

昼夜不对称性与对称性升温对大豆产量和水分利用的影响

王 丹^{1,2} 乔匀周² 董宝娣² 葛 静¹ 杨萍果^{1*} 刘孟雨²

¹山西师范大学生命科学学院, 山西临汾 041000; ²中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050021

摘 要 全球气候变暖并不是白天和夜间的平均变暖, 而是呈现一定的不对称性。大豆(*Glycine max*)是世界范围内种植较广泛的豆科作物, 也是中国重要的粮食作物。研究大豆的生长与水分利用对不对称性气候变暖的响应, 可为预测未来气候变暖情景下大豆的适应提供科学的参考依据。该实验在人工气候箱中采用盆栽方式进行, 设立对照(CON, 昼26 °C夜16 °C)、对称性升温(ETs, 昼夜均升高3 °C)和不对称性升温(ETa, 昼升高2 °C, 夜升高4 °C)三个温度情景, 研究了大豆产量和水分利用对昼夜不对称性与对称性升温的差异化响应。结果表明: 在昼/夜26 °C/16 °C的背景下, 1) ETs对大豆产量影响不显著, 主要是因为生物量的增加缓解了收获指数下降对大豆的不利影响; ETa使大豆产量减少38.9%, 是由于大豆的收获指数和产量构成要素(荚数、粒数、百粒重)均显著降低。2) ETs对大豆全生育期蒸散量(ET)的影响不显著, ETa使大豆整个生育期ET减少14.8%。3)两种升温模式对大豆耗水量中蒸发量的影响都不显著, 耗水量的差异主要来自蒸腾量的差异, 其中ETs和ETa分别使大豆全生育期蒸腾量降低10.7%和26.1%。综上所述, 只针对ETs进行研究, 而没有对ETa进行研究的实验会低估真正的气候变暖情景(ETa)对大豆生长和产量的不利影响, 高估其对大豆耗水量的影响。

关键词 昼夜不对称性气候变暖; 产量; 耗水量; 水分利用效率; 蒸腾效率; 大豆

引用格式: 王丹, 乔匀周, 董宝娣, 葛静, 杨萍果, 刘孟雨 (2016). 昼夜不对称性与对称性升温对大豆产量和水分利用的影响. 植物生态学报, 40, 827–833. doi: 10.17521/cjpe.2015.0439

Differential effects of diurnal asymmetric and symmetric warming on yield and water utilization of soybean

WANG Dan^{1,2}, QIAO Yun-Zhou², DONG Bao-Di², GE Jing¹, YANG Ping-Guo^{1*}, and LIU Meng-Yu²

¹College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen, Shanxi 041000, China, and ²Centre for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China

Abstract

Aims Global warming does not mean similar warmer temperatures between daytime and nighttime. Soybean (*Glycine max*) is a widely planted legume crop around the world and an important food crop in China. The aim of this study was to understand the responses of soybean growth and water utilization to future asymmetric warming, which would provide scientific reference for evaluating the adaptation of soybean to the future climate scenarios.

Methods This experiment was carried out in artificial climate chambers, using the method of potted plants, under three temperature conditions; contrast (CON, 26 °C during the day and 16 °C during night), symmetric warming (ETs, elevated temperature of 3 °C both during the day and night), asymmetric warming (ETa, elevated temperature of 2 °C during the day and elevated temperature of 4 °C during night). We investigated the differential effects of diurnal asymmetric and symmetric warming on the yield and water consumption of soybean.

Important findings The results revealed that, under the background of 26 °C during the day and 16 °C during night: 1) the effect of ETs on soybean yields showed no significant function that mainly benefit from the increase in the amount of biomass to ease negative influence of decrease in the harvest index. ETa reduced yields of soybean by 38.9% ($p < 0.05$) due to both significant decrease in harvest index and yield components (pod number per plant, grain number per pod and 100-grain weight). 2) ETs showed no obvious effect on the whole growing stage evapotranspiration (ET) of soybean, while ETa reduced the whole growing stage ET by 14.8% ($p < 0.05$). 3) The effect of the two warming pattern on water consumption of soybean were not significant. The difference in water

收稿日期Received: 2015-12-02 接受日期Accepted: 2016-05-09

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: 314008348@qq.com)

consumption was mainly derived from the difference in transpiration (T). ETs and ETa reduced total transpiration by 10.7% ($p < 0.05$) and 26.1% ($p < 0.05$), respectively. In conclusion, our results suggest that ETs will underestimate the detrimental effects of real climate warming (ETa) on the growth and yield of soybean, and overestimate the effects on water consumption of soybean.

Key words asymmetric warming; yield; water consumption; water use efficiency; transpiration efficiency; *Glycine max*

Citation: Wang D, Qiao YZ, Dong BD, Ge J, Yang PG, Liu MY (2016). Differential effects of diurnal asymmetric and symmetric warming on yield and water utilization of soybean. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 827–833. doi: 10.17521/cjpe.2015.0439

气候变暖这个不争的事实(IPCC, 2007)已经成为生态学研究的核心问题之一。随着人类对气候变暖认识的逐步深入,越来越多的科学家意识到,气候变暖(ET)并不是全球地表温度的平均变暖,而是呈现一定的非对称性(Abou-Hussein, 2012; 江晓东等, 2014),并且夜间增温幅度大于白天(魏金连等, 2010; 褚延梅等, 2014),在我国华北地区,过去50年间,夜间增温幅度达到白天增温幅度的两倍(谭凯炎等, 2009)。随着全球变暖的日益加剧,研究不对称升温对大豆(*Glycine max*)生长和水分利用的影响,可为预测大豆在未来气候变化条件下的生产趋势和栽培管理应对措施提供基础数据和科学依据。

以气候变暖为主要特征的全球气候变化正在影响作物的产量和耗水量(刘玉洁和陶福祿, 2013)。温度升高对作物产量和水分利用效率的影响已有大量报道(万运帆等, 2014; 苏营等, 2016),然而,进行不对称升温的研究只有极少数,且多为模型模拟研究。国外的作物模型模拟增温研究表明:不对称升温对作物产量的影响小于对称升温,在最低气温增温幅度大于最高气温的增温幅度时,增温对美国小麦(*Triticum aestivum*)和玉米(*Zea mays*)产量的负效应得到缓解(Klein *et al.*, 2005; Wang & Greenberg, 2007)。由于模型模拟增温中作物的反应与真实田间条件下作物的实际反应有一定差距,关于对称性升温(ETs)与不对称性升温(ETa)对大豆产量和水分利用效率影响的区别没有定论(田云录等, 2010)。ETa表现为夜间升温多,白天升温少,气温日较差小于ETs,因此我们设想,ETa对大豆生长、产量和耗水量(ET)的影响大于ETs,进而大豆的水分利用效率(WUE)对ETs和ETa的响应亦会有所差异。基于上述假设,本研究在人工气候箱内模拟气温变化,以盆栽大豆作为试验材料,开展了ETs和ETa两种升温模式的试验,探讨ETs和ETa影响大豆产量和水分利用效率的原因及二者之间的差异。

1 材料和方法

1.1 实验材料

本实验于2015年4月20日在人工气候箱(PRX-1000L, 海曙赛福, 宁波)内进行,选取籽粒饱满、大小均匀的常规大豆品种‘中黄13’为实验材料,实验采用3个人工气候箱,设置3个温度情景,每个温度情景下有18个重复。每个气候箱放置19个盆(直径14.5 cm, 高10.5 cm, 质量35 g),每盆装纯蛭石到盆沿,并且播种2粒大豆种子,其中1盆不播种,用于测量土壤蒸发,共记57盆,待出苗后,于5月4日选择生长状况较好的幼苗,定苗至每盆1株,无病虫害和杂草。每隔15天每盆浇一次100 mL的营养液,营养液的配置参考Wang等(2009)的营养液配方。

1.2 实验设计

在人工智能气候箱内进行升温处理,实验设置对照(CON, 昼26 °C夜16 °C)、ETs、ETa三种温度情景。ETs指昼夜同步升温3 °C(侯雯嘉等, 2015),ETa是同时期内白天升温2 °C,夜间升温4 °C(谭凯炎等, 2009),每天光照时间为14 h(昼/夜时长为14 h/10 h),光照强度为17 000 lx人工光源,相对湿度为80%。所有处理均从播种开始直至收获。同时为避免不同气候箱的差异,每隔15天轮转一次。

1.3 测定项目及方法

产量(GY)及构成组分:大豆收获期,测定每株荚数、每荚粒数、荚质量、粒质量、生物量以及收获指数。其中荚质量、粒质量、生物量是在60 °C烘箱中烘干至恒质量所得的干质量(赖上坤等, 2015),单位为g·plant⁻¹,收获指数定义为籽粒产量与总生物量的比值。

蒸发(E)、蒸腾(T)和蒸散(ET):选择长势均匀、具有代表性的5盆植株,在升温处理的第30、45、60、75天,每天7:00将盆吸水饱和,测量盆质量 M_1 和只装蛭石没有种植大豆的盆质量 m_1 ,第二天同一时间

再测量盆质量 M_2 和空盆质量 m_2 , 然后饱和再称质量, 以此类推, 每次连续测量5天, 计算5天的平均值。每天的 E_d 、 T_d 、 ET_d 和全生育期的 E 、 T 、 ET 的计算采用下述公式:

$$ET_d = M_1 - M_2 \quad (1)$$

$$E_d = m_1 - m_2 \quad (2)$$

$$T_d = ET_d - E_d \quad (3)$$

$$E = \sum D \cdot E_d \quad (4)$$

$$ET = \sum D \cdot ET_d \quad (5)$$

$$T = \sum D \cdot T_d \quad (6)$$

式中 M_1 为第一天测量的饱和盆质量, M_2 为第二天饱和和前测量的盆质量, m_1 为第一天测量的只装蛭石没有种植大豆的盆饱和质量, m_2 为第二天饱和和前测量的盆质量, 单位都为 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{plant}^{-1}$, D 表示测定蒸散量的日期所代表的附近天数, E_d 、 T_d 、 ET_d 的单位为 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{plant}^{-1}$, E 、 T 、 ET 的单位为 $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ 。

叶面积: 在升温处理第30、45、60、75天测量叶片长和宽, 用长宽系数法计算叶面积(郁进元等, 2007)。

$$S = 0.73a \cdot b \quad (7)$$

式中: S 为单叶面积, 单位为 cm^2 , a 为叶片的长, b 为叶片的宽, 单位为 cm 。

蒸腾速率(TR)定义为:

$$TR = T/S_T \quad (8)$$

TR 的单位为 $\text{g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, S_T 为单株总叶面积。

水分利用效率(WUE)和蒸腾效率(TE)由下述公式计算:

$$WUE = GY/ET \quad (9)$$

$$TE = GY/T \quad (10)$$

单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{plant}^{-1}$ 。

1.4 数据分析

在SPSS软件中采用单因素方差分析进行统计分析, 差异显著时, 各处理间采用最小显著差数

(LSD)法进行比较。

2 结果和分析

2.1 产量及构成组分

与CON相比, ETa使大豆产量降低38.9% ($p < 0.05$, 表1), 一方面是因为ETa降低了大豆产量构成的三要素, 荚数、粒数、百粒重分别减少($p < 0.05$)了23.0%、9.1%和12.1%。另一方面原因是生物量降低5.2% ($p > 0.05$), 收获指数降低35.6% ($p < 0.05$)。

与CON相比, ETs仅使大豆产量降低5.6% ($p > 0.05$, 表1), 其中产量构成三要素虽然略有降低, 但均不显著(荚数降低2.2%、粒数降低1.1%、百粒重降低1.5%)。从干物质分配角度分析, ETs使收获指数降低12.0% ($p < 0.05$), 使大豆的生物量增加7.3% ($p > 0.05$), 生物量的增加缓解了收获指数下降对大豆的不利影响, 所以产量没有显著变化。

与ETs相比, ETa使大豆的产量降低了35.5% ($p < 0.05$, 表1), 一方面原因是ETa使大豆的荚数、粒数和百粒重分别减少($p < 0.05$) 19.7%、8.0%、10.7%, 另一方面原因是ETa降低了大豆的生物量(11.6%, $p < 0.05$)、收获指数(25.9%, $p < 0.05$), 因此ETa对大豆的减产作用比ETs大。

2.2 蒸散

2.2.1 植株的蒸散量

无论显著与否, 升温降低了大豆植株的 E 、 T 和 ET (图1)。与CON相比, ETa使大豆整个生育期 ET 减少14.8% ($p < 0.05$), 其中 E 仅减少2.7% ($p > 0.05$), T 减少26.1% ($p < 0.05$); ETs使大豆 ET 减少5.7% ($p > 0.05$), 蒸腾量降低4% ($p > 0.05$), 蒸发量降低10.7% ($p < 0.05$); 与ETs比较, ETa使大豆蒸散量降低9.6% ($p < 0.05$), 蒸发量升高1.4% ($p > 0.05$), 蒸腾量降低17.3% ($p < 0.05$)。

表1 不对称与对称升温对大豆产量及其构成组分的影响(平均值 \pm 标准误差, $n = 5$)

Table 1 The effects of asymmetric and symmetric warming on yield and its components of soybean (mean \pm SE, $n = 5$)

处理 Treatment	荚数 Pod number	粒数 Seed number	百粒重 100-seed weight (g)	产量 Grain yield ($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)	生物量 Biomass ($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)	收获指数 Harvest index (%)
CON	6.8 \pm 0.66 ^a	1.76 \pm 0.00 ^a	10.92 \pm 3.15 ^a	1.31 \pm 0.06 ^a	4.27 \pm 0.85 ^{ab}	0.31 \pm 0.07 ^a
ETa	5.2 \pm 0.12 ^b	1.60 \pm 0.02 ^b	9.60 \pm 1.72 ^b	0.80 \pm 0.10 ^b	4.05 \pm 0.79 ^b	0.20 \pm 0.02 ^c
ETs	6.6 \pm 0.35 ^a	1.74 \pm 0.05 ^a	10.75 \pm 0.47 ^a	1.24 \pm 0.06 ^a	4.58 \pm 0.41 ^a	0.27 \pm 0.01 ^b

不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。CON, 对照; ETa, 不对称升温; ETs, 对称升温。

Different small letters indicate significant differences among different treatments ($p < 0.05$). CON, control; ETa, asymmetric warming; ETs, symmetric warming.

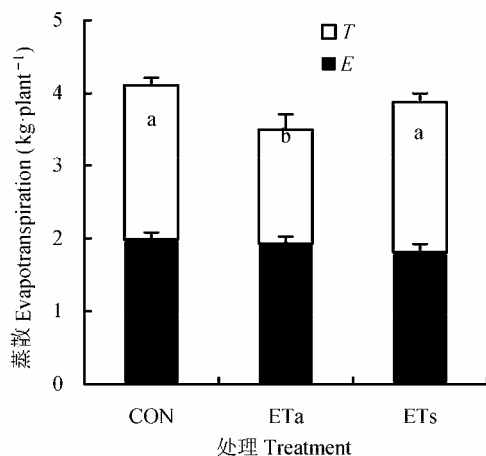


图1 不对称与对称升温对大豆全生育期蒸散(ET)、蒸发(E)和蒸腾(T)的影响(平均值±标准误差, $n = 5$)。ET = E + T。不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。CON, 对照; ETa, 不对称升温; ETs, 对称升温。

Fig. 1 Effects of asymmetric and symmetric warming on whole stage evapotranspiration (ET), evaporation (E), transpiration (T) of soybean (mean \pm SE, $n = 5$). ET = E + T. Different small letters indicate significant differences among different treatments ($p < 0.05$). CON, control; ETa, asymmetric warming; ETs, symmetric warming.

2.2.2 植株蒸腾速率与叶面积

三种温度情景下,随着大豆生育进程的推进,单位叶面积蒸腾速率均逐渐下降(图2A)。与CON相比,ETa和ETs的蒸腾速率在大豆生育期的中前期均低于CON,生育后期各处理间没有差异。ETs的蒸腾速率则在处理的45天之前低于ETa,60天之后两种升温模式之间的差异也消失了。在生长旺盛、温度

情景间差异显著的第30–60天,ETa和ETs的平均蒸腾速率分别比对照低12.5% ($p < 0.05$)和19.7% ($p < 0.05$),ETs的平均蒸腾速率比ETa低8.1% ($p < 0.05$)。

大豆单株叶面积随生育进程逐渐增多,呈现明显的S形曲线特征(图2B)。ETa和ETs的平均叶面积(30–75天)分别比对照低24.2% ($p < 0.05$)和11.8% ($p < 0.05$),ETs的平均叶面积(30–75天)比ETa高17% ($p < 0.05$)。

2.3 水分利用效率和蒸腾效率

与CON相比,ETa降低了大豆的水分利用效率28.3% ($p < 0.05$)和蒸腾效率17.3% ($p < 0.05$),主要是因为ETa降低了大豆的产量,减少了大豆的蒸散和蒸腾,然而产量的降低幅度大于蒸散和蒸腾的降低幅度,因此水分利用效率和蒸腾效率均降低(图3)。与CON相比,ETs对大豆的水分利用效率和蒸腾效率均没有显著影响。与ETs比较,因为ETa降低了大豆的产量,减少了大豆的蒸散和蒸腾,然而产量的降低幅度大于蒸散和蒸腾的降低幅度,所以ETa处理的WUE和TE分别比ETs降低了28.6% ($p < 0.05$)和22.0% ($p < 0.05$)。

3 讨论和结论

此前针对气候变暖进行的实验研究主要依据背景是地表温度的平均升高。自气候的不对称性变暖受到科学家关注以来(Karl *et al.*, 1993),许多生态学家开始通过模型研究昼夜不同升温幅度对作物的影

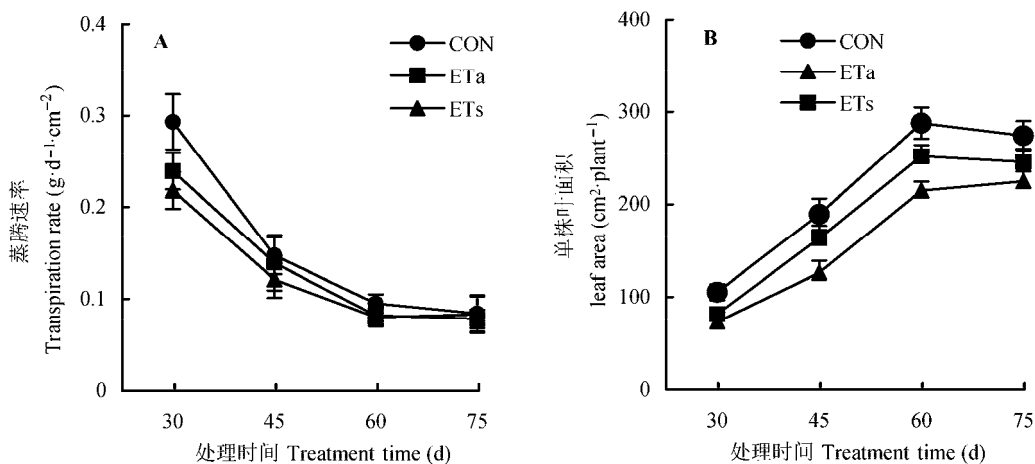


图2 不对称与对称升温对大豆不同时期叶片蒸腾速率和单株叶面积的影响(平均值±标准误差, $n = 5$)。图注同图1。

Fig. 2 Effects of asymmetric and symmetric warming on leaf transpiration rate and leaf area per plant of soybean at different growth period (mean \pm SE, $n = 5$). Notes see Fig. 1.

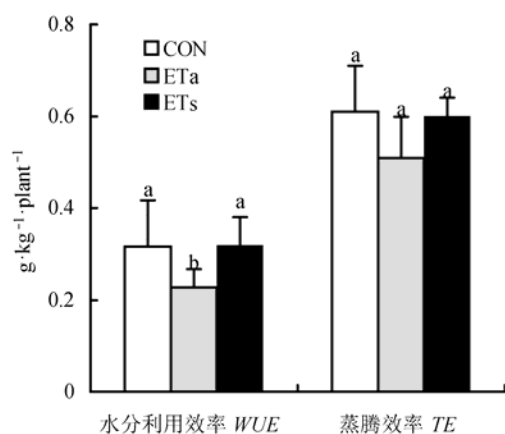


图3 不对称与对称升温对大豆水分利用效率(WUE)和蒸腾效率(TE)的影响(平均值±标准误差, $n = 5$)。不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。图注同图1。

Fig. 3 Effects of asymmetric and symmetric warming on water use efficiency (WUE) and transpiration efficiency (TE) of soybean (mean \pm SE, $n = 5$). Different small letters indicate significant differences among different treatments ($p < 0.05$). Notes see Fig. 1.

响(Rosenzweig & Tubiello, 1996), 仅有少数研究人员采用试验的方法研究了夜晚的高升温幅度对植物的影响。本研究中两种升温模式均抑制了大豆的生长, 与对照相比, ETs与ETa均使大豆的产量构成三要素(荚数、粒数和百粒重)和收获指数降低。但ETs与ETa对大豆生物量的影响不同。ETa对大豆的生物量没有显著影响, 与ETa比较, ETs使大豆的生物量显著增加, 有效缓解了ETa情景下收获指数下降对大豆的不利影响。这与石姣姣等(2015)的结果相似, 但与Brown和Rosenberg (1997)、Lobell和Field (2007)在美国中部的模型模拟不同。与ETs相比, ETa使大豆产量降低35.5%, 而美国学者通过模型研究的结果却是不对称升温对作物产量的影响小于对称升温(Dhakhwa *et al.*, 1997), 本研究结果与之相反。不对称升温的负作用大于对称升温, 是由于夜间升温幅度高导致作物夜间呼吸消耗增加, 不利于干物质的积累(董文军等, 2011)。

气候变暖对大豆的影响与种植作物的地区的温度状况有关(Abou-Hussein, 2012)。在比本研究区域气温低的哈尔滨及以北气温较低的高寒地区, 气候变暖将使大豆的产量大幅提高(张桂华等, 2004; 郝兴宇等, 2010)。张晓峰等(2014)的研究表明, 在中国近50年气候变化的背景下, 大豆的高产趋势从南向北逐渐增加。王永兴和严火其(2014)的研究表明, 增

温幅度小时, 作物的产量变化不稳定, 温度进一步升高时, 尤其是极端最低气温升高时, 作物迅速增产。可见, 在未来气候变暖的情景下, 我国北部地区比本研究所在区域更具备种植大豆的优势。

两种升温模式均显著降低了大豆植株全生育期耗水量(ET), 这与很多研究结果一致, 比如王石立等(1996)的研究表明增温使作物总耗水量减少, Lovelli等(2010)的研究表明当温度增加2 °C, 作物耗水会成比例上升, 但是当温度超过作物的最适温度, 气孔导度进一步降低, 蒸散也会随之减少。与前人不同, 本研究比较了两种升温模式耗水量的差异, ETa处理的蒸散量(ET)显著低于ETs, 此差异主要是由于ETa的蒸腾速率比ETs高8.1%, 而叶面积比ETs低17%。

ET由蒸发(E)和蒸腾(T)两部分组成。本研究中, 取决于自然环境状况的E在各处理间均没有显著差异, ET的变化主要取决于与作物生理生态密切相关的T。在开放的露天环境中, 温度越高, 蒸发量越大。但是在封闭的培养箱中, 蒸发不仅与温度有关, 还与环境中气体的气态密度有关(周祥等, 2006)。温度升高, 使水汽压升高, 水蒸气浓度升高, 而空气湿度越大, 越接近饱和, 蒸发越慢, 所以各温度情景间E的差异并不显著。若要探寻升温模式对E的影响, 最好在开放的环境下进行试验研究。

不对称升温情景对大豆的水分效率(WUE和TE)影响显著。本研究中大豆耗水量的差异主要来自大豆叶片蒸腾的差异, 因而处理间WUE与TE的变化一致。ETs与CON的水分效率没有显著差异, 说明在过去30年试验区大豆生育期的平均温度状况26 °C/16 °C的背景下, 昼夜温度平均升高3 °C对作物产量和耗水量的影响程度是相近的。植物白天和夜晚进行的生理活动是有差异的, 白天主要进行光合等吸收能量、固定物质的过程, 夜晚主要是呼吸作用。ETs与ETa处理间的差异在于昼夜升温幅度的不同, ETa的水分效率显著低于ETs, 应该由于夜晚升温幅度大, 对呼吸作用的副作用大于对称升温的副作用(刘建栋等, 2002)。

4 结论

本研究比较了ETa和ETs对大豆生长和水分利用影响的差异, 其中ETa处理的产量和产量构成组分、生物量和收获指数、耗水量均显著低于ETs处

理。如果采用过去40年普遍开展的对称性升温的研究结果进行气候变暖的模拟研究,会低估正在发生的气候变暖对大豆生长和产量的不利影响,高估其对耗水量的影响。未来不对称性气候变暖条件下比对称性气候变暖条件下所预期的产量要低,水分利用效率的下降是其原因之一。

基金项目 国家自然科学基金(31272258和31170415)和国家科技支撑计划(2012BAD0802和2013BAD05B02)。

致谢 感谢中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心李霞老师和王幼宁老师在大豆栽培方面的指导与帮助。

参考文献

- Abou-Hussein SD (2012). Climate change and its impact on the productivity and quality of vegetable crops (review article). *Journal of Applied Sciences Research*, 8, 4359–4383.
- Brown RA, Rosenberg NJ (1997). Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climate factors and CO₂ concentrations a simulation study applying EPCI to the central USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, 83, 171–203.
- Chu YM, Yang J, Li JJ, Peng PH (2014). Three warming scenarios differentially affect themorphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides*. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 1411–1417. (in Chinese with English abstract) [褚延梅, 杨健, 李景吉, 彭培好 (2014). 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响. *生态学报*, 34, 1411–1417.]
- Dhakhwa GB, Campbell CL, Le Duc SK, Cooter EJ (1997). Maize growth: Assessing the effects of global warming and CO₂ fertilization with crop models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87, 253–272.
- Dong WJ, Deng AX, Zhang B, Tian YL, Chen J, Yang F, Zhang WJ (2011). An experimental study on the effects of different diurnal warming regimes single cropping rice with free air temperature increased (ATI) facility. *Journal of Ecology*, 31, 2169–2177. (in Chinese with English abstract) [董文军, 邓艾兴, 张彬, 田云录, 陈金, 杨飞, 张卫健 (2011). 开放式昼夜不同增温对单季稻影响的实验研究. *生态学报*, 31, 2169–2177.]
- Hao XY, Han X, Ju H, Lin RD (2010). Impact of climatic change on soybean production: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 2697–2706. (in Chinese with English abstract) [郝兴宇, 韩雪, 居辉, 林而达 (2010). 气候变化对大豆影响的研究进展. *应用生态学报*, 21, 2697–2706.]
- Hou WJ, Geng T, Chen Q, Chen CQ (2015). Impacts of climate warming on growth period and yield of rice in Northeast China during recent tow decades. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26, 249–259. (in Chinese with English abstract) [侯雯嘉, 耿婷, 陈群, 陈长青 (2015). 近20年气候变暖对东北水稻生育期和产量的影响. *应用生态学报*, 26, 249–259.]
- IPCC (2007). *Fourth Assessment Report: Climate Change (AR4)*. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm. Cited: 2007-12-17.
- Jiang XD, Su HB, Wang XM, Wan CJ, Hao MJ, Hao MJ (2014). Effect of asymmetric between day and night warming on soil moisture in wheat field. *Journal of Irrigation and Drainage*, 33(4/5), 283–286. (in Chinese with English abstract) [江晓东, 苏海报, 王晓梅, 万长健, 韩小梅, 郝鸣驹 (2014). 昼夜不对称增温对麦田土壤水分的影响. *灌溉排水学报*, 33(4/5), 283–286.]
- Karl TR, Jones PD, Knight RW, Kukla G, Plummer N, Razuvayev V (1993). A new perspective on recent global warming asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74, 1007–1023.
- Klein JA, Harte J, Zhao XQ (2005). Dynamic and complex microclimate responses to warming and grazing manipulations. *Global Change Biology*, 11, 1440–1451.
- Lai SK, Zhuang ST, Wu YZ, Wang YX, Zhu JG, Yang LX, Wang YL (2015). Impact of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on growth and development of super rice. *China Journal of Ecology*, 34, 1253–1262. (in Chinese with English abstract) [赖上坤, 庄时腾, 吴艳珍, 王云霞, 朱建国, 杨连新, 王余龙 (2015). 大气CO₂浓度和温度升高对超级稻生长发育的影响. *生态学杂志*, 34, 1253–1262.]
- Liu JD, Wang JS, Yu Q, Bi JJ (2002). Influence of temperature and concentration of CO₂ on crop respiration. *Agricultural Meteorology of China*, 23(1), 1–3. (in Chinese with English abstract) [刘建栋, 王吉顺, 于强, 毕建杰 (2002). 作物夜间呼吸作用与温度、CO₂浓度的关系. *中国农业气象*, 23(1), 1–3.]
- Liu YJ, Tao FL (2013). Response of crop water use efficiency to elevated temperature and CO₂ concentration. *Progress in Geography*, 32, 416–424. (in Chinese with English abstract) [刘玉洁, 陶福禄 (2013). 作物水分利用效率对温度和CO₂浓度升高的响应研究进展. *地理科学进展*, 32, 416–424.]
- Lobell DB, Field CB (2007). Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2, 625–630.
- Lovelli S, Perniola M, Tommaso TD, Ventrella D, Moriondo M, Amato M (2010). Effects of rising atmospheric CO₂ on crop evapotranspiration in a Mediterranean area. *Agricultural Water Management*, 97, 1287–1292.

- Rosenzweig C, Tubiello FN (1996). Effects of changes in minimum and maximum temperature on wheat yields in the central US: A simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80, 215–230.
- Shi JJ, Jiang XD, Qiu SQ (2015). Effects of different temperature treatments on growth and yield of wheat. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 43, 82–84. (in Chinese with English abstract) [石姣姣, 江晓东, 邱思齐 (2015). 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, 43, 82–84.]
- Su Y, Zhang YF, Mou WY, Xing GN, Chen FJ (2016). Morphological traits and yield of sobean under elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 2597–2606. (in Chinese with English abstract) [苏营, 张逸飞, 牟文雅, 邢光南, 陈法军 (2016). 大豆主要株型和产量指标对大气CO₂和温度升高的响应. 生态学报, 36, 2597–2606.]
- Tan KY, Fang SB, Ren SX, Zhang XS (2009). Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature in global warming and its effects on agriculture ecosystems. *Journal of Applied Meteorological Science*, 20, 634–641. (in Chinese with English abstract) [谭凯炎, 房世波, 任三学, 张新时 (2009). 非对称升温对农业生态系统影响研究进展. 应用气象学报, 20, 634–641.]
- Tian YL, Zheng JC, Zhang B, Chen J, Dong WJ, Yang F, Zhang WJ (2010). Design of free air temperature increasing (FATI) system for upland with three diurnal warming scenarios and their effects. *Scientia Agricultura Sinica*, 43, 3724–3731. (in Chinese with English abstract) [田云录, 郑建初, 张彬, 陈金, 董文军, 杨飞, 张卫健 (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, 3724–3731.]
- Wan YF, You SC, Li YE, Wang B, Gao QZ, Qing XB, Liu S (2014). Influence of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on growth and yield of early rice. *Journal of Agro-Environment Science*, 33, 1693–1698. (in Chinese with English abstract) [万运帆, 游松财, 李玉娥, 王斌, 高清竹, 秦晓波, 刘硕 (2014). CO₂浓度和温度升高对早稻生长及产量的影响. 农业环境科学学报, 33, 1693–1698.]
- Wang H, Greenberg SE (2007). 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*, 67, 136–142.
- Wang SL, Zhao YX, Wang FT (1996). Study on the possible impact of climate warming on the evapotranspiration and yield of winter wheat. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 17(4), 18–22. (in Chinese with English abstract) [王石立, 赵艳霞, 王馥棠 (1996). 气候变暖对小麦蒸散和产量的可能影响. 中国农业气象, 17(4), 18–22.]
- Wang YW, Li PC, Cao XF, Wang XJ, Zhang AM, Li X (2009). Identification and expression analysis of miRNAs from nitrogen-fixing soybean nodules. *Biochemical and Biophysical Research Communication*, 378, 799–803.
- Wang YX, Yan HQ (2014). Effect of climate change on rice production in Heilongjiang Province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 30(9), 92–98. (in Chinese with English abstract) [王永兴, 严火其 (2014). 气候变暖对黑龙江省水稻生产的影响初探. 中国农通学报, 30(9), 92–98.]
- Wei JL, Pan XH, Deng QH (2010). Effects of nighttime temperature increase on the yield of double season rice. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 2793–2798. (in Chinese with English abstract) [魏金连, 潘晓华, 邓强辉 (2010). 夜间温度升高对双季早晚稻产量的影响. 生态学报, 30, 2793–2798.]
- Yu JY, He Y, Zhao ZF, Wang D (2007). Study on the correction coefficient of crop leaf area by the method of length and width. *Jiangsu Agricultural Sciences*, (2), 37–39. (in Chinese with English abstract) [郁进元, 何岩, 赵忠福, 王栋 (2007). 长宽法测定作物叶面积的校正系数研究. 江苏农业科学, (2), 37–39.]
- Zhang GH, Wang YQ, Zheng H, Pan HS (2004). Effect of atmospheric humidity on water evaporation in dry hot valley of Yuanmou. *Journal of Natural Disasters*, 13(3), 95–100. (in Chinese with English abstract) [张桂华, 王艳秋, 郑红, 潘华盛 (2004). 气候变暖对黑龙江省作物生产的影响及其对策. 自然灾害学报, 13(3), 95–100.]
- Zhang XF, Wang HZ, Liu LS, Xu XL (2014). Spatial-temporal characteristics of soybean production potential change under the background of climate change over the past 50 years in China. *Progress in Geography*, 33, 1414–1423. (in Chinese with English abstract) [张晓峰, 王宏志, 刘洛神, 徐新良 (2014). 近50年来气候变化背景下中国大豆生产潜力时空演变特征. 地理科学进展, 33, 1414–1423.]
- Zhou X, Wang KQ, Zhong ZF (2006). Effect of atmospheric humidity on water evaporation in dry hot valley of Yuanmou. *Modern Agricultural Science and Technology*, 8, 191–194. (in Chinese with English abstract) [周祥, 王克勤, 仲增福 (2006). 大气湿度对元谋干热河谷水水面蒸发的影响. 现代农业科技, 8, 191–194.]

责任编辑: 刘菊秀 责任编辑: 李 敏



植物生态学报官网



微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布



微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览