

# 基于 SPEI 指数的河北省南部夏玉米生长季 干旱特征分析

赵玉兵<sup>1</sup> 孙东磊<sup>1</sup> 贾秋兰<sup>1</sup> 杨丽娜<sup>1</sup> 甄文超<sup>2</sup>

(1 河北省邢台市气象局, 邢台 054000; 2 河北农业大学农学院, 保定 071000)

**摘要** 利用河北省南部 8 个气象站点 1962—2018 年的逐月气温、降水量数据, 采用标准化降水蒸散指数(SPEI), 通过小波分析、Mann-Kendall 检验等方法, 分析了河北省南部夏玉米生长季(6—9 月)干旱变化特征以期用于干旱灾害的监测、预报预警及防御提供理论依据。结果表明:夏玉米苗期干旱发生频率为 31.5%, 1966 年后苗期气候呈湿润化趋势, 在 1968 和 2009 年附近可能发生了气候湿润化的突变, 整个分析期(1962—2018 年)干湿变化包含 13~18 a、5~8 a 周期振荡;夏玉米穗期干旱发生频率为 40.3%, 2006 年后穗期气候呈持续干旱化趋势, 在 1980 和 1997 年附近可能发生了气候干旱化的突变, 整个分析期干湿变化包含 15~22 a、6~10 a 周期振荡;夏玉米花粒期干旱发生频率为 29.8%, 1989 年后花粒期气候呈持续干旱化趋势, 可能在 1992 和 2002 年附近发生了气候干旱化的突变;夏玉米生长季干旱发生频率约为 30%, 生长季气候总体呈干旱化趋势, 特别是 1997 年后持续干旱化, 可能在 1996 年附近发生了气候干旱化的突变。

**关键词** 夏玉米;河北省;生长季;SPEI

**中图分类号:** P429/S162 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20190445 **文献标识码:** A

## 引言

干旱灾害发生范围广,持续时间长,造成的影响大,是当前气候变化研究的热点领域<sup>[1]</sup>。气象灾害造成的经济损失约占各种自然灾害总损失的 70% 以上,而干旱造成的损失又占气象灾害损失的 50% 左右<sup>[2-3]</sup>。干旱也是河北省发生最频繁、影响最大的气象灾害。据 1980—2000 年资料统计,全省农作物每年平均受旱面积达  $2.38 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[4]</sup>。河北省南部邯郸、邢台地区处于东亚暖温带大陆性季风气候区,年平均日照时数 2769 h,总辐射量  $5507 \text{ MJ/m}^2$ ,年平均降水量 503 mm,年平均气温  $13.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,光热资源比较丰富,为小麦—夏玉米一年两熟制栽培区域,常年种植面积  $6.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,是河北省夏玉米主产区,干旱是制约该地区夏玉米稳产的主要农业气象灾害之一。

目前,常用于干旱监测、预报的干旱指数主要分为两类,一类是基于卫星遥感信息的干旱指数,一类

是基于地面气候数据、农田土壤生态环境、作物因子信息等的干旱指数<sup>[5]</sup>。基于气候数据的表征指标有降水距平百分率(Pa)、标准化降水指数(SPI)、帕尔默干旱强度指数(PDSI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)、气象综合干旱指数(CI)、Z 指数等<sup>[5-8]</sup>。SPI、Z 指数仅以降水量作为输入量,考虑降水概率分布,计算简单,缺点是只考虑了降水亏缺对干旱的影响。PDSI 指数考虑了温度对干旱的影响,但数据要求高,需要土壤持水量等资料作为输入量,具有固定时间尺度(9~12 个月之间)的缺陷。CI 指数是利用近 30 d(相当于月尺度)和近 90 d(相当于季尺度)降水量标准化降水指数,以及近 30 d 相对湿度指数综合而得,但在描述干旱动态方面,当一个明显降水过程移出 30 d 和 90 d 的 2 个 CI 计算窗口时,CI 突然下降,存在不合理的旱情加剧问题<sup>[9-11]</sup>。SPEI 与其他指数相比,综合考虑了降水,温度对蒸散影响,利用比较容易获取的气温、降水量资料,具有多时间尺度、多空间比较的优点,适于全球变暖背

http://www.qxkj.net.cn 气象科技

“十三五”国家重点研发计划项目“黄淮海北部小麦-玉米周年控水节肥一体化均衡丰产增效关键技术研究与模式构建”(2017YFD0300900)、邢台市科技计划项目“邢台夏玉米需水量时空分布特征及气象影响因子研究”(2019ZC077)资助

作者简介:赵玉兵,女,1981 年生,硕士,工程师,主要从事农业气象研究与服务工作,Email:xtsdl@126.com

收稿日期:2019 年 10 月 14 日;定稿日期:2020 年 5 月 18 日

景下干旱特征的分析<sup>[12-14]</sup>。容锦萌等<sup>[15]</sup>分析了 4 种干旱指标在华北地区气象干旱监测中的适用性, SPEI 比 CI、SPI、Z 指数表征各时间尺度的气象干旱发生效果好。闫峰等<sup>[16]</sup>采用 SPI 分析了 1958—2007 年河北省干旱时空特征, 夏季干旱多发地区主要在河北省北部和西南部, 秋季干旱多发地区主要集中在河北省西部和南部。王宏等<sup>[17]</sup>应用 Z 指数分析了河北省 1961—2009 年干旱时空特征, 年、各季南部和北部干旱指数反位异常显著。张金龙等<sup>[18]</sup>认为, 河北省南部为干旱多发区, 河北省干旱具有较强的时空差异性。但基于 SPEI 对河北省不同区域特定作物生长季干旱变化特征的研究还鲜见报道。采用具有比较优点的 SPEI 研究河北省南部夏玉米生长季的干旱变化特征, 对该区气象干旱灾害的监测、预报预警和防御更具有针对性和现实意义。

### 1 资料与方法

#### 1.1 资料数据

采用河北省南部 8 个代表性气象站 1962—2018 年月平均气温和降水量资料, 数据经过严格质量控制且无缺值, 由河北省气候中心提供, 站点分布见图 1。对研究区域 8 个气象站点月平均气温和月降水量再平均, 得到代表河北省南部月平均气温和降水量的时间变化序列资料。夏玉米生长季划分基于 2014—2018 年河北省肥乡、内丘农业气象站夏玉米发育监测资料, 夏玉米生长季为 6—9 月, 夏玉米苗期(出苗到拔节阶段)主要处于 6 月, 夏玉米穗期

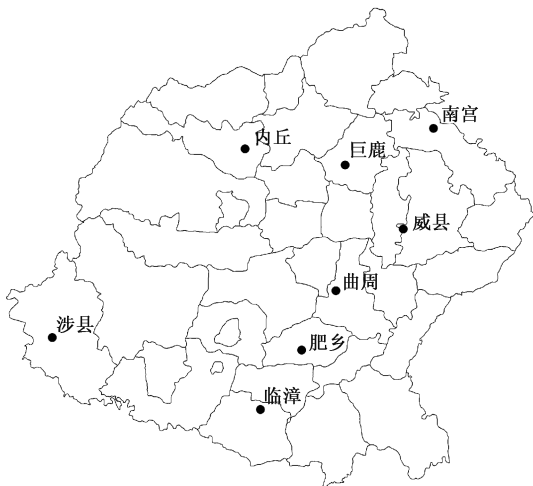


图 1 河北省南部 8 个代表性气象站点分布

(拔节到抽雄)主要处于 7 月, 夏玉米花粒期(抽雄到成熟)主要处于 8—9 月。本文计算了 1、2、4 个月时间尺度 SPEI 值, 分别用 SPEI-1, SPEI-2, SPEI-4 表示。6 月 SPEI-1、7 月 SPEI-1 分别表征夏玉米苗期、穗期的干旱, 9 月 SPEI-2 表征夏玉米花粒期的干旱, 9 月 SPEI-4 表征夏玉米整个生长季的干旱。

#### 1.2 方法

SPEI 指数由 Vicente-Serrano<sup>[19]</sup>提出, 它是在 SPI 指数的基础上, 引入蒸散发项构建, 具有 SPI 多时间尺度特征, 又考虑了温度变化对干旱的影响, 同时也是基于概率模型的指数。SPEI 利用月平均气温和月降水量资料, 通过计算月降水与潜在蒸散量的差值并进行正态标准化处理得到。步骤如下:

(1) 潜在蒸散发量 (Potential Evapotranspiration)  $P_{ET}$  计算。采用 Vicente-Serrano 推荐的 Thornthwaite 法:

$$P_{ET} = 16 \left[ \frac{10T_i}{H} \right]^A \quad (1)$$

$$H = \sum_{i=1}^{12} H_i = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1.514} \quad (2)$$

式中,  $T_i$  为月平均温度,  $H$  为年热量指数;  $H_i$  为月热量指数;  $A$  为常数, 由  $H$  决定  $A = 0.49 + 0.179H - 0.000077H^2 + 0.000000675H^3$ 。

(2) 计算水分平衡, 即逐月降水量与潜在蒸散量的差值  $D_i$ :

$$D_i = R_i - P_{ETi} \quad (3)$$

式中,  $R_i$  表示某月降水量,  $P_{ETi}$  为某月潜在蒸散发量值。

(3) 建立不同时间尺度下气候学意义的水分盈亏累积序列  $D_i^k$ :

$$D_i^k = \sum_{j=0}^{k-1} (R_{i-j} - P_{ET(i-j)}) \quad i \geq k \quad (4)$$

式中,  $k$  为时间尺度;  $i$  为计算月份;  $R_{i-j}$  为  $(i-j)$  月降水量;  $P_{ET(i-j)}$  为  $(i-j)$  月潜在蒸散发值。

(4) 对降水蒸散发差值  $D_i$  数据序列标准化, 由于  $D_i$  数据序列可能存在负值, 因此采用三参数的 Log-Logistic 概率分布对其进行拟合, 式中  $\alpha, \beta, \gamma$  可以采取线性矩方法获得:

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

$D_i$  概率密度累积函数为

$$F(x) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (6)$$

拟合分布超过某  $D_i$  值的累积概率  $P = 1 - F(x)$ , 概率加权矩  $w = \sqrt{-2 \ln(P)}$ 。

对累积概率标准化, 计算出每个  $D_i$  数值对应的  $S_{PEI}$  值。

当  $[P \leq 0.5]$  时,

$$S_{PEI} = w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}$$

当  $[P > 0.5]$  时,  $[P = 1 - P]$

$$S_{PEI} = - \left( w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} \right)$$

式中,  $c_0 = 2.515517$ ;  $c_1 = 0.802853$ ;  $c_2 = 0.010328$ ;  $d_1 = 1.432788$ ;  $d_2 = 0.189269$ ;  $d_3 = 0.001308$ 。

采用现行的 GB/T 20481—2017《气象干旱等级》划分干旱等级。

干旱发生频率:  $M = n/N \times 100\%$ 。  $n$  为数据序列中干旱发生的次数,  $N$  为样本容量。

MATLAB 6.5 软件进行小波分析<sup>[20]</sup>, 采用复值 Morlet 基小波。

运用 Mann-Kendall 方法<sup>[21-23]</sup> 进行变化趋势突变检验。

## 2 结果分析

### 2.1 夏玉米苗期干旱变化特征

1962—2018 年, 夏玉米苗期平均气温为  $25.5^\circ\text{C}$ , 最大值为  $27.4^\circ\text{C}$ , 最小值为  $23.5^\circ\text{C}$ 。平均气温变化大体可分为 2 个阶段: 第 1 阶段为下降阶段 (1962—1996 年), 平均气温为  $25.4^\circ\text{C}$ , 气候倾向率为  $-0.31^\circ\text{C}/10\text{a}$ , 通过 0.05 显著性检验, 平均气温下降趋势显著; 第 2 阶段为上升阶段 (1997—2018 年), 平均气温为  $25.7^\circ\text{C}$ , 气候倾向率为  $0.15^\circ\text{C}/10\text{a}$ , 通过 0.05 显著性检验, 平均气温上升趋势显著。夏玉米苗期降水量平均为  $57.6\text{mm}$ , 最大值为  $158.9\text{mm}$ , 最小值为  $10.7\text{mm}$ , 变异系数为 56%, 气候倾向率为  $1.9\text{mm}/10\text{a}$ , 未通过 0.05 显著性检验, 降水量增加趋势不显著。

1962—2018 年, 6 月 SPEI-1 最小为  $-1.65$  (1985 年), 最大值为  $2.20$  (1971 年), 6 月 SPEI-1 气候倾向率为  $0.098/10\text{a}$ , 未通过 0.05 显著性检验。夏玉米苗期干旱发生频率为 31.5%, 其中轻旱发生频率为 12.3%, 中旱发生频率为 12.3%, 重旱发生

频率为 7.0%。达到重旱等级年份有 1972、1983、1985、1998 年, 最湿润的 4 个年份为 1971、1973、1980、1987 年, 发生重旱和最湿润的年份均发生在 20 世纪 70、80 年代, 最湿润的年份偏离正常年的程度要大于重旱年份, 呈旱涝年际间急转特征。

6 月 SPEI-1 变化趋势的 M-K 检验 (图 2) 表明, 除 1964、1965 年外, 其他年份 UF 均大于 0, UF 和 UB 曲线在 1968、2009 年附近出现交点且位于  $\pm 1.96$  置信线之间, 2004 年 UF 值超出置信线, 即 6 月 SPEI-1 呈上升趋势, 变化趋势存在显著突变点, 2004—2005 年为突变区域。说明 1966 年后夏玉米苗期气候呈湿润化趋势, 1968 和 2009 年附近可能发生了气候湿润化的突变。

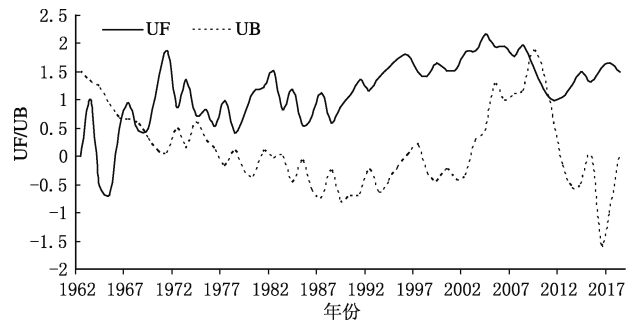


图 2 河北省南部 1962—2018 年夏玉米苗期 6 月 SPEI-1 变化趋势 M-K 检验

由 6 月 SPEI-1 小波变换系数实部等值线可知 (图 3,  $\geq 0$  为实线,  $< 0$  为虚线, 下同), 夏玉米苗期气候干湿变化周期性规律明显, 具有全域性和稳定性, 存在 13~18 a 的年代际变化, 经历了 5 个干湿交替: 1965—1970 年、1974—1978 年、1982—1988 年、1994—2000 年和 2006—2010 年, 这 5 个时段处

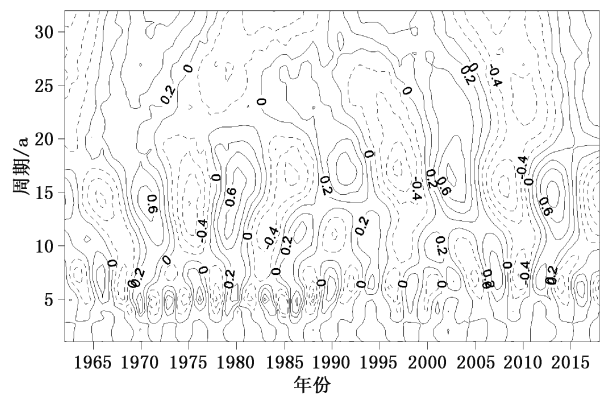


图 3 河北省南部 1962—2018 年夏玉米苗期 6 月 SPEI-1 小波变换系数实部等值线

于偏干期,其他时段处于偏湿期。从年代际变化周期预测,2015—2024 年夏玉米苗期气候处于偏干期。10 a 及以下尺度年际变化,具有 5~8 a 周期振荡。

### 2.2 夏玉米穗期的干旱变化特征

1962—2018 年,夏玉米穗期平均气温为 26.6 °C,最大值为 28.7 °C,最小值为 24.5 °C。平均气温变化大体也可分为 2 个阶段:第 1 阶段为下降阶段(1962—1976 年)平均气温为 26.4 °C,气候倾向率为 -1.10 °C/10a,通过 0.05 显著性检验,平均气温下降趋势显著;第 2 阶段(1977—2018 年)为上升阶段,平均气温为 25.5 °C,气候倾向率为 0.25 °C/10a,通过 0.05 显著性检验,平均气温上升趋势显著。穗期降水量平均为 148.7 mm,最大值为 334.2 mm,最小值为 50.5 mm,变异系数为 44%,气候倾向率为 0.2 mm/10a,未通过 0.05 显著性检验,降水量增加趋势不显著。

1962—2018 年 7 月 SPEI-1 最小值为 -1.85 (1992 年),最大值为 1.98(2000 年),7 月 SPEI-1 气候倾向率为 -0.017/10a,未通过 0.05 显著性检验。干旱发生频率为 40.3%,其中轻旱发生频率 24.5%,中旱发生频率在 12.3%,重旱发生的频率 3.5%。达到重旱等级年份有 1965 年和 1992 年,最湿润的 3 个年份为 1989、2000、2016 年。

7 月 SPEI-1 变化趋势的 M-K 检验(图 4)表明,1962—1966 年、1976—1983 年和 2000—2005 年,3 个时段 UF 均大于 0,其他时段 UF 均小于 0,特别是 2006 年以来,UF 持续小于 0,UF 和 UB 曲线在 1964、1974、1980、1997、2017 年附近出现交点且位于 ±1.96 置信线之间,但 1964 年和 2017 年附近的交点位于时间序列边缘,判断是否突变需要更长时间序列验证。表明,1962—1966 年、1976—1983 年、2000—2005 年这 3 个时段,夏玉米穗期气候呈湿润化趋势,其他时段呈干旱化趋势,2006 年以来呈持续干旱化趋势。1974 年附近可能发生了气候湿润化的突变,1980 和 1997 年附近可能发生了气候干旱化的突变。

由 7 月 SPEI-1 小波变换系数实部等值线(图 5)可知,夏玉米穗期干湿周期变化规律明显,主要包含了 15~22 a 的年代际变化,具有全域性和稳定性,经历了 4 个干湿交替:1965—1974 年、1981—1987 年、1994—1998 年和 2005—2010 年,这 4 个时段处

于偏干期,其他时段处于偏湿期。从年代际变化周期预测,2015—2025 年夏玉米穗期气候处于偏干期。10 a 及以下尺度年际变化,具有 6~10 a 周期振荡。

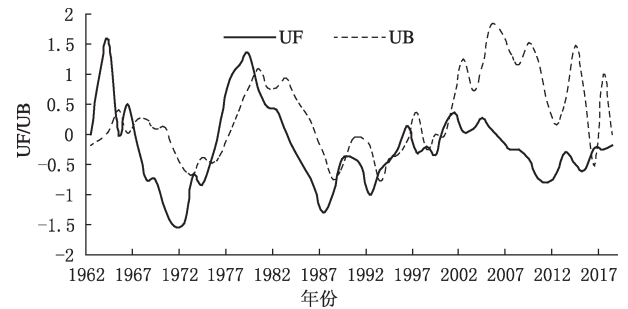


图 4 河北省南部 1962—2018 年夏玉米穗期 7 月 SPEI-1 变化趋势 M-K 检验

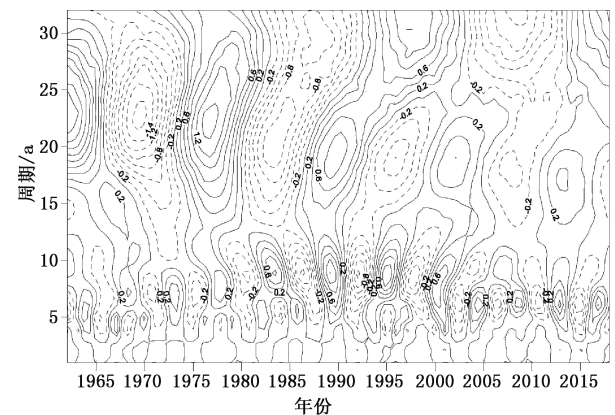


图 5 河北省南部 1962—2018 年夏玉米穗期 7 月 SPEI-1 小波变换系数实部等值线

### 2.3 夏玉米花粒期干旱变化特征

1962—2018 年,夏玉米花粒期平均气温 22.6 °C,最大值为 24.3 °C,最小值为 21.4 °C。1962—1996 年平均气温为 22.4 °C,气候倾向率为 -0.10 °C/10a,通过 0.05 显著性检验,下降趋势显著,1997—2018 年平均气温为 22.8 °C,线性变化趋势不明显。花粒期降水量平均为 172.8 mm,最大值为 546.3 mm,最小值为 52.9 mm,变异系数为 47%,气候倾向率为 -9.6 mm/10a,未通过 0.05 显著性检验。

9 月 SPEI-2 最小值为 -2.55(1965 年),最大值为 2.37(1963 年),9 月 SPEI-2 气候倾向率为 -0.12/10a,未通过 0.05 显著性检验。干旱发生频率为 29.8%,其中轻旱发生频率为 10.5%,中旱发生频率为 12.3%,重旱发生的频率为 7.0%。干旱

最严重的年份有1965、1994、1999、2001年,达到重旱等级,最湿润的3个年份为1963、1982和2010年。

9月SPEI-2变化趋势的M-K检验(图6)表明,在1962—1988年,UF值正负交替出现。1989—2018年UF值持续小于0,UF和UB曲线在1992、2002、2015年附近出现交点且位于 $\pm 1.96$ 置信线之间,UF值在2004—2005年超出置信线。2015年附近交点位于时间序列边缘,判断是否突变需要更长时间序列验证。表明,夏玉米花粒期气候1989年后呈干旱化趋势,1992和2002年附近可能发生了气候干旱化的突变。

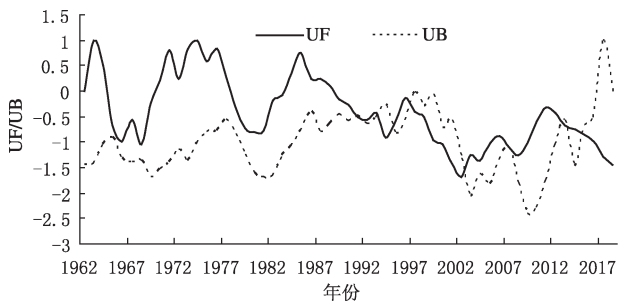


图6 河北省南部1962—2018年夏玉米花粒期9月SPEI-2变化趋势M-K检验

由9月SPEI-2值小波变换系数实部等值线(图7)可知,夏玉米花粒期干湿变化周期不具有全域性和稳定性。1965—1995年,10a以上的年代际变化存在15~20a的周期振荡,主要经历了4个干湿交替:1965—1970年,1975—1980年,1985—1990年和1991—1995年,处于偏干期,其他时段处于偏湿期。10a及以下尺度包含8~10a、4~5a周期,振荡强弱表现不太稳定,周期逐渐融合为5~8a。

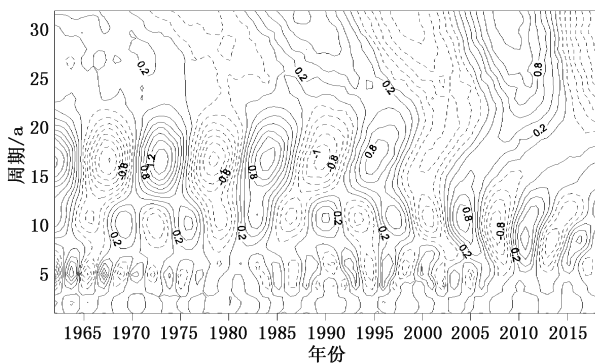


图7 河北省南部1962—2018年夏玉米花粒期9月SPEI-2小波变换系数实部等值线

## 2.4 夏玉米生长季干旱变化特征

1962—2018年,夏玉米生长季平均气温 $24.3^{\circ}\text{C}$ ,最大值为 $25.6^{\circ}\text{C}$ ,最小值为 $23.3^{\circ}\text{C}$ ,生长季平均气温变化趋势拟合呈二次函数型, $y = 0.001x^2 - 0.0482x + 24.621$  ( $R^2 = 0.2603$ ),变化平缓且呈先下降后上升的态势,1988年前后生长季平均气温处于低值年份。1962—2018年,生长季降水量平均为 $380.1\text{mm}$ ,最大值为 $775.9\text{mm}$ ,最小值为 $155.8\text{mm}$ ,变异系数为29%,气候倾向率为 $-7.41\text{mm}/10\text{a}$ ,未通过0.05显著性检验。

9月SPEI-4最小值为-2.6(1965年),最大值为2.1(1973年),气候倾向率为 $-0.07/10\text{a}$ ,未通过0.05显著性检验,下降趋势不显著。整个生长季干旱频率在31.6%,其中轻旱发生频率为15.8%,中旱发生频率为8.8%,重旱发生频率为5.3%,干旱最严重的年份1965年,达到极端干旱等级,1968、1986、1997年达到重旱等级。最湿润的3个年份为1963、1973、1996年。干旱严重年份与最湿润的年份偏离正常年的程度基本相同。

9月SPEI-4变化趋势的M-K检验(图8)表明,除1963、1964、1976、1977、1996年外,其他年份UF值均小于0,UF和UB曲线出现多个交点且位于置信线之间,在1996年前出现的多个交点且UF值在零值上下波动,1996年后出现多个交点且UF值均小于0。表明,夏玉米生长季气候总体呈干旱化趋势,大体可分为2个阶段:第1阶段(1962—1996年),干湿变化趋势存在一定的转换;第2阶段(1997—2018年),气候持续呈现干旱化趋势,1996年附近可能发生了气候干旱化的突变。

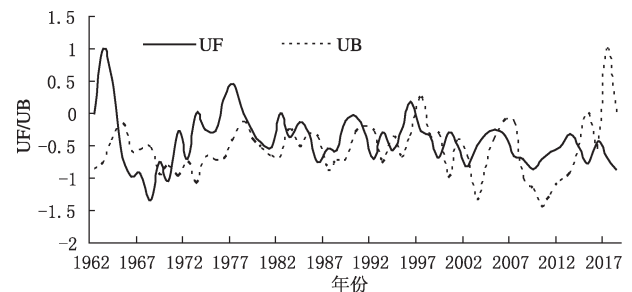


图8 河北省南部1962—2018年夏玉米生长季9月SPEI-4变化趋势M-K检验

由9月SPEI-4小波变换系数实部等值线(图9)可知,夏玉米生长季气候干湿变化周期不具有全域性和稳定性,1965—1985年,10a以上的年

代际变化存在 18~22 a 的周期振荡,经历了 1963—1970 年、1975—1980 年的 2 个偏干期和 1971—1974 年、1981—1985 年的 2 个偏湿期。10 a 及以下尺度包含 8~10 a、3~5 a 周期,逐渐融合为 5~8 a。

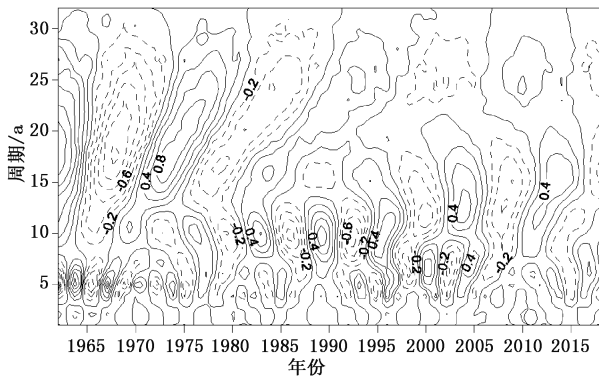


图 9 河北省南部 1962—2018 年夏玉米生长季 9 月 SPEI-4 小波变换系数实部等值线

### 3 讨论

据中国气象灾害大典(河北卷)<sup>[4]</sup>统计,河北南部地区典型夏季干旱年有 1968、1972、1983、1992、1997、2014 年。据邢台市统计局资料,1972 年邢台地区发生严重夏季干旱,成灾面积 33.2 hm<sup>2</sup>,1997 年夏季严重干旱,成灾面积 30.33 hm<sup>2</sup>。本文计算

1972 年的 9 月 SPEI-4 值为 -1.1,1997 年 9 月 SPEI-4 为 -1.9。据 2014 年河北省气候公报,2014 年河北省干旱强度较重,部分地区旱情较重,7 月旱情迅速发展,8 月 22 日干旱覆盖河北省大部分地区,中南部和东北部较重。本文计算 2014 年 9 月 SPEI-4 值为 -0.6。其他夏季干旱成灾年份,1968、1983、1992 年,9 月 SPEI-4 值分别为 -1.6、-0.8、-1.3。表明,本文采用的 9 月 SPEI-4 可较好的反映该地区夏玉米生长季干旱的强度。

大部分学者在研究不同区域的气象干旱时,以年、季尺度,本文以作物生长季为研究尺度,对农业生产更具有指导意义。基于推荐性国家标准《气象干旱等级》对干旱等级划分,河北南部夏玉米生长季不同时间尺度干旱发生频率约为 30%,其中以轻、中旱为主,发生频率约为 23%,重旱发生频率约为 5%,极端干旱发生频率约为 2%,整个分析期(1962—2018 年)夏玉米苗期气候干湿变化包含 13~18 a、5~8 a 尺度周期振荡,穗期干湿气候变化包含 15~22 a、6~10 a 尺度周期振荡。本文结果与闫峰等<sup>[16]</sup>、王宏等<sup>[17]</sup>、刘增进等<sup>[24]</sup>等研究结果基本一致,与番聪聪等<sup>[25]</sup>、韦潇宇等<sup>[26]</sup>等研究结果有一定差异(表 1)。番聪聪等<sup>[25]</sup>认为河北南部干旱发生频率 15%左右,其采用 SPI 指数,研究区域中代表河北南部区域仅 2 个气象站点,干旱等级划分未

表 1 不同学者对河北省南部干旱特征研究结果比较

	本文	闫峰等 <sup>[16]</sup>	王宏等 <sup>[17]</sup>	刘增进等 <sup>[24]</sup>	番聪聪等 <sup>[25]</sup>	韦潇宇等 <sup>[26]</sup>
采用指数	SPEI	SPI	Z	Pa	SPI	SPEI
干旱标准	GB/T 20481—2017, SPEI ≤ -0.5	SPI ≤ -0.5	Z < -0.524	Pa ≤ -25%	SPI ≤ -1.0	SPEI ≤ 0
研究时段	1962—2018 年	1958—2007 年	1961—2009 年	1988—2017 年	1961—2014 年	1961—2015 年
结论	河北省南部夏玉米生长季干旱频率在 31.6%,呈干旱化趋势,1997 年后持续干旱化。干湿变化存在 18~22 a 周期振荡,10 a 及以下尺度包含 8~10 a、3~5 a 周期,逐渐融合为 5~8 a	河北南部大部分地区夏季干旱发生频率 20%~30%,局部 10%~20%,秋季发生概率大于 30%。2000 年以来夏季干旱比较严重	河北省南部夏季干旱指数存在 12 a 左右和 6~8 a 周期变化,秋季存在 16~18 a 周期	邢台站点干旱发生频率 31.0%,南宫站点干旱发生频率 20.7%	河北省南部干旱发生频率 15%左右,20 世纪 90 年后干旱形势越发严峻	河北省南部夏玉米生长季(6—10 月)干旱发生频率 48%~50%,生长季干旱频率呈增加趋势



参照中国气象局提出的我国干旱等级划分标准,相比而言,本文选择 SPEI 指数,站点数量多,分布相对均匀,气象干旱等级划分参照推荐性国家标准,研究结果更具有准确性和针对性。韦潇宇等<sup>[26]</sup>认为,华北平原夏玉米生长季干旱发生频率 50%左右,其选择 6 个月时间尺度的 10 月的 SPEI 值,与本文研究结果差异较大,原因与表征生长季 SPEI 的时间尺度选择有关,本文根据河北南部夏玉米生长时段,采取 4 个月时间尺度的 9 月的 SPEI 值,表征区域针对性更强。

夏玉米穗期发生干旱对产量和产量构成要素有一定影响,易造成卡脖旱和花期不遇,但轻旱会在后期使产量构成要素产生一定的补偿效应,影响不大;花粒期是夏玉米生殖生长的关键阶段,也是水分敏感期,发生干旱易造成玉米籽败育<sup>[27]</sup>。本文结果表明,1988 年后整个生长季的平均气温一直处于升高趋势,2006 年后,夏玉米穗期气候一直呈干旱化趋势;1989 年后,夏玉米花粒期气候呈干旱化趋势;整个生长季气候呈干旱化趋势,特别是 1997 年后持续呈现变干趋势。作物品种培育和栽培技术措施改进中应重视这种变化趋势。本文研究数据只选择 8 个代表气象站点进行了适用性研究,今后研究过程中应考虑选用更多的代表站点,进行合理的区域划分,进行适用性分析,同时结合旱灾数据对于干旱指数进行验证。

#### 4 结论

(1)河北省南部夏玉米苗期干旱发生频率为 31.5%,轻旱发生频率为 12.3%,中旱发生频率为 12.3%,重旱发生的频率 7.0%。1966 年后夏玉米苗期气候呈湿润化趋势。1968 和 2009 年附近可能发生了气候湿润化的突变。气候干湿变化具有 13~18 a、5~8 a 两个显著周期。

(2)河北省南部夏玉米穗期干旱发生频率为 40.3%,轻旱发生频率 24.5%,中旱发生频率 12.3%,重旱发生的频率 3.5%,2006 年后夏玉米穗期气候呈持续干旱化趋势。1974 年附近可能发生了气候湿润化的突变,1980 和 1997 年附近可能发生了气候干旱化的突变。气候干湿变化具有 15~22 a、6~10 a 两个显著周期。

(3)河北省南部夏玉米花粒期干旱发生频率为 29.8%,轻旱发生频率在 10.5%,中旱发生频率在

12.3%,重旱发生的频率 7.0%。1989 年后夏玉米花粒期气候呈持续干旱化趋势。1992 和 2002 年附近可能发生了气候干旱化的突变。

(4)河北省南部夏玉米生长季干旱频率 31.6%,轻旱发生频率在 15.8%,中旱发生频率 8.8%,重旱发生的频率 5.3%,夏玉米生长季气候总体呈干旱化趋势,特别是 1997 年后持续干旱化,1996 年附近可能发生了气候干旱化的突变。

#### 参考文献

- [1] Seneviratne S I. Climate science: historical drought trends revisited [J]. *Nature*, 2012, 491(7424): 338-339.
- [2] 张强,王劲松,姚玉璧,等. 干旱灾害风险及其管理[M]. 北京:气象出版社,2017:2.
- [3] 徐建文,居辉,刘勤,等. 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应[J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 460-470.
- [4] 温克刚,臧建升. 中国气象灾害大典·河北卷[M]. 北京:气象出版社,2007:8-75.
- [5] 张强,张良,崔显成,等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 763-778.
- [6] 王胜,田红,张存杰,等. 安徽冬麦区 4 种干旱指数应用对比[J]. *气象科技*, 2015, 43(2): 295-301.
- [7] Mouatadid S, Raj N, Deo R C, et al. Input selection and data-driven model performance optimization to predict the standardized precipitation and evaporation index in a drought-prone region [J]. *Atmospheric Research*, 2018, 212(11): 130-149.
- [8] Hernandez E A, Uddameri V. Standardized precipitation evaporation index (SPEI)-based drought assessment in semi-arid south Texas [J]. *Environ Earth Sci*, 2014, 71: 2491-2501.
- [9] 秦鹏程,刘敏,万素琴,等. 气象干旱综合监测指数在湖北的本地化应用及其适用性分析[J]. *气象科技*, 2014, 42(2): 341-247.
- [10] 杨玮,谢五三,王胜,等. 气象干旱综合监测指数在安徽省的适用性分析[J]. *气象科技*, 2018, 46(5): 988-998.
- [11] 王春林,郭晶,薛丽芳,等. 改进的综合气象干旱指数  $CI_{new}$  及其适用性分析[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(4): 621-626.
- [12] 许玲燕,王慧敏,段琪彩,等. 基于 SPEI 的云南省夏玉米生长季干旱时空特征分析[J]. *资源科学*, 2013, 35(3): 1024-1034.
- [13] 王林,陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(2): 423-431.
- [14] 李翔翔,居辉,刘勤,等. 基于 SPEI-PM 指数的黄淮海平原干旱特征分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(6): 2054-2066.
- [15] 容锦萌,周丹,罗静,等. 4 种干旱指标在华北地区气象干旱监测中的适用性分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(1): 259-267.
- [16] 闫峰,王艳娇,吴波. 近 50 年河北省干旱时空分布特征[J]. *地理研究*, 2010, 29(3): 423-430.

- [17] 王宏,余锦华,李宗涛. 近 49 年河北省干旱时空变化特征研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2015, 7(3): 260-267.
- [18] 张金龙,刘学峰,于新文. 河北省干旱分布特征和变化规律分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1): 41-46.
- [19] Beguer A S, Vicente-Serrano S M. Calculation of the standardized precipitation evapo-transpiration index [J]. Risk & Decision Analysis, 2017, 4(4): 25-38.
- [20] 林振山,邓自旺. 子波气候诊断技术研究[M]. 北京:气象出版社, 1999: 1-22, 47-51, 38.
- [21] 吴洪宝,吴蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京:气象出版社, 2005: 33-44, 208-245.
- [22] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.
- [23] 黄嘉佑,李庆祥. 气象数据统计分析方法[M]. 北京:气象出版社, 2015: 423-428.
- [24] 刘增进,张静. 1988-2017 年河北省干旱时空变化特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 27-31.
- [25] 潘聪聪,胡正华,黄进,等. 河北省夏玉米生长季干旱时空特征及对夏玉米产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(10): 69-74.
- [26] 韦潇宇,胡琦,马雪晴,等. 基于 SPEI 的华北平原夏玉米生长季干旱时空变化特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 554-560.
- [27] 李叶蓓,陶洪斌,王若南,等. 干旱对玉米穗发育及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(4): 383-391.

## SPEI-Based Characteristic Analysis of Summer Corn Drought in Growing Season in Southern Hebei Province

ZHAO Yubing<sup>1</sup> SUN Donglei<sup>1</sup> JIA Qiulan<sup>1</sup> YANG Lina<sup>1</sup> ZHEN Wenchao<sup>2</sup>

(1 Xingtai Meteorological Service, Hebei, Xingtai 054000;

2 College of Agronomy, Agricultural University of Hebei Province Hebei, Baoding 071000)

**Abstract:** Based on the observation data of 8 meteorological stations in the southern Hebei Province from 1962 to 2018, the characteristics and trends of climate change in summer maize growing season (June to September) are analyzed by the regression analysis, wavelet analysis and Mann-Kendall test. The frequency of drought in the seedling stage of summer maize was 31.5%. After 1966, the climate in the seedling stage showed a humidification trend. A sudden change in climate humidification occurred around 1968 and 2009. The dry-wet changes during the entire analysis period (1962 to 2018) contained the periodic oscillations of 13 to 18 years and 5 to 8 years. The frequency of drought at the ear stage of summer corn was 40.3%, and the climate at the ear stage after 2006 showed a continuous aridity trend. A sudden change in climate aridification occurred around 1980 and 1997. The dry-wet changes in the entire analysis period contained the periodic oscillations of 15 to 22 years and 6 to 10 years. The frequency of drought during the flower and grain period of summer maize was 29.8%. After 1989, the climate during the flower and grain period showed a continuous aridification trend. It is possible that a sudden change of climate aridity occurred in 1992 and 2002. The frequency of drought in the summer corn growing season is about 30%. The climate in the growing season showed a trend of aridification, especially after 1997, and there experienced abrupt climate aridification around 1996. The above results are expected to provide a theoretical basis for drought disaster monitoring, prediction, early warning and prevention.

**Keywords:** summer maize; Hebei; growing season; drought