

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征 朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)

大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响 蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)

近3年太原市夏季降水的化学特征研究 郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)

太原市PM_{2.5}中有机碳和元素碳的污染特征 刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)

青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布 李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)

北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究 王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)

人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征 宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)

春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究 刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)

青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析 李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)

亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析 张奎,李秋华,黄国佳,欧腾,李翎,吴迪,周黔兰,高廷进(438)

长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)

黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究 郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)

苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析 陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)

滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力 孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)

城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性 李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)

艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究 张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)

工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价 臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)

山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价 戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)

UV协同ClO₂去除三氯生及其降解产物的研究 李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)

氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究 康英,段晋明,景传勇(523)

负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究 曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)

磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究 刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)

TiO₂@酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究 王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)

MnO₂/CFP复合电极的制备及电吸附Pb²⁺特性的研究 刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)

吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO₂催化剂 王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)

掺铁TiO₂纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究 项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)

天然矿物负载Fe/Co催化H₂O₂氧化降解阳离子红3R 马楠,刘华波,谢鑫源(576)

臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究 张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)

碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响 韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)

低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究 马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)

O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响 丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)

改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探 周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)

热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究 杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)

不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)

地表臭氧浓度升高对旱作农田N₂O排放的影响 吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)

亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究 刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)

川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素 罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)

黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响 张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)

汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性 张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)

土壤电动修复的电极空间构型优化研究 刘芳,付融冰,徐珍(678)

有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险 张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)

水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律 杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)

植物根系体外溶液的提取方法研究:以多环芳烃为例 朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)

垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究 徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)

1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究 刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)

CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)

锯齿新米虾对Cu²⁺和毒死蜱毒性的生理响应 李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)

同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物 田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)

热水环境中Na⁺活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究 张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)

区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用 樊新刚,米文宝,马振宁(751)

《环境科学》征订启事(401) 《环境科学》征稿简则(437) 信息(489,522,726,735)

地表臭氧浓度升高对旱作农田 N₂O 排放的影响

吴杨周^{1,3}, 胡正华^{1,2,3*}, 李岑子³, 陈书涛^{1,3}, 谢燕³, 肖启涛^{2,3}

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 大气环境中心, 南京 210044; 3. 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, 在冬小麦和大豆生长季设置 3 种不同臭氧(O₃)浓度的处理, 包括自由空气(对照, CK)、100 nL·L⁻¹ O₃浓度(T₁)和 150 nL·L⁻¹ O₃浓度(T₂), 采用静态箱-气相色谱法测定N₂O排放通量, 研究地表 O₃浓度升高对冬小麦-大豆轮作系统N₂O排放的影响. 结果表明, 与 CK 相比, 在冬小麦返青期, T₁和 T₂处理都降低了土壤-冬小麦系统N₂O累积排放量, 降幅分别为 37.8% (P=0.000)和 8.8% (P=0.903); 在拔节-孕穗期, T₁和 T₂处理使N₂O累积排放量分别降低了 15.0% (P=0.217)和 39.1% (P=0.000); 从冬小麦全生育期来看, T₁、T₂的N₂O累积排放量分别降低了 18.9% (P=0.138)和 25.6% (P=0.000). 由于本年度大豆生长季降水偏少, 受干旱胁迫的影响, O₃浓度升高对大豆田N₂O排放的作用不明显. 本研究表明地表 O₃浓度升高会减少旱作农田N₂O排放量.

关键词: 臭氧; 冬小麦; 大豆; 土壤; N₂O排放

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0636-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.02.035

Impacts of Elevated Ozone Concentration on N₂O Emission from Arid Farmland

WU Yang-zhou^{1,3}, HU Zheng-hua^{1,2,3*}, LI Cen-zi³, CHEN Shu-tao^{1,3}, XIE Yan³, XIAO Qi-tao^{2,3}

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast Meteorological Disaster Warning and Assessment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To investigate the impact of elevated surface ozone (O₃) concentration on nitrous oxide (N₂O) emission from arid farmland, field experiments were carried out during winter-wheat and soybean growing seasons under the condition of simulating O₃ concentrations, including free air (CK), 100 nL·L⁻¹ O₃ concentration (T₁), and 150 nL·L⁻¹ O₃ concentration (T₂). N₂O emission fluxes were measured by static dark chamber-gas chromatograph method. The results showed that the accumulative amount of N₂O (AAN) were decreased by 37.8% (P=0.000) and 8.8% (P=0.903) under T₁ and T₂ treatments, respectively, in the turning-green stage of winter wheat. In the elongation-booting stage, ANN were decreased by 15.0% (P=0.217) and 39.1% (P=0.000) under T₁ and T₂ treatments, respectively. ANN were decreased by 18.9% (P=0.138) and 25.6% (P=0.000) under T₁ and T₂ treatments, respectively, during the whole winter-wheat growing season. No significant impact of elevated O₃ concentration on N₂O emission from soil-soybean system was found due to the less rainfall during the soybean growing season, drought had a stronger stress on soybean than O₃ concentration. The results of this study suggested that elevated O₃ concentration could reduce N₂O emission from arid farmland.

Key words: ozone; winter wheat; soybean; soil; N₂O emission

氧化亚氮(N₂O)是仅次于CO₂、CH₄的重要的温室气体,其百年尺度全球增温潜势(GWP)是CO₂的298倍^[1],大气中N₂O浓度已由工业革命前的270×10⁻⁹上升到2011年的324×10⁻⁹^[2]. N₂O在大气中滞留时间长,其生命周期长达121 a^[3],而且还能参与平流层的光化学反应,将平流层臭氧(O₃)光解为O₂,破坏大气臭氧层^[4],使得到达地表的紫外辐射增加.

O₃主要存在于平流层底层和近地层,位于平流层的O₃可吸收短波紫外线,保护地球上的生物不受伤害,而位于近地层的O₃通过光化学反应生成二次

污染物,造成环境污染. 由于人类活动和大量化石燃料的使用,使得O₃前体物和光氧化剂持续增加,导致近地层O₃浓度不断升高. 1999~2000年我国长三角地区6个大气O₃监测点的资料表明^[5],每天7 h平均O₃浓度为75 nL·L⁻¹,而到2050年北半球O₃浓度将在现有基础上增加20%~25%^[6,7],到

收稿日期: 2014-05-10; 修订日期: 2014-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41175136, 41375006); 江苏省农业气象重点实验室开放课题项目(KYQ1302); 江苏省高校“青蓝工程”项目

作者简介: 吴杨周(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为农田地气碳氮交换与全球变化, E-mail: yangzhou_wu@139.com

* 通讯联系人, E-mail: zhhu@nuist.edu.cn

2100 年将增加 40% ~ 60%^[8]. 研究表明, 地表 O₃ 浓度升高能改变植物叶绿体结构、分解叶绿素和可溶性蛋白, 从而减少叶绿素含量^[9,10]; 迫使叶片气孔关闭, 降低植物的光合和蒸腾速率^[11,12], 抑制植物生长和干物质积累^[13], 同时降低根系生物量和根系分泌物总量^[14~16], 导致产量下降^[17]. O₃ 浓度升高还可改变土壤微生物群落组成与活性, 降低根际土壤微生物数量和生物量^[18~20].

农田土壤是大气 N₂O 的重要排放源^[21], 在全球温室气体收支中具有重要的地位. 农田 N₂O 主要是在土壤微生物参与下, 通过土壤硝化-反硝化作用以及作物自身的氮代谢过程产生^[22], 而 O₃ 浓度升高可能通过抑制作物生长、改变土壤理化性质和土壤微生物组成, 从而降低土壤硝化反硝化速率, 减少 N₂O 的产生与排放. 本研究通过田间试验, 采用开顶箱和 O₃ 发生与调控装置模拟 O₃ 浓度升高, 应用静态箱-气相色谱法测定 N₂O 排放通量, 并测定植株生物量、叶片与土壤的全氮和有效氮含量, 初步分析地表 O₃ 浓度升高对冬小麦-大豆轮作农田生态系统 N₂O 排放的影响规律及机制, 以期对地表 O₃ 浓度持续增加情景下区域农田温室气体排放量估算提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

田间试验在南京信息工程大学农业气象与生态试验站(32. 16°N, 118. 86°E)进行. 试验地耕层土壤质地为壤质黏土, 土壤 pH(H₂O) 值为 6. 2、黏粒含量为 26. 1%、有机碳和全氮的含量分别为 19. 41 g·kg⁻¹和 1. 42 g·kg⁻¹. 冬小麦和大豆品种分别为扬麦 14 和八月白. 作物主要生育期及肥料管理见表 1.

1.2 试验方法

1.2.1 O₃ 浓度处理

1999~2000 年我国长三角地区 6 个大气 O₃ 监测点的资料表明^[5], 每天 7 h 平均 O₃ 浓度为 75 nL·L⁻¹, 而 2050 年北半球 O₃ 浓度将在现有基础上增加 20% ~ 25%^[6,7], 2100 年将增加 40% ~ 60%^[8], 因此本研究设置 3 种 O₃ 浓度水平: 对照(CK, 自由空气)、O₃ 浓度 100 nL·L⁻¹(T₁)和 O₃ 浓度 150 nL·L⁻¹(T₂), 每处理 3 个重复. 每天在 08:00 ~ 16:00 运行臭氧增加装置, 阴雨天关闭.

O₃ 浓度自动调控装置的组成包括开顶箱(OTC)、臭氧发生器、O₃ 浓度传感器、微型电子控

表 1 作物主要生育期和施肥

Table 1 Main growth stages of crop and fertilization schedules		
作物	日期	生育期及施肥
冬小麦	2008-12-14	播种, 施基肥(复合肥, 40 g·m ⁻² , 含 N18%, P ₂ O ₅ 46%)
	2009-01-01	出苗
	2009-02-14	返青, 施返青肥(复合肥, 45 g·m ⁻² , 含 N18%, P ₂ O ₅ 46%)
	2009-03-30	拔节
	2009-04-08	孕穗
	2009-04-17	抽穗
大豆	2009-05-04	成熟
	2010-07-02	播种, 施基肥(复合肥, 23 g·m ⁻² , 含 N18%, P ₂ O ₅ 46%)
	2010-07-06	出苗
	2010-07-11	三叶期
	2010-08-06	分枝
	2010-08-17	开花
	2010-09-01	结荚
	2010-09-14	鼓粒
	2010-10-16	收获

制仪等. 采用直径 3 m、高 2.5 m 的 OTC 作为集气装置, OTC 壁为高透光率的阳光板, 保证作物生长所需的光强和光质. O₃ 由 WH-H-Y10 型臭氧发生器(南京沃环科技实业有限公司)生成, 通过气泵和风扇将 O₃ 稀释, 经给 PVC 导气管输送入 OTC. 每个 OTC 内安装一个 O₃ 浓度传感器(ML9810B, MONITOR, 精度 1 nL·L⁻¹, 美国), 预先在传感器设置 O₃ 浓度阈值, 当 OTC 内 O₃ 浓度达到该阈值时, O₃ 浓度感应器发射信号, 微型电子控制仪接收并打开控制指令, 使 O₃ 发生器上的电磁阀断开, 臭氧发生器停止供气. 当 OTC 内 O₃ 浓度降低后, O₃ 发生器又开始运行并向 OTC 内通入 O₃, 实现了 OTC 内 O₃ 浓度自动控制, 使 OTC 内 O₃ 浓度保持在设定水平.

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^[23]. 每种处理安装 3 个圆形采样底座(直径 20 cm, 高 10 cm), 上口有 1.5 cm 深的凹槽, 以注水与采样箱密封. 采样箱为 PVC 材料的圆柱, 高 1 m, 箱体直径与底座凹槽直径相同. 箱体外侧先包裹一层海绵, 再覆盖一层铝箔, 以减小采样期间因太阳辐射引起的箱内温度变化. 将采样箱罩于底座上, 连接好带三通阀的针筒和温度计, 向凹槽中加水密封. 分别在关箱后 0、10、20 min 采集气样, 抽气前抽推针筒数次以混合箱内气体, 每次抽样 60 mL. 记录土壤温度、湿度和采样前后箱内气温. 每周采样 1~2

次,在 08:00 ~ 10:00 完成. 采样过程关闭臭氧装置.

用 Agilent-6890N 气相色谱仪检测气样中 N_2O 的混合比,采用的是双阀双柱自动进样、反吹、分离和切换系统, ECD (electron capture detector) 检测器. 通过对每组 3 个样品的 N_2O 混合比与相应的采样间隔时间 (0、10、20 min) 进行直线回归,求得 N_2O 的排放速率,再根据大气压力、气温、普适气体常数、 N_2O 分子量、采样箱有效高度等,加权平均求得单位面积的排放量^[23],然后通过对每一组相邻平均排放量的累积积分求得全生育期累积排放量^[24].

1.2.3 植物与土壤指标测定

用全自动凯氏定氮仪 (Kjeltec2300, FOSS, 瑞典) 测定叶片和土壤全氮^[25]. 用紫外可见分光光度计 (Cary50, Varian, 美国) 测定叶片中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N. 用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 浸提, FOSS 流动注射分析仪 (FIAstar5000, FOSS, 瑞典) 测定土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N. 用磺胺比色法 (活体法) 测定叶片中硝酸还原酶活性,考马斯亮蓝-染色法测定叶片可溶性蛋白质,紫外可见分光光度法测定叶片叶绿素含量. 105°C 杀青 30min, 80°C 烘干至恒重,测定植株生物量.

1.3 统计分析

试验数据用 Excel 计算平均值和标准差,用统计软件 SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 进行显著性检验,分析不同 O_3 浓度处理的 N_2O 排放差异. 用软件 OriginPro 8.0 (OriginLab, USA) 作图.

2 结果与分析

2.1 土壤温湿度的变化

冬小麦生长季 5 cm 深土壤温湿度如图 1 所示. CK 的土壤温度变化范围为 $9.1 \sim 22.8^\circ\text{C}$, T_1 的土壤温度变化范围为 $9.1 \sim 22.9^\circ\text{C}$, T_2 的土壤温度变化范围为 $9.4 \sim 23.3^\circ\text{C}$. CK 的土壤湿度变化范围为 $13.6\% \sim 22.6\%$, T_1 的土壤湿度变化范围为 $13.2\% \sim 22.1\%$, T_2 的土壤湿度变化范围为 $12.3\% \sim 21.6\%$. 在整个冬小麦生长季,不同 O_3 浓度处理的土壤温湿度差异不显著 ($P < 0.05$), 在这种情况下,土壤温度和湿度对 N_2O 排放有着相同影响,因此可认为不同 O_3 浓度处理后产生的 N_2O 排放之间的差异不是由于土壤温湿度引起的.

2.2 O_3 浓度升高对 N_2O 排放规律的影响

土壤-冬小麦系统 N_2O 排放的生长季变化规律见图 2(a). CK 在返青期, N_2O 排放量逐渐升高,随

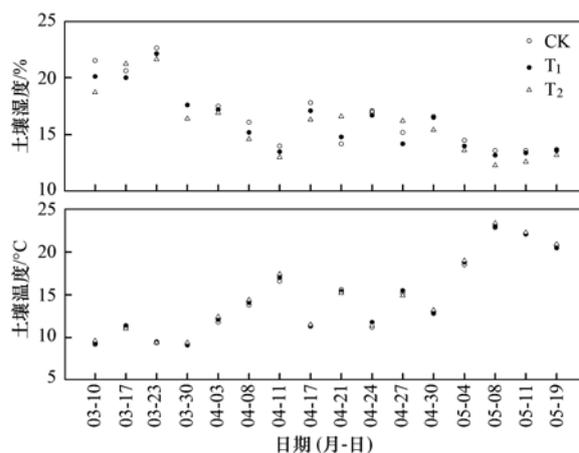


图 1 土壤温湿度的变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil temperature and soil moisture

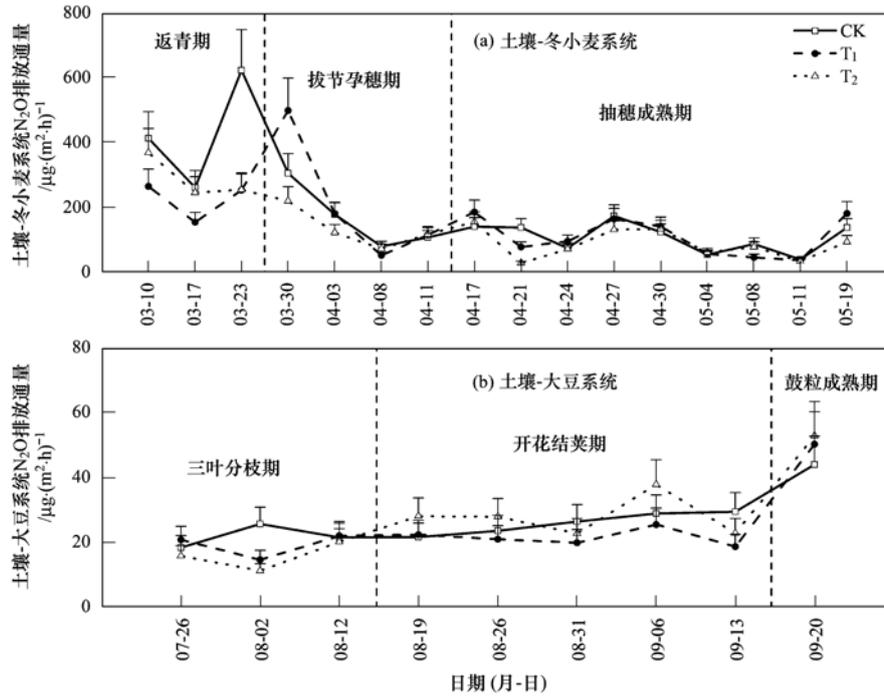
着植物生长和气温的升高, N_2O 排放量逐渐增大,在返青期末达到峰值,到拔节孕穗期又逐渐降低. CK、 T_1 与 T_2 的 N_2O 排放生长季变化模式相似,只是 T_1 的峰值出现在拔节期,与 CK 相比推迟了 N_2O 排放量峰值出现的时间, T_2 的 N_2O 排放通量随着小麦的生长逐渐降低, T_2 处理较高的 N_2O 排放通量出现在返青期.

土壤-大豆系统 N_2O 排放的生长季变化规律如图 2(b), CK 的 N_2O 排放通量随着大豆的生长呈现逐渐升高的趋势,在鼓粒成熟期达到峰值. T_1 处理的 N_2O 排放通量明显低于 CK,在鼓粒成熟期又高于 CK. T_2 处理的 N_2O 排放通量在三叶分枝期低于 CK,在开花结荚期又高于 CK,并在结荚期出现一个峰值. CK、 T_1 、 T_2 的 N_2O 排放的生长季变化规律均呈现逐渐升高的趋势,在成熟期达到峰值, O_3 浓度升高没有改变土壤-大豆系统 N_2O 排放通量的生长季变化规律.

2.3 O_3 浓度升高对 N_2O 累积排放量的影响

土壤-冬小麦系统 N_2O 累积排放量如图 3(a). 与 CK 相比,返青期, T_1 、 T_2 的 N_2O 累积排放量分别降低了 37.8% ($P = 0.000$) 和 8.8% ($P = 0.903$); 在拔节孕穗期, T_1 、 T_2 的 N_2O 累积排放量分别降低了 15.0% ($P = 0.217$) 和 39.1% ($P = 0.000$); 抽穗成熟期, T_1 、 T_2 的 N_2O 累积排放量分别降低了 10.1% ($P = 0.385$) 和 18.8% ($P = 0.135$); 从全生育期来看, T_1 、 T_2 的 N_2O 累积排放量分别降低了 18.9% ($P = 0.138$) 和 25.6% ($P = 0.000$). 除返青期外, T_2 的 N_2O 累积排放量都显著低于 T_1 ,即 O_3 浓度越高, N_2O 累积排放量降低幅度越大.

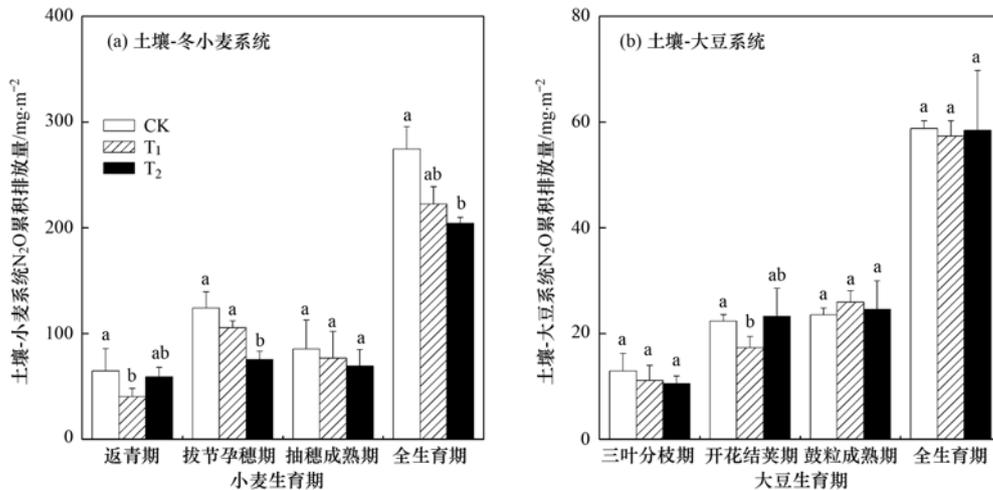
图 3(b) 是土壤-大豆系统的 N_2O 累积排放量. 在三叶分枝期, N_2O 累积排放量随着 O_3 浓度的升高



图中误差线为标准误差 SD(个别数据点因 SD 较小而未显示出误差线)

图 2 O₃ 浓度升高对土壤-冬小麦系统和土壤-大豆系统 N₂O 排放通量的影响

Fig. 2 Effects of elevated O₃ concentration on N₂O emission fluxes from soil-winter wheat system and soil-soybean system



字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 O₃ 浓度升高对不同生育期土壤-冬小麦系统和土壤-大豆系统 N₂O 累积排放量的影响

Fig. 3 Effects of elevated O₃ concentration on the accumulative amount of N₂O emission from soil-wheat system and soil-soybean system during different growing stages

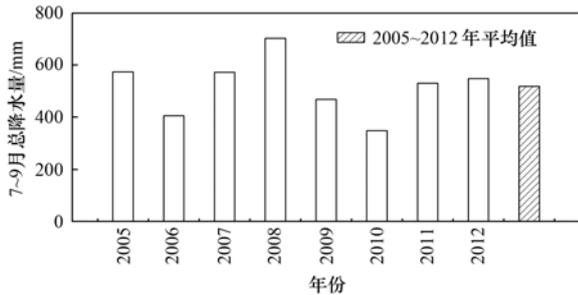
而降低；开花结荚期和鼓粒成熟期，T₂ 处理的 N₂O 累积排放量变化不大，T₁ 则仅在开花-结荚期显著降低了 N₂O 累积排放量。从全生育期来看，O₃ 浓度对土壤-大豆系统的 N₂O 累积排放量没有改变，其原因主要是大豆生长期间干旱胁迫所致。2010 年大豆生长季的降水量很少(图 4)，土壤较干旱，而试验过程中没有进行人工浇水，大豆植株生长受到抑制，导致

土壤和大豆植株 N₂O 产生/排放量较小。

2.4 O₃ 浓度升高对生物量和氮指标的影响

2.4.1 O₃ 浓度升高对生物量的影响

冬小麦拔节-孕穗期，T₁ 地上、根和总生物量分别降低了 32.65% ($P = 0.000$)、26.64% ($P = 0.037$) 和 31.76% ($P = 0.000$)，T₂ 处理地上、根和总生物量分别降低了 31.87% ($P = 0.000$)、



数据来源:南京水利(<http://www.njsl.gov.cn/>)

图4 大豆主要生育期(7~9月)多年降水量

Fig. 4 Precipitation during the main growth season of soybean (from July to September)

表2 O₃浓度升高对冬小麦生物量的影响/g·m⁻²

Table 2 Effects of elevated O₃ on winter-wheat biomass/g·m⁻²

生育期	生物量	CK	T ₁	T ₂
拔节-孕穗期	地上生物量	14.12 ± 3.54	9.51 ± 1.06**	9.62 ± 1.05**
	根生物量	2.59 ± 0.18	1.90 ± 0.43*	1.90 ± 0.73*
	总生物量	16.72 ± 2.42	11.41 ± 1.95**	11.52 ± 1.92*
成熟期	地上生物量	39.90 ± 6.46	27.27 ± 5.61	20.08 ± 2.96*
	根生物量	1.75 ± 0.55	1.49 ± 1.24	1.05 ± 0.53
	总生物量	41.65 ± 5.62	28.76 ± 3.82*	21.13 ± 3.27*

1) 数值为平均值 ± 标准误差, *, ** 表示 CK 与 T₁、T₂ 处理的差异性, 分别为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$, 下同

表3 O₃浓度升高对冬小麦叶片相关氮指标的影响/mg·g⁻¹

Table 3 Effects of elevated O₃ on nitrogen items in wheat leaves/mg·g⁻¹

项目	拔节-孕穗期		抽穗-成熟期	
	CK	T ₂	CK	T ₂
硝态氮	0.25 ± 0.03	0.27 ± 0.02	0.22 ± 0.02	0.20 ± 0.02
铵态氮	2.11 ± 0.02	2.10 ± 0.02	2.8 ± 0.01	2.6 ± 0.02
全氮	38.71 ± 3.75	38.23 ± 3.8	10.22 ± 2.36	5.84 ± 1.49*

成熟期显著降低, 降幅为 42.86% ($P = 0.000$). 由于大豆生长季受干旱影响严重, 大豆叶片氮指标的变化可能主要是干旱引起而不是 O₃ 浓度升高, 因此本文也未列出大豆叶片的相关氮指标.

表4 O₃浓度升高对冬小麦田土壤相关氮指标的影响

Table 4 Effects of elevated O₃ on nitrogen items related to N₂O emission in wheat farmland soil

项目	拔节-孕穗期		抽穗-成熟期	
	CK	T ₂	CK	T ₂
硝态氮/μg·g ⁻¹	1.28 ± 0.03	1.28 ± 0.01	1.24 ± 0.03	1.22 ± 0.01
铵态氮/μg·g ⁻¹	21.28 ± 2.03	11.35 ± 1.01**	27.37 ± 1.43	16.24 ± 1.62**
全氮/mg·g ⁻¹	0.58 ± 0.15	0.76 ± 0.09	0.64 ± 0.07	0.66 ± 0.12

3 讨论

3.1 环境因子与N₂O排放

土壤含水量通过影响土壤的氧化还原电位、土壤微生物的有效性等来对土壤硝化反硝化作用产生影响, 使得土壤N₂O在土壤中的传输及其向大气中的排放产生变化. 当土壤孔隙含水率(water filled

26.64% ($P = 0.034$) 和 31.1% ($P = 0.000$). 成熟期, T₁、T₂ 的总生物量分别降低了 30.95% ($P = 0.000$) 和 49.27% ($P = 0.000$) (表2). O₃ 浓度升高降低了小麦的生物量. 由于大豆生长季受干旱影响严重, 大豆生物量的变化可能主要是干旱引起而不是 O₃ 浓度升高, 因此本文未列出大豆生物量.

2.4.2 O₃浓度升高对氮指标的影响

由表3可见, 在拔节-孕穗期、抽穗-成熟期, 与CK相比, T₂ 处理的小麦叶片硝态氮含量差异均不显著 ($P = 0.215$ 和 $P = 0.317$); 叶片铵态氮含量差异也不显著 ($P = 0.851$ 和 $P = 0.342$); 全氮在抽穗-

冬小麦土壤氮相关指标见表4. 与CK相比, T₂ 处理的土壤硝态氮、全氮含量差异不显著, 但土壤铵态氮含量在拔节-孕穗期和抽穗-成熟期显著降低, 降幅为 46.66% ($P = 0.000$) 和 40.66% ($P = 0.000$).

pore space, WFPS) 处于 30% ~ 60%, 土壤N₂O排放量与NO₃⁻-N浓度均随土壤含水量的增加而增加时, 由土壤硝化作用产生的N₂O占主要地位; 而当WFPS高于60%时, 土壤反硝化作用是N₂O产生的主要机制. 当土壤含水量处于一个既能促进硝化作用又能促进反硝化作用的特定范围时, 土壤N₂O产生和排放达到最高值. 在本研究中, 冬小麦CK、T₁、

T₂ 的土壤温湿度变化差异不大,说明 T₁、T₂ 的土壤-冬小麦系统 N₂O 排放降低是由于 O₃ 浓度升高引起的。

土壤-冬小麦系统的 N₂O 排放通量峰值出现在返青和拔节期,原因可能与施用返青肥有关,此时小麦植株幼小,其对 N₂O 排放贡献较小,施肥氮素引起的 N₂O 排放所占比例较大。另外,这段时期也正处于降雨较频繁季节,降雨充满土壤孔隙,加大了厌氧环境并使反硝化作用加强, N₂O 大量产生并排入土壤,这与 Mu 等^[26] 在日本的观测结果一致。Goldberg 等^[27] 认为干旱土壤由于浇水或降雨而造成土壤水分迅速升高会导致土壤 N₂O 排放短暂而剧烈的增加,降水可提高土壤氧化还原电位,改变 O₂ 供给状况,从而影响 N₂O 的排放。Kinney 等^[28] 研究发现土壤 N₂O 排放通量与降雨量和土壤湿度间存在线性关系,灌溉和降水是造成 N₂O 季节性波动的主要原因。所以土壤-冬小麦系统 N₂O 排放通量在返青和拔节期出现峰值,在冬小麦生长后期,植株对氮素吸收利用能力变强,土壤有效氮随时间而减少,导致土壤-冬小麦系统 N₂O 排放通量较低。

对比冬小麦与大豆试验结果发现, O₃ 浓度升高对冬小麦农田影响明显,而对大豆农田几乎没有影响,且大豆田 N₂O 排放比小麦田小很多,其原因是: ① 试验设计时,冬小麦和大豆 O₃ 处理浓度是一致的(都是 100 nL·L⁻¹, 或 150 nL·L⁻¹),但是宗雪梅^[29] 等发现近地表 O₃ 浓度有较强的季节变化特征,表现夏季(大豆生长季)较高,冬季(冬小麦生长季)较低。因此,试验过程中冬小麦受到的 O₃ 胁迫程度比大豆大很多,表现在冬小麦系统对臭氧浓度升高响应明显; ② 本研究中大豆生长季试验期间,降水量非常少(图 4),土壤干旱胁迫抑制了大豆植株生长, N₂O 排放也很低,远远小于冬小麦生长季的(图 2)。由于干旱胁迫对作物和土壤的影响,使臭氧升高对大豆田的影响并没有能明显地表现出来。③ 熊正琴等^[30] 研究发现,与闲耕相比,旱地种植豆科植物显著降低了土壤 N₂O 的排放。这是由于豆科植物不仅从大气中固定氮,还从土壤中吸收矿质态氮,从而降低了 N₂O 的排放量。因此,相比于土壤-冬小麦系统而言,土壤-大豆系统 N₂O 排放量相对较低。

3.2 O₃ 浓度升高影响 N₂O 排放的原因

本研究中 O₃ 浓度升高显著降低了土壤-作物系统的 N₂O 平均排放通量,其可能原因: 土壤 N₂O 产生和排放主要来自微生物的硝化反硝化过程,

Andersen^[14] 研究发现 O₃ 浓度升高会降低植物根系有机物的分泌,而根系分泌物是根际微生物的主要 C 源,从而会导致土壤微生物代谢降低^[31]。植物根系分泌物减少,影响土壤微生物养分供应,使土壤微生物活性降低,从而导致土壤 N₂O 排放通量降低。李全胜等^[32] 研究也发现 O₃ 浓度升高通过影响小麦植株间接增加根际土壤亚硝酸细菌和硝化反硝化细菌数量,可能使土壤硝化反硝化过程更完全,最终产物不是 N₂O,而是 N₂,从而使土壤 N₂O 排放随着 O₃ 浓度升高而降低。而作物体本身产生的 N₂O 量一般与光合作用的强度和叶绿素含量等因素有关。O₃ 浓度升高降低叶绿素含量^[9,10]; 迫使叶片气孔关闭^[33],从而降低植物的光合作用^[34],抑制植物生长和作物生物量^[13],导致植株 N₂O 排放降低。即 O₃ 浓度升高通过间接地影响作物,降低土壤-作物系统的 N₂O 排放。

李玥莹等^[35] 研究发现,作物 N₂O 排放与作物叶片的 NO₃⁻-N 含量和硝酸还原酶(NR)活性呈显著正相关。本研究中,在冬小麦拔节-孕穗期和抽穗-成熟期,与 CK 相比, T₂ 处理的冬小麦叶片 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量差异均不显著,仅叶片全氮在抽穗-成熟期显著降低,从而 O₃ 浓度升高处理的小麦植株的 N₂O 排放量可能降低。本研究中 T₂ 处理的土壤 NH₄⁺-N 含量与 CK 相比,在拔节-孕穗期和抽穗-成熟期显著降低,土壤 NO₃⁻-N 含量没有显著差异,曾江海等^[36] 研究表明大部分反硝化细菌在一定条件下能把 N₂O 还原为 N₂,但 NH₄⁺ 通过反硝化细菌抑制 N₂O 的进一步还原,即由于土壤 NH₄⁺-N 含量降低, N₂O 进一步被还原为 N₂,所以导致土壤 N₂O 排放降低,孙艳丽等^[37] 也发现随着土壤 NH₄⁺-N 含量降低,土壤 N₂O 排放通量呈下降趋势,而与 NO₃⁻-N 含量未表现出明显的数量关系。本研究中冬小麦土壤拔节-孕穗期和抽穗-成熟期 T₂ 处理的全氮含量增加(但未达到显著性水平),而黄耀等^[38] 的研究表明土壤 N₂O 的排放与土壤全氮含量呈显著负相关,因此可能出现冬小麦拔节-孕穗期和抽穗-成熟期 T₂ 处理的土壤 N₂O 排放降低现象。土壤中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 作为硝化反硝化作用关键的底物,其含量降低,可能导致土壤 N₂O 排放量降低。O₃ 浓度升高可能通过降低小麦植株 N₂O 排放和土壤 N₂O 排放,从而导致土壤-冬小麦系统 N₂O 排放通量降低,而相比于 T₁ 处理, T₂ 处理的冬小麦植株受臭氧胁迫更加严重,植株的生长等其他生理特性也受到抑制,从而

T₂ 处理比 T₁ 处理的小麦植株 N₂O 排放通量降低,同时小麦田 T₂ 处理的土壤 N₂O 排放通量也降低,又因为植株 N₂O 排放在土壤-作物系统 N₂O 排放中所占比重较大^[39],因此可能出现冬小麦拔节-孕穗期 T₂ 处理的土壤-冬小麦系统 N₂O 排放降低现象。

3.3 O₃ 浓度升高对氮素指标的影响

O₃ 浓度升高改变了植物的生理机制、凋落物及其根系分泌物的品质和组成成分,导致了土壤中 N 等元素的含量发生变化,从而引发了土壤中的功能微生物数量的改变,进而可能影响不同时期小麦植株体内 N 含量。张成臣等^[40]研究表明,O₃ 浓度升高处理显著降低了成熟期小麦植株地上部分体内 N 的含量,本研究也发现 T₂ 处理显著降低了成熟期小麦叶片中全氮含量,降幅为 42.86% ($P=0.043$)。

Kanerva 等^[41]对草地生态系统的观察表明,臭氧浓度升高条件下土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的含量均会下降,并且 NH₄⁺-N 含量的下降达到了显著水平 ($P<0.05$)。本研究中也表明 O₃ 浓度升高条件下,自拔节期起,土壤活性氮 (NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N) 含量随小麦生长呈现出逐渐降低的趋势,T₂ 处理下土壤铵态氮含量在拔节期和抽穗期显著降低。臭氧浓度升高条件下土壤脲酶活性增强,可能是小麦受到臭氧胁迫后通过增加氮素营养吸收来提高其抗胁迫能力^[42],所以土壤活性氮含量均趋于降低,亦导致土壤-冬小麦系统 N₂O 排放降低。

4 结论

(1) O₃ 浓度升高没有改变土壤-冬小麦(大豆)系统 N₂O 排放通量的生长季变化规律。

(2) 从返青期和全生育期来看,O₃ 浓度升高显著降低了土壤-冬小麦系统的 N₂O 排放通量和累积排放量。

(3) 本研究的大豆生长季由于降水量少,干旱对大豆作物影响大,干旱胁迫遮蔽了 O₃ 的生态效应,O₃ 对大豆田 N₂O 排放影响没有显著体现出来。

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 [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] Blasing T J. Recent greenhouse gas concentrations. Oak ridge national laboratory: carbon dioxide information analysis center [EB/OL]. http://cdiac.ornl.gov/pns/current_ghg.html, 2014-4-15.
- [4] IPCC. Atmospheric chemistry and greenhouse gases [A]. In: Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. (Eds.). Climate change 2001: the scientific basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 183-238.
- [5] 周秀骥. 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究 [M]. 北京: 气象出版社, 2004. 48-51.
- [6] Meleux F, Solmon F, Giorgi F. Increase in summer European ozone amounts due to climate change [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(35): 7577-7587.
- [7] Cape J N. Surface ozone concentrations and ecosystem health: past trends and a guide to future projections [J]. Science of the Total Environment, 2008, **400**(1-3): 257-269.
- [8] Sitch S, Cox P M, Collins W J, et al. Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink [J]. Nature, 2007, **448**(7155): 791-794.
- [9] 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等. 臭氧胁迫下遮荫对孕穗期冬小麦叶片光合系统的影响 [J]. 中国农业气象, 2013, **34**(4): 410-418.
- [10] Löw M, Herbinger K, Nunn A J, et al. Extraordinary drought of 2003 overrules ozone impact on adult beech trees (*Fagus sylvatica*) [J]. Trees, 2006, **20**(5): 539-548.
- [11] Wang X P, Mauzerall D L. 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.
- [12] Ryang S Z, Woo S Y, Kwon S Y, et al. Changes of net photosynthesis, antioxidant enzyme activities, and antioxidant contents of *Liriodendron tulipifera* under elevated ozone [J]. Photosynthetica, 2009, **47**(1): 19-25.
- [13] 王云霞, 王晓莹, 周晓冬, 等. 近地层臭氧 (O₃) 浓度升高对水稻武运梗 21 抗倒性的影响 [J]. 江苏农业学报, 2011, **27**(6): 1167-1173.
- [14] Andersen C P. Source-sink balance and carbon allocation below ground in plants exposed to ozone [J]. New Phytologist, 2003, **157**(2): 213-228.
- [15] 胡正华, 李岑子, 陈书涛, 等. 臭氧浓度升高对土壤-冬小麦系统 CO₂ 排放的影响 [J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 46-50.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Islam K R, Mulchi C L, Ali A A. Interactions of tropospheric CO₂ and O₃ enrichments and moisture variations on microbial biomass and respiration in soil [J]. Global Change Biology, 2000, **6**(3): 255-265.
- [19] Kanerva T, Palojarvi A, Rämö K, et al. Changes in soil

- microbial community structure under elevated tropospheric O₃ and CO₂ [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(10): 2502-2510.
- [20] 石春红, 郑有飞, 吴芳芳, 等. 大气中臭氧浓度增加对根际和非根际土壤微生物的影响[J]. *土壤学报*, 2009, **46**(5): 894-898.
- [21] Melillo J M, Stuedler P A, Aber J D, *et al.* Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. *Science*, 2002, **298**(5601): 2173-2176.
- [22] Parton W J, Mosier A R, Ojima D S, *et al.* Generalized model for N₂ and N₂O production from nitrification and denitrification [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(3): 401-412.
- [23] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(5): 842-844.
- [24] Hu Z H, Jiang J Y, Chen S T, *et al.* Effects of enhanced UV-B radiation on N₂O emission in a soil-winter wheat system [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, **213**(1-4): 493-499.
- [25] 李宇庆, 陈玲, 赵建夫. 土壤全氮测定方法的比较[J]. *广州环境科学*, 2006, **21**(3): 28-29.
- [26] Mu Z J, Kimura S D, Toma Y, *et al.* Nitrous oxide fluxes from upland soils in central Hokkaido, Japan [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(11): 1312-1322.
- [27] Goldberg S D, Gebauer G. N₂O and NO fluxes between a Norway spruce forest soil and atmosphere as affected by prolonged summer drought [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(9): 1986-1995.
- [28] Kinney C A, Mandernack K W, Mosier A R. Laboratory investigations into the effects of the pesticides mancozeb, chlorothalonil, and prosulfuron on nitrous oxide and nitric oxide production in fertilized soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(5): 837-850.
- [29] 宗雪梅, 王庚辰, 陈洪滨, 等. 北京地区边界层大气臭氧浓度变化特征分析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2615-2619.
- [30] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 冬季耕作制度对农田氧化亚氮排放的贡献[J]. *南京农业大学学报*, 2002, **25**(4): 49-52.
- [31] 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.
- [32] 李全胜, 林先贵, 胡君利, 等. 近地层臭氧浓度升高对麦田土壤氨氧化与反硝化细菌活性的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, **26**(6): 524-528.
- [33] Wieser G, Matyssek R. Linking ozone uptake and defense towards a mechanistic risk assessment for forest trees [J]. *New Phytologist*, 2007, **174**(1): 7-9.
- [34] Wittig V E, Ainsworth E A, Naidu S L, *et al.* Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(2): 396-424.
- [35] 李玥莹, 陈冠雄, 徐慧, 等. 苗期玉米、大豆在土壤-植物系统N₂O排放中的贡献[J]. *环境科学*, 2003, **24**(6): 38-42.
- [36] 曾江海, 王智平. 农田土壤N₂O生成与排放研究[J]. *土壤通报*, 1995, **26**(3): 132-134.
- [37] 孙艳丽, 陆佩玲, 李俊, 等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田土壤N₂O通量特征及影响因素[J]. *中国农业气象*, 2008, **29**(1): 1-5.
- [38] 黄耀, 焦燕, 宗良纲, 等. 土壤理化特性对麦田N₂O排放影响的研究[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(5): 598-602.
- [39] Zou J W, Huang Y, Sun W J, *et al.* Contribution of plants to N₂O emissions in soil-winter wheat ecosystem: pot and field experiments [J]. *Plant and Soil*, 2005, **269**(1-2): 205-211.
- [40] 张咸臣, 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]. *生态学杂志*, 2011, **30**(8): 1637-1641.
- [41] Kanerva T, Palojärvi A, Rämö K, *et al.* A 3-year exposure to CO₂ and O₃ induced minor changes in soil N cycling in a meadow ecosystem [J]. *Plant and Soil*, 2006, **286**(1-2): 61-73.
- [42] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, **9**(4): 406-410.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Status and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning (751)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行