

大气 O₃ 浓度升高对稻季耕层土壤溶液 Ca Mg 浓度的影响

尹微琴¹, 王小治^{1,2}, 孙 伟¹, 盛海君¹, 封 克¹, 朱建国²

(1.江苏省扬州农业环境安全技术服务中心/扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.中科院南京土壤研究所 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘 要:利用中国稻/麦轮作系统 O₃-FACE(Ozone-Free Air Concentration Enrichment)试验平台,研究了大气 O₃ 浓度升高(比周围大气高 50%)对稻季不同生育期耕层土壤溶液中 Ca、Mg 浓度的影响。结果表明,大气 O₃ 浓度升高对稻田 0~15 cm 耕层土壤溶液 Ca 浓度无明显影响,但 Mg 浓度呈现降低趋势;降低了 15 cm 处土壤溶液 Ca、Mg 浓度,其中对 Mg 浓度的降低幅度为 20.97%,且达显著水平;大气 O₃ 浓度升高可改变耕层土壤溶液中 Ca、Mg 离子在不同深度的分布,降低 15 cm 处土壤溶液 Ca、Mg 浓度与 5 cm 处比值,降低幅度分别为 13.50%、34.29%。文章指出大气 O₃ 浓度升高会对稻田生态系统土壤 Ca、Mg 元素地球化学循环产生重要影响,并可能因此影响稻米产量和品质。

关键词:O₃ 浓度升高;土壤溶液;Ca;Mg;稻田生态系统

中图分类号:S153.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)10-2005-06

Effect of O₃ Enrichment on Ca and Mg Concentration in Soil Solution at Arable Layer in the Rice Season

YIN Wei-qin¹, WANG Xiao-zhi^{1,2}, SUN Wei¹, SHENG Hai-jun¹, FENG Ke¹, ZHU Jian-guo²

(1.Yangzhou Technical Service Center for Agro-Environment Safety of Jiangsu Province/College of Environment Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The objective of this study is to investigate the effects of atmospheric elevated O₃ on concentrations of Ca, Mg in soil solution under the wheat-rice rotation. Ozone Free-air Concentration Enrichment(O₃-FACE) system at Xiaoji town, Jiangdu County, Jiangsu Province, China (32°35'5''N, 119°42'0''E) was used in this study. The target O₃ for FACE plots was 50% higher than that in the ambient O₃. Concentrations of Ca and Mg in soil solution at different depths(5 cm and 15 cm) were determined under ambient and elevated ozone concentration treatment at different stages of the rice season in 2007. The results showed that elevated atmospheric O₃ had no obvious influence on concentration of Ca in 0~15 cm soil solution, while had a trend to decrease the concentration of Mg in 0~15 cm soil solution. Elevated atmospheric O₃ decreased the concentration of Ca in 15 cm soil solution, and significantly decreased the concentration of Mg in 15 cm soil solution with 20.97% (P=0.022). Elevated atmospheric O₃ changed the distribution of Ca, Mg in soil solution at different depths in arable layer, and decreased the ratio of Ca, Mg concentration in soil solution at 15 cm depth to that at 5 cm depth. FACE treatment decreased the ratio of 15 cm/5 cm of Ca and Mg by 13.50% and 34.29%, respectively. It was indicated that elevated atmospheric O₃ had a potential impact on soil Ca, Mg in the biogeochemical cycles, and might affect rice yield and quality.

Keywords: elevated O₃; soil solution; Ca; Mg; paddy ecosystem

近几十年来, 由于化石燃料的大量使用导致近

地层大气 O₃ 浓度以每年 0.3%~2%的速度增长^[1], O₃ 已成为东亚乃至全世界范围内最重要的大气污染物之一, 估计到 2100 年 O₃ 浓度将在现有基础上增加 40%~60%^[2]。目前有关 O₃ 污染对农业生态系统影响的研究主要集中在地上部分, 对地下部分的研究相对较少^[3-5]。事实上, O₃ 浓度升高对生态系统地下部分的影响也非常重要^[6], 因为地下过程直接关系到植物的养分吸收、水分利用和生态系统的物质循环, 而且臭

收稿日期:2010-05-05

基金项目:国家自然科学基金重大国际合作项目(40120140817);土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放课题(0551000005);江苏省“青蓝工程”资助(苏教 2007-2);扬州大学科技基金(2008CXJ015, 2009CXJ016)

作者简介:尹微琴(1971—),女,硕士,农艺师,主要从事土壤元素循环及农业面源污染研究。E-mail:wqyin@yzu.edu.cn

通讯作者:王小治 E-mail:xzwang@yzu.edu.cn

氧污染对生态系统地下过程的影响存在累积效应^[7]。钙和镁主要以碳酸盐和硅酸盐的形式存在于土壤中,是土壤中最丰富的碱土金属元素^[8]。钙和镁作为植株的必需营养元素,对水稻的健康生长极为重要,其中,钙能提高植物的抗逆性^[9-10],镁是光合作用过程中不可缺少的元素^[11],与稻米的产量和品质密切相关^[12-13]。土壤溶液中养分含量与作物生长有很好的相关性,因此开展大气 O₃ 浓度升高条件下土壤溶液化学组成的相关研究对于正确阐述农田生态系统对大气 O₃ 浓度升高的响应具有重要意义。迄今为止,有关大气 O₃ 浓度升高对稻田耕层土壤溶液 Ca、Mg 浓度的影响尚未见报道。

为此,本文利用目前世界上唯一的稻麦轮作系统开放式 O₃ 浓度增加的 FACE (Free-Air Concentration Enrichment) 试验研究平台,研究了大气 O₃ 浓度升高对水稻生长季节耕层土壤溶液 Ca、Mg 浓度的影响,以期进一步认识未来气候变化下稻田 Ca、Mg 元素的地球化学行为,为气候变化下稻田土壤生产力培育和农业生产中的肥料施用提供决策参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江苏省扬州市小纪镇马陵村良种场(32°35'5"N, 119°42'0"E)。试验区年降雨量约 980 mm,年平均温度约 14.9℃,年均日照时间>2 100 h,年无霜期 220 d。土壤类型为清泥土,0~15 cm 耕层土壤的基本性状为:pH(H₂O)7.2,有机碳 18.4 g·kg⁻¹,全氮 1.45 g·kg⁻¹,全磷 0.63 g·kg⁻¹,全钾 14.02 g·kg⁻¹,速效磷 10.1 mg·kg⁻¹,速效钾 70.5 mg·kg⁻¹,容重 1.16 g·cm⁻³,土壤质地为砂壤(2~0.02 mm 砂粒 57.8%,0.02~

0.002 mm 粉粒 28.5%,<0.002 mm 粘粒 13.7%)。

1.2 试验平台

臭氧 FACE 平台于 2007 年 3 月开始运行,分设 3 个臭氧处理(FACE)圈和 3 个对照(Ambient)圈,每圈直径为 14 m 正八角形,各圈间隔>70 m,以减少臭氧释放对其他圈的影响。FACE 圈采用反映近地层 O₃ 浓度实情的日变化熏蒸方式,置于作物冠层上方约 50 cm 处的 8 根放气管道在晴天每日 09:00~19:00 释放 O₃,使圈内浓度始终比 Ambient 圈内浓度高 50%,且 90%的放气时间内浓度的误差控制在目标值的 20%以内。Ambient 圈无放气管道,环境条件与自然状态完全一致。臭氧放气时间为 2007 年 7 月 1 日—10 月 17 日,共计 109 d。对照圈和 FACE 圈内臭氧变化情况见图 1。

1.3 试验布置

水稻品种为武运粳 21 号,大田育秧,6 月 15 日人工移栽,行距 25 cm,株距 16.7 cm,24 穴·m⁻²,1 苗·穴⁻¹。施氮量为 N 200 kg·hm⁻²,分基肥(6 月 14 日)、分蘖肥(6 月 21 日)和穗肥(7 月 28 日)3 次施用。基肥和分蘖肥占总施氮量的 60%,穗肥占 40%。施 P、K 量均为 70 kg·hm⁻²,P、K 肥全做基肥施用。

1.4 土壤溶液的采集与分析

在水稻移栽后将根际土壤溶液取样器(RHIZON SMS-MOM,荷兰 Eijkelkamp Agrisearch Equipment 公司)分两层(离地表 5 cm 和 15 cm 的耕层土壤处)插入根部土壤,同一圈层中设 2 个重复。分别在水稻生长的拔节期(7 月 22 日)、抽穗期(8 月 15 日)和乳熟期(9 月 10 日),原位采集 5 cm 和 15 cm 处土壤溶液,将每圈内同一层次的 2 个样品混合后待测。土壤溶液中的 Ca、Mg 采用原子吸收分光光度计(Thermo M

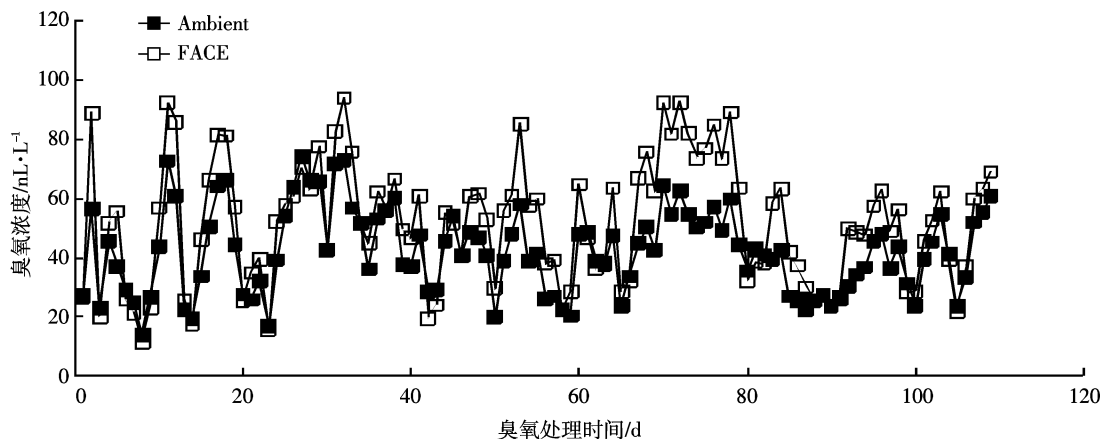


图 1 对照圈和 FACE 圈内臭氧浓度变化情况

Figure 1 O₃ concentration changes in ambient and O₃-FACE

939QZ/989QZ)测定。

1.5 数据处理

用 Excel 2007 对数据进行处理, 使用 SPSS13.0 软件对数据进行 F-检验和 AVOVA 统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤溶液 Ca、Mg 浓度

从图 2 可以看出, 随着水稻生育进程的推进, 5 和 15 cm 处土壤溶液 Ca 浓度均逐渐增加, 且 FACE 处理和对照处理的变化趋势一致; 对照处理 5 cm 处土壤溶液 Mg 浓度有增加的趋势, 但 15 cm 处土壤溶液 Mg 浓度比较稳定, FACE 处理 5 cm 和 15 cm 处土壤溶液 Mg 浓度均随生育期的进行而略有增加。比较 FACE 与对照处理可以发现, 大气 O_3 浓度升高对耕层 5 cm 处土壤溶液 Ca 浓度影响不明显 (图 2A-a), 除在乳熟期 FACE 处理比对照高 15.1% (未达显著水平) 外, 在拔节期和抽穗期两处理浓度均非常接近; FACE 处理 15 cm 处土壤溶液 Ca 浓度在拔节期和抽穗期比对照略低, 在乳熟期略高于对照 (图 2A-b)。从图 2B 可看出, FACE 处理 5 cm 处土壤溶液 Mg 浓度均高于对照, 增加幅度为 3.6%~25.9%, 而 15 cm 处均

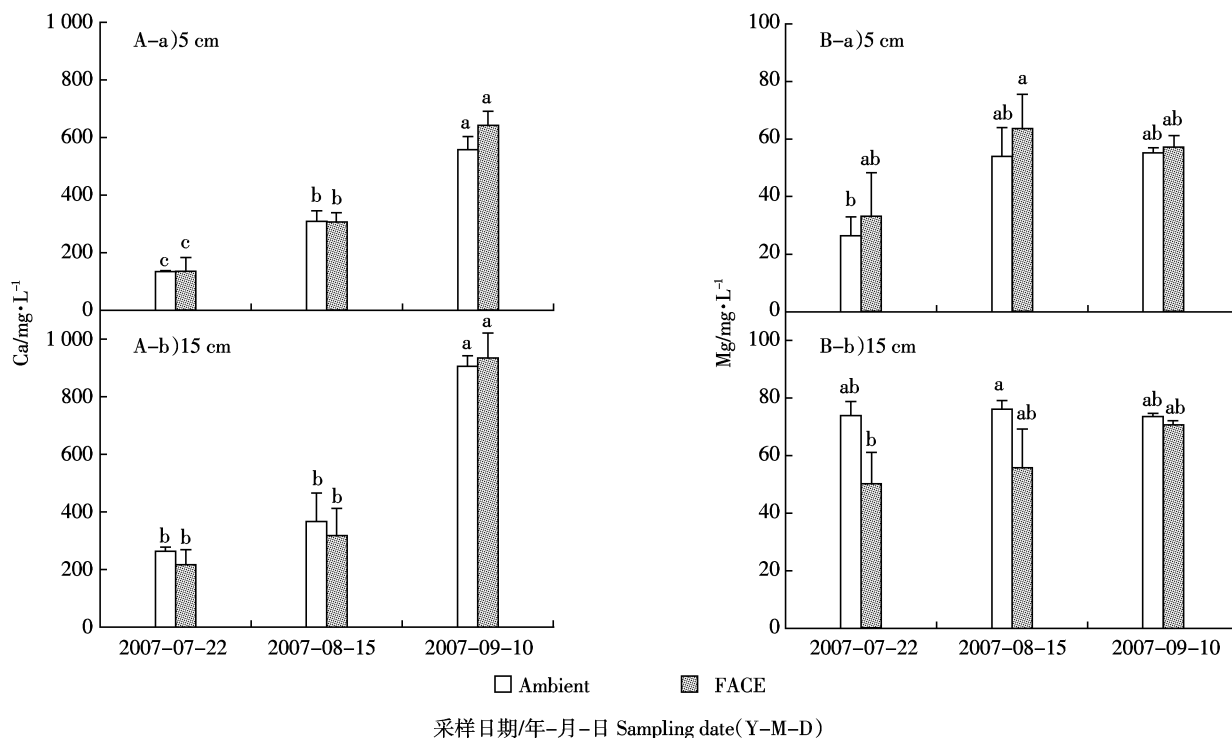
低于对照, 降低幅度为 3.7%~32.4%, 但差异均未达显著水平。

以同一时期 5 cm 处和 15 cm 处土壤溶液 Ca、Mg 的平均浓度作为 0~15 cm 耕层土壤溶液 Ca、Mg 的浓度近似值, 结果如图 3 所示。FACE 处理耕层土壤溶液 Ca 浓度在拔节期和抽穗期分别比对照低 11.8% 和 7.6%, 在乳熟期比对照高 7.7% (图 3A); FACE 处理耕层土壤溶液 Mg 浓度与拔节期和抽穗期分别比对照低 17.1% 和 8.2%, 而在乳熟期与对照十分接近, 仅比对照低 0.6% (图 3B)。

整个稻季土壤溶液 Ca、Mg 浓度综合分析的结果列于表 1。从中可见, FACE 条件下 5 cm 处土壤溶液中 Ca、Mg 浓度分别比对照高 8.27% 和 13.55%; 15 cm 处比对照低 4.39% 和 20.97%, 其中对 15 cm 处土壤溶液 Mg 浓度的降低达显著水平 ($P=0.022$)。对 0~15 cm 耕层土壤溶液而言, FACE 处理对 Ca 浓度基本无影响, 仅增加 0.61%; 降低了 Mg 浓度, 降幅为 7.95%, 但未达显著水平。

2.2 不同深度 Ca、Mg 浓度比例

如图 4 所示, 大气 O_3 浓度升高降低了同一时期 15 cm 处与 5 cm 处土壤溶液 Ca、Mg 浓度的比值。



注: 图中不同字母表示为 $P<0.05$ 显著性差异, 下同。

图 2 2007 年大气 O_3 浓度升高对不同深度耕层土壤溶液 Ca、Mg 浓度的影响 (平均值±标准差, 下同)

Figure 2 Effect of elevated O_3 on concentration of Ca and Mg in soil solution at different depths, 2007 (Values are mean±SE, the same below)

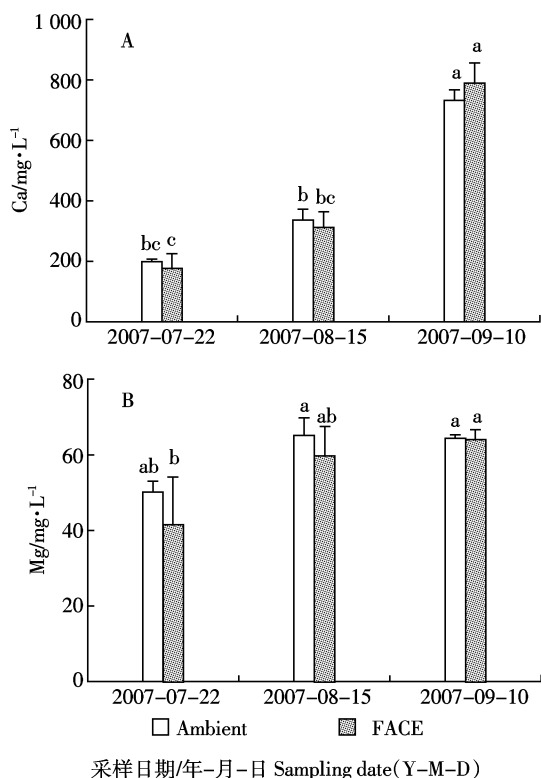


图 3 大气 O₃ 浓度升高对耕层土壤溶液 Ca、Mg 浓度的影响
Figure 3 Effect of elevated O₃ on concentration of Ca and Mg in soil solution at arable layer

表 1 大气 O₃ 浓度升高对稻季土壤溶液 Ca、Mg 浓度的影响
Table 1 Effect of elevated O₃ on Ca and Mg concentration in soil solution in the rice season

深度	处理	Ca	Mg
5 cm	Ambient	333.90±63.73	45.18±5.86
	FACE	361.53±77.71	51.30±7.31
	增幅/%	8.27	13.55
	F 值	0.076(0.787)	0.427(0.523)
15 cm	Ambient	511.35±104.28	74.57±1.73
	FACE	488.89±119.26	58.93±5.9
	增幅/%	-4.39	-20.97
	F 值	0.02(0.889)	6.471(0.022)
0~15 cm	Ambient	422.62±81.14	59.87±2.91
	FACE	425.21±97.25	55.11±5.52
	增幅/%	0.61	-7.95
	F 值	0.000(0.984)	0.582(0.457)

注: 括号内为 *P* 值, 下同。Note: *P* values are in the parentheses, the same below.

FACE 处理在 7 月 22 日、8 月 15 日和 9 月 10 日对 15 cm 处土壤溶液 Ca 浓度与 5 cm 处的比值分别降低 11.6%、19.2%和 11.9%(图 4A),对 Mg 浓度比值分别降低 45.1%、35.7%和 6.5%(图 4B)。尽管未达显著

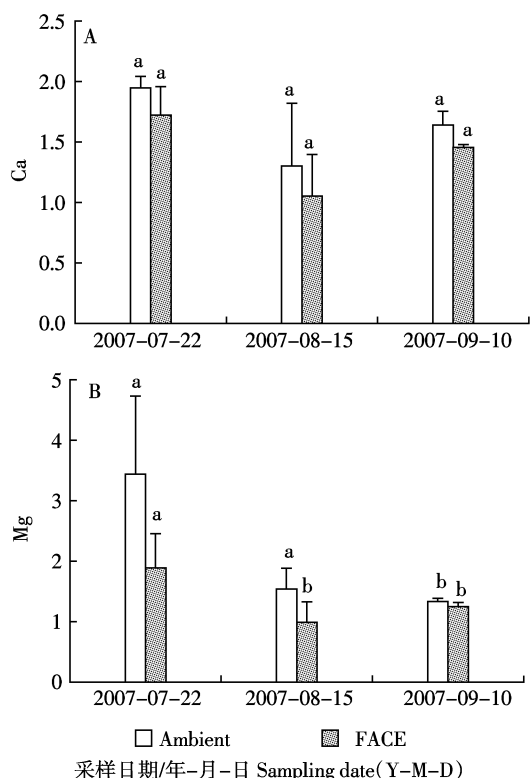


图 4 大气 O₃ 浓度升高对 15 cm 土壤溶液 Ca、Mg 浓度和 5 cm 处浓度比值的影响

Figure 4 Effect of elevated O₃ on ratio of concentration of Ca and Mg in solution at 15 cm depth to that at 5 cm

水平,但表现出较为明显的降低趋势。

整个稻季 15 cm 处与 5 cm 处土壤溶液 Ca、Mg 浓度比值的综合分析结果列于表 2。从中可见,FACE 条件下 15 cm 处与 5 cm 处土壤溶液 Ca 浓度的比值为 1.41,比对照处理低 13.50%;FACE 处理对 15 cm 处与 5 cm 处土壤溶液 Mg 浓度比值的影响程度更大,比对照处理低 34.29%。

3 讨论

目前有关大气 O₃ 浓度升高对稻田土壤中 Ca、Mg

表 2 大气 O₃ 浓度升高对稻季不同深度土壤溶液 Ca 和 Mg 浓度比值的影响

Table 2 Effect of elevated O₃ on ratio of Ca and Mg concentration in soil solution at 15 cm depth to that at 5 cm in the rice season

比值	处理	Ca	Mg
15 cm/5 cm	Ambient	1.63±0.18	2.1±0.51
	FACE	1.41±0.15	1.38±0.23
	增幅/%	-13.50	-34.29
	F 值	0.857(0.368)	1.672(0.214)

元素的影响研究较少,曾有学者认为土壤养分元素(除N素外)在全球气候变化的时间尺度下很难发生显著性的改变^[14],而Rounsevell提出土壤化学过程可能对全球气候变化快速响应的假设^[15]。

大气O₃浓度升高对土壤元素循环的影响可能通过直接影响和间接影响两条途径进行。一是FACE条件下大气O₃进入土壤而产生的直接影响;二是FACE条件影响水稻生物量和根系生长,进而改变土壤生物化学性状,间接影响了土壤溶液中元素组成和浓度。尽管臭氧不能穿透表层土壤而进入深层土壤^[6],但其可能通过植被的通气组织运输并在根际排出,从而对土壤过程产生直接影响^[4]。另外,间接影响对改变土壤养分供应状况可能更为重要。研究显示,臭氧污染导致叶片损伤后,降低了植物根系生物量^[17-18],植物的抵御机制会促使植物吸收更多的营养元素来抵御损伤,植物的自我修复机制也会利用更多的碳来修复损伤和维持光合作用,造成用于根生长的碳减少^[19],降低根冠比^[20],从而使土壤中水分和营养元素的供应状况发生变化^[21]。本研究结果显示,大气O₃浓度升高表现出降低稻田耕层土壤溶液中Mg浓度的趋势,同时降低了15 cm土壤溶液Ca、Mg浓度与5 cm处的比值,对整个稻季15 cm处土壤溶液Mg浓度降低幅度为20.97%,且达显著水平($P=0.022$)。其可能的原因是FACE条件下水稻从耕层土壤吸收较多的Ca和Mg,根据水稻根系的特点,在水稻生长的中后期,根系较多的从土壤10~15 cm处吸收养分,这应是造成本研究不同土层差异的主要原因。

另外,臭氧污染加速叶片衰老,改变植物C/N,影响脱落物的生物降解特性,进而影响其降解速率和土壤中元素的周转^[22]。以根系分泌物、脱落物等形式进入根际土壤的含C物质也会影响根际土壤微生物的活性、组成和生物量,并进而对共生菌根和参与养分循环的细菌以及酶活性等产生影响^[23-27],这将间接影响土壤微生物生物量及微生物所调控的多个土壤过程,从而改变根际土壤的生态和营养动态。臭氧污染会降低植株生物量^[28],势必改变作物对营养元素的需求和吸收状况,如已有研究表明,臭氧浓度升高提高了马铃薯生育中期地上部组织中的Ca浓度^[29],可提高春小麦籽粒中Ca、Mg含量^[30],降低大豆叶片中Ca、Mg浓度^[31]。可见,与土壤元素循环密切相关的土壤生化过程和植物生长状况均会对大气臭氧污染产生响应。

本研究结果表明,大气O₃浓度升高可对土壤溶液Ca、Mg离子在不同深度土壤中的分布产生影响。

从长期来看,将潜在影响土壤Ca、Mg的生物地球化学循环,并可能对稻米产量和品质造成影响。而要搞清大气O₃浓度升高对包括Ca、Mg在内的土壤元素地球化学循环的影响机制,还需结合土壤过程和植物生长等方面进行深入研究。

4 结论

(1)大气O₃浓度升高对稻田0~15 cm耕层土壤溶液Ca浓度无明显影响,但表现出降低耕层土壤溶液Mg浓度的趋势。

(2)大气O₃浓度升高条件下15 cm处土壤溶液Ca浓度降低了4.39%,Mg浓度显著降低了20.97%。

(3)O₃浓度升高可改变耕层土壤溶液中Ca、Mg离子在不同深度的分布,降低15 cm处土壤溶液Ca、Mg浓度与5 cm处比值。

参考文献:

- [1] Thompson A M. The oxidation capacity of the earth's atmosphere: probable past and future changes[J]. *Science*, 1992, 256: 1157-1165.
- [2] Meehl G A, Stocker T F, Collins W D. Global climate projections[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Clark C S, Weber J A, Lee E H, et al. Accentuation of gas exchange gradients in flushes of ponderosa pine exposed to ozone[J]. *Tree Physiology*, 1995, 15: 181-189.
- [4] Timothy G J, Chris F, Andrew L, et al. Impacts of elevated atmospheric ozone on peatland below-ground DOC characteristics[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35: 971-977.
- [5] 陈展, 王效科, 段晓男, 等. 臭氧浓度升高对盆栽小麦根系和土壤微生物功能的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1803-1808.
CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, DUAN Xiao-nan, et al. Ozone effects on wheat root and soil microbial biomass and diversity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1803-1808.
- [6] Hofstra G, Ali A, Wukash R T, et al. The rapid inhibition of root respiration after expose of bean(*Phaseolus vulgaris* L.) plants to ozone[J]. *Atmospheric Environment*, 1981, 15: 483-487.
- [7] Kasurinen A, Gonzales P K, Riikonen J, et al. Soil CO₂ efflux of two silver birch clones exposed to elevated CO₂ and O₃ levels during three growing seasons[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10: 1654-1665.
- [8] 青长乐, 牟树森. 地球化学原理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 37-41.
QING Chang-le, Mou Shu-sen. Geochemical principle[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2001: 37-41.
- [9] Rengel Z. Role of calcium in aluminum toxicity[J]. *New Phytologist*, 1992, 121: 499-513.
- [10] Gong M, Chen S N, Song Y, et al. Effect of calcium and calmodulin on intrinsic heat tolerance in relation to antioxidant system in maize seedling[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1997, 24: 371-379.
- [11] Shaul O. Magnesium transport and function in plants: The tip of the

- iceberg[J]. *Bio Metals*, 2002, 15:309–323.
- [12] 李 延, 唐建海, 李秀芳. 水稻镁肥肥效及镁素营养诊断指标的研究[J]. 中国农学通报, 1994, 10(2):12–14.
- LI Yan, TANG Jian-hai, LI Xiu-fang. Studies on the effect of magnesium fertilizers on rice and magnesium diagnostic target[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 1994, 10(2):12–14.
- [13] 周维全, 谢蕴宏. 滇西南优质大米品质与微量元素的相关性研究[J]. 西南农业学报, 1990, 3(3):23–26.
- ZHOU Wei-quan, XIE Yun-hong. On correlation between trace elements and quality of high-quality rice in southwest Yunnan[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 1990, 3(3):23–26.
- [14] Legros J P, Loveland P J, Rounsevell M D A. Soils and climate change—where next [M]//Rounsevell, M D A and Loveland P J. (eds.). Soil responses to climate change. NATO ASI Series 23. Springer-Verlag, Heidelberg, 1994:257–266.
- [15] Rounsevell M D A, Evans S P, Bullock P. Climate change and agricultural soils: Impacts and adaptation[J]. *Climatic Change*, 1999, 43:683–709.
- [16] Blum U, Tingey D T. A study of the potential ways in which ozone could reduce root growth and modulation of soybean[J]. *Atmospheric Environment*, 1977, 11:737–739.
- [17] Kelting D L, Burger J A, Edwards G S. The effects of ozone on the root dynamics of seedlings and mature red oak[J]. *Forest Ecology and Management*, 1995, 79:197–206.
- [18] Scagel C F, Andersen C P. Seasonal changes in root and soil respiration of ozone-exposed ponderosa pine grown in different substrates[J]. *New Phytologist*, 1997, 136:627–643.
- [19] US Environmental Protection Agency. Air quality criteria for ozone and related photochemical oxidants, Vol. II. Environmental protection agency[R]. Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, 1996. NC. US EPA Report No. EPA/600/P-93/004bF, Washington DC.
- [20] Cooley D R, Manning W J. The impact of ozone on assimilate partitioning in plants: A review[J]. *Environmental Pollution*, 1987, 47(2):95–113.
- [21] Spence R D, Rykiel E J J, Sharpe P J. Ozone alters carbon allocation in loblolly pine: Assessment with carbon-11 labeling[J]. *Environmental Pollution*, 1990, 64(2):93–106.
- [22] Jürg F, Fitzgerald B. Ecological issues related to ozone: Agricultural issues[J]. *Environment International*, 2003, 29:141–154.
- [23] Rogers H H, Runion G B. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere[J]. *Environmental Pollution*, 1994, 83, 155–189.
- [24] 王曙光, 冯兆忠, 王效科, 等. 大气臭氧浓度升高对丛枝菌根(AM)及其功能的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(9):1872–1877.
- WANG Shu-guang, FENG Zhao-zhong, WANG Xiao-ke, et al. Effect of elevated atmospheric O₃ on arbuscular mycorrhiza(AM) and its function[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(9):1872–1877.
- [25] 胡君利, 林先贵, 王俊华, 等. 大气对流层臭氧浓度升高下 AM 真菌对小麦生长的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(11):3393–3398.
- HU Jun-li, LIN Xian-gui, WANG Jun-hua, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal effects on wheat growth in response to elevated tropospheric O₃ concentration[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11):3393–3398.
- [26] 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[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 CO₂ on soil enzyme activities at different nitrogen level[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1):48–53.
- [27] 郑有飞, 石春红, 吴芳芳, 等. 大气臭氧浓度升高对冬小麦根际土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8):4386–4391.
- ZHENG You-fei, SHI Chun-hong, WU Fang-fang, et al. Effects of simulated elevated atmospheric O₃ concentration on soil enzyme activity in winter wheat rhizosphere[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8):4386–4391.
- [28] Shi G Y, Yang L X, Wang Y X, et al. Impact of elevated ozone concentration on yield of four Chinese rice cultivars under fully open-air field conditions[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2009, 131:178–184.
- [29] Fangmeier A, Temmerman L D, Black C, et al. Effects of elevated CO₂ and/or ozone on nutrient concentrations and nutrient uptake of potatoes[J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, 17:353–368.
- [30] Fuhrer J, Lehnher B, Moeri P B, et al. Effects of ozone on the grain composition of spring wheat grown in open-top field chambers[J]. *Environmental Pollution*, 1990, 65(2):181–192.
- [31] Tingey D T, Rodecap K D, Lee E H, et al. Ozone alters the concentrations of nutrients in bean tissue[J]. *Angew Bot*, 1986, 60:481–493.