

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 PM₁₀/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 SO₂ 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, 王稔炎 (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) 光催化降解二苯砷酸的研究 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 Al³⁺ 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, 欧阳纬莹, 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)

O₃ 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按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)

¹³C₂O₂ 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 *Burkholderia xenovorans* 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(-CeO₂)/Al₂O₃ 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)

O₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响

杨田田^{1,2}, 张巍巍³, 胡恩柱², 王效科², 田媛¹, 冯兆忠^{2*}

(1. 北京工商大学食品学院, 北京 100048; 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; 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态重点实验室, 哈尔滨 150081)

摘要: 近地层臭氧(O₃)浓度升高会降低树木的光合速率, 抑制 Rubisco 酶的活性, 势必会间接影响树木 N 素的吸收与分配. 本研究利用开顶式气室研究过滤大气(CF, <20 nL·L⁻¹)与 O₃ 浓度升高(E-O₃, 约 150 nL·L⁻¹)对 10 种南方城市常用绿化树种幼苗 N 素吸收和分配的影响. 结果表明, 与 CF 相比, E-O₃ 使枫香叶生物量和马褂木茎生物量分别显著降低了 20.9% 和 21.4%, 使枫香和马褂木的根生物量显著降低了 24.2% 和 32.5%. O₃ 对被测树种茎中 N 素含量影响显著, 而对叶和根中 N 素含量无显著影响. O₃ 对被测树种整株树 N 素吸收总量(N_总)、叶片 N 素吸收量及根的 N 素吸收量存在显著影响, 而对茎 N 素吸收量无显著影响. 与 CF 相比, E-O₃ 使马褂木与木荷的 N_总 分别显著降低了 28.4% 与 22.7%, 而使舟山新木姜子 N_总 显著增加了 15.5%. O₃ 浓度升高对各树种 N 素吸收量在各器官中的分配无显著影响.

关键词: 绿化树种; 氮素分配; 氮素吸收; 开顶式气室; 臭氧

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3896-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.10.036

Effects of Elevated O₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China

YANG Tian-tian^{1,2}, ZHANG Wei-wei³, HU En-zhu², WANG Xiao-ke², TIAN Yuan¹, FENG Zhao-zhong²

(1. Food College, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China)

Abstract: Numerous studies have indicated that rising ozone (O₃) in the troposphere significantly decreased the photosynthesis and the activity of Rubisco enzyme. So it can be inferred that the N uptake and distribution within the plants could be affected by elevated O₃. In this study, ten greening woody species, widely distributed in subtropical China, were exposed to charcoal-filtered air (CF, less than 20 nL·L⁻¹) and elevated O₃ (E-O₃, mean concentration of 150 nL·L⁻¹) in open top chambers. The results showed that E-O₃ significantly reduced the leaves biomass in *Liquidamba formosana* by 20.9%, the stem biomass in *Liriodendron chinense* by 21.4%, the root biomass in *L. formosana* and *L. chinense* by 24.2% and 32.5%, respectively. E-O₃ significantly affected the N concentration in the stem but not those in leaves and root. The N uptakes in the whole tree (N_总), the leaves and the root were significantly affected by E-O₃. Compared to CF, E-O₃ significantly reduced the N_总 in *L. chinense* by 28.4% and *Schima superba* by 22.7% but significantly increased the N_总 in *Neolitsea sericea* by 15.5%. Elevated O₃ concentration had no significant influence on N distribution within the plants across the selected 10 tree species.

Key words: greening tree species; N distribution; N uptake; open top chamber; ozone

近地层(距地面 50 ~ 100 m)臭氧(O₃)是一种对地球生命体有害的气体污染物^[1], 并且在全球或区域气候变暖中发挥了重要作用^[2]. 随着全球工业的快速发展与化石燃料的大量消耗, O₃ 浓度日益升高. 目前, 全球近四分之一的国家和地区夏季近地层 O₃ 浓度已经达到了 60 nL·L⁻¹ 以上, 远远超过了 O₃ 对植物致害的临界浓度(40 nL·L⁻¹)^[3], 并且仍以每年 0.5% ~ 2.0% 的速度持续增加^[4]. 在我国经济发展较为迅速的中东部地区, O₃ 污染问题尤其突出. 监测数据显示, 2013 年 6 月全国 74 个城市空气质量月报中 O₃ 浓度每日 8 h 平均值的最大值已达到 247 nL·L⁻¹ (远远超过了我国最新公布的环境空

气质量标准中日 8 h 最大平均 O₃ 浓度二级标准——约为 80 nL·L⁻¹)^[5].

O₃ 对植物的毒性作用一直备受国内外学者的广泛关注. 从 1958 年 Richards 等^[6]首次确定对流层 O₃ 为一种植物毒性气体开始, 国内外开展了大量的研究. 结果表明 O₃ 浓度升高可引起森林衰退^[7,8], 农作物减产^[9], 影响土壤微生物及酶活

收稿日期: 2014-02-22; 修订日期: 2014-04-03

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 国家自然科学基金项目(30700086); 北京市教委环境科学与工程重点建设学科项目(PXM2012_014213_000042)

作者简介: 杨田田(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态学, E-mail: sdjdytt@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zhzhfeng201@hotmail.com

性^[10,11],影响元素吸收及其在植物体内的分配^[12,13]等. 北半球当前环境中的 O₃ 浓度已经达到了对树木产生负面影响水平,导致速生落叶树种的生长速度缓慢^[14]. 目前,国内外已经有了许多关于 O₃ 对森林树种影响的研究和报道,如欧洲水青冈、云杉^[15]、赤松、桦树^[16]、山毛榉^[17]以及北美鹅掌楸等,但很少涉及到城市绿化树种的研究,特别是亚热带地区的城市绿化树种.

氮素是植物体内氨基酸、叶绿素、辅酶、蛋白质、核酸等物质的重要组成元素,对于树木的生长以及新叶的再生具有重要作用^[18]. 植物叶片大约 75% 的 N 素存在于叶绿体中,其中 30% ~ 50% 分配给光合作用反应中重要的羧化酶——Rubisco 酶^[19]. 因此,植物叶片 N 含量与光合速率有着直接的关系^[20]. 大量研究表明,O₃ 浓度升高能显著抑制 Rubisco 酶的活性^[21],使得叶片光合速率显著下降^[22]. 因此,较高的 O₃ 浓度可能影响树木叶片 N 素含量,并且通过改变植株生长特别是地下部分的生长来影响 N 元素的吸收^[23]. 然而,目前有关 O₃ 浓度升高对树木 N 素吸收与分配的影响研究很少. 鉴于此,选取空气 O₃ 浓度较高的长江三角洲地区,开展 O₃ 浓度升高对城市绿化树种 N 元素吸收与分配的影响研究,对大气污染日益严重的环境条件下城市绿化树种的优化与选育具有重要的理论与现实意义.

1 材料与方法

1.1 实验区概况

该实验区位于气候温暖湿润的浙江省宁波市华东师范大学天童森林生态系统国家野外观测站(29°48'N,121°47'E),该地区为典型的亚热带季风气候(年均降水量1374.7 mm,年均温度 16.2℃). 土壤主要为偏酸性的红黄壤(pH 4.8).

1.2 实验设计

该实验将树木幼苗放入自主研发的开顶式气室(OTC, open top chamber)中进行 O₃ 熏气. 开顶式气室为高 2.0 m、边长 1.0 m 的正八面柱体. 为减少外界气体对气室内气体的影响,在柱体顶端加了一个高 1 m、倾斜角为 45°的收缩口. 气室由塑钢框架和透明 PE 聚酯薄膜组成,体积约 18 m³.

实验材料为针叶树种水杉(*Metasequoia glyptostroboides*, SS)和马尾松(*Pinus massoniana*, MWS),阔叶树种全缘冬青(*Ilex integra*, DQ)、枫香(*Liquidamba formosana*, FX)、马褂木(*Liriodendron chinense*, MGM)、木荷(*Schima superba*, MH)、舟山

新木姜子(*Neolitsea sericea*, MJZ)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*, QG)、红叶石楠(*Photinia × fraseri*, SN)和香樟(*Cinnamomum camphora*, XZ) 10 种长势相同的树木幼苗. 于 2008 年 2 月,选取长势较为一致的幼苗统一植入直径 20 cm,高 20 cm 圆形花盆中,当地山地红黄壤与树皮腐殖质按体积比 1:1 混匀后装盆作为栽培基质(土壤有机碳 9.80 g·kg⁻¹,总氮 1.36 g·kg⁻¹,总磷 0.27 g·kg⁻¹,总钾 14.1 g·kg⁻¹). 经过冬季温室育苗缓苗后,于 2008 年 4 月初将长势相同的幼苗全部移入 OTC 内进行缓苗,以便适应外界与气室内环境. 2008 年 7 月初,每种树苗选取 30 棵长势一致的健康植株随机分配到 6 个 OTC 中,并对每个 OTC 内每种植株的株高与基径进行统计,保证每个 OTC 树苗本底值无显著差异. 实验期内未对植株进行施肥,保证各植株充足且等量的水分供应,光强、温度和病虫害等不成为限制因子.

实验设过滤大气(CF, 小于 20 nL·L⁻¹)和 O₃ 浓度增加(E-O₃, 约 150 nL·L⁻¹)两个处理,每个处理 3 个气室重复,每个气室内每种树至少 4 株幼苗. 实验期间每隔 2 ~ 3 d 将 OTC 内花盆随机移动,以消除气室内部小气候差异可能产生的影响. 熏气时间从 2008 年 7 月 6 日开始到 9 月 28 日结束,每日熏气时间最大为 8 h(北京时间 09:00 ~ 17:00),阴雨天停止熏气,整个生长季有效熏气天数为 47 d.

1.3 生物量与 N 素含量的测定

收获时将每株幼苗分割为根、茎枝与叶片三部分,洗净放入烘箱中先 105℃ 杀青 30 min 再 80℃ 烘干至恒重,测定生物量. 将烘干样品经球磨机(MM400,德国 RETSCH)精磨过 100 目筛后,采用元素分析仪(Vario EL III,德国 Elementar)测定样品中的 N 素含量.

用 m_l 、 m_s 、 m_r 分别表示单株植物叶片、茎枝和根的生物量干重(单位:g·株⁻¹);用 N_l 、 N_s 、 N_r 分别表示叶片、茎枝、根的 N 素含量(单位:g·kg⁻¹); N_{lu} 、 N_{su} 、 N_{ru} 、 N_{lu} 分别表示每株植物的叶片、茎枝、根、整株树的 N 素吸收量(单位:g·株⁻¹);用 N_{lp} 、 N_{sp} 、 N_{rp} 表示叶片、茎枝、根的 N 素吸收量占总吸收量 N_{lu} 的百分比(单位:%). 以叶片为例,各指标之间存在如下关系:

$$N_{lu} = N_l \times m_l / 1000 \quad (1)$$

$$N_{lp} = N_{lu} \times 100 / N_{lu} \quad (2)$$

在计算生物量干重和 N 素含量时,先对每个气室内同种植物的同一指标取平均,然后再对每个处

理的 3 个平行气室取平均. 在计算 N 素吸收量时, 先分别计算每棵树各器官的 N 素吸收量, 然后再对每个气室内同种植物取平均, 最后再对每个处理的 3 个平行气室取平均.

1.4 数据分析

实验数据按 OTC 为重复单元 ($n = 3$). 采用 SPSS 18.0 软件进行统计分析, 选择 t 检验法分析被测指标在 CF 和 E-O₃ 之间的差异, 并选择一般线性模型 (General Linear Model) 将 O₃ 处理与树种作为双因素进行方差分析. 文中数据为平均值 \pm 标准差 (Mean \pm SD). 采用 Origin 8.0 进行绘图.

表 1 不同臭氧处理对各树种不同器官(叶、茎和根部)生物量的影响¹⁾

Table 1 Effects of elevated O₃ on the biomass of various parts (leaves, stems and roots) in different trees species

项目	$m_l/g \cdot 株^{-1}$		$m_s/g \cdot 株^{-1}$		$m_r/g \cdot 株^{-1}$	
	CF	E-O ₃	CF	E-O ₃	CF	E-O ₃
DQ	19.6 \pm 0.22	17.6 \pm 3.10	28.3 \pm 2.30	24.7 \pm 3.22	20.9 \pm 1.33	21.6 \pm 3.15
FX	11.8 \pm 1.26	9.3 \pm 0.73**	19.7 \pm 1.00	16.7 \pm 1.60	19.2 \pm 0.29	14.5 \pm 1.00***
MGM	14.7 \pm 2.35	10.6 \pm 2.03	27.9 \pm 1.12	21.9 \pm 2.18**	26.0 \pm 3.03	17.6 \pm 1.79**
MH	21.0 \pm 2.07	18.0 \pm 4.04	22.0 \pm 2.75	21.1 \pm 2.67	21.0 \pm 5.55	18.0 \pm 17.98
MJZ	12.3 \pm 1.26	13.9 \pm 1.49	14.9 \pm 1.58	16.0 \pm 0.92	15.2 \pm 1.51	15.0 \pm 0.63
MWS	34.9 \pm 0.76	33.2 \pm 1.52	29.8 \pm 0.09	29.3 \pm 1.46	14.6 \pm 1.13	15.3 \pm 2.40
QG	15.3 \pm 1.41	15.8 \pm 1.73	22.7 \pm 5.19	18.3 \pm 0.67	14.4 \pm 2.08	13.4 \pm 1.17
SN	20.7 \pm 0.68	21.3 \pm 0.95	33.0 \pm 0.74	30.2 \pm 1.95	14.9 \pm 2.51	12.3 \pm 4.48
SS	10.0 \pm 0.73	11.5 \pm 0.95	20.2 \pm 1.04	20.7 \pm 0.89	20.8 \pm 0.89	18.8 \pm 0.74
XZ	11.5 \pm 1.36	11.3 \pm 0.77	19.0 \pm 0.82	18.0 \pm 1.44	18.3 \pm 0.10	15.8 \pm 1.29
ANOVA (P 值)	树种	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	O ₃	0.071	0.001	0.001	0.008	0.008
	树种 \times O ₃	0.121	0.086	0.086	0.019	0.019

1) ** 和 *** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$

2.2 O₃ 浓度升高对各器官 N 素含量的影响

N 素含量在被测树种各器官中大致存在以下关系: 叶 > 根 > 茎 (图 1). 方差分析结果表明, O₃ 处理显著影响了被测树种茎中 N 素含量, 而对叶和根中 N 素含量无显著影响, 并且只有根部出现 O₃ 与树种间显著的交互作用. CF 与 E-O₃ 处理下马褂木和水杉叶片 N 素含量均明显高于其它树种 [图 1(a)]. 与 CF 处理相比, E-O₃ 显著降低了木荷叶片 N 含量的 4.3%, 而对其余 9 种被测树木叶片 N 含量无显著影响. E-O₃ 显著影响了木荷与舟山新木姜子根中的 N 含量, 而对其他树种均无显著影响 [图 1(c)]. 此外, 各树种茎中的 N 含量也相差较大, 其中 E-O₃ 下水杉茎 N 平均含量为 $7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 CF 下香樟茎中 N 含量仅为 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 1(b)], O₃ 浓度升高显著增加了香樟茎的 N 含量. 与 CF 相比, E-O₃ 使 10 种树的叶、茎和根的 N 素含量的平均值分别增加 15.5%、13.8% 和 5.6%.

2 结果与分析

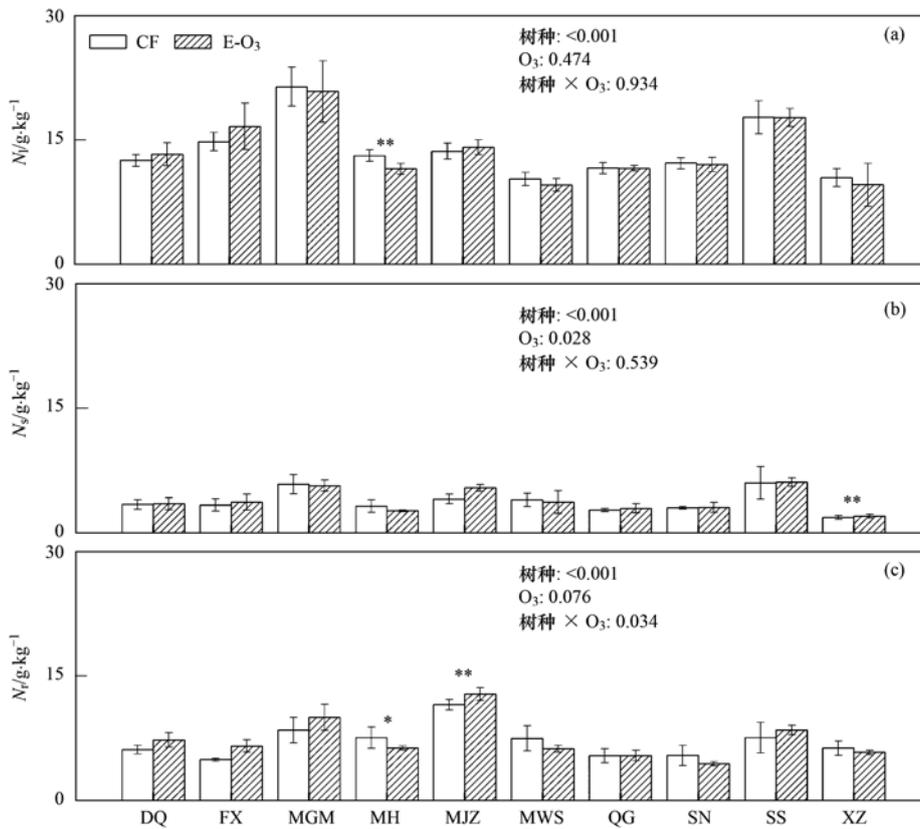
2.1 O₃ 浓度升高对各器官生物量的影响

如表 1 所示, O₃ 处理显著影响被测树种茎和根的生物量, 而对叶的生物量影响不显著, 同时根中出现了 O₃ 与树种间显著的交互作用. 与 CF 处理相比, E-O₃ 使枫香叶与马褂木茎生物量分别显著降低了 20.9% 与 21.4%, 对其余树种地上部生物量无显著影响. 此外, E-O₃ 处理下枫香和马褂木根生物量分别比 CF 处理显著低 24.2% 和 32.5%, 其余树种根生物量未出现显著变化.

2.3 O₃ 浓度升高对 N 素吸收量的影响

CF 条件下马褂木总的 N 素吸收量最大 ($0.64 \text{ g} \cdot \text{株}^{-1}$), 枫香和香樟在 CF 和 E-O₃ 下 N_{in} 均较小 (图 2). 方差分析结果表明, O₃ 处理显著影响了被测树种 N_{in} , 并且 O₃ 与树种之间存在显著的交互作用. 与 CF 相比, E-O₃ 对马褂木、木荷和木姜子的 N_{in} 均存在显著影响, 其中马褂木的 N_{in} 显著降低了 28.4%, 木荷的 N_{in} 显著降低了 22.7%, 而木姜子 N_{in} 显著增加了 15.5%.

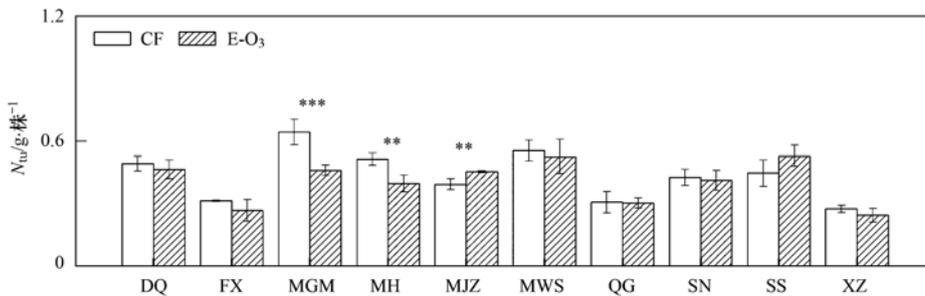
方差分析表明, O₃ 处理显著影响了被测树种叶片和根中的 N 素吸收量 (N_{in} 与 N_{rn}), 并且 O₃ 与树种之间存在显著的交互作用, 而对茎中的 N 素吸收量 (N_{st}) 无显著影响 (图 3). 除木姜子以外, 其余树种在 CF 或 E-O₃ 的条件下, N_{in} 都明显高于 N_{st} 和 N_{rn} . 马尾松和石楠均呈现 N_{in} 低于 N_{st} 的趋势, 而其余树种则呈现相反趋势. 马尾松叶片吸收的 N 量最高, 香樟的 N_{st} 最低; 枫香、青冈和石楠这 3 种树的 N_{rn}



* 和 ** 分别表示 $P < 0.1$ 和 $P < 0.05$

图 1 臭氧处理对各树种叶(N_l)、茎(N_s)和根(N_r)氮素含量的影响

Fig. 1 Effects of ozone on the N concentration in different organs (leaves, stem and root) of tree species



** 和 *** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$

图 2 臭氧处理对不同树种单株植物的氮素吸收量的影响

Fig. 2 Effects of elevated O₃ on the N uptake amount of each plant in different tree species

都较低(图 3)。与 CF 相比,E-O₃ 使枫香和马尾松的 N_{lu} 分别显著降低了 20.4% 和 29.2%,而使舟山新木姜子的 N_{lu} 显著增加了 20.3%。此外,E-O₃ 使香樟 N_{su} 显著增加了 16.7%,马尾松的 N_{ru} 显著降低了 35.0%,对其它树种的 N_{su} 和 N_{ru} 均无显著影响[图 3(b)和图 3(c)]。

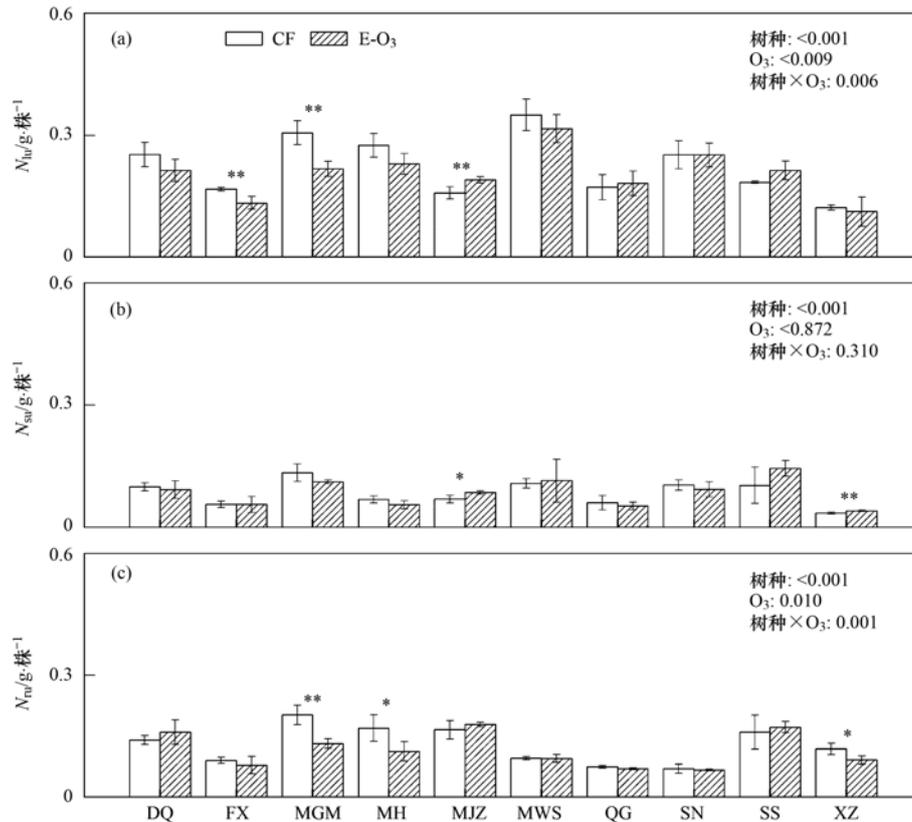
2.4 O₃ 浓度升高对各树种氮素分配的影响

在氮素分配方面,所有被测树种叶片中的氮量在整株树中的比例均在 40% 以上,其中枫香、木荷、

马尾松、青冈和石楠树种的氮量在叶片中的分配比例达到全株总氮量 50% 以上,马尾松叶片中的氮分配比例甚至超过了 60% [图 4(a)]。统计结果显示,O₃ 浓度升高对所有树种的氮量在叶片、茎和根中的分配比例均无显著影响。

3 讨论

大量研究结果表明,O₃ 浓度升高会引起一些树种的叶片气孔关闭,严重时显著降低叶片 Rubisco



* 和 ** 分别表示 $P < 0.1$ 和 $P < 0.05$

图3 臭氧处理对不同树种各器官(根、茎和叶片)N素吸收量的影响

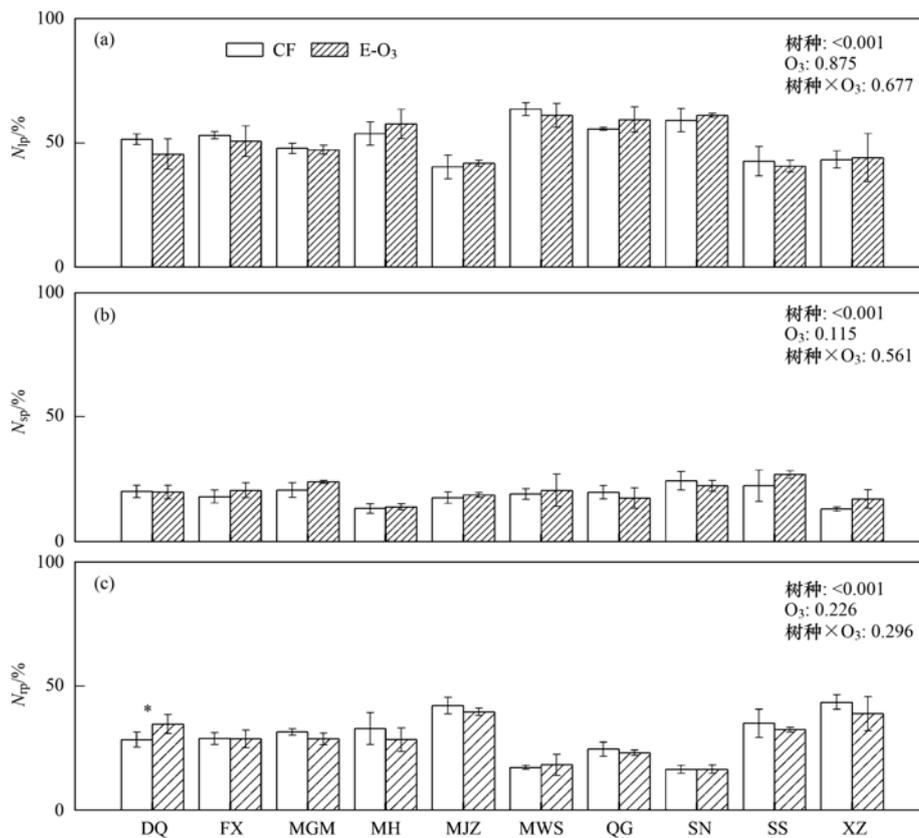
Fig. 3 Effects of elevated ozone on the N uptake amount within different organs (leaves, stems and roots) in different tree species

酶活性与含量^[24],进而导致光合速率降低^[25]、树木生长速率放缓,最终导致元素利用率降低^[26]. 本研究显示,高浓度 O₃ 显著增加了舟山新木姜子的叶片和总 N 吸收量,并且木姜子的成熟叶片与新生叶片均未出现 O₃ 伤害症状^[27]. 这一结果证实了 Maurer 等的研究^[28]:在 O₃ 浓度较高的环境下,植物可以通过提高叶片中 N 素含量而加强叶片转换机制来抵抗 O₃ 的危害. 本研究还发现,高浓度 O₃ 显著降低了马褂木的叶片、根和总 N 吸收量,显著降低了枫香的叶片 N 吸收量和木荷的总 N 吸收量;线性回归分析结果显示,O₃ 浓度升高对叶片 N 吸收量的影响是由生物量决定的 ($R^2 = 0.629, P < 0.001$). 简言之,O₃ 对各树种叶片生物量的影响变异程度较大(变化幅度为 1.5% ~ 27.9%,表 1),使得某些叶 N 含量受 O₃ 影响较小的树种,由于显著降低了叶生物量,从而叶 N 吸收量受到 O₃ 的显著抑制,如枫香;反之,对某些叶 N 含量受 O₃ 影响较大的树种,由于 O₃ 对叶生物量影响并不显著,最终使得其 N 吸收量没有显著变化,如木荷. 另外,通过统计分析发现,O₃ 浓度升高对 N 素在各树种各器官的分配均无显

著影响,即 O₃ 浓度升高不会影响到 N 素在各树种体内的分配,这可能与 O₃ 熏蒸时间较短和树种的特点有关.

此外,张巍巍^[29]研究发现 O₃ 对被调查树种根系生物量的影响程度与自身比叶重(单位叶面积的叶片干重)存在显著的负相关关系,表明叶片自身比叶重较大的植物,其根生物量受到臭氧的影响幅度较小,具有更大的保证根系吸收土壤中水分和营养物质的能力. 自身比叶重较大、叶片生命周期较长、单位面积叶绿素含量较大的木本植物可以产生更多的解毒物质,有更强的抵御逆境胁迫的能力^[30].

在本研究中,整株树及根系的 N 素吸收量均呈现出 O₃ 和树种的显著效应,并且存在显著的 O₃ 与树种交互作用[图 2 和图 3(c)]. 个别树种的整株树 N 素吸收量对 O₃ 敏感,表现出在高浓度 O₃ 条件下显著降低或增加. 由于冬青属(*Q. ilex*)树种 O₃ 抗性较强,O₃ 熏蒸未对叶片中 C、N 含量造成影响^[31]. Reddy 等^[32]也发现 O₃ 浓度升高并不会对火炬松 N 素含量造成影响,这些结果与本研究的结果



* 表示 $P < 0.1$

图4 臭氧处理对各树种 N 素吸收量在各器官中的分配百分比的影响

Fig. 4 Effects of elevated ozone on the distribution of N amount per plant into leaves, stem and root in each trees species

相似. 由此推测, O₃ 浓度升高对松树 N 素的吸收与分配影响不显著. 相对叶片与茎而言, 根中的 N 素吸收量除由叶 N 含量决定外 [图 4(c)], 也可能源于生物量的变化. 已有研究表明, O₃ 浓度升高降低了北美红橡木 (*Quercus rubra* L.)^[33] 和山地松 (*Pinus uncinata*)^[34] 根系的生物量, 这与本研究关于 O₃ 浓度升高对树木根生物量的影响结果相似. 由于细根是树木从地下摄取元素的主要途径, 因此, 树木的细根量减少, 必定会造成吸收的营养元素量减少.

4 结论

(1) N 素在各器官中的含量大致存在以下关系: 叶 > 根 > 茎. 模拟 O₃ 浓度升高条件下, 我国南方城市绿化树种整株树 N 素吸收总量存在显著的 O₃ 与树种的主效应或交互效应, 并且 O₃ 与树种对叶与茎中 N 素含量存在显著的主效应, 而对根中 N 素含量无显著影响.

(2) O₃ 对被测树种叶片和根部 N 素吸收量存在显著影响, 二者主要由生物量的响应差异决定;

对茎中 N 吸收量的影响较小, 主要由 N 素含量的变化决定; O₃ 浓度升高对 N 素在各器官中的分配没有影响.

参考文献:

- [1] Hoshika Y, Carriero G, Feng Z Z, *et al.* Determinants of stomatal sluggishness in ozone-exposed deciduous tree species [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **481**: 453-458.
- [2] Cooper O R, Parrish D D, Stohl A, *et al.* Increasing springtime ozone mixing ratios in the free troposphere over western North America [J]. *Nature*, 2010, **463** (7279): 344-348.
- [3] Laakso L, Beukes J P, Van Zyl P G, *et al.* Ozone concentrations and their potential impacts on vegetation in southern africa [J]. *Developments in Environmental Science*, 2013, **13**: 429-450.
- [4] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38** (21): 3431-3442.
- [5] 中国环境监测总站. 2013 年 6 月京津冀、长三角、珠三角区域及直辖市、省会城市和计划单列市空气质量报告 [R]. 2013.
- [6] Richards B L, Middleton J T, Hewitt W B. Air pollution with relation to agronomic crops. V. Oxidant stipple of grape [J]. *Agronomy Journal*, 1958, **50** (9): 559-561.

- [7] Karnosky D F, Werner H, Holopainen T, *et al.* Free-air exposure systems to scale up ozone research to mature trees [J]. *Plant Biology*, 2007, **9**(2): 181-190.
- [8] 徐胜, 何兴元, 陈玮, 等. 高浓度 O₃ 对树木生理生态的影响 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(1): 368-377.
- [9] 郭建平, 王春乙, 白月明, 等. 大气中臭氧浓度变化对冬小麦生理过程和籽粒品质的影响 [J]. *应用气象学报*, 2001, **12**(2): 255-256.
- [10] 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.
- [11] Kanerva T, Palojärvi 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.
- [12] 刘德鸿, 寇太记, 徐晓峰, 等. 臭氧污染对不同品种小麦磷素吸收与分配的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, **18**(6): 1319-1325.
- [13] Rai R, Agrawal M, Agrawal S B. Assessment of yield losses in tropical wheat using open top chambers [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(40): 9543-9554.
- [14] Huttunen S, Manninen S. A review of ozone responses in Scots pine (*Pinus sylvestris*) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, **90**: 17-31.
- [15] Weigt R B, Haberle K H, Millard P, *et al.* Ground-level ozone differentially affects nitrogen acquisition and allocation in mature European beech (*Fagus sylvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*) trees [J]. *Tree Physiology*, 2012, **32**(10): 1259-1273.
- [16] Kasurinen A, Riikonen J, Oksanen E, *et al.* Chemical composition and decomposition of Silver Birch leaf litter produced under elevated CO₂ and O₃ [J]. *Plant and Soil*, 2006, **282**(1-2): 261-280.
- [17] Thomas V F D, Braun S, Fluckiger W. Effects of simultaneous ozone exposure and nitrogen loads on carbohydrate concentrations, biomass, growth, and nutrient concentrations of young beech trees (*Fagus sylvatica*) [J]. *Environment Pollution*, 2006, **143**(2): 341-354.
- [18] 潘瑞炽, 王小菁, 李娘辉. 植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. 33-35.
- [19] 郭盛磊, 阎秀峰, 白冰, 等. 供氮水平对落叶松幼苗光合作用的影响 [J]. *生态学报*, 2005, **25**(6): 1291-1298.
- [20] Makino A, Mae T, Ohira K. Relation between nitrogen and ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase in rice leaves from emergence through senescence [J]. *Plant Cell Physiology*, 1984, **25**: 429-437.
- [21] San-Oh Y, Sugiyama T, Yoshita D, *et al.* The effect of planting pattern on the rate of photosynthesis and related processes during ripening in rice plants [J]. *Field Crops Research*, 2006, **96**: 113-124.
- [22] Zhang W W, Feng Z Z, Wang X K, *et al.* Responses of native broadleaved woody species to elevated ozone in subtropical China [J]. *Environment Pollution*, 2012, **163**: 149-157.
- [23] Vollsnes A V, Kruse O M O, Eriksen A B, *et al.* In vivo root growth dynamics of ozone exposed *Trifolium subterraneum* [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, **69**(2): 183-188.
- [24] Leitao L, Dizengremel P, Biolley J P. Foliar CO₂ fixation in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) submitted to elevated ozone: Distinct changes in Rubisco and PEPc activities in relation to pigment content [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, **69**(3): 531-540.
- [25] Mills G, Wagg S, Harmens H. Ozone pollution: Impacts on ecosystem services and biodiversity [R]. Bangor UK: ICP Vegetation Programme Coordination Centre, 2013. 1-104.
- [26] Felzer B S, Cronin T, Reilly J M, *et al.* Impacts of ozone on trees and crops [J]. *Geoscience*, 2007, **339**(11-12): 784-798.
- [27] 张巍巍, 牛俊峰, 王效科, 等. 大气臭氧浓度增加对湿地松幼苗的影响 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1710-1716.
- [28] Maurer S, Matussek R. Nutrition and the ozone sensitivity of birch (*Betula pendula*) [J]. *Trees-Structure and Function*, 1997, **12**(1): 11-20.
- [29] 张巍巍. 近地层 O₃ 浓度升高对我国亚热带典型树种的影响 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2011. 1-12.
- [30] Bussotti F. Functional leaf traits, plant communities and acclimation processes in relation to oxidative stress in trees: a critical overview [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(11): 2727-2739.
- [31] Baldantoni D, Fagnano M, Alfani A. Tropospheric ozone effects on chemical composition and decomposition rate of *Quercus ilex* L. leaves [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(5): 979-984.
- [32] Reddy G B, Reinert R A, Eason G. Loblolly pine needle nutrient and soil enzyme activity as influenced by ozone and acid rain chemistry [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 1995, **27**(8): 1059-1064.
- [33] Kelting D L, Burger J A, Edwards G S. The effects of ozone on the root dynamics of seedlings and mature red oak (*Quercus rubra* L.) [J]. *Forest Ecology and Management*, 1995, **79**(3): 197-206.
- [34] Díaz-de-Quijano M, Schaub M, Bassin S, *et al.* Ozone visible symptoms and reduced root biomass in the subalpine species *Pinus uncinata* after two years of free-air ozone fumigation [J]. *Environment Pollution*, 2012, **169**: 250-257.

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 Propranolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytic 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)
Macrozoobenthos 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