

FACE 对常规籼稻扬稻 6 号产量形成的影响

刘红江¹, 杨连新¹, 黄建晔¹, 董桂春¹, 朱建国², 刘 钢², 王余龙¹

(1.扬州大学江苏省作物栽培生理重点实验室, 江苏 扬州 225009; 2.中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

摘 要:2006 年利用我国农田开放式空气 CO₂ 浓度增高(FACE)研究平台,以常规籼稻扬稻 6 号为供试材料,设计比大气 CO₂ 浓度(对照,370 μmol·mol⁻¹)高 200 μmol·mol⁻¹ 的 FACE 处理(570 μmol·mol⁻¹)和施 N 量为 125 kg·hm⁻²(LN)、250 kg·hm⁻²(NN)处理,研究其对扬稻 6 号产量形成的影响。结果表明:(1)FACE 处理使扬稻 6 号的产量平均比对照增加 24.1%,其中 LN 处理、NN 处理条件下分别比对照增产 18.0%、31.0%,处理间的差异达极显著水平;(2)FACE 处理使扬稻 6 号单位面积穗数、每穗颖花数、结实率和千粒重平均比对照增加 6.8%、8.3%、4.2%、和 3.2%,除单位面积穗数外,处理间的差异均达显著或极显著水平;(3)FACE 处理使扬稻 6 号生物产量平均比对照增加 21.3%,达极显著水平,对经济系数无明显影响,生物产量的极显著增加是 FACE 水稻产量极显著增加的重要原因;(4)N 处理以及 CO₂×N 的互作效应对扬稻 6 号产量和产量构成因素的影响均未达显著水平。

关键词:常规籼稻;开放式空气 CO₂ 浓度增高(FACE);产量及其构成因素;经济系数

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)02-0299-06

Effect of Free Air CO₂ Enrichment(FACE) on Yield Formation of Indica Rice Cultivar Yangdao 6

LIU Hong-jiang¹, YANG Lian-xin¹, HUANG Jian-ye¹, DONG Gui-chun¹, ZHU Jian-guo², LIU Gang², WANG Yu-long¹

(1.Key Lab of Crop Cultivation & Physiology, Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The Chinese unique Free Air CO₂ Enrichment FACE, 200 μmol·mol⁻¹ higher than ambient AMB research platform was used to investigate the effects of FACE on grain yield formation of indica rice cultivar Yangdao 6 under two levels of N input: Low (LN, 125 kg·hm⁻²) and normal N(NN, 250 kg·hm⁻²) in 2006. The results showed that: (1)FACE increased the grain yield of Yangdao 6 significantly($P<0.01$), with an average increase of 24.1%. For NN and LN-levels, grain yields under FACE were increased by 18.0% and 31.0%, respectively. (2)FACE increased yield components of Yangdao 6, averaging 6.8%, 8.3%($P<0.01$), 4.2%($P<0.01$) and 3.2%($P<0.01$) for panicle number per unit area, spikelet number per panicle, filled grain percentage and 1 000-grain weight, respectively. (3)FACE increased total biomass of Yangdao 6 significantly ($P<0.01$) by an average of 21.3%, while economic coefficient was increased slightly. Grain yield of Yangdao 6 under FACE significantly higher than those under AMB was chiefly resulted from the larger increment of total biomass stimulated by FACE. (4)N and interactions between [CO₂]×N effect were not significant on yield and its components of Yangdao 6.

Keywords: indica rice; free air CO₂ enrichment(FACE); yield and yield components; economic coefficient

有关自由空气中 CO₂ 浓度增加(FACE)对水稻产量及其产量构成因素的影响已经有了几例报道^[1-2]。日本 FACE 研究^[3-5]报道了 FACE 处理对粳稻品种 Aki-

takomachi 产量及其构成因素的影响,我国无锡 FACE 研究^[6-9]报道了 FACE 处理对粳稻品种武香粳 14 产量形成的影响。笔者等^[10-11]利用中日合作建立在我国江都市的 FACE 研究平台,报道了 FACE 处理使三系杂交籼稻汕优 63 产量平均比对照增产 34.1%,处理间的差异达到极显著水平,且 FACE 使三系杂交籼稻产量的增加幅度明显大于前人研究的粳稻品种。到目前为止,在我国水稻生产中具有重要位置,并有耐湿、耐热、耐强光、易落粒和对稻瘟病以及条纹叶枯病抵抗

收稿日期:2008-04-12

基金项目:国家自然科学基金项目(30471013,30671226);国家自然科学基金重大国际合作研究项目(40120140817)

作者简介:刘红江(1979—),男,博士研究生,主要从事水稻栽培生理生态方面的研究。E-mail:Liuhongjiang2004@sohu.com

通讯作者:王余龙 E-mail:ylwang@yzu.edu.cn

性较强等特性的常规籼稻产量对开放式空气中 CO_2 浓度增加的响应尚未见报道。为了明确这一问题,我们于 2006 年在建立在我国江苏省江都市的农田 FACE 研究平台($32^\circ 35.5' \text{N}$, $119^\circ 42' \text{E}$),设计比目前大气 CO_2 浓度(对照, $370 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)高 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的 FACE 处理($570 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$),研究其对我国常规籼稻扬稻 6 号产量及其构成因素的影响,以期对未来大气 CO_2 浓度升高条件下我国水稻品种选育和应用、栽培技术的制订提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 实验方法

本实验于 2006 年在中国水稻 FACE 研究平台上进行。该平台建于江苏省江都市小纪镇良种场实验田中($32^\circ 35.5' \text{N}$, $119^\circ 42' \text{E}$),实验田土壤类型为清泥土,年均降水量 980 mm 左右,年均蒸发量 1 100 mm 左右,年平均温度 14.9°C ,年日照时间 2 100 h 左右,年平均无霜期 220 d,耕作方式为水稻-冬小麦轮作。土壤理化性质为:有机 C $18.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全 N $1.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全 P $0.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全 K $14.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效 P $10.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效 K $70.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,砂粒($2 \sim 0.02 \text{ mm}$) $578.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,粉砂粒($0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$) $285.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,粘粒($<0.002 \text{ mm}$) $136.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,容重 $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,pH 7.2。平台共有 3 个 FACE 实验圈和 3 个对照圈。FACE 圈之间以及 FACE 圈与对照圈之间的间隔 $>90 \text{ m}$,以减少 CO_2 释放对其他圈的影响。FACE 圈设计为正八角形,直径为 12.5 m,通过 FACE 圈周围的管道向 FACE 圈中心喷射纯 CO_2 气体,电脑控制 FACE 圈内 CO_2 浓度,使其全生育期 FACE 圈内 CO_2 浓度保持在 $570 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 左右^[14]。对照田块没有安装 FACE 管道,其余环境条件与自然状态一致。

1.2 供试材料

供试品种为常规籼稻扬稻 6 号,大田旱育秧,5 月 20 日播种,6 月 15 日人工移栽,行距为 25 cm,株距为 16.7 cm, $24 \text{ 穴} \cdot \text{m}^{-2}$, 3 苗 $\cdot \text{穴}^{-1}$ 。自移栽期起,大气 CO_2 浓度设对照($370 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)和比对照高 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的 FACE 处理($570 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)2 个水平。施 N 量设 $125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (LN)、 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (NN)2 个水平,共 4 个处理组合。N 肥施用时期分别为 6 月 14 日施基肥,6 月 21 日施分蘖肥,7 月 28 日施穗肥。基肥和分蘖肥占总施 N 量的 60%,穗肥占总施 N 量的 40%。施 P、K 量均为 $70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,全部作基肥施用。水分管理为 6 月 13 日—7 月 10 日保持浅水层(约 5 cm),

7 月 11 日—8 月 4 日进行多次轻搁田,8 月 5 日至收割前 7 日进行间隙灌溉。适时进行病虫草害防治,水稻正常生长发育。

1.3 测定内容与方法

在成熟期,每小区调查 50 穴植株的穗数,计算单穴平均穗数。据此每处理取代表性植株 5 穴,分别测定绿叶、黄叶、茎鞘、穗等器官的干物质量。

成熟期根据调查的平均穗数取代表性植株 15 穴,测定每穗颖花数,用水漂法区分饱粒(沉入水底者)和空瘪粒,计算饱粒结实率和饱粒千粒重。

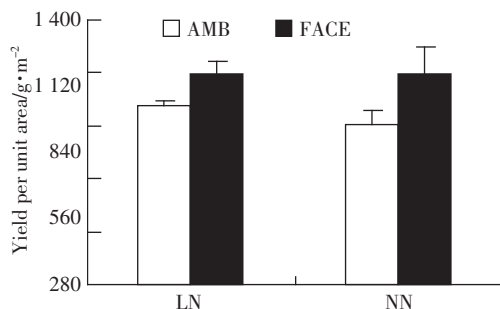
1.4 统计分析方法

采用 SPSS 11.5 软件进行统计分析,作图采用 Excel 作图软件。各处理的比较采用最小显著差数(LSD)法,凡超过 $\text{LSD}_{0.05}$ (或 $\text{LSD}_{0.01}$) 水平的视为显著(或极显著)。

2 结果与分析

2.1 FACE 对扬稻 6 号产量的影响

FACE 处理对扬稻 6 号产量的影响如图 1 所示。由图 1 可知:(1)FACE 处理使扬稻 6 号产量平均比对照增产 $216.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,增产幅度平均为 24.1%。其中:LN 处理、NN 处理分别比对照增产 18.0%、31.0%。(2)在 FACE 条件下,NN 处理产量平均比 LN 处理减产 $5.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,减产幅度为 0.5%。(3)统计分析表明, CO_2 处理对扬稻 6 号产量的影响达极显著水平,N 处理以及 $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 的互作效应对产量的影响均未达到显著水平(表 1)。说明 FACE 处理能显著提高扬稻 6 号的产量,施 N 量对产量的影响不大。



FACE: 开放式空气 CO_2 浓度增高; AMB: 环境 CO_2 浓度(对照)。NN: 常氮; LN: 低氮。下同。

FACE: Free-air CO_2 enrichment; AMB: Ambient (CK). NN: Normal nitrogen; LN: Low nitrogen. The same as below

图 1 FACE 处理对水稻产量的影响

Figure 1 Effect of FACE on grain yield of rice

2.2 FACE 对扬稻 6 号产量构成因素的影响

2.2.1 FACE 对扬稻 6 号单位面积穗数的影响

FACE 处理对扬稻 6 号单位面积穗数的影响如图 2 所示。由图 2 可知:(1)FACE 处理使扬稻 6 号单位面积穗数平均比对照增加 6.8%。其中:LN 处理、NN 处理分别比对照

增加 3.0%、10.9%。(2)在 FACE 条件下,NN 处理单位面积穗数平均比 LN 处理增加 0.1%。(3)统计分析表明, CO_2 处理对扬稻 6 号单位面积穗数的影响未达到显著水平,N 处理以及 $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 的互作效应对单位面积穗数的影响亦均未达到显著水平(表 1)。

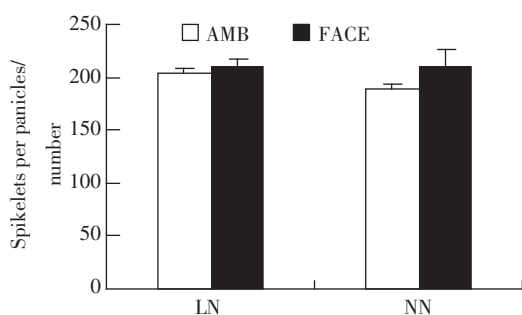


图 2 FACE 对水稻单位面积穗数的影响

Figure 2 Effect of FACE on panicles per square meter of rice

2.2.2 FACE 对扬稻 6 号每穗颖花数的影响

FACE 处理对扬稻 6 号每穗颖花数的影响如图 3 所示。由图 3 可知:(1)FACE 处理使扬稻 6 号每穗颖花数平均比对照增加 8.3%。其中:LN 处理、NN 处理分别比对照增加 8.0%、8.5%。(2)在 FACE 条件下,NN 处理每穗颖花数平均比 LN 处理增加 2.0%。(3)统计分析表明, CO_2 处理对扬稻 6 号每穗颖花数的影响达到极显著水平,N 处理以及 $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 的互作效应对每穗颖花数的影响均未达到显著水平(表 1)。

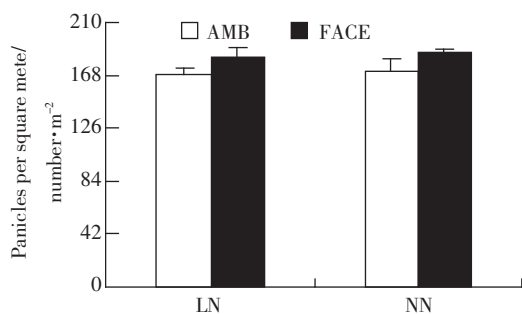


图 3 FACE 对水稻每穗颖花数的影响

Figure 3 Effect of FACE on spikelet per panicle of rice

表 1 FACE 处理对水稻产量及其构成因素、生物产量、经济系数影响的显著性检验

Table 1 Probability of treatment differences in grain yield and yield components, total biomass, economic coefficient of rice plant						
项目	来源	自由度	总均方	均方	F 值	P 值
单位面积产量	CO_2	1	141 192.6	141 192.6	18.7	0.003
	N	1	8 090.5	8 090.5	1.1	0.330
	$\text{CO}_2 \times \text{N}$	1	6 519.5	6 519.5	0.9	0.379
单位面积穗数	CO_2	1	534.5	534.5	2.7	0.142
	N	1	150.5	150.5	0.7	0.412
	$\text{CO}_2 \times \text{N}$	1	159.1	159.1	0.8	0.400
每穗颖花数	CO_2	1	592.9	592.9	12.0	0.009
	N	1	28.2	28.2	0.6	0.472
	$\text{CO}_2 \times \text{N}$	1	0.8	0.8	0.0	0.900
结实率	CO_2	1	38.5	38.5	17.0	0.003
	N	1	10.3	10.3	4.6	0.065
	$\text{CO}_2 \times \text{N}$	1	1.4	1.4	0.6	0.453
千粒重	CO_2	1	3.0	3.0	23.8	0.001
	N	1	1.0	1.0	3.7	0.054
	$\text{CO}_2 \times \text{N}$	1	0.1	0.1	0.7	0.420
生物产量	CO_2	1	443 936.1	443 936.1	14.0	0.006
	N	1	137 505.1	137 505.1	4.3	0.071
	$\text{CO}_2 \times \text{N}$	1	5 246.1	5 246.1	0.2	0.695
经济系数	CO_2	1	0.0	0.0	0.3	0.571
	N	1	0.0	0.0	13.6	0.006
	$\text{CO}_2 \times \text{N}$	1	0.0	0.0	0.8	0.389

2.2.3 FACE 对扬稻 6 号结实率的影响

FACE 处理对扬稻 6 号结实率的影响如图 4 所示。由图 4 可知:(1)FACE 处理使扬稻 6 号结实率平均比对照提高 4.2%。其中:LN 处理、NN 处理分别比对照提高 3.3%、5.1%。(2)在 FACE 条件下,NN 处理结实率平均比 LN 处理下降 1.3%。(3)统计分析表明, CO_2 处理对扬稻 6 号结实率的影响达到极显著水平,N 处理以及 $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 的互作效应对结实率的影响均未达到显著水平(表 1)。

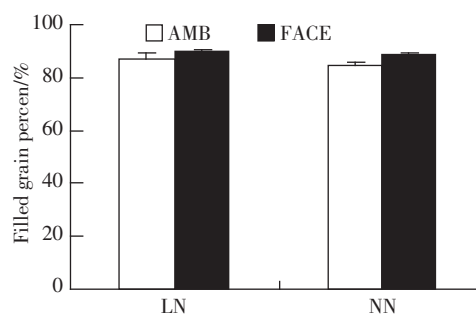


图 4 FACE 对水稻结实率的影响

Figure 4 Effect of FACE on filled grain percentage of rice

2.2.4 FACE 对扬稻 6 号千粒重的影响

FACE 处理对扬稻 6 号千粒重的影响如图 5 所示。由图 5 可知:(1)FACE 处理使扬稻 6 号千粒重平均比对照增加 3.2%。其中:LN 处理、NN 处理分别比对照增加 2.6%、3.8%。(2)在 FACE 条件下,NN 处理千粒重平均比 LN 处理下降 1.2%。(3)统计分析表明,CO₂ 处理对扬稻 6 号千粒重的影响达到极显著水平,N 处理以及 CO₂×N 的互作效应对千粒重的影响均未达到显著水平(表 1)。

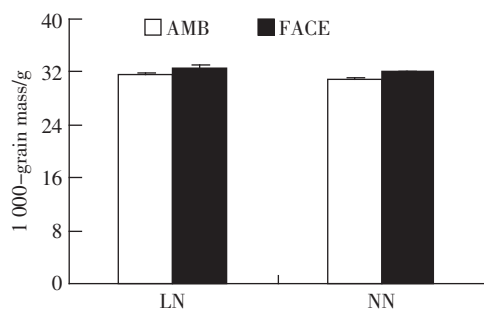


图 5 FACE 对水稻千粒重的影响

Figure 5 Effect of FACE on 1 000-grain weight of rice

2.3 FACE 对扬稻 6 号生物产量和经济系数的影响

2.3.1 FACE 对扬稻 6 号生物产量的影响

FACE 处理对扬稻 6 号生物产量的影响如图 6 所示。由图 6 可知,FACE 处理使扬稻 6 号生物产量平均比对照增加 21.3%。其中:LN 处理、NN 处理分别比对照增产 19.9%、22.5%。统计分析表明,CO₂ 处理对扬稻 6 号生物产量的影响达极显著水平,N 处理以及 CO₂×N 的互作效应对产量的影响均未达到显著水平(表 1)。

2.3.2 FACE 对扬稻 6 号经济系数的影响

FACE 处理对扬稻 6 号经济系数的影响如图 7 所示。由图 7 可知,FACE 处理使扬稻 6 号经济系数平均比对照提高 2.6%。其中:LN 处理比对照减少 1.3%,NN 处理比对照提高 7.4%。统计分析表明,CO₂ 处理以及 CO₂×N 的互作效应对产量的影响均未达到显著水平,N 处理对扬稻 6 号经济系数的影响达极显著水平(表 1)。

水稻产量为生物产量和经济系数的乘积。上述结果表明,FACE 处理使扬稻 6 号生物产量大幅度提高是 FACE 水稻产量比对照显著增产的重要原因,经济系数对 FACE 水稻产量的提高没有明显的影响。

3 讨论

关于大气 CO₂ 浓度增加对水稻产量的影响,前人

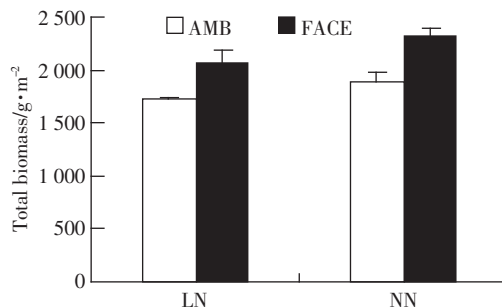


图 6 FACE 对水稻生物产量的影响

Figure 6 Effect of FACE on total biomass of rice

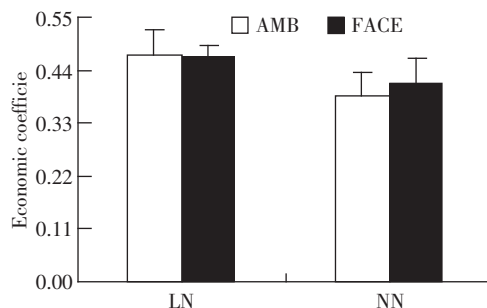


图 7 FACE 对水稻经济系数的影响

Figure 7 Effect of FACE on economic coefficient of rice

已有较多报道,但这些报道多是气室条件下的研究结果。关于 FACE 对水稻产量的影响,Kim 等^[3]研究表明,FACE 处理使日本粳稻品种 *Akitakomachi* 的产量平均比对照增加 12.8%(表 2),其中 1998、1999 和 2000 年分别增加 16.1%、9.7%、11.4%;黄建晔等^[6-7]和 Yang 等^[9]的研究表明,FACE 使我国粳稻品种武香粳 14 的产量平均比对照增加 12.8%,其中 2001、2002 和 2003 年分别增加 10.8%、14.1%、13.6%。刘红江等^[10-11]研究表明,FACE 处理使三系杂交籼稻汕优 63 产量平均比对照增加 34.1%(图 1),其中 2004、2005 和 2006 年分别增加 42.4%、27.3%和 31.2%。汕优 63 增产幅度平均比粳稻品种大 1.66 倍。本研究结果表明,FACE 处理使常规籼稻扬稻 6 号的产量平均比对照增产 24.1%。在 LN 处理、NN 处理条件下,FACE 使扬稻 6 号分别比对照增产 18.0%、31.0%。说明 FACE 处理使常规籼稻的增产幅度大于粳稻品种,但要小于杂交水稻品种。不同遗传背景水稻品种产量对 FACE 处理的响应不同,可能主要还是由于籼、粳水稻品种类型不同所造成,具体原因还有待于进一步研究。

水稻产量为穗数、每穗颖花数、结实率、千粒重的乘积。日本 FACE 研究表明^[3-5],FACE 处理使粳稻品种 *Akitakomachi* 穗数、每穗颖花数、结实率和千粒重

表 2 水稻不同类型品种产量及其产量构成因素、生物产量对 FACE 处理的响应

Table 2 Summary of the responses of yield and its components, total biomass of different types of rice cultivars to FACE

项目	日本 ²⁾	中国 ³⁾	中国 ⁴⁾	中国
试验时间	1998—2000	2001—2003	2004—2006	2006
试验位置	Iwate(39° 38'N, 140° 57'E)	无锡(31° 37'N, 120° 28'E)	江都(32°35'5"N, 119°42'E)	江都(32°35'5"N, 119°42'E)
供试品种	Akitakomachi	武香粳 14	汕优 63	扬稻 6 号
品种类型	常规粳稻	常规粳稻	三系杂交籼稻	常规籼稻
CO ₂ 目标浓度	570	570	570	570
供氮水平				
低氮 LN	40	150	125	125
中氮 NN	80 或 90	250	250	250
高氮 HN	120 或 150	350	—	—
籽粒产量	+12.8% ^{**1)}	+12.8% ^{**}	+34.1% ^{**}	+24.1% ^{**}
单位面积穗数	+8.6% [*]	+18.8% ^{**}	+10.3% ^{**}	+6.8% ^{**}
每穗颖花数	+1.9% ^{**}	-7.6% ^{**}	+10.3% ^{**}	+8.3% ^{**}
结实率	+0.8% ^{**}	+4.9% ^{**}	+4.9% ^{**}	+4.2% ^{**}
千粒重	+1.3% [*]	+1.3% ^{**}	+4.3% ^{**}	+3.2% ^{**}
生物产量	+12% ^{**}	+16% ^{**}	+33% ^{**}	+21% ^{**}

注:(1)ns, no significance; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。(2)数据来自 Kim 等^[3]。(3)数据来自 Yang 等^[9]。(4)数据来自刘红江等^[10]。

分别比对照增加 8.6%、1.8%、1.76%和 1.24%(表 2); 黄建晔等^[7]研究表明,FACE 处理使武香粳 14 穗数、结实率和千粒重分别比对照增加 18.8%、4.8%、1.3%, 使每穗颖花数比对照减少 7.6%。两者的研究表明穗数的增加是 FACE 水稻增产的主要原因。刘红江等^[10-11]对汕优 63 的研究表明,FACE 处理使汕优 63 穗数、每穗颖花数、结实率和千粒重分别比对照增加 10.3%、10.3%、4.9%和 4.3%。本研究结果表明,FACE 处理使常规籼稻扬稻 6 号的穗数、每穗颖花数、结实率和千粒重分别比对照增加 6.8%、8.3%、4.2%和 3.2%,FACE 处理对扬稻 6 号穗数的影响未达到显著水平,每穗颖花数的增加是 FACE 水稻产量显著增加的主要原因。这可能与常规籼稻本身的分蘖发生能力不强,FACE 处理对其分蘖发生的促进作用要小于其他类型水稻品种有关。水稻每穗颖花数为每穗分化颖花数和退化颖花数的差值,杨洪建等^[15]研究表明,FACE 处理使武香粳 14 每穗分化颖花数显著减少,退化颖花数显著增加,从而使水稻每穗颖花数显著减少。关于 FACE 处理使扬稻 6 号每穗颖花数显著增加,是 FACE 处理增加了分化颖花数,还是减少了退化颖花数,还有待于进一步深入研究。

有关 FACE 处理对生物产量的影响, Kim 等^[3]FACE 研究结果表明,FACE 处理使水稻 Akitako-machi 的生物产量平均增幅为 12%(表 2)。黄建晔等^[12]的研究结果表明,FACE 使武香粳 14 的生物产量

平均比对照增产 16.2%,经济系数比对照减少 2.7%^[7]。刘红江等^[10]对汕优 63 的结果表明,FACE 能极显著地提高水稻的生物产量,平均增幅为 36.1%,增加幅度明显比前人研究的粳稻品种大,FACE 使汕优 63 的经济系数比对照减少 1.6%。本研究结果表明,FACE 处理使常规籼稻扬稻 6 号的生物产量平均比对照增产 21.3%(图 6),经济系数比对照增加 2.6%(图 7)。上述结果表明,FACE 处理大幅度的提高汕优 63 和扬稻 6 号的生物产量是其产量比粳稻品种大幅度增加的重要原因。

与刘红江等^[10]对三系杂交籼稻汕优 63 的研究结果一致,在 125 kg·hm⁻²的基础上增施 N 肥 (250 kg·hm⁻²)对常规籼稻扬稻 6 号产量及其构成因素的影响亦均未达显著水平,FACE 和对照趋势一致。施 N 量过多不利于产量形成,这在无锡 FACE 研究中亦有体现^[7]:施 N 量从 250 kg·hm⁻² 增加到 350 kg·hm⁻²,粳稻类型品种武香粳 14 的产量显著下降。但从结果看,扬稻 6 号和汕优 63 的适宜施 N 量要明显低于武香粳 14,这可能与不同类型水稻品种的根系吸收氮素能力以及它们的需肥特性不同有关。

关于 CO₂×N 的互作效应对水稻产量及其构成因素的影响,本研究结果表明,CO₂×N 的互作效应对水稻产量及其构成因素的影响均未达到显著水平。这与前人^[7,9-11]的研究结果基本一致:随着供氮水平的提高,N 肥对水稻 CO₂ 响应的促进作用将逐渐下降,甚

至消失。说明未来大气 CO₂ 浓度增高条件下水稻施 N 量存在适宜值,并非越高越好。

参考文献:

- [1] Wang Y L, Yang L X, Huang J Y, et al. The impact of free-air CO₂ enrichment(FACE)and N supply on growth, yield and quality of rice crops with large panicle(special review)[J]. *Journal of Integrated Field Science*, 2007(4):11-25.
- [2] 杨连新,王余龙,黄建晔,等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高对水稻生长发育影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7):1331-1337.
- YANG Lian-xin, WANG Yu-long, HUANG Jian-ye, et al. Advances in the study on growth and development response of rice crops to free-air CO₂ enrichment(FACE)[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, 17(7):1331-1337.
- [3] Kim H Y, Lieferring M, Kobayashi K, et al. Seasonal changes in the effects of elevated CO₂ on rice at three levels of nitrogen supply: a free-air CO₂ enrichment (FACE) experiment[J]. *Global Change Biol*, 2003(9): 826-837.
- [4] Kim H Y, Lieferring M, Miura S, et al. Growth and nitrogen uptake of CO₂-enriched rice under field conditions[J]. *New Phytol*, 2001(150): 223-229.
- [5] Kim H Y, Lieferring M, Kobayashi K, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops[J]. *Field Crops Res*, 2003(83):261-270.
- [6] 黄建晔,杨洪建,董桂春,等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高对水稻产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10):1210-1214.
- HUANG Jian-ye, YANG Hong-jian, DONG Gui-chun, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment(FACE)on yield formation in rice(*Oryza Sativa* L.)[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(10):1210-1214.
- [7] 黄建晔,杨洪建,杨连新,等. 开放式空气 CO₂ 浓度增加(FACE)对水稻产量形成的影响及其与氮的互作效应[J]. 中国农业科学, 2004, 37(12):1824-1830.
- HUANG Jian-ye, YANG Hong-jian, YANG Lian-xin, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment(FACE)on yield formation of rice and its interaction with nitrogen[J]. *Sci Agric Sin*, 2004, 37(12):1824-1830.
- [8] 杨洪建,杨连新,刘红江,等. FACE 对水稻根系及产量的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(9):1221-1226.
- YANG Hong-jian, YANG Lian-xin, LIU Hong-jiang, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment(FACE)on root system and its relations with yield in rice(*Oryza sativa* L.)[J]. *Acta Agron Sin*, 2005, 31(9):1221-1226.
- [9] Yang L X, Huang J Y, Yang H J, et al. The impact of free-air CO₂ enrichment(FACE)and N supply on yield formation of rice crops with large panicle[J]. *Field Crops Res*, 2006(98):141-150.
- [10] 刘红江,杨连新,黄建晔,等. FACE 对三系杂交籼稻汕优 63 产量形成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2285-2290.
- LIU Hong-jiang, YANG Lian-xin, HUANG Jian-ye, et al. Effect of free air CO₂ enrichment(FACE)on yield formation of three-line indica hybrid rice cultivar shanyou 63[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2008, 27(6):2285-2290.
- [11] Liu H J, Wang Y L, Yang L X, et al. Higher-than-expected yield stimulation of hybrid indica rice cv Shanyou 63 under free air CO₂ enrichment(FACE)[J]. *Field Crops Res*, 2008(108):93-100.
- [12] 黄建晔,董桂春,杨洪建,等. 开放式空气 CO₂ 增高对水稻物质生产与分配的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2):253-257.
- HUANG Jian-ye, DONG Gui-chun, YANG Hong-jian, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment on biomass accumulation and distribution in rice[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14(2):253-257.
- [13] Yang L X, Huang J Y, Yang H J, et al. Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment(FACE)on dry matter production and distribution of rice(*Oryza sativa* L.)[J]. *Field Crops Res*, 2006(98):12-19.
- [14] 刘刚,韩勇,朱建国,等. 稻麦轮作 FACE 系统平台 I. 系统机构与控制[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10):1253-1258.
- LIU Gang, HAN Yong, ZHU Jian-guo, et al. Rice wheat rotational FACE platform I. system structure and control[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(10):1253-1258.
- [15] 杨洪建,杨连新,黄建晔,等. FACE 对武香梗 14 颖花分化和退化的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(7):1076-1082.
- YANG Hong-jian, YANG Lian-xin, HUANG Jian-ye, et al. Effect of free-air CO₂ enrichment(FACE)on spikelets differentiation and retrogression in rice(*Oryza Sativa* L.)[J]. *Acta Agron Sin*, 2006, 32(7):1076-1082.
- [16] 刘红江,杨连新,黄建晔,等. FACE 对杂交籼稻汕优 63 干物质生产与分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1):8-14.
- LIU Hong-jiang, YANG Lian-xin, HUANG Jian-ye, et al. Effect of free air CO₂ enrichment(FACE)on dry matter production and distribution of three-line indica hybrid rice cultivar shanyou 63[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2009, 28(1):8-14.