



论文

气候变暖对冬小麦生长和产量影响的大田实验研究

房世波^{①*}, 谭凯炎^①, 任三学^①, 张新时^②

① 中国气象科学研究院生态环境与农业气象研究所, 北京 100081;

② 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

* E-mail: sbfang0110@163.com

收稿日期: 2011-10-28; 接受日期: 2012-02-21

国家重点基础研究发展计划(编号: 2010CB951300)和国家级科研院所基本科研业务费(编号: 2008Y005)资助

摘要 针对全球气候变暖主要表现为夜间最低气温升高的特点, 以冬小麦为研究对象, 利用红外辐射器模拟研究了冬小麦黄淮主产区大田条件下的夜间增温对冬小麦生长、产量及其构成的影响. 试验结果表明: 无论是偏冷年型还是偏暖年型, 试验区夜间增温 2~2.5℃并未导致冬小麦的产量下降, 而偏冷年较偏暖年的增温可更显著地提高冬小麦产量. 偏冷年的增温将促进小麦的分蘖, 有效穗数显著增加, 籽粒产量较对照大幅度增加(31%); 偏暖年的增温也显著促进了冬小麦有效穗数和穗粒数增加, 尽管使得千粒重显著降低, 但并未导致产量下降. 除越冬期外, 试验区夜间增温 2~2.5℃使冬小麦除了越冬开始期以外的各发育期有不同程度的提前, 越冬期大幅度缩短, 冬前生育期延长, 冬后各生育阶段有不同程度前移. 本试验仅分析了相对冷和相对暖的 2 种年型下, 夜间增温对试验区冬小麦的影响. 不能简单地将该结果外推到全球变暖对我国及其他冬麦区的影响, 而且由于未来作物品种、耕作方式和气候情景等都会发生变化, 多种因素的影响可能增大未来气候对冬小麦影响的不确定性. 建议在全球变暖背景下, 采取推迟播种等适宜措施适应夜间气温升高, 以确保冬小麦稳产高产.

关键词气候变化
夜间增温
冬小麦
产量
适应

地球气候正经历着一个逐渐变暖的过程. 研究指出, 1901~2000年和1906~2005年全球平均气温分别上升 0.6℃(0.4~0.8℃)和 0.74℃(0.56~0.92℃)^[1,2]. 全球气温升高存在非对称性增温特征, 即日最低温度升温速率远大于日最高温度升温速率^[3], 夜间最低气温上升的幅度是白天最高气温的增温幅度的 2~3 倍^[3,4]. 尽管非对称增温引起日较差减小的显著性仍存在争议^[5], 然而大气环流模式和 1950 年以来的气温观测均证实了这一特征^[1,2,6,7]. 政府间气候

变化专门委员会(IPCC)评估报告^[2]认为几乎在全球所有地方, 夜间增温大于白天增温导致日较差下降. 近 50 年来, 我国近地表气温的升高也表现为最低气温明显上升、日最低温升幅是日最高温升幅的 2~3 倍^[8].

野外自然条件下的生态系统增温实验是研究全球变暖与陆地生态系统关系的重要方法之一, 研究结果可为陆地生态系统结构与功能的动态模拟和验证提供关键的参数估计^[9,10]. 尽管增温试验往往限于

英文引用格式: Fang S B, Tan K Y, Ren S X, et al. Fields experiments in North China show no decrease in winter wheat yields with night temperature increased by 2.0–2.5°C. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55: 1021–1027, doi: 10.1007/s11430-012-4404-5

有限的试验品种和生态区, 试验代表性需要在更大尺度上的验证^[11], 不能简单地将结论推广到区域乃至全球变暖的影响, 但是通过田间试验可以定量分析和模拟气候变暖对作物的影响机理^[9,12], 温度是作物生长发育的关键气象要素, 增温必将对作物生长发育和产量产生影响. 关于气温升高对作物的影响研究大多基于平均温度变化^[9,13-15], 只有少数研究注意到了昼夜增温差异的影响^[16,17]. 为研究增温对作物的影响, 温室 (Greenhouse) 和开顶式气室 (Open-Top Chamber) 常被用于模拟气候变化或极端气候事件对作物生长的影响^[18-20], 然而这些封闭式或半封闭式装置内的作物与外界隔离, 内部光照、相对湿度、风速、病虫害状况等因素与野外仍有差异^[12,21], 且温室和开顶式气室的白天增温幅度远高于夜间增温幅度(最高气温增温可达 7.3℃)^[18,19,22], 与当前气候变暖的增温特征不符, 不能准确地反映当前气候变暖对作物的影响. 因此, 实验结果能否推演到大田仍需进一步的试验验证. 目前, 关于大田条件下夜间气温升高对作物生长影响的实验研究还未见报道, 从而制约着气候变暖对作物影响过程和机理的认识.

本研究试图以黄淮冬小麦为研究对象, 采用红外辐射器模拟大田开放式增温环境, 通过分析偏冷和偏暖 2 种年型的增温试验数据, 探讨夜间增温对冬小麦产量构成要素和生长发育过程的影响, 旨在揭示夜间增温对冬小麦产量影响的机理, 为制定农业应对气候变化措施提供依据. 可为大田条件下作物对未来气候变暖的响应的机理研究提供借鉴.

1 试验材料和方法

1.1 试验地概况

试验在中国气象局河北定兴固城农业气象实验站(39°08'N, 115°40'E)实施. 该地区年均气温 11.7℃, 年均降水量 551.5 mm, 属于中国冬小麦主产区黄淮海麦区, 主要农作物为冬小麦和夏玉米; 土壤为典型褐土.

试验期间, 研究区气象站各月的平均气温距平见表 1. 2008~2009 年小麦生长季是偏暖年(平均气温距平为 1.7℃), 2009~2010 年为偏冷年(平均气温距平为 -1.0℃).

1.2 试验处理

试验在大田开展, 采用红外线辐射器作为增温装置^[23,24]. 该装置是通过悬挂在样地上方的能发射红外线辐射的灯管来实现环境增温. 与温室和开顶式气室相比较, 该实验样地所处环境与野外条件基本一致. 试验设置夜间增温 (Higher Night Temperature, HNT) 和对照 (CK) 两个处理. 试验周期为 2008~2010 年冬小麦 2 个全生育期, 第一年每个处理设 5 个重复, 第二年每个处理设 4 个重复. 每个重复样地为 8 m² (2 m×4 m), 为防止增温处理对对照处理产生影响, 增温处理和对照之间设置 1 个隔离样区.

增温装置设置如下: 在增温处理样地的中轴上方距地面 2.3 m 高处一字悬挂 3 根配有不锈钢反射灯罩的红外线灯管(220 V, 500 W/根), 其照射范围刚好覆盖冬小麦冠层, 红外辐射器照射时间为每天 21:00 至次日 7:00. 增温处理自播种开始, 至小麦成熟后结束. 各处理样地内装有 1 套地温(20 cm)和冠层气温自动观测传感器, 每分钟 1 次连续观测气温和地温变化, 全生育期增温处理与对照的温差结果见表 2. 增温处理较对照夜间冠层附近气温增加 2.2~2.5℃, 冠层增温的标准差为 0.4~0.6℃. 土壤 20 cm 处夜间增温为 2.6~2.8℃.

1.3 试验管理和观测

试验选用当地普遍种植冬小麦品种“超优-626”, 属半冬性品种. 2008 年播种时间为 10 月 10 日, 2009 年播种时间为 10 月 11 日, 出苗后观测的播种密度为 495~510 株/m². 实验灌溉管理如下: 分别在冬小麦的播种、返青、拔节、孕穗和开花 5 个生育期(以对照生育期为准)对各小区进行人工灌溉, 每次灌溉量共计 100 mm 降水, 保证充分满足小麦生长用水; 种

表 1 试验期间研究区气象站平均气温距平

		11~5 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	
2008~2009	偏暖年型	平均气温距平	1.7	2.2	1.4	1.6	2.0	1.6	1.3	2.1
2009~2010	偏冷年型	平均气温距平	-1.0	-3.3	-0.4	-0.7	0.1	-1.6	-3.1	1.8

表2 增温处理的增温效果

	土壤 20 cm 处夜间 日均增温(°C)		冠层夜间日均气温增温(°C) (拔节至成熟)	
	均值	标准差	均值	标准差
2008~2009	2.64	0.46	2.48	0.61
2009~2010	2.85	0.39	2.22	0.71

肥和根外追肥的施肥量在试验的 2 冬小麦生育期的保持一致(表 3), 其他管理措施一致. 小麦发育期观测、产量构成要素测定参照《农业气象观测规范》^[25].

2 结果

2.1 增温对冬小麦产量及其产量构成的影响

2 年试验的考种数据表明(表 4), 夜间增温 2~2.5°C 对冬小麦产量的影响存在差异, 在偏暖年影响不显著, 偏冷年将显著提高产量(约 31%).

对产量构成分析表明, 偏暖年(2008~2009)夜间增温将使得有效穗数和穗粒数显著增加, 尽管千粒重显著减小, 但并未导致产量降低. 偏冷年(2009~2010)的冬前积温较常年减少, 有效穗数严重不足, 而夜间增温促进了冬小麦分蘖, 使得有效穗数较对照增加 24.4%, 但对穗粒数和千粒重影响不显著, 导致籽粒产量较对照大幅增加, 增幅达 31%.

2.2 增温对冬小麦有效茎数和发育期的影响

2.2.1 有效茎数

增温对进入越冬期前的冬小麦茎数和冬后返青

表3 试验过程中肥料施用情况

	肥料	施肥量(g/样区)
种肥(播种)	尿素 (N 40%)	200
	复合肥 (N22%, P10%, K16%)	400
根外追肥(拔节)	尿素(N 40%)	300

期的冬小麦茎数影响显著(表 5). 2008~2009 偏暖年, 夜间增温使冬前小麦茎数显著增加, 返青期茎数均值也较对照增加 6%以上, 因此夜间增温促进了冬小麦的分蘖数增加, 从而增加了总穗数和有效穗数, 从而并没有导致 2008~2009 暖年冬小麦产量的下降. 2009~2010 偏冷年, 热量条件的严重不足使得对照区小麦冬前茎数和返青期茎数较 2008~2009 暖年显著减少, 且返青期茎数较冬前减少, 这可能与 2010 年 2~3 月初的低温冷害有关, 而夜间增温促进了冬前和冬后的冬小麦茎数的增加, 返青期夜间增温使得冬小麦茎数较对照增加了近 1 倍(720 和 379 茎/m²). 因此, 研究区冷年夜间增温将显著促进冬小麦分蘖数增加, 从而增加有效穗数, 导致冬小麦产量的显著提高.

2.2.2 物候期

除越冬期延迟外, 夜间增温将促使冬小麦各发育期(物候期)不同程度的提前(表 6). 暖年(2008~2009)夜间增温将使得返青期提前 3 天, 拔节期提前 14 天, 孕穗期提前 8 天, 抽穗期提前 9 天, 而成熟期提前 7 天; 冷年(2009~2010)夜间增温将促使返青期提前 17 天, 拔节期提前 15 天, 孕穗期提前 7 天, 抽穗期提前 5 天, 而成熟期提前 11 天. 因此, 夜间增温将使除越冬期外的冬小麦各发育期有不同程度的前移.

在冷暖 2 种年型下, 夜间增温都将促使冬小麦越冬开始日期不同程度的推迟, 而越冬结束日期不同程度的提前. 暖年(2008~2009)夜间增温使越冬开始时间较对照推迟 8 天, 越冬期结束时间较对照提前 3 天, 整个越冬期缩短 11 天; 冷年(2009~2010)越冬开始时间较对照推迟 2 天, 越冬期结束时间较对照提前 17 天, 整个越冬期缩短 19 天, 即增温导致越冬期日数大幅度减少. 结合表 5, 冬小麦越冬开始时间推迟可以显著提高分蘖数和茎数, 偏暖年将导致无效分蘖增加, 对小麦增产不利, 而偏冷年分蘖数增加保证

表4 产量及产量构成差异分析^{a)}

		实际产量(g/m ²)	穗粒数(粒/10 穗)	有效穗数(穗/m ²)	无效穗数(穗/m ²)	千粒重(g)
2008~2009	对照 (CK)	716.53a [*]	323.67a	680.83a	13.33	41.66a
	夜间增温(HNT)	718.54a	369.40b	759.40b	21.20	34.76b
2009~2010	对照 (CK)	530.69a	425.00	406.75a	16.25	44.12
	夜间增温(HNT)	693.24b	409.25	505.00b	9.00	44.45

a) 同年同列不同小写字母表示本年度各处理间差异达显著水平($P < 0.05$), 下同

表 5 增温和对照的越冬期前和返青期的茎数

		冬前茎数 (茎/m ²)	返青期茎数 (茎/m ²)	有效穗数 (穗/m ²)
2008~2009	对照	1377.32a	1827.32	680.83a
	夜间增温	1702.80b	1940.80	759.40b
2009~2010	对照	477.00a	379.00a	406.75a
	夜间增温	550.00b	720.00b	505.00b

了有效穗数的增加,对冬小麦增产有益。暖年(2008~2009)小麦成熟期提前 7 天,即整个生育期缩短 7 天,而其越冬期缩短 11 天;在冷年型(2009~2010),小麦成熟期提前 11 天,即整个生育期缩短 11 天,而其越冬期缩短 19 天。可见增温导致生育期缩短主要是增温导致越冬期缩短造成的,除越冬期以外的各生育期(即活动积温下的各生育期)总天数并未减少,反而增加,这对小麦的生长有利。

增温对冬后各生育期周期的影响主要表现在(表 7),2008~2009 暖年型返青-孕穗(主要是营养生长期)增温处理较对照缩短 5 天,而孕穗-成熟(主要是生殖生长期)增温处理较对照延长 1 天;2009~2010 冷年型返青-孕穗期(主要是营养生长期)增温处理较对照延长 10 天,而孕穗期-成熟期(主要是生殖生长期)增温处理较对照缩短 4 天。暖年营养生长期缩短而生殖生长期延长,产量并未显著增加;冷年营养生长期延长而生殖生长期缩短,小麦增产。可见相对延长营养生长期可能对冬小麦增产有利。

3 讨论

3.1 小麦产量及其产量构成对增温的响应

3.1.1 小麦产量对增温的响应

气候变暖将增加农业生产的不稳定性,产量波动加大。而现有研究结果并不一致,且多数研究为统计和模型研究,Lobell 和 Field^[26]的统计得出,提高温度对小麦、玉米和大麦这些作物的全球产量有显著的

负面影响,而全球范围内的产量与日较差的相关分析得出,日最低温升高导致的日较差减少可以促使玉米和水稻产量增加^[7];CERES 模型研究认为,提高低温可能使玉米和小麦生长季缩短,从而使作物减产^[27],而另一统计研究得出最低气温升高可以提高作物收获指数,但对产量影响不大^[16]。这些研究结果的截然不同可能与温度对某些作物产量影响存在温度阈值有关,当温度高于关键温度后其产量会迅速下降^[28,29],所以最低温升高对产量和产量构成的影响需要进一步实验验证和机理分析。

本试验得出研究区最低气温升高缩短了冬小麦生育期,而并未缩短冬小麦活动生育期(即活动积温下的各生育期),2 年的试验得出,无论冷年还是暖年增温 2~2.5℃左右,并未导致冬小麦产量降低,冬小麦对气候变暖的适应性在研究区可以缓解 2~2.5℃左右的增温。这一结论与 CERES 模型也得出的我国北方小麦在未来气候变暖的 A2 和 B2 排放情景下(注:2000 年 IPCC 第三次评估报告制定的未来排放情景下的世界发展模式,A2 为人口持续增长,新技术发展缓慢,注重区域性合作情景;B2 为人口以略低 A2 的速度增长,注重区域生态改善)(无 CO₂ 效应)都有增产趋势相一致^[30],同时,澳大利亚 40 多年的产量和温度统计分析也得出日最低温的升高对小麦产量的增加至少有 30%~50%的贡献^[31],增温 2.5℃以下对我国小麦产量不构成影响^[32]。这些统计和模型研究结果与本研究区大田试验的结果相吻合。当然也有不少研究得出平均气温升高将对全球及其我国的冬小麦产量产生负面影响^[26,27,33]。这可能与研究方法、研究参数以及气候情境设置的不同有关^[7],且不同冬小麦的春化类型和光周期是对当地气候长期适应的结果,增温对不同气候区域冬小麦产量的影响需要进一步试验验证,所以不能简单地将本试验结果外推到全球变暖对我国及其他冬麦区的影响。另外,尽管长时间气温变化主要表现为夜间增温(最低气增幅是最高

表 6 增温对冬小麦物候期的影响

		三叶	分蘖	越冬	返青	拔节	孕穗	抽穗	成熟
2008~2009	对照生育期(日/月)	3/11	8/11	7/12	1/3	1/4	16/4	26/4	9/6
	夜间增温生育期(日/月)	1/11	6/11	15/12	26/2	18/3	8/4	17/4	2/6
2009~2010	对照生育期(日/月)	17/11	未分蘖	5/12	12/3	23/4	4/5	9/5	24/6
	夜间增温生育期(日/月)	9/11	11/11	7/12	23/2	7/4	27/4	4/5	13/6

表7 增温对冬小麦不同生育期周期的影响

		播种-越冬(冬前生育期)(d)	越冬期(d)	返青-孕穗(d)	孕穗-成熟(d)	冬后生育期(d)
2008~2009	对照	58	84	46	54	100
	夜间增温	66	73	41	55	96
2009~2010	对照	55	97	53	51	104
	夜间增温	57	78	63	47	110

气温的 2~3 倍)^[3,4], 然日最高气温也呈增加趋势^[5], 本文并未考虑白天增温和全天增温对冬小麦产量的影响, 有待今后进一步深入研究.

3.1.2 小麦产量构成对增温的响应

在暖年型, 由于增温导致有效穗数和穗粒数的显著增加, 尽管增温同时也导致千粒重显著下降, 但正负效应抵消, 并未导致冬小麦产量下降; 在冷年型, 由于增温促使小麦有效穗数显著增加, 而穗粒数和千粒重未因为增温而发生显著变化, 所以产量显著提高(31%). 以往的观测研究和作物模型研究多认为增温尤其是小麦越冬前增温可以增加小麦分蘖数, 导致无效分蘖和无效穗数增加, 本实验结果显示, 无论冷年增温还是暖年增温并未导致无效穗数增加, 而显著提高了有效穗数, 这可能更增温幅度或增温阈值有关; 同时本实验得出暖年夜间增温可以显著提高穗粒数, 而国内外未见增温对穗粒影响的研究报道. 本试验 2008~2009 暖年增温对产量构成的影响与另一春季增温对冬小麦产量构成影响的试验结果基本一致^[24], 但是仅在春季增温不能增加分蘖数和有效穗数, 而春季增温同样导致千粒重显著下降, 所以仅春季增温可导致小麦产量降低^[24], 北半球和我国范围内的未来气候变暖趋势表明, 气候变暖冬季增温幅度在一年中最大, 其次是春季^[4,6], 所以结合本研究可以认为由于冬天和春天增温 2~2.5°C 能增加黄淮冬麦区的冬小麦有效穗数和穗粒数, 同时可能导致千粒重减少, 但正负效应在产量计算时抵消, 即未必对冬小麦产量造成影响.

3.2 冬小麦物候对增温的响应

通过物候观测发现在亚洲、欧洲、澳大利亚和北美等都有作物物候提前和生长季延长的报道. 在过去 80 年中, 欧洲春季平均每年提前 0.2 d, 而秋季的来临时间平均每年推迟 0.15 d^[34]; 美国大平原的冬小麦花期有持续提前的趋势, 研究认为春天日最低温升高起了关键作用^[35]. 我国区域尺度的研究得出植

被“返青”有提前趋势, 这与春季低温增加有关^[36,37], 我国北方冬小麦越冬期缩短和春天发育期普遍提前与春季增温密切相关^[24,33,38]. 本文得出夜间增温导致冬小麦物候期提前, 越冬开始日推迟, 越冬期缩短, 实验证实了日最低温升高对冬小麦物候影响的重要性, 即若不考虑品种和播种期的变化, 未来夜间增温将可能使小麦发育加快生育期缩短. 尽管除了越冬开始日外, 增温促使小麦各个物候期都有不同程度的提前, 冬前生育期(播种-越冬开始期)因为增温而延长, 这对冬前分蘖数增加有益, 当然, 包括本试验在内很多研究表明气候变暖容易造成冬小麦冬前旺长而过多分蘖对产量不利(尽管本试验暖年增温并未造成小麦减产)^[39], 而很多研究也证实推迟播种是缓解气候变暖造成冬前分蘖过多的适应气候变暖的重要措施^[40,41]. 本试验得出冷年增温使研究区冬小麦营养生长期相对延长而暖年增温使冬小麦营养生长期相对缩短, CERES 模型研究也得出冬小麦更长的生长周期对其增产有益^[26].

3.3 气候变暖对冬小麦生长影响的不确定性

气候变化对作物影响的研究是一项难度很大的探索性工作. 本研究所取得的成果只是初步性的, 在某些方面尚具有一定的不确定性(如单点试验的代表性、适应措施的作用、CO₂ 的肥效作用, 以及无法考虑未来耕作方式、品种更新和未来气候情景的多变性等因素), 有待进一步的深入和提高. 首先, 田间试验具有时间与空间上的局限性^[9,12], 气温的年内和年际变化比较明显, 试验的代表性需要更长时间尺度上的检验, 同时, 不同春化类型的冬小麦对气温变化的响应可能不同, 单一区域的试验只能在一定程度上反映增温对作物的影响, 所以不能简单地将本试验的结果外推到全球变暖对我国及其他冬麦区的影响, 需进一步开展更长时间更多区域的实验研究和作物模型模拟研究; 其次, 未来的气候情景(CO₂ 浓度和增温幅度等)存在很多的不确定性, 且未来的作物品

种和耕作方式等都会发生变化, 而本试验是建立在假设未来农业生产状况与现有农业生产状况一致的前提下, 即未来耕作方式、品种选择、种质资源等这些影响单产的因素变化在当前试验条件下无法考虑; 另外, 作物对气温的升高的响应存在非线性特征, 即当气温高于作物的关键温度后其产量会迅速下降^[28], 所以摸清冬小麦对气温升高的响应规律需要进一步的深入的多增温梯度的长期观测和模拟研究; 最后, 趋多趋强的极端气候事件必然造成气候年型的多样化^[42,43], 尽管长时间序列的气温变化表现主要表现为夜间增温, 然日最高气温也有增加趋势^[5], 即白天气温也有增加趋势, 白天增温对作物的影响有待于今后进一步深入的研究. 所以冬小麦生长和产量对增温的响应仍然存在着多种因素可能引起的不确定性.

4 结论

(1) 大田试验证明夜间增温 2~2.5℃并未导致研究区冬小麦产量下降. 即夜间增温 2~2.5℃, 在偏暖

年型时并未导致试验区产量下降, 而偏冷年型时能显著提高试验区冬小麦产量.

(2) 究其原因是夜间增温促使冬小麦越冬前生长期延长, 分蘖数增加, 有效穗数显著增加. 暖年增温尽管导致冬小麦千粒重显著下降, 然而由于增温促使有效穗数和穗粒数显著增加, 其产量并未下降; 冷年增温促使分蘖数和有效穗数显著增加, 而千粒重并未因为增温而下降, 所以增温促使产量增加. 增温通过对生长发育过程的影响从而影响冬小麦的产量及其构成, 冬前相对高温和相对长的生长期促使分蘖数增加, 而一定数量有效穗数不会改变千粒重而提高小麦产量(冷年增温), 但若分蘖数和有效穗数大幅度增加, 导致千粒重下降, 将对增产不利(暖年增温).

(3) 本研究基于2年的试验数据分析了夜间增温对当地冬小麦的影响, 然而由于未来的增温幅度、作物品种和耕作方式等都存在很大的不确定性, 所以冬小麦生长和产量对夜间增温的响应仍然存在着多种因素可能引起的不确定性, 还需要进一步的深入研究.

致谢 诚挚感谢审稿专家对论文提出的建设性修改意见. 衷心感谢试验开展地“中国气象局河北定兴固城农业气象实验站”的全体工作人员. 衷心感谢中国科学院植物研究所的周广胜研究员对论文修改的指导.

参考文献

- 1 Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge-New York: Cambridge University Press, 2007
- 2 Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge-New York: Cambridge University Press, 2001
- 3 Karl T R, Jones P D, Knight R W, et al. A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1993, 74: 1007–1023
- 4 Easterling D R, Peterson T C, Karl T R. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 1997, 277: 364–367
- 5 Vose R S, Easterling D R, Gleason B. Maximum and minimum temperature trends for the globe: An update through 2004. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L23822, doi: 10.1029/2005GL024379
- 6 Zhou L M, Dickinson R E, Dirmeyer P, et al. Spatiotemporal patterns of changes in maximum and minimum temperatures in multi-model simulations. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L02702, doi: 10.1029/2008GL036141
- 7 Lobell D B. Changes in diurnal temperature range and national cereal yields. *Agric For Meteorol*, 2007, 45: 229–238
- 8 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展. *气候与环境研究*, 2005, 10: 701–716
- 9 Wolf J, van Oijen M, Kempenaar C. Analysis of the experimental variability in wheat responses to elevated CO₂ and temperature. *Agric Ecosyst Environ*, 2002, 93: 227–247
- 10 Shen K P, Harte J. Ecosystem climate manipulations. In: Sala O E, Jackson R B, Mooney H A, et al, eds. *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer, 2000. 270–369
- 11 Leakey A D B, Ainsworth E A, Bernacchi C J, et al. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: Six important lessons from FACE. *J Exp Bot*, 2009, 60: 2859–2876

- 12 Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, et al. Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentration. *Science*, 2006, 312: 1918–1921
- 13 Baigorria G A, Jones J W, O'Brien J J. Potential predictability of crop yield using an ensemble climate forecast by a regional circulation model. *Agric For Meteorol*, 2008, 14: 1353–1361
- 14 刘颖杰, 林而达. 气候变暖对中国不同地区农业的影响. *气候变化研究进展*, 2007, 3: 229–233
- 15 居辉, 熊伟, 许吟隆, 等. 气候变化对我国小麦产量的影响. *作物学报*, 2005, 31: 1340–1343
- 16 Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I. Impacts of day versus night temperatures on spring wheat yields: A comparison of empirical and cereals model predictions in three locations. *Agron J*, 2007, 99: 469–477
- 17 Peng S B, Jianliang H, Sheehy J E. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2004, 101: 9971–9975
- 18 Norby R J, Edwards N T, Riggs J S, et al. Temperature controlled open-top chambers for global change research. *Glob Change Biol*, 1997, 3: 259–267
- 19 Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Dynamic and complex micro-climate responses to warming and grazing manipulations. *Glob Change Biol*, 2005, 11: 1440–1451.
- 20 郭建平, 高素华. 高温, 高 CO₂ 对农作物影响的试验研究. *中国生态农业学报*, 2002, 10: 17–20
- 21 Kennedy A D. Simulated climate change: Are passive greenhouses a valid microcosm for testing the biological effects of environmental perturbations? *Glob Change Biol*, 1995, 1: 29–42
- 22 房世波, 沈斌, 谭凯炎, 等. 大气 CO₂ 和温度升高对农作物生理及生产的影响. *中国生态农业学报*, 2010, 18: 1116–1124
- 23 Wan S Q, Xia J Y, Liu W X, et al. Photosynthetic overcompensation under nocturnal warming enhances grassland carbon sequestration. *Ecology*, 2009, 90: 2700–2710
- 24 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试验研究. *中国农业科学*, 2010, 43: 3251–3258
- 25 国家气象局. 农业气象观测规范. 北京: 气象出版社, 1993
- 26 Lobell D B, Field C B. Global scale climate—Crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environ Res Lett*, 2007, doi: 10.1088/1748-9326/2/1/014002
- 27 Wilkens P, Singh U. A code-level analysis for temperature effects in the CERES models. In: White J, ed. *Modeling Temperature Response in Wheat and Maize*. El Batan: CIMMYT, 2001. 1–7
- 28 Sclenker W, Roberts M J. Nonlinear effect of weather on corn yields. *Rev Agr Econ*, 2006, 28: 391–398
- 29 Bannayan M, Hoogenboom G, Crout N M J. Photothermal impact on maize performance: A simulation approach. *Ecol Model*, 2004, 180: 277–290
- 30 杜瑞英, 杨武德, 许吟隆, 等. 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*, 2006, 25: 34–37
- 31 Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature*, 1997, 387: 484–485
- 32 田展, 徐新良, 史军. 气候变化对甘肃定西、安徽合肥小麦生产影响研究. *地理科学进展*, 2006, 25: 88–95
- 33 张宇, 王石立, 王馥棠. 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*, 2000, 11: 264–270
- 34 Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397: 659
- 35 Hu Q, Weiss A, Feng S, et al. Earlier winter wheat heading dates and warmer spring in the U.S. Great Plains. *Agric For Meteorol*, 2005, 135: 284–290
- 36 朱文泉, 潘耀忠, 阳小琼, 等. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析. *科学通报*, 2007, 52: 2535–2541
- 37 钱拴, 伏洋, Pan F F. 三江源地区生长季气候变化趋势及草地植被响应. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40: 1439–1445
- 38 郭海英, 赵建萍, 索安宁, 等. 陇东黄土高原农业物候对全球气候变化的响应. *自然资源学报*, 2006, 21: 608–614
- 39 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社. 2007
- 40 邓振镛, 张强, 蒲金涌, 等. 气候变暖对中国西北地区农作物种植的影响. *生态学报*, 2008, 28: 3760–3768
- 41 郭海英, 万信, 杨兴国, 等. 冬小麦冬前旺长及资源损耗现象分析. *土壤通报*, 2008, 39: 1252–1255
- 42 Tebaldi C, Hayhoe K, Arblaster J, et al. Going to the extremes—An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Clim Change*, 2006, 79: 185–211
- 43 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述. *地球科学进展*, 2007, 22: 673–684