

FACE 对三系杂交籼稻汕优 63 产量形成的影响

刘红江¹, 杨连新¹, 黄建晔¹, 董桂春¹, 杨 欢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:2004—2006 年利用我国农田开放式空气 CO₂ 浓度增高(FACE)研究平台,以三系杂交籼稻汕优 63 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,研究其对汕优 63 产量形成的影响。结果表明:(1)FACE 处理使汕优 63 成熟期株高比对照提高 6.7%,达极显著水平;FACE 处理对汕优 63 全生育期日数无显著影响;(2)FACE 处理使汕优 63 产量平均比对照增加 34.1%,其中 2004、2005、2006 年分别增加 42.4%、27.3%和 31.2%,均达极显著水平;年度间、CO₂ 和年度的互作效应对产量的影响达显著或极显著水平;(3)FACE 处理使汕优 63 单位面积穗数、每穗颖花数、单位面积颖花量、结实率和千粒重平均比对照增加 10.3%、10.3%、21.7%、4.9%和 4.3%,均达显著或极显著水平;(4)N 处理对汕优 63 产量和产量构成因素的影响均未达显著水平,但 N×年度对单位面积的穗数、颖花量、以及产量均有显著互作效应。

关键词:三系杂交籼稻;开放式空气 CO₂ 浓度增高(FACE);生育期;产量及其构成因素

中图分类号:X171.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2285-06

Effect of Free Air CO₂ Enrichment(FACE)on Yield Formation of Three-line *Indica* Hybrid Rice Cultivar Shanyou 63

LIU Hong-jiang¹, YANG Lian-xin¹, HUANG Jian-ye¹, DONG Gui-chun¹, YANG Huan¹, 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:In this study, 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 three-line *indica* hybrid rice cultivar Shanyou 63 under two levels of N input:Low (LN, 125 kg·hm⁻²)and normal N (NN, 250 kg·hm⁻²)in 2004—2006. The results showed that: (1)Compared with AMB treatments, FACE significantly increased plant height by 6.7% on average at maturity of Shanyou 63($P<0.01$), however, no CO₂ effect was observed on the whole growth duration of Shanyou 63. (2)On average, FACE increased the grain yield of Shanyou 63 significantly ($P<0.01$), with an average increase of 34.8% across the three years (42.4%, 27.3% and 31.2% in 2001, 2002 and 2003, respectively). The year effect and the interaction between [CO₂]×year were significant($P<0.05$ or $P<0.01$)for grain yield. (3)FACE increased yield components of Shanyou 63 significantly($P<0.05$ or $P<0.01$), averaging 10.3%, 10.3%, 21.7%, 4.9% and 4.3% for panicle number per unit area, spikelet number per panicle, spikelet number per unit area, filled grain percentage and 1 000-grain weight, respectively. (4)N effect was not significant on yield and its components of Shanyou 63, while its interaction with year was significant for panicle number, spikelet number and grain yield per unit area.

Keywords:three-line *indica* hybrid rice; free air CO₂ enrichment(FACE); growth duration; yield and yield components

开放式空气中 CO₂ 浓度增加(FACE)对水稻生长发育、产量形成和养分吸收利用等的影响已有一些报

道(见杨连新等^[1]和 Wang 等^[2]综述)。日本和我国的研究者先后明确了 FACE 处理使常规粳稻品种生育期缩短^[3]或显著缩短^[4],使生物产量^[5-9]和稻谷产量^[5-7,10-12]显著提高。FACE 处理使粳稻品种的总吸氮量略有增加^[5,7,13-15]、总吸磷量显著增加^[16-19]。FACE 处理显著提高了粳稻品种的氮籽粒生产效率^[7,13-15],但使磷籽粒生产效率显著下降^[17-19]。此外,还明确了 FACE 处理使粳稻品种的稻米外观品质变差、整精米率显著下降^[20-21]

收稿日期:2008-01-20

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);江苏省“六大人才高峰”项目(07-G-023)

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

等。但这些研究都是以粳稻品种为材料,到目前为止,在我国水稻生产中具有重要位置的杂交水稻对开放式空气中 CO_2 浓度增加的反应尚未见报道。杂交水稻杂种优势强、抗逆性好、穗型大、产量高,其对开放式空气中 CO_2 浓度增加响应的趋势是否与粳稻品种一致? 响应值大小与粳稻品种有无差异? 这些问题都不清楚。为了明确这些问题,本研究于 2004—2006 年利用中日合作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($570 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$),研究其对我国代表性三系杂交水稻组合汕优 63 的生育期、产量、稻米品质、干物质生产与分配、根系生长、氮和磷等养分的吸收利用等的影响,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试验依据。本文主要报道三系杂交水稻组合汕优 63 产量及其构成因素对 FACE 处理响应的研究结果。

1 材料与方法

1.1 试验方法

本试验于 2004—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试验田中($32^\circ 35' \text{N}$, $119^\circ 42' \text{E}$),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:有机碳 $18.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,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 试验圈和 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^[22]。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

2004—2006 年,供试品种均为三系杂交水稻汕优 63,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 穴 $\cdot \text{m}^{-2}$,1 苗 $\cdot$ 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。施氮量设 $125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (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%。施磷、钾量均为 $70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,全部作基肥施用。水分管理为 6 月 13 日至 7 月 10 日保持浅水层(约 5 cm),7 月 11 日至 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。适时进行病虫害防治,水稻正常生长发育。

1.3 测定内容与方法

记载不同处理播种、抽穗、成熟的日期,计算播种—抽穗、抽穗—成熟以及全生育期的天数(d);成熟期测定各处理水稻株高。

移栽后每小区定点 10 穴,每隔 5~7 d 调查 1 次茎蘖数,直至抽穗。根据最高茎蘖数和穗数计算成穗率。成穗率(%)=(单位面积穗数/单位面积最高茎蘖数) $\times 100$ 。

成熟期调查每小区平均穗数,根据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。

2 结果与分析

2.1 FACE 对汕优 63 生育期和株高的影响

研究结果表明,FACE 处理使 2004 年汕优 63 全生育期的平均日数比对照增加 1.5 d,使 2005、2006 年分别比对照缩短 1.0 和 0.5 d,3 年平均全生育期日数与对照相同(图 1)。统计分析表明,不同年度间汕优 63 全生育期日数的差异未达到显著水平,同时 CO_2 处理、N 处理以及 $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 的互作对汕优 63 全生育期日数的影响均未达到显著水平(表 1)。说明三系杂交水稻汕优 63 全生育期日数对 FACE 处理的相应与粳稻品种不同,开放式空气中 CO_2 浓度增加并未使其生育期显著缩短。

FACE 处理对汕优 63 成熟期株高的影响示于图 2。由图 2 可知,FACE 处理使 2004、2005、2006 年汕优 63 成熟期株高分别比对照增加 9.8%、5.9%、4.8%,平均比对照增加 6.7%。统计分析表明, CO_2 处理对汕优 63 成熟期株高的影响达到极显著水平,N 处理、

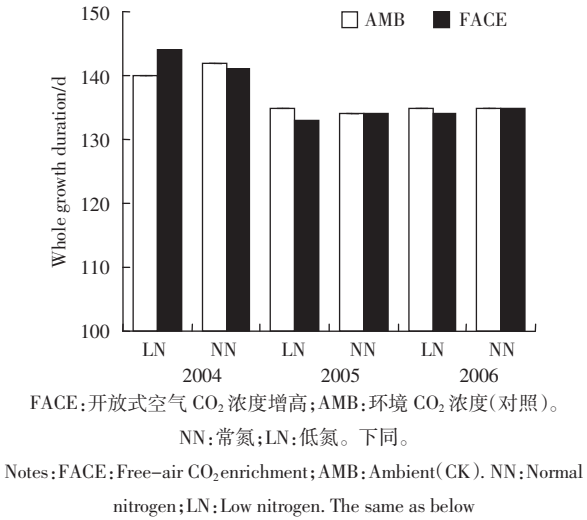


图 1 FACE 处理对水稻生育期的影响(2004—2006)
Figure 1 Effect of FACE treatment on growth duration of rice in 2004—2006

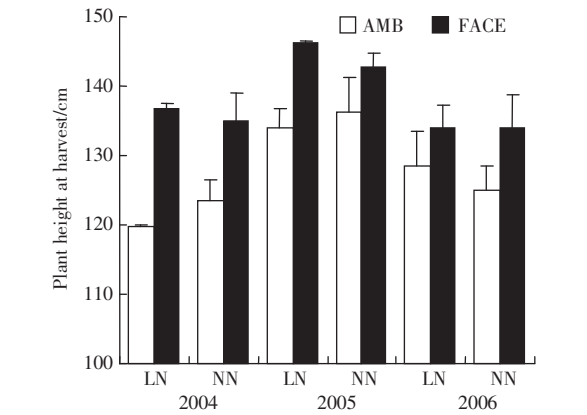


图 2 FACE 处理对水稻成熟期株高的影响(2004—2006)
Figure 2 Effect of FACE treatment on plant height of rice at harvest in 2004—2006

CO₂×N 的互作对汕优 63 成熟期株高的影响均未达到显著水平(表 1)。说明 FACE 处理极显著提高了三系杂交籼稻汕优 63 成熟期的株高。

2.2 FACE 对汕优 63 产量的影响

FACE 处理对汕优 63 产量的影响如表 2 所示。由表 2 可知:(1)FACE 处理使汕优 63 产量平均比对照增产 318.0 g·m⁻², 增产幅度平均为 34.1%。其中:2004、2005、2006 年分别比对照增产 42.4%、27.3%、31.2%。(2)在 FACE 条件下,NN 处理产量平均比 LN 处理减产 6.5%。其中:2004 年比 LN 处理增产 8.1%,2005、2006 年分别比 LN 处理减产 11.8%、15.7%。(3)统计分析表明,CO₂ 处理对汕优 63 产量的影响达极显著水平,CO₂×年度和 N×年度的互作效应对水稻产量的影响均达显

表 1 FACE 处理对水稻生育期天数和成熟期株高的显著性检验
Table 1 Significance test for whole growth duration and plant height at harvest of rice among different treatments

项目	来源	自由度	总均方	均方	F 值	P 值
生育期天数	CO ₂	1	0.0	0.0	.	.
	N(氮)	1	0.0	0.0	.	.
	Year(年)	2	153.6	76.8	.	.
	CO ₂ ×N	1	0.7	0.7	.	.
	Year×N	2	0.6	0.3	.	.
	Year×CO ₂	2	3.6	1.8	.	.
	Year×CO ₂ ×N	2	7.5	3.7	.	.
成熟期株高	CO ₂	1	459.3	459.3	57.3	0.00
	N	1	1.1	1.1	0.1	0.72
	Year	2	192.9	96.5	24.1	0.00
	CO ₂ ×N	1	7.2	7.2	0.9	0.36
	Year×N	2	2.9	1.4	0.4	0.71
	Year×CO ₂	2	20.0	10.0	2.5	0.11
	Year×CO ₂ ×N	2	11.2	5.6	1.4	0.28

著或极显著水平,N 处理以及 CO₂×N 和 CO₂×N×年度的互作效应对产量的影响均未达到显著水平(表 2)。

2.3 FACE 对汕优 63 产量构成因素的影响

2.3.1 FACE 对汕优 63 单位面积穗数的影响

FACE 处理对汕优 63 单位面积穗数的影响如表 2 所示。由表 2 可知:(1)FACE 处理使汕优 63 单位面积穗数平均比对照增加 10.3%。其中:2004、2005、2006 年分别比对照增加 8.3%、10.6%、13.9%。(2)在 FACE 条件下,NN 处理单位面积穗数平均比 LN 处理减少 1.6%。其中:2004 年比 LN 处理增加 4.9%,2005、2006 年分别比 LN 处理减少 2.0%、7.7%。(3)统计分析表明,CO₂ 处理以及 N×年度的互作效应对汕优 63 单位面积穗数的影响均达到了极显著水平,N 处理以及 CO₂×年度和 CO₂×N 和 CO₂×N×年度的互作效应对水稻单位面积穗数的影响均未达到显著水平(表 2)。

穗数由主茎穗和分蘖穗所构成。分蘖穗取决于最高分蘖数的多少与分蘖成穗率的高低。由表 3 可知,FACE 处理使汕优 63 单位面积最高分蘖数平均比对照增加 14.4%,使分蘖成穗率比对照下降 0.2%。统计分析表明,CO₂ 处理对汕优 63 单位面积最高分蘖数的影响达到显著水平,对分蘖成穗率无显著影响。说明 FACE 处理使三系杂交籼稻汕优 63 单位面积穗数的增加是由于 FACE 处理促进了分蘖发生的缘故。

2.3.2 FACE 对汕优 63 每穗颖花数的影响

FACE 处理对汕优 63 每穗颖花数的影响如表 2 所示。由表 2 可知:(1)FACE 处理使汕优 63 每穗颖

表 2 FACE 处理对水稻产量和产量构成因素的影响

Table 2 Effect of FACE on grain yield and yield components of rice in 2004—2006

Year	N	CO ₂	穗数·m ⁻²	粒数·panicle ⁻¹	总颖花数·m ⁻²	结实率/%	千粒重/g	产量/g·m ⁻²
2004	LN	AMB	244.8	188.3	46 102.6	79.5	29.9	1 094.8
		FACE	278.2	207.7	57 205.6	85.2	31.2	1 522.5
		%	13.6	10.3	24.1	7.2	4.6	39.1
	NN	AMB	283.7	169.3	48 047.5	79.0	29.8	1 129.8
		FACE	291.9	204.3	59 498.4	88.2	31.4	1 646.0
		%	2.9	20.7	23.8	11.7	5.2	45.7
2005	LN	AMB	225.2	154.4	34 779.5	78.2	30.2	819.3
		FACE	257.6	173.5	44 688.6	80.9	31.3	1 130.2
		%	14.4	12.4	28.5	3.4	3.8	37.9
	NN	AMB	236.4	157.2	37 173.2	77.4	29.7	854.3
		FACE	252.4	168.3	42 515.4	75.8	30.9	996.6
		%	6.8	7.0	14.4	-2.1	4.2	16.7
2006	LN	AMB	238.8	175.8	41 961.1	76.2	30.5	975.7
		FACE	253.8	183.5	46 653.3	81.0	31.8	1 200.2
		%	6.3	4.4	11.2	6.3	4.3	23.0
	NN	AMB	192.8	159.9	30 849.4	77.1	30.6	725.8
		FACE	234.4	171.2	40 109.0	79.3	31.8	1 012.1
		%	21.6	7.1	30.0	2.9	3.8	39.4
CO ₂	Mean	AMB	237.0	167.5	39 818.9	77.9	30.1	933.3
		FACE	261.4	184.8	48 445.0	81.7	31.4	1 251.3
		%	10.3	10.3	21.7	4.9	4.3	34.1
ANOVA		Y	**	**	**	ns	*	**
		CO ₂	**	**	**	*	**	**
		N	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		CO ₂ ×N	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		CO ₂ ×Y	ns	ns	ns	ns	ns	*
		N×Y	**	ns	**	ns	ns	*
		CO ₂ ×N×Y	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注: ns, no significance. * *P*<0.05. ** *P*<0.01。

花数平均比对照增加 10.3%。其中:2004、2005、2006 年分别比对照增加 15.5%、9.7%、5.7%。(2)在 FACE 条件下,NN 处理每穗颖花数平均比 LN 处理减少 3.8%。其中:2004、2005、2006 年分别比 LN 处理减少 1.7%、3.0%、6.7%。(3)统计分析表明,CO₂ 处理对汕优 63 每穗颖花数的影响均达到了极显著水平,N 处理以及 N×年度、CO₂×年度、CO₂×N、CO₂×N×年度的互作效应对每穗颖花数的影响均未达到显著水平(表 2)。

2.3.3 FACE 对汕优 63 单位面积颖花量的影响

FACE 处理对汕优 63 单位面积颖花数的影响如表 2 所示。由表 2 可知:(1)FACE 处理使汕优 63 单位面积颖花数平均比对照增加 21.7%,其中 2004、2005、2006 年分别比对照增加 24.0%、21.2%、19.2%。(2)在 FACE 条件下,NN 处理单位面积颖花数平均比 LN 处理减少 4.3%。其中:2004 年比 LN 处理增加 4.0%,2005、2006 年分别比 LN 处理减少 4.9%、14%。(3)统计分析表明,CO₂ 处理以及 N×年度的互作对汕优 63 单位面积颖花数的影响均达到了极显著水平,N 处理以及 CO₂×年度、CO₂×N、CO₂×N×年度的互作效应对单位面积颖花数的影响均未达到显著水平(表 2)。

2.3.4 FACE 对汕优 63 结实率的影响

FACE 处理对汕优 63 结实率的影响如表 2 所示。由表 2 可知:(1)FACE 处理使汕优 63 结实率平均比对照增加 4.9%。其中:2004、2005、2006 年分别比对照增加 9.4%、0.7%、4.6%。(2)在 FACE 条件下,NN 处理结实率平均比 LN 处理减少 1.6%。其中:2004 年比 LN 处理增加 3.5%,2005、2006 年分别比 LN 处理减少 6.3%、2.2%。(3)统计分析表明,CO₂ 处理对汕优

表 3 FACE 处理对单位面积最高分蘖数和分蘖成穗率的影响(2006)

Table 3 Effect of FACE on number of maximum tiller per unit area and productive tiller ratio in 2006

CO ₂	单位面积最高分蘖数		分蘖成穗率	
	LN	NN	LN	NN
AMB	333.6	308.8	69.6	59.5
FACE	354.4	380.8	69.6	59.2
CO ₂	*			ns
N	ns			**
CO ₂ ×N	ns			Ns

注: ns, no significance. * *P*<0.05, ** *P*<0.01。

63 结实率的影响达到显著水平,N 处理以及 N×年度、CO₂×年度、CO₂×N、CO₂×N×年度的互作效应对结实率的影响均未达到显著水平(表 2)。

2.3.5 FACE 对汕优 63 千粒重的影响

FACE 处理对汕优 63 千粒重的影响如表 2 所示。由表 2 可知:(1)FACE 处理使汕优 63 千粒重平均比对照增加 4.3%。其中:2004、2005、2006 年分别比对照增加 4.9%、4.0%、4.0%。(2)在 FACE 条件下,NN 处理千粒重平均比 LN 处理减少 0.3%。其中:2004 年比 LN 处理增加 0.4%,2005、2006 年分别比 LN 处理减少 1.2%、0.1%。(3)统计分析表明,CO₂ 处理对三系杂交籼稻汕优 63 千粒重的影响达到极显著水平,N 处理以及 N×年度、CO₂×年度、CO₂×N、CO₂×N×年度的互作效应对水稻千粒重的影响均未达到显著水平(表 2)。

3 讨论

关于水稻生育期对 FACE 处理的响应,Kobayashi 等研究表明,FACE 处理使日本粳稻品种 Akitako-machi 开花期比对照提早 2 d^[3];黄建晔等^[4]研究表明,FACE 处理使我国粳稻品种武香粳 14 抽穗期比对照提早 3.4 d,抽穗期-成熟期日数比对照缩短 2.4 d,全生育期日数平均比对照缩短 5.8 d。本研究表明,FACE 处理使三系杂交籼稻汕优 63 全生育期日数与对照相同(图 1)。说明汕优 63 生育期对 FACE 处理响应的趋势与粳稻品种不同(表 4)。虽然本研究的试验地点、土壤、栽培条件等与其他研究有差异(表 4),可能会对研究结果产生一定影响,但汕优 63 生育期对 FACE 处理响应的趋势与粳稻品种不同可能主要还是由于籼、粳品种类型不同所造成,具体原因还有待于进一步研究。

关于水稻产量对 FACE 处理的响应,Kim 等^[6]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%,其中 1998、1999 和 2000 年分别增加 16.1%、9.7%、11.4%;黄建晔等^[11]和 Yang 等^[12]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%。本研究表明,FACE 处理使三系杂交籼稻汕优 63 产量平均比对照增加 34.1%,其中 2004、2005 和 2006 年分别增加 42.4%、27.3%和 31.2%(表 2),增产幅度平均比粳稻品种大 1.66 倍。说明汕优 63 产量对 FACE 处理的响应比粳稻品种大得多。

从产量构成因素来看(表 2),三系杂交籼稻汕优

63 产量对 FACE 处理的响应明显大于粳稻品种,主要是由于 FACE 条件下汕优 63 每穗颖花数显著增加引起单位面积颖花量大幅度提高和千粒重提高所造成。FACE 条件下汕优 63 每穗颖花数和千粒重提高的幅度明显大于粳稻品种的原因目前尚不清楚,作者推测可能与 FACE 条件下三系杂交籼稻汕优 63 株高(图 2,表 4)、茎鞘可溶性碳水化合物含量(另文报道)等显著提高有关,但具体原因还有待于进一步研究。

为了明确影响汕优 63 产量的主要产量构成因素,对产量构成因素与产量进行多元逐步回归分析。结果表明,单位面积穗数(X₁)、每穗颖花数(X₂)、结实率(X₃)和千粒重(X₄)对产量均有显著作用,回归方程为:Y =-3 231.633 +4.294X₁ +6.414X₂ +14.065X₃ +32.552X₄,决定系数为 0.992。通径分析表明,单位面积穗数、每穗颖花数、结实率、千粒重对汕优 63 产量的直接通径系数分别为 0.491、0.454、0.257、0.102。因此从产量构成因素对产量的影响来看,单位面积穗数对汕优 63 产量的影响力为最大,其余依次为每穗颖花数、结实率和千粒重。

表 4 水稻不同类型品种生育期、株高、产量及其产量构成因素对 FACE 处理的响应

Table 4 Summary of responses of growth duration, plant height, yield and its components of different types of rice cultivars to FACE

项目	日本 ¹⁾	中国 ²⁾	中国
试验时间	1998-2000	2001-2003	2004-2006
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)
供试品种及其生育期			
供试品种	Akitakomachi	武香粳 14	汕优 63
品种类型	常规粳稻	常规粳稻	三系杂交籼稻
全生育期	146	158	136
供氮水平			
低氮 LN	40	150	125
中氮 NN	80 或 90	250	250
高氮 HN	120 或 150	350	—
全生育期	—	-5.8 d**	0.0 d ^m
成熟期株高	—	-2.2% [*]	+6.7%**
子粒产量	+12.8%**	+12.8%**	+34.1%**
单位面积穗数	+8.6% [*]	+18.8%**	+10.3%**
每穗颖花数	+1.9%**	-7.6%**	+10.3%**
单位面积颖花量	+11.5%**	+9.1%**	+21.7%**
结实率	+0.8% ^m	+4.9%**	+4.9%**
千粒重	+1.3% [*]	+1.3%**	+4.3%**

注:ns, no significance; +, P<0.1; *, P<0.05; **, P<0.01。

1)数据来自 Kim 等^[5]。

2)数据来自 Yang 等^[12]。

本研究结果表明,在 125 kg·hm⁻² 的基础上增施 N 肥(250 kg·hm⁻²)对汕稻 63 产量及其构成因素的影响均未达显著水平,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^[12]: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,汕优 63 的适宜施 N 量要明显低于武香粳 14,这可能与杂交稻杂种优势强,根系发达,生长繁茂,吸氮比常规品种强等特性有关。尽管本试验 N 处理效应未达显著水平,但值得一提的,与 2004 年试验结果相反,2005 和 2006 年 NN 处理的产量和产量构成因素多低于 LN 处理,FACE 和对照趋势一致。笔者认为这可能与试验地不同年度间气候条件的差异有关:江都气象数据显示,2004 年水稻生长季节的温度、日照时数、降水量等指标接近于常年,2005 年日照时数明显少于常年,降水量明显多于常年,而 2006 年水稻生育中期(7 月中旬至 8 月中旬)高温少雨。说明气候条件正常年份施氮量多的处理(NN)产量及其构成因素高(或多),气候条件异常年份则相反,施氮量多的处理(NN)反而不利于产量形成。统计表明,N×Year 的互作对汕优 63 单位面积的穗数、颖花量以及产量均达极显著水平(表 2),进一步证明施 N 量对产量形成的效应明显受水稻生长季气候条件的影响。

关于 CO₂×N 的互作效应,Yang 等^[12]认为,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。本研究的结果进一步验证了这一假设,这亦与无锡 FACE 系列研究的结果相一致^[12,15,19]:即在多数情况下,水稻产量、生物量和其他生长参数间均不存在 CO₂×N 协同效应。

参考文献:

[1] 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.
[2] 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.
[3] Kobayashi K, Lieffering M, Kim H Y. Growth and yield of paddy rice under free-air CO₂ enrichment[C]//Shiyomi M, Koizumi H, eds. Structure and Function in Agroecosystem Design and Management. Boca Raton, Florida, USA :CRC Press, 2001.371-395.
[4] 黄建晔,杨连新,杨洪建,等.开放式空气 CO₂ 浓度增加对水稻生育期的影响及其原因分析[J].作物学报,2005,31(7):882-887.
[5] Kim H Y, Lieffering 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.
[6] Kim H Y, Lieffering 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.
[7] Kim H Y, Lieffering M, Miura S, et al. Growth and nitrogen uptake of CO₂-enriched rice under field conditions [J]. *New Phytol*, 2001, 150: 223-229.
[8] 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.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 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.
[12] 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.
[13] 董桂春,王余龙,杨洪建,等.开放式空气 CO₂ 浓度增高对水稻 N 素吸收利用的影响[J].应用生态学报,2002,13(10):1219-1222.
[14] 黄建晔,杨洪建, 杨连新,等.水稻不同生育期 N 素营养对 FACE 响应的研究[J].作物学报,2004,30(12):1237-1243.
[15] Yang L X, Huang J Y, Yang H J, et al. Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment(FACE)on nitrogen uptake and utilization of rice at three levels of nitrogen fertilization[J]. *Field Crops Res*, 2007, 100:189-199.
[16] Yamakawa Y, Saigusa M, Okada M, et al. Nutrient uptake by rice and soil solution composition under atmospheric CO₂ enrichment [J]. *Plant and Soil*, 2004, 259:367-372.
[17] 黄建晔,王余龙,杨洪建,等.开放式空气 CO₂ 浓度增高对水稻磷吸收利用的影响[J].扬州大学学报·农业与生命科学版,2002,23(4):39-42.
[18] 杨连新,杨洪建,黄建晔,等.水稻不同生育时期磷素营养对开放式空气二氧化碳浓度增高的响应 [J]. 应用生态学报,2005,16(5):924-928.
[19] Yang L X, Wang Y L, Huang J Y, et al. Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE)on phosphorus uptake and utilization of rice at three levels of nitrogen fertilization [J]. *Field Crops Res*, 2007, 102, 141-150.
[20] 董桂春,王余龙,黄建晔,等.稻米品质性状对开放式空气二氧化碳浓度增高的响应[J].应用生态学报,2004,15(7):1217-1222.
[21] Yang L X, Wang Y L, Dong G C, et al. The impact of free-air CO₂ enrichment(FACE)and nitrogen supply on grain quality of rice[J]. *Field Crops Res*, 2007, 102:128-140.
[22] 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.