

FACE 对三系杂交籼稻汕优 63 磷素吸收利用的影响

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

(1.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; 2.扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州 225009)

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 CO₂ 浓度增高(FACE)研究平台, 设计施 N 量为 125 kg·hm⁻²(LN)、250 kg·hm⁻² (NN)处理, 研究大气 CO₂ 浓度比对照高 200 μmol·mol⁻¹ 的 FACE 处理对三系杂交籼稻汕优 63 不同生育时期磷素含量、磷素吸收、磷素分配和磷素效率的影响。结果表明:(1) FACE 处理使汕优 63 各生育时期稻株含 P 率极显著提高, 使各生育时期 P 素吸收量极显著增加, 生育中期的增幅略小于生育前、后期;(2) FACE 处理使汕优 63 抽穗后 P 素在茎鞘中的分配比例显著增加, 穗中的分配比例显著下降, 对抽穗前 P 素在叶片、茎鞘中的分配比例均无显著影响;(3) FACE 处理使汕优 63 不同生育期 P 素干物质生产效率极显著下降, 使 P 素子粒生产效率和 P 素收获指数亦均极显著下降;(4)增施 N 肥, 使汕优 63 大多数生育时期的植株 P 素含量和吸 P 量得到显著或极显著的增加, 使大多数生育时期 P 素干物质生产效率下降, 使 P 素子粒生产效率和收获指数显著下降;(5)CO₂×N、CO₂×Y 对植株含 P 率、吸 P 量的影响有互作效应, FACE 处理使汕优 63 稻株含 P 率、P 素吸收量显著提高; 使 P 素干物质生产效率、P 素子粒效率显著下降。

关键词:三系杂交籼稻; 开放式空气 CO₂ 浓度增高(FACE); P 素吸收; P 素分配; P 素效率

中图分类号:X171.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)05-1882-08

Effect of Free-air CO₂ Enrichment(FACE)on Phosphorus Uptake and Utilization of Three-line Indica Hybrid Rice Cultivar Shanyou 63

LIU Hong-Jiang^{1,2}, YANG Lian-Xin^{1,2}, HUANG Jian-Ye², DONG Gui-Chun², ZHU Jian-Guo¹, LIU Gang¹, WANG Yu-Long²

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2.Key Lab of Crop Cultivation & Physiology, Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, 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 CO₂ Enrichment [FACE, 200 μmol·mol⁻¹ higher than ambient (AMB)] research platform was used to investigate the effects of FACE on rice phosphorus (P) 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⁻²) and normal N (NN, 250 kg·hm⁻²) in 2005—2006. Main results showed that: (1) Compared with AMB, FACE significantly increased P concentration in rice plant of Shanyou 63 over the season, FACE significantly increased phosphorus 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) Before heading, FACE had no obvious effect on phosphorus allocation pattern of Shanyou 63, but after heading, it made the proportion of phosphorus allocation in leaves significant increased, the phosphorus allocation in spikes significant decreased. (3) Under FACE treatment, P use efficiency for biomass (PUEp) over the season, P use efficiency for grain yield(PUEg)at grain maturity, and phosphorus harvest index (PHI) were significantly decreased. (4) Phosphorus concentration and accumulation at majority growth stages of Shanyou 63 increased with increasing N supply (*P*< 0.05 or 0.01), but PUEp and PUEg showed the opposite trends. (5) Significant interactions between [CO₂]×N and [CO₂]×year were observed

收稿日期:2007-11-29

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); 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开放课题资助项目(2005)

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

for P concentration and accumulation. FACE increased P concentration and P uptake, decreased PUEp and PUEg at different growth stages of Shanyou 63.

Keywords: three-line indica hybrid rice; Free-air CO₂ enrichment (FACE); phosphorus uptake; phosphorus allocation; phosphorus efficiency

前文报道了开放式空气中二氧化碳增高(FACE, 比对照高 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)对三系杂交水稻汕优 63 N 素吸收利用的影响,明确了汕优 63 不同生育时期稻株含 N 率、生育后期 N 素吸收量、N 素干物质生产效率、N 素子粒生产效率对 FACE 处理的响应明显大于粳稻品种^[1]。磷素是水稻需求量最大的营养元素之一,其对水稻产量形成、物质生产影响的重要性仅次于氮素^[2,3]。关于水稻 P 素吸收利用对 FACE 的响应仅 Yang 等、黄建晔等和谢祖彬等^[4-7]报道了 FACE 处理使我国粳稻品种武香粳 14 不同生育时期含 P 率、P 素吸收量显著增加,使 P 素干物质生产效率、子粒生产效率、收获指数显著下降。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 P 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 P 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、250 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理,研究大气 CO₂ 浓度比对照高 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的 FACE 处理对杂交水稻 P 素吸收利用的影响,以期对未来大气 CO₂ 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 °C,年日照时间 2 100 h 左右,年平均无霜期约 220 d,耕作方式为水稻—冬小麦复种轮作。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 CO₂ 释放对其他圈的影响。FACE 圈设计为正八边形,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^[11]。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,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。施氮量设 125 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-1}$ (LN)、250 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-1}$ (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 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,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(105 °C 杀青 30 min,80 °C 烘干 72 h)。将不同器官材料粉碎后,用钒钼黄比色法测定全 P 含量。

1.4 名词定义与说明

植株含 P 率,指植株当中 P 素的重量占全株干物重的比率。吸 P 量:单位面积土地上植株所吸收的 P 素重量。P 素在茎鞘、叶、穗中分配比例:是指茎鞘、

叶、穗的 P 素积累量占全株 P 素积累量的比例。P 素干物质生产效率:干物质积累量与 P 素积累量的比值,是衡量吸收单位 P 生产的干物质量。P 素子粒生产效率:子粒产量与成熟期 P 素积累量的比值,是吸收单位 P 生产的子粒产量。P 素收获指数:子粒中的 P 素积累量占全株 P 素积累量的比例。

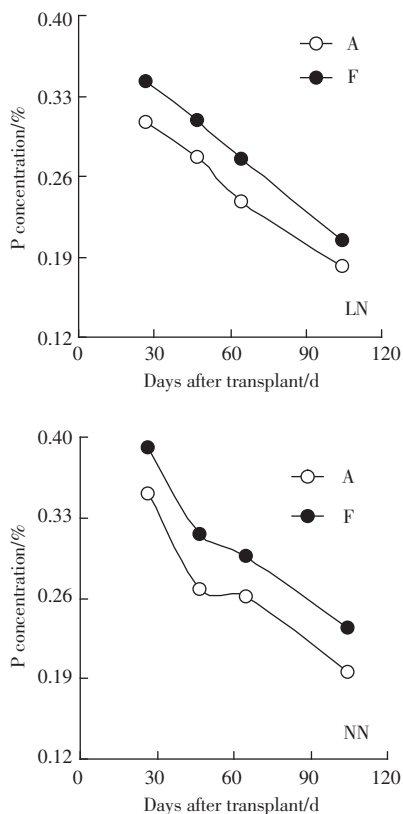
1.5 统计分析方法

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_2 、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 $\text{LSD}_{0.05}$ (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 处理对汕优 63 植株含 P 率的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育期植株含 P 率的影响如图 1 所示。FACE 处理使汕优 63 够苗期、拔节



A: 环境空气 CO_2 浓度 (Ambient CO_2); F: 开放式空气 CO_2 浓度增高 (Free air CO_2 enrichment)。下同 (The same below)

图 1 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期植株含 P 率(%)的影响 (2005—2006)

Figure 1 Effect of FACE treatment on shoot P concentration (%) at different growth stages of shanyou 63 in 2005—2006

期、抽穗期、成熟期的植株含 P 率分别比对照提高 11.6%、14.5%、14.4%、16.4%, 处理间的差异均达到极显著水平; NN 处理够苗期、抽穗期、成熟期的植株含 P 率分别比 LN 处理高 14.1%、23.3%、11.2%, 拔节期比 LN 处理下降 0.3%, 除拔节期外, 处理间的差异均达显著或极显著水平。统计分析表明(表 1), 除成熟期外, 不同生育时期植株含 P 率年度间差异达极显著水平, $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 、 $\text{CO}_2 \times \text{Y}$ 的交互效应对拔节期植株含 P 率的影响达极显著水平, $\text{N} \times \text{Y}$ 的交互效应对拔节期、成熟期植株含 P 率的影响达显著水平, $\text{CO}_2 \times \text{N} \times \text{Y}$ 的交互效应对拔节期、抽穗期植株含 P 率的影响达显著水平。

2.2 FACE 处理对汕优 63 吸 P 量的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育期植株吸 P 量的影响如图 2 所示。FACE 处理使够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的植株吸 P 量分别比对照增加 54.9%、43.4%、47.0%、54.2%, 处理间的差异均达极显著水平; NN 处理够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的吸 P 量分别比 LN 处理增加 28.9%、0.1%、8.3%、8.7%, 除

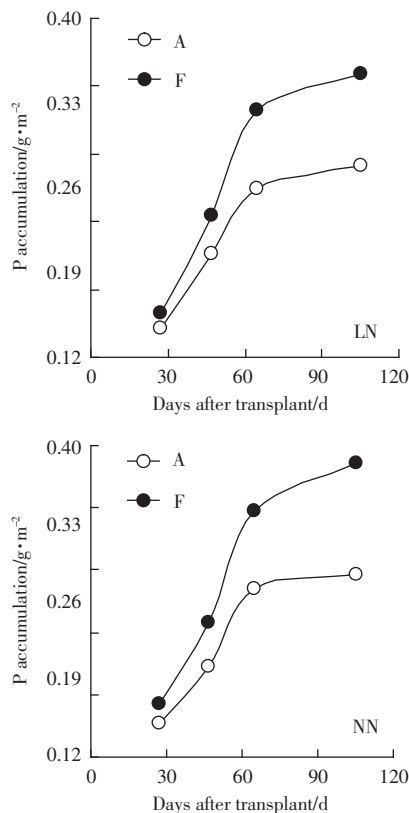


图 2 FACE 处理对汕优 63 不同生育时吸 P 量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) 的影响 (2005—2006)

Figure 2 Effect of FACE treatment on shoot P accumulation ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) at different growth stages of shanyou 63 in 2005—2006

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

Table 1 Probability of treatment differences in P concentration, P uptake, P allocation in stem, P allocation in leaf, P allocation in spike, P use efficiency for biomass of rice plant					
项目	处理	够苗期	拔节期	抽穗期	成熟期
含 P 率	Y	**	**	**	ns
	CO ₂	**	**	**	**
	N	**	ns	**	**
	CO ₂ ×N	ns	**	ns	ns
	CO ₂ ×Y	ns	**	ns	ns
	N×Y	ns	*	ns	*
	CO ₂ ×N×Y	ns	*	*	ns
P素累积量	Y	ns	ns	ns	**
	CO ₂	**	**	**	**
	N	**	ns	*	*
	CO ₂ ×N	ns	ns	ns	*
	CO ₂ ×Y	ns	**	ns	ns
	N×Y	ns	ns	ns	ns
	CO ₂ ×N×Y	ns	ns	ns	ns
茎鞘中 P 素比例	Y	**	*	**	*
	CO ₂	ns	ns	**	**
	N	ns	**	ns	ns
	CO ₂ ×N	ns	ns	**	ns
	CO ₂ ×Y	ns	*	ns	ns
	N×Y	ns	ns	ns	**
	CO ₂ ×N×Y	ns	ns	**	**
叶片中 P 素比例	Y	**	*	**	*
	CO ₂	ns	ns	ns	ns
	N	ns	**	ns	**
	CO ₂ ×N	ns	ns	**	ns
	CO ₂ ×Y	ns	*	ns	ns
	N×Y	ns	ns	ns	*
	CO ₂ ×N×Y	ns	ns	*	ns
穗中 P 素比例	Y	—	—	**	ns
	CO ₂	—	—	**	**
	N	—	—	ns	**
	CO ₂ ×N	—	—	ns	*
	CO ₂ ×Y	—	—	ns	ns
	N×Y	—	—	**	*
	CO ₂ ×N×Y	—	—	**	ns
P素物质生产效率	Y	**	**	**	ns
	CO ₂	**	**	**	**
	N	**	*	**	**
	CO ₂ ×N	ns	ns	ns	ns
	CO ₂ ×Y	ns	**	ns	ns
	N×Y	ns	*	ns	ns
	CO ₂ ×N×Y	ns	ns	*	ns

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

拔节期外,处理间的差异达显著或极显著水平。统计分析表明(表 1),成熟期植株吸 P 量年度间差异达到

极显著水平,CO₂×N 的互作效应对成熟期吸 P 量的影响达显著水平,CO₂×Y 的互作效应对拔节期吸 P 量影

响达极显著水平, $N \times Y$ 、 $CO_2 \times N \times Y$ 的互作效应对吸 P 量的没有影响。

2.3 FACE 处理对汕优 63 P 素分配的影响

2.3.1 对茎鞘中 P 素比例的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育期植株 P 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、抽穗期、成熟期的茎鞘中 P 素比例分别比对照提高 3.4%、3.8%、6.2%、21.2%,抽穗期、成熟期处理间的差异达到极显著水平;NN 处理够苗期、抽穗期的茎鞘中 P 素比例分别比 LN 处理增加 3.2%、2.0%,拔节期、成熟期比 LN 处理下降 9.0%、0.9%,拔节期处理间差异达极显著水平,其他生育期未达到显著水平。统计分析表明(表 1),不同生育时期年度间茎鞘中 P 素比例的差异均达显著或极显著水平, $CO_2 \times N$ 的互作效应对抽穗期 P 素在茎鞘中分配比例的影响达极显著水平, $CO_2 \times Y$ 的互作效应对拔节期 P 素在茎鞘中分配比例的影响达显著水平, $N \times Y$ 的互作效应对成熟期 P 素在茎鞘中分配比例的影响达极显著水平, $CO_2 \times N \times Y$ 的互作效应对抽穗期、成熟期 P 素在茎鞘中分配比例的影响达极显著水平。

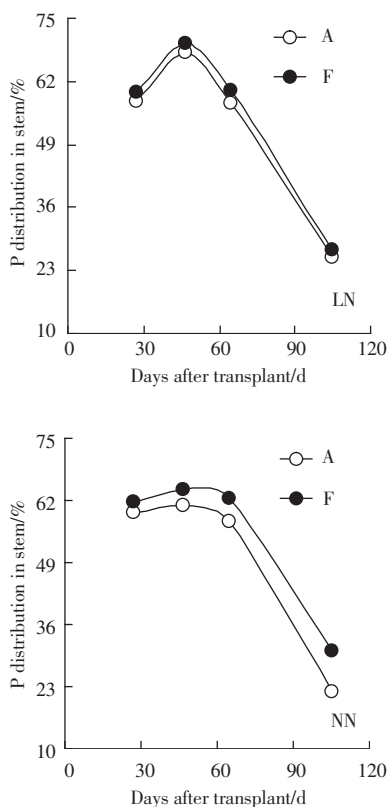


图 3 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期 P 素在茎鞘中比例(%) 的影响(2005—2006)

Figure 3 Effect of FACE treatment on P distribution rate in

stems (%) at different growth stages of shanyou 63 in 2005—2006

2.3.2 对 P 素在叶片中分配比例的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育期植株 P 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 P 素比例分别比对照下降 4.8%、6.9%、3.5%、4.0%,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 P 素比例分别比 LN 处理增加 19.9%、38.4%,够苗期、抽穗期分别比 LN 处理下降 4.5%、2.0%,拔节期和成熟期的处理间差异达极显著水平。统计分析表明(表 1),不同生育时期年度间叶片中 P 素比例的差异均达显著或极显著水平, $CO_2 \times N$ 的互作效应对抽穗期叶片中 P 素比例的影响达极显著水平, $CO_2 \times Y$ 的互作效应对拔节期叶片中 P 素比例的影响达显著水平, $N \times Y$ 的互作效应对成熟期叶片中 P 素比例的影响达显著水平, $CO_2 \times N \times Y$ 的互作效应对抽穗期叶片中 P 素比例的影响达极显著水平。

2.3.3 对 P 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 P 素在穗中分配比例的影响如图 5 所示。FACE 处理使抽穗期、成熟期 P 素在穗中分配比例比对照下降 18.2%、

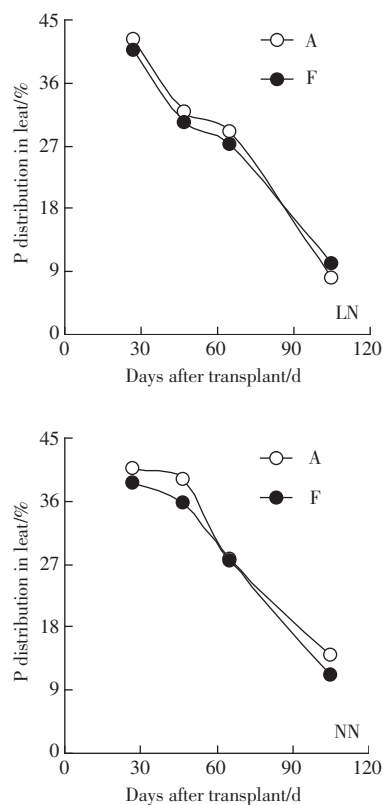


图 4 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期 P 素在叶片中比例(%) 的影响(2005—2006)

Figure 4 Effect of FACE treatment on P distribution rate in

leaves (%) at different growth stages of shanyou 63 in 2005—2006

7.1%，处理间的差异均达到极显著水平；NN 处理抽穗期、成熟期 P 素在穗中分配比例分别比 LN 处理下降 4.8%、5.0%，成熟期处理间的差异达极显著水平。统计分析表明(表 1)，不同年度间抽穗期 P 素在穗中分配比例的差异达极显著水平， $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 的互作效应对成熟期 P 素在穗中分配比例的影响达显著水平， $\text{N} \times \text{Y}$ 的互作效应对抽穗期、成熟期 P 素在穗中分配比例的影响达显著或极显著水平， $\text{CO}_2 \times \text{N} \times \text{Y}$ 的互作效应对抽穗期 P 素在穗中分配比例的影响达极显著水平。

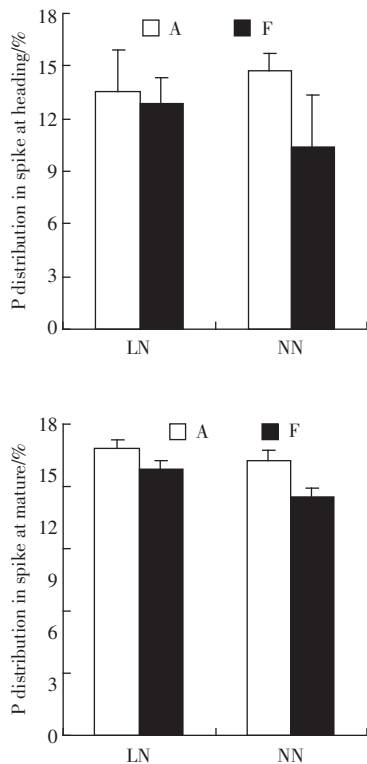


图 5 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期 P 素在稻穗中比例 (%) 的影响 (2005—2006)

Figure 5 Effect of FACE treatment on P distribution rate in spikes (%) at different growth stages of shanyou 63 in 2005—2006

2.4 FACE 处理对汕优 63 P 素利用效率的影响

2.4.1 对 P 素干物质生产效率的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育期 P 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 P 素干物质生产效率分别比对照下降 10.7%、12.2%、12.7%、13.7%，处理间的差异均达极显著水平；NN 处理使够苗期、抽穗期、成熟期的 P 素干物质生产效率分别比 LN 处理下降 12.4%、8.0%、9.5%，拔节期比 LN 处理提高 2.3%，处理间的差异均达显著或极显著水平。统计分析表明(表 1)，

除成熟期外，不同年度间的 P 素干物质生产效率的差异达到极显著水平， $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 的互作效应对不同生育期的 P 素干物质生产效率的影响均未达显著水平， $\text{CO}_2 \times \text{Y}$ 的互作效应对拔节期 P 素干物质生产效率的影响达极显著水平， $\text{N} \times \text{Y}$ 的互作效应对拔节期 P 素干物质生产效率的影响达显著水平， $\text{CO}_2 \times \text{N} \times \text{Y}$ 的互作效应对抽穗期 P 素干物质生产效率的影响达显著水平。

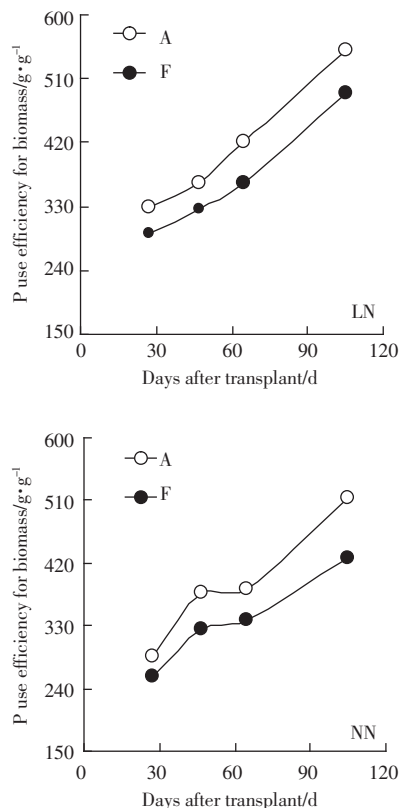


图 6 FACE 处理对汕优 63 不同生育时期 P 素干物质生产效率($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 的影响 (2005—2006)

Figure 6 Effect of FACE treatment on P use efficiency for biomass (PUEp) ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) at different growth stages of shanyou 63 in 2005—2006

2.4.2 对 P 素子粒生产效率和 P 素收获指数的影响

FACE 处理对汕优 63 P 素子粒生产效率、P 素收获指数的影响如图 7 所示。FACE 处理使汕优 63 的 P 素子粒生产效率比对照下降 16.4%，达极显著水平；NN 处理使汕优 63 的 P 素子粒生产效率比 LN 处理下降 10.9%，达极显著水平。FACE 处理使汕优 63 P 素收获指数比对照下降 7.1%，达极显著水平；NN 处理使汕优 63 的 P 素收获指数比 LN 处理下降 5.0%，达极显著水平。说明 FACE 处理使汕优 63 的 P 素籽生产粒效率和收获指数均显著下降，增

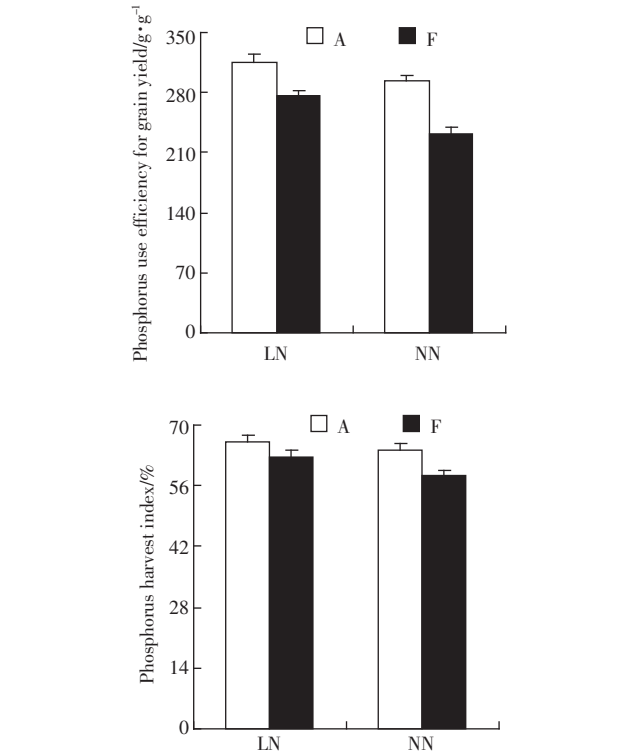


图 7 FACE 处理对汕优 63 P 素子粒生产效率(g·g⁻¹) 和收获指数 (%)的影响 (2005—2006)

Figure 7 Effect of FACE treatment on P use efficiency for grain yield (g·g⁻¹)and P harvest index (%) of shanyou 63 in 2005—2006

施 N 肥使水稻 P 素子粒生产效率和收获指数亦均显著下降。

3 讨论

关于水稻不同生育时期植株含 P 率对 FACE 处理的响应,前人研究甚少。已有研究结果表明,FACE 处理使粳稻品种够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的植株含 P 率分别比对照增加 7.3%、8.4%、10.0%、13.7%^[6](表 2)。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、成熟期的植株含 P 率分别比对照增加 11.6%、14.5%、14.4%、16.4%(图 1)。可见,三系杂交水稻类型组合不同生育时期植株含 P 率对 FACE 处理的响应与前人研究的粳稻品种的趋势一致,但杂交水稻不同生育时期植株含 P 率对 FACE 处理的响应值均明显大于粳稻品种。

水稻的吸 P 量为某一生育时期的含 P 率乘以该期的干物质量。前人研究表明,因为 FACE 处理使水稻不同生育时期的植株含 P 率极显著增加,同时由于各生育期的干物质累积量大幅度提高^[8,9],FACE 处理使粳稻品种不同生育时期吸 P 量显著提高^[5,6],FACE

表 2 FACE 研究不同水稻品种 P 素吸收利用对高 CO ₂ 浓度的响应		
Table 2 Summary of the resposes of P uptake and utilization of different rice cultivars to elevated [CO ₂] in FACE experiments		
项目	2001—2003	2004—2006
供试品种	武香粳 14 ²⁾ (常规粳稻)	汕优 63(三系杂交水稻)
CO ₂ 目标浓度	570	570
供氮水平	150、250、350	125、250
不同生育时期植株含 P 率		
够苗期	+7.3% ^{**1)}	+11.6% ^{**}
拔节期	+8.4% ^{**}	+14.5% ^{**}
抽穗期	+10.0% ^{**}	+14.4% ^{**}
成熟期	+13.7% ^{**}	+16.4% ^{**}
不同生育时期吸 P 量		
够苗期	+52% ^{**}	+54.9% ^{**}
拔节期	+41% ^{**}	+43.4% ^{**}
抽穗期	+34% ^{**}	+47.0% ^{**}
成熟期	+33% ^{**}	+54.2% ^{**}
P 素在茎鞘中分配比例		
够苗期	—	+3.4% ^{ns}
拔节期	—	+3.8% ^{ns}
抽穗期	—	+6.2% ^{**}
成熟期	—	+21.2% ^{**}
P 素在叶片中分配比例		
够苗期	—	-4.8% ^{ns}
拔节期	—	-6.9% ^{ns}
抽穗期	—	-3.5% ^{ns}
成熟期	—	-4.0% ^{ns}
P 素在穗中分配比例		
抽穗期	-19% ^{**}	-18.2% ^{**}
成熟期	-8% [*]	-7.1% ^{**}
不同生育时期 P 素干物质生产效率		
够苗期	-7% ⁺	-10.7% ^{**}
拔节期	-8% ^{**}	-12.2% ^{**}
抽穗期	-9% ^{**}	-12.7% ^{**}
成熟期	-12% ^{**}	-13.7% ^{**}
P 素子粒生产效率	-13% ^{**}	-16.4% ^{**}
P 素收获指数	-7% [*]	-7.1% ^{**}

注:(1)ns, no significance;* ,P<0.05;** ,P<0.01。(2)数据来自 Yang 等^[6]。

处理够苗期、拔节期、抽穗期、成熟期的吸 P 量分别比对照增加 52%、41%、34%、33%^[8](表 2)。随着生育进程的推移,FACE 处理对粳稻品种吸 P 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、成熟期的吸 P 量分别比对照提高 54.9%、43.4%、47.0%、54.2%(图 2)。可见,三系杂交水稻生育前期(够苗期、拔节期)的 P 素

吸收量对 FACE 处理的响应与粳稻类型品种差异不大,生育中期的 P 素吸收量对 FACE 处理的响应明显大于粳稻类型品种,随着生育进程的推移,生育后期的 P 素吸收量对 FACE 处理的响应进一步大于粳稻类型品种。三系杂交籼稻汕优 63 生育中、后期的 P 素吸收量比对照大幅度增加,可能是 FACE 条件下汕优 63 抽穗-成熟期的叶面积系数下降速度慢、净同化率高、干物质生产量大、增产幅度大(另文发表)的又一个重要原因。

关于 FACE 对 P 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 CO₂ 浓度使粳稻品种抽穗后 P 素在生殖器官中的分配比例显著下降,营养器官中分配比例显著增加,对抽穗前 P 素在叶片、茎鞘中的分配比例无明显影响^[5,6](表 2)。本研究表明,高 CO₂ 浓度使汕优 63 抽穗后 P 素在穗中的分配比例显著下降,茎鞘中的分配比例显著增加,对抽穗前 P 素在叶片、茎鞘中的分配比例均无显著影响(图 3、4、5),与前人的研究结果基本一致。说明 FACE 处理使 P 素在水稻穗中的分配比例显著下降,与前人在水培条件下的研究结果不同^[10],这可能是由于两者的栽培方式不同引起的。

关于 FACE 对水稻 P 素利用效率的影响,前人研究表明,高 CO₂ 浓度使粳稻品种不同生育期的单位 P 素干物质生产效率明显减少,其中生育中、后期的 P 素干物质生产效率处理间的差异达到显著水平,使单位 P 素子粒生产效率和 P 素收获指数分别平均下降 13%和 7%^[6](表 2)。本研究表明,高 CO₂ 浓度使汕优 63 不同生育时期的单位 P 素干物质生产效率极显著减少(图 6),使单位 P 素子粒生产效率和 P 素收获指数分别平均下降 16.4%和 7.1%(图 7)。说明与吸收同样多 P 素的对照相比,高 CO₂ 浓度处理水稻的生物产量和经济产量要比对照显著下降。同时汕优 63 P 素子粒生产效率对高 CO₂ 浓度处理的响应明显大于粳

稻品种。因此在 FACE 条件下,三系杂交籼稻汕优 63 产量增幅明显大于粳稻类型品种,主要是因为 FACE 处理大幅度促进了汕优 63 的总吸 P 量,而不是其 P 素利用效率提高的缘故。说明在未来大气 CO₂ 浓度增加条件下,如何兼顾水稻 P 素吸收和利用的矛盾,尤其是籼稻类型品种,值得深入研究。

参考文献:

- [1] 刘红江, 杨连新, 黄建晔, 等. FACE 对三系杂交籼稻汕优 63 氮素吸收利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):1015-1021.
- [2] 郭朝晖, 李合松, 张杨珠, 等. 磷素水平对杂交水稻生长发育和磷素运转的影响[J]. 中国水稻科学, 2002, 16(2): 151-156.
- [3] 李永夫, 罗安程, 王为木, 等. 不同供磷水平下水稻磷素吸收利用和产量的基因型差异[J]. 土壤通报, 2005, 36(3):365-370.
- [4] 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.
- [5] 杨连新, 黄建晔, 王余龙, 等. 水稻不同生育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.
- [6] 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.
- [7] 谢祖彬, 朱建国, 张雅丽, 等. 水稻生长及其体内 C、N、P 组成对开放式空气 CO₂ 浓度增高和 N、P 施肥的响应[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10):1223-1230.
- [8] 黄建晔, 董桂春, 杨洪建, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度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] 庞 静, 朱建国, 谢祖彬, 等. 自由空气 CO₂ 浓度升高对水稻营养元素吸收和子粒中营养元素含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(4):350-354.
- [11] 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.