

开放式空气二氧化碳浓度增高(FACE)条件下水稻的根系活力和氮同化能力*

庞 静^{1,2,*} 朱建国¹ 谢祖彬¹ 刘 钢¹ 陈改苹¹ 张雅丽¹

(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, 南京 210008;

² 湖北大学资源与环境学院, 武汉 430062)

【摘要】 利用 FACE(Free Air Carbon dioxide Enrichment) 平台技术, 用伤流量法研究了低氮(LN 150 kg·hm⁻²)和常氮(NN 250 kg·hm⁻²)水平下, 大气 CO₂ 浓度升高对水稻分蘖、抽穗期和穗后 35 d 根系活力和根系 N 同化能力(氨基酸合成能力)的影响。结果表明, 就整株水稻来看, CO₂ 浓度升高和 N 处理对根系活力无显著影响; 但由于 FACE 条件下水稻分蘖数增加 14.5%(LN)和 20.7%(NN), 使每茎根系活力(伤流强度)降低 1.4%~21.7%。在分蘖和抽穗期, 虽然 FACE 处理促进了根系吸收的无机 N 向氨基酸转化, 根系伤流液中氨基酸氮/无机氮提高 11.1%~143.1%, 但氨基酸浓度和合成总量和对照相比无明显差异。在穗后 35 d, FACE 处理减弱了水稻根系的 N 同化能力, 表现为根系伤流液中氨基酸/无机氮降低 38.1%(LN)和 29.2%(NN); 同时氨基酸浓度降低 34.0%(LN)和 44.7%(NN), 氨基酸合成总量降低 50.8%(LN)和 40.0%(NN)。提高施氮水平促进了抽穗期水稻根系对无机氮的吸收, 伤流液中无机氮含量增加 51.1%(对照)和 155.2%(FACE), 但并未增加氨基酸合成量, 由此导致抽穗期氨基酸氮/无机氮显著降低 19.5%(对照)和 36.8%(FACE); 同时, 氮处理在这个时期与 FACE 处理表现出明显的交互作用。

关键词 FACE CO₂ 浓度升高 水稻 根系伤流液 根系活力 氨基酸合成
文章编号 1001- 9332(2005)08- 1482- 05 中图分类号 X173 文献标识码 A

Root activity and nitrogen assimilation of rice (*Oryza sativa*) under Free Air CO₂ Enrichment. PANG Jing^{1,2}, ZHU Jianguo¹, XIE Zubin¹, LIU Gang¹, CHEN Gaiping¹, ZHANG Yali¹ (¹State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; ²Faculty of Resource and Environment, Hubei University, Wuhan 430062, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(8): 1482~ 1496.

With Free Air CO₂ Enrichment (FACE) technique, this paper studied the root activity and amino acid(aa) synthesis of rice (*Oryza sativa*) at low N(LN, 150 kgN·hm⁻²) and normal N (NN, 250 kgN·hm⁻²) under ambient air and elevated atmospheric CO₂(Ambient + 200 μmol·mol⁻¹). Under elevated CO₂, the xylem exudates per hill changed little, while the xylem exudates per stem declined by 1.4%~21.7% as the result of greater tiller numbers. At tillering and heading stages, elevated CO₂ increased aa N/inorganic N in xylem exudates by 11.1%~143.1%, but did not affect the aa concentration in xylem exudates and the total amount of aa in roots significantly. However, at 35 days after heading, the aa N/inorganic N ratio decreased by 38.1% (LN) and 29.2% (NN) under elevated CO₂. FACE also declined the aa concentration in xylem exudates by 34.0% (LN) and 44.7% (NN), and the total amount of aa by 50.8% (LN) and 40.0% (NN), which meant the retarded capability of aa synthesis in roots. N amendment led to a decrease of aa N/inorganic N in xylem exudates by 19.5% (Ambient) and 36.8% (FACE) at heading stage, as the result of unaffected aa and increased inorganic N concentration. There existed a significantly antagonistical CO₂ × N interaction on aa N/inorganic N at heading stage.

Key words FACE, Elevated CO₂, Rice, Xylem exudates, Root activity, Amino acid synthesis.

1 引 言

由于人为活动的影响, 在相当长的一段时间内, 大气 CO₂ 浓度持续升高不可避免, 预计到 21 世纪末将由当前的 370 μmol·mol⁻¹ 上升到 700 μmol·mol⁻¹ 左右^[25]. 因此, 大气 CO₂ 浓度升高对自然生态系统功能和植物生长发育及代谢过程的影响成为人们的研究热点. 过去人们关于 CO₂ 浓度升高对植物根系影响的研究主要集中于对根系生

长^[5, 6, 17, 19, 28]、形态^[11, 16] 和空间分布^[15, 19, 26] 等根系形态特征的描述. 根系能提供某些特种氨基酸, 以补充地上部器官尤其是叶片在合成蛋白质过程中的原料不足; 换言之, 作为植物吸收水分、营养物质及固定植株的器官, 根系同时也是氨基酸、植物激素等物

* 国家自然科学基金项目 (NSFG 40271061, NSFG 40120140817)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 (kzcx2 408) 和国家重点基础研究发展规划资助项目 (2002CB412502, 2002CB714003).
** 通讯联系人. E-mail: pangjing2286@sina.com
2004- 10- 02 收稿, 2005- 02- 21 接受.

质合成的重要器官. 截至目前, 关于植物根系生理活性和代谢过程对高 CO₂ 浓度响应的研究鲜见报道.

水稻(*Oryza sativa*)是我国的主要粮食作物, 研究 FACE 对水稻根系 N 同化能力的影响, 不仅有助于深入认识 CO₂ 浓度升高对水稻 N 代谢的影响机理, 还可为未来大气 CO₂ 浓度条件下水稻生产中 N 肥的合理施用提供理论依据. 本试验采用 FACE(开放式空气 CO₂ 浓度升高)平台技术研究了 CO₂ 浓度升高对两个施 N 水平下水稻根系活力和 N 同化能力的影响. 根系活力的测定方法很多, 如 TTC 还原法、吸附甲烯蓝法、 α -萘胺氧化法和伤流量法等^[3], 因为根系伤流量同时还是研究根系的物质合成和运输形式等生理活性的很好材料, 故本文采用伤流量法测定水稻的根系活力.

2 研究地区与研究方法

2.1 自然概况

稻麦轮作 FACE 系统平台位于江苏省无锡安镇年余农场(31° 37' N, 120° 28' E). 年降雨量 1 100~ 1 200 mm, 年平均温度约 16 °C, 水稻生长季日平均温度 29 °C, 年无霜期大于 230 d, 年辐射为 4 500 MJ·m⁻². 土壤类型为黄泥土, 其基本理化性状为: 砂粒(1~ 0.05 mm) 9.2%, 粉砂粒(0.05~ 0.001 mm) 65.7%, 粘粒(< 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. 平台共有 3 个 FACE 圈和 5 个对照圈, 间隔大于 90 m, 电脑控制 FACE 圈内 CO₂ 浓度, 使其全生育期平均 CO₂ 浓度保持在比正常大气 CO₂ 浓度高 200 μ mol·mol⁻¹, 控制误差为 10%.

2.2 试验设计

供试水稻品种为高产粳稻新品系 99 15. 试验采用裂区设计, CO₂ 浓度为主处理, N 处理为副处理. 设 2 个 CO₂ 水平, 分别为 FACE(Ambient+ 200 μ mol·mol⁻¹) 和 Ambient(对照). 在每个圈内设 LN(低 N) 和 NN(常 N) 2 个 N 水平, 低 N 施肥 150 kg·hm⁻², 常 N 施肥 250 kg·hm⁻². 对照每处理 5 次重复, FACE 每处理 3 次重复. 水稻栽种密度为 24 穴·m⁻², 每穴栽秧苗 3 株.

2.3 样品收集和测定

每穴伤流量: 于分蘖期、抽穗期和穗后 35 d, 选取长势一致的稻株 6 穴, 按照林文等^[13]的方法收集伤流量. 于 18: 00 在离地面 10 cm 处剪去地上部, 于切口处覆以已称重的脱脂棉, 外用双层保鲜膜扎紧, 次日上午 6: 00 取回脱脂棉称重, 其增加的重量即为伤流量, 用注射器挤压此 6 个棉球获得伤流量混合液为 1 重复, - 20 °C 保存, 用于氨基酸和无机态氮的分析. 同时记录每穴相应的分蘖数并依照沈波等^[21]的方法计算伤流强度(每茎伤流量).

采用 PICO TAGTM 氨基酸柱前衍生分析方法测定氨基酸含量, 仪器为 Waters(美国) 820 色谱工作站, 色谱柱为 Pi

co Tag FAA 柱(3.9× 300 mm) 5 μ m; 510 泵; 484 紫外检测器检测, 波长 254 nm; TCM 柱温控制器控温; U6K 手动进样器进样. 测定条件为: 流动相 A: 19.0 g NAA·3H₂O, 0.5 ml 三乙胺和 200 ml EDTA 储备液(1 mg·ml⁻¹) 溶于 1000 ml 超纯水, 调 pH 至 6.4, 0.45 μ m 的滤膜过滤; 940 ml 上述滤液+ 60 ml 乙腈. 流动相 B: 600 ml 乙腈+ 400 ml 超纯水+ 200 ml EDTA 储备液. 流速: 1.0 ml·min⁻¹. 柱温: 40 °C.

氨基酸总含量为上述过程检测出的氨基酸含量之和.

采用流动分析仪(SKALAR, San Plus System, Netherlands)测定伤流液中 NH₄⁺ 和 NO₃⁻, 其总和为无机 N.

2.4 数据处理

采用 SPSS10.0 通用线性模型多因素变量(General Linear Model Multivariate full factorial)对 CO₂ 浓度和 N 处理间的主效应和交互作用进行方差分析.

3 结果与分析

3.1 对不同生育期水稻根系伤流量和根系的氨基酸合成总量的影响

从图 1 可以看出, 水稻根系伤流量由分蘖期到抽穗期呈增加趋势, 随后较迅速地下降, 到穗后 35 d 只有抽穗期伤流量的 47.5%~ 50.4%. FACE 和 N 处理对其影响均不显著, 且 FACE 处理与 N 处理也未表现出明显的交互作用.

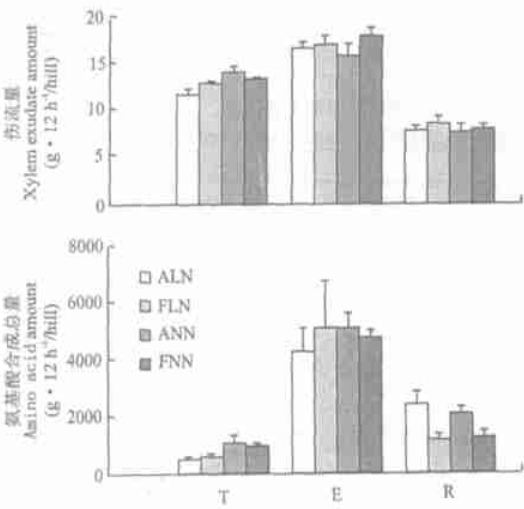


图 1 水稻根系在分蘖期、抽穗期和穗后 35 d 的伤流量和氨基酸合成总量

Fig 1 Xylem exudate amount per hill and synthesizing rate of amino acid in roots at tillering stage, heading stage and 35 days after heading. 图中数值为平均值, se 用竖棒表示 Each value in this figure was the mean with se expressed as bar (nA = 5, nF = 3). T: 分蘖期 Tillering stage; E: 抽穗期 Earing stage; R: 穗后 35 d 35 d after earing. ALN: 对照+ 低 N Ambient+ low nitrogen; FLN: FACE+ 低 N FACE+ low nitrogen; ANN: 对照+ 常 N Ambient+ normal nitrogen; FNN: FACE+ 常 N FACE+ normal nitrogen.

在分蘖期和抽穗期, FACE 处理对水稻根系氨基酸合成总量的作用不明显, 在穗后 35 d 则使其显

著降低, 降幅达 50.8% (LN) 和 40.0% (NN) ($P=0.01$). N 处理只在分蘖期显著增加了水稻根系氨基酸合成总量($P=0.03$), FACE 处理和 N 处理未对根系氨基酸合成总量表现出显著交互作用.

3.2 对水稻根系伤流强度的影响

从表 1 可以看出, 和伤流量相似, 从分蘖期到抽穗期, 伤流强度增高, 抽穗期后下降较为迅速, 在穗后 35 d, 所有处理植株的根系伤流强度仅为抽穗期的 49.3%~53.6%. 和 Ambient 相比, FACE 处理降低了水稻的根系伤流强度. 在分蘖期, FACE 处理使 LN 和 NN 水平植株的根系伤流强度分别下降 6.0% 和 21.7% ($P=0.03$); 在抽穗期和穗后 35 d, 降幅分别为 9.9% 和 8.1% (LN), 1.4% 和 7.7% (NN), 但均未达统计显著水平. N 对水稻根系伤流强度的影响不明显, FACE 处理和 N 处理也未对其

表 1 FACE 对水稻根系伤流强度的影响
Table 1 Effect of FACE on xylem exudate amount ($\text{g stem}^{-1} \cdot 12 \text{ h}^{-1}$)

处理 Treatments	分蘖期 Tillering stage		抽穗期 Heading stage		穗后 35 d 35 days after heading
	A	F	A	F	
LN	1.16±0.06	1.09±0.03	1.51±0.05	1.36±0.06	0.70±0.04
NN	1.29±0.08	1.01±0.02	1.36±0.09	1.25±0.07	0.65±0.06
N	ns	ns	ns	ns	ns
CO ₂	< 0.05	ns	ns	ns	ns
N×CO ₂	ns	ns	ns	ns	ns

LN: 低氮 Low nitrogen; NN: 常氮 Normal nitrogen. A: 对照 Ambient; F: CO₂ 浓度升高 FACE. ns: 不显著 No significant. 下同 The same below.

表 2 伤流液中氨基酸和无机 N 的浓度
Table 2 Concentration of amino acid, inorganic N in xylem exudates ($\mu\text{g g}^{-1}$)

处理 Treatments	分蘖期 Tillering stage			抽穗期 Heading stage			穗后 35 d 35days after heading		
	氨基酸 N AA-N	无机 N Inorganic N	氨基酸 N/无机 N AA-N/inorganic N	氨基酸 N AA-N	无机 N Inorganic N	氨基酸 N/无机 N AA-N/inorganic N	氨基酸 N AA-N	无机 N Inorganic N	氨基酸 N/无机 N AA-N/inorganic N
LN	0.73±0.09	3.43±0.62	0.22±0.02	6.52±1.26	5.19±0.34	1.23±0.22	5.31±0.66	7.80±1.10	0.71±0.08
F	0.77±0.08	2.90±0.54	0.30±0.08	8.62±1.89	2.86±0.16	2.99±0.58	3.03±0.38	9.14±2.22	0.39±0.13
NN	1.20±0.25	5.08±0.87	0.23±0.01	7.50±0.49	7.84±0.82	0.99±0.11	6.65±0.70	16.31±3.65	0.48±0.10
F	1.20±0.12	3.60±0.65	0.35±0.05	7.59±0.40	7.30±1.11	1.10±0.19	3.68±0.66	11.92±3.50	0.34±0.05
N	< 0.05	ns	ns	ns	< 0.001	< 0.01	ns	ns	ns
CO ₂	ns	ns	< 0.05	ns	ns	< 0.01	< 0.01	ns	< 0.05
N×CO ₂	ns	ns	ns	ns	ns	< 0.05	ns	ns	ns

4 讨 论

根系活力作为重要的根系生理特征, 其强弱直接影响水稻植株对营养物质的吸收进而影响地上部的生长发育^[12, 20], 根系伤流量和伤流强度(每茎伤流量)都是能很好反映根系活力的指标^[3, 21]. 研究表明, FACE 处理对水稻整株根系活力无显著影响, 但 FACE 条件下每个分蘖根系活力呈降低趋势, 尤其是在分蘖期表现显著, 这是 FACE 条件下水稻分蘖数显著增加 14.5% (LN) 和 20.7% (NN)

表现出显著的交互作用.
3.3 对水稻根系伤流液中氨基酸 N、无机 N 浓度及其比值的影响

从表 2 可以看出, 分蘖期和抽穗期 FACE 处理对伤流液中氨基酸浓度影响不显著, 但在穗后 35 d, FACE 处理植株根系伤流液中氨基酸浓度极显著降低, 降幅达 34.0% (LN) 和 44.7% (NN). 提高施 N 水平可显著增加分蘖期和穗后 35 d 伤流液中的氨基酸浓度, 但在抽穗期作用不明显.

伤流液中的无机 N 浓度在两个 CO₂ 浓度水平下无明显差异. 抽穗期提高供 N 水平使伤流液中无机 N 浓度增加 51.1% (Ambient) 和 155.2% (FACE).

由分蘖到抽穗期, FACE 处理显著提高了 LN 和 NN 处理水稻根系伤流液中氨基酸 N/无机 N, 增幅达 11.1%~143.1%; 在穗后 35 d, 却又使之降低 38.1% (LN) 和 29.2% (NN). 提高供 N 水平使抽穗期伤流液中的氨基酸 N/无机 N 降低 19.5% (Ambient) 和 36.8% (FACE). 结合上文结果推测, 这是因为水稻根系活力在抽穗期最强, 提高供 N 水平使无机 N 吸收量大大增加, 而根系的氨基酸合成能力并未同幅度增加所致. FACE 和 N 处理对伤流液中氨基酸 N 和无机 N 浓度未表现出显著的交互作用, 只在抽穗期对伤流液中氨基酸态 N 与无机 N 的比值表现出显著的拮抗作用.

($P<0.001$) 的结果.

根系伤流液中氨基酸 N/无机 N 的变化可以认为是根内无机 N 吸收、同化(与碳同化产物供应有关)及地上与地下氮循环共同作用的结果, 供 N 水平低时, 植物把更多的光合产物分配到根部, 提高根部 NRA(硝酸还原酶活性), 促进 NO₃⁻-N 向氨基酸转化, 也提高了根冠比, 增加根部的长度和密度以适应氮缺乏环境^[4]. Barthes 等^[1]也发现 N 利用特性不同的小麦木质部伤流液中的氨基酸 N 和 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 间及地下部 NRA 的差异, 认为此特性与

品种间的 N 利用差异有直接关系. 因而, 该比值大小可以直接反映植株对 N 的利用能力. 本研究发现, FACE 处理显著提高了从分蘖期到抽穗期水稻根系伤流液中氨基酸 N/ 无机 N, 表明该时期 FACE 处理对根系中无机 N 向氨基酸的转化有明显的促进作用. 其原因可能是 CO₂ 浓度升高条件下植物体内碳同化产物含量增加^[8, 10, 16, 22]所致: 一方面根系中用以合成氨基酸的碳骨架增多; 另一方面碳同化产物增多也意味着糖酵解底物的增多, 而根组织中还原 NO₃-N 需要糖酵解产生的还原吡啶核苷酸, 对 N 的同化则需要消耗呼吸作用产生的能量^[2]. 提高供 N 水平可显著降低抽穗期根系伤流液中氨基酸 N/ 无机 N, 而且和 FACE 处理表现出显著的交互作用. 更有趣的是, 我们还观察到 FACE 处理水稻也表现出类似植物为适应 N 缺乏环境而增加根冠比、地下部分生物量增大的现象^[28]. 因此, 我们推测在生育中期 FACE 条件下水稻根系伤流液中氨基酸 N/ 无机 N 的改变还与土壤有效 N 的供应水平有关, 是 FACE 和供 N 水平交互作用的结果. 到目前为止, CO₂ 浓度升高对土壤 N 有效性的影响仍无定论. 许多研究表明, CO₂ 浓度升高条件下进入土壤的可溶态 C 增多^[24, 29], 使土壤微生物的数量和活性提高^[14, 23], 可能加速土壤有机物分解和 N 矿化而利于植物吸收 N^[24, 29], 也可能导致土壤有效 N 固定的加强, 与植物产生对有效 N 的竞争^[7, 18, 27]. 因此, 对 CO₂ 浓度升高条件下水稻 C 代谢以及土壤有效 N 的供应状况作进一步研究将有助于探明 FACE 处理促进水稻生育前期和中期根系中 N 向氨基酸转化的真正原因.

此外, 本研究还发现, 在生育前、中期 FACE 处理对水稻氨基酸合成总量无显著影响; 但在穗后 35 d, 使水稻根系的氨基酸合成能力极显著降低, 伤流液中氨基酸浓度和总合成量都极显著低于对照处理, 其原因可能与 FACE 条件下水稻的早衰有关. 本试验 FACE 处理水稻全生育期的天数分别为 152 d(LN) 和 156 d(NN), 比对照植株分别缩短 6 d 和 5 d($P < 0.05$). 黄建晔等^[9]也报道过类似结果. 但仅早衰现象又无法解释同一时期水稻的根系活力(无论用伤流强度还是用伤流量表示)并未因 FACE 处理而降低, 预示着还可能其它生理过程对根系氨基酸合成进行调节, 值得进一步探讨.

参考文献

1 Barthes L, Deleens E, Bousser A, *et al.* 1996. Nitrate use and xylem

exudation in detopped wheat seedlings: An early diagnosis for predicting varietal differences in nitrogen utilization? *Aust J Plant Physiol*, **23**: 33~ 44

- 2 Beevers L. 1975. Trans. Xue Y-L(薛应龙), *et al.* 1981. Nitrogen Metabolism in Plants. Beijing: Science Press. 22~ 30(in Chinese)
- 3 Cao S-Q(曹树青), Deng Z-R(邓志瑞), Zhai H-Q(翟虎渠), *et al.* 2002. Analysis on heterosis and combining ability for root activity and its declined properties in Indica hybrid rice. *Chin J Rice Sci*(中国水稻科学), **16**(1): 19~ 23(in Chinese)
- 4 Chen F-J(陈范骏), Mi G-H(米国华), Liu J-A(刘建安), *et al.* 1999. Genotypic difference of nitrogen form in xylem sap of maize inbred seedlings and its relation to nitrogen efficiency. *Sci Agric Sin*(中国农业科学), **32**(5): 43~ 48(in Chinese)
- 5 Curtis PS, Ó neil EG, Teeri JA, *et al.* 1994. Below ground responses to rising atmospheric CO₂: Implications for plants, soil biota and ecosystem processes. *Plant Soil*, **165**: 1~ 6
- 6 Curtis PS, Zak DR, Pregitzer KS, *et al.* 1994. Above and below-ground responses of *Populus grandidentata* to elevated atmospheric CO₂ and soil N availability. *Plant Soil*, **165**: 45~ 51
- 7 Diaz S, Grime JP, Harris J, *et al.* 1993. Evidence of a feedback mechanism limiting plant response to elevated carbon dioxide. *Nature*, **364**: 616~ 617
- 8 Frederiksen HB, Rønn R, Christensen S. 2001. Effect of elevated atmospheric CO₂ and vegetation type on microbiota associated with decomposing straw. *Global Change Biol*, **7**: 313~ 321
- 9 Huang J-Y(黄建晔), Yang H-J(杨洪建), Dong G-C(董桂春), *et al.* 2002. Effect of free air CO₂ enrichment (FACE) on spikelets differentiation and retrogression in rice(*Oryza sativa*). *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **13**(10): 1210~ 1214(in Chinese)
- 10 Kimball BA, Zhu J-G(朱建国), Cheng L(程 磊), *et al.* 2002. Responses of agricultural crops to free air CO₂ enrichment. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **13**(10): 1240~ 1244(in Chinese)
- 11 Larigauderie A, Reynolds JF, Strain BR. 1994. Root response to CO₂ enrichment and nitrogen supply in loblolly pine. *Plant Soil*, **165**: 21~ 32
- 12 Liang J-S(梁建生), Cao X-Z(曹显祖). 1993. Studies on the relationship between several physiological characteristics of leaf and bleeding rate of roots in hybrid rice. *J Jiangsu Agric Coll*(江苏农学院学报), **14**(4): 25~ 30(in Chinese)
- 13 Lin W(林 文), Zheng J-S(郑景生), Jiang Z-W(姜照伟), *et al.* 1997. Methods of studying root system of rice. *Fujian Sci Technol Rice Wheat*(福建稻麦科技), **15**(4): 18~ 27(in Chinese)
- 14 Montealegre CM, Kessel CV, Russelle MP, *et al.* 2002. Changes in microbial activity and composition in a pasture ecosystem exposed to elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant Soil*, **243**: 197~ 207
- 15 Prior SA, Rogers HH, Runion GB, *et al.* 1994. Free air CO₂ enrichment of cotton: Vertical and lateral root distribution patterns. *Plant Soil*, **165**: 33~ 44
- 16 Prior SA, Rogers HH, Runion GB, *et al.* 1995. Free Air carbon enrichment of cotton: Root morphological characteristics. *J Environ Qual*, **24**: 678~ 683
- 17 Pritchard SG, Rogers HH, Prior SA, *et al.* 1999. Elevated CO₂ and plant structure: A review. *Global Change Biol*, **5**: 807~ 837
- 18 Rice CW, Garcia FO, Hampton CO, *et al.* 1994. Soil microbial response in tallgrass prairie to elevated CO₂. *Plant Soil*, **165**: 67~ 74
- 19 Rogers HH, Peterson CM, McGrimmon JN, *et al.* 1992. Response of plant roots to elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant Cell Environ*, **15**: 749~ 752
- 20 Shen B(沈 波), Wang X(王 熏). 2000. Changes of root exudates of indica japonica hybrid rice and its relation to leaf physiological traits. *Chin J Rice Sci*(中国水稻科学), **14**(2): 122~ 124(in Chinese)
- 21 Shen B(沈 波), Wang X(王 熏). 2002. Physiological activities of root system in two inter-subspecific hybrid rice combinations. *Chin J Rice Sci*(中国水稻科学), **16**(2): 146~ 150(in Chinese)
- 22 Stitt M, Krapp A. 1999. The interaction between elevated CO₂ and N nutrition: The physiological and molecular background. *Plant Cell Environ*, **22**: 583~ 621
- 23 Tschenko D, Kandler E, Jones TH. 2001. Effect of temperature on

- below ground nitrogen dynamics in a weedy model ecosystem at ambient and elevated atmospheric CO₂ levels. *Soil Biol Biochem*, **33**: 491~ 501
- 24 Van Ginkel JH, Gorissen A, van Veen JA. 1997. Carbon and nitrogen allocation in lolium perenne in response to elevated atmospheric CO₂ with emphasis on soil carbon dynamics. *Plant Soil*, **188**: 299~ 308
- 25 Watson RT, Rodhe H, Oeschger H. 1990. Greenhouse gases and aerosols. In: Houghton JT, eds. *Climate: the IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press. 1~ 40
- 26 Wechsung G, Wechsung F, Wall GW, *et al.* 1999. The effects of free air CO₂ enrichment and soil water availability on spatial and seasonal patterns of wheat root growth. *Glob Change Biol*, **5**: 519~ 529
- 27 Williams MA, Rice CW, Owensby CE. 2001. Nitrogen competition in a tallgrass prairie ecosystem exposed to elevated carbon dioxide.

Soil Sci Soc Am J, **65**: 340~ 346

- 28 Xie Z-B(谢祖彬), Zhu J-G(朱建国), Zhang Y-L(张雅丽), *et al.* 2002. Responses of rice(*Oryza sativa*) growth and its C, N and P composition to FACE(Free air carbon dioxide enrichment), N and P fertilization. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **13**(10): 1223~ 1230(in Chinese)
- 29 Zak DR, Pregitzer KS, Curtis PS, *et al.* 1993. Elevated atmospheric CO₂ and feedback between C and N cycles. *Plant Soil*, **151**: 105~ 117

作者简介 庞 静,女,1973年生,博士研究生.主要从事土壤环境生物化学研究,发表论文13篇. Tel: 025-86881137; E-mail: pangjing2286@sina.com

2006《南京林业大学学报(自然科学版)》

CN32-1161/S ISSN1000-2006 国内外公开发行人 邮发代号:28-16

《南京林业大学学报(自然科学版)》由南京林业大学主办,创刊于1958年,是以林业为主的综合类学术期刊.本刊坚持的一贯宗旨是鼓励学术创新,推动科技成果转化,促进学术交流和发

展,培养、扶持学术人才.主要内容 生物学、森林地学、林学基础理论、森林培育与经营管理、森林资源与环境、森林与自然保护、水土保持与荒漠化防治、木材工业与技术科学、林业机械与电子工程、林产化学与工业、园林植物与风景园林、林业经济与管理、森林工程、土木工程等以及有关边缘学科的研究成果.另设置专栏集中报道重点项目、基金项目及重大课题的研究成果.

刊物地位 国家科技部中国科技论文统计源期刊;中国科学引文数据库来源期刊;中国学术期刊综合评价数据库来源期刊;中国自然科学核心期刊;《中国学术期刊(光盘版)》首批入编期刊、万方数据(China info)系统入编科技期刊群.被国际国内著名检索刊物如《CA》、《FA》、《FPA》、《国际农业与生物科学研究中心(网络版)》、《剑桥文摘》、《中国林业文摘》、《中国生物学文摘》、《竹类文摘》等数据库收录.

1992年以来,《南京林业大学学报(自然科学版)》先后获得全国优秀科技期刊三等奖、全国高校优秀学术期刊一等奖、江苏省优秀自然科学学报一等奖等多项荣誉,2001年入选“中国期刊方阵”,2002年入选“江苏期刊方阵”,并获优秀期刊称号,2004年再次荣获全国高校优秀科技期刊一等奖,江苏省第二届期刊方阵优秀期刊奖等荣誉.

读者范围 大中专院校师生,科研院所研究人员.

本刊为双月刊,单月末出版.大16开本,每期定价10元,全年60元.

全国各地邮局(所)均可订阅,邮发代号:28-16;国外发行:中国国际图书贸易总公司(北京399信箱),发行代号:Q552.

也可通过全国非邮发中心联合征订服务部办理订阅手续:天津市大寺泉集北里别墅17号,邮编:300385

编辑部联系电话:025-85428247 E-mail: xuebao@njfu.edu.cn