

FACE 对杂交籼稻汕优 63 干物质生产与分配的影响

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 江苏省作物遗传生理重点实验室, 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:2005—2006 年利用我国惟一的农田开放式空气 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 物质生产与分配的影响。结果表明:(1)两季平均,FACE 处理使汕优 63 移栽—分蘖中期、分蘖中期—拔节期、拔节—抽穗期和抽穗—成熟期干物质生产量分别比对照增加了 39%、20%、32%和 41%,结果使成熟期生物产量显著增加(+33%);(2)与干物质生产量相比,汕优 63 平均叶面积指数(LAI)和净同化率(NAR)对 CO₂ 的响应有相似的季节性变化趋势,但 LAI 的响应值明显大于 NAR;(3)FACE 处理使汕优 63 不同生育时期叶片和稻穗占地上部干重的比例下降,而使茎鞘占地上部干重的比例明显增加;(4)三系杂交籼稻汕优 63 成熟期生物产量以及不同生育阶段平均 LAI、NAR 和干物质生产量对 FACE 的响应与粳稻品种存在明显差异,而干物质分配差异较小。

关键词:三系杂交籼稻;开放式空气 CO₂ 浓度增高(FACE);干物质生产与分配;叶面积系数;净同化率

中图分类号:X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)01-0008-07

Effect of Free Air CO₂ Enrichment (FACE) on Production and Distribution of Dry Matter of Three-line Indica Hybrid Rice Cultivar Shanyou 63

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: In this study, the Chinese unique Free Air CO₂ Enrichment [FACE, 200 μmol·mol⁻¹ higher than ambient CO₂ concentration (AMB)] research platform was used to investigate the effects of FACE on dry matter (DM) production and distribution of three-line indica hybrid rice cultivar Shanyou 63 under two levels of N such as Low (LN, 125 kg·hm⁻²) and normal N (NN, 250 kg·hm⁻²) in 2005 and 2006. The results showed that throughout the two growing seasons, rice DM production under the FACE was significantly enhanced by 39%, 20%, 32% and 41% during the rice growth periods from transplanting to mid-tillering, mid-tillering to jointing, jointing to heading and heading to grain maturity, respectively. As a result, the final total biomass at maturity was increased by 33% on average. In general, the seasonal response of crop growth to the FACE in both leaf area index (LAI) and net assimilation rate (NAR) followed a similar pattern to those of the DM production, with a larger response in LAI than in NAR. Under the FACE, the weight of leaves and spikes was decreased in proportion to the total above-ground DM over the season, whereas the weight of stems was increased. There were large differences between the three-line indica hybrid rice cultivar and japonica rice cultivar in the responses of final DM accumulation to leveled CO₂ concentrations at maturity stage, and in mean LAI and NAR, and DM production during the different growth periods, while differences in dry matter distribution of leaves, spikes and stems were small.

Keywords: three-line indica hybrid rice; Free Air CO₂ Enrichment (FACE); dry matter production and distribution; leaf area index; net assimilation rate

收稿日期:2008-02-25

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

前文(见刘红江等^[9])报道了三系杂交水稻品种汕优63的生育期、株高、产量及其构成因素对开放式空气中二氧化碳增高(FACE, 比对照高 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)的响应, 明确了FACE处理使汕优63成熟期株高显著提高(+7%), 使单位面积穗数(+10%)、每穗颖花数(+10%)、结实率(+5%)和千粒质量(+4%)均显著增加, 使籽粒产量大幅度提高(+34%), 但FACE处理对汕优63生育期无显著影响; 三系杂交水稻汕优63生育期、株高、产量及其构成因素对FACE的响应与粳稻品种有明显差异: 其中, 汕优63的生育期、单位面积穗数对FACE处理的响应明显小于粳稻品种, 株高、每穗颖花数、千粒质量、产量对FACE处理的响应明显大于粳稻品种, 结实率对FACE处理的响应与粳稻品种差异不大。籽粒产量形成是物质生产与分配的最终结果。作为世界两个大型水稻FACE研究(直径12.5 m), 日本报道了1998—2000年度Akitakomachi不同生育时期干物质积累量、叶面积系数(LAI)和收获指数(HI)对FACE的响应^[4-7]; 中国FACE研究者系统报道了2001—2003年武香粳14不同生育时期(或阶段)干物质生产与分配、LAI、净同化率(NAR)以及茎鞘碳水化合物含有率 and 累积量等对FACE的响应^[1,13], 上述研究均以常规粳稻品种为供试材料。同常规粳稻相比, 杂交水稻杂种优势强、抗逆性好、穗型大、产量高。杂交水稻物质生产与分配对FACE响应的方向是否与常规粳稻品种一致? 响应的大小与粳稻品种有无差异? 明确这些问题, 对全面评价大气CO₂浓度升高对我国乃至亚洲水稻生产的可能影响, 以及制订相应的应对策略和措施均具有重要科学意义。本文将利用连续两年(2005—2006年)的数据试图回答这些问题。

1 材料与方法

1.1 试验方法

本试验于2005、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°35.5'N, 119°42'E), 试验田土壤类型为砂壤土, 年均降水量980 mm左右, 年均蒸发量1100 mm左右, 年平均温度14.9℃, 年日照时间大于2100 h, 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(2~0.02 mm) $578.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 粉砂粒(0.02~0.002 mm) $285.1 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 粘粒(<0.002 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 m, 以减少CO₂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CO₂气体, 电脑控制FACE圈内CO₂浓度, 使其全生育期FACE圈内CO₂浓度保持在 $570 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 左右^[8]。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

2005、2006年, 供试品种均为三系杂交水稻汕优63, 大田早育秧, 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·m⁻², 1苗·穴⁻¹。自移栽期起, 大气CO₂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 $70 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, P、K肥全部作基肥施用。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, 保证水稻正常生长发育。

1.3 测定内容与方法

记载不同处理各个生育时期。

在移栽日、移栽后27 d(约分蘖中期)、移栽后47 d(约拔节期)、抽穗期、成熟期, 每小区调查35穴植株的茎蘖数, 计算单穴平均茎蘖数。据此, 每处理取代表性植株5穴(移栽期测定50株), 分别测定绿叶、黄叶、茎鞘、穗等器官的干物重。

用蒽酮比色法测定抽穗期和成熟期水稻茎鞘中可溶性糖和淀粉含量。

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LSD0.05(或LSD0.01)水平的视为显著(或极显著)。

2 结果与分析

2.1 FACE对汕优63干物质生产的影响

2.1.1 FACE对汕优63生物量的影响

FACE处理对汕优63成熟期生物量的影响示于图1。由图1可知: 2005年, FACE处理使汕优63生物

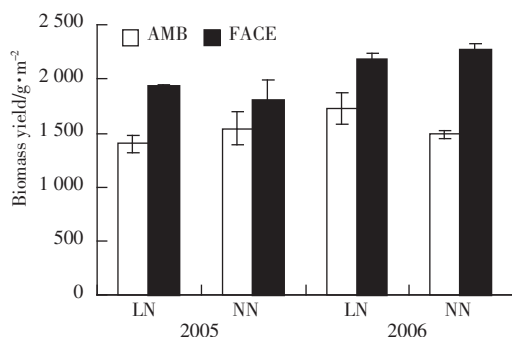
量平均比对照增加 $394 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 增幅 26.8%, 其中 LN 条件下增加 $532.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 增幅 38.0%, NN 条件下增加 $256 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 增幅 16.6%; 2006 年, FACE 处理使汕优 63 生物量平均比对照增加 $609 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 增幅 37.9%, 其中 LN 条件下增加 $444.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 增幅 25.7%, NN 条件下增加 $773.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 增幅 51.9%; 两季平均, FACE 处理使汕优 63 生物量平均比对照增加 $502 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 增幅 32.6% ($P < 0.01$), 其中 LN 条件下增加 $389 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 增幅 31.2%, NN 条件下增加 $514 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 增幅 34.0%。统计分析表明, 高 CO_2 浓度使汕优 63 生物量极显著增加; 2006 年生物量极显著高于 2005 年的生物量; N 处理以及不同处理间的互作效应(包括 $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 、 $\text{CO}_2 \times \text{年}$ 、 $\text{N} \times \text{年}$ 和 $\text{CO}_2 \times \text{N} \times \text{年}$, 下同)对生物量的影响均未达到显著水平。

水稻成熟期生物量为不同生育阶段干物质生产量之和。由图 2 可知, 与对照相比, 两季水稻 FACE 处理

的干物质生产量在移栽-分蘖中期、分蘖中期-拔节期、拔节-抽穗期以及抽穗-成熟期平均分别比对照增加 39.0% ($P < 0.01$)、20.0% ($P < 0.01$)、32.4% ($P < 0.01$) 和 41.2% ($P < 0.01$)。其中, LN 条件下分别比对照增加 34.7%、17.8%、34.3% 和 37.6%, NN 条件下分别比对照增加 43.3%、22.2%、30.1% 和 44.8%。随着生育进程的推移, 水稻物质生产对 FACE 的响应值呈现由大变小、再由小变大的趋势, 以分蘖中期-拔节期干物质生产量的响应值最小, 移栽-分蘖中期和抽穗-成熟期的响应值最大。统计分析表明, 高 CO_2 浓度使不同生育阶段干物质生产量均显著或极显著增加; 除分蘖中期-拔节期外, 不同年度间同一生育阶段干物质生产量的差异均达显著或极显著水平; N 处理以及不同处理间的互作效应对各生育阶段干物质生产量大多数没有显著影响。

2.1.2 FACE 对汕优 63 叶面积系数和净同化率的影响

由图 3 可知, 叶面积指数(LAI)随着生育进程的推移呈单峰曲线, 以抽穗期达到最大值(平均 6.6), FACE 处理和对照趋势一致。两季平均 FACE 处理水稻 LAI 在分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期分别比对照增加了 39.0% ($P < 0.01$)、19.3% ($P < 0.01$)、16.0% ($P < 0.01$) 和 27.2% ($P < 0.01$), 其中, LN 条件下分别比对照增加 23.3%、24.2%、15.1% 和 19.9%, NN 条件下分别比对照增加 53.9%、15.4%、16.8% 和 34.1%, 均表现出“先降后增”的趋势, 以拔节期或抽穗期增幅最小, 分蘖中期增幅最大。这种变化趋势与干物质生产对 FACE 的时间响应曲线基本一致。统计分析表明, 高 CO_2 浓度使不同生育时期 LAI 均极显著增加; 分蘖中期和拔节期 LAI 两年间的差异分别达显著和极显著水平, 但抽穗期和成熟期 LAI 两年间无显著差异, 增



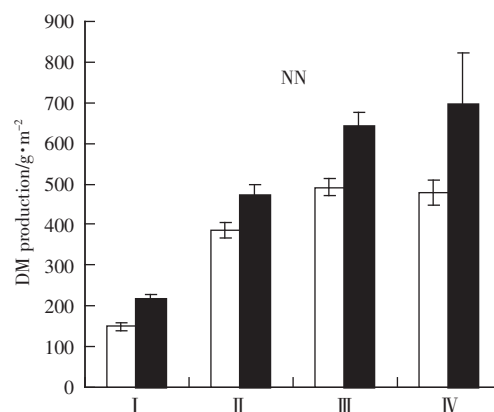
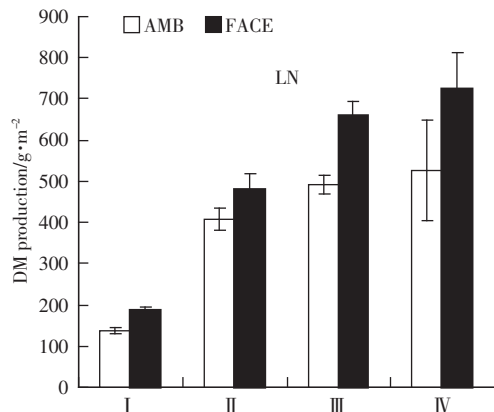
LN: 低氮 low nitrogen; NN: 常氮 normal nitrogen.

FACE: 开放式空气 CO_2 浓度增高 Free Air CO_2 Enrichment;

AMB: 环境空气 CO_2 浓度 Ambient CO_2 , 下同 The same below.

图 1 FACE 对汕优 63 成熟期生物量的影响

Figure 1 Effect of FACE on biomass yield at grain maturity of Shanyou 63 in 2005 and 2006



I: 移栽-分蘖中期 Transplanting to Mid-tillering; II: 分蘖中-拔节期 Mid-tillering to jointing; III: 拔节-抽穗期 Jointing to heading; IV: 抽穗-成熟期 Heading to maturity

图 2 FACE 处理对汕优 63 不同生育阶段干物质生产量的影响(2005—2006)

Figure 2 Effect of FACE on DM production during different growth periods of Shanyou 63 in 2005 and 2006

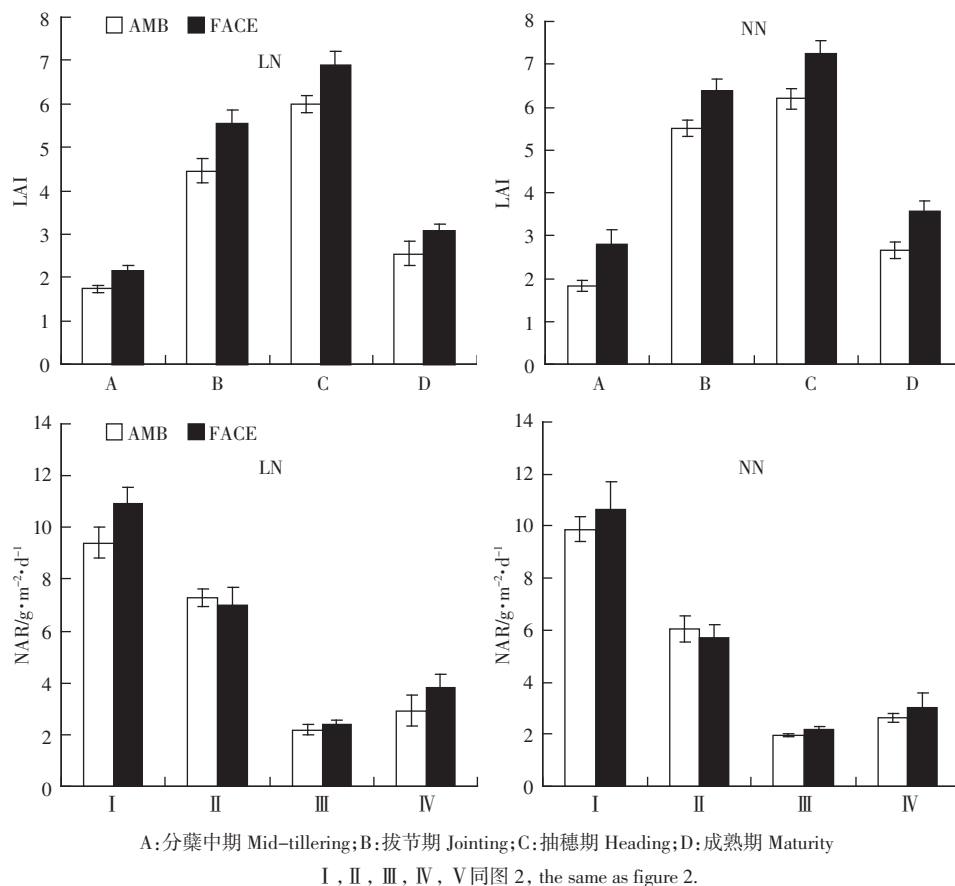


图 3 FACE 处理对汕优 63 叶面积系数(LAI)和净同化率(NAR)的影响(2005—2006)

Figure 3 Effect of FACE on leaf area index(LAI)and net assimilation rate(NAR)of Shanyou 63(2005 and 2006)

加施 N 量使分蘖中期和拔节期 LAI 显著和极显著增加,但对抽穗期和成熟期 LAI 无显著影响;不同处理间的互作效应对不同生育时期 LAI 均没有显著影响。

由图 3 可知,随着生育进程的推移,净同化率(NAR)直线下降,至拔节-抽穗期达最小值,抽穗-成熟期又稍有回升,FACE 处理与对照趋势一致。两季平均,FACE 水稻 NAR 在移栽-分蘖中期、拔节-抽穗期和抽穗-成熟期分别比对照增加了 11.6%($P<0.05$)、10.7%和 22.9%,分蘖中期-拔节期 NAR 比对照减少了 4.5%。其中,LN 条件下,移栽-分蘖中期、拔节-抽穗期和抽穗-成熟期分别比对照增加了 7.6%、12.7%和 15.3%,分蘖中-拔节期 NAR 比对照减少了 5.4%。NN 条件下,移栽-分蘖中期、拔节-抽穗期和抽穗-成熟期分别比对照增加了 15.8%、8.9%和 29.7%,分蘖中期-拔节期 NAR 比对照减少了 3.7%,均表现出“先降后增”的趋势,以抽穗-成熟期增幅最大,而分蘖中期-拔节期稍有下降。统计分析表明,高 CO_2 浓度使移栽-分蘖中期 NAR 显著增加,但对分蘖中-成熟期 NAR 无显著影响;移栽-分蘖中期、分蘖中期-拔节期

NAR 2005 年极显著高于 2006,而拔节-抽穗期、抽穗-成熟期则相反;增加施 N 量使分蘖中期-拔节期 NAR 极显著下降,但对移栽-分蘖中期、拔节-抽穗期、抽穗-成熟期 NAR 均无显著影响;不同处理间的互作效应对不同生育阶段 NAR 大多数没有显著影响。

2.2 FACE 对汕优 63 物质分配的影响

由表 1 可知,叶片占全株干重的比例随着生育进程的推移逐渐下降,分蘖中期最高(平均 47%),成熟期最低(平均 14%),不同年度 FACE 处理和对照趋势一致。两季平均 FACE 处理叶片占全株干重的比例在分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期分别比对照减少了 3.4%、7.5%($P<0.05$)、8.5%($P<0.01$)和 10.3%($P<0.05$),其中,LN 条件下分别比对照减少了 4.9%、7.0%、7.9%和 7.2%;NN 条件下分别比对照减少 1.7%、8.0%、9.1%和 13.2%,随着生育进程的推移,响应值大多数表现出逐渐增大的趋势。统计分析表明,高 CO_2 浓度使拔节期、抽穗期和成熟期叶片占全株干重的比例均显著或极显著下降,对分蘖中期叶片占全株干重的比例没有影响;增施 N 肥使拔节期和抽穗期叶片占全

表 1 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期叶片占全株干重比例的影响(2005—2006)

Table 1 Effect of FACE on the ratios of dry matter(DM) distribution in leaves at different growth stages of Shanyou 63 in 2005 and 2006

年份	N 处理	CO ₂ 处理	分蘖中期	拔节期	抽穗期	成熟期
2005	LN	AMB	50.2	42.2	28.1	15.1
		FACE	47.2	38.3	25.4	14.1
	NN	AMB	48.1	44.2	31.6	15.1
		FACE	46.7	39.6	25.3	13.8
2006	LN	AMB	47.4	37.2	28.1	13.7
		FACE	45.6	35.6	26.3	12.7
	NN	AMB	45.9	42.7	28.0	16.4
		FACE	45.6	40.4	29.0	13.5
	CO ₂		ns	*	**	*
	N(氮)		ns	*	*	ns
	Year(年)		ns	ns	ns	ns
	CO ₂ ×N		ns	ns	ns	ns
	CO ₂ ×Year		ns	ns	**	ns
	N×Year		ns	ns	ns	ns
	CO ₂ ×N×Year		ns	ns	*	ns

注:ns:No significance, * $P<0.05$, ** $P<0.01$. 下同 The same below.

株的比例均显著增加,但对分蘖中期和成熟期没有影响;年度以及不同处理间的互作效应对各生育时期叶片占全株干重的比例大多数无显著影响。

由表 2 可知,茎鞘占全株干重的比例随着生育进程的推移呈单峰曲线,抽穗期达最大值(平均 60%),成熟期最低(平均 29%),不同年度 FACE 处理和对照趋势一致。两季平均 FACE 处理茎鞘占全株干重的比例在分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期分别比对照增加 3.1%、5.3% ($P<0.05$)、6.2% ($P<0.01$) 和 12.5% ($P<0.01$),其中,LN 条件下分别比对照增加 4.7%、4.6%、5.4%和 6.3%;NN 条件下分别比对照增加 1.5%、6.2%、7.1%和 19.0%。随着生育进程的推移,响应值逐渐增大,以成熟期为最大。统计分析表明,除分蘖中期外,高 CO₂ 浓度使其他生育期茎鞘占全株干重的比例均显著或极显著增加;增加施 N 量使拔节期和抽穗期茎鞘占全株干重的比例显著和极显著减少,但对分蘖中期和成熟期均无显著影响;年度以及不同处理间的互作效应对不同生育时期茎鞘占全株干重的比例大多数无显著影响。

由表 3 可知,稻穗占全株干重的比例随着生育进程的推移迅速增加,抽穗期最低(平均 14%),成熟期最高(平均 56%),不同年度 FACE 处理和对照趋势一致。两季平均 FACE 处理稻穗占全株干重的比例在抽穗期和成熟期分别比对照下降了 7.0% ($P<0.05$) 和 3.3% ($P<0.01$),其中,LN 条件下分别下降 6.0% 和

表 2 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期茎鞘占全株干重比例的影响(2005—2006)

Table 2 Effect of FACE on the ratios of DM distribution in stems at different growth stages of Shanyou 63 in 2005 and 2006

年份	N 处理	CO ₂ 处理	分蘖中期	拔节期	抽穗期	成熟期
2005	LN	AMB	49.8	57.8	57.9	27.4
		FACE	52.8	61.7	61.3	29.5
	NN	AMB	51.9	55.8	53.4	27.7
		FACE	53.3	60.4	61.4	31.5
2006	LN	AMB	52.6	62.8	57.2	29.3
		FACE	54.4	64.4	60.0	30.7
	NN	AMB	54.1	57.3	56.3	25.8
		FACE	54.4	59.6	56.1	32.2
	CO ₂		ns	*	**	**
	N(氮)		ns	*	**	ns
	Year(年)		ns	ns	ns	ns
	CO ₂ ×N		ns	ns	ns	ns
	CO ₂ ×Year		ns	ns	**	ns
	N×Year		ns	ns	ns	ns
	CO ₂ ×N×Year		ns	ns	*	ns

1.3%;NN 条件下分别下降 7.9%和 5.2%。统计分析表明,高 CO₂ 浓度使抽穗期和成熟期稻穗占地上部干重的比例显著和极显著下降;年度、N 以及不同处理间的互作效应对抽穗期和成熟期稻穗占全株干重的比例均未达显著水平。

3 讨论

关于水稻生物量对 FACE 处理的响应,Kim 等^[5]研究表明,FACE 处理使日本粳稻品种 Akitakomachi 的生物量平均比对照增加 12%;Yang 等^[13]的研究表

表 3 FACE 处理对汕优 63 抽穗和成熟期稻穗占全株干重比例的影响(2005—2006)

Table 3 Effect of FACE on the ratios of DM distribution in spikes at heading and grain maturity of Shanyou 63 in 2005 and 2006

年份	CO ₂ 处理	抽穗期		成熟期	
		LN	NN	LN	NN
2005	AMB	14.0	15.0	57.5	57.2
	FACE	13.2	13.4	56.4	54.7
2006	AMB	14.7	15.7	57.0	57.8
	FACE	13.8	14.9	56.7	54.3
	CO ₂		*		**
	N(氮)		ns		ns
	Year(年)		ns		ns
	CO ₂ ×N		ns		ns
	CO ₂ ×Year		ns		ns
	N×Year		ns		ns
	CO ₂ ×N×Year		ns		ns

明,FACE 使我国粳稻品种武香粳 14 的生物量平均比对照增加 16%(表 4)。本研究表明,FACE 处理使汕优 63 生物量平均比对照增加 33%(图 1、表 4),增加幅度平均比粳稻品种大 2.36 倍。说明与经济产量相似^[9],三系杂交水稻汕优 63 生物量对 FACE 处理的响应亦比粳稻品种大很多。此外,本研究结果表明,在

表 4 中日 FACE 研究不同水稻品种物质生产与分配对高 CO₂ 浓度的响应

Table 4 Summary of the responses of DM production and distribution in rice crops to elevated CO₂ concentration in Chinese and Japanese FACE experiments

项目	日本 ²⁾	中国 ³⁾	中国
试验条件			
试验时间	1998—2000	2001—2003	2005—2006
供试品种	Akitakomachi (常规粳稻)	武香粳 14 (常规粳稻)	汕优 63 (三系杂交水稻)
CO ₂ 目标浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$	570	570	570
供氮水平/ $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$	40、80~90、120~150	150、250、350	125、250
生物产量	12% ^{**1)}	+16% ^{**}	+33% ^{**}
不同生育阶段物质生产量			
移栽—分蘖中期	—	+41% ^{**}	+39% ^{**}
分蘖中期—拔节期	—	+27% ^{**}	+20% ^{**}
拔节—抽穗期	—	+15% ^{**}	+32% ^{**}
抽穗—成熟期	—	+5% ^{ns}	+41% ^{**}
叶面积指数(LAI)			
分蘖中期	+18% [*]	+29% ^{**}	+39% ^{**}
拔节期	+17% ^{**}	+15% [*]	+19% ^{**}
抽穗期	-4% ^{ns}	+4% ^{ns}	+16% ^{**}
成熟期	-13% ^{**}	+5% ^{ns}	+27% ^{**}
净同化率(NAR)			
移栽—分蘖中期	—	+21% ^{**}	+12% [*]
分蘖中期—拔节期	—	+4% ^{ns}	-5% ^{ns}
拔节—抽穗期	—	+14% [*]	+11% ^{ns}
抽穗—成熟期	—	+4% ^{ns}	+23% ^{ns}
叶片占地上部干重比例			
分蘖中期	—	-5.6% ^{**}	-3.4% ^{ns}
拔节期	—	-10.1% ^{**}	-7.5% [*]
抽穗期	—	-10.3% ^{**}	-8.5% ^{**}
成熟期	—	-8.3% ^{**}	-10.3% [*]
茎鞘占地上部干重比例			
分蘖中期	—	+5.4% ^{**}	+3.1% ^{ns}
拔节期	—	+8.4% ^{**}	+5.3% [*]
抽穗期	—	+6.8% ^{**}	+6.2% ^{**}
成熟期	—	+8.5% ^{**}	+12.5% ^{**}
稻穗占地上部干重比例			
抽穗期	—	-2.7% ^{ns}	-7.0% [*]
成熟期	-2.4%	-2.6% ^{**}	-3.3% ^{**}

注:1)ns, no significance;*, $P<0.05$; **, $P<0.01$.

2)数据来自 Kim 等^[4-5];Data from Kim et al^[4-5].

3)数据来自 Yang 等^[13];Data from Yang et al^[13].

125 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的基础上增施 N 肥(250 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)对汕优 63 生物量的影响未达显著水平。施 N 量过多不利于生物量增加,这与增施 N 肥对汕优 63 产量没有明显影响相一致,至于其中的原因,笔者等在前文^[9]已经作了说明。

水稻成熟期生物量为不同生育阶段干物质生产量之和。高 CO₂ 浓度对水稻不同生育阶段物质生产量的影响及其可能原因目前只有 1 例报道^[13]。Yang 等^[13]报道,FACE 使粳稻品种武香粳 14 移栽—分蘖期(有效分蘖期)、分蘖—拔节期(无效分蘖期)、拔节—抽穗期(生育中期)和抽穗—成熟期(生育后期)干物质生产量分别比对照增加 41%、27%、15%和 5%,有效分蘖期物质生产对 FACE 的响应能力最强,随着生育进程的推移响应能力逐渐减弱。本研究表明,FACE 使三系杂交水稻汕优 63 有效分蘖期、无效分蘖期、生育中期以及生育后期干物质生产量分别比对照增加 39%、20%、32%和 41%,有效分蘖和无效分蘖期响应值的大小及其随生育进程变化的趋势(逐渐下降)与粳稻品种基本一致,但生育中期和后期物质生产量的响应值明显大于粳稻品种对应生育阶段物质生产量的响应值,且随生育进程变化的趋势与粳稻相反。水稻不同生育阶段的物质生产量主要取决于不同生育阶段的天数和干物质生产速度,而干物质生产速度为平均叶面积系数(LAI)和净同化率(NAR)的乘积。本研究发现,水稻物质生产量对 FACE 的响应随生育进程变化的趋势与 LAI 和 NAR 随生育进程变化的趋势基本一致(先降后增),但 LAI 的响应值明显大于 NAR 的响应值,说明水稻物质生产对高 CO₂ 浓度的动态响应主要是由 LAI 的变化所致,而受 NAR 的影响相对较小。同中日 FACE 研究中的两个粳稻品种^[1,5,13]相比,高 CO₂ 浓度条件下三系杂交水稻汕优 63 生育中期叶片扩展能力明显大于粳稻品种,而生育后期叶面积衰减速度又明显小于粳稻品种(见表 4),这可能是导致这两种不同类型水稻品种物质生产量季节响应差异的主要原因。三系杂交水稻生育中后期物质生产量、LAI 和 NAR 对高 CO₂ 浓度的响应能力不降反升,除本研究的试验地点、土壤、栽培条件等与前人有差异外(表 4),可能与汕优 63 养分吸收利用(特别是 N 素)对 FACE 的响应特点有关,具体原因有待进一步研究。

FACE 处理不仅改变了汕优 63 各生长期物质生产的能力,亦改变了物质在不同器官中分配的规律。本研究表明,FACE 使不同生育时期叶片和稻穗占全株干物重的比例下降,茎鞘占全株干物重的比例提高,这与前人 FACE 研究^[3,13]的结果一致。这一结果亦

与 FACE 条件下水稻叶片含 N 率下降(数据未列出),而茎鞘中的可溶性碳水化合物含有率和积累量均大幅增加(另文发表)相一致^[3,13]。这可能是由于在大气 CO₂ 浓度增高条件下,作物光合作用所需要的底物增加,因此其光合作用可能加强,这样作物积累的碳水化合物就会显著增加。稻穗占地上部干重的比例反映了水稻光合产物向结实器官运转的效率,成熟期稻穗占地上部干重的比例,即为收获指数。中日 FACE 研究表明,粳稻^[3,4,14]和籼稻品种收获指数对高 CO₂ 浓度响应的方向和大小一致,说明从物质生产与分配来看,三系杂交水稻汕优 63 籽粒产量对 FACE 的响应明显大于粳稻品种^[2-4,6,14],主要是 FACE 条件下汕优 63 生物产量大幅度增加所造成,而与物质分配到籽粒中的比例关系不太密切,而前者又主要与三系杂交水稻生育中后期光合生产的响应能力明显大于粳稻品种有关(图 2,表 4)。从另一方面来看,水稻籽粒灌浆物质有两个主要来源,即抽穗后的物质生产量和抽穗期茎鞘贮藏碳水化合物的运转量。本试验表明,FACE 处理使汕优 63 抽穗前茎鞘贮藏性碳水化合物运转量平均增加 63%,其中 LN 条件下增加 78%,NN 条件下增加 48%,均达极显著水平(图 4),说明 FACE 条件下三系杂交水稻籽粒产量较对照大幅增加^[9],不仅与该品种抽穗后光合生产的响应能力显著增强有关(图 2,表 4),亦与抽穗前茎鞘贮藏性碳水化合物运转能力明显提高有关(图 4)。因此,FACE 情形下汕优 63 籽粒的阶段灌浆特点及其生理学机制值得进一步研究。

4 结论

开放式空气 CO₂ 浓度增高(FACE)使汕优 63 成熟

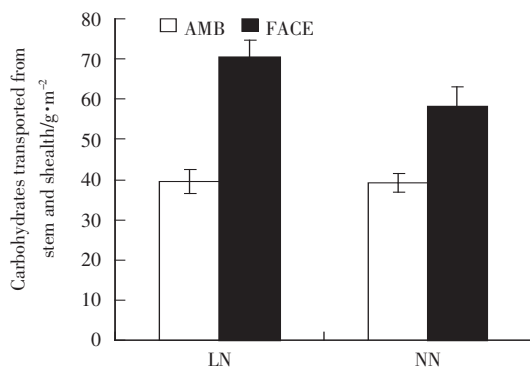


图 4 FACE 处理对汕优 63 结实期贮藏物质(茎鞘可溶性碳水化合物)运转量的影响(2005—2006)
Figure 4 Effect of FACE on the transport of substances from stems and sheaths during the grain filling stage of Shanyou 63 in 2005 and 2006

期生物量、不同生育时期内的生物产量、不同生育时期叶面积指数均得到了显著或极显著的增加,对净同化率的影响相对较小;FACE 使汕优 63 不同生育时期叶片和稻穗占全株干物重的比例下降,茎鞘占全株干物重的比例提高。本研究表明,N 肥、FACE 和 N 的互作效应对水稻生物产量的影响均未达到显著水平,对这一问题进一步深入研究,将会为未来大气 CO₂ 浓度增高条件下我国水稻高产栽培的 N 肥施用提供理论依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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, Miura S, et al. Growth and nitrogen uptake of CO₂-enriched rice under field conditions[J]. *New Phytol*, 2001, 150: 223-229.
- [7] Kobayashi K, Lieffering M, Kim H Y. Growth and yield of paddy rice under free-air CO₂ enrichment. In: Shiyomi M, Koizumi H, eds. *Structure and Function in Agroecosystem Design and Management*[M]. USA: CRC Press, Boca Raton, Florida, 2001. 371-395.
- [8] 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.
- [9] 刘红江,杨连新,黄建晔,等. FACE 对三系杂交水稻汕优 63 产量形成的影响[J]. 农业环境科学学报, (待发表).
- [10] Nakagawa H, Horie T. Rice responses to elevated CO₂ and temperature[J]. *Global Environ Res*, 2000, 3: 101-113.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [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] 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 Research*, 2006, 98: 141-150.