

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^①

马红亮 朱建国 谢祖彬 张雅丽 刘刚 曾青

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘要 采用 FACE (Free air carbon dioxide enrichment) 技术, 研究了不同 N 施肥水平下, 大气 CO₂ 浓度升高对水稻/小麦轮作中水稻土壤可溶性 C、N、P 的影响。结果表明, CO₂ 浓度升高使土壤表层可溶性 C 含量增加, 土壤 5 ~ 15 cm 的可溶性 C 含量倾向于降低, 增加 N 肥施用 (常规 N 处理) 更易于使土壤可溶性 C 含量降低。CO₂ 浓度升高使水稻土壤中的可溶性 N 含量降低, 在低 N 处理和土壤表层降低幅度较大, N 肥施用仍有提高的余地。CO₂ 浓度升高使水稻成熟期土壤可溶性 P 含量增加, 但是常规 N 处理下会降低水稻生长前期和土壤表层的可溶性 P, 增加 N 肥施用有利于水稻对 P 的吸收。

关键词 CO₂ 浓度升高; 水稻土; 可溶性 C、N、P;

中图分类号 S153.61

因森林砍伐 (人口增加导致)、化石燃料的燃烧等人为活动导致大量 C 进入大气, 促使大气中 CO₂ 浓度升高, 这种趋势还在继续, 已由工业革命前 (大约 1750 年) 的 (280 ± 10) μmol/mol 增长到现在的大约 365 μmol/mol 左右^[1]。目前许多研究关注地上植物部分, 诸如光合作用、蒸腾作用和生物量累积等^[2,3], 很少报道有关大气 CO₂ 浓度升高对土壤可溶性 C、N、P 影响的动态研究。然而在大气 CO₂ 浓度升高条件下, 有 20% ~ 50% 的光和同化 C 是转移到地下区域^[4,5], 为土壤微生物增加了 C 源和能量, 提高生物活性, 有利于增加土壤的可溶性 C、N、P, 所以值得我们研究其在土壤中发生的变化。

由于 CO₂ 是光合作用的重要原料, 其浓度的升高将对光合作用及其相关的生理过程产生影响, 促进作物生长和养分吸收。在开放式条件下, 研究 CO₂ 浓度升高对生态系统的影响主要是在国外开展的, 我国近年来很重视 CO₂ 浓度升高对植物生长影响的研究, 并已取得了初步的成果。但是考虑到在开放式条件下进行的技术难度, 我国以前还未在这方面有所研究。因此本试验将利用 FACE 系统, 在农田生态系统的稻麦轮作中, 研究大气 CO₂ 浓度升高对水稻季土壤可溶性 C、N、P 的影响, 为农田耕作和水肥管理提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概括

稻麦轮作 FACE 系统平台^[6]位于江苏省无锡市安镇镇年余农场 (31°37'N, 120°28'E)。土壤类型为水耕人为土 (俗称黄泥土), 年降水量 1100 ~ 1200 mm, 年平均温度约 16°C, 年日照时间 > 2000 h, 年无霜天数大于 230 d, 耕作方式为水稻-冬小麦轮作。土壤有关基本性质为: 砂粒 (1 ~ 0.05 mm) 92 g/kg, 粉砂粒 (0.05 ~ 0.001 mm) 657 g/kg, 粘粒 (< 0.001 mm) 251 g/kg, 容重 1.2 g/cm³, 有机 C 15 g/kg, 全 N 1.59 g/kg, 全 P 1.23 g/kg, 速效 P 10.4 mg/kg, pH 6.8。

1.2 田间试验处理

试验采用裂区设计。CO₂ 浓度为主处理, N 肥料处理为副处理。FACE 圈 (高 CO₂ 圈) 比对照大气升高 200 μmol/mol, FACE 和 Ambient 圈 (对照圈, 当前周围大气 CO₂ 浓度) 内设两个 N 水平分别是: 常规 N (NN, 250 kg/hm²), 低 N (LN, 150 kg/hm²); P 水平为 150 kg/hm², 即组合成两个处理: LN, NN。复合肥、尿素和磷酸氢二铵分 4 次施用, 分别在水稻移栽前 1 d、移栽后 5 d、51 d 和 61 d 作为基肥、苗肥、拔节肥和穗肥施用; 施肥安排为: LN 和 NN 处理在第 1 次和第 3 次分别施复合肥 3/5 和 2/5, 第 2 次施 2/3 尿素和磷酸氢二铵, 第 4 次施

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

尿素 1/3。移栽行距为 25 cm, 株距为 16.7 cm, 合 24 穴/m²。

1.3 土样采集与分析

水稻实验, 供试品种为高产稻新品系 99-15。2001 年 6 月 13 日水稻移栽, 移栽后 27 d、49 d、76 d 和 104 d 分别采样, 分别代表着分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期。每次采土样 3 层: 0~1 cm, 1~5 cm, 5~15 cm, 约 1 kg。取土时, 一个不锈钢铝框插入土壤 10 cm, 把框内的水抽出去, 用铲子取表层土, 接着亚表层, 再取低层土。同一肥料处理的同一层土混在一起。挑出可见的所有物质后, 新鲜土壤保存在 4~5℃待测。每次取土后在新鲜情况下带回实验室尽快测土壤可溶性 C、N、P, 开始测定的时间不超过 2 d。

土壤可溶性 C、N 用 K₂SO₄ 溶液提取^[7]: 称 3 份新鲜土 (相当于烘干土 25 g) 用 100 ml 0.5 M K₂SO₄ 溶液提取, 在 25℃ 300 r/min 条件下震荡 30 min, 过滤。可溶性 P 用 NaHCO₃ 溶液提取^[8]: 称 3 份新鲜土 (相当于烘干土 25 g) 用 100 ml pH 为 8.5 的 0.5M NaHCO₃ 溶液提取, 震荡时要加无 P 活性炭, 在 25℃ 200 r/min 条件下震荡 30 min, 过滤。提取液很快测定的保存在 4~5℃, 当时来不及测定的, 提取液放在 -15~-20℃ 下保存待测。提取液中的全 C 用“高温外热重铬酸钾氧化-容量法”, 全 N 用分段流动分析仪 (荷兰, Skalar 公司) 测得, 全 P

用钼兰比色法-7530 紫外分光光度法测得^[9]。

1.4 根系分泌的总 C 和总糖收集和测定

2002 年水稻生长季, 在常规 N (NN) 水平为 250 kg/hm²、P 水平为 70 kg/hm² 施肥处理下, 将预先在根袋中移栽的水稻连同根袋一起取出, 用自来水小心冲洗干净, 再用蒸馏水洗 3 次, 放入 0.01 M CaSO₄ 溶液中, 在高 CO₂ 和对照条件下培养 4 h, 收集溶液, 用冷冻干燥仪 (The SuperModulyo Freeze Dryer) 浓缩后分析测定, 总 C 用“高温外热重铬酸钾氧化-容量法”, 总糖用蒽酮法^[10]。

1.5 数据分析

本文采用 ANOVA、F-检验和 LSD 方法, 在不同 CO₂ 浓度条件下对土壤可溶性 C、N、P 的数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度升高对土壤可溶性 C 的影响

表 1 显示, 在 LN 和 NN 处理下, CO₂ 浓度升高对 0~1, 1~5 和 5~15 cm 层土壤可溶性 C 的影响明显不同。LN 处理下高 CO₂ 使水稻土壤可溶性 C 在整个生长期各土层均增加, 0~5 cm 增加幅度最大, 但在 NN 处理下, 土壤下层 1~15 cm 降低, 其中 5~15 cm 降低 23.6%。结果表明高 CO₂ 降低了土壤 5~15 cm 的可溶性 C, 增施 N 肥加速了土壤可溶性 C 含量的减少。

表 1 CO₂ 浓度升高对土壤可溶性 C 的影响

Table 1 Effects of elevated CO₂ on content of available soil C

施肥处理	土壤层次 (cm)	CO ₂	水稻移栽后不同时间土壤可溶性 C 的含量(mg/kg)				(F-A) / A (%)
			27d	49d	76d	104d	
LN	0~1	F	106 ± 60	64.7 ± 43.9	52.9 ± 11.9	43.5 ± 22.9	16.5
		A	90.0 ± 24.6	59.6 ± 56.8	34.3 ± 7.7	45.7 ± 14.3	
	1~5	F	149 ± 163	53.0 ± 14.3	57.1 ± 16.6	33.2 ± 19.0	42.2
		A	78.8 ± 35.1	45.4 ± 23.0	44.2 ± 4.5	37.3 ± 17.2	
	5~15	F	88.5 ± 86.3	49.0 ± 32.5	43.1 ± 16.3	31.4 ± 11.8	1.1
		A	77.3 ± 24.2	39.6 ± 25.8	48.2 ± 14.1	44.6 ± 20.1	
	(F-A) / A (%)		39.8	15.3	20.8	-15.4	
NN	0~1	F	73.5 ± 26.5	42.3 ± 6.4	75.8 ± 24.6	40.1 ± 14.7	8.5
		A	82.5 ± 28.8	42.4 ± 9.4	59.8 ± 20.9	28.8 ± 12.8	
	1~5	F	63.5 ± 7.0	29.5 ± 6.7	53.4 ± 19.8	37.5 ± 17.8	-9.7
		A	56.8 ± 30.0	43.7 ± 1.8	42.8 ± 15.4	60.4 ± 40.1	
	5~15	F	47.6 ± 5.5	21.6 ± 7.3	51.9 ± 16.8	35.4 ± 28.2	-23.6
		A	82.3 ± 31.5	31.5 ± 16.5	56.3 ± 13.1	34.5 ± 2.7	
	(F-A) / A (%)		-16.7	-20.6	14.0	-8.7	

注: 数据表示为平均值±标准偏差(SD); F-FACE, A-Ambient; 下同。

表 1 结果表明, 在不同 N 处理下高 CO₂ 对土壤可溶性 C 在分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期含量的影响相反。LN 处理下, 成熟期降低 15.4%, 但是 NN 处理下, 分蘖期、拔节期、和成熟期分别降低 16.7%、20.6%、和 8.7%。表明增施 N 肥, 高 CO₂ 使土壤可溶性 C 含量在水稻生长季提前降低。

表 2 显示, CO₂ 浓度升高使通过根系分泌物进入土壤的活性 C 增加, 其中总 C 在水稻移栽后 46 d、79 d 和 108 d 分别增加 26.2%、18.0% 和 0.46%; 总糖分别增加 13.4%、38.1% 和 13.7%, 表明高 CO₂ 使进入土壤的活性 C 增加, 有利于土壤微生物活动。

表 2 2002 年高 CO₂ 对水稻根系分泌物的影响

Table 2 Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on root exudates of rice in 2002

水稻移栽后天数 (d)	CO ₂	水稻根系分泌总 C 和总糖			
		总 C (g/m ²)	(F-A) / A (%)	总糖 (mg/m ²)	(F-A) / A (%)
46	F	40.70 ± 8.38	26.2	1.029 ± 0.162	13.4
	A	32.26 ± 7.68		0.908 ± 0.213	
79	F	64.54 ± 11.78	18.0	3.623 ± 1.347	38.1
	A	54.72 ± 3.26		2.624 ± 0.145	
108	F	26.71 ± 6.93	0.46	1.163 ± 0.193	13.7
	A	26.59 ± 8.44		1.023 ± 0.494	

2.2 CO₂ 浓度升高对土壤可溶性 N 的影响

在不同 N 处理下, 高 CO₂ 浓度对不同土壤层可溶性 N 的影响不同 (表 3)。结果显示, 高 CO₂ 使土壤可溶性 N 总体上降低, LN 处理下, 土壤 0~5 cm 降低幅度大于 NN 处理, 表明在高 CO₂ 条件下, 作物增加对表层 N 的吸收。同时, 从水稻不同生长期看, 在 LN 和 NN 处理下, 高 CO₂ 对水稻分蘖期土壤可溶性 N 降低的幅度最大, 分别为 46.2% (差异

显著, $p < 0.05$) 和 28.0%, 在拔节期、抽穗期和成熟期, 高 CO₂ 的影响范围不超过 12% (表 3)。表明在水稻前期—主要是分蘖期, CO₂ 浓度升高明显降低了土壤可溶性 N 含量。

2.3 CO₂ 浓度升高对土壤可溶性 P 的影响

高 CO₂ 浓度对土壤可溶性 P 的影响与对可溶性 N 的影响有些不同 (表 4)。在 LN 处理下, 高 CO₂ 使土壤各层可溶性 P 没有降低, 反而增加, 而且土

表 3 CO₂ 浓度升高对土壤可溶性 N 的影响

Table 3 Effects of elevated CO₂ on content of available soil N

施肥处理	土壤层次 (cm)	CO ₂	水稻移栽后不同时间土壤可溶性 N 的含量(mg/kg)				(F-A) / A (%)
			27d	49d	76d	104d	
LN	0~1	F	31.6 ± 18.2	21.1 ± 0.7	11.9 ± 0.9	11.3 ± 2.4	-17.6
		A	56.8 ± 35.5	21.8 ± 5.2	13.0 ± 3.5	13.2 ± 2.4	
	1~5	F	25.0 ± 19.2	16.4 ± 2.1	9.2 ± 1.9	11.3 ± 2.8	-15.9
		A	45.0 ± 13.2	19.2 ± 3.4	10.3 ± 1.7	10.6 ± 2.2	
	5~15	F	18.5 ± 10.1	20.5 ± 4.2**	10.4 ± 0.9	10.4 ± 2.5	4.0
		A	36.8 ± 13.9	13.4 ± 2.1	9.6 ± 1.5	10.0 ± 0.4	
(F-A) / A (%)			-46.2*	11.7	-3.8	-1.0	
NN	0~1	F	40.7 ± 27.8	23.8 ± 4.0	13.0 ± 2.3	13.4 ± 2.2	-8.5
		A	61.8 ± 28.8	24.3 ± 1.7	12.1 ± 2.1	14.2 ± 2.7	
	1~5	F	35.8 ± 23.3	17.7 ± 1.6	10.2 ± 0.1	10.0 ± 1.4	-8.7
		A	52.5 ± 17.1	16.2 ± 1.1	10.0 ± 1.5	11.6 ± 5.1	
	5~15	F	23.8 ± 12.8	17.9 ± 4.1	9.8 ± 2.3	10.0 ± 1.3	-4.5
		A	29.0 ± 15.4	16.4 ± 1.6	10.7 ± 0.6	10.1 ± 4.4	
(F-A) / A (%)			-28.0	5.5	0.2	-6.5	

* 表示 F (FACE) 与 A (Ambient) 在 $p < 0.05$ 水平有显著差异; **表示 F (FACE) 与 A (Ambient) 在 $p < 0.01$ 水平有显著差异; 下同。

表 4 CO₂ 浓度升高对土壤可溶性 P 的影响Table 4 Effects of elevated CO₂ on content of available soil P

施肥处理	土壤层次 (cm)	CO ₂	水稻移栽后不同时间土壤可溶性 P 的含量(mg/kg)				(F-A)/A (%)	
			27d	50d	77d	105d		
LN	0~1	F	18.1 ± 5.8	6.93 ± 1.76	6.07 ± 0.94	5.97 ± 1.87	5.5	
		A	13.1 ± 4.2	8.19 ± 2.57	6.98 ± 1.63	5.32 ± 0.53		
	1~5	F	10.1 ± 3.6	4.51 ± 1.40	3.64 ± 0.58	4.89 ± 1.48*	20.0	
		A	10.6 ± 1.4	4.77 ± 2.85	4.36 ± 0.99	2.36 ± 0.82		
	5~15	F	9.44 ± 4.89	5.93 ± 4.12	4.72 ± 1.38	5.67 ± 1.11	43.8	
		A	7.71 ± 0.88	3.21 ± 1.23	3.76 ± 0.25	3.99 ± 1.55		
	(F-A) / A (%)			18.6	21.4	-1.3	53.7	
	NN	0~1	F	17.3 ± 2.1	10.5 ± 2.9	5.61 ± 0.39	6.69 ± 1.00	-10.6
A			21.5 ± 5.0	12.7 ± 3.3	5.54 ± 1.31	7.18 ± 0.10		
1~5		F	12.4 ± 2.1**	5.72 ± 2.11	5.22 ± 1.64	5.06 ± 0.92	3.0	
		A	21.5 ± 5.0	5.12 ± 2.04	4.30 ± 1.16	4.16 ± 1.35		
5~15		F	10.7 ± 1.9	4.28 ± 1.59	5.42 ± 1.85	5.67 ± 1.86	9.4	
		A	9.30 ± 2.67	6.05 ± 1.59	4.64 ± 2.42	4.20 ± 1.13		
(F-A) / A (%)			-15.7	-11.6	13.1	16.6		

壤下层 5~15 cm 增加幅度最大, 达到 43.8%。但是在 NN 处理下土壤 0~1 cm 降低 10.6%, 且在 1~15 cm 增加幅度也没有 LN 处理大。表明增施 N 肥, CO₂ 浓度升高可能会通过水稻生物量的增加促进对土壤可溶性 P 的吸收。

总体上, CO₂ 浓度升高使土壤可溶性 P 随水稻生长而增加的幅度升高(表 4)。在 LN 处理下由分蘖期的 18.6% 升高到成熟期的 53.7%, 其中在抽穗期没有升高反而降低了 1.3%; 但是 NN 处理下, 在分蘖期和拔节期分别降低 15.7% 和 11.6%, 到抽穗期和成熟期才分别增加 13.1% 和 16.6%。表明增施 N 肥情况下, CO₂ 浓度升高可以促进作物对前期土壤 P 的吸收。

3 讨论

众所周知, CO₂ 是植物进行光合作用的底物, 其浓度的升高直接促进生物量的增加, 更多的同化产物进入土壤^[4, 5], 为土壤有机生物提供了额外的 C, 会间接地影响土壤过程^[11]。本文结果显示, 高 CO₂ 对水稻土壤的可溶性 C 没有产生显著影响, Cheng 等^[12]和 Hoque 等^[13] 在箱式和田间试验中也得出同样的结果。本实验结果表明由于在营养生长期水稻生长增加, 更多的同化产物就会进入土壤, 增加土壤中的可溶性 C 含量; 同时当土壤中的 N 含量增加(NN 处理)时, 土壤中的 C 会因为 N 的增加而加速分解或被生物固定, 从而导致土壤可溶性

C 含量降低。可能会影响植物-土壤-大气系统 C 的流通^[14]。土壤中的可溶性 C 是有机质分解第一步的产物, 在土壤表层, 土壤温度较高, 生物活性高, 又存在许多海藻, 由于海藻的增加有利于土壤可溶性 C 的增加^[15], 所以表层可溶性 C 含量增加幅度大, 底层增加幅度低或没有增加。

土壤中提取的可溶性 N 是由矿物态 N 和可溶性有机 N 组成, 来自于有机生物体的分泌或自我分解产生的氨基酸和小分子缩氨酸, 以及由肥料或有机物分解提供的 NH₄⁺。由于可溶性 N, 很容易被生物吸收、分解, 因此生物活性的变化对它的影响很大, 一般来说, 土壤表层可溶性 N 应该是较高的, 高 CO₂ 浓度使它降低的可能原因是: 高 CO₂ 促进土壤表层横向生长根系的伸展和生物量的增加, 导致吸收更多的可溶性 N; 同时由于水稻分蘖期(或者生长前期)分蘖数和生物量的增加^[16], 也是土壤可溶性 N 在此时不同土壤层次降低的一个原因, 因为生物量的增加必然需要大量的 N 元素, 而且 N 在水稻器官中的吸收也明显增加^[17]; 另一方面由于土壤表层和水稻生长前期土壤可溶性 C 的增加, 从反面可以说明, 如果可溶性 N 增加将不会有可溶性 C 的增加, 因此可溶性 N 降低也是合理的。在水稻生长后期, 高 CO₂ 浓度条件下土壤可溶性 N 降低幅度减小, 据报道在水稻生长的后期 N 矿化会增加^[12], 但是本文的结果没有显示土壤可溶性 N 增加, 只是降低的幅度减小, 这可能与矿化的 N 很快部分被生物吸收

固定或部分损失有关。再者,随着进入土壤的 C 增加^[18,19],为微生物提供了 C 源和能量,植物和生物利用的 N 会增加,土壤中的可溶性 N 也可能会降低。

Hu 等^[20]也报道高 CO₂ 浓度条件下,土壤可溶性 N 含量降低,他们的实验结果显示,在 Ambient 中的土壤可溶性 N 含量高于 FACE 31%。本文中不同 N 水平下总体上降低的幅度在 1.0% ~ 46.2%,表明 CO₂ 浓度升高会改变植物和土壤生物对 N 的竞争关系,有助于植物对 N 的利用,而且现有实验中的施肥水平可能仍有进一步提高的余地。

已有研究表明在包括热带和温带的许多生态系统中,都缺乏可溶性 P^[21-23],土壤中的 P 在 A 层(耕层)有一半以上是有机 P^[24],这类 P 通过脂键与土壤有机物质结合在一起,不易为植物吸收利用,但它可被根系、菌根和细菌分泌的磷酸酶活化。酸性磷酸酶的分泌虽然在进入根际的总 C 中占很少的一部分,但是要把 P 从土壤有机物质的磷酸脂键中释放出来,为植物所吸收利用,这种过程是非常重要的,在受到 P 限制的环境中显得特别重要^[25]。鉴于根系在土壤中是微生物活动的主要 C 源,很可能根系生物量和分泌物的增加在某些土壤上会促进更多磷酸酶的活性,特别是根际土壤。除了酸性磷酸酶的行为外,从高度缺 P 土壤中的 Al/Fe 复合体中释放出无机 P,柠檬酸盐的分泌也很重要^[26]。本实验结果显示高 CO₂ 浓度使土壤 1 ~ 15 cm 和水稻成熟期的土壤可溶性 P 含量增加,同时水稻对 P 的吸收也增加^[17];而且在分蘖和拔节期 LN 处理下土壤可溶性 P 的增加和 NN 处理下降低,表明可能存在养分之间的协助关系,即增施 N (NN 处理)有利于植物对 P 的吸收,这样的结果揭示高 CO₂ 浓度条件下,在 NN 处理下农田施肥可以将 P 肥施用量适当提前,并同样重视大量元素的平衡施用。

4 初步结论

(1) CO₂ 浓度升高使土壤表层可溶性 C 含量增加,土壤 5 ~ 15 cm 的可溶性 C 含量倾向于降低;增加 N 肥施用 (NN 处理) 更易于使土壤可溶性 C 含量降低,土壤生物活性可能有所提高。

(2) CO₂ 浓度升高使水稻土壤中的可溶性 N 含量降低,在低 N 处理和土壤表层降低幅度较大, N 肥施用仍有提高的余地。

(3) CO₂ 浓度升高使水稻成熟期土壤可溶性 P 含量增加,但是常规 N 处理下会降低水稻生长前期和

土壤表层的可溶性 P,在增加施用 N 肥的同时,要考虑适当增加 P 肥的施用,且需要适当增加水稻生长前期 P 肥的施用量。

参考文献

- Mendelsohn R, Rosenberg NJ. Framework for integrated assessments of global warming impacts. *Climate Change*, 1994, 28: 15 ~ 44
- Lekkerkerk LJA, Van De Geijn SC, Van veen JA. Effects of elevated atmospheric CO₂-levels on the carbon economy of a soil planted with wheat. In: Bouwman AF. ed. soils and the greenhouse effect. Wiley, New York, 1990, 423 ~ 429
- Li FS, Kang SZ. Effects of atmospheric CO₂ enrichment, applied nitrogen and soil moisture on dry matter accumulation and nitrogen uptake in spring wheat. *Pedosphere*, 2001, 12 (3): 207 ~ 218
- Chander K, Brookes PC. Plant inputs of carbon to metal-contaminated soil and effects on the soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 1991, 23: 1169 ~ 1177
- Van Ginkel JH, Gorissin A, Van veen JA. Carbon and nitrogen allocation in *lolium perenne* in response to elevated atmospheric CO₂ with emphasis on soil carbon dynamics. *Plant soil*, 1997, 188: 299 ~ 308
- 刘钢, 韩勇, 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 I. 系统结构与控制. *应用生态学报*, 2002, 13 (10): 1253 ~ 1258
- Inubushi K, Brookes PC, Jenkinson DS. Soil microbial biomass C, N and ninhydrin-N in aerobic and anaerobic soils measured by the fumigation-extraction method. *Soil Biol. Biochem.*, 1991, 23: 737 ~ 741
- Brookes PC, Powlson DS, Jenkinson DS. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1982, 14: 319 ~ 329
- 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000, 166 ~ 168
- 许光辉, 郑洪元主编. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社, 1986, 192 ~ 194
- 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
- Cheng W, Inubushi K, Yagi K, Sakai H, Kobayashi K. Effects of elevated CO₂ on biological nitrogen fixation, nitrogen mineralization and carbon decomposition in

- submerged rice soil. *Bio. Fertile Soils*, 2001, 34: 7 ~ 13
- 13 Hoque MM, Inubushi K, Miura S, Kobayashi K., Kim HY, Okada M, Yabashi S. Biological dinitrogen fixation and soil microbial biomass carbon as influenced by free-air carbon dioxide enrichment (FACE) at three levels of nitrogen fertilization in a paddy field. *Bio. Fertile Soils*, 2001, 34: 453 ~ 459
- 14 Wang XZ, Curtis PS, Vogel CS. Effects of soil fertility and atmospheric CO₂ enrichment on leaf, stem and root dark respiration of *populus tremuloides*. *Pedosphere*, 2001, 11(3): 199 ~ 208
- 15 Cheng W, Chander K, Inubushi K. Effects of elevated CO₂ and temperature on microbial biomass nitrogen and nitrogen mineralization in submerged soil microcosms. *Soil microorganisms*, 2000, 54: 51 ~ 59
- 16 黄建晔, 扬洪建, 董贵春, 王余龙, 朱建国, 杨连新, 单玉华. 开放式空气 CO₂ 浓度增高对水稻产量形成的影响. *应用生态学报*, 2002, 13 (10): 1210 ~ 1214
- 17 谢祖彬, 朱建国, 张雅丽, 马红亮, 刘钢, 韩勇, 曾青, 蔡祖聪. 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
- 18 Paterson E, Hall JM, Rattray EAS, Griffiths BS, Ritz K, Killham K. Effect of elevated CO₂ on rhizosphere carbon flow and soil microbial processes. *Global Change Biol.*, 1997, 3: 363 ~ 377
- 19 Diaz S, Grime JP, Harris J, McPherson E. Evidence of a feedback mechanism limiting plant response to elevated carbon dioxide. *Nature*, 1993, 364: 616 ~ 617
- 20 Hu S, Chapin III FS, Fireston MK, Field CB, Chiariello NR. Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO₂. *Nature*, 2001, 409: 188 ~ 191
- 21 Buol F, Hole F, McCracken R. Soil genesis and classification. Iowa State University Press, Ames, USA. 1980, 243
- 22 Sanchez P. Properties and management of soils in the tropics. Wiley and Son, NY, USA. 1976, 254 ~ 295
- 23 Vitousek PM, Howarth RW. Nitrogen limitation on land and in the sea-how and it occur. *Biogeochemistry*, 1991, 13: 87 ~ 115
- 24 Barber SA. Soil nutrient bioavailability. A mechanistic approach. John Wiley and Sons, New York. 1984, 398
- 25 Cardon ZG. Influence of rhizodeposition under elevated CO₂ on plant nutrition and soil organic matter. *Plant and Soil*, 1996, 187: 277 ~ 288
- 26 Marschner H. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press, San Diego, USA. 1995

EFFECT OF FACE (FREE AIR CARBON-DIOXIDE ENRICHMENT) ON SOLUBLE C, N AND P IN SOIL DURING RICE GROWING

MA Hong-liang ZHU Jian-guo XIE Zu-bin ZHANG Ya-li LIU Gang ZENG Qing

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract Effect of elevation of atmospheric CO₂ on soluble C, N and P in paddy soil through a FACE (Free air carbon-dioxide enrichment) system was studied by comparing FACE with Ambient in content of soil soluble C, N and P, between different rice growing stages. The results show that compared to the treatment of ambient air, elevated CO₂ results in increasing soluble C in the upper soil layer (0~1cm) and decreasing soluble C in the lower soil layer (5~15cm). With a higher rate of N fertilizer application, elevated CO₂ is more likely to decrease the content of soluble C in the soil. Elevated CO₂ decreases soluble N in paddy soil under different N levels by the most at 0-1cm soil layer and in LN treatment. The decreasing in the content of soluble N in the soil indicates that it is unadvisable to increase the application rate of N fertilizer under increasing atmospheric CO₂ concentration. The content of soluble P increased due to elevated CO₂ at the rice ripening stage. But it decreased at the tillering and jointing stages and in the soil layer of 0~1cm under NN treatment. The uptake of P by rice increased under higher N application rate (NN treatment) due to elevated CO₂.

Key words Elevated atmospheric CO₂, Paddy soil, Soluble soil C, N and P