

宋艳玲,周广胜,郭建平,等. 北方冬小麦冬季冻害及播期延迟应对. 应用气象学报, 2022, 33(4): 454-465.  
DOI: 10.11898/1001-7313.20220406

# 北方冬小麦冬季冻害及播期延迟应对

宋艳玲<sup>1)2)\*</sup> 周广胜<sup>1)2)</sup> 郭建平<sup>1)2)</sup> 李勇<sup>3)</sup> 潘亚茹<sup>1)</sup> 付严<sup>4)</sup>  
杨荣光<sup>5)</sup> 白晓英<sup>6)</sup> 徐金霞<sup>7)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

<sup>2)</sup>(中国气象局-中国农业大学农业应对气候变化联合实验室, 北京 100081)

<sup>3)</sup>(贵州省气象局, 贵阳 550002) <sup>4)</sup>(农业农村部国际交流服务中心, 北京 100125)

<sup>5)</sup>(山东省泰安市气象局, 泰安 271001) <sup>6)</sup>(陕西省咸阳市气象局, 咸阳 712034)

<sup>7)</sup>(四川省气象局, 成都 610072)

## 摘 要

全球变暖背景下,我国北方冬麦区冬季冻害是否仍是主要气象灾害,冬小麦播期延迟是否能作为应对气候变化的措施,成为当前亟待解决的科学问题。研究表明:1981—2000 年北方冬麦区偏北地区冬季冻害指数与冬小麦减产率相关系数为 0.62(达到 0.001 显著性水平),即 2000 年前冬季冻害是冬小麦减产的主要气象灾害之一;2000 年后冻害与冬小麦减产率相关不显著,即冬季冻害已不再是冬小麦减产的主要影响因素。2018—2021 年的冬小麦分期播种试验分析表明:山东泰安和陕西咸阳主栽的冬小麦品种播期推迟,冬前积温和生长季积温明显减少,导致冬小麦植株高度、地上总干重和叶面积指数减小;播期推迟对产量结构造成不利影响,有效穗数、穗粒数和千粒重均分别减少,导致减产,播期推迟 10 d 平均减产 22%,推迟 20 d 平均减产 40%。因此,冬小麦推迟播期并未产生积极效应,可能原因是当前冬小麦播期和主栽的冬小麦品种已适应当地气候变化。

**关键词:** 北方冬麦区; 冻害; 应对气候变化措施; 产量

## 引 言

小麦是世界性的重要谷物,其种植面积、总产量和总贸易额均居各类作物之首<sup>[1]</sup>。中国是世界上最大的冬小麦生产和消费国,1978—2020 年中国冬小麦总产量增加了 1.7 倍,其中冬小麦单产增加 2 倍,种植面积减少 10%<sup>[2]</sup>。2020 年冬小麦种植面积达到  $2.2 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,总产量超过  $1.29 \times 10^8$  t<sup>[2]</sup>,占世界总产量的 15%<sup>[1]</sup>。冬小麦产量波动影响我国国家粮食安全,其受气象灾害、病虫害和生产措施等<sup>[3-5]</sup>诸多因素影响。气象条件影响冬小麦生长发育的物理、化学和生物过程,尤其是气象灾害,如低温冻害、干旱、渍害和干热风等,常导致冬小麦大幅

减产。华北平原冬季干旱、多风、少雪、气温变幅大,冬小麦经常发生冻害,如 1949—1994 年北京有 5 年因严重冻害冬小麦减产 30% 以上。1980 年河北省冬季发生严重冻害,冬小麦麦苗冻害死亡三成以上,其中沧州、衡水两地 70% 以上麦田死苗超过五成<sup>[6]</sup>。黄淮平原冬季强寒潮南下时也可发生冻害,如 1977 年和 1980 年冬季强寒潮南下发生冻害,造成冬小麦减产。1988 年山东冻害严重,济宁有  $1.5 \times 10^4$  hm<sup>2</sup> 冬小麦绝产,江苏北部和安徽北部也发生了冻害<sup>[6]</sup>。

受全球变暖影响,气温和降水等气候要素及低温冻害、高温、干旱等灾害强度和频率均发生变化,影响社会各个领域<sup>[7-8]</sup>。2019 年全球平均气温较工业化前(1850—1900 年平均值)偏高约 1.1℃,是有完

2022-04-19 收到, 2022-05-25 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505605, 2018YFA0606103), 中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J051)

\* 邮箱: songyl@cma.gov.cn

整气象观测记录以来的第二暖年<sup>[9]</sup>。1901—2019年中国地表年平均气温呈显著上升趋势,年平均气温上升 $1.27^{\circ}\text{C}$ 。1951—2019年中国地表年平均气温增温速率为 $0.24^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ,年平均最低气温增温速率达到 $0.32^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ,中国极端低温事件发生频次呈显著减少趋势,平均每10年减少239站日<sup>[10]</sup>。受全球变暖影响,北半球包括中国无霜期增加,终霜提前<sup>[11-13]</sup>。同时,气候变暖导致北半球生长季延长,生长季开始日期提前,结束日期延迟。植物和农作物物候期(如返青、开花、灌浆、落叶)随气温变化而变化<sup>[14]</sup>。研究表明:北半球过去几十年中生长季延长了1~3周,且春季开始日期提前明显<sup>[15]</sup>。我国生长季也明显延长,特别是生长季开始日期明显提前,2001—2010年与20世纪50年代相比,生长季开始日期提前7 d,其中北方地区生长季开始日期提前7~14 d,生长季结束日期延迟<sup>[13]</sup>。21世纪二氧化碳和其他温室气体如果不大幅度减排,全球增温可能超过 $2^{\circ}\text{C}$ ,对农业和社会影响更大<sup>[7]</sup>。

尽管气候变暖及其对农业和生态的影响已有大量研究,但农业应对气候变化措施研究鲜见报道。气候变暖,冬季气温升高,生长季开始日期提前,结束日期延后,我国北方冬小麦冬季冻害是否还是主要气象灾害,冬小麦播期延迟是否能作为气候变化的应对措施,成为亟待解决的科学问题。本研究于2018—2021年连续4年在陕西咸阳和山东泰安开展大田科学试验,研究气候变暖背景下冬小麦播期延迟能否作为应对气候变暖的措施。

## 1 试验方法与数据

### 1.1 试验区概况

试验在陕西咸阳和山东泰安的农业试验站开展。咸阳站位于陕西省咸阳市渭城区陵召村( $34.4^{\circ}\text{N}, 108.7^{\circ}\text{E}$ ),海拔高度为472.8 m,属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温为 $13.1^{\circ}\text{C}$ ,年降水量约为522 mm,地势平坦,土层深厚,土壤类型以粉壤土为主。泰安站位于山东省泰安市泰山区宁家结庄( $36.2^{\circ}\text{N}, 117.2^{\circ}\text{E}$ ),海拔高度为128.6 m,属于暖温带大陆性半湿润季风气候,年平均气温为 $13.3^{\circ}\text{C}$ ,年降水量约为685.6 mm,地势平坦,土层深厚,土壤类型以砂壤土为主。

### 1.2 试验设计

以当地常年大田实际播种期为界,设定正常播种期、比正常播种期晚播种10 d和晚播种20 d 3种方案,前后间隔20 d。各播种期重复4次(其中1个重复仅作为产量要素测定,不进行任何观测活动)。

各试验小区面积不小于 $20\text{ m}^2$ ,各小区间留有0.5 m保护间隔。种植方式采用南北方向条播,保持良好的通风透光,行距统一为20 cm。采用当地主栽品种或新推广的品种,不同播期种子一次性足量购买,保证种子属同一批次产品。山东泰安试验站2018—2019年使用红地95,2020—2021年使用泰科麦31。陕西咸阳试验站2018—2021年使用豫麦49-198,2020年使用周麦30。所有播期的播种量均与当地正常播种期的播种量保持一致。田间管理措施与当地常规管理措施一致,保证冬小麦不受水分因素和病虫害影响。

### 1.3 观测内容及方法

#### 1.3.1 冬小麦发育期观测

按顺序观测冬小麦播种、出苗、三叶、分蘖、越冬开始、返青、起身、拔节、孕穗、抽穗、开花、乳熟、成熟各发育期的普遍期日期。

#### 1.3.2 冬小麦生长及产量观测

株高:从三叶期开始每个发育普遍期测定。将最长叶片拉直,测至叶片顶端,抽穗后同时还测定穗顶端高度。每个小区顺序测定10株(茎),求平均后记录株高,每个播期3个重复分别测定。

地上部分干鲜重:在三叶、分蘖、越冬开始、返青、拔节、抽穗、乳熟、成熟普遍期测定。每个小区顺序挖取10株(茎),将茎秆、叶鞘(拔节期开始)、叶、穗分开,分别称取鲜重,烘干后称取干重,并求取平均值。记录单位( $\text{g}/\text{株}(\text{茎})$ ),每个播期3个重复分别测定。

密度:在三叶期、越冬开始期、返青期、拔节期和乳熟期测定。在小区中部相邻两行错开位置各取0.5 m长,分别数出小麦株(茎)数,并换算成单位面积(每平方米)株(茎)数。成熟期记录有效茎数。每个播期如无大的差异,观测1个重复。

产量因素测定:在冬小麦成熟期测定。测定项目包括小穗数、不孕小穗数、穗粒数、千粒重。在每个小区连续取20穗。逐穗数出小穗总数和不孕小穗数,求取平均值。脱粒数出总粒数并求取穗粒数。

晾晒风干后称取千粒重,每个播期3个重复分别测定。

气象要素测定:气象要素取站内气象观测数据,包括生长季的逐日平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数、风速等。

#### 1.4 农业气象站数据

为了研究冬小麦产量与冬季冻害的关系,搜集

1981—2021年北方冬麦区农业气象站冬季最低气温与冬小麦产量数据。农业气象站分布见图1,河北省选取4个站,山西省选取5个站,陕西省选取5个站,山东选取4个站。

本文插图中所涉及的中国国界及省界基于审图号为GS(2020)4630号标准地图制作,底图无修改。

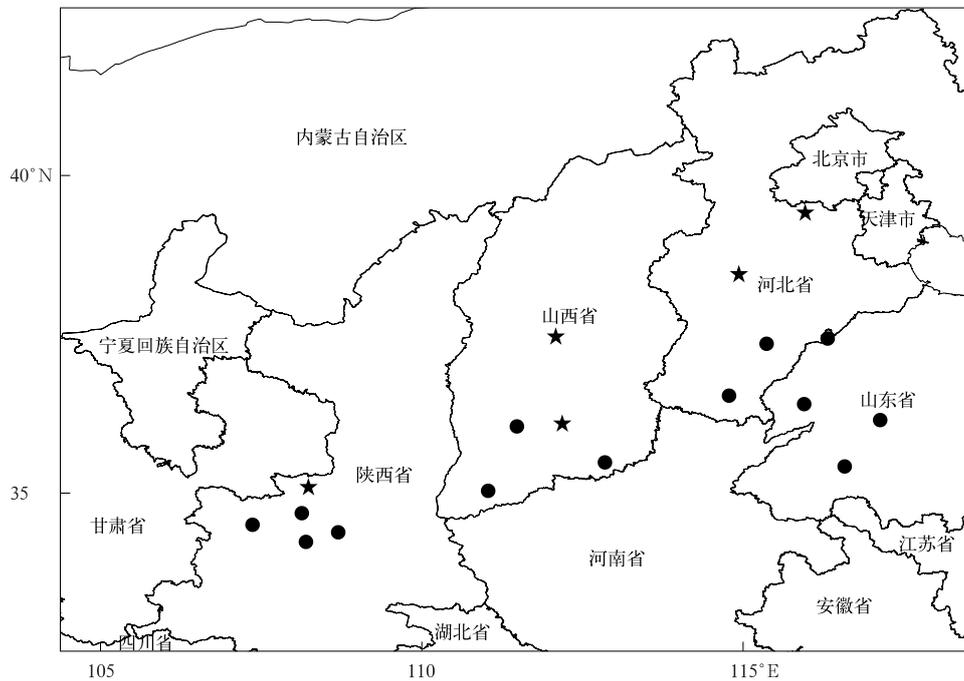


图1 北方冬麦区选取的农业气象站分布

Fig. 1 Location of agro-meteorological stations over winter wheat in northern China

#### 1.5 冬季冻害指数计算方法

北方冬麦区在日平均气温降到 $3^{\circ}\text{C}$ 以下时,冬小麦停止生长。日平均气温低于 $0^{\circ}\text{C}$ 时,冬小麦进入越冬期。冬小麦冬季冻害是指冬小麦越冬休眠到早春返青前受到长期强烈低温或剧烈变温造成的伤害。冬小麦不同部位以次生根抗冻能力最弱,茎生长点和老叶次之。茎生长点受冻会导致该分蘖死亡,但其他茎仍然可以生长。根系死亡则严重影响整个麦苗返青生长,但仍有可能长出新根恢复生长。分蘖节一旦死亡,即使还有部分新叶和叶鞘存活,但由于与土壤水分养分的联系切断,整个植株随即死亡。因此国内外大多以冬小麦分蘖节临界致死温度作为冬小麦冻害的生理指标。冬小麦安全越冬的临界温度因品种差异略有不同,冬性品种一般分蘖节能耐受的最低气温为 $-13^{\circ}\text{C}$ <sup>[16]</sup>,本文采用日最低气

温 $-13^{\circ}\text{C}$ 作为冬小麦越冬临界温度,冬季冻害指数( $I_{\text{KDD}}$ )作为冬小麦遭受冻害指标。冬季冻害指数计算方法如下:

$$I_{\text{KDD}} = \sum J_{\text{KDD}}, \quad (1)$$

$$J_{\text{KDD}} = \begin{cases} T_{\text{low}} - T_{\text{min,d}}, & T_{\text{min,d}} < T_{\text{low}}; \\ 0, & T_{\text{min,d}} > T_{\text{low}}. \end{cases} \quad (2)$$

其中, $I_{\text{KDD}}$ 为冬季冬小麦冻害指数(单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ), $J_{\text{KDD}}$ 为逐日冬小麦冻害指数(单位: $^{\circ}\text{C}$ ), $T_{\text{low}}$ 为冬小麦安全越冬临界温度(取 $-13^{\circ}\text{C}$ ), $T_{\text{min,d}}$ 为日最低气温(单位: $^{\circ}\text{C}$ )。

#### 1.6 冬前积温计算方法

冬前积温是指冬小麦播种到越冬期开始时日平均气温大于 $0^{\circ}\text{C}$ 的温度累积值,在本研究中冬小麦播种期为试验设定,冬小麦越冬期则与第1次强冷

空气出现时间有关,如第1次强冷空气出现时间早,冬小麦很快进入越冬期,冬前积温少,但当第1次强冷空气出现偏晚,冬小麦进入越冬期晚,冬小麦冬前积温多。

$$C_i = \sum T, T > 0. \quad (3)$$

式(3)中, $C_i$ 为冬小麦播种期到越冬期积温(单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$ ), $T$ 为日平均气温(单位: $^{\circ}\text{C}$ )。

### 1.7 冬小麦减产率计算方法

冬小麦单产受到诸多因素影响,如冬小麦品种、种植措施、肥料使用以及气候条件<sup>[17-18]</sup>。冬小麦品种改良、种植措施和施肥决定了冬小麦单产长期增产趋势,但冬小麦单产的年际波动则受到病虫害和气象灾害的影响,如干旱<sup>[19-22]</sup>、干热风<sup>[23-24]</sup>和低温冻害<sup>[25-30]</sup>等,单产越高说明受气象灾害和病虫害的影响越小。一般冬小麦品种3年更换1次,连续3年单产受冬小麦品种和种植制度以及施肥变化的影响较小,同时连续3年单产中最高产量受到气象灾害和病虫害影响最小。本研究减产率采用当年单产与前3年单产最高值差值的比值计算,这样归一化处理反映减产率主要受到气象灾害和病虫害的影响:

$$Y_c = \frac{Y_m - Y_i}{Y_m} \times 100\%。 \quad (4)$$

式(4)中, $Y_c$ 为第*i*年冬小麦减产率(单位:%), $Y_i$ 为第*i*年冬小麦单产(单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), $Y_m$ 为第*i*

年的前3年冬小麦最高产量(单位: $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

## 2 结果分析

本研究基于1981—2021年北方冬麦区农业气象站冬季日最低气温与冬小麦产量数据,分析在气候变暖背景下,冬小麦越冬期冻害与冬小麦单产的关系,并利用2018—2021年山东泰安和陕西咸阳大田试验数据,研究冬小麦播期延迟能否作为应对气候变化的措施。

### 2.1 冬小麦越冬期冻害与冬小麦单产关系

受全球变暖影响,1961—1990年我国北方冬麦区年平均最低气温在 $6.7^{\circ}\text{C}$ 附近波动,1991年后年平均最低气温持续上升,2001—2010年年平均最低气温为 $7.8^{\circ}\text{C}$ ,2011—2020年达到 $8.3^{\circ}\text{C}$ ,与1981—1990年相比,年平均最低气温升高 $1.3^{\circ}\text{C}$ (图2)。冬小麦生长季(当年10月—次年6月)平均最低气温也呈明显升高趋势,1962—1990年平均最低气温在 $2.9^{\circ}\text{C}$ 附近波动,1991年以后平均最低气温升温趋势明显,2001—2010年冬小麦生长季平均最低气温为 $4.2^{\circ}\text{C}$ ,2011—2020年达到 $4.6^{\circ}\text{C}$ ,比1981—1990年升高 $1.4^{\circ}\text{C}$ 。1981—2000年大于 $0^{\circ}\text{C}$ 积温变化不大,但2000—2021年大于 $0^{\circ}\text{C}$ 积温明显增加,受气候变暖影响2011—2020年比1961—1970年积温增加 $11.7\%$ (图2)。

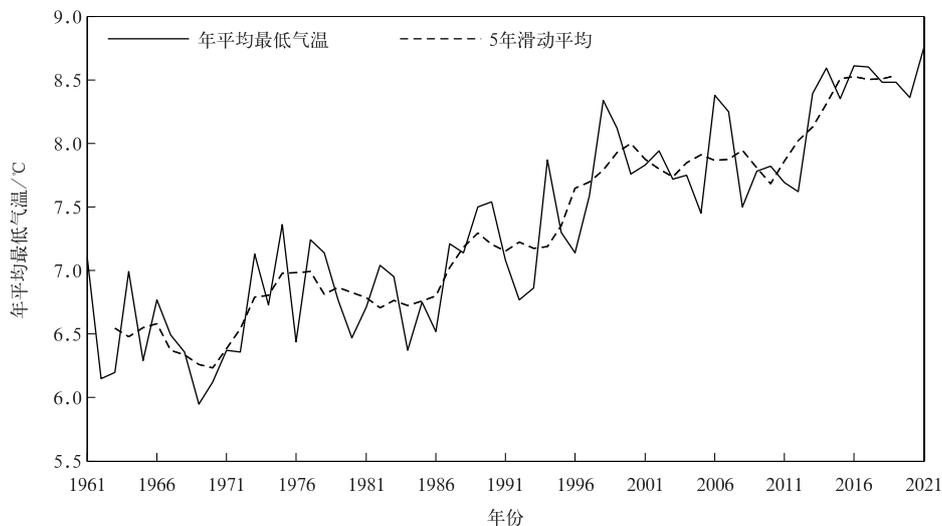
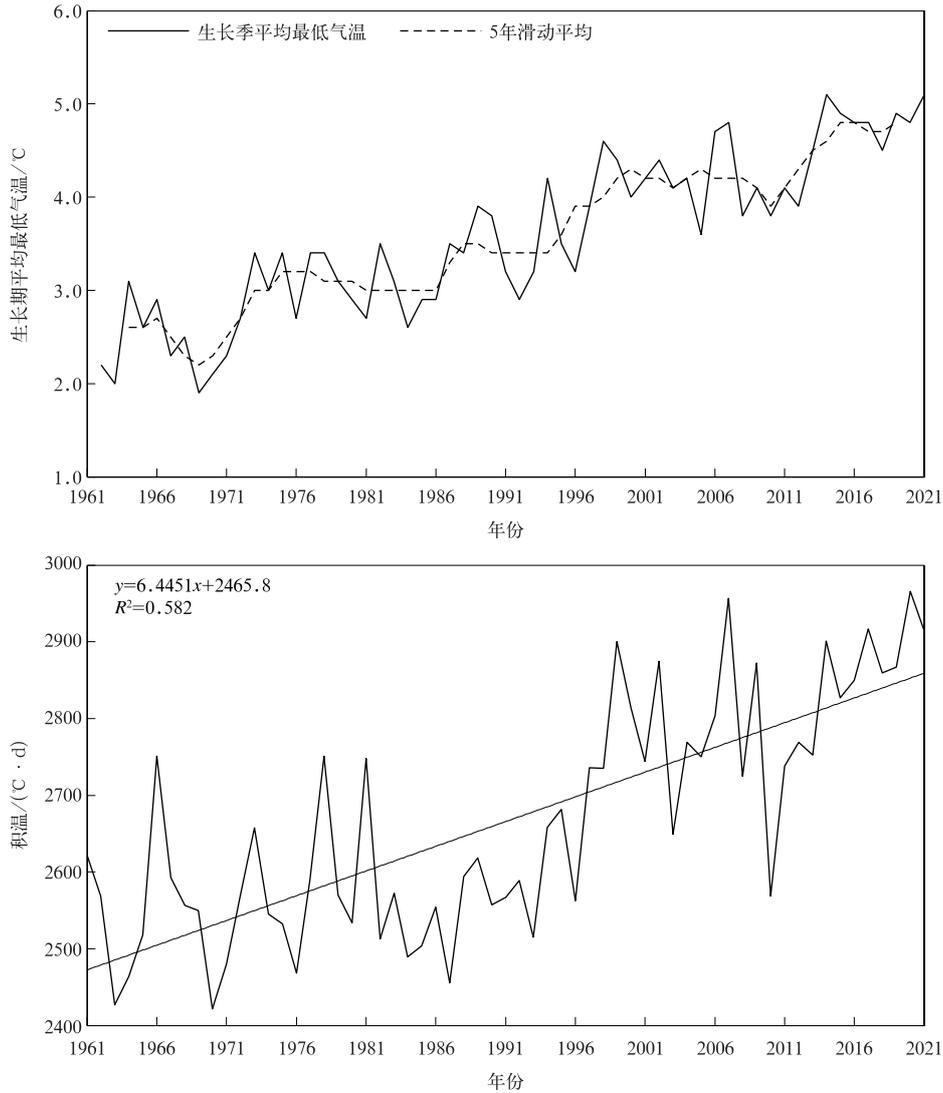


图2 1961—2021年北方冬麦区年平均最低气温、冬小麦生长季平均最低气温和积温变化

Fig. 2 Average annual minimum temperature, average minimum temperature of growing season and accumulated temperature of winter wheat in northern China from 1961 to 2021



续图 2

在气候变暖背景下,冬季冻害是否还是造成冬小麦减产的主要气象灾害,为了研究这一问题,本文分析 1981—2000 年和 2001—2021 年两个时间段冻害指数与冬小麦减产率的关系。结果表明:在北方冬麦区各省偏北地区(河北定州和涿州、陕西旬邑、山西交城和安泽冬季冻害指数超过  $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ), 1981—2000 年冬小麦减产率随着冬季冻害指数增加而增加,冻害指数与减产率相关系数为 0.62(达到 0.001 显著性水平),表明 1981—2000 年冬季低温冻害是冬小麦减产的主要气象灾害之一,如山西交城 1983/1984 年冬季冻害指数为  $524.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,交城站冬小麦减产达 60.6%。在上述研究样本中, 1981—2000 年北方冬麦区偏北地区冻害指数平均

为  $307.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,造成冬小麦平均减产 32.8%。冻害指数每增加  $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,冬小麦减产 7.3%。2001—2021 年北方冬麦区偏北地区冬小麦减产率虽然随着冻害指数的增加而增加,但两者的相关系数仅为 0.29,表明气候变暖后冬季冻害已不再是冬小麦减产的主要影响因子(图 3)。在北方冬麦区偏南地区(冬季冻害指数小于  $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ),1981—2000 年冬季冻害指数与冬小麦减产率相关系数仅为 0.25,且大多数年份冻害指数为 0。2001—2021 年冬季冻害指数与冬小麦减产率相关系数更低,仅为 0.08,说明气候变暖后,北方冬麦区偏南地区冬季冻害对冬小麦影响很小(图 4)。

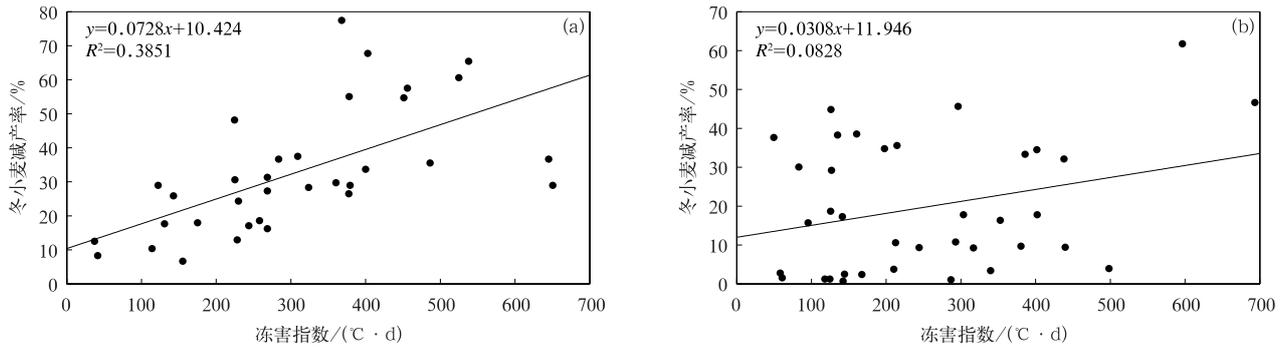


图 3 1981—2000 年(a)、2001—2021 年(b)北方冬麦区偏北地区  
冬季冻害指数和冬小麦减产率关系

Fig. 3 The correlation between freezing injury index and yield reduction during 1981—2000(a) and 2001—2021(b) over northern winter wheat region

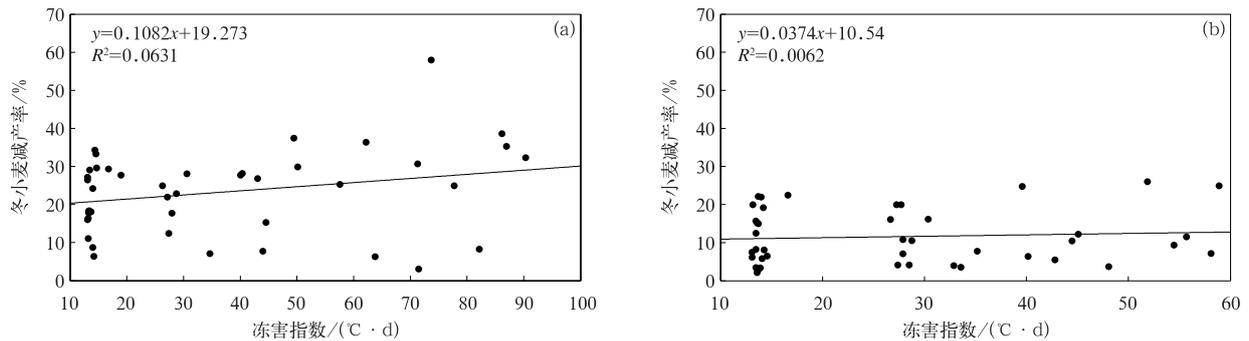


图 4 1981—2000 年(a)、2001—2021 年(b)北方冬麦区偏南地区  
冬季冻害指数和冬小麦减产率关系

Fig. 4 The correlation between freezing injury index and yield reduction during 1981—2000(a) and 2001—2021(b) over southern winter wheat region

## 2.2 冬小麦播期延迟应对气候变暖措施

气候变暖导致我国气温升高、生长季延长、冬小麦生长季积温增加,冬季冻害已不是冬小麦减产的主要影响因子。为了研究冬小麦适应气候变化措施,2018—2021 年在山东泰安和陕西咸阳开展大田试验,研究冬小麦播期延迟对冬小麦生长和产量的影响。

### 2.2.1 冬小麦延迟播种后积温和冻害分析

冬前积温是指冬小麦播种到越冬期开始时大于 0℃的积温。大田试验结果显示:冬小麦秋季播期推迟 10 d 和 20 d,冬前积温和整个生长季积温均明显减少。咸阳站冬小麦播种推迟 10 d,冬前积温平均减少 27.9%,2018 年减少最多,达 30.4%;冬小麦播种推迟 20 d,冬前积温平均减少 54.6%(图 5)。泰安站冬小麦播种推迟 10 d,冬前积温平均减少 24.6%,推迟 20 d,冬前积温平均减少 47.3%(图

5)。冬前积温与 12 月强冷空气出现时间有关,12 月强冷空气出现早,平均气温很快降到 0℃以下,冬小麦进入越冬期,冬小麦冬前积温少。反之,12 月强冷空气出现晚,冬小麦冬前积温多。如 2019 年 12 月 8 日泰安站冬小麦进入越冬期,冬小麦晚播 10 d,冬前积温为 407.4℃·d。2020 年 12 月 31 日泰安站进入越冬期,冬小麦晚播 10 d,冬前积温为 467.5℃·d。对于整个生长季而言,咸阳站冬小麦播种推迟 10 d,积温平均减少 5.6%,推迟 20 d,积温减少 12.4%(图 6)。泰安站冬小麦播种期推迟 10 d,积温平均减少 5.6%,推迟 20 d,积温平均减少 11.2%(图 6)。

2019/2020 年冬季泰安站日最低气温均在 -13℃ 以上,冻害指数为 0。2017/2018 年、2018/2019 年和 2020/2021 年冬季日最低气温低于 -13℃ 的日数分别为 4 d,1 d 和 4 d,冻害指数分别

为 $2.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 、 $0.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 和 $6.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,冻害指数较小,对冬小麦生长影响不大。咸阳站 2018/2019 年和 2019/2020 年冬季日最低气温均在 $-13^{\circ}\text{C}$ 以上,冻害指数均为 0。2017/2018 年冬季仅有 1 d 日最低气

温低于 $-13^{\circ}\text{C}$ ,冻害指数为 $3.6^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ,2020/2021 年也仅有 1 d 日最低气温低于 $-13^{\circ}\text{C}$ ,冻害指数为 $0.8^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。因此 2018—2021 年咸阳站冬季冻害对冬小麦影响不大。试验期间两站均无明显冻害发生。

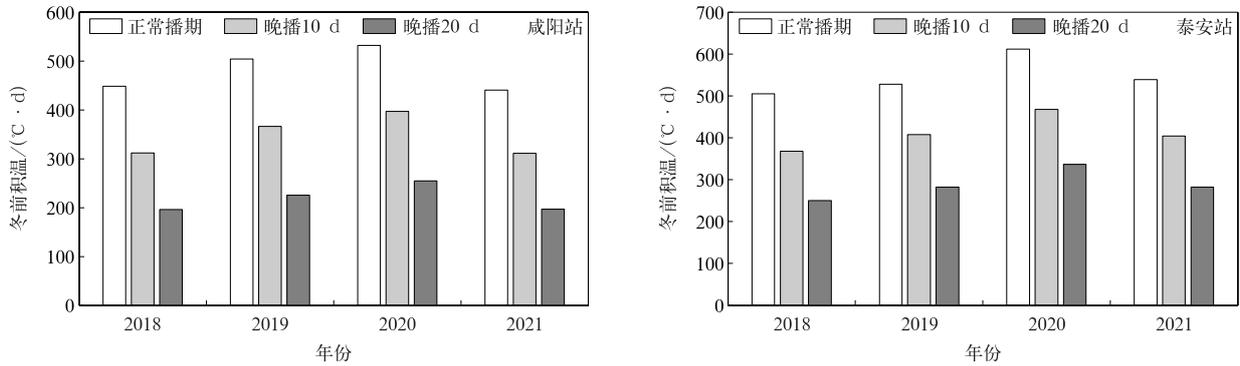


图5 2018—2021年咸阳站和泰安站正常播期、晚播10 d和晚播20 d冬前积温变化  
Fig. 5 Accumulated temperature before winter for normal sowing date, sowing date delaying for 10 days and sowing date delaying for 20 days at Xianyang and Taian stations from 2018 to 2021

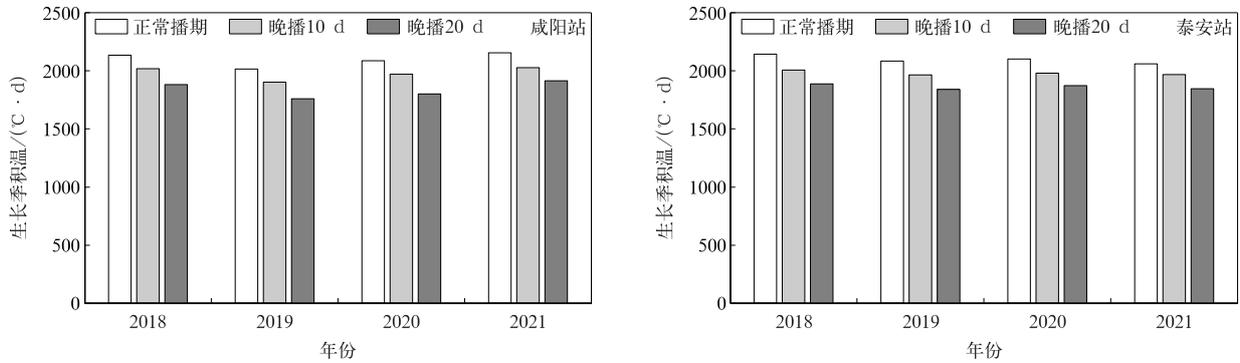


图6 2018—2021年咸阳站和泰安站正常播期、晚播10 d和晚播20 d生长季积温变化  
Fig. 6 Accumulated temperature of growing season for normal sowing date, sowing date delaying for 10 days and sowing date delaying for 20 days at Xianyang and Taian stations from 2018 to 2021

### 2.2.2 冬小麦延迟播种对生长影响

研究显示:冬小麦播种期推迟,冬小麦成熟时植株高度减少。咸阳站冬小麦播种期推迟10 d,冬小麦株高平均减少4.6 cm,推迟20 d减少10.4 cm(图7)。泰安站冬小麦播期推迟10 d,冬小麦株高平均减少3.2 cm,推迟20 d减少5.2 cm(图7)。试验结果表明:目前北方冬麦区种植的冬小麦品种,播种期推迟10 d和20 d,生长季积温减少,导致冬小麦植株比正常播期的植株矮。

研究发现,冬小麦播期推迟,冬小麦成熟时地上总干重(包括叶、茎、叶鞘和穗干重)减少。2018—2021年咸阳站试验中,冬小麦播种期推迟10 d,成

熟时地上总干重平均减少16.7%,推迟20 d,减少25.5%。2021年冬小麦成熟时地上总干重减少最多,播种期推迟10 d和推迟20 d地上总干重分别减少38.2%和55.7%。2018—2021年泰安站冬小麦播种期推迟10 d,成熟时地上总干重平均减少7.8%,推迟20 d,减少10.9%。

叶面积指数是冬小麦群体结构的重要量化指标。总体上,冬小麦播期推迟,叶面积指数减少。2018—2021年咸阳站冬小麦播期推迟10 d,抽穗时叶面积指数平均减少33.6%,推迟20 d,减少57.5%。2018—2021年泰安站冬小麦播期推迟10 d,抽穗时叶面积指数平均减少11%,推迟20 d,减少31.3%。

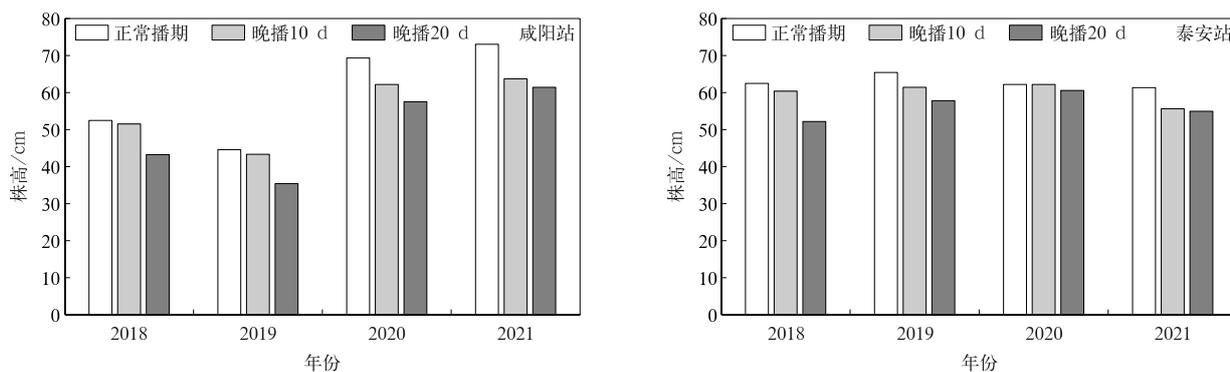


图 7 2018—2021 年咸阳站和泰安站正常播期、晚播 10 d 和晚播 20 d 冬小麦成熟株高变化

Fig. 7 Winter wheat height during mature for normal sowing date, sowing date delaying for 10 days and sowing date delaying for 20 days at Xianyang and Taian stations from 2018 to 2021

### 2.2.3 冬小麦延迟播种对产量结构影响

冬小麦推迟播期导致目前种植的冬小麦品种单产减少。2018 年、2019 年和 2021 年咸阳站冬小麦品种为豫麦 49-198, 在其他生产条件相同情况下, 播期推迟 10 d, 分别减产 6.4%, 31% 和 14.8%; 2020 年冬小麦品种为周麦 30, 推迟播种 10 d, 减产 64.5%。冬小麦推迟播种 20 d, 2018—2021 年单产分别减少 28.2%, 76.2%, 72.0%, 39.0% (图 8)。2018 年和 2019 年泰安站种植冬小麦品种为红地 95, 2020 年和 2021 年种植品种为泰科麦 31, 冬小麦播期推迟 10 d, 分别减产 11.5%, 14.6%, 12.7% 和 23.5%; 播期推迟 20 d, 2018—2019 年分别减产 19.8%, 31.9%, 2021 年减产 60.9% (图 8)。总体

上, 当前冬小麦种植的品种, 播期推迟普遍减产, 播期推迟 10 d 平均减产 22%, 推迟 20 d 平均减产 40%。

冬小麦播期推迟, 对冬小麦产量结构造成影响。2018—2021 年咸阳站冬小麦播期推迟 10 d, 有效穗数、穗粒数、千粒重分别平均减少 17.2%, 11.9%, 10.0%; 冬小麦播期推迟 20 d, 有效穗数、穗粒数、千粒重分别平均减少 32.5%, 25.4%, 17.1% (表 1)。2018—2021 年泰安站冬小麦播期推迟 10 d, 有效穗数、穗粒数分别平均减少 5%, 10.2%; 冬小麦播期推迟 20 d, 有效穗数、穗粒数分别平均减少 21.3%, 12.1%, 千粒重变化不明显 (表 2)。总体上, 冬小麦播期推迟, 对冬小麦产量结构均造成不利影响, 播

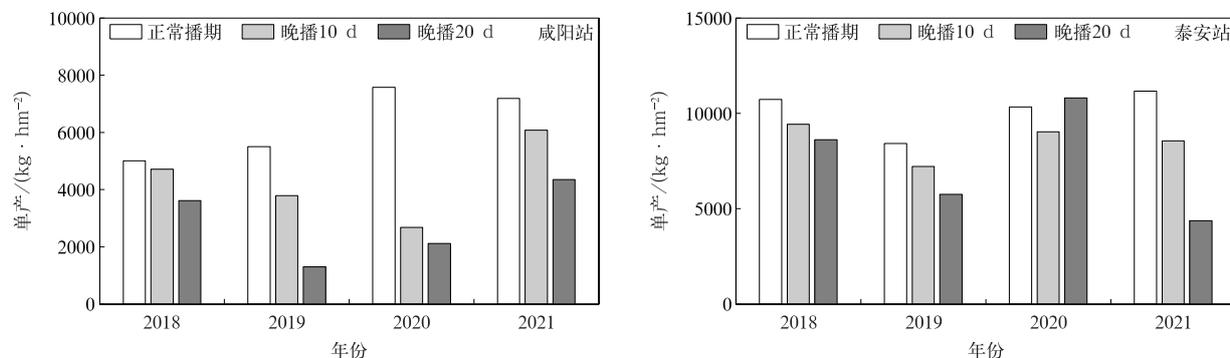


图 8 2018—2021 年咸阳站和泰安站正常播期、晚播 10 d 和晚播 20 d 冬小麦单产变化

Fig. 8 Yield for normal sowing date, sowing date delaying for 10 days and sowing date delaying for 20 days at Xianyang and Taian stations from 2018 to 2021

表1 2018—2021年咸阳站冬小麦正常播期和推迟播期积温和产量要素变化

Table 1 Accumulated temperature and yield of winter wheat for normal sowing date and sowing date delaying for 10 days and 20 days at Xianyang Station from 2018 to 2021

| 参量  | 推迟日数/d | 2018年  | 2019年  | 2020年  | 2021年  | 2018—2021年平均 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| 冬前积温/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ )  | 0      | 448.2  | 504.1  | 531.9  | 440.4  | 494.7        |
|   | 10     | 312.0  | 366.2  | 397.0  | 311.3  | 358.4        |
|   | 20     | 196.4  | 225.5  | 254.8  | 196.6  | 225.6        |
| 生长季积温/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ) | 0      | 2136.1 | 2017.3 | 2087.2 | 2157.6 | 2080.2       |
|   | 10     | 2019.3 | 1904.0 | 1970.3 | 2028.5 | 1964.5       |
|   | 20     | 1881.8 | 1760.4 | 1802.5 | 1913.8 | 1814.9       |
| 有效穗数/ $\text{m}^{-2}$                     | 0      | 565.0  | 920.0  | 463.3  | 481.7  | 607.5        |
|   | 10     | 453.3  | 723.3  | 375.0  | 460.0  | 502.9        |
|   | 20     | 401.7  | 435.0  | 378.3  | 425.0  | 410.0        |
| 穗粒数                                       | 0      | 22.7   | 15.6   | 33.6   | 31.9   | 26.0         |
|   | 10     | 28.6   | 14.1   | 18.6   | 30.4   | 22.9         |
|   | 20     | 28.6   | 8.8    | 16.7   | 23.4   | 19.4         |
| 千粒重/g                                     | 0      | 39.3   | 38.3   | 48.6   | 46.6   | 43.2         |
|   | 10     | 36.4   | 37.2   | 38.5   | 43.6   | 38.9         |
|   | 20     | 31.5   | 34.1   | 33.6   | 43.9   | 35.8         |

表2 2018—2021年泰安站冬小麦正常播期和推迟播期积温和产量要素变化

Table 2 Accumulated temperature and yield of winter wheat for normal sowing date and sowing date delaying for 10 days and 20 days at Taian Station from 2018 to 2021

| 参量  | 推迟日数/d | 2018年  | 2019年  | 2020年  | 2021年  | 2018—2021年平均 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| 冬前积温/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ )  | 0      | 505.2  | 528.1  | 611.9  | 538.7  | 546.0        |
|   | 10     | 368.1  | 407.4  | 467.5  | 404.5  | 411.9        |
|   | 20     | 249.9  | 282.5  | 336.6  | 282.5  | 287.9        |
| 生长季积温/( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ) | 0      | 2143.7 | 2085.1 | 2102   | 2060.9 | 2097.9       |
|   | 10     | 2006.6 | 1964.4 | 1979.5 | 1970   | 1980.1       |
|   | 20     | 1888.4 | 1839.5 | 1873.8 | 1848   | 1862.4       |
| 有效穗数/ $\text{m}^{-2}$                     | 0      | 685.0  | 625.0  | 700.0  | 595.0  | 651.3        |
|   | 10     | 700.0  | 525.0  | 725.0  | 525.0  | 618.8        |
|   | 20     | 590.0  | 395.0  | 600.0  | 465.0  | 512.5        |
| 穗粒数                                       | 0      | 34.0   | 35.1   | 40.0   | 50.4   | 39.9         |
|   | 10     | 32.0   | 35.6   | 30.7   | 44.9   | 35.8         |
|   | 20     | 32.0   | 34.8   | 40.0   | 33.4   | 35.1         |
| 千粒重/g                                     | 0      | 46.0   | 38.5   | 36.9   | 37.2   | 39.7         |
|   | 10     | 42.3   | 38.6   | 40.5   | 36.2   | 39.4         |
|   | 20     | 45.5   | 41.8   | 45.0   | 28.1   | 40.1         |

期推迟越多,造成的不利影响越显著。

试验表明:虽然当前冬季冻害指数较小,对冬小麦影响不大,但冬小麦推迟播期后,冬前积温减少,生长季积温减少,导致冬小麦株高比正常播期偏矮,地上总干重和叶面积指数偏小,使得有机物积累显著减少,从而使有效穗数、穗粒数和千粒重显著减少,最终导致减产。

### 3 结论与讨论

本文利用北方地区农业气象站数据以及2018—

2021年陕西咸阳和山东泰安连续4年大田科学试验,研究冬小麦产量与冬季冻害的关系以及适应气候变化措施。研究发现:

1) 受全球变暖影响,1961—1990年我国北方冬麦区年平均最低气温在 $6.7^{\circ}\text{C}$ 附近波动,此后持续上升,2011—2020年年平均最低气温比20世纪80年代升高 $1.3^{\circ}\text{C}$ 。冬小麦生长季平均最低气温升温趋势与年平均最低气温升温趋势一致,2011—2020年平均最低气温比20世纪80年代升高 $1.4^{\circ}\text{C}$ 。受气候变暖影响北方冬麦区积温也明显增加,2011—2020年比1961—1970年大于 $0^{\circ}\text{C}$ 积温增

加 11.7%。进一步研究表明,2000 年前低温冻害是北方冬小麦减产的主要气象灾害之一。受气候变暖影响,2000 年后低温冻害与冬小麦减产率相关不显著,冬季冻害已不再是冬小麦减产的主要因子。

2) 山东泰安和陕西咸阳主栽的冬小麦品种播期推迟,冬前积温和整个生长季积温明显减少,延迟播种对冬小麦后期生长有不利影响,表现为播期推迟后,冬小麦成熟时植株高度减少,地上总干重减少,叶面积指数减小;且播期推迟后对产量结构造成不利影响,有效穗数、穗粒数和千粒重均分别减少,导致减产,播期推迟 10 d 平均减产 22%,推迟 20 d 平均减产 40%。

气候变暖背景下,我国北方冬麦区积温增加、冻害减少,但冬小麦推迟播期,却对产量有不利影响。说明陕西咸阳和山东泰安地区当地冬小麦品种更换较快,试验 4 年平均 2~3 年更换一次品种,同时当地农民根据生产经验适当调整了冬小麦播期,使陕西咸阳和山东泰安冬麦区冬小麦播期和主栽的冬小麦品种能够适应当地的气候变化。如果前茬夏玉米受连阴雨或低温因素影响,成熟收获较晚,导致冬小麦播期被迫推迟 10 d 以上,可能造成冬小麦减产。由于冬小麦秋季播种前,6—10 月夏玉米生长,冬小麦提前播期在实际农业生产中不可行。但在实际生产中,播期推迟可通过增加播种密度抵消由于播期推迟造成的不利影响。此外,在本试验中冬小麦播期推迟 10 d,冬小麦的生长和产量结构均受到不利影响,在以后的田间试验中,试验设计冬小麦播期推迟小于 10 d,可能会得到更有意义的结果。

### 参考文献

- [1] FAO(Food and Agricultural Organization of the United Nations). FAOSTAT, 2020.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2021. National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [3] 霍治国, 尚莹, 郭定荣, 等. 中国小麦干热风灾害研究进展. 应用气象学报, 2019, 30(2): 129-141. Huo Z G, Shang Y, Wu D R, et al. Review on disaster of hot dry wind for wheat in China. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(2): 129-141.
- [4] 王纯枝, 霍治国, 郭安红, 等. 中国北方冬小麦蚜虫气候风险评估. 应用气象学报, 2021, 32(2): 160-174. Wang C Z, Huo Z G, Guo A H, et al. Climatic risk assessment of winter wheat aphids in northern China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(2): 160-174.
- [5] 任三学, 赵花荣, 齐月, 等. 气候变化背景下麦田沟金针虫爆发性发生为害. 应用气象学报, 2020, 31(5): 620-630. Ren S X, Zhao H R, Qi Y, et al. The outbreak and damage of the *Pleonomus canaliculatus* in wheat field under the background of climate change. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(5): 620-630.
- [6] 金善宝. 中国小麦学. 北京: 中国农业出版社, 1996. Jin S B. Chinese Wheat Science. Beijing: China Agriculture Press, 1996.
- [7] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change. The Physical Science Basis, 2021.
- [8] 丁一汇, 李霄, 李巧萍. 气候变暖背景下中国地面风速变化研究进展. 应用气象学报, 2020, 31(1): 1-12. Ding Y H, Li X, Li Q P. Advances of surface wind speed changes over China under global warming. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(1): 1-12.
- [9] WMO. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019. WMO No. 1248, 2020: 6-34.
- [10] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书. 北京: 科学出版社, 2020. National Climate Change, China Meteorological Administration. Blue Book of Climate Change in China. Beijing: Science Press, 2020.
- [11] Abu-Asab M S, Peterson P M, Shetler S G, et al. Earlier Plant Flowering in Spring as a Response to Global Warming in the Washington, DC, Area. *Biodiversity and Conservation* 10, 2021: 597-612.
- [12] Scheifinger H, Menzel A, Koch E, et al. Trends of spring time frost events and phenological dates in Central Europe. *Theor Appl Climatol*, 2003, 74: 41-51.
- [13] Song Y L, Linderholm H, Chen D L, et al. Trends of the thermal growing season in China during 1951—2007. *Int J Climatol*, 2010, 30: 33-43.
- [14] Menzel A, Jakobi G, Ahas R, et al. Variations of the climatological growing season (1951—2000) in Germany compared with other countries. *Int J Climatol*, 2003, 23: 793-812.
- [15] Linderholm H W, Walther A, Chen D. Twentieth-century trends in the thermal growing season in the Greater Baltic Area. *Climatic Change*, 2008, 87: 405-419.
- [16] 杨霏云, 郑秋红, 罗蒋梅, 等. 实用农业气象指标. 北京: 气象出版社, 2015: 13-14. Yang F Y, Zheng Q H, Luo J M, et al. Practical Agrometeorological Indicators. Beijing: China Meteorological Press, 2015: 13-14.
- [17] 宋艳玲, 王建林. 气候变化背景下农业气象灾害对我国农业生产影响评估技术. 北京: 气象出版社, 2017. Song Y L, Wang J L. The Assessment of Influence of Agro-Meteorological Disasters on Agriculture under Climate Change in China. Beijing: China Meteorological Press, 2017.
- [18] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11.

- Guo J P. Advances in impacts of climate change on agriculture production in China. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(1): 1-11.
- [19] 赵艳霞, 王馥棠, 裘国旺. 冬小麦干旱识别和预测模型研究. 应用气象学报, 2001, 12(2): 235-241.
- Zhao Y X, Wang F T, Qiu G W. Study of winter wheat drought and prediction model. *J Appl Meteor Sci*, 2001, 12(2): 235-241.
- [20] 赵辉, 戴延波, 姜东, 等. 高温下干旱和渍水对冬小麦花后旗叶光合特性和物质转运的影响. 应用生态学报, 2007, 18(2): 333-338.
- Zhao H, Dai Y B, Jiang D, et al. Effect of drought and waterlogging on flag leaf post-anthesis photosynthetic characteristics and assimilates translocation in winter wheat under high temperature. *Chinese J Appl Ecology*, 2007, 18(2): 333-338.
- [21] 范雪梅, 姜东, 戴延波, 等. 花后干旱或渍水下氮素供应对小麦光合和籽粒淀粉积累的影响. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1883-1888.
- Fan X M, Jiang D, Dai Y B, et al. Effects of nitrogen supply on flag leaf photosynthesis and grain starch accumulation of wheat from its anthesis to maturity under drought or waterlogging. *Chinese J Appl Ecology*, 2005, 16(10): 1883-1888.
- [22] 吴乃元, 梁丰香, 张衍华, 等. 有限水分胁迫对小麦生长状况的影响及合理灌溉的土壤相对湿度指标. 应用气象学报, 2000, 11(增刊 I): 170-177.
- Wu N Y, Liang F X, Zhang Y H, et al. Effects of limited water stress on wheat growth and the relative soil moisture index of rational irrigation. *J Appl Meteor Sci*, 2000, 11(Suppl I): 170-177.
- [23] 尚莹, 霍治国, 张蕾, 等. 土壤相对湿度对冬小麦干热风灾害发生的影响. 应用气象学报, 2019, 30(5): 598-607.
- Shang Y, Huo Z G, Zhang L, et al. Effects of soil relative humidity on the occurrence of dry hot wind disaster in winter wheat. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(5): 598-607.
- [24] 霍治国, 尚莹, 邬定荣, 等. 中国小麦干热风灾害研究进展. 应用气象学报, 2019, 30(2): 129-141.
- Huo Z G, Shang Y, Wu D R, et al. Advance on dry hot wind disaster of wheat in China. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(2): 129-141.
- [25] 孟繁圆, 冯利平, 张丰瑶, 等. 北部冬麦区冬小麦越冬冻害时空变化特征. 作物学报, 2019, 45(10): 1576-1585.
- Meng F Y, Feng L P, Zhang F Y, et al. Temporal and spatial variations of winter wheat freezing injury in northern winter wheat region. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(10): 1576-1585.
- [26] 王春艳, 李茂松, 胡新, 等. 黄淮地区冬小麦的抗晚霜冻害能力. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 211-215.
- Wang C Y, Li M S, Hu X, et al. Spring frost resistance of winter wheat in Huang-huai area. *J Nat Disaster*, 2006, 15(6): 211-215.
- [27] 郑冬晓, 杨晓光, 赵锦, 等. 气候变化背景下黄淮冬麦区冬季长寒型冻害时空变化特征. 生态学报, 2015, 35(13): 4338-4346.
- Zheng X D, Yang X G, Zhao J, et al. Spatial and temporal patterns of freezing injury during winter in Huang-Huai winter wheat area under climate change. *Acta Ecological Sinica*, 2015, 35(13): 4338-4346.
- [28] 莫志鸿, 霍治国, 叶彩华, 等. 北京地区冬小麦越冬冻害的时空分布与气候风险区划. 生态学报, 2013, 32(12): 3197-3206.
- Mo Z H, Huo Z G, Ye C H, et al. Spatial temporal distribution and climatic risk zonation of freeze injury of winter wheat during overwintering stage in Beijing region. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(12): 3197-3206.
- [29] 李茂松, 王道龙, 张强, 等. 2004—2005年黄淮海地区冬小麦冻害成因分析. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 51-55.
- Li M S, Wang D L, Zhang Q, et al. Cause analysis of frost damage to winter wheat in Huang-Hai Plain during 2004—2005. *J Nat Disaster*, 2005, 14(4): 51-55.
- [30] 赵花荣, 任三学, 齐月, 等. 基于分期播种试验的冬小麦越冬冻害调查分析. 干旱气象, 2019, 37(4): 648-655.
- Zhao H R, Ren S X, Qi Y, et al. Investigation and analysis of winter wheat frost damage based on sowing test under different sowing dates. *J Arid Meteor*, 2019, 37(4): 648-655.

## Freezing Injury of Winter Wheat in Northern China and Delaying Sowing Date to Adapt

Song Yanling<sup>1)2)</sup> Zhou Guangsheng<sup>1)2)</sup> Guo Jianping<sup>1)2)</sup> Li Yong<sup>3)</sup> Pan Yaru<sup>1)</sup> Fu Yan<sup>4)</sup>  
Yang Rongguang<sup>5)</sup> Bai Xiaoying<sup>6)</sup> Xu Jinxia<sup>7)</sup>

<sup>1)</sup> (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (CMA-CAU Jointly Laboratory of Agriculture Addressing Climate Change, Beijing 100081)

<sup>3)</sup> (Guizhou Meteorological Bureau, Guiyang 550002)

<sup>4)</sup> (Center of International Cooperation Service, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125)

<sup>5)</sup> (Taian Meteorological Bureau of Shandong, Taian 271001)

<sup>6)</sup> (Xianyang Meteorological Bureau of Shaanxi, Xianyang 712034)

<sup>7)</sup> (Sichuan Meteorological Bureau, Chengdu 610072)

### Abstract

Under the background of global warming, whether freezing injury is still the main meteorological disaster in northern winter wheat growing region of China becomes uncertain, and whether delaying sowing date is an effective measurement to adapt to climate change becomes an urgent scientific problem to solve. It is found that the correlation coefficient between winter freezing injury index and winter wheat yield reduction rate is 0.62 in the northern winter wheat region from 1981 to 2000, which indicates that winter freezing injury is one of the main disasters before the year of 2000. However, this correlation becomes very low after the year of 2000, indicating that winter freezing injury is no longer the main factor for yield reduction of winter wheat. Experiments are carried out at Taian and Xianyang stations, showing that the accumulated temperature before winter and the accumulated temperature of the whole growth season of winter wheat are significantly reduced. The plant height, total aboveground dry weight and leaf area index will decrease when sowing date of winter wheat is delayed for 10 days and 20 days. Furthermore, the delay of sowing date has an adverse impact on the yield structure, the effective panicles and grains per panicle are decreased by 5% and 10.2% respectively when the sowing date of winter wheat is delayed for 10 days from 2018 to 2021 at Taian Station, and they are decreased by 17.2% and 11.9% respectively when the sowing date is delayed for 10 days at Xianyang Station. Overall, the average yield of winter wheat is reduced by 22% and 40% when sowing dates are delayed for 10 days and 20 days respectively, which indicates that the delayed sowing date of winter wheat have no positive effects. The possible cause is that the local winter wheat varieties have changed at Xianyang and Taian, and farmers have appropriately adjusted the sowing date according to experience. The current winter wheat sowing date and the main winter wheat varieties have adapted to local climate change.

**Key words:** winter wheat region of northern China; freezing injury; measurements to adapt to climate change; yield