流指数遥相关分析[J].水土保持研究,2021,28(5):261-267. DOI: 10.13869/j. cnki. rswc, 2021.05.030.

[7] 陈星任,杨岳,何佳男,等.近 60 年中国持续极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J].长江流域资源与环境,2020,29(9):2068-2081.

[8] 李静,何清,姚俊强,等.内蒙古西部地区气候变化特征及影响因子分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(5):186-191. DOI:10.13448/j. cnki. jalre, 2014.05.033.

[9] 范磊,吕爱锋,张文翔.青海省干旱时空特征及与大气环流响应关系[J].干旱区资源与环境,2021,35(12):60-65. DOI:10.13448/j. cnki. jalre, 2021.326.

[10] 魏凤英,黄嘉佑.大气环流降尺度因子在中国东部夏季降水预测中的作用[J].大气科学,2010,34(1):202-212.

[11] 闫昕畅,张强,闫晓敏,等.全球干旱区分布特征及成因机制研究进展[J].地球科学进展,2019,34(8):826-841.

- 对气候变化和人类活动的响应[J].生态学报,2022,42(9):3557-3568.
- [7] 肖建勇,王世杰,白晓永,等.喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素[J].生态学报,2018,38(24):8799-8812.
- [8] Hou W J, Gao J B, Wu S H, et al. Interannual variations in growing-season NDVI and its correlation with climate variables in the southwestern karst region of China[J]. Remote Sensing, 2015,7(9):11105-11124.
- [9] 韦小茶,周秋文,张继,等.1982—2016年广西NDVI时空变化及其影响因素[J].山地学报,2020,38(4):520-531.
- [10] 马士彬,安裕伦,杨广斌.基于GIS的喀斯特区域不同岩性基底植被NDVI变化分析[J].水土保持研究,2017,24(2):202-206,212.
- [11] 刘阳,周忠发,闫利会.2001—2018年贵州省NDVI时空演变及其对气候变化和人类活动的响应[J].水土保持通报,2021,41(1):327-336.
- [12] 刘梁美子,占车生,胡实,等.黔桂喀斯特山区年NDVI变化的影响因素研究[J].地理科学进展,2019,38(11):1783-1792.
- [13] Burn D H, Hag Elnur M A. Detection of hydrologic trends and variability [J]. Journal of Hydrology, 2002,255(1):107-122.
- [14] Abdul Aziz O I, Burn D H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2006,319(1):282-294.
- [15] 覃巧婷,陈建军,杨艳萍,等.黄河源植被时空变化及其对地形和气候的响应[J].中国环境科学,2021,41(8):3832-3841.
- [16] 徐光来,李爱娟,徐晓华,等.中国生态功能保护区归一化植被指数动态及气候因子驱动[J].植物生态学报,2021,45(3):213-223.
- [17] 王芳,汪左,张运.2000—2015年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J].生态学报,2018,38(8):2754-2767.
- [18] 何奕萱,易桂花,张廷斌,等.红河流域“通道—阻隔”作用下2000—2014年植被EVI变化趋势与驱动力[J].生态学报,2018,38(6):2056-2064.
- [19] 杨艳蓉,侯召朕,张增信.2001—2018年西南地区NDVI变化特征及影响因素[J].水土保持通报,2021,41(2):337-344.
- [20] Lü Y, Zhang L, Feng X, et al. Recent ecological transitions in China: Greening, browning and influential factors[J]. Scientific Reports, 2015,5(1):1-8.
- [21] 罗旭玲,王世杰,白晓永,等.西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析[J].生态学报,2021,41(2):680-693.
- [22] 崔立鲁,宋哲,邹正波,等.基于GRACE的2009—2010年西南地区特大干旱分析[J].人民长江,2020,51(7):13-19.
- [23] 张蓓蓓,蔡宏,田鹏举,等.2000—2017年贵州省植被覆盖时空变化特征及其对气候变化的响应[J].地球与环境,2020,48(4):461-470.
- [24] 单洋天.我国西南岩溶石漠化及其地质影响因素分析[J].中国岩溶,2006,25(2):163-167.
- [25] 苏勃,高学杰,效存德. IPCC《全球1.5℃增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读[J].气候变化研究进展,2019,15(4):395-404.
- [26] 管艳霞,龙晓泳,李维杰.重庆喀斯特地区NDVI变化的影响因素[J].西南农业学报,2021,34(1):165-173.

(上接第231页)

- [12] 司瑶冰,高涛,李海英,等.内蒙古春季干旱年和多雨年的大气环流特征对比研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(12):82-87. DOI:10.13448/j. cnki. jalre, 2014.12.014.
- [13] 黄莹,杨建玲,李欣,等.基于地温的宁夏初霜冻日期气候演变及环流异常成因[J].干旱区地理,2022,45(2):359-369.
- [14] 王佳瑞,孙从建,郑振婧,等.近57年来黄土高原干旱特征及其与大气环流的关系[J].生态学报,2021,41(13):5340-5351.
- [15] 郑广芬,陈晓光,赵光平,等.宁夏冬季气温的变化及同期500 hPa环流特征量的变化特征[J].干旱区地理,2006,29(1):59-64.
- [16] 徐泽华,韩美.山东省干旱时空分布特征及其与ENSO的相关性[J].中国生态农业学报,2018,26(8):1236-1248. DOI:10.13930/j. cnki. cjea, 171024.
- [17] 汪琳,舒章康,王国庆,等.汉江流域1961—2018年多尺度气象干旱时空演变特征[J].长江流域资源与环境,2021,30(7):1649-1658.
- [18] 徐一丹,任传友,马熙达,等.基于SPI/SPEI指数的东北地区多时间尺度干旱变化特征对比分析[J].干旱区研究,2017,34(6):1250-1262.
- [19] 王洁,李王成,李晨,等.基于SPI指数的宁夏干旱特征[J].南水北调与水利科技(中文),2021,19(3):528-538. DOI:10.13476/j. cnki. nsbdqk, 2021.0056.
- [20] 信忠保,谢志仁.宁夏气候变化对ENSO事件的响应[J].干旱区地理,2005,28(2):239-243.
- [21] 张耀宗,张勃,刘艳艳,等.1960—2012年宁夏强干旱时空格局及影响因素分析[J].灾害学,2016,31(1):120-127.