

O_3 浓度升高对麦季土壤-植株系统中微量元素的影响

尹微琴¹, 张贤臣¹, 王小治^{1,2*}, 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.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, 南京 210008)

摘 要:利用 O_3 -FACE 平台研究近地面臭氧浓度升高(目标值比周围大气高 50%)对 2009—2010 年间麦季各生育期不同深度(0~5 cm, 5~10 cm 和 10~15 cm)耕层土壤微量元素有效性和成熟期地上部分微量元素累积量的影响。结果表明,近地层大气 O_3 浓度增加提高了麦季耕层(0~15 cm)土壤中有效性 Fe、Mn 含量,降低了有效性 Cu、Zn 含量,对 Zn 的减幅达 27.3% ($P<0.05$);大气 O_3 浓度升高对土壤 5~10 cm 土层 DTPA 提取态 Fe、Mn、Cu、Zn 的影响最大;高 O_3 浓度显著降低了 5~10 cm 和 10~15 cm 土壤 DTPA-Zn 含量 ($P<0.05$)。 O_3 浓度升高降低了小麦成熟期生物量和微量元素累积量。对不同层次土壤有效态微量元素和成熟期微量元素累积量对 O_3 浓度升高响应进行了分析,同时指出应从土壤性质和作物生长两个方面进一步研究全球大气环境变化对土壤有效态微量元素的影响机制。

关键词: O_3 浓度升高;微量元素;DTPA;麦季;土壤

中图分类号: X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)11-2094-07

Effect of O_3 Enrichment on DTPA-extractable Microelements in Soil and Accumulation of Microelements of Mature Crops in the Wheat Season

YIN Wei-qin¹, ZHANG Xian-chen¹, WANG Xiao-zhi^{1,2*}, 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: Ozone Free-air Concentration Enrichment (O_3 -FACE) system was used in this study to investigate the effects of atmospheric elevated O_3 on concentrations of DTPA-extractable microelements in soil and microelements accumulation of plant in the wheat season during 2009 to 2010. Concentrations of DTPA-extractable Fe, Mn, Cu, Zn at different soil depths (0~5 cm, 5~10 cm and 10~15 cm) and microelement accumulation of plant at mature stage were determined under ambient and elevated (target at 50% above ambient) ozone concentration treatment. The results showed that elevated O_3 increased the concentrations of DTPA-extractable Fe, Mn in soil at 0~15 cm depth with 11.7%, 6.2%, and reduced the concentrations of DTPA-extractable Cu, Zn in soil at 0~15 cm depth with 3.0%, 27.3% ($P<0.05$), respectively. Elevated O_3 significantly increased the concentrations of DTPA-extractable Fe, Mn, Cu and Zn in soil at 5~10 cm depth. Elevated O_3 significantly reduced the concentration of DTPA-extractable Zn in 5~10 cm and 10~15 cm soil ($P<0.05$), and decreased accumulation of dry matter and microelements in above-ground of wheat at maturity stage. This article analyzed the reasons of changes of microelements in soil and wheat plant under elevated O_3 , and pointed out that in order to understand the impact mechanism of elevated O_3 on concentrations of DTPA-extractable microelements in soil, soil properties and plant growth, together with the microelement status at different soil depths should be considered.

Keywords: elevated O_3 ; microelement; DTPA; wheat season; soil

收稿日期: 2012-04-29

基金项目: 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放课题(0551000005); 扬州大学科技基金(2009CXJ016, 2011CXJ033)

作者简介: 尹微琴(1971—), 女, 硕士, 农艺师, 从事农业生态系统元素循环研究。E-mail: wqyin@yzu.edu.cn

* 通信作者: 王小治 E-mail: xzwang@yzu.edu.cn

近几十年来,由于化石燃料的大量使用导致近地层大气 O_3 浓度以每年 0.3%~2% 的速率增长^[1], O_3 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 O_3 浓度将在现有基础上增加 40%~60%^[2]。长江三角洲是我国重要的经济腹地,经济发展导致 NO_x 、 $VOCs$ 大量排放使该地区对流层 O_3 浓度明显增高,估计 2030 年前后 O_3 浓度将比本世纪初增加约 50%^[3-4]。国内外已报道的有关 O_3 污染对农业生态系统影响的研究主要集中在地上部分(如光合作用、叶绿素含量、生物量、产量等)^[5-8],少量关于地下部分的研究主要着重于土壤微生物及根系分泌物^[9-11]。 O_3 污染对生态系统地下过程的影响存在累积效应^[12],从而可能影响土壤元素的地球化学循环。土壤中微量营养元素在植物代谢中起着重要作用,其含量的动态变化与农业生产和土壤肥力也密切相关。研究 O_3 浓度升高对土壤有效态微量营养元素含量的影响规律,对未来大气环境变化下小麦种植的合理耕作、科学施肥、保护生态环境具有重要意义。目前有关 O_3 浓度升高对土壤微量营养元素循环的研究还比较缺乏。在 FACE(Free-Air Concentration Enrichment)系统基础上进行土壤-小麦系统微量营养元素对 O_3 升高响应的研究更为少见。

本文利用目前世界上唯一的稻麦轮作系统开放式 O_3 浓度增加的 FACE 试验研究平台,在田间原位条件下研究了 O_3 浓度升高对小麦生长季节耕层土壤-植物微量元素的影响,旨在分析 O_3 胁迫条件下农田微量元素的地球化学行为,为未来气候变化条件下农田耕作和水肥管理提供参考依据。

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 °C,年均日照时间>2100 h,年无霜期 220 d。土壤类型为清泥土,耕层土壤(0~15 cm)的基本性状为:pH(H_2O)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,容重 1.16 g·cm⁻³,土壤质地为砂壤,砂粒(2~0.02 mm)含量 57.8%,粉粒(0.02~0.002 mm)含量 28.5%,粘粒(<0.002 mm)13.7%。

1.2 试验平台

O_3 -FACE 平台于 2007 年 3 月开始运行,分设 3 个对照(Ambient)圈和 3 个 O_3 处理(比对照圈浓度高

50%,FACE)圈, O_3 -FACE 圈直径为 14 m 正八角形,8 根放气管道在作物灌层上方 50~60 cm 处。晴天每日在 09:00—18:00 释放 O_3 ,使圈内 O_3 浓度始终比对照圈 O_3 浓度高 50%。在 90% 的放气时间内,平台控制区域 O_3 浓度的误差在控制目标值的 20% 以内。对照圈无 O_3 -FACE 管道,环境条件与自然状态完全一致^[13]。本文为 2009—2010 年度麦季试验结果,通气时间为 2010 年 3 月 10 日至 5 月 31 日,通气时间内 FACE 处理 O_3 日平均浓度为 51.93 nL·L⁻¹,对照圈 O_3 日平均浓度为 39.1 nL·L⁻¹。

1.3 土壤样品的采集与分析

在冬小麦(扬麦 16)幼苗期(2009 年 12 月 16 日)、拔节期(2010 年 3 月 11 日)、抽穗期(2010 年 4 月 16 日)、灌浆期(2010 年 5 月 11 日)和成熟期(2010 年 6 月 2 日)等生长时期分层(0~5 cm, 5~10 cm 和 10~15 cm)多点采集耕层土壤样品;采集成熟期地上部分植株样品,105 °C 杀青 30 min 后,75 °C 烘至恒重后称量干重,粉碎。

土壤有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 用 pH7.3 的 DTPA-CaCl₂-TEA 浸提液浸提,植株样品 Fe、Mn、Cu、Zn 采用维生素 C-盐酸溶液一次浸提,用原子吸收分光光度计(Thermo M 939QZ/989QZ)测定^[14]。

1.4 数据处理

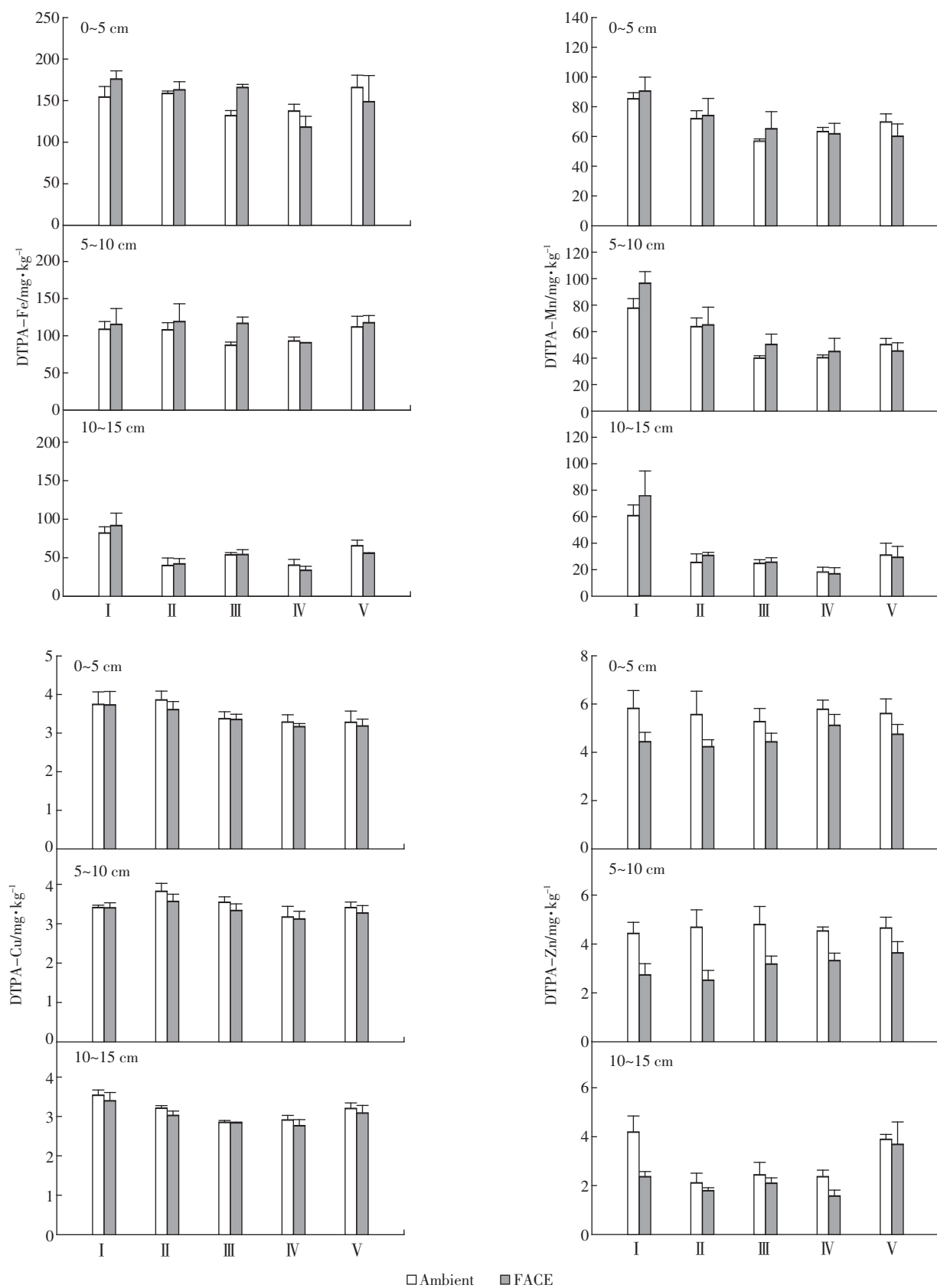
实验数据采用 Excel 2003 处理,用 SPSS17.0 进行显著性检验和方差分析, SigmaPlot10.0 作图。

2 结果与分析

2.1 不同时期麦田土壤有效态微量元素含量变化

经 O_3 处理后麦季不同层次土壤中 DTPA-Fe、Mn、Cu、Zn 含量情况如图 1 所示。FACE 和 Ambient 处理土壤 DTPA-Fe 含量在小麦不同生长期不同土层中差异很大,变化趋势也有所差异。土壤 DTPA-Mn 在不同生长期不同土层中变化趋势基本一致,呈先降低后升高的趋势;土壤 DTPA-Cu 在小麦生育期内不同土层中含量比较稳定,变化趋势一致;土壤 DTPA-Zn 含量在不同土层和不同生育期的变化趋势有所差异,在对照组处理中 0~5 cm 和 10~15 cm 土层表现为先降低后增加,5~10 cm 土层表现为先增加后降低,而 FACE 条件下不同土层变化不一致。耕层土壤有效态 Fe、Mn、Zn 含量均随土壤深度的增加而降低。

比较 FACE 与 Ambient 处理可发现,FACE 处理对不同时期不同深度土壤有效态 Fe、Mn 的影响基本相同,在抽穗期前表现为增加,灌浆期和成熟期表现



I、II、III、IV和V分别指幼苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期

图1 大气O₃浓度升高对2009—2010年麦季不同深度土壤有效态Fe、Mn、Cu、Zn含量的影响

Figure 1 Effect of elevated O₃ on DTPA-extractable Fe, Mn, Cu and Zn in soil at different depths in the wheat season in 2009—2010

为降低。从图 1 可以看出, O₃ 浓度升高只在灌浆期和成熟期降低了土壤有效态 Fe、Mn 含量, 其他时期均比对照有所提高, DTPA-Fe 在 0~5、5~10 cm 和 10~15 cm 增幅分别为 2.8%~25.6%、6.0%~33.9% 和 0.8%~11.7%, DTPA-Mn 在 0~5、5~10 cm 和 10~15 cm 增幅分别为 3.0%~15.9%、2.1%~25.8% 和 3.2%~24.2%。分析发现 O₃ 浓度升高对土壤 DTPA-Fe 的影响主要集中在 0~10 cm 土层, DTPA-Mn 则在 5~15 cm 土层中影响较大。FACE 处理后降低了各时期不同土层中 DTPA-Cu、Zn 含量。DTPA-Cu 含量在 0~5、5~10 cm 和 10~15 cm 减幅分别为 0.4%~6.5%、0.2%~6.7% 和 0.4%~5.8%, DTPA-Zn 含量在 0~5、5~10 cm 和 10~15 cm 减幅分别为 11.5%~23.9%、21.8%~46.1% 和 5.2%~43.5%。O₃ 浓度升高对麦季成熟期 5~10 cm 土壤中 DTPA-Zn 含量的影响达到显著水平(幼苗期, $P=0.029$; 抽穗期, $P=0.018$; 灌浆期, $P=0.017$) 和极显著水平(拔节期, $P=0.007$); 对幼苗期 10~15 cm 土壤 DTPA-Zn 含量的影响也达到显著水平($P=0.020$)。随着小麦生育期的进行, O₃ 对土层中 DTPA-Zn 含量的影响呈降低趋势。

2.2 整个麦季耕层土壤有效态微量元素含量变化

对不同麦季生长季节试验结果取平均值进行分析, 以探求 O₃ 浓度升高对整个麦季各耕层土壤有效性微量元素的影响程度, 结果见表 1。FACE 处理提高

了 0~5、5~10、10~15 cm 土壤 DTPA-Fe 和 DTPA-Mn 含量, 降低了各土层 DTPA-Cu 和 DTPA-Zn 含量, 其中对 5~10 cm 和 10~15 cm 土壤 DTPA-Zn 含量的减幅分别为 32.6% ($P=0.042$) 和 32.3% ($P=0.046$), 达显著水平。就整个耕层(0~15 cm)而言, FACE 处理提高了土壤中 DTPA-Fe、DTPA-Mn 含量, 增幅分别为 11.7% 和 6.2%, 降低了 DTPA-Cu、DTPA-Zn 含量, 减幅分别为 3.0% 和 27.3%, 其中对 DTPA-Zn 的影响达显著水平($P=0.049$), 且对 DTPA-Zn 的影响主要集中在 5~15 cm 的土层。

2.3 小麦成熟期生物量和微量元素累积量

O₃ 浓度升高对成熟期小麦地上部分生物量及微量元素累积量的影响如表 2 所示。与对照相比, O₃ 浓度升高处理的成熟期地上干物重减少了 16.5%, 植株体内 Fe、Mn、Cu 和 Zn 累积量减幅分别为 15.5%、19.4%、24.3% 和 19.2%, 且 Cu 的差异达到显著水平。

3 讨论

微量元素在土壤中含量少、有效性低, 但其对农作物生长发育起着重要作用, 土壤微量元素有效性和作物的微量元素营养现已引起了国内外学者的重视^[5]。用 DTPA 浸提剂浸提土壤中有有效态的 Fe、Mn、Cu 和 Zn 是目前的常用方法, DTPA 提取态常用来衡量土壤中对植物有效的微量元素含量^[16], 并且经常作

表 1 大气 O₃ 浓度升高对麦季不同深度土壤植物有效性微量元素含量的影响(平均值±标准误)
Table 1 Effect of elevated O₃ on concentrations of DTPA-extractable microelements of soils at different depths in the wheat season
(Values are mean±1SE)

深度/cm	处理	Fe	Mn	Cu	Zn
0~5	Ambient/mg·kg ⁻¹	148.0±4.7	69.7±1.9	3.5±0.1	5.6±0.7
	FACE/mg·kg ⁻¹	163.9±13.9	72.3±13.2	3.4±0.1	4.7±0.4
	增幅/%	10.7%	3.7%	-2.9%	-16.1%
	P 值	0.347	0.817	0.805	0.288
5~10	Ambient/mg·kg ⁻¹	101.5±5.5	54.9±1.3	3.5±0.1	4.6±0.5
	FACE/mg·kg ⁻¹	115.5±10.9	60.7±8.4	3.3±0.1	3.1±0.3
	增幅/%	13.8%	10.6%	-5.7%	-32.6%
	P 值	0.317	0.537	0.354	0.042
10~15	Ambient/mg·kg ⁻¹	60.7±5.9	31.4±5.7	3.1±0.0	3.1±0.3
	FACE/mg·kg ⁻¹	61.1±9.0	37.5±8.6	3.0±0.1	2.1±0.3
	增幅/%	0.7%	19.4%	-3.2%	-32.3%
	P 值	0.972	0.589	0.475	0.046
0~15	Ambient/mg·kg ⁻¹	103.0±5.4	52.0±2.2	3.3±0.1	4.4±0.4
	FACE/mg·kg ⁻¹	115.0±11.6	55.2±7.9	3.2±0.1	3.2±0.3
	增幅/%	11.7%	6.2%	-3.0%	-27.3%
	P 值	0.419	0.72	0.639	0.049

表 2 大气 O₃ 浓度升高对成熟期小麦地上干物质和微量元素累积量的影响

Table 2 Effect of elevated O₃ on accumulation of dry matter and microelements in above-ground of wheat at maturity stage

处理	干物质累积量/kg·hm ⁻²	Fe/g·hm ⁻²	Mn/g·hm ⁻²	Cu/g·hm ⁻²	Zn/g·hm ⁻²
Ambient	12 852	1 825.5	745.1	65.1	339.5
FACE	10 736	1 543.0	600.8	49.2	274.2
变化幅度/%	-16.5	-15.5	-19.4	-24.3	-19.2
P 值	0.454	0.358	0.233	0.025	0.083

为评价土壤微量元素的生物有效性^[17-18]。

实验统计分析发现,在 O₃-FACE 条件经 3 年 O₃ 处理后提高了麦田土壤有效态 Fe、Mn 含量,降低了有效性 Cu、Zn 含量,其中对 DTPA-Zn 的减幅达到极显著水平(表 1)。4 种微量元素土壤有效态含量和空间变化规律也有所不同,在耕层土壤(0~15 cm)中有效态 Fe、Mn 含量较高,而土壤有效态 Cu、Zn 含量很低;土壤有效性 Fe、Mn、Zn 含量随土壤深度增加而降低,而有效态 Cu 含量变化很小,基本保持相对恒定。造成此结果的原因可能包括:微量元素在土壤中自身的化学/物理作用使得不同微量元素有效态含量在不同土层中分布存在差异^[15]。同一研究平台发现 O₃ 浓度升高会增强稻田土壤中 Fe、Mn、Cu、Zn 的生物有效性^[19],这可能与旱地与水田的耕作方式差异有关,同时稻季水田土壤有效态微量元素高,可能导致其径流损失加大,从而对随后的麦季土壤微量元素状况产生影响。O₃ 浓度升高使作物叶绿素降低^[20]、叶片黄化^[21]、叶片净光合速率下降^[22],膜系统受到伤害^[23],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^[24],影响小麦植株对微量元素的吸收;对地上部分的间接影响地下根系分泌物的量和改变根系分泌物的种类^[7],根系分泌物减少改变了根际土壤团聚体结构的稳定性^[25],影响微生物活性,从而改变根际生态和营养动态^[26-27]。在大气 O₃ 浓度升高的情况下,小麦根系环境的改变包括根际土壤 pH 和氧化还原电位的改变,土壤中 Fe 和 Mn 的有效性很大程度上取决于土壤 pH 和氧化还原电位^[28],O₃ 浓度升高后整个麦季土壤 pH 为降低趋势,这使得土壤中难溶的铁锰氧化物溶解转化为有效态形式,提高了土壤中有效态 Fe、Mn 的含量;土壤 pH 值在中性偏碱时,有效 Cu 和 Zn 含量较低^[29]。本实验所获得的 FACE 条件下不同土壤微量元素有效性的变化与上述综合作用有密切的联系。

土壤中有效态微量元素含量与土壤有机质含量也有密切联系,当有机质含量<35.0 g·kg⁻¹时,土壤有效 Mn 含量随有机质的增加而增高;当有机质含

量>30.0 g·kg⁻¹时,土壤有效 Zn 含量则随有机质含量的增加而降低^[29]。我们对土壤有机质的测定结果表明,O₃ 浓度升高增加了麦田土壤有机质的含量,在小麦整个生长期内对照处理土壤有机质含量在 29.1~32.4 g·kg⁻¹之间(幼苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期含量分别为 31.2、29.1、30.7、31.8、32.4 g·kg⁻¹),而 FACE 处理土壤有机质含量在 30.7~34.1 g·kg⁻¹之间(幼苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期含量分别为 33.1、30.9、31.8、30.7、34.1 g·kg⁻¹),土壤中有有效态 Mn、Zn 含量变化与有机质含量变化有很大联系。同期的研究表明 O₃ 浓度升高使麦田土壤速效磷的含量增加 26.3%^[30],而土壤中 P 含量的提高会降低有效态 Cu、Zn 的含量^[31]。

实验发现 O₃ 浓度升高降低了成熟期地上部分微量元素的累积量,除与成熟期生物量降低有密切联系外,还与 O₃ 浓度升高对小麦植株生长的直接影响和土壤中有有效态微量元素的供应有关。O₃ 浓度升高降低了灌浆期后土壤中各微量元素有效态含量(图 1),白明月等^[32]研究发现 O₃ 浓度增加会减缓小麦前期发育,加快后期衰老,这使得后期提前加速了对微量元素的吸收,成熟期叶片衰老脱落进而降低了其体内含量的累积。

同时,在 CO₂-FACE 平台上进行的研究发现,大气 CO₂ 浓度升高增加稻季和麦季光合作用^[33-34],提高作物生物量^[35],增加根系分泌物^[36],提高土壤微量元素的生物有效性^[15,28];大气 O₃ 浓度升高增加稻田土壤中有效态 Fe、Mn、Cu、Zn 含量^[19]。大气 O₃ 浓度升高对作物的影响与 CO₂ 升高的影响有许多不同之处,对不同作物的影响也有所差别。因此,要准确理解全球气候变化对土壤元素生物地球化学循环的影响,应在大气 CO₂ 和 O₃ 浓度同时升高条件下,同时从土壤元素供应与植物元素吸收两个方面进行研究。

4 结论

近地层大气 O₃ 浓度增加提高了麦季 0~15 cm 耕层土壤有效性 Fe、Mn 含量,降低了土壤有效性 Cu、

Zn 含量,其中对 Zn 的减幅为 27.3%,达显著水平;比较大气 O₃ 浓度增加对不同层次土壤 DTPA 提取态 Fe、Mn、Cu、Zn 的影响程度,其对 5~10 cm 土层的影响最大;高 O₃ 浓度显著降低了 5~10 cm 和 10~15 cm 土壤 DTPA-Zn 含量;O₃ 浓度升高降低了小麦成熟期生物量和微量元素累积量。未来应同时从土壤元素供应与植物吸收两个方面进行研究,以准确理解大气 O₃ 浓度增加对土壤微量元素生物地球化学循环的影响机制。

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[D]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Morgan P B, Mies T A, Bollero G A, et al. Season-long elevation of o₃ zone concentration to projected 2050 levels under fully open-air conditions substantially decreases the growth and production of soybean[J]. *New Phytologist*, 2006, 170: 333-343.
- [4] IPCC. Climate Changes 2001[R]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 2002.
- [5] 冯兆忠,王效科,郑启伟,等.油菜叶片气体交换对 O₃ 浓度和熏蒸方式的响应[J].生态学报,2006,26(3):823-829.
FENG Zhao-zhong, WANG Xiao-ke, ZHENG Qi-wei, et al. Response of gas exchange of rape to ozone concentration and exposure regimes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 823-829.
- [6] 郑启伟,王效科,冯兆忠,等.臭氧对原位条件下小麦叶片光合色素、膜脂过氧化的影响[J].西北植物学报,2005,25(11):2240-2244.
ZHENG Qi-wei, WANG Xiao-ke, FENG Zhao-zhong, et al. Ozone effects on chlorophyll content and lipid peroxidation in the in situ leaves of winter wheat[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2005, 25(11): 2240-2244.
- [7] 郭建平,王春乙,温民,等.大气中 O₃ 浓度变化对水稻影响的试验研究[J].作物学报,2001,27(6):822-826.
GUO Jian-ping, WANG Chun-yi, WEN Min, et al. The experimental study on the impact of atmospheric O₃ variation on rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(6): 822-826.
- [8] 冯兆忠,小林和彦,王效科,等.小麦产量形成对大气臭氧浓度升高响应的整合分析[J].科学通报,2008,53(24):3080-3085.
FENG Zhao-zhong, XIAOLIN He-yan, WANG Xiao-ke, et al. Integrated analysis of response of wheat yield formation to elevated tropospheric O₃ concentration[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(24): 3080-3085.
- [9] 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.
- [10] Edwards N T. Root and soil respiration responses to ozone in *Pinus taeda* L. seedlings[J]. *New Phytologist*, 1991, 118: 315-321.
- [11] 胡君利,林先贵,朱建国.土壤微生物对大气对流层臭氧浓度升高的响应[J].土壤,2008,40(6):857-862.
HU Jun-li, LIN Xian-gui, ZHU Jian-guo. A review: Soil microbial responses to elevated tropospheric O₃ concentration[J]. *Soil*, 2008, 40(6): 857-862.
- [12] 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.
- [13] 王亮,曾青,冯兆忠,等.开放式臭氧浓度升高对2个冬小麦品种光合损伤的研究[J].环境科学,2009,2(30):527-534.
WANG Liang, ZENG Qing, FENG Zhao-zhong, et al. Photosynthetic-damage induced by elevated O₃ in two varieties of winter wheat with free air controlled enrichment approach[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(2): 527-534.
- [14] 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.
LU Ru-kun. Analysis method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [15] 王小治,孙伟,封克,等.大气 CO₂ 浓度升高和施氮对麦季土壤有效态微量元素含量的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(2):530-534.
WANG Xiao-zhi, SUN Wei, FENG Ke, et al. Effect of CO₂ enrichment and N supply on concentrations of DTPA-extractable microelements of soils in wheat season[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 530-534.
- [16] Lindsay W L, Norvell W A L. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1978, 42: 421-428.
- [17] Sedberry J E, Bligh Jr D P, Eun M Y. An evaluation of chemical methods for extracting copper from rice soils[J]. *Soil Sci Plant Anal*, 1988, 19: 1841-1857.
- [18] 刘铮.中国土壤微量元素[M].南京:江苏科学技术出版社,1996:1-24.
LIU Zheng. Chinese soil trace elements[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1996: 1-24.
- [19] 王小治,张海进,张威臣,等.大气 O₃ 浓度升高对稻田土壤有效态微量元素的影响[J].生态学报,2010,30(17):4741-4747.
WANG Xiao-zhi, ZHANG Hai-jin, ZHANG Xian-chen, et al. Effect of O₃ enrichment on concentrations of DTPA-extractable microelements of soils in the rice season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17): 4741-4747.
- [20] Schickelger C, Schroeter B. Effects of ozone fumigation on Epiphytic Macrolichens: Ultra-structure, CO₂ gas exchange and chlorophyll fluorescence[J]. *Environ Pollut*, 1995, 88: 345-354.
- [21] 金明红,黄益宗.臭氧污染胁迫对农作物生长与产量的影响[J].生态环境,2003,12(4):482-486.
JIN Ming-hong, HUANG Yi-zong. Review of crops damaged and yield loss by ozone stress[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 482-486.
- [22] 王春乙,郭建平,白月明,等. O₃ 浓度增加对冬小麦影响的试验研究[J].气象学报,2002,60(2):238-241.

- WANG Chun-yi, GUO Jian-ping, BAI Yue-ming, et al. Experimental study of impacts by increasing ozone concentration on winter wheat[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(2):238-241.
- [23] 郑启伟, 王效科, 谢居清, 等. 外源抗坏血酸对臭氧胁迫下水稻叶片膜保护系统的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(4):1131-1137.
- ZHENG Qi-wei, WANG Xiao-ke, XIE Ju-qing, et al. Effects of exogenous ascorbate acid on membrane protective system of in situ rice leaves under O₃ stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4):1131-1137.
- [24] Jürg F, Fitzgerald B. Ecological issues related to ozone: Agricultural issues[J]. *Environment International*, 2003, 29:141-154.
- [25] 刘芷宇. 根际研究法[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1997.
- LIU Zhi-yu. Rhizosphere research method[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1997.
- [26] McCrady J K, Andersen C P. The effect of ozone on below-ground carbon allocation in wheat[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 107:465-472.
- [27] Edwards N T. Root and soil respiration responses to ozone in *Pinus taeda* L. seedlings[J]. *New Phytologist*, 1991, 118:315-321.
- [28] 任思荣, 朱建国, 李辉信, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对稻田土壤中微量元素的影响[J]. *生态环境*, 2007, 16(3):982-986.
- REN Si-rong, ZHU Jian-guo, LI Hui-xin, et al. Effect of free-air CO₂ enrichment (FACE) on microelements in paddy soil[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3):982-986.
- [29] 王昌全, 李冰, 龚斌, 等. 西昌市土壤 Fe、Mn、Cu、Zn 有效性评价及其影响因素分析[J]. *土壤通报*, 2010, 41(2):447-451.
- WANG Chang-quan, LI Bing, GONG Bin, et al. Study on the bioavailability and Impact Factors of Fe, Mn, Cu and Zn in the soils of Xichang City[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2):447-451.
- [30] 张贤臣, 张海进, 尹微琴, 等. 大气 O₃ 浓度升高对麦季土壤和植株氮磷钾的影响[J]. *生态学报*, 2011, 30(8):1637-1641.
- ZHANG Xian-chen, ZHANG Hai-jin, YIN Wei-qin, et al. Effects of elevated atmospheric O₃ on N, P, and K concentrations in soil and wheat plant during wheat growth season[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8):1637-1641.
- [31] 俄胜哲, 袁继超, 丁志勇, 等. 氮磷钾肥对稻米铁、锌、铜、锰、镁、钙含量和产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2005, 19(5):434-440.
- E Sheng-zhe, YUAN Ji-chao, DING Zhi-yong, et al. Effect of N, P, K fertilizers on Fe, Zn, Cu, Mn, Ca and Mg contents and yields in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(5):434-440.
- [32] 白月明, 郭建平, 王春乙, 等. 水稻与冬小麦对臭氧的反应及其敏感性试验研究[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(1):13-16.
- BAI Yue-ming, GUO Jian-ping, WANG Chun-yi, et al. The reaction and sensitivity experiment of O₃ on rice and winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(1):13-16.
- [33] 廖铁, 陈根云, 张海波, 等. 水稻叶片光合作用对开放式空气 CO₂ 浓度增高 (FACE) 的响应与适应[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(10):1205-1209.
- LIAO Tie, CHEN Gen-yun, ZHANG Hai-bo, et al. Response and acclimation of photosynthesis in rice leaves to free-air CO₂ enrichment (FACE)[J]. *Chinese Journal Applied Ecology*, 2002, 13(10):1205-1209.
- [34] Roberntz P, Stockfors J. Effects of elevated CO₂ concentration and nutrition on net photosynthesis, stomatal conductance and needle respiration of field-grown Norway spruce trees[J]. *Tree Physiology*, 1998, 18(4):233-241.
- [35] 刘红江, 杨连新, 黄建晔, 等. FACE 对三系杂交水稻汕优 63 根系活性影响的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1):15-20.
- LIU Hong-jiang, YANG Lian-xin, HUANG Jian-ye, et al. Effect of free air CO₂ enrichment on root activity of indica rice (*Oryza saliva* L.) cultivar Shanyou 63[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):15-20.
- [36] 陈改革, 朱建国, 程磊. 高 CO₂ 浓度下根系分泌物的研究进展[J]. *土壤*, 2005, 37(6):602-606.
- CHEN Gai-ping, ZHU Jian-guo, CHENG Lei. A summary of researches on effects of CO₂ elevation on root exudates[J]. *Soils*, 2005, 37(6):602-606.