

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

^{13}C 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响

陈展^{1,2}, 王效科^{2*}, 尚鹤¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 本研究采用具有日变化的熏蒸方式, 利用 ^{13}C 同位素示踪方法, 结合 PLFA 技术, 模拟分析了臭氧浓度升高对水稻土壤微生物结构的影响. 实验设置 2 个臭氧浓度处理, 即空气对照 (CF , 臭氧浓度约 $4 \sim 10 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$), 臭氧浓度升高处理 (O_3 , 8 h 平均浓度为 $110 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$). 分别在水稻熏蒸 1 个月和 2 个月时进行 ^{13}C 同位素标记实验. 结果发现, 臭氧熏蒸一个月的时候对土壤微生物量碳没有影响, 但此时输入到土壤微生物的即时光合产物 ^{13}C 已经显著低于对照; 随臭氧熏蒸时间的延长, 无论是总的土壤微生物量碳还是即时光合产物 ^{13}C 对土壤微生物的输入都显著低于对照处理. PLFA 主成分分析结果表明, 熏蒸一个月时臭氧对 ^{13}C -PLFA 的结构组成并没有显著影响, 但熏蒸两个月后则臭氧明显改变了 ^{13}C -PLFA 的组成, 但两次标记后 PLFA 单体的 $\Delta\delta^{13}\text{C} \text{ ‰}$ 值已受到臭氧的影响. 臭氧胁迫前期, 只有细菌脂肪酸的 ^{13}C 分配 ($^{13}\text{C}\%$) 受到臭氧的明显影响, 而胁迫后期则臭氧主要影响的是分配给放线菌和真菌的 ^{13}C .

关键词: 臭氧; 水稻; 土壤微生物; ^{13}C 同位素; ^{13}C -PLFA

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3911-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.10.038

Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ^{13}C Isotope Labeling

CHEN Zhan^{1,2}, WANG Xiao-ke², SHANG He¹

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of State Forestry Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: This study was initiated to explore the effects of dynamic ozone (O_3) exposure on soil microbial biomass and phospholipid fatty acids (PLFAs) under potted rice. A pulse-chase labeling experiment was designed to expose potted rice with ^{13}C for 6 h after one and two months, the rice were fumigated by elevated O_3 concentration with an 8 h mean of $110 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ (O_3). The allocation of the assimilated ^{13}C to soil microorganisms was estimated by analyzing the ^{13}C profile of microbial phospholipid fatty acids (PLFAs). After one month O_3 exposure, the soil microbial biomass carbon was not affected, while the ^{13}C -microbial biomass was significantly decreased with elevated O_3 . Both the total and ^{13}C microbial biomass carbon was remarkably lower than that of control treatment after two months O_3 exposure. Principal components analysis of ^{13}C -PLFA data showed that elevated O_3 significantly changed soil microbial structure after two month exposures, while there was no difference of ^{13}C -PLFA structure between control and elevated O_3 treatments after one month exposure. $\Delta\delta^{13}\text{C} \text{ ‰}$ of individual PLFA was significantly affected by O_3 after both one and two month exposures. Only did ozone change the relative abundance of individual ^{13}C -PLFA ($^{13}\text{C}\%$) of bacterial fatty acids after one month exposure, while after two month exposures, the $^{13}\text{C}\%$ of fungal and actinomycetic fatty acids were markedly changed by elevated O_3 .

Key words: ozone; rice; soil microbe; ^{13}C isotope; ^{13}C -PLFA

目前的 O_3 浓度相对于工业化前已经增加了 36%^[1]. 随着我国工业化和城市化进程的加快, 能源消耗不断增加, 大气污染危害日益严重, 尤其是近地层 O_3 浓度的升高, 导致农作物产量降低, 森林衰退^[2-6]. Ding 等^[7]通过对 MOZAIC (measurement of ozone and water vapor by airbus in-service aircraft) 航测数据的研究发现, 在过去 10 年里我国东部地区地面臭氧浓度以每年 2% 左右的速度增长. Wang 等^[8]利用 1994 ~ 2007 年 14 年间香港地区监测数据得出, 中国南方地区臭氧的背景值浓度每年增加

$0.58 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$. 在我国, 随着社会经济的快速发展, 无论珠江和长江三角洲, 还是京津地区, 空气 O_3 浓度一直较高.

有关臭氧对植物的影响研究多集中在地上部分, 如臭氧降低气孔导度、抑制光合作用、产生叶面伤害、降低植物生物量、作物产量及森林生态系

收稿日期: 2014-02-13; 修订日期: 2014-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30670387)

作者简介: 陈展 (1980 ~), 女, 博士, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: chenchen323@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangxk@rcees.ac.cn

统生产力等^[9~13],而关于臭氧对土壤微生物的影响研究还比较少^[14].但是臭氧能改变植物光合产物分配^[15],降低植物对根系的碳分配,而转移到根系的光合产物减少也会影响根系微生物之间的相互作用^[16,17],同时臭氧浓度提高会降低凋落物的质量和分解速率,从而降低土壤微生物生物量,并且改变微生物的群落结构及功能多样性^[18].臭氧浓度升高抑制小麦根系土壤微生物的活性,降低根系土壤微生物代谢多样性^[19,20];臭氧也降低水稻土壤微生物的代谢功能,同时改变了土壤微生物的磷脂脂肪酸(PLFA)组成^[21],但臭氧对土壤微生物群落结构的具体影响不明确,如臭氧主要影响的是土壤微生物中哪些磷脂脂肪酸等.

随着土壤微生物研究越来越广泛、深入,有很多方法被引入到土壤微生物分析中,其中,PLFA生物标记法对实验条件要求较低,方法灵敏^[22],能够快速、直接、有效地提供较为客观可靠的土壤微生物含量、组成及群落信息^[23,24]等优点被广泛运用于土壤微生物分析中.稳定同位素标记技术作为一种快速发展的新技术,已经被应用于土壤微生物学研究. PLFAs 技术与稳定同位素分析的结合,可以很好地识别复杂土壤生态系统中利用外加底物的微生物种群,确定生态系统在外来胁迫因素作用下,不同类群土壤微生物参与有机质代谢的功能.采用稳定性同位素标记技术,通过直接测定不同土壤微生物 PLFA 类群的稳定性同位素丰度变化及其对臭氧熏蒸的响应,以期回答:①植物同化的稳定性同位素标记过的 CO_2 能否很快传递到土壤微生物中? ②传递到土壤微生物中的同位素丰度是否受到臭氧熏蒸的影响? ③如果是,哪些微生物类群将受到何种影响? 本研究利用 ^{13}C 同位素标记和 PLFA 技术,对臭氧浓度升高后土壤微生物结构的响应过程进行探讨,以明确臭氧改变光合产物分配引起的土壤微生物的变化,以期了解未来近地表大气臭氧浓度持续增加情况下生态系统地下过程的响应规律提供基础数据和理论依据.

1 材料与方法

1.1 室内熏气系统

室内实验所用的熏气装置采用专门定做的研究大气污染对植物影响的柜式气室($1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 2.1\text{ m}$)^[25]. O_3 由臭氧发生器产生,以纯氧作为 O_3 发生器的气源, O_3 由箱底部进入生长箱,进入前先与鼓风机吹进的空气混合,再经过箱子中下部起混

合作用的薄钢板(孔径 1 mm),使 O_3 与空气混合均匀.箱子中部为带孔钢板(孔径 1 mm),供放盆钵和再次混匀气体.充分混匀后的气体进入生长室,生长室内 O_3 浓度由 O_3 分析仪监测(ML9810 型, ECOTECH 公司), O_3 浓度通过空气钢瓶供气量的大小和质量流量计控制.生长箱顶部有排气通道,用于熏蒸后废 O_3 气体的排放.

1.2 O_3 的暴露处理

水稻暴露实验采用了两个处理,即对照 CK 和臭氧浓度升高的处理 O_3 . CK 为空气对照(直接向气室内通空气,其臭氧浓度约 $4 \sim 10\text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$). 现有的研究大多是在恒定浓度下进行臭氧熏蒸,这并不能完全真实的反应实际情况,实际上大气环境中的臭氧会有一个明显的日变化,从清晨开始臭氧浓度会随光照等条件有所升高,14:00 ~ 15:00 臭氧浓度达到一天的最高值,之后臭氧浓度又会缓慢回落.为了真实反映大气中 O_3 浓度变化,本研究采用具有日变化的臭氧熏蒸方式,臭氧浓度升高处理的配气方案为 09:00 时臭氧浓度约 $40\text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$,每过 0.5 h 臭氧浓度升高 $20\text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$,直到 12:30 达到一天的最大值为 $180\text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 持续 1 h ,随后臭氧浓度与上午呈对称式下降,到 17:00 回落到 $40\text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$,最大值为 $170\text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$,其日平均为 $110\text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.3 水稻的种植管理

水稻品种为 3694 繁,采用的土是从浙江嘉兴野外实验基地采回的田间土,过 2 mm 筛.移栽水稻前在土壤中添加一定的肥料, $0.428\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 尿素、 $0.323\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.247\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ K_2SO_4 以及 $0.4732\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. 水稻种子于 6 月 5 日用 5% H_2O_2 消毒后置于培养皿中于 25°C 培养箱中催芽 3 d ,然后在珍珠岩苗床上培养,培养期间用 Hoagland 营养液浇灌,7 月 2 日将水稻苗从珍珠岩上移植到高 30 cm 、直径 15 cm 的 PVC 筒中,每个臭氧处理下 15 盆,每盆 2 株,于室外自然光照下生长.7 月 20 日将栽有水稻苗的 PVC 筒移入气室内,开始熏气,11 月 2 日熏气结束.该气室内白天温度为 $25 \sim 30^\circ\text{C}$,夜间为 $20 \sim 25^\circ\text{C}$;相对湿度为 $50\% \sim 85\%$, CO_2 浓度与正常大气中一致,光源是波长 $400 \sim 700\text{ nm}$ 、光强 $220\text{ }\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 的人工光源的,光照时间是 07:00 ~ 19:00. 生育期间每天转换 PVC 筒的方向以保证水稻光照均匀.

1.4 ^{13}C 同位素示踪

分别于 8 月 21 日和 9 月 19 日进行两次 $^{13}\text{CO}_2$ 标记,标记实验在自制的标记室内进行.标记装置

由一个水封槽底座有机玻璃罩子组成,底座上装有一个空气压缩机,温度控制器。由于标记时日照很强,会使有机玻璃标记室内温度过高产生雾气,因此利用空气压缩机进行冷却,同时利用温度控制器将标记室内温度稳定在一个温度范围内从而避免雾气产生影响植物的光合作用。将栽有水稻植株的 PVC 筒放在水封槽内的底座上,每盆水稻在 PVC 筒口平面上用黑色塑料布遮住(水稻正常露出),以避免盆内水体中的藻类等进行光合作用吸收 $^{13}\text{CO}_2$ 。每次标记时两个处理各标记 3 盆,共在标记室内放 6 盆水稻。水稻放好后将有机玻璃罩子罩在水封槽上,保证其密封性, $^{13}\text{CO}_2$ 气体由箱体上方的孔注入。同时用 CO_2 红外分析仪监测标记室内的 CO_2 浓度。

植株放入后,先将室内气体通过一个过滤器进行循环以吸收掉背景的 CO_2 ,使背景 CO_2 浓度降至 100×10^{-6} 左右,将此通路关闭,再开始注入 $^{13}\text{CO}_2$ 。 $^{13}\text{CO}_2$ 由 $\text{Ba}^{13}\text{CO}_3$ (98% atom%) 与磷酸反应产生,产生的气体用气袋收集,然后用注射器分次向气室内注入该气体。标记从 09:00 开始向气室内注入 $^{13}\text{CO}_2$ 气体,使气室内的 $^{13}\text{CO}_2$ 浓度维持在 250×10^{-6} 左右,共标记 6 h,之后再注入普通 CO_2 气体使室内残留的 $^{13}\text{CO}_2$ 能完全吸收。两次标记分别消耗 $\text{Ba}^{13}\text{CO}_3$ 约 10 g 左右,且第一次标记时植株的光合能力要强于第二次标记的时候。未标记的样品则用 CO_2 代替 $^{13}\text{CO}_2$ 进行上述过程。

1.5 样品采集

标记完成后的植株从标记室内取出后继续放到相应处理的气室内继续进行臭氧暴露处理,标记 72 h 后取根际土壤样品,分别进行微生物量测定(包括 ^{13}C -微生物量碳)和磷脂脂肪酸(^{13}C -PLFA)分析。

1.6 分析测定

1.6.1 土壤样品中 ^{13}C -微生物量的分析测定

土壤样品采样后按照微生物碳的测定方法进行熏蒸,用 TOC 分析仪测定出熏蒸和未熏蒸土壤样品的有机碳,计算其微生物量碳。然后分别取 20 mL 熏蒸和未熏蒸样品提取液在 80°C 烘干并磨成粉末,用同位素比率质谱仪测定 ^{13}C 。 ^{13}C 的原子百分比计算公式为^[23]:

$$\text{atom}^{13}\text{C}\% = \left\{ (\delta^{13}\text{C} + 1000) \times R_{\text{PDB}} \right\} / \left\{ (\delta^{13}\text{C} + 1000) \times R_{\text{PDB}} + 1000 \right\} \times 100 \quad (1)$$

式中, R_{PDB} 是标准 PDB 的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值(0.012372), $\delta^{13}\text{C}$ 是每个土壤提取液的丰度。微生物碳中的 ^{13}C 是在熏蒸和未熏蒸土壤提取液扣除掉未标记土壤样品中

的 ^{13}C 自然丰度以后的差值来计算的,计算公式为:

$$\begin{aligned} ^{13}\text{C-MBC} = & \left[\left\{ (\text{atom}^{13}\text{C}\%)_{\text{FM,label}} - \right. \right. \\ & \left. \left. (\text{atom}^{13}\text{C}\%)_{\text{FM,unlabel}} \right\} \times C_{\text{FM}} - \right. \\ & \left. \left\{ (\text{atom}^{13}\text{C}\%)_{\text{UFM,label}} - \right. \right. \\ & \left. \left. (\text{atom}^{13}\text{C}\%)_{\text{UFM,unlabel}} \right\} \times \right. \\ & \left. C_{\text{UFM}} \right] + 0.45 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, FM, label 表示标记样品熏蒸土壤提取液; FM, unlabel 表示未标记样品熏蒸土壤提取液; UFM, label 表示标记样品未熏蒸土壤提取液; UFM, unlabel 表示未标记样品未熏蒸土壤提取液; C_{FM} 和 C_{UFM} 分别表示熏蒸土壤和未熏蒸土壤的总有机碳^[26]。熏蒸样品和未熏蒸样品均设 3 个重复,即取 3 份土进行熏蒸,未熏蒸样品也取 3 份土但不熏蒸。

1.6.2 土壤样品中 ^{13}C -PLFA 的分析

^{13}C -PLFA 按照上述 PLFA 同样的方法提取后,用 GC-c-IRMS 进行 PLFA 分析及每个单峰 PLFA 的 $\delta^{13}\text{C}$ 的确定。

PLFA 单体的量按照公式(5)进行计算:

$$\text{Fatty acid} = \text{dilution} \times \frac{(P_{\text{FAME}} \times \text{ng Std})}{(P_{\text{ISTD}} \times W)} \quad (3)$$

式中, Fatty acid 为单个磷脂脂肪酸(PLFA)的量(以干土计),单位为 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$; P_{FAME} 为样品峰面积; P_{ISTD} 为内标(methyl ester C19:0, $5 \text{ ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$) 峰面积; ng Std 为内标的浓度($\text{ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$); dilution 为稀释倍数,即最后加入的正己烷体积 $1000 \mu\text{L}$; W 为烘干土干重(以干土计),4 g。

每个单体 PLFA 中的 ^{13}C 的量按照标记样品和未标记样品的差值进行计算:

$$\begin{aligned} ^{13}\text{C-PLFA} = & \left[(\text{atom}^{13}\text{C}\%)_{\text{PLFA,label}} - \right. \\ & \left. (\text{atom}^{13}\text{C}\%)_{\text{PLFA,unlabel}} \right] \times \text{PLFA} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, ^{13}C -PLFA 是进入单体 PLFA 的 ^{13}C 的量(以 $^{13}\text{C}/\text{soil}$ 计, $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); $(\text{atom}^{13}\text{C}\%)_{\text{PLFA; labeled}}$ 和 $(\text{atom}^{13}\text{C}\%)_{\text{PLFA; unlabel}}$ 分别指标记和未标记样品单体 PLFA 的 $\text{atom}^{13}\text{C}\%$; PLFA 指标记样品中单体 PLFA 的含量(以 C/soil 计, $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

单体 PLFA 中 ^{13}C 的相对丰度(the relative abundance)按公式(5)进行计算:

$$^{13}\text{C}\% = \frac{^{13}\text{C-PLFA}_{\text{individual}}}{\sum ^{13}\text{C-PLFA}_{\text{individual}}} \times 100 \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 臭氧对水稻土壤微生物量碳的影响

第一次取样时臭氧对土壤微生物量碳没有影

响,但后两次取样臭氧则显著降低了水稻土壤的微生物量碳,相对于空气对照而言臭氧处理后水稻土壤微生物量碳分别降低 26.1% 和 14.6%. 但第一、二次标记后的臭氧处理的土壤样品中微生物量的 ^{13}C 均是显著降低的,分别比空气对照降低了 68.6% 和 59.1% (表 1).

没有 $^{13}\text{CO}_2$ 标记的样品中无论是熏蒸还是未熏蒸的土壤提取液中的 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ 值很接近,随时间也没有发生变化,未熏蒸土壤提取液的 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ 为 $-24.06\text{‰} \pm 0.17\text{‰}$,熏蒸土壤提取液中 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ 为 $-25.36\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$. $^{13}\text{CO}_2$ 标记的样品中,熏蒸土壤提取液的 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ 明显的高于未熏蒸土壤提取液,且 9 月 22 日样品中熏蒸土壤提取液的 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ 比未熏蒸土壤提取液增加得要比 8 月 24 日多. 随时间的延长在 9 月 22 日样品中无论是熏蒸还是未熏蒸土壤提取液中的 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ 都要相应地高于 8 月 24 日的样品.

对于未熏蒸样品而言,CK 和 O_3 处理之间 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ 没有差别;而对于熏蒸样品而言,8 月 24 日对照处理下 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ 为 -6.69‰ , O_3 处理下 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ 为 -8.44‰ ,9 月 22 日对照处理和 O_3 处理下 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ 分别为 0.49‰ 和 -0.60‰ , O_3 处理明显降低了熏蒸土壤提取液的 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$.

表 1 臭氧对水稻土壤微生物量碳及 ^{13}C 的影响¹⁾

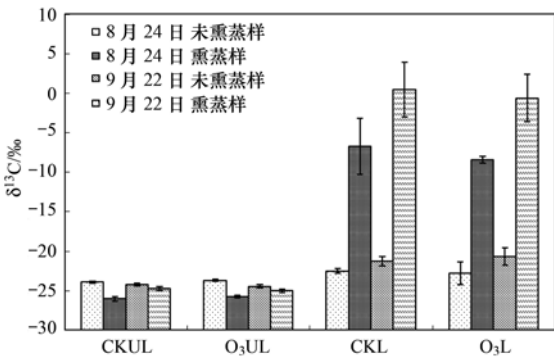
Table 1 Effects of ozone on soil microbial biomass carbon and ^{13}C partition under rice

项目	MBC(以 C/干土计)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			^{13}C -MBC(以 C/干土计)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	
	8 月 24 日	9 月 22 日	11 月 2 日	8 月 24 日	9 月 22 日
CK	487.93 $\pm$ 49.31	745.47 $\pm$ 31.81	512.46 $\pm$ 14.96	2.39 $\pm$ 0.20	3.50 $\pm$ 0.13
O_3	443.72 $\pm$ 25.12	550.89 $\pm$ 60.54	437.44 $\pm$ 12.84	0.75 $\pm$ 0.13	1.43 $\pm$ 0.25
	ns	*	*	**	**

1) ns 表示对照处理 CK 和 O_3 处理之间无显著差异; *, ** 分别表示两个处理在 0.05 和 0.01 水平下差异显著

第一次标记时水稻土壤 PLFA 主成分分析表明,主成分 1 和 2 分别解释了变异量的 69.1% 和 23.3%,但并没有区分开臭氧处理和对照处理,说明第一次标记时两个处理间 PLFA 结构没有差异[图 2(a)].

第二次标记时水稻土壤 PLFA 主成分分析表明,主成分 1 和 2 分别解释了变异量的 57.1% 和 28.8%,且得分系数方差分析表明 PC1 明显将 CK 和 O_3 处理区分开来($F=22.1, P=0.009$, PC1),说明第二次标记时臭氧已经明显的改变了水稻土壤 PLFA 的结构. 造成 PC1 显著分异的脂肪酸是与其显著正相关的 14:0 和 cy17 以及与 PC1 显著负相关的 i16:0 和 18:2 ω 6,9 这 4 种脂肪酸,且臭氧处理后前两种脂肪酸的含量是降低的,而后两种脂肪酸则



CKUL,对照处理中未标记 $^{13}\text{CO}_2$ 的样品; O_3UL , O_3 处理中未标记 $^{13}\text{CO}_2$ 样品; CKL,对照处理中标记 $^{13}\text{CO}_2$ 的样品; O_3L , O_3 处理中标记 $^{13}\text{CO}_2$ 的样品

图 1 $^{13}\text{CO}_2$ 标记与未标记两个处理中熏蒸土壤样品和未熏蒸土壤样品的 $\delta^{13}\text{C}$

Fig. 1 $\delta^{13}\text{C}$ of fumigated and unfumigated soil extracts of soil samples from pots with and without $^{13}\text{CO}_2$ labelling of rice plants under control and O_3 treatments

2.2 臭氧对水稻土壤微生物 PLFA 结构的影响

室内水稻土壤中一共检测到 11 种 C14 ~ 18 的脂肪酸,包括直链饱和脂肪酸、支链饱和脂肪酸、环丙基脂肪酸以及多不饱和脂肪酸,其中含量最丰富的脂肪酸是 16:0、15:0、a15:0、i16:0 以及 cy17:0,均占总量的 10% 左右.

是增加的[图 2(b)].

水稻植株进行 $^{13}\text{CO}_2$ 标记后,部分 ^{13}C 迅速转移到土壤中,进入微生物的 PLFA 中,但 ^{13}C 并不是均匀分布于 PLFAs 中. 两次标记前后 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加最多的均是 14:0 和 cy17 以及 15:0,其余脂肪酸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加幅度差不多. 第一次标记结果表明,臭氧熏蒸显著的改变除了 17:0 以外其他 PLFA 单体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,i16:0 和 i17:0 这 2 种脂肪酸在臭氧处理后 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著提高,而其他 6 种细菌脂肪酸包括 14:0、15:0、a15:0、16:0、cy17:0、18:0,以及放线菌指示脂肪酸 18:0(10Me)和真菌脂肪酸 18:2 ω 6 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均显著降低[图 3(a)]. 而第二次标记后,则臭氧对 PLFA 单体 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响没有第一次明显,i16:0 经臭氧处理后 $\delta^{13}\text{C}$ 值仍显著增加,同时臭氧

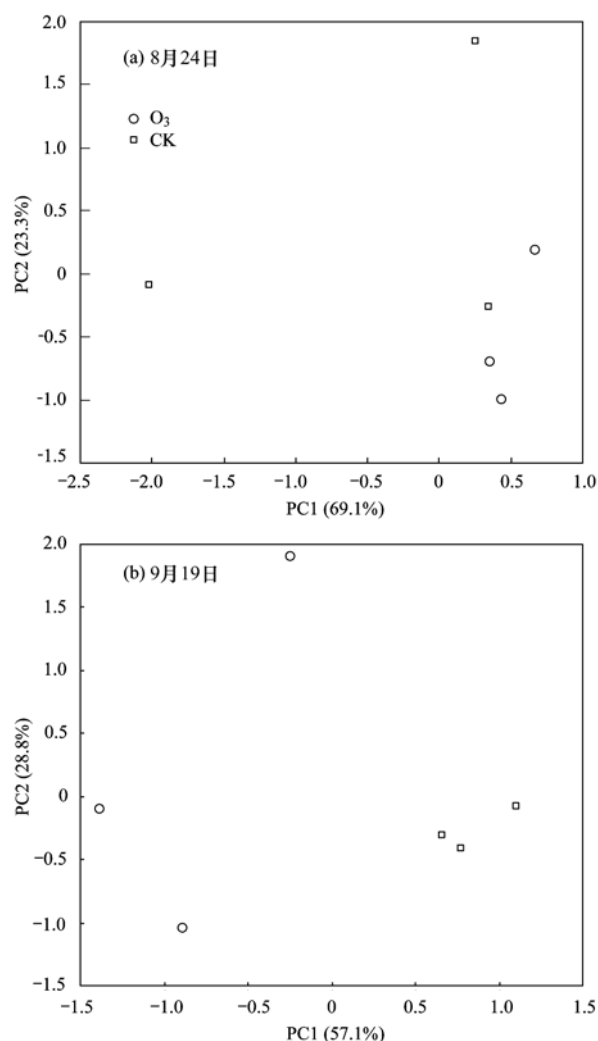


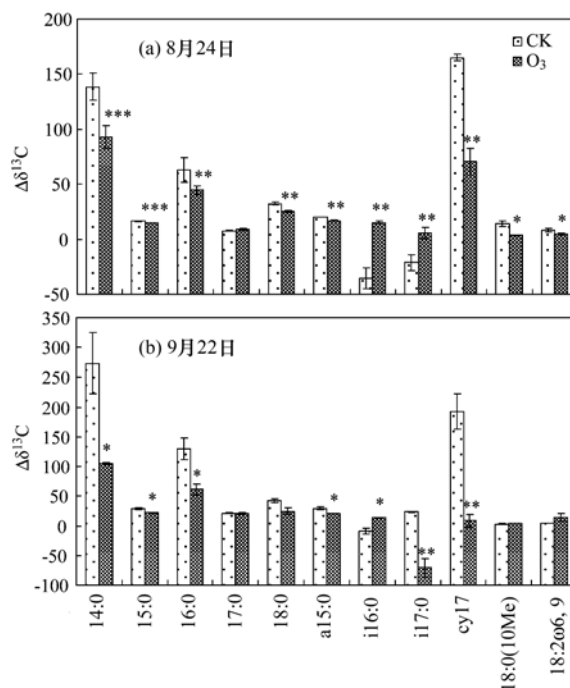
图2 两次标记时水稻土壤微生物 PLFA 结构

Fig. 2 Plot of Factor 1 versus Factor 2 scores from principal components analysis of PLFA data between rhizosphere soils labeling on 24th Aug. and 19th Sep.

显著降低了 14:0、15:0、16:0、a15:0、i17:0、cy17 这 6 种脂肪酸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,而对放线菌的指示脂肪酸 18:0(10Me)以及真菌脂肪酸 18:2 ω 6,9 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值都没有产生影响[图 3(b)]。

PLFA 单体的 ^{13}C 相对丰度($^{13}\text{C}\%$)表明,16:0 和 cy17 这 2 种脂肪酸占有 PLFA 中总的 ^{13}C 的一大半,两者总的 $^{13}\text{C}\%$ 超过了 60%,其次 $^{13}\text{C}\%$ 含量高的脂肪酸包括 14:0、15:0、a15:0 和 i16:0。PLFAs 单体中 $^{13}\text{C}\%$ 的差别表明微生物群落对输入的光合产物存在不同的反应,臭氧作用后会影响到不同 PLFAs 单体中的 $^{13}\text{C}\%$ 。第一次标记样品中,相对于空气对照土壤而言,臭氧显著提高了 4 种饱和脂肪酸的 $^{13}\text{C}\%$,包括 15:0、16:0、17:0 以及 a15:0;同时显著降低了 i16:0 和 i17:0 这 2 种脂肪酸的 ^{13}C 相对含

量,而对放线菌脂肪酸和真菌脂肪酸中 ^{13}C 相对含量没有影响[图 4(a)]。第二次标记样品中,臭氧显著提高了两种细菌脂肪酸 16:0、17:0,放线菌脂肪酸 18:0(10Me)以及真菌脂肪酸 18:2 ω 6 的 ^{13}C 的分配量($^{13}\text{C}\%$);同时显著抑制了 ^{13}C 对 14:0 和 cy17 这 2 种脂肪酸的分配[图 4(b)]。



*, **, *** 分别表示 CK 处理和 O_3 处理在 0.05、0.01、0.001 水平上差异显著,下同

图3 两次标记后土壤样品 ^{13}C -PLFA 单体的 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ ‰值

Fig. 3 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ ‰ of individual ^{13}C -PLFA of labeled and unlabeled soils under different O_3 treatments on 24th Aug. and 22nd Sep.

3 讨论

由于臭氧作用于植物叶片导致光合作用降低,总的光合产物降低,但植物本身存在一个自我修复机制,会用更多的碳来修补叶片的损伤,从而导致输入到茎和根部的碳减少^[27]。本研究也证明了这一机制的存在,臭氧胁迫后植物叶片碳分配增加而茎和根等其他部位碳分配减少^[13]。这一结果也与 Ariyaphanphitak 等^[28]得到的研究结果一致。臭氧胁迫后对根部碳分配的降低会减少根系分泌物的量,从而导致土壤微生物可利用的碳源减少,势必会影响到土壤微生物的量。本研究表明,虽然第一次标记时臭氧胁迫下的土壤微生物总的生物量碳没有发生变化,但 ^{13}C -MBC 已经明显降低,第二次标记时则总的生物量碳和 ^{13}C -MBC 均受到臭氧的明显抑制,

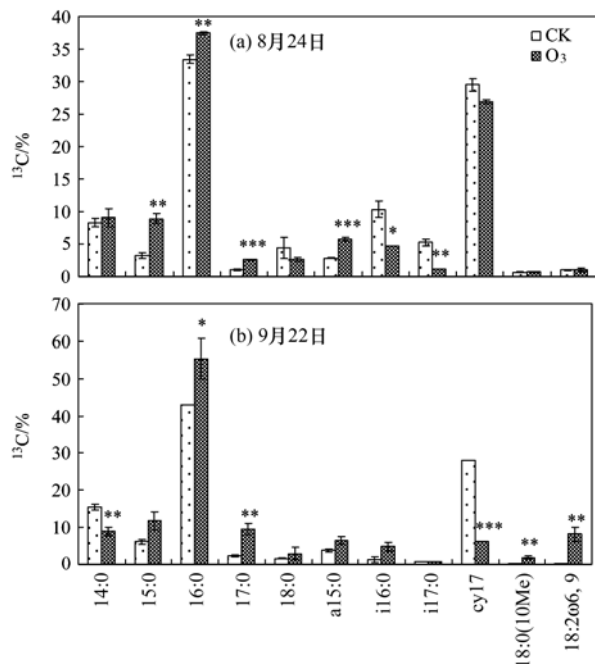


图4 两次标记后土壤样品中 PLFA 单体的 ^{13}C 含量

Fig. 4 ^{13}C incorporation into phospholipid fatty acids (PLFAs) for the fourth labeling event performed on 24th Aug. and 22nd Sep.

这说明臭氧明显的降低了即时光合产物进入到土壤微生物中的输入量。另外的研究发现,臭氧浓度升高降低小麦土壤微生物生物量碳^[19,20]; OTC 实验表明臭氧浓度升高同样降低了大田水稻土壤微生物生物量碳^[21]。关于臭氧对土壤微生物数量和生物量的影响,不同研究结果也不尽一致。Larson 等^[29]研究发现当平均臭氧浓度为 $54 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,暴露于其中的温带森林的土壤微生物碳 ($95 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 要比环境臭氧浓度下的土壤微生物碳高 ($70 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),但二者之间差异不显著,不同臭氧处理之间的土壤微生物呼吸也没有显著差异。Shafer^[30]研究臭氧和酸雨对高粱根际微生物的影响,发现根际细菌的总数与臭氧呈现一个曲线关系,臭氧和酸雨趋向于刺激根际真菌繁殖体的数量,但这种影响不显著。当酸雨 pH 4.0 时,根际具磷酸酶活性的细菌数量随臭氧呈线性增加。根际的其它微生物与臭氧和酸雨的相互作用没有很大关系。

本研究结果表明,水稻植株进行 $^{13}\text{CO}_2$ 标记后,少部分光合产物迅速转移到土壤中,成为微生物 PLFA 组成部分,14:0、16:0 和 cy17 这 3 种脂肪酸是 ^{13}C 丰度最高,也是 ^{13}C 分配最多的脂肪酸。第一次标记后,臭氧显著影响 ^{13}C 分配的脂肪酸主要是细菌的脂肪酸,而对放线菌和真菌脂肪酸的 ^{13}C 分配没有影响;而到了第二次标记的时候则臭氧影响 ^{13}C 分

配的细菌脂肪酸减少,但显著提高了放线菌和真菌脂肪酸中的 ^{13}C 的分配。这可能是由于在前期细菌生长迅速且能分解水稻分泌的一些简单化合物,从而对臭氧胁迫产生的碳源改变的反应比较敏感;而相对于细菌而言,放线菌和真菌是分解一些较难分解的大分子化合物,由于它们生长相对缓慢,前期标记时生物量还相对少,因此对由于臭氧胁迫引起的碳源变化反应不敏感。但到了后期,随着简单化合物的分解其量在减少,可供细菌利用的碳源减少,从而受到碳源影响的 PLFA 种类也减少,即臭氧影响碳分配的 PLFA 种类减少;而随着生长繁殖的进行放线菌和真菌的生物量增加,同时难分解化合物的累积为放线菌和真菌提供了丰富的碳源,此时臭氧胁迫引起的碳源变化就会对放线菌和真菌产生明显的影响,表现为臭氧胁迫下放线菌和真菌 ^{13}C 分配增加。Manning 等^[31]以豆类(Pinto bean)为研究对象,发现暴露在臭氧中的豆根比过滤空气中的豆根能分离出更多的真菌,经臭氧处理与未经臭氧处理的豆根被相同真菌定植,并且存在大体相同的真菌群落。Scagel 等^[32]研究表明,臭氧影响北美黄松土壤中活微生物和总微生物的种群组成。活真菌生物量、活真菌和细菌生物量比值随植物受臭氧胁迫的时间而增加。在低臭氧浓度下 ($23 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$),总真菌和总细菌的生物量增加,但臭氧对其的影响不是线性的;在高臭氧浓度下 ($31 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$),总真菌和总细菌生物量与对照相比是下降的。由此可见,臭氧改变土壤微生物群落结构的组成,而土壤微生物群落结构中细菌、真菌和放线菌组成的改变,必然会导致植株营养、植物竞争和物种组成的改变^[18]。而这种影响将是更加深远且不可逆的,而且对生态系统生产力、碳循环、营养循环和水循环将会产生更大更长远的影响。

4 结论

(1) 臭氧降低土壤微生物生物量碳,且即时光合产物对地下的输入减少在第一时间即反应出来,第一次标记时虽然总的土壤微生物量碳没有受到臭氧的影响,但臭氧已经降低土壤微生物量中的 ^{13}C 含量。

(2) 臭氧改变了土壤微生物 PLFA 的结构组成,臭氧胁迫前期,只有细菌脂肪酸的 ^{13}C 分配受到臭氧的明显影响,而胁迫后期则臭氧主要影响的是 ^{13}C 对放线菌和真菌的分配。

参考文献:

[1] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007

- (AR4) [EB/OL]. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm.
- [2] Feng Z W, Jin M H, Zhang F Z, *et al.* Effects of ground-level ozone (O_3) pollution on the yields of rice and winter wheat in the Yangtze River delta [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, **15**(3): 360-362.
- [3] Fuhrer J, Booker F. Ecological issues related to ozone: agricultural issues[J]. *Environment International*, 2003, **29**(2-3): 141-154.
- [4] Nunn A J, Kozovits A R, Reiter I M, *et al.* Comparison of ozone uptake and sensitivity between a phytotron study with young beech and a field experiment with adult beech (*Fagus sylvatica*) [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **137**(3): 494-506.
- [5] Nunn A J, Reiter I M, Häberle K H, *et al.* Response patterns in adult forest trees to chronic ozone stress: identification of variations and consistencies[J]. *Environmental Pollution*, 2005, **136**(3): 365-369.
- [6] 王雪梅, 符春, 梁桂雄. 城市区域臭氧浓度变化的研究[J]. *环境科学研究*, 2001, **14**(5): 1-3, 19.
- [7] Ding A J, Wang T, Thouret V. Tropospheric ozone climatology over Beijing: Analysis of aircraft data from the MOZAIC program [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(1): 1-13.
- [8] Wang T, Wei X L, Ding A J, *et al.* Increasing surface ozone concentrations in the background atmosphere of Southern China, 1994-2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(16): 6217-6227.
- [9] Feng Z Z, Zheng H Q, Wang X K, *et al.* Sensitivity of *Metasequoia glyptostroboides* to ozone stress[J]. *Photosynthetica*, 2008, **46**(3): 463-465.
- [10] Zhang W W, Niu J F, Wang X K, *et al.* Effects of ozone exposure on growth and photosynthesis of the seedlings of *Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg, a native tree species of subtropical China[J]. *Photosynthetica*, 2011, **49**(1): 29-36.
- [11] Niu J F, Zhang W W, Feng Z Z, *et al.* Impact of elevated O_3 on visible foliar symptom, growth and biomass of *Cinnamomum camphora* seedlings under different nitrogen loads[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, **13**(10): 2873-2879.
- [12] Skärby L, Ro-poulsen H, Wellburn F A M, *et al.* Impacts of ozone on forests: a European perspective[J]. *New Phytologist*, 1998, **139**(1): 109-122.
- [13] Chen Z, Wang X K, Feng Z Z, *et al.* Effects of elevated ozone on growth and yield of field-grown rice in Yangtze River Delta, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(3): 320-325.
- [14] Dorhmann A B, Tebbe C C. Effect of elevated tropospheric ozone on the structure of bacterial communities inhabiting the rhizosphere of herbaceous plants native to Germany[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(12): 7750-7758.
- [15] 寇太记, 于伟伟, 朱建国, 等. 臭氧污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2862-2867.
- [16] Andersen C P, Rygielwicz P T. Allocation of carbon in mycorrhizal *Pinus ponderosa* seedlings exposed to ozone[J]. *New Phytologist*, 1995, **131**(4): 471-480.
- [17] 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.
- [18] Yoshida L C, Gamon J A, Andersen C P. Differences in above- and below-ground responses to ozone between two populations of a perennial grass[J]. *Plant and Soil*, 2001, **233**(2): 200-211.
- [19] 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.
- [20] Chen Z, Wang X K, Feng Z Z, *et al.* Impact of elevated O_3 on soil microbial community function under wheat crop[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2009, **198**(1-4): 189-198.
- [21] Chen Z, Wang X K, Yao F F, *et al.* Elevated ozone changed soil microbial community in a rice paddy[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2010, **74**(3): 829-837.
- [22] 王曙光, 侯彦林. 磷脂脂肪酸方法在土壤微生物分析中的应用[J]. *微生物学通报*, 2004, **31**(1): 114-117.
- [23] 白震, 何红波, 张威, 等. 磷脂脂肪酸技术及其在土壤微生物研究中的应用[J]. *生态学报*, 2006, **26**(7): 2387-2394.
- [24] 陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 等. 不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroRespTM 方法[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2375-2382.
- [25] 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.
- [26] Lu Y H, Murase J, Watanabe A, *et al.* Linking microbial community dynamics to rhizosphere carbon flow in a wetland rice soil[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, **48**(2): 179-186.
- [27] US Environmental Protection Agency. Air quality criteria for ozone and related photochemical oxidants. Vol. II. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC. US EPA Report No. EPA 600/P-93/004bF[R]. Washington DC, 1996.
- [28] Ariyaphanphitak W, Chidthaisong A, Sarobol E, *et al.* Effects of elevated ozone concentrations on Thai jasmine rice cultivars (*Oryza sativa* L.) [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2005, **167**(1-4): 179-200.
- [29] Larson J L, Zak D R, Sinsabaugh R L. Extracellular enzyme activity beneath temperate trees growing under elevated carbon dioxide and ozone[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**(6): 1848-1856.
- [30] Shafer S R. Influence of ozone and simulated acidic rain on microorganisms in the rhizosphere of sorghum[J]. *Environmental Pollution*, 1988, **51**(2): 131-152.
- [31] Manning W J, Feder W A, Papia P M, *et al.* Influence of foliar ozone injury on root development and root surface fungi of pinto bean plants[J]. *Environmental Pollution*, 1971, **1**(4): 305-312.
- [32] Scagel C F, Andersen C P. Seasonal changes in root and soil respiration of ozone-exposed ponderosa pine (*Pinus ponderosa*) grown in different substrates[J]. *New Phytologist*, 1997, **136**(4): 627-643.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《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)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行