

FACE 对三系杂交籼稻汕优 63 根系活性影响的研究

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,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 根系活性的影响。结果表明:(1)FACE 处理使汕优 63 不同生育时期单位干质量根系的总吸收面积、活跃吸收面积、α-萘胺氧化量等根系活性指标均极显著小于对照。由于 FACE 处理促进汕优 63 根系发生量的大幅度增加,因此分蘖期、拔节期其单穴根系活性与对照多无明显差异,到抽穗期 FACE 处理单穴根系活性显著大于对照;(2)拔节期、抽穗期汕优 63 每穴的不定根数、不定根总长度、根系体积、根干质量与单位干质量根系活性的关系密切,根量越大单位干质量根系活性越低;(3)不同生育时期汕优 63 植株含氮率与单位干质量的根系活性多呈正相关,植株碳氮比与单位干质量的根系活性多呈负相关;(4)FACE 处理汕优 63 根系生长量大、植株含氮率低、碳氮比高等可能是造成其单位干质量根系活性低于对照的重要原因。

关键词:水稻;开放式空气 CO₂ 浓度增高(FACE);根系活性;含氮率;碳氮比

中图分类号:X171.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)01-0015-06

Effect of Free Air CO₂ Enrichment on Root Activity of Indica Rice (*Oryza sativa* L.) 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 (AMB)] research platform was used to investigate the effects of FACE on root growth dynamics 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 decreased the total absorption area per unit dry weight of root, the active absorption area per unit dry weight of root and the amount of α-NA per unit root dry weight of shanyou 63 at different growth stages. While FACE made larger increment of rice root, which resulted in little effects of FACE on root activity per hole at tillering and jointing stages, but FACE significantly increased root activity per hole at heading stage. (2) Root activity per unit dry weight of root negatively correlated with the number of adventitious roots per plant, total length of adventitious roots per plant, roots volume and dry weight of root at jointing and heading stages. The larger the root productions, the lower the root activity per unit dry weight. (3) For the most part, root activity per unit dry weight of root positively correlated with N content of rice plant, and negatively correlated with C/N ratio. (4) The larger biomass accumulated, lower N content in rice plant and higher C/N ratio appear to be the primary causes of significant decrement of root activity per unit dry weight of root under FACE condition.

Keywords: rice; free-air CO₂ enrichment (FACE); root activity; N content; C/N ratio

前文报道了开放式空气中二氧化碳增高(FACE, 比对照高 200 μmol·mol⁻¹)使三系杂交籼稻汕优 63 分

蘖期、拔节期、抽穗期每穴的不定根数、不定根总长度、根系体积以及根干质量均极显著大于对照^[6]。关于大气 CO₂ 浓度增高对水稻根系生长发育及其活性的影响,前人在大气条件下的研究表明,大气 CO₂ 浓度增高将使植物光合产物显著增多,导致输入到根中的碳水化合物增多,从而使植物根系的发生量增加^[12],并对植物的根系活性产生影响。同时根系分泌的含量和组成也会发生变化,这些变化将影响到根际微生物

收稿日期:2008-03-15

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

多样性的变化,根际微生态系统的变化反过来也会影响植物根系的生长和活性的变化^[13]。目前为止,关于 FACE 处理对水稻根系活性的影响,仅杨洪建等^[3]报道了 FACE 处理使粳稻品种武香粳 14 不同生育时期单位干质量根系活性明显下降,移栽后 18 d 及以后不同生育时期处理间的差异达到及显著水平。关于 FACE 处理对籼稻品种根系活性的影响则未见报道。根据前人的研究结果,水稻根系发生的早迟对水稻根系活性具有重要影响。杂交籼稻根系生长发育的过程^[6]对 FACE 的响应与常规粳稻品种^[2]明显不同。那么其根系活性对 FACE 处理的响应与粳稻品种有哪些不同?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籼稻汕优 63 为供试材料,设计施 N 量为 125、250 kg·hm⁻² 处理,研究大气 CO₂ 浓度比对照高 200 μmol·mol⁻¹ 的 FACE 处理对杂交籼稻根系活性的影响,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

本实验于 2005、2006 年在中国水稻 FACE 研究平台上进行。该平台由 2001 年建成的无锡 FACE 平台迁移而来,重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),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—冬小麦轮作。土壤理化性质为:有机碳 18.4 g·kg⁻¹,全 N 1.45 g·kg⁻¹,全 P 0.63 g·kg⁻¹,全 K 14.0 g·kg⁻¹,速效 P 10.1 mg·kg⁻¹,速效 K 70.5 mg·kg⁻¹,砂粒(2~0.02 mm)578.4 g·kg⁻¹,粉砂粒(0.02~0.002 mm)285.1 g·kg⁻¹,粘粒(<0.002 mm)136.5 g·kg⁻¹,容重 1.16 g·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,外接圆直径为 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 μmol·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籼稻汕优 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 μmol·mol⁻¹)和比对照高 200 μmol·mol⁻¹ 的 FACE 处理(570 μmol·mol⁻¹) 2 个水平。施氮量设 125 kg·hm⁻² (LN)、250 kg·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 kg·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。

1.3 测定内容与方法

2005、2006 年,于移栽后 27 d(约分蘖期)、移栽后 47 d(约拔节期)、抽穗期每小区调查 35 穴有效茎蘖(穗)数,取其中有代表性的植株 3 穴,每穴以植株为中心,取长 25 cm、宽 16.7 cm、深 20 cm 的土块,清水冲洗后,记数每穴不定根数,容积法测定每穴根系体积,用 α-萘胺的氧化法测定根系对 α-萘胺的氧化量,用甲烯蓝蘸根法测定根系的总吸收表面积和活跃吸收表面积。鲜根 105 °C 杀青 30 min、80 °C 烘至质量恒定(一般为 72 h)后称量根干质量,计算单位干质量根系活性和每穴的根系活性。同时测定植株地上部干物质量。用 H₂SO₄-H₂O₂ 硝化,用半微量蒸馏法测定植株的含氮量,用蒽酮比色法测定茎鞘中可溶性碳水化合物(可溶性糖和淀粉)的含量。

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 CO₂、N 单因素及其互作效应的显著性分析。各处理的比较采用最小显著差数(LSD)法,凡超过 LSD_{0.05}(或 LSD_{0.01})水平的视为显著(或极显著)。

2 结果与分析

2.1 FACE 对汕优 63 单位根干质量根系活性的影响

2.1.1 FACE 对汕优 63 单位干质量根系总吸收面积的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育时期单位干质量根系总吸收面积的影响如图 1 所示。由图 1 可知:(1)

不同生育时期油优 63 单位干质量根系总吸收面积年度间差异均达到极显著水平;(2)FACE 处理使油优 63 分蘖期、拔节期、抽穗期单位干质量根系总吸收面积分别平均比对照下降 28.0%、24.1%、20.6%，处理间的差异均达到极显著水平;(3)NN 处理使油优 63 分蘖期、拔节期单位干质量根系总吸收面积分别比 LN 处理平均下降 16.5%、13.7%，抽穗期比 LN 处理增加 2.8%，分蘖期、拔节期处理间的差异达到显著水平。统计分析表明， $\text{CO}_2 \times \text{Year}$ 和 $\text{CO}_2 \times \text{N} \times \text{Year}$ 抽穗期、 $\text{N} \times \text{Year}$ 分蘖期、 $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 拔节期和抽穗期的互作效应对单位干质量根系总吸收面积的影响均达显著水平。

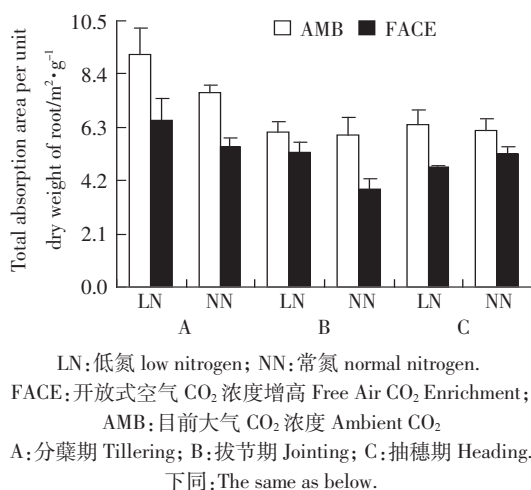


图 1 FACE 对油优 63 单位干质量根系总吸收面积 ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) 的影响 (2005—2006)

Figure 1 Effect of FACE on total absorption area per unit dry weight of root in 2005—2006

2.1.2 FACE 对油优 63 单位干质量根系活跃吸收面积的影响

FACE 处理对油优 63 不同生育时期单位干质量根系活跃吸收面积的影响如图 2 所示。由图 2 可知:(1) 不同生育时期油优 63 单位干质量根系活跃吸收面积年度间差异均达到极显著水平;(2)FACE 处理使油优 63 分蘖期、拔节期、抽穗期单位干质量根系活跃吸收面积分别比对照平均下降 29.9%、19.9%、21.2%，处理间的差异均达到极显著水平;(3)NN 处理使油优 63 分蘖期、拔节期单位干质量根系活跃吸收面积分别比 LN 处理平均下降 16.5%、13.7%，抽穗期比 LN 处理增加 10.9%，处理间的差异均达到显著或极显著水平。统计分析表明， $\text{CO}_2 \times \text{Year}$ 、 $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 、 $\text{CO}_2 \times \text{N} \times \text{Year}$ 抽穗期的互作效应对单位干质量根系活跃吸收面积的影响均达显著水平。

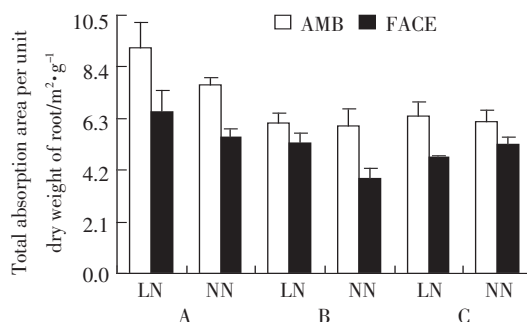


图 2 FACE 对油优 63 单位干质量根系活跃吸收面积 ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) 的影响 (2005—2006)

Figure 2 Effect of FACE on active absorption area per unit dry weight of root in 2005—2006

2.1.3 FACE 对油优 63 单位干质量根系 α -萘胺氧化量的影响

FACE 处理对油优 63 不同生育时期单位干质量根系的 α -萘胺氧化量的影响如图 3 所示。由图 3 可知:(1) 不同生育时期油优 63 单位干质量根系的 α -萘胺氧化量年度间差异均达到显著或极显著水平;(2)FACE 处理使油优 63 分蘖期、拔节期、抽穗期单位干质量根系的 α -萘胺氧化量分别平均比对照下降 18.6%、22.2%、18.0%，处理间的差异均达到极显著水平;(3)NN 处理使油优 63 分蘖期单位干质量根系的 α -萘胺氧化量比 LN 处理增加 2.7%，拔节期、抽穗期分别比 LN 处理平均下降 12.2%、7.4%，拔节期、抽穗期处理间的差异达到显著或极显著水平。统计分析表明， $\text{CO}_2 \times \text{Year}$ 拔节期和抽穗期、 $\text{N} \times \text{Year}$ 抽穗期的互作效应对单位干质量根系的 α -萘胺氧化量的影响均达显著水平。

2.2 FACE 对油优 63 每穴根系活性的影响

2.2.1 FACE 对油优 63 每穴根系总吸收面积的影响

FACE 处理对油优 63 不同生育时期每穴根系总

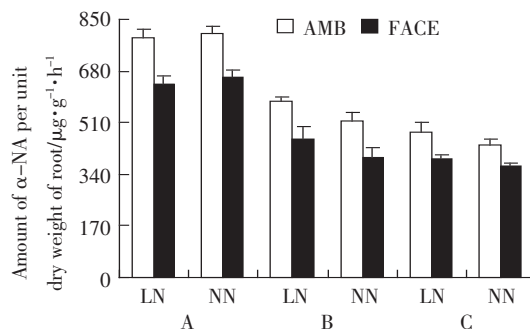


图 3 FACE 对油优 63 单位干质量根系的 α -萘胺氧化量 ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) 的影响 (2005—2006)

Figure 3 Effect of FACE on the amount of α -NA per unit dry weight of root in 2005—2006

吸收面积的影响如图 4 所示。由图 4 可知:(1)分蘖期、抽穗期汕优 63 每穴根系总吸收面积年度间差异均达到极显著水平;(2)FACE 处理使汕优 63 分蘖期、抽穗期每穴根系总吸收面积分别平均比对照增加 3.1%、18.8%,拔节期比对照下降 2.9%,抽穗期处理间的差异达到极显著水平;(3)NN 处理使汕优 63 分蘖期、拔节期每穴根系总吸收面积分别平均比 LN 处理下降 10.6%、7.7%,抽穗期比 LN 处理增加 14.3%,抽穗期处理间的差异达到极显著水平。统计分析表明, $\text{CO}_2 \times \text{Year}$ 、 $\text{N} \times \text{Year}$ 、 $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 、 $\text{CO}_2 \times \text{N} \times \text{Year}$ 的互作效应对不同生育时期每穴根系总吸收面积的影响多未达到显著水平。

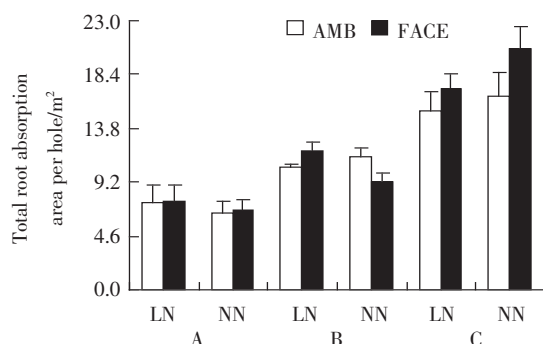


图 4 FACE 对汕优 63 每穴根系总吸收面积(m^2)的影响(2005—2006)

Figure 4 Effect of FACE on total root absorption area per hole in 2005—2006

2.2.2 FACE 对汕优 63 每穴根系活跃吸收面积的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育时期每穴根系活跃吸收面积的影响如图 5 所示。由图 5 可知:(1)分蘖期、抽穗期汕优 63 每穴根系活跃吸收面积年度间差异均达到极显著水平;(2)FACE 处理使汕优 63 分蘖期、拔节期、抽穗期每穴根系活跃吸收面积分别平均比对照增加 0.2%、2.6%、19.7%,抽穗期处理间的差异达到极显著水平;(3)NN 处理使汕优 63 分蘖期、拔节期每穴根系活跃吸收面积分别比 LN 处理平均下降 10.9%、11.9%,抽穗期比 LN 处理增加 23.2%,抽穗期处理间的差异达到极显著水平。统计分析表明, $\text{N} \times \text{Year}$ 拔节期、 $\text{CO}_2 \times \text{N}$ 抽穗期的互作效应对每穴根系活跃吸收面积的影响达显著水平。

2.2.3 FACE 对汕优 63 每穴根系 α -萘胺氧化量的影响

FACE 处理对汕优 63 不同生育时期每穴根系的 α -萘胺氧化量的影响如图 6 所示。由图 6 可知:(1)分蘖期、拔节期汕优 63 每穴根系的 α -萘胺氧化量年度间差异均达到极显著水平;(2)FACE 处理使汕优

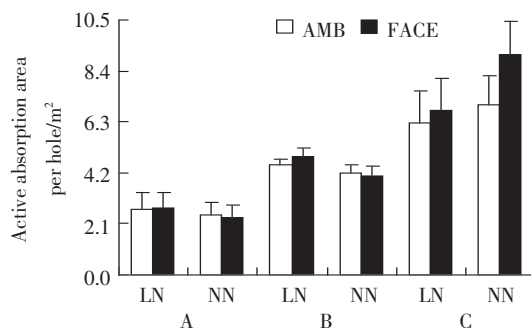


图 5 FACE 对汕优 63 每穴根系活跃吸收面积(m^2)的影响(2005—2006)

Figure 5 Effect of FACE on root active absorption area per hole in 2005—2006

63 分蘖期、抽穗期每穴根系的 α -萘胺氧化量分别比对照平均增加 18.6%、23.1%,拔节期比对照下降 1.1%,分蘖期、抽穗期处理间的差异达到显著或极显著水平;(3)NN 处理使汕优 63 分蘖期、抽穗期每穴根系的 α -萘胺氧化量分别比 LN 处理平均增加 12.2%、1.3%,拔节期比 LN 处理下降 2.8%,不同生育时期处理间的差异均未达到显著水平。统计分析表明, $\text{CO}_2 \times \text{Year}$ 抽穗期、 $\text{N} \times \text{Year}$ 和 $\text{CO}_2 \times \text{N} \times \text{Year}$ 拔节期的互作效应对每穴根系的 α -萘胺氧化量的影响达显著水平。

2.3 汕优 63 根系性状和体内养分含量与单位干质量根系活性的关系

2.3.1 汕优 63 根系性状与单位干质量根系活性的关系

相关分析表明,汕优 63 分蘖期每穴的不定根数、不定根总长度、根系体积、根干质量与单位干质量根系的总吸收面积、活跃吸收面积、 α -萘胺氧化量的关系不密切,拔节期、抽穗期每穴的不定根数、不定根总长度、根系体积、根干质量与单位干质量根系的总吸收面积、活跃吸收面积、 α -萘胺氧化量

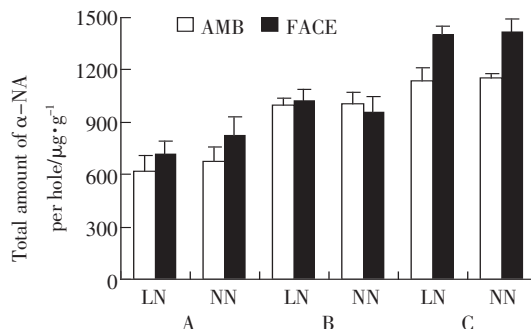


图 6 FACE 对汕优 63 每穴根系的 α -萘胺氧化量($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)的影响(2005—2006)

Figure 6 Effect of FACE on total amount of α -NA per hole in 2005—2006

的关系非常密切,相关系数多达到了显著或极显著水平,根量越大单位干质量根系的总吸收面积、活跃吸收面积、 α -萘胺氧化量越小(表 1、表 2、表 3)。前文研究表明,FACE 处理汕优 63 分蘖期、拔节期、抽穗期每穴不定根数、不定根总长度、根系体积、根干质量均极显著大于对照^[6]。FACE 处理汕优 63 根量过大可能是造成其单位干质量根系活性低于对照的重要原因。

2.3.2 植株体内氮、碳含量与单位干质量根系活性的关系

汕优 63 分蘖期、拔节期、抽穗期的含氮率与单位干质量根系的总吸收面积、活跃吸收面积、 α -萘胺氧化量多呈正相关关系,分蘖期、拔节期的植株含氮率与单位干质量根系的总吸收面积的相关系数达到了显著或极显著水平,分蘖期的植株含氮率与单位干质量根系的活跃吸收面积的相关系数达到了极显著水平,分蘖期、抽穗期的植株含氮率与单位干质量根系的 α -萘胺氧化量的相关系数达到显著或极显著水平,植株的含氮率越高,单位干质量根系的总吸收面积、活跃吸收面积、 α -萘胺氧化量越大(表 1、表 2、表 3)。前文研究表明,FACE 处理汕优 63 分蘖期、拔节期、抽穗期的植株含氮率显著低于对照^[4]。FACE 处理汕优 63 植株含氮率低可能是造成其单位干质量根系活性低与对照的重要原因之一。

汕优 63 植株碳氮比与单位干质量根系的总吸收面积、活跃吸收面积、 α -萘胺氧化量多呈负相关关系,分蘖期、抽穗期的植株碳氮比与单位干质量根系的总吸收面积的相关系数达到了显著或极显著水平,分蘖期植株的碳氮比与单位干质量根系的活跃吸收面积的相关系数达到了极显著水平,分蘖期、抽穗期植株的碳氮比与单位干质量根系的 α -萘胺氧化量的相关系数达到显著或极显著水平(表 1、表 2、表 3),碳氮比越高,单位干质量根系的活性越小。前文研究表明,FACE 处理汕优 63 不同生育时期植株含氮率显著低于对照^[4],可溶性碳水化合物含有率显著高于对照^[7]。FACE 处理汕优 63 植株碳氮比过高可能是造成其单位干质量根系活性低与对照的又一重要原因。

3 讨论

关于 FACE 处理对水稻根系的影响报道较少,到目前为止仅 Kim 等^[8]报道了 FACE 处理使日本中熟中粳稻品种 *Akitakomachi* 抽穗期根干质量比对照增

表 1 根系形态性状和植株养分含量与单位干质量根系的总吸收面积的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of root morphological traits and nutrient content in rice plant with total absorption area per unit dry weight of root

	分蘖期	拔节期	抽穗期
每穴不定根数/条	-0.133	-0.402	-0.062
每穴不定根总长度/m	0.096	-0.543*	-0.549*
每穴根系体积/cm ³	0.004	-0.674**	-0.182
每穴根干质量/g	-0.242	-0.778**	-0.522*
植株含氮率/%	0.606**	0.505*	-0.108
碳氮比	-0.595**	-0.354	-0.526*

表 2 根系形态性状和植株养分含量与单位干质量根系的活跃吸收面积的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of root morphological traits and nutrient content in rice plant with active absorption area per unit dry weight of root

	分蘖期	拔节期	抽穗期
每穴不定根数/条	0.182	-0.307	-0.597**
每穴不定根总长度/m	0.349	-0.363	-0.252
每穴根系体积/cm ³	0.267	-0.512*	-0.619**
每穴根干质量/g	0.049	-0.686**	-0.043
植株含氮率/%	0.616**	0.239	0.253
碳氮比	-0.565**	-0.178	-0.141

表 3 根系形态性状和植株养分含量与单位干质量根系的 α -萘胺氧化量的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of root morphological traits and nutrient content in rice plant with amount of α -NA per unit dry weight of root

	分蘖期	拔节期	抽穗期
每穴不定根数/条	-0.273	-0.408	-0.729**
每穴不定根总长度/m	-0.113	-0.630**	-0.749**
每穴根系体积/cm ³	-0.264	-0.599**	-0.498*
每穴根干质量/g	-0.396	-0.788**	-0.799**
植株含氮率/%	0.757**	0.416	0.519*
碳氮比	-0.731**	-0.366	-0.460*

加了 17.4%~45.6%;水培条件下的研究^[14]表明,FACE 处理使水稻分蘖期、拔节期、抽穗期根干质量分别比对照增加了 63%、37%和 44%;杨洪建等^[1-2]报道了 FACE 处理使我国粳稻品种武香粳 14 分蘖期、拔节期、抽穗期每穴的不定根干质量分别比对照增加了 44.5%、43.6%、38.2%,处理间差异均达极显著水平;

刘红江等^[6]前文研究表明,FACE 处理使汕优 63 分蘖期、拔节期、抽穗期每穴根干质量分别比对照平均增加 45.2%、29.1%、50.2%,处理间差异均达极显著水平,抽穗期 FACE 使汕优 63 根干质量的增加明显大于前人的研究结果。本研究表明,FACE 处理使三系杂交水稻汕优 63 分蘖期、拔节期、抽穗期单位干质量根系的总吸收面积、活跃吸收面积、 α -萘胺氧化量均极显著低于对照(图 1、图 2、图 3),与前人^[3]对武香粳 14 的研究结果基本一致,这可能是由于 FACE 处理使水稻根系的发生提早,到分蘖期及其以后的不同生育时期水稻老根的比例明显增加,因此其单位干质量根系活性比对照显著下降。FACE 处理对汕优 63 分蘖期、拔节期每穴不定根系活性的影响较小,这些与前人^[3]对粳稻品种的研究结果基本一致。但由于 FACE 处理到生育中期还能促进汕优 63 根系发生量的大幅度增加^[6],而对武香粳 14 根系的发生没有明显影响^[2],因此 FACE 处理使汕优 63 抽穗期每穴不定根系活性显著提高,对武香粳 14 抽穗期每穴不定根系活性影响很小。这可能是由于不同类型水稻品种根系生长对 FACE 处理响应的不同引起的。水稻 N、P 等养分吸收与地下部根系活性之间具有密切关系。汕优 63 抽穗期单穴根系活性对 FACE 处理的响应明显大于粳稻品种,可能是 FACE 处理使汕优 63 生育后期 N、P 等养分吸收等的增幅明显大于粳稻品种^[4-5]的重要原因。

水稻单位干质量根系活性的高低与根质量^[9]、根系的生理年龄^[10]关系密切。一般认为,根质量和根系的生理年龄越大,单位干质量根系的活性越低。杨洪建等^[3]对武香粳 14 的研究表明,移栽后 12、18 d 每穴的不定根数、不定根总长度、根系体积、根干质量与单位干质量根系活性的相关系数多未达到显著水平,移栽后 28 d 及其以后不同生育时期每穴根系的上述形态性状与单位干质量活性的相关系数多达到了显著或极显著水平,根量越大单位干质量根系活性越小。本研究表明,汕优 63 分蘖期每穴的不定根数、不定根总长度、根系体积、根干质量与单位干质量根系活性的相关系数均未达到显著水平,拔节期、抽穗期每穴根系的上述形态性状与单位干质量活性的相关系数多达到了显著或极显著水平(表 1、表 2、表 3),水稻根量过大不利于单位干质量根系活性的提高。这与前人的研究结果基本一致,FACE 处理不同水稻品种的根量大,随着生育进程的增加,根系生理年龄大或比较大的“老根”比例明显大于对照。这可能是造成

FACE 处理水稻单位干质量根系活性显著或极显著低于对照的重要原因之一。说明在未来大气 CO₂ 浓度增加条件下,如何提高生育中期水稻单位干质量根系活性,值得深入研究。

前人研究表明,水稻不同生育时期植株含氮率与单位干质量根系活性多呈正相关,碳氮比与单位干质量根系活性多呈负相关^[9]。本研究表明,汕优 63 分蘖期、拔节期、抽穗期植株含氮率与单位干质量根系的活性多呈正相关,植株碳氮比与单位干质量根系活性多呈负相关(表 1、表 2、表 3)。前文研究表明,FACE 处理使汕优 63 不同生育时期植株含氮率显著低于对照^[6],可溶性碳水化合物含有率显著高于对照^[7]。说明 FACE 条件下植株含氮率显著下降、可溶性碳水化合物含有率显著提高,造成植株碳氮比过高。可能是造成 FACE 处理水稻单位干质量根系活性显著或极显著低于对照的又一重要原因。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨洪建,杨连新,刘红江,等. FACE 对武香粳 14 根系生长动态的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(12): 1628-1633.
- [3] 杨洪建,杨连新,刘红江,等. FACE 对武香粳 14 根系活性影响的研究[J]. 作物学报, 2006, 32(1): 118-124.
- [4] 刘红江,杨连新,黄建晔,等. FACE 对三系杂交水稻汕优 63 氮素吸收利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1015-1021.
- [5] 刘红江,杨连新,黄建晔,等. FACE 对三系杂交水稻汕优 63 磷素吸收利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1882-1889.
- [6] 刘红江,杨连新,黄建晔,等. FACE 对三系杂交水稻汕优 63 根系生长动态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2291-2296.
- [7] 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]. *Journal of Experimental Botany*, 2008, (in press).
- [8] Kim H Y, Lieffering M, Miura S, et al. Growth and nitrogen uptake of CO₂-enriched rice under field conditions[J]. *New Phytologist*, 2001 (150): 223-229.
- [9] 王余龙,津野幸人. 水稻不同层次根量与活性的关系及其对氮素吸收的影响[J]. 江苏农学院学报, 1989, 10(2): 13-16.
- [10] 王余龙,陈林,姚友礼,等. 不同水稻品种的根系发生和根系活性[J]. 江苏农学院学报, 1994, 15(1): 11-16.
- [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.
- [12] Rogers H H, Runion G B, Krupa S V. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere[J]. *Environmental Pollution*, 1994(83): 155-189.
- [13] 潘红丽,赵秀兰,谢祖彬,等. 大气 CO₂ 浓度升高对农田生态系统的影响[J]. 云南环境科学, 2005, 24(4): 6-9.
- [14] 陈改革,朱建国,谢祖彬,等. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对水稻根系形态的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 503-507.