

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)
臭气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	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铈在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

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

寇太记^{1,2}, 于伟伟¹, 朱建国², 朱新开³

(1. 河南科技大学农学院, 洛阳 471003; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 3. 扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 扬州 225009)

摘要: 近地层臭氧(O_3)污染对陆地生态系统及植物生长的危害备受关注. 本研究利用开放式臭氧污染(Free-air O_3 concentration enrichment, O_3 FACE)研究平台, 研究了大气 O_3 浓度增加(比周围大气高50%)对长江三角洲地区5个冬小麦(*Triticum aestivum* L.)品种(扬麦15、扬麦16、烟农19、扬辐麦2号和嘉兴002)的干物质与生物量碳的积累与分配以及作物残体C/N比的影响. 结果表明, 不同品种小麦的干物质积累和分配对 O_3 升高的响应差异明显; O_3 升高具有降低扬麦15、嘉兴002和增加扬辐麦2号总生物量的趋势, 但对扬麦16和烟农19几乎无影响, 其中嘉兴002达到显著水平. O_3 升高显著增加了扬麦15、嘉兴002和显著降低了烟农19和扬辐麦2号的根/冠比, 而对品种扬麦16无影响, 导致干物质在地上和地下分配呈现品种差异. 高 O_3 环境下扬麦15、扬麦16和嘉兴002穗重降低, 而烟农19和扬辐麦2号无明显变化; 小麦籽粒占穗的比重在高 O_3 条件下嘉兴002、烟农19和扬辐麦2号显著降低8.2%~15.5%, 扬麦15呈增加趋势而扬麦16变化不大; 表明 O_3 升高将致嘉兴002、烟农19、扬辐麦2号和扬麦16不同程度减产. O_3 升高导致烟农19和扬辐麦2号秸秆碳量显著增加14.1%~22.9%和C/N比显著降低10.9%~29.1%, JX002秸秆碳量显著减少和C/N比显著增加, 扬麦16和扬麦15的秸秆碳量与C/N比则分别呈增加和降低趋势. O_3 升高显著降低了扬麦16、烟农19和扬辐麦2号品种的根茬碳量和C/N比, 对嘉兴002的根茬碳量无显著影响却显著降低了C/N比, 但对扬麦15根茬碳数量与质量均影响不大. 评价小麦干物质的形成与分配、根茬和秸秆固碳的质与量对 O_3 污染的响应需考虑品种差异影响.

关键词: 物质形成; 秸秆; 根茬; 生物量碳; 农田生态系统; O_3

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2862-06

Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat

KOU Tai-ji^{1,2}, YU Wei-wei¹, ZHU Jian-guo², ZHU Xin-kai³

(1. College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Jiangsu Province Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Effects of surface ozone pollution on the terrestrial ecosystem and plant growth have drawn great attention. With the support of the Free-Air ozone Concentration Enrichment (O_3 -FACE) system located in Jiangdu city, Jiangsu province, the effects of elevated atmospheric ozone (pO_3) on the accumulation and distribution of dry matter and biomass carbon as well as the C/N ratio of crop residue of five wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties (Yangmai 15, Yangmai 16, Yannong 19, Yangfuma 2 and Jiaxing 002) were investigated in the Yangtze River delta, the target pO_3 of which was 50% higher than the ambient pO_3 . The results showed that the accumulation and distribution of different wheat varieties responded differently to elevated pO_3 . Elevated pO_3 decreased the biomass of Yangmai 15 and Jiaxing 002, increased the Yangfuma 2 biomass, and had no effects on the total biomass of Yangmai 16 and Yannong 19, among which a significant difference was found for Jiaxing 002. Elevated pO_3 significantly increased the ratios of root to shoot for Yangmai 15 and Jiaxing 002 and significantly decreased the root/shoot ratios of Yannong 19 and Yangfuma 2, but had no effect on Yangmai 16, leading to an obvious difference in dry matter distributed among aboveground and belowground parts. O_3 enrichment decreased the wheat ear weight of Yangmai 15, Yangmai 16 and Jiaxing 002, and had no effect on that of Yannong 19 and Yangfuma 2. Elevated pO_3 significantly decreased the proportion of grain weight to ear weight by 8.2% - 15.5% for Jiaxing 002, Yannong 19 and Yangfuma 2, whereas the proportion was increased for Yangmai 15 and not affected for Yangmai 16, suggesting that O_3 enrichment lead to different decreases in the yield of Jiaxing 002, Yannong 19, Yangfuma 2 and Yangmai 16. Elevated pO_3 significantly increased the straw carbon of Yannong 19 and Yanfuma 2 by 14.1% - 22.9% and significantly decreased the straw C/N ratio by 10.9% - 29.1%.

收稿日期: 2011-10-10; 修订日期: 2012-01-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41003030); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金项目(Y052010030); 国家科技部国际科技合作计划项目(2009DFA31110); 中国科学院知识创新方向项目(KZCX2-EW-414); 河南科技大学人才基金项目(09001266)

作者简介: 寇太记(1975~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为物质循环与气候环境变化、逆境植物营养与农田生态, E-mail: tjkou@yahoo.com.cn

The rising pO_3 significantly decreased the straw carbon of Jiaxing 002 and significantly increased the straw C/N ratio. Moreover, for Yangmai 16 and Yangmai 15, there was a decreasing straw carbon amount and an increasing straw C/N under rising pO_3 . Elevated pO_3 significantly decreased the carbon quantity and C/N of root residue in Yangmai 16, Yannong 19 and Yangfuma 2. Elevated pO_3 had no significant effect on the root residue carbon of Jiaxing 002, but significantly decreased its C/N ratio. However, elevated pO_3 had no effect on the quantity and quality of the root residue of Yangmai 15. It is obvious that when evaluating the response of the formation and distribution of wheat dry matter and the quantity and quality of root and straw carbon to O_3 pollution, the difference in wheat varieties should be taken into account.

Key words: matter formation; straw; root residue; biomass carbon; farmland ecosystem; O_3

随着全球气候变化对陆地生态系统的影响日益增加,陆地生态系统碳循环成为研究关注的热点之一^[1]. 臭氧(O_3)是重要的温室气体和最主要的光化学污染物^[2]. 大气中 NO_x 和 CO_2 等温室气体增多、矿质能源消耗和机动车辆尾气排放量的增加均加剧了近地层 O_3 污染^[2,3]. 持续增加的近地层臭氧(O_3)污染^[4]的环境生态效应备受科学家的关注,东亚地区远超过敏感植物和主要农作物 O_3 损伤的阈值($40\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$)甚至更高^[5~7]. 前人针对 O_3 污染对植物系统的影响采用密闭箱、开顶箱法作了大量研究^[8],主要集中在自然森林系统和农作物的植物光合作用及其响应机制^[9,10]、不同植物类型的响应^[3,9]、林木和作物的产量^[3,9,10]等方面. 农田系统是人为干扰最大的陆地生态系统,农作物年固碳量占全球植被年固碳量的 47%^[11],农田碳库极其活跃对维持全球碳平衡具有重要贡献^[12]. 有机物料的土壤输入是土壤碳库的重要来源,其通过腐殖化作用形成有机质. 农田土壤有机物料主要源于根茬碳输入与秸秆碳归还^[12,13]和有机肥施入等. 有机物料的输入数量与质量潜在的影响农田土壤碳库对气候环境变化的响应程度与趋势. 当前针对不同作物种类、农作物产量与品质对 O_3 污染的响应或适应已有大量的结果^[10,14],然而针对农作物残余物的数量与质量、光合产物的分配研究不足. 已有的少量针对植物同化碳的合成与分配的结果主要源于森林系统^[15],农田系统研究偏少^[16],尤其开放环境 O_3 污染下同作物不同品种间响应差异鲜见报道,既不利于深入认识 O_3 污染加剧下农田系统碳周转,也不利于选育抗 O_3 污染高产且适宜土壤培育的品种类型.

小麦是我国重要的粮食作物,也是对 O_3 特别敏感的作物之一^[17]. 长江三角洲地区是我国 O_3 污染最严重的区域之一^[5,7]. 本研究利用中国唯一的稻/麦轮作系统 O_3 FACE (Free-air O_3 concentration enrichment) 试验平台,研究大气 O_3 浓度升高对长江三角洲地区 5 个不同冬小麦品种的干物质积累与分

配、产量形成的物质基础、生物量碳的数量与质量的影响,以期建立高 O_3 浓度下农田生态系统的土壤有机培育调控措施和耐 O_3 品种选育提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江苏省扬州市江都小纪镇马陵村良种场($119^\circ42'0''\text{E}$, $32^\circ35'5''\text{N}$). 试验区年降水量 980 mm 左右,年均蒸发量 $>1\,100\text{ mm}$,年平均温度约 14.9°C ,年均日照时间 $>2\,100\text{ h}$,年无霜期 220 d. 土壤类型为下位砂姜土,0~15 cm 耕层土壤的基本性状为: pH 7.2,有机碳 $18.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $1.45\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $0.63\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾 $14.02\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,容重 $1.16\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,砂粒($2\sim0.02\text{ mm}$) $578\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,粉粒($0.02\sim0.002\text{ mm}$) $285\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,黏粒($<0.002\text{ mm}$) $137\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,质地为壤土;耕作方式为水稻-冬小麦轮作.

1.2 试验平台

臭氧平台于 2007 年 3 月开始运行,分设 3 个 O_3 处理(O_3 FACE)圈和 3 个对照(Ambient)圈,每圈直径为 14 m 的正八边形,试验面积为 160 m^2 ,各圈间隔 $>70\text{ m}$,以减少臭氧释放对其它圈的影响. O_3 FACE 圈内目标 O_3 浓度高于 Ambient 圈 O_3 浓度 50%. O_3 FACE 处理 O_3 释放通过 8 根直径 15 mm 置于冠层上方 30~60 cm 布气管进行, Ambient 圈无布气管道,环境条件与自然状态完全一致. 麦季放气期为 3 月初至小麦成熟,每天放气时间为 09:00 至日落时间,但在下雨、露水等造成叶片湿润时,高浓度的 O_3 会造成叶片的急性损伤,系统将暂停放气. 平台控制详细信息见文献[18].

1.3 试验设计与管理

在 O_3 FAOE、Ambient 每个处理每重复区域内,采用微区($3\text{ m}\times3\text{ m}$)试验种植长江三角洲地区栽种面积较大的扬麦 15 (Yangmai 15, Y15)、扬麦 16 (Yangmai 16, Y16)、烟农 19 (Yannong 19, YN19)、扬幅麦 2 号 (Yangfuma 2, YF2) 和嘉兴 002 (Jiaxing

002, JX002)共 5 个小麦品种. 播种时间为 2009 年 11 月中旬, 2010 年 6 月 1 日成熟后收获, 行距 20 cm, 小麦基本苗 180 万株·hm⁻²左右. 收获时, 每品种每处理每重复小区均采集 2 m² 的全部地上和地下(0~20 cm)植株样品, 分成穗、秸秆(茎叶)、根茬几部分. 小麦根茬以相邻两行中线为界分行挖掘将 2 m² 区域内的 0~20 cm 土壤(含根)装袋, 用自来水冲洗去泥土将肉眼可见超过 1 cm 的根系全部拣出, 并用蒸馏水冲洗干净, 用吸水纸吸去多余水分, 装袋. 用干燥箱在 80℃ 时连烘 72 h 称干重计算各部分生物量, 并将穗人工脱粒称重计产. 将秸秆、根粉碎过 20 目和 100 目筛备用. 有机碳测定采用重铬酸钾容量法, 氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-自动定氮仪测定^[19].

麦季施 N 220 kg·hm⁻², P₂O₅ 和 K₂O 各 75 kg·hm⁻²; 其中氮肥为尿素, 磷肥为过磷酸钙, 钾肥为氯化钾. 其它管理均与实际生产大田同.

1.4 数据计算与分析

地上部干重为秸秆干重(g·m⁻²)和穗干重(g·m⁻²)之和. 小麦籽粒在穗中的比重为籽粒干重(g·m⁻²)与穗干重(g·m⁻²)的比值; 根/冠比为根茬干重(g·m⁻²)与地上部干重(g·m⁻²)的比值. 秸秆或根茬生物量碳(g·m⁻²)为秸秆或根茬中碳含量(g·kg⁻¹)与对应的生物量干重(g·m⁻²)之积; 作物残体碳(g·m⁻²)为秸秆与根茬生物量碳之和. C/N 比为秸秆或根茬中碳含量(g·kg⁻¹)与氮含量(g·kg⁻¹)的比值.

数据通过 SPSS 11.5 统计软件, 采用 Univariate、*F*-检验和 LSD 方法对不同大气 O₃ 浓度和品种的效应及其交互作用进行统计分析, 显著水平为 *P* ≤ 0.05, 利用 Microsoft Excel 制图.

2 结果与分析

2.1 大气 O₃ 浓度升高对不同品种小麦干物质形成与分配的影响

2.1.1 大气 O₃ 升高对总生物量和秸秆干物质积累与分配的影响

大气 O₃ 升高对不同品种小麦总生物量积累以及在秸秆中物质分配影响不同(图 1). O₃ 污染降低了 Y15 和 JX002 的总生物量积累, Y15 降低 5.1% 和 JX002 降低 17.5% (*P* < 0.05). O₃ 升高对 Y16 和 YN19 的生物积累量几乎没有影响. O₃ 升高增加 YF2 小麦总干物质积累量 5.5%. 表明小麦的干物质积累对 50% 的 O₃ 浓度增加响应因品种而异. O₃

升高导致 Y15 秸秆减少 7.0%、JX002 秸秆重显著降低 24.6% (*P* < 0.05). O₃ 升高增加了 Y16 秸秆重 5.1%. O₃ 升高显著增加了 YN19 和 YF2 的秸秆重 24.7% 和 21.0% (*P* < 0.05). 表明冬小麦作物不同品种间的植株与秸秆中的干物质积累响应或适应 O₃ 污染存在机制差异, 可能与基因型差异有关. 因素分析表明, O₃ 浓度和品种差异对秸秆的干物质积累影响均未达到显著水平, 但二者的交互效应对秸秆的干物质积累在统计上达到显著水平(*P* < 0.05, 表 1).

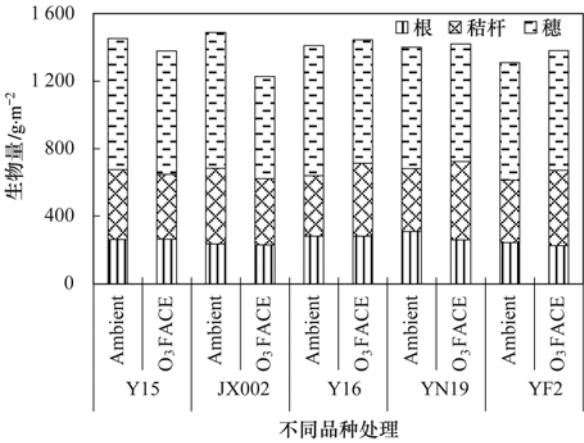


图 1 两个 O₃ 浓度下不同小麦品种的生物量及其分配

Fig. 1 Biomass of different wheat varieties and their distribution under two ozone concentrations

表 1 臭氧浓度和品种差异对小麦干物质积累的影响效应分析¹⁾

Table 1 Factor effects of different O₃ concentrations and wheat types on dry matter accumulation of wheat

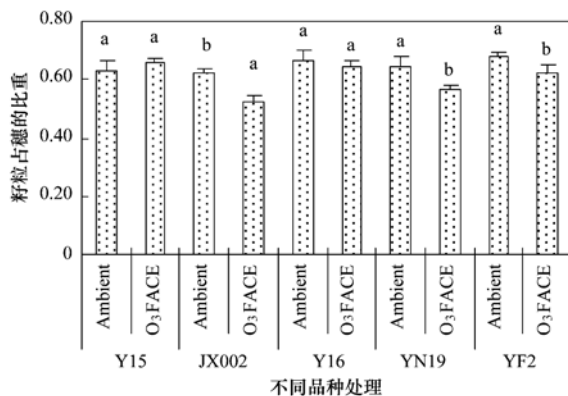
因素	秸秆		根		穗	
	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
O ₃	0.04	0.84	0.47	0.50	2.43	0.13
品种	0.25	0.91	2.87	0.04 *	0.36	0.83
O ₃ × 品种	3.60	0.02 *	0.26	0.90	0.94	0.46

1) * 为 *P* < 0.05

2.1.2 大气 O₃ 升高对穗干物质积累及其向籽粒转运的影响

穗重及籽粒占穗比重变化影响籽粒的产量. 大气 O₃ 升高对不同小麦品种的光合产物在穗中的分配(图 1)和由穗向籽粒的转运(图 2)的影响不同. O₃ 升高导致 Y15 和 Y16 穗重分别减少 6.0% 和 5.1%, JX002 的穗重显著降低 12.7% (*P* < 0.05). O₃ 升高对 YN19 和 YF2 穗生物积累影响不大. 因素分析表明, O₃ 浓度和品种差异、以及二者的交互效应对穗干物质积累影响均未达到显著水平(表 1). O₃ 升高增加了 Y15 小麦籽粒占穗的比重 4.5%, 分别显著降低了 JX002、YN19 和 YF2 小麦籽粒占穗

重的比重 15.5%、12.4% 和 8.2% ($P < 0.05$), 但对 Y16 品种几乎没有影响. 显然 O_3 污染对不同品种小麦产量形成的影响存在差异.



不同字母表示同品种在不同 O_3 浓度环境处理差异显著, 下同

图2 不同 O_3 浓度下不同品种小麦籽粒占穗重的比例

Fig. 2 Proportion of dry grain weight to ear weight of different wheat varieties under different ozone concentrations

2.1.3 O_3 增加对地下部干物质积累及光合产物向地下分配的影响

O_3 污染下不同品种小麦的地下部干物质积累和分配是不同的(图1和3). 大气 O_3 升高对 Y15、JX002 和 Y16 这3个小麦品种根生物量几乎没有影响, 但降低了 YN19 和 YF2, 分别为 15.7% ($P < 0.05$) 和 7.3% (图1). O_3 污染造成地下部干物质积累量的下降因品种而有所差异. 因素分析进一步表明, 品种差异对地下部的干物质积累影响达到显著水平 ($P < 0.05$), 但 O_3 浓度及其与品种间的交互效应对地下部的干物质积累在统计上均未达到显著水平(表1).

O_3 升高显著增加了品种 Y15 和 JX002 的根/冠比 8.7% 和 19.4% ($P < 0.05$); 表明品种 Y15 和 JX002 遭 O_3 污染后, 该两品种类型小麦分配更多的光合产物到地下. 品种 YN19 和 YF2 在高 O_3 环境的根/冠比显著降低 22.5% 和 9.9% ($P < 0.05$), 表明臭氧污染将导致该类型品种输入地下的光合产物下降, 分配于地上部分的量增加. 而品种 Y16 在两种 O_3 浓度处理没有明显差异, 表明该品种抵抗 O_3 污染的能力较强.

2.2 大气 O_3 浓度升高对小麦生物量碳数量与质量的影响

2.2.1 大气 O_3 浓度升高对秸秆碳数量与质量的影响

O_3 升高显著增加了 Y16、YN19 和 YF2 品种的秸秆生物量碳固定, 分别增加 24.7%、14.1% 和 22.9% ($P < 0.05$, 表2). 高 O_3 浓度降低 JX002 和

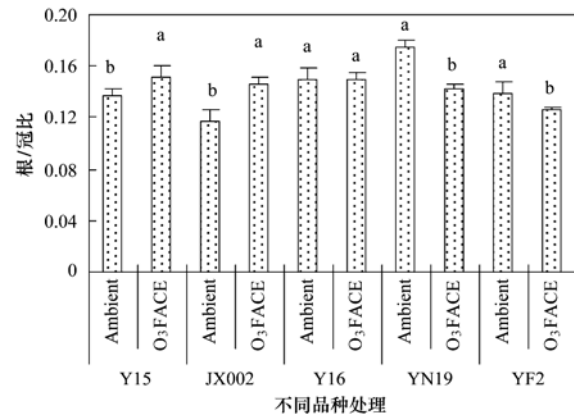


图3 两个 O_3 浓度下不同品种小麦的根/冠比

Fig. 3 Ratio of root to shoot of different wheat varieties under two ozone concentrations

Y15 品种秸秆生物量碳的固定 19.4% ($P < 0.05$) 和 8.3%. O_3 升高降低了 Y15、YN19、YF2 小麦秸秆的 C/N 比, 其中 YN19 和 YF2 分别显著降低 10.9% 和 29.1% ($P < 0.05$)、Y15 降低 8.3%. O_3 升高增加了 JX002 和 Y16 小麦品种秸秆的 C/N 比 23.1% ($P < 0.05$) 和 9.5%. O_3 升高分别增加 Y16、YN19 和 YF2 品种的秸秆与根茬总生物量碳固定 10.5% ($P < 0.05$)、5.0% ($P = 0.105$) 和 8.5% ($P < 0.05$), 显著降低 JX002 秸秆与根茬总生物量碳 13.7% ($P < 0.05$), 但 Y15 品种仅略有降低. 表明 O_3 污染对农作物残体固碳数量与质量的影响因品种而异.

2.2.2 大气 O_3 浓度升高对根茬碳数量与质量的影响

O_3 升高显著降低了 Y16、YN19 和 YF2 品种的根茬生物量碳的 8.7%、10.0% 和 10.4% ($P < 0.05$, 表2). 高 O_3 浓度对 JX002 和 Y15 品种根茬生物量碳的影响未达到显著水平. O_3 升高显著降低了 JX002、Y16、YN19 和 YF2 小麦根茬的 C/N 比, 降幅为 11.8% ~ 31.2% ($P < 0.05$). 但 O_3 升高对 Y15 小麦品种根茬的 C/N 比影响不大. 表明 O_3 污染对不同品种小麦的根茬固碳数量与质量因品种而异.

3 讨论

小麦是对 O_3 特别敏感的作物之一^[17], 尽管本研究中长江三角洲地区 5 个适栽品种在大气 O_3 增加 50% 环境中总干物质积累量及其根/冠比分别呈降低、不变或增加为初步结果, 仍表明并非所有小麦品种均对 O_3 敏感. 该结果不完全与利用模型和试验发现树木和农作物的干物质积累减少^[20,21] 和

表 2 不同 O₃ 条件下各品种小麦的根茬与秸秆的生物碳量和 C/N 比¹⁾

Table 2 Biomass carbon and C/N ratio of root residue and straw of different wheat varieties under different O ₃ concentration conditions						
品种	处理	秸秆碳/g·m ⁻²	根茬碳/g·m ⁻²	作物残体碳/g·m ⁻²	秸秆 C/N 比	根茬 C/N 比
Y15	Ambient	200.5 ± 8.6 bcd	106.1 ± 8.8 bc	306.6 ± 7.8 b	37.7 ± 1.7 cd	52.3 ± 6.7 c
	O ₃ FACE	183.3 ± 12.8 cd	114.9 ± 5.6 b	298.3 ± 6.5 bcd	34.5 ± 2.5 d	53.8 ± 3.1 c
JX002	Ambient	225.5 ± 13.9 a	98.7 ± 6.8 cd	324.2 ± 10.8 a	34.1 ± 3.4 d	67.8 ± 1.8 a
	O ₃ FACE	181.8 ± 10.8 d	97.9 ± 8.9 d	279.8 ± 6.7 d	42.0 ± 2.5 b	53.8 ± 2.0 c
Y16	Ambient	171.9 ± 9.5 d	126.9 ± 4.3 a	298.7 ± 11.3 bc	36.2 ± 3.0 cd	75.0 ± 7.0 a
	O ₃ FACE	214.3 ± 16.7 abc	115.8 ± 4.2 b	330.0 ± 9.7 a	39.6 ± 5.1 bcd	51.6 ± 1.8 c
YN19	Ambient	189.7 ± 9.6 cd	114.7 ± 4.2 b	304.4 ± 11.8 bc	46.5 ± 1.5 a	59.9 ± 1.1 b
	O ₃ FACE	216.5 ± 15.9 ab	103.2 ± 3.0 cd	319.7 ± 14.7 ab	41.4 ± 3.3 bc	52.9 ± 4.9 c
YF2	Ambient	174.5 ± 12.0 d	109.5 ± 5.8 bc	284.0 ± 10.7 cd	37.4 ± 2.0 cd	69.9 ± 4.8 a
	O ₃ FACE	214.5 ± 8.6 abc	98.1 ± 2.8 d	308.2 ± 5.0 b	26.5 ± 1.4 e	51.8 ± 0.9 c

1) 作物残体碳为根茬碳与秸秆碳之和; 同列不同字母表示为 $P < 0.05$ 显著性差异

树木根/冠比下降^[22]的报道一致. 这可能与植物类型、试验条件、同作物不同品种对 O₃ 污染响应机制差异有关. 通常敏感型小麦遭受 O₃ 危害后叶片膜保护系统受到危害^[24]、光合作用降低^[8], 碳水化合物合成能力下降, 导致干物质积累减少. 本研究中 Y15 与 JX002 品种遭 O₃ 污染危害后总干物质质量下降, 王春乙等^[20]有类似的发现; 但另 3 个品种则未下降, 可能与供试小麦品种特性及敏感程度差异有关^[23]. 相同平台上, 王亮等^[8]就发现 O₃ 造成对不同品种小麦造成的光合损伤存在差异. 由于 O₃ 升高增加了 Y15 与 JX002 品种的根/冠比但对根干重影响不大, 表明这 2 个品种尽管光合产物减少但根系所占份额却相对增加, 较多的光合碳被输入地下, 促进根系对养分和水分的吸收来维持植物生长减少 O₃ 危害影响. O₃ 浓度升高没有改变 Y16 总干物质积累量和根/冠比, 或许这个品种抗 O₃ 污染的能力较强. 而 O₃ 污染尽管没有改变 YN19 总干物质积累量却降低了根/冠比, 表明该品种在 O₃ 污染下减少了光合产物向地下的分配, 通过增加地上部的分配份额来抵抗 O₃ 污染危害. YF2 品种 O₃ 污染下干物质积累略有增加但根/冠比却降低, 可能该品种抗 O₃ 能力极强, 通过加强碳水化合物的合成和增加地上部的分配数量来抵抗 O₃ 增加的逆境危害, 具体原因仍有待研究.

本研究中 O₃ 污染对穗重及籽粒占穗比重的影响因受品种制约. 品种 Y15 和 JX002 遭 O₃ 污染后穗重下降、光合产物向穗中转移减少, JX002 光合产物由穗向籽粒中转运受到阻碍, 而 Y15 加大了穗向籽粒的物质转运, 但 4.5% 转运增幅小于穗重 7.0% 的降幅, 显然 O₃ 污染将导致这 2 个品种减产但造成减产的机制不同. O₃ 污染没有减少 YN19 和

YF2 品种穗贮藏的光合产物量, 但光合产物由穗向籽粒的转移减少, 必导致产量下降. 50% 的 O₃ 浓度升高对 Y16 的光合产物由穗向籽粒的转运基本无影响, 但穗重略有降低和秸秆重略有增加, 该品种响应 O₃ 污染已呈现将更多光合产物贮藏于营养器官和减少生殖器官物质积累导致产量降低的风险. 本研究中 5 个品种在 50% 的 O₃ 增加污染下均呈现减产风险, 与模型预测趋势^[10,25] 基本一致, 但品种响应差异明显^[23].

农作物残体表征了农田系统的初级固碳能力^[14]. 本研究表明 O₃ 污染增加 Y16、YN19 和 YF2 品种的秸秆与根茬总生物量碳 15.3 ~ 31.3 g·m⁻², 降低了 JX002 固碳量 44.4 g·m⁻², 对 Y15 固碳量影响较小. 显然 O₃ 污染对农作物残体的固碳效应受品种差异影响, 与其它自然植被遭受 O₃ 污染后固碳效应下降^[3,21] 不同, 除植被类型差异外, 不同品种抗 O₃ 逆境的基因差异可能也是重要的原因. 秸秆、根茬与有机肥等有机物料通过腐殖化作用合成土壤有机质^[13], 土壤有机质性质主要与输入土壤的有机物料的数量与质量有关. O₃ 污染下 Y16、YN19 和 YF2 品种秸秆碳固定量增加, 但 C/N 比下降使得秸秆如还田被分解难度降低; 而 JX002 和 Y15 品种在 O₃ 污染下秸秆碳固定量减少, C/N 比的增加使秸秆不易分解. 但当前农田施用有机肥偏少, 秸秆还田受多种因素制约并未被广泛接受, 根茬仍是农田土壤有机质的主要有机物料来源. O₃ 污染降低了 Y16、YN19 和 YF2 品种的根茬生物量碳输入和 C/N 比, JX002 的根茬碳输入量未变但 C/N 比降低, 这不完全相同于 O₃ 污染将致根重降低的报道^[22,26], 这可能与试验条件、试验方法和试验品种有关. C/N 比降低将使根茬更易分解和腐殖质形成量减

少, 显然在 O_3 污染危害加剧背景下持续种植这 4 个品种的农田土壤碳库存在减小的风险. Felzer 等^[21]通过模型研究自然植被与主要农作物初级生产力和碳固定也发现, 自 20 世纪 50 年代以来因 O_3 污染年均 NPP 减少不低于 $9 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 、碳固定降低 18~38 Tg, 农田耕作过程中碳损失增加 27.0%, 且高 O_3 浓度环境中碳固定极少. 然而, O_3 污染下 Y15 品种的根茬生物量碳输入量与 C/N 比变化不大, O_3 污染对该品种土壤碳库的影响仍有待观察. 此外, 根茬与秸秆中 N 积累增加或降低的改变势必影响氮素的地球生物化学循环, 其对土壤碳循环的潜在影响仍有待深入研究, 但显然 O_3 污染导致植物-土壤系统碳氮积累和固定的改变势必影响未来全球碳氮动力学和碳预算.

4 结论

不同品种小麦总干物质的积累和在穗、茎叶(秸秆)与根中的分配响应大气 O_3 浓度增加的机制存在明显的品种差异. 供试品种在 50% 的 O_3 增加污染下均呈现减产风险, 或因光合产物向穗中转运下降, 或因光合产物由穗向籽粒转移减少, 或二者共同作用, 具体因品种而异. O_3 污染下不同品种小麦秸秆、根茬的生物量碳和 C/N 比均呈现增加、降低或不变, 该规律因品种和器官组织差异而不尽相同, 其对土壤碳库的潜在影响有待深入研究.

参考文献:

- [1] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995, **1**(1): 77-91.
- [2] Thompson A M. The oxidizing capacity of the earth's atmosphere: probable past and future changes[J]. *Science*, 1992, **256**(5060): 1157-1165.
- [3] 寇太记, 常会庆, 张联合, 等. 近地层 O_3 污染对陆地生态系统的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(2): 704-710.
- [4] Oltmans S J, Levy H II. Surface ozone measurements from a global network[J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(1): 9-24.
- [5] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis [A]. In: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002. 239-287.
- [6] Morgan P B, Mies T, Bollero G. 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.
- [7] 李莉, 陈长虹, 黄成, 等. 长江三角洲地区大气 O_3 和 PM_{10} 的区域污染特征模拟[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 237-245.
- [8] 王亮, 曾青, 冯兆忠, 等. 开放式臭氧浓度升高对 2 个冬小麦品种光合损伤的研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 527-534.
- [9] Wang C Y, Bai Y M, Guo J P, et al. Impacts of ozone concentration changes on crops and vegetables in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, **18**(1): 105-116.
- [10] 冯兆忠, 小林和彦, 王效科, 等. 小麦产量形成对大气臭氧浓度升高响应的整合分析[J]. *科学通报*, 2008, **52**(24): 3080-3085.
- [11] 王修兰. 全球农作物对大气 CO_2 及其倍增的吸收量估算[J]. *气象学报*, 1996, **54**: 416-426.
- [12] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 119-229.
- [13] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 66-207.
- [14] 朱新开, 刘晓成, 孙陶芳, 等. 开放式 O_3 浓度增高对小麦籽粒蛋白的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(10): 2551-2557.
- [15] Mörsky S K, Haapala J K, Rinnan R, et al. Long-term ozone effects on vegetation, microbial community and methane dynamics of boreal peatland microcosms in open-field conditions [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(8): 1891-1903.
- [16] 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.
- [17] Guderian R. Emissions and ambient ozone concentration [A]. In: Guderian R, (Ed.). Air pollution by photochemical oxidants: formation, transport, control and effects on plants [C]. Berlin: Springer, 1985. 11-67.
- [18] 唐昊治, 刘钢, 韩勇, 等. 农田开放体系中调控臭氧浓度装置平台(O_3 -FACE)研究[J]. *土壤*, 2010, **42**(5): 833-841.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 308-309.
- [20] 王春乙, 白月明, 郑昌玲, 等. CO_2 和 O_3 浓度倍增对作物影响的研究进展[J]. *气象学报*, 2004, **62**(6): 875-881.
- [21] Felzer B, Kicklighter D, Melillo J, et al. Effects of ozone on net primary production and carbon sequestration in the conterminous United States using a biogeochemistry model[J]. *Tellus*, 2004, **56**(3): 230-248.
- [22] Landolt W, Bühlmann U, Bleuler P, et al. Ozone exposure-response relationships for biomass and root/shoot ratio of beech (*Fagus sylvatica*), ash (*Fraxinus excelsior*), Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) [J]. *Environmental Pollution*, 2000, **109**(3): 473-478.
- [23] Fuhrer J, Grimmer A G, Tschannen W, et al. The response of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to ozone at high elevations [J]. *New Phytologist*, 1992, **121**(2): 211-219.
- [24] 金明红, 冯宗炜. 臭氧对冬小麦叶片膜保护系统的影响[J]. *生态学报*, 2000, **20**(3): 444-447.
- [25] 金明红, 黄益宗. 臭氧污染胁迫对农作物生长与产量的影响[J]. *生态环境*, 2003, **12**(4): 482-486.
- [26] 王春乙, 白月明, 温民, 等. CO_2 和 O_3 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.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-qiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行