	第 36 卷	第 21 期	农 业 工 程 学 报	Vol.36 No.21
164	2020年	11 月	Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering	Nov. 2020

# 基于 SPEI K<sub>c</sub> 的华北平原小麦玉米周年干旱特征分析

马雪晴<sup>1</sup>, 胡 琦<sup>1\*</sup>, 王 靖<sup>1</sup>, 潘学标<sup>1</sup>, 张 君<sup>2</sup>, 王晓晨<sup>1</sup>, 胡莉婷<sup>1</sup>, 和骅芸<sup>1</sup>, 李 蓉<sup>1</sup>, 邢梦媛<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193; 2. 内蒙古自治区农牧业科学院,呼和浩特 010031)

摘 要:华北平原是中国重要的冬小麦和夏玉米(麦玉)生产基地,同时也是水资源紧缺的区域,农业生产极易受到干旱的影响。该研究在标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)的基础上,引进作物系数(K<sub>C</sub>)改进 SPEI 指数,并基于改进后的 SPEI\_K<sub>C</sub> 指数从作物生长季尺度、关键生育期尺度以及麦玉周年尺度分析 1961—2017 年华北平原冬小麦-夏玉米周年干旱的时空分布和变化特征。结果表明:1)SPEI\_K<sub>C</sub> 指数在华北平原麦玉周年干旱评估中的适用性优于 SPEI\_TW 指数(采用 Thornthwaite 公式计算的 SPEI 指数)和 SPEI\_PM 指数(采用 Penma-Monteith 公式计算的 SPEI 指数):在(实际)有旱(指数)评估为有旱情况下,SPEI\_K<sub>C</sub> 指数准确率为 76.13%,较 SPEI\_TW 指数、SPEI\_PM 指数均有提高;在无旱评估为无旱情况下,SPEI\_K<sub>C</sub> 指数准确率为 85.67%,较 SPEI\_TW 指数、SPEI\_PM 指数分别均有提高。2)小麦关键生育期和小麦生长季的空间分布均呈中旱在河北北部较高,重旱在研究区中部较高分布,玉米关键生育期和玉米生长季干旱频率的空间分布均呈中旱在河北北部较高,看干旱严重。3)年代际干旱程度总体呈略微减小的趋势,具体表现为大部分研究尺度的轻旱发生频率增加,所有研究尺度的中旱和重旱发生频率减小;小麦关键生育期、小麦生长季以及玉米生长季的干旱频率减小,玉米关键生育期和麦玉周年尺度干旱频率增加。研究结果能够为正确认识气候变化背景下该地区干旱分布和变化,进而采取合理措施应对气候变化提供理论依据。

关键词:干旱;作物;降雨;SPEI;作物系数;华北平原;麦玉生长季 doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2020.21.020

中图分类号: S162.5<sup>+</sup>7 文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-21-0164-11

马雪晴, 胡琦, 王靖, 等. 基于 **SPEI\_K**<sub>C</sub> 的华北平原小麦玉米周年干旱特征分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): **164-174**. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.21.020 http://www.tcsae.org

Ma Xueqing, Hu Qi, Wang Jing, et al. Spatiotemporal variation characteristics of drought trend at annual of wheat-maize in the North China Plain based on SPEI\_K<sub>C</sub> index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(21): 164-174. (in Chinese with English abstract) doi : 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.21.020 http://www.tcsae.org

# 0 引 言

在全球变暖的背景下,农业气象灾害频发,其中干 旱灾害占所有农业气象灾害的 53%<sup>[1-2]</sup>,干旱灾害导致农 作物减产、水资源短缺、荒漠化加剧等现象频频发生<sup>[3-4]</sup>。 华北平原对气候变化响应敏感,生态环境较为脆弱,过 去几十年间,其干湿变化明显,极端干旱事件发生频率 显著增加,农业生产面临严峻的形势<sup>[4-6]</sup>。为了抗旱保产, 研究区大面积抽取地下水进行灌溉,导致地下水位迅速 下降,成为世界上最大的地下水漏斗区,生态环境日益 恶化<sup>[7]</sup>。

冬小麦-夏玉米轮作是华北平原主要的生产方式,大

收稿日期: 2020-07-27 修订日期: 2020-10-10

作者简介: 马雪晴,博士生,主要从事农业气象灾害评估等方面研究。 Email: maxueqingee@163.com

※通信作者: 胡琦, 副高, 主要从事气候变化影响评价研究。

Email: huq@cau.edu.cn

范围、高强度且频发的干旱导致华北平原小麦、玉米减产,且对于作物的不同生长阶段,干旱胁迫对作物生长发育影响的结果不同,从而影响粮食生产安全<sup>[8]</sup>。因此对华北平原开展冬小麦-夏玉米周年干旱时空分布特征研究,对该地区干旱变化进行评估、预警具有重要意义。

针对干旱的研究多依赖于干旱指数,刘荣花等<sup>[9]</sup>利用 降水距平百分率(Precipitation Anomaly Percentage, PA) 对华北冬麦区进行干旱综合风险区划,但其将复杂的干 旱现象归结于单一的原因,未能反映干旱的机理。王林 等<sup>[10]</sup>研究指出,在中国区域,帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)适用于表征长期干旱,对 短期干旱较难以评估<sup>[11]</sup>。周磊等<sup>[12]</sup>通过对标准化降水指 数(Standardized Precipitation Index, SPI)分析华北平原 发生干旱的频率和强度,但由于气温升高导致的蒸散发 作用增强已经不容忽视, SPI 指数仅考虑降水的作用,未 考虑气温变化带来的影响,具有一定的局限性<sup>[13]</sup>。

标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)能综合考虑降水和蒸散的作用,且能基于多时间尺度合理地评估干旱<sup>[14]</sup>。关于 SPEI

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0300404、2016YFD0300304、2017YFD0300105)

指数的研究已取得一些成果, 庄少伟等<sup>[15]</sup>的研究指出, 由于增温的影响, 相较于 SPI 指数等, SPEI 指数在华北 平原更加适用, 但这个研究结果基于年尺度, 对于生长 季、关键生育期、月份尺度等多时间尺度的干旱变化特 征未进行有效的评估和验证; 王理萍等<sup>[16]</sup>研究指出, 相 较于 PA 指数、SPI 指数等, SPEI 指数在冬季适用性欠佳, 这可能是由于 SPEI 指数对降水的敏感度高, 而夏秋季 SPEI 指数的适用性更强。

关于 SPEI 指数的计算方法多采用 Thornthwaite 公式 (SPEI TW 指数) 以及 Penman-Monteith 公式 (SPEI PM 指数)。传统 SPEI 指数计算方法采用 Thornthwaite 经验 公式估算潜在蒸散量(ET0\_TW),进一步计算出 SPEI\_TW 指数。SPEI TW 指数适用于湿润区,对半干旱区和干旱 区的估算效果较差<sup>[17]</sup>,这是由于 SPEI\_TW 指数的计算过 程中仅考虑了温度和降水量,没有考虑与蒸散有关的、 风速、植被、湿度等气象因素,以及海拔、纬度等非气 象因素的影响,在全球变暖的背景下存在局限性。段莹 等<sup>[18]</sup>的研究结果表明,SPEI TW 指数对降水的敏感度偏 高,对干旱的表现具有滞后性,且对冬季干旱的旱涝评 估有所偏差。采用 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散量 (ET<sub>0</sub> PM),求出 SPEI PM 指数,这种方法在部分地区 和季节有较好的效果,但仍有不足。SPEI PM 指数的计 算过程中过于依赖降水量,当降水变率较大时,会导致 SPEI PM 指数值不准确。因此,有必要进一步分析 SPEI TW 指数与 SPEI PM 指数在区域和季节上的适 用性。

农业干旱是作物需水与供给不平衡所致,在干旱指数的研究中,Thornthwaite 公式以及 Penman-Monteith 公式均采用潜在蒸散量代替作物需水量,对评估农业干旱的适用性有一定影响。为此,本研究拟引进作物系数( $K_c$ ),以作物需水量代替潜在蒸散量( $ET_0_TW$ 、 $ET_0_PM$ ),计算出基于作物系数改进后的 SPEI\_ $K_c$ ,并基于 SPEI\_ $K_c$ 指数对华北平原冬小麦-夏玉米(麦玉)周年干旱时空特征进行分析,为该地区麦玉生产力的提升提供理论依据。

# 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况与数据来源

华北平原(黄淮海平原)位于中国东部,114°~121°E、 32°~40°N,包括北京市、天津市、河北省、山东省、河 南省5个省市区,总耕地面积达1.3亿 hm<sup>2</sup>。

气象数据来自于中国气象科学数据共享服务网的中国地面气候资料日值数据集(http://data.cma.cn/),数据集经过严格质量控制、检查和 R 语言编程进行订正。选择华北平原夏玉米-冬小麦种植区 48 个具有 1961-2017年完整时间序列逐日气象资料的台站作为研究站点,其分布于 5 个省市(京、津、冀、豫和鲁),如图 1。由于气候和播种期差异,将研究区划分为 3 个亚区,分别是京津冀地区(II区),共分布 17 个气象站点;山东半岛地区(II区),共分布 15 个气象站点;河南地区(III区),共分布 16 个气象站点。



图 1 研究区及 48 个气象站点分布



历史干旱灾情数据来源于中国农业气象灾情旬值数 据集(http://data.cma.cn),时段为 1991 年 9 月-2015 年 12 月,其数据根据 1991 年以来中国农业气象观测台 站上报的农业气象旬报资料整理得到。

# 1.2 研究方法

1.2.1 参考蒸散量的计算方法

1) 采用 Thornthwaite 方法计算潜在蒸散量  $(ET_0 TW)$ :

$$\mathrm{ET}_{0}\mathrm{TW} = 16K \left(\frac{10T_{i}}{H}\right)^{a} \tag{1}$$

式中 ET<sub>0</sub>\_TW 为月潜在蒸散量, mm/月;  $T_i$ 为 i 月的平均 气温, ℃; K 为修正系数; H 为年高温指数, 由 12 个月 的月平均热量指数  $h_i$  累加得到:

$$H = \sum_{i=1}^{12} h_i \tag{2}$$

$$h_i = \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514} \tag{3}$$

a 是由 H 决定的系数:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} H^3 - 7.71 \times 10^{-5} H^2 +$$

$$1.79 \times 10^{-2} H + 0.492$$
(4)

K由月份序数和纬度决定:

$$K = \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{\text{NDM}}{30}\right) \tag{5}$$

式中N为最大日照时数,h;NDM为每月的天数,d。

2)采用 Penman-Monteith 方法计算潜在蒸散量 (ET<sub>0</sub> PM)

FAO Penman-Monteith 方法克服了 Thornthwaite 方法的不足,计算公式如下:

$$\mathrm{ET}_{0}\mathrm{PM} = \frac{0.408\Delta(R_{n}-G) + \gamma \frac{900}{T+273}U_{2}(e_{s}-e_{a})}{\Delta + \gamma(1+0.34U_{2})} \quad (6)$$

式中 ET<sub>0</sub>\_PM 为潜在蒸散量, mm/d;  $\Delta$  为饱和水汽压-温 度曲线的斜率, kPa/°C;  $R_n$  为地表净辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d); G为土壤热通量, MJ/(m<sup>2</sup>·d), 在逐日或 10 d 尺度上计算 ET<sub>0</sub> 时, 土壤热通量相对较小, 可以忽略不计; T 为日平均气 温, °C;  $U_2$ 为 2 m 高度处风速, m/s;  $e_s$  为饱和水汽压, kPa;  $e_a$  为实际水汽压, kPa;  $\gamma$  为干湿表常数, kPa/°C。

采用 FAO 推荐公式将 10 m 高处的平均风速转换为

2 m 高处的平均风速:

式中 $U_{10}$ 为10m高度处风速观测值,m/s。

3)基于作物系数改进 SPEI\_K<sub>C</sub>

 $U_{2} = 0.748 U_{10}$ 

$$ET_{c} = ET_{0} PM \cdot K_{c}$$
(8)

式中  $ET_{C}$  为作物需水量, mm/d;  $K_{C}$  为作物系数。 1.2.2 作物系数  $K_{c}$  的估算

根据联合国粮农组织 FAO-56 推荐的标准作物系数 表,将作物分为不同生育期。在实际的农业生产中,由 于气候和播种期的影响,华北平原不同区域的作物生育 期日序存在差异<sup>[19]</sup>。因此,在计算过程中,只能取多年 平均值作为一种理论态,并且将研究区划分为3个亚区, 在方便计算的同时也尽量保持结果准确。表1中,生育 期日序采用30个农试站实测数据的多年平均值,并使用 插值的方法,确定逐日作物系数 K<sub>C</sub>值。

表 1 分区的各生育期平均作物系数 Table 1 Average crop coefficient during each growth period in each subarea

	日序 Day sequer	生育相	作物系数	
ΙX	Ш区	Ш区	Growth period	Crop coefficient
Zone I	Zone II	Zone III	1	I
1~46	1~44	1~42	越冬-返青	[0.74,0.82)
47~101	45~98	43~95	返青-拔节	[0.82,1.03)
102~125	99~122	96~118	拔节-抽穗	[1.03,1.44)
126~149	123~145	119~140	抽穗-灌浆	[1.44,0.61)
150~167	146~162	141~157	灌浆-收获	[0.61,0.50)
168~169	163~164	158~160	裸地	[0.50,0.51)
170~176	165~171	161~167	播种-出苗	[0.51,0.72)
177~205	172~201	168~200	出苗-拔节	[0.72,1.08)
206~228	202~226	201~228	拔节-抽穗	[1.08,1.30)
229~250	227~249	229~250	抽穗-灌浆	[1.30,0.87)
251~276	250~275	251~278	灌浆-收获	[0.87,0.50)
277~285	276~285	279~288	裸地	[0.50,0.57]
286~317	286~316	289~317	播种-分蘖	[0.57,0.80)
318~337	317~335	318~335	分蘖-越冬	[0.80,0.74)
338~365	336~365	336~365	越冬-返青	[0.74,0.82)

1.2.3 SPEI 指数计算

第一步,由 Thornthwaite 公式计算得到逐月潜在蒸散 量  $ET_0_TW$ ,由 Penman-Monteith 公式和作物系数  $K_C$ 计 算得到逐日潜在蒸散量和作物需水量,进而累加得到逐 月潜在蒸散量  $ET_0$  PM 和作物需水量  $ET_c$ 。

第二步,计算逐月降水量  $P_i$  与逐月潜在蒸散量  $ET_0_TW$ 、 $ET_0_PM$ 、作物需水量  $ET_C$  的差额  $D_i$ :

采用 Thornthwaite 方法:

$$D_i = P_i - (ET_0_TW)_i$$
 (9)  
采用 Penman-Monteith 方法:

$$D_i = P_i - (\mathrm{ET}_0 \mathrm{PM})_i \tag{10}$$

$$D_i = P_i - \left(\mathrm{ET}_{\mathrm{c}}\right)_i \tag{11}$$

$$D_{i,j}^{k}$$
表示第 $j$ 年第 $i$ 个月开始,  $k$ 个月内的累积降水蒸

散差额:

$$\begin{cases} X_{j,i}^{k} = \sum_{l=13-k+i}^{12} D_{j-1,l} + \sum_{l=1}^{i} D_{j,l} & i < k \\ X_{j,i}^{k} = \sum_{l=i-k+1}^{i} D_{j,l} & i \ge k \end{cases}$$
(12)

第三步,采用三参数的 log-logistic 概率分布函数对 *D*<sub>i</sub>数据序列进行拟合

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma^{\beta}}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2}$$
(13)

式中参数  $\alpha$ ,  $\beta \pi \gamma$  可以采用线性矩 (L-moment) 方法拟 合获得

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1) \beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)}$$
(14)

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \tag{15}$$

$$\gamma = w_0 - \alpha \Gamma \left( 1 + 1/\beta \right) \Gamma \left( 1 - 1/\beta \right)$$
(16)

式中*Γ*为阶乘函数, w<sub>0</sub>、w<sub>1</sub>和 w<sub>2</sub>为原始序列 D<sub>i</sub>的概率加 权矩,计算方法为

$$w_s = \frac{1}{N'} \sum_{f=1}^{N'} \left( 1 - F_j \right)^s D_i \tag{17}$$

$$F_j = \frac{f - 0.35}{N'}$$
(18)

(19)

式中 N'为参与计算的总日数。 对累计概率密度(P)进行标准化:

対象目観平岳反(I)近日标臣に:  $P=1-F(\mathbf{r})$ 

$$w = \sqrt{-2\ln(P)} \tag{20}$$

SPEI = 
$$w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}$$
 (21)

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

当累计概率 P>0.5 时:

$$w = \sqrt{-2\ln(1-P)} \tag{22}$$

SPEI = 
$$-\left(w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}\right)$$
 (23)

此处的 SPEI 分别为 SPEI\_TW (采用 Thornthwaite 公 式计算的 SPEI 指数)、SPEI\_PM (采用 Penman-Monteith 公式计算的 SPEI 指数)、SPEI\_K<sub>c</sub>(引进作物系数改进 后的 SPEI 指数)。

以上3种计算 SPEI 值的方法区别在于: SPEI\_TW、 SPEI\_PM 属于气象干旱指数,直接用于评估农业干旱可 能会产生偏差, SPEI\_K<sub>c</sub>加入了作物系数,并与作物生长 季结合,计算的作物需水量更准确,更能反映农田水分 供需的情况。但这3种计算方法的原理是相同的,公式 中降水和蒸散的函数形式也没有改变,因此仍然采用 SPEI 指数等级划分标准<sup>[20]</sup>,如表2 所示。

$$(\mathbf{7})$$

表 2	标准	化降水蒸散指数	(SPEI)	指数干旱等级划分	
Tab	le 2	Drought classifica	tion base	ed on Standardized	
Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)					

recipitation Evaportation index (51 Er)				
SPEI 值	干旱等级	干旱类型		
SPEI value	Drought classification	Drought grade		
>-0.5	0	无旱		
-1~<-0.5	1	轻度干旱		
-1.5~<-1	2	中度干旱		
<-1.5	3	重度干旱		

#### 1.2.4 不同时间尺度 SPEI 值

SPEI 指数能够表征不同时间尺度下的干旱情况,选 取月尺度、小麦关键生育期、玉米关键生育期、小麦生 长季、玉米生长季、麦玉周年,共 6 个时间尺度。当时 间尺度为 *k* 月时,则某月的水分盈亏量为前 *k*-1 个月与当 月水分盈亏量的累积之和。本研究针对不同作物、不同 时间尺度的设置表 3。

表 3 不同时间尺度 SPEI 指数

Table 3	SPEI index at different time scales			
研究尺度	时间尺度	选取 SPEI 值		
Research scale	Time scale/月	Selected SPEI value		
月	1	1-12 月的 SPEI 值		
小麦关键生育期	3	5月的 SPEI 值		
玉米关键生育期	3	8月的 SPEI 值		
小麦生长季	6	6月的 SPEI 值		
玉米生长季	6	10 月的 SPEI 值		
麦玉周年	12	10 月的 SPEI 值		

1.2.5 气候倾向率

当n为样本量, $x_q$ 为n的某一气候变量, $x_q$ 所对应的时间用 $t_a$ 表示,采用一元线性回归的方法:

 $x_q = a_a + b_b t_q$   $q = 1, 2, \cdots, n$  (24)

式中  $a_a$ 为回归常数,  $b_b$ 为回归系数, 可以用最小二乘法 估计。

常规方法计算时间  $t_q$  与变量  $x_q$  间的相关系数, 气候 变量  $x_q$  每 10 a 的气候倾向率记为  $b_b$  的 10 倍。用  $a_a$ 、  $b_b$ 的符号表明气候变量  $x_q$  的变化趋势: 当  $b_b > 0$  时,表明  $x_q$  随时间  $t_q$  呈增加趋势; 当  $b_b < 0$  时,表明  $x_q$  随时间  $t_q$  无变化趋势。 [b表示上升或下降的倾向程度,同时反映了上升或下降的 速率。r 为相关系数,象征着时间  $t_q$ 、变量  $x_q$  两者之间线 性相关的密切程度。判断气候变量  $x_q$  变化趋势是否显著 时,采用对 r 进行显著性检验。a'为显著性水平,当 $|r| > r_a'$ , 表示随时间  $t_q$  的变化,  $x_q$  的变化趋势是显著的,否则表 示  $x_a$  的变化趋势是不显著的。

# 2 结果与分析

#### 2.1 SPEI\_K。指数与 SPEI\_TW 指数和 SPEI\_PM 指数对比

通过查阅《中国农业气象灾情句值数据集》 (http://data.cma.cn/),整理1991-2015年间华北平原16 个代表气象站点的实际灾情数据。据统计,25 a 间干旱发 生次数共1015次,其中轻旱519次,中旱321次,重旱 175次。同时,基于1961-2017年逐日气象数据,计算 得出月尺度 SPEI TW 指数、SPEI PM 指数、SPEI K<sub>c</sub>指

#### 数的干旱等级。

根据 3 种 SPEI 指数干旱等级与实际灾情数据对比分 析,分为(实际)有旱评估为(指数)有旱、无旱评估 为无旱、有旱评估为无旱、无旱评估为有旱 4 种情况, 其中前 2 种记为指数评估正确,结果表明 SPEI\_Kc 指数 对小麦玉米周年干旱评估吻合率最高。如表 4 所示:在 (实际)有旱评估为(指数)有旱的情况下,SPEI\_Kc 指 数在代表气象站点的平均准确率为 76.13%,较 SPEI\_TW 指数、SPEI\_PM 指数分别提高 11.11、5.55 个百分点;在 无旱评估为无旱的情况下,SPEI\_Kc 指数准确率为 85.67%,较 SPEI\_TW 指数、SPEI\_PM 指数分别提高 1.36、 0.13 个百分点。

表	4 基于不同方法的评估历史灾情数据的准确率
Table 4	Accuracy of evaluating historical disaster data based on
	different methods

	地区 Regions	站点 Station _	评估结果站点占比		
评估结果			Proportion of stations corresponding		
Assessment result			to as	to assessment result/%	
	-		SPEI_TW	SPEI_PM	SPEI_K <sub>C</sub>
	河南	宜阳	83.33	88.89	94.44
		荥阳	70.97	74.19	77.42
		蔚氏	54.55	63.64	72.73
(		桐柏	67.74	70.97	74.19
(指数)评估有旱		正阳	66.67	72.22	77.78
(Fact) Drought		淮滨	72.73	81.82	90.91
(Index) Drought	山太	沂水	53.13	59.38	65.63
	山尓	胶州	62.82	65.38	66.67
	河北	宁阳	53.85	57.69	65.38
	平均值		65.09	70.46	76.13
	河南	长葛	83.73	85.56	86.09
		南召	83.82	84.31	85.05
(灾际) 壬早		桐柏	85.04	86.35	86.88
(指数)评估无早	山东	长青	84.03	84.52	85.01
(Fact) No drought		平阴	83.50	84.00	84.25
(Index)		博山	85.32	85.87	86.43
No drought		鄄城	86.92	87.85	88.79
	河北	张北	82.12	82.62	82.87
	平均值		84.31	85.14	85.67
计 CDEL TW CDE	I DM S	DELV	公别为其王	Thornthuvoito	公式

注: SPEL\_TW、SPEL\_PM、SPEL\_K<sub>C</sub>分别为基于 Thornthwaite 公式、 Penman-Monteith 和作物系数的 SPEI 值,下同。

Note: SPEI\_TW, SPEI\_PM and SPEI\_K<sub>C</sub> are SPEI calculated based on Thornthwaite, Penman-Monteith and crop coefficient, respectively, the same below.

SPEI\_K<sub>c</sub>指数对华北地区重大干旱事件的评估效果 明显优于其他 2 种指数。SPEI\_K<sub>c</sub>指数对华北平原历史上 几次重大的干旱事件,如 1965 年干旱、1968 年干旱、1972 年和 1992 年秋冬连旱,1997 年干旱、1999 和 2000 年夏 季干旱,2010 年山东干旱以及 2015 年干旱等事件检测率 达 100%。

# 2.2 麦玉周年干旱的空间分布

SPEI\_K<sub>c</sub> 指数在华北平原麦玉周年干旱评估中的适 用性优于 SPEI\_TW 指数和 SPEI\_PM 指数,因此基于 SPEI\_K<sub>c</sub>指数评估 1961-2017 年华北平原麦玉周年干旱 时空分布和变化特征。

近 57 a,华北平原小麦关键生育期尺度和生长季尺度的干旱特征如图 2 所示。轻度干旱平均发生频率为

33.56%, 多发生于河北省南部、山东省中部、河北省东 部等地区,河南省南部的淮滨市、山东省中部的昌邑市 轻旱发生频率均大于 40.00%。中度干旱平均发生频率为 9.76%,山东省西部、北京市、天津市、河北省北部地区 为高频发地。重度干旱平均发生频率为 6.90%,河南省中 部的通许市、山东省东南部的牟平市等地发生重旱发生 频率均为 10.53%,即近 57 a 有 6 a 发生重旱。 小麦生长季轻度干旱平均发生频率为 34.26%,特点为研究区北部发生频率高,中部和东部发生频率低。中度干旱平均发生频率为 9.82%,多发于山东省东部以及河南省南部。重度干旱平均发生频率为 6.62%,多发生于河北省中部,河北省发生频率平均为 7.01%,河北省南宫中旱发生频率最高为 10.71%;河南省发生重旱发生频率较低,平均发生频率 6.14%。



Fig.2 Distribution of drought frequency of key growing period and growth season of wheat in the North China Plain from 1961 to 2017

如图 3,近 57 a 华北平原玉米关键生育期轻度干旱发 生频率为 24.57%~42.10%,中度干旱发生频率为 5.27%~15.79%,重度干旱发生频率为 3.51%~10.52%。 轻度干旱平均发生频率为 33.44%,多发生于河北省南部、 山东省西部、河南省除豫中外大部分区域。中度干旱平 均发生频率为 10.56%,山东省以及北京市部分地区为中 等干旱的高频发地区;山东省中旱发生频率为 11.23%, 河北省中旱发生频率为 9.45%。重度干旱平均发生频率为 6.54%,多发生于河北省南部。

华北平原玉米生长季轻度干旱发生频率为 21.09%~ 43.86%,中度干旱发生频率为 3.51%~19.29%,重度干 旱发生频率为 3.51%~10.52%。轻度干旱平均发生频率 为 33.08%,多发生于华北平原中部和东部。中度干旱 平均发生频率为 10.34%,多发于河北省、山东省东部 以及中部部分地区。重度干旱平均发生频率为 6.40%, 山东省中部地区发生重旱发生频率较高,平均发生频率 为 7.13%。

图 4 为 1961-2017 年华北平原麦玉周年干旱频率分 布。轻度干旱多发生于河南省除豫中外大部分区域,平 均发生频率为 33.78%,河南省雎县轻旱发生频率最高为 46.43%。中旱的平均发生频率为 6.60%,北京市、天津市 以及河北省南部部分地区为中等干旱的高频发地区。重 度干旱平均发生频率为 6.80%, 多发生于河南省中部以及 山东省中部,其中河南省中部的荥阳市、长葛市发生重 旱发生频率高达 10.71%。

#### 2.3 麦玉周年干旱的变化趋势

SPEI\_K<sub>c</sub> 指数气候倾向率在小麦关键生育期、小麦和 玉米生长季以及麦玉周年尺度均大于 0,即 SPEI\_K<sub>c</sub> 指数 呈上升趋势,干旱程度降低;玉米关键生育期 SPEI\_K<sub>c</sub> 指 数呈下降趋势,干旱程度增加(图 5)。但气候倾向率总 体变化范围较小,干旱程度显著增加或下降的站点较少。

小麦和玉米关键生育期尺度的 SPEI\_K<sub>c</sub> 指数气候倾向率表现出相反的趋势。华北平原小麦关键生育期 SPEI\_K<sub>c</sub> 指数气候倾向率变化范围为-0.18/10 a~0.19/10 a, 平均值为 0.01/10 a,即过去 57 a,小麦关键生育期 SPEI\_K<sub>c</sub> 指数呈上升趋势,干旱程度降低。时空分布表现 为由东北向西南逐渐降低,河南南部地区以及山东东部 干旱程度增加,河北中部地区以及山东西部干旱程度降 低。玉米关键生育期 SPEI\_K<sub>c</sub> 指数气候倾向率变化范围 为-0.17/10 a~0.18/10 a,平均值为-0.009/10 a,表现为下 降趋势,干旱程度增加。从空间上来看,河北地区以及 山东东部地区干旱程度增加,河南省干旱程度降低。



Fig.5 Climatic tendency rate of SPEI\_K<sub>c</sub> during key growth period, growing season of wheat-maize and annual SPEI\_K<sub>c</sub> in the North China Plain from 1961 to 2017

小麦和玉米生长季 SPEI\_K<sub>C</sub> 指数的气候倾向率均表现为上升,即干旱程度降低。华北平原小麦生长季 SPEI\_K<sub>C</sub>指数气候倾向率变化范围为-0.17/10 a~0.23/10 a, 平均值为 0.02/10 a,即近 57 a 小麦生长季干旱程度降低,气候倾向率空间分布表现为由西南到东北呈上升 趋势。从空间上来看,河北北部、山东东部地区干旱 程度增加,河南北部地区、山东西部和河北南部干旱 程度降低。

华北平原玉米生长季 SPEI\_Kc 指数气候倾向率为 -0.12/10 a~0.22/10 a,平均值为 0.06/10 a,同样反映干 旱程度降低。其中,河北中部地区、北京市、天津市、 山东西部以及河北东部干旱程度降低,山东东部地区以 及河南南部干旱程度增加。

华北平原周年尺度 SPEI\_K<sub>C</sub> 指数气候倾向率范围为 -0.19/10 a~0.021/10 a, 平均值为 0.01/10 a, SPEI\_K<sub>C</sub> 指 数呈上升趋势,干旱程度降低。其中,河南南部、山东 东部、河北北部、北京以及天津部分地区干旱程度增加, 山东西部和河北南部表现为干旱程度降低。

综上,山东半岛和河南省南部等地区干旱愈加严重, 河南省北部以及河北省南部等地干旱程度降低。

在之前的研究中,华北平原麦玉生长季、关键生育 期、麦玉周年尺度上的干旱特征表现出不同趋势,进一 步深入地分析干旱变化趋势与降水量和需水量变化趋势 的因果关系。

小麦关键生育期的降水量气候倾向率空间分布表现为,河南南部地区降水呈减少趋势,山东北部以及河北、 北京、天津地区呈增加趋势,华北平原生育期降水平均 气候倾向率为-0.90 mm/10 a,总体呈下降趋势(图 6)。 从空间上来看,河南地区、山东东部以及河北北部地区 表现为上升趋势,河南省汝州、扶沟,山东省五莲等11 个站点表现为上升趋势,平均增幅7.10 mm/10 a。山东北 部以及河北南部地区表现为下降趋势,下降幅度为 -11.50~-6.80 mm/10 a,这些变化特征与该地区干旱特征 表现一致。



图 6 1961-2017 年华北平原麦玉关键生育期、生长季和周年尺度的降水量和作物需水量气候倾向率

Fig.6 Climatic tendency rates of precipitation and crop evapotranspiration during key growth period, growing season of wheat-maize and wheat-maize rotation in the North China Plain from 1961 to 2017

玉米关键生育期降水量气候倾向率变化范围为-33.55~15.25 mm/10 a,平均值为-7.07 mm/10 a。其空间分布表明,仅河北省北部的乐亭市,山东省东南部的青岛市(崂山区、长岛区)、烟台市,北京市共 5 个站点

表现为上升趋势,增幅为 0.20~2.30 mm/10 a,其他地区 均表现为下降趋势。

小麦生长季降水量气候倾向率发生范围为-15.19~ 6.61 mm/10 a,空间分布表现为由东北向西南呈减少趋 势,河南南部地区降水量下降幅度最大,平均下降-5.32 mm/10 a,因此该地区干旱程度增加。

玉米生长季降水量气候倾向率发生范围为-35.63~ 19.00 mm/10 a,东部呈下降趋势,西部表现为上升趋势。 玉米生长季作物需水量气候倾向率变化幅度为-26.90~ 7.10 mm/10 a。山东东部、河北北部以及河南南部表现出 下降趋势,有 30 个站点显著下降,其中河南省雎县、清 丰,山东省聊城下降幅度较高,均大于 20%。 山东东部呈下降趋势,河北北部地区和山东北部为上升 趋势。研究区平均变化幅度为-0.90 mm/10 a,总体呈下降 趋势。华北平原周年尺度作物需水量气候倾向率在河南南 部表现为上升趋势,河北北部以及山东西部表现为下降趋 势,因此麦玉周年尺度干旱变化趋势表现为河南南部干旱 程度增加,河北北部以及山东西部干旱程度降低。

# 2.4 不同年代际干旱特征变化

小麦和玉米各生育阶段不同年代际的干旱发生频率 如图 7 所示。



Fig.7 Interdecadal drought frequency in the North China Plain from 1961 to 2017

由图 7 可知,年代际尺度干旱发生频率总体呈略微 减小的趋势,较P1时段,P3时段的干旱发生频率在小麦 关键生育期、小麦生长季、玉米生长季干旱发生频率降 低,分别降低 4.59%、1.44%、4.11%,玉米关键生育期、 麦玉周年尺度表现为干旱发生频率增加,分别增加 2.26%、1.77%。小麦关键生育期、周年尺度,轻旱发生 频率表现为下降,分别降低 0.35%、16.72%; 玉米关键生 育期、小麦生长季、玉米生长季均表现为轻旱发生频率 增加,分别增加7.17%、10.45%、2.58%。中旱和重旱的 发生频率在各个生育期大致表现为不同程度的降低:其 中,小麦关键期、小麦生长季、玉米关键期、玉米生长 季、周年尺度,中旱发生频率分别降低 1.98%、1.72%、 3.92%、1.33%、0.12%, 重旱发生频率分别降低 2.28%、 3.19%、7.96%、5.38%、4.29%。重旱发生频率的差异较 大,其中周年尺度的重旱发生频率在 P1 时段、P2 时段、 P3 时段的发生频率分别为 8.33%、7.29%、4.04%, 波动 范围高达 51.50%。

# 3 讨 论

长期以来,学者们使用 Thornthwaite 经验公式计算 SPEI\_TW 指数,该经验公式在计算潜在蒸散量 ET<sub>0</sub>时仅

考虑了温度,而没有考虑与蒸散有关的风速、植被、湿 度以及动力学等因素。在全球变暖的趋势下,温度升高 导致 Thornthwaite 经验公式估算的 ET<sub>0</sub> 偏大;同时 ET<sub>0</sub> 也受到海拔、纬度等因素的影响,所以这种方法存在-定的局限性,导致蒸散量偏大或者偏小,进一步导致 SPEI 指数变化,从而低估或者高估真实的干旱情况。少数研 究采用 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散量 (ET<sub>0</sub> PM),进而计算 SPEI PM 指数,但仍未与具体的 农作物生长状况相结合,因此评估农业干旱时具有一定 的局限性。目前,已有学者开展了2种方法的对比研究, 刘珂等<sup>[21]</sup>指出, SPEI TW 指数计算较为简便, 但冬春季 节中国北方的蒸散发显著增加,因此冬春季节 SPEI PM 指数更合理地描述了干湿变化特征;赵静等<sup>[22]</sup>研究结果 表明, SPEI TW 指数适用于湿润地区, SPEI PM 指数改 进了 SPEI TW 指数在干旱区和冬季适用性不高的不足, 能够显著提高 SPEI 指数的区域和季节适用范围,满足我 国以季节性干旱为主的干旱评估需求。

利用 Penman-Monteith 公式计算的 SPEI\_PM 指数已 取得较大进步,本研究引进作物系数  $K_c$ ,在 SPEI\_PM 指 数的基础上得到 SPEI\_ $K_c$  指数。与实际灾情数据对比, 结果表明 SPEI\_ $K_c$  指数正确率高达 76.13%,评估干旱效 果优于 SPEI\_TW 指数、SPEI\_PM 指数。进一步使用 SPEI\_K<sub>c</sub>指数评估麦玉周年干旱特征,结果表明华北平原 在夏季干旱最为严重,玉米关键生育期和小麦生长季干 旱发生频率大于 50.00%,与周丹<sup>[6]</sup>、王江涛<sup>[23]</sup>的研究结 果相似;且山东半岛地区和华北平原的中部干旱情况较 轻,河南省干旱严重,研究区的东南部干旱频率小于西 北部,这与薛昌颖等<sup>[24]</sup>的结论大致相同。

本质而言, SPEI\_TW 指数、SPEI\_PM 指数和 SPEI\_K<sub>C</sub> 指数干旱评估正确率存在差异的原因在于计算的潜在蒸 散量不同。进一步研究表明,小麦关键生育期(4月) SPEI TW 指数中潜在蒸散量 ET0 TW 约为 SPEI Kc 指数 中蒸散量 ET<sub>C</sub> 的 51.82%, 因此造成了约 25.00%的站点 SPEI TW 指数低估了实际干旱等级; SPEI PM 指数多表 现为高估历史干旱等级, 11 月份有 4.16%站点表现为高 估,原因在于 SPEI TW 指数中潜在蒸散量 ET<sub>0</sub> PM 偏大, 约为 ET<sub>c</sub> 的 1.72 倍。对于温度较低的 2 月份和 4 月份, ET<sub>0</sub> TW 偏低; 而 10 月份温度高时, ET<sub>0</sub> TW 偏高, 这 与刘晓英等<sup>[25]</sup>、裴步祥<sup>[26]</sup>、Jacobs 和 Satti<sup>[27]</sup>的研究结 果一致。刘晓英等[25]针对华北平原潜在蒸散量的研究指 出,基于月尺度分析的 ET0\_TW 与 ETc 吻合程度可能会 因季节不同而存在差异。在温度高的时期, ET<sub>0</sub> TW 较 ET<sub>C</sub>偏高,其他季节尤其是冬季偏低。Jacobs 和 Satti<sup>[27]</sup> 在美国 3 个不同地点的比较也指出, ET<sub>0</sub> TW 在冬季偏 低,其他季节偏高。ET0 TW 和 ET0 PM 偏高或偏低导致 SPEI TW 指数和 SPEI PM 指数对干旱的高估或低估。

韦潇宇等<sup>[28]</sup>的研究中指出,华北平原夏玉米生长季 干旱程度呈加重的趋势,而本文的研究结果表明华北平 原干旱程度总体呈减小的趋势,导致这一差别的主要原 因在于其采用了 Thornthwaite 经验公式计算潜在蒸散量, Thornthwaite 经验公式过于依赖温度,在全球变暖的形势 下,温度升高,导致由 Thornthwaite 经验公式计算的潜在 蒸散量偏高,从而导致 SPEI\_TW 指数偏低,高估干旱程 度;魏堃等<sup>[29-30]</sup>采用 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散 量,得到华北平原干旱程度趋于下降的结果,与本研究 结果一致。本研究在前人研究的基础上引进作物系数 K<sub>c</sub>, 以作物需水量代替潜在蒸散量,降低了温度对 SPEI\_K<sub>c</sub> 指数的干预程度,评估干旱效果更佳。

除此之外,本研究使用的作物系数结合了 FAO-56 的推荐值以及前人研究中小麦和玉米作物系数的结果, 具有一定的普适性,但仍需进一步细化,今后的研究可 以结合大田试验,获得更加精确的作物生育期作物系数 变化曲线,使干旱监测结果更加精确。

# 4 结 论

本文利用华北平原多年气象数据,基于 Thornthwaite 公式、Penman-Monteith 和作物系数计算了标准化降水蒸散指 数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI), 分别表示为 SPEI\_TW 指数、SPEI\_PM 指数以及 SPEI\_K<sub>C</sub> 指数。并与历史灾情数据对比,研究这 3 个干旱指数在 华北平原麦玉周年干旱评估中的适用性。基于适用性最 优的 SPEI 指数从小麦和玉米的关键生育期尺度、生长季 尺度和麦玉周年尺度分析了 1961-2017 年华北平原冬小麦-夏玉米的周年干旱时空分布和变化特征,主要研究结论如下:

1)基于历史灾情数据对比,3个干旱指数中 SPEI\_K<sub>c</sub> 指数在华北平原麦玉周年干旱评估中的适用性最好。在 (实际)有旱且(指数)评估为有旱情况下,SPEI\_Kc指 数的准确率高达 76.13%,较 SPEI\_TW 指数、SPEI\_PM 指数分别提高 11.11、5.55 个百分点;在无旱评估为无旱 情况下,SPEI\_Kc 指数的准确率为 85.67%,较 SPEI\_TW 指数、SPEI\_PM 指数分别提高 1.36、0.13 个百分点。

2) 玉米关键生育期和小麦生长季干旱发生频率大于 50.00%, 且多发重旱, 小麦关键期重旱频率高达 10.71%。 从空间上来看, 小麦的生长季和关键生育期、玉米的生 长季和关键生育期干旱频率的空间分布分别呈现出高度 相似的分布规律; 山东半岛地区和华北平原的中部干旱 情况较轻, 河南和山东东部地区干旱程度呈增加趋势, 河南南部尤为严重。

3)不同时间尺度在年代际干旱频率总体呈略微下降的趋势:其中小麦关键生育期、小麦生长季、玉米生长季干旱发生频率降低,而玉米关键生育期、麦玉周年尺度表现为干旱发生频率增加。轻旱在大多时间尺度表现为发生频率增加,小麦生长季增加频率最高,中旱和重旱在所有时间尺度表现为下降。

#### [参考文献]

- Jefferson M. IPCC fifth assessment synthesis report: "Climate change 2014: Longer report": Key analysis[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2015, 92: 362-363.
- [2] 马柱国,邵丽娟.中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系[J].大气科学,2006,30(3):464-474.
  Ma Zhuguo, Shao Lijuan. Relationship between dry/wet variation and the pacific decade oscillation (PDO) in northern China during the last 100 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(3): 464-474. (in Chinese with English abstract)
- [3] Dai A, Trenberth K E, Qian T. A global dataset of Palmer Drought Severity index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(6): 1117-1130.
- [4] 郑大玮,李茂松,霍治国. 农业灾害与减灾对策[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
- [5] Ma Z, Fu C. Some evidence of drying trend over northem China from 1951 to 2004[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(23): 2913-2925.
- [6] 周丹. 1961-2013 年华北地区气象干旱时空变化及其成因 分析[D]. 兰州:西北师范大学, 2015.
  Zhou Dan. Spatial-temporal Changes and the Cause Analysis of Meteorological Drought in North China from 1961-2013[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [7] 吴霞,王培娟,公衍铎,等.黄淮海平原夏玉米干旱识别及时空特征分析[J].农业工程学报,2019,35(18):189-199.
   Wu Xia, Wang Peijuan, Gong Yanduo. Analysis of drought

identification and spatio-temporal characteristics for summer corn in Huang-Huai-Hai Plain in year of 1961–2015[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(18): 189-199. (in Chinese with English abstract)

[8] 王娜,王靖,冯利平,等.华北平原冬小麦-夏玉米轮作区 采用"两晚"技术的产量效应模拟分析[J].中国农业气象, 2015,36(5):611-618.

Wang Na, Wang Jing, Feng Liping, et al. Modeling the impact of "Double-Delay" technology on yield of wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(5): 611-618. (in Chinese with English abstract)

- [9] 刘荣花,朱自玺,方文松,等. 华北平原冬小麦干旱灾损风险区划[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1068-1072.
  Liu Ronghua, Zhu Zixi, Fang Wensong, et al. Risk regionalization of yield loss caused by drought for winter wheat in North China Plain[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(9): 1068-1072. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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.
  Wang Lin, Chen Wen. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2):423-431. (in Chinese with English abstract)
- [11] Palmer W C. Meteorology Drought[R]. Washington: No.30 US Department of Commerce, Weather Bureau Washington, 1965.
- [12] 周磊,武建军,吕爱峰,等. 华北不同地表覆盖类型区干 旱演变特征[J]. 地理研究, 2012, 31(4): 597-607.
  Zhou Lei, Wu Jianjun, Lv Aifeng, et al. Drought evolution of different land cover regions in North China[J]. Geographical Research, 2012, 31(4): 597-607. (in Chinese with English abstract)
- [13] Mckee T B, Doesken N J, Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales: Proceedings of Vulnerability[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [14] Vicente-Serrano S M, Beguerfa, Santiago S, et al. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [15] 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.
  Zhuang Shaowei, Zuo Hongchao, Ren Pengcheng, et al. Application of standardized precipitation evapotranspiration index in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(5): 617-625. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王理萍, 王树仿, 王新华, 等. 五种干旱指数在云南省的 适用性分析[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 117-124.
  Wang Liping, Wang Shufang, Wang Xinhua, et al. Feasibility study of five drought indices for use in yunnan province[J].
  Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(7): 117-124. (in Chinese with English abstract)
- [17] Zhou Jian, Wang Yanjun, Su Buda, et al. Choice of potential evapotranspiration formulas influences drought assessment:

A case study in China[J]. Atmospheric Research, 2020, 242: 104979.

- [18] 段莹,王文,蔡晓军.PDSI、SPEI及 CI 指数在 2010/2011 年冬、春季江淮流域干旱过程的应用分析[J]. 高原气象, 2013, 32(8): 1127-1138.
  Duan Ying, Wang Wen, Cai Xiaojun. Applied analyses on Palmer, SPEI and CI indexes of drought process in yangtze-huaihe river basins during winter of 2010/Spring of 2011[J]. Plateau Meteorology. 2013, 32(8): 1127-1138. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26-30.
  Liu Yu, Pereira L S. Validation of FAO Methods for Estimating Crop Coefficients[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(5): 26-30. (in Chinese with English abstract)
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会。气象干旱等级:GB/T 20481-2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [21] 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[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 23-36.
  Liu Ke, Jiang Dabang. Analysis of dryness/wetness over China using standardized precipitation evapotranspiration index based on two evapotranspiration algorithms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(1): 23-36. (in Chinese with English abstract)
- [22] 赵静,严登华,杨志勇,等.标准化降水蒸发指数的改进 与适用性评价[J].物理学报,2015,64(4):382-390.
  Zhao Jing, Yan Denghua, Yang Zhiyong, et al. Improvement and adaptability evaluation of standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(4): 382-390. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王江涛. 基于华北地区气象指数 SPI 干旱时空分析[J]. 水 土保持研究, 2019, 26(4): 203-207.
  Wang Jiangtao. Analysis on spatiotemporal pattern of SPI drought based on meteorological index in the North China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 203-207. (in Chinese with English abstract)
- [24] 薛昌颖,马志红,胡程达.近40 a 黄淮海地区夏玉米生长季干旱时空特征分析[J]. 自然灾害学报,2016,25(2):1-14. Xue Changying, Ma Zhihong, Hu Chengda. Spatiotemporal characteristics of drought during summer maize growing season in Huang-Huai-Hai area for recent 40 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(2): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘晓英,李玉中,王庆锁. 几种基于温度的参考作物蒸散 量计算方法的评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 12-18. Liu Xiaoying, Li Yuzhong, Wang Qingsuo. Evaluation on several temperature-based methods for estimating reference crop evapotranspiration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(6): 12-18. (in Chinese with English abstract)
- [26] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算方法的现状及发展[J]. 气象科技, 1985(2): 69-74.

Pei Buxiang. Calculation method for the determination of evaporation and transpiration and present situation and development[J]. Meteorological Science and Technology, 1985(2): 69-74. (in Chinese with English abstract)

- [27] Jacobs J M, Satti S R. Evaluation of Reference Evapotranspiration Methodologies and AFSIRS Crop Water Use Simulation Model[M]. Gainesville, Florida: University of Florida, Department of Civil and Coastal Engineering, 2001.
- [28] 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): 554-560,577.
  Wei Xiaoyu, Hu Qi, Ma Xueqing, et al. Temporal-spatial variation characteristics of drought in summer maize growing season in the North China Plain based on SPEI[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(4): 554-560, 577. (in Chinese

with English abstract)

- [29] 魏堃,张勃,吴乾慧,等.基于日尺度 SPEI 的黄淮海平 原冬小麦生育阶段干旱特征分析[J]. 干旱区地理,2019,42(5):1085-1093.
  Wei Kun, Zhang Bo, Wu Qianhui, et al. Drought characteristics of winter wheat in different growth stages in the Huang-Huai-Hai Plain of China based on the daily SPEI[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 1085-1093. (in
- Chinese with English abstract) [30] 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. Li Xiangxiang, Ju Hui, Liu Qin, et al. Analysis of drought characters based on the SPEI-PM index in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(6): 2054-2066. (in Chinese with English abstract)

# Spatiotemporal variation characteristics of drought trend at annual of wheat-maize in the North China Plain based on SPEI K<sub>C</sub> index

Ma Xueqing<sup>1</sup>, Hu Qi<sup>1\*\*</sup>, Wang Jing<sup>1</sup>, Pan Xuebiao<sup>1</sup>, Zhang Jun<sup>2</sup>, Wang Xiaochen<sup>1</sup>,

Hu Liting<sup>1</sup>, He Huayun<sup>1</sup>, Li Rong<sup>1</sup>, Xing Mengyuan<sup>1</sup>

College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
 Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China)

Abstract: The North China Plain (NCP) is an important wheat-maize production region in China with limited water resource. Drought is one of major agro-meteorological disasters for the local agricultural production. This study introduced crop coefficient Kc into calculation of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) to analyze drought condition. The method was compared with the two methods including SPEI based on Thornthwaite (SPEI TW) and Penman-Monteith (SPEI PM). Multi-year meteorological data in the North China Plain were obtained. The applicability of these three SPEI indexes in the annual drought assessment of wheat-maize was assessed based on historical disaster data. The spatial and temporal distributions and variations of annual drought during both winter wheat and summer maize growth season from 1961 to 2017 were analyzed. To understand the effect of climate change on wheat-maize, the study further analyzed the results at the key growth period scale and the annual scale. The results showed that SPEI\_K<sub>c</sub> could be a better index than SPEI\_TW and SPEI\_PM to evaluate crop drought. Compared with the observed actual disaster data, SPEI\_K<sub>c</sub> had the best applicability to assess annual scale of wheat-maize drought among the SPEI TW index and SPEI PM index in the North China Plain. For the condition with right evaluation when the drought was present, the average accuracy of SPEI Kc index in representing meteorological stations was up to 76.13%, which was 11.11 and 5.55 percent points higher than SPEI TW index and SPEI\_PM index, respectively. For the condition with right evaluation when the drought was not found, the accuracy of SPEI\_K<sub>c</sub> index was 85.67%, which was 1.36 and 0.13 percent point higher than SPEI\_TW index and SPEI\_PM index, respectively. Spatial distribution of drought during the key growing period and the growth season of wheat and maize showed highly similar rules: light drought frequency at the key growing period and the growth season of wheat was high in the north of Heibei Province and serve drought frequency was high in the North China Plain; moderate drought frequency at the key growing period and the growth season of wheat was high in the north of Heibei Province. The drought intensity was strong in the northwest of the North China, weak in the southeast, mainly in the Henan. The average frequency of light drought was higher than 33.08%, the frequency of moderate drought was 10.08%, the average frequency of severe drought was higher than 6.14%. The drought frequency in the North China Plain showed a slight decreasing trend. The frequency of light drought increased at majority timescale and moderate drought and severe drought decreased at all of time scale. Moreover, the drought frequency decreased during the key growing period of wheat and the growing season of wheat and maize, and increased during the key growing period of maize and wheat-maize rotation. Our study revealed the temporal and spatial variation and the characteristics and causes of meteorological drought in North China Plain, and provided reasonable measures to deal with climate change.

Keywords: drought; crops; precipitation; SPEI; crop coefficient; the North China Plain; wheat-maize growing season