文章编号: 1672 - 3317 (2023) 08 - 0009 - 07

淮北平原冬小麦干旱特征分析

方逸敏¹,朱永华^{1*},吕海深^{1,2},王振龙³,潘莹¹,许海婷¹

(1.河海大学 水文水资源学院,南京 210098; 2.河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 3.安徽省(水利部淮委)水利科学研究院 水利水资源安徽省重点实验室,合肥 230088)

摘 要:【目的】探讨淮北平原冬小麦各生育阶段的干旱特征和干旱趋势,以期进一步认识淮北平原农业干旱规律, 给田间灌溉管理和提高作物产量提供科学依据。【方法】利用 1986—2018 年淮北平原砂姜黑土区的土壤含水率数 据,分析冬小麦各生育阶段在水分上对产量起决定作用的关键土层,利用关键土层含水率计算干旱严重指数 (Drought Severity Index, DSI)并评定干旱等级,采用 Mann-Kendall 检验法(M-K 检验法)、滑动 T 检验法分析干 旱变化趋势,并对比气温突变年(1994年)前后的干旱特征及变化趋势。【结果】①1986—2018 年淮北平原冬小麦 播种—出苗期以轻旱和中旱为主,仅发生1次重旱;出苗—灌浆期只发生轻旱和中旱;灌浆—成熟期发生3次重旱 和5次特旱;②播种—出苗期干旱呈显著下降趋势,出苗—返青期干旱在2007—2012 年呈显著下降趋势,其他生育 阶段干旱无显著变化趋势,且冬小麦全生育期内无干旱突变年;③气温突变年(1994 年)后,冬小麦各生育阶段、 各等级干旱的干旱频率均大于突变前,且极端干旱有加剧趋势。【结论】淮北平原在气温突变年后干旱愈加频繁,且 极端干旱加剧,未来应注意加强冬小麦灌浆—成熟期的灌溉,及时补充土壤水分以防出现极端干旱。 关键词:淮北平原;冬小麦;干旱特性;砂姜黑土

中图分类号: S274.3 文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022521



方逸敏, 朱永华, 吕海深, 等. 淮北平原冬小麦干旱特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 9-15. FANG Yimin, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Analyzing Drought Variation in Winter Wheat Growing Season in the Huaibei Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 9-15.

0 引 言

【研究意义】淮北平原安徽地区(以下简称淮北 平原)地处黄淮海平原南侧,自然条件优越,是我国 重要商品粮生产基地之一,冬小麦是其主要的粮食作 物。干旱是冬小麦生育期间发生的主要气象灾害之一, 其特点是发生频率高、影响范围大、持续时间长,对 冬小麦生长发育和产量有很大影响^[1-2]。因此,研究 淮北平原冬小麦干旱特征及变化趋势,对科学把握淮 北平原冬小麦生长发育状况以及确保冬小麦稳产高 产具有重要意义。【研究进展】监测干旱的指标很多, 其中常见的干旱指数有帕默尔干旱指数(PDSI)^[3]、 标准化降水蒸散指数(SPEI)^[4]、归一化植被指数 (NDVI)^[5]等。王连喜等^[6]以作物水分亏缺指数 (CWDI)为干旱指标,结合数理统计方法,分析河 南省冬小麦干旱时空分布特征。李德等^[7]采用平均值、 点聚图、有序样本最优聚类等方法, 建立了皖北砂姜 黑土区冬小麦生育期尺度的降水量负距平百分率、麦

田水分盈亏率干旱指标,经检验,这些指标均有80% 以上的正确率,能较好地解释皖北砂姜黑土区的干旱 事件。康西言等^[8]以冬小麦需水量替代 SPEI 指数中 的蒸散量, 对蒸散量的计算和时间尺度进行改进, 分 析了河北省 1965-2014 年冬小麦干旱时空分布特征。 贾建英等^[9]基于冬小麦休闲期土壤贮水和生长期降 水盈亏对作物水分亏缺指数进行改进,改进后的水分 亏缺指数与冬小麦减产率高度相关。【切入点】一方 面,这些研究大多基于作物水分亏缺或气象条件建立 干旱指标,或者仅考虑某地区发生干旱的频率,鲜有 将作物水分亏缺和发生干旱的频率相结合的干旱指 标。Cammalleri等^[10]将作物水分亏缺和干旱频率同时 纳入考虑,认为只有发生罕见的土壤水分亏缺才能被 认定为干旱,并建立了一种基于土壤含水率数据,结 合土壤水分亏缺程度和频率的干旱严重指数 (Drought Severity Index, DSI) 来量化干旱事件。另 一方面,这些研究大多基于 0~50 cm 土层土壤含水率 展开研究^[7,11],未考虑冬小麦根区层不同土层深度土 壤含水率对各生育阶段生长发育的贡献程度。本文通 过冬小麦各生育阶段根区不同土层深度土壤含水率 与冬小麦产量的相关性分析,分别确定各生育阶段对 冬小麦生长发育起决定作用的关键土层,用关键土层 的土壤含水率计算干旱严重指数 DSI 并评定干旱等

收稿日期: 2022-09-20 修回日期: 2023-04-25 网络出版日期: 2023-05-15 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41830752); 国家自然科学基金 面上项目(42071033)

作者简介:方逸敏(1999-),女。硕士研究生,主要从事生态水文与环境 水文、水生态环境保护与修复等研究。E-mail: fangyimin2020@163.com 通信作者:朱永华(1970-),女。教授,博士,主要从事生态水文与环境 水文、水生态环境保护与修复等研究。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

级,分析 1986—2018 年淮北平原冬小麦干旱特征及 干旱趋势。【拟解决的关键问题】利用 1986—2018 年 淮北平原砂姜黑土区的不同土层深度土壤含水率数 据和冬小麦年产量数据,分析对冬小麦生长发育起决 定作用的关键土层,并结合发生干旱的频率,计算关 键土层的干旱严重指数 DSI,依据 DSI 指数计算结果 评定干旱等级,统计淮北平原 1986—2018 年的干旱 频率频次,采用 Mann-Kendall 检验法(M-K 检验法)、 滑动 T 检验法分析干旱变化趋势,并对比淮北平原气 温突变年(1994 年)前后的干旱特征及趋势,对淮 北平原冬小麦的干旱特征和变化趋势进行研究,以期 更准确地监测和量化淮北平原地区的农业干旱事件, 对淮北平原的农业干旱特征有更科学的把握。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

淮北平原位于安徽省北部,黄淮海平原南端,属 北亚热带和暖温带气候,冬季干旱少雨,夏季炎热多 雨,54%的土地面积为砂姜黑土,冬小麦是其主要冬 作物。五道沟水文水资源试验站位于安徽省蚌埠市北 部固镇县境内,年平均降水量为890 mm,60%以上 的降水发生在6—9月,降水量年内分布不均匀且年 际变化大,土壤类型为砂姜黑土,且位于冬小麦产区, 具有典型冬小麦物候期。综上,五道沟试验站在气候、 土壤类型、作物类型及物候期方面均在淮北平原具有 一定代表性,故而选择五道沟试验站为淮北平原的代 表性站点^[12-14]。

1.2 数据来源

土壤含水率数据: 1986—2018 年淮北平原砂姜黑 土区土壤含水率数据来源于安徽省蚌埠市固镇县新马 桥镇五道沟试验站。土壤含水率采用土钻每 5 天取样 1 次(每月 1、6、11、16、21、26、31 日),各土层 质量含水率采用烘干法测定,结合该试验站测定的干 体积质量数据将各土层质量含水率换算成体积含水率。

冬小麦生长资料:依据淮北平原冬小麦的生长 发育情况和五道沟试验站试验报告^[15],将冬小麦生 育期划分为 6 个生育阶段,依次为播种一出苗期 (1010—1220)、出苗一返青期(1221—次年 0210)、 返青一拔节期(0211—0320)、拔节一抽穗期 (0321—0420)、抽穗—灌浆期(0421—0515)、灌浆— 成熟期(0516—0531)。以每年10月10日至次年5月 31日为一个生育期,例如1986年10月10日—1987 年5月31日称为1987年生育期,其他年份同理。

1.3 研究方法

1.3.1 相关性分析

利用淮北平原冬小麦 2006—2013、2016—2017

年共 10 个生育期的年产量数据和不同土层深度的土 壤含水率数据,计算皮尔逊相关指数,进行相关性分 析,确定对冬小麦各生育阶段生长发育起决定作用的 关键土层。

1.3.2 土壤水分亏缺指数

依据 Van 等^[16]1987 年提出的 S 曲线计算土壤水 分亏缺指数 *d*:

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

其中, $\theta_{50} = \frac{1}{2(\frac{\theta_f}{2} + \theta_{wp})}$, θ_f 为田间持水率; θ_{wp} 为凋萎含

水率; *n*为经验指数, 由 Skaggs 等^[17]2006 年在 S 曲 线的基础上提出的式(2)与式(1)联立计算得到:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^p} , \qquad (2)$$

式中: *a* 为无量纲吸收减少函数,表示水分胁迫导致的根系吸水减少,吸收减少函数 *a* 与水分亏缺指数 *d* 本质上都是反映土壤水分亏缺,前者以土水势来量化, 后者以土壤含水率来量化,对于同一对象,二者在数 量上相等; *p* 为经验形状参数; *h* 为土水势; *h*₅₀ 为蒸 腾作用减半时的土水势; 依据淮北平原砂姜黑土的经 验数据^[18], *h*₅₀=-1 500 cm, *p*=3; 依据淮北平原砂姜 黑土土壤水分特征曲线^[19]得到, *h*=-3 299 cm; 综上, 联立式 (1)、式 (2),确定经验指数 *n*=5.866。 1.3.3 千旱频率

与 Cammalleri 等^[10]计算干旱严重指数 DSI 过程 类似:用 beta 分布来统计土壤水分亏缺指数 d;用土 壤水分亏缺指数的标准化百分数F*(d)表示土壤水分 与"通常"状态的偏离程度,即干旱的罕见性;用 Z 指数干旱等级定义土壤水分亏缺指数的标准化百分 数的等级;最后拟合标准化百分数F*(d)与干旱频率 P 的关系,得出干旱频率 P 的表达式,如表 1 所示。本 文用《气象干旱等级》(GB/T20481—2017)^[20]规定 的 Z 指数干旱等级代替 Cammalleri 等^[10]使用的 Z 指 数干旱等级。

表 1 冬小麦各生育阶段 P 指数与 $F^*(d)$ 的函数 Table 1 The function of P index and $F^*(d)$ at each growth stage of winter wheat

each Bro	and stage of whiter wheat
生育阶段	函数表达式
播种一出苗期	$P = 0.977 \ 2e^{\frac{-\left(F^{*}(d) - 0.764 \ 4\right)^{6}}{0.006 \ 558 \ 8}}$
出苗一返青期	$P = 1.285 e^{\frac{-(F^*(d)-1.272)^6}{0.06}}$
返青—拔节期	$P = 1.131 e^{\frac{-(F^*(d) - 0.8756)^6}{0.004598}}$
拔节一抽穗期	$P = 1.135 \mathrm{e}^{\frac{-(F^*(d) - 0.996 8)^6}{0.002 45}}$
抽穗一灌浆期	$P = 0.953 \ 6 e^{\frac{-(F^*(d) - 0.906 \ 4)^6}{0.003}}$
灌浆一成熟期	$P = 0.983 8e^{\frac{-(f^*(d)-1.043)^6}{0.003}}$

1.3.4 干旱严重指数 DSI 计算

土壤水分亏缺指数描述了缺水严重程度,但即使

是相同的水分亏缺,在不同时期不同地区也会对作物 产生不同影响,仅考虑水分亏缺严重程度而忽略水分 亏缺在历史序列中的异常性可能会错误识别干旱;干 旱频率可以反映干旱的罕见程度,对于年际变化小的 地区,仅考虑干旱罕见程度则可能会将罕见但不妨碍 作物正常生长的情况识别为干旱。Cammalleri 等^[10] 将作物水分亏缺和干旱频率同时纳入考虑,认为只有 发生罕见的土壤水分亏缺才能被认定为干旱,并建立 了一种基于水分亏缺程度和频率的干旱严重指数 (Drought severity index, *DSI*)来量化干旱事件,并 给定干旱等级,如表2所示:

$$DSI=\sqrt{pd}$$
。 (3)
表 2 基于干旱严重指数 (DSI) 的干旱等级划分

Table 2 The algorithm of drought grade based on DSI

Table 2 The classified	aion of drought grade based on DSI
干旱等级	DSI
无旱	0
轻旱	0 <dsi<0.25< th=""></dsi<0.25<>
中旱	0.25 <dsi<0.5< th=""></dsi<0.5<>
重旱	0.5 <dsi<0.75< th=""></dsi<0.75<>
特旱	0.75< <i>DSI</i> <1

注 干旱严重指数 DSI 的干旱等级划分引用自文献[10]。

2.1 相关性分析

2 结果与分析

冬小麦播种一出苗期根系深度一般在 0~30 cm 之间,出苗一返青期根系深度生长至 90 cm 左右,返 青一拔节期根系生长至 120 cm 左右,拔节期后根系 逐渐发育完全,至150 cm 左右^[18]。播种一出苗期以 0~10 cm 耕作层和最大根系深度 30 cm 为界线划分土 层,出苗期后以 0~10 cm 耕作层、50 cm 常用土层深 度和各生育阶段最大根系深度为界线划分土层,将原 始土壤含水率数据按深度加权计算得到所划分土层 的平均土壤含水率。计算冬小麦各生育阶段不同深度 土层土壤含水率与冬小麦产量之间的皮尔逊相关系 数,在各个生育阶段分别选择相关性最高的土层作为 冬小麦生长发育的关键土层,计算结果如表 3 所示。 由表3可知,冬小麦各生育阶段生长发育的关键土层 分别为:播种一出苗期 10~30 cm、出苗一返青期 0~50 cm、返青一拔节期 50~120 cm、拔节一抽穗期 0~150 cm、抽穗一灌浆期 50~150 cm、灌浆一成熟期 0~10 cm。

表 3 不同深度土层土壤含水率与冬小麦产量的相关系数

|--|

生育期	指标			数值		
播种一出苗期	土层深度/cm	0~10	0~30	10~30	-	-
	相关系数 r	0.03	0.51	0.53	-	-
山井 近書相	土层深度/cm	0~10	0~50	0~90	10~50	50~90
出由一返育期	相关系数 r	0.03	0.63	0.59	0.60	0.55
返青一拔节期	土层深度/cm	0~10	0~50	0~120	10~50	50~120
	相关系数 r	0.24	0.40	0.53	0.36	0.54
拔节一抽穗期	土层深度/cm	0~10	0~50	0~150	10~50	50~150
	相关系数 r	0.48	0.48	0.63	0.41	0.59
抽 油 波 把	土层深度/cm	0~10	0~50	0~150	10~50	50~150
捆穗——濯浆期	相关系数 r	0.24	0.03	0.30	0.01	0.39
· 本地 - 半計 #0	土层深度/cm	0~10	0~50	0~150	10~50	50~150
准永— 风烈别	相关系数 r	0.36	0.30	0.15	0.31	0.07

2.2 干旱频率及频次

1986—2018 年淮北平原冬小麦生育期尺度下干旱 频率统计见表 4。由表 4 可知,淮北平原冬小麦生育 期尺度下干旱总频率达 42.64%,以轻旱和中旱为主, 各等级干旱频率轻旱(20.3%)>中旱(17.77%)> 特旱(2.54%)>重旱(2.03%)。轻旱和中旱频率在 20 世纪 90 年代后大幅度上升,重旱和特旱出现频率 较低。1991—2000 年干旱频率达到最高,干旱总频 率为 14.21%。

表 4 1986—2018 年淮北平原冬小麦生育期尺度下干旱频率 Table 4 Drought frequency in Huaibei Plain from 1986 to 2018 %

-		-			
年份	轻旱	中旱	重旱	特旱	合计
1986—1990	3.05	2.03	0	0.51	5.58
1991-2000	4.06	7.61	1.02	1.52	14.21
2001-2010	7.61	4.57	0.51	0	12.69
2011-2018	5.58	3.55	0.51	0.51	10.15
合计	20.3	17.77	2.03	2.54	42.64

1986—2018 年淮北平原冬小麦生育期尺度下干 旱频次统计见表 5。由表 5 可知,淮北平原冬小麦 1986—2018年(共197个生育阶段)干旱频次播种— 出苗期(21次)>灌浆一成熟期(18次)>返青— 拔节期和抽穗—灌浆期(14次)>出苗—返青期(9 次)>拔节—抽穗期(8次)。其中,播种—出苗期以 轻旱和中旱为主,仅发生1次重旱;出苗—灌浆期只 发生轻旱和中旱;灌浆—成熟期出现3次重旱和5次 特旱,干旱较为严重。

表 5 1986—2018 年淮北平原冬小麦生育期尺度下干旱频次次 Table 5 Drought incidence in Huaibei Plain from 1986 to 2018

Table J	Dioug	in meiu	chec in riua	ioci i iam	1101111700	10 2010
生育阶目	没	轻旱	中旱	重旱	特旱	合计
播种一出语	苗期	9	11	1	0	21
出苗一返社	青期	5	4	0	0	9
返青一拔	节期	10	4	0	0	14
拔节一抽種	惠期	2	6	0	0	8
抽穗一灌线	鴤期	6	8	0	0	14
灌浆一成熟	熟期	8	2	3	5	18

2.3 M-K 趋势检验及突变检验

1986—2018 年淮北平原冬小麦各生育阶段 DSI 指数 M-K 趋势检验及突变检验如图 1 所示。

1)趋势性分析。播种一出苗期统计变量 Z=-1.72<-1.64,通过了0.05显著性检验,表明播种一 出苗期干旱呈显著下降趋势。出苗一返青期统计变量 Z=-0.39>-1.64,未通过0.05显著性检验,表明出苗一 返青期干旱无显著下降趋势,UF曲线在2007—2012 年超出了置信区间下限,表明这段时间干旱呈显著 下降趋势。返青一拔节期、拔节一抽穗期、抽穗一 灌浆期、灌浆一成熟期统计变量Z分别为0.54、0.65、 0.03、-0.56,均未通过 0.05 显著性检验,表明返青— 拔节期、拔节—抽穗期、抽穗—灌浆期干旱无显著 上升趋势,灌浆—成熟期干旱无显著下降趋势。

2) 突变性分析。冬小麦各生育阶段的 M-K 突变 检验结果见图 1, 由图中 UF 曲线和 UB 曲线交点的 位置确定干旱可能突变年,以可能突变年为基准点, 选取基准点前后时间长度相等的 2 个子序列进行滑 动 T 检验,各生育阶段的检验结果均未通过 0.05 显 著性水平,说明 1986—2018 年冬小麦全生育期内无 干旱突变年。





2.4 气候突变前后干旱对比

气候变暖是影响农业干旱灾害最直接的要素,尤 其以气温变化最为关键^[21]。王振龙等^[22]分析了淮北平 原 1964—2009 年气象资料,得出年平均气温以 0.14 °C/10 a的速率呈上升趋势的结论。刘勇等^[23]分 析了五道沟水文试验站 1986—2018 年气象观测资料, 得出淮北平原 1986—2018 年气温和年降水量均呈上 升趋势,且 1994 年为气温突变年的结论。本文基于 以上研究,对比气温突变年 1994 年前后淮北平原冬 小麦干旱事件的变化特征及趋势。

1)突变前后干旱严重指数 DSI 变化特征分析。 以气温突变年(1994年)为界,统计突变前 (1986—1993年)、后(1994—2018年)干旱严重指 数 DSI 的平均值、最大值、线性倾向率,分析突变 前后干旱严重指数 DSI 的变化特征,结果见表 6。由 表 6 可知,1986—2018 年淮北平原干旱严重指数均 值在冬小麦播种—返青期突变后小于突变前,返青— 成熟期突变后大于突变前,其中播种一出苗期由突变前 0.285 下降到突变后 0.145,由中旱变为轻旱。各 生育阶段 DSI 线性倾向率突变前到突变后除返青一 拔节期呈上升趋势外,其他生育阶段突变前后均呈下 降趋势或由上升变为下降。除出苗一返青期外,其他 生育阶段突变后的 DSI 最大值均大于突变前,这说明 极端干旱有加剧趋势。

2)突变前后干旱频率变化特征分析。以气温突 变年(1994年)为界,统计突变前后的干旱频率, 分析突变前后干旱频率的变化特征,结果见表7。由 表7可知,1986—2018年淮北平原冬小麦各生育阶 段、各等级干旱的干旱频率均呈现出突变后大于突变 前的规律,这表明干旱愈加频繁。突变前重旱、特旱 仅在灌浆—成熟期以较低频率发生,其他生育阶段均 未发生,突变后播种—出苗期出现重旱,灌浆—成熟 期重旱、特旱频率均有所增加,表明突变后极端干旱 现象增多。

表 6	气温突变年前后干旱严重指数	、(DSI) 变化特征
-----	---------------	-------------

DSI	播种一出苗期		出苗一返青期		返青一	返青一拔节期		拔节一抽穗期		抽穗一灌浆期		灌浆一成熟期	
	突变前	突变后	突变前	突变后	突变前	突变后	突变前	突变后	突变前	突变后	突变前	突变后	
线性倾向率	0.22	-0.02	0.24	-0.02	0.11	0.03	-0.03	-0.01	-0.13	-0.55	0.25	-0.02	
平均值	0.29	0.15	0.08	0.04	0.05	0.10	0.01	0.08	0.05	0.12	0.22	0.23	
最大值	0.43	0.72	0.42	0.38	0.25	0.31	0.09	0.35	0.37	0.41	0.93	0.94	
表 7 气温突变年前后干旱频率对比													

Table 7	The comp	arison o	of drought	t frequenc	y between	before and	after abru	pt tem	perature	change

	Table 7 The comparison of drought frequency between before and after abrupt temperature change											%	
工日格表	播种一出苗期		出苗一	出苗一返青期		返青一拔节期		拔节一抽穗期		抽穗一灌浆期		灌浆一成熟期	
十千妙平	突变前	突变后	突变前	突变后	突变前	突变后	突变前	突变后	突变前	突变后	突变前	突变后	
所有干旱	4.06	6.6	1.02	3.55	1.02	6.09	0.51	3.55	0.51	6.6	1.52	7.61	
轻旱	1.52	3.05	0.51	2.03	0.51	4.57	0.51	0.51	0	3.05	0	4.06	
中旱	2.54	3.05	0.51	1.52	0.51	1.52	0	3.05	0.51	3.55	0.51	0.51	
重旱	0	0.51	0	0	0	0	0	0	0	0	0.51	1.02	
特旱	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.51	2.03	

3 讨论

土壤深度 0~50 cm 是各种作物根系的主要分布 区^[24-25],很多作物土壤水分的研究仅针对 0~50 cm 展 开^[7,11],实际上,作物根区土壤水分是随着根系生长 动态变化的[26],本研究表明,在冬小麦各生育阶段水 分对生长发育起关键作用的土层依次为:播种一出苗 期 10~30 cm、出苗一返青期 0~50 cm、返青一拔节期 50~120 cm、拔节一抽穗期 0~150 cm、抽穗一灌浆期 50~150 cm、灌浆一成熟期 0~10 cm。其中, 播种一出 苗期、出苗--返青期、拔节--抽穗期、抽穗--灌浆期 的关键土层与张从志等^[27]的结论一致,返青一拔节期、 灌浆—成熟期的结论有所出入,可能是因为冬小麦品 种及土壤类型不同,加之5月下半月淮北平原干热风 的影响,导致结论并不完全一致。淮北平原干热风在 5月中下旬出现,在5月第四、第五候对冬小麦灌浆 速度影响最大[28],削弱了土壤水分对冬小麦产量的影 响,且干热风加剧蒸发,表层土壤水分大幅下降,进 一步导致冬小麦减产,使得抽穗一灌浆期、灌浆一成 熟期各土层土壤水分与冬小麦产量的相关系数较低, 且灌浆一成熟期的关键土层为表土层 0~10 cm。

1986-2018 年淮北平原冬小麦生育期尺度下干 旱频率在 1991-2000 年达到最高, 查阅资料(《中 国气象灾害大典》《安徽统计年鉴》)得知 1991、 1994、1995、1999 年为典型干旱年,降水量较少。 典型干旱年增多与20世纪90年代干旱频率增大相吻 合。重旱多在灌浆一成熟期发生,特旱仅在灌浆一成 熟期发生,可见冬小麦灌浆一成熟期缺水最为严重, 这与许莹等[29]的研究结果一致,可能是受淮北平原5 月下半月干热风影响[28],未来应注意冬小麦灌浆一成 熟期的生长发育情况, 及时补充土壤水分并注意干热 风防御,以防出现严重旱灾。

在干旱事件发生过程中, 普遍认为降水和气温是

导致发生干旱的最主要因素^[30]。刘勇等^[23]认为 1986—2018 年淮河流域气温升高显著,陈柏丽等^[31]认 为淮北平原1955—2015年的年降水量整体呈现不显著 的上升趋势。气温上升对干旱的加剧作用可能被降水 量增加对干旱的减弱作用抵消一部分,再加之其他气 象因素的综合作用,可能造成了淮北平原 1986—2018 年冬小麦全生育期内无干旱突变年的现象。

气温突变年后,冬小麦播种一出苗期出现重旱, 在此之前冬小麦苗期以轻旱和中旱为主,未来应注意 冬小麦苗期的生长发育情况,及时补充土壤水分,保 证冬小麦出苗。气候变暖背景下,干旱愈加频繁且极 端干旱加剧,这与韩兰英等^[32]、张强等^[33]的研究结果 一致。随着中国经济的发展,抗旱减灾能力有所增加, 但抵御重大旱灾的能力仍然不足[34-35],面临极端干旱 加剧的趋势,未来应加强防御重大旱灾,避免重大旱 灾带来的社会经济损失。

本文依据相关系数判定关键土层,而目前关于不 同深度水源对作物贡献的研究,多是借助田间试验和 稳定性氢氧同位素技术来实现,今后可结合淮北平原 田间试验的研究成果,更为严谨地判定冬小麦生长发 育的关键土层。此外,本文选择冬小麦为主要粮食作 物, 选择蚌埠市五道沟试验站为站点, 来研究淮北平 原农业干旱的特征及演变规律,而淮北平原还有其他 代表性粮食作物和代表性站点,在后续研究中,可适 当开展多站点、多作物品种的研究,以期对淮北平原 农业干旱的特征及时空演变规律有更深的认识。

4 结 论

1) 冬小麦各生育阶段对产量起关键作用的根系 深度分别为: 播种一出苗期 10~30 cm、出苗一返青 期 0~50 cm、返青一拔节期 50~120 cm、拔节一抽穗 期 0~150 cm、抽穗一灌浆期 50~150 cm、灌浆一成熟 期 0~10 cm。

2)1986-2018年淮北平原冬小麦播种一出苗期 以轻旱和中旱为主,仅发生1次重旱;出苗一灌浆 期只发生轻旱和中旱;灌浆一成熟期发生3次重旱 和5次特旱,未来应加强灌浆一成熟期灌溉,及时补 充土壤水分以防出现严重旱灾。

3)1986—2018 年淮北平原冬小麦播种一出苗期干 旱呈显著下降趋势,出苗一返青期干旱在 2007—2012 年呈显著下降趋势,其他生育阶段干旱无显著变化趋势,且冬小麦全生育期内无干旱突变年。

 4) 气温突变年(1994年)后干旱愈加频繁,且 极端干旱有加剧趋势。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

[1] 谢五三,田红. 安徽省近 50 年干旱时空特征分析[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 94-98.

XIE Wusan, TIAN Hong. Analysis of the spatial-temporal characteristics of drought in Anhui Province in recent 50 years[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(1): 94-98.

- [2] 王胜,田红,党修伍,等.安徽淮北平原冬小麦气候适宜度分析及作物年景评估[J]. 气候变化研究进展,2017,13(3):253-261.
 WANG Sheng, TIAN Hong, DANG Xiuwu, et al. Research on the climate suitability and agricultural climate yields assessment of winter wheat in Huaibei Plain of Anhui Province[J]. Climate Change Research, 2017, 13(3): 253-261.
- [3] PALMER W C. Meteorological drought[M]. Washington, DC: U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [4] VICENTE-SERRANO S M, BEGU ER ÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1 696-1 718.
- [5] AWUMA K S, STUTH J W, KAITHO R, et al. Application of normalized differential vegetation index and geostatistical techniques in cattle diet quality mapping in Ghana[J]. Outlook on Agriculture, 2007, 36(3): 205-213.
- [6] 王连喜,王田,李琪,等. 基于作物水分亏缺指数的河南省冬小麦干 旱时空特征分析[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 83-88.
 WANG Lianxi, WANG Tian, LI Qi, et al. Study on spatial and temporal characteristics of drought of winter wheat in Henan Province based on crop water deficit index[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(12): 83-88.

[7] 李德,孙有丰,孙义.皖北砂姜黑土地冬小麦生育期尺度干旱指标研究[J].麦类作物学报,2017,37(2):220-231.
LI De, SUN Youfeng, SUN Yi. Study on drought indices of winter wheat during the growth stages in the lime concretion black soil in Northerm Anhui Province[J]. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(2): 220-231.

- [8] 康西言,李春强,杨荣芳.河北省冬小麦生育期干旱特征及成因分析[J].干旱地区农业研究,2018,36(3):210-217.
 KANG Xiyan, LI Chunqiang, YANG Rongfang. Analysis of characteristics and causes of drought for winter wheat growing period in Hebei Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3): 210-217.
- [9] 贾建英,刘蓉,韩兰英,等. 修订后水分盈亏指数在甘肃省冬小麦干 旱监测中的应用[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 871-879.
 JIA Jianying, LIU Rong, HAN Lanying, et al. Applicability of modified water budget index in winter wheat drought monitoring of Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 871-879.
- [10] 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.

- [11] 许海婷,黄娟萍,朱永华,等. 淮北平原冬小麦土壤含水率时空特征 分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 1-8.
 XU Haiting, HUANG Juanping, ZHU Yonghua, et al. Spatiotemporal variation of soil water content over winter wheat fields in Huaibei Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(7): 1-8.
- [12] 袁新田,刘桂建. 1957 年至 2007 年淮北平原气候变率及气候基本态 特征[J]. 资源科学, 2012, 34(12): 2 356-2 363.
 YUAN Xintian, LIU Guijian. Characteristics of climate variability and climate base state in Huaibei Plain 1957—2007[J]. Resources Science, 2012, 34(12): 2 356-2 363.
- [13] 张豪强,朱永华,吕海深,等.基于典型站点的淮北平原区不同时间 尺度下五项干旱指数分析[J].水电能源科学,2021,39(4):15-19. ZHANG Haoqiang, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Analysis of five drought indices in different time scales of Huaibei Plain based on typical station[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(4): 15-19.
- [14] GOU Q Q, ZHU Y H, HORTON R, et al. Effect of climate change on the contribution of groundwater to the root zone of winter wheat in the Huaibei Plain of China[J]. Agricultural Water Management, 2020, 240: 106 292.
- [15] 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]. 2019.
- [16] VAN GENUCHTEN M T. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone[C]//Unpublished Research Report, U S Salinity Laboratory, 1987.
- [17] SKAGGS T H, VAN GENUCHTEN M T, SHOUSE P J, et al. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1/2): 140-149.
- [18] ZHU Y H, REN L L, HORTON R, et al. Estimating the contribution of groundwater to the root zone of winter wheat using root density distribution functions[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-15.
- [19] 郝振纯,杨兆,王加虎,等. 淮北平原典型土壤水分特征曲线测定与 分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 106-108.
 HAO Zhenchun, YANG Zhao, WANG Jiahu, et al. Study on soil water characteristic curve of representative soil in Huaibei Plain[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(2): 106-108.
- [20] 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 20481-2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.
- [21] 倪深海,王亨力,刘静楠,等.中国农业干旱灾害特征及成因分析[J]. 中国农学通报,2022,38(10):106-111.
 NI Shenhai, WANG Hengli, LIU Jingnan, et al. Characteristics and causes of agricultural drought disasters in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(10): 106-111.
- [22] 王振龙,陈玺,郝振纯,等.淮北平原水文气象要素长期变化趋势和 突变特征分析[J]. 灌溉排水学报,2010,29(5):52-56.
 WANG Zhenlong, CHEN Xi, HAO Zhenchun, et al. Long-team trend and jump change for major climate processes over the area of Huaibei[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(5): 52-56.
- [23] 刘勇,朱永华,吕海深,等.淮河流域土壤含水量与气候因子的相关 性分析:以蚌埠站为例[J].节水灌溉,2021(1):20-26.
 LIU Yong, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Correlation analysis of soil moisture content and climatic factors in Huaihe River Basin: A case study of Bengbu Station[J]. Water Saving Irrigation, 2021(1): 20-26.
- [24] 刘荣花,朱自玺,方文松,等. 冬小麦根系分布规律[J]. 生态学杂志, 2008, 27(11): 2 024-2 027.
 LIU Ronghua, ZHU Zixi, FANG Wensong, et al. Distribution pattern of winter wheat root system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(11): 2 024-2 027.
- [25] 张柏治, 殷格侠, 张学. 关中灌区小麦、玉米高产节水灌溉的几个指标确定[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 142-145. ZHANG Baizhi, YIN Gexia, ZHANG Xue. Determination of several water-saving irrigation indicators for wheat and corn with high yield in

Guanzhong irrigated region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(5): 142-145.

- [26] ZHOU H K, WU J J, GENG G P, et al. Enhancing the ability of a soil moisture-based index for agricultural drought monitoring by incorporating root distribution[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2017, 53(6): 1 409-1 423.
- [27] 张丛志,张佳宝,张辉.不同深度土壤水分对黄淮海封丘地区小麦的贡献[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 655-664.
 ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao, ZHANG Hui. Contribution of soil water at different depths in profile to winter wheat in Fengqiu in Huang-Huai-Hai plain of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(4): 655-664.
- [28] 戚尚恩,杨太明,孙有丰,等.淮北地区小麦干热风发生规律及防御 对策[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 401-404.
 QI Shang'en, YANG Taiming, SUN Youfeng, et al. Occurrence rules and preventive measures of wheat dry hot wind in Huaibei area[J].
 Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(1): 401-404.
- [29] 许莹,马晓群,王晓东,等.淮河流域冬小麦水分亏缺时空变化特征 分析[J]. 地理科学, 2013, 33(9):1138-1144.
 XU Ying, MA Xiaoqun, WANG Xiaodong, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics of winter wheat water deficiency in Huaihe River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(9):1138-1144.
- [30] 周丹,张勃,安美玲,等.黄河流域不同时间尺度干旱对 ENSO 事件 的响应[J]. 中国沙漠, 2015, 35(3): 753-762.
 ZHOU Dan, ZHANG Bo, AN Meiling, et al. Responses of drought with different time scalese to the ENSO events in the Yellow River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(3): 753-762.

- [31] 陈柏丽,朱永华,王春艳,等.淮北平原降水量和参考作物蒸散量时 空演变规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(6): 109-116. CHEN Baili, ZHU Yonghua, WANG Chunyan, et al. Spatiotemporal variation of precipitation and evapotranspiration in Huaibei Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(6): 109-116.
- [32] 韩兰英,张强,贾建英,等. 气候变暖背景下中国干旱强度、频次和 持续时间及其南北差异性[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 1-10.
 HAN Lanying, ZHANG Qiang, JIA Jianying, et al. Drought severity, frequency, duration and regional differences in China[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(5): 1-10.
- [33] 张强,韩兰英,郝小翠,等. 气候变化对中国农业旱灾损失率的影响 及其南北区域差异性[J]. 气象学报, 2015, 73(6): 1 092-1 103. ZHANG Qiang, HAN Lanying, HAO Xiaocui, et al. On the impact of the climate change on the agricultural disaster loss caused by drought in China and the regional differences between the North and the South[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(6): 1 092-1 103.
- [34] 田志会,李晓雪. 1949—2016 年我国粮食主产区早灾变化趋势分析[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(12): 159-167.
 TIAN Zhihui, LI Xiaoxue. Analysis on the trend of drought in main grain producing areas in China from 1949 to 2016[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(12): 159-167.
- [35] 刘笑,何学敏,游松财. 1976—2015 年中国主要农业气象灾害的变 化特征[J]. 中国农业气象, 2017, 38(8): 481-487.
 LIU Xiao, HE Xuemin, YOU Songcai. Characteristics of agricultural meteorological disasters in China from 1976 to 2015[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(8): 481-487.

Analyzing Drought Variation in Winter Wheat Growing Season in the Huaibei Plain

FANG Yimin¹, ZHU Yonghua^{1*}, LYU Haishen^{1,2}, WANG Zhenlong³, PAN Ying¹, XU Haiting¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Water Conservancy Engineering, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory on Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province,

Anhui & Huaihe River Institute of Hydraulic Research, Hefei 230088, China)

Abstract: 【Objective】 Winter wheat in Huaibei plain experiences temporal water stress during its growing season. This paper investigates the characteristics and trends of the droughts in attempts to help improve agricultural management in this region. 【Method】 Soil in the studied region is Shajiang black soil. Soil moisture measured from 1986 to 2018 was used to analyze the key soil layers that influence wheat yield and to calculate the drought severity index (DSI). The Mann Kendall test and sliding T-test were used to analyze the drought trends and compare the characteristics of drought before and after sudden temperature changes. 【Result】 From 1986 to 2018, the wheat experienced mild and moderate droughts during the sowing-emergence stage, and it only encountered one severe drought. From the dormancy stage to heading stage, only mild and moderate droughts were identified. During the maturity stage, three droughts and five extreme droughts were recorded. From 2007 to 2012, the frequency of drought was declining in the sowing-emergence stage and dormancy stage. There were no significant changes in drought in other growth stages. Following sudden temperature change resulted in an increase in drought frequency and intensification of extreme drought. Future work should focus on improving irrigation during the maturity stage and timely replenishing soil moisture to mitigate the impact of extreme droughts.

Key words: Huaibei plain; winter wheat; drought characteristics; Shajiang black soil

责任编辑:赵宇龙