

开放式增温对东北稻田生态系统作物生长与产量的影响^{*}

张佳华^{1,2,*} 张健南³ 姚凤梅⁴ 门艳忠⁵ 高西宁³

(¹中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094; ²中国气象科学研究院, 北京 100081; ³沈阳农业大学, 沈阳 110866; ⁴中国科学院大学, 北京 100049; ⁵黑龙江科技学院, 哈尔滨 150030)

摘要 全球变暖在高纬度和气候凉爽地区更为明显, 并且具有一定的不确定性。为了明确未来气候背景下作物的适应趋势, 在中国东北哈尔滨地区设立红外增温模拟试验站, 利用开放式增温系统(FATI)对东北水稻进行2个温度梯度的模拟增温试验。结果表明: 增温情况下, 东北水稻生长和发育加快、始穗期提前, 但收获期延后; 分蘖数增加, 单分蘖产量下降; 植株高度增加, 乳熟期后植株出现倾倒; 叶面积增加, 单叶叶长扩展; 与对照比较, 2种增温梯度下产量差异不同, W_1 (每组1根红外灯管)增温产量增加, W_2 (每组2根红外灯管)增温模式下产量略有下降(未到达显著); 地上有机物分配及穗粒结构较对照存在差异, 节宽减小, 壁厚减小, 千粒重减少, 籽粒含水量增加; 叶绿素增加、单叶净光合速率增大。

关键词 开放式增温系统; 东北地区; 稻田生态系统; 水稻; 作物生长与产量

中图分类号 S161 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)1-0015-07

Effects of free air temperature increasing on the rice growth and grain yield in Northeast China. ZHANG Jia-hua^{1,2,*}, ZHANG Jian-nan³, YAO Feng-mei⁴, MEN Yan-zhong⁵, GAO Xi-nin³ (¹Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; ²Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; ³Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; ⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁵Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150030, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(1): 15-21.

Abstract: It is recognized that global warming is more obvious in high latitude and cool climate regions, and shown definite uncertain features. In order to clarify the adaptation trends of the crops to future climate scenarios, a simulation experiment station of infrared temperature increasing was set up in Harbin of Northeast China, and the free air temperature increasing (FATI) system was applied to simulate the effects of increased temperature on rice grow and yield. Two temperature gradients were installed, *i. e.*, each set with one infrared lamp (W_1), and each set with two infrared lamps (W_2). Under increased temperature, the rice growth and development accelerated, and the begining-spike period was in advance while the harvest period delayed. The tiller number increased while the yield per tiller declined, the plant height increased but the plant appeared lodging at milk-ripe stage, and the leaf area increased and the single leaf showed an extended length. As compared with the control, the rice yield differed under two warming gradients, *i. e.*, increased under W_1 but slightly decreased under W_2 . There existed differences with the control in the aboveground organic matter distribution and the spike grain structure under increased temperature. Under temperature increasing, the rice 1000-grain weight reduced, whereas the grain moisture content, leaf chlorophyll content, and leaf net photosynthetic rate increased.

Key words: free air temperature increasing (FATI) system; Northeast China; rice field ecosystem, rice; crop growth and yield.

* 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB951302)、公益类行业(气象)专项(GYHY201106027)、中国科学院百人计划项目(全球变化下干旱及衍生灾害遥感及评估)和中国气象科学研究院创新团队项目(2011Z02)资助。

* * 通讯作者 E-mail: jhzhang@ceode.ac.cn; zhangjh@cams.cma.gov.cn

收稿日期: 2012-08-09 接受日期: 2012-10-31

IPCC 第4次报告指出,1906—2005年的100年间,全球平均地表温度上升了(0.74 ± 0.18) $^{\circ}\text{C}$,其中后50年升温速率为每10年(0.13 ± 0.03) $^{\circ}\text{C}$,几乎是100年总体升温速率(每10年(0.07 ± 0.02) $^{\circ}\text{C}$)的2倍。预计到2090—2099年全球平均温度将升高1.8~4.0 $^{\circ}\text{C}$,变化幅度在1.1~6.4 $^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2007)。然而,观测到的气候变暖在季节和区域上的分布是不均一的(Pritchard & Amthor, 2005)。北半球观察到的升温主要表现在春季,秋、冬、夏季增幅较小。高纬度地区温度上升高于低纬度地区(Trenberth *et al.*, 2005)。有模型预测到2050年中国平均气温可能升高1.2~2.0 $^{\circ}\text{C}$,到2100年可能升高2.2~4.2 $^{\circ}\text{C}$ (秦大河, 2005)。

水稻是世界上最重要的粮食作物之一,占全球谷类作物种植面积的1/3,在南北纬35°和海拔0~2000 m广泛种植(Yoshida, 1981)。在中国,水稻更是作为第一大粮食作物,稻谷产量占全国谷物总产的40%以上(孟亚利和周志国, 1997)。有大量研究表明,气候变暖对水稻的生育进程和产量存在影响(Yao *et al.*, 2007; 姚凤梅和张佳华, 2008; 江敏等, 2010)。东北是中国重要的粮食生产基地,已成为世界最大的以种植早、中熟粳稻为主的优质稻生产区(中国农业科学院, 1986)。同时,东北地区气温呈现出明显上升趋势,1.43 $^{\circ}\text{C}$ 的增温率较全国百年增温率(0.44 $^{\circ}\text{C}$)高出3倍(孙凤华等, 2006)。

目前,气候变化对作物的影响研究主要有模型预测、卫星遥感和环境模拟等方法,国内外学者对此做了大量工作(姚凤梅和张佳华, 2009; Yao *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2011)。由于全球变暖主要是由温室气体反射的长波辐射(主要是红外线)增强而引起的,野外开放式红外增温装置(free air temperature increasing, FATI)就成为了一种研究气候变化和生态系统关系的有效方法(牛书丽等, 2007)。Harte等(1995)首先应用红外线辐射器在美国科罗拉多州亚高山草甸进行生态系统增温实验, Wan等(2005)在内蒙古建立了中国首个草地FATI试验平台。国内学者在南京进行了农田开放式增温试验,试验结果表明,增温条件下水稻产量下降,而小麦产量增加(田云录等, 2010, 2011; 张彬等, 2010; 董文军等, 2011a, 2011b; Dong *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2011)。

温度的升高能促进大多数植物的生理过程,但响应关系不是线性的。在那些温度接近水稻生长最

高温度的气候温暖地区,过高的温度会严重减少稻米生产率(田小海等, 2007);一项对于水稻产量历史记录的研究发现,在气候温暖的菲律宾水稻产量已经下降了(Peng *et al.*, 2004)。另一方面,在气候比较凉爽的日本北部,生物量和产量不断增加(Shimono, 2008)。鉴于FATI试验对中国寒冷的东北地区水稻研究中的空缺,在黑龙江建立了水田开放式增温试验点,进行水稻对增温的响应研究,拟为全球气候变化背景下的中国东北水稻生产应对提供理论参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

本实验于2011年在东北农业大学实验基地进行($125^{\circ}42'E$ — $130^{\circ}10'E$, $44^{\circ}04'N$ — $46^{\circ}40'N$)。该区域为中温带大陆性季风气候,气候四季分明,冬季漫长而寒冷,夏季短暂而炎热,春、秋季气温升降变化快,属于过渡季节,时间较短;该区年均温3.5 $^{\circ}\text{C}$,年平均降水量530 mm。研究试验品种为“东农425”,于5月29日移栽进小区,小区为2 m \times 2 m保水池,栽植密度为行距30 cm,穴距10 cm,行为南北走向,每池126穴,每穴1株,无空穴。移栽时稻苗大多为四叶一心,水深保持在5 cm以上直到收获前25 d停水。本年度气象条件有利于水稻生长,生殖生长期没有遭到寒流危害。

1.2 试验处理

试验装置采用农田开放式增温系统(FATI),参考了国内外同类装置的使用方法,结合中国未来气候变化的模型预测,在2 m \times 2 m的保水池内架设3组红外灯管,架设方向与水稻行向垂直,为东西走向。试验设置一个对照(CK)和2个增温梯度(W_1 , 每组1根红外灯管; W_2 , 每组两根红外灯管),处理小区之间的每小时增加能量梯度为CK : W_1 : W_2 = 0 : 3 kW : 6 kW。灯管架设高度随水稻生育期改变做出调节(拔节期前, 120 cm; 拔节抽穗期, 140 cm, 齐穗期后, 160 cm)。综合考虑全球气候变化情况和已有的装置效果研究,试验采用全天不间断增温模式(雨天为防止漏电伤人会断电),移栽21 d后开始供电,动力为380 v交流电,收获时停止并拆除设备。

1.3 田间观测与测定

在供电10 d后(6月29日)开始生长状况调查和基础指标测定,每天对设备运行状态、保水池水位至少一次检查,记录水稻长势、株高、分蘖状况等。

此后每 5 d 测定试验指标 (生物量每生育期测定一次), 叶绿素含量使用 SPAD-502 叶绿素仪测定, 数据来源于水稻上数第一片完全展开叶; 净光合速率使用 LI-6400 便携式光合仪 (LI-COR 公司), 自然光源, 田间外源 CO₂ 供应, 数据来源于水稻上数第一片完全展开叶; 叶面积采用传统直尺整株测量, 取水稻常用系数 0.75; 茎宽及壁厚用游标卡尺测定; 水稻生物量用精度 0.01 g 电子天平, 叶片烘干 10 h, 茎鞘 24 h, 籽粒 72 h, 含水量通过干鲜重比得到, 籽粒重全部换算成 14% 水分含量; 小区周围两行两列定为边界层, 不在其中取样, 取样时样品在各池中的相同位置, 收获时理论产量调查每池取 0.8 m×0.8 m; 测定指标 3 次以上重复。生育期按苗期、分蘖期、拔节孕穗期、抽穗期、灌浆期、乳熟期、腊熟期和收获期划分。

1.4 数据统计分析

本文采用 Z-检验方法进行每组观测数据的平均数差异的显著性检验, 其中数据的波动程度采用方差分析。每组平均数的离散程度用标准误差表示。

2 结果与分析

2.1 开放式增温对东北水稻生育期与分蘖数的影响

水稻抽穗期在 W₁、W₂ 处理与 CK 下的水稻冠层上气温的日变化曲线 (图 1) 显示, 全天平均增幅为 W₁ 是 2.32 °C, W₂ 是 3.57 °C; 夜间平均为 W₁ 是 2.69 °C, W₂ 是 3.95 °C; 白天平均为 W₁ 是 1.94 °C, W₂ 是 2.97 °C。

增温处理后, 与光合作用密切相关的叶温指标表现为午后差异较小, 早晚差异较大 (图 2)。在 8:00—16:00, W₁ 和 W₂ 模式下叶温较对照平均高 1.04 °C 和 1.27 °C。

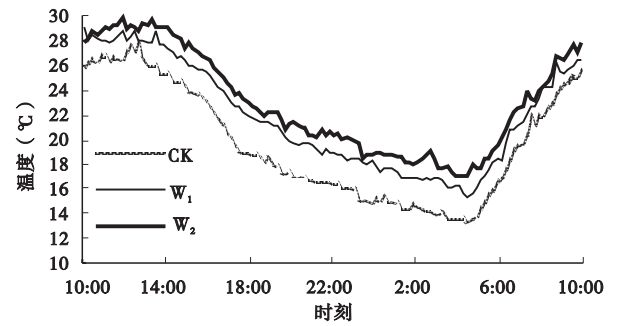


图 1 梯度增温水稻冠层上空气温度日变化
Fig.1 Diurnal variation of air temperature over rice canopy under different increasing temperature gradient

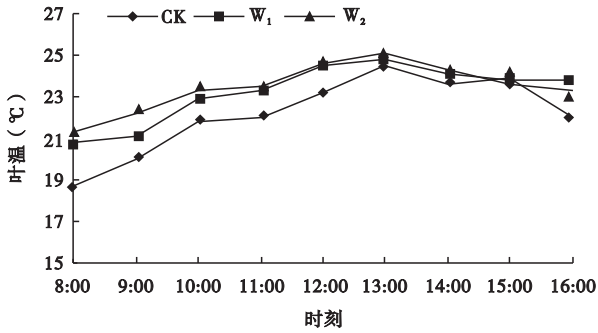


图 2 开放式增温处理下水稻叶温日变化曲线
Fig.2 Diurnal variation of rice canopy temperature under different increasing temperature gradient

试验增温对东北水稻生长发育具有促进作用 (表 1), W₁ 和 W₂ 处理模式使“东农 425”品种水稻从移栽到始穗期分别缩短了 3 和 4 d, 并且在此后的生长过程中, 这一趋势进一步加大, 到齐穗期差异增加到 4 和 5 d, 但到收获期时, 趋势逆转, 增温处理下“东农 425”品种水稻整个生育天数在各小区平均增加 2 d。主要原因哈尔滨寒温带水稻收获期的温度偏低, 增温是对作物有增加植株活力, 延缓了衰亡的趋势。这样的结果也被 Ishii 等 (2011) 发现。

水稻分蘖既受遗传因素的调控, 又受生长环境和栽培措施影响, 外部环境因素中影响较大的就是气温。由图 3 可知, 增温处理对“东农 425”品种水稻分蘖状况影响明显, 与对照相比, W₁ 和 W₂ 模式中

表 1 开放式增温处理对东北水稻生育期的影响
Table 1 Differences of growing stages under the free air temperature increasing (FATI)

| 品种 | 处理 | 移栽日期 | 开始处理日期 (DAT) | 始穗日期 (DAT) | 齐穗日期 (DAT) | 收获日期 (DAT) |
|--------|----------------|------|--------------|------------|------------|------------|
| 东农 425 | CK | 5-29 | 6-20(21) | 8-11(73) | 8-22(84) | 9-27(119) |
| | W ₁ | 5-29 | 6-20(21) | 8-8(70) | 8-18(80) | 9-29(121) |
| | W ₂ | 5-29 | 6-20(21) | 8-7(69) | 8-17(79) | 9-29(121) |

始穗期是以 20% 水稻穗子从剑叶中露出为准, 齐穗期是以水稻穗全部抽出时为准。DAT 为移栽后天数。

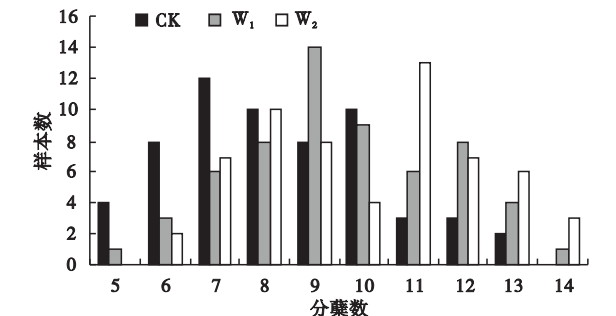


图 3 增温处理下水稻 60 穴样本分蘖数分布频次
Fig.3 Rice tillering number distribution frequency with 60 point samples under temperature increasing

水稻分蘖数都有增加,60 样本平均分蘖差异为 CK : W_1 : W_2 = 8.3 : 9.6 : 10,这一结果也使增温处理区单分蘖生长状况弱于对照区。

2.2 开放式增温对东北水稻地上有机物积累和分配的影响

由图 4 可知,与对照组比较, W_1 和 W_2 模式处理下“东农 425”品种水稻株高分别增加了 15.4 cm 和 21.4 cm,从分蘖后期到灌浆期株高差异趋势一致,都表现高温下水稻纵向生长强烈。在纵向生长加强的同时,增温处理也使叶面积得到扩展(图 5), W_1 和 W_2 模式处理下水稻叶面积指数 LAI(叶面积/小区面积)分别增加了 54.2% 和 57.3%。对每小区 50 片剑叶抽样调查的结果显示,增温处理使剑叶面积增加(CK : W_1 : W_2 = 31.25 : 33.07 : 33.61 cm²),剑叶面积差异来源于叶长增加(CK : W_1 : W_2 = 27.54 : 29.72 : 30.91 cm),而剑叶宽度与对照相比均略有所减小。

增温处理对东北水稻地上干重影响显著。与对照区组相比,在整个生育期内, W_1 和 W_2 模式处理下“东农 425”品种水稻地上部分干重都表现出增加趋

势,这种趋势在生殖生长后期趋于缓和, W_1 和 W_2 模式在收获时地上干重差异不显著($P>0.05$)(图 6)。由收获前一周调查结果(表 2)可知,温度升高可以影响“东农 425”品种水稻地上有机物分配,在整株水平上, W_1 和 W_2 模式地上生物量都高于对照,两处理之间差异不显著($P>0.05$)。每株(穴)茎鞘重和叶重差异不显著($P>0.05$),但单片剑叶重与对照比差异均显著。本研究调查取样分蘖数差异为 CK : W_1 : W_2 = 8.2 : 9.5 : 10,增温处理使单分蘖水平的生长减弱, W_2 模式单分蘖生物量下降达到显著水平。

2.3 开放式增温对东北水稻光合特性的影响

与对照组相比,开放式增温处理下,“东农 425”品种水稻叶绿素显著增加,其中 W_2 模式增幅较大(图 7)。各生育期净光合速率差异表现为增温区显著高于对照, W_1 模式在乳熟期之前较高,而乳熟期之后较 W_2 模式略低(图 8)。在净光合速率的日变化中,增温处理区均高于对照区,差异趋势表现为从小变大再减小(图 9)。

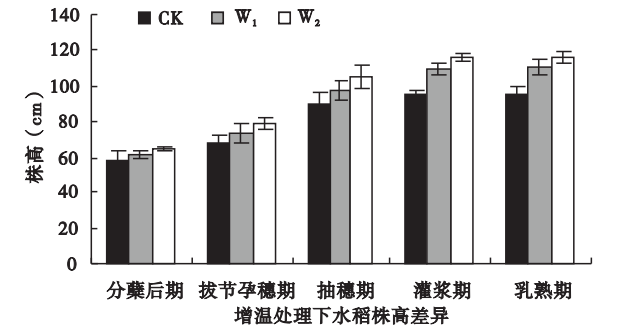


图 4 开放式增温对水稻各生育期株高的影响
Fig.4 Effect of increasing temperature on rice plant height in different growth periods

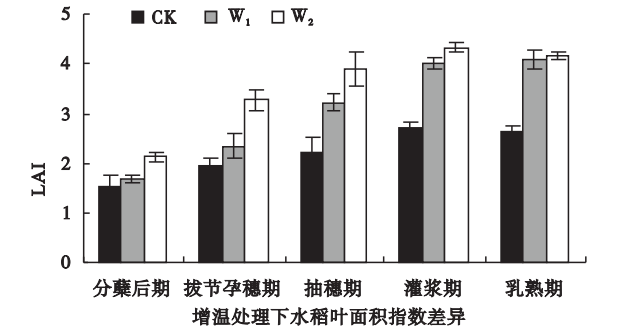


图 5 开放式增温对水稻各生育期叶面积指数(LAI)的影响
Fig.5 Effect of increasing temperature on rice LAI in different growth periods

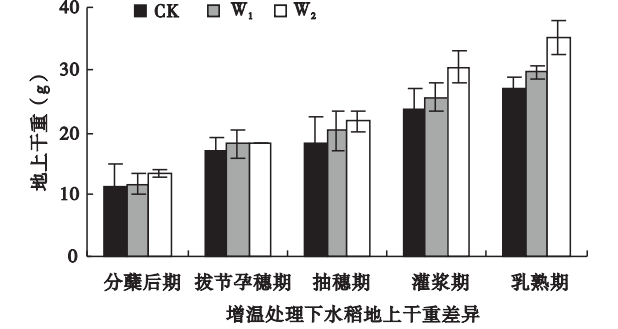


图 6 开放式增温对水稻各生育期地上干重的影响
Fig.6 Effect of increasing temperature on rice plant dry weight in different growth periods

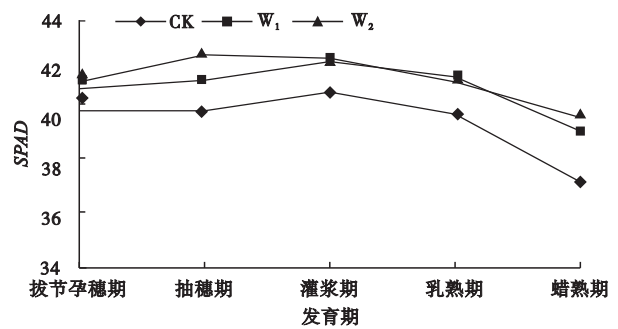


图 7 开放式增温对水稻各生育期 SPAD 值影响
Fig.7 Effect of increasing temperature on SPAD in different rice growth periods

表 2 开放式增温处理对东北水稻地上有机物分配的影响
Table 2 The effect of increasing temperature on distribution of above-ground organic matter of rice

| 处理 | 株重 (g·穴 ⁻¹) | 穗重 (g·穴 ⁻¹) | 茎鞘重 (g·穴 ⁻¹) | 叶重 (g·穴 ⁻¹) | 单分蘖重 (g) | 剑叶重 (g·片 ⁻¹) |
|----------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------|-----------------------------|
| CK | 41.02±2.22 a | 22.85±1.43 a | 14.54±1.22 a | 4.25±0.61 a | 4.82±0.67 a | 0.17±0.00 a |
| W ₁ | 42.47±3.01 b | 23.92±1.76 b | 14.32±0.83 a | 4.67±0.64 a | 4.79±0.61 a | 0.20±0.00 b |
| W ₂ | 42.56±1.23 b | 23.68±0.75 b | 14.19±1.02 a | 4.69±0.53 a | 4.12±0.62 b | 0.21±0.00 b |

同一列不同字母代表达到 5% 显著水平 ($P<0.05$)。

表 3 开放式增温处理对水稻穗粒结构的影响
Table 3 Effect of increasing temperature on rice grain structure

| 处理 | 一次枝梗数 | 一次枝梗实粒数 | 一次枝梗空秕粒数 | 一次枝梗实粒重(g) | 二次枝梗数 | 二次枝梗实粒数 | 二次枝梗空秕粒数 | 二次枝梗实粒重(g) |
|----------------|--------|---------|----------|------------|--------|---------|----------|------------|
| CK | 10.1 a | 48.8 a | 4.2 a | 1.7 a | 20.4 a | 54.8 a | 4.1 a | 1.8 a |
| W ₁ | 9.5 b | 48.1 a | 4.4 b | 1.6 a | 20.1 a | 51.6 b | 5.4 b | 1.6 b |
| W ₂ | 9.4 b | 44.2 b | 4.4 b | 1.4 b | 19.2 b | 46.0 c | 7.4 c | 1.3 c |

同一列不同字母代表达到 5% 显著水平 ($P<0.05$), 籽粒重统一换算成 14% 含水量。

表 4 开放式增温处理对水稻产量构成要素的影响
Table 4 Effect of increasing temperature on rice yield components

| 处理 | 有效穗数 (穴) | 穗长 (cm) | 穗实粒数 | 实粒率 (%) | 千粒重 (g) | 含水量 (%) | 理论产量 (kg·hm ⁻²) |
|----------------|-------------|------------|---------|------------|------------|------------|--------------------------------|
| CK | 8.3 a | 24.1 a | 103.6 a | 92.8 a | 33.7 a | 14.4 a | 5048.4 a |
| W ₁ | 9.6 b | 24.2 a | 96.7 b | 91.2 ab | 31.4 a | 19.4 b | 5432.3 b |
| W ₂ | 9.7 b | 24.1 a | 90.2 c | 88.4 b | 28.6 b | 19.9 b | 4987.3 a |

同一列不同字母代表达到 5% 显著水平 ($P<0.05$), 籽粒重统一换算成 14% 含水量。

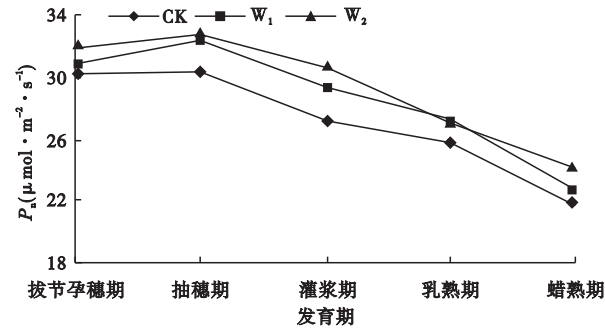


图 8 开放式增温对水稻各生育期净光合速率(P_n)的影响
Fig.8 Effect of increasing temperature on net rice photo-synthetic rate in different rice growth periods

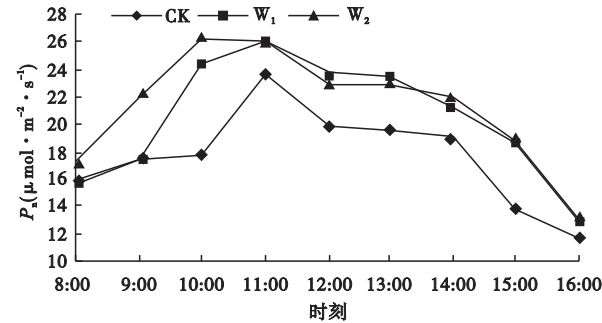


图 9 开放式增温处理下水稻净光合速率(P_n)日变化
Fig.9 Effect of increasing temperature on diurnal varia-tion of rice net photosynthetic rate

2.4 开放式增温对东北水稻产量及构成要素的影响

开放式增温处理影响水稻穗粒结构,与对照组相比,温度升高使水稻枝梗数减少、实粒数减少、空秕粒增加、实粒重减少,其中 W₂ 模式降幅较大,二次枝梗较一次枝梗降幅大(表 3)。温度升高使水稻有效穗数增加、穗实粒数减少、千粒重下降、籽粒含水量增加,与对照相比,两种增温下水稻穗长差异均不显著, W₁ 模式理论产量较对照增加 7.6%, W₂ 模式较对照下降 1.2%, 未到显著水平(表 4)。

3 讨 论

3.1 温度升高对东北水稻结构指标的影响

在开放式增温处理下,较高温度明显促进了水稻营养体生长及分蘖加强,增温区水稻高分蘖频次较对照增多, W₁ 和 W₂ 每平米分蘖数较对照增幅 13.6% 和 15.4%;国内也有关于高纬度地区增温促分蘖的报道(丁兆禄等,1999;李景蕪等,2010;佟立杰,2010)。分蘖的增加及水稻在较高温度下叶扩展的综合作用,导致 LAI 增幅达 54.2% (W₁) 和 57.3% (W₂),这与 Shimono 等(2002)的研究结果相似。温度升高的另一个重要影响就是植株高度增幅较大, W₁ 模式为 16.2%, W₂ 模式为 22.5%, 水稻植

株高度的增长大大增加了倒伏风险。大量研究表明:株高与倒伏指数呈极显著正相关(李荣田等,1996;杨惠杰等,2000;董明辉等,2003)。本试验在水稻收获时, W_2 增温模式区有近一半水稻倾倒,最大植株倾角达 50° ,同时还发现由于稻穗下垂严重,导致稻米灌浆不充分,空秕粒增加,千粒重下降。在高度增加的同时,茎粗下降,其中 W_2 模式基部节长轴平均降幅13.3%,短轴降幅15.2%,壁厚下降25.8%;节伸长,其中 W_1 和 W_2 模式倒一节比较对照组增幅大,达16.7%和21.1%。在水稻地上有机物分配上,升温导致单分蘖生物产量下降、谷草比减小、冠层增大。

3.2 温度升高对东北水稻功能指标的影响

增温处理下水稻净光合速率增大明显,在灌浆期 W_1 和 W_2 模式较对照增幅8.1%和12.5%;净光合速率的增加主要来源于高叶温和高叶绿素含量。植物的光合作用在一定温度范围是随温度的升高而升高的(Lambers *et al.*, 2008),Reddy 等(1995)研究发现,昼夜温度为 $30/22^\circ\text{C}$ 以下时,棉花净光合速率随温度升高而增大。整个生育期中,水稻SPAD值不同处理的差异显著,在灌浆期 W_1 和 W_2 模式较对照组增幅3.2%和3.4%,并且在乳熟期之后差异加大,而对照组水稻叶片SPAD值下降较快。水稻SPAD能反映出叶片的衰老速度,结合试验中水稻生育期调查,我们认为,温度升高会延缓水稻植株衰老;有研究也表明,营养生长期升温后停止处理会加快衰老(Ishii *et al.*, 2011)和生长季SPAD与水温存在响应关系(Shimono, 2008)。

3.3 温度升高对东北水稻产量形成的影响

增温处理下水稻生物产量增大,最终收获时 W_1 和 W_2 较对照地上干重增幅4.7%和4.6%,而在抽穗期时差异为11.2%和18.9%。水稻生物量对温度的敏感性受所在生育期影响。在冠层郁闭后,从上部辐射增温会因为增强呼吸损耗而降低生物量和产量(Matsushima *et al.*, 1964; Arai-Sanoh *et al.*, 2010)。在冠层郁闭之前的高温处理,会增加叶面积,加强冠层生长,从而增加生物量。研究表明,稻谷产量与生物产量呈显著或极显著的正相关(张佳华, 2001)。本研究中, W_1 模式水稻增产7.6%, W_2 模式水稻产量下降1.2%。产量的增加主要源于分蘖数增加、叶绿素增加、净光合速率增大等原因,而减产主要源于植株倾倒、群体呼吸加强、灌浆不充分等原因。在对稻米产量构成的调查中发现, W_2 模式

下单穗品质下降较大,空秕率大且实粒的千粒重较对照小15.1%(14%含水量)。

3.4 未来研究建议

本研究结论的两个重要方面是分蘖增多和植株倾倒。分蘖数作为水稻生长状况的基础指标,直接影响生物产量及稻谷产量,本研究关于温度升高对东北水稻分蘖状况的研究还不够细致,在后续研究中需要不断完善;温度升高加强了水稻纵向生长,植株增高导致倾倒,综合考虑未来极端天气增强、部分升温可能引起的东北水稻增产等问题,水稻植株矮化仍将作为育种的重要方向,栽培技术同样要加强抗倒伏研究。本研究的水稻生长过程中,温度升高提高了作物生长速率,在整个生育期内表现为加快生长→正效应下降→延缓衰老;但关于温度升高条件下植株衰老的问题有待继续探讨。此外,考虑高温及大冠层增加了群体呼吸、叶扩展及植株倾倒可能引起群体光合效率下降,以及未来可利用水资源的可能变化,有关群体的光能利用效率及水分利用效率方面有待进一步研究。

参考文献

- 丁兆禄, 邴建国, 崔凤金, 等. 1999. 寒地水稻井水灌溉增温技术及效果. 现代化农业, (3): 6-7.
- 董明辉, 张洪程, 戴其根. 2003. 不同粳稻品种倒伏指数及其相关农艺性状的分析. 吉林农业大学学报, 25(2): 120-123.
- 董文军, 邓艾兴, 张彬, 等. 2011. 开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究. 生态学报, 31(8): 2169-2177.
- 董文军, 田云录, 张彬, 等. 2011. 非对称性增温对水稻品种南粳44米质及关键酶活性的影响. 作物学报, 37(5): 832-841.
- 江敏, 金之庆, 石春林, 等. 2010. 长江中下游地区水稻孕穗开花期高温发生规律及其对产量的影响. 生态学杂志, 29(4): 649-656.
- 李景蕻, 李刚华, 杨从党, 等. 2010. 增加土壤温度对高海拔生态区水稻分蘖成穗及产量形成的影响. 中国水稻科学, 24(1): 36-42.
- 李荣田, 姜延波, 秋太权, 等. 1996. 水稻倒伏对产量影响及倒伏和株高关系的研究. 黑龙江农业科学, (1): 13-17.
- 孟亚利, 周志国. 1997. 结实期温度与稻米品质的关系. 中国水稻科学, 11(1): 51-54.
- 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.
- 秦大河. 2005. 中国气候与环境演变(上卷) 气候与环境演变及预测. 北京: 科学出版社.
- 孙凤华, 袁健, 路爽. 2006. 东北地区近百年气候变化及突变检测. 气候与环境研究, 11(1): 101-107.
- 田小海, 松井勤, 李守华, 等. 2007. 水稻花期高温胁迫研究进展与展望. 应用生态学报, 18(11): 2632-2636.

- 田云录, 陈金, 邓艾兴, 等. 2011. 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*, **22**(3): 681–686.
- 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.
- 佟立杰. 2010. 水温调控对寒地水稻产量影响的研究. *北方水稻*, **40**(2): 1673–6737.
- 杨惠杰, 杨仁崔, 李义珍, 等. 2000. 水稻茎秆性状与抗倒伏能力的关系. *福建农业学报*, **15**(2): 1–7.
- 姚凤梅, 张佳华. 2008. 气候变化对中国粮食产量的影响与模拟. 北京: 气象出版社.
- 姚凤梅, 张佳华. 2009. 1981–2000 年水稻生长季相对极端高温事件及其气候风险的变化. *自然灾害学报*, **18**(4): 37–39.
- 张彬, 郑建初, 田云录, 等. 2010. 农田开放式夜间增温系统的设计及其在稻麦上的试验效果. *作物学报*, **36**(4): 620–628.
- 张佳华. 2001. 自然植被第一性生产力和作物产量估测模型研究. *上海农业学报*, **17**(3): 83–89.
- 中国农业科学院. 1986. 中国稻作学. 北京: 农业出版社.
- Arai-Sanoh Y, Ishimaru T, Ohsumi A, *et al.* 2010. Effects of soil temperature on growth and root function in rice. *Plant Production Science*, **13**: 235–242.
- Dong WJ, Chen J, Zhang B, *et al.* 2011. Responses of biomass growth and grain yield of midseason rice to the anticipated warming with FATI facility in East China. *Field Crops Research*, **123**: 259–265.
- Harte J, Torn MS, Chang FR, *et al.* 1995. Global warming and soil microclimate: Results from a meadow warming experiment. *Ecological Applications*, **5**: 132–150.
- IPCC. 2007. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report. Cambridge, UK: Cambridge University.
- Ishii A, Kuroda E, Shimono H. 2011. Effect of high water temperature during vegetative growth on rice growth and yield under a cool climate. *Field Crops Research*, **121**: 88–95.
- Lamber H, Chapin III FS, Pons TL. 1998. *Plant Physiological Ecology* (Second Edition). New York: Springer-Verlag.
- Matsushima S, Tanaka T, Hoshino T. 1964. Analysis of yield-determining process and its application to yield-prediction and culture improvement of lowland rice. LXX. Combined effects of air-temperatures and water-temperatures at different stages of growth on the grain yield and its components of lowland rice. *Proceeding of the Crop Science Society of Japan*, **33**: 53–58 (in Japanese with English abstract).
- Peng S, Huang J, Sheehy JE, *et al.* 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **101**: 9971–9975.
- Pritchard SG, Amthor JS. 2005. *Crops and Environmental Change*. New York, USA: Food Production Press.
- Reddy VR, Reddy KR, Hodges HF. 1995. Carbon dioxide enrichment and temperature effects on cotton canopy photosynthesis, transpiration, and water-use efficiency. *Field Crops Research*, **41**: 13–23.
- Shimono H, Hasegawa T, Iwama K. 2002. Response of growth and grain yield in paddy rice to cool water at different growth stages. *Field Crops Research*, **73**: 67–79.
- Shimono H. 2008. Impact of global warming on yield fluctuation in rice in the northern part of Japan. *Japan Journal of Crop Science*, **77**: 489–497 (in Japanese with English abstract).
- Trenberth KE, Jones PD, Ambenje P, *et al.* 2007. Observations; Surface and atmospheric climate change// Solomon S, *et al.* Eds. *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: Cambridge University Press.
- Wan SQ, Hui DF, Wallace L, *et al.* 2005. Direct and indirect effects of experimental warming on ecosystem carbon processes in a tallgrass prairie. *Global Biogeochemistry Cycles*, **19**: 1–13.
- Yao FM, Xu, YL, Lin ED, *et al.* 2007. Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China. *Climatic Change*, **80**: 395–409.
- Yao FM, Qin PC, Zhang JH, *et al.* 2011. Uncertainties in assessing the effect of climate change on agriculture using model simulation and uncertainty processing methods. *Chinese Science Bulletin*, **56**: 729–737.
- Yoshida S. 1981. *Fundamentals of Rice Crop Science*. International Rice Research Institute. Los Banos, The Philippines.
- Zhang JH, Yao FM, Li BB, *et al.* 2011. Progress in monitoring high-temperature damage to rice through satellite and ground-based optical remote sensing. *Sciences in China (D)*, **54**: 1801–1811.

作者简介 张佳华, 1966 年生, 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为全球变化的区域响应. E-mail: jhzhzhang@ceode.ac.cn

责任编辑 李凤芹