

# 越冬前增温对小麦生长发育和产量的影响\*

李向东\*\* 张德奇 王汉芳 邵运辉 方保停 吕凤荣 岳俊芹 马富举

(河南省农业科学院小麦研究所/小麦国家工程实验室/农业部黄淮中部小麦生物学与遗传育种重点实验室/河南省小麦生物学重点实验室, 郑州 450002)

**摘要** 为了揭示越冬前积温增加对冬小麦生长发育进程和产量的影响,于2010—2012年在设施内进行人为控制增温模拟试验.以试验期室外环境实测温度值为对照,设置越冬前增温40、50、60 d,研究越冬前不同积温( $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )对小麦物候期、幼穗发育进程、开花期和成熟期叶片光合生理特性及产量构成要素的影响.结果表明:设施内越冬前增加积温在越冬前对幼穗发育进程有一定影响,对拔节期幼穗发育进程和育性影响明显,孕穗后随着发育进程的加快影响减小,成熟期大部分处理间的生物学性状差异不显著.越冬前积温增加不超过 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对幼穗影响很小;积温增加大于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 幼穗发育进程明显加快,积温越高变化越明显.冬前积温增加到一定幅度将导致冬小麦物候期提前,积温增加超过 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,拔节期叶龄提高0.8以上,抽穗期和成熟期分别提前1 d左右.物候期的提前和幼穗发育进程的加快使小麦整个发育期缩短,容易遭受春季低温危害,造成小花败育甚至小穗冻死;冬前积温过高还导致后期旗叶光合能力下降,灌浆期缩短,并造成减产.

**关键词** 冬小麦;越冬前高温;发育进程;光合特性;产量

**文章编号** 1001-9332(2015)03-0839-08 **中图分类号** S629 **文献标识码** A

**Impact of temperature increment before the over-wintering period on growth and development and grain yield of winter wheat.** LI Xiang-dong, ZHANG De-qi, WANG Han-fang, SHAO Yun-hui, FANG Bao-ting, LYU Feng-rong, YUE Jun-qin, MA Fu-ju (*Wheat Research Institute of Henan Academy of Agricultural Sciences/National Laboratory of Wheat Engineering/Key Laboratory of Wheat Biology and Genetic Breeding in Central Huang-Huai Region, Ministry of Agriculture/Henan Provincial Key Laboratory of Wheat Biology, Zhengzhou 450002, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, 26(3): 839-846.

**Abstract:** The effect of temperature increment before the over-wintering period on winter wheat development and grain yield was evaluated in an artificial climate chamber (TPG 1260, Australia) from 2010 to 2011. Winter wheat cultivar 'Zhengmai 7698' was used in this study. Three temperature increment treatments were involved in this study, *i.e.*, temperature increment last 40, 50 and 60 days, respectively, before the over-wintering period. Control was not treated by temperature increment. The results showed that temperature increment before the over-wintering period had no significant effect on earlier phase spike differentiation. But an apparent effect on later phase spike differentiation was observed. High temperature effect on spike differentiation disappeared when the difference of effective accumulated temperature between the temperature increment treatment and the control was lower than  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . However, the foliar age at the jointing stage was enhanced more than 0.8, heading and physiological ripening were advanced 1 day each, when the effective accumulated temperature before the over-wintering period increased  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Higher effective accumulated temperature before the over-wintering period accelerated winter wheat growth and development, which resulted in a short spike differentiation period. Winter wheat was easy to suffer freeze damage, which lead to floret abortion and spikelet death in spring under this situation. Meanwhile, higher effective accumulated temperature before the over-wintering period also reduced photosynthetic capacity of flag leaf, shortened the grain filling period, and led to wheat grain yield reduction.

**Key words:** winter wheat; high temperature before over-wintering period; growth and development process; photosynthetic characteristics; yield.

\* 国家“十二五”公益性行业(农业)科研专项(201203033)、国家科技支撑计划项目(2012BAD20B01, 2011BAD16B07)和河南省创新型科技人才队伍建设工程项目(114100510014)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: hnlxd@126.com

2014-03-21 收稿, 2015-01-08 接受.

全球气候变化的最大特点是气温升高和极端气候事件发生的频次增加,改变了各地的农业气候资源,对农业生产产生直接的影响.据 IPCC 第 4 次报告显示,在过去的 100 年间地表气温升高了 0.56~0.92 °C;模拟研究显示,21 世纪末全球平均地表温度仍将升高 1.1~6.4 °C<sup>[1-2]</sup>.因此,探讨温度升高对作物生长发育和产量的影响,对作物栽培技术的创新和粮食生产安全具有重要意义.

研究表明,随着气候变化小麦生长速度加快,发育期明显提前;年度间影响小麦千粒重的因子中,气象因子起决定作用<sup>[3-4]</sup>.气候变化对不同区域小麦生长发育和产量的影响不同,例如,气候条件的改变对墨西哥 1980 年以来小麦产量的提高有很大贡献<sup>[1,5]</sup>;居辉等<sup>[6]</sup>运用 PRECIS 模型,预测在气候变化条件下,2070 年我国雨养和灌溉小麦的平均单产较基准年(1961—1990 年平均值)减少约 20%;周林等<sup>[7]</sup>运用改进的 SUCROS 产量生态学模型分析了气候变暖条件下黄淮海平原南部地区冬小麦的生长过程及产量可能受到的影响,结果表明,气候变暖引发的升温加快了冬小麦的发育过程,使整个发育期缩短,产量降低.在无土壤水分亏缺的理想状态下,适度增温有利于冬小麦增产;但在现有的自然降水条件下,温度升高使小麦粒重明显下降,春季增温对小麦生长尤为不利.

关于冬前积温对小麦生长发育的影响研究较多,但多以播期为试验手段<sup>[8-10]</sup>,在设施内进行阶段性高温模拟及发育进程变化研究尚未见报道.郑大玮等<sup>[11]</sup>认为,使用积温指标推算植物发育进程的效果较好.因此,为探讨越冬前温度升高对小麦生长发育进程和产量的影响,本试验在 2010—2012 年分别利用人工气候室和增温棚对越冬前小麦进行增温( $\geq 0$  °C 积温超历史极值或超当年相应时期 120 °C·d 左右)处理,对小麦发育进程、幼穗分化、后期光合特性、灌浆及产量因素变化进行了系统研究,以期应对气候变暖条件下小麦防灾、减灾应变栽培技术提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与试验设计

试验于 2010—2012 年在河南省农业科学院现代农业研发基地(新乡原阳)进行.试验地位于豫北平原(34.55°—35.11° N,113.36°—114.15° E),属暖温带季风型大陆性气候,日照充足,气候温和,常年平均气温为 14.3 °C,平均降水量 556 mm,无霜期

227 d,主要种植制度为小麦-玉米两熟制.冬小麦供试品种为‘国审郑麦 7698’;采取盆栽方式,盆内直径为 30 cm、深度为 35 cm,实际装土深度为 30 cm;土壤养分含量为:速效氮 37.2 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 15.9 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 126.6 mg·kg<sup>-1</sup>、有机质 0.98 mg·g<sup>-1</sup>.播种前每盆施有机肥 750 g、纯氮 1.0 g、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1.35 g、K<sub>2</sub>O 2.25 g,拔节期每盆追施纯氮 1.0 g.土壤水分控制在田间持水量的 80%~85%.

于 2010—2011 年在室内人工气候室中,以试验地区(新乡原阳)出苗至越冬积温历史最高年份(1998 年)为基准(查询气象记录),以出苗至越冬日平均气温比基准温度高 2 °C 左右进行增温处理,试验结束后以实际测定温度计算积温.光照设 1200 lx,CO<sub>2</sub> 浓度设置为正常大气浓度 400 μmol·mol<sup>-1</sup>.由于 2010—2011 年的处理积温是以 1998 年的积温为基础模拟设定的,而 2010 年冬前出现异常高温,11 月 19 日—12 月 8 日年实际温度远高于处理模拟温度,导致处理 50 d 的积温略低于处理 40 d 的积温,且 40 和 50 d 的处理(W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>)积温与当年实际积温差距较小.因此,为了体现逐日增温效果,2011—2012 年采取室外塑料增温棚增温的方式加以改进(增温棚高度 80 cm),自然光照,用温度计实时监测温度.实际测量温度和处理温度见图 1.

本试验以全生育期室外自然温度为对照,两年均自出苗后 10 d(10 月 25 日)起进行增温处理(移入人工气候室或增温棚),处理时间分别为 40、50、60 d,处理结束后移至室外自然条件下,每处理计算最终实际积温,具体处理积温测定结果见表 1.每个处理 9 盆,4 个处理共计 36 盆,于三叶期定植,每盆

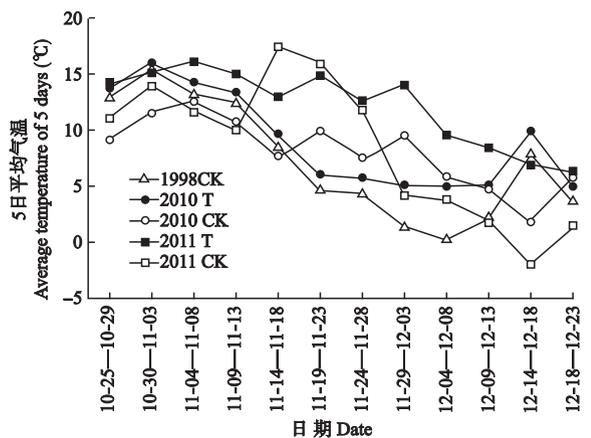


图 1 冬前实际和模拟平均气温

Fig.1 Actual and simulated average temperature before winter period (°C).

CK: 实际气温 Actual temperature; T: 模拟气温 Simulated temperature.

表 1 不同处理积温

Table 1 Accumulated temperature in different treatments

处理 Treatment	处理时间 Treatment time (d)	≥0 °C 积温 Accumulated temperature above 0 °C (°C)	
		2010—2011	2011—2012
		CK	0
W <sub>1</sub>	40	507.5	598.0
W <sub>2</sub>	50	505.0	659.5
W <sub>3</sub>	60	542.0	728.5

留长势均匀一致的植株 12 株。

## 1.2 测定项目与方法

**1.2.1 幼穗分化的观测** 分别在越冬期、返青期、拔节期、拔节后期、孕穗期取 3~5 株主茎幼穗,利用体视显微镜进行观察。

**1.2.2 叶绿素含量 (SPAD 值) 的测定** 于小麦扬花期、灌浆期用日产 SPAD-502 型叶绿素计测定旗叶 SPAD 值。每次测 20 个叶片,每片叶测定 10 次,取平均值。

**1.2.3 光合特征参数的测定** 分别于小麦扬花期和灌浆期选择晴朗天气 9:00—11:00,使用美国产 Li-6400 型便携式光合仪测定旗叶净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $g_s$ )、胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ ) 等光合参数。每个处理选择一致性较好的 5 片旗叶交叉测量。

**1.2.4 个体发育和产量性状的调查及测定** 在小麦不同生长阶段进行发育进程调查和测量;成熟期全部收获,调查小穗育性和产量构成三要素(单位穗数、穗粒数、千粒重)。

## 1.3 数据处理

采用 Excel 2003 软件处理试验数据,采用 SPSS 13.0 软件进行显著性检验 (LSD 法),采用 SigmaPlot 10.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 越冬前增温对小麦发育进程的影响

表 2 小麦主茎幼穗分化进程

Table 2 Spike differentiation process in main stem of wheat

年份 Year	处理 Treatment	日期 Date				
		12-25	02-22	03-09	03-28	04-07
2010—2011	CK	单棱末期	二棱中期	二棱末期	雌雄蕊原基分化	柱头伸长期
	W <sub>1</sub>	二棱初期	二棱中期	护颖原基分化	小花分化	柱头伸长期
	W <sub>2</sub>	二棱初期	二棱中期	小花原基分化	雌雄蕊分化	柱头伸长期
	W <sub>3</sub>	二棱初期	二棱末期	雌雄蕊原基分化	药隔形成期 (主茎小穗冻死)	主茎小穗冻死
2011—2012	CK	单棱末期	二棱中期	护颖原基分化	雌雄蕊原基分化	柱头伸长期
	W <sub>1</sub>	二棱初期	二棱中期	护颖原基分化	雌雄蕊原基分化	柱头伸长期
	W <sub>2</sub>	二棱初期	二棱中期	小花原基分化	药隔形成期	柱头羽毛突起
	W <sub>3</sub>	二棱中期	二棱中期	小花原基分化	四分体时期	柱头羽毛伸长

**2.1.1 幼穗分化进程** 温度是影响幼穗分化进程的主要因素。由表 2 可知,设施内增加积温处理对幼穗发育的前期影响没有中期明显,后期随着发育进程的加快影响也逐渐变小,CK 和 W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub> 处理间成熟期的差异并不显著。与对照相比,≥0 °C 积温增加不超过 25 °C 对幼穗的影响较小,差异不显著,如 2010—2011 年 W<sub>1</sub> 和 W<sub>2</sub> 处理;积温增加超过 60 °C 后对幼穗发育进程的影响较为明显,如 2010—2011 年 W<sub>3</sub> 处理和 2011—2012 年各增温处理与对照相比均有明显变化,尤其是拔节期至孕穗期。

两年试验结果表明,越冬前 ≥0 °C 积温增加超过 60 °C 可使幼穗发育进程加快,积温越高变化越明显。春季如遇低温天气危害,幼穗发育进程较快的小穗就容易遭受冻害甚至死亡,2010—2011 年的试验中,W<sub>3</sub> 处理就是由于提前发育到药隔期遭遇低温危害而发生小穗冻死现象 (图 2)。

**2.1.2 物候期变化** 从表 3 可以看出,与对照相比,冬前积温增加到一定幅度会导致冬小麦物候期提前,积温增加超过 60 °C 抽穗期提前 1 d,成熟期提前 1 d。2010—2011 年 W<sub>3</sub> 处理收获期推迟,是由于发育进程加快,在拔节期受到低温冻害,主茎和大分蘖冻死,形成二次分蘖成穗。物候期的提前导致小麦整个发育进程加快,春季容易遭受低温危害,造成小花败育甚至小穗冻死 (图 2)。

**2.1.3 返青-拔节期生物学性状** 两年试验结果 (表 4) 表明,与对照相比,冬前积温增加加快了小麦的发育进程。冬前积温越高返青期叶龄越大,积温增加超过 60 °C,叶龄增加 0.8 以上;积温增加还减少了小麦分蘖和次生根数。拔节期叶龄、分蘖和次生根的变化趋势与返青期基本一致;拔节高度随冬前积温升高显著增加。

### 2.2 越冬前增温对小麦花后旗叶 SPAD 值的影响

SPAD 值的变化反映了旗叶功能的状态和光合潜力。从两年试验结果 (图 3) 可以看出,越冬期前积

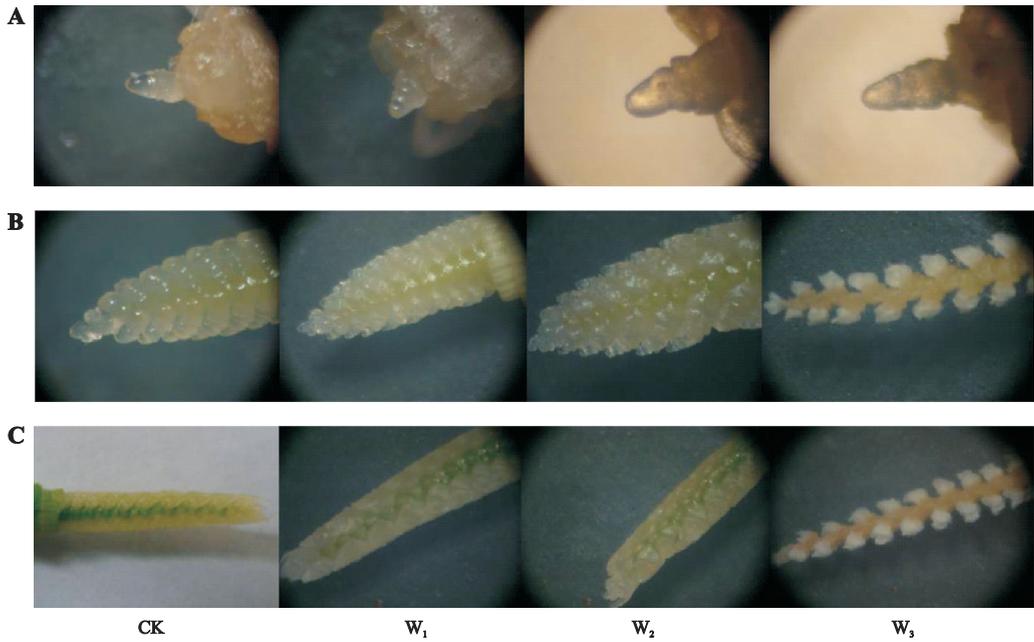


图2 不同时期小麦主茎幼穗观察

Fig.2 Observation of main stem spike in different periods.

A: 越冬期 Winterring period; B: 拔节期 Jointing stage; C: 孕穗期 Heading stage.

表3 冬前不同增温处理对小麦物候期的影响

Table 3 Effects of different increasing temperature treatments before winter period on phenophases of wheat

年份 Year	处理 Treatment	返青期 Turning green stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage
2010—2011	CK	02-23	03-18	04-25	06-06
	W <sub>1</sub>	02-23	03-16	04-25	06-06
	W <sub>2</sub>	02-23	03-16	04-24	06-05
	W <sub>3</sub>	02-23	03-13	04-27	06-10
2011—2012	CK	02-26	03-13	04-23	06-04
	W <sub>1</sub>	02-26	03-12	04-23	06-04
	W <sub>2</sub>	02-26	03-10	04-22	06-02
	W <sub>3</sub>	02-26	03-10	04-20	06-02

温越高,扬花期和灌浆期小麦旗叶的 SPAD 值越低,且积温增加超过 60 °C 在灌浆期差异较显著.从灌浆期来看,连续两年观测结果基本一致,两年均以 W<sub>1</sub> 处理旗叶的 SPAD 值最高,平均较 CK 提高了 4.7%; W<sub>2</sub> 和 W<sub>3</sub> 处理旗叶 SPAD 值平均分别较 CK 降低了 9.8%、37.0%.

### 2.3 越冬前增温对小麦花后旗叶光合特性的影响

从两年试验结果(图 4)可以看出,小麦花后旗叶光合特性对越冬前不同增温处理的响应不同.在开花期,旗叶光合速率( $P_n$ )除 2010—2011 年 W<sub>3</sub> 处理小穗冻死外,增温处理与对照差异并不显著;在灌

表4 冬前不同增温处理对小麦返青-拔节期生物学性状的影响

Table 4 Effects of different increasing temperature treatments before winter period on biological traits of wheat in returning green and jointing stages

年份 Year	处理 Treatment	返青期 Returning green stage			拔节期 Jointing stage			
		叶龄 Leaf age	分蘖数 Tiller number	次生根数 Secondary root number	叶龄 Leaf age	分蘖数 Tiller number	次生根数 Secondary root number	拔节高度 Jointing height (cm)
2010—2011	CK	6.2b	3.6a	6.0a	7.0c	4.5a	9.5a	0.5c
	W <sub>1</sub>	6.9b	3.7a	5.4a	8.1b	5.0a	9.0b	0.5c
	W <sub>2</sub>	8.8a	3.2a	2.5b	9.5a	3.7b	8.7b	1.0b
	W <sub>3</sub>	8.9a	3.5a	1.4 c	9.7a	2.1 c	7.0c	1.5a
2011—2012	CK	6.1c	2.0a	4.0b	7.1b	4.8a	6.0b	0.5c
	W <sub>1</sub>	6.9b	2.0a	5.0a	7.1b	3.0c	4.0c	1.0b
	W <sub>2</sub>	7.2ab	2.0a	2.0d	7.3b	3.0c	8.0a	1.0b
	W <sub>3</sub>	7.5a	2.0a	3.0c	8.3a	4.0b	6.0b	1.5a

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level.下同 The same below.

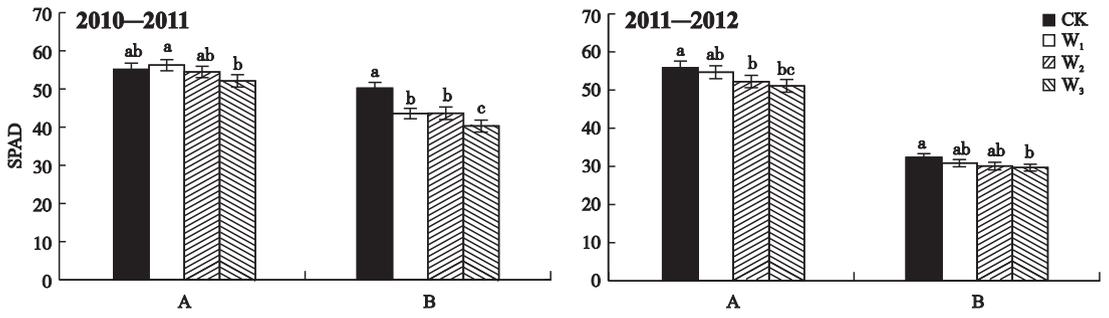


图 3 冬前不同增温处理对小麦旗叶 SPAD 值的影响

Fig.3 Effects of different increasing temperature treatments before winter period on SPAD values in flag leaves of wheat.

A: 扬花期 Flowering stage; B: 灌浆期 Grain filling stage. 下同 The same below.

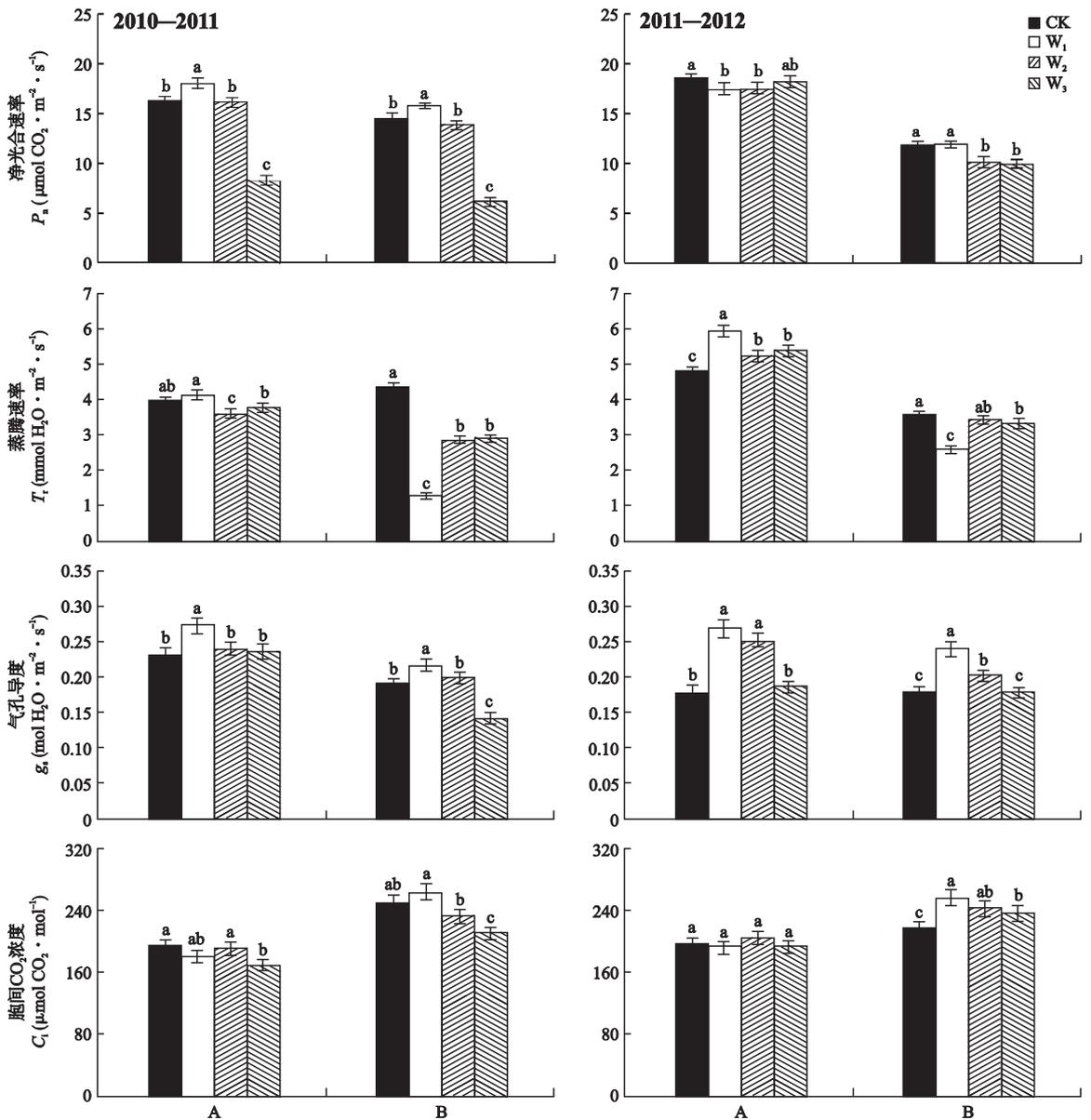


图 4 冬前不同增温处理对小麦旗叶净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的影响

Fig.4 Effects of different increasing temperature treatments before winter period on  $P_n$ ,  $T_r$ ,  $g_s$  and  $C_i$  in flag leaves of wheat.

表5 冬前不同增温处理对小麦产量及其构成要素的影响

Table 5 Effects of different increasing temperature treatments before winter period on grain yield and yield components of wheat

年份 Year	处理 Treatment	可孕小穗数 Fruiting spikelet number	不孕小穗数 Sterile spikelet number	穗数 Spikes per plant	穗粒数 Kernels per spike	千粒重 (g) 1000-kernel mass	产量 (g · plot <sup>-1</sup> ) Yield
2010—2011	CK	16.0a	1.7bc	25.4a	35.5a	49.2a	44.5a
	W <sub>1</sub>	13.5b	1.8b	24.5a	38.9a	48.3a	46.1a
	W <sub>2</sub>	13.4b	1.6c	24.8a	37.2a	48.9a	45.1a
	W <sub>3</sub>	8.5c	3.0a	22.6b	14.9b	48.8a	16.4b
2011—2012	CK	16.2a	2.9ab	24.7a	35.7a	44.4a	38.9a
	W <sub>1</sub>	16.4a	2.8ab	23.6ab	35.2a	45.5a	36.9a
	W <sub>2</sub>	16.2a	3.1a	22.0b	33.8ab	42.9b	32.2b
	W <sub>3</sub>	15.9a	2.6b	21.3b	32.2b	41.9b	31.9b

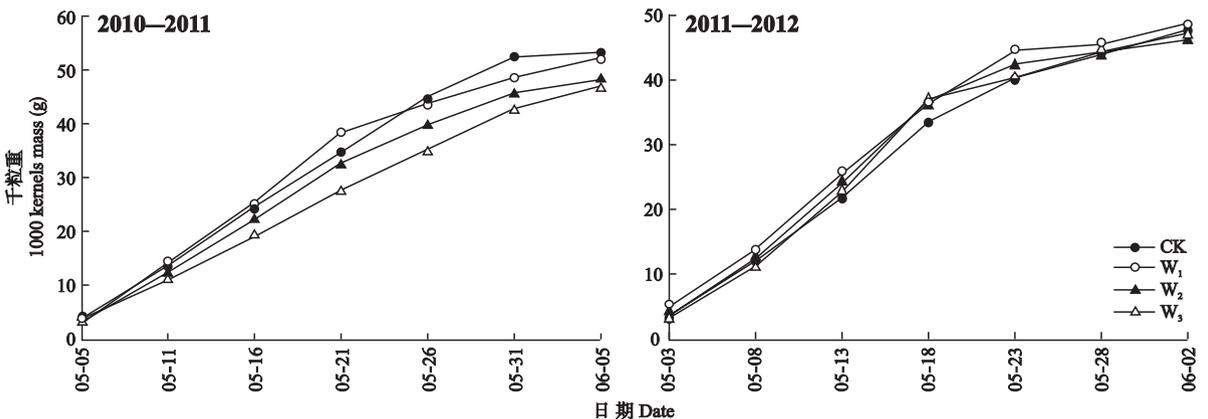


图5 冬前不同增温处理对小麦不同时期千粒重的影响

Fig.5 Effects of different increasing temperature treatments before winter period on 1000-kernel mass of wheat at different stages.

浆期,  $\leq 25^{\circ}\text{C}$  的增温处理旗叶  $P_n$  高于或与对照相近, 而  $\geq 60^{\circ}\text{C}$  的处理旗叶功能衰老加快, 其  $P_n$  均低于对照, 且随着处理积温的增加  $P_n$  下降显著。花后小麦旗叶气孔导度 ( $g_s$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ) 与  $P_n$  的变化趋势基本一致。就蒸腾速率 ( $T_r$ ) 而言, 在扬花期冬前增温  $\leq 25^{\circ}\text{C}$  的处理与对照差异不显著, 但在灌浆期明显低于对照, 表明冬前过高的积温使小麦发育后期旗叶功能迅速下降, 光合能力降低, 不利于籽粒发育和物质积累。

#### 2.4 越冬前增温对小麦灌浆进程的影响

两年试验结果(图5)显示, 冬前适度增温处理 ( $\leq 25^{\circ}\text{C}$ ) 不同时期小麦千粒重均大于对照, 而积温增加到一定程度 ( $\geq 60^{\circ}\text{C}$ ), 增温处理的千粒重低于对照但差异不显著, 灌浆过程也比对照早结束 5 d 左右, 即冬前积温过高导致灌浆进程加快、时间缩短, 千粒重下降, 造成冬小麦产量降低。

#### 2.5 越冬前增温对小麦产量构成要素的影响

由表5可知, 冬前增温在一定范围内(不超过  $25^{\circ}\text{C}$ ) 有利于提高穗粒数, 千粒重与对照差异不显

著, 产量略高于对照(2010—2011年  $W_1$ 、 $W_2$  处理); 增温超过一定幅度(超过  $60^{\circ}\text{C}$ ), 小穗数降低且大部分处理无效穗数显著增加, 穗粒数均有所下降, 大部分处理千粒重也低于对照。总体来看, 越冬前增温对产量三要素均有影响, 最终造成小麦籽粒产量降低。

### 3 讨论

#### 3.1 积温增加与小麦发育进程的关系

全球气候变化尤其是气候变暖的结果, 是极端气候事件频繁发生, 直接影响作物的生长发育和产量, 从而影响到作物布局调整、种植制度优化和农艺措施改进等<sup>[12-15]</sup>。气候变暖可能会促进作物发育进程, 但作物发育进程的加快带来的影响有正负两方面, 幼穗分化速度快、历时短, 将直接影响小穗小花的发育, 进而影响产量<sup>[16]</sup>。

从小麦幼穗发育进程来看, 设施内增加积温处理对幼穗发育的前期影响不大, 对幼穗中期发育影响明显, 在幼穗发育后期随着发育进程的加快影响逐渐变小, 成熟期大部分处理间生物学性状差异并

不显著. 这与姜丽娜等<sup>[17]</sup>有关积温对小麦护颖分化期、药隔分化期、二棱期影响较大的研究结果相一致.

从积温增加幅度来看, 积温增加不超过 25 °C 处理对幼穗影响较小, 差异不显著; 积温增加超过 60 °C 处理可使幼穗发育进程加快, 尤其在拔节至孕穗期间小穗发育影响较大, 积温越高变化越明显. 本试验结果表明, 分化进程加快的幼穗, 如果第二年遇春季低温, 极易遭受冻害的危害, 造成小花败育甚至小穗冻死. 积温增加超过 60 °C 的处理抽穗期提前 1 d 左右, 成熟期提前 1~2 d, 与有关研究中我国黄淮海地区小麦生育期平均每 10 年减少 1.3~1.5 d 的结果基本一致, 这与整个生育期的温度、光照及栽培条件不同有关<sup>[18-19]</sup>.

综合本试验和前人研究结果, 从气候变化看, 大气温度呈逐渐上升的趋势<sup>[1-2]</sup>; 从生产实际看, 小麦种植带的北扩西移和半冬性品种的南移<sup>[20]</sup>, 说明积温的适当增加有利于小麦发育习性, 但适宜的积温增加范围需要进一步探讨.

### 3.2 积温增加与小麦产量的关系

小麦灌浆与籽粒的形成是决定小麦粒重和产量的关键过程, 品种特性、后期光合器官的功能和温度、光照、土壤水分等环境因子以及栽培措施, 都能影响灌浆速度与持续时间<sup>[21]</sup>. 本试验结果显示, 冬前增温一定幅度会导致冬小麦物候期提前, 从而使小麦整个发育期和灌浆过程缩短, 小麦发育后期旗叶光合能力下降, 导致灌浆不足, 千粒重降低而造成减产. 与自然温度相比, 越冬前增温在一定范围内 (不超过 25 °C) 有利于提高穗粒数, 千粒重和对照差异不显著, 产量略高于对照; 但增温超过一定幅度 (超过 60 °C), 大部分处理小穗数降低, 无效穗数显著增加, 穗粒数下降, 千粒重降低, 产量构成三要素均受到影响, 最终造成籽粒产量降低. 从本研究结果看, 适度增温有利于小麦产量的提高, 这与周林等<sup>[7]</sup>研究结果一致. 但小麦产量受温度、水分、光照等因素影响, 温度增加是否为小麦产量提高的直接因子之一, 仍需进一步研究验证.

### 3.3 模拟增温方法的探讨

本试验主要研究了积温对小麦生长发育的影响, 但小麦的生长发育除了与积温密切相关外, 与光照也有很大关系. 无论在气候室 (模拟时光照设定在 1200 lx) 还是增温棚, 都与田间实际光照有很大差别. 两种模式增温效果与体现在小麦个体发育上的变化也有所差异, 而光照不足会降低叶片光合速率,

影响小麦发育和产量. 本试验结果是在特定的环境条件下取得的, 今后需要考虑多因素进一步研究. 另外, 室内和盆栽试验与大田环境存在很大差异, 需要进一步完善试验操作手段, 实现模拟环境与大田环境最大程度的一致或相近.

### 参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Summary for Policymakers [EB/OL]. [2010-01-29][2014-03-20]. <http://www.ipcc.ch>.
- [2] Ding Y-H (丁一汇), Ren G-Y (任国玉), Shi G-Y (石广玉), et al. National assessment report of climate change: Climate change in China and its future trend. *Advance in Climate Change Research* (气候变化研究进展), 2006, 2(1): 3-8 (in Chinese)
- [3] Chen Y-H (陈英慧), Song J-Y (宋建玉), Fang W-J (房稳静). The influence of varied temperature on growth of wheat with the winter feature. *Meteorology Journal of Henan* (河南气象), 2003 (1): 30-31 (in Chinese)
- [4] Li F-Z (李富占), Gao M (高敏), Gao Z-G (高志国). Meteorological factors and thousand grain weight of wheat. *Meteorology Journal of Henan* (河南气象), 2004(2): 32 (in Chinese)
- [5] Lobell DB, Ortiz-Monasterio JI, Asner GP, et al. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research*, 2005, 94: 250-256
- [6] Ju H (居辉), Xiong W (熊伟), Xu Y-L (许吟隆), et al. Impacts of climate change on wheat yield in China. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2005, 31(10): 1340-1343 (in Chinese)
- [7] Zhou L (周林), Wang H-J (王汉杰), Zhu H-W (朱红伟). Simulation study on the impact of climate warming on production of winter wheat in Huang-Huai-Hai Plain of China. *Journal of PLA University of Science and Technology* (解放军理工大学学报), 2003, 4(2): 76-82 (in Chinese)
- [8] Gao Q-L (郜庆炉), Liang Y-J (梁云娟), Duan A-W (段爱旺). Light characteristics and its changing laws in solar greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2003, 19(3): 200-204 (in Chinese)
- [9] Wu S-H (吴少辉), Gao H-T (高海涛), Zhang X-P (张学品), et al. Effect of sowing date on grain filling characters in different wheat varieties. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2004, 24(4): 105-107 (in Chinese)
- [10] Lan T (兰涛), Pan J (潘洁), Jiang D (姜东), et al. Effects of eco-environments and sowing dates on the relationships between grain quality traits in winter wheat. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2005, 25(4): 72-78 (in Chinese)
- [11] Zheng D-W (郑大玮), Sun Z-F (孙忠富). Discussion on scientificness problem of accumulated temperature and its unit. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国

- 农业气象), 2010, **31**(2): 165-169 (in Chinese)
- [12] Wang Y-X (王义祥), Weng B-Q (翁伯琦), Huang Y-B (黄毅斌). Effects of global climate change on agriculture ecosystems and research strategy for the future. *Subtropical Agriculture Research* (亚热带农业研究), 2006, **3**(3): 203-208 (in Chinese)
- [13] Zhang Q (张强), Deng Z-Y (邓振镛), Zhao Y-D (赵映东), *et al.* The impacts of global climatic change on the agriculture in northwest China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(3): 1210-1218 (in Chinese)
- [14] Olmstead AL, Rhode PW. Adapting North American wheat production to climatic challenges, 1839-2009. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**: 480-485
- [15] Halse NJ, Weir RN. Effects of temperature on spikelet number of wheat. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1974, **25**: 687-695
- [16] Xue X (薛香), Gao Q-L (郜庆炉). Effects of day length and temperature on the spike differentiation of winter wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2005, **13**(4): 56-59 (in Chinese)
- [17] Jiang L-N (姜丽娜), Zhao Y-L (赵艳岭), Shao Y (邵云), *et al.* Comparative study of spike differentiation in wheat in the glasshouse and field. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(15): 4207-4214 (in Chinese)
- [18] Zhang J-P (张建平), Zhao Y-X (赵艳霞), Wang C-Y (王春乙), *et al.* Effects of climate change on winter wheat growth and yield in North China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(7): 1179-1184 (in Chinese)
- [19] Yu W-D (余卫东), Zhao G-Q (赵国强), Chen H-L (陈怀亮). Impacts of climate change on growing stages of main crops in Henan Province. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2007, **28**(1): 9-12 (in Chinese)
- [20] Yang X-G (杨晓光), Liu Z-J (刘志娟), Chen F (陈阜). The possible effects of global warming on cropping systems in China. VI. Possible effects of future climate change on northern limits of cropping system in China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2011, **44**(8): 1562-1570 (in Chinese)
- [21] Wang S-Z (王绍中). *Wheat Cultivation in Henan (New)*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2010 (in Chinese)

---

作者简介 李向东,男,1967年生,博士,研究员.主要从事农业生态研究. E-mail: hnlxd@126.com

责任编辑 张凤丽

---