

淮北平原不同时间尺度下的夏玉米干旱特征

彭宇杰¹, 朱永华^{1*}, 吕海深¹, 陆玟¹, 朱婉婷¹, 王怡宁^{1,2}, 王振龙³

(1.河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2.南京水利科学研究所, 南京 210029;

3.安徽省(水利部淮委)水利科学研究所 水利水资源安徽省重点实验室, 合肥 230088)

摘要:【目的】在生长阶段和生长季内起始不定的10 d尺度下, 对淮北平原夏玉米的干旱时空特征进行研究, 探索不同土层深度下的干旱规律, 为夏季作物的抗旱灌溉提供更加科学合理的规划依据。【方法】基于干旱严重程度指数(DSI), 将2010—2019年表土层(0~10 cm)和根系主要分布层(0~50 cm)的干旱状态进行分级, 并利用M-K检验法和克里金空间插值法, 在生长阶段和生长季内起始时间不定的10 d两种较小时间尺度下, 对淮北平原夏玉米干旱的时间变化趋势和空间分布特征进行了分析。【结果】①自2016年生长季开始, 砀山、蒙城、谯城站的干旱程度和频率显著升高, 阜阳站干旱程度和频率都显著降低, 而宿州站的干旱事件则集中在2010—2012、2019年生长季; 与生长阶段尺度相比, 部分干旱事件在生长季内起始不定的10 d尺度下的干旱程度更大, 干旱频率也更高; ②各个生长阶段的多年平均干旱指数最高的是播种—出苗期, 达到了中旱以上, 此生长阶段的干旱频率同时也最高, 在40%以上; 2种尺度下重旱以上的干旱事件常发生在北部砀山和中部蒙城、宿州区域; 0~10 cm土层的干旱频率在西南部较高, 0~50 cm土层的干旱频率则在东部和北部较高; ③生长季内起始不定10 d尺度下, 每个生长季干旱程度最高的时段其起始时间多数处于播种—出苗的早期, 出苗—拔节的早期, 拔节—抽雄的中期, 且大都在重旱以上, 少数发生在8月与9月。【结论】淮北平原夏玉米在2016年生长季之后有显著的干旱突变趋势, 干旱程度和频率常常在播种—出苗期最高, 相比于生长阶段时间尺度, 在生长季内起始不定的10 d尺度下会识别出更高的干旱程度, 干旱频率也有所增大, 同时能更确定严重干旱事件的发生时段。

关键词: 夏玉米; 干旱严重程度指数; 时间尺度; 生长阶段

中图分类号: S423

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023507

彭宇杰, 朱永华, 吕海深, 等. 淮北平原不同时间尺度下的夏玉米干旱特征[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(6): 76-85.

PENG Yujie, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Spatiotemporal variations in summer maize droughts in the Huaibei Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(6): 76-85.

0 引言

【研究意义】淮北平原夏玉米的种植周期一般接近4个月, 从6月中上旬至9月中下旬, 正值高温多雨期。但因淮北平原年降水量变化率大, 所以干旱事件频发^[1-3]。而夏玉米对高温天气较为敏感, 干旱事件的发生常常伴随着极端高温天气, 夏玉米的生长发育状况会受到明显的影响, 乃至绝收^[4]。淮北平原作为我国重要的商品粮生产基地之一, 小麦-玉米轮作模式下的需水量和灌溉量都有显著的增加趋势^[5], 研究其干旱特征, 可以对干旱高发区域和时间规律有更加准确的认识, 从而做到合理规划灌溉, 有效防灾减灾。【研究进展】干旱指数是旱情模拟、监测与评估最常用的工具之一, 目前在农业干旱研究中常采用的

干旱指数有作物水分指数(CMI)和土壤水分亏缺指数(SMDI)等^[6]。此外, 因为农业干旱与气象干旱的高度相关性, 一些气象上的干旱指数也可以用来进行农业干旱研究。这些指标过去已经有了大量的应用实例, 以时间尺度为标准, Leng等^[7]利用标准化降水指数(SPI), 研究了全球范围内的小麦和玉米产量在年尺度下遭遇不同程度干旱时的损失风险; Yao等^[8]利用标准化降水蒸散指数(SPEI)和土壤水分亏缺指数(SMDI), 在1—9个月的时间尺度下, 分析了中国98个地点, 包括玉米在内的多种作物生长发育时干旱特征, 他们从年、季节等大时间尺度出发, 同时在较大的空间范围内探究作物受到干旱影响时的特征。而Dai等^[9]利用SPI指数表征了农业干旱发生的条件, 依据农业损失数据确定了SPI的最佳时间尺度为4个月左右; 番聪聪等^[10]基于河北省干旱的空间分布, 发现相较于年、季节尺度, 以逐月计的时间尺度下, SPI能够更好地描述干旱的实际情况, 可以发现, 依据研究目标和实际情况, 以月计的时间尺度能够让干旱指数更加准确。在实际生产中, 针对作物的生长季, 生

收稿日期: 2023-10-31 修回日期: 2024-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830752, 42071033); 国家青年基金项目(52109029)

作者简介: 彭宇杰(2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事农业干旱研究。E-mail: 221301020002@hhu.edu.cn

通信作者: 朱永华(1970-), 女, 教授, 博士, 主要从事生态水文、水环境保护和水生态修复研究。E-mail: zhuyonghua@hhu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

育期时间尺度下的干旱特征研究, 有很高的实践意义, 赵玉兵等^[11]采用标准化降水蒸散指数 *SPEI* 分析了河北省南部夏玉米从 1962—2018 年各个生长季时间尺度下的干旱变化特征; 马雪晴等^[12]通过作物系数 *K_c* 改进后 *SPEI*, 从作物生长季尺度、关键生育期尺度以及小麦-玉米周年尺度下分析了 1961—2016 年华北平原的作物干旱时空特征。除时间尺度之外, 针对干旱指数的本身也有从简到繁的发展, 如 *DSI* 综合干旱指数, Cammalleri 等^[13]提出了基于土壤水分数据的综合干旱指数 (*DSI*), 并利用 Lisflood 水文模型进行了验证, 证明 *DSI* 能够对欧洲干旱事件的规模和严重程度进行合理的估计。在提出这一综合干旱指数之后, Liu 等^[14]评估了目前使用较多的 8 种干旱指数在中国六类主要的植被土壤水分状况上的表现情况, 发现 *DSI* 的整体性能最佳; Elhag 等^[15]在 2001—2011 年的苏丹地区利用 *DSI* 和 *SPI* 对于干旱状况与夏季高粱产量之间的关系进行了研究, 结果表明 *DSI* 在农业干旱监测中, 可以作为作物产量估计的替代指标; Haroon 等^[16]使用巴基斯坦地区的 *DSI* 与 TRMM-PPTN 和 *SPI*-3 数据之间的空间相关性图来评估 *DSI* 的性能, 研究表明 *DSI* 能够作为识别干旱条件的良好指标; Zhang 等^[17]利用遥感数据得到 MODIS *DSI* 综合干旱指数, 并对华北平原的冬小麦产区的干旱状况进行了评估, 发现在冬小麦的抽穗期和灌浆期, 干旱对其影响最为显著。【切入点】对于干旱事件的研究, 通常可以总结为两个方面: 缺水程度和罕见性。在已有的农业干旱研究中, 采用的干旱指数多从作物缺水程度这一方面出发, 来描述其干旱状态, 而淮北平原夏玉米的干旱特征少有利用综合干旱指数从不同时间尺度上进行作物干旱的概况研究; 此外, 考虑到不同土层深度的土壤水分与干旱指数的响应关系存在一定的差异^[18], 采用较小的时间尺度能够更加精确的分析不同土层深度下干旱事件的动态演变特征^[19], 尤其是针对逐日周期下的短期干旱情形。【拟解决的关键问题】通过淮北平原

5 个水文气象站点 2010—2019 年的实测土壤水分数据得到干旱严重性指数 *DSI*, 在生长阶段和生长季内起始时间不定的 10 d 两种时间尺度下, 利用 *DSI* 来量化 0~10 cm 表土层和 0~50 cm 夏玉米根系主要分布层的干旱严重程度, 分析其在淮北平原的时空分布特征, 为农作物的防旱减灾灌溉规划提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

淮北平原位于我国中东部地区 (114°55′—118°10′E, 32°25′—34°35′N), 总面积达到 27 万 km², 涉及安徽、江苏、河南、山东 4 个省份, 是中国典型的南北方过渡气候区^[20]。淮北平原属于暖温带半湿润季风性气候, 优越的自然条件使其成为我国重要的棉粮油生产基地, 其多年平均降水量接近 900 mm, 在 5—9 月汛期的多年平均降水量能占到全年降水总量的 60%以上, 但年降水量变化率大, 导致干旱事件频发^[21], 淮河流域的干旱频率和干旱强度处于中国九大流域的平均水平之上^[22]。所选取的 5 个代表性水文气象站点: 砀山、蒙城、谯城、阜阳和宿州, 较均匀地分布在淮北平原区域, 其中砀山和谯城地区的土壤类型为黄潮土, 蒙城、阜阳和宿州地区属于砂姜黑土^[23]。

1.2 数据来源

本文使用的数据资料主要为淮北平原 5 个气象站点从 2010 年 1 月到 2020 年 1 月 10 a 间的逐小时土壤水分实测数据。依据淮北平原五道沟试验站试验报告^[24]中的夏玉米的多年生长发育记录, 可将夏玉米生育期划分为 5 个生长阶段, 即播种—出苗期 (6 月 10—20 日)、出苗—拔节期 (6 月 21 日—7 月 5 日)、拔节—抽雄期 (7 月 6—31 日)、抽雄—灌浆期 (8 月 1—15 日)、灌浆—成熟期 (8 月 16 日—9 月 15 日), 将每年 6 月 10 日至同年的 9 月 15 日定为夏玉米的一个生长季。参考五道沟水文地质参数试验报告可以确定部分关键土壤参数如表 1 所示。

表 1 关键土壤参数

Tab.1 Key soil parameters

土层深度/cm	平均体积质量/(g·cm ⁻³)	饱和含水率/%	田间持水率/%	毛管破裂含水率/%	凋萎系数/%	吸湿系数/%
0~10	1.339 05	39.6	30.7	19.5	14.8	7.4
0~50		29.6	26.5	18.6	14.4	7.2

1.3 研究方法

1.3.1 *DSI* 指数的计算方法

使用基于土壤水分的综合干旱指数 *DSI* 来研究淮北平原夏玉米的干旱特征, 该指数由缺水程度和较土壤正常状态下发生干旱的概率两部分组成。其中缺水程度是通过缺水指数 *d* 来表示, 将淮北平原田间含水率的 80%作为夏玉米整个生长季的临界含水率 θ_{cr} ; 通过夏玉米的凋萎系数可以得到其凋萎含水率 θ_{wp} 。

Cammalleri 等^[13]考虑到土壤水分和其水压在特定地点的关系, 认为 *n* 的取值范围大致位于 4~8 之间, 淮北平原的土壤水分研究区域最深为 50 cm, 其深度相对较浅, 且无其他详细资料, 因此可以选择使用中间值 6, 使用的公式为:

$$d = \frac{1}{1 + \left(\frac{\theta}{\theta_{50}}\right)^n}, \quad (1)$$

$$\theta_{50} = \frac{1}{2}(\theta_{cr} + \theta_{wp}), \quad (2)$$

式中： θ 为土壤含水率 (cm^3/cm^3)； θ_{cr} 为临界含水率 (cm^3/cm^3)； θ_{wp} 为凋萎含水率 (cm^3/cm^3)； θ_{50} 为 θ_{cr} 和 θ_{wp} 的平均值； n 为经验形状因子常数。

通过标准 Z 分数量化一次干旱事件的“异常”程度是常见的做法，预先假设数据服从正态分布，能够用变量标准化的总体，即一个特定地点多年数据的均值和标准差来计算给定月份、年份的 Z 分数。然而，双约束变量一般具有偏态分布的特征，Sheffield 等^[25]指出，通过 β 分布可以获得土壤水分数据更好的统计表征，即通过定义阈值，使用 $F(\theta)$ 函数来检测干旱事件。这种方法是通过公式 (3) 得到缺水程度 d 的 β 分布的累积密度函数 $F(\theta)$ ，将其构成的时间序列中位数作为正常状态 m ，并比较其他缺水程度与正常状态之间的概率距离，即 $|F(d)-F(d=m)|$ ，通过公式 (4) 标准化后得到 F^* ，最后通过公式 (5) 的拟合关系，可以把土壤比正常状态干旱的概率 F^* 转化为干旱概率指数 p ， p 指数是 0~1 之间的等间隔量，计算公式为：

$$F(d;a,b)=\frac{B(d;a,b)}{B(a,b)}, \quad (3)$$

$$F^*(d)=\begin{cases} \frac{F(d)-F(d=m)}{1-F(d=m)} & d \geq m \\ 0 & d < m \end{cases}, \quad (4)$$

$$p=e^{-\frac{(F^*(d)-1)^2}{0.03}}, \quad (5)$$

式中： $B(d;a,b)$ 为不完全 β 函数； $B(a,b)$ 为 β 函数； $F(d;a,b)$ 为 β 分布的累积密度函数； a, b 为 β 函数的形状参数； $F^*(d)$ 为 $F(d)$ 标准化后的百分位数； m 为该地区正常状态下的缺水指数。

对 DSI 指数的变化规律进行定性的考虑：从概念上讲， p 、 d 和 DSI 之间的相互关系应该允许 DSI 在 p 和 d 这 2 个指数一致时，与其大小相同， p 接近零或 d 接近零时， DSI 应该是小值，在其他所有情况下， DSI 应该是 2 个指数之间的中间值，且在 0~1 之间。综合考虑这些情况后，为了避免缺水状态或干旱概率这 2 个条件其中之一不被满足时，出现较高的 DSI

值，选择利用一个简单的乘法关系将 2 个指数结合起来得到 DSI 指数：

$$DSI=\sqrt{p \cdot d}, \quad (6)$$

由公式 (6) 可知，只有某一地区同时表现出一定的缺水程度，以及较正常状态下，较高的干旱概率时， DSI 指数才会将土壤状态识别为干旱。其中将 DSI 为 0 定义为无旱；0~0.25 为轻旱；0.25~0.5 属于中旱；0.5~0.75 属于重旱；0.75~1 属于特旱。

1.3.2 时空特征分析方法

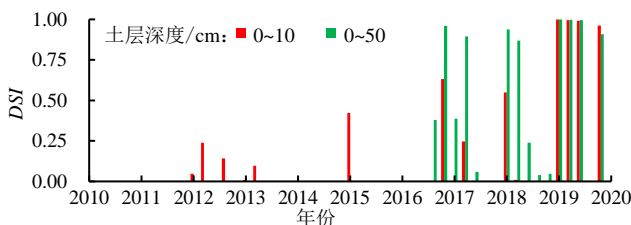
利用窗口长度为 10 d 的移动平均法，对夏玉米 2010—2019 年生长季的土壤水分时间序列进行计算，得到的一系列均值作为 10 d 尺度下的土壤水分值，每个 10 d 尺度的最早起始时间为 6 月 10 日，最晚为 9 月 6 日。其包含了传统意义上的旬尺度，同时在旬尺度基础上，对中间的过渡时间段有更加精细的考量，例如在上旬和中旬之间的 10 d 尺度。在夏玉米生长阶段与生长季内起始不定的 10 d 两种时间尺度下，采用 ArcGis 的克里金插值来对夏玉米的干旱程度和频率进行空间分布分析；对 2010—2019 年生长季干旱状况的时间变化趋势采用线性拟合法和 M-K 检验法进行分析，得到夏玉米干旱的时空分布规律。

2 结果与分析

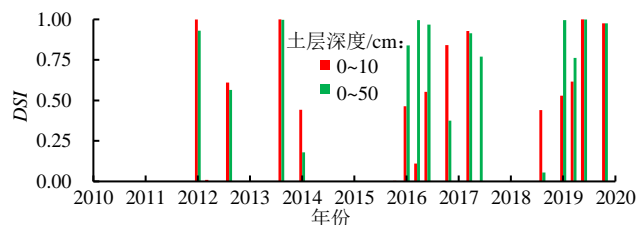
2.1 干旱程度的时间变化

2.1.1 年际变化趋势

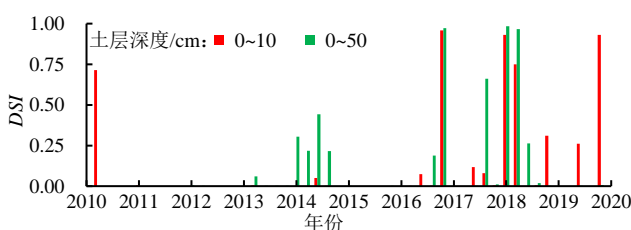
2010—2019 年生长季期间，两种时间尺度下的 DSI 变化趋势如图 1 和图 2 所示。砀山、蒙城、谯城 3 个站点的干旱集中在 2016—2019 年生长季，阜阳站的干旱高发时间集中在 2010—2015 年生长季，宿州站的干旱高发时间集中在 2010—2012 年，2019—2020 年生长季。0~10 cm 和 0~50 cm 土层的绝大多数的干旱会同时发生，部分仅仅会发生在表土层。



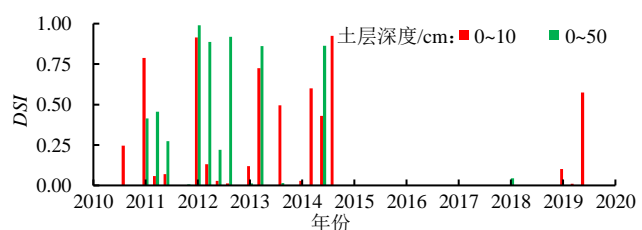
(a) 砀山站



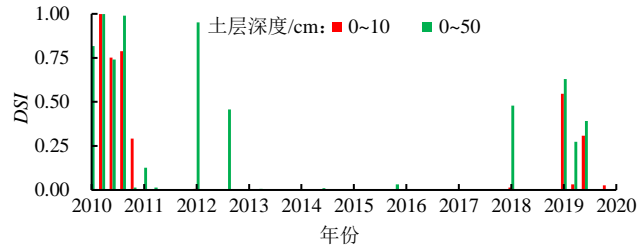
(b) 蒙城站



(c) 谯城站



(d) 阜阳站



(e) 宿州站

图 1 生长阶段尺度下的变化趋势

Fig.1 Trend at the time scale of growth stage

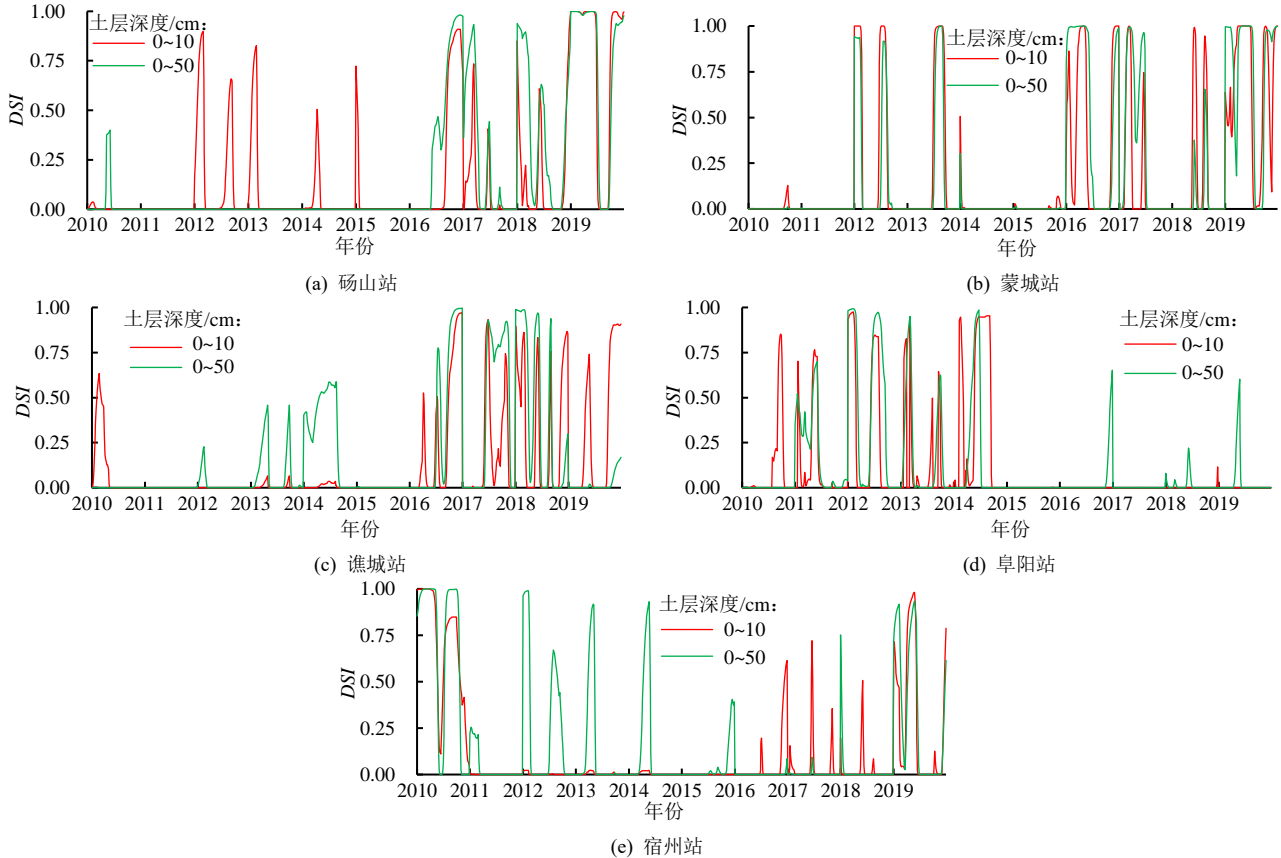


图 2 起始不定的 10 d 尺度下的变化趋势

Fig.2 Trend under a ten-day with uncertain start

M-K 趋势检验结果如表 2 所示,2 种时间尺度下, 阜阳站的表土层和主要根系分布层以及宿州站的表土层干旱状况为下降趋势, 其余站点均处于上升趋势, 但生长阶段尺度下的变化趋势并不显著, 多表现为正常范围内的波动状态。起始不定的 10 d 尺度下各站点的干旱程度和干旱频率都有一定程度的升高, 且大

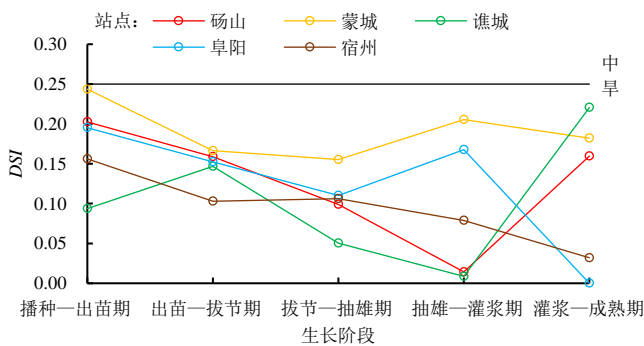
多通过了 0.01 的显著性检验。结合 2 种时间尺度下的变化特征, 可以认为宿州和阜阳区域在未来的干旱风险低, 且干旱状况的增长趋势缓慢, 其余 3 个站点存在较高的干旱风险, 同时有比较显著的增长趋势, 尤其是短期的干旱事件发生频率更高。

表 2 DSI 年际变化趋势

Tab.2 Inter-annual variation trend of DSI

站点	生长阶段时间尺度				起始不定的 10 d 尺度			
	土层深度/cm	M-K 统计量 Z	变化趋势	是否显著($\alpha=0.01$)	土层深度/cm	M-K 统计量 Z	变化趋势	是否显著($\alpha=0.01$)
砀山	10	2.58	上升	是	10	12.092	上升	是
	50	0.45	上升	否	50	3.229	上升	是
蒙城	10	2.23	上升	否	10	8.515	上升	是
	50	2.12	上升	否	50	9.265	上升	是
谯城	10	3.27	上升	是	10	14.312	上升	是
	50	0.25	上升	否	50	2.317	上升	否
阜阳	10	-2.09	下降	否	10	-9.484	下降	是
	50	-2.74	下降	是	50	-11.998	下降	是
宿州	10	-1.27	下降	否	10	-5.725	下降	是
	50	0.42	上升	否	50	1.771	上升	否

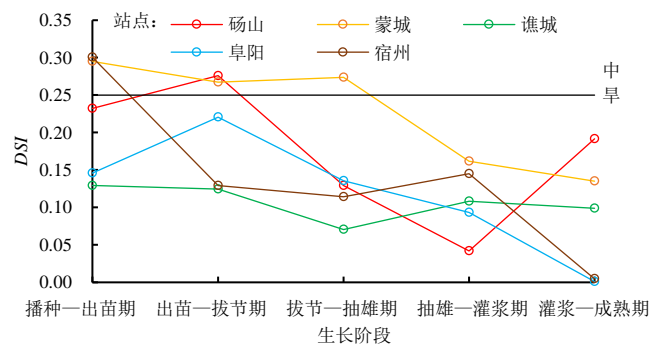
通过 M-K 突变分析可以发现, 在生长阶段尺度下, 对于 0~10 cm 土层, 仅仅在 2017 年生长季的蒙城站有通过 0.05 显著性检验的突变点; 对于 0~50 cm 土层, 则没有发生显著的突变过程。在起始不定的 10 d 尺度下, 对于 0~10 cm 土层, 砀山站的突变点发生在 2018 年生长季, 蒙城站在 2016 年生长季有突变发生, 阜阳站突变点发生在 2014 年生长季, 谯城与宿州站没有发生显著突变; 对于 0~50 cm 土层, 砀山和谯城站的突变点发生在 2019 年生长季, 阜阳和宿州站的突变点发生在 2018 年生长季。在两种时间尺度下, 各站点表土层和根系主要分布层的突变过程多数集中在 2016—2019 年生长季, 这可能与 2016 年的强厄尔尼诺现象有关, 其引起了如降水异常^[26]等一系列气候变化。



(a) 0~10 cm 土层

2.1.2 生长阶段变化趋势

各个生长阶段的多年平均 DSI 值变化趋势如图 3 所示, 0~10 cm 土层下, 各个站点在 5 个生长阶段下均处于轻旱状态; 蒙城、阜阳和宿州站的多年平均 DSI 值随着生育期的进行呈波动下降趋势, 砀山和谯城站在抽雄—灌浆期下降到最低值, 之后在灌浆—成熟期有一定的回升趋势。0~50 cm 土层的变化趋势与表土层类似, 只有谯城站的多年平均 DSI 值在整个生长阶段始终处于较低的水平。蒙城、阜阳和宿州的土壤类型为砂姜黑土, 砀山和谯城的土壤类型为黄潮土, 砂姜黑土区的夏玉米通常在播种—出苗期, 出苗—拔节期出现较高的干旱程度, 同时期 0~50 cm 土层比 0~10 cm 土层的干旱程度要高; 黄潮土区的夏玉米在出苗—拔节期, 灌浆—成熟期出现较高的干旱程度。



(b) 0~50 cm 土层

图 3 生长阶段 DSI 多年平均变化趋势

Fig.3 Annual average trend of DSI during the growth stage

2.2 干旱程度的空间分布

2 种尺度下的干旱程度空间分布相似, 以生长阶段尺度为例, 2010—2019 年生长季 5 个站点不同干旱程度出现的次数如表 3 所示, 在 0~10 cm 土层深度下, 宿州、蒙城和砀山各有一个生长季的干旱程度达到了重旱及以上, 而其余站点多数生长季的干旱程度达到了轻旱, 无旱和轻旱的出现次数相当。在 0~50 cm 的土层深度下, 蒙城、砀山、阜阳和宿州都出现有重旱以上的生长季, 而谯城最高只出现轻旱。整体来看, 阜阳站 0~50 cm 土层的干旱明显比其 0~10 cm 土层要严重, 其余站点 2 种土层下各等级干旱的出现次数相差不大, 较严重的干旱事件多集中在淮北平原的北部砀山和中东部的蒙城和宿州地区。

表 3 不同干旱程度的生长季出现次数

Tab.3 Number of occurrences of growth seasons with different degrees of drought

站点	0~10 cm					0~50 cm				
	无旱	轻旱	中旱	重旱	特旱	无旱	轻旱	中旱	重旱	特旱
砀山	1	7	1	0	1	6	3	0	1	0
蒙城	1	6	2	1	0	5	3	1	0	1
谯城	3	4	3	0	0	4	6	0	0	0
阜阳	3	4	3	0	0	6	1	1	2	0
宿州	2	6	1	1	0	2	4	2	2	0

2.3 干旱频率的时空分布

夏玉米不同生长阶段的干旱频率如图 4 所示, 在 2 种土层深度下, 干旱频率较高的生长阶段为播种—出苗期和出苗—拔节期, 处于 40%~50%之间, 其中轻旱占到了一半左右, 特旱发生频率高于重旱和中旱。通过分析干旱频率可以认为淮北平原的夏玉米在播种—出苗期, 出苗—拔节期时, 每 10 a 至少会发生两次轻旱, 一次特旱, 中旱和重旱的发生频率则低于十年一次; 而在拔节—抽雄期, 抽雄—灌浆期, 灌浆—成熟期的干旱频率均处于 30%以下, 即十年内轻旱的发生次数在两次以内, 其余各等级的干旱都在十年一次的频率以下。

各个站点的干旱频率如图 5 所示, 5 个代表站点的干旱频率都处于 20%~40%之间。在生长阶段尺度下, 0~10 cm 土层的干旱频率最低在宿州站为 24%, 最高在谯城和阜阳站为 38%; 0~50 cm 土层下的干旱频率最低在谯城为 24%, 最高是在宿州为 38%。各站点的表土层都以轻旱为主, 特旱频率略高于中旱与重旱; 0~50 cm 土层深度下, 砀山和谯城站的轻旱频率最高为 24%, 其余程度的干旱发生频率都低于二十年一次; 蒙城、阜阳和宿州站的特旱频率最高, 依次为

16%、10%、14%，其他等级的干旱发生频率均在 10% 以下。与生长阶段时间尺度相比，在起始不定的 10 d 尺度下，各站点整体的干旱频率并没有明显的变化，但各个等级频率的相对占比存在差异，尤其体现在表土层。宿州表土层的特旱频率下降，轻旱频率升高，

其余 4 个站点刚好相反，特旱频率增长，轻旱频率下降；中旱和重旱频率在蒙城和阜阳有不同程度的降低，其余站点有所升高，这说明部分站点的土壤状况在较短的时间内可以迅速达到较严重的干旱状态。

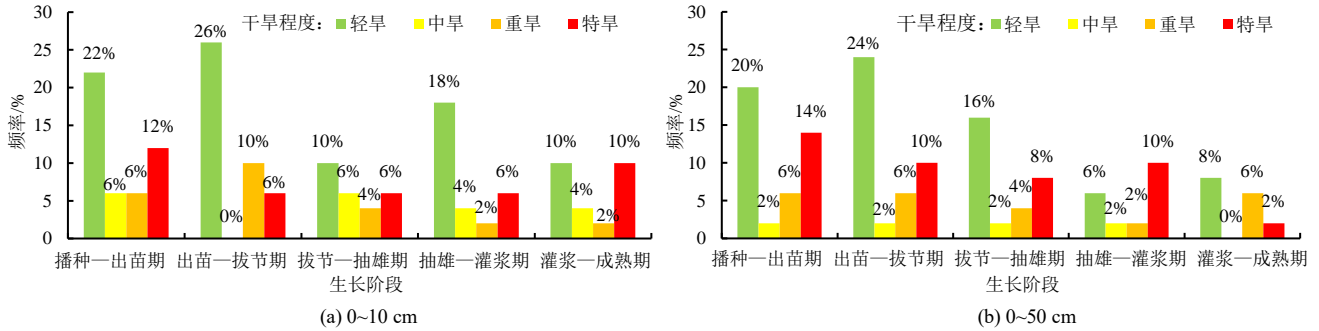


图 4 夏玉米各生长阶段的干旱频率

Fig.4 Drought frequency at summer maize each growth stage

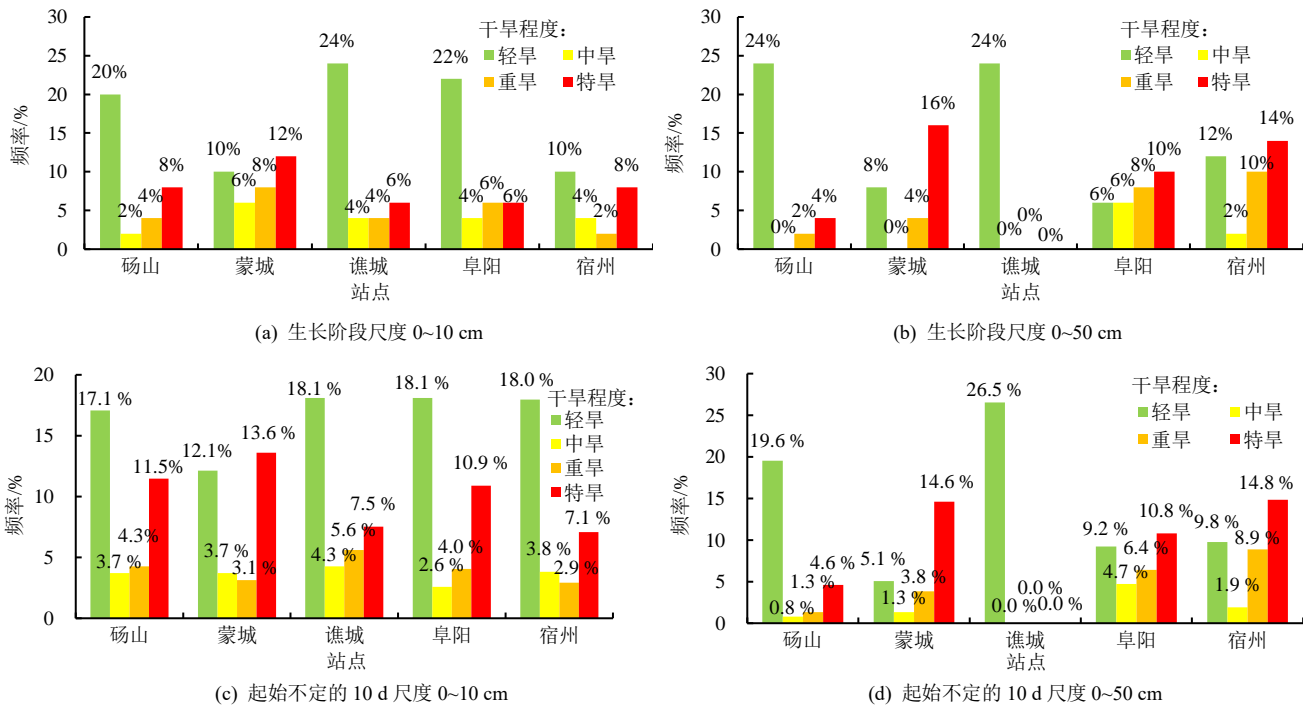


图 5 两种时间尺度下各站点的干旱频率

Fig.5 Drought frequency at each station at two time scales

2 种土层深度的干旱频率空间分布如图 6 所示，0~10 cm 土层干旱频率较高的区域在阜阳、淮城、蒙

城站所在的西南部地区；0~50 cm 土层干旱频率较高区域则分布在宿州及以东地区。

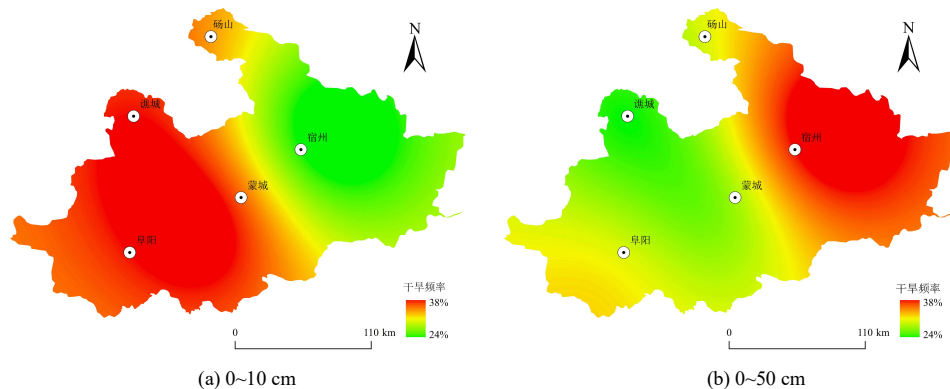


图 6 干旱频率的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of drought frequency

2.4 DSI 峰值的时空分布

生长季内起始不定 10 d 尺度下, 各个站点每个生长季的最高干旱指数如图 7 所示, 在 0~10 cm 土层深度下, 最高干旱指数值的起始时间相对集中分布在 4 个时间段内, 依次为 6 月 10—13 日, 6 月 19—27 日, 7 月 13—23 日以及 9 月 6 日。0~50 cm 土层深度下, 最高指数值的起始时间同样集中分布在 4 个时间

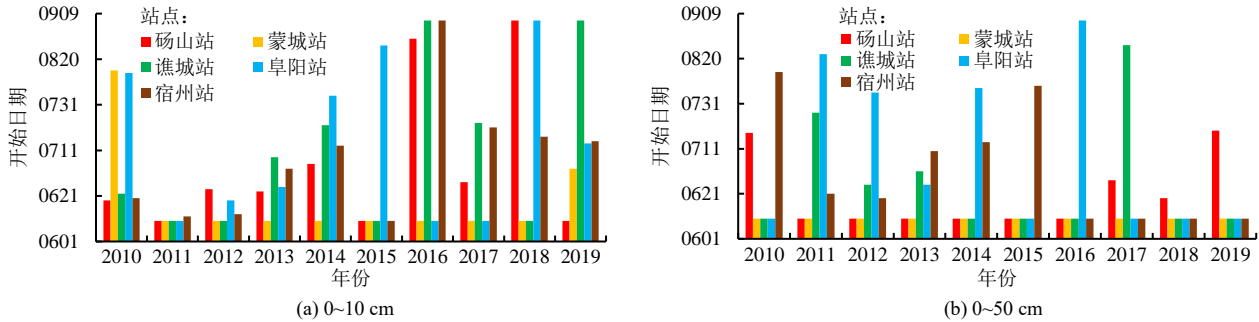


图 7 起始不定的 10 d 尺度下最高 DSI 开始时间

Fig.7 Maximum DSI start time at a ten day scale with uncertain starting points

3 讨论

在本研究中, 淮北平原夏玉米 2010—2019 年生长季下, 宿州站和阜阳站的干旱严重程度有下降趋势 ($Z < 0$), 其余站点为较显著的上升趋势 ($Z > 2.326$), 由 M-K 突变检验可知, 各个站点干旱趋势的突变大都发生在 2017—2019 年生长季, 这与安徽省统计年鉴^[28]中淮河流域的夏季气温和降水量变化规律一致, 而相比于生长阶段时间尺度, 生长季内起始不定的 10 d 尺度下的干旱程度和干旱频率更高。各个生长阶段的多年平均 DSI 值变化规律符合高超等^[29]和张晓旭等^[30]对夏玉米干旱特征的研究结论, 在播种一出苗期会形成“初夏旱”, 此时干旱程度最大, 干旱频率最高。吴霞等^[31]对 1961—2015 年黄淮海平原夏玉米干旱特征分析后也发现, 夏玉米在播种一抽雄期对水分变化更为敏感, 更加容易发生水分胁迫, 同时与月尺度相比, 旬尺度下的干旱指数效果更好。0~50 cm 土层深度下, 除拔节一抽雄期的干旱频率比 0~10 cm 土层有所升高外, 其余生长阶段的干旱频率都明显下降, 不同等级的干旱发生频率又以轻旱为最高, 其次是特旱, 中旱与重旱的发生频率最低。

2010—2019 年不同生长季的干旱程度空间分布之间存在明显的年际差异, 在 2010 年生长季, 2 种土层下的干旱程度在东北部更大, 在 2011—2018 年生长季, 西南部的干旱程度更大, 2019 年生长季则属于典型干旱年^[28], 淮北平原发生有较大范围的干旱事件, 2 种土层深度分别在砀山和蒙城区域内达到了特旱, 这也与姚蕊等^[32]对淮河流域的干旱特征演变过程的研究结论相符, 干旱重心会在淮河流域的中部区

段, 依次是 6 月 10 日, 6 月 19—27 日, 7 月 10—19 日以及 8 月 5—14 日。2 种土层深度下的最高指数值多数出现在播种一出苗的早期, 出苗一拔节的早期, 拔节一抽雄的中期, 这三段时期的夏玉米单产又极容易受到降水不足和高温的不利影响^[27], 因此在防灾减灾时, 可以特别关注夏玉米在这些时间段内的干旱情况。

域与四周区域, 尤其是西南部和西北部进行周期性移动。通过干旱程度的空间分布可以发现, 在砀山、蒙城、宿州站的中北部地区和阜阳站的西南地区, 2 种土层深度下的干旱程度相比于其他地区更高, 这与高超等^[29]对于淮河流域 1961—2015 年的夏玉米生育阶段需水量的时空分布研究结论相一致, 需水量高的地区越容易受到干旱的影响。起始不定的 10 d 尺度下的干旱空间分布与生长阶段尺度下的分布特征区别在于, 部分生长季在生长阶段尺度下被识别为无旱或轻旱的地区, 在起始不定的 10 d 尺度下则会被识别成更高的干旱程度。

淮北平原 0~10 cm 土层的干旱频率西南地区较高, 而 0~50 cm 土层的干旱频率在东部区域较高。各个干旱等级中, 轻旱与特旱的发生频率又相对较高, 这也与郑香悦等^[33]在淮北地区基于 SPEI 指数对安徽省 1960—2018 年的干旱时空特征进行分析的结论相一致。与生长阶段尺度相比, 起始不定的 10 d 尺度下, 各个站点不同等级的干旱频率有明显的变化, 即轻旱频率有所下降, 而重旱和特旱频率则会升高, 尤其体现在 0~10 cm 的表土层。

起始不定的 10 d 尺度下的最高 DSI 值与其对应的生长阶段 DSI 值相比, 前者的大小常常更高, 这意味着淮北平原的干旱发展到峰值的过程较为迅速, 短期内就会达到较高的干旱水平。这可能会导致在夏玉米生长阶段尺度下, 一些短期高旱事件对作物生长发育产生的影响会被不同程度的低估, 这一类干旱事件也被称为骤旱。近年来, 骤旱逐渐成为我国干旱的一种新常态^[34], 张翔等^[35]研究发现中国农业区的骤旱现象有不同程度的增加趋势, 降水骤旱历时在 7~20 d,

高温骤旱历时在 20 d 以上。在淮北地区, 骤旱的平均持续时长在 10~25 d, 同时也会存在一些 5~7 d 的短期高温、少雨、强蒸散现象, 从气候或其他大尺度的角度来说, 它能产生的影响较为有限, 但对于生育期不到 4 个月的夏玉米来说, 并不能忽视它所带来的后果。奚夏珍^[36]通过对华北地区的骤旱现象研究发现, 灌溉对于该地区的骤旱有显著的抑制作用, 其发生频率能降低 76%, 干旱烈度能降低 78%, 持续时间也能有效降低。在起始不定的 10 d 尺度下, 最高程度的干旱事件发生时间多数处于播种一出苗的早期, 出苗一拔节的早期, 拔节一抽雄的中期。

本文使用的是淮北平原 5 个水文站点的实测土壤水分数据, 今后可以考虑使用气象卫星数据来提高研究结果的普遍性, 同时以夏玉米为代表, 可以将研究结论拓展到类似的夏季作物或其他季节作物的抗旱研究中。随着淮北平原干旱频率的进一步增长, 可以深入研究多种作物在受到干旱影响时的特征, 从而更加具有针对性的应对干旱威胁, 做好防旱保收工作。

4 结论

1) 砀山、蒙城、谯城 3 个站点的干旱集中在 2016—2019 年生长季, 阜阳站集中在 2010—2015 年生长季, 在 2016 年生长季之后, 这些站点都存在显著的突变变化, 而宿州站的干旱则集中在个别生长季; 与生长阶段尺度相比, 多数干旱事件在起始不定的 10 d 尺度下程度更高, 更小的时间尺度能够识别出新的干旱事件, 从而导致干旱频率的增加。

2) 在生长阶段的多年平均变化趋势中, 蒙城、阜阳、宿州站等砂姜黑土区, 在夏玉米播种一出苗期, 出苗一拔节期会出现较高的干旱程度; 砀山和谯城等黄潮土区在出苗一拔节期, 灌浆一成熟期常会出现较高的干旱程度, 0~50 cm 土层各个生长阶段的干旱程度整体较高。DSI 能够作为淮北平原地区不同土壤类型的作物干旱指标, 且更具有综合性。

3) 淮北平原的中北部和西南地区的干旱程度往往比其他地区要高, 在 2019 年典型干旱年则表现的更加突出。0~10 cm 土层干旱频率较高区域集中在阜阳, 谯城等西南部地区, 0~50 cm 土层干旱频率较高区域则集中在宿州以东地区, 频率最高都为 38%。

4) 生长季内起始不定的 10 d 尺度下, 每个生长季的干旱程度最高时段的起始时间多处于播种一出苗早期, 出苗一拔节早期, 拔节一抽雄中期, 它们在短期内会发展到重旱及以上的程度, 与对应生长阶段尺度下的干旱指数大多相差 0.1~0.2, 少数干旱发生在 8、9 月。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 李德, 祁宦, 马晓群. 安徽省淮北平原夏玉米主要生育时期旱涝指标与影响评估[J]. 中国农学通报, 2013, 29(17): 208-216.
LI De, QI Huan, MA Xiaohun. The climate index and assessment about drought and flood in maize's key growth stage in Huaibei Plain in Anhui Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(17): 208-216.
- [2] 乔丛林, 史明礼, 苏娅, 等. 淮北平原地区水文特征[J]. 水文, 2000, 20(3): 55-58.
- [3] 汪左, 王芳, 张运. 基于 CWSI 的安徽省干旱时空特征及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 853-866.
WANG Zuo, WANG Fang, ZHANG Yun. Spatio-temporal distribution characteristics and influencing factors of drought in Anhui Province based on CWSI[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 853-866.
- [4] 霍治国, 张海燕, 李春晖, 等. 中国玉米高温热害研究进展[J]. 应用气象学报, 2023, 34(1): 1-14.
HUO Zhiguo, ZHANG Haiyan, LI Chunhui, et al. Review on high temperature heat damage of maize in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2023, 34(1): 1-14.
- [5] 魏童彤, 彭致功, 刘福胜, 等. 华北小麦-玉米轮作净灌溉需水量变化趋势: 以大兴区为例[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(9): 63-72.
WEI Tongtong, PENG Zhigong, LIU Fusheng, et al. Trend of net irrigation water requirement of wheat-maize rotation in North China: A case study of Daxing district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 63-72.
- [6] 吴志勇, 程丹丹, 何海, 等. 综合干旱指数研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 36-45.
WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 36-45.
- [7] LENG G Y, HALL J. Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future[J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 811-821.
- [8] YAO N, LI Y, LIU Q Z, et al. Response of wheat and maize growth-yields to meteorological and agricultural droughts based on standardized precipitation evapotranspiration indexes and soil moisture deficit indexes[J]. Agricultural Water Management, 2022, 266: 107-116.
- [9] DAI M, HUANG S Z, HUANG Q, et al. Assessing agricultural drought risk and its dynamic evolution characteristics[J]. Agricultural Water Management, 2020, 231: 106-113.
- [10] 潘聪, 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.
- [11] 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.
ZHAO Yubing, SUN Donglei, JIA Qiulan, et al. SPEI-based characteristic analysis of summer corn drought in growing season in Southern Hebei Province[J]. Meteorological Science and Technology, 2020, 48(5): 766-773.
- [12] 马雪晴, 胡琦, 王靖, 等. 基于 SPEI_{Kc} 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.
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_{Kc} index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(21): 164-174.
- [13] CAMMALLERI C, MICALE F, VOGT J. A novel soil moisture-based drought severity index (DSI) combining water deficit magnitude and frequency[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(2): 289-301.
- [14] LIU Q, ZHANG J H, ZHANG H R, et al. Evaluating the performance of eight drought indices for capturing soil moisture dynamics in various vegetation regions over China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 789: 147-160.

- [15] ELHAG K, ZHANG W C. Monitoring and assessment of drought focused on its impact on sorghum yield over Sudan by using meteorological drought indices for the period 2001—2011[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1 231.
- [16] HAROON M A, ZHANG J H, YAO F M. Drought monitoring and performance evaluation of MODIS-based drought severity index (DSI) over Pakistan[J]. *Natural Hazards*, 2016, 84(2): 1 349-1 366.
- [17] ZHANG J, MU Q Z, HUANG J X. Assessing the remotely sensed drought severity index for agricultural drought monitoring and impact analysis in North China[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 63: 296-309.
- [18] WANG H S, ROGERS J C, MUNROE D K. Commonly used drought indices as indicators of soil moisture in China[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(3): 1 397-1 408.
- [19] 方国华, 涂玉虹, 闻昕, 等. 1961—2015 年淮河流域气象干旱发展过程和演变特征研究[J]. *水利学报*, 2019, 50(5): 598-611.
FANG Guohua, TU Yuhong, WEN Xin, et al. Study on the development process and evolution characteristics of meteorological drought in the Huaihe River Basin from 1961 to 2015[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(5): 598-611.
- [20] 秦小光, 张磊, 穆燕. 中国东部南北方过渡带淮河半湿润区全新世气候变化[C]/中国科学院地质与地球物理研究所 2015 年度(第 15 届)学术论文汇编: 新生代地质与环境研究室. 北京, 2016: 503-518.
- [21] 刘赛艳, 解阳阳, 方红远, 等. 淮河流域汛期降水结构变化特征[J]. *水文*, 2022, 42(5): 102-108.
LIU Saiyan, XIE Yangyang, FANG Hongyuan, et al. Spatial-temporal variation characteristics of precipitation pattern in the Huai River Basin during flood season[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(5): 102-108.
- [22] 来和鑫, 张泽中, 王飞, 等. 1960—2019 年中国流域尺度干旱时空演变特征研究[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(8): 122-129, 138.
LAI Hexin, ZHANG Zezhong, WANG Fei, et al. Spatiotemporal variation in catchment-scale droughts from 1960 to 2019 across China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(8): 122-129, 138.
- [23] 杜明成, 张建云, 王振龙, 等. 皖北杨楼流域玉米农田土壤水变化特征及驱动因子研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(1): 206-214.
DU Mingcheng, ZHANG Jianyun, WANG Zhenlong, et al. Soil moisture content change characteristics and driving factors of maize farmland in the Yanglou Watershed, Northern Anhui Province[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(1): 206-214.
- [24] 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院. 五道沟试验站试验报告[Z]. 蚌埠, 2019.
- [25] SHEFFIELD J, GOTETI G, WEN F H, et al. A simulated soil moisture based drought analysis for the United States[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109: D24 108.
- [26] 查显宝, 王双涛, 罗平平, 等. 降水时空分布及变化特征分析: 以安徽省为例[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(1): 112-120.
ZHA Xianbao, WANG Shuangtao, LUO Pingping, et al. Spatiotemporal variation in precipitation across Anhui Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(1): 112-120.
- [27] 陈文婷, 周曙东. 不同生长阶段降水对夏玉米产出的影响[J]. *华南农业大学学报(社会科学版)*, 2022, 21(4): 91-103.
CHEN Wenting, ZHOU Shudong. Impact of precipitation at different growth stages on summer maize yield[J]. *Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition)*, 2022, 21(4): 91-103.
- [28] 安徽省统计局, 国家统计局安徽调查总队. 安徽统计年鉴 2020(总第 32 期)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [29] 高超, 李学文, 孙艳伟, 等. 淮河流域夏玉米生育阶段需水量及农业干旱时空特征[J]. *作物学报*, 2019, 45(2): 297-309.
GAO Chao, LI Xuewen, SUN Yanwei, et al. Spatiotemporal characteristics of water requirement and agricultural drought during summer maize season in Huaihe River Basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(2): 297-309.
- [30] 张晓旭, 孙忠富, 郑飞翔, 等. 基于作物水分亏缺指数的黄淮海平原夏玉米全生育期干旱分布特征[J]. *中国农业气象*, 2021, 42(6): 495-506.
ZHANG Xiaoxu, SUN Zhongfu, ZHENG Feixiang, et al. Characteristics of drought distribution for summer maize over whole growth period in Huang-Huai-Hai Plain based on crop water deficit index[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2021, 42(6): 495-506.
- [31] 吴霞, 王培娟, 公衍铎, 等. 1961—2015 年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, et al. 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*, 2019, 35(18): 189-199.
- [32] 姚蕊, 夏敏, 孙鹏, 等. 淮河流域干旱时空演变特征及成因[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 333-347.
YAO Rui, XIA Min, SUN Peng, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of meteorological drought and climate influence factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 333-347.
- [33] 郑香悦, 周亮广, 黄骁力. 基于 SPEI 的安徽省干旱时空变化特征分析[J]. *黑龙江工程学院学报*, 2023, 37(2): 14-21.
ZHENG Xiangyue, ZHOU Lianguang, HUANG Xiaoli. Analysis of spatial-temporal variation characteristics of drought in Anhui Province based on SPEI[J]. *Journal of Heilongjiang Institute of Technology*, 2023, 37(2): 14-21.
- [34] 袁星, 王钰淼, 张苗, 等. 关于骤旱研究的一些思考[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(6): 1 086-1 095.
YUAN Xing, WANG Yumiao, ZHANG Miao, et al. A few thoughts on the study of flash drought[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(6): 1 086-1 095.
- [35] 张翔, 陈能成, 胡楚丽, 等. 1983—2015 年我国农业区域三类骤旱时空分布特征分析[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(10): 1 048-1 057.
ZHANG Xiang, CHEN Nengcheng, HU Chuli, et al. Spatio-temporal distribution of three kinds of flash droughts over agricultural land in China from 1983 to 2015[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(10): 1 048-1 057.
- [36] 奚夏珍. 骤旱期间大气和土壤水分胁迫对植被的影响分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.

Spatiotemporal variations in summer maize droughts in the Huaibei Plain

PENG Yujie¹, ZHU Yonghua^{1*}, LYU Haishen¹, LU Wen¹, ZHU Wanting¹, WANG Yining^{1,2}, WANG Zhenlong³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Anhui & Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Anhui Provincial Key Laboratory of Water Resources, Hefei 230088, China)

Abstract: 【Objective】 Drought is a significant abiotic stress affecting agricultural production in many regions of China. This study investigates the spatiotemporal variations in drought during the growing seasons of summer maize

in the Huaibei Plain. **【Method】** The analysis was based on the drought severity index (DSI) from 2010 to 2019 calculated using metrological data measured from weather stations across the region. We focused on the top 0-10 cm soil layer and the root zone from the soil surface to the depth of 50 cm. The M-K test and the Kriging spatial interpolation were used to analyze the spatiotemporal variation in droughts over the region at different time scales.

【Result】 ① Since 2016, the severity and frequency of droughts have both significantly increased in the areas of Dangshan, Mengcheng, and Qiaocheng, while decreased in the area of Fuyang. In Suzhou, droughts mainly occurred in 2010—2012 and 2019. Compared to seasonal scale, some drought events exhibited greater severity and higher frequency at the ten-day scale with unpredictable onset. ② The highest average annual drought index and frequency both occurred during the sowing-emergence stage, reaching moderate level or above, with the frequencies exceeding 40%. Severe droughts or worse at both timescales occurred in northern Dangshan and central Mengcheng and Suzhou. The frequency of the 0-10 cm soil-layer droughts was higher in the southwest, while the frequency of 0-50 cm soil-layer droughts was higher in the east and north than in other areas. ③ At the ten-day scale, the periods with the highest drought severity in each growing season mostly started in the early stage of sowing - emergence, emergence - jointing, and the mid-stage of jointing - tasseling. Severe droughts occurred primarily in August and September. **【Conclusion】** Since 2016, there has been a significant increase in drought severity and frequency for summer maize in the Huaibei Plain, particularly during the sowing seedling stage. Severe droughts were observed at uncertain ten-day scales, with increased drought frequency.

Key words: summer corn; comprehensive drought index; time scale; growth stage

责任编辑：赵宇龙

(上接第 67 页)

Experimental study on the hydraulic performance of impact-sprinkler system using aquaculture water for irrigation

JIANG Yue^{1,2}, WANG Lisha¹, LI Hong¹, ZUO Xinle¹

(1. Research Centre of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

2. Changzhou Engineering and Technology Institute of Jiangsu University, Changzhou 213164, China)

Abstract: **【Background】** Sprinkler irrigation is a widely used technique across various sectors. This study examines the impact of using aquaculture water for irrigation on the hydraulic performance of the 20PY₂H impact sprinkler systems. **【Method】** The experiments were conducted under varying working pressures and nozzle spacings, with clean water irrigation serving as the control. Measurements in the experiments included the pressure-flow relationship and water-droplet distribution around the nozzle for each treatment. The relationships between irrigation water type, working pressure, and nozzle spacing were analyzed, along with the influence of meteorological factors on irrigation uniformity. **【Result】** ① Compared with the control using clean water for irrigation, irrigation using aquaculture water reduced flow rate of the sprinkler system by 2.06%-5.38%. ② When working pressure was in the range of 200-300 kPa and nozzle-spacing was in the range of 1.0-1.4 of the radius of the covered area of the nozzle, the value of the *CU* calculated by our proposed model varied from 0.74 to 0.88, close to the measured *CU* which was in the range of 0.66 to 0.79. The erratic change in meteorological conditions in the field could reduce irrigation uniformity by 6.28%-12.78%. **【Conclusion】** Using aquaculture water for irrigation decreases the flow rate of the sprinkler systems. The effect of working pressure and nozzle spacing on irrigation uniformity is more pronounced when using clean water than using aquaculture water.

Key words: farming fertilizer water; impact sprinkler; hydraulic performance; test water distribution; uniformity coefficient

责任编辑：白芳芳