

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔晓勇, 许群, 宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲, 谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣, 程品, 张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)
1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛昱, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晓冰, 冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼, 李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)
农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应

张巍巍¹, 王光华¹, 王美玉², 刘晓冰^{1*}, 冯兆忠^{3*}

(1. 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; 2. 吉林省气象局, 长春 130062; 3. 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: 采用开顶式气室 (OTCs) 方法, 研究了不同臭氧 (O_3) 浓度处理对春大豆品种“东生 1 号”的影响, 主要包括产量与产量构成因子, 叶片与籽粒碳、氮元素与碳氮比、盛花期叶片气体交换速率、叶绿素荧光参数与光合色素含量变化. 试验设置 3 个臭氧水平: 过滤大气 (CFA, $10 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$)、自然大气 (NFA) 与自然大气添加 $40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\text{NFA} + O_3$). 结果表明, 经过一个生长季处理 (AOT40 值累积为 $10.6 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}$), 与 CFA 相比, NFA 处理东生 1 号大豆单株产量与百粒重降低 4.5%、4%, 而 $\text{NFA} + O_3$ 处理分别显著降低 34%、18% ($P < 0.05$), 而处理间株高、主茎节数、单株荚数与每荚粒数均无显著变化. 鼓粒期 $\text{NFA} + O_3$ 处理叶片 C、N 元素含量分别显著增加 3%、26%, 碳氮比则显著降低 18%. CFA 与 NFA 相比, $\text{NFA} + O_3$ 显著降低盛花期大豆叶片净光合速率 (A_{sat})、气孔导度 (g_s)、水分利用效率 (WUE)、开放的光系统反应中心激发能捕获效率 (F'_v/F'_m) 和作用光下光系统 II 的实际量子效率 (Φ_{PSII}), 而胞间 CO_2 浓度 (c_i)、光化学猝灭系数 (q_p) 和光合色素含量则无显著变化. 结果表明, O_3 浓度升高导致东生 1 号单株产量下降的主要原因是其显著降低百粒重、净光合速率和电子传递效率.

关键词: 臭氧; 大豆; 产量; 光合作用; 碳; 氮

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1473-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.04.039

Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O_3 Concentrations in Northeast China

ZHANG Wei-wei¹, WANG Guang-hua¹, WANG Mei-yu², LIU Xiao-bing¹, FENG Zhao-zhong³

(1. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 2. Jilin Province Meteorological Bureau, Changchun 130062, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Soybean cultivar Dongsheng No. 1 [*Glycine max* (L.) Mer.] was exposed to charcoal-filtered air (CFA), non-filtered air (NFA) and non-filtered air with ozone addition ($\text{NFA} + O_3$) in nine open-top chambers. Individual yield and yield components at maturity, C, N concentration in leaf and seed, gas exchange, chlorophyll a fluorescence and pigments content at the full bloom stage were measured with an AOT40 value of $10.6 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}$ during the growing season. Compared to CFA, NFA reduced individual yield and 100-seed weight by 4.5% and 4% respectively, while $\text{NFA} + O_3$ treatment significantly reduced each of them by 34% and 18%. However, plant height, node numbers of main stem, pods per plant and number of seeds per pod remained unchanged by O_3 addition. Leaf C, N concentrations at the seed filling stage under $\text{NFA} + O_3$ also significantly increased by 3% and 26%, respectively, while the CN ratio significantly decreased by 18%. Moreover, compared to CFA and NFA, $\text{NFA} + O_3$ caused significant reductions in the photosynthetic parameters at the full bloom stage, e.g. significant declines in net photosynthetic rates, stomatal conductance, water use efficiency, fluorescence parameters of F'_v/F'_m and Φ_{PSII} . It is proposed that lower photosynthetic rates, reduced photochemical efficiency in PS II and the decline in 100-seed weight might be the main reasons contributing to the lower individual yield of soybean plant by elevated O_3 .

Key words: ozone; soybean; yield; photosynthesis; C; N

近地层臭氧 (O_3) 作为一种对地球上生命体有害的气体污染物^[1], 其近地浓度已经比工业革命前上升了 36%, 预计到 2015 ~ 2050 年北半球近地层大气 O_3 浓度将再增加 20% ~ 25%^[2], 到本世纪末将超过 $70 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[3]. 东北地区是我国重要的重工业基地和粮食主产区, 监测数据表明, 部分城市夏季 7 ~ 9 月 O_3 浓度均已超过敏感作物的伤害阈值 $40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[4~6]. 并且, 随着耗能产业的迅速发展该地区 O_3 浓度将不断增长, 越来越多的农田将暴露于 O_3

污染中, 农作物生产将会受到极大影响. 大豆 [*Glycine max* (L.) Mer.] 是重要的油料和高蛋白作物, 是东北区的主产作物, 也是对 O_3 污染最为敏感的作物之一^[7,8]. 大量研究表明, O_3 污染降低大豆叶

收稿日期: 2013-08-14; 修订日期: 2013-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31200391); 中国科学院黑土区农业生态重点实验室开放基金项目 (2012-ZKHT-03)

作者简介: 张巍巍 (1982 ~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: zwwno_1@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liuxb@neigae.ac.cn; fzz@rcees.ac.cn

片的同化能力改变同化物在各个器官或组织的分配,并引起减产与营养品质的改变^[9,10]. 由于气候特征,东北大豆春播秋收,生长季节与 O_3 浓度高峰期同步,特别是夏季 7~8 月大豆生殖生长的关键时期正是 O_3 浓度极值期,必然不可避免地受到 O_3 的威胁. 迄今为止,有关 O_3 浓度升高对东北大豆品种的影响及其作用机制的研究很少. 本研究以黑龙江省第三积温带主栽大豆品种东生 1 号为试验材料,采用开顶式气室法(OTCs),分析 O_3 胁迫对其产量与产量构成因子、籽粒碳氮元素含量的影响,从光合气体交换速率、叶绿素荧光参数以及光合色素含量 3 个方面分析东生 1 号对 O_3 胁迫的生理生化响应机制,以期评估 O_3 污染对东北春大豆的影响提供试验数据和科学指导.

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验区位于中国科学院东北地理与农业生态研究所哈尔滨试验场,通过自制的 OTC-1 型开顶式气室进行臭氧熏气试验^[11]. 开顶式气室主体高为 2.0 m,直径为 3.5 m,横截面为正八边形,正八面柱体顶端增加 45°收缩口,收缩口高为 1.0 m,用以减少外部气体对室内气体的影响,整个气室的体积约为 25 m³. 气室框架由方形钢管与聚乙烯薄膜(透光率 $\geq 90\%$)构建,主要由过滤系统、臭氧发生与加入系统、通风及布气系统、臭氧浓度控制系统与数据自动采集系统组成. 臭氧由山东省济南市三康电器有限公司生产的臭氧发生器产生,加入到经过活性炭过滤的大气中,由功率为 750 W 的轴流风机通入气室内,通过调节流量计使气室内臭氧浓度保持在目标浓度范围,通过臭氧分析仪(Themofisher, i49, 美国)进行即时监测与记录. 试验过程中通风与布气系统可以满足气室内气体每 min 交换 1 次以上,使得气室内温度湿度与 CO_2 浓度等环境因素与外界基本保持一致.

试验设 3 个处理:过滤大气(CFA, 约 10 nL·L⁻¹),自然大气(NFA)与自然大气添加 40 nL·L⁻¹(NFA + O_3),每个处理 3 个 OTC 重复,每个 OTC 内种植 4 盆大豆,每盆 3 株. 于 2012 年 6 月 20 日(始花期)开始熏气,9 月 11 日停止熏气直至大豆成熟收获. 每日熏气最长时间为 8 h(北京时间 09:00~17:00),阴雨天气停止熏气.

1.2 试验材料

试验材料为中国科学院东北地理与农业生态研

究所选育的大豆品种“东生 1 号”(黑审豆 2003017). 供试土壤为典型黑土, pH 6.5, 有机质 26.8 mg·kg⁻¹, 全氮 2.1 mg·kg⁻¹. 采取盆栽方式, 将黑土与河沙按体积比 1:1 混匀后装入圆形桶(直径 40 cm, 高 30 cm), 每盆 15 kg, 并且以种肥方式一次性施入分析纯 KH_2PO_4 3.29 g, 尿素 3.26 g. 于 2012 年 5 月 20 日统一播种于盆中约 3 cm 深的土壤中, 出苗后每盆保留长势一致幼苗 3 株. 整个试验期内保证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.

1.3 指标测定

1.3.1 光合色素含量

于盛花期(7 月 7 日)选取冠层上部 2 片全展相同叶位叶片进行光合色素含量测定. 新鲜叶片用体积分数为 95% 乙醇提取, 于 664、648 与 470 nm 处测定吸光度. 根据 Lichtenthaler^[12] 修正公式计算叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)、叶绿素总量(Chl a + b)和类胡萝卜素(Car)含量.

1.3.2 气体交换与叶绿素 a 荧光参数

于盛花期(7 月 7 日)晴天上午 09:00~11:00, 每个 OTC 选取 4 株大豆上部全展相同叶位叶片 3 片, 用 Li-6400 便携式光合测定仪荧光叶室(Li-Cor, Inc, 美国)进行测定. 测定光强设定为 1 200 $\mu mol \cdot (m^2 \cdot s)^{-1}$, CO_2 浓度为 380 $\mu mol \cdot mol^{-1}$, 空气流速为 0.5 L·s⁻¹, 气温控制在 $(34 \pm 1)^\circ C$, 相对湿度 $(55 \pm 5)\%$.

1.3.3 叶片与籽粒 C、N 元素

于盛花期(7 月 7 日)与鼓粒期(8 月 27 日), 每个 OTC 内取 3 株大豆, 将叶片清洗干净, 105℃ 杀青 20 min 后, 于 80℃ 烘干 48 h 至恒重. 植株成熟收获后, 将大豆籽粒于 80℃ 烘干至恒重后, 将各其磨碎经元素分析仪(Vario EL III, Elementar Inc, 德国)测定 C、N 元素含量并得出碳氮比.

1.3.4 籽粒产量与产量构成要素

植株成熟收获后测产、考种, 测定大豆株高、主茎节数、单株荚数与百粒重.

1.4 数据分析

所有试验数据以 OTC 为重复单元, 即 3 个重复. 采用 SPSS 16.0 统计软件对数据进行方差分析(ANOVA). 文中数据均为平均值 $\pm$ 标准差.

2 结果与分析

2.1 AOT40 值

试验期间实际臭氧熏气天数为 68 d. OTC 内日

平均温度与相对湿度分别为 22.4℃与 83.1% (变化范围 70% ~ 95%), OTC 外日平均温度与相对湿度分别为 21.8℃与 73.8% (变化范围 45% ~ 98%). 每日熏气期间 (8 h) 平均光合有效辐射为 624 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$.

大豆是对 O_3 胁迫最为敏感的作物之一 (大于 40 $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 即可造成氧化伤害)^[13], 因此参考 Fuhrer 等^[14] 计算公式: $\text{AOT40} = \sum ([\text{O}_3]_i - 40) \Delta t$, 计算出整个处理期间 CFA、NFA 与 $\text{NFA} + \text{O}_3$ 下 AOT40 值 (即每小时 O_3 浓度高于 40 $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的累积总和), 分别为 0、0.03 与 10.6 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}$ (表 1). 试验期间, NFA 小时最高值出现在 8 月 13 日, 为 44.5 $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NFA} + \text{O}_3$ 小时最高值出现在 8 月 26 日, 为 85.4 $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$.

表 1 试验期间各处理每日 O_3 平均浓度与 AOT40 值

Table 1 Daily mean O_3 concentrations with ozone treatments and AOT40 values			
项目	CFA	NFA	$\text{NFA} + \text{O}_3$
每日 8 h 平均值/ $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$	9.9	19.1	58.6
臭氧日平均最大值/ $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$	15.6	35.2	58.6
臭氧日平均最小值/ $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$	2.1	9.9	48.1
小时平均浓度最高值/ $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$	15.6	44.5	85.4
AOT40 值/ $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}$	0	0.03	10.6

2.2 产量及产量构成因子

与 CFA 相比, NFA 处理降低东生 1 号大豆单株产量 4.5%, 无显著差异 ($P > 0.05$), 而 $\text{NFA} + \text{O}_3$ 处理显著降低单株产量, 达 34% ($P < 0.05$), 减产作用显著高于 NFA 处理 (表 2). 但是, 3 个处理间株高、主茎节数、单株荚数与每荚粒数均未无显著差异, 尽管 $\text{NFA} + \text{O}_3$ 处理的单株荚数与每荚粒数分别比 CFA 降低 27% 与 13%, 但未达到显著水平. CFA 与 NFA 间百粒重也无显著差异, 只降低 4%, 而 $\text{NFA} + \text{O}_3$ 处理籽粒百粒重比 CFA 显著降低 18% ($P < 0.05$). 由于单株产量与单株结荚数之间呈显著正相关 ($r = 0.459^*$, $P < 0.05$), 与百粒重之间呈极显著正相关 ($r = 0.667^{**}$, $P < 0.01$), 表明单株荚数与百粒重在决定东生 1 号产量上具有显著作用 (表 3).

以 CFA 处理东生 1 号产量为基准值, NFA 与 $\text{NFA} + \text{O}_3$ 产量与之比值为相对产量. 以试验期间 O_3 暴露累积值 AOT40 值为横坐标, 单株相对产量为纵坐标, 得出相对产量与 AOT40 值之间的线性相关关系为 $y = -0.030x + 0.977$ ($r^2 = 0.725^*$, $P < 0.05$). AOT40 值和东生 1 号单株相对产量存在显著负相

关关系, 并且根据曲线可以计算出东生 1 号大豆减产 10% 的 AOT40 值为 2.6 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}$, 即当大气中 O_3 浓度高于 40 $\text{nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的小时累积效应指数达到 2.6 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}$ 时, 将造成大豆单株产量减少 10%.

表 2 不同 O_3 处理对东生 1 号单株产量及其构成要素的影响

Table 2 Effects of different O_3 concentrations on yield and yield components of soybean cultivar Dongsheng No. 1			
项目	CFA	NFA	$\text{NFA} + \text{O}_3$
单株产量/ $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$	15.6 $\pm$ 1.1 a	14.9 $\pm$ 2.5 a	10.2 $\pm$ 2.8 b
株高	61.5 $\pm$ 5.2 a	57.0 $\pm$ 4.5 a	56.4 $\pm$ 5.4 a
主茎节数	14.1 $\pm$ 1.3 a	13.8 $\pm$ 1.0 a	13.3 $\pm$ 1.1 a
单株荚数	26.2 $\pm$ 7.1 a	24.7 $\pm$ 5.4 a	19.3 $\pm$ 7.0 a
每荚粒数	2.3 $\pm$ 0.1 a	2.2 $\pm$ 0.6 a	2.0 $\pm$ 0.4 a
百粒重	22.5 $\pm$ 1.7 a	21.6 $\pm$ 2.0 a	18.4 $\pm$ 1.8 b

表 3 东生 1 号单株产量与其构成要素之间的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients between yield and yield components in soybean cultivar Dongsheng No. 1					
	株高	主茎节数	单株荚数	每荚粒数	百粒重
单株产量	0.158	0.273	0.459 *	-0.148	0.667 **
株高		0.413 *	0.507 **	0.174	0.116
主茎节数			0.672 **	0.191	0.215
单株荚数				0.055	0.297
每荚粒数					-0.303

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

2.3 C、N 元素含量与 C/N 比

盛花期 3 个处理间植株中上部叶片 C、N 元素含量与 C/N 比均无显著差异. 随着 O_3 暴露时间延长, 鼓粒期 3 个处理叶片 C、N 元素含量及比例发生变化 (图 1). 与 CFA 相比, NFA 处理植株叶片 C 与 N 元素含量与 C/N 比无显著变化, $\text{NFA} + \text{O}_3$ 处理植株叶片 C 与 N 元素含量分别显著升高 3% 与 26%, 而 C/N 比显著降低 18%. 与 CFA 相比, $\text{NFA} + \text{O}_3$ 处理籽粒中 N 元素含量升高 3%, 碳氮比降低 3%, 均未达到显著水平.

2.4 气体交换、叶绿素荧光参数与光合色素含量

与 CFA 相比, $\text{NFA} + \text{O}_3$ 处理显著降低盛花期东生 1 号叶片 A_{sat} 、 g_s 和 WUE, 分别降低 47%、41% 和 30%, 而胞间 CO_2 浓度 (c_i) 未受到显著影响. $\text{NFA} + \text{O}_3$ 处理引起叶片开放的光系统 II 反应中心的激发能捕获效率 (F_v'/F_m') 和光系统 II 的实际量子效率 (PS II) 分别显著下降 12% 与 22% ($P < 0.05$), 光化学猝灭系数 (q_p) 也降低 11%, 但未达到显著水平 (表 4). 盛花期 3 个处理下大豆叶片光合色素含量与比例均无显著差异.

3 讨论

O_3 胁迫引起作物减产, 并且这种负面影响有累

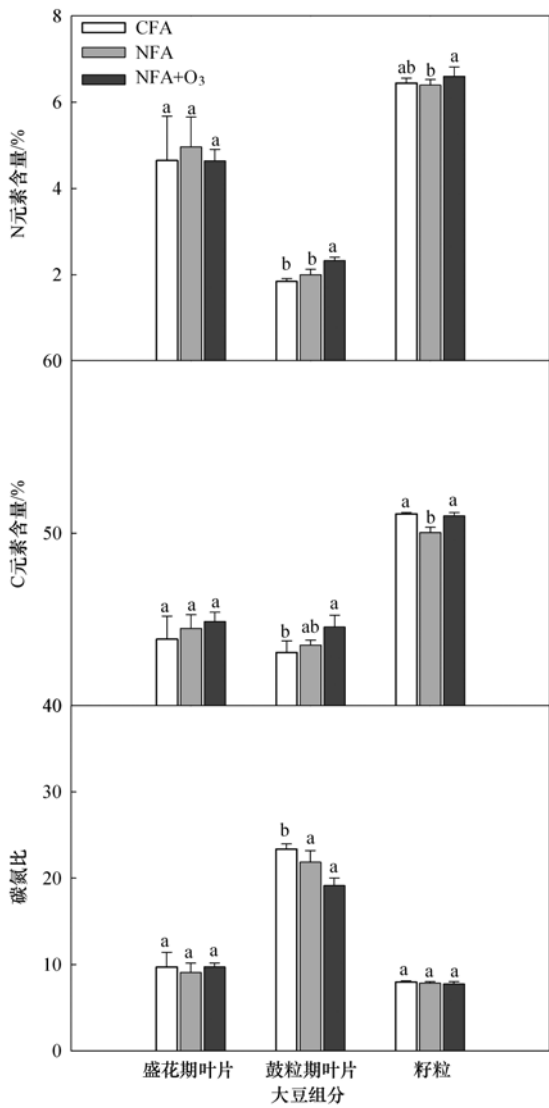


图1 不同 O₃ 处理对东生 1 号叶片与籽粒 C、N 元素及 C/N 比的影响

Fig. 1 Effects of different O₃ concentrations on C and N concentrations in leaf and seed of soybean cultivar Dongsheng No. 1

积效应. 基于全球臭氧监测数据的评估结果表明, O₃ 污染(以每日平均浓度 M12 与暴露剂量 AOT40 值为指标)导致 2000 年全球大豆、小麦和玉米分别减产 8.5% ~ 14%、3.9% ~ 15% 和 2.2% ~ 5.5%^[15]. O₃ 污染已经导致我国长江三角洲地区部分作物减产. 以水稻和冬小麦为例, 1999 年水稻和冬小麦分别减产 59.9 万 t 和 66.9 万 t, 相应的经济损失分别超过 5.39 亿元和 9.36 亿元^[16]; 2003 年水稻与冬小麦分别减产 3.04% 与 17.08%, 经济损失达到 5.76 亿元与 7.68 亿元^[17].

大豆是对 O₃ 最敏感的作物之一, O₃ 浓度达到 50 ~ 60 nL·L⁻¹ 时, 大豆减产 22%^[13]. 模型预测, 至 2050 年, 在 O₃ 浓度升高 20% 的前提下, 与当今粮食

表 4 不同 O₃ 处理对盛花期东生 1 号叶片气体交换、叶绿素荧光参数与光合色素含量的影响

Table 4 Effects of different O₃ concentrations on gas exchange, chlorophyll a fluorescence parameters and photosynthetic pigments in soybean cultivar Dongsheng No. 1 at the full bloom stage

项目	CFA	NFA	NFA + O ₃
A _{sat}	26.4 ± 1.7 a	25.5 ± 1.2 a	13.9 ± 2.8 b
g _s	0.67 ± 0.02 a	0.61 ± 0.04 a	0.39 ± 0.10 b
c _i	268.1 ± 2.3 a	270.5 ± 2.1 a	274.8 ± 13.8 a
WUE	2.72 ± 0.46 a	2.57 ± 0.28 a	1.89 ± 0.53 b
F _v '/F _m '	0.62 ± 0.01 a	0.62 ± 0.03 a	0.54 ± 0.04 b
Φ _{PSII}	0.37 ± 0.01 a	0.29 ± 0.03 a	0.36 ± 0.02 b
q _P	0.59 ± 0.02 a	0.58 ± 0.03 a	0.53 ± 0.06 a
叶绿素 a/g·m ⁻²	0.39 ± 0.02 a	0.45 ± 0.03 a	0.37 ± 0.10 a
叶绿素 b/g·m ⁻²	0.13 ± 0.01 a	0.15 ± 0.01 a	0.13 ± 0.03 a
叶绿素 a + b/g·m ⁻²	0.53 ± 0.03 a	0.60 ± 0.04 a	0.49 ± 0.13 a
类胡萝卜素/g·m ⁻²	0.11 ± 0.02 a	0.12 ± 0.01 a	0.10 ± 0.02 a
叶绿素 a/b	3.02 ± 0.18 a	3.08 ± 0.01 a	2.94 ± 0.14 a

产量相比,大豆将进一步减产 12%^[18]. 针对亚洲地区的研究表明:环境 O₃ 浓度在 35 ~ 75 nL·L⁻¹ 范围内,经过一个生长季(4 ~ 8 h)豆类减产范围在 10% ~ 65%^[19]. 本试验中, O₃ 平均浓度为 58.6 nL·L⁻¹, 经过一个生长季处理,东生 1 号大豆单株产量较洁净大气处理显著降低 34%, 相比美国大豆品种 Pioneer 93B15 减产 20% (O₃ 浓度 50 ~ 63 nL·L⁻¹, 每天暴露 8 h)^[20], 说明我国东北大豆对 O₃ 胁迫响应可能更为敏感. 这一方面与品种间臭氧敏感性差异有关,另一方面与臭氧熏蒸方式有关,OTCs 内温度、湿度等环境因子与开放式熏气系统(FACE)相比通常较高,有可能造成内部植株具有更大的气孔开度,导致通过气孔进入叶片内部的 O₃ 通量较大,造成单株减产更为严重.

百粒重是大豆产量构成的重要因素之一,与产量呈正相关关系. 本试验中, O₃ 胁迫导致东生 1 号大豆籽粒百粒重显著降低,而对株高、单株荚数与每荚粒数无显著影响. 这一结果与采用 OTCs 方式对夏大豆品种荷包 12 的研究(O₃ 浓度 80 nL·L⁻¹, 初花期开始熏气,每天 8 h)结论相似^[21]. 然而,同样采用相同熏气方式、熏气浓度与时间的研究结果却表明,80 nL·L⁻¹ O₃ 胁迫造成荷包 12 单株籽粒重显著降低 20%, 对百粒重无显著影响,单株荚数和单株籽粒数的降低是单株籽粒重降低的主要原因^[22]. 可见,相同熏气方式、熏气浓度与时间对不同大豆品种的影响受到气候条件等因素的影响.

产量损失是 O₃ 胁迫对作物生长发育产生伤害的最终结果,与光合作用固定的同化物以及同化物

在植物体内的分配密切相关。O₃ 胁迫导致作物减产通常是由光合能力降低以及供应繁殖器官生长发育的营养物质的吸收能力降低所致^[23]。对大豆来说, 花期出现或者开花期之后, 叶片生长大部分停止。在这一时期, 冠层上部叶片成为供应籽实鼓粒光合同化物的最主要来源直至植株衰老^[20]。以往研究结果表明: O₃ 暴露下, 鼓粒期大豆减产幅度最大, 这是因为冠层上部的叶片, 通常处在阳光之下, 具有较大的气孔导度, 它们累积吸收的 O₃ 通量超过其他叶片, 因此导致大豆大幅度减产^[27]。本研究发现, 与较洁净和自然大气处理相比, 高浓度 O₃ 暴露导致东生 1 号叶片净光合速率与气孔导度显著降低, 这与前人的研究结果相似^[27,28]。

气孔是限制 O₃ 进入叶内部最主要的因子, 在一定程度上是造成植物 O₃ 敏感性差异最重要的原因^[24,25]。气孔导度降低可能是植物避免 O₃ 胁迫的一种反应, 取决于叶片特性、O₃ 浓度、持续伤害时间及其它环境因素^[26]。本研究发现, 虽然高浓度 O₃ 暴露导致植株气孔导度显著降低, 而叶片胞间 CO₂ 浓度(c_i)维持不变, 该结果表明: 高浓度 O₃ 引起的气孔导度降低是东生 1 号叶片净光合速率降低的结果, 而非其他原因^[29], 这与在夏大豆上的研究结果略有不同^[30]。从测定的光合生理指标变化来看, 光系统 II 电子传递与捕获效率的下降是高浓度 O₃ 引起净光合速率显著降低的主要原因。

高浓度 O₃ 处理导致东生 1 号叶片 N 元素含量随着暴露时间延长显著升高, C/N 比显著降低, 说明 O₃ 胁迫对大豆氮代谢具有明显的影响, 这一结果与郑飞翔等^[31]在水稻上的研究结果一致。此外, 高浓度 O₃ 处理引起大豆籽粒碳氮元素显著升高, 这与对春小麦^[32]和水稻^[33]的研究结果相似, 表明 O₃ 造成大豆营养器官(叶片)氮代谢旺盛, 光合产物输出率降低, 最终影响籽粒产量的提高。这与郑有飞等^[34]的研究较为相似, 他们认为 100 nL·L⁻¹ O₃ 熏气下大豆产量显著下降的主要原因是干物质生产速率下降; 而 150 nL·L⁻¹ O₃ 熏气下大豆产量显著下降, 是由于干物质转移受抑制和干物质生产速率下降共同导致。鼓粒期东生 1 号叶片碳元素的增加, 也证明除光合同化能力的降低外, O₃ 胁迫还可以通过减少光合产物向籽粒的输入降低谷类的收获指数^[14,35]。

本研究测定指标涵盖生长发育、产量与品质、气体交换速率、光合色素含量等指标, 但研究周期

仅为一个生长季, 仅能在一定程度上反映 O₃ 浓度升高对东北黑土区春大豆品种的影响。另外, 试验采用 OTC 的熏蒸方式, 气室内部环境条件与自然环境有一定差别, 存在一定局限性。因此在今后的研究中, 将考虑到 O₃ 暴露浓度、时间、品种、叶龄、植物营养状态以及与其它环境因子之间交互作用的影响, 以期全面评价东北黑土区春大豆品种的 O₃ 敏感性, 指导预防和减轻因 O₃ 胁迫给春大豆生产带来的负面影响。

4 结论

(1) O₃ 胁迫(日平均浓度 58.6 nL·L⁻¹, 从开花初期至鼓粒后期, 有效熏气天数 68 d) 导致东生 1 号大豆品种单株产量与籽粒百粒重显著低于过滤大气与自然大气处理, 但株高、主茎节数、单株荚数与每荚粒数无显著变化。

(2) O₃ 胁迫显著降低盛花期大豆叶片净光合速率、气孔导度、水分利用效率、开放的光系统反应中心激发能捕获效率与光系统 II 的实际量子效率显著降低, 净光合速率与电子传递效率的降低是减产的主要原因。

(3) O₃ 胁迫显著升高鼓粒期大豆叶片 C 与 N 元素含量, 降低了碳氮比, 使籽粒中 N 元素含量呈现升高趋势。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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]. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Stith S, Cox P, Collins W, *et al.* Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink[J]. *Nature*, 2007, **448**(7155): 791-794.
- [4] 徐晓斌, 林伟立. 卫星观测的中国地区 1979~2005 年对流层臭氧变化趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2010, **6**(2): 100-105.
- [5] 崔继菊. 辽中地区臭氧浓度特征及影响因素研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [6] US Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park. Air quality criteria for ozone and related photochemical oxidants[R]. Vol. NC. US EPA Report No. EPA600/P-93/004bF. Washington DC, 1996.
- [7] FAO-UN. FAO trade yearbook [M]. Rome: Publishing Management Service Information Division FAO, 2002.

- [8] Morgan P B, Bernacchi C J, Ort D R, *et al.* An in vivo analysis of the effect of season-long open-air elevation of ozone to anticipated 2050 levels on photosynthesis in soybean[J]. *Plant Physiology*, 2004, **135**(4): 2348-2357.
- [9] 王春乙, 白月明, 温民, 等. CO₂ 和 O₃ 浓度倍增及复合效应对大豆生长和产量的影响[J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 6-10.
- [10] Betzelberger A M, Gillespie K M, Mcgrath J M, *et al.* Effects of chronic elevated ozone concentration on antioxidant capacity, photosynthesis and seed yield of 10 soybean cultivars [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2010, **33**(9): 1569-1581.
- [11] 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.
- [12] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids-pigments of photosynthetic biomembranes [J]. *Methods in Enzymology*, 1987, **148**: 350-382.
- [13] Ashmore M R. Effects of oxidants at the whole plant and community level[M]. UK Chichester: John Wiley, 2002. 89-118.
- [14] Fuhrer J, Skarby L, Ashmore M R. Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe [J]. *Environmental Pollution*, 1997, **97**(1-2): 91-106.
- [15] Avnery S, Mauzerall D L, Liu J F, *et al.* Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 2. Year 2030 potential crop production losses and economic damage under two scenarios of O₃ pollution[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**: 2297-2309.
- [16] Feng Z W, Jin M H, Zhang F Z, *et al.* Effects of ground-level ozone (O₃) pollution on the yield of rice and winter wheat in the Yangtze River Delta [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, **15**(3): 360-362.
- [17] 姚芳芳, 王效科, 逮非, 等. 臭氧对农业生态系统影响的综合评估: 以长江三角洲为例[J]. *生态毒理学报*, 2008, **3**(2): 189-195.
- [18] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, *et al.* Global food insecurity. Treatment of major food crops with elevated carbon dioxide or ozone under large-scale fully open-air conditions suggests recent models may have overestimated future yields[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, **360**(1463): 2011-2020.
- [19] Emberson L D, B  ker P, Ashmore M, *et al.* A comparison of North American and Asian exposure-response data for ozone effects on crop yields[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(12): 1945-1953.
- [20] Morgan P B, Mies T A, Bollero G A, *et al.* Season-long elevation of ozone concentration to projected 2050 levels under fully open-air conditions substantially decreases the growth and production of soybean[J]. *New Phytologist*, 2006, **170**(2): 333-343.
- [21] 李彩虹, 李勇, 乌云塔娜, 等. 高浓度臭氧对大豆生长发育及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(9): 2347-2352.
- [22] 战丽杰. 臭氧胁迫下硅对大豆生理生态影响的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [23] Krupa S V, Kickert R N. The greenhouse effect: impacts of ultraviolet-B (UV-B) radiation, carbon dioxide (CO₂), and ozone (O₃) on vegetation[J]. *Environmental Pollution*, 1989, **61**(4): 263-393.
- [24] Emberson L D, Ashmore M R, Cambridge H M, *et al.* Modelling stomatal ozone flux across Europe[J]. *Environmental Pollution*, 2000, **109**(3): 403-413.
- [25] Feng Z Z, Pang J, Kobayashi K, *et al.* Differential responses in two varieties of winter wheat to elevated ozone concentration under fully open-air field conditions [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(1): 580-591.
- [26] Grulke N E, Neufeld H S, Davison A W, *et al.* Stomatal behavior of ozone-sensitive and-insensitive coneflowers (*Rudbeckia laciniata* var. *digitata*) in Great Smoky Mountains National Park[J]. *New Phytologist*, 2007, **173**(1): 100-109.
- [27] Morgan P B, Ainsworth, E A, Long S P. How does elevated ozone impact soybean? A meta-analysis of photosynthesis, growth and yield[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2003, **26**(8): 1317-1328.
- [28] 金东艳, 赵天宏, 付宇, 等. 臭氧浓度升高对大豆光合作用及产量的影响[J]. *大豆科学*, 2009, **28**(4): 632-635.
- [29] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, **33**(1): 317-345.
- [30] 郑有飞, 徐卫民, 吴荣军, 等. 地表臭氧浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理对大豆光合特性的影响[J]. *生态学报*, 2012, **32**(8): 2515-2524.
- [31] 郑飞翔, 王效科, 侯培强, 等. 臭氧胁迫对水稻生长以及 C、N、S 元素分配的影响[J]. *生态学报*, 2011, **31**(6): 1479-1486.
- [32] Pleijel H, Danielsson H, Gelang J, *et al.* Growth stage dependence of the grain yield response to ozone in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1998, **70**(1): 61-68.
- [33] 郭建平, 王春乙, 温民, 等. 大气中 O₃ 浓度变化对水稻影响的试验研究[J]. *作物学报*, 2001, **27**(6): 822-826.
- [34] 郑有飞, 刘瑞娜, 吴荣军, 等. 地表臭氧胁迫对大豆干物质生产和分配的影响[J]. *中国农业气象*, 2011, **32**(1): 73-80.
- [35] McKee I F, Eiblmeier M, Polle A. Enhanced ozone-tolerance in wheat grown at an elevated CO₂ concentration: ozone exclusion and detoxification[J]. *New Phytologist*, 1997, **137**(2): 275-284.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 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