

基于 SPEI 的宁夏沿黄城市带干旱特征及驱动性分析

马小燕, 朱晓雯, 赵金涛, 赵娜, 石云

(宁夏大学, 银川 750021)

摘 要:宁夏沿黄城市带气候变化敏感,生态环境脆弱,探究区域干旱驱动机制,对进一步研究黄河流域高质量发展,优化区域农业水资源管理具有重要意义。利用研究区 1995—2015 年的气象资料,采用彭曼蒙特斯模型(P-M 模型)和标准降雨蒸散指数(SPEI)获得区域潜在蒸散发量和干旱指数,通过 Mann-Kendall 突变检测法、滑动 t 检验和 Pettitt 突变检验,分析了研究区干旱时间变化周期,利用冗余分析法定量分析宁夏沿黄城市带干旱驱动因素。结果表明:(1)研究区在季节尺度上,单季旱发生频繁,以春季和秋季发生为主,自北向南整体呈现由高到底的趋势,且主要发生在北部地区,整体以 0.013/10 a 速率呈湿润化趋势;(2)在年尺度上干旱的下降趋势具有全域性,自北向南呈现由高到底的趋势;(3)宁夏沿黄城市带 SPEI-12 值在研究时段呈现逐年下降的趋势,通过 3 种突变检测函数,确定 2008 年出现异常值,这与降水分布一致;(4)各环境因子对 SPEI 指数的解释率均在 75%以上,降水量、温度、地表净辐射是驱动 SPEI 值主要环境因子。其中,降水量对 SPEI 的贡献率最高,呈显著正相关关系。

关键词:宁夏沿黄城市带;标准降雨蒸散指数;突变检验;冗余分析

中图分类号:K928

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0364-10

Analysis of Drought Characteristics and Driving Forces in the Urban Belt Along the Yellow River in Ningxia Based on SPEI

MA Xiaoyan, ZHU Xiaowen, ZHAO Jintao, ZHAO Na, SHI Yun

(Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The urban belt along the Yellow River in Ningxia is sensitive to climate change and its ecological environment is fragile. Exploring the driving mechanism of regional drought is of great significance for further research on the high-quality development of the Yellow River Basin and optimize the management of regional agricultural water resources. Based on the meteorological data of the study area from 1995 to 2015, the Penman Montes model (PM model) and the standard rainfall evapotranspiration index (SPEI) were used to obtain the regional potential evapotranspiration and drought index, the Mann-Kendall mutation detection method, sliding t test and Pettitt mutation test were used to analyze the drought time change cycle in the study area, and the redundancy analysis method was used to quantitatively analyze the driving factors of drought in the urban belt along the Yellow River in Ningxia. The results show that: (1) on the seasonal scale, the single-season drought occurred frequently in the study area, mainly in spring and autumn; the overall trend from north to south was from high to bottom, and it mainly occurred in the northern region, a humidification trend was found with an overall rate of 0.013/decade; (2) the decreasing trend of drought on the annual scale was found in the entire belt, showing a trend from high to bottom from north to south; (3) the SPEI-12 value of the urban belt along the Yellow River in Ningxia showed the downward trend year by year during the study period; it was determined that there was an abnormal value in 2008 through three mutation detection functions, which was consistent with the precipitation distribution; (4) the interpretation rate of each environmental factor for the SPEI index was above 75%, and precipitation, temperature, and

收稿日期:2021-07-15

修回日期:2021-08-18

资助项目:宁夏重点研发项目“宁东基地生态环境监测评估与环境调控关键技术集成与示范”(2019BEG03049)

第一作者:马小燕(1995—),女,回族,宁夏吴忠人,硕士在读,研究方向为空间分析与遥感应用。E-mail:1102703025@qq.com

通信作者:石云(1977—),女,宁夏银川人,理学博士,教授,主要研究方向为空间分析与遥感应用。E-mail:shiysky@163.com

surface net radiation were the driving forces on SPEI value of major environmental factors; precipitation had the highest contribution rate to SPEI, and had a significant positive correlation with SPEI.

Keywords: Ningxia city group along the Yellow River; standard rainfall evapotranspiration index; mutation test; redundancy analysis

干旱作为一种自然现象,是破坏农业、经济和生态的主要因素,具有影响范围广、持续时间长、出现频率高等特点^[1]。水分长期不足是干旱形成和发展的主要原因,多时间尺度变化是其主要特征。根据不同的时间尺度,可将干旱划分为农业干旱、气象干旱、水文干旱等^[2-6]。为方便对干旱程度进行量化,国内外众多学者在气象干旱领域提出了多种干旱指数,如相对湿润指数、帕默尔干旱指数(PDSI)、标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸散指数(SPEI)等^[7-8],其中,帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)对 9~12 个月尺度的干旱响应较好^[9-10],但在干旱持续时间的表征方面不够完备^[11],由 McKee 等^[12]提出的标准化干旱指数(Standardized Precipitation Index, SPI)具有多时间尺度分析能力^[13],模型简单、时空适用性强。但未考虑到温度对干旱程度的影响^[14]。蒸散发量和降水量共同作用影响干旱形成和发展,是干旱气候形成的两个最主要驱动因子^[15-16]。在全球增温的气候背景下^[17],仅分析降水量变化已不足以说明区域干旱程度和范围。由 Vicente-Serrano 等^[15,18]提出的标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI),不仅同时保留了 PDSI 指数与 SPI 指数的优点,在多时间尺度上,同时考虑了潜在蒸散量和降水量两个因素的影响^[13],在全球干旱研究中得到了广泛应用。目前,国内对 SPEI 的应用仅限于部分地区的适用性分析^[19-20],针对多尺度下宁夏沿黄城市带近年来干旱趋势、变化范围和幅度等问题研究较少,分析宁夏沿黄城市带干旱变化对区域农作物种植以及水资源协调以缓解干旱提供理论依据^[21]。

针对不同流域^[22-23]和自然区域^[24-25]干旱驱动因素及时空分布特征,国内外学者展开了大量研究。Wang Fei 等^[26]基于 SPEI 指数分析 1961—2015 年黄河流域干旱特征发现区域干旱趋势明显增加;Xiao 等^[27]发现各气候因子对珠江流域降水天数和降水强度的影响具有季节差异,且彼此之间存在制约和协同关系;李运刚等^[28]对 1961—2012 年红河流域干旱驱动因素及时空分布进行研究,发现 1961—2012 年红河流域干旱程度呈现增强趋势,各季节干旱发生频次空间差异较大。Sergio 等^[29]基于标准化降水指数分

析了 1952—1999 年西班牙东北部半干旱地区冬季干旱的时空变化特征,发现西班牙东北部半干旱地区冬季逐渐由暖湿转换为暖干气象特征;陈亚宁等^[30]基于 PDSI 指数,分析了整个中国西北干旱区空间模态与大气环流因子的相关性,发现研究区极端气候/水文事件呈逐年增加趋势,新疆有变暖趋势,而河西走廊则有变干趋势;李明等^[31]基于 SPEI 指数探讨东北地区干旱的空间变化趋势,并将其划分为 5 个干旱亚区;王允等^[32]基于 SPI 的近 53 a 宁夏干旱时空演变特征进行研究,发现宁夏在年和季节两个尺度表现为由北向南干旱的加重幅度逐渐增大,尤以南部山区对区域干旱变化的响应最为敏感。

宁夏沿黄城市带位于黄河流域中上游,属于干旱半干旱地区,是气候变化的敏感区,生态环境极其脆弱^[33],蒸发量远大于降雨量,水资源时空分布不均,近年来对宁夏干旱特征研究多以宁夏中部干旱带为主,宁夏沿黄城市带干旱特征及驱动性分析较少。鉴于此,本文以干旱的多时间尺度特征为出发点,基于 SPEI 指数探究宁夏沿黄城市带的干旱时空分布特征及影响因素,采用 Mann-Kendall 突变检测法、滑动 t 检验和 Pettitt 突变检验,对干旱指数进行突变检测,利用冗余分析法定量分析宁夏沿黄城市带干旱驱动因素,探究区域干旱程度和影响范围以及干旱形成的原因,为研究区生态环境保护和指导农业生产等方面提供参考,以达到提高水资源利用率、优化水资源配置和合理利用水资源的目的。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

宁夏沿黄城市带(36°54′30″—39°23′23″N, 104°17′7″—106°58′13″E)位于青藏高原、黄土高原和蒙古高原交汇地带,气候类型复杂。以石嘴山市、中卫市以及银川市全市、吴忠市中利通区和青铜峡市为主干,涉及大武口区、平罗县、惠农区、贺兰县、兴庆区、金凤区、西夏区、永宁县、利通区、灵武市、青铜峡市、中宁县、沙坡头区 17 个县(市、区),区域国土面积 5.59 万 km²。黄河干流自宁夏中卫县南长滩翠柳沟流入,至石嘴山市惠农区头道坎麻黄沟流出,黄河流域宁夏段 397 km,面积 5 万 km²,年日照时长达

2 600~3 000 h,温差较大^[34],水量主要来自地表水、大气降水、地下水。地形南高北低,年均降水量介于167.2~618.3 mm,且四季分布不均,多集中在夏季,冬季有少量降雪,年均蒸发量1 312~2 204 mm,蒸发量远大于降雨量,水资源时空分布不均,集中了宁夏90%以上的水资源^[35],人均用水量仅为129 m³,不足全国的1/16。宁夏沿黄城市带是典型的农牧交错带,生态环境脆弱,对水资源的反应十分敏感;流域内设有工业园区,工业用水效率低,重复利用率达到60%,高于全国平均水平,资源性缺水问题较突出,是我国干旱缺水严重地区之一。

1.2 数据来源

采用宁夏沿黄城市带1995—2015年惠农区、吴忠市、银川市、平罗县、中卫市、中宁县6个气象站点和2个辐射站点的逐日数据(中国气象数据网 <http://data.cma.cn>),包括日照时间、相对湿度、平均风速、平均温度以及地表净辐射数据。为保证数据在时间序列上的完整性,采用偏最小二乘回归插值法对研究区气象观测资料中缺测数据进行插补延展^[36],研究区各气象站点信息及分区见图1,文中各参量的空间化方法采用反距离权重法进行插值用反距离权重法进行插值^[37]。

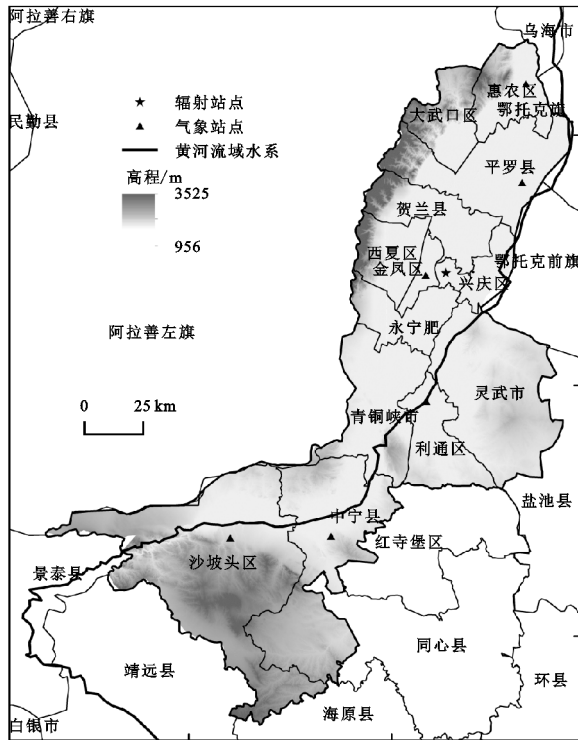


图1 研究区及气象站点分区图

2 研究方法

2.1 潜在蒸散发量

应用 Penman-Monteith 模型(P-M 模型)计算宁

夏沿黄城市带1995—2015年的月ET₀和年ET₀,计算过程如下^[38]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + V \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + V(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中:ET₀表示潜在蒸散量(mm/d);R_n表示地表净辐射[MJ/(m²·d)];G表示土壤热通量[MJ/(m²·d)](在逐日计算公式中,G约等于0);T表示2 m高度处平均气温(°C);U表示2 m高度处风速(m/s);e_s表示饱和水汽压(kPa);e_a表示实际水汽压(kPa);Δ表示饱和水汽压与温度关系曲线斜率(kPa/°C);V表示干湿表常数(kPa/°C)。其中:

$$V = 0.665 \times 10^{-5} P \quad (2)$$

式中:P表示大气压(kPa)。

2.2 SPEI(标准降雨蒸散指数)

Vicente-Serrano等^[15]在SPI指数的基础上,基于降水和潜在蒸散发的差值所表示的水量平衡方程进行计算^[39]:

第一步,计算逐月降水量与潜在蒸散发量的差额:

$$D_m = P_m - ET_0 \quad (3)$$

式中:m为月数;P_m为逐月降水量(mm);ET₀为潜在蒸散发量(mm)。

第二步,根据不同的时间尺度,对D_m进行聚集和归一化:

$$D_{m,n}^i = \begin{cases} \sum_{j=13-i+n}^{12} D_{m-1,j} + \sum_{j=1}^n D_{m,j} & n < i \\ \sum_{j=n-i+1}^n D_{m,j} & n \geq i \end{cases} \quad (4)$$

式中:D_{m,n}ⁱ为m年n个月开始,i个月的降水蒸散发差额的累计值。

第三步,使用log-logistics概率分布函数拟合D_m序列^[40],得到累积概率密度函数F(D):

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{D - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (5)$$

式中:参数α,β,γ分别表示通过线性矩方法估计的尺度、形状和位置参数。

$$\alpha = \frac{(w_1 - 2w_2)\beta}{\Gamma(1+1/\beta)\Gamma(1-1/\beta)} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{(2w_2 - w_1)}{(6w_2 - w_1 - 6w_3)} \quad (7)$$

$$\gamma = w_1 - \alpha \Gamma(1+1/\beta) \Gamma(1-1/\beta) \quad (8)$$

式中:Γ为阶乘函数;w₁,w₂,w₃为原始数据序列D_i的概率加权矩。计算方法如下:

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i$$

$$F_i = \frac{i-0.35}{N}$$

(9)

式中: N 为参与计算的月份数。

第四步,对累积概率密度进行正态标准化:

$$W = \sqrt{-2\ln(Q)}$$

(10)

$$\text{SPEI} = W - \frac{c_1 + c_2 W + c_3 W^2}{1 + t_1 W + t_2 W^2 + t_3 W^3}$$

(11)

式中: $c_1 = 2.515517, c_2 = 0.802853, c_3 = 0.010328, t_1 = 1.432788, t_2 = 0.189269, t_3 = 0.001308^{[41]}$; Q 为大于某个确定的 D_m 值的概率, $Q \leq 0.5$ 时, $Q = 1 - f(D)$; $Q > 0.5$ 时, $Q = 1 - Q$ 。

表 1 干旱等级划分标准

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

3 结果与分析

3.1 SPEI 指数季节变化特征

3.1.1 时间变化特征 宁夏沿黄城市带 SPEI 在 3 个月尺度上发生强烈的正负波动,表明研究区在季节尺度上发生显著的干湿变化。干旱发生的季节性包括单季旱和连季旱两种类型,分析图 2 可以看出:研究区单季旱发生频繁,以春季和秋季发生为主,其中春旱发生的频率为 38.09%,春季轻旱的发生频率为 56%、中旱的发生频率为 5.6%、特大干旱的发生频率为 1.3%;秋旱发生的频率为 50.3%,秋季轻旱的发生频率为 33.33%、特大干旱的发生频率为 4.76%。从 1995—2015 年研究区季节变化特征看,春、秋、冬 3

2.3 干旱等级划分标准

干旱具有多时间尺度特征,不同时间尺度可以反映不同类型的干旱,如 12 个月时间尺度主要突出水文干旱、6 个月时间尺度主要突出农业生态干旱、3 个月时间尺度主要突出气象干旱^[16,42]。因此,本研究选取 1,3,12 个月的时间尺度,来计算每月、每季度以及每年的 SPEI,来分析区域干旱特征。国际上通用的基于 SPEI 指数的干旱等级划分标准见表 1。通过干旱等级划分标准表可以确定区域在不同时间尺度发生干旱变化的程度^[16]。

个季节整体呈上升趋势,春季以 0.91/10 a 速率上升,上升趋势与年际变化趋势较为相似,在 1995—1998 年波动较大,从 2000 年和 2005 年之后表现为明显变旱趋势;秋冬季上升速率分别为 0.45/10 a 和 0.05/10 a,在 1995—2000 年基本呈现先下降后上升趋势,秋季在 2001—2009 年进入全面干旱时期,2008 年以后干旱情况有所好转;冬季 SPEI-3 指数在高、低位之间震荡变化,干旱/半干旱交替分布,2004—2007 年期间以及 2011 年为轻度干旱时期,而在 2008 年之后干旱情况逐渐好转;夏季则呈现缓慢上升趋势,上升速率为 0.01/10 a,夏季干湿波动幅度较小,2008 年和 2009 年基本处于正常状态,2011—2014 年呈轻度湿润状态,之后表现为变旱趋势。

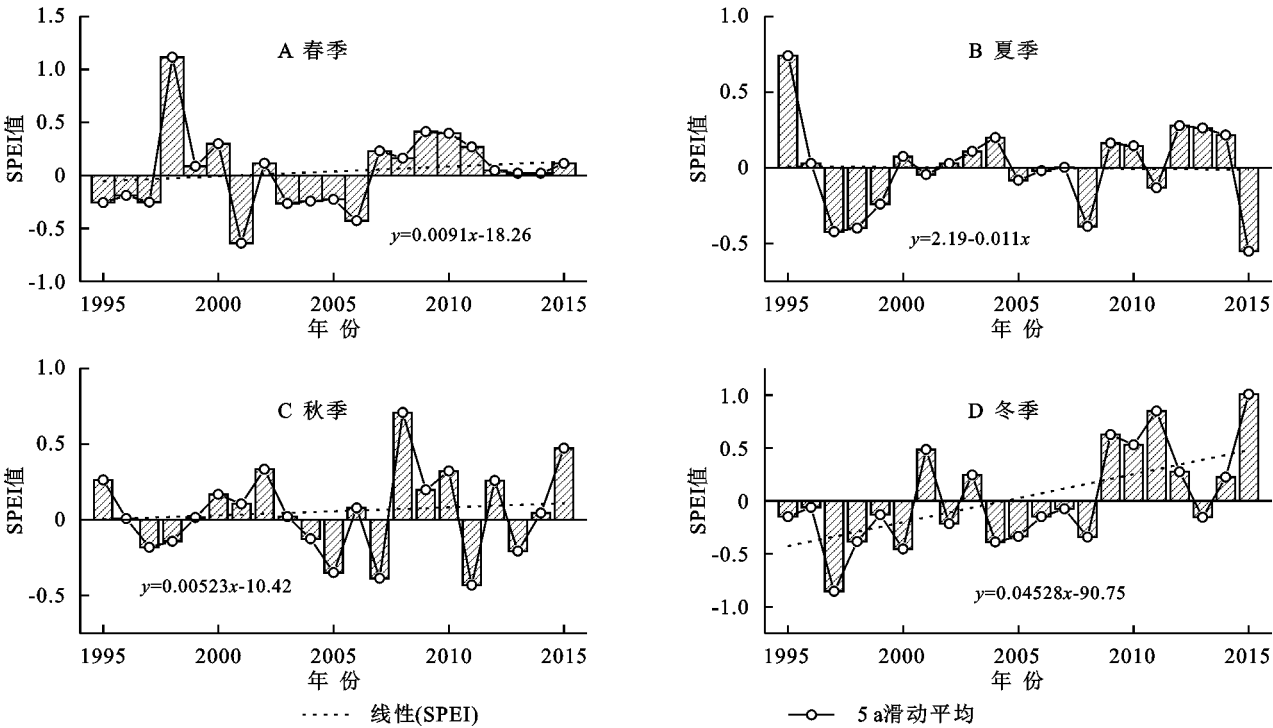


图 2 1995—2015 年宁夏沿黄城市带 SPEI-3 指数季节变化特征

3.1.2 空间趋势变化 研究以 SPEI-3 指数为例对宁夏沿黄城市带不同等级干旱空间分布特征进行分析(图 3),可以看出研究区各季节 SPEI-3 指数空间分布差异明显,自北向南整体呈现由高到低的趋势,其中,平罗县干旱发生频率最高(16.50%),金凤区发生频率最低(2.31%)。春季 SPEI-3 指数由北到南呈现“低—中—高”分布特征,其中沙坡头区、中宁县、青铜峡市西南部 SPEI-3 指数有下降趋势($0.001/10\text{ a}\sim 0.055/10\text{ a}$),下降趋势占 51.62%,平罗以西区域有中度干旱,利通区有逐渐变湿趋势;夏季 SPEI-3 指数的趋势系数介于 $0.006/10\text{ a}\sim 0.746/10\text{ a}$,由北到南呈现“低—高一中—高”分布特征,干旱主要分布在平罗县且有加重趋势,青铜峡市、利通区和灵武市相较于春季有变干的趋势,沙坡头区、中宁县干旱发生趋势

增加($-0.125/10\text{ a}\sim 0.394/10\text{ a}$)。由春季到秋季干旱强度和范围都有所增加,几乎遍布整个研究区,由北到南整体呈现为“低—高一低”的分布特征。中度干旱出现在平罗县西部和利通区中南部,沙坡头区和中宁县有逐渐变干趋势,利通区干旱趋势系数逐渐减小,意味着利通区具有干旱化趋势。冬季,研究区以北干旱加重,与秋季相比,干旱趋势减弱,趋势系数介于 $-0.265/10\text{ a}\sim 0.463/10\text{ a}$,金凤区、西夏区以西、兴庆区以东干旱加剧,平罗县干旱情况有所缓和,利通区有明显变湿趋势,除利通区外,宁夏沿黄城市带在冬季整体呈现为冷干气候,符合当地气候特点。整体来看,宁夏沿黄城市带四季呈现干旱回归正常的气象表现,干旱主要集中在北部地区。

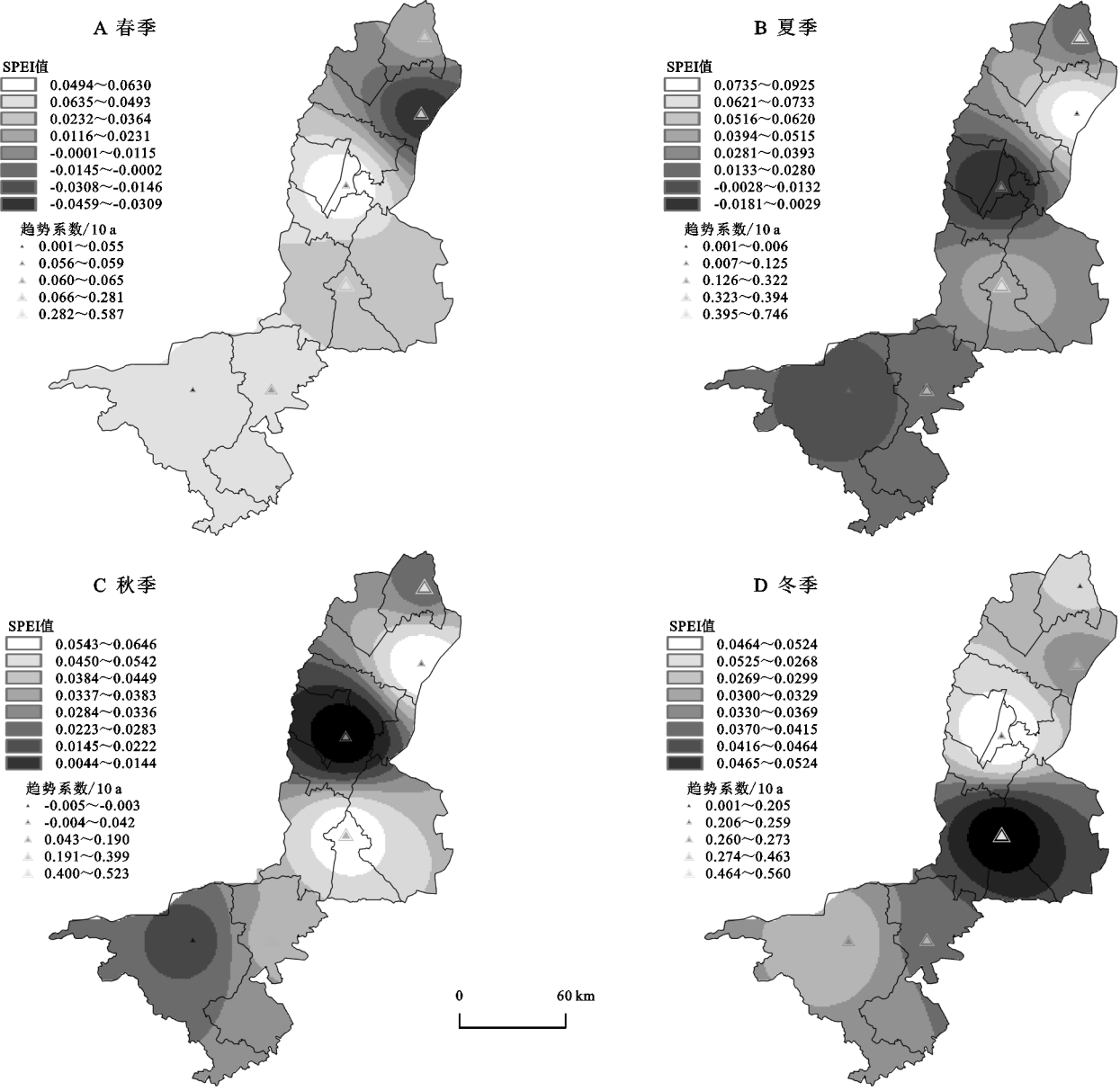


图 3 1995—2015 年宁夏沿黄城市带 SPEI-3 指数季节变化趋势

3.2 SPEI 指数年际变化特征

3.2.1 时间变化特征 宁夏沿黄城市带 1995—2015 年 SPEI-12 指数呈现明显的正负波动(图 4),整体以 0.013/10 a 速率呈上升趋势,变化幅度微弱,表明宁夏沿黄城市带气候有变湿趋势。干旱发生具有随机性和频繁性,在 1996 年、2002 年和 2007 年 SPEI-12 指数出现明显转折,呈现“下降—上升—下降—上升”的趋势。1995—2015 年宁夏沿黄城市带主要干旱时期集中在 1997—2001 年和 2003—2006 年,随着气温增高,降水量随年际变化出现震荡,干旱指数降低,其中 1997 年出现重度干旱,1998 年和 2005 年出现中度干旱,SPEI-12 指数分别达到 -1.19, -0.87 和 -0.79。宁夏沿黄城市带在 1995 年和 2002 年达到了湿润状态,分别为 1.08,0.91;在 2007—2014 年,呈现明显的年代际震荡,波动范围 0.049~0.607。整体来看,21 年来宁夏沿黄城市带呈现由湿润逐渐干旱再至 2006 年之后干旱减轻的趋势,随着温度跃升,潜在蒸散发量加剧,而降水量逐渐降低,导致较明显的暖干化趋势。

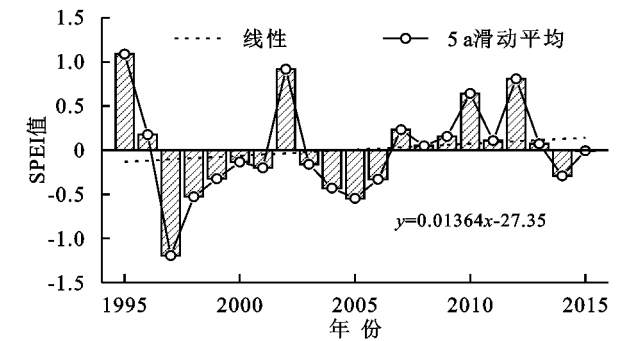


图 4 1995—2015 年宁夏沿黄城市带 SPEI-12 指数
年际变化特征

3.2.2 空间变化特征 从年尺度 SPEI 指数变化趋势的空间分布可知(图 5),宁夏沿黄城市带 SPEI-12 指数的下降趋势具有全域性,自北向南呈现由高到底的趋势(-0.057/10 a~0.348/10 a),下降和上升趋势分别占研究区总面积的 82.3%和 17.7%,即以干旱化趋势为主,不同区域 SPEI-12 指数下降趋势由北到南呈现“高一低—中—低”空间分布特征,具有明显的空间差异,主要干旱地区分布在平罗以西、中宁县及沙坡头区以西部分地区,表现为明显干旱化加重的趋势,这可能与宁夏沿黄城市带温度和降水量两个因素共同作用有关。其中,平罗县与中宁县干旱发生频率最高,分别为 7.25%和 12.36%,且平罗县有干旱化加重的趋势,中宁县则有逐渐变湿的倾向;惠农区较为湿润,SPEI-12 值为 0.47,但有逐渐干旱化的倾向;金凤

区、兴庆区、永宁县以及灵武市东北地区有轻度干旱,SEI-12 值介于 0.041~0.130 之间;利通区气候状况良好且有逐渐转换为暖湿化倾向(0.407/10 a)。整体来看,随着温度增加,降水量大量的减少,宁夏沿黄城市带整体呈现暖干化趋势。

3.3 干旱指数变化趋势

采用 Mann-Kendall 突变检测法、滑动 t 检验和 Pettitt 突变检验,对 SPEI-12 进行突变检测,3 种检测方法交叉检验能够提高突变检测精度。当 1 种结果与另外 2 种结果不一致时,按照少数服从多数原则确定突变时间,当 3 种检验结果均不一致时,取其平均值作为突变时间。

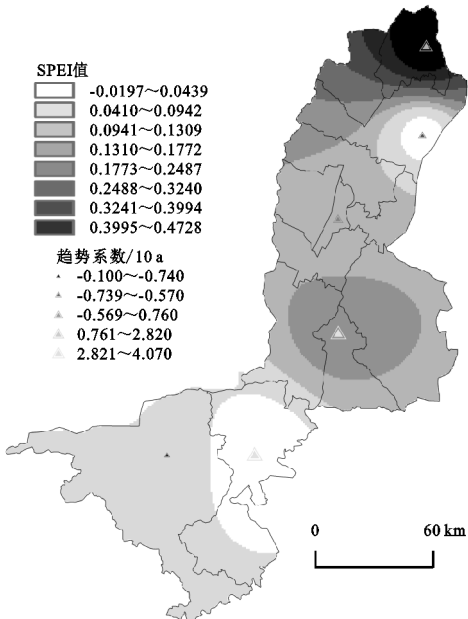


图 5 1995—2015 年宁夏沿黄城市带 SPEI-12 指数
年际变化趋势

结合 3 种突变检测方法,对宁夏沿黄城市带 SPEI-12 指数进行突变检测,1995—2015 年宁夏沿黄城市带年代际 SPEI-12 指数呈现起伏变化。根据 M-K 突变检测结果可以看出研究区在 1995—1997 年和 2002—2006 年下降趋势显著且 UF 为负值,表明该时期为轻度干旱期;2007—2015 年 SPEI-12 指数上升趋势超过了显著性水平 0.05 临界线,在 2015 年以后明显超过 0.01 显著性水平,说明宁夏沿黄城市带由干旱变为正常的趋势显著,在显著水平 0.05 的界限内,UF 与 UB 曲线相交于 2008 年与 2013 年附近,在 2008 年之后 UF 值均大于 0,表明在 2008 年、2013 年附近发生了突变,SPEI-12 指数在突变前后的平均值相差 0.204,从宁夏沿黄城市带 SPEI-12 指数年际变化来看,20 世纪 90 年代至今,宁夏沿黄城市带逐渐由干旱回归正常的气候水平。检验结果显示,Pet-

titt 值整体呈现下降趋势,表明宁夏沿黄城市带整体呈现暖干化趋势,检验显示 2008 年为突变年。由滑动 t 检验可以看出,滑动 t 统计量在 2003 年和 2008 年超出了临界线,表明宁夏沿黄城市带 SPEI-12 指数的突变点在 2003 年和 2008 年;t 值在 1995—2003 年呈现上升趋势,表明在这期间干旱情况有所缓和;在

2003—2008 年出现明显的下降趋势,表明这一期间的干旱情况十分严峻,出现连年干旱的情况。结合 3 种突变检测结果,确定 2008 年为研究区的突变年,表明研究区 SPEI-12 值在 1995—2015 年整体上呈现逐年下降的趋势,表明干旱情况得以缓解,黄河灌溉工程、生态恢复等措施有效地遏制了研究区内的干旱发展。

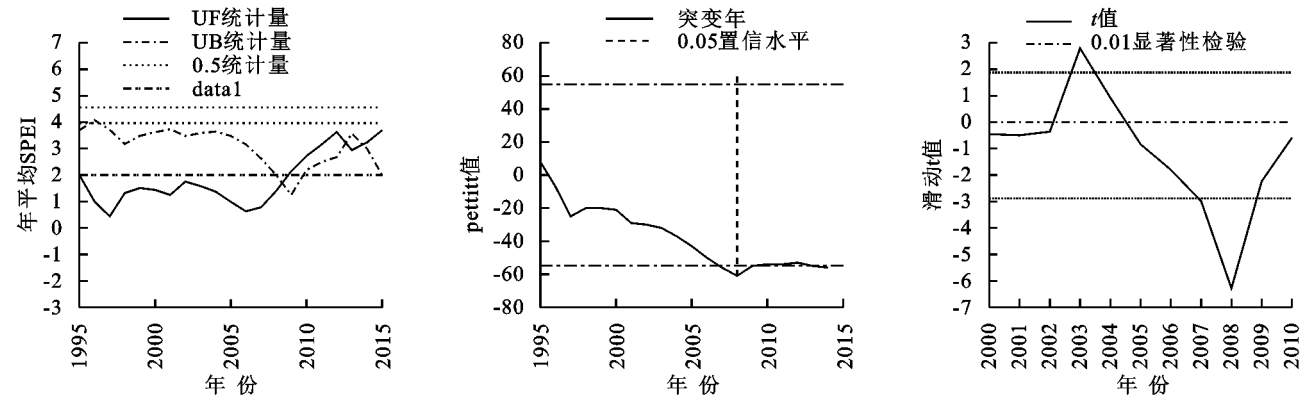


图 6 1995—2015 年宁夏沿黄城市带 SPEI-12 突变检测

3.4 驱动因子分析

冗余分析是一种结合了主成分分析与回归分析的排序方法,是多响应变量回归分析的拓展^[43],宁夏沿黄城市带 ET_0 , ET , $SPEI$ 值变化与各个驱动因子之间的相互关系密切,两主轴对所选样方的解释率均在 75% 以上。由图 7 可以看出,降水量、温度、地表净辐射是驱动 $SPEI$ 值主要环境因子,其次是水汽压和风速。其中,惠农、平罗、吴忠、银川以及中卫 5 个站点均显示降水量箭头连线的长度最长,表明降水量对 $SPEI$ 的贡献率最高,介于 54.2%~72.4%,中宁站点的贡献率最高,达到 85.4%。平罗站点,降水量与地表净辐射与 $SPEI$ 方向一致,呈正相关关系,降水量与 $SPEI$ 方向一致且夹角较小,呈显著正相关关系,相关性达到 0.643,而水汽压、风速和温度方向相反,呈负相关关系;其余各站点中,温度与 $SPEI$ 方向一致且夹角较大,呈正相关,但相关性较弱,为 0.401,其他环境因子相关性与平罗站点一致。驱动 ET 和 ET_0 的主要环境因子为地表净辐射,其中,地表净辐射对 ET_0 的贡献率最大达到 98.6%,且方向一致、夹角最小,呈显著正相关,相关性为 0.806。在惠农、吴忠、中卫、中宁以及银川 5 个站点,降水量、地表净辐射、温度与 ET 和 ET_0 方向相同,呈正相关关系,水汽压、风速方向相反,呈负相关关系;平罗站点则出现 ET 和 ET_0 方向相反长度较短,呈现弱相关性。

4 讨论

本研究通过计算不同时间尺度的 $SPEI$ 指数,对

宁夏沿黄城市带干旱时空演变特征及影响因素进行分析,发现研究区由北到南呈现“高一低—中—低”的空间分布特点,1995—2015 年呈现“下降—上升—下降—上升”的波动趋势,在 2008 年发生显著突变。宁夏沿黄城市带 $SPEI$ 指数年代际波动与降水量呈显著正相关关系,年和季降水量在研究区内部分地区有增加趋势,随着全球变暖,宁夏沿黄城市带北部平罗县,大武口区等地潜在蒸散发显著增加,导致研究区北部表现为不同程度的暖干化趋势,这与关静等^[44]分析一致。

基于离散分布的测站资料,通过空间插值方法,揭示整个流域干旱特征的时空差异性,时间尺度较短,无法预测未来 10~20 年内区域干旱程度及范围的变化趋势,后续需扩大研究的时间尺度,并对研究区未来干旱特征进行预测;黄河流域宁夏段位于黄土高原中部,具有黄土高原的典型特征,但研究区较小, $SPEI$ 指数空间分布宏观特征不明显,后续研究需扩大研究区范围。

论文所采用 Penman-Monteith 模型(P-M 模型)计算宁夏沿黄城市带潜在蒸散发,其计算结果与 $SPEI$ 指数有显著正相关关系,但在平罗、中卫等站点相关性较弱,甚至呈负相关关系,表明 P-M 模型中部分参数具有地方性和经验性,因此需对参数进行区域优化,深入不同的潜在蒸散量理论在宁夏沿黄城市带干旱检测的比较研究,提高蒸散发计算精度。

分析研究区各县(区、市)干旱指数对气象因子的敏感性发现,降水量和潜在蒸散发对 $SPEI$ 指数的贡献率

较高,由于宁夏沿黄城市带位于平原地区,高程变化较小,因此,在选取环境因子时,未考虑高程对区域干旱的影响。后续研究需结合测站高程资料,研究各环境因子

在该研究区内与高程的关系,分析干旱指数对气象要素的敏感系数与海拔的线性关系,明确不同海拔的地形、温度、植被和土壤之间的复杂反馈机制。

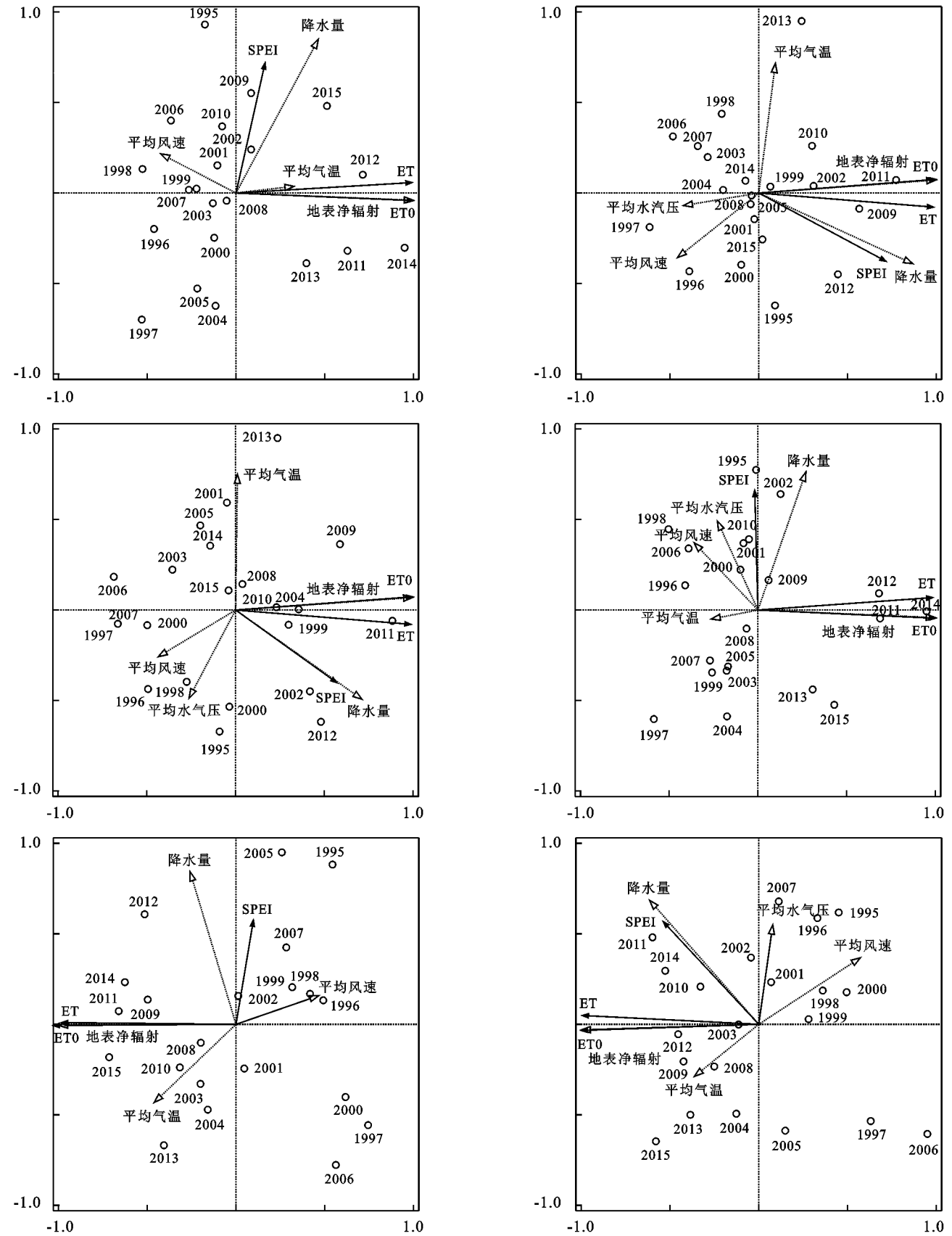


图 7 1995—2015 年宁夏沿黄城市带冗余分析排序图

5 结论

(1) 宁夏沿黄城市带四季呈现湿润化趋势,自北向南整体呈现由高到低分布,且主要集中在北部地区。单季旱发生频繁,以春季和秋季发生为主。春、秋、冬3个季节干旱强度和范围都有所增加,由北到南整体呈现为“低—高一低”的分布特征,冬季,研究区以北干旱加重,与秋季相比,干旱趋势减弱。

(2) 宁夏沿黄城市带1995—2015年SPEI-12指数整体以0.013/10 a速率呈上升趋势,表明宁夏沿黄城市带气候有变湿趋势。干旱发生具有随机性和频繁性,随着温度跃升,潜在蒸散发量加剧,而降水量逐渐降低,导致研究区有较明显的暖干化趋势。

(3) 研究区SPEI-12指数的下降趋势具有全域性,自北向南呈现由高到底的趋势,下降和上升趋势分别占研究区总面积的82.3%和17.7%。随着温度增加,降水量大量的减少,宁夏沿黄城市带整体呈现暖干化趋势。

(4) 综合3种突变检测结果表明研究区SPEI-12值在1995—2015年整体上呈现逐年下降的趋势,确定2008年为突变年。1995—2015年研究区由于干旱状态逐渐回归正常的气象表现水平,表明黄河灌溉工程、生态恢复等措施有效的遏制了研究区内的干旱发展。

(5) 宁夏沿黄城市带 ET_0 、ET、SPEI值变化与各个驱动因子之间的相互关系密切,两主轴对所选样方的解释率均在75%以上。降水量、温度、地表净辐射是驱动SPEI值主要环境因子,降水量对SPEI的贡献率最高,呈显著正相关关系,相关性达到0.643;水汽压、风速和温度环境因子与SPEI呈负相关关系;驱动ET和 ET_0 的主要环境因子为地表净辐射,对 ET_0 的贡献率最大达到98.6%,呈显著正相关,相关性为0.806。

参考文献:

- [1] Byun H R, Wilhite D A. Objective Quantification of Drought Severity and Duration[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(9): 2747-2756.
- [2] 杨庆,李明星,郑子彦,等.7种气象干旱指数的中国区域适应性[J].*中国科学:地球科学*, 2017, 47(3): 337-353.
- [3] Zhang J, Sun F, Liu W, et al. Spatio-temporal patterns of drought evolution over the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(6): 863-876.
- [4] Zhang J, Shen Y. Spatio-temporal variations in extreme drought in China during 1961—2015[J]. *Journal of Geo-*

- graphical Sciences*, 2019, 29(1): 67-83.
- [5] He B, Lü A, Wu J, et al. Drought hazard assessment and spatial characteristics analysis in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 235-249.
- [6] 马柱国,符淙斌,杨庆,等.关于我国北方干旱化及其转折性变化[J].*大气科学*, 2018, 42(4): 951-961.
- [7] 李柏贞,周广胜.干旱指标研究进展[J].*生态学报*, 2014, 34(5): 1043-1052.
- [8] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [9] Guttman N B. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index 1[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 113-121.
- [10] 刘卫国,王曼,丁俊祥,等.帕默尔干旱指数在天山北坡典型绿洲干旱特征分析中的适用性[J].*中国沙漠*, 2013, 33(1): 249-257.
- [11] 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.
- [12] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The Relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Boston, 1993: 179-183.
- [13] 王芝兰,李耀辉,王素萍,等.1901—2012年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征[J].*中国沙漠*, 2015, 35(6): 1666-1673.
- [14] 王芝兰,王劲松,李耀辉,等.标准化降水指数与广义极值分布干旱指数在西北地区应用的对比分析[J].*高原气象*, 2013, 32(3): 839-847.
- [15] Vicente-serrano S M, Beguería S, López-moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [16] Yao J, Zhao Y, Chen Y, et al. Multi-scale assessments of droughts: A case study in Xinjiang, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 444-452.
- [17] 马柱国.我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系[J].*地球物理学报*, 2005(05): 1011-1018.
- [18] Vicente-serrano S M, Beguería S, López-moreno J I, et al. A new global 0.5 gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2010, 11(4): 1033-1043.
- [19] 王林,陈文.近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征[J].*气象科技进展*, 2012, 2(4): 21-26.

- [20] 苏宏新,李广起.基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系[J].生态学报,2012,32(17):5467-5475.
- [21] 方黎明,王多银,房皓.基于标准化降水蒸散指数的宁夏中部干旱带干旱趋势分析[J].科学技术与工程,2019,19(14):336-345.
- [22] Soh Y, Koo C H, Huang Y, et al. Application of artificial intelligence models for the prediction of standardized precipitation evapotranspiration index (spei) at Langat River Basin, Malaysia[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018,144:164-173.
- [23] 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.
- [24] Nedelcov M, Răileanu V, Sirbu R, et al. The use of standardized indicators (spi and spei) in predicting droughts over the republic of moldova territory[J]. Present Environment and Sustainable Development, 2015(2):149-158.
- [25] Lavaysse C, Vogt J, Toreti A, et al. On the use of weather regimes to forecast meteorological drought over Europe[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2018,18(12):3297-3309.
- [26] Wang F, Wang Z, Yang H, et al. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the yellow river basin based on spei[J]. Sci. China Earth Sci, 2018,61(8):1098-1111.
- [27] Xiao M, Zhang Q, Singh V P. Influences of Enso, Nao, Iod and Pdo on seasonal precipitation regimes in the Yangtze River Basin, China[J]. International Journal of Climatology, 2015,35(12):3556-3567.
- [28] 李运刚,何娇楠,李雪.基于 SPEI 和 SDI 指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析[J].地理科学进展,2016,35(6):758-767.
- [29] Vicente-serrano S M, López-moreno J I. The influence of atmospheric circulation at different spatial scales on winter drought variability through a semi-arid climatic gradient in northeast Spain[J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2006,26(11):1427-1453.
- [30] 陈亚宁,王怀军,王志成,等.西北干旱区极端气候水文事件特征分析[J].干旱区地理,2017,40(1):1-9.
- [31] 李明,王贵文,张莲芝.基于 SPEI 的中国东北地区干旱分区及其气候特征分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(6):65-70.
- [32] 王允,刘普幸,曹立国,等.基于 SPI 的近 53 a 宁夏干旱时空演变特征研究[J].水土保持通报,2014,34(1):296-302.
- [33] 杨建玲,冯建民,郑广芬,等.宁夏中南部地区干旱变化趋势分析[J].中国沙漠,2012,32(3):842-851.
- [34] 高祖桥,白永平,周亮,等.宁夏沿黄城市带湿地景观格局演变特征及驱动力[J].应用生态学报,2020,31(10):3499-3508.
- [35] 张荣群,乔月霞,刘欢.湿地景观演变与土地利用强度变化的响应关系:以银川平原为例[J].测绘科学,2015,40(208):54-59.
- [36] 张璐,朱仲元,席小康,等.基于 SPEI 的锡林河流域干旱演化特征分析[J].干旱区研究,2020,37(4):819-829.
- [37] Qiant D, Trenberthk E. Simulation of global and surface conditions from 1948—2004 [J]. Part I: Forcing data and evaluation, 2006, 7(5): 953.
- [38] 毛飞,张光智,徐祥德.参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J].应用气象学报,2000(S1):128-136.
- [39] 张乐园,王弋,陈亚宁.基于 SPEI 指数的中亚地区干旱时空分布特征[J].干旱区研究,2020,37(2):331-340.
- [40] Trenberth K E, Dai A, Van der schrier G, et al. Global warming and changes in drought[J]. Nature Climate Change, 2014,4(1):17-22.
- [41] Ayantobo O O, Li Y, Song S, et al. Spatial comparability of drought characteristics and related return periods in mainland China over 1961—2013[J]. Journal of Hydrology, 2017,550:549-567.
- [42] 姚俊强,毛炜峰,胡文峰,等.1961—2015 年新疆区域 SPEI 干旱指数数据集[J].中国科学数据:中英文网络版,2019,4(3):112-121.
- [43] 肖飞艳.黑河中游土地利用和景观变化的时空特征与驱动因素[D].西安:长安大学,2019.
- [44] 关静,梁川,赵璐,等.3 种干旱指数在宁夏中部干旱带的适用性分析[J].水土保持研究,2018,25(3):122-127.