

# FACE 对三系杂交籼稻汕优 63 氮素吸收利用的影响

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

(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:**在水稻品种中,杂交籼稻因其杂种优势强、抗逆性好、穗型大、产量潜力高,在稻作生产中占有重要的、不可替代的作用。2005、2006 年利用我国惟一的农田开放式空气 CO<sub>2</sub> 浓度增高(FACE)研究平台,设计施 N 量为 125 kg·hm<sup>-2</sup>(LN)、250 kg·hm<sup>-2</sup>(NN)处理,研究大气 CO<sub>2</sub> 浓度比对照高 200 μmol·mol<sup>-1</sup> 的 FACE 处理对三系杂交籼稻汕优 63 不同生育时期 N 素含量、N 素吸收、N 素分配和 N 素效率的影响。结果表明:(1) FACE 处理使汕优 63 各生育时期稻株含 N 率显著下降,使各生育时期 N 素吸收量显著增加,生育中期的增幅明显小于生育前、后期;(2) FACE 处理对汕优 63 N 素在不同器官中分配比例无明显影响;(3) FACE 处理使汕优 63 不同生育期 N 素干物质生产效率极显著提高,使 N 素子粒效率显著提高,但对 N 素收获指数无显著影响;(4)增施 N 肥,使汕优 63 不同生育时期的植株 N 素含量和吸 N 量均得到显著或极显著的增加,使 N 素干物质生产效率和 N 素子粒效率下降;(5)CO<sub>2</sub>×Y、N×Y 对植株含 N 率、吸 N 量的影响有互作效应,FACE 处理使汕优 63 稻株含 N 率显著下降;使 N 素吸收量、N 素干物质生产效率、N 素子粒效率显著提高。

**关键词:**三系杂交籼稻;开放式空气 CO<sub>2</sub> 浓度增高(FACE);N 素含量;N 素吸收;N 素分配;N 素效率

**中图分类号:**X945.78      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-2043(2008)03-1015-07

## Effect of Free-air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) on Nitrogen Uptake and Utilization of Three-line Indica Hybrid Rice Cultivar Shanyou 63

LIU Hong-jiang<sup>1</sup>, YANG Lian-xin<sup>1</sup>, HUANG Jian-ye<sup>1</sup>, DONG Gui-chun<sup>1</sup>, ZHU Jian-guo<sup>2</sup>, LIU Gang<sup>2</sup>, WANG Yu-long<sup>1</sup>

(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:** Hybrid indica rice (*Oryza sativa* L.) cultivars play an important and irreplaceable role in rice production system due to its heterosis, resistance to environmental stress, large panicle and high yield potential. In this study, the Chinese unique free air CO<sub>2</sub> enrichment [FACE, 200 μmol·mol<sup>-1</sup> higher than ambient (AMB) ] research platform was used to investigate the effects of FACE on rice nitrogen (N) concentration, uptake, efficiency and allocation at different growth stages of three-line indica hybrid rice cultivar Shanyou 63 under two levels of N: low (LN, 125 kg·hm<sup>-2</sup>) and normal N (NN, 250 kg·hm<sup>-2</sup>) in 2005—2006. Main results showed that: (1) Compared with AMB, FACE significantly decreased N concentration in rice plant of Shanyou 63 over the season, FACE significantly increased nitrogen accumulation in rice plant, and the increasing rate at the middle growth stage was less than that at the early and late growth stage. (2) FACE had no obvious effect on nitrogen allocation pattern of Shanyou 63 over the season. (3) FACE treatment resulted in the significant increase in N use efficiency for biomass (NUEp) over the season and in N use efficiency for grain yield (NUEg) at grain maturity, but no CO<sub>2</sub> effect was observed on nitrogen harvest index (NHI).(4) Nitrogen concentration and accumulation at different growth stages of Shanyou 63 increased with increasing N supply (*P*<0.05 or 0.01), but NUEp and NUEg showed the opposite trends. (5) Significant interactions between [CO<sub>2</sub>]×year and N×year were observed for N concentration and accumulation. FACE decreased N concentration, increased N uptake, NUEp and NUEg at different growth stages of Shanyou 63, but no CO<sub>2</sub> effect was detected on N allocation.

**Keywords:** three-line indica hybrid rice cultivar;free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE);nitrogen concentration;nitrogen uptake;nitrogen allocation;nitrogen efficiency

收稿日期:2007-10-23

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);中国科学院知识创新重要方向项目(KSCX3-SW-440)

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

同封闭室和开顶式气室研究相比,开放式空气中 CO<sub>2</sub> 浓度增高 (FACE) 技术被公认为研究大气 CO<sub>2</sub> 浓度增高加后植物响应和适应的最佳方法。氮素是水稻需求量最大的营养元素<sup>[1-2]</sup>,随着大气 CO<sub>2</sub> 浓度的升高<sup>[3-4]</sup>,近几年来,日本和中国科学家利用大田 FACE 系统平台研究了大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  对粳型水稻氮素吸收利用的影响<sup>[5-9]</sup>。日本 FACE 研究发现,FACE 处理使日本粳稻品种 Akitakomachi 不同生育时期叶片的含 N 率均显著低于对照 (除生育早期外),使不同生育时期的 N 素干物质生产效率明显增加<sup>[5-6]</sup>。中国 FACE 研究表明<sup>[7-9]</sup>,FACE 处理使我国粳稻品种武香粳 14 不同生育期的植株含 N 率显著或极显著低于对照,使 N 素吸收量明显增加,使 N 素干物质生产效率、N 素子粒生产效率和收获指数明显提高。但到目前为止,在我国水稻生产中具有重要地位的杂交水稻的 N 素吸收利用对 FACE 的响应尚未见报道。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,杂交水稻的 N 素吸收利用对 FACE 的响应规律是否与常规粳稻品种一致? 响应值的大小与粳稻品种有无差异? 为了明确这些问题,本研究于 2005—2006 年,在江苏省江都市利用中国惟一的农田 FACE 研究平台,以我国种植面积最大的三系杂交水稻汕优 63 为供试材料,设计施 N 量为 125  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、250  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  处理,研究大气 CO<sub>2</sub> 浓度比对照高 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  的 FACE 处理对杂交水稻 N 素吸收利用的影响,以期为未来大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下我国水稻生产提供实验依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验方法

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'N, 119°42'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 ℃,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(2~0.02 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

CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 气体,电脑控制 FACE 圈内 CO<sub>2</sub> 浓度,使其全生育期 FACE 圈内 CO<sub>2</sub> 浓度保持在 570  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  左右<sup>[10]</sup>。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,1 苗·穴<sup>-1</sup>。自移栽期起,大气 CO<sub>2</sub> 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。同一 FACE 圈的 1/2 为 LN 区,另 1/2 为 NN 区。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  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,磷、钾肥全部作基肥施用。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

在移栽日、移栽后 27 d(够苗期)、移栽后 47 d(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。据此每小区取代表性植株 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。将不同器官材料粉碎后,用半微量蒸馏法测定全 N 含量。

### 1.4 统计分析方法

本试验所有数据均以 Excel 进行数据处理和图表绘制,SPSS 进行 CO<sub>2</sub>、N、年度单因素及其交互效应的显著性分析。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 处理对汕优 63 植株含 N 率的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育期植株含 N 率的影响如图 1 所示。FACE 处理使汕优 63 够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的植株含 N 率分别比对照低 12.7%、15.6%、15.7%、12.8%,NN 处理够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的植株含 N 率分别比 LN 处理高

4.4%、10.3%、23.3%、15.5%。统计分析表明 (表 1):年度、CO<sub>2</sub>、N 处理对不同生育时期植株含 N 率的影响均达到显著或极显著水平,CO<sub>2</sub>×N 的互作效应对抽穗期植株含 N 率的影响达极显著水平,CO<sub>2</sub>×Y 的互作效应对拔节期、抽穗期植株含 N 率的影响达显著或极显著水平,N×Y 的互作效应对拔节期、抽穗期、成熟期植株含 N 率的影响达显著或极显著水平,CO<sub>2</sub>×N×Y 的互作效应对抽穗期植株含 N 率的影响达极显著水平。

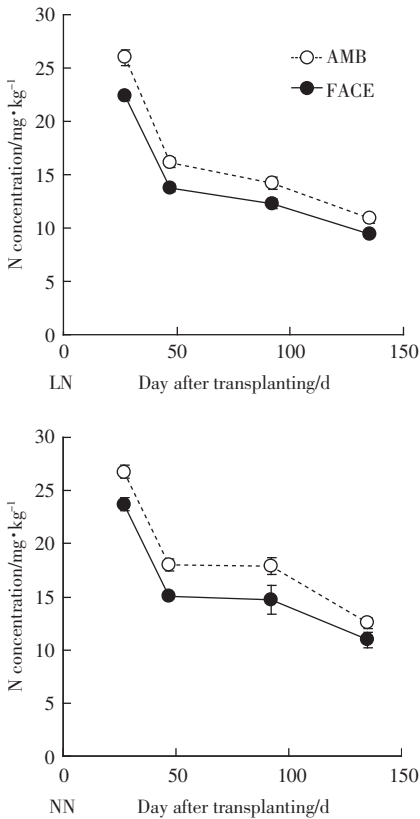


图 1 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期地上部含 N 率 (mg·kg<sup>-1</sup>) 的影响 (2005—2006)

Figure 1 Effect of FACE treatment on shoot N concentration (mg·kg<sup>-1</sup>) at different growth stages of shanyou63 in 2005—2006

2.2 FACE 处理对汕优 63 吸 N 量的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育期植株 N 素累积量的影响如图 2 所示。FACE 处理使够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的植株 N 累积量分别比对照增加 20.5%、6.7%、8.5%、15.8%,除拔节期外,处理间的差异均达显著或极显著水平;NN 处理够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的 N 累积量分别比 LN 处理增加 17.8%、9.9%、22.5%、12.8%,处理间的差异均达显著或极显著水平。统计分析表明(表 1):不同生育时期植株 N 累积量的年度间差异达到显著或极显著水平,CO<sub>2</sub>×Y 的互

作效应对拔节期、抽穗期 N 累积量的影响达显著或极显著水平,N×Y 的互作效应对拔节期、抽穗期 N 累积量的影响达显著水平,CO<sub>2</sub>×N×Y 的互作效应对抽穗期、成熟期 N 累积量的影响达显著或极显著水平。

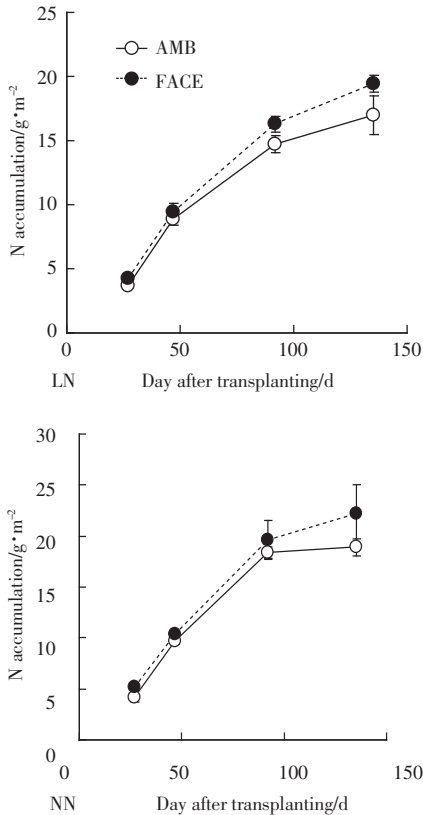


图 2 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期地上部吸 N 量 (g·m<sup>-2</sup>) 的影响 (2005—2006)

Figure 2 Effect of FACE treatment on shoot N accumulation (g·m<sup>-2</sup>) at different growth stages of shanyou63 in 2005—2006

2.3 FACE 处理对汕优 63 N 素分配的影响

2.3.1 对茎鞘中 N 素比例的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育期植株 N 素在茎鞘中分配比例的影响如图 3 所示。FACE 处理使够苗期、拔节期、成熟期的茎鞘中 N 素比例分别比对照提高 0.8%、1.9%、8.8%,使抽穗期比对照下降 0.5%,处理间的差异均未达到显著水平;NN 处理够苗期、抽穗期、成熟期的茎鞘中 N 素比例分别比 LN 处理增加 3.6%、4.4%、13.5%,拔节期比对照下降 8.3%,拔节期和成熟期的处理间差异均达显著水平,其他生育期未达到显著水平。统计分析表明(表 1):不同年度间抽穗期茎鞘中 N 素比例的差异达显著水平,CO<sub>2</sub>×N、CO<sub>2</sub>×Y、N×Y、CO<sub>2</sub>×N×Y 的互作效应对不同生育期 N 素在茎鞘中分配比例的影响多未达到显著水平。

表 1 FACE 处理对汕优 63 不同生育期 N 素吸收  
利用与分配影响的显著性检验

Table 1 Significance test for N concentration, N uptake, N  
distribution in stem, N distribution in leaf, N distribution in spike,  
N use efficiency for biomass of rice plant under different treatments

| 项目        | 处理                   | 够苗期 | 拔节期 | 抽穗期 | 成熟期 |
|-----------|----------------------|-----|-----|-----|-----|
| 含 N 率     | Y                    | **  | **  | **  | **  |
|           | CO <sub>2</sub>      | **  | **  | **  | **  |
|           | N                    | *   | **  | **  | **  |
|           | CO <sub>2</sub> ×N   | ns  | ns  | **  | ns  |
|           | CO <sub>2</sub> ×Y   | ns  | **  | *   | ns  |
|           | N×Y                  | ns  | *   | **  | **  |
| N 素累积量    | CO <sub>2</sub> ×N×Y | ns  | ns  | **  | ns  |
|           | Y                    | **  | *   | **  | **  |
|           | CO <sub>2</sub>      | **  | ns  | *   | **  |
|           | N                    | **  | *   | **  | **  |
|           | CO <sub>2</sub> ×N   | ns  | ns  | ns  | ns  |
|           | CO <sub>2</sub> ×Y   | ns  | **  | *   | ns  |
| 茎鞘中 N 素比例 | N×Y                  | ns  | *   | *   | ns  |
|           | CO <sub>2</sub> ×N×Y | ns  | ns  | *   | **  |
|           | Y                    | ns  | ns  | **  | ns  |
|           | CO <sub>2</sub>      | ns  | ns  | ns  | ns  |
|           | N                    | ns  | *   | ns  | *   |
|           | CO <sub>2</sub> ×N   | ns  | ns  | ns  | ns  |
| 叶片中 N 素比例 | CO <sub>2</sub> ×Y   | ns  | ns  | *   | ns  |
|           | N×Y                  | ns  | ns  | ns  | ns  |
|           | CO <sub>2</sub> ×N×Y | ns  | ns  | ns  | ns  |
|           | Y                    | ns  | ns  | **  | ns  |
|           | CO <sub>2</sub>      | ns  | ns  | ns  | ns  |
|           | N                    | ns  | *   | ns  | *   |
| 穗中 N 素比例  | CO <sub>2</sub> ×N   | ns  | ns  | *   | ns  |
|           | CO <sub>2</sub> ×Y   | ns  | ns  | **  | ns  |
|           | N×Y                  | ns  | ns  | ns  | ns  |
|           | CO <sub>2</sub> ×N×Y | ns  | ns  | ns  | ns  |
|           | Y                    |     |     | **  | ns  |
|           | CO <sub>2</sub>      |     |     | ns  | ns  |
| N 素物质生产效率 | N                    |     |     | *   | **  |
|           | CO <sub>2</sub> ×N   |     |     | ns  | ns  |
|           | CO <sub>2</sub> ×Y   |     |     | ns  | ns  |
|           | N×Y                  |     |     | ns  | ns  |
|           | CO <sub>2</sub> ×N×Y |     |     | *   | ns  |
|           | Y                    | **  | *   | **  | **  |
|           | CO <sub>2</sub>      | **  | **  | **  | **  |
|           | N                    | *   | **  | **  | **  |
|           | CO <sub>2</sub> ×N   | ns  | ns  | ns  | ns  |
|           | CO <sub>2</sub> ×Y   | ns  | **  | **  | ns  |
|           | N×Y                  | ns  | ns  | **  | **  |
|           | CO <sub>2</sub> ×N×Y | ns  | ns  | **  | *   |

2.3.2 对 N 素在叶片中分配比例的影响  
注:ns, no significant difference. \* P<0.05. \*\* P<0.01.

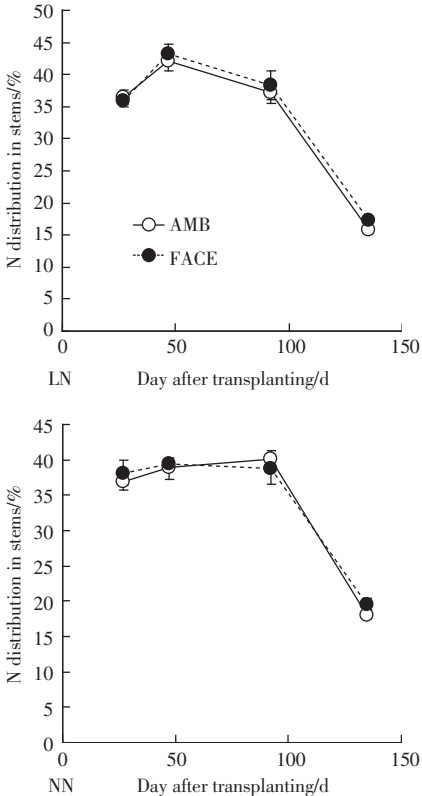


图 3 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期 N 素在茎鞘中  
比例 (%) 的影响 (2005—2006)

Figure 3 Effect of FACE treatment on N distribution rate in stems  
(%) at different growth stages of shanyou63 in 2005—2006

FACE 处理对汕优 63 不同生育期植株 N 素在叶片中分配比例的影响如图 4 所示。FACE 处理使汕优 63 够苗期、拔节期、抽穗期叶片中 N 素比例分别比对照下降 0.5%、1.3%、1.1%，成熟期比对照提高 6.1%，处理间的差异均未达到显著水平；NN 处理拔节期、成熟期叶片中 N 素比例分别比 LN 处理增加 6.2%、13.4%，够苗期、抽穗期分别比对照下降 2.0%、0.9%，拔节期和成熟期的处理间差异达显著水平。统计分析表明(表 1):不同年度间抽穗期叶片中 N 素比例的差异达极显著水平,CO<sub>2</sub>×N、CO<sub>2</sub>×Y 的互作效应对抽穗期植株叶片中 N 素比例的影响达显著或极显著水平。

2.3.3 对 N 素在穗中分配比例的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育期植株 N 素在穗中分配比例的影响如图 5 所示。FACE 处理使抽穗期 N 素在穗中分配比例比对照提高 6.5%，成熟期比对照下降 1.4%，处理间的差异均未达到显著水平；NN 处理抽穗期、成熟期 N 素在穗中分配比例分别比 LN 处理下降 9.6%、6.7%，处理间差异达显著或极显著水平。统计分析表明(表 1),不同年度间抽穗期 N 素



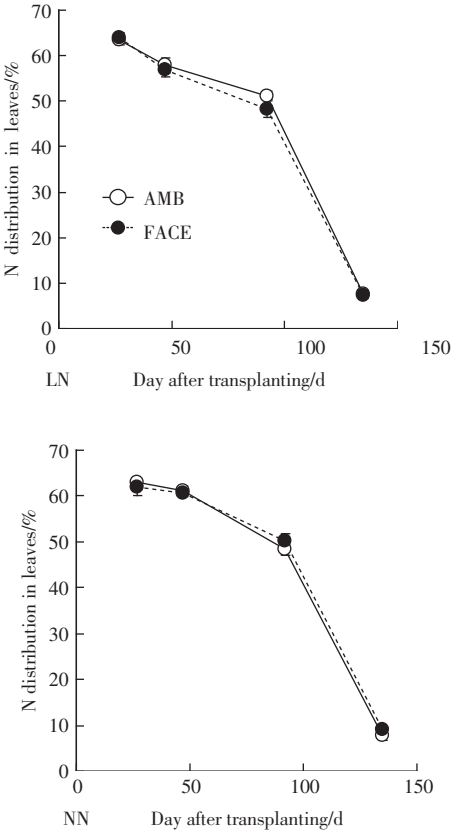


图 4 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期 N 素在叶片中比例 (%) 的影响 (2005—2006)

Figure 4 Effect of FACE treatment on N distribution rate in leaves (%) at different growth stages of shanyou63 in 2005—2006

在穗中分配比例的差异达极显著水平,CO<sub>2</sub>×N、CO<sub>2</sub>×Y、N×Y、CO<sub>2</sub>×N×Y 的互作效应对 N 素在穗中分配比例的几乎没有影响。

2.4 FACE 处理对汕优 63 N 素利用效率的影响

2.4.1 对 N 素干物质生产效率的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育期 N 素干物质生产效率的影响如图 6 所示。FACE 处理使够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的 N 素干物质生产效率分别比对照提高 14.6%、18.1%、19.5%、15.7%,处理间的差异均达极显著水平;NN 处理使够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的 N 素干物质生产效率分别比 LN 处理下降 4.3%、9.2%、17.1%、12.5%,处理间的差异均达显著或极显著水平。统计分析表明(表 1),不同年度间够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的 N 素物质生产效率的差异达到显著或极显著水平,CO<sub>2</sub>×N 的互作效应对不同生育期的 N 素干物质生产效率的影响均未达显著水平,CO<sub>2</sub>×Y 的互作效应对拔节期、抽穗期的 N 素干物质生产效率的影响达极显著水平,N×Y 的互作效应对抽穗期、成熟期的 N 素干物质生产效率的影响达极显著水

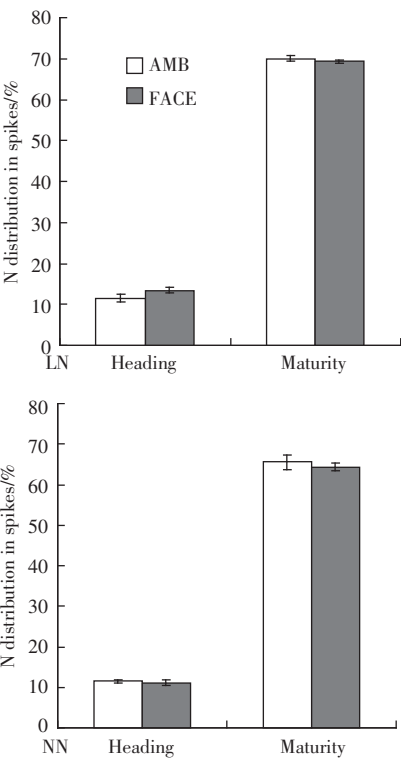


图 5 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期 N 素在稻穗中比例 (%) 的影响 (2005—2006)

Figure 5 Effect of FACE treatment on N distribution rate in spikes (%) at different growth stages of shanyou63 in 2005—2006

平,CO<sub>2</sub>×N×Y 的互作效应对抽穗期、成熟期的 N 素干物质生产效率的影响达显著或极显著水平。

2.4.2 对 N 素子粒生产效率和 N 素收获指数的影响

FACE 处理对汕优 63 N 素子粒生产效率、N 素收获指数的影响如图 7 所示。FACE 处理使汕优 63 的 N 素子粒生产效率比对照提高 13.2%,达极显著水平;NN 处理使汕优 63 的 N 素子粒生产效率比 LN 处理下降 20.1%,达极显著水平;FACE 处理对汕优 63 N 素收获指数无显著影响;NN 处理使汕优 63 的 N 素收获指数比 LN 处理下降 6.4%,达到极显著水平。说明 FACE 处理使汕优 63 的 N 素子粒效率显著提高,但对 N 素收获指数无明显影响,增施 N 肥使水稻 N 素子粒生产效率和收获指数均显著下降。

3 讨论

关于水稻不同生育时期植株含 N 率对 FACE 处理的响应,前人研究甚少。已有研究表明,FACE 处理使粳稻品种够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的植株含 N 率分别比对照低 6.1%、12.2%、12.1%、6.9%<sup>[9]</sup>。本研究表明,FACE 处理使三系杂交籼稻汕优 63 够苗期、拔节期、抽穗期、抽穗后 20 d、成熟期的植株含

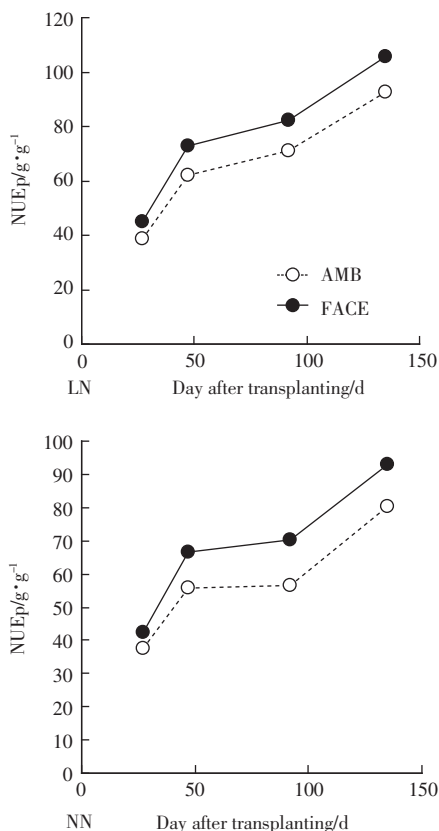


图 6 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期 N 素干物质生产效率 ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) 的影响 (2005—2006)

Figure 6 Effect of FACE treatment on N use efficiency for biomass ( $\text{NUEp}$ ) ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) at different growth stages of shanyou63 in 2005—2006

N 率分别比对照低 12.7%、15.6%、15.7%、12.8%(图 1)。可见,三系杂交水稻类型组合不同生育时期植株含 N 率对 FACE 处理的响应与前人研究的粳稻品种的趋势一致(表 2),但杂交水稻不同生育时期植株含 N 率对 FACE 处理的响应值均明显大于粳稻品种,尤其是够苗期和成熟期。

水稻的 N 素累积量为某一生育时期的含 N 率乘以该期的干物质量。前人研究表明,尽管 FACE 处理使水稻不同生育时期的植株含 N 率显著下降,但是由于各生育期的干物质累积量大幅度提高,FACE 处理使粳稻品种不同生育时期 N 素累积量显著提高<sup>[8,9]</sup>,FACE 处理够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的 N 素累积量分别比对照增加 37%、16%、7%、9%<sup>[9]</sup>,随着生育进程的推移,FACE 处理对粳稻品种 N 素累积量的促进作用逐渐减少。本研究表明,FACE 处理使三系杂交水稻汕优 63 够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的 N 素累积量分别比对照高 20.5%、6.7%、8.5%、15.8%(图

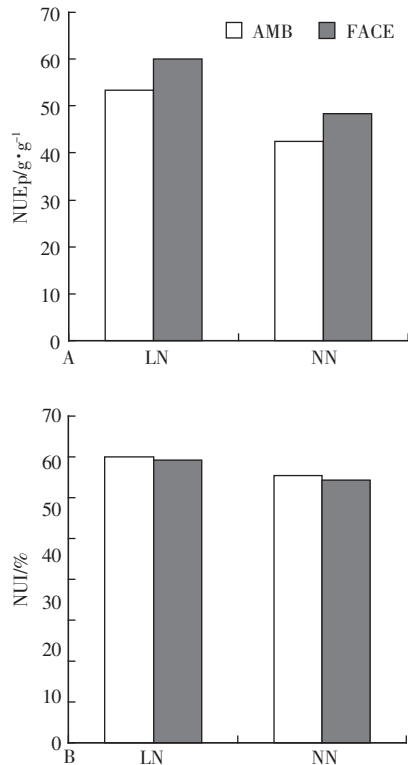


图 7 FACE 处理对汕优 63 N 素子粒生产效率 ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) (A) 和收获指数 (%) (B) 的影响 (2005—2006)

Figure 7 Effect of FACE treatment on N use efficiency for grain yield ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) (A) and N harvest index (%) (B) of shanyou63 in 2005—2006

2)。可见,三系杂交水稻生育前期(够苗期、拔节期)的 N 素吸收量对 FACE 处理的响应明显小于粳稻类型品种,生育中期的 N 素吸收量对 FACE 处理的响应与粳稻类型品种差异不大,生育后期的 N 素吸收量对 FACE 处理的响应明显大于粳稻类型品种。

关于 FACE 对 N 素在不同器官中分配比例的影响报道甚少。前人研究表明,高  $\text{CO}_2$  浓度使粳稻品种不同生育期 N 素在茎鞘中的分配比例增加,使 N 素的穗中分配比例增加,使 N 素在叶片中的分配比例减少<sup>[8,9]</sup>。本研究表明,高  $\text{CO}_2$  浓度对汕优 63 不同生育期 N 素在不同器官中的分配,除使穗后 20 d N 素在茎鞘中的比例显著减少外(图 3、4、5),均未达到显著水平。这可能与本研究的供试水稻品种跟前人的研究不同有关。

关于 FACE 对水稻 N 素利用效率的影响,前人研究表明,高  $\text{CO}_2$  浓度能够明显增加粳稻品种不同生育期的单位 N 素物质生产效率,其中生育中、后期的 N 素物质生产效率处理间的差异达到显著水平,使单位 N 素子粒生产效率和 N 收获指数分别平均提高

5.7%和 2.0%<sup>⑨</sup>。本研究表明,高 CO<sub>2</sub> 浓度使汕优 63 不同生育时期的单位 N 素物质生产效率极显著增加

表 2 中日 FACE 研究不同水稻品种 N 素  
吸收利用对高 CO<sub>2</sub> 浓度的响应

| Table 2 Resposes of N uptake and utilization of different rice cultivars to elevated [CO <sub>2</sub> ] in Chinese and Japanese FACE experiments |                        |                       |                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| 项目                                                                                                                                               | 日本 <sup>2)</sup>       | 中国 <sup>3)</sup>      | 中国                   |
| 试验条件                                                                                                                                             |                        |                       |                      |
| 试验时间                                                                                                                                             | 1998—2000              | 2001—2003             | 2004—2006            |
| 供试品种                                                                                                                                             | Akitakomachi<br>(常规粳稻) | 武香粳 14<br>(常规粳稻)      | 汕优 63<br>(三系杂交籼稻)    |
| CO <sub>2</sub> 目标浓度                                                                                                                             | 570                    | 570                   | 570                  |
| 供氮水平                                                                                                                                             | 40、80~90、120~150       | 150、250、350           | 125、250              |
| 不同生育时期植株含 N 率                                                                                                                                    |                        |                       |                      |
| 够苗期                                                                                                                                              | —                      | -6.1% <sup>**1)</sup> | -12.7% <sup>**</sup> |
| 拔节期                                                                                                                                              | —                      | -12.2% <sup>**</sup>  | -15.6% <sup>**</sup> |
| 抽穗期                                                                                                                                              | —                      | -12.1% <sup>**</sup>  | -15.7% <sup>**</sup> |
| 成熟期                                                                                                                                              | —                      | -6.9% <sup>**</sup>   | -13.4% <sup>**</sup> |
| 不同生育时期吸 N 量                                                                                                                                      |                        |                       |                      |
| 够苗期                                                                                                                                              | —                      | +37% <sup>**</sup>    | +20.5% <sup>**</sup> |
| 拔节期                                                                                                                                              | +14.9% <sup>*</sup>    | +16% <sup>**</sup>    | +6.7% <sup>ns</sup>  |
| 抽穗期                                                                                                                                              | —                      | +7% <sup>**</sup>     | +8.5% <sup>*</sup>   |
| 成熟期                                                                                                                                              | +4.1% <sup>ns</sup>    | +9% <sup>**</sup>     | +15.8% <sup>**</sup> |
| N素在茎鞘中分配比例                                                                                                                                       |                        |                       |                      |
| 够苗期                                                                                                                                              | —                      | +8.4% <sup>+</sup>    | +0.8% <sup>ns</sup>  |
| 拔节期                                                                                                                                              | —                      | +6.8% <sup>**</sup>   | +1.9% <sup>ns</sup>  |
| 抽穗期                                                                                                                                              | —                      | +8.5% <sup>**</sup>   | -0.5% <sup>ns</sup>  |
| 成熟期                                                                                                                                              | —                      | -5.7% <sup>ns</sup>   | +6.6% <sup>ns</sup>  |
| N素在叶片中分配比例                                                                                                                                       |                        |                       |                      |
| 够苗期                                                                                                                                              | —                      | -1.8% <sup>+</sup>    | -0.5% <sup>ns</sup>  |
| 拔节期                                                                                                                                              | —                      | -5.0% <sup>**</sup>   | -1.3% <sup>ns</sup>  |
| 抽穗期                                                                                                                                              | —                      | -6.4% <sup>**</sup>   | -1.1% <sup>ns</sup>  |
| 成熟期                                                                                                                                              | —                      | -2.8% <sup>ns</sup>   | +0.5% <sup>ns</sup>  |
| N素在穗中分配比例                                                                                                                                        |                        |                       |                      |
| 抽穗期                                                                                                                                              | —                      | 0 <sup>ns</sup>       | +6.4% <sup>ns</sup>  |
| 成熟期                                                                                                                                              | —                      | +2.9% <sup>+</sup>    | -1.8% <sup>ns</sup>  |
| 不同生育时期 N 素干物质生产效率                                                                                                                                |                        |                       |                      |
| 够苗期                                                                                                                                              | —                      | +7% <sup>**</sup>     | +14.6% <sup>**</sup> |
| 拔节期                                                                                                                                              | —                      | +14% <sup>**</sup>    | +18.1% <sup>**</sup> |
| 抽穗期                                                                                                                                              | —                      | +15% <sup>**</sup>    | +19.5% <sup>**</sup> |
| 成熟期                                                                                                                                              | —                      | +8% <sup>**</sup>     | +15.7% <sup>**</sup> |
| N素子粒生产效率                                                                                                                                         | —                      | +5.7% <sup>*</sup>    | +12.7% <sup>**</sup> |
| N素收获指数                                                                                                                                           | —                      | +2.0% <sup>ns</sup>   | -1.8% <sup>ns</sup>  |

注:1)ns,no significant difference;+,P<0.1;\* ,P<0.05;\*\* ,P<0.01;2)数据来自 Kim 等<sup>[5,9]</sup>;3)数据来自 Yang 等<sup>[9]</sup>。

(图 6),使单位 N 素子粒生产效率平均提高 12.7%(图 7)。说明与吸收同样多 N 素的对照相比,高 CO<sub>2</sub> 浓度处理水稻不仅表现出生物产量的优势,也表现出经济产量的优势。同时高 CO<sub>2</sub> 浓度处理使汕优 63 比粳稻品种表现出更强的 N 素经济产量优势。FACE 条件下,三系杂交籼稻汕优 63 的总吸 N 量、N 素子粒效率比对照的增幅均明显大于粳稻类型品种,是其产量增幅明显大于粳稻类型品种 (另文发表) 的重要原因之一。FACE 条件下三系杂交籼稻汕优 63 总吸 N 量大、N 素子粒生产效率高的原因值得深入研究。这一现象启示我们在未来大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下,对不同类型水稻品种的 N 肥运筹,应采取相应的应对措施,以获得更高的经济和生态效益。

参考文献:

[1] 王维金. 关于不同籼稻品种和施肥时期稻株对 <sup>15</sup>N 的吸收及其分配的研究[J]. 作物学报, 1994, 20 (4):476-450.

[2] 单玉华, 王余龙, 黄建晔, 等. 中后期追施 <sup>15</sup>N 对水稻体内氮素积累与分配的影响[J]. 江苏农业研究, 2000, 21(4):18-21.

[3] IPCC. Climate change 1995: The science of climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1996.

[4] Watson R T, Rodhe H, Oescheger H. Greenhouse gases and aerosols[C]. //Houghon J T, Jenkins G J, Ephranums J J. Climate: the IPCC Scientific Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1990, 1-40.

[5] Kim H Y, Lieffering M, Kobayashi K, et al. Seasonal changes in the effects of elevated CO<sub>2</sub> on rice at three levels of nitrogen supply: A free-air CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>-enriched rice under field conditions [J]. *New Phytol*, 2001, 150: 223-229.

[7] 董桂春, 王余龙, 杨洪建, 等. 开放式空气 CO<sub>2</sub> 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.

[8] 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.

[9] Yang L X, Huang J Y, Yang H J, et al. Seasonal changes in the effects of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) on nitrogen (N) uptake and utilization of rice at three levels of N fertilization (*Oryza sativa* L)[J]. *Field Crops Research*, 2007, 100: 189-199.

[10] 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.