

中国不同气候区小麦产量及发育期持续时间 对田间增温的响应

高美玲¹, 张旭博², 孙志刚^{2,3}, 孙楠⁴, 李仕冀^{2,3}, 高永华⁵, 张崇玉¹

(¹贵州大学生命科学学院, 贵阳 550025; ²中国科学院地理科学与资源研究所/生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; ³中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; ⁴中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; ⁵宣汉县农业技术推广站, 四川宣汉 636150)

摘要:【目的】气候变暖对小麦生长发育有重要影响。然而, 中国不同气候区小麦生长发育对温度升高的响应程度仍未系统量化。因此, 急需阐明不同气候区增温及不同时段增温对小麦产量及发育期持续时间的影响程度, 揭示小麦产量及发育期对增温的响应规律。【方法】本文搜集了1990—2017年间已发表的关于中国小麦全生育期田间持续增温条件下小麦产量变化的21篇文献, 运用整合分析(Meta-analysis)量化田间不同增温幅度及不同时段增温对中国小麦产量及生育期的影响程度, 系统阐明其在不同气候区的差异及规律。【结果】(1) 亚热带季风区增温(0—3℃)显著增加小麦产量、千粒重和穗粒数, 其平均增幅分别为8.2%、6.3%和4.7%; 温带季风区增温(0—3℃)显著增加小麦产量、穗粒数和穗数, 其平均增幅分别为6.8%、3.9%和5.5%, 而温带大陆性气候区增温(0—3℃)显著降低小麦产量、千粒重和穗粒数, 其平均降幅分别为10.2%、5.9%和8.3%。其中, 亚热带季风区增温0—2℃, 小麦产量显著提高了8.5%, 而增温2—3℃时, 小麦并未增产; 温带季风气候区小麦增产愈为明显, 当增温2—3℃时小麦的增产幅度达14.5%; 相反, 在温带大陆性气候区增温0—2℃和2—3℃时, 小麦分别显著减产10.1%和15.9%。(2) 亚热带季风区和温带大陆性气候区增温(0—3℃)小麦全生育期持续时间分别缩短了3.3%和7.1%, 相反, 在温带季风区, 增温并未明显改变小麦全生育期持续时间; 与此同时温带大陆性气候区和温带季风气候区的生殖期持续时间并无明显变化, 而亚热带季风区小麦生殖生长持续时间却显著增加(8.7%)。(3) 总体来看(季风气候区所有独立研究结果)夜间增温0—2℃和2—3℃对小麦产量有显著影响, 小麦分别增产10.5%和15.0%。【结论】田间增温会显著影响中国粮食主产区小麦产量以及发育期持续时间, 但不同气候区及不同时段增温对小麦生长和发育的影响不同。本研究结果可为未来气候变化新形势下中国粮食主产区种植制度优化与合理布局提供科学依据。

关键词:持续增温; 小麦产量; 气候区; 增温时段; 增温幅度; Meta-analysis

Wheat Yield and Growing Period in Response to Field Warming in Different Climatic Zones in China

GAO MeiLing¹, ZAHNG XuBo², SUN ZhiGang^{2,3}, SUN Nan⁴, LI ShiJi^{2,3}, GAO YongHua⁵, ZHANG ChongYu¹

(¹College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025; ²Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences/Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Beijing 100101; ³College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; ⁴Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081; ⁵Agricultural Technology Extension Station of Xuanhan County, Xuanhan 636150, Sichuan)

收稿日期: 2017-08-13; 接受日期: 2017-11-17

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0503805)、国家自然科学基金项目(31570472)、中国科学院“百人计划”项目

联系方式: 高美玲, E-mail: gml1390210244@163.com。通信作者张旭博, E-mail: zhangxb@igsnrr.ac.cn。通信作者孙志刚, E-mail: sun.zhigang@igsnrr.ac.cn

Abstract: 【Objective】 Global warming has been recognized as a key impact factor for wheat growth and development. However, the responses of wheat growth and development to warming are still remain unclear, and have not been systematically quantified in different climate regions of main wheat producing area in China. Therefore, there is a special need to systematically quantify the magnitude and mechanisms of field warming impacts on wheat yield and growing period at different periods in a day and the main climatic regions. 【Method】 This study collected 21 published literatures between 1990-2017 from nationwide with the effects of field warming on wheat yield and development. In addition, the Meta-analysis was used to systematically quantify the magnitude of field warming during entire wheat growing season on wheat yield and growing period at different climate regions. 【Result】 The results indicated that: (1) Field warming (0-3 °C) significantly increased the wheat yield, thousand kernel weight, and grain number per spike under subtropical monsoon climate whose the average growth rates were 8.2%, 6.3%, and 4.7%, respectively, and significantly increased the wheat yield, spike numbers, and grain number per spike under temperate monsoon climate whose the average growth rates were 6.8%, 3.9% and 5.5%; By contrary, field warming (0-3 °C) reduced the wheat yield, thousand kernel weight and grain number per spike under temperate continental climate whose the average change rates were 10.2%, 5.9%, and 8.3%, respectively. Specifically, the wheat yield significantly were increased (8.5%) by 0-2 °C of field warming and were not significantly changed by 2-3 °C of field warming under subtropical monsoon climate; The increment of wheat yield by 2-3 °C of field warming was 14.5% under temperate monsoon climate; On the contrary, wheat yield were significantly reduced by 10.1% and 15.9% by 0-2 °C and 2-3 °C of field warming under temperate continental climate, respectively. (2) The entire duration of wheat growing period was shorten by 3.3% and 7.1% by field warming (0-3 °C) under subtropical monsoon climate and temperate monsoon climate, but was not changed apparently under temperate continental climate. At the same time, the duration of wheat reproductive period in temperate monsoon climate and temperate continental climate were not changed significantly, while the duration of reproductive growth in subtropical monsoon climate was increased significantly (8.7%). (3) On the whole, though the effects of warming period in a day on wheat yield and development were varied among different climatic regions, the wheat yield were significantly increased by 10.5% and 15.0% under 0-2 °C and 2-3 °C of night warming within all climatic regions. 【Conclusion】 The effect magnitude of field warming on wheat yield and growing period was varied under different climatic regions and the period in a day. The findings of this study could provide scientific base for rational optimization and arrangement of cropping system within the main producing areas in China under new climate change situations.

Key words: continuous warming; wheat yield; climatic regions; warming period; warming degree; Meta-analysis

0 引言

【研究意义】2013 年发布的 IPCC 第五次评估报告指出, 全球年均气温增加趋势明显, 近 30 年平均气温增加幅度较 1990 年前约上升了 0.85°C^[1]。近年, 中国粮食主产区温度升高明显, 尤其是小麦主产区积温显著增加^[2]。小麦作为中国三大主要粮食作物之一, 势必会受到气候变暖的显著影响, 其安全生产风险随之增大, 并对中国粮食安全造成潜在威胁^[3-4]。目前, 增温对中国小麦产量影响的研究结果不一, 甚至截然相反^[5]。因此, 阐明和量化增温对中国粮食主产区小麦产量的影响程度具有重要意义。【前人研究进展】有研究表明, 温度每升高 1.0°C, 小麦产量将会减少 4%—7%^[2]。相反, 也有研究认为温度每升高 1.0—1.5°C, 小麦产量会提高 15%—20%^[6]。前人研究结果的不一致可能是由于试验所处地域气候的特殊性及差异导致。例如, 千怀遂等^[7]研究表明, 亚

热带季风区小麦生长季每增温 1°C, 小麦将增产 135—320 kg·hm⁻²; 而位于温带季风气候区的河南北部的增温试验表明, 增温 1°C 小麦产量显著降低了 240—340 kg·hm⁻²^[7]。CERES-Wheat 模型研究结果显示, 当增温 2—3°C 时, 华北及长江中下游地区小麦均有增产趋势, 而西北地区春小麦将会减产 30%—60%^[8]。另外, 全球气候变暖同时伴随着昼夜增温幅度的不均衡^[9], 不同程度地造成小麦产量增加或降低^[10-11]。位于河北固城的增温试验表明, 当夜间增温 2.5°C 时, 小麦减产 26.6%^[10]; 相反, 位于江苏省的增温试验表明, 白天增温约 0.9°C 或夜间增温约 1.1°C 时, 小麦分别增产 40.1% 和 18.3%^[11]。可见, 不同时段增温同样对小麦产量影响显著。因此, 系统量化不同气候区和不同时段增温对中国粮食主产区小麦产量的影响程度具有重要的理论和实践价值。【本研究切入点】目前, 由于田间增温对小麦产量影响的试验耗费较大, 因此试验数量稀少; 且现有研究多基

于某试验点^[7-10], 即增温对小麦的影响程度受试验点所处地区特定气候和环境条件的影响, 具有较强的局限性和特殊性。为避免上述问题, 应对中国粮食主产区独立试验或样本进行整合分析, 系统阐明增温对中国粮食主产区不同气候区的小麦产量及发育期持续时间的影响。【拟解决的关键问题】通过对国内外已发表(1990—2017年)的有关田间增温对小麦产量及发育期持续时间影响的文章中数据进行提取收集, 运用整合分析(Meta-analysis), 定量分析中国粮食主产区不同气候区及不同时段增温对小麦产量及发育期持续时间的影响, 探讨增温对小麦生长发育影响的一般规律, 以期为未来气候变化新形势下中国粮食主产区种植制度优化与合理布局提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 文献收集

为了系统全面地揭示增温对中国粮食主产区小麦产量的影响, 本研究从 web of science、中国知网、万方和百度学术等文献数据库对 1990—2017 年期间发表的文献进行检索。选取增温(warming、infrared heating、increasing temperature), 小麦产量(yield), 生育期(growing periods)等关键词进行文献收集。筛选文献采用以下标准来进行: (1) 田间试验; (2) 试验处理结果至少含有均值、标准偏差 SD(或标准误差 SE) 和重复数 3 个要素, 其中重复数至少为 3 次; (3) 试验处理必须包含对照和增温处理; (4) 需清楚地说明增温方式、冠层增温幅度数以及持续时间。例如, 为了更好模拟气候变暖对小麦的影响, 增温设施多选取田间开放式增温方式^[12]: 红外线辐射和红外线反射方式。同时, 获取每个独立试验的基本信息: 试验点的地理位置(经度、纬度和海拔), 气候类型, 土地利用方式和土壤理化性质以及小麦种植期间农田肥料的投入量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)等。由于全生育期的田间红外增温试验需要较大的资金投入, 其数量有限, 因此本文针对全生育期增温对小麦生长发育的影响, 筛选出符合上述条件的文献共 21 篇, 包含 19 个点位的试验数据(表 1)。

1.2 整合分析方法

整合分析(Meta-analysis)是一种将独立研究结果进行加权的统计分析方法^[13], 分析过程中必须含有对照和试验处理的均值、SD/SE 值和重复数 3 个要素。

数值均来自所收集的文献, 若观测值需从图中获取, 则用 GetData Graph Digitizer 2.24 软件来提取^[14]。对于文中缺乏 SD 值的用公式 $SD = SE\sqrt{n}$ 进行转换, 其中 n 是重复次数。增温对小麦生长发育的影响效应值 L_i (effect size) 用 $L_i = \ln RR$ 公式来表示, 其中 $RR = \frac{\bar{X}_t}{\bar{X}_c}$ (\bar{X}_t 和 \bar{X}_c 分别是处理组(t) 和对照组(c) 变量 x 的平均值)。效应值($L_i = \ln RR$) 是将反应比 RR 进行自然对数化处理^[15], 效应值的大小反映的是增温对小麦产量和生育期的影响程度。

本研究采用的是随机效应模型, 该模型涉及研究内的方差 V (其中 SD_t 和 SD_c 分别代表处理组(t) 和对照组(c) 变量 x 的标准差, n_t 和 n_c 分别代表处理组(t) 和对照组(c) 重复数)、权重系数 W_i (其中 τ 指研究间方差, i 指样本号)、累积效应值 \bar{L} 、 \bar{L} 的标准差 $S(\bar{L})$ 和 (\bar{L}) 95% 的置信区间(95%CI) 可通过以下公式获得。

$$V = \frac{SD_t^2}{n_t \bar{x}_t^2} + \frac{SD_c^2}{n_c \bar{x}_c^2} \quad (1)$$

$$W_i = \frac{1}{V + \tau^2} \quad (2)$$

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^m W_i L_i}{\sum_{i=1}^m W_i} \quad (3)$$

$$S(\bar{L}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m W_i L_i}} \quad (4)$$

$$95\%CI = \bar{L} \pm 1.96 S(\bar{L}) \quad (5)$$

增温处理与不增温相比, 产量和生育期的变化百分数 r 可以通过公式 $(e^{\bar{L}} - 1) \times 100\%$ 计算^[13]。如果 r 的 95% 置信区间没有跨过横坐标零点($P < 0.05$), 则说明增温使小麦相关指标显著增加或减少; 若跨过横坐标零点则说明增温对小麦各生育指标影响不显著^[16]。

1.3 数据分析

本研究采用整合分析专用软件(Meta-Win2.1)进行数据分析^[17]。为了进一步探讨增温对小麦生长发育的影响, 本研究将试验测量的响应指标大致分为两类: (1) 产量及构成; (2) 小麦生育期持续时间。同时, 本研究分别考虑了气候区、增温时段以及增温幅度 3 个因素对小麦产量的影响。具体分

表1 整合分析所用19个增温试验点位信息表

Table 1 Basic information of 19 warming experimental sites for the Meta-analysis

Sites	地理位置	经度	纬度	气候类型	小麦类型	试验开始时间	试验时长(年)	增温幅度	年均气温	年均降水量	小麦生长季平均气温	小麦生长季降水量	灌溉/雨养小麦
		Longitude	Latitude	Climate type	Wheat type	Starting time	duration (Year)	Warming degree (°C)	Annual temperature	Mean precipitation	Mean temperature of wheat growing period (°C)	Precipitation of wheat growing period (mm)	Irrigated/ Rainfed wheat
甘肃兰州	Lanzhou, Gansu	104.62E	35.58N	NTC	春小麦	2010	3	1.0/1.5/2.0/3.0	7.1	382.0	16.3/17.0/17.2	118.1/116.7/133.8	雨养 Rainfed
宁夏石嘴山	Shizuishan, Ningxia	106.38E	38.87N	NTC	春小麦	2010	1	0.5/1.5/22.5	9.1	185.0	13.2	125.7	灌溉 Irrigated
甘肃通渭	Tongwei, Gansu	105.23E	35.22N	NTC	冬小麦	2006-2008	2	0.6/1.4/2.2	6.8	422.0	2.9/1.6	239.9/300.8	雨养 Rainfed
甘肃固原	Guyuan, Gansu	106.47E	36.03N	NTC	春小麦	2001、2004	2	0.5/1.2/2.0	7.3	386.0	11.0/11.9	76.7/137.8	雨养 Rainfed
宁夏海原	Haiyuan, Ningxia	105.58E	36.57N	NTC	春小麦	2001	2	0.7/1.7	7.2	400.0	11.7/11.5	70.9/222.2	雨养 Rainfed
山东禹城	Yucheng, Shandong	116.36E	36.57N	NTM	冬小麦	2010	2	1.3	13.3	739.0	7.2/7.6	99.4/132.4	灌溉 Irrigated
河北定兴	Dingxing, Hebei	115.40E	39.08N	NTM	冬小麦	2008	4	1.6/2.0/2.2/4.2/5	11.7	552.0	7.1/4.5/6.3/5.5	70.2/75.4/70.3/82.4	灌溉 Irrigated
河北深州	Luancheng, Hebei	114.68E	37.88N	NTM	冬小麦	2008	6	2.0/2.0/2.0/2.0/1.5/	12.3	481.0	9.6/7.4/8.8/8.8/7.4/9.7	135.8/169.8/223/239/283/366	雨养/灌溉 Rainfed/Irrigated
江苏连云港	Lianyungang, Jiangsu	118.40E	34.12N	NTM	冬小麦	2009	1	2.2	10.7	883.6	9.1	297.3	雨养 Rainfed
江苏丰县	Fengxian, Jiangsu	116.65E	34.83N	NTM	冬小麦	2007	3	1.1	14.6	630.0	10.5/11.0/10.1	256.8/378.6/306.0	灌溉 Irrigated
河北石家庄	Shijiazhuang, Hebei	114.07E	34.83N	NTM	冬小麦	2007	3	1.0/0.9/1.0	13.2	534.5	10.7/11.6/9.6	257.2/135.8/185.5	灌溉 Irrigated
河南许昌	Xuchang, Henan	114.27E	33.93N	NTM	冬小麦	2008	2	0.8/1.1	14.7	579.0	12.4/11.3	323.4/269.3	灌溉 Irrigated
江苏镇江	Nanjing, Jiangsu,	119.50E	31.90N	STM	冬小麦	2007	3	1.3/0.8/1.1	15.6	1088.2	12.8/13.7/12.5	506.0/716.6/708.7	灌溉 Irrigated
江苏徐州市	Zhenjiang, Jiangsu	116.65E	34.83N	STM	冬小麦	2007	3	1/1.1/1.1	14.0	855.0	11.6/12.3/11.0	369.4/366.9/290.6	灌溉 Irrigated
江苏南京	Nanjing, Jiangsu	118.71E	32.21N	STM	冬小麦	2012	2	2.0/2.2/2.3/2.5	15.6	1200.0	10.1/12.9	372.7/456.5	雨养 Rainfed
江苏南京	Nanjing, Jiangsu,	118.86E	32.16N	STM	冬小麦	2012	1	2.2	15.6	1100.0	10.1	372.7	雨养 Rainfed
上海青浦	Qingpu, Shanghai	121.11E	31.18N	STM	冬小麦	2007	3	1.8	15.5	1045.0	13.1/13.6/12.1	743.0/587.2/547.1	灌溉 Irrigated
江苏常熟	Changshu, Jiangsu	120.33E	31.30N	STM	冬小麦	2010	4	1.4/1.5/2.0	16.0	1100.0	10.5/11.1/10.6/11.4	194.3/447.0/568.5/544.9	灌溉 Irrigated

STM: 亚热带季风区; NTM: 温带季风区; NTC: 温带大陆性气候区 STM indicates subtropical monsoon climate; NTM indicates temperate monsoon climate; NTC indicates temperate continental climate

类如下：（1）试验样地分布在甘肃、宁夏、河南、河北、山东、江苏和上海等地，总共19点位，按试验样地分布气候区的不同可分为温带大陆性气候（5个试验点位）、温带季风气候（7个试验点位）和亚热带季风气候（7个试验点位）；（2）按增温时间段不同分为全天增温和夜间增温；（3）所收集文献中全生育期增温幅度范围为0—3℃，因此，依据多个气候模型以及气温变化趋势将增温幅度细分为0—2℃和2—

3℃两个范围^[18-19]。为了统计分析不同分类条件下增温对小麦产量及生育期持续时间的影响，本研究采用Open me软件^[20]对数据进行回归分析，由于整体数据的异质性显著，因此需要通过引入解释变量，研究不同分类条件对累积效应值 \bar{L} 影响的显著性（表2）。若处理间异质性 $P<0.05$ ，则说明不同分类条件对小麦的影响显著；反之， $P>0.05$ ，则表明该分类条件对小麦的影响不显著。

表2 不同分类条件下的增温对小麦产量和生育期影响异质性检验

Table 2 Heterogeneity test on the effects of warming on wheat yield and growing period under different classification conditions

项目 Item	分类条件 Classification	自由度 <i>df</i>	整体间异质性 <i>Qt</i>	显著性 <i>P</i>	处理间异质性 <i>Q_b</i>	显著性 <i>P</i>
产量 Yield	不同气候区 Climatic type	73	643.5	$P<0.001$	38.7	$P<0.001$
	不同增温时段 Warming period	73	756.8	$P<0.001$	21.5	$P<0.001$
千粒重 Thousand-kernel weight	不同气候区 Climatic type	63	580.7	$P<0.001$	34.7	$P<0.001$
	不同时段增温 Warming period	63	1209.8	$P<0.001$	13.5	$P<0.05$
穗粒数 Grain number per spike	不同气候区 Climatic type	53	514.9	$P<0.001$	47.8	$P<0.001$
	不同增温时段 Warming period	53	793.6	$P<0.001$	10.8	$P<0.05$
单位面积穗数 Spike number per unit area	不同气候区 Climatic type	41	318.5	$P<0.001$	23.5	$P<0.05$
	不同增温时段 Warming period	41	271.6	$P<0.001$	8.6	$P>0.05$
全生育期 Whole growth period	不同气候区 Climatic type	57	8.2	$P=1$	3.6	$P>0.05$
	不同增温时段 Warming period	57	7.3	$P=1$	4.0	$P>0.05$

2 结果

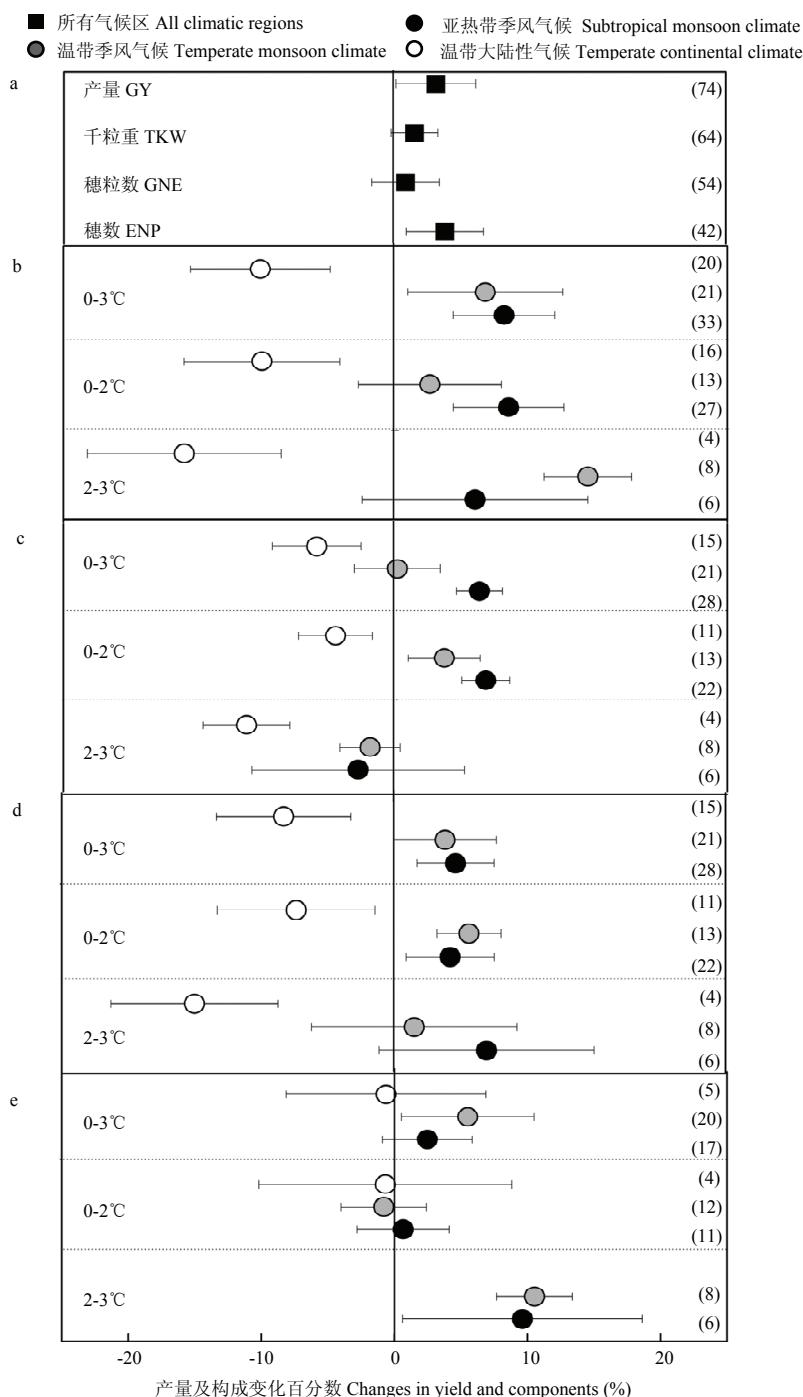
2.1 不同气候区全生育期持续增温对小麦产量及构成的影响

综合亚热带季风区、温带季风区以及温带大陆性气候区这3种气候区，研究全生育期平均温度增加0—3℃对小麦产量、千粒重、穗粒数以及穗数的影响。结果显示，增温（0—3℃）时产量和穗数显著增加了3.1%和3.8%（ $P<0.05$ ），而千粒重以及穗粒数均无明显变化（图1-a）。

然而，不同气候区小麦产量对增温的响应明显不同（图1-b）。总体来说，全生育期持续增温（0—3℃）对温带季风区和亚热带季风区的小麦均有增产效果，并且亚热带季风区小麦产量增幅（8.2%， $P<0.05$ ）大于温带季风区小麦产量增幅（6.8%， $P<0.05$ ）；而温带大陆性气候区小麦产量减少10.2%（ $P<0.05$ ）。具体来说，在亚热带季风区增温0—2℃对小麦产量

有明显的提升作用（8.5%， $P<0.05$ ），然而增温2—3℃时小麦产量未明显增加；在温带季风区增温0—2℃至2—3℃时，小麦的增产效果逐渐加强（2.6%—14.5%， $P<0.05$ ）；相反，在温带大陆性气候区增温0—2℃至2—3℃时，小麦产量显著降低，降幅由10.1%变为15.9%（ $P<0.05$ ）。

不同气候区增温对小麦千粒重的影响显著（图1-c）。总体来说，全生育期持续增温（0—3℃）对亚热带季风区小麦千粒重增加明显（6.3%， $P<0.05$ ）；相反，温带大陆性气候区增温显著降低了小麦千粒重（5.9%， $P<0.05$ ）；但温带季风气候区增温并未明显影响小麦千粒重。具体来说，在亚热带季风区和温带季风区增温0—2℃后，小麦千粒重分别显著增加6.8%和3.7%（ $P<0.05$ ），但增温至2—3℃时小麦千粒重均未明显增加；相反，在温带大陆性气候增温0—2℃至2—3℃时，小麦千粒重显著降低，降幅为4.5%—11.2%（ $P<0.05$ ）。



a 表示综合不同气候区增温 0-3°C 对小麦产量 (GY)、千粒重 (TKW)、穗粒数 (GNE) 和穗数 (ENP) 的影响; b-e 分别表示不同气候区不同增温幅度对小麦产量、千粒重、穗粒数和穗数的影响。点和误差线分别代表变化百分数及其 95% 的置信区间, 如果 95% 的置信区间没有跨越零线表示增温处理对小麦相关生理指标有显著影响; 左侧为增温幅度, 右侧括号内数值代表样本数。下同

a: Represents the effect of increasing 0-3 °C on wheat yield (GY), thousand-kernel weight (TKW), grain number per ear (GNE) and ear numbers per unit area (ENP) under the three climatic regions; b-e: Represents the effects of different warming ranges in different climatic regions on wheat yield, thousand-kernel weight, grain number per ear and ear numbers per unit area. Dots with error bars denote the percent change and 95% CI, respectively. The 95% CI which does not cross the zero line means warming treatment has a significant impact on the related physiological indexes of wheat. The warming degree is on the left, and the numbers in the right brackets represent the sample numbers. The same as below

图 1 不同气候区小麦产量、千粒重、穗粒数和单位面积穗数对增温幅度的响应

Fig. 1 Responses of wheat yield, thousand-kernel weight, grain number per ear and ear numbers per unit area to warming degrees under different climatic regions

不同气候区小麦穗粒数对增温的响应不一(图1-d)。总体来说,全生育期持续增温(0—3℃)使亚热带季风区和温带季风区小麦穗粒数分别显著增加4.7%和3.9%,而温带大陆性气候区增温使小麦穗粒数显著降低(8.3%, $P<0.05$)。具体来说,温带季风区和亚热带季风区增温0—2℃对小麦穗粒数有显著提升作用(5.7%和4.3%, $P<0.05$),然而增温2—3℃时小麦穗粒数均未明显增加;当增温0—2℃至2—3℃时,温带大陆性气候区小麦穗粒数显著降低,降幅为7.3%—15.6%($P<0.05$)。

另外,图1-e显示,全生育期持续增温(0—3℃)时,温带季风区小麦穗数增加显著(5.5%, $P<0.05$),对温带大陆性气候区和亚热带季风区小麦穗数无显著影响。具体来说,增温0—2℃至2—3℃时,亚热带季风区和温带季风区小麦穗数均由变化不明显变为显著

增加(9.6%和10.5%, $P<0.05$),而温带大陆性气候区的小麦穗数均无显著变化。

2.2 全生育期持续增温对不同气候区小麦生育期持续时间的影响

图2显示,不同气候区小麦全生育期持续时间对增温的响应相似。整体来看,当增温0—3℃时,亚热带季风区和温带大陆性气候区的小麦整个生育期持续时间均显著缩短(-3.3%和-7.1%, $P<0.05$),但温带季风区小麦全生育期持续时间并未受到增温的显著影响。当增温幅度为0—2℃时,亚热带季风区和温带大陆性气候区的小麦全生育期持续时间分别缩短3.8%和5.5%($P<0.05$);当增温2—3℃时,温带大陆性气候区小麦全生育期持续时间缩短的更为明显(-12.3%, $P<0.05$),而温带季风区小麦全生育期持续时间并无显著变化。

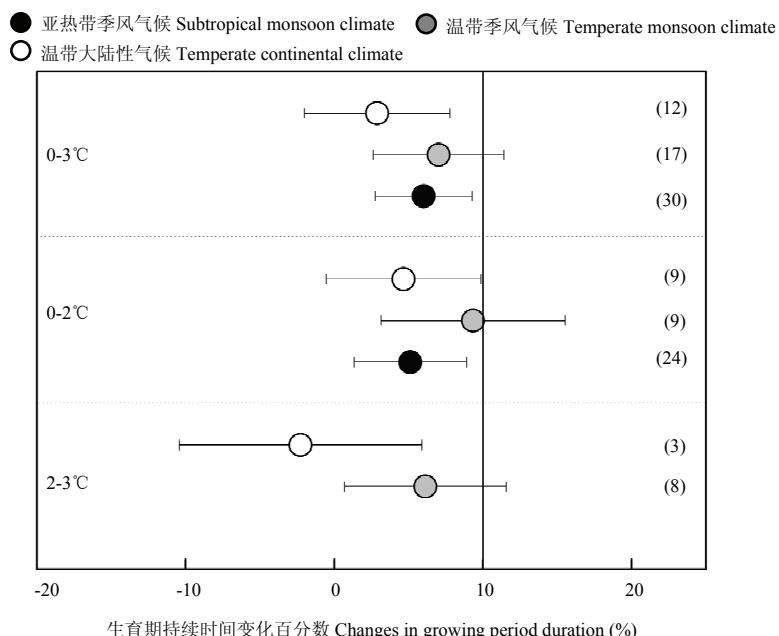


图2 不同气候区小麦生育期持续时间对不同增温幅度的响应

Fig. 2 Response of wheat growth duration to different warming degree under different climatic regions

综合所有气候区来看(图3),当增温0—3℃时,小麦营养生长期持续时间显著缩短(8.1%, $P<0.05$),而小麦生殖生长期持续时间并未受增温影响;而将气候区分开进行分析时发现(图4),温带季风区和温带大陆性气候区的小麦生殖生长期持续时间均未发生显著变化,但亚热带季风区小麦生殖生长期持续时间显著增加(8.7%, $P<0.05$)。

2.3 不同时段增温对小麦产量及构成的影响

综合不同增温时段,研究小麦生长季平均温度增加0—3℃对小麦产量、千粒重、穗粒数以及穗数的影响,由图5-a可以看出,小麦产量和穗数分别显著增加了3.1%和3.8%,而千粒重以及穗粒数均无明显变化。

本研究将不同增温时段分为全天和夜间增温。图

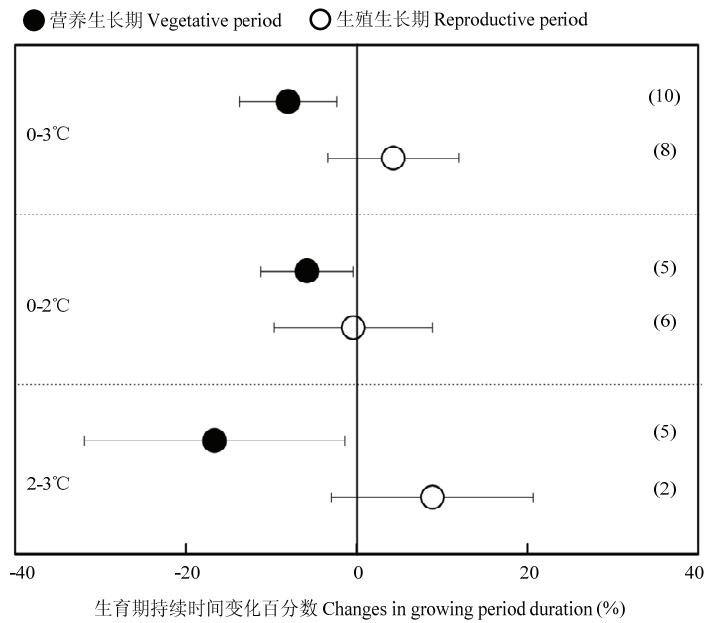


图 3 小麦营养生长期持续时间和生殖生长期持续时间对不同增温幅度的响应

Fig. 3 Response of vegetative and reproductive growth duration of wheat to different warming degree

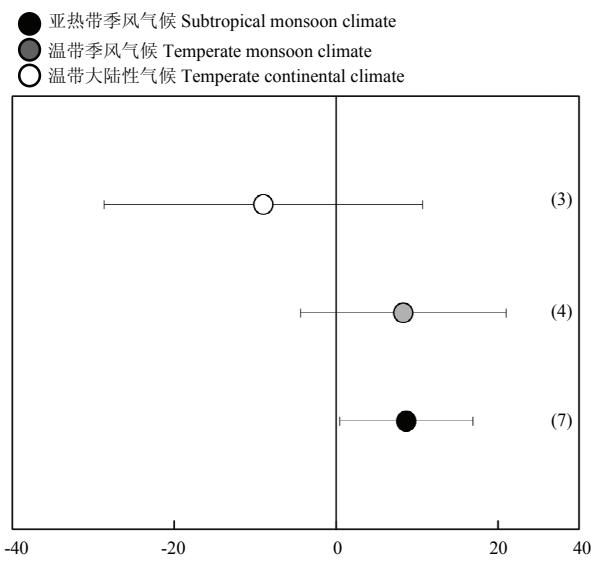


图 4 小麦生殖生长期在不同气候区增温 0—3℃的响应

Fig. 4 Response of reproductive growth duration of wheat to field warming 0-3 °C under different climatic regions

5 显示, 不同增温时段对小麦产量及构成影响显著。综合不同气候区来看, 全天不同幅度增温对产量影响均不显著; 夜间增温 0—3℃时, 小麦显著增产 9.9% ($P<0.05$) (图 5-b), 当增温幅度为 0—2℃和 2

—3℃时, 夜间增温均使小麦产量显著增加 (10.5%—15.0%, $P<0.05$)。

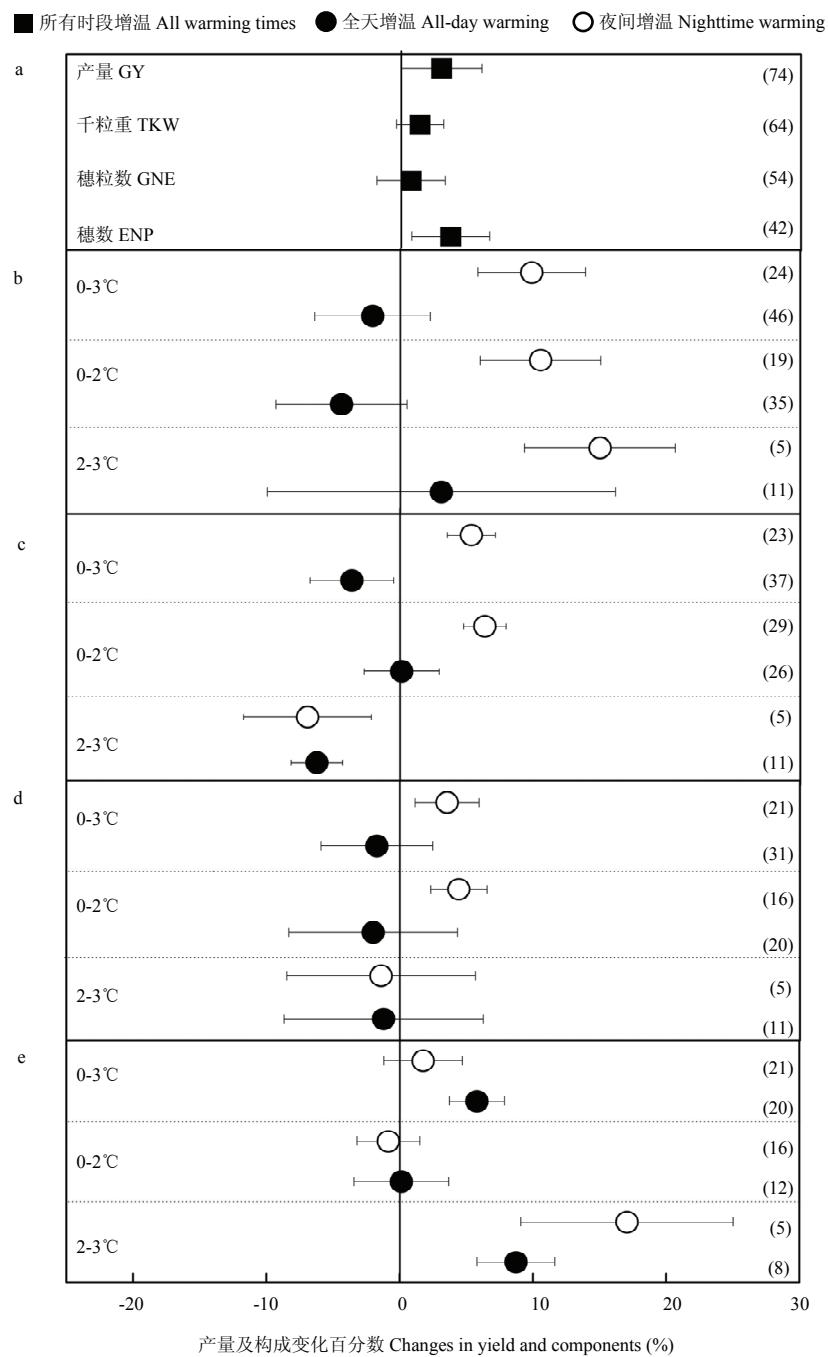
综合不同气候区来看, 不同时段增温对小麦千粒重影响差异明显 (图 5-c)。全天增温使小麦千粒重显著减少 (-3.6%, $P<0.05$), 夜间增温使小麦千粒重显著增加 (5.3%, $P<0.05$); 当增温 0—2℃至 2—3℃时, 全天增温使小麦千粒重由变化不显著变为显著减少 (-6.2%, $P<0.05$), 夜间增温使小麦千粒重由显著增加 (6.4%, $P<0.05$) 变为显著减少 (-6.9%, $P<0.05$)。

同样, 不同时段增温对小麦穗粒数影响差异明显 (图 5-d)。整体来看, 全天增温对小麦穗粒数无显著影响, 夜间增温 0—3℃使小麦穗粒数显著增加 (3.5%, $P<0.05$)。当夜间增温幅度为 0—2℃时, 小麦穗粒数显著增加 (4.4%, $P<0.05$), 但增温 2—3℃时小麦穗粒数变化不显著。

另外, 不同时段增温对小麦穗数影响有差异 (图 5-e)。整体来看, 夜间增温对小麦穗数影响不显著, 全天增温使小麦穗数显著增加 (5.8%, $P<0.05$); 当增温 0—2℃时, 全天和夜间增温小麦穗数变化均不显著; 当增温 2—3℃时, 全天和夜间增温分别使小麦穗数显著增加 8.7% 和 17.1% ($P<0.05$)。

2.4 不同时段增温对小麦生育期持续时间的影响

由图 6 和图 7 可知, 综合所有气候区, 全天增温



a 表示综合不同时段增温 0—3℃对小麦产量 (GY)、千粒重 (TKW)、穗粒数 (GNE) 和穗数 (ENP) 的影响；b—e 分别表示不同增温时段及幅度对小麦产量、千粒重、穗粒数和穗数的影响

a: Represents the effect of increasing 0—3°C on wheat yield (GY), thousand-kernel weight (TKW), grain number per ear (GNE) and ear numbers per unit area (ENP) under different warming period; b-e: Represents the effects of different warming ranges in different warming period on wheat yield, thousand-kernel weight, grain number per ear and ear numbers per unit area

图 5 小麦产量、千粒重、穗粒数和单位面积穗数对不同增温时段及幅度的响应

Fig. 5 Responses of wheat yield, thousand grain weight, grain number per ear and ear numbers per unit area to warming degrees under different warming period

(0—3℃) 小麦全生育期持续时间显著缩短 5.7% ($P < 0.05$)；当全天增温 0—2℃和 2—3℃时，小麦全生育

期持续时间显著缩短 5.4% 和 6.1% ($P < 0.05$)，而开花—成熟期的持续时间均无显著变化；另外，夜间增

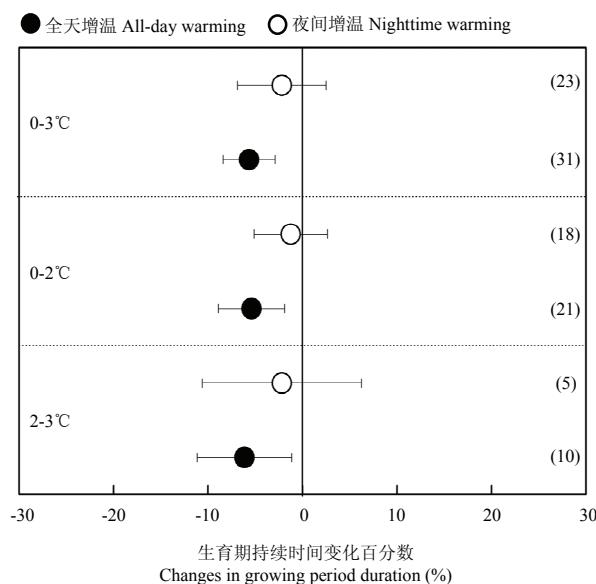


图 6 不同增温时段小麦生育期持续时间对增温幅度的响应

Fig. 6 Response of wheat growth duration to warming degree under different warming periods

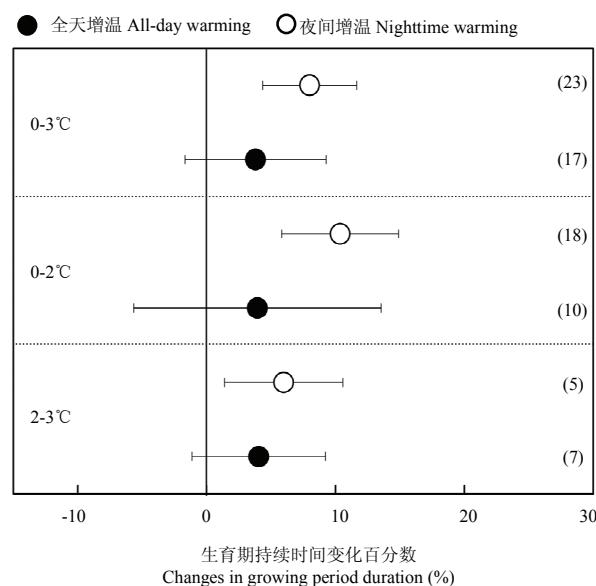


图 7 不同增温时段的小麦开花期-成熟期持续时间对不同增温幅度的响应

Fig. 7 Response of flowering-maturation period of wheat to warming degree under different warming periods

温 (0—3°C) 对小麦全生育期持续时间无显著影响, 而开花—成熟期却显著延长了 8.0%, 其中在 0—2°C 和 2—3°C 两个增温幅度下夜间增温均未使小麦全生

育期发生显著变化, 但开花—成熟期的持续时间却分别显著增加 10.4% 和 6.2%。

3 讨论

3.1 全生育期持续增温对不同气候区小麦产量及生育期影响差异性

本研究表明, 亚热带季风区全生育期增温 0—3°C 使小麦产量显著增加 7.5% (图 1-b), 虽与前人研究结果相似^[11, 21], 但小麦增产幅度对增温的响应仍有所差异。这可能是由于独立试验中气候年型的差异导致水热条件不均衡对试验结果的影响。例如, 2004—2009 年间, 南京地区增温 0—2°C 时, 小麦产量分别提高 16.3%—40.1%^[11, 21], 但 2010—2014 年间, 该地区增温 0—2°C 却造成小麦平均减产 26.2%^[23-24]。因此, 本研究运用整合分析, 可排除某个独立试验中特殊气候年型及点位特征, 进而反映该区域小麦产量对田间增温的一般规律。值得一提的是, 当增温 0—2°C 时, 亚热带季风区小麦增产 8.2%, 而增温 2—3°C 时, 该气候区小麦产量无显著变化。这说明, 增温超过 2°C 对小麦增产无积极作用甚至可能出现负面效应, 即适度增温可在亚热带季风区增加小麦产量^[25]。小麦穗数、穗粒数和千粒重作为产量构成要素, 在亚热带季风区增温 0—3°C 时, 穗粒数与千粒重分别显著增加了 4.7% 和 6.3%, 这与前人研究结果一致^[11, 26-27]。亚热带季风区小麦生殖期显著延长了 8.7% (图 4); 另外, 有研究证明增温可显著提高耐热性小麦的灌浆速率^[28], 从而提高籽粒充实度。因此, 该地区小麦千粒重增加可能是由灌浆速率加快和灌浆持续时间延长共同决定的^[29-30]。

温带季风区增温 0—3°C 使小麦产量显著增加 6.8%, 而且增温 2—3°C 的小麦增产幅度 (14.5%, $P < 0.05$) 大于增温 0—2°C (图 1-b), 这与前人研究结果一致^[31-34]。例如, 位于温带季风气候区的山东禹城、河北固城以及江苏丰县等地的增温试验表明, 当增温约 1.0°C 时, 千粒重增加 6.3%, 小麦产量增加 12%^[29]; 增温 2—3°C 时小麦产量增加 18%—20%^[33-34]。由于温带季风区冬季寒冷干燥, 秋冬季适度增温总体有利于小麦产量的提升^[35], 因此本研究中增温 (0—3°C) 有利于该气候区小麦增产。从产量构成要素来看, 本研究增温 0—3°C 使小麦穗粒数和穗数分别增加 3.9% 和 5.5%, 与前人研究结果类似, 但是其增产幅度有所差异^[2, 22]。前人研究发现, 当增温 2—3°C 时, 穗数和穗粒数平均显著增加 27.4% 和 20.0%, 且小麦产

量增加 23%^[22]; 而本研究小麦穗数和产量分别显著增加了 10.5% 和 14.5%。冬季积温升高可使小麦穗分化时间加长^[31]、有效穗数增加^[32], 进而使小麦穗数和产量增加。另外, 增温 (0—3℃) 对小麦生殖生长持续时间影响不显著 (图 4), 与前人研究结果一致^[34,36]。进一步分析发现, 整个生育期持续时间对增温 (0—3℃) 的响应却有显著差异, 在温带季风区, 本研究增温 0—3℃ 对小麦全生育期无显著影响 (图 2), 而有研究预测本世纪末随着温度升高会使小麦生育期显著缩短 27%^[3]。

增温 (0—3℃) 使温带大陆性气候区小麦产量显著减少 10.2% (图 1-b), 尤其是增温 2—3℃ 时小麦减产幅度 (-15.9%) 显著大于 0—2℃ (-10.0%)。温带大陆性气候区小麦产量增温胁迫指数较高^[37], 也就是说该气候区小麦易受到增温胁迫而减产。例如, 宁夏和甘肃等地的增温试验表明, 增温 (0—3℃) 降低了 0.5%—20% 的小麦产量, 且随着增温幅度的升高 (0—2℃ 升高至 2—3℃), 小麦减产幅度由无显著变化增加到 20%^[38-40]。从小麦产量构成要素来看, 小麦产量、千粒重和穗粒数分别显著减少了 10.2%、5.9% 和 8.3%, 有研究表明增温 0—3℃ 可使小麦光合速率下降, 穗粒数和千粒重减少 20% 和 20.8%, 产量减少 18.5%^[38], 同时增温也会使小麦呼吸速率提升^[41], 最终导致小麦干物质积累减少、千粒重和产量降低^[38-39]。对于小麦生育期持续时间来说, 增温可使小麦生育期持续时间显著缩短^[38-40]。例如, 宁夏引黄灌区增温 2—3℃ 时, 小麦全生育期显著缩短 18—22 d^[38]。本研究发现, 增温 (0—3℃) 不仅使全生育期持续时间显著缩短了 7.1%, 同时也使小麦营养生长期缩短, 导致小麦生长及生殖过程中营养供应不足^[42], 这可能也是小麦产量减少的原因之一。

目前, 利用作物模型模拟预测气候变暖对小麦产量的影响成为热点之一^[43-46]。例如, APSIM-Wheat 模型模拟结果显示当前澳大利亚平均每增温 1℃, 小麦产量降低 5.3%, 其中降水和 CO₂ 浓度升高均对小麦产量有一定的补偿作用; 在中国兰州陇东雨养地区增温 1.5℃ 范围内, 随着温度的升高小麦逐渐减产。CERES-Wheat 模型预测结果显示气候变暖造成东北和西北地区春小麦产量下降, 而华北及长江中下游地区小麦均有增产趋势^[8]; 中国黄淮海地区 20 年 (1990—2009 年) 历史冬小麦产量数据可知, 每升高 1℃, 小麦增产 0.62%—4.78%^[47]。与本研究整合分析所得结果的趋势一致。模型模拟可

能忽视了小麦生育期内病虫害或者品种更替等影响; 另外, 增温很大程度上伴随着 CO₂ 浓度升高, 模型模拟过程中, 如未考虑 CO₂ 浓度的变化, 很可能会低估小麦产量的变化趋势。模型研究表明, 在 IPCC 的 SRES A2 和 B2 情景下, 至 2050 年时增温 2℃ 会降低 1.6%—2.5% 的灌溉区冬小麦产量, 然而考虑增温带来的 CO₂ 浓度变化后, 增温则会增加小麦产量^[48]。

3.2 全生育期不同时段增温小麦产量及生育期的影响差异性

本研究表明, 综合不同气候区研究结果来看, 全天增温 0—3℃ 对中国小麦产量影响幅度不明显。由于不同气候区水热条件、灌溉条件以及小麦品种耐热性的差异, 在亚热带季风区、温带大陆性气候区和温带季风气候区, 相同幅度的全天增温 (0—3℃) 会使小麦产量出现增加^[21,39]或降低^[24,37-38]截然不同的趋势, 不同气候区增温对小麦的正、负效应可能是导致本研究基于所有气候区得出的全天增温对小麦产量无明显影响的原因。值得注意的是, 综合亚热带季风区和温带季风区所有研究数据进行整合分析, 夜间增温 0—3℃ 仍然可使小麦产量显著增加 10.1%。研究表明, 夜间增温对小麦产量的影响更加明显, 出现显著增产^[11,30,49]或减产^[10,23,26,50]的趋势。这可能是由于植物光合作用受源-库关系调控, 夜间增温使小麦呼吸作用增强, 呼吸消耗加快不利于干物质积累, 会造成千粒重和产量的减少^[5,10,26]。夜间增温虽显著加快了小麦夜间呼吸作用, 但同时也刺激小麦在白天的光合作用, 使干物质积累增加^[51-52]。另外也有研究表明夜间增温会促进冬小麦地上部的生长发育, 提高小麦籽粒淀粉合成酶活性和千粒重^[49], 从而使小麦产量增加。例如江苏南京的增温试验表明, 夜间增温 0—3℃ 可使小麦显著增产 19.6%^[42]。本研究中夜间增温未显著改变小麦整个生育期持续时间, 但延长了生殖生长期 (开花期至成熟期) 持续时间 (图 7), 生殖生长期的延长可能会使灌浆期延长而增加小麦千粒重, 因此夜间增温使开花成熟期持续时间延长以及千粒重增加, 这有可能是造成小麦增产的原因。

3.3 研究不足与展望

由于小麦田间增温试验成本较高且相关研究数量较少, 可用于整合分析的文献和数据有限, 增加了本文分析结果的局限性。另外, 本文只研究了年均增温对中国粮食主产区不同气候区的小麦产量

和生育期的影响, 并未进一步系统量化不同季节中增温幅度对小麦产量的影响, 以及不同气候区中不同增温时段对小麦产量的影响, 这也是下一步研究小麦对增温响应的重点之一。21世纪末年均增温有可能达到 5°C ^[1], 但由于收集数量的限制, 本文只分析了 $0\text{--}3^{\circ}\text{C}$ 增温对小麦生长发育的影响。最后, 由于雨养和灌溉小麦对增温响应的差异性^[40], 今后应着眼于基于水、热交互作用下小麦产量的变化, 进一步明确增温在不同环境下对小麦生长发育的影响。

4 结论

全生育期持续增温($0\text{--}3^{\circ}\text{C}$)对不同气候区小麦产量影响显著, 亚热带季风区和温带季风区的小麦产量分别显著增加8.2%和6.8%, 而温带大陆性气候区小麦产量则显著减少10.2%。当增温幅度由 $0\text{--}2^{\circ}\text{C}$ 提升至 $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$ 时, 温带季风区增产越为明显, 温带大陆性气候区减产幅度由10.1%增大至15.9%, 而亚热带季风区小麦增产越不显著。其次, 亚热带季风区和温带大陆性气候区小麦全生育期持续时间均显著缩短了3.3%和4.0%。其中, 亚热带季风区小麦生殖生长期却显著延长了8.7%。值得注意的是, 综合不同气候区来看, 全天增温对中国小麦产量无显著影响, 而季风区夜间增温 $0\text{--}3^{\circ}\text{C}$ 可使小麦产量显著增加9.9%, 其中, 夜间增温延长了小麦生殖生长期(开花期—成熟期)持续时间。综上所述, 田间增温会显著影响中国粮食主产区小麦产量以及生育期持续时间, 但不同气候区及不同时段增温对小麦生长和发育的影响不同。因此, 为应对未来气候变化而对中国小麦主产区种植制度进行调整时, 应综合考虑不同气候区小麦对增温响应的特点, 从而对现有种植制度进行合理优化与布局。

References

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. *Contribution of Working Group to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge & New York: Cambridge University Press, 2013.
- [2] HATFIELD J L, BOOTE K J, KIMBALL B A, ZISKA L H, LZAURRALDE R C, ORT D, THOMSON A M, WOLFE D. Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy Journal*, 2011, 103(2): 351-370.
- [3] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 何勇. 气候变化对我国华北地区冬小麦发育和产量的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1179-1184.
- ZHANG J P, ZHAO Y X, WANG C Y, HE Y. Effects of climate change on winter wheat growth and yield in North China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1179-1184. (in Chinese)
- [4] 赵鸿, 李凤民, 熊友才, 张强, 王润元, 杨启国. 西北干旱区不同海拔高度地区气温变化对春小麦生长的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 887-893.
- ZHAO H, LI F M, XIONG Y C, ZHANG Q, WANG R Y, YANG Q G. Effects of air temperature change on spring wheat growth at different altitudes in northwest arid area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 887-893. (in Chinese)
- [5] 夏云. 气候变化对中国小麦产量的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2016.
- XIA Y. The impact of climate change on wheat yield in China[D]. NanChang: Jiangxi Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [6] TACK J, BARKLEY A, NALLEY L L. Effect of warming temperatures on US wheat yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2015, 112(22): 6931-6936.
- [7] 千怀遂, 魏东嵒. 气候对河南省小麦产量的影响及其变化研究. *自然资源学报*, 2000, 15(2): 149-154.
- QIAN H S, WEI D L. Impacts of climate on wheat yield and their changes in Henan province. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(2): 149-154. (in Chinese)
- [8] 居辉, 熊伟, 许吟隆, 林而达. 气候变化对我国小麦产量的影响. *作物学报*, 2005, 31(10): 1340-1343.
- JU H, XIONG W, XU Y L, LIN E D. Impacts of climate change on wheat yield in China. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(10): 1340-1343. (in Chinese)
- [9] VOSE R S, EASTERLING D R, GLEASON B. Maximum and minimum temperature trends for the globe: An update through 2004. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(23): 822-826.
- [10] 房世波, 谭凯炎, 任三学. 夜间增温对冬小麦生长和产量影响的实验研究. *中国农业科学*, 2010, 43(15): 3251-3258.
- FANG S B, TAN K Y, REN S X. Winter wheat yields decline with spring higher night temperature by controlled experiments. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3251-3258. (in Chinese)
- [11] 田云录, 陈金, 董文军, 邓艾兴, 张卫建. 开放式增温下非对称性增温对冬小麦生长特征及产量构成的影响. *应用生态学报*, 2011,

- 22(3): 681-686.
- TIAN Y L, CHEN J, DONG W J, DENG A X, ZHANG W J. Effects of asymmetric warming on the growth characteristics and yield components of winter wheat under free air temperature increased. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 681-686. (in Chinese)
- [12] 牛书丽, 韩兴国, 马克平, 万师强. 全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 262-271.
- NIU S L, HAN X G, MA K P, WAN S Q. Field facilities in global warming and terrestrial ecosystem research. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 262-271. (in Chinese)
- [13] ZHAO X, LIU S L, PU C, ZHANG X Q, XUE J F, ZHANG R, WANG Y Q, LAI R, ZHANG H L, CHEN F. Methane and nitrous oxide emissions under no-till farming in China: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2016, 22(4): 1372-1384.
- [14] TAOVA S. GetData digitizing program code: Description, testing, training. INDC International Nuclear Data Committee, International Atomic Energy Agency, 2013.
- [15] LARRY V, HEDGES J G, CURTIS P S. The Meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [16] CHEN X, HU B, YU R. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China. *Global Change Biology*, 2005, 11(7): 1118-1130.
- [17] ROSENBERG M S, ADAMS D C, GUREVITCH J. Metawin: Statistical software for meta-analysis with resampling tests. *Quarterly Review of Biology*, 1998, 73(1): 126-128.
- [18] LIU S X, MO X G, LIN Z H, XU Y Q, JI J J, WEN G, RICHEY J. Crop yield responses to climate change in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1195-1209.
- [19] SANCHEZ B, RASMUSSEN A, PORTER J R. Temperatures and the growth and development of maize and rice: A review. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 408-417.
- [20] WALLACE B C, LAJEUNESSE M J, DIETZ G, DAHABRECH I J, TRIKALIONS T A, SCHMID C H. OpenMEE: Intuitive, open-source software for meta-analysis in ecology and evolutionary biology. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, 8(8): 941-947.
- [21] TIAN Y L, CHEN J, CHEN C Q, DENG A X, SONG Z W, ZHENG C Y, HOOGMOED W, ZHANG W J. Warming impacts on winter wheat phenophase and grain yield under field conditions in Yangtze Delta Plain, China. *Field Crops Research*, 2012, 134(3): 193-199.
- [22] 谭凯炎, 房世波, 任三学. 增温对华北冬小麦生产影响的试验研究. 气象学报, 2012, 70(4): 902-908.
- TAN K Y, FANG S B, REN S X. Experiment study of winter wheat growth and yield response to climate warming. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(4): 902-908. (in Chinese)
- [23] 田思勰, 罗雪顶, 董京铭, 刘凤凤, 吴雪亚, 张耀鸿. 夜间增温及免耕对冬小麦生长及养分吸收利用的影响. *江苏农业科学*, 2015, 43(9): 111-114.
- TIAN S X, LUO X D, DONG J M, LIU F F, WU X Y, ZHANG Y H. Effects of night warming and no tillage on growth and nutrient uptake and utilization of winter wheat. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(9): 111-114. (in Chinese)
- [24] WANG J Q, LIU X Y, ZHANG X H, SMITH P, LI L Q, FILLEY T R, CHENG K, SHEN M X, HE Y B, PAN G X. Size and variability of crop productivity both impacted by CO₂ enrichment and warming-a case study of 4 year field experiment in a Chinese paddy. *Agriculture, Ecosystems&Environment*, 2016, 221: 40-49.
- [25] 杨绚, 汤绪, 陈葆德, 田展, 钟洪麟. 气候变暖背景下高温胁迫对中国小麦产量的影响. *地理科学进展*, 2013, 32(12): 1771-1779.
- YANG X, TANG X, CHEN B D, TIAN Z, ZHONG H L. Impacts of heat stress on wheat yield due to climatic warming in China. *Progress in Geography*, 2013, 32(12): 1771-1779. (in Chinese)
- [26] 房世波, 谭凯炎, 任三学, 张新时. 气候变暖对冬小麦生长和产量影响的大田实验研究. *中国科学: 地球科学*, 2012, 55(6): 1021-1027.
- FANG S B, TAN K Y, REN S X, ZHANG X S. Field experimental study on effects of climate warming on growth and yield of winter wheat. *Chinese Science: Earth Science*, 2012, 55(6): 1021-1027. (in Chinese)
- [27] 高素华, 郭建平, 赵四强, 张宇, 潘亚茹. 高温对我国小麦生长发育及产量的影响. *大气科学*, 1996, 20(5): 599-605.
- GAO S H, GUO J P, ZHAO S Q, ZHANG Y, PAN Y R. The impacts of "higher-temperature" on wheat growth and yield in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1996, 20(5): 599-605. (in Chinese)
- [28] 胡刚元. 温度对冬小麦灌浆时间和灌浆速度的影响. *安徽农业科学*, 2012, 40(26): 12836-12837.
- HU G Y. Effects of temperature on filling time and filling rate during grain filling period of winter wheat (*Triticum aestivum* Linn). *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(26): 12836-12837. (in Chinese)
- [29] 苗永杰. 高温胁迫对小麦籽粒灌浆特性及主要品质形状的影响[D].

- 北京：中国农业科学院，2016。
- MIAO Y J. Effect of heat stress on grain filling and major quality of common wheat [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
- [30] CHEN J, TIAN Y, ZHANG X, ZHENG C Y, SONG Z W, DENG A X, ZHANG W J. Nighttime warming will increase winter wheat yield through improving plant development and grain growth in North China. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2013, 33(2): 397-407.
- [31] 张明响. 黄淮麦区不同小麦品种的产量及其相关因素分析[D]. 北京：中国农业科学院, 2013.
- ZHANG M X. Analysis of different wheat varieties yield and its related factors in Huang-Huai wheat area[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013. (in Chinese)
- [32] 田云录, 郑建初, 张彬, 陈金, 董文军, 杨飞, 张卫健. 麦田开放式昼夜不同增温系统的设计及增温效果. 中国农业科学, 2010, 43(18): 3724-3731.
- TIAN Y L, ZHENG J C, ZHANG B, CHEN J, DONG W J, YANG F, ZHANG W J. Design of free air temperature increasing (FATI) system for upland with three diurnal warming scenarios and their effects. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(18): 3724-3731. (in Chinese)
- [33] FANG S B, CAMMARANO D, ZHOU G S, TAN K Y, REN S X. Effects of increased day and night temperature with supplemental infrared heating on winter wheat growth in North China. *European Journal of Agronomy*, 2015, 64: 67-77.
- [34] HOU R X, OUYANG Z, LI Y S, WILSON G V, LI H X. Is the change of winter wheat yield under warming caused by shortened reproductive period? *Ecology and Evolution*, 2012, 2(12): 2999-3008.
- [35] 李向东, 张德奇, 王汉芳, 邵运辉 方保停, 吕凤荣, 岳俊芹, 马富举. 越冬前增温对小麦生长发育和产量的影响. 应用生态学报, 2015, 26(3): 839-846.
- LI X D, ZHANG D Q, WANG H F, SHAO Y H, FANG B T, LÜ F R, YUE J Q, MA F J. Impact of temperature increment before the over-wintering period growth and development and grain yield of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 839-846. (in Chinese)
- [36] 王斌, 顾蕴倩, 罗卫红, 戴剑锋, 张巍, 亓春杰. 中国冬小麦种植区光热资源及其配比的时空演变特征分析. 中国农业科学, 2012, 45(2): 228-238.
- WANG B, GU Y Q, LUO W H, DAI J F, ZHANG W, QI C J. Analysis of the temporal and spatial changes of photo-thermal resources in winter wheat growing regions in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(2): 228-238. (in Chinese)
- [37] 肖国举, 张强, 张峰举, 罗成科, 王润元. 增温对宁夏引黄灌区春小麦生产的影响. 生态学报, 2011, 31(21): 6588-6593.
- XIAO G J, ZHANG Q, ZHANG F J, LUO C K, WANG R Y. The impact of rising temperature on spring wheat production in the yellow river irrigation region of Ningxia. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6588-6593. (in Chinese)
- [38] 张凯, 王润元, 冯起, 王鹤龄, 赵鸿, 赵阳, 雷俊. 模拟增温和降水变化对半干旱区春小麦生长及产量的影响. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 161-170.
- ZHANG K, WANG R Y, FENG Q, WANG H L, ZHAO H, ZHAO Y, LEI J. Effects of simulated warming and precipitation change on growth characteristics and grain yield of spring wheat in semi-arid area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(S1): 161-170. (in Chinese)
- [39] GUO J X, WEI X L, QIANG X, ZHAO J S, JING W. Effects of temperature increase and elevated CO₂ concentration, with supplemental irrigation, on the yield of rain-fed spring wheat in a semiarid region of China. *Agricultural Water Management*, 2005, 74(3): 243-255.
- [40] 谢英添. 农田开放式CO₂浓度和温度增高对冬小麦生长发育和产量的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- XIE Y T. Effect of free air CO₂ enrichment and free air temperature increase on growth and yield in wheat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [41] 于振文, 潘庆民, 姜东, 张永丽, 王东. 9000kg/公顷小麦施氮量与生理特性分析. 作物学报, 2003, 29(1): 37-43.
- YU Z W, PAN Q M, JIANG D, ZHANG Y L, WANG D. Analysis of the amount of nitrogen applied and physiological characteristics in wheat of the yield level of 9000 kg per hectare. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(1): 37-43. (in Chinese)
- [42] 田云录. 冬小麦生产力对昼夜不同增温的响应研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- TIAN Y L. Response of winter wheat productivity to asymmetric warming region[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [43] INNES P J, TAN D KY, VAN OGTROP F. Effects of high-temperature episodes on wheat yields in New South Wales, Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 208: 95-107.

- [44] 杨轩, 王自奎, 曹铨, 张小明, 沈禹颖. 陇东地区几种旱作作物产量对降水与气温变化的响应. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 106-114.
- YANG X, WANG Z K, CAO Q, ZHANG X M, SHEN Y Y. Effects of precipitation and air temperature changes on yield of several crops in Eastern Gansu of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 106-114. (in Chinese)
- [45] PIRTTIOJA N, CARTER T R, FRONZEK S. Temperature and precipitation effects on wheat yield across a European transect: A crop model ensemble analysis using impact response surfaces. *Climate Research*, 2015, 65(8): 87-105.
- [46] AHMED M, AKRAM M N, ASIM M. Calibration and validation of APSIM-Wheat and CERES-Wheat for spring wheat under rainfed conditions: Models evaluation and application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 123: 384-401.
- [47] 陈群, 于欢, 侯雯嘉, 付伟, 耿婷, 陈长青. 气候变暖对黄淮海地区冬小麦生育进程与产量的影响. *麦类作物学报*, 2014, 34(10): 1363-1372.
- CHEN Q, YU H, HOU W J, FU W, GENG T, CHEN C Q. Impacts of climate warming on growth development process and yield of winter wheat in Huang-Huai-Hai region of China. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(10): 1363-1372. (in Chinese).
- [48] XIONG W, CONWAY D, LIN E, XU Y, JU H, JIANG J, HOLMAN I, LI Y. Future cereal production in China: Modelling the interaction of climate change, water availability and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 2009, 19(1): 34-44.
- [49] 石姣姣, 江晓东, 邱思齐. 昼夜不同增温处理对小麦生长发育和产量的影响. *江苏农业科学*, 2015, 13(1): 82-84.
- SHI J J, JIANG X D, QIU S Q. Effects of different warming treatments at night and day on growth and yield of wheat. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 13(1): 82-84. (in Chinese)
- [50] TIAN Y L, CHENG Y, JIN C, CHANG Q C, DENG A X, SONG Z W, ZHANG B X, ZHANG W J. Climatic warming increases winter wheat yield but reduces grain nitrogen concentration in East China. *PLoS ONE*, 2014, 9(4): e95108.
- [51] MCCORMICK A J, CRAMER M D, WATT D A. Sink strength regulates photosynthesis in sugarcane. *New Phytologist*, 2006, 171(4): 759-770.
- [52] PAUL M, PELLNY T, GODDIJN O. Enhancing photosynthesis with sugar signals. *Trends in Plant Science*, 2001, 6(5): 197-200.

(责任编辑 杨鑫浩)