

# 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高和氮肥施用对小麦生长期间土壤溶液阴离子含量的影响<sup>①</sup>

程 磊<sup>1</sup> 朱建国<sup>1\*</sup> 陈改苹<sup>1</sup> 周 森<sup>2</sup> 曾 青<sup>1</sup> 谢祖彬<sup>1</sup> 庞 静<sup>1</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008; 2 南京理工大学 南京 210094)

**摘 要** 在中国稻/麦轮作 FACE (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment) 平台上, 采用根际土壤溶液取样器来研究大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高和不同 N 肥水平对小麦生长期间土壤溶液离子组成的影响。结果表明, 高 CO<sub>2</sub> 浓度条件对土壤溶液 pH 值无显著影响, 但却普遍降低土壤溶液中 Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 3 种主要阴离子含量; 相对于 N 150 kg/hm<sup>2</sup> 施 N 水平, N 250 kg/hm<sup>2</sup> 施用量显著降低土壤溶液中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量, 同时也明显降低 Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量。

**关键词** CO<sub>2</sub> 浓度升高; 氮肥; 阴离子; 土壤溶液; 小麦

**中图分类号** S153.5

由于化石燃料燃烧以及土地利用方式的改变, 自工业革命以来大气 CO<sub>2</sub> 浓度迅速增加, 预计在本世纪末达到 550~970 μmol/mol<sup>[1,2]</sup>。全球 CO<sub>2</sub> 浓度持续升高将可能导致全球气候变暖, 并对植物和生态系统的功能和结构产生深刻影响<sup>[3]</sup>。由于农业生产的重要性, 农作物对 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应成为全球变化研究热点<sup>[4]</sup>。高 CO<sub>2</sub> 浓度常常会增加 C<sub>3</sub> 作物 (如水稻和小麦) 的光合速率, 导致作物生长速率加快, 作物生物量积累明显增加<sup>[3]</sup>。众所周知, 作物生长若没有地下养分资源支撑是难以维持的, 而高 CO<sub>2</sub> 条件所引起的作物生物量的累积效应可能会增加作物对地下养分的需求<sup>[5]</sup>。作物主要通过根系从土壤或介质中获得养分, 土壤溶液中养分含量与植物生长具有很好的相关性, 因此开展大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下土壤溶液养分组成的相关研究对全面正确地阐明农业生态系统对高 CO<sub>2</sub> 浓度的响应是不可或缺的。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究地区概况

稻/麦轮作 FACE 系统平台位于江苏省无锡市安镇镇年余农场 (31°37'N, 120°28'E), 关于系统的软件和硬件设施等, 韩勇和刘刚等<sup>[6,7]</sup>分别对其进行了详细阐述。供试土壤为太湖地区典型水耕人为土

(俗称黄泥土), 水稻-冬小麦轮作是太湖地区主要耕作方式<sup>[8]</sup>, 土壤有关基本物理性质为: 砂粒(1~0.05 mm) 92 g/kg, 粉砂粒(0.05~0.001 mm) 657.0 g/kg, 粘粒(<0.001 mm) 251.0 g/kg, 容重 1.2 g/cm<sup>3</sup>。FACE 系统开始运行前土壤其他基本性质详见表 1, 其测定按常规方法进行<sup>[9]</sup>。试验区年降水量 1100~1200 mm, 年平均温度约 16℃, 年日照时间>2000 h, 年无霜天数>230 天。FACE 平台共有 3 个高 CO<sub>2</sub> 浓度实验圈和 5 个对照圈。FACE 圈设计为正八角形, 直径为 12.5 m, 通过 FACE 圈周围的管道向圈中心喷射纯 CO<sub>2</sub> 气体, 电脑控制圈内 CO<sub>2</sub> 浓度, FACE 圈内 1 年 365 天每天 24 h 不间断加入 CO<sub>2</sub> 气体。对照田块没有安装 FACE 管道。除 FACE 圈增加的管道外, FACE 圈和对照圈, 其环境条件与自然状态完全一致。

### 1.2 大田试验设计

试验采用裂区设计, CO<sub>2</sub> 浓度为主处理, N 肥为副处理。FACE 圈 (高 CO<sub>2</sub> 圈) 比对照大气升高 CO<sub>2</sub> 200 μmol/mol, FACE 圈和 Ambient 圈 (对照圈) 内设两个 N 水平: 常规 N (N, 250 kg/hm<sup>2</sup>, 用 NN 表示), 低 N (N, 150 kg/hm<sup>2</sup>, 用 LN 表示)。供试作物: 冬小麦 (*Triticum aestivum* L. cv. Ningmai-9), 2002 年 11 月 15 日播种。施肥日期: 11 月 13 日 (基肥), 12 月 4 日 (苗肥), 2003 年 3 月 3 日 (拔节肥), 4

①国家自然科学基金项目 (NSFC-40271061)、国家自然科学基金重大国际合作研究项目 (NSFC-40120140817)、中国科学院知识创新重要方向项目 (KZCX2-408) 共同资助。

\*通讯作者 (jgzhu@mail.issas.ac.cn)

表 1 试验区域土壤基本性质

Table 1 Chemical properties of soils in FACE and Ambient plots

| 处理     | 全 N    | 全 P    | 全 K    | 有机质    | 有效 P    | 有效 K    | pH   |
|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|------|
|        | (g/kg) | (g/kg) | (g/kg) | (g/kg) | (mg/kg) | (mg/kg) |      |
| FACE 圈 | 1.57   | 0.51   | 13.1   | 25.2   | 12.8    | 82      | 5.75 |
| 对照圈    | 1.51   | 0.47   | 12.9   | 24.3   | 10.5    | 80      | 5.63 |

月 5 日 (穗肥)。

### 1.3 土壤溶液采集与测定

每圈 2 个处理 (LN 和 NN), 在每个 N 处理上分别设 2 层 (离地表 5 cm 和 15 cm 处的耕层土壤处), 每层设 3 个重复。选择雨后, 将根际土壤溶液取样器 (RHIZON SMS-MOM, 荷兰 Eijkelkamp Agrisearch Equipment 公司) 埋入根部土壤, 尽可能不对土壤产生扰动, 放入 1 周后试用一下, 确保无误。采集样品时用注射器加负压保持一段时间, 第 1 次的样品不要<sup>[10]</sup>。分别在拔节期 (3 月 5 日), 倒 2 叶龄期 (4 月 3 日), 抽穗期 (5 月 1 日) 采集 3 次土壤溶液样品。土壤溶液 pH 值用 pH 计 (REX PHS J-4) 直接在田间测定刚采集的土壤溶液。土壤溶液阴离子用 DIONEX 500 型离子色谱测定。

### 1.4 数据处理

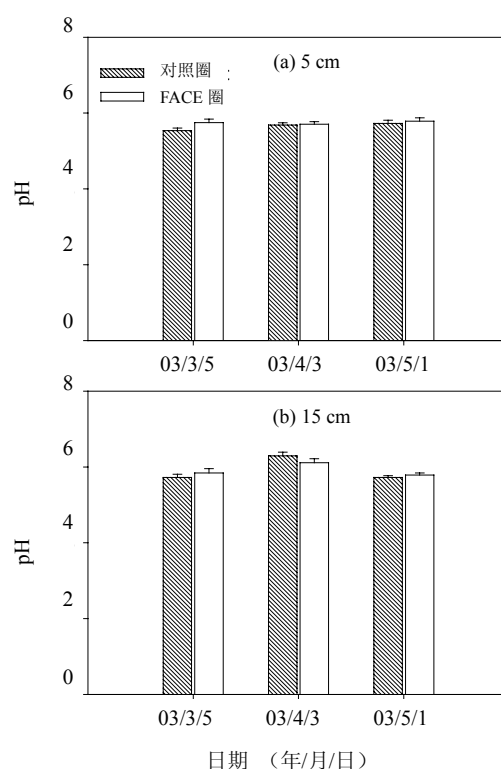
采用 SPSS10.0 统计分析软件进行差异显著性分析 (ANOVA),  $P \leq 0.05$  为显著水平。

## 2 结果与讨论

### 2.1 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对土壤溶液 pH 值的影响

在小麦生长前期, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦根部土壤溶液 pH 无显著影响 (图 1); 但到生长中期 FACE 处理的结果稍有降低, 在抽穗期相对于 FACE 运行前的土壤 pH 值 (表 1) 仍略有降低, 结果统计则不显著。土壤溶液 pH 是与土壤溶液中 CO<sub>2</sub> 分压密切相关的<sup>[13]</sup>, 而在小麦生长旺季的 4 月份, FACE 显著增加了土壤 CO<sub>2</sub> 分压<sup>[14]</sup>; 此外根系分泌物的可能增加也会导致土壤 pH 值发生改变<sup>[4]</sup>。Luxmoore 等<sup>[11]</sup>报道, 高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下 Virginia 松树根部土壤 pH 值有降低趋势; 也有报道表明在 FACE 条件下土壤 CO<sub>2</sub> 分压增加可能导致森林土壤酸化速率加快, 从而降低土壤 pH 值<sup>[12]</sup>。尽管没有观察到 FACE 条件下土壤 pH 值的显著变化, 但长期实验结果 (未发表数据) 表明 FACE 有降低土壤 pH 的趋势。

### 2.2 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对土壤溶液中阴离子含量的影响



注: (a)和(b)分别表示离地表 5 cm 和 15 cm 处所取土壤溶液; 误差线代表标准误差 SE; 下同。

图 1 CO<sub>2</sub> 处理对土壤溶液 pH 值的影响

Fig. 1 Effect of FACE on soil solution pH

由图 2 可知, FACE 处理有降低土壤溶液中 Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量的趋势, 随着土壤耕层深度增加, 这种效应越明显。

在耕作层底部, FACE 处理土壤溶液中 Cl<sup>-</sup> 含量在拔节期、倒 2 叶龄期和抽穗期分别比对照降低 26 %、29 % 和 14 %, 但由于变异性较大, 统计结果不显著。耕作底层 Cl<sup>-</sup> 含量显著高于上部, 并且对照圈的增加幅度高于 FACE 圈 (表 2)。Williams 等<sup>[15]</sup>最近也观察到高 CO<sub>2</sub> 条件下土壤溶液中 Cl<sup>-</sup> 含量降低的现象。Andrews 和 Schlesinger<sup>[12]</sup>在 Duke 森林土壤各层土壤溶液中也未观测到 FACE 条件对土壤溶液中 Cl<sup>-</sup> 的显著影响。这表明, 一方面, 在 FACE 条件下小麦对水分的利用可能会发生改变; 另一方面,

表 2 不同耕作层土壤溶液阴离子含量的变化趋势

Table 2 Change in anion concentrations with soil depth

| 采样日期<br>(年/月/日) | Cl <sup>-</sup> (%) |        | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (%) |        | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (%) |        |
|-----------------|---------------------|--------|----------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|
|                 | 对照圈                 | FACE 圈 | 对照圈                              | FACE 圈 | 对照圈                               | FACE 圈 |
| 03/3/5          | 232                 | 214    | 38                               | 38     | 59                                | 78     |
| 03/4/3          | 252                 | 103    | 97                               | -35    | 109                               | 54     |
| 03/5/1          | 56                  | 41     | -69                              | -2     | 64                                | 52     |

注：结果为耕作底层（15 cm）土壤溶液中阴离子的平均浓度比耕作上层（5 cm）含量高出的百分比数。

水分利用的改变同时也会影响到植物根系对其他离子的吸收。

N 是植物必须的大量元素，土壤溶液中 N 受到作物吸收的强烈影响。第 1 次采样日期（拔节期）在施用拔节肥后第 3 天，图 2 表明在小麦拔节期 FACE 显著降低土壤溶液中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量，降幅在土壤耕层 5 cm 和 15 cm 处分别为 33%（ $P=0.09$ ）和 33%，这一结果与相关文献报道是一致的<sup>[15]</sup>。这表明高 CO<sub>2</sub> 浓度显著影响小麦对 N 的吸收，中国 FACE 实验的前期实验结果也证实这一结论<sup>[12]</sup>。FACE 条件下根际土壤溶液中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量的降低可能是植物根系吸收的结果。BassiriRad 等<sup>[17]</sup>对松树根系吸收动力学的试验表明，高 CO<sub>2</sub> 条件显著增加根系对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的吸收速率。

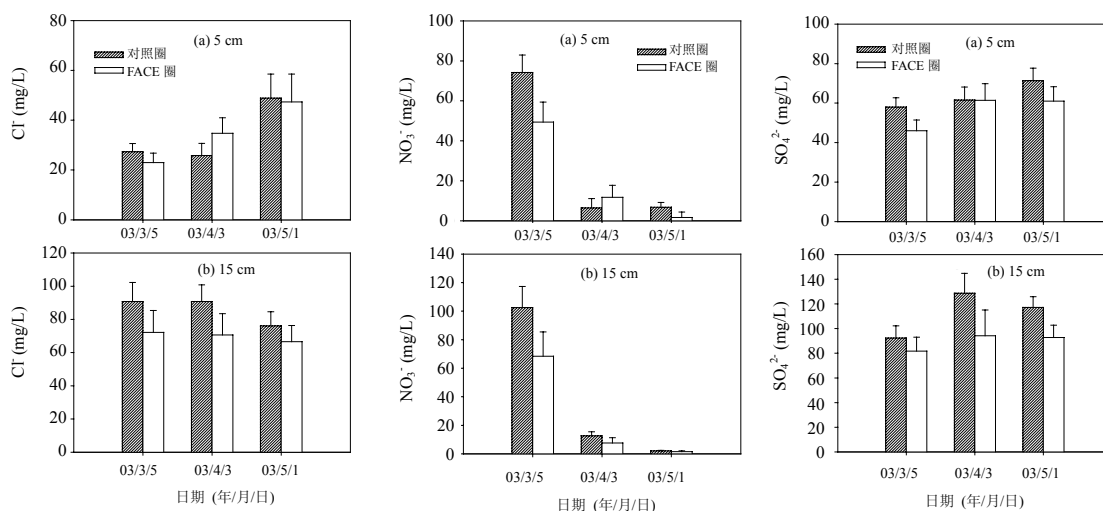
在耕作层底部，FACE 圈的土壤溶液中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量在拔节期、倒 2 叶龄期和抽穗期分别比对照降低 13%、37%和 26%（ $P=0.096$ ）。同样，耕作层底部的

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量皆明显高于上层含量，这与其他阴离子的含量变化是一致的（表 2）。由于植物合成蛋白需要大量的 S 元素，所以，在高 CO<sub>2</sub> 条件下植物生物量显著增加会导致对 S 的需求增加，从而导致对土壤养分需求增加，这是 FACE 条件下土壤溶液 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度下降的可能原因之一。

此外，相对于对照圈，FACE 圈土壤耕层底部 Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的含量比耕作上层的增加值要低（表 2），这表明在 FACE 条件下根部土壤对带负电荷的阴离子固持力增加，从而减少了由于土壤带负电性所带来的阴离子养分流失。

### 2.3 N 肥施用对土壤溶液阴离子含量的影响

不同的 N 肥处理对小麦根部土壤溶液阴离子含量的影响比 CO<sub>2</sub> 主处理的影响更为明显（图 3）。图 3 表明，常规 N 肥处理（NN）的土壤溶液中各阴离子含量皆比低 N 处理（LN）高。

图 2 高 CO<sub>2</sub> 浓度对土壤溶液阴离子含量的影响Fig. 2 Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the concentrations of anion in soil solution

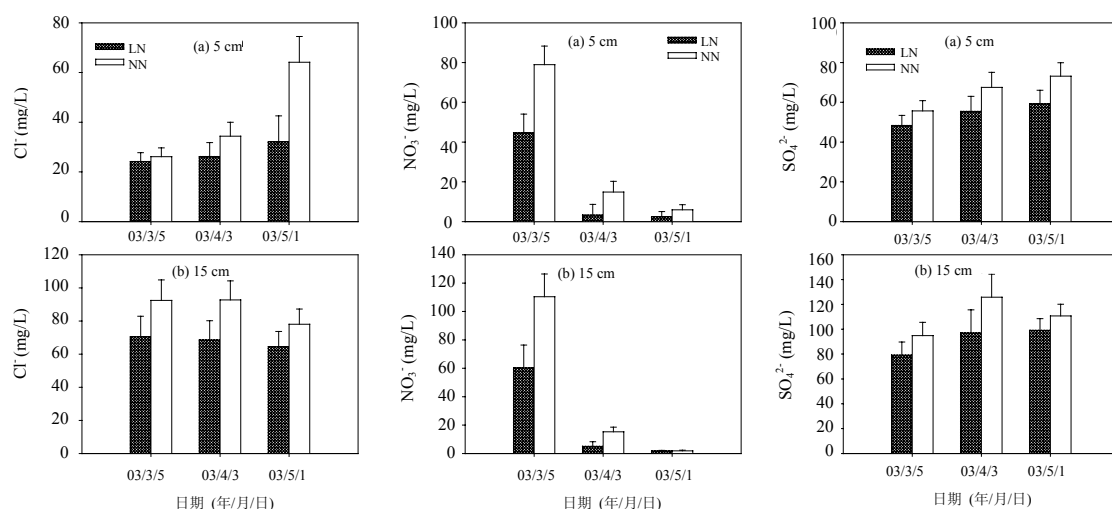


图3 不同N处理对土壤溶液阴离子含量影响

Fig. 3 Effects of nitrogen supply on concentrations of anion in soil solution

由于N肥施用量的增加, 显然NN处理土壤溶液中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>要显著高于LN处理(图3)。在小麦生长拔节期, NN处理含量在耕作层5 cm和15 cm处分别比LN处理高76%(P=0.027)和83%(P=0.048)。

同样, NN处理也明显增加了土壤溶液中Cl<sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量(图3)。Williams等<sup>[15]</sup>也报道在高N条件下2种木本植物土壤溶液中Cl<sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>比低N条件下分别高11%和62%。由于在NN条件下, 小麦地上和地下部分的生物量也要高于LN<sup>[16]</sup>, 显然小麦对其吸收量不会低于LN条件, 其具体原因有待进一步探究。

### 3 结论

(1) 大气CO<sub>2</sub>浓度升高对小麦根部土壤溶液pH值短期内无显著影响, 从而不会对由酸碱度所驱使的养分平衡产生显著改变; 大气CO<sub>2</sub>浓度升高具有降低土壤溶液中阴离子Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量的趋势, 增加了对根部土壤负离子养分的固持能力; N肥的施用增加了土壤溶液中各阴离子的含量。

(2) 土壤溶液中阴离子含量的改变表明其主要阳离子含量也可能会发生相应改变。

(3) 在稻麦轮作系统中, 在水稻生长期, 由于土壤氧化还原条件的改变可能会得出不同的结论, 比如SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>在强还原条件下易被还原。

(4) 大气CO<sub>2</sub>浓度升高对土壤过程的影响是一间接过程, 同时作物对高CO<sub>2</sub>浓度的短期与长期响

应可能有所不同, 因此需要进行长期的研究。

### 参考文献

- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, Van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA. IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge, United Kingdom and New York, USA.: Cambridge University Press, 2001
- 赵其国, 李忠. 中国热带、亚热带地区 CO<sub>2</sub> 的释放和减缓潜力. 土壤学报, 1995, 32 (增刊): 116 ~ 127
- Dahlman RC, Strain BR, Rogers HH. Research on the response of vegetation to elevated carbon dioxide. J. Environ. Qual., 1985, 14: 1 ~ 8
- Kimball BA, 朱建国, 程磊, Kobayashi K, Bindi M. 开放式系统中农作物对空气 CO<sub>2</sub> 浓度增高的响应. 应用生态学报, 2002, 13 (10): 1323 ~ 1338
- Hungate BA, Holland EA, Jackson RB, Stuart Chapin III F, Mooney HA, Field CB. The fate of carbon in grasslands under carbon dioxide enrichment. Nature, 1997, 388: 576~579
- 刘钢, 韩勇, 朱建国, 冈田益己, 吉本真由美. 稻麦轮作FACE系统平台 I. 系统结构与控制. 应用生态学报, 2002, 13 (10): 1253 ~ 1258
- 韩勇, 刘钢, 朱建国, 冈田益己, 中村浩史, 吉本真由美. 稻麦轮作FACE系统平台 II. 系统控制和数据分析软件. 应用生态学报, 2002, 13 (10): 1259 ~ 1263

- 8 Cai ZC, Xu H, Zhang HH, Jin JS. Estimate of methane emission from rice paddy fields in Taihu region, China. *Pedosphere*, 1994, 4 (4): 279 ~ 306
- 9 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- 10 吴龙华, 骆永明. 根际土壤溶液取样器—介绍一种新型原位土壤溶液采集装置. *土壤*, 1999, 31 (1): 54 ~ 56
- 11 Luxmoore RJ, O'Neill EG, Eills JM, Rogers HH. Nutrient uptake and growth responses of Virginia pine to elevated atmospheric carbon dioxide. *J. Environ. Qual.*, 1986, 15 (3): 244 ~ 251
- 12 Andrews JA, Schlesinger WH. Soil CO<sub>2</sub> dynamics, acidification, and chemical weathering in a temperate forest with experimental CO<sub>2</sub> enrichment. *Global Biogeochem. Cycles*, 2001, 15 (1): 149 ~ 162
- 13 Reuss JO, Cosby BJ, Wright RF. Chemical processes governing soil and water acidification. *Nature*, 1987, 329: 27 ~ 32
- 14 刁一伟, 郑循华, 王跃思, 徐仲均, 韩圣慧, 朱建国. 开放式空气 CO<sub>2</sub> 浓度增高条件下旱地土壤气体 CO<sub>2</sub> 浓度廓线测定. *应用生态学报*, 2002, 13 (10): 1249 ~ 1252
- 15 Williams EL, Walter LM, Ku TCW, Kling GW, Zak DR. Effects of CO<sub>2</sub> and nutrient availability on mineral weathering in controlled tree growth experiments. *Global Biogeochem. Cycles*, 2003, 17 (2): 10-1 ~ 10-11
- 16 马红亮. 开放式大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对作物生长、养分吸收和土壤养分状况的影响 (中国科学院研究生院硕士学位论文). 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2003
- 17 BassiriRad H, Prior SA, Norby RJ, Rogers HH. A field method of determining NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> uptake kinetics in intact roots: Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on trees and crop species. *Plant and Soil*, 1999, 217: 195~204

## EFFECTS OF FREE-AIR CO<sub>2</sub> ENRICHMENT AND NITROGEN SUPPLY ON THE CONCENTRATION OF ANION OF SOIL SOLUTION IN WHEAT FIELD

CHENG Lei<sup>1</sup>   ZHU Jian-guo<sup>1</sup>   CHEN Gai-ping<sup>1</sup>   ZHOU Miao<sup>2</sup>   ZENG Qing<sup>1</sup>   XIE Zu-bin<sup>1</sup>   PANG Jing<sup>1</sup>  
 ( 1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008; 2 *Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094)

**Abstract** Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and nitrogen supply on concentration of anion in soil solution were investigated in a FACE (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment) study. Soil solutions were extracted with the Rhizon SMS-MOM from a wheat field. Little effect of CO<sub>2</sub> treatment on soil solution pH was observed in all cases. Elevated CO<sub>2</sub> decreased the concentration of Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in the soil solution, but not significantly in statistics in most cases. Normal nitrogen supply not only increased the concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> significantly but also heightened the content of Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> significantly in samples regardless of gathering dates.

**Key words** Free-air CO<sub>2</sub> enrichment, Nitrogen supply, Anion, Soil solution, Wheat