

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

黄建晔¹ 杨连新¹ 杨洪建¹ 刘红江¹ 董桂春¹ 朱建国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,江苏南京 210008)

摘要: 2001 - 2003 年利用农田开放式空气 CO₂ 浓度增高 (FACE) 系统平台,以武香粳 14 为供试品种,设置不同施氮量处理,研究大气 CO₂ 浓度比对照高 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的 FACE 处理对水稻生育期的影响及其可能原因。结果表明,FACE 使水稻播种—抽穗期、抽穗—成熟期和全生育期的天数分别比对照缩短 3~5 d、1~5 d、4~9 d,平均分别缩短 3.4、2.4、5.8 d,增施 N 肥可以减缓 FACE 对水稻生育期的缩短程度;FACE 使水稻不同生育期植株含 N 率明显降低,使不同生育期植株含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含有率明显提高;多元回归和通径分析表明,对水稻全生育期有显著影响的因素从大到小依次为拔节期植株含 N 率、抽穗期植株含 P 率、抽穗期茎鞘可溶性碳水化合物含有率和够苗期植株含 N 率。推测 FACE 使水稻够苗期和拔节期的植株含 N 率明显降低,使抽穗期的植株含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含有率明显提高可能是 FACE 水稻生育期缩短的生理原因之一。

关键词: 水稻;FACE;生育期;含 N 率;含 P 率;茎鞘可溶性碳水化合物含有率

中图分类号: S511

Effects of Free-air CO₂ Enrichment (FACE) on Growth Duration of Rice (*Oryza sativa* L.) and Its Cause

HUANG Jian-Ye¹, YANG Lian-Xin¹, YANG Hong-Jian¹, LIU Hong-Jiang¹, DONG Gui-Chun¹, ZHU Jian-Guo², WANG Yu-Long^{1,*}

(¹ Key Laboratory of Crop Cultivation & Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu; ² Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China)

Abstract: Global atmospheric CO₂ concentrations ($[\text{CO}_2]$) are projected to reach levels of 650 - 780 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ at the end of this century (IPCC, 2000). The increase in atmospheric $[\text{CO}_2]$ has the potential to enhance the growth and development of rice. However, little is known about the effect of free-air CO₂ enrichment (FACE) on growth duration of rice and its physiological cause. So we conducted a FACE experiment at Anzhen, Wuxi, Jiangsu Province, in 2001 - 2003, using the *Japonica* cultivar Wuxiangjing 14. The target $[\text{CO}_2]$ of the FACE plots was 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ above that in the ambient air. Three levels of N were supplied: low (LN, 150 kg $\cdot \text{ha}^{-1}$), normal (NN, 250 kg $\cdot \text{ha}^{-1}$) and high N (HN, 350 kg $\cdot \text{ha}^{-1}$). Results showed that: Compared with CK, the duration from sowing to heading, from heading to maturity and the whole growth duration of rice shrank 3 - 5 d (mean value 3.4 d), 1 - 5 d (mean value 2.4 d), 4 - 9 d (mean value 5.8 d) days in FACE treatment. Increment of nitrogen application rate could weaken the effect of FACE on growth duration.

FACE treatment resulted in the obvious decrease of N content in rice plant and obvious increase of P content in rice plant and soluble carbohydrates content in stem and sheath at different growth stage. Multiple regression and path analysis indicated that the sequence of factors which had significant effect on whole growth duration from the biggest to the smallest were N content in rice plant at jointing stage, P content in rice plant at heading stage, soluble carbohydrates content in stem and sheath at heading stage and N content in rice plant at N_n leaf stage. This suggests that one of the physiological reasons for the reduction of whole growth duration is the obvious decrease of N content in rice plant at jointing stage and obvious increase of P content in rice plant and soluble carbohydrates content in stem and sheath at heading stage.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30270777, 30471013)、国家自然科学基金重大国际合作研究项目 (40120140817) 和中国科学院知识创新重要方向项目 (KZCX-2-408) 资助。

作者简介: 黄建晔 (1963 -), 男, 江苏常熟人, 副教授, 博士, 主要从事水稻栽培生理生态研究。Tel: 0514-7979316; Fax: 0514-7971840; E-mail: jyhuang@yzu.edu.cn *通讯作者: 王余龙。Tel: 0514-7979225; Fax: 0514-7349817; E-mail: ylwang@yzu.edu.cn

Received (收稿日期): 2004-07-26, Accepted (接受日期) 2004-11-16.

Key words: Rice ; Free-air CO₂ enrichment (FACE) ; Growth duration ; Nitrogen content ; Phosphorus content ; Soluble carbohydrates content in stem and sheath

地球大气中 CO₂ 浓度迅速升高已是不争的事实,人类即将面临高 CO₂ 浓度的大气环境。大气 CO₂ 浓度增加势必对作物生态系统产生深刻的影响,因此一直是近年来国内外生态和农业领域的研究热点^[1]。为了研究大气 CO₂ 浓度升高对作物生长发育的影响,20 世纪 90 年代以前,主要是将作物放在 CO₂ 浓度较高的控制环境(controlled environment, CE)或开顶式同化箱(open-top chamber, OTC)内进行研究^[2,3],上述设备在提供作物较高大气 CO₂ 浓度的同时,其箱壁效应也使室内的其他生态因素和地下部根系生长环境与自然状态下有明显差异^[4,5],从而导致研究结果的代表性和可比性较差^[3]。为了克服这些研究方法的局限性,欧美等发达国家率先采用开放式空气 CO₂ 浓度增高设施即 FACE(Free-air CO₂ Enrichment)来研究大气 CO₂ 浓度升高对作物生长发育的影响^[3]。由于 FACE 圈内没有任何隔离设施,气体可以自由流通,因此十分接近自然生态环境,国际上普遍认为这是研究大气 CO₂ 浓度增加条件下生态系统响应最理想的方法,被称为“在未来世界开了个窗口”^[3]。

FACE 试验开展的 10 多年中,供试农作物主要有:C₃ 禾本科作物小麦、多年生黑麦草和水稻,C₄ 禾本科类高粱,C₃ 豆科植物白三叶草,C₃ 非禾本科块茎状作物马铃薯,以及多年生 C₃ 类木本作物棉花和葡萄,涉及的参数主要包括:光合作用、气孔导度、冠层温度、水分利用、水势、叶面积指数、根茎生物量累积、作物产量、辐射利用率、比叶面积、N 含量、N 收益、碳水化合物含量、生育期变化、土壤微生物、土壤呼吸、痕量气体交换以及土壤碳固定等。关于 FACE 对植物生育期的影响,有人发现 FACE 小麦从分蘖到成熟期平均缩短了 0.4 d^[6];马铃薯的成熟期缩短约 1 d^[7];在水分充足条件下,高粱的生育期也略有缩短^[8];而葡萄的生育期则不受影响^[9]。水稻是我国最主要的粮食作物,在我国粮食生产中占有特殊的地位。关于 FACE 对水稻生育期影响的研究报道甚少,只有 Kobayashi 等^[10]报道了 FACE 对播种—抽穗期天数的影响(提前 2 d),对抽穗—成熟期和全生育期天数的影响未见报道,其内在生理原因更不清楚。水稻生育期的长短不仅对产量和品质有明显影响,同时还是制订耕作制度、品种搭配、播种期安排

以及制订栽培措施等的重要依据。为此,本研究利用我国惟一的农田 FACE 系统平台,设置不同施氮量处理,系统研究并探讨了不同年度(2001、2002、2003 年)FACE 水稻生育期的变化规律及其可能原因^[11,12],以期为未来大气 CO₂ 浓度升高条件下我国稻作制度的调整、水稻品种生育期的选择以及水稻高产栽培技术措施的制订提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验平台

本试验于 2001 - 2003 年在中国水稻 FACE 研究技术平台上进行。该平台建于江苏省无锡市安镇镇年农场实验田中(31°37'N, 120°28'E)。实验区年降水量 1 100 ~ 1 200 mm,年平均温度约 16℃,年日照时间大于 2 000 h,年无霜天数大于 230 d,实验田土壤类型为黄泥土,耕作方式为水稻、冬小麦轮作。土壤基本理化性质为:砂粒(1 ~ 0.05 mm)9.2%,粉砂粒(0.05 ~ 0.001 mm)65.7%,黏粒(< 0.001 mm)25.1%,容重 1.2 g cm⁻³,有机 C 1.5%,全 N 0.159%,全 P 0.123%,速效 P 10.4 mg kg⁻¹,pH 6.8。

利用计算机网络对平台的 CO₂ 浓度进行监测和控制,根据大气中的 CO₂ 浓度、风向、风速、作物冠层高度的 CO₂ 浓度及昼夜等因素的变化自动调节 CO₂ 气体的释放速度及方向,实现水稻全生育期 FACE 圈内 CO₂ 平均浓度高于对照圈大气 CO₂ 浓度 200 μmol · mol⁻¹(即达到 570 μmol · mol⁻¹)。对照圈的其他环境条件则与自然状态完全一致^[13]。平台共有 3 个 FACE 实验圈和 5 个对照圈。为了防止 CO₂ 污染,对照圈距离 FACE 圈 90 m 以上。每个 FACE 圈是一个直径为 12.5 m 的八角形,有 8 根释放 CO₂ 气体的管带,每根长 5 m;管的向圈内一面有很多呈锯齿状分布的小孔,直径约 0.5 ~ 0.9 mm;管的高度在水稻冠层上方 50 ~ 60 cm。

1.2 试验设计

3 年的供试品种均为高产粳稻新品种武香粳 14。大田旱育秧,5 月 18 日播种,6 月 13 日人工移栽,行距为 25 cm,株距为 16.7 cm,24 穴 · m⁻²,3 苗 · 穴⁻¹。试验采用裂区设计。CO₂ 浓度为主处理,N 处理为副处理。自移栽期起,大气 CO₂ 浓度设对照(A, 370 μmol · mol⁻¹)和 FACE(F, 570 μmol · mol⁻¹)2

个水平;施N量,2001年设 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (LN)、 $250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (NN)2个水平,2002、2003年设 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (LN)、 $250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (NN)、 $350\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (HN)3个水平。施N时间为6月12日施基肥,6月18日施分蘖肥,7月28日~7月30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量为 $70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,均作基肥施用。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~收割前7 d进行间隙灌溉。适时防治病虫害,保证水稻正常生长发育。

1.3 测定内容及方法

1.3.1 生育期观察 记载不同处理抽穗期和成熟期的日期,计算播种—抽穗期、抽穗—成熟期和全生育期的天数(d)。

1.3.2 植株含N率、植株含P率和茎鞘内可溶性糖含有率的测定 分别于够苗期、拔节期、抽穗期在普查的基础上(100穴),每处理各取代表性植株5穴,测定地上部干重(105 杀青30 min,80 烘干72 h),然后用半微量蒸馏法测定植株含N率、用钼黄

比色法测定植株含P率、萘酚比色法测定茎鞘内可溶性糖含有率。

2 结果与分析

2.1 FACE对水稻生育期的影响

2.1.1 FACE对播种—抽穗期天数的影响

FACE对水稻播种—抽穗期天数的影响见表1。由表1可知,2001、2002、2003年,FACE使水稻播种—抽穗期的平均天数分别比对照缩短4.5、3.0、3.0 d,平均缩短3.4 d。其中,HN、NN、LN条件下分别比对照缩短3.0、3.3、3.7 d,增施N肥减缓了FACE对水稻播种—抽穗期天数的缩短程度。

2.1.2 FACE对抽穗—成熟期天数的影响

FACE对水稻抽穗—成熟期天数的影响见表2。由表2可知,2001、2002、2003年,FACE使水稻抽穗—成熟期的平均天数分别比对照缩短3.0、2.7、2.0 d,平均缩短2.4 d,缩短天数少于播种—抽穗期。其中,HN、NN、LN条件下分别比对照缩短1.0、2.0、4.0 d,增施N肥可以明显减缓FACE对水稻抽穗—成熟期天数的缩短程度。

表1 FACE对水稻播种—抽穗期天数的影响

Table 1 Effect of FACE on growth duration from sowing to heading stage of rice in 2001 - 2003(d)

N 处理 N treatment	CO ₂ 处理 CO ₂ treatment	2001	2002	2003	平均 Mean
HN ¹⁾	F ²⁾	—	101	100	100.5
	A ³⁾	—	104	103	103.5
NN	F	98	100	98	98.7
	A	102	103	101	102.0
LN	F	96	99	97	97.3
	A	101	102	100	101.0
平均 Mean	F	97.0	100.0	98.3	98.8
	A	101.5	103.0	101.3	102.2

注: ¹⁾ HN:高氮;NN:常氮;LN:低氮。²⁾ F:开放式空气CO₂浓度增高。³⁾ A:环境CO₂浓度(对照)。下同。

Notes: ¹⁾ HN: High nitrogen; NN: Normal nitrogen; LN: Low nitrogen. ²⁾ F: FACE. ³⁾ A: Ambient (CK). The same below.

表2 FACE对水稻抽穗—成熟期天数的影响

Table 2 Effect of FACE on growth duration from heading to mature stage of rice in 2001 - 2003(d)

N 处理 N treatment	CO ₂ 处理 CO ₂ treatment	2001	2002	2003	平均 Mean
HN	F	—	58	60	59.0
	A	—	59	61	60.0
NN	F	54	57	58	56.3
	A	56	59	60	58.3
LN	F	52	53	55	53.3
	A	56	58	58	57.3
平均 Mean	F	53.0	56.0	57.7	56.2
	A	56.0	58.7	59.7	58.6

2.1.3 FACE对全生育期天数的影响 FACE对水稻全生育期天数的影响见表3。由表3可知,

2001、2002、2003年,FACE使水稻全生育期的平均天数分别比对照缩短7.5、5.7、5.0 d,平均缩短5.8 d。

其中,HN、NN、LN 条件下分别比对照缩短 4.0、5.3、7.6 d,增施 N 肥可以明显减缓 FACE 对水稻全生育期的缩短程度。统计分析表明,FACE 使水稻全生育

期显著缩短,增施 N 肥使水稻全生育期显著延长,FACE 与 N 处理有显著的互作效应,2001、2002、2003 年趋势一致。

表 3 FACE 对水稻全生育期天数的影响

Table 3 Effect of FACE on whole growth duration of rice in 2001 - 2003 (d)

N 处理 N treatment	CO ₂ 处理 CO ₂ treatment	2001	2002	2003	平均 Mean
HN	F	—	159	160	159.5
	A	—	163	164	163.5
NN	F	152	157	156	155.0
	A	158	162	161	160.3
LN	F	148	152	152	150.7
	A	157	160	158	158.3
平均 Mean	F	150.0	156.0	156.0	155.1
	A	157.5	161.7	161.0	160.7
	F	*	*	*	*
	N	*	*	*	*
	F × N	*	*	*	*

Note: * P < 0.05.

2.2 FACE 对水稻植株含 N 率、含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含有率的影响

2001 - 2003 年 FACE 对水稻不同生育期植株含 N 率、含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含有率的影响列于表 4。表 4 表明,FACE 使水稻够苗期、拔节期、抽穗期植株含 N 率分别较对照下降 3.6% ~ 4.8%、12.9% ~ 13.4%、10.1% ~ 10.2%,不同年度均达显著或极显著水平;FACE 处理使水稻够苗期、拔节期、

抽穗期植株含 P 率分别较对照增加 3.9% ~ 8.0%、2.5% ~ 18.8%、8.6% ~ 10.9%,抽穗期达显著或极显著水平,够苗期和拔节期因年度而异;FACE 处理使水稻够苗期、拔节期、抽穗期茎鞘可溶性碳水化合物含有率分别较对照增加 7.7% ~ 17.3%、10.9% ~ 26.8%、8.2% ~ 22.6%,拔节期和抽穗期达显著或极显著水平,够苗期因年度而异。

表 4 FACE 对水稻不同生育期植株含 N 率、含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含有率的影响(2001 - 2003)

Table 4 Effects of FACE on nitrogen content, phosphorus content in rice plant and soluble carbohydrates content in stem and sheath at different growth stage of rice in 2001, 2002 and 2003

Year	CO ₂	含 N 率 Nitrogen content			含 P 率 Phosphorus content			碳水化合物含有率 Soluble carbohydrates content		
		够苗期 N-n leaf stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	够苗期 N-n leaf stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	够苗期 N-n leaf stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage
2001	F	2.83 *	1.93 *	1.67 **	0.54 ^{ns}	0.41 **	0.38 **	—	—	—
	A	2.97	2.22	1.86	0.52	0.35	0.35	—	—	—
2002	F	3.05 *	1.90 *	1.28 **	0.41 *	0.40 *	0.34 *	46.96 ^{ns}	87.88 **	95.70 **
	A	3.16	2.19	1.42	0.38	0.37	0.31	43.61	69.31	78.06
2003	F	2.83 *	1.93 **	1.67 **	0.52 ^{ns}	0.40 ^{ns}	0.35 *	34.52 *	60.20 *	88.51 *
	A	2.97	2.22	1.86	0.49	0.39	0.32	29.43	54.29	81.82

Notes: ^{ns} non-significant; * P < 0.05, ** P < 0.01. The same as follows.

2.3 水稻生育期与植株含 N 率、含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含有率的关系

同一水稻品种生育期的长短与种植期间的温度高低等关系密切。在本研究条件下,FACE 和对照水稻在同一地点种植,而且播种期相同,水稻生育期的差异可以认为不是由于温度等不同所造成,可能与植株体内有机、无机养分等含量有关。相关分析表明,水稻不同生育期植株含 N 率与全生育期的天数

均呈线性正相关,其中拔节期和抽穗期的相关系数均达极显著水平(表 5);水稻不同生育期植株含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含有率与全生育期的天数均呈线性负相关,其中抽穗期的植株含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含有率的相关系数均达极显著水平(表 5)。说明水稻不同生育期植株含 N 率越高、植株含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含有率越低则水稻全生育期越长。

表5 水稻不同生育期植株含 N 率、植株含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含量与全生育期的关系
Table 5 Relationship between whole growth duration and nitrogen content, phosphorus content in rice plant, soluble carbohydrates content in stem and sheath at different growth stage of rice

项目 Item	够苗期 N:n leaf stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage
植株含 N 率 Nitrogen content in rice plant	0.35 ^{ns}	0.84 ^{**}	0.65 ^{**}
植株含 P 率 Phosphorus content in rice plant	-0.42 ^{ns}	-0.27 ^{ns}	-0.66 ^{**}
茎鞘可溶性碳水化合物含量 Soluble carbohydrates content in stem and sheath	-0.19 ^{ns}	-0.44 ^{ns}	-0.76 ^{**}

Notes: ^{ns} non-significant; ^{**} $P < 0.01$.

为了进一步明确够苗期、拔节期和抽穗期的植株含 N 率、植株含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含量等 9 个因素对水稻全生育期天数的影响,进行多元逐步回归分析。结果表明,够苗期植株含 N 率 (X_1)、拔节期植株含 N 率 (X_2)、抽穗期植株含 P 率 (X_3) 和抽穗期茎鞘可溶性碳水化合物含量 (X_4) 对水稻全生育期的天数有显著影响,其回归方程为:

$$Y = 139.47 + 2.57X_1 + 12.87X_2 - 34.68X_3 - 0.04X_4$$

($R^2 = 0.81$)。通径分析结果表明,拔节期植株含 N 率对水稻全生育期天数的直接作用最大,其次为抽穗期植株含 P 率和抽穗期茎鞘可溶性碳水化合物含量,够苗期植株含 N 率对全生育期天数的影响力最小(表 6)。笔者认为,FACE 使水稻够苗期和拔节期的植株含 N 率明显降低,使抽穗期植株含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含量明显提高,可能是 FACE 水稻全生育期缩短的重要生理原因。

表6 水稻植株含 N 率、植株含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含量与全生育期的通径分析
Table 6 Path analysis of nitrogen content, phosphorus content in rice plant, soluble carbohydrates content in stem and sheath to whole duration of rice

通径系数 Path coefficient	1 Y	2 Y	3 Y	4 Y
够苗期植株含 N 率 X_1 ,1 Nitrogen content in rice plant at N:n leaf stage	0.1010	0.3116	0.0658	0.0563
拔节期植株含 N 率 X_2 ,2 Nitrogen content in rice plant at jointing stage	0.0502	0.6270	0.0794	0.1125
抽穗期植株含 P 率 X_3 ,3 Phosphorus content in rice plant at heading stage	-0.0298	-0.2232	-0.2230	-0.0307
抽穗期茎鞘碳水化合物含量 X_4 ,4 Soluble carbohydrates content in stem and sheath at heading stage	-0.0427	-0.5304	-0.0515	-0.1330

3 讨论

3.1 关于 CO₂ 浓度增加对水稻生育期的影响

关于大气 CO₂ 浓度增加对水稻播种—抽穗期的影响,金汉龙等^[14]在温室条件下研究认为,CO₂ 浓度倍增处理使粳稻品种秋光播种—抽穗期的天数明显缩短,而且随着温度升高缩短的天数增加。Kobayashi 等^[10]研究认为,FACE 使水稻开花期平均提前了 2 d。本研究表明,FACE 使粳稻品种武香粳 14 播种—抽穗期的天数平均缩短 3.4 d(2001、2002、2003 年分别缩短 4.5、3.0、3.0 d),缩短程度大于 Kobayashi 等的研究结果^[10],这可能因本试验地点(31°37'N,120°28'E)的纬度低于 Kobayashi 等试验地点(39°38'N,140°57'E)的纬度,与其温度较高有关。本研究还发现,在 HN、NN、LN 条件下,FACE 使水稻播种—抽穗期天数分别比对照缩短 3.0、3.3、3.7 d,增加施 N 量减缓了 FACE 对水稻播种—抽穗期天数缩短的程度。

关于大气 CO₂ 浓度增加对水稻抽穗—成熟期和全生育期天数的影响未见报道。本研究表明,FACE 使武香粳 14 抽穗—成熟期的天数平均比对照缩短 2.4 d(2001、2002、2003 年分别缩短 3.0、2.7、2.0 d),全生育期的天数平均比对照缩短 5.6 d(2001、2002、2003 年分别缩短 7.5、5.7、5.0 d)。此外,本研究还发现,在 HN、NN、LN 条件下,FACE 使水稻抽穗—成熟期的天数分别比对照缩短 1.0、2.0、4.0 d,使全生育期的天数分别比对照缩短 4.0、5.3、7.6 d,说明增加施 N 量可明显减缓 FACE 对水稻抽穗—成熟期和全生育期缩短的程度。

武香粳 14 为感光性较强的晚熟早粳品种,不同温光类型水稻品种的生育期对 FACE 的响应尚待进一步观察和研究。

3.2 关于 CO₂ 浓度增加条件下水稻生育期缩短的原因分析

关于 FACE 条件下水稻生育期缩短的原因未见报道。由于本试验 FACE 处理和 CK 在同一地点进

行,而且播种期相同,温度、光照等生态条件一致。在排除了温光等因素对水稻生育期的影响后,笔者推测植株体内养分含量的高低可能与 FACE 水稻生育期缩短有关。相关分析表明,水稻全生育期天数与不同生育期植株含 N 率呈线性正相关,与不同生育期植株含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含有率呈线性负相关(表 5)。多元回归分析结果表明,够苗期和拔节期的植株含 N 率、抽穗期的植株含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含有率对水稻全生育期的天数有显著影响,决定系数为 0.81。通径分析结果表明,拔节期植株含 N 率对水稻全生育期天数的直接作用最大,其次为抽穗期植株含 P 率和抽穗期茎鞘可溶性碳水化合物含有率,够苗期植株含 N 率对全生育期天数的影响力最小(表 6)。笔者认为,FACE 使水稻够苗期和拔节期的植株含 N 率明显降低,使抽穗期植株含 P 率和茎鞘可溶性碳水化合物含有率明显提高,可能是 FACE 水稻全生育期缩短的重要生理原因。罗卫红等^[16]研究发现,从开花—成熟期 FACE 水稻冠层白天平均温度比对照高 0.43℃,FACE 水稻冠层温度的变化可能与生育期缩短也具有密切的关系,值得进一步深入研究。

人类即将面临高 CO₂ 浓度的大气环境,因此准确预测和了解大气 CO₂ 浓度升高条件下水稻不同品种生育期的变化规律,对未来的稻作生产和粮食安全具有重要的现实指导意义。大量研究已经证实温室气体(主要是 CO₂)的增加将使本世纪全球温度升高 2~5℃^[17],而温度升高势必导致水稻生育期进一步被缩短。因此,如何应对未来气候变化使水稻生育期缩短对我国稻作生产带来的不利影响,在品种选择、播期、栽培以及耕作制度等方面作相应调整,是值得深入研究的重要课题^[18]。

References

- [1] Porter H, Navas ML. Plant growth and competition at elevated CO₂: on winners, losers and functional groups. *New Phytologist*, 2003, **157**: 175 - 198
- [2] Kimball B A, Zhu J-G(朱建国), Cheng L(程磊), Kobayashi K, Bindi M. Response of agricultural crops to free air CO₂ enrichment. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2002, **13**(10): 1 323 - 1 338 (in Chinese with English abstract)
- [3] Nakagawa H, Horie T. Rice responses to elevated CO₂ and temperature. *Global Environ Res*, 2000, **3**(2): 101 - 113
- [4] Porter H. Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. *Vegetatio*, 1993, **104/105**: 77 - 97
- [5] Thomas R B, Strain B R. Root restriction as a factor in photosynthetic acclimation of cotton seedlings grown in elevated carbon dioxide. *Plant Physiol*, 1991, **96**: 627 - 634
- [6] Pinter Jr P J, Kimball B A, LaMorte R L, Wall G W, Hunsaker D J, Adamsen F J, Frumau K F A, Vuets H F, Hendrey G R, Lewin K F, Nagy J, Johnson H B, Leavitt S W, Thompson T L, Matthias A D, Brooks T J. Free-air CO₂ enrichment (FACE): blower effects on wheat canopy microclimate and plant development. *Agric For Meteorol*, 2000, **103**: 319 - 332
- [7] Bindi M, Fibbi L, Frabotta A, Ottavini G, Magliulo V. Free air CO₂ enrichment of potato (*Solanum tuberosum* L.). In: Annual report for changing climate and potential impacts on potato yield and quality (CHIP), Contract No. ENV4-CT97-0489. Brussels, Belgium: Commission of the European Union, 1998. 133 - 163
- [8] Otman M J, Kimball B A, Pinter Jr P J, Wall G W, Vanderlip R L, Leavitt S W, LaMorte R L, Matthias A D, Brooks T J. Elevated CO₂ increases sorghum biomass under drought conditions. *New Phytologist*, 2001, **150**(2): 261 - 273
- [9] Bindi M, Fibbi L, Miglietta F. Free Air CO₂ enrichment (FACE) of grapevine (*Vitis vinifera* L.). Growth and quality of grape and wine in response to elevated CO₂ concentrations. *European Journal of Agronomy*, 2001, **14**: 145 - 155
- [10] 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. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2001. 371 - 395
- [11] Huang J-Y(黄建晔), Yang H-J(杨洪建), Dong G-C(董桂春), Wang Y-L(王余龙), Zhu J-G(朱建国), Yang L-X(杨连新), Shan Y-H(单玉华). Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on yield formation in rice. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2002, **13**(10): 1 210 - 1 214 (in Chinese with English abstract)
- [12] Dong G-C(董桂春), Wang Y-L(王余龙), Yang H-J(杨洪建), Huang J-Y(黄建晔), Zhu J-G(朱建国), Yang L-X(杨连新), Shan Y-H(单玉华). Effect of free-air CO₂ enrichment (FACE) on nitrogen accumulation and utilization efficiency in rice. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2002, **13**(10): 1 219 - 1 222 (in Chinese with English abstract)
- [13] Liu G(刘钢), Han Y(韩勇), Zhu J-G(朱建国), Okada M, Nakamura H, Yoshimoto M. Rice-wheat rotational FACE platform. System structure and control. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2002, **13**(10): 1 253 - 1 258 (in Chinese with English abstract)
- [14] Kim H Y, Horie T, Nakagawa H, Wada K. Effects of elevated CO₂ concentration and high temperature on growth and yield of rice. *Jpn J Crop Sci*, 1996, **65**(4): 634 - 643
- [15] Xie Z-B(谢祖彬), Zhu J-G(朱建国), Zhang Y-L(张雅丽), Ma H-L(马红亮), Liu G(刘钢), Han Y(韩勇), Zeng Q(曾青), Cai Z-C(蔡祖聪). Responses of rice (*Oryza sativa*) growth and its C, N and P composition to FACE (Free-air carbon dioxide enrichment) and N, P fertilization. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2002, **13**(10): 1 223 - 1 230 (in Chinese with English abstract)
- [16] Luo W-H(罗卫红), Yoshimoto M, Dai J-F(戴剑峰), Zhu J-G(朱建国), Han Y(韩勇), Liu G(刘钢). Effects of free-air CO₂ enrichment on rice canopy microclimate. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2002, **13**(10): 1 235 - 1 239 (in Chinese with English abstract)
- [17] IPCC. Climate Change 1995: Summary for Policy Makers and Technical Summary of the Working Group Report. In: Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, Harris N, Kattenberg A, Maskell K, eds. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1996
- [18] Wu H-B(吴海宝). Strategies of rice paddy production in relation to global warming. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, 1997, **17**(2): 216 - 219 (in Chinese with English abstract)