

非对称性增温对农业生态系统影响研究进展^{*}

谭凯炎¹⁾ 房世波¹⁾ 任三学¹⁾ 张新时²⁾

¹⁾(中国气象科学研究院,北京 100081) ²⁾(中国科学院植物研究所,北京 100093)

摘 要

该文概述了北半球和我国气候变暖中增温的非对称性特征:北半球气候变暖存在明显的季节差异和昼夜不同步性,大部分地区冬、春季升温高于夏、秋季,日最低气温升幅是日最高气温升幅的 2~3 倍;近 50 年我国近地表气温升高主要是最低气温明显上升的结果,日最低气温升幅是日最高气温升幅的 2~3 倍,与北半球基本一致;升温最显著的季节为冬季和春季。在此基础上概述了非对称性增温对农业生态系统的影响,论述了非对称性增温对农作物物候和农作物产量的影响,得出最低气温升高促使整个生长季延长,促使早春作物物候期提前,但最低气温和最高气温对不同作物的物候以及同一作物的不同发育阶段影响不同。现有研究多采用模型或统计的方法研究气候变暖对作物生长的影响,认为温度升高对作物有“强迫成熟”效应;而现有的最低气温升高和最高气温升高对作物生长影响的研究结果并不一致。非对称性增温对农作物影响的实验研究极少,且缺乏对模型模拟结果的实验验证。

关键词: 非对称性增温; 气候变暖; 农业生态系统; 增温实验

引 言

IPCC 第 4 次评估报告综合了全世界科学家 6 年来的科学研究成果,最新、更多、更强的证据表明,气候系统的变暖已经是不争的事实^[1]。IPCC 第 3 次评估报告提出全球变暖背景下温度的变化有 3 种情形:① 夜间增温幅度大于白天,导致温度日较差减小;② 冬季增温幅度大于夏季;③ 高纬度地区增温幅度大于低纬度地区^[2]。IPCC 第 4 次评估报告进一步分析了昼夜温度中极端温度的变化,认为冷昼、冷夜和霜冻的发生频率减小,而热昼、热夜的发生频率增加^[1]。最低气温升高比最高气温升高得快,冬季的升温速率远大于夏季的升温速率,即升温存在非对称性(asymmetric trends)。

1 国内外非对称性增温研究

1.1 国外对北半球非对称性增温的研究

1993 年,美国国家气候数据中心的 Karl 等通过

对 1951—1990 年的全球陆地气温研究得出,北半球大部分陆地最低气温上升的幅度是最高气温的 3 倍,40 年来夜间平均增温 0.84 °C,而白天平均增温仅 0.28 °C,且在所有陆地和所有季节都有这种趋势^[3]。1997 年美国国家气候数据中心的 Easterling 等^[4]进一步证实了气候变暖中最低气温增幅和最高气温增幅的非对称性,并且认为升温在季节分布上也具有非对称性,这种不对称性造成气温日较差的变小,各研究结果整理见表 1。从表 1 可以看出:北半球大部分陆地最低气温上升的幅度是最高气温的 2~3 倍,在所有陆地和所有季节看来都有这种趋势,且各季节增温幅度也存在非对称性,冬、春季的升温速率远大于夏、秋季的升温速率。其他地方的观测研究也得到相似结论,欧洲地中海地区最低气温的升高速率远远高于最高气温,导致日较差降低,这可能是云覆盖提高和降水增加,或对流层气溶胶增加造成的^[4-6];研究得出澳大利亚 1961—1990 年平均最低气温提高 0.80 °C,冬天温度提高 2.36 °C^[7];非洲尼日利亚的最低气温 1961—1991 年升高 1.5 °C,相对湿度降低,这可能是由于温度升

* 中国气象科学研究院基本科研业务费(2008Y005)、国家自然科学基金项目(30700107)和中加国际科技合作项目(2009DFA91900)共同资助。

2008-11-10 收到,2009-07-23 收到再改稿。

高而蒸汽压不变造成的^[8];美国北卡罗来纳州最高气温和最低气温的升高趋势与其他研究相似,也是最高气温和最低气温增幅不一致^[9]。

表 1 北半球近 50 年平均最高、最低气温变化速率(单位:°C/100 a)

Table 1 Changing trends of maximum and minimum temperature variation in the Northern Hemisphere during the past 50 years (unit:°C/100 a)

	最高气温	最低气温	日较差
冬季	1.26	2.74	2.44
春季	1.39	2.28	0.90
夏季	0.25*	1.05	0.79
秋季	0.12*	0.72*	0.84
年平均	0.77	1.74	0.89

注:*表示未通过 0.05 的显著性检验(双尾 t 检验)。

1.2 国内关于非对称性增温的研究

翟盘茂等认为全国平均的年最高气温在过去 40 年(1951—1990 年)中虽略有增高,但在统计上不具有显著性意义;最低气温具有显著增高趋势,因而表现出显著的日较差变小趋势;我国最低、最高气温变化线性趋势表现出非常明显的不同步性^[10],而 Zhai 等进一步研究证实,由于最低气温和最高气温的变化趋势不同,我国极端冷昼和冷夜出现的频率显著减少^[11]。马晓波研究了我国西北地区最高、最低气温的非同步变化,认为:与华北和我国东部相比,西北地区非对称性幅度更大^[12]。王菱等认为我国北方地区近 50 年来最高和最低气温的变化特点是:最低气温升温速率大于最高气温的升温速率;冬季升温速率大于夏季;高纬度地区的升温速率大于低纬度地区^[13]。王石立等研究认为东北气候变暖主要表现在冬季,最低气温升高幅度远大于最高气温的升高幅度^[14]。任国玉等总结了“十五”攻关课题有关我国温度变化的研究,表明:我国现代增暖最明显的地区包括东北、华北、西北和青藏高原北部,最显著的季节在冬季和春季;根据已有全国尺度的温度研究^[10,15],总结如表 2 所示。由表 2 可以看出:近 50 年我国近地面气候变暖主要是平均最低气温明显上升的结果,全国范围内极端最低气温显著升高,而极端最高气温升高不多,我国冬、春季升温高于夏、秋季,日最低气温升幅是日最高气温升幅的 2~3 倍。为了反映这种温度差异,有学者采用最高和最低气温求算平均气温序列^[16]。气候变化国家评估报告得出我国平均增温速率明显高于全球或北半球同期平均增温速率,增温主要发生在

冬季和春季^[17]。所以,可以认为气候变暖存在明显的季节差异和昼夜不同步性。

表 2 中国近 50 年和季节平均最高、最低气温变化幅度速率(单位:°C/10 a)

Table 2 Changing trends of maximum and minimum temperature variation in China during the past 50 years (unit:°C/10 a)

	最高气温	最低气温	日较差
春季	0.10	0.28	0.18
夏季	0.03	0.15	0.13
秋季	0.09	0.22	0.13
冬季	0.25	0.49	0.23
年平均	0.12	0.28	0.17

全球温度不断升高,对农业生态系统产生了影响,国内外学者对此进行了许多研究,但大部分只限于平均温度的变化研究,对农业生态系统来说,最高和最低气温的变化对作物生理活动有重要作用,因为夜间最低气温对作物的呼吸作用、干物质的积累等影响很大;春季低温对作物的物候会产生影响,而日最高气温对于作物的光合作用正常机能的控制等方面非常重要。昼夜温度对作物的生理效应不同,作物对昼夜不同增温的响应也将存在差异。

2 非对称性增温对作物物候的影响

2.1 最低气温升高对作物物候的影响

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^[18]。由于生长季延长,低温升高,作物受霜冻冷害机率降低,春天可以提前播种^[19]。美国大平原的冬小麦物候研究表明,小麦花期有持续提前的趋势,平均为 0.8~1.8 d/10 a,进一步分析认为春天日最低气温的升高起关键作用^[20]。中国气候变化国家评估报告总结认为气候变化导致我国农业生产的不稳定性增加,局部春季霜冻的危害因气候变暖、发育期提前而加大^[17]。Schwartz 等用一个简单的日最低气温和最高气温数据研究了 1959—1993 年中国东北的物候,得出春季的终霜日已经提前了 6 d,而秋季的初霜日推迟了 4 d,在中国北部地区表现明显,这与日较差缩短和春、秋两季的温度变化有关^[21];叶殿秀等也得出全国平均无霜冻期自 20 世纪 80 年代起明显延长^[22]。IPCC 第 2 工作组的第 4 次评估报告得出春

季的物候现象(植物和动物)出现时间提前,大尺度的研究得出植被“返青”有提前的趋势,这都与最近变暖造成的生长季延长有关联^[1]。

2.2 最高和最低气温对各作物物候影响的差异

关于果树的研究进一步证实温度对果树物候起关键作用:苹果和桃的停止生长和诱导冬眠并不受光周期影响,证实这两个过程始终受低于 12℃ 低温影响,而与光周期无关^[23]。温度对作物影响在不同生长阶段表现不同,早花植物对低温升高敏感而晚花植物对高温升温敏感^[24],导致缩短某些生育期或延长某些生育期,对于冬小麦来说,从分蘖到拔节期,灌浆到成熟期,随着温度升高而缩短,然而拔节到开花、开花到灌浆期随着温度升高而延长。而敦煌的棉花,升温缩短了出苗到吐絮的时间,却延长了吐絮到停止生长的时间。这表示气候变化对物候期的影响有不同的表现形式。增温使玉米拔节期以前的营养生长阶段缩短,抽雄—乳熟期的生殖生长阶段延长,乳熟—成熟期的生殖生长阶段缩短;西北干旱区作物玉米对变暖响应的这种特点可能与绿洲的气候特点、作物的生理特性及增温的季节差异有关,而其响应的生物学机制可能与气候变暖使自然植被秋季生长季延长的生物学机制不同^[25]。

用 APSIM 模型模拟东澳大利亚的小麦和用 CERES-Wheat 模型模拟南美潘帕斯草原小麦的物候,发现随着气候变暖小麦生长季缩短,引起花期的相对改变和种植期的改变。模型模拟得到从播种到收获平均减少 0.3 d/a。模型可以检测出速率为 0.02℃/a 引起的花期和生长季的缩短,与长期观测结果相吻合,约为 7 d/℃^[26]。

3 非对称性增温对作物产量的影响

3.1 最高气温和最低气温变化对作物的影响

最低气温与最高气温增温的不同步性造成日较差变化。全球范围内的产量与日较差的相关分析得出,日较差减少可以导致玉米和水稻产量增加,从而提高印度的水稻产量^[27];墨西哥的研究通过统计和机理分析表明:墨西哥西北部各州的小麦产量提高与小麦生长期夜间温度降低有关^[28],在全球范围内,降雨和温度的变化对产量有大约 30% 的影响,对于小麦、玉米和大麦,提高温度对这些作物的全球产量有显著的负面影响^[29]。然而,从历史产量数据与气候因子关系和模型模拟两个角度分析最高气温

和最低气温对作物产量的影响,历史产量数据与气候因子统计分析结果并不统一:历史数据分析得出最高气温和最低气温对产量的影响效果相同,而 CERES 模型则得出最高气温升高是最低气温升高对产量影响效应的 3 倍。这需要进行进一步研究作物对温度响应机制^[30]。

3.2 模型模拟和统计研究中非对称性增温对作物的影响

作物模型已经被广泛应用于研究气候变化对农业生产和粮食安全的影响,从模型研究来看,是日最高气温升高还是日最低气温升高对作物生长的影响大,现有研究结果并不一致。对于玉米和小麦,对 CERES 模型研究认为,由于灌浆速率对低温的敏感性高于高温,所以降低低温可以使作物有更长的生长周期,可以在更低的夜间温度上有更高的产量^[31],而提高低温可能使生长季缩短,从而使作物减产。另有学者用 CERES 模型模拟则认为统计方法得到的最低气温升高对产量影响的重要性,可能是来自于最低气温升高与日平均气温升高和太阳辐射的共变效应造成的,而不是最低气温升高对产量的直接影响,模型模拟认为最高气温对产量的影响是最低气温的 3 倍,最低气温的升高可以提高作物收获指数^[30]。而从 1952—1992 年的观测数据得出,澳大利亚日最低气温呈升高趋势,日较差呈减小趋势,统计分析得出这种日较差的变化对该时期产量的增加至少有 50% 的贡献,主要原因是日最低气温升高可以减少霜冻灾害而提高作物产量^[32],意大利关于春小麦的研究也认为在夜间温度提高的基础上,作物受最后霜冻破坏的概率减少了,在春天可以更加安全地播种^[19,33]。用 EPIC 作物模型得出,日较差提高可能导致蒸发增加而产生干旱胁迫从而使玉米产量下降,可能白天温度的提高比夜间温度提高对作物影响更大^[34]。然而 Peng 等得出日较差对作物产量有重要影响,认为日最低气温每提高 1℃,水稻产量减少 10%,而日最高气温作用并不显著^[35],小麦发育的最适温度低于玉米和水稻,在多数区域,日最高气温经常超出最适温度,所以日最高气温的改变较夜间最低气温的改变对作物的影响相对较小。而我国的研究得出:冬小麦和棉花的营养生长期主要受低温的影响,而生殖生长和作物产量受高温、低温的共同影响,其中高温的作用更强,高温升高或极端高温在灌浆期对小麦有“强迫成熟”效应,导致产量降低,这种现象在我国西北半干旱区

很常见^[25]。

3.3 温度对作物产量的影响

最新研究认为温度对谷物产量影响是非线性的,当温度高于关键温度后其产量会迅速下降,在 B1 情景(全球可持续发展情景)、A1FI 情景(高化石能源消费情景)下均认为提前播种可以在某些程度上减轻作物减产,然而需进一步精细的模型研究,以便精确确定作物播种时间,从而适应气候变化^[36]。有研究用 CERES-maize 模型研究了不同玉米品种对温度的响应,任何玉米品种在最高气温达到 35 °C 之前,最高气温的升高有助于生物量的产量,而当最高气温超过 35 °C,将对生物量积累带来负面影响;研究认为最高生产潜力是一个相对低温的组合,最高气温为 20 °C,最低气温为 10 °C,这可以极大限度延长作物的生长发育周期而使作物增产^[37]。印度的研究通过 CROPGRO 作物模型,得出大豆类作物对日最高气温提高较日最低气温更加敏感,CO₂ 倍增导致的产量提高 50% 可以与提高 3 °C 的气温而抵消^[38];CERES(小麦和水稻)模型被应用于评价气候变化对印度西北部的产量影响,小麦因为 CO₂ 倍增可以提高产量 28%,但气温升高 3 °C 足以抵消这种增产效应;水稻因为 CO₂ 倍增可以提高产量 15%,但气温升高 2 °C 足以抵消这种增产效应^[39]。

3.4 温度对不同类型植物生产力的影响

温度对不同光合途径的植物类型影响不同,有学者通过 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素研究了地质时期的气候变化情况,发现生长季低温更有利于 C3 植物生长,而生长季温度升高对 C4 有利^[40],长时间序列的矮草草原最低气温和植被变量的关系研究得出:矮草草原生态系统对最低气温提高反应敏感,提高春天最低气温显著降低该区优势 C4 植物的净初级生产力,提高本地和外来的非禾本科草本植物 C3 植物的丰富度和生产力^[41]。生长季的最低气温和最高气温的高相关提出了一个挑战:需要更好地解释影响植物生长和产量的唯一因素。

4 增温对土壤呼吸的影响

多数研究得出土壤温度和土壤湿度是控制土壤呼吸即土壤 CO₂ 通量的主要环境因素,干土壤降雨后会产生 CO₂ 的爆发式集中释放^[42]。统计分析得出影响我国陆地生态系统植物生长的关键因素是温度,其次是降水^[43]。观测实验得出,土壤温度和土

壤湿度是控制我国南方人工林土壤 CO₂ 通量的主要因素,是土壤 CO₂ 产量的驱动变量,用这两个变量建立的模型可以预测土壤 CO₂ 释放^[44]。我国南方不同地方的研究都得出土壤呼吸主要受土壤温度控制^[45],而西藏农田的观测结果表明,土壤 CO₂ 通量主要受土壤温度和作物物候的控制^[46]。也有研究得出土壤呼吸在不同季节其主控因素不同,例如黄土高原区,土壤呼吸的年变化主要受土壤温度控制,但在夏季,土壤水分是主要限制因子,控制着土壤呼吸。可以看出,土壤温度是土壤呼吸主要控制因素,最高气温和最气低温的变化必然对区域土壤碳通量产生影响,但最高气温和最低气温升高将对土壤碳通量产生怎样的影响,国内外的研究很少见。伴随着最高气温的不变或降低和最低气温的提高,这种温度对蒸发的影响并不像期待的那样使蒸散降低,反而使蒸散增加^[33],从而影响土壤水分含量,而土壤水分也是一个影响土壤呼吸的重要因素。这就需要改变过去仅仅使用平均气温的计算方法,而考虑最低气温和最高气温对蒸散的影响,进而考虑非同步性增温对土壤呼吸的间接影响。

5 增温对作物影响的试验研究

5.1 增温实验装置演化

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主要方法之一^[47],其研究结果为陆地生态系统结构与功能的中长期动态模型预测和验证提供关键的参数估计。温室和开顶式气室具有易控制等很多优点而被广泛应用于气候变化研究,来研究气候变化对农业生态系统、草原生态系统和森林生态系统的影响。其作为增温设施已经在一系列环境中被广泛应用,主要是一些高纬度和高海拔地区^[48-50]。开顶式气室不仅可以用于增温处理,而且还可以应用于其他气候变化,例如水分(土壤湿度)、光照(强度和光质)和 CO₂, O₃ 等的研究当中^[51-54]。欧盟投资 5.665 亿欧元研究了环境与气候变化,其中的 MODEXCROP 计划(Model evaluation of experimental variability to improve the predictability of crop yields under climat change, ENV4950142)在气候变化对农业生产影响方面做了大量的野外试验和模型验证研究,Wolf 等综述了欧盟 1994—1998 年的关于农业方面的研究,认为地上农作物生物量可能因为升温减少 10%~30%,而

由于 CO₂ 升高可能增加 0~40%。此方面的试验绝大多数是通过开顶式气室研究升温和提高 CO₂ 浓度,或通过 FACE 提高 CO₂ 浓度进行试验^[55]。在我国,王春乙等利用开顶式气室在研究 CO₂ 和 O₃ 浓度增加对作物影响方面作了大量工作^[54]。在以上研究中,温室或开顶式气室既起到增温的作用,又是各类环境因素对作物生长影响的作用容器,多数实验(尤其是 CO₂, O₃ 以及 UV-B 等实验)中往往得到的是增温效应后的试验结果(尽管多数试验采用加强通风消除温室效应)。温室和开顶式气室在有太阳辐射的白天增温幅度高于其夜间增温幅度^[56-57],从而使气温日较差增加^[48-49,58]。对于季节增温而言,温室和开顶式气室在夏季的增温幅度比冬季增温幅度大得多^[58-59],故温室和开顶式气室增温与当前气候变暖的增温特征不吻合。

为了尽量真实地模拟全球变暖机制,一种新的增温装置——红外线辐射器在生态系统控制实验中逐渐得到应用。该装置是通过悬挂在样地上方、可以散发红外线辐射的灯管来实现的^[60],与温室(包括自动控温的气候室)和开顶箱相比较,可以较真实地反映野外气候条件,从而真实地模拟非对称性增温对植物的影响^[61]。

5.2 非对称性增温对农业影响的实验研究

国内外关于最低气温升高和最高气温升高对农作物影响的试验研究十分少见,现有的研究多采用模型的方法研究最低气温升高或最高气温升高对小麦生长的影响,未见试验研究与模拟结果比较验证。美国学者通过作物模型模拟研究认为:非同步增温对作物产量的影响小于同步增温,增温对美国小麦和玉米产量的负效应在最低气温增温幅度大于最高气温的增温幅度时得到缓解^[34,62]。我国现有气候变暖对农作物产量的影响,多采用统计和模型方法进行研究,而模型模拟和预测结果也截然不同,例如,有些研究认为东北地区气候变暖(即积温增加和温度胁迫的快速降低)带来粮食产量增加^[63-65],也有研究得出东北大部分作物产量均有所降低^[66-67];华北地区研究结果也不尽相同^[63,68-69]。这些研究中未见任何实验研究对模拟结果进行验证,且多数研究未考虑非对称性增温的影响。国内仅见通过开顶式气室研究高温胁迫对小麦生长影响的少数工作^[70-71]。

6 结 语

全球气候变化正经历一次以变暖为主要特征的

显著变化,北半球和我国气候变暖中增温的非对称性特征,即气候变暖存在明显的季节差异和昼夜不同步性,日最低气温升幅远大于日最高气温升幅。昼夜温度对作物的生理效应不同,所以日最低气温升高和日最高气温升高可能对农作物生长有不同影响。现有的长期观测数据和作物模型研究一致认为最低气温升高促使整个生长季延长,促使早春作物物候期提前;但最低气温对不同作物的物候以及同一作物的不同发育阶段影响不同。在最高气温和最低气温对作物产量影响方面,现有研究多采用作物模型模拟或统计方法,这些研究结果没有就最高气温还是最低气温对作物产量起关键作用取得一致。在增温实验研究方面,新出现的一些增温设施可以较真实地反映野外气候条件,然而到目前为止,未见对作物模型模拟结果的实验验证。综上所述,日最高气温和最低气温升高对农业生产影响的实验研究、多因子综合对农业生产影响的实验研究等需要加强,以期进一步研究各因素对作物生长的影响机理,为制定合理的农业气候变化适应措施和农业管理提供理论支撑。

参 考 文 献

- [1] IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4). http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm.
- [2] IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001 (TAR). http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm.
- [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 Meteor Soc*, 1993, 74(6):1007-1023.
- [4] Easterling D R, Peterson T C, Karl T R, et al. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 1997, 277(18): 364-367.
- [5] Price C, Michaelides S, Pashiardis S, et al. Long term changes in diurnal temperature range in Cyprus. *Atmos Res*, 1999, 51(2): 85-98.
- [6] Ventura F, Rossi Pisa P, Ardizzoni E. Temperature and precipitation trends in Bologna (Italy) from 1952 to 1999. *Atmos Res*, 2002, 61(3): 203-214.
- [7] Hasenauer H, Nemani R R, Schadauer K, et al. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *Forest Ecology and Management*, 1999, 122(3):209-219.
- [8] Hess T M. Trends in reference evapo-transpiration in the North East Arid Zone of Nigeria, 1961-91. *Journal of Arid Environments*, 1998, 38(1): 99-115.

- [9] Boyles R P, Raman S. Analysis of climate trends in North Carolina (1949—1998). *Environment International*, 2003, 29:263-275.
- [10] 翟盘茂, 任福民. 中国近四十年最高最低气温变化. *气象学报*, 1997, 55(4):418-429.
- [11] Zhai P M, Pan X H. Trends in temperature extremes during 1951—1999 in China. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(17):1913-1916.
- [12] 马晓波. 中国西北地区最高、最低气温的非对称变化. *气象学报*, 1999, 57(5):613-620.
- [13] 王菱, 谢贤群, 苏文, 等. 中国北方地区 50 年来最高和最低气温的变化及其影响. *自然资源学报*, 2004, 19(3):337-343.
- [14] 王石立, 庄立伟, 王馥棠. 近 20 年气候变暖对东北农业生产水热条件影响的研究. *应用气象学报*, 2003, 14(2):152-163.
- [15] 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(4):701-716.
- [16] 唐国利, 丁一汇. 由最高最低气温求算的平均气温对我国年平均气温序列的影响. *应用气象学报*, 2007, 18(2):187-192.
- [17] 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.
- [18] Menzel A, Fabian P. Growing season extended in Europe. *Nature*, 1999, 397:659.
- [19] Moonen A C, Ercoili L, Mariotti M, et al. Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(1):13-27.
- [20] Hu Q, Weiss A, Feng S, et al. Earlier winter wheat heading dates and warmer spring in the US Great Plains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135:284-290.
- [21] Schwartz M D, Chen X Q. Examining the onset of spring in China. *Climate Research*, 2002, 21: 157-164.
- [22] 叶殿秀, 张勇. 1961—2007 年我国霜冻变化特征. *应用气象学报*, 2008, 19(6):661-665.
- [23] Heide O M, Prestrud A K. Low temperature, but not photoperiod, controls growth cessation and dormancy induction and release in apple and pear. *Tree Physiology*, 2005, 25(1): 109-114.
- [24] Lu P L, Yu Q, Liu J D, et al. Effects of changes in spring temperature on flowering dates of woody plants across China. *Botanical Studies*, 2006, 47: 153-161.
- [25] 王润元, 张强, 王耀琳, 等. 西北干旱区玉米对气候变暖的响应. *植物学报*, 2004, 46(12):1387-1392.
- [26] Sadras V O, Monzon J P. Modelled wheat phenology captures rising temperature trends: Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina. *Field Crops Research*, 2006, 99(2-3):136-146.
- [27] Lobell D B. Changes in diurnal temperature range and national cereal yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 145:229-238.
- [28] Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I, Asner G P, et al. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research*, 2005, 94(2-3):250-256.
- [29] 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.
- [30] Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I. Impacts of day versus night temperatures on spring wheat yields: A comparison of empirical and CERES model predictions in three locations. *Agron J*, 2007, 99: 469-477.
- [31] Wilkens P, Singh U. A Code-level Analysis for Temperature Effects in the CERES Models// White J. Modeling Temperature Response in Wheat and Maize. CIMMYT, El Batan, Mexico, 2001:1-7.
- [32] Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature*, 1997, 387:484-485.
- [33] Todisco F, Vergni L. Climatic changes in Central Italy and their potential effects on corn water consumption. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148:1-11.
- [34] Dhakhwa G B, Campbell C L, LeDuc S K, et al. Maize growth: Assessing the effects of global warming and CO₂ fertilization with crop models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87(4): 253-272.
- [35] Peng S B, Jianliang H, Sheehy J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *PNAS*, 2004, 101:9971-9975.
- [36] Schlenker W, Roberts M J. Nonlinear effects of weather on corn yields. *Rev Agric Econ*, 2006, 28: 391-398.
- [37] Bannayan M, Hoogenboom G, Crout N M J. Photothermal impact on maize performance: A simulation approach. *Ecological Modelling*, 2004, 180:277-290.
- [38] Lal M, Singh K K, Srinivasan G, et al. Growth and yield responses of soybean in Madhya Pradesh, India to climate variability and change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93(1):53-70.
- [39] Lal M, Singh K K, Rathore L S, et al. Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89(2): 101-114.
- [40] Wang H, Greenberg S E. Reconstructing the response of C3 and C4 plants to decadal-scale climate change during the late Pleistocene in southern Illinois using isotopic analyses of calcified rootlets. *Quaternary Research*, 2007, 67:136-142.
- [41] Alward R D, Detling J K, Milchunas D G. Grassland vegetation changes and nocturnal global warming. *Science*, 1999, 283:229-231.
- [42] Jose J S, Montes R, Nikonova N. Seasonal patterns of carbon dioxide, water vapour and energy fluxes in pineapple. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147:16-34.
- [43] He Y, Dong W J, Guo X Y. Terrestrial growth in China and its relationship with climate based on the MODIS data. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5086-5092.
- [44] Li Y L, Otieno D, Owen K, et al. Temporal variability in soil CO₂ emission in an orchard forest ecosystem. *Pedosphere*,

- 2008, 18(3): 273-283.
- [45] Iqbal J, Hu G R, Du L J, et al. Differences in soil CO₂ flux between different land use types in mid-subtropical China. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(9):2324-2333.
- [46] Shi P L, Zhang X Z, Zhong Z M, et al. Diurnal and seasonal variability of soil CO₂ efflux in a cropland ecosystem on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137:220-23.
- [47] Shen K P, Harte J. Ecosystem Climate Manipulations// Sala O E, Jackson R B, Mooney H A, et al. Methods in Ecosystem Science. New York: Springer-Verlag Press, 353-270-369, 2000.
- [48] Hollister R D, Webber P J. Biotic validation of small open-top chambers in a tundra ecosystem. *Global Change Biology*, 2000, 6:835-842.
- [49] Klein J A, Harte J, Zhao X Q. Dynamic and complex microclimate responses to warming and grazing manipulations. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1440-1451.
- [50] 许庆民, 赵建中, 刘伟. 模拟增温对短穗兔耳草生长特征的影响. *安徽农业科学*, 2007, 35(36):11826-11828.
- [51] Van Oijen M, Schapendonk A H C M, Jansen M J H, et al. Do open-top chambers overestimate the effects of rising CO₂ on plants? An analysis using spring wheat. *Global Change Biology*, 1999, 5:411-421.
- [52] Wan S Q, Richard J N, Joanne L. Responses of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland. *Global Change Biology*, 2007, 13: 2411-2424.
- [53] Kudernatscha T, Fischera A, Bernhardt-Rämerrmann M. Short-term effects of temperature enhancement on growth and reproduction of alpine grassland species. *Basic and Applied Ecology*, 2007, doi:10.1016/j.baae.2007.02.005.
- [54] 王春乙, 白月明, 郑昌玲. CO₂和O₃浓度倍增对作物影响的研究进展. *气象学报*, 2004, 62(5):875-881.
- [55] Wolf J, Van Oijen M, Kempenaar C. Analysis of the experimental variability in wheat responses to elevated CO₂ and temperature. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 93:227-247.
- [56] Suzuki S, Kudo G. Short-term effects of simulated environmental change on phenology, leaf traits, and shoot growth of alpine plants on a temperate mountain, northern Japan. *Global Change Biology*, 1997, 3(Suppl. 1):108-115.
- [57] Werkman B R, Callaghan T V, Welker J M. Responses of bracken to increased temperature and nitrogen availability. *Global Change Biology*, 1996, 2: 59-66.
- [58] Marion G M, Henry G H R, Freckman D W, et al. Open-top designs for manipulating field temperature in high-latitude ecosystems. *Global Change Biology*, 1997, 3(Suppl. 1):20-32.
- [59] Stenstrom M, Gugerli F, Henry G H R. Response of Saif raga oppositifolia L to simulated climate change at three contrasting latitudes. *Global Change Biology*, 1997, 3(Suppl. 1):44-54.
- [60] Shaver G R, Canadell J, Chapin III F S, et al. Global warming and terrestrial ecosystems; A conceptual framework for analysis. *BioScience*, 2000, 50:871-882.
- [61] 牛书丽, 韩兴国, 马克平, 等. 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.
- [62] Rosenzweig C, Tubiello F N. Effects of changes in minimum and maximum temperature on wheat yields in the central US: A simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 80(2-4):215-230.
- [63] 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(4):229-233.
- [64] 蔺涛, 谢云, 刘刚, 等. 黑龙江省气候变化对粮食生产的影响. *自然资源学报*, 2008, 23(2):307-318.
- [65] 廉毅, 高枫亭, 沈柏竹, 等. 吉林省气候变化及其对粮食生产的影响. *气候变化研究进展*, 2007, 3(1):46-49.
- [66] 王艳秋, 高煜中, 潘华盛, 等. 气候变暖对黑龙江省主要农作物的影响. *气候变化研究进展*, 2007, 3(6):373-378.
- [67] 袁婧薇, 倪健. 中国气候变化的植物信号和生态证据. *干旱区地理*, 2007, 30(4):465-473.
- [68] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 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.
- [69] 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(3):264-270.
- [70] 高素华, 郭建平, 赵四强, 等. “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.
- [71] 陈希勇, 赵爱菊, 李亚军, 等. 高温胁迫对小麦籽粒品质的影响. *河北农业科学*, 2007, 11(1): 1-4.

Asymmetric Trends of Daily Maximum and Minimum Temperature in Global Warming and Its Effects on Agriculture Ecosystems

Tan Kaiyan¹⁾ Fang Shibo¹⁾ Ren Sanxue¹⁾ Zhang Xinshi²⁾

¹⁾ (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

²⁾ (*Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093*)

Abstract

Some recent major research findings on trends of daily maximum and minimum temperature in global warming and warming experiments in agro-ecosystems are summarized briefly. Investigating the daily mean maximum and minimum temperatures of the Northern Hemisphere landmass, it's found that the rising rate of the minimum temperature is 2—3 times as big as that of the maximum temperature during the period of 1950—1993. It indicates that the daily mean maximum and minimum temperatures rising are asymmetry. The largest increase in temperature occurs in wintertime and springtime, implying that temperature increase is asymmetry in seasons too. Similar trends are observed for the past 52 years (1951—2002) in China. The agro-ecosystems response to temperature increasing in asymmetric trends is introduced in detail. As for the rise of the minimum temperature, almost all researches confirm that the growing season has been extended and the spring crops phenological phases have become earlier than before. The minimum temperature and the maximum temperature have different effects on different crops' phenological calendar and on one crop's different phenological phases. Most of the existing reports about agro-ecosystems response to temperature increase concentrate on crops model simulation and statistic description. And most of the results show that increasing temperature has made the growth period shorter and the ripe date earlier. As for these causes, some studies imply that it could cut down the crops yields. But others consider that increasing minimum temperature will lessen the danger of crop chill injury, and will improve the crops yields. Some studies also suggest that the temperature rising, especially the daily maximum temperature rising has nonlinear effects on corn yields. Thus the roles of minimum temperature and maximum temperature to crops grow and yields are still uncertain. The temperature also plays an important role in controlling the soil CO₂ releases. Most of experiments about temperature rising are conducted in OTC(open-top chamber) or greenhouse, where the maximum temperature is increased much more than the minimum temperature (the minimum temperature are almost unchanged comparing with blank). Therefore, all the OTC and greenhouse experiments are mainly set to simulate the effects of the maximum temperature rising on crops. A recently reported method designed to simulate minimum temperature rising is also reviewed. Minimum temperature rising experiments have been carried out on grassland and forest ecosystems, but the experiments in agro-ecosystems are seldom reported.

Key words: asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature; global climate warming; agro-ecosystems; warming experiment