

杨雪婷, 曹永强, 李可欣, 等. 基于 SAPEI 的河北省玉米生育期旱涝演变特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 407-416. YANG X T, CAO Y Q, LI K X, et al. Evolution characteristics of droughts and floods in different stage of maize in Hebei Province based on SAPEI [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 407-416. (in Chinese)

基于 SAPEI 的河北省玉米生育期旱涝演变特征

杨雪婷¹, 曹永强², 李可欣¹, 任博¹, 周姝含¹, 赵慧¹

(1. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029; 2. 天津师范大学京津冀生态文明发展研究院, 天津 300387)

摘要:为探究河北省玉米生育期旱涝演变特征,通过构建标准化前期降水蒸散指数(standardized antecedent precipitation evapotranspiration index, SAPEI)和利用气象站点逐日气象数据,对河北省 1980—2020 年玉米生育期内旱涝特征演变进行时空分析。结果显示:1980—2020 年河北省 SAPEI 在玉米初始生长期、快速发育期、发育中期和成熟期 4 个生育阶段内波动变化区间为-1.0~1.5,且初始生长期波动呈上升趋势;SAPEI 空间变化总体特征表现为初始生长期和快速发育期玉米生长气候湿润化趋势表现明显,生育中期和成熟期东部及南部气象站点表现为变旱趋势;玉米生育期内多年平均早积指数 $Q_{早}$ 总体呈东南高西北低的格局分布,即西北部大于东南部;多年平均渍积指数 $Q_{渍}$ 在 21.07~37.85 内变化,年均早积与渍积指数的分布格局与河北省降水分布格局相呼应。研究结果可为河北省农业气象灾害风险评估和防灾减灾管理决策提供理论依据。

关键词: SAPEI; 渍积/早积指数; 玉米生育期; 旱涝特征; 河北省

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0041

在全球变化大背景之下,极端气候事件频发重发,导致受灾区域和风险都持续增加。其中,旱涝灾害影响最为广泛,尤其是对农业生产的影响更是不容小觑^[1]。我国灾害发生类型多种多样与复杂的地貌类型密切相关,在多种自然灾害综合影响之下成为世界上受灾最严重的国家之一^[2],气象灾害(70%以上)发生次数较多、影响较深的地区在全国分布广泛^[3]。总之,掣肘我国农业生产发展的主要气象灾害存在着明显的地域差异,主要有旱涝、寒潮和风暴潮等,复杂严峻的自然灾害持续对人们的生产生活带来了不利影响^[4-5]。国家气候中心数据显示,2021 年我国农业受灾面积高达 $1.17 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。因此,面对复杂多变气象灾害,如何掌握其发展变化特征,制定相关防灾减灾措施、提升农业旱涝灾害应对防御能力逐渐成为目前最主要的研究热点。

近年来,国内外学者在旱涝灾害研究方面取得重大进展,利用气温、降水和土壤湿度等相关资料

开展了关于旱涝指标的相关研究。Nkiaka 等^[6]对乍得湖 Logone 集水区域干/湿状况进行了分析,通过计算标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)和标准化流量指数(standardized runoff index, SSI)发现,1950 年至 1970 年流域普遍湿润,中间存在一些水文干旱事件,总体而言,苏丹地区容易发生干旱,萨赫勒地区容易发生洪涝。Nie 等^[7]结合重力恢复和气候实验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)卫星观测地面储水量(terrestrial water storage, TWS)变化,采用气象干旱指标或其他确定的灾害信息,以确定干旱/洪水的发生和严重程度。同时,该实验的建立还能够独立检查全球旱/涝灾情特征。史本林等^[8]基于 1961—2016 年实测气象数据,结合标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)、干旱频率和干旱强度指标,对月度、季度和年度 SPEI 值进行计算,研究表明随着跨越时间尺度增大,SPEI 值

收稿日期: 2023-01-15 修回日期: 2023-03-16 网络出版时间: 2023-04-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230412.1037.006.html>

基金项目: “一带一路”水与可持续发展科技基金资助项目(2021nkzd02); 辽宁省兴辽英才项目资助(XLYC2008033; XLYC2007111); 辽宁省重点研发计划(2020JH2/10200043)

作者简介: 杨雪婷(1995—),女,宁夏银川人,主要从事水文水资源研究。E-mail: 1808918273@qq.com

通信作者: 曹永强(1972—),男,内蒙古乌盟人,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

波动减小,干旱频率在研究年份表现出地区间差异较大分布不均衡的特征。其次,通过评估旱涝灾害发生风险,学者们开展了旱涝灾害成因的相关分析与研究。Pei 等^[9]对中国省级行政区域旱涝风险进行分析后得出:时间上,各地区水旱灾害风险均呈下降趋势;空间上,东北和华北地区是干旱发生的高风险区域,南方是洪水高风险多发区。降水是水旱灾害的重要自然因素,地区经济发展水平与水旱灾害联系密切。曹永强等^[10]从月尺度入手,对辽宁省春玉米生育期内干旱变化特征进行探究可得,全生育期干旱站次比以 0.41%/(10 a) 上升,干旱频率由西北向东南递减,频发区位于辽西地带,还认为降水量和气温对玉米发生干旱有直接影响,需要做好玉米抗旱工作。除此之外,基于全国^[11]、区域^[12-13]和省级^[14-15]相关旱涝特征及其演变研究也为后续的旱涝分区域防灾减灾提供了参考。

河北以环抱之势与北京相连,是华北平原的重要组成部分,位于华北平原北部,东部与天津毗连,濒临渤海。全省主要分布在 400 mm 等降水量线以东的东部季风区,但大陆性气候特征显著,属于温带大陆性季风气候,四季分明,年均降水量 484.5 mm,降水空间分布与当地地势条件相吻合,由东南向西北递减。河北省作为我国经济发展水平较高的东部地带,在国家推进中西部发展战略中地位十分重要,也是我国粮食主产区之一,在全国粮食生产格局中占有重要地位^[16]。当前,面对全球气候变暖的严峻形势,全球气温不断升高,河北省内降水量也在不断减少,旱涝灾害频发使玉米生长环境改变,对农业生产经济活动影响巨大^[17-18]。以往的研究大都从年、季和月尺度入手探究某一区域旱涝特征,研究结果反映出整体水分状况变化,无法反映逐日演变规律。因此,在前人研究基础上,采用日尺度标准化前期降水蒸散指数(standardized antecedent precipitation evapotranspiration index, SAPEI)对玉米不同生育期旱涝演变特征进行相关分析,以期对河北省农业气象灾害风险评估和管理决策提供一定参考和理论支撑。

1 数据与方法

1.1 数据来源

联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)提供的作物生育期划分^[19],为本文玉米生育期划分提供了参考

依据。再结合河北省具体实际生产情况将河北省玉米生育期划分为 6—9 月,主要包括 4 个生长阶段,分别为:初始生长期(6 月中旬—6 月下旬)、快速发育期(7 月上旬—7 月下旬)、发育中期(8 月上旬—8 月下旬)以及成熟期(9 月上旬—9 月下旬)4 个阶段^[20-21]。本文气象数据资料主要来源于中国气象数据网平台(<http://data.cma.cn>),主要涵盖了时间跨度为 1980—2020 年的日平均气温、日最高和日最低气温、降水量、相对湿度、日照时数和风速等观测资料。对于个别站点数据缺失的情况,进行插补将数据补充完整,以此来保证选用数据的完整性和连续性。图 1 是河北省 17 个气象站点分布情况。

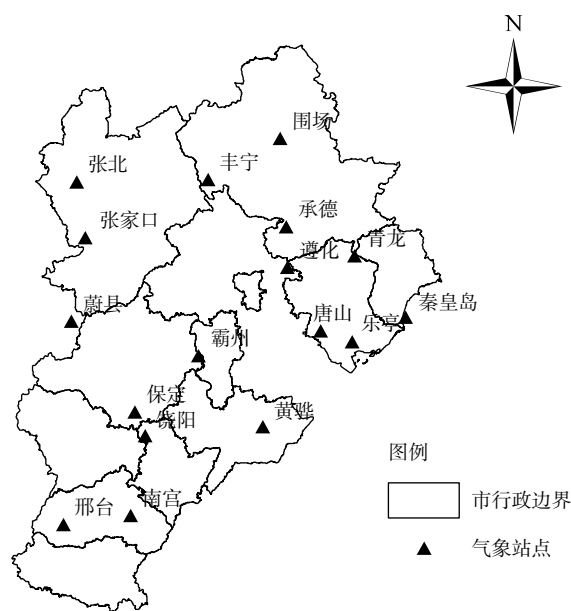


图 1 河北省 17 个气象站点分布状况

Fig. 1 Distribution of 17 meteorological stations in Hebei Province

1.2 研究方法

自然因素(气温、降水和蒸散状况等)是旱涝灾害发生的前提条件,而自然环境下的类活动(灾害防治技术、管理等)也十分重要,二者缺一不可。因此,在研究区域旱涝影响状况时,须通过综合性较强的旱涝指标来反映客观实际情况。为反映河北省玉米生育期内旱涝特征状况,引入 SAPEI 进行相应计算,该指数不仅能够通过降水时间和降水量对单日旱涝状况进行评估,也考虑土壤中前期水分的影响,综合性较强,监测精确度较高^[22]。SAPEI 具体计算步骤如下:

计算作物蒸散量 ET_c 。主要参考 FAO 推荐使用的 Penman-Monteith 公式进行计算,该公式综合考虑温度、气压和风速等气象因素计算农作物的蒸散量, ET_0 作为参考蒸散量不能够具体的反映出农

作物水量变化,因此又通过作物系数 K_c 来计算调整后的 ET_c ^[21]。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{G_n}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + G_d u_2)} \quad (1)$$

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (2)$$

式中: R_n 为净辐射, MJ/(m²·d); G 为热通量密度, MJ/(m²·d); T 为日平均温度, °C; u_2 为 2 m 高处风速, m/s; e_s 为饱和空气水汽压, kPa; e_a 为空气水汽压, kPa; Δ 为饱和水汽压-温度曲线的梯度, kPa/°C; γ 为湿度计常数; G_n 、 G_d 为常数, 在计算过程中分取值 900 和 0.34。各因子相关计算详见参考文献 [21]。

计算日农田水分收支量 ΔW 。在没有灌溉且忽略地表径流和地下水的影响时, 将降水量作为土壤湿润层含水量的补给, 此时作物需水量为消耗量。

$$\Delta W = P - ET_c \quad (3)$$

式中: P 为降水量, mm; ET_c 为调整后作物蒸散量, mm。

计算日前期累积降水与蒸散差值指数 I_{APE_j} 。考虑前期农田水分收支状况对当日产生的影响, 离当日时间越久, 产生影响越小。

$$I_{APE_j} = \sum_{i=0}^m (K^i \times \Delta W_i) \quad (4)$$

式中: m 为前推天数, 可取值 100; i 为前推日序数 (当日取值为 0); j 为累积日数, $j=1, 2, \dots, n$; K 为衰减系数, 按经验取 0.955; ΔW_i 为第 i 日的农田水分收支量, mm。

对玉米生长期每日 I_{APE_j} 构成的序列。采用三参数的 log-Logistic 概率分布函数 $F(x)$ 对 I_{APE_j} 构成的序列拟合并进行标准化处理, 可得研究时段内每日对应 $F(x)$ 值:

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

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2} \quad (7)$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta) \quad (8)$$

$$\omega_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{1 - 0.35^s}{n} \right) I_{APE_i} \quad (9)$$

式中: Γ 为 Gamma 阶乘函数; ω_s 为 I_{APE} 序列的概率权重矩, $s=0, 1, 2$; n 为 I_{APE} 序列长度; i 为按升序排列时 I_{APE} 的序数。

对累积概率密度进行标准化, 得到所需的 SAPEI 值 I_{SAPE} :

$$V = 1 - F(x) \quad (10)$$

$$\omega = \sqrt{-2 \ln(V)} \quad (11)$$

当累积概率 $V \leq 0.5$ 时:

$$I_{SAPE} = \omega - \frac{c_0 - c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} \quad (12)$$

当累积概率 $V > 0.5$ 时:

$$I_{SAPE} = -\omega + \frac{c_0 - c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} \quad (13)$$

式中: $c_0=2.515\ 517$, $c_1=0.802\ 853$, $c_2=0.010\ 328$, $d_1=1.432\ 788$, $d_2=0.189\ 269$, $d_3=0.001\ 308$ 。

通过以上公式计算得出逐日 I_{SAPE} 之后, 对逐日旱涝程度参考 I_{SAPE} 旱涝分类等级进行判断。 I_{SAPE} 旱涝等级划分参照有关文献^[22-23]。见表 1。

表 1 标准化前期降水蒸散指数等级标准、累积概率

Tab. 1 The rating criteria and cumulative probability of standardized antecedent precipitation evapotranspiration index

旱涝等级名称	I_{SAPE} 阈值	累积概率
严重干旱	$I_{SAPE} \leq -2.0$	2.3
重度干旱	$-2.0 < I_{SAPE} \leq -1.5$	4.4
中度干旱	$-1.5 < I_{SAPE} \leq -1.0$	9.2
轻度干旱	$-1.0 < I_{SAPE} \leq -0.5$	15.0
正常	$-0.5 < I_{SAPE} \leq 0.5$	38.0
轻度渍涝	$0.5 < I_{SAPE} \leq 1.0$	15.0
中度渍涝	$1.0 < I_{SAPE} \leq 1.5$	9.2
重度渍涝	$1.5 < I_{SAPE} \leq 2.0$	4.4
严重渍涝	$I_{SAPE} > 2.0$	2.3

SAPEI 农业旱涝特征评价研究。对旱涝事件判别主要参考我国^[23] 对干旱和洪涝事件划分方式, 干旱事件判定标准主要是在 I_{SAPE} 持续 10 d 至轻旱及以上等级; 与此同时, 旱事件起始日期定义为第一次到达轻旱等级。同理, 涝事件判定标准主要是 I_{SAPE} 持续 10 d 轻涝及以上等级, 而涝事件起始日期定义为第一次达到轻涝等级。作物生育期内渍涝事件强度、渍涝发生频次与持续时间有关。因此, 农业渍涝强度需要用渍涝过程中的渍积指数 Q_w 来表示:

$$Q_w = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m (I_{SAPE_j} - I_{SAPE_{w0}}) \right] \quad (14)$$

式中: n 为渍涝过程数; m 为某一渍涝过程持续天数; I_{SAPE_j} 为渍涝过程中第 j 天的 I_{SAPE} ; n 为涝期持续时间。 $I_{SAPE_{w0}}$ 是渍涝发生界限值, 取值 0.5。

同理, 旱积指数 Q_d 可表示为

$$Q_d = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m (I_{SAPE_j} - I_{SAPE_{d0}}) \right] \quad (15)$$

式中: $I_{SAPE_{d0}}$ 为干旱发生界限值, 与上述渍涝界限值同理, 取值-0.5。

2 结果与分析

2.1 指标适用性检验

对日尺度 I_{SAPE} 进行计算时, 假设前期累积降水蒸散指数 (antecedent precipitation evapotranspiration index, APEI) 服从三参数 log-Logistic 分布函数, 当日尺度下的前期累积降水蒸散差值序列概率分布近似于 log-Logistic 曲线分布时, 可考虑选择 I_{SAPE} 来应用该序列对该区域旱涝情况进行分析。因此, 本文首先对选用的日尺度下 APEI 值 (I_{APE}) 是否服从 log-Logistic 函数分布进行检验, 再根据河北省不同区域气候特点和玉米种植分布, 选取具有代表性

的四大代表站点秦皇岛、南宫、蔚县和丰宁作为河北省东、南、西和北四大区域检验所需站点, 计算出这几个站点 1980—2020 年 I_{APE} 序列所得经验概率和三参数 log-Logistic 函数理论概率(图 2)。从图 2 可知, log-Logistic 进行拟合曲线与代表站点 I_{APE} 概率分布几近重合, 拟合重合度都比较高。为了拟合效果验证更加准确, 本文采用 $k-s$ 检验对 I_{APE} 序列进行拟合效果检验。 $k-s$ 检验稳定性强, 适用范围广, 能够较好地验证样本值是否符合某一分布^[24]。 $k-s$ 检验临界值 $D=0.058$, 河北省各气象站点 D 值为 0.037~0.097, 在所有站点中, 有 90% 以上的站点 D 值小于临界值并通过检验, 而个别未通过检验的站点主要是罕见极端降水对其产生了影响, 但是对河北省而言发生概率较低。可认为选用的 I_{APE} 序列符合 log-Logistic 函数分布, 所以选用 I_{SAPE} 反映河北省玉米水分日盈亏状况真实可行。

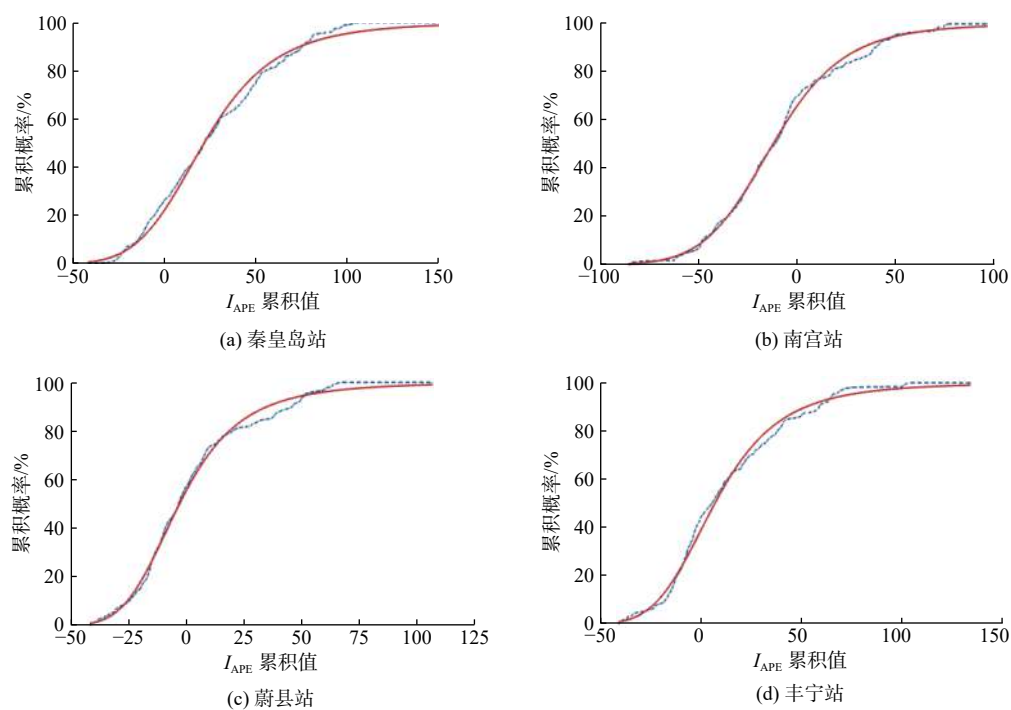


图 2 选取代表站 I_{APE} 序列经验概率与 log-Logistic 理论概率分布对比

Fig. 2 Comparison of empirical probability distribution of I_{APE} and the theoretical probability distribution of log-Logistic for selected representative stations

2.2 不同年代生育期内 I_{SAPE} 时间演变

为分析河北省不同年代际旱涝时间演变特征, 利用已有数据计算出 1980—2020 年玉米不同生育期内 I_{SAPE} , 结果见图 3, 1980—2020 年河北省玉米不同生育期内 I_{SAPE} 在零值上下波动变化, 旱涝交替发生频繁。对不同生长期 I_{SAPE} 进行线性趋势分析之后发现 4 个生长阶段 Sig 值均大于 0.05, 没有通过

0.05 显著性检验, 表明在生长期内 I_{SAPE} 变化剧烈。具体来看, 图 3(a) 显示初始生长期, I_{SAPE} 以 0.004 7 的速率呈现波动上升趋势, 最大出现在 1990 年, 为 1.47。根据 UF 和 UB 曲线交点可以看出突变年份分别出现于 1992、1999 和 2014 年, 这主要与这些年份有效降水量低有关^[25], 且初始生长期中涝次数和轻旱次数都高达 7 次 (17.07%)、轻涝次数达 16

次(39.02%),严重影响玉米生长发育。图 3(b)显示:快速发育期 I_{SAPE} 最大在 1995 年,为 0.71;最小值在 2014 年,为-0.52。研究年份正常次数占比最多,轻旱次数 8 次。发育中期 I_{SAPE} 最大值 0.29 在 1999 年,最小值-0.69 在 1995 年。根据 UF 和 UB 曲线交点可以看出突变年份在该阶段出现次数较多,说明夏季旱涝特征不稳定,且强度较大,产生的旱涝问题突出。研究年份轻旱和轻涝次数分别为 10 次、2 次。图 3(c)显示发育中期 I_{SAPE} 以 0.006 7 速率呈波动式下降,且大多为负值,干旱化趋势明显,表现为“旱—涝—旱”的变化特征。图 3(d)显示:成熟期的 I_{SAPE} 最大在 1999 年,为 0.93,接近中涝水平;最小值

则出现在 2004 和 2016 年,为-0.71。突变年份主要出现在 1987、2000 和 2005 年,研究年份轻旱次数高达 7 次,轻涝出现 6 次。综上,1980—2020 玉米不同生育期内 I_{SAPE} 波动变化明显。快速发育期和发育中期正常年份占比较多,表明该时段内旱涝变化特征较为稳定,且快速发育期轻旱年份出现在 2014 年。从 1992 年开始,正常年份与轻涝发生年份交替呈现,该时间段日降水量平均在 4~6 mm,表明该时段内降水强度和降水次数较多,有利于玉米生长发育^[26-27]。基于上述研究结果,河北省应针对玉米不同生育期积极完善相应的旱涝灾情防御措施,以确保河北省玉米产量的稳定。

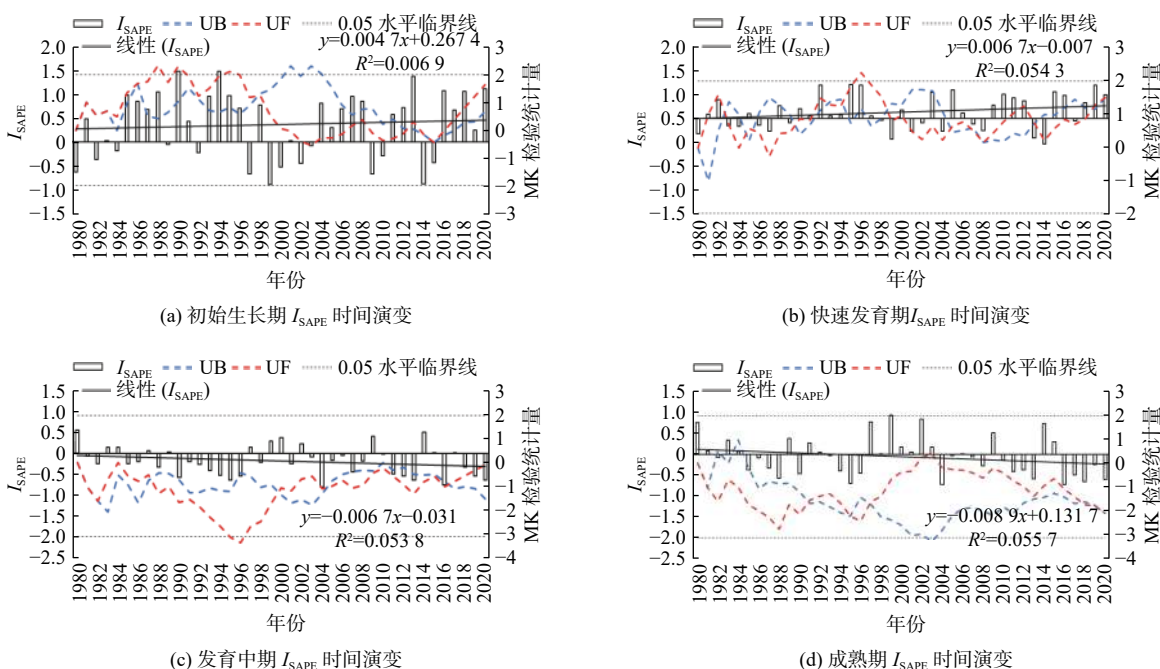


图 3 1980—2020 年河北省玉米不同生育期内 I_{SAPE} 时间演变特征

Fig. 3 Temporal evolution characteristics of I_{SAPE} values in different growth stages of maize in Hebei Province from 1980 to 2019

2.3 不同生育期内 I_{SAPE} 空间演变

为了进一步分析河北省玉米不同生育阶段 I_{SAPE} 空间演变特征,采用反距离权重插值法对研究年份不同生育阶段 I_{SAPE} 进行空间插值,进而分析河北省玉米生育期内旱涝空间演变特征,见图 4。由于玉米不同生育阶段气象要素的复杂变化,在不同生育阶段河北省玉米旱涝演变特征也呈现复杂化趋势。总体上,初始生长期和快速发育期 I_{SAPE} 呈现出由东南向西北递减的趋势,即西北干旱化程度大于东南部,发育中期和成熟期 I_{SAPE} 则与前两个生育阶段大致相反。在初始生长期阶段, I_{SAPE} 分别在 -0.53 ~ 0.88 波动变化: 低值区集中于张北、张家口

和南宫等地区,分别为-0.32、-0.53 和-0.35,且在初始生长期时达到轻旱状态;高值区则集中分布于东部秦皇岛、青龙和遵化等地区,分别为 0.78、0.81 和 0.88,这主要是河北省夏季暴雨强度中心分布在太行山东麓等地,使河北省东部及南部地区偏涝^[28]。在快速发育期阶段, I_{SAPE} 分别在-0.40 ~ 0.34 波动变化,低值区张家口地区 I_{SAPE} 为-0.4,相反高值区最大值 0.34 位于遵化地区。发育中期阶段 I_{SAPE} 位于-0.53 ~ 0.49,低值区在围场、秦皇岛、青龙、遵化等地区,高值区为张北、张家口和南宫等地区。在成熟期阶段, I_{SAPE} 集中于-0.62 ~ 0.95 波动变化,最大值出现于张家口地区,为 0.95,低值区在东部地带分布广泛。综

上,河北省玉米不同生育期旱涝特征主要变现为初始生长期和快速发育期玉米生长气候湿润化趋势表现明显;生育中期和成熟期东部及南部气象站点

表现为变旱趋势,这与赵玉兵等^[29]所得的研究结果相一致。

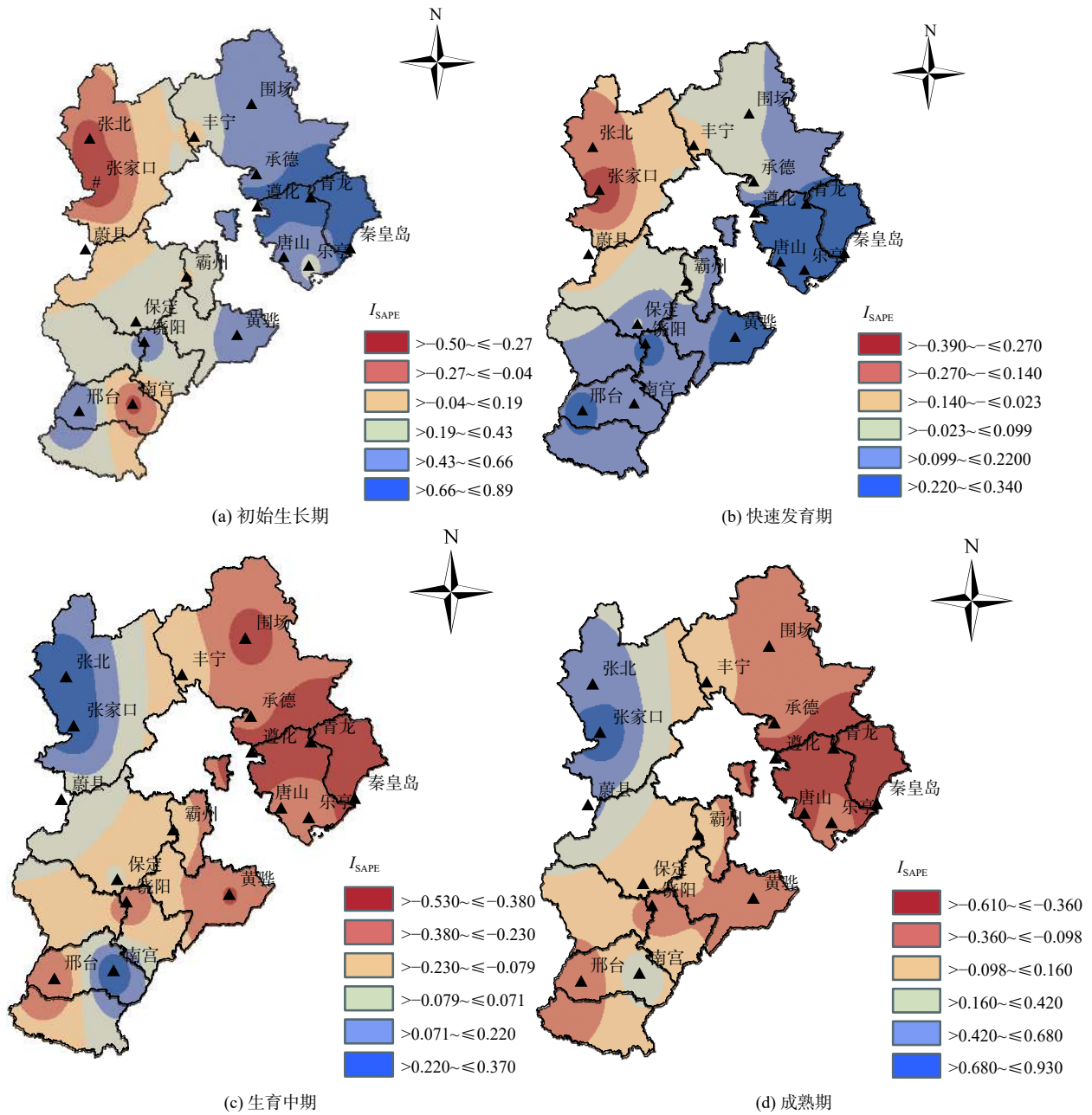


图 4 河北省玉米不同生育期 I_{SAPE} 空间演变特征

Fig. 4 Spatial evolution characteristics of I_{SAPE} values in different growth stages of maize in Hebei Province

2.4 生育期内玉米旱涝演变过程

通过计算得出的 1980—2020 年 I_{SAPE} 数据,并基于此数据分别计算河北省玉米全生育期内旱积指数 Q_d 的累年平均值 (Q_{di}) 和渍积指数 Q_w 的累年平均值 (Q_{wi}),探究河北省玉米生育期内旱涝演变过程。图 5 结果显示, Q_{di} 绝对值总体呈西北高东南低的格局分布,即干旱西北部大于东南部。河北省玉米生育期内 Q_{di} 在 -21.21 ~ -15.69 变化,其中,东部

沿海地区以及黄骅、饶阳和霸州地区的旱积指数在 -17.89 ~ -15.69 不等,干旱较为严重地区在张北、张家口和南宫地区,旱积指数分别为 -19.81、-21.21 和 -19.84。 Q_{wi} 在 21.07 ~ 37.85 区间内变化,大致呈现东南高西北低的格局。其中,秦皇岛、青龙和南宫地区渍积指数分别高达 34.27、37.86 和 36.16,远超全省平均水平。综上,河北省年均旱积与渍积指数分布格局与河北省降水分布格局相呼应。

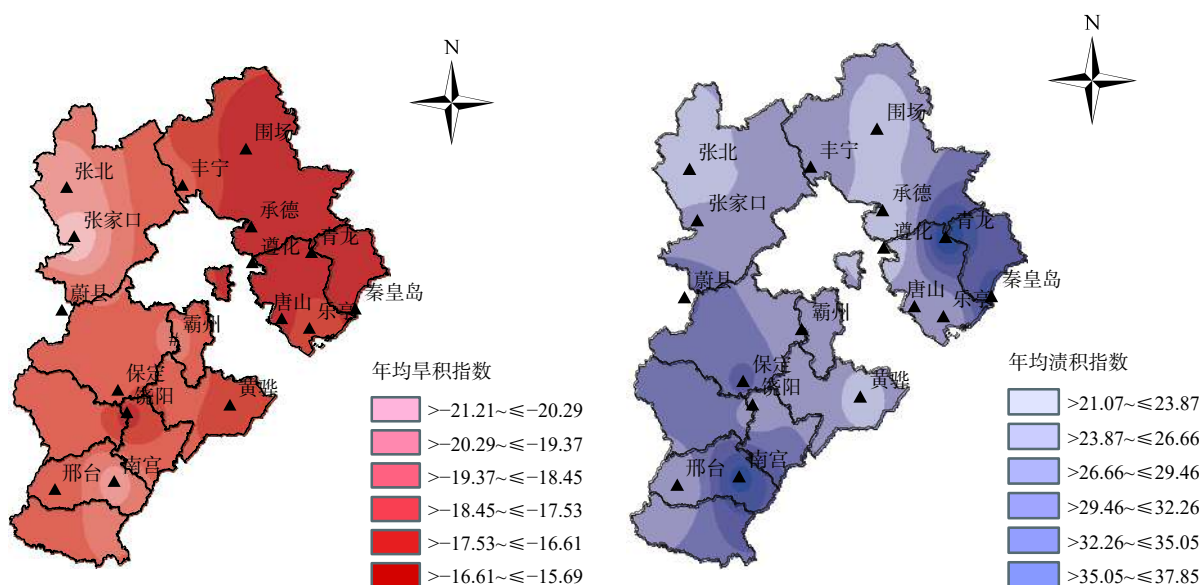


图5 河北省玉米生育期内旱积指数和渍积指数累年平均值空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of cumulative annual mean of drought and flood accumulation index during the fertility period of maize in Hebei Province

3 讨论

通过选取河北省东、南、西、北四大区域检验所需站点,在对前文提及的 I_{APE} 序列累积值与三参数 log-Logistic 概率分布相拟合和标准化处理之后,可以构建形成日尺度的 I_{SAPE} ,再对该指数在河北省全域不同干湿条件下的合理性进行验证。研究表明:所选取的站点 I_{APE} 累积数值与三参数 log-Logistic 概率分布基本相吻合,表明选取指标具有一定的合理性,对河北省不同区域农业旱涝监测预报具有一定的实际意义。但是 I_{SAPE} 在衡量水分收支状况时未考虑径流的影响,降水量代替下渗水量可能会使暴雨影响下的 I_{SAPE} 反映的渍涝程度增加。未来可将地下径流引入进行改进,使得农田水分状况的反映更加准确、真实。

本研究从时间和空间两个维度对河北省玉米生育期内旱涝特征进行综合分析可知,研究年份河北省玉米生育期内旱涝事件交替演变显著,计算结果表明生育初期和快速发育期(6—7月)气候呈湿润化方向演变,发育中期和成熟期(8—9月)气候干旱化趋势加重,这与赵玉兵等^[29]、王宏等^[30]的研究结果相一致。8、9月作为玉米生长的水分敏感阶段,若发生干旱极易造成玉米吐丝延迟和穗粒发育失败,导致穗粒数减少^[31]。因此,需要加强8、9月干旱事件的监测,及时有效进行防灾减灾。同时,与韦潇宇等^[32]的研究结果存在一定差异,这主要是与研究区域选取的时间尺度有关。本文选取玉米生长季日尺度 I_{SAPE} 表征旱涝演变特征,与河北省玉米

种植区域旱涝事件时间、强度相吻合,验证了 I_{SAPE} 反映河北省玉米生育期旱涝特征的客观性。 I_{SAPE} 在对单日旱涝状况进行评估时,将土壤中前期水分的影响也考虑进去,在今后的研究中可深入对比分析土壤湿度资料与 I_{SAPE} 指标。本文对研究数据进行适用性分析时采用的代表站点数量有限,今后在研究过程中需要选取更多站点进行区域合理划分。同时,还需要结合旱灾和洪灾数据对旱积指数和渍积指数进行验证。综上,通过研究分析可知旱涝灾害会导致农作物减产,从而降低土地利用率和复种率,同时还会影响农业用水水质,加剧水环境污染,这对于河北省农业缺水大省而言,无疑增加农业用水负担。因此,在未来需要采用先进的防灾预警手段提高旱涝灾害应对能力,全面科学分析河北省旱涝灾害演变特征,完善抗旱防洪体系,对实现河北省土地资源和水资源高效合理利用具有重要实践意义。

4 结论

基于日尺度的 SAPEI,结合反距离权重法,分析河北省 1980—2020 年河北省玉米不同生育期内 I_{SAPE} 时空变化,进一步探讨玉米不同生育期内旱涝演变特征,得出以下结论:

选用 SAPEI 能够真实地反映出河北不同干湿性地区玉米不同生育阶段旱涝状况及其变化特征,且在不同生育阶段表现出的旱涝特征与河北省降水时间变化特征相一致。

从时间尺度上来看,研究年份河北省 SAPEI 特征表现为:在玉米初始生长期、快速发育期、发育中期和成熟期 I_{SAPEI} 在零值上下波动变化,旱涝交替发生频繁;且在初始生长期以 0.23% 速率呈波动上升趋势,其他 3 个生育期呈波动下降趋势,快速发育期和发育中期正常年份占比较多。

在空间分布上,研究年份河北省 SAPEI 指数特征表现为:在初始生长期阶段, I_{SAPEI} 分别在 -0.53 ~ 0.88 波动变化,低值区集中于张北、张家口和南宫等地区且达到轻旱状态,高值区则集中分布于东部秦皇岛、青龙、遵化等地区;在快速发育期阶段, I_{SAPEI} 分别在 -0.40 ~ 0.34 波动变化,低值区张家口地区 I_{SAPEI} 为 -0.4,相反高值区最大值 0.34 位于遵化地区;在发育中期阶段, I_{SAPEI} 位于 -0.53 ~ 0.49,低值区在围场、秦皇岛、青龙和遵化等地区,高值区为张北、张家口和南宫等地区;在成熟期阶段, I_{SAPEI} 集中于 -0.62 ~ 0.95 波动变化,最大值出现于张家口地区,为 0.95,低值区在东部地带分布广泛。

河北省玉米生育期内 Q_{di} 在 -21.21 ~ -15.69 变化,干旱较为严重地区在张北、张家口和南宫地区, Q_{di} 分别为 -19.81、-21.21 和 -19.84,而 Q_{wi} 在 21.07 ~ 37.85 内变化,大致呈现东南高西北低的格局,其中,秦皇岛、青龙和南宫地区 Q_{wi} 分别高达 34.27、37.86 和 36.16。

参考文献:

- [1] 刘玲,沙奕卓,白月明. 中国主要农业气象灾害区域分布与减灾对策[J]. *自然灾害学报*, 2003(2): 92-97. DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2003.02.016.
- [2] 王静爱,史培军,王平,等. 中国自然灾害的时空格局[M]. 北京: 科学出版社, 2006. DOI: 10.3969/j.issn.1002-4549.2007.03.037
- [3] 史培军,应卓蓉. 中国气象灾害对宏观经济增长的影响分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(6): 747-753. DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2016.06.012.
- [4] 杨青青,罗纲,高超. 地理学视角的农业干旱研究进展[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(1): 27-34, 64. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2020004.
- [5] 桑婧,郝璐. 近30年中国主要农业气象灾害典型场时空格局分异特征[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(9): 1302-1314. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170697.
- [6] NKIAKA E, NAWAZ N R, LOVETT J C. Using standardized indicators to analyse dry/wet conditions and their application for monitoring drought/floods: A study in the Logone catchment, Lake Chad basin[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2017, 62(16): 2720-2736. DOI: 10.1080/02626667.2017.1409427.
- [7] NIE N, ZHANG W, CHEN H, et al. A global hydrological drought index dataset based on gravity recovery and climate experiment (GRACE) data[J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(4): 1275-1290. DOI: 10.1007/s11269-017-1869-1.
- [8] 史本林,朱新玉,胡云川,等. 基于SPEI指数的近53年河南省干旱时空变化特征[J]. *地理研究*, 2015, 34(8): 1547-1558. DOI: 10.11821/dlyj201508012.
- [9] PEI W, TIAN C Z, FU Q, et al. Risk analysis and influencing factors of drought and flood disasters in China[J]. *Natural Hazards*, 2022, 110(3): 1599-1620. DOI: 10.1007/s11069-021-05004-0.
- [10] 曹永强,李玲慧,路洁,等. 基于SPEI的辽宁省玉米生育期干旱特征分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(18): 7367-7379. DOI: 10.5846/stxb202009112367.
- [11] 姚亚庆,郑粉莉,关颖慧. 近60年我国旱涝灾情时空特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 228-232,263. DOI: 10.7670/j.issn.1000-7601.2017.01.34.
- [12] 王容,李相虎,薛晨阳,等. 1960—2012年鄱阳湖流域旱涝急转事件时空演变特征[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1): 207-222. DOI: 10.18307/2020.0120.
- [13] 张雪茂,杜华明,董廷旭,等. 南方农牧交错带 1960—2017年降水特征及早涝时空分布特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 126-132. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.05.018.
- [14] 杜张颖,陈松林. 安徽省旱涝灾害及其对农业胁迫变化[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2018, 13(4): 78-84. DOI: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2018.04.0011.
- [15] 曹永强,路洁,李玲慧. 基于SPEI指数的辽宁省多尺度旱涝特征分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2021, 19(2): 210-220. DOI: 10.13244/j.cnki.ji-whr.20200038.
- [16] 郝瑞彬,尹力军,张新锋. 河北省粮食产量变动及因素分解研究[J]. *唐山师范学院学报*, 2016, 38(5): 148-152. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9115.2016.0504.
- [17] 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. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2019032.
- [18] 魏军, 陈小雷, 俞海洋, 等. 1470—2014年河北省旱涝灾害特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(12): 103-109. DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.01.002.
- [19] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements: FAO Irrigation and drainage paper 56[J]. *Fao, Rome*, 1998, 300(9): D05109.
- [20] 代立芹, 李春强, 魏瑞江. 河北省夏玉米气候适宜度及其变化特征分析[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(Z1): 1031-1036. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.04.016.
- [21] 曹永强, 路洁, 冯兴兴. 辽西北春玉米旱灾灾损风险区划[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(5): 1346-1358. DOI: 10.31497/zrzyxb.20210519.
- [22] 陈金华, 余卫国, 刘瑞娜, 等. 日尺度标准化前期降水蒸散指数及其在安徽省的适用性分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(6): 919-928. DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180835.
- [23] 国家气候中心. 气象干旱等级: GB/T 20481—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [24] 吉曹翔, 李崇, 陈鹏心, 等. 沈阳市降水量正态分布检验及其时空变化特征[J]. *干旱气象*, 2018, 36(6): 954-962. DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0954.
- [25] 张力, 陈阜, 雷永登. 黄淮海地区冬小麦-夏玉米生育期内水分供需时空变化特征[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(4): 1-10. DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2020.04.01.
- [26] 刘伟, 王梦雨, 刘昕晔, 等. 1972—2017年河北省夏季降水的时空变化特征[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(10): 10-13,5.
- [27] 向亮, 郝立生, 安月改, 等. 51 a河北省降水时空分布及变化特征[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(1): 56-65. DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2014.01.008.
- [28] 曹永强, 宁月, 李玲慧, 等. 基于SPEI指数的河北省多尺度旱涝特征分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(3): 76-85. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2021038.
- [29] 赵玉兵, 孙东磊, 贾秋兰, 等. 基于SPEI指数的河北省南部夏玉米生长季干旱特征分析[J]. *气象科技*, 2020, 48(5): 766-773. DOI: 10.19517/j.1671-6345.20190445.
- [30] 王宏, 余锦华, 李宗涛. 近49年来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. DOI: 10.13878/j.cnki.jnuist.2015.03.009.
- [31] DENMEAD O T, SHAW R H. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on the development and yield of corn[J]. *Agronomy Journal*, 1960, 52(5): 272-274. DOI: 10.2134/agronj1960.000219620052.
- [32] 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. DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-04-0554.

Evolution characteristics of droughts and floods in different stage of maize in Hebei Province based on SAPEI

YANG Xueting¹, CAO Yongqiang², LI Kexin¹, REN Bo¹, ZHOU Shuhan¹, ZHAO Hui¹

(1. School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. Academy of Eco-civilization Development for Jing-Jin-Ji Megalopolis, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In the context of global change, extreme weather events are frequent and recurring, leading to a continuous increase in both affected areas and risks. Among them, droughts and floods have the most widespread impact and become one of the major meteorological disasters affecting agricultural production. According to the relevant statistical results, the area affected by agriculture in 2021 is as high as $1.17 \times 10^7 \text{ hm}^2$ in China. Hebei Province is located in the North China Plain of China which belongs to the temperate continental monsoon climate.

Under the influence of global climate change, the temperature in Hebei Province has increased while precipitation has decreased, and the occurrence of droughts and floods has changed the growth and development of corn, which has had a huge impact on agricultural production and economic activities. Therefore, the spatial and temporal evolution characteristics of droughts and floods during maize reproductive period are greatly significant for the disaster for the prevention and mitigation of maize production.

The research methods include SAPEI (Standardized Antecedent Precipitation Evapotranspiration Index) and ArcGIS to reflect the drought and flooding characteristics of maize in Hebei Province during the reproductive period. SAPEI can not only evaluate the single-day drought and flood conditions by precipitation time and amount, but also take into account the influence of soil moisture in the early stages, which is more comprehensive and has higher monitoring accuracy. And the map in ArcGIS will visualize the spatial evolution trend of SAPEI values.

Conclusion: (1) The SAPEI in Hebei Province fluctuated from -1.0 to 1.5 in the initial growth stage, rapid development stage, middle development stage and maturity stage of maize, and the fluctuation in the initial growth stage showed an upward trend from 1980 to 2020. (2) The overall spatial variation of SAPEI in Hebei Province was characterized by a wetting trend in the initial growth period and the rapid development period of maize. The trend of wetting was obvious during the initial growth period and rapid development period, while the eastern and southern meteorological stations showed a trend of drought during the middle and mature periods. (3) The multi-year average drought accumulation index Q_{dl} was generally distributed in a pattern of high southeast and low northwest during the maize reproductive period in Hebei Province, that means the drought in the northwest was greater than in the southeast. The multi-year average flood accumulated index Q_{wl} varied from 21.07 to 37.85 , and the distribution pattern of annual average of accumulated index of drought and flood corresponded with the distribution pattern of precipitation in Hebei Province. The results will provide a theoretical basis for agricultural meteorological disaster risk assessment and disaster prevention and mitigation management decisions in Hebei Province.

Key words: SAPEI ; drought and flood accumulation index; stage of maize; characteristics of drought and waterlog; Hebei Province