

臭氧浓度升高对土壤-冬小麦系统 CO₂ 排放的影响

胡正华¹, 李岑子¹, 陈书涛¹, 李涵茂¹, 杨燕萍¹, 申双和²

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要:通过田间试验,采用静态箱-气相色谱法测定 CO₂ 排放通量,研究臭氧(O₃)浓度升高对土壤-冬小麦系统 CO₂ 排放的影响.结果表明,O₃浓度升高对 CO₂ 排放的季节变化模式无明显影响.在返青期和拔节孕穗期,O₃浓度升高显著降低了土壤-冬小麦系统的 CO₂ 排放通量;在抽穗成熟期,O₃浓度 100 nL·L⁻¹处理对 CO₂ 排放通量没有显著影响,但 150 nL·L⁻¹ O₃ 浓度处理显著降低了 CO₂ 排放通量.对照、100 nL·L⁻¹和 150 nL·L⁻¹ O₃ 浓度处理的土壤-冬小麦系统呼吸速率与气温均存在极其显著的指数关系($p < 0.01$),拟合方程的决定系数 R^2 分别为 0.139、0.513 和 0.211,温度敏感性系数 Q_{10} 值分别为 1.13、1.58 和 1.21. 本研究表明 O₃ 浓度升高可能会导致农田 CO₂ 排放量降低.

关键词:臭氧;土壤;冬小麦;CO₂ 排放; Q_{10}

中图分类号:X511 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)01-0046-05

Effects of Elevated Ozone Concentration on CO₂ Emission from Soil-Winter Wheat System

HU Zheng-hua¹, LI Cen-zi¹, CHEN Shu-tao¹, LI Han-mao¹, YANG Yan-ping¹, SHEN Shuang-he²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract:To investigate the impact of elevated ozone (O₃) on CO₂ emission from soil-winter wheat system, outdoor experiments with simulating elevated O₃ concentration were conducted, and static dark chamber-gas chromatograph method was used to measure CO₂ emission fluxes. Results indicated that the elevated O₃ did not change the seasonal pattern of CO₂ emissions from soil-winter wheat system, but significantly decreased CO₂ emission fluxes during turning-green stage and elongation-pregnant stage. From heading to maturity, CO₂ emission fluxes were not found to be significant difference under 100 nL·L⁻¹ O₃ treatment compared with the control, while 150 nL·L⁻¹ O₃ treatment significantly declined CO₂ emission fluxes. Significant relationships were found between respiration rate and air temperature under the control, 100 nL·L⁻¹ and 150 nL·L⁻¹ O₃ treatment, and the fitting equation determined coefficients R^2 were 0.139, 0.513 and 0.211, respectively. In addition, the Q_{10} (temperature sensitivity coefficients) for soil-winter wheat system's respiration were 1.13, 1.58 and 1.21, respectively. The results of this study suggested that elevated O₃ could reduce CO₂ emissions from agroecosystem.

Key words:ozone; soil; winter-wheat; CO₂ emission; Q_{10}

全球变暖和近地层臭氧(O₃)污染是当今重要的全球性环境问题.全球变暖的主要原因是大气中温室气体(CO₂、CH₄和 N₂O等)浓度不断增加,其中 CO₂是最重要的温室气体,其在大气中的浓度已由工业革命前的 2.80×10^5 nL·L⁻¹ 上升到 2005 年的 3.79×10^5 nL·L⁻¹ [1]. 由于大量化石燃料的使用,导致近地层 O₃ 浓度不断增加.农田生态系统是 CO₂ 的一个重要的源和汇,CO₂ 排放量占全球人为排放量的 10% ~ 12% [2].

有关研究表明,高浓度 O₃ 不仅通过改变作物的光合作用等生理生态特性而抑制作物生长 [3~7],亦会影响土壤微生物的群落组成与活性,降低根际土壤微生物的数量和生物量 [8~10]. 作物生长和土壤微生物是影响农田 CO₂ 排放的重要因素 [11,12], 因此,

O₃ 浓度升高可能影响到农田生态系统 CO₂ 排放,而这方面的研究工作却鲜有报道.

本研究采用 O₃ 发生和调控系统模拟 O₃ 浓度升高环境,应用静态箱-气相色谱法测定 CO₂ 排放通量,探讨 O₃ 浓度升高对土壤-冬小麦系统 CO₂ 排放的影响,以期预测地表 O₃ 浓度升高情景下区域农田碳固定和温室气体排放趋势提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 田间试验

收稿日期:2010-01-19;修订日期:2010-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(40605029);中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放基金项目(AMF 200901);中国博士后科学基金项目(20070420195)

作者简介:胡正华(1973~),男,博士,副教授,主要研究方向为陆地生态系统温室气体排放与全球变化,E-mail:zhhu@nuist.edu.cn

田间试验于 2008 ~ 2009 年冬小麦生长季在南京信息工程大学生态与农业气象试验站 (32. 16°N, 118. 86°E) 进行. 土壤为潴育型水稻土, 灰马干土属, 耕层土壤质地为壤质粘土. 土壤黏粒含量为 26. 1%, 土壤 pH(H₂O) 值为 6. 22, 有机碳和全氮的含量分别为 19. 40 g/kg 和 1. 45 g/kg. 冬小麦品种为扬麦 12, 主要生育期见表 1.

表 1 冬小麦主要生育期

Table 1 Developmental stages of winter-wheat

日期	生育期	日期	生育期
2008-12-02	播种	2009-04-11	孕穗
2008-12-18	出苗	2009-04-17	抽穗
2009-02-14	返青	2009-04-27	灌浆
2009-03-30	拔节	2009-05-27	收获

1. 2 实验方法

1. 2. 1 O₃ 浓度升高处理

采用直径 3 m、高 2. 5 m 的开顶箱 (OTC) 作为 O₃ 布气的集气装置, OTC 壁为高透光率的太阳板, 保证了作物生长所需的光强和光质. 设置 CK (对照, 正常空气)、T₁ (100 nL·L⁻¹ O₃)、T₂ (150 nL·L⁻¹ O₃) 共 3 种 O₃ 浓度水平, 每浓度水平 3 个重复. O₃ 由 WH-H-Y10 型臭氧发生器生成, 通过气泵将 O₃ 稀释, 之后经给气管送入 OTC. OTC 内安装 O₃ 浓度传感器 (ML9810B, MONITOR, 精度 1 nL·L⁻¹), 将传感器预先设定 O₃ 浓度阈值, 当 OTC 内 O₃ 浓度未达到此阈值时, 臭氧发生器持续工作并向 OTC 内通入 O₃, 当 OTC 内浓度超过此阈值时, O₃ 传感器则提示报警, 其信号通过微型电子控制仪的指令控制与臭氧发生器相连的电磁阀断开, 此时臭氧发生器停止工作. 实现了 OTC 内 O₃ 浓度自动保持在设定的浓度值. 每天 O₃ 处理时间段为 08:00 ~ 16:00, 阴雨天则关闭整个装置. 图 1 为 3 ~ 5 月地表大气 O₃ 的背景值.

1. 2. 2 气样采集与分析

气体样品的采集与分析采用静态箱-气相色谱法^[13]. 在每个 OTC 内安装 3 个采样底座, 底座为 10 cm 高的圆形无底盆钵, 盆钵上口有 1. 5 cm 深的凹槽, 用以在采样时注水与采样箱密封. 采样箱为 PVC 材料的圆柱, 高 1 m, 箱体直径与底座凹槽直径一致, 约为 20 cm. 箱体外侧先包裹一层海绵, 然后覆盖一层铝箔, 以减小采样时由于太阳辐射所引起的箱内温度变化. 用带有三通阀的针筒采集气样, 分别于关箱后 0、10、20 min 采集, 抽样前抽推针筒数次以混合箱内气体, 每次抽样 50 mL, 同时记录箱内

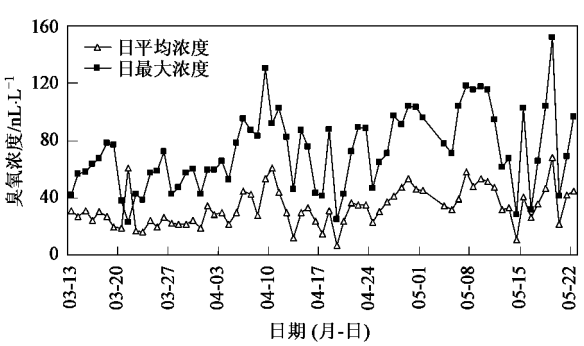


图 1 O₃ 日平均浓度和最大浓度

Fig. 1 Daily average concentration and the maximum O₃ concentration

温度、土壤温度和土壤水分等. 采样工作在 08:00 ~ 10:00 完成. 通过对每组 3 个样品的 CO₂ 混合比与相应的采样间隔时间 (0、10、20 min) 进行直线回归, 可求得 CO₂ 的排放速率. 再根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱有效高度、CO₂ 分子量等, 求得单位面积的排放量^[13].

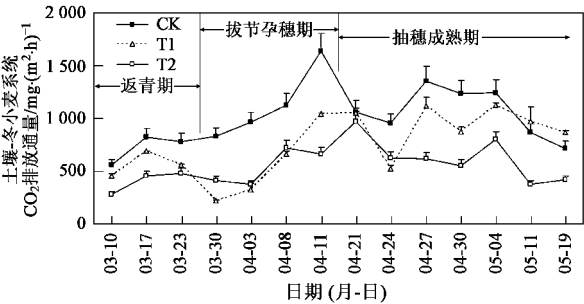
1. 3 统计分析

试验数据用 Excel 2003 进行计算与分析, 用统计软件 SPSS 10. 0 (SPSS Inc. 2000) 进行显著性检验和相关性分析.

2 结果与分析

2. 1 O₃ 浓度升高对 CO₂ 排放季节性规律的影响

土壤-冬小麦 CO₂ 排放的季节性变化规律见图 2. 在冬小麦返青期, CO₂ 排放量较低, 随着植物生长和气温的升高, CO₂ 排放量逐渐增大, 在孕穗抽穗期达到峰值, 到成熟后期又逐渐降低. CK、T₁、T₂ 的 CO₂ 排放季节性变化模式相似, O₃ 浓度升高没有改变土壤-冬小麦系统 CO₂ 排放通量的季节性变化规律.



图中误差线为 SD

图 2 O₃ 浓度升高对土壤-冬小麦系统 CO₂ 排放通量的影响

Fig. 2 Effects of elevated O₃ on CO₂ emission fluxes from soil-winter wheat system

2.2 O₃ 浓度升高对 CO₂ 排放通量的影响

在返青期,T₁、T₂ 的 CO₂ 排放通量都显著低于 CK(表 2),O₃ 浓度升高处理使 T₁、T₂ 的 CO₂ 排放通量分别降低了 20.8% 和 43.7%. 拔节孕穗期,T₁、T₂ 的 CO₂ 排放通量分别降低了 50.8% 和 52.3%. 抽穗成熟期,T₁、T₂ 的 CO₂ 排放通量分别降低了 12.0% 和 41.5%. 从全生育期来看,T₁、T₂ 的 CO₂ 排放通量分别降低了 25.9% 和 45.3%. O₃ 浓度升高降低了土壤-冬小麦系统的 CO₂ 排放通量.

表 2 O₃ 浓度升高对不同生育期土壤-冬小麦系统平均 CO₂ 排放通量的影响¹⁾/mg·(m²·h)⁻¹

Table 2 Effects of elevated O₃ on average CO₂ emission fluxes from soil-wheat system during different growing stages/mg·(m²·h)⁻¹

处理	返青期	拔节孕穗期	抽穗成熟期	全生育期
CK	720.58	1140.15	1061.48	1010.91
T ₁	570.48 *	561.00 *	933.99	749.53 *
T ₂	405.83 *	543.30 *	621.13 *	552.76 *

1) * 表示处理与对照相比有显著差异(p<0.05),下同

2.3 O₃ 浓度升高对呼吸的温度敏感性影响

将 CK、T₁ 和 T₂ 处理的呼吸速率分别与气温进行回归分析,结果表明,CK、T₁、T₂ 的呼吸与气温之间的关系可用指数方程来描述(图 3). CK、T₁ 和 T₂ 的拟合方程的可决系数 R² 分别为 0.139、0.513 和 0.211. 根据指数方程计算得到 CK、T₁、T₂ 的呼吸温度敏感性系数 Q₁₀ 值(温度每增加 10℃ 呼吸速率变

为初始值的倍数),分别为 1.13、1.58、1.21. O₃ 浓度升高在一定程度上提高了呼吸对温度的敏感性,意味着未来温度升高情景下,O₃ 浓度的升高可能会增加生态系统呼吸速率.

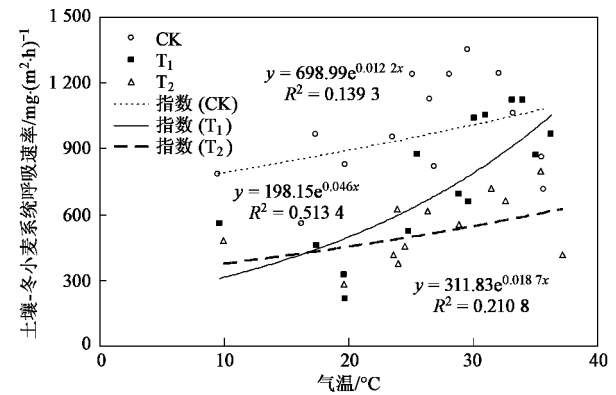


图 3 土壤-冬小麦系统呼吸速率与气温的关系

Fig. 3 Relationship between soil-winter wheat system respiration rate and air temperature

2.4 O₃ 浓度升高对生物量的影响

为保证每个底座中小麦株数等同,在幼苗期和返青期进行了间苗. 分别于 2009 年 4 月 12 日和 2009 年 5 月 27 日进行了作物生物量测定(表 3). 在拔节孕穗期,T₁、T₂ 的总生物量分别降低了 32.9% 和 31.2%;在成熟期,T₁、T₂ 的总生物量分别降低了 30.4% 和 49.4%. 可见,O₃ 浓度升高降低了冬小麦的生物量.

表 3 O₃ 浓度升高对冬小麦生物量的影响¹⁾/g·盆⁻¹

Table 3 Effects of elevated O₃ on winter wheat biomass/g·pot⁻¹

项目	拔节孕穗期			成熟期		
	CK	T ₁	T ₂	CK	T ₁	T ₂
根生物量	0.10 ± 0.04	0.07 ± 0.14 *	0.07 ± 0.14 *	0.07 ± 0.02	0.06 ± 0.05	0.04 ± 0.02
地上生物量	0.54 ± 0.21	0.36 ± 0.12 *	0.37 ± 0.12 *	1.52 ± 0.44	1.04 ± 0.48	0.76 ± 0.42 *
总生物量	0.64 ± 0.24	0.43 ± 0.19 *	0.44 ± 0.19 *	1.58 ± 0.44	1.10 ± 0.53 *	0.80 ± 0.43 *

3 讨论

3.1 O₃ 浓度升高对 CO₂ 排放的影响

返青期是冬小麦生长的早期阶段,作物生长缓慢,植株幼小,此时小麦地上生物量很小,覆盖率低,系统的 CO₂ 排放量相对较少. 在拔节孕穗期,O₃ 浓度的升高主要通过影响作物的生长和土壤微生物的生物量而影响到土壤-植物系统的 CO₂ 排放量. 实验从 2 月 11 日开始熏蒸,此时的幼苗处于返青和分蘖期,对 O₃ 的反应较敏感,会受到 O₃ 胁迫的伤害. 郑有飞等^[4,14] 对冬小麦进行不同浓度的 O₃ 处理,结果

发现,O₃ 可通过影响气孔开放,破坏光合色素,抑制卡尔文循环,降低光能利用效率,损伤光保护系统,阻碍光合电子传递等多种机制,降低光合能力. 相关研究还表明 O₃ 浓度升高能降低作物叶面积、加速叶片老化^[15,16],增加气孔阻力、影响光合色素、抑制光合作用^[17-19],降低作物生物量^[20,21],从而可能降低植株的 CO₂ 排放量. O₃ 升高对土壤微生物的影响是间接的,主要是通过影响作物生长,改变根际分泌物的性质和数量而加以调节的^[22]. O₃ 浓度升高降低了植物根系有机物的分泌,减少了土壤微生物的养分供应,导致微生物代谢和土壤呼吸降低^[8,23,24].

3.2 O₃ 浓度升高对生物量的影响

以往研究发现地表 O₃ 浓度升高会减少作物光合色素含量^[25],降低光合速率,从而抑制作物生长,导致生物量和产量降低^[26,27]. 本研究的生物量实验结果与上述结论吻合. 另外,将拔节孕穗期 CO₂ 排放量与作物生物量进行相关性分析: $y = 1\,075.4x + 175.5$, $R^2 = 0.9418$, CO₂ 排放量与生物量呈明显正相关. 在成熟期, CO₂ 排放量与生物量也呈正相关: $y = 265.22x + 585.4$, $R^2 = 0.6453$. 可见, O₃ 浓度升高可能主要通过降低作物的生物量,从而减少生态系统的 CO₂ 排放量.

4 结论

(1) O₃ 浓度升高没有改变土壤-冬小麦系统 CO₂ 排放通量的季节性变化规律.

(2) 在返青期和拔节孕穗期, O₃ 浓度升高显著降低了土壤-冬小麦系统的 CO₂ 排放通量;在抽穗成熟期, 150 nL·L⁻¹ O₃ 浓度处理显著降低了 CO₂ 排放通量.

(3) O₃ 浓度升高在一定程度上增加了土壤-冬小麦系统呼吸的温度敏感性 (Q_{10}).

(4) O₃ 浓度升高降低了冬小麦植株生物量.

参考文献:

[1] IPCC. Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[2] Koponen H T, Flöjt L, Martikainen P J. Nitrous oxide emission from agricultural soils at low temperatures: a laboratory microcosm study [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36** (5): 757-766.

[3] Francesco L, Silvano F. Is ozone flux inside leaves only a damage indicator? Clues from volatile isoprenoid studies [J]. Plant Physiology, 2007, **143**: 1096-1100.

[4] 郑有飞, 胡程达, 吴荣军, 等. 地表臭氧浓度增加对冬小麦光合作用的影响 [J]. 生态学报, 2010, **30**(4): 847-855.

[5] 姚芳芳, 王效科, 陈展, 等. 农田冬小麦生长和产量对臭氧动态暴露的响应 [J]. 植物生态学报, 2008, **32**(1): 212-219.

[6] 张巍巍, 郑飞翔, 王效科, 等. 臭氧对水稻根系活力、可溶性蛋白含量与抗氧化系统的影响 [J]. 植物生态学报, 2009, **33**(3): 425-432.

[7] Feng Z W, Jin M H, Zhang F Z, *et al.* Effects of ground-level ozone (O₃) pollution on the yields of rice and winter wheat in the Yangtze River Delta [J]. Journal of Environmental Sciences, 2003, **15**(3): 360-362.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Chen Z, Wang X K, Feng Z Z, *et al.* Impact of elevated O₃ on soil microbial community function under wheat crop [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2009, **198**(1-4): 189-198.

[11] Ding W X, Meng L, Yin Y F, *et al.* CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, **39**(2): 669-679.

[12] Ding W X, Cai Y, Cai Z C, *et al.* Diel pattern of soil respiration in N-amended soil under maize cultivation [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(18): 3294-3305.

[13] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-time ecosystem [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, **20**(5): 842-844.

[14] 郑有飞, 赵泽, 吴荣军, 等. 臭氧胁迫对冬小麦叶绿素荧光及气体交换的影响 [J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 472-479.

[15] Pleijel H, Eriksen A B, Danielsson H, *et al.* Differential ozone sensitivity in an old and a modern Swedish wheat cultivar-grain yield and quality, leaf chlorophyll and stomatal conductance [J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, **56**(1): 63-71.

[16] Grulke N E, Paoletti E, Heath R L. Comparison of calculated and measured foliar O₃ flux in crop and forest species [J]. Environmental Pollution, 2007, **146**(3): 640-647.

[17] Vandermeiren K, Black C, Pleijel H, *et al.* Impact of rising tropospheric ozone on potato: effects on photosynthesis, growth, productivity and yield quality [J]. Plant, Cell and Environment, 2005, **28**(8): 982-996.

[18] Grantz D A, Silva V, Toyota M, *et al.* Ozone increases root respiration but decreases leaf CO₂ assimilation in cotton and melon [J]. Journal of Experimental Botany, 2003, **54**(391): 2375-2384.

[19] Wang X P, Denise L M. Characterizing distributions of surface ozone and its impact on grain production in China, Japan and south Korea: 1990 and 2020 [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(26): 4383-4402.

[20] Flowers M D, Fiscus E L, Burkey K O, *et al.* Photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and yield of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes differing in sensitivity to ozone [J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, **61**(2): 190-198.

[21] 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, **30**(2): 527-534.

[22] McCrady J K, Andersen C P. The effect of ozone on below ground carbon allocation in wheat [J]. Environmental Pollution, 2000, **107**(3): 465-472.

[23] 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.
- [24] Andersen C P. Source-sink balance and carbon allocation below ground in plants exposed to ozone [J]. New Phytologist, 2003, **157**(2): 213-228.
- [25] Calatayud A, Iglesias D J, Talón M, *et al.* Response of spinach leaves (*Spinacia oleracea* L.) to ozone measured by gas exchange, chlorophyll a fluorescence, antioxidant systems, and lipid peroxidation [J]. Photosynthetica, 2004, **42**(1): 23-29.
- [26] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 等. 臭氧和模拟酸雨对冬小麦气体交换、生长和产量的复合影响 [J]. 环境科学学报, 2007, **27**(9): 1542-1548.
- [27] Wang X K, Manning W, Feng Z W, *et al.* Ground-level ozone in China: Distribution and effects on crop yields [J]. Urban Environmental Pollution, 2007, **147**(2): 394-400.