

增温对华北冬小麦生产影响的试验研究^{* 1}

谭凯炎 房世波 任三学
TAN Kaiyan FANG Shibo REN Sanxue

中国气象科学研究院生态与农业气象研究所,北京,100081
Institute of Eco-environment and Agrometeorology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China
2011-01-18 收稿,2011-09-05 改回.

Tan Kaiyan, Fang Shibo, Ren Sanxue. 2012. Experiment study of winter wheat growth and yield response to climate warming. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(4): 902-908.

Abstract In order to explore and validate the impact of further climate warming on winter wheat growth and yield, and to obtain basic features of winter wheat's response to temperature increase, the experiments with temperature increase on all day (TI) during the whole growing season of winter wheat were carried out by using the technique of Free Air Temperature Increase (FATI) in the field. The impacts of TI on yield, growth and water consumption of winter wheat were also analyzed. The results showed: (1) Compared with control treatment (CK), phenological phase of return green was earlier significantly in TI, and all phenological phases after wintering period were earlier more than 10 d. The duration of vegetative growth was increased, the duration from flowering to milky was prolonged, and the duration from milky to maturity was shortened in TI. In the relatively colder years, temperature increase could safeguard normal tiller and growth of winter wheat against low temperature, and TI could significantly increase plant height, produce more panicles (by 24.7% than CK), and enhance grain yield. In relatively warmer years, TI caused the duration of spike differentiation extend, kernels per panicle increase, and 1000-grain weight decreased owing to heat injury in the late period of grain filling and yield. Besides, the water consumption of wheat increased. For winter wheat in north China, a certain level of warming in the winter and early spring would be beneficial to wheat production, but if the temperature increased is too high it might lead to adverse results. The temperature increase in spring and early summer would be disadvantageous to wheat production.

Key words Impact of climate warming, FATI, Winter wheat, Controlled experiments

摘 要 为了探索和验证未来地表气温升高对中国冬小麦生产的影响,了解冬小麦生长发育和产量对增温响应的基本特征,在田间条件下采用红外辐射器增温的方法(FATI)对冬小麦全生育期进行昼夜增温处理,分析了增温对冬小麦生长发育和产量构成及其耗水量的影响。结果表明,全生育期增温使冬小麦返青期显著提前,冬后生育阶段整体前移 10 d 以上,全生育期天数减少,但营养生长期大幅增加,开花至乳熟时间延长,乳熟至成熟时间缩短;在偏冷年份,增温处理保障了小麦的正常分蘖和生长,株高显著提高,有效穗数比对照增加 27.4%,籽粒产量比对照大幅增加;在偏暖年份,增温导致小麦穗分化时间延长,穗粒数增加,灌浆中后期遭受高温危害,千粒重显著降低,产量下降;增温致使冬小麦生产耗水量增加。就华北冬小麦而言,冬季及早春一定幅度的升温有利于小麦生产,但增幅过大可能会导致不利结果;而春末夏初升温对小麦生产是不利的。

关键词 气候变暖影响,增温,冬小麦,试验研究

中图法分类号 P463.26

^{*} 资助课题:国家级科研院所基本科研业务费(2008Y005)、国家自然科学基金(41075085)、全球变化研究国家重大科学研究计划(2010CB951300)。

作者简介:谭凯炎,主要从事气候变化对农业影响研究。E-mail:tanky777@163.com
通讯作者:房世波,主要从事气候变化对农业影响研究。E-mail:dr.sbfang@163.com

1 引言

地球气候正在逐渐变暖,20 世纪全球地表年平均气温上升了 $0.56\sim0.92^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2007),预计在 21 世纪内仍可能升高 $1.4\sim5.8^{\circ}\text{C}$ 。地球气候变暖已对世界农作物生长发育和产量产生了明显的影响 (Bradley, et al, 1999; Chmielewski, et al, 2004; Tao, et al, 2006)。未来气候变暖对作物生产的可能影响,多采用模型分析方法进行评估和预测 (Brown, et al, 1997; 张宇等, 1998; Weiss, et al, 2003; Xiong, et al, 2007),相关试验研究则集中于 CO_2 、 O_3 浓度倍增的影响 (王春乙等, 1997, 2002; 郭嘉等, 2008)。虽然增温是气候变暖的基本表征,但针对增温影响的试验研究却不多,且以往开展的增温影响试验都是在封闭或半封闭式设施(开顶式气室)中进行 (Batts, et al, 1997; 郭建平等, 2002)。一般情况下,这些设施的增温与自然气候变暖的特征不同 (牛书丽等, 2007)。为了克服封闭式试验设施的不足,一种开放式增温系统 (Free air temperature increase-FATI) 逐渐被用于增温影响试验,多见于自然生态系统的研究 (Shaw, et al, 2002; Wan, et al, 2005),开放式增温系统在大田作物上的应用尚处于开始阶段 (田云录等, 2010)。

华北是中国冬小麦主产区,其种植面积和产量约占全国小麦产量的 $1/2$,华北也是中国气候变暖显著的地区之一。柳艳香等 (2007) 预测,到 2030 年华北地区冬季增温幅度相对于多年 (1961—1990 年) 平均达 2.5°C 左右; IPCC (2007) 指出,至 2070 年,华北地区的地表气温将升高 $2.5\sim2.8^{\circ}\text{C}$ 。冬小麦生长季恰好与增温最明显的季节重叠,气候变暖必然深刻影响未来华北地区的冬小麦生产。因此,开展增温试验研究有助于揭示气候变暖对该地区冬小麦生产影响的机理。此外,作物生长模型分析仍然存在较大的不确定性,其原因部分在于某些参数依据早期的试验数据,为了提高模型预测评估的可靠性,需要更加符合气候变化特征、更接近自然环境的模拟试验研究数据 (Long, et al, 2006)。目前,针对华北地区冬小麦在田间条件下的全生育期增温试验研究还未见报道。本试验运用田间开放式增温系统,首次对华北灌溉冬小麦进行全生育期模拟增温

处理,旨在探索未来气温进一步升高对该地区冬小麦生产的影响,并为作物模型评估预测提供实例验证。

2 材料与方法

2.1 试验地概况

试验是在中国气象科学研究院河北定兴固城生态与农业气象试验站 ($39^{\circ}08'\text{N}$, $115^{\circ}40'\text{E}$) 进行。该站位于华北山前平原灌溉农业地区,年均气温 11.7°C ,年均降水量 551.5 mm ,是中国冬小麦主要高产种植区之一,该地区主要农作物为冬小麦和夏玉米,土壤为典型褐土。

2.2 试验处理

试验是在试验站水分控制试验场进行的,设增温 (TI) 和对照 (CK) 两个处理,试验周期为 2008—2010 年两个冬小麦生长季。第 1 年每个处理设 3 个重复,第 2 年每个处理设 4 个重复,每个重复小区面积为 $2\text{ m}\times4\text{ m}$ 。增温装置为红外线辐射器,依据对华北地区温度变化的预测 (柳艳香等, 2007; IPCC, 2007) 设定日均温度增幅为 $2\sim2.5^{\circ}\text{C}$,通过前期预试验调试,在每个增温处理小区中轴上方距地面 2.3 m 高处一字悬挂 3 根带不锈钢反射罩的红外线灯管 (规格: 220 V , 500 W),其照射范围刚好覆盖小区冬小麦冠层,红外辐射器照射时间为每天 09—19 时,21 时—次日 07 时 (为了保证增温系统长期平稳运行且尽可能减小昼夜增温的影响,早晚各停机 2 h),增温处理自播种后开始,小麦成熟后结束。为了去除阴影的影响,在对照小区安装了同样大小和形状的不锈钢罩。在两处理上各装有一套地温 (20 cm 深) 和冠层气温自动观测传感器,自小麦拔节开始,冠层气温传感器定位于 $2/3$ 植株高度处,并随株高增长上移,全期连续观测,每分钟 1 次,由每分钟数据计算日平均值,再计算两处理日均温差。因冬小麦生育前期群体较小,增温效果主要表现在土壤温度的升高,冬小麦开始拔节后,形成覆盖地表的冠层,增温效果也表现在冠层气温差值上,增温处理与对照处理的温差结果见表 1。

2.3 试验管理与观测

试验冬小麦品种为超优 626,属半冬性品种,随着气候变暖,半冬性冬小麦品种已逐渐成为华北中

表1 升温处理的温度增幅(与对照处理的比较)

Table 1 The temperature elevation in temperature increase treatments as compared with the control ones								
冬小麦生长季	出苗至拔节前土壤(20 cm)		出苗至拔节前冠层		拔节至成熟土壤(20cm)		拔节至成熟冠层	
	日均温度增幅(℃)		日均气温增幅(℃)		日均温度增幅(℃)		日均气温增幅(℃)	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
2008—2009 年	3.74	0.58	/		2.08	0.44	2.34	0.72
2009—2010 年	4.11	0.77	/		1.60	0.48	2.18	0.48

北部地区主导冬麦品种类型。2008 年 10 月 10 日播种,2009 年 10 月 11 日播种,冬小麦生育期需水由 5 次灌溉提供,计 500 mm,各处理灌溉量相同,灌溉时间取相同发育期,其他管理措施一致。按照农业气象观测规范(国家气象局,1993)分小区进行发育期观测,每小区选定两行 1 m 长发育期观测区,并从其中选取 10 株测量株高。考种在每重复小区取样 1 m²,测取有效穗数、籽粒产量、总干物重和千粒重,从中选取 10 穗测定每穗粒数。土壤水分测

定采用烘干法,每处理取 3 个重复,观测深度 0—50 cm,每 10 cm 一层,每 15 d 一次。

2.4 试验期气候背景

表 2 给出了保定市气象站(距试验站约 40 km)冬小麦生长季各月多年(1961—1990 年)平均气温及本试验两个冬小麦生长季各月气温距平。2008—2009 年冬小麦生长季属于偏暖年型,而 2009—2010 年冬小麦生长季为偏冷年型,两个生长季平均温度相差 2.8℃。

表2 保定各月平均气温及试验期间平均气温距平(℃)

Table 2 The mean monthly temperature and its anomaly during experimental periods (℃)							
	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月
多年平均气温	5.0	-1.9	-3.9	-1.2	6.0	14.3	20.6
2008—2009 年距平	2.2	1.4	1.6	2.0	1.6	1.3	2.1
2009—2010 年距平	-3.3	-0.4	-0.7	0.1	-1.6	-3.1	1.8

3 结果分析

3.1 升温对冬小麦物候期的影响

试验表明,全生育期升温对冬小麦生长影响表现最明显的是物候期的变化(表 3),升温处理使两种年型冬小麦各物候期都不同程度提前,冬后生育阶段整体前移。其中,对返青期和拔节期的影响尤为显著,返青期提前超过 22 d,拔节期提前天数也超过 16 d,偏暖年升温处理的冬小麦在冬季几乎没有停止生长。冬后其他各物候期都相应提前,2 a 中全生育期天数分别缩短 10 和 14 d(成熟期比对照提前天数)。

升温处理还引起了各发育阶段持续时间的改变,如 2009 年拔节至孕穗增加 5 d,开花至乳熟时间延长 6 d,乳熟至成熟的时间缩短 6 d。2010 年的情形基本相同。从同一发育阶段的平均气温比较(图 1)可看出,在乳熟前,升温处理的平均冠层气温低于对照,其中孕穗以前表现明显,而乳熟后至成熟则稍高于对照。这表明,升温处理使冬小麦冬后恢复生长时间提前,造成冬小麦冬后营养生长期反而处于一个相对较低的温度环境,并导致营养生长期更长;而在灌浆中后期升温可能对冬小麦灌浆进程产生胁迫,出现高温逼熟现象。但由于升温处理使开始灌浆日期提前较多,所以对灌浆持续时间影响较小。

表3 升温对冬小麦物候期(日/月)的影响

Table 3 The effects of TI on phenological stages(day/month)										
		三叶	返青	起身	拔节	孕穗	抽穗	开花	乳熟	成熟
2008—2009 年	增温	31/10			16/3	5/4	12/4	23/4	18/5	30/5
	对照	3/11	1/3	14/3	1/4	16/4	26/4	3/5	22/5	9/6
2009—2010 年	增温	2/11	18/2	12/3	5/4	23/4	1/5	6/5	1/6	10/6
	对照	17/11	12/3	3/4	23/4	4/5	9/5	16/5	4/6	24/6

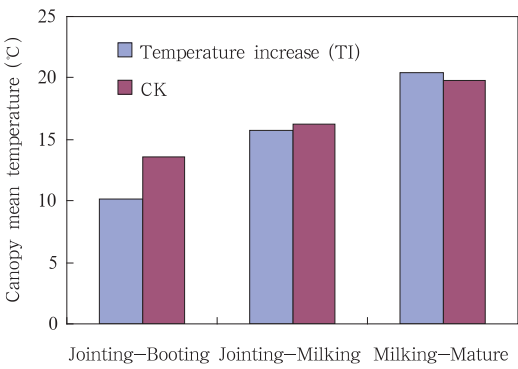


图1 2008—2009 年度冬小麦
不同阶段平均冠层气温比较
Fig.1 Mean air temperature
at the canopy in different
periods for 2008 - 2009

3.2 增温处理对冬小麦产量构成的影响

2008—2009 年冬小麦生长季内,各月平均气温较常年偏高 1.3—2.2℃(表 2)。从表 4 可看出,对照的冬小麦产量构成指标中有效穗数较多,千粒重比较正常,籽粒产量较高,表明该年生育期气象条件比较有利于冬小麦生长发育和产量形成。相比之下,增温处理的有效穗数有所减少,千粒重明显降低(32.91 g)。究其原因,有效穗数减少是因为增温处理小区冬前生长有些过旺,越冬期地上部分没有休眠枯萎,以至于到拔节期时,群体过密过稠,很多分蘖不能成穗,成为无效生长,还影响了后期群体的光环境,这从籽粒与总干物重的比值中亦可看出。而增温处理导致千粒重降低的原因之一是小麦在灌浆后期受到高温的危害。温度记录(略)显示,从 2009 年 5 月 18 日起连续数天中,11—15 时的增温处理冠层气温在 33—37℃,超过了小麦灌浆适宜气温的上限(龚绍先,1988),阻碍了光合产物的形成及向

籽粒的输送。至于穗粒数的多与少,可能主要是由于穗分化时间长短的差异造成的。北方冬小麦幼穗分化阶段与其返青至拔节期相应,本年度对照小区返青至拔节相隔 31 d(表 3),远短于春季偏冷的 2010 年对照小区的 42 d,其穗粒数(31.6 粒)较后者(42.5 粒)少很多。如 3.1 节中指出,与对照相比,增温处理使冬后营养生长期反而处于一个相对较低的温度环境,营养生长时间更长,同期进行的幼穗分化持续时间也就更长,因此增温处理的穗粒数(37.9 粒)比对照显著增多。

在 2009—2010 年小麦生长季内,冬前冬后气温均较多年平均偏低。小麦冬前生长量过小,没有分蘖,单茎越冬,且有部分死苗;而早春温度偏低,麦苗生长缓慢。因而对照小区植株矮小,有效穗数严重不足,籽粒产量明显偏低(表 4)。增温处理保障了小麦的正常生长和一定的分蘖,避免了越冬冻害,使有效穗数比对照增加 27.4%,这可能是导致籽粒产量比对照大幅增加的主要原因。另外,该年度增温处理与对照冬小麦从返青至起身间隔日数均为 22 d,返青至拔节日数只相差 4 d,表明同期进行的幼穗分化过程持续时间相差不大,有可能造成两者的穗粒数(分别为 41.4 粒和 42.5 粒)没有显著差异。同时,春季偏冷的气候年型本身有利于籽粒灌浆,因此对照小区的千粒重较高(44.12 g),在此背景下,2℃左右的增温处理没有构成明显的高温危害影响,其千粒重(42.98 g)与对照无显著差异。

综上所述,在两个相反的年型(偏暖和偏冷)里,增温处理的影响机制和结果完全不同,偏暖年型增温使穗粒数增加、千粒重下降、产量降低(约 9%),而偏冷年型增温显著提高了有效穗数及产量(约 23%)。

表 4 两种气候年型下增温对冬小麦产量构成和株高的影响

Table 4 The comparison of effects of TI on yield compositions and biomass between 2008 - 2009 and 2009 - 2010

		有效穗数(m ⁻²)		每穗粒数		千粒重(g)		籽粒产量(g/m ²)		株高(cm)		籽粒产量/总干物重	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
2008—2009 年	增温	663.0a	25.94	37.9a	1.51	32.91a	2.01	648.07a	45.16	81.1a	3.8	0.4151a	0.0263
	对照	684.7a	17.67	31.6b	1.99	41.78b	0.82	712.23b	36.09	77.9b	1.12	0.4718b	0.0223
2009—2010 年	增温	519.5b	14.62	41.4c	2.00	42.98b	2.00	655.59a	13.99	78.0b	1.46	0.5006c	0.0061
	对照	407.0c	19.13	42.5c	0.59	44.12b	3.02	530.69c	32.51	65.6c	2.04	0.5280d	0.0038

* 注同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

3.3 增温处理对冬小麦耗水量的影响

图2给出了2008—2009年冬小麦生育期增温处理与对照0—50 cm土层容积含水率的变化,增温处理使冬小麦耗水量增加,截至5月8日,在0—50 cm小麦根系主要分布层,增温处理累计比对照多耗水41.5 mm(50 cm $\times$ 8.3%),考虑到试验地区灌溉农田50 cm以下土层土壤湿度的时间变化很小(谭凯炎等,2010),可以用上述差值近似代表两者耗水量的总差异。从图中还可以看出,耗水量差异主要发生在冬后的营养生长阶段。该期间增温处理的冬小麦生长速度远快于对照,群体也较大,所以蒸腾耗水比对照多;而前期的蒸散受增温的影响较小。考虑到对照的物候期稍晚,后期对照的耗水量可能稍多于增温处理,两者全生产过程的耗水量差别可能比上述值小。该结果与刘晓英等(2004)对华北地区的模式计算结果相近。

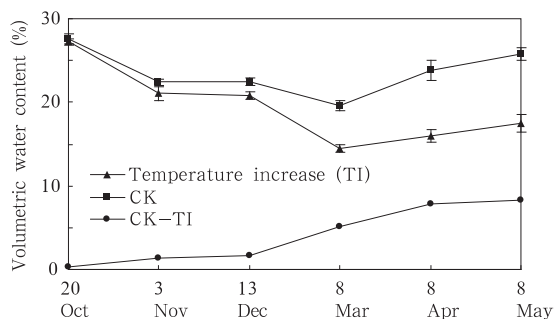


图2 2008—2009冬小麦生育期增温处理
对0—50 cm土层土壤含水量的影响
(CK-TI为对照与增温处理土壤容积含水率的差值)

Fig. 2 Effects of TI on the soil water content
in the soil profile of 0–50 cm

4 讨论

(1) 气候变暖对农作物生长最直接的影响是物候期的改变,不同季节对作物的影响有所不同。冬小麦跨年生长,越冬期持续较长,而冬季又是升温最显著的季节,因此,冬小麦的物候期受气候变化的影响很明显(车少静等,2005; Wang, et al, 2008)。一些模型研究(张宇等,2000; 张建平, 2006; Sadras, et al, 2006)认为,气温升高,促使冬小麦发育进程加快,生育期缩短,导致产量下降。本研究的田间模拟试验结果表明,除黄熟阶段增温可能导致高温逼熟,增温并没有加快其他发育进程。相反,增温使冬后

恢复生长日期提前很多,冬后营养生长期反而处于一个相对较低的温度环境,某些生育过程的持续时间反而延长。1981—2004年中国西北冬小麦物候期资料也表明,24 a的升温使冬后各物候期大幅提前,开花至乳熟持续时间延长了8 d(Wang, et al, 2008)。可见,关于气候变暖对农作物生育期的影响,应结合作物生育特点、生长季节以及该时段大气温度变化特征来分析。对于华北冬小麦而言,全生育期增温对小麦物候期的影响主要是导致越冬期缩短,冬后物候期前移,营养生长期增加,全生育期缩短。

(2) 关于气候变暖下的中国冬小麦生产,大多研究认为升温会导致产量下降(Xiong, et al, 2007; 张建平, 2006),但不同模型分析结果有较大的差异。针对水分适宜条件下温度升高3℃左右,模型分析有减产20%(居辉等, 2005)、与现在持平(田展等, 2006)和增产(杜瑞英等, 2006)等不同结论。可见,目前模型分析还存在较大的不确定性。先前开展的春季增温试验(房世波等, 2010)显示,增温促使冬小麦物候期提前,穗粒数和千粒重大幅减少而导致大幅度减产(26.6%)。显然,这反映了春季阶段性增温的可能影响结果。本研究的两个全生育期增温试验,遭遇两种相反的气候年型,得到了两种迥异的产量结果,比较全面地显示了升温的作用机制和效果。从两年试验结果来看,增温对冬小麦产量的影响机制主要在于:冬季及早春气温升高,改善了偏冷年的冬小麦越冬条件,减轻或消除冻害,利于小麦分蘖和生长,形成壮苗;冬小麦灌浆中后期气温的升高增加了偏暖年灌浆成熟期高温危害的几率和危害程度。如表2所示,保定站冬季多年月平均气温为-1℃—4℃,如果冬季升温2—3℃,月平均气温将接近或高于0℃,增温对越冬条件的改变非常显著,尤其对于偏冷的冬季,增温的有利作用更加明显。表2及表4表明,灌浆期平均温度较多年平均值稍偏高没有对千粒重造成很明显的影

极端高温是影响灌浆和千粒重的关键因素。

关于增温对穗粒数的影响,房世波(2010)的春季增温试验曾得出大幅减少穗粒数的结论,这是因为从春季开始增温提高了穗分化阶段的环境温度,缩短了穗分化时间的结果。而在本研究全生育期增温试验中,偏暖年增温使幼穗分化开始时间大幅提前,穗分化阶段温度较低,持续时间较长,对穗粒数的影响结果正好相反。而偏冷年温度偏低本身就有利于延长小麦穗分化持续时间,利于形成大穗,在此基础上的增温处理对穗分化时间和穗粒数的影响不明显,因此,处理和对照两者的穗粒数都较高,差异不大。论及增温对小麦穗分化的影响还应注意,对于弱冬性小麦品种,如果冬季增温幅度过大,可能导致冬前即开始穗分化,植株抗寒能力显著减弱,极易遭受冻害和霜害,因此,更大幅度增温的影响后果须另当别论。

综上所述,相对于多年平均值而言,冬季及早春一定幅度的增温有利于北方冬小麦生长,但增温值超过某个幅度可能会导致不利结果;而春末夏初增温对冬小麦产量形成是不利的,尤其增幅较大时可能造成严重减产。干旱和冻害是影响中国北方冬小麦产量的主要气象灾害,有灌溉条件的冬小麦产区的严重减产多因受冻害影响,黄淮地区冬小麦霜冻发生率为30%—40%(曾燕等,2002;李茂松等,2005)。因此推测,未来气候一定程度的变暖,会减少华北灌溉冬小麦遭受冻害的几率和受害程度,提高偏冷年份的产量,但小麦灌浆期遭遇高温危害的几率和程度也相应增大。

(3) 本试验仅研究了增温单因子的直接影响,未考虑气候变化对农业环境带来的其他改变(如CO₂、降水)和增温导致的间接影响(如病虫害等)。2 a 试验只是一个初步结果,为了更深入认识增温的影响及其机制,还有待深入研究。另外,试验数据表明本试验的增温效应与自然气候变暖还是有一定的差别。

5 结 论

全生育期增温使冬小麦返青期显著提前,冬后生育过程整体前移,生育期缩短。偏冷年增温有利于冬小麦分蘖生长,减轻或避免越冬和返青后可能出现的冻害危害,有利于提高有效穗数及产量;偏暖年增温引起小麦穗分化时间延长,穗粒数增加,但可

能导致灌浆中后期遭受高温危害,千粒重显著减小,产量下降。就华北冬小麦而言,冬季及早春一定幅度的增温有利于冬小麦生产,但增幅过大可能会导致不利结果;而春末夏初增温对小麦生产是不利的。此外,增温将使华北冬小麦生产的耗水量增加。

参考文献

- 车少静, 智利辉, 冯立辉. 2005. 气候变暖对石家庄冬小麦主要生育期的影响及对策. 中国农业气象, 26(3): 180-183
- 杜瑞英, 杨武德, 许吟隆等. 2006. 气候变化对我国干旱/半干旱区小麦生产影响的模拟研究. 生态科学, 25(1): 34-37
- 房世波, 谭凯炎, 任三学. 2010. 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, 43(15): 3251-3258
- 龚绍先. 1988. 粮食作物与气象. 北京: 北京农业大学出版社, 76-87
- 郭嘉, 张卫建, 卢其亮等. 2008. 大气 CO₂ 浓度倍增对稻田生态系统钙、镁、硅离子流失的潜在影响. 中国科学 C 辑: 生命科学, 38(6): 558-564
- 国家气象局. 1993. 农业气象观测规范. 北京: 气象出版社
- 郭建平, 高素华. 2002. 高温、高 CO₂ 对农作物影响的试验研究. 中国生态农业学报, 10(1): 17-20
- 居辉, 熊伟, 许吟隆等. 2005. 气候变化对我国小麦产量的影响. 作物学报, 31(10): 1340-1343
- 李茂松, 王道龙, 钟秀丽等. 2005. 冬小麦霜冻害研究现状与展望. 自然灾害学报, 14(4): 72-78
- 刘晓英, 林而达. 2004. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响. 水利学报, (2): 77-83
- 柳艳香, 吴统文, 郭裕福等. 2007. 华北地区未来 30 年气候变化趋势模拟研究. 气象学报, 65(1): 45-51
- 牛书丽, 韩兴国, 马克平等. 2007. 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, 31(2): 262-271
- 谭凯炎, 房世波, 任三学. 2010. 灌溉农田土壤湿度的时空变化特征. 中国农业气象, 31(3): 423-426
- 田云录, 郑建初, 张彬等. 2010. 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, 43(18): 3724-3731
- 田展, 刘纪远, 曹明奎. 2006. 气候变化对中国黄淮海农业区小麦生产影响模拟研究. 自然资源学报, 21(4): 598-607
- 王春乙, 潘亚茹, 白月明等. 1997. CO₂ 浓度倍增对中国主要作物影响的试验研究. 气象学报, 55(1): 86-94
- 王春乙, 郭建平, 白月明等. 2002. O₃ 浓度增加对冬小麦影响的试验研究. 气象学报, 60(2): 238-242
- 张建平, 赵艳霞, 王春乙等. 2006. 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, 17(7): 1179-1184
- 张宇, 王馥棠. 1998. 气候变暖对中国水稻生产可能影响的研究. 气象学报, 56(3): 369-375
- 张宇, 王石立, 王馥棠. 2000. 气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究. 应用气象学报, 11(3): 264-270
- 曾燕, 邱新法, 黄海智. 2002. 影响我国主要粮食作物产量的气象

因子研究. 气象, 28(9): 36-40

- Batts G R, Morison J K L, Ellis R H, et al. 1997. Effects of CO₂ and temperature on growth and yield of crops of winter wheat over four seasons. *Develop Crop Sci*, 25: 67-76
- Bradley N L, Leopold A C, Ross J, et al. 1999. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. *Proc Natl Acad Sci USA*, 96(17): 9701-9704
- Brown R A, Rosenberg N J. 1997. Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO₂ concentrations: A simulation study applying EPIC to the central USA. *Agri Forest Meteor*, 83(3-4): 171-203
- Chmielewski F M, Muller A, Bruns E. 2004. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000. *Agri Forest Meteor*, 121(1-2): 69-78
- IPCC. 2007. Climate Change. Synthesis Report: Summary for Policymakers. <http://www.ipcc.ch>.
- Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, et al. 2006. Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science*, 312(5782): 1918-1921
- Sadras V O, Monzon J P. 2006. Modelled wheat phenology captures rising temperature trends: Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina. *Field Crops Res*, 99(2-3): 136-146
- Shaw M R, Zavaleta E S, Chiariello N R, et al. 2002. Grassland responses to global environmental changes suppressed by elevated CO₂. *Science*, 298(5600): 1987-1990
- Tao F L, Yokozawa M, Xu Y L, et al. 2006. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. *Agri Forest Meteor*, 138(1-4): 82-92
- Wan S Q, Hui D F, Wallace L, et al. 2005. Direct and indirect effects of experimental warming on ecosystem carbon processes in a tallgrass prairie. *Global Biogeochem Cycles*, 19: GB2014, doi: 10.1029/2004GB002315
- Wang Y T, Gan R Y, Wang R Y, et al. 2008. Phenological trends in winter wheat and spring cotton in response to climate changes in northwest China. *Agri Forest Meteor*, 148(8-9): 1242-1251
- Weiss A, Hays C J, Won J. 2003. Assessing winter wheat responses to climate change scenarios: A simulation study in the U. S. great plains. *Climatic Change*, 58(1-2): 119-147
- Xiong W, Lin E D, Ju H, et al. 2007. Climate change and critical thresholds in China's food security. *Climatic Change*, 81(2): 205-221, 149(6-7): 1009-1014