

大气 CO₂ 浓度升高对作物根际土壤氮的影响

马红亮¹, 吴艳红¹, 朱建国², 徐一杰¹, 谢祖彬², 刘 钢², 杨玉盛¹

(1. 福建省亚热带资源与环境重点实验室, 湿润亚热带生态-地理过程省部共建教育部重点实验室, 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008)

摘 要 利用 FACE(Free air carbon dioxide enrichment)技术, 在两种氮肥施用(低氮 LN 和常规氮 NN)水平下, 研究 CO₂ 浓度升高对水稻和小麦收获后根际和非根际土壤硝态氮、铵态氮和有机氮的影响。结果表明, 相对于对照 CO₂ 浓度处理, 高 CO₂ 浓度处理在显著增加作物生物量的前提下, 使水稻季根际土壤硝态氮含量降低, NN 水平下降明显, 小麦季变化不大。高 CO₂ 浓度处理对作物根际的影响大于非根际。高 CO₂ 浓度对土壤铵态氮含量的影响不显著, 仅小幅度增加了水稻季和降低了小麦季土壤铵态氮含量, 且根际降低幅度大于非根际。增加氮肥施用使土壤铵态氮含量在高 CO₂ 浓度处理增加幅度低于对照。高 CO₂ 浓度处理并没有显著增加有机氮的含量, 在小麦季作物对土壤有机氮的贡献大于水稻季, 且增加氮肥施用条件下根际对有机氮的贡献较大。

关键词 CO₂ 浓度升高; 施氮水平; 根际; 矿质氮; 有机氮

中图分类号 S181 **文献标志码** A **文章编号** 1672-2043(2009)04-0849-06

Effect of Elevated Atmospheric CO₂ Concentration on Soil Nitrogen Around Roots of Crops

MA Hong-liang¹, WU Yan-hong¹, ZHU Jian-guo², XU Yi-jie¹, XIE Zu-bin², LIU Gang², YANG Yu-sheng¹

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Subtropical Resources and Environment, Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract It has been well known that elevated atmospheric CO₂ concentration can not only promote crops soil nitrogen uptake directly through increasing plant photosynthesis and aboveground biomass, but also influence the soil nitrogen and carbon status, indirectly through enhancing root biomass, changing root activity, root exudates and root spatial distribution. However, the effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on soil nitrogen cycle at rhizosphere and non-rhizosphere, especially under different soil fertilized nitrogen conditions, were unclear. This study aimed to reveal the effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on the contents of soil inorganic nitrogen(nitrate-N, ammonium-N)and organic nitrogen at rhizosphere and non-rhizosphere after crop harvest and under different nitrogen fertilizer applications for a wheat and rice rotation. The FACE (Free air carbon dioxide enrichment)systems, built at Xiaoji Town, Jiangdu City, Jiangsu Province(119°42' 0" E, 32°35' 5" N), provided in field two levels of CO₂ concentration: ambient(370 μmol·mol⁻¹, as control)and elevated (370+200)μmol·mol⁻¹, with three repeats. For each CO₂ concentration level there existed two nitrogen fertilizer application rates: low(125 and 112.5 kg·hm⁻², LN)and conventional (250 and 225 kg·hm⁻², NN)for rice season of 2005 and for wheat season of 2004–2005, respectively. The results showed that, while significantly increased crop biomass both in rice and wheat compared with ambient CO₂, elevated CO₂ decreased soil nitrate-N for rice significantly, especially at NN, but no pronounced change in soil nitrate-N was found for wheat. And elevated CO₂ affected soil nitrate-N at root rhizosphere more greatly than that at non-rhizosphere. There were no significant effects of elevated CO₂ on soil ammonium-N for both rice and wheat, although with a slight rise trend with CO₂ elevated for rice and a declined trend, especially at rhizosphere, for wheat. With nitrogen application rate increased, soil ammonium-N content was increased more at ambient CO₂ than at elevated CO₂. We observed no significant increase in soil organic nitrogen under elevated CO₂ compared with ambient CO₂ and, founded more organic nitrogen in wheat season was input into soil than in rice season, and for wheat season, more organic nitrogen would amass in rhizosphere than in non-rhizosphere with more nitrogen applied.

Keywords elevated [CO₂]; N levels; rhizosphere; mineral nitrogen; organic N

收稿日期 2008-08-18

基金项目: 国家“973”资助项目(2002CB714003); 中国科学院知识创新重要方向资助项目(KZCX32SW2440); 国家自然科学基金资助项目(40571157); 福建省青年科技人才创新项目(2007F3020); 福建省教育厅 B 类项目(JB07076); 地理学实验教学示范中心课外开放实验项目

作者简介: 马红亮(1978—), 男, 山西原平人, 博士, 讲师, 主要从事土壤环境化学、全球变化与土壤碳氮循环方面的研究。E-mail: mhl936@163.com

自 19 世纪 70 年代工业革命以来,由于人类活动的影响,大气中 CO₂ 浓度以每年 0.4% 的速度递增^[1] (2004 年约为 380 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[2])。CO₂ 能直接促进植物的光合作用、增加其生物量^[3-6],进而增加对氮素的吸收^[3-5-7]。大气 CO₂ 浓度升高还通过增加根系生物量、影响根系活动和根系分泌物、改变根系空间分布等间接地影响土壤碳氮循环^[8-10],也会影响土壤酶活性和生物活性来调节土壤养分循环^[11-12]。由于距作物根系远近不同的土壤受到根系影响的程度不一,因此大气 CO₂ 浓度升高对土壤氮的影响也必然不同。已有研究显示,在水稻和小麦生长季节,大气 CO₂ 浓度升高对土壤养分的影响存在差异^[9-10, 13],然而在作物根系周围的变化尚待研究。

本文通过在作物收获后取根际和非根际土壤样品,研究 CO₂ 浓度升高对水稻和小麦季结束后土壤无机氮和有机氮的影响,旨在阐述未来大气中 CO₂ 浓度升高,在作物生物量增加并对养分大量需求的前提下,根际土壤养分含量的可能变化,为农田如何进行水肥管理等实际需要提供理论基础和依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

稻麦轮作 FACE(Free Air Carbon-dioxide Enrichment)系统平台^[14]重建于江苏省江都市小纪镇(119°42' 0"E, 32°35' 5"N)。土壤理化特性:砂粒(2~0.02 mm)578 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,粉砂粒(0.02~0.002 mm)285 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,粘粒(<0.002 mm)137 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,0~15 cm 容重 1.16 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, pH7.9。1995—2000 年平均降水量 918 mm,同期实测年平均蒸发量 1 194.3 mm,年平均气温 14~16 °C,无霜期 220 d。6—9 月份降水较多,平均汛期雨量占年平均雨量 60%。区内田面真高 2.7~4.0 m 之间。累年平均总热量(≥ 0 °C 积温)有 5 456.6 °C(1959—1988)。养分含量见表 1。

1.2 大田试验设置

江都 FACE 田间试验采用裂区设计。CO₂ 浓度为主处理, N 肥料处理为副处理。大气 CO₂ 浓度设对照(A, 370 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$) 和比对照高 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的 FACE 处理(F, 570 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)2 个水平, 3 次重复,每个 CO₂ 浓度条件下设置 2 个氮水平处理。2005 年水稻季,施 N 量设低氮(LN, 125 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、常规氮(NN, 250 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)2 个水平,施 P、K 量均设 70 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。施氮时间和施氮量:6 月 13 日施基肥,6 月 19 日施分蘖肥,7 月 30 日施穗肥,其中基、蘖肥占总施 N 量的 60%,穗肥占总施 N 量的 40%。P、K 肥均作为基肥施用。2004—2005 年小麦实验,氮肥设低氮(LN, 112.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和常规氮(NN, 225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)施用量各 75 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。氮肥为尿素,磷、钾肥为复混肥。磷钾肥在小麦播种前 2 d 作基肥 1 次施入、氮肥分别按基肥、拔节肥(播种后 113 d)和孕穗肥(播种后 146 d)施用,施用量分别为总量的 50%、10% 和 40%。

1.3 土壤样品采集与分析

于 2005 年 10 月水稻收获后和 2005 年 6 月小麦收获后,分别挖取远离根系 5 cm 的土壤,作为非根际土壤,同时挖取根系 5 cm 之内的土壤 15 cm 连同根系一起挖出,适当风干后,将外面的土壤打碎、抖落,将紧靠根系的土壤收集,作为根际土壤。土壤铵态氮和硝态氮用 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液提取,分别用靛酚蓝比色法和紫外分光光度法测定,土壤全氮用凯氏定氮法^[15]。

本文采用 SPSS 12.0 软件中 ANOVA、F-检验和 LSD 方法,在不同 CO₂ 浓度条件下对实验数据进行统计分析。数据表示为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度升高对水稻和小麦季土壤中硝态氮含量的影响

图 1 表明,与对照相比,CO₂ 浓度升高使水稻季

表 1 江都土壤养分含量

Table 1 Soil nutrients content in Jiangdu

田块 Soil blocks	全碳 Total C/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 Total N/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷 Total P/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾 Total K/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效 P Available P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效 K Available K/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
F1	20.7	1.7	0.67	14.8	10.6	83.4
F2	18.7	1.5	0.67	13.4	10.7	67.5
F3	17.3	1.4	0.66	14.6	13.8	74.2
A1	18.2	1.5	0.61	13.5	7.8	60.7
A2	17.7	1.4	0.62	13.6	6.3	61.5
A3	17.9	1.3	0.56	14.3	11.8	75.8

注: F 表示 elevated CO₂ 处理田块, A 表示对照 CO₂ 浓度田块。

土壤硝态氮有较大幅度的降低,在 LN 处理下根际和非根际土壤分别下降了 31.2% 和 31.8%,在 NN 处理下根际和非根际土壤分别显著下降了 57.8% ($P < 0.05$) 和 46.5% ($P < 0.05$),高 CO_2 浓度对土壤中硝态氮含量具有显著的影响,而且在 NN 水平下降低幅度更大,硝态氮含量的降低很可能是由于作物吸收增加导致的,结果将有利于水稻生长,如果是由于田间损失增加造成的,相反,容易造成环境污染。较高的氮肥施用(NN 处理与 LN 处理比较),使根际和非根际土壤硝态氮含量在对照 CO_2 条件下分别升高了 24.1% 和 81.1%,在 CO_2 浓度升高条件下分别降低了 23.9% 和 41.9%,仍然低于对照条件下的变化。表明 CO_2 浓度升高条件下,根系以及地上部分生物量的增加很可能会通过增加对硝态氮的吸收而降低土壤氮的含量。

与对照相比, CO_2 浓度升高条件下,在 LN 处理

下,小麦季根际和非根际土壤硝态氮含量分别升高了 11.2% 和 0.8% (图 1),在 NN 处理下,根际和非根际土壤硝态氮分别升高了 5.1% 和 6.9%,与水稻季不同, CO_2 浓度升高对小麦季土壤硝态氮含量的影响相反,并没有降低硝态氮含量。较高的氮肥施用(NN 处理与 LN 处理比较),使根际和非根际土壤硝态氮含量在对照 CO_2 条件下分别升高了 21.2% 和 7.7%,在 CO_2 浓度升高条件下,分别升高了 14.6% 和 14.2%。结果显示,小麦季硝态氮在不同 CO_2 浓度条件下变化不明显, CO_2 浓度升高条件使小麦季土壤硝态氮只有小幅度的增加,那么在作物吸收增加的前提下,很可能与小麦季土壤较高的含氧量有关,导致较多的铵态氮转化硝态氮的结果。

2.2 CO_2 浓度升高对水稻和小麦季土壤中铵态氮含量的影响

如图 2 所示,与对照相比, CO_2 浓度升高条件下,

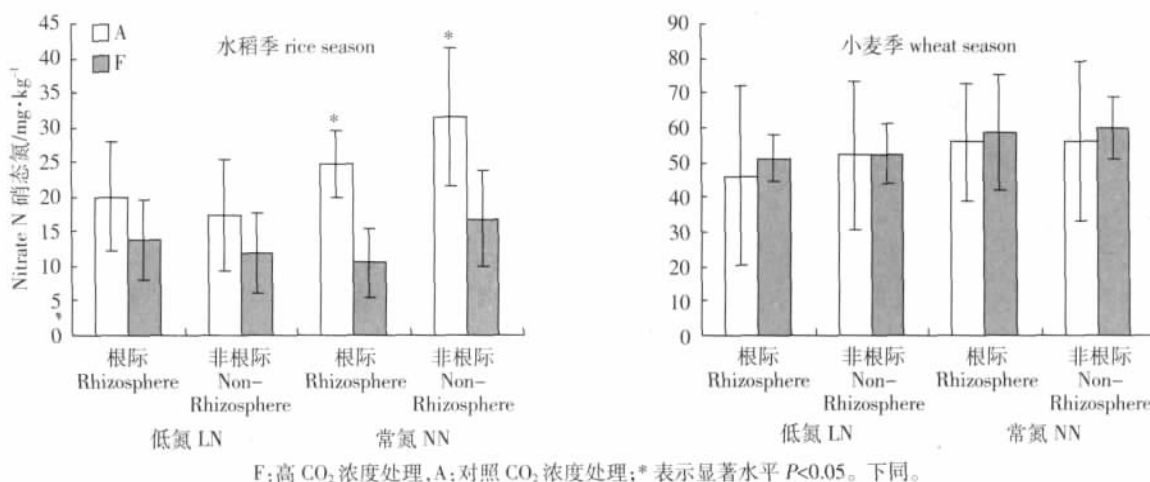


图 1 CO_2 浓度升高对水稻和小麦季土壤硝态氮的影响

Figure 1 Effects of elevated CO_2 on nitrate N in soil of rice and wheat season

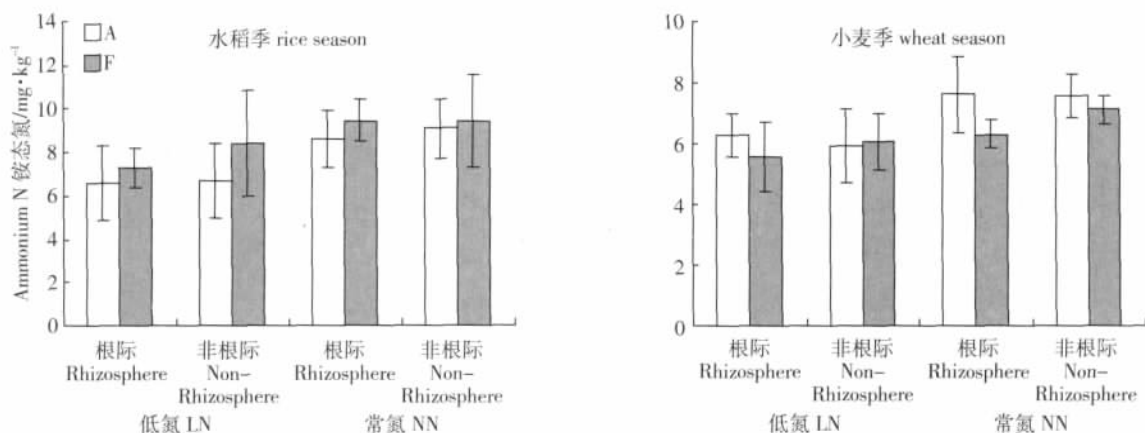


图 2 CO_2 浓度升高对水稻和小麦季土壤铵态氮的影响

Figure 2 Effects of elevated CO_2 on ammonium N in soil of rice and wheat season

在 LN 处理下,水稻季根际和非根际土壤铵态氮分别升高了 11.5 %和 26.1% ;在 NN 处理下,根际和非根际土壤铵态氮分别升高了 9.9 %和 3.3%。较高的氮肥施用(NN 处理与 LN 处理比较),使根际和非根际土壤铵态氮含量在对照 CO₂ 条件下分别升高了 31.3% 和 36.8% ,在 CO₂ 浓度升高条件下分别升高了 29.4% 和 12.1%。表明氮肥的施用保持了土壤较高的铵态氮含量,对作物的吸收有利,同时铵态氮并没有像硝态氮那样受 CO₂ 浓度升高的影响而大幅度降低,可能与水稻土壤中的脲酶等活性比较大有关,有利于有机氮的矿化分解,从而增加了铵态氮的含量。

与对照相比,CO₂ 浓度升高条件下,在 LN 处理下,小麦季根际和非根际土壤铵态氮分别降低了 11.3%和升高了 1.8%(图 2);在 NN 处理下,根际和非根际土壤铵态氮分别降低了 17.1%和 6.1%。较高的氮肥施用(NN 处理与 LN 处理比较),使根际和非根际土壤铵态氮含量,在对照 CO₂ 条件下分别升高了 21.4%和 27.3% ,在 CO₂ 浓度升高处理下分别升高了 13.4%和 17.5%。表明 CO₂ 浓度升高条件下,高氮施肥有利于小麦季土壤铵态氮的降低,影响程度在根际大于非根际。

2.3 CO₂ 浓度升高对水稻和小麦季土壤中有机氮含量的影响

如图 3 所示,与对照相比,CO₂ 浓度升高条件下,在 LN 处理下,水稻季根际和非根际土壤有机氮分别升高了 0.9%和 1.9% ;在 NN 处理下,分别降低了 2.5%和升高 4.6%。较高的氮肥施用(NN 处理与 LN 处理比较),使根际和非根际土壤有机氮含量,在对照 CO₂ 条件下分别升高了 2.2%和降低 0.6% ,在 CO₂ 浓度升高条件下,分别降低了 1.2%和升高了 2.0%。表

明高 CO₂ 浓度对水稻季土壤有机氮含量的影响不显著。

与对照相比,CO₂ 浓度升高条件下,在 LN 处理下,小麦季根际和非根际土壤有机氮分别升高了 8.4%和 5.3%(图 3);在 NN 处理下,分别升高了 8.1 %和 11.5%。较高的氮肥施用(NN 处理与 LN 处理比较),使根际和非根际土壤有机氮含量,在对照 CO₂ 条件下分别升高了 1.1%和降低 6.8% ;在 CO₂ 浓度升高条件下分别升高了 0.8%和降低 1.3%。表明高 CO₂ 浓度对小麦季土壤有机氮含量的影响也不显著,增加施氮水平有使小麦季非根际土壤有机氮降低的可能。

3 讨论

由于 CO₂ 是植物进行光合作用的底物,因此,相对于对照 CO₂ 浓度,大气 CO₂ 浓度的升高能直接促进生物量的增加^[3,5-7],增加植物对土壤养分的吸收,尤其是氮素。同时根系在纵向的穿透和横向的扩展也增加^[8],有利于增加与土壤的接触面积,促进作物对水分、养分等的吸收,降低土壤养分含量。反过来大气 CO₂ 浓度升高通过根系也将增加对土壤的间接影响,大气 CO₂ 浓度的升高使更多的同化产物进入土壤^[8,16-17],包括根系死亡、凋落等各种方式向土壤归还、分泌的活性有机碳^[8-9],这些以各种形式进入土壤的碳有利于土壤生物和酶活性的提高^[11-12],增加了有机质的分解^[18-20],从而改变土壤中的养分含量,根际和非根际土壤由于受到作物根系的影响程度不一,导致根际和非根际土壤 C、N 含量存在差异^[8]。本文结果显示,相对于对照处理,高 CO₂ 条件下水稻季土壤硝态氮含量显著降低,铵态氮含量变化不大,呈增加趋势,而小麦季的变化趋势与其相反,水稻季硝态氮对高 CO₂ 浓度

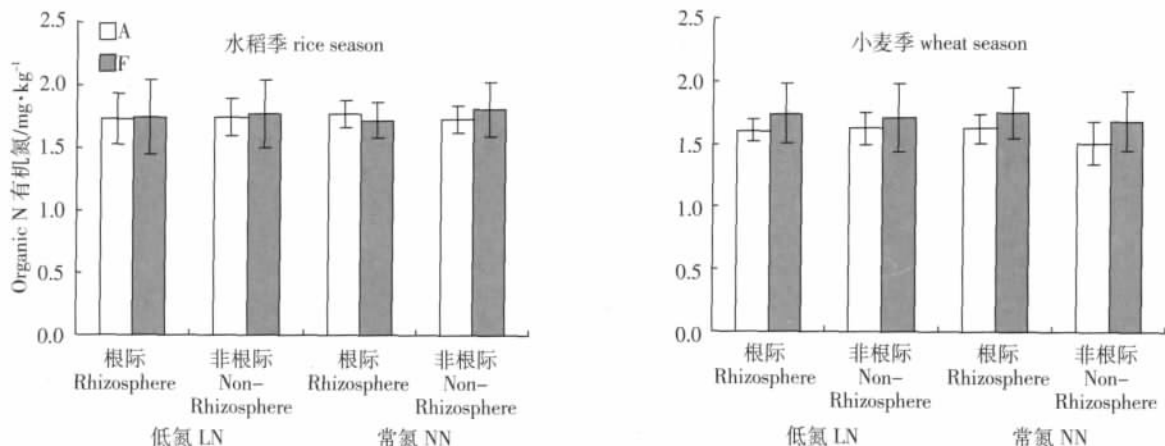


图 3 CO₂ 浓度升高对水稻和小麦季土壤有机氮的影响

Figure 3 Effects of elevated CO₂ on organic nitrogen in soil of rice and wheat season

的响应最大,研究显示 CO_2 浓度增高对于水稻土的反硝化活性起到一定的抑制作用^[21],因此硝态氮通过反硝化降低可能性不大,很有可能是通过水体流失和水稻增加对土壤硝态氮的吸收引起硝态氮含量的降低,因为多数植物存在对不同氮形态吸收强度的差异性,高 CO_2 浓度对硝态氮的影响程度大于铵态氮^[22],还有一种可能就是有机氮分解对硝态氮的贡献小于铵态氮。而在麦季根际根系呼吸活动较强,除吸收养分增加外,也有更多的铵态氮转化为硝态氮,结果造成小麦季根际土壤铵态氮降低,硝态氮增加。与麦季不同,水稻季土壤由于经常处在还原状态,在硝态氮和铵态氮变化上与小麦季相反,但是相同的是高 CO_2 浓度对根际的影响大于非根际。

研究表明矿物态 N 的有效性是控制植物对高 CO_2 浓度响应的关键因素^[23]。而目前大量的证据表明,地上生物量会因氮肥的不足而减弱对 CO_2 的响应^[24-25],因此 N 水平将通过影响生物量的变化,影响土壤过程。结果显示,与对照相比,在 CO_2 浓度升高条件下,在 LN 和 NN 处理下,水稻季土壤硝态氮有较大幅度的降低,且 NN 水平下降幅度较大。相反小麦季土壤硝态氮没有降低,而铵态氮含量却降低,且 NN 水平下降幅度较大,可能与高氮水平下作物从土壤中吸收的氮较多有关^[3,7,26]。相关研究显示,土壤为偏酸性(pH6.8),LN 水平下由于硝化活性增加,硝态氮含量增加,而 NN 水平下相反,增加氮肥施用并没有增加土壤硝化活性^[27],本文结果与此研究不同,可能与土壤偏碱性(pH7.9)对土壤酶产生的影响不同有关。结果还显示,随着施肥水平增加,不同 CO_2 条件下土壤硝态氮和铵态氮都增加,但是在高浓度 CO_2 条件下增加幅度低于对照处理,这与高氮水平下作物响应 CO_2 浓度升高,生物量增加,对养分的需求也增加有关。

参考文献:

- [1] Keeling C D, Whorf T P. Atmospheric CO_2 records from sites in the SIO air sampling network, trends a compendium of data on global change. Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, USA. Carbon Dioxide Information Analysis Center, 2004.
- [2] Sabine C L, Feely R A, Gruber N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO_2 [J]. *Science*, 2004, 305 :367-371.
- [3] 马红亮,朱建国,谢祖彬,等. 开放式空气 CO_2 浓度升高对冬小麦生长和 N 吸收的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(12) :1634-1639.
MA Hong-liang, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin, et al. Effects of free-air carbon dioxide enrichment on growth and uptake of nitrogen in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(12) :1634-1639.
- [4] Ainsworth E A, Long S P. What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment(FACE)? a meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2 [J]. *N Phytol*, 2005, 165 :351-372.
- [5] 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 CO_2 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]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10) :1223-1230.
- [6] Ma H L, Zhu J G, Xie Z B, et al. Responses of rice and winter wheat to free-air CO_2 enrichment(China FACE) at rice/wheat rotation system[J]. *Plant and Soil*, 2007, 294 :137-146.
- [7] 马红亮,朱建国,谢祖彬,等. CO_2 浓度升高对水稻生物量及 C、N 吸收分配的影响[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3) :38-41.
MA Hong-liang, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin, et al. Effects of CO_2 enrichment on the allocation of biomass and C, N uptake in rice organs [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3) :38-41.
- [8] 马红亮,朱建国,谢祖彬. 大气 CO_2 浓度升高对植物-土壤系统地下过程影响的研究[J]. 土壤, 2003, 35(6) :465-472.
MA Hong-liang, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin. Effect of elevated atmospheric CO_2 on below-ground[J]. *Soil*, 2003, 35(6) :465-472.
- [9] 马红亮,朱建国,谢祖彬,等. 开放式空气 CO_2 浓度升高对水稻土壤可溶性 C、N 和 P 的影响[J]. 土壤, 2004, 36(4) :392-397.
MA Hong-liang, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin, et al. Effect of FACE (Free Air Carbon-Dioxide Enrichment) on available C, N and P in soil during rice growing[J]. *Soil*, 2004, 36(4) :392-397.
- [10] 马红亮,朱建国,谢祖彬,等. 不同氮水平下 CO_2 浓度升高对小麦土壤可溶性 C、N 和 P 的影响[J]. 土壤, 2005, 37(3) :284-289.
MA Hong-liang, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin, et al. Effect of FACE (Free Air Carbon-Dioxide Enrichment) on available C, N and P in soil during winter wheat growing[J]. *Soil*, 2005, 37(3) :284-289.
- [11] 苑学霞,林先贵,褚海燕,等. 大气 CO_2 浓度升高对不同施氮土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(1) :48-53.
YUAN Xue-xia, LIN Xian-gui, CHU Hai-yan, et al. Effects of elevated atmospheric CO_2 on soil enzyme activities at different nitrogen level[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1) :48-53.
- [12] 苑学霞,林先贵,褚海燕,等. 大气 CO_2 浓度升高对几种土壤微生物学特征的影响[J]. 中国环境科学, 2006, 26(1) :25-29.
YUAN Xue-xia, LIN Xian-gui, CHU Hai-yan, et al. Influence of atmospheric CO_2 concentration enhancement on soil microbiological properties[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(1) :25-29.
- [13] Ma H L, Zhu J G, Liu G, et al. Availability of soil nitrogen and phosphorus in a typical rice-wheat rotation system under elevated atmospheric CO_2 [J]. *Field Crops Research*, 2007, 100(1) :44-51.
- [14] 刘 钢,韩 勇,朱建国,等. 稻麦轮作 FACE 系统平台 . 系统结构与控制[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10) :1253-1258.
LIU Gang, HAN Yong, ZHU Jian-guo, et al. Rice-wheat rotational FACE platform . system structure and control[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10) :1253-1258.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,

- 2000 :169–231.
LU Ru-kun. Analysis methods for soil agricultural chemistry[M]. Beijing :China Agricultural Science and Technology Press, 2000 :146 – 163.
- [16] Chander K, Brookes P C. Plant inputs of carbon to metal-contaminated soil and effects on the soil microbial biomass[J]. *Soil Soil Biochem*, 1991, 23 :1169–1177.
- [17] Chen G P, Cheng L, Zhu J G, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment on root characteristics and C :N ratio of rice at the heading stage[J]. *Rice Science*, 2006, 13(2) :120–124.
- [18] 王艳玲, 何园球, 李成亮. 柠檬酸对红壤磷的持续活化效应及其活化机理的探讨[J]. 土壤学报, 2007, 44(1) :130–136.
WANG Yan-ling, HE Yuan-qiu, LI Cheng-liang. Persistent activating effect of citric acid on phosphorus in red soil and its mechanism[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1) :130–136.
- [19] 聂艳丽, 郑 毅, 林克惠. 根分泌物对土壤中磷活化的影响[J]. 云南农业大学学报, 2002, 17(3) :281–286.
NIE Yan-li, ZHENG Yi, LIN Ke-hui. Effect of root exudates on activation of phosphates in soils[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2002, 17(3) :281–286.
- [20] 李廷轩, 马国瑞, 王昌全, 等. 籽粒苋根际土壤及根系分泌物对矿物态钾的活化作用[J]. 土壤通报, 2003, 34(1) :48–51.
LI Ting-xuan, MA Guo-rui, WANG Chang-quan, et al. Mineral potassium activation in rhizosphere soils and root exudates of grain amaranth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(1) :48–51.
- [21] 王晏屹, 韩 琳, 史 奕, 等. 开放式大气 CO₂ 浓度增高对水稻土反硝化活性的影响 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2007, 33(3) :284–289.
WANG Shu-yi, HAN Lin, SHI Yi, et al. Effects of FACE on denitrification activity in paddy-field soil[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Science)*, 2007, 33(3) :284–289.
- [22] 庞 静, 朱建国, 谢祖彬. 大气 CO₂ 体积分数升高对植物 N 素吸收的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(3) :429–433.
PANG Jing, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin. Effect of elevated atmospheric CO₂ on nitrogen uptake by plant[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(3) :429–433.
- [23] Gloser V, Jezikova M, Lüscher A, et al. Soil mineral nitrogen availability was unaffected by elevated atmospheric PCO₂ in a four year old field experiment(Swiss FACE)[J]. *Plant and Soil*, 2000, 227 :291–299.
- [24] Lüscher A, Hartwig U A, Suter D, et al. Direct evidence that symbiotic N₂ fixation is an important trait for a strong response of the plant to elevated atmospheric CO₂[J]. *Global Change Biol*, 2000, 6 :655–662.
- [25] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, et al. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂[J]. *Nature*, 2006, 440 :922–925.
- [26] Schneider M K, Lüscher A, Richter M, et al. Ten years of free-air CO₂ enrichment altered the mobilisation of N from soil in *Lolium perenne* L. swards[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10 :1377–1388.
- [27] 胡君利, 褚海燕, 林先贵, 等. 大气 CO₂ 浓度增高对农田土壤硝化活性的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(3) :329–332.
HU Jun-li, CHU Hai-yan, LIN Xian-gui, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on soil nitrification activities[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(3) :329–332.