

网络出版时间:2026-03-31

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260330.1701.012

1994—2023 年度河北沧州滨海旱碱麦生长季 气候资源变化特征

魏秀梅^{1,2,3}, 秦俊灵^{1,2,3}, 任妙春³, 魏瑞江^{1,2,4}, 李琛³, 牟凤军³, 邹林林³

(1. 河北省气象与现代经济重点实验室, 河北石家庄 050021; 2. 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室, 河北雄安新区 071800; 3. 河北省沧州市气象局, 河北沧州 061000; 4. 河北省气象科学研究所, 河北石家庄 050021)

摘要: 基于河北沧州滨海旱碱麦主要种植区 1994—2023 年度逐日气象资料及农业气象试验站旱碱麦生育期资料, 采用线性倾向估计、Mann-Kendall(M-K)趋势检验和突变检验、Pearson 相关分析等方法, 系统分析旱碱麦全生育期及关键生育阶段降水、日照、热量资源变化特征, 并明确影响旱碱麦产量的关键气象因子。结果表明, 河北沧州滨海旱碱麦全生育期降水呈增加趋势, 结合播种年夏季及播前降水量, 全部年份自然降水均能够满足旱碱麦需水要求, 但各生育阶段差异显著, 播种—越冬期、越冬—返青期、返青—抽穗期和抽穗—成熟期降水能够满足需水要求的年份占比分别为 76.7%、66.7%、1.4% 和 26.7%。全生育期及灌浆期日照时数呈增加趋势, 灌浆期日照时数在 2009 年发生突变, 突变前后年日照时数相差 358 h, 灌浆期日照时数历年平均为 $9.1 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$, 光照充足。生长季 $>0^\circ\text{C}$ 积温呈极显著增加趋势, 76.7% 的年份在 2000°C 以上, $<0^\circ\text{C}$ 负积温有 50% 的年份在 200°C 以内, 但冬季最低气温呈显著下降趋势, 有 43.3% 的年份低于 -15°C ; 灌浆期日较差 90% 的年份在 $11.5\sim 13.5^\circ\text{C}$ 之间, 其中 2010—2016 年度减少显著。灌浆期日最高气温 $>32^\circ\text{C}$ 日数显著增加而日最高气温 $>35^\circ\text{C}$ 日数减少。旱碱麦产量与全生育期降水、播种年夏季降水、播前降水、返青—抽穗期降水、全生育期及灌浆期日照时数均呈显著正相关。水分是限制河北沧州滨海旱碱麦的主要因子, 需通过精准灌溉与雨水富集技术提升水分利用效率, 搭配抗寒、耐旱早熟品种降低气候风险。

关键词: 河北滨海; 旱碱麦; 气候资源; M-K 突变检验

中图分类号: S512.1; S314

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2026)05-0686-10

Variation Characteristics of Climatic Resources during the Growth Season of Coastal Drought-Saline Wheat in Cangzhou, Hebei Province from 1994 to 2023

WEI Xiumei^{1,2,3}, QIN Junling^{1,2,3}, REN Miaochun³, WEI Ruijiang^{1,2,4},

LI Chen³, MOU Fengjun³, ZOU Linlin³

(1. Hebei Key Laboratory of Meteorology and Modern Economy, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 2. CMA Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Open Laboratory, Xiong'an New Area, Hebei 071800, China; 3. Cangzhou Meteorological Bureau of Hebei Province, Cangzhou, Hebei 061000, China; 4. Meteorological Science Institute of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

Abstract: Based on the daily meteorological data from 1994 to 2023 and the growth period data of drought-saline wheat from agrometeorological experimental stations in the main coastal drought-saline wheat planting areas of Cangzhou, Hebei Province, this study systematically analyzed the variation characteristics of precipitation, sunshine, and thermal resources during the whole growth period and key growth stages of drought-saline wheat, and identified the key meteorological factors affecting its yield by using methods including linear trend estimation, Mann-Kendall(MK) trend test and mutation test, and Pearson correlation analysis. The results showed that the precipitation during the entire

收稿日期: 2025-06-17 修回日期: 2025-09-18

基金项目: 沧州市科技局科研项目(222202001)

第一作者 E-mail: 1981796659@qq.com(魏秀梅)

通讯作者 E-mail: weirj6611@sina.com(魏瑞江)

growth period of coastal drought-saline wheat in Cangzhou, Hebei Province showed an increasing trend. Combined with the precipitation in the summer of the sowing year and before sowing, natural precipitation in all years could meet the water demand of drought-saline wheat. However, there were significant differences among various growth stages. The proportions of years in which precipitation could meet the water demand during the sowing—overwintering stage, overwintering—regreening stage, regreening—heading stage, and heading—maturity stage are 76.7%, 66.7%, 1.4%, and 26.7%, respectively. The sunshine duration during the whole growth period and grain-filling stage of the wheat showed an increasing trend. A significant mutation in the sunshine duration during the grain-filling stage occurred in 2009, and the annual sunshine duration before and after the mutation differed by 358 h. The annual average sunshine duration during the grain-filling stage was $9.1 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$, indicating sufficient sunlight. The accumulated temperature above 0°C during the growing season showed a significant increasing trend, with 76.7% of the years reaching over $2\,000^\circ\text{C}$. For the negative accumulated temperature below 0°C , 50% of the years were within -200°C ; however, the winter minimum temperature presents a significant decreasing trend, and 43.3% of the years drop below -15°C . The diurnal temperature range during the filling stage fell between $11.5\text{--}13.5^\circ\text{C}$ in 90% of the years, with a significant reduction observed in the 2010—2016 period. The number of days with the daily maximum temperature exceeding 32°C during the filling stage increased significantly, while the number of days with the daily maximum temperature exceeding 35°C decreases. The annual yield of coastal drought-saline wheat in Cangzhou, Hebei Province was significantly positively correlated ($P < 0.05$) with the precipitation during the whole growth period, summer precipitation in the sowing year, pre-sowing precipitation, precipitation during the regreening to heading stage, and sunshine duration during the whole growth period and grain-filling stage. Water is the main limiting factor for coastal drought-saline wheat in Cangzhou, Hebei Province. It is necessary to improve water use efficiency through precision irrigation and rainwater harvesting technologies, and match cold-resistant, drought-tolerant, and early-maturing varieties to reduce climate risks.

Keywords: Coastal Hebei; Drought-saline wheat; Climatic resources; Mann-Kendall mutation test

旱碱麦是滨海盐碱地特有的小麦,主要在盐碱地条件下,为减轻地表返盐而实行旱作方式种植的小麦,具有抗旱、耐盐碱、适应性强等特性,且其籽粒富含蛋白质及多种微量元素,营养价值较高^[1],作为天然无污染的农产品,具有较好的市场前景。在国家相关战略引领下,特别是在“向盐碱地要粮”重要指示推动下,河北沧州滨海旱碱麦种植面积达 $1.04 \times 10^5 \text{ hm}^2$,占该省盐碱地面积的26%。系统评估其生长季气候资源及其演变特征,对盐碱地开发利用与旱碱麦稳产增产具有重要意义。

受盐渍化程度高、土壤肥力偏低以及灌溉条件受限等因素制约,旱碱麦生产以雨养旱作为主^[2-3]。既往研究在品种选育与栽培技术方面取得了较多进展,如筛选出了适合种植的抗旱、耐盐、丰产品种捷麦19、捷麦20、沧麦6005等;研发了起垄覆膜侧播技术^[4]、旱作沟播技术和起垄覆

膜膜下栽培技术^[5],在提高盐碱地雨水富集能力、降低田间水分蒸发量、保证冬小麦所需水分等方面发挥关键作用。然而,旱碱麦产量对年际间气候波动敏感,不同年际间产量在 $3\,000\text{--}5\,250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 间波动^[6-7]。对于华北乃至北方冬小麦气候资源变化的研究已有一定基础,有研究认为华北地区冬小麦全生育期平均气温、平均最高气温和平均最低气温均呈显著上升趋势,而降水量变化不显著,总辐射量显著下降^[8];华北东部沿海热量明显呈增加趋势,全年及夏季降水量减少趋势不明显,但年际间变化增大^[9];此外,基于气候变化对生育期的影响研究表明,河北及山西冬麦区冬春季增温明显,最低气温相对于平均及最高气温增幅更大,生育期变化与返青后阶段气温密切相关^[10-13];冬小麦的关键生育期与日照时数、日较差、气温相关显著,最低气温升高是冬小麦生育期提前的主要原因^[14]。但针对河北省旱碱麦种植

区的农业气候资源变化的研究鲜有报道。

本研究拟基于 1994—2023 年度河北省旱碱麦主要种植区 7 个气象站的地面逐日观测资料及冬小麦发育期观测资料,分析其种植区降水、光照和热量条件的变化特征,为旱碱麦品种改良和决策制定提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 研究区域

河北省旱碱麦的种植区主要位于沧州市运河以东的 7 个县(市)(图 1),包括黄骅、海兴、盐山、孟村、青县、沧县和南皮。沧州市属黑龙港流域,东临渤海,地势西高东低,西部为沃土平原,东部受临海影响,土壤以盐碱地为主,大运河贯穿南北。全市东西长约 181 km,南北宽约 165 km,总面积约 $1.43 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。受纬度与地形影响,表现为明显的暖温带大陆季风气候,四季分明,日照充足,年平均气温 $13.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 536.6

mm,降水、气温季节变化及气温的昼夜差别较为明显。该区域地势平坦,光照充足,土壤瘠薄,越靠近渤海盐碱化程度越高,pH 值平均 7.8(数据来源于旱碱地盐碱量测试实验),主要的种植作物有旱碱麦、玉米、苜蓿及特色林果冬枣等。

1.2 数据来源

选取河北省旱碱麦主要种植区内黄骅、海兴、盐山、孟村、青县、沧县和南皮 7 个气象观测站 1994—2023 年度旱碱麦生育期逐日气象资料,包括降水量、日照时数、平均气温、最低气温和最高气温。各气象要素的平均值为旱碱麦种植区内 7 个气象站各气象要素的平均值。气象资料来自于河北省气象信息中心。旱碱麦产量数据来源于河北省统计局,年限为 1994—2023 年度。旱碱麦生育期资料来自于河北省黄骅农业气象试验站,观测年限为 2010—2023 年度,包括播种期、越冬期、返青期、抽穗期和成熟期,各生育时期起止日期取历年观测值的平均值(表 1)。

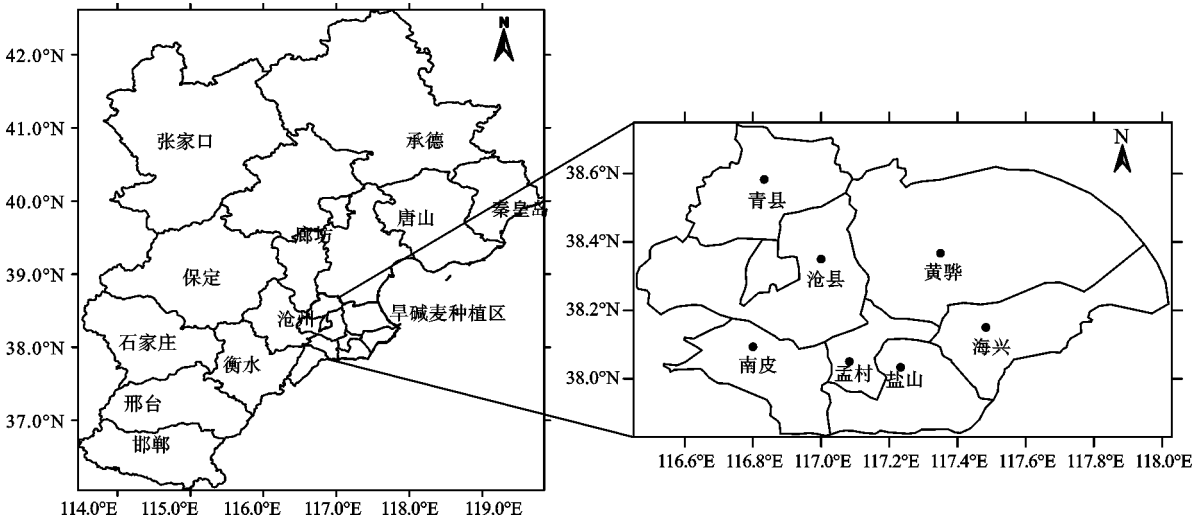


图 1 河北省旱碱麦种植区分布图

Fig. 1 Distribution map of drought-alkali wheat planting areas in Hebei Province

表 1 旱碱麦播种前及各生育期起止日期

Table 1 Start and end dates of pre-sowing period and each growth stage of drought-alkali wheat

序号 Serial number	播种前及生育期 Pre-sowing period and growth stage	起止日期(月/日) Date(month/day)
I	播种年夏季 Summer of the sowing year	6/1—8/31
II	播种前 Pre-sowing stage	9/1—10/7
III	播种—越冬期 Sowing—overwintering stage	10/8—12/3
IV	越冬—返青期 Overwintering—regreening stage	12/4—3/2
V	返青—抽穗期 Regreening—heading stage	3/3—5/4
VI	抽穗—成熟期 Heading—maturity stage	5/5—6/6
VII	全生育期 Whole growth period	10/8—6/6

1.3 研究方法

1.3.1 生育期划分与气象要素统计

根据旱碱麦生育进程,将其生育期划分为播种—越冬期、越冬—返青期、返青—抽穗期和抽穗—成熟期 4 个阶段。统计各站历年各生育阶段的降水量、日照时数、最低气温、日较差、 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温、 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 负积温、日最高气温 $>32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $>35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数,分析各气象要素的年际变化特征。

1.3.2 Mann-Kendall(M-K)趋势检验

采用 M-K 趋势检验和突变检验方法判断气象要素年际变化显著水平和突变点^[15]。

对于 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 的时间序列变量, n 为时间序列的长度,构造一个秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, (k=2, 3, \cdots, n) \tag{1}$$

式中 $r_i = \begin{cases} 1, & \text{当 } x_i > x_j \\ 0, & \text{当 } x_i \leq x_j \end{cases}, (j=1, 2, \cdots, i) \tag{2}$

在时间序列随机独立的假定下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}}, (k=1, 2, \cdots, n) \tag{3}$$

式中 $UF_1=0, E(S_k)、\text{Var}(S_k)$ 是累计数 S_k 的均值和方差,在 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 相互独立,且有相同连续分布时,可由下式算出:

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \tag{4}$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \tag{5}$$

UF_i 为标准正态分布,按时间序列 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,当 $\alpha=0.05$,那么临界值 $U_\alpha = \pm 1.96$,若 $|UF_i| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。按时间序列 x 逆序 $x_n, x_{n-1}, \cdots, x_2, x_1$,再重复上述过程,同时使逆序列的 $UB_k = -UF_k (k=n, n-1, \cdots, 1), UB_1=0$ 。分析绘出的 $UF_k、UB_k$ 曲线,当其超过临界线时,表明上升或下降趋势显著。若 $UF_k、UB_k$ 两条曲线出现交点且在临界线之间,对应年份为突变发生时间。

1.3.3 降水满足率计算

采用降水满足率评价不同生育阶段降水对旱碱麦需水的满足程度。

$$a_j = \begin{cases} 1, & R_j > ET_j \\ \frac{R_j}{ET_j}, & R_j \leq ET_j \end{cases} \tag{6}$$

式中, a_j 为旱碱麦第 i 生育阶段降水满足率; R_j 为第 j 生育阶段内的降水量(mm); ET_j 为第 j 生育阶段内的需水量(mm),参考秦俊灵等^[16]的研究结果(表 2)。

1.3.4 相关性分析

采用 Pearson 相关系数分析旱碱麦产量与各

表 2 旱碱麦全生育期及各生育时期需水量

Table 2 Water requirements of drought-alkali wheat during whole growth period and each growth stage

序号 Serial number	生育时期 Growth stage	需水量 Water requirement/mm
I	全生育期 Whole growth period	180.6
II	播种—越冬期 Sowing—overwintering stage	22.4
III	越冬—返青期 Overwintering—regreening stage	8.4
IV	返青—抽穗期 Regreening—heading stage	86.1
V	抽穗—成熟期 Heading—maturity stage	63.7

气象因子的相关性,筛选出影响旱碱麦产量的关键气象因子。

$$r = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y} \tag{7}$$

式中, $\text{cov}(X, Y)$ 表示 X 和 Y 的协方差, σ_x 和 σ_y 表示 X 和 Y 的标准差, r 的取值范围 $-1 \sim 1$ 。

1.4 数据处理

利用 Excel 2019 进行数据处理,采用 Origin 2018 软件作图,气象要素变化趋势分析采用气候倾向率法,突变及显著性检验采用 M-K 法,用 SPSS 29.0 软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 旱碱麦种植区降水资源

2.1.1 全生育期、播前及播种年夏季降水量变化特征

1994—2023 年度旱碱麦全生育期历年平均降水量为 121.1 mm,整体呈极缓慢增加趋势,且年际间变化较大,其最大值出现在 2005 年度(332.9 mm),最小值出现在 1997 年度(25.8 mm);其气候倾向率为 $2.2\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ (图 2a)。旱碱麦播前降水量历年平均为 58.3 mm,年际差异显著,最大值出现在 2022 年度(274.3

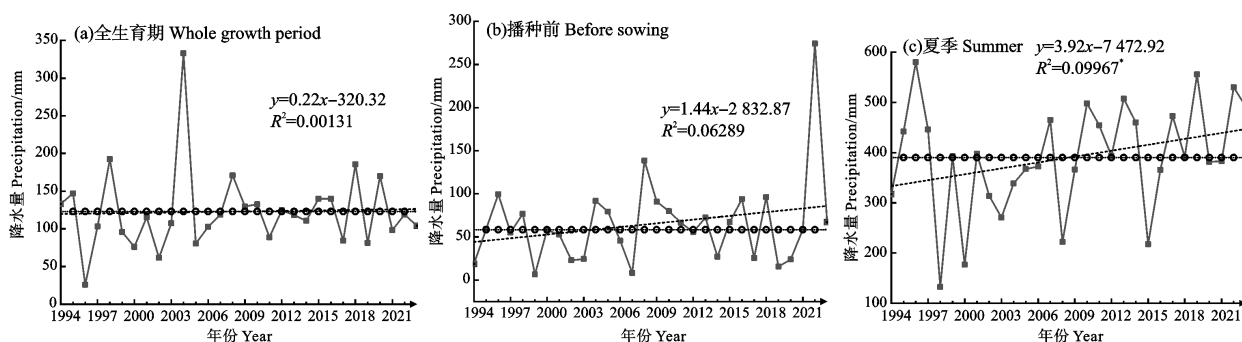
mm),最小值出现在1999年度(6.5 mm)(图2b)。旱碱麦播种年夏季降水量历年平均为390 mm,整体呈波动上升趋势($P<0.05$),气候倾向率为 $39.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,最大值出现在1996年度(580 mm),最小值出现在1998年度(132.4 mm)(图2c)。

结合旱碱麦全生育期需水量分析表明,全生育期内的降水仅13.3%年份能够满足旱碱麦生长需求。然而,播种年夏季降水及播前降水对播种期土壤墒情的形成具有重要补偿作用,综合考虑播前降水量与播种年夏季降水量,研究期内各年份自然降水总体上均能够满足旱碱麦生长对水分的基本需求。

2.1.2 旱碱麦各生育阶段降水量变化特征

1994—2023年旱碱麦播种—越冬期、越冬—

返青期、返青—抽穗期和抽穗—成熟期各阶段历年平均降水量分别为38.7 mm、13.7 mm、35.4 mm和35.1 mm(图3)。总体来看,各生育阶段降水量波动较大,个别年份存在异常偏多的现象,如2004年播种—越冬期降水量高达203.9 mm,主要由于2004年10月10—12日出现强降水过程,降水量达177.4 mm;1999年度,越冬—返青期降水量为54.4 mm,显著高于多年平均水平。结合旱碱麦各生育期需水量分析,各阶段自然降水能够满足作物需水量的年份比例分别为76.7%、66.7%、1.4%和26.7%。其中,返青—抽穗期自然降水满足率最低,水分亏缺最为突出,是旱碱麦生长季中水分胁迫最为严重的关键阶段。



*: $P<0.05$. 下同。

*: $P<0.05$. The same in below.

图2 1994—2023年度旱碱麦全生育时期(a)、播种前(b)及播种年夏季(c)降水量变化趋势

Fig. 2 Trends in precipitation during the whole growth period(a), pre-sowing stage(b), and summer of sowing year(c) for drought-alkali wheat from 1994 to 2023

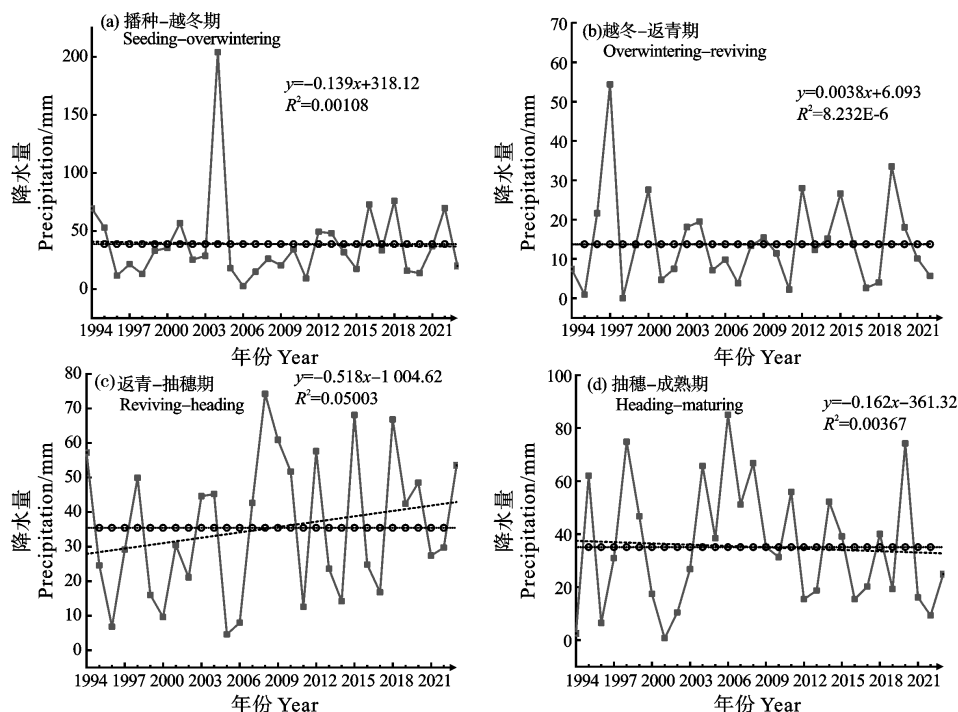


图3 1994—2023年度旱碱麦各生育阶段降水量变化趋势

Fig. 3 Variation trends of precipitation across different growth stages of drought-alkali wheat from 1994 to 2023

2.2 旱碱麦种植区日照时数变化特征

1994—2023 年度旱碱麦全生育期日照时数平均值为 1 644.5 h,日照时数整体呈极显著增加趋势($P<0.01$),气候倾向率为 $25.1\text{ h}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ (图 4a)。历年日照时数年际波动较大,其中最大值出现在 2012 年度(1 913.5 h);最小值出现在 2004 年度(1 384.1 h)。

抽穗—成熟期是小麦授粉与籽粒灌浆的关键阶段,充足的日照条件有利于光合产物的形成及向籽粒转运。1994—2023 年度旱碱麦抽穗—成熟期日照时数年际间变化较大,最大值出现在 2017 年度(350.7 h),最小值出现在 2002 年度(210.7 h),历年平均 $9.1\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$,气候倾向率平均值为 $6.5\text{ h}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ (图 4b)。

利用 M-K 法对抽穗—成熟期日照时数进行突变检验发现,由图 4c 可见,其 UF 曲线有明显阶段性特征,1994—2008 年度 $UF<0$,日照时数整体呈下降趋势;2009 年以后 UF 值迅速上升,并与 UB 曲线相交,且交点位于显著性检验临界线($\pm U_{0.05}$)之间,说明该时期日照时数的增加具有突变特征,突变发生在 2009 年。突变前后阶段年日照时数差异达 358 h,突变后日照时数增幅明显。

2.3 旱碱麦种植区热量条件

2.3.1 全生育期 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温、 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 负积温及冬季最低气温变化

日平均气温 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温可以直观体现旱碱麦生长季的热量状况。1994—2023 年度旱碱麦从播种至成熟阶段 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温在年际波动中呈极显著增加趋势($P<0.01$),气候倾向率为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。其中,最大值出现在 2015 年度($2\,253.3\text{ }^{\circ}\text{C}$),最小值出现在 2011 年度($1\,761.6\text{ }^{\circ}\text{C}$),历年平均值为 $2\,051.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 5a)。结合旱碱麦生长需

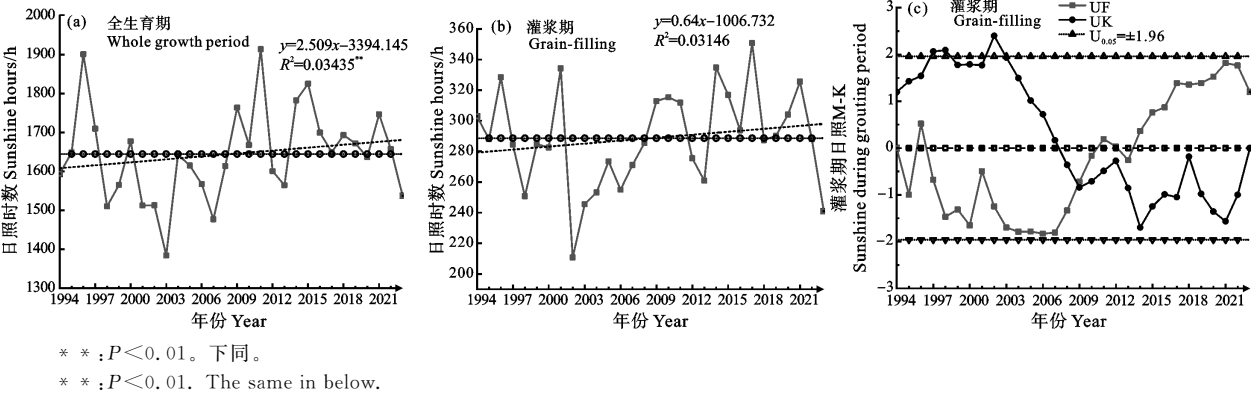
求来看,其正常成熟约需要 $2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温^[17],统计结果表明,有 76.7%的年份生长季 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温在 $2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,说明研究区整体热量条件能够较好满足旱碱麦正常生长发育的需求,且近 30 年来热量资源呈持续增加态势。

日平均温度 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的负积温是反映冬季寒冷程度及作物越冬环境的重要指标,负积温绝对值越大,表明冬季越寒冷,越不利于旱碱麦越冬。1994—2023 年度旱碱麦生长季 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温年际间波动较大,负积温绝对值最大的年份为 2014 年度($-316.7\text{ }^{\circ}\text{C}$),绝对值最小的年份为 2016 年度($-81.6\text{ }^{\circ}\text{C}$)。相关研究表明,越冬前生长进入伸长期的旱碱麦,当冬季负积温达 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,幼穗易发生冻害^[18],本研究统计结果显示,有 50%的年份生长季负积温绝对值在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内(图 5b),说明研究区近 30 年来冬季低温强度整体处于相对可控范围,但仍存在个别年份冬季寒冷程度偏强。

冬季最低气温是影响旱碱麦安全越冬及冻害发生风险的关键气象因子,当气温低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,旱碱麦易发生中度和重度冻害^[19]。1994—2023 年旱碱麦种植区冬季最低气温年际变化幅度较大,整体呈显著下降趋势($P<0.05$),气候倾向率为 $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,最低值出现在 2022 年度($-21.1\text{ }^{\circ}\text{C}$),历年平均值为 $-14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 5c)。冬季最低气温低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的年份占比为 43.3%。说明尽管研究区整体热量资源条件有所改善,但冬季强冷空气过程仍较为频繁,旱碱麦在部分年份仍面临一定低温冻害风险。

2.3.2 灌浆期日较差变化特征

灌浆期日较差越大越有利于旱碱麦籽粒干物质的积累。1994—2023 年度旱碱麦灌浆期日较差平均值为 $12.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中 90%的年份在 $11.5\sim13.5$



* * : $P<0.01$ 。下同。

* * : $P<0.01$ 。The same in below.

图 4 1994—2023 年度旱碱麦全生育期(a)和灌浆期日照时数变化趋势(b)及灌浆期日照时数 M-K 突变检验(c)

Fig. 4 Variation trends of sunshine hours during the whole growth stage(a) and grain-filling stage of drought-alkali wheat(b), and M-K mutation test chart of sunshine hours at grain-filling stage(c) from 1994 to 2023

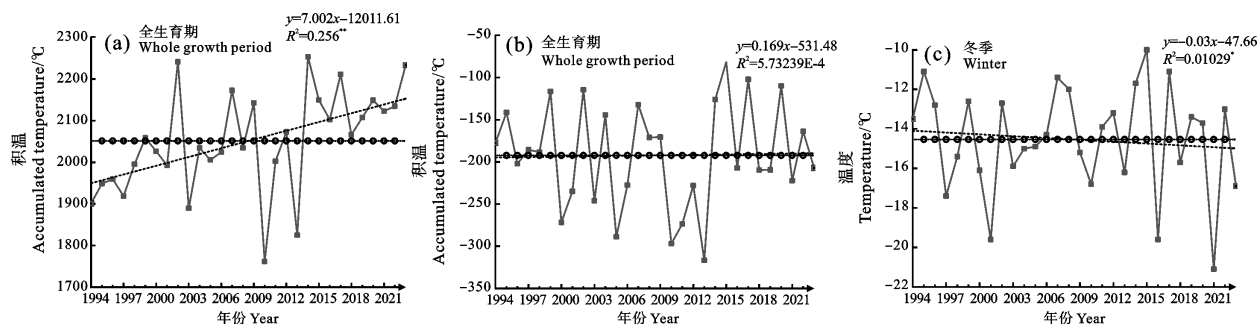


图 5 1994—2023 年度旱碱麦生长季 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温(a)、 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 负积温(b)及冬季最低气温(c)变化趋势

Fig. 5 Changes in accumulated temperature $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a), $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) and winter minimum temperature(c) during the growing season of drought-alkali wheat from 1994 to 2023

$^{\circ}\text{C}$, 仅个别年份高于 $13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或低于 $11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 整体处于相对适宜范围(图 6a)。M-K 突变检验结果(图 6b)表明, 灌浆期日较差的 UF 曲线仅在 2001 年出现大于 0 的情况, 其余年份均小于 0, 说明近 30 年来灌浆期日较差整体呈下降趋势。其中, 2010—2016 年 UF 曲线超过显著性水平 0.05 的临界线, 表明该阶段日较差下降趋势达到显著水平。总体来看, 尽管灌浆期日较差总体仍处于适宜区间, 但其下降趋势可能对旱碱麦籽粒干物质积累产生一定不利影响, 需在生产管理和品种选育中予以关注。

2.3.3 灌浆期日最高气温 $>32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $>35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 日数变化特征

冬小麦灌浆前期适宜灌浆的上限温度为日最高气温 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$, 灌浆后期为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ [20], 超过上述温度将会造成灌浆期缩短, 千粒重下降。1994—2023 年度旱碱麦灌浆期日最高气温 $>32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数年际波动较大, 平均值为 6 d, 整体呈显著增加趋势($P<0.05$), 气候倾向率平均值为 $0.9\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ (图 7a)。其中, 2001 年出现最多, 为 16

d; 1998 年最少, 未出现 $>32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温日。1994—2023 年旱碱麦灌浆期日最高气温 $>35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的日数平均值为 1 d, 整体呈下降趋势, 气候倾向率平均值为 $-0.1\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, $>35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温日数最多的在 2001 年(7 d), 其次为 2002 年和 2014 年(均为 5 d), 有 46.7% 的年份未出现。综合分析表明, 研究区近 30 年来灌浆期中等高温($>32\text{ }^{\circ}\text{C}$)发生频率有所增加, 而极端高温($>35\text{ }^{\circ}\text{C}$)发生频率呈下降趋势, 表明灌浆期热胁迫类型正由“极端高温”为主向“持续性中等高温”为主转变。

2.4 影响旱碱麦产量的主要气象因子筛选

1994—2023 年度河北省沧州滨海旱碱麦产量与各气象因子的相关性(表 3)表明, 旱碱麦产量与全生育期降水量、播种年夏季降水量、播种前降水量、返青—抽穗期降水量、全生育期日照时数及灌浆期日照时数均呈显著正相关, 相关系数分别为 0.364、0.360、0.373、0.349、0.434 和 0.371。其中, 全生育期日照时数与旱碱麦产量的相关系数最高, 表明光照条件对旱碱麦产量形成具有重要促进作用。

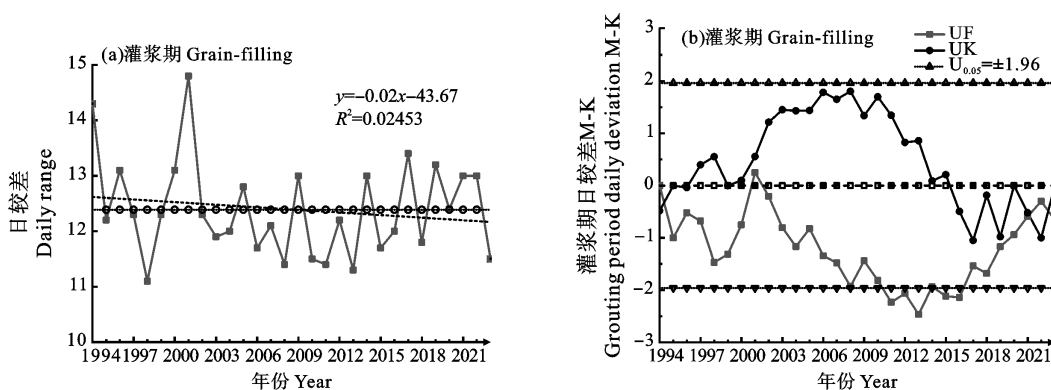


图 6 1994—2023 年度旱碱麦灌浆期日较差变化趋势(a)、灌浆期日较差 M-K 突变检验图(b)

Fig. 6 Variation trend of daily temperature range at filling stage of drought-alkali wheat from 1994 to 2023(a) and M-K mutation test results(b)

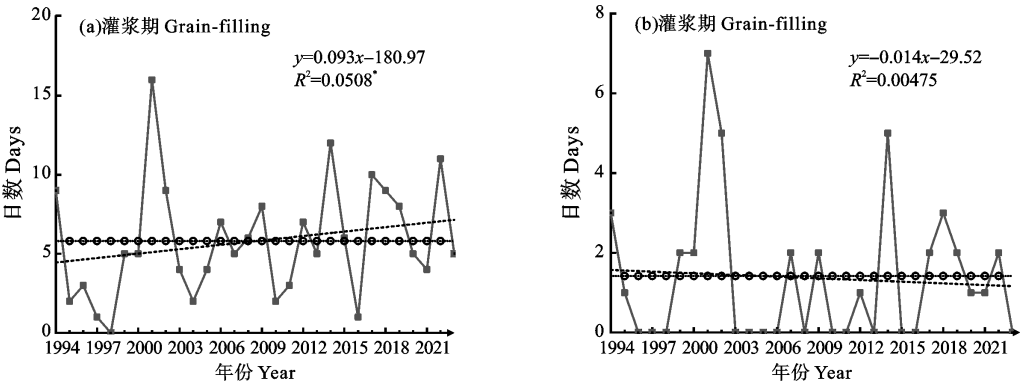


图 7 1994—2023 年度旱碱麦灌浆期 $>32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) $>35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) 日数变化趋势
Fig. 7 Change trend of days with temperature $>32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a) and $>35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) at grain-filling stage of drought-alkali wheat from 1994 to 2023

表 3 旱碱麦产量与光、温、水气象因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between drought-alkali wheat yield and meteorological factors

序号 Serial number	气象因子 Meteorological factor	相关系数 Correlation coefficient
I	全生育期降水 Precipitation during the whole growth stage	0.364 *
II	播种年夏季降水 Sowing-year summer precipitation	0.360 *
III	播种前降水 Pre-sowing precipitation	0.373 *
IV	播种—越冬期降水 Precipitation during the sowing stage to overwintering stage	0.177
V	越冬—返青期降水 Precipitation during the overwintering stage to regreening stage	0.247
VI	返青—抽穗期降水 Precipitation during the regreening stage to heading stage	0.349 *
VII	抽穗—成熟期降水 Precipitation during the heading to maturity stage	0.145
VIII	全生育期日照时数 Total sunshine hours during the whole growth stage	0.434 *
IX	灌浆期日照时数 Sunshine hours during the grain-filling stage	0.371 *
X	全生育期 $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 Accumulated temperature $>0\text{ }^{\circ}\text{C}$ during the whole growth stage	0.175
XI	全生育期 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 负积温 Accumulated negative temperature $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$ during the whole growth stage	0.123
XII	最低气温 Minimum air temperature	0.017
XIII	灌浆期日较差 Grain-filling stage diurnal temperature range	-0.230
XIV	灌浆期 $>32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 日数 Days with $\geq 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ during grain filling stage	-0.147
XV	灌浆期 $>35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 日数 Days with $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ during grain filling stage	-0.273

* : $P<0.05$ 。

3 讨论

本研究中,尽管旱碱麦全生育期内的自然降水仅有 13.3% 的年份能够满足其需水量,但播种年夏季降水和播种前降水对生育期水分供给具有显著补偿效应。综合播种年夏季和播前降水量,研究期内 100% 年份的自然降水条件均能够满足旱碱麦生长需求,表明雨水在旱碱麦生产体系中具有基础性支撑作用。这一结果也从气候资源角度支撑了起垄覆膜侧播技术、早作沟播技术等雨水富集措施在旱碱麦生产中的关键作用。播种—越冬期和越冬—返青期约有 70% 的年份自然降水能够满足旱碱麦需水要求,且播种年夏季及播

前降水为旱碱麦播种出苗、分蘖及安全越冬提供了较充足的底墒和表墒条件。然而,返青—抽穗期和抽穗—成熟期能够满足旱碱麦水分需求的年份仅占 1.4% 和 26.7%,水分亏缺严重,尤其返青—抽穗期。该时期正值幼穗分化和茎秆生长的关键期,水分胁迫会导致穗粒数减少和结实率下降^[16],因此返青—抽穗期是旱碱麦生产中最为关键的水分调控窗口期,生产实践中应优先在该阶段实施补充灌溉,以保障产量形成。

研究区域内旱碱麦全生育期及灌浆期日照时数在近 30 年内呈增加趋势,其中全生育期日照时数增幅达到极显著水平,灌浆期平均日照时数达 $9.1\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$,与姬兴杰等^[14]在北方冬麦区发现的

日照时数变化不显著结果,以及丁一汇等^[21-22]、代立芹等^[23]报道的华北平原及河北冬麦区日照时数下降趋势不同,本研究结果表明滨海旱碱麦种植区光照资源相对充足且持续改善的区域特征。光照条件改善有利于增强群体光合能力,延长有效灌浆时间,从而促进籽粒干物质积累,这也与相关分析中旱碱麦产量与全生育期及灌浆期日照时数显著正相关的结果一致,表明光照是研究区旱碱麦高产形成的重要促进因子。

旱碱麦生长季 $>0^{\circ}\text{C}$ 积温有76.7%的年份在2000 $^{\circ}\text{C}$ 以上,且增幅极显著($P<0.01$),越冬期间负积温呈下降趋势,且有50%的年份负积温在200 $^{\circ}\text{C}$ 以内。说明旱碱麦种植区的气候条件能够较好的满足旱碱麦热量生长需求。然而,冬季最低气温仍呈下降趋势($P<0.05$),低于 -15°C 的年份占比达43.3%,低温冻害风险依然存在。因此,在品种选育上仍需以冬性强、抗寒性好的品种为主,如沧麦12、沧麦6002等,其抗冻性可使低温胁迫下的产量损失降低20%以上^[24-25]。灌浆期日较差90%的年份在11.5~13.5 $^{\circ}\text{C}$,有利于光合产物的形成和积累^[26]。同时,灌浆期内日最高气温 $>32^{\circ}\text{C}$ 日数呈增加趋势,而 $>35^{\circ}\text{C}$ 日数和降水总体下降,与近几年灌浆期轻度干热风日数增加而中度和重度干热风较少相符,在品种的选育上应选择耐旱及早熟品种,以避免干热风灾害影响。

影响旱碱麦产量的关键气象因子是全生育期降水、播种年夏季降水、播种前降水、返青—抽穗期降水、全生育期及灌浆期日照时数,这些因子30年内均呈增加趋势,尤其播种年夏季降水($P<0.05$)、全生育期日照时数($P<0.01$)增幅显著,为旱碱麦产量提升提供了有利的气候背景^[27]。这一研究结果与秦俊灵等^[28]的结果略有差异,可能与选取的影响因子不同有关,本研究新增了播种年夏季降水、播种前降水为气象影响因子。在各类影响因子中,降水因子是主要相关因子,由于盐碱地土壤保水能力较差,其田间持水量较普通土壤低15%~20%,水分仍是制约旱碱麦生长和产量形成的核心限制因子。因此,需围绕降水高效利用构建综合管理体系:在技术层面,推广起垄覆膜侧播、旱作沟播等雨水富集技术、结合秸秆覆盖,提高土壤的储水能力;在灌溉层面,建立“气象预测+墒情监测”联动机制,于返青—抽穗期关键需水阶段实施精准补灌,确保水分满足率达90%以上。

4 结论

1994—2023年度河北省沧州旱碱麦全生育期历年平均降水量为121.1 mm,年际波动较大但整体呈缓慢增加趋势,结合播种年夏季及播前降水,全部年份均可满足需水要求,其中返青—抽穗期水分亏缺最为突出,是限制产量形成的关键阶段。旱碱麦全生育期及灌浆期日照时数均呈增加趋势,其中全生育期增幅极显著($P<0.01$),灌浆期日照时数在2009年发生突变,突变前后年日照时数明显增加。旱碱麦生长期以变暖为主的气候特征明显,其中 $>0^{\circ}\text{C}$ 积温在2000 $^{\circ}\text{C}$ 以上年份达76.7%,负积温整体减弱,但冬季最低气温下降趋势显著。产量与降水及日照因子显著正相关,水分是限制旱碱麦生长发育产量形成的主要因子,因此需通过精准灌溉与雨水富集技术提升水分利用效率,同时搭配抗寒、耐旱早熟品种进一步降低气候风险。

参考文献:

- [1]刘洪波,王淑琴.黄骅旱碱麦产业发展现状及对策[J].基层农技推广,2020,8(11):59.
LIU H B, WANG S Q. Present situation and countermeasures of drought-alkali wheat industry in Huanghua [J]. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2020, 8(11): 59.
- [2]王遵亲.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993.
WANG Z Q. Saline soil in China [M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [3]端木福,丁强.黄骅市旱碱麦种植技术要点及发展前景分析[J].现代农村科技,2023(5):25.
DUAN Y F, DING Q. Analysis of planting techniques and development prospect of drought-alkali wheat in Huanghua city [J]. *Xiandai Nongcun Keji*, 2023(5): 25.
- [4]黄素芳,刘振敏,白艳梅,等.环渤海雨养旱作区冬小麦起垄覆膜侧播种植模式研究[J].作物研究,2017,31(5):477.
HUANG S F, LIU Z M, BAI Y M, et al. Study on the furrow planting modes with ridge film mulching of the winter wheat in the rain-fed areas around Bohai [J]. *Crop Research*, 2017, 31(5): 477.
- [5]裴贞.小麦旱作沟播技术增产效应分析[J].农业灾害研究,2020,10(9):9.
PEI Z. Effect of furrow sowing technique on wheat yield increase in dry farming [J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2020, 10(9): 9.
- [6]曹华宁.黄骅不同旱碱地小麦品种生育特性及产量比较试验[J].农业科技通讯,2023(6):65.
CAO H N. Comparative experiment on growth characteristics and yield of wheat varieties in different dry and alkali lands in Huanghua [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2023(6): 65.
- [7]查晴,王芳,陈滇豫,等.深蓄储水灌溉对冬小麦籽粒灌浆及生长产量的影响[J].水资源与水工程学报,2023,34(3):208.
ZHA Q, WANG F, CHEN D Y, et al. Effects of deep storage irrigation on grain filling and growth yield of winter wheat [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*,

- 2023,34(3):208.
- [8]胡海瑀,王靖,冯利平.华北平原冬小麦各生育阶段农业气候要素变化特征分析[J].中国农业气象,2013,34(3):317.
HU X Y, WANG J, FENG L P. Analysis on agro-climatic elements variation during winter wheat growing season in North China Plain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(3):317.
- [9]谭方颖,王建林,宋迎波,等.华北平原近45年农业气候资源变化特征分析[J].中国农业气象,2009,30(1):19.
TAN F Y, WANG J L, SONG Y B, *et al.* Analysis of changing characteristics of agricultural climate resources over last 45 years in North China Plain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(1):19.
- [10]车少静,智利辉,冯立辉.气候变暖对石家庄冬小麦主要生育期的影响及对策[J].中国农业气象,2005,26(3):180.
CHE S J, ZHI L H, FENG L H. Impact of warmer climate on main growing periods of winter wheat and response strategy [J]. *Agricultural Meteorology*, 2005, 26(3):180.
- [11]谷永利,林艳,李元华.气温变化对河北省冬小麦主要发育期的影响分析[J].干旱区资源与环境,2007,21(12):141.
GU Y L, LIN Y, LI Y H. The analysis on the effect of temperature fluctuation on primary growing periods of winter wheat in Hebei [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(12):141.
- [12]王菱,谢贤群,苏文,等.中国北方地区50年来最高和最低气温变化及其影响[J].自然资源学报,2004,19(3):337.
WANG L, XIE X Q, SU W, *et al.* Changes of maximum and minimum temperature and their impacts in northern China over the second half of the 20th century [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(3):337.
- [13]钱锦霞,溪玉香.山西省冬小麦主要发育期特征及对气候变暖的响应[J].中国农学通报,2008,24(11):438.
QIAN J X, XI Y X. Characteristics of winter wheat main growth stages and response to climate warming in Shanxi Province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(11):438.
- [14]姬兴杰,朱业玉,刘晓迎,等.气候变化对北方冬麦区冬小麦生育期的影响[J].中国农业气象,2011,32(4):576.
JI X J, ZHU Y Y, LIU X Y, *et al.* Impacts of climate change on the winter wheat growth stages in North China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(4):576.
- [15]魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007.
WEI F Y. Modern climate statistical diagnostics and prediction techniques [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [16]秦俊灵,魏瑞江,魏秀梅,等.不同水文年型下河北旱碱麦需水量和缺水分析[J].麦类作物学报,2025,45(3):404.
QIN J L, WEI R J, WEI X M, *et al.* Analysis of water demand and water deficit of drought-alkali wheat in Hebei under different hydrological year patterns [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(3):404.
- [17]周吉红,毛思帅,王俊英,等.北京地区小麦生育期温度演变及不同生育时期温度指标[J].作物杂志,2016(3):116.
ZHOU J H, MAO S S, WANG J Y, *et al.* Temperature evolution and indicator of wheat growth period in Beijing [J]. *Crops*, 2016(3):116.
- [18]孙本普,李风云,孙雪梅,等.冬小麦冬性强弱不同品种穗分化的特点及其应用[J].小麦研究,2004,25(4):9.
SUN B P, LI F Y, SUN X M, *et al.* Characteristics of ear differentiation in winter wheat varieties with different levels of winter hardiness and their applications [J]. *Journal of Wheat Research*, 2004, 25(4):9.
- [19]中国气象局.黄淮海地区冬小麦越冬期冻害指标:QX/T447-2018[S].北京:中国气象出版社,2018.
China Meteorological Administration. Indices for freezing injury of winter wheat during wintering period in Huang-Huai-Hai Plain: QX/T447-2018 [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2018.
- [20]中国气象局.农作物气象条件定量评价技术导则:QX/T664-2023[S].北京:中国气象出版社,2023.
China Meteorological Administration. Technical guidelines for quantitative assessment of crop meteorological conditions: QX/T664-2023 [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2023.
- [21]丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):3.
DING Y H, REN G Y, SHI G Y, *et al.* National Assessment Report of Climate Change (I): Climate change in China and its future trend [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1):3.
- [22]谭方颖,王建林,宋迎波.华北平原近45年气候变化特征分析[J].气象,2010,36(5):40.
TAN F Y, WANG J L, SONG Y B. Characteristics of climate change in the North China Plain for recent 45 years [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(5):40.
- [23]代立芹,李春强,魏瑞江,等.河北省冬小麦生长和产量对气候变化的响应[J].干旱区研究,2011,28(2):294.
DAI L Q, LI C Q, WEI R J, *et al.* Response of growth and yield of winter wheat to climate change in Hebei Province [J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(2):294.
- [24]于亮,钮力亚,付晶,等.多抗节水型小麦品种沧麦12的选育及利用[J].安徽农业科学,2015,43(34):41.
YU L, NIU L Y, FU J, *et al.* Breeding and Utilization of Wheat Variety Cangmai 12 with Multi-Resistance and Water-saving [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(34):41.
- [25]于亮,王奉芝,陆莉,等.多抗节水型小麦品种沧麦6002的选育利用[J].河北农业科学,2009,13(7):42.
YU L, WANG F Z, LU L, *et al.* Breeding and utilization of wheat variety Cangmai 6002 with multi-resistance and water-saving [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2009, 13(7):42.
- [26]信志红,郭建平,谭凯炎,等.冬小麦籽粒品质评价及其对气象因子的响应研究[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(8):1205.
XIN Z H, GUO J P, TAN K Y, *et al.* Evaluation of grain quality of winter wheat and its response to meteorological factors [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(8):1205.
- [27]周林,王汉杰,朱红伟.气候变暖对黄淮海平原冬小麦生长及产量影响的数值模拟[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2003(2):76.
ZHOU L, WANG H J, ZHU H W. Simulation study on the impact of climate warming on production of winter wheat in Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science)*, 2003(2):76.
- [28]秦俊灵,索春男,任妙春,等.河北旱碱麦不同生育时期气候变化及对产量影响的双重量化分析[J].麦类作物学报,2025,45(1):130.
QIN J L, SUO C N, REN M C, *et al.* Double quantitative analysis of climate change and its effect on yield of drought-alkali-resistant wheat in Hebei Province [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(1):130.