

FACE 对水稻磷素累积量及含磷率影响的模拟研究

孙成明¹, 庄恒扬¹, 杨连新¹, 黄建晔¹, 董桂春¹, 朱建国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, 江苏 南京 210008)

摘要:为了明确开放式空气 CO₂ 浓度增高(FACE)对水稻磷素动态的影响,借助目前国内惟一的 FACE 技术平台,以武香粳 14 为供试品种,设置不同施 N 量处理,研究大气 CO₂ 浓度高于对照 200 μmol·mol⁻¹ 的 FACE 处理对水稻 P 素吸收利用动态的影响。结果表明,FACE 处理使水稻各生育期 P 素累积量较 CK 显著增加,含 P 率也有所增加,但增幅不大。增施 N 肥对 P 素累积量及含 P 率均影响不大。在此基础上采用 Logistic 方程描述了水稻 P 素累积量及含 P 率随移栽天数的动态变化过程,并建立 CO₂ 及 P 素影响因子对模型进行了订正。利用建模以外的试验数据对该模型进行了检验,结果表明,模拟值与实测值之间的根均方差(RMSE)较小,相关系数达到了显著或极显著水平,表明模型的预测性能好。

关键词:水稻;FACE;P 素累积量;含 P 率;模型

中图分类号:X171.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)03-1009-06

Simulation on Phosphorus Accumulation and Phosphorus Content in FACE Rice

SUN Cheng-ming¹, ZHUANG Heng-yang¹, YANG Lian-xin¹, HUANG Jian-ye¹, DONG Gui-chun¹, ZHU Jian-guo², WANG Yu-long¹

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

Abstract: The effects of increase in CO₂ concentration on phosphorus dynamic of rice was studied in this paper, based on a FACE experiment conducted at Anzhen, Wuxi, Jiangsu Province in 2001—2003. The FACE facility consisted of three FACE rings (three repetitions) and five ambient rings, and the ambient rings were 90 m apart to avoid contamination of elevated CO₂. Rice were grown from transplanting to harvest under two levels of [CO₂] for three consecutive years, and the target [CO₂] of the FACE rings was 200 μmol·mol⁻¹ higher than that in the ambient air. The annual mean temperature was about 16 °C, the annual mean rainfall was 1 150 mm and the annual sunshine hours were 2 000 h in the experiment area. The experiment was conducted in 3 years using the *japonica cultivar* Wuxiangjing 14. Seeds were sowed on 18 May and seedlings were hand transplanted with 3 plants each hill on 13 June. Hills and rows were 16.7 and 30 cm apart, respectively (equivalent to 24 hill·m⁻²), and three levels of N treatment were applied: LN (150 kg·hm⁻²), MN (250 kg·hm⁻²) and HN (350 kg·hm⁻²). The results indicated that phosphorus accumulation and phosphorus content in rice plant increased at different growth stages under FACE treatment. The model of phosphorus accumulation was described by Logistic equation and the exponential and quadratic functions were used to describe CO₂ concentration effect. The phosphorus content was defined as the proportion of phosphorus accumulation to that of shoot mass. The models were described with numbers of days after transplanting and the phosphorus dynamics were fitted well both under FACE and normal conditions. The model validation using different experimental data indicated that, the RMSE between simulated and observed values was small and the correlation coefficients were significant at 5% level, suggesting that the models were accurate.

Keywords: rice; free-air CO₂ enrichment; phosphorus accumulation; phosphorus content; model

磷是作物需求量较大且作物生长反应敏感的重要元素。建立磷素养分模拟模型,对作物生产中磷的

有效管理十分重要^[1,2]。在已建的作物生长模型中,磷的动态模拟较少,如 RCSODS、WCSODS、COTGROW、CERES、ORYZA、WHEATGRO 等都未包括磷素动态模拟^[3-9]。庄恒扬等^[1]建立了基于生长潜在需要和土壤水溶性磷浓度受限的作物磷素吸收动态模型,检验结果表明模型对小麦植株含磷率的动态变化有较好的模拟效果。陈实等^[10]建立了一个简化的农业系统磷循环模型来模拟磷的动态行为及长期效应。李军等^[11]则

收稿日期:2007-09-02

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);中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX-2-408、KZCX3-SW-440)

作者简介:孙成明(1973—),男,博士,副教授,主要从事作物栽培生理及其模拟系统等方面的研究。E-mail:cmsun@yzu.edu.cn

通讯作者:王余龙

较为系统地介绍了 EPIC 模型中土壤磷运转和作物磷素营养的数学模拟。Jones、Sharpley 等^[12-14]组建了系统性和机理性较强的描述土壤磷运转和作物营养的系统动力学模型。在大田条件下,谢祖彬等^[15]研究了 FACE 对水稻苗期、拔节期、抽穗期和成熟期含磷率和吸磷量的影响,陈利军等^[16]探讨了大气 CO₂ 浓度增加对土壤磷酸酶活性的影响。Lieferrig 等^[17]在较常态 CO₂ 浓度增高 200 μmol·mol⁻¹ 的 FACE 条件下发现水稻子粒中磷素含量无显著差异。杨连新等^[18]、黄建晔等^[19,20]研究表明,FACE 处理使水稻不同生育时期植株磷素含量增加,增幅达 2.48%~18.84%,同时磷素累积量显著或极显著增加,增幅为 28.71%~59.11%,生育前期的增幅明显大于生育中、后期。本文利用我国惟一的 FACE 技术平台,通过设置不同的 N 素水平,对 FACE 条件下水稻磷素吸收与累积动态模型进行了研究,以期对未来大气 CO₂ 浓度增高条件下水稻施肥管理和决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验平台及试验设计见相关研究^[18-20]。

1.2 测定内容与方法

在主要生育期各小区普查的基础上,每处理各取代表性植株 5 穴,分别测定地上部茎鞘、绿叶、黄叶、稻穗等器官干物重(105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干 72 h),上述材料经粉碎后用钼黄比色法测定全磷含量。

1.3 数据分析与验证

采用 EXCEL 等进行基础数据的归类、处理、作图等,用 Visual Basic 语言编制分析程序进行模型参数的校正和显著性分析。采用实测值与模拟值之间的根

均方差(RMSE)表示模型的预测精度,并绘制实测值与模拟值的 1:1 关系图。

2 模型的构建

2.1 FACE 对水稻磷素动态的影响

FACE 对水稻 P 素累积量的影响(图 1)。图 1 表明 FACE 处理使水稻各生育期 P 素累积量增加,且不同 N 素处理之间趋势一致。增施 N 肥对 FACE 及 CK 条件下的 P 素累积量影响不大。这与杨连新等^[18]、黄建晔等^[19,20] 研究结果一致。同时从图 1 可以看出,FACE 水稻 P 素累积量随移栽后天数呈典型的 S 型曲线变化,不同的 N 素处理之间趋势一致。CK 处理也有相同结果。

水稻植株的含 P 率可表示为水稻地上部 P 素累积量与植株干物重的比值。FACE 对水稻含 P 率的影响见图 2。图 2 表明 FACE 处理使水稻各生育期含 P 率较 CK 均有增加,但增幅不大,不同 N 素处理之间趋势相同。增施 N 肥对植株的含 P 率影响不大,且 FACE 处理和 N 素处理之间无显著交互作用。这与杨连新、黄建晔等的研究结果一致^[18-20]。

2.2 FACE 水稻 P 素累积量模型

根据上述结果及相关研究^[19,20]可知,FACE 及 CK 条件下水稻地上部 P 素累积量均呈 S 型变化,因此可以用 Logistic 方程来对模型进行描述。

(1)水稻 P 素累积量常态模型

CK 条件下水稻 P 素累积量的模拟模型表示如下:

$$PA_{amb}=PA_{max}/[1+EXP(a-b\times t)](1)$$

式中:PA_{amb} 为 t 时刻水稻地上部 P 素累积量,g·m⁻²; PA_{max} 为植株最大 P 素累积量,g·m⁻²;a、b 为模型系数。

(2)FACE 对水稻 P 素累积量的影响

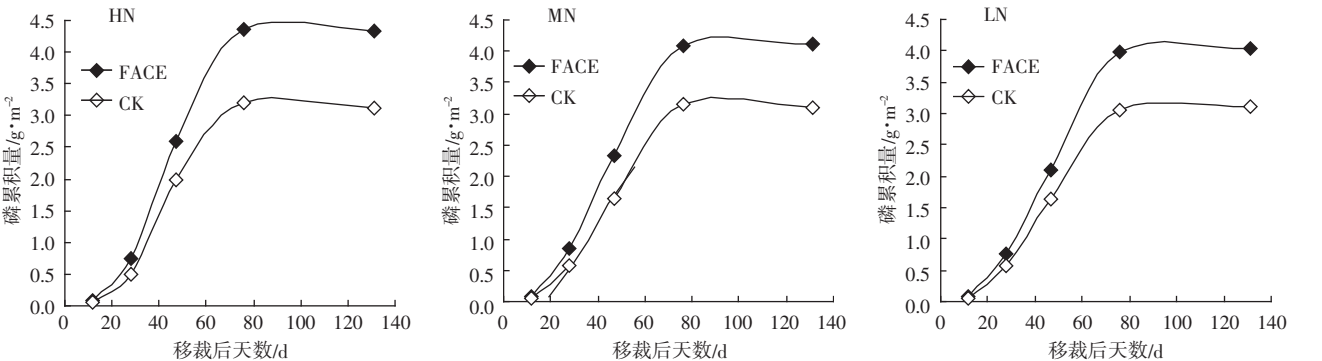


图 1 FACE 水稻 P 素累积量的变化趋势

Figure 1 Dynamics of entire plant phosphorus accumulation in FACE rice

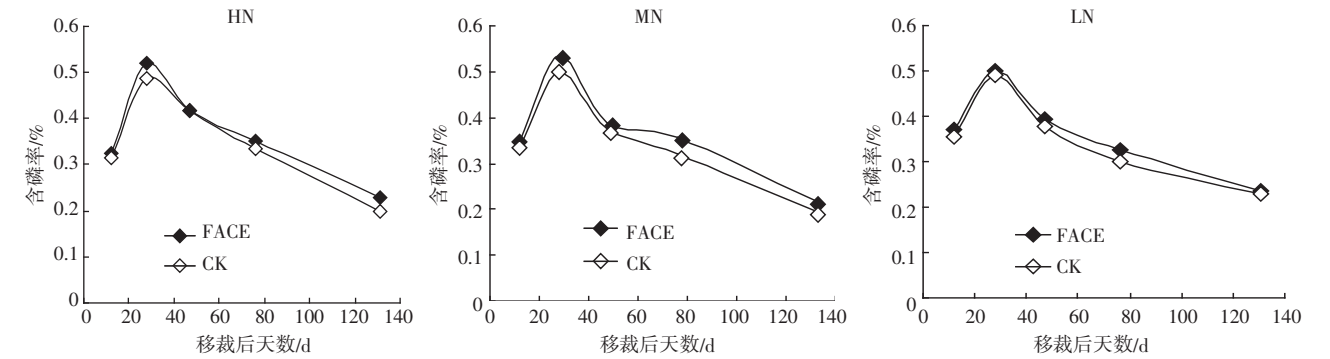


图 2 FACE 水稻植株含 P 率的变化趋势

Figure 2 Dynamics of entire plant phosphorus content in FACE rice

由图 1 可知,FACE 处理使水稻各生育期 P 素累积量增加,且不同处理之间的趋势一致。因此 CO₂ 影响因子可采用一个通用的模型:

$$F_{CO_2}=1+\beta\times\text{Ln}(Cx/C_0)(2)$$

式中: F_{CO_2} 为 CO₂ 影响因子; Cx 为变化后的大气 CO₂ 浓度; C_0 为对照的 CO₂ 浓度,即当前大气 CO₂ 浓度 (370 μmol·mol⁻¹); β 为模型系数,本研究根据 2003 年试验数据求得 $\beta=0.844$ 。

(3)P 素影响因子

沈善敏等^[21]认为,作物 P 素状况与土壤速效磷含量关系密切,但现有资料还不足以对作物生长发育、产量与磷供应水平的关系进行较为准确的定量描述。本研究参照李军等^[11]介绍的 EPIC 模型,对 P 素影响因子描述如下:

$$FP=0.1+0.9CLP/[CLP+EXP(8.01-0.36CLP)](3)$$

式中: FP 为速效 P 因子,取值在 0.1~1.0 之间; CLP 为土层中速效 P 含量,mg·kg⁻¹。根据李刚华等^[22]研究可知,水稻土壤中速效 P 含量与施 P 量之间呈显著的线性关系(施磷 20 d 后),结合本研究的土壤状况 CLP 可以表示为:

$$CLP=10.4+0.215APA(4)$$

式中 APA 为施 P 量,kg·hm⁻²。

综上所述,FACE 水稻 P 素累积量模型 (PA_{face}) 可以表示为:

$$PA_{face}=PA_{amb}\times F_{CO_2}\times FP(5)$$

2.3 FACE 水稻含 P 率模型

水稻植株含 P 率可以表示为地上部分 P 素累积量和地上部干物质累积量的比值,具体如下:

$$PC_{face}=PA_{face}/DMW_{face}(6)$$

其中 PC_{face} 、 DMW_{face} 分别为 FACE 条件下水稻植株的含 P 率和地上部干物质重量。 DMW_{face} 模拟另文

报道^[23]。

2.4 参数的确定

采用顾世梁等^[24]提出的非线性方程最优拟合的缩张算法,对参数进行逐步求解,使模型的拟合程度达到最优化,即模拟值和实测值之间的离差平方和最小。根据 2003 年的试验数据求得参数值列于表 1。

表 1 FACE 水稻 P 素动态模型的参数值

Table 1 The parameters of phosphorus dynamic models in FACE rice

年度	处理	参数			
		PA_{max}	a	b	R^2
2003	HN	3.192	5.163	0.117	0.998 6
	MN	3.170	5.080	0.103	0.996 8
	LN	3.177	5.067	0.098	0.996 5
平均		3.180	5.103	0.106	0.997 3

2.5 模型的检验

2.5.1 FACE 水稻 P 素累积量模型的检验

选用 2002 年的实测数据对 FACE 水稻 P 素累积量模型的可靠性进行验证,模拟值与实测值的 1:1 图见图 3。由图 3 可知,FACE 及 CK 条件下不同 N 素处理植株 P 素累积量的模拟值与实测值之间有很好的-一致性,相关系数在 0.989 4~0.999 3 之间,均达到了极显著水平。平均相对误差小, RMSE 在不同 N 素处理间分别为 0.301 7、0.247 2、0.071 2 g·m⁻²(FACE)以及 0.154 2、0.134 1、0.234 4 g·m⁻²(CK),表明模型有很好的模拟效果。

2.5.2 FACE 水稻含 P 率模型的检验

选用 2001 年的实测数据对 FACE 水稻含 P 率模型的准确性和适用性进行验证,模拟值与实测值的 1:1 关系见图 4。由图 4 可知,FACE 及 CK 条件下水稻含 P 率模拟值与实测值之间有较好-一致性 (FACE 处理

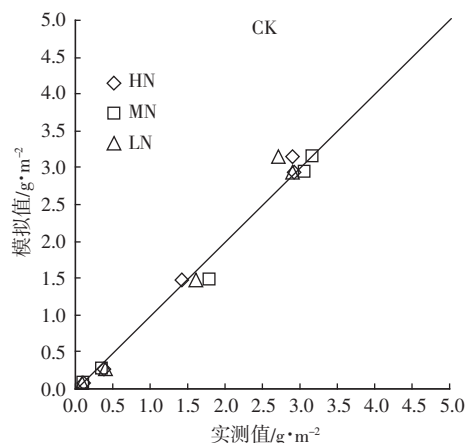
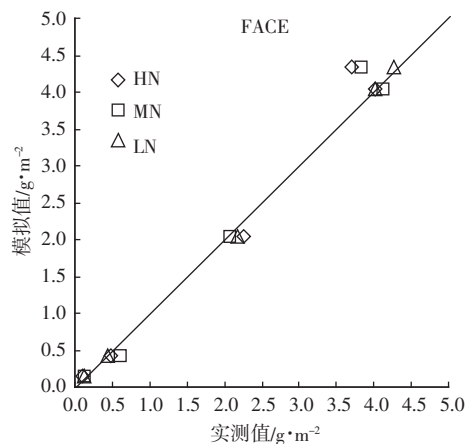


图 3 FACE 水稻 P 累积量模拟值与实测值的比较(2002)

Figure 3 Comparison between the simulated and observed phosphorus accumulation in FACE rice(2002)

的模拟值稍微偏低)。不同 N 素处理的模拟根均方差 RMSE 分别为 0.056 4%、0.046 2%(FACE) 以及 0.046 0%、0.037 6%(CK)。相关分析表明,FACE 水稻含 P 率的模拟值与实测值之间的相关系数在 0.865 7~0.951 5 之间,达到了显著或极显著水平,表明模拟结果的准确性较高。

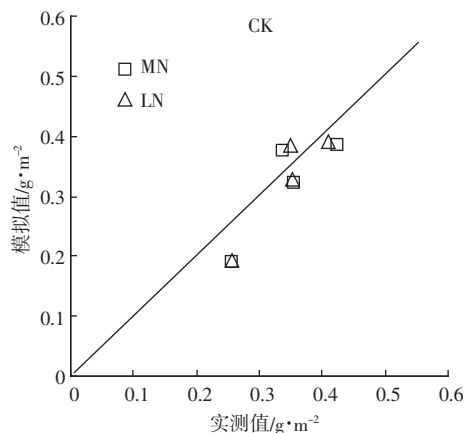
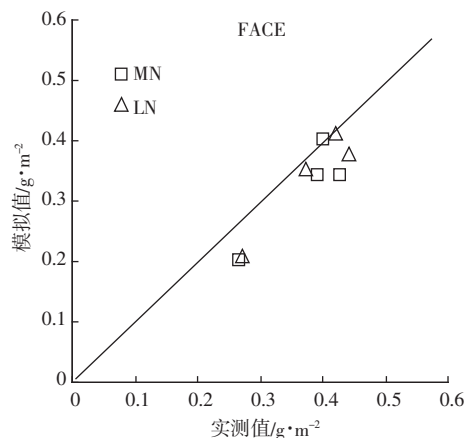


图 4 FACE 水稻含 P 率模拟值与实测值的比较(2001)

Figure 4 Comparison between the simulated and observed phosphorus content in FACE rice

3 结论与讨论

关于 CO_2 浓度增高对作物 P 素吸收利用的影响,前人已有不少研究^[15-20]。但对 FACE 条件下水稻体内 P 素含量及累积量变化的模拟研究尚未见报道。本文利用我国稻/麦轮作 FACE 技术平台,通过设置不同的 N 素水平,对 FACE 条件下水稻 P 素累积动态与含量进行了模拟研究,结果表明,FACE 处理使水稻各生育期 P 素累积量较 CK 显著增加,含 P 率也有所增加,但增幅不大。增施 N 肥对 P 素累积量及含 P 率均影响不大。

FACE 及 CK 条件下的 P 素累积量均呈典型的 S 型曲线变化,因此本研究用 Logistic 方程对 P 素累积量进行了模拟,并通过 CO_2 浓度及施 P 量因子对模型进行订正。含 P 率的模拟用 P 素累积量和地上部干物重的比值表示,由于 FACE 处理使稻株 P 素累积量增加较多,所以含 P 率较 CK 仍有不同程度的增加。通过建模以外试验数据对模型的检验,模拟值与实测之间有很好的 consistency,表明 FACE 水稻 P 素动态模型有很好的模拟效果。

水稻 P 素的吸收与利用受到品种、土壤、水分管理及施肥方式等因素的影响^[25]。本研究表明,大气 CO_2 浓度增高对水稻 P 素的吸收利用也有较大的影响,FACE 处理使水稻各生育期 P 素累积量及含 P 率均有不同程度的增加,且不同 N 素处理之间趋势一致。本研究提出的 FACE 水稻 P 素动态模型反映了不同大气 CO_2 浓度、不同施 N 水平情况下 P 素累积量和含 P 率的动态变化过程,结果有一定的可靠性。但由于受到试验条件的限制,模型只在两个 CO_2 浓度上得到了验证。同时本研究的结果还主要以统计模型为

主, 未能反映 P 素代谢的生理机制对水稻 P 素吸收动态的影响。这些都有待今后进一步探索。

参考文献:

- [1] 庄恒扬, 曹卫星, 刘传松. 作物磷素养分的动态模拟[J]. 生态学杂志, 2005, 24(3): 335-338.
- ZHUANG Heng-yang, CAO Wei-xing, LIU Chuan-song. Dynamic simulation of phosphorus nutrient in crop-soil system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(3): 335-338.
- [2] 庄恒扬, 曹卫星, 蒋思霞, 等. 作物氮素吸收与分配的动态模拟[J]. 农业系统科学与综合研究, 2004, 20(1): 5-11.
- ZHUANG Heng-yang, CAO Wei-xing, JIANG Si-xia, et al. Simulation on nitrogen uptake and partitioning in crops [J]. *System Science and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2004, 20(1): 5-11.
- [3] 高亮之, 金之庆, 黄 耀, 等. 水稻栽培计算机模拟优化决策系统(RCSODS)[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1992. 36-38.
- GAO Liang-zhi, JIN Zhi-qing, HUANG Yao, et al. Rice cultivation simulation optimization-decision making system(RCSODS)[M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 1992. 36-38.
- [4] 高亮之, 金之庆, 郑国清, 等. 小麦栽培模拟优化决策系统(WCSODS) [J]. 江苏农业学报, 2000, 16(2): 65-72.
- GAO Liang-zhi, JIN Zhi-qing, ZHENG Guo-qing, et al. Wheat cultivation simulation-optimization-decision making system (WCSODS) [J]. *Jiangsu J of Agr Sci*, 2000, 16(2): 65-72.
- [5] 潘学标, 韩湘玲, 石元春. COTGROW: 棉花生长发育模拟模型[J]. 棉花学报, 1996, 8(4): 180-188.
- PAN Xue-biao, HAN Xiang-ling, SHI Yuan-chun. COTGROW: cotton growth and development simulation model[J]. *Acta Gossypii Sinica*, 1996, 8(4): 180-188.
- [6] 曹永华. 美国 CERES 作物模拟模型的应用 [J]. 世界农业, 1991, 9: 52-55.
- CAO Yong-hua. Application of CERES crop simulation model in America[J]. *World Agriculture*, 1991, 9: 52-55.
- [7] Buresh R J, Singh U, Godwin D C, et al. Simulation soil nitrogen transformations and crop response to nitrogen using the CERES-rice model[J]. *IRIR Research Paper Series*, 1991, 151: 43-45.
- [8] Drenth H, ten Berge H F M, Riethoven J J M. ORYZA simulation modules for potential and nitrogen limited rice production [M]. SARP proceedings Pudoc, Wageningen, 1994.
- [9] Aggarwal P K. Analyzing the limitations set by climate factors, genotype, water and nitrogen availability on productivity of wheat I. The model description, parameterization and validation [J]. *Field Crop Res*, 1994, 38: 73-91.
- [10] 陈 实, 殷秀岩, 张 璐, 等. 农业系统中磷肥残效及磷循环研究 IV. 农业系统磷循环的一个简单模型及其验证 [J]. 应用生态学报, 1994, 5(3): 256-262.
- CHEN Shi, YIN Xiu-yan, ZHANG Lu, et al. Residual effect of phosphorus fertilizer and phosphorus recycling in a farming system IV. A simple phosphorus recycling model in a farming system and its test[J]. *Chin J Appl Ecol*, 1994, 5(3): 256-262.
- [11] 李 军, 邵明安, 张兴昌. EPIC 模型中土壤氮磷运转和作物营养的

数学模拟[J]. 植物营养与肥科学报, 2005, 11(2): 166-173.

- LI Jun, SHAO Ming-an, ZHANG Xing-chang. Simulation equations for soil nitrogen and phosphorus transfer and crop nutrition in the EPIC model[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(2): 166-173.
- [12] Jones C A, Cole C V, Sharpley A N, et al. A simplified soil and plant phosphorus model: I. Documentation[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, 48(4): 800-805.
- [13] Sharpley A N, Jones C A, Gray C. A simplified soil and plant phosphorus model: II. Prediction of labile, organic, and sorbed phosphorus[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, 48(4): 806-809.
- [14] Jones C A, Sharpley A N, Williams J R. A simplified soil and plant phosphorus model: III [J]. *Testing Soil Sci Soc Am J*, 1984, 48(4): 810-813.
- [15] 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.
- XIE Zu-bin, ZHU Jian-guo, ZHANG Ya-li, et al. Responses of rice (*Oryza sativa*) growth and its C, N and P composition to FACE (Free Air Carbon Dioxide Enrichment) and N, P fertilization [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(10): 1223-1230.
- [16] 陈利军, 武志杰, 黄国宏, 等. 大气 CO₂ 增加对土壤脲酶、磷酸酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1356-1357.
- CHEN Li-jun, WU Zhi-jie, HUANG Guo-hong, et al. Effect of elevated atmospheric CO₂ on soil urease and phosphatase activities[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13(10): 1356-1357.
- [17] Lieferring M, Kim H Y, Kobayashi K, et al. The impact of elevated CO₂ on the elemental concentrations of field grown rice grains [J]. *Field Crops Research*, 2004, 88: 279-286.
- [18] 杨连新, 杨洪建, 黄建晔, 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影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 924-928.
- YANG Lian-xin, YANG Hong-jian, HUANG Jian-ye, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment(FACE) on phosphorus nutrition of *Oryza sativa* at its different growth stage [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16 (5): 924-928.
- [19] 黄建晔, 杨连新, 杨洪建, 等. 水稻磷素对开放式空气 CO₂ 浓度增高响应的研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2004, 25(4): 1-6.
- HUANG Jian-ye, YANG Lian-xin, YANG Hong-jian, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment(FACE) on phosphorus accumulation and utilization at different growth stages in rice(*Oryza sativa* L.) cultivar wuxiangjing 14 [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and life Sciences Edition)*, 2004, 25(4): 1-6.
- [20] 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.
- HUANG Jian-ye, WANG Yu-long, YANG Hong-jian, et al. Effect of free-air CO₂ enrichment (FACE) on phosphorus accumulation and utilization efficiency in rice [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and life Sciences Edition)*, 2002, 23(4): 39-42.
- [21] 沈善敏, 殷秀岩, 张 璐. 农业系统中磷肥残效及磷循环研究 1. 作

1014	孙成明等:FACE 对水稻磷素累积量及含磷率影响的模拟研究	2008年 5月
	物吸磷量、磷肥残效及土壤有效磷变化[J]. 应用生态学报, 1992, 3 (2):138-143.	SUN Cheng-ming, ZHUANG Heng-yang, YANG Lian-xin, et al. Dry matter accumulation and allocation models of rice in FACE [J]. <i>Chin J Appl Ecol</i> , 2006, 17(10):1894-1898.
	SHEN Shan-min, YIN Xiu-yan, ZHANG Lu. Residual effect of phosphorus fertilizer and phosphorus recycling in a farming system I. Phosphorus uptake by crops, residual effect of phosphorus fertilizer and changes of soil available phosphorus [J]. <i>Chin J Appl Ecol</i> , 1992, 3(2): 138-143.	[24] 顾世梁, 惠大丰, 莫惠栋. 非线性方程最优化拟合的缩张算法[J]. 作物学报, 1998, 24(5):513-519.
[22]	李刚华, 丁艳锋, 杨文祥, 等. 江苏省主要土壤的磷肥指数及适宜磷肥用量[J]. 土壤通报, 2005, 36(6):896-898.	GU Shi-liang, HUI Da-feng, MO Hui-dong. The optimal fitting of the nonlinear equation with contraction-expansion algorithm[J]. <i>Acta Agro Sin</i> , 1998, 24(5):513-519.
	LI Gang-hua, DING Yan-feng, YANG Wen-xiang, et al. P fertilizer index and optimal P fertilizer application rate for different soil types in jiangsu province[J]. <i>Chinese Journal of Soil Science</i> , 2005, 36(6):896-898.	[25] 严定春, 朱 艳, 曹卫星. 水稻磷钾肥运筹的知识模型研究[J]. 中国水稻科学, 2004, 18(4):339-345.
[23]	孙成明, 庄恒扬, 杨连新, 等. FACE 水稻干物质积累与分配模型[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10):1894-1898.	YAN Ding-chun, ZHU Yan, CAO Wei-xing. A knowledge model for design of suitable phosphorus and potassium fertilization in Rice[J]. <i>Chinese J Rice Sci</i> , 2004, 18(4): 339-345.