

大气 CO₂ 浓度升高对稻麦根系 周围土壤 C、P、K 的影响

马红亮^{1,*}, 徐一杰¹, 朱建国², 吴艳红¹, 谢祖彬², 刘 钢², 高 人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, 福州 350007; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中科院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 利用 FACE (free air carbon dioxide enrichment) 技术平台, 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可溶性碳、有机磷、速效磷和速效钾的影响。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, 土壤速效磷和速效钾不但没有降低反而增加, 增加幅度小麦季大于水稻季, 根际大于非根际; 水稻季土壤可溶性碳含量增加, 且 NN 水平下水稻和小麦季进入土壤的可溶性碳增加, 导致土壤有机磷降低幅度低于 LN 水平, 且水稻季根际土壤大于非根际土壤, 有机磷的降低是保证有效磷升高的一个重要因素, 增加氮肥施用将有利于土壤有机磷的增加, 对维持土壤磷的供给有积极作用, 有利于作物对高 CO₂ 浓度的持续响应。

关键词: CO₂ 浓度升高; N 水平; 根际; 可溶性碳; 速效 P; 有机 P; 速效 K

文章编号: 1000-0933 (2009) 09-4949-07 中图分类号: Q142, Q948, S314 文献标识码: A

Effects of elevated CO₂ on soil C, P and K around the roots of rice and wheat

MA Hong-Liang^{1,*}, XU Yi-Jie¹, ZHU Jian-Guo², WU Yan-Hong¹, XIE Zu-Bin², LIU Gang², GAO Ren¹

1 Fujian provincial key laboratory of subtropical resources and environment, Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process (Fujian Normal University), 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

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4949 ~ 4955.

Abstract: The present study is conducted to determine effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on soil soluble C, available P and K, and organic P in rhizosphere and non-rhizosphere after crops harvested under two N levels with FACE (free air carbon dioxide enrichment) systems. The results showed that compared with ambient CO₂, elevated CO₂ did not decrease soil available P and K but increase them with increased biomass of rice and wheat and soil available P and K were increased more in wheat season than in rice one, more in root rhizosphere than in non-rhizosphere. Soil soluble C was increased by elevated CO₂ and more carbon input to soil under NN treatment resulted in a more decrease of soil organic P at LN than at NN, in rhizosphere than in non-rhizosphere of rice. The decrease of organic P played an important role in the increase of soil available P. More N application, for example, NN treatment was beneficial to increase of soil organic P and then perform a positive function in keeping the soil P available, which could insure the continuously response of crops to elevated CO₂.

Key Words: elevated [CO₂]; N levels; rhizosphere; soluble C; available P; available K; organic P

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资助项目 (2007F3020); 福建省教育厅 B 类资助项目 (JB07076); 地理学实验教学示范中心课外开放实验资助项目

收稿日期: 2008-06-02; 修订日期: 2008-12-10

* 通讯作者 Corresponding author. 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 CO_2 浓度以每年 0.4% 的速度递增^[1] (2004 年约为 $380 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ^[2])。 CO_2 能直接促进植物的光合作用、增加其生物量^[3~6],进而影响作物的化学特性^[7,8]。由于陆地生态系统碳库(约 2060 Gt)几乎是大气(约 735 Gt)的 3 倍^[9],大气 CO_2 浓度升高后只能是间接地影响土壤过程,通过改变根系生物量和根系活动,增加根系分泌物,影响土壤碳和养分循环^[10,11],也会影响土壤酶活性和生物活性来调节土壤养分^[12,13]。大气 CO_2 浓度的升高在增加作物生物量的同时也吸收更多的养分,比如 P, K^[5~7]。大气 CO_2 浓度升高使植物根系的干重增加,根系的穿透和扩张能力增加,也改变根系的分布,影响土壤养分的有效性^[10]。已有研究显示在水稻和小麦季,大气 CO_2 浓度升高对土壤养分的影响存在差异^[11,14,15],然而在作物根系周围如何变化,不甚清楚。

因此本文通过在作物收获后的根际和非根际取土壤样品,研究 CO_2 浓度升高对水稻和小麦季结束后土壤 C、P、K 的影响,以期阐明在未来大气 CO_2 浓度升高的情境下,根系土壤养分含量的变化,为进行田间水肥管理等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概括

稻麦轮作 FACE 系统平台^[16]建于江苏省江都市小纪镇(119°42' 0"E, 32°35' 5"N)。土壤有关基本性质为:砂粒(2~0.02mm) 578 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,粉砂粒(0.02~0.002mm) 285 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,粘粒(<0.002mm) 137 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,0~15cm 容重 1.16 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,pH7.9。1995~2000 年平均降水量 918mm,同期实测年平均蒸发量 1194.3mm,年平均气温 14~16℃,无霜期 220d。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 2.7~4.0m 之间。累年平均总热量($\geq 0^\circ\text{C}$ 积温)有 5456.6℃(1959~1988 年),基本养分情况见表 1。

表 1 江都土壤基本养分状况
Table 1 Soil basic characters 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 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
F 高 CO_2 浓度处理 Elevated [CO_2] treatment						
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
A 对照 [CO_2] 浓度处理 Ambient [CO_2] treatment						
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

1.2 大田试验设置

江都 FACE 田间试验采用裂区设计。 CO_2 浓度为主处理,N 肥料处理为副处理。大气 CO_2 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 CO_2 浓度条件下设置两个氮水平处理。供试品种为武香粳 14 号。2005 年水稻季,供试品种为武香粳 14 号,施 N 量设低氮(LN, $125 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、常氮(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(扬麦 14 号)实验,氮肥分低氮(LN, $112.5 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和常氮(NN, $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)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 作基肥一次施入、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

分别于 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 5cm 的行间土壤,作为非

根际土壤;同时挖取靠近根系 5cm 之内的土壤,采用抖根法获取根际土壤。土壤可溶性 C 用 K₂SO₄ 溶液提取,重铬酸钾容量法测定;土壤速效 P 用碳酸氢钠溶液提取,有机磷用烧灼法和稀硫酸溶液提取,钼锑抗比色法进行测定;土壤速效 K 用乙酸铵溶液提取,火焰光度计法测定^[17]。

本文采用 SPSS12.0 软件中 ANOVA、F-检验和 LSD 方法,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可溶性碳含量的影响

由图 1 可以看出,与对照 CO₂ 浓度相比,CO₂ 浓度升高条件下,在 LN 处理下,水稻根际土壤中可溶性碳升高了 5.3%,非根际土壤中可溶性碳升高了 6.7%;在 NN 处理下,根际土壤中可溶性碳升高了 6.3%,非根际土壤中可溶性碳升高了 17.3%。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可溶性碳含量在对照 CO₂ 条件下分别降低了 15.4% 和 12.5%,在 CO₂ 浓度升高条件下分别降低了 14.5% 和 3.9%。

CO₂ 浓度升高对小麦季土壤可溶性碳的影响见图 1,与对照 CO₂ 浓度相比,CO₂ 浓度升高条件下,在 LN 处理下,根际土壤可溶性碳降低了 15.2%,非根际土壤可溶性碳降低了 2.1%;在 NN 处理下,根际中可溶性碳升高了 12.4%,非根际中可溶性碳降低了 0.5%。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可溶性碳含量在对照 CO₂ 条件下分别降低了 25.4% 和 8.0%,在 CO₂ 浓度升高条件下分别降低了 1.1% 和 6.5%。CO₂ 浓度升高条件下 NN 处理使土壤可溶性碳含量增加,很可能与有利于土壤生物活动提高有机质分解有关。CO₂ 浓度升高条件下和较高的施氮水平使土壤活性碳含量的增加,将有利于提高土壤酶活性,影响土壤有机质的矿化和养分有效性。

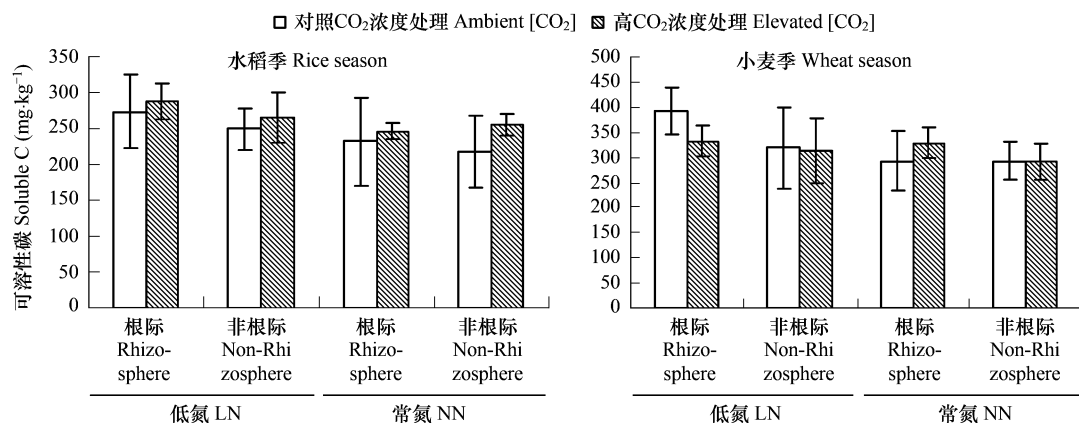


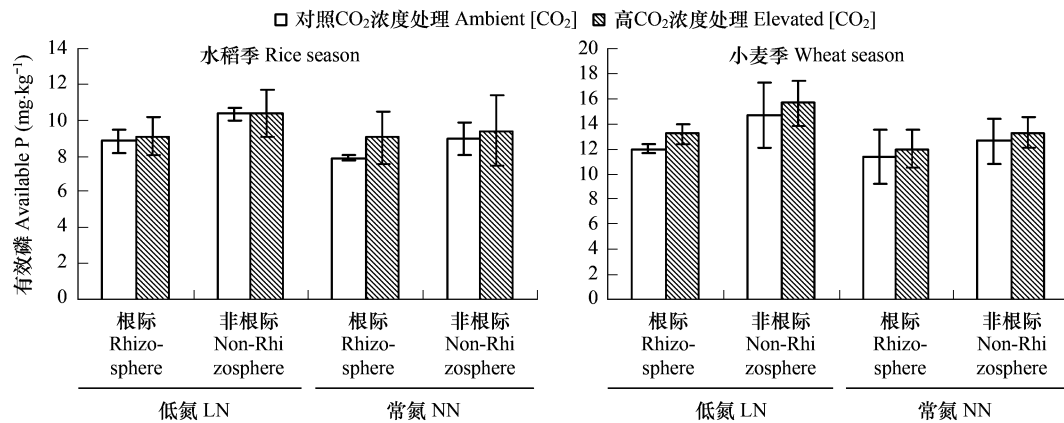
图 1 CO₂ 浓度升高对水稻和小麦季土壤可溶性碳的影响

Fig. 1 Effects of elevated CO₂ on soluble C in soil of rice and wheat season

2.2 CO₂ 浓度升高对水稻和小麦季土壤中速效 P 含量的影响

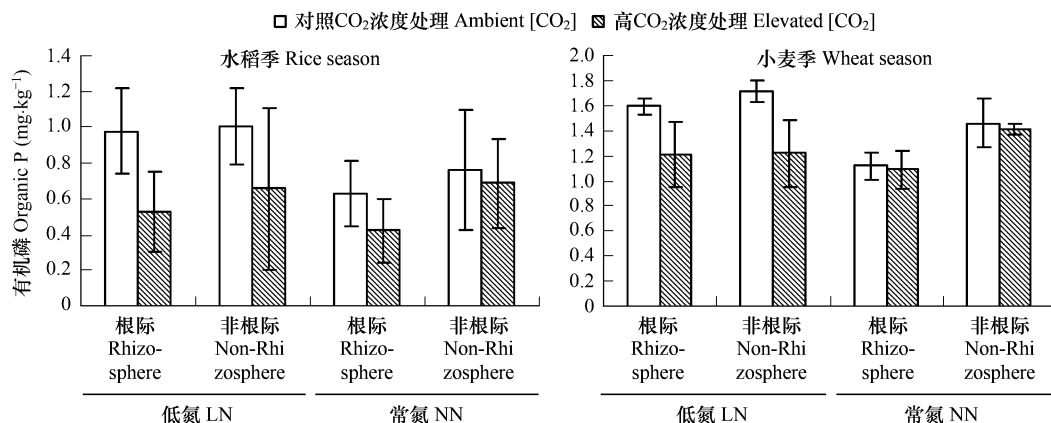
相对于对照 CO₂ 浓度条件,CO₂ 浓度升高条件下,水稻和小麦土壤中的速效 P 含量均有一定的提高(图 2),水稻土壤 LN 处理下,根际与非根际分别升高了 2.7% 和 0.6%,在 NN 处理下,根际与非根际也分别升高了 14.1% 和 4.7%。较高的氮肥施用(NN 处理与 LN 处理比较),使根际和非根际土壤速效 P 含量在对照 CO₂ 条件下分别降低了 10.6% 和 13.1%,在 CO₂ 浓度升高条件下分别降低了 0.7% 和 9.6%。

相对于对照 CO₂ 浓度条件,CO₂ 浓度升高条件下,小麦土壤 LN 处理下,根际与非根际分别升高了 10.3% 和 6.1%(图 2),在 NN 处理下,根际与非根际也分别升高了 5.6% 和 5.2%。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速效 P 含量在对照 CO₂ 条件下分别降低了 5.3% 和 14.1%,在 CO₂ 浓度升高条件下分别降低了 9.4% 和 14.9%。

图2 CO₂浓度升高对水稻和小麦季土壤速效P的影响Fig. 2 Effects of elevated CO₂ on available P in soil of rice and wheat season

2.3 CO₂浓度升高对水稻和小麦季土壤中有机P含量的影响

相对于对照 CO₂ 浓度条件, CO₂ 浓度升高使水稻和小麦土壤有机 P 含量均有一定的降低(图 3), 水稻土壤 LN 处理下根际与非根际分别降低了 45.9% ($P=0.062$) 和 34.7%, 在 NN 处理下根际与非根际也分别降低了 32.4% 和 9.2%。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 P 含量在对照 CO₂ 条件下分别降低了 36.0% 和 24.5%, 在 CO₂ 浓度升高条件下分别降低了 20.0% 和升高了 5.1%。

图3 CO₂浓度升高对水稻和小麦季土壤有机磷的影响Fig. 3 Effects of elevated CO₂ on organic P in soil of rice and wheat season

相对于对照 CO₂ 浓度条件, CO₂ 浓度升高使小麦土壤 LN 处理下根际与非根际分别降低了 24.3% ($P=0.012$) 和 28.5% ($P=0.003$) (图 3), 在 NN 处理下根际与非根际也分别降低了 2.5% 和 3.6%。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 P 含量在对照 CO₂ 条件下分别降低了 29.7% ($P=0.003$) 和 14.7%, 在 CO₂ 浓度升高条件下分别降低了 9.4% 和升高了 15.0%。

相对于对照 CO₂ 浓度条件, 随着 CO₂ 浓度的升高, 小麦季根际土壤有机磷降低幅度低于水稻季的, 且不同于水稻季, 小麦季非根际土壤降低幅度大于根际土壤; 不同氮处理下, CO₂ 浓度的升高使有机磷含量降低, 可能与土壤酶有关; 同一 CO₂ 浓度条件下, 增加氮肥施用, 有机磷降低幅度减小, 甚至在高 CO₂ 浓度条件下, NN 水平处理使水稻和小麦非根际土壤有机磷不但没有降低, 反而分别比 LN 处理增加了 5.1% 和 15.0%, 可能与 NN 水平下进入土壤的有机质大于有机磷矿化的量。

2.4 CO₂浓度升高对水稻和小麦季土壤中速效K含量的影响

相对于对照 CO₂ 浓度条件, CO₂ 浓度升高使水稻和小麦土壤中的速效 K 含量均有一定的提高(图 4), 水稻

土壤 LN 处理下根际与非根际分别升高了 9.8% 和 3.7%, 在 NN 处理下根际与非根际也分别升高了 6.3% 和 4.3%。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速效 K 含量在对照 CO₂ 条件下分别降低了 4.0% 和 1.7%, 在 CO₂ 浓度升高条件下分别降低了 6.9% 和 1.1%。

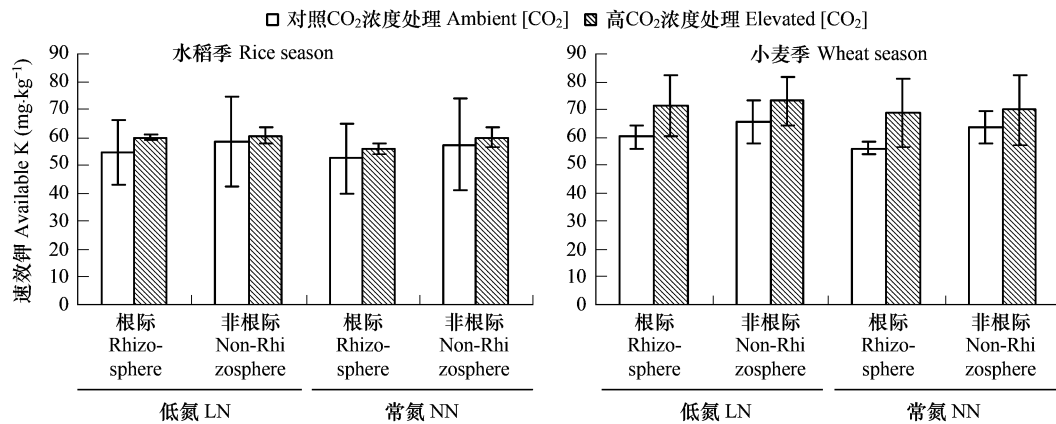


图 4 CO₂ 浓度升高对水稻和小麦季土壤速效 K 的影响

Fig. 4 Effects of elevated CO₂ on available K in soil of rice and wheat season

相对于对照 CO₂ 浓度条件, CO₂ 浓度升高下, 小麦土壤 LN 处理下根际与非根际分别升高了 18.0% 和 11.2%, 在 NN 处理下根际与非根际也分别升高了 22.3% 和 10.0%。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速效 K 含量在对照 CO₂ 条件下分别降低了 6.9% 和 3.3%, 在 CO₂ 浓度升高条件下分别降低了 3.5% 和 4.3%。相对于对照条件, 高 CO₂ 浓度增加了土壤速效钾的含量, 增施 N 肥有助于作物对速效 K 的吸收。

3 讨论

由于 CO₂ 作为植物光合作用的原料, 大气 CO₂ 浓度的升高能直接促进生物量的增加, 使得更多的同化产物进入土壤^[3,5,10,18,19], 影响土壤中根系和生物的活动^[11~13], 结果显示大气 CO₂ 浓度的升高使水稻季土壤可溶性碳含量增加, 且在 NN 水平下根际与非根际土壤可溶性碳变化较大, 而高 CO₂ 浓度总体上并没有增加小麦季土壤可溶性碳的含量, 且在 LN 和 NN 水平下根际与非根际土壤的差异比较大, 很可能一方面水稻季, 有水分调节使得水稻根际与非根际变化不大, 另外由于小麦季土壤空气条件较好, 根系活动比较强烈, 进入土壤的可溶性碳好氧分解比较大, 土壤积累少, 因此不同作物对土壤可溶性碳的贡献不一。相对于对照 CO₂ 浓度, 高 CO₂ 浓度使作物根系生物量增加^[3,5,6,20], 增加对养分的吸收, 且根系在纵向的穿透和横向的扩展也增加^[10], 根系通过各种方式向土壤归还、分泌的活性有机碳增加^[10,11], 有利于土壤生物和酶活性的提高^[12,13], 增加了有机质的分解^[21~23], 从而改变土壤中的养分含量, 结果显示大气 CO₂ 浓度的升高使水稻和小麦季土壤速效磷和速效钾增加, 且增加幅度根际大于非根际, 作物的生物量和养分吸收增加, 但并没有降低土壤中的养分含量, 表明根系对 P、K 养分转化的影响是很大的。研究发现土壤有机磷含量是降低的, 且水稻季根际土壤降低幅度大于非根际, 而小麦季在根际与非根际变化差异不大, 因此养分的转化和吸收在水稻和小麦之间存在差异。结果显示考虑水稻季根际与非根际土壤可溶性碳增加幅度的变化, 以及有机磷在根际与非根际的降低, 表明了作物根系对土壤有机磷的贡献有限, 主要是增加了对土壤原有有机质转化的影响力。通过分析高 CO₂ 浓度对土壤可溶性碳、有机磷、速效磷和钾的影响, 发现随着高 CO₂ 浓度使土壤可溶性碳的增加, 土壤有机磷有降低的趋势, 而土壤速效磷和钾则有增加的趋势, 但是这种关系不很明显 ($R^2 < 0.1$)。

研究表明, 矿物态 N 的有效性是控制植物对高 CO₂ 浓度响应的关键因素^[24]。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 CO₂ 的响应^[25,26], 因此, N 水平将通过影响生物量的变化, 影响土壤过程, 实验结果显示, 高 CO₂ 浓度使土壤可溶性碳和土壤速效磷增加幅度在 NN 水平下大于 LN 水平, 但是对

小麦季土壤速效磷的影响则相反;而土壤有机磷降低幅度在 NN 水平下小于 LN 水平,很可能与 LN 水平下酸性磷酸酶活性较高有关^[13],而 NN 水平下作物通过有机质归还土壤对有机磷起着积极的补充作用;高 CO₂ 浓度对土壤速效磷、钾的影响差异不大,但也不能忽视作物大量吸收钾对土壤养分供给所产生的影响。实验结果还显示,无论在对照 CO₂ 浓度下,还是在 CO₂ 浓度升高条件下,增施 N 肥均使得土壤中可溶性碳、速效磷、钾和有机磷的含量降低,且土壤可溶性碳、有机磷和速效钾在根际降低幅度大于非根际,甚至在 CO₂ 浓度升高条件下,水稻和小麦季非根际土壤有机磷有所升高,而有效磷在根际降低幅度小于非根际。这样的实验结果与增加氮肥施用可以促进作物对养分的吸收、增加土壤生物活性加大对有机碳的分解、加快养分的转化有关。在高 CO₂ 浓度下土壤可溶性碳和有机磷由于增加氮肥施用导致降低的幅度低于对照 CO₂ 浓度条件下的,表明增施 N 肥的情况下,CO₂ 浓度升高可能会通过小麦和水稻生物量的增加促进对土壤碳的归还,同时有机质的分解抵消了部分因作物吸收造成养分含量进一步的减少。结果分析显示随着增加氮肥施用,土壤可溶性碳的增加与土壤有机磷有正相关关系($R^2 = 0.5073$),与土壤速效磷和钾的关系分别达到 0.2089 和 0.4204。表明在高 CO₂ 浓度下,增施 N 肥有利于土壤有机磷的增加,有利于维持水稻和小麦季土壤磷的持续供给、满足作物生长需要。

References:

- [1] Keeling C D, Whorf T P. Atmospheric CO₂ 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 CO₂. *Science*, 2004, 305: 367—371.
- [3] Ma H L, Zhu J G, Xie Z B, *et al.* Effects of Free-air Carbon Dioxide Enrichment on Growth and Uptake of Nitrogen in Winter Wheat. *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 CO₂ enrichment (FACE)? a meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *N Phytol*, 2005, 165: 351—372.
- [5] Xie Z B, Zhu J G, Zhang Y L, *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. *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 CO₂ enrichment (China FACE) at rice/wheat rotation system. *Plant and Soil*, 2007, 294: 137—146.
- [7] Ma H L, Zhu J G, Xie Z B, *et al.* Effects of free air carbon dioxide enrichment on the uptake of P, K and C:N, C:P mass ratios of winter wheat. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1192—1198.
- [8] Cotrufo M F, Ineson P. Does elevated atmospheric CO₂ concentrations affect wood decomposition. *Plant and Soil*, 2000, 224: 51—57.
- [9] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Glob Biogeochem Cycles*, 1995, 9: 23—36.
- [10] Ma H L, Zhu J G, Xie Z B. Effect of elevated atmospheric CO₂ on below-ground. *Soil*, 2003, 35(6): 465—472.
- [11] Ma H L, Zhu J G, Xie Z B, *et al.* Effect of FACE (Free Air Carbon-dioxide Enrichment) on available C, N and P in soil during rice growing. *Soil*, 2004, 36(4): 392—397.
- [12] Yuan X X, Lin X G, Chu H Y, *et al.* Effects of elevated atmospheric CO₂ on soil enzyme activities at different nitrogen level. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 48—53.
- [13] Yuan X X, Lin X G, Chu H Y, *et al.* Influence of atmospheric CO₂ concentration enhancement on soil microbiological properties. *China Environmental Science*, 2006, 26(1): 25—29.
- [14] Ma H L, Zhu J G, Xie Z B, *et al.* Effect of FACE (free air carbon-dioxide enrichment) on available C, N and P in soil during winter wheat growing. *Soil*, 2005, 37(3): 284—289.
- [15] 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 [CO₂]. *Field Crops Research*, 2007, 100(1): 44—51.
- [16] Liu G, Han Y, Zhu J G, *et al.* Rice-wheat rotational FACE platform I. System structure and control. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1253—1258.
- [17] Lu R K. Analysis methods for soil agricultural chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 169—231.
- [18] Chander K, Brookes P C. Plant inputs of carbon to metal-contaminated soil and effects on the soil microbial biomass. *Soil Boil. Biochem*, 1991, 23: 1169—1177.

- [19] 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. *Rice Science*, 2006, 13(2): 120—124.
- [20] Ma H L, Zhu J G, Xie Z B, *et al.* Effect of free-air CO₂ enrichment (FACE) on the allocation of biomass and C,N in rice organs. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2005, 13(3): 38—41.
- [21] Wang Y L, He Y Q, Li C L. Persistent activating effect of citric acid on phosphorus in red soil and its mechanism. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1): 130—136.
- [22] Nie Y L, Zheng Y, Lin K H. Effect of root exudates on activation of phosphates in soils. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2002, 17(3): 281—286.
- [23] Li T X, Ma G R, Wang C Q, *et al.* Mineral potassium activation in rhizosphere soils and root exudates of grain amaranth. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(1): 48—51.
- [24] Gloser V, Jezikova M, Luscher A, *et al.* soil mineral nitrogen availability was unaffected by elevated atmospheric PCO₂ in a four year old field experiment (Swiss FACE). *Plant and Soil*, 2000, 227: 291—299.
- [25] Lischer 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. *Global Change Biol.*, 2000, 6: 655—662.
- [26] Reich P B, Hobbie S E, Lee T, *et al.* Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO₂. *Nature*, 2006, 440: 922—925.

参考文献:

- [3] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对冬小麦生长和 N 吸收的影响. *作物学报*, 2005, 31(12): 1634—1639.
- [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 CO₂ 浓度增高和 N、P 施肥的响应. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1223—1230.
- [7] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对冬小麦 P、K 吸收和 C:N, C:P 比的影响. *农业环境科学学报*, 2005, 24(6): 1192—1198.
- [10] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬. 大气 CO₂ 浓度升高对植物-土壤系统地下过程影响的研究. *土壤*, 2003, 35(6): 465—472.
- [11] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对水稻土壤可溶性 C、N 和 P 的影响. *土壤*, 2004, 36(4): 392—397.
- [12] 苑学霞, 林先贵, 褚海燕, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对不同施氮土壤酶活性的影响. *生态学报*, 2006, 26(1): 48—53.
- [13] 苑学霞, 林先贵, 褚海燕, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对几种土壤微生物学特征的影响. *中国环境科学*, 2006, 26(1): 25—29.
- [14] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 不同氮水平下 CO₂ 浓度升高对小麦土壤可溶性 C、N 和 P 的影响. *土壤*, 2005, 37(3): 284—289.
- [16] 刘钢, 韩勇, 朱建国, 等. 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.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 169—231.
- [20] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对水稻生物量和 C、N 吸收分配的影响. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 38—41.
- [21] 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. *土壤学报*, 2007, 44(1): 130—136.
- [22] 聂艳丽, 郑毅, 林克惠. 根分泌物对土壤中磷活化的影响. *云南农业大学学报*, 2002, 17(3): 281—286.
- [23] 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. *土壤通报*, 2003, 34(1): 48—51.