

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析	钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)
基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素	高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM _{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析	陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析	张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势	徐虹, 唐迦, 肖致美, 高璟赞, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析	李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)
长江三角洲 2010 ~ 2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单	朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)
北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性	许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子	高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析	李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价	冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析	樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)
超低排放高湿度气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试	胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征	王坚, 黄压, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立	潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)
基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演	黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨垠晖, 杜晓晨 (3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例	刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为	赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱奔, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析	许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)
过氧化钙 (CaO ₂) 联合生物炭对河道底泥的修复	李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)
基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}$ -NO ₃ ⁻ , $\delta^{18}\text{O}$ -NO ₃ ⁻) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪	徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)
三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷	严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算	高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)
Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附	赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为	薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响	江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS	李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮	方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性	张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)
基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策	刘晓蕾, 李安婕 (3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响	刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能	戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝辉, 张瑞良, 何欣昱 (3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移	袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)
四环素胁迫对 <i>Shigella flexneri</i> 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程	高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择	乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响	侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用	宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率	罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响	方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响	邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N ₂ O 排放的影响	周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素	葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力	黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响	蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响	刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响	魏宾斌, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)
螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响	覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测	俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)
《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)	

臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响

方笑堃¹, 罗小三^{1*}, 张丹¹, 吴礼春¹, 邱丹², 陈志伟¹, 赵朕¹

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 农业资源与环境系, 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 江苏省耕地质量与农业环境保护站, 南京 210036)

摘要: 地表臭氧(O_3)浓度升高造成的空气污染是日渐关注的重要环境问题,既直接危害人体健康,也影响农业生态系统,威胁农作物的生长发育和农产品品质,其中矿质金属元素含量由于同时涉及微量营养元素和有害重金属而尤为重要.本研究开展了 O_3 浓度升高处理(维持 $100\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$)的开顶箱(OTC)田间试验,通过2个水稻品种的作物生长监测和采样分析比较,探讨了 O_3 污染对水稻生长、产量及籽粒矿质金属元素含量的影响.结果表明,高浓度 O_3 抑制了南粳5055和扬稻6号两种水稻叶片的光合作用并降低了叶绿素含量和叶面积指数,进而导致稻谷产量下降,与自然空气对照相比分别减产45.5%和28.6%;但收获籽粒的糙米和颖壳中大部分矿质金属元素含量升高,与对照相比增幅分别达3.6%~19.8%和3.9%~36.0%,因而由此导致的微量元素缺乏或重金属污染等相关粮食品质安全影响需要综合评价.

关键词: 大气污染; 臭氧; 农作物; 重金属; 营养元素; 粮食品质安全

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3797-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912268

Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice

FANG Xiao-kun¹, LUO Xiao-san^{1*}, ZHANG Dan¹, WU Li-chun¹, QIU Dan², CHEN Zhi-wei¹, ZHAO Zhen¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Department of Agricultural Resources and Environment, School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. China Jiangsu Farmland Quality and Agricultural Environmental Protection Station, Nanjing 210036, China)

Abstract: The increase in the surface ozone (O_3) concentration causes air pollution, which has become a significant environmental issue that is of increasing concern. Ozone pollution not only directly harms human health, but also influences the agricultural ecosystem by impacting crop growth, which may then indirectly affect human health through food quality and the safety of agricultural products. The effects of O_3 pollution on rice growth, yields, and mineral metal contents in grains were investigated through field experiments with increased O_3 concentration treatment (remaining at $100\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$) in open top chambers (OTC). The crop growth and metal contents of two rice varieties were analyzed and compared. The results showed that the higher O_3 concentration inhibited the photosynthesis of Nanjing 5055 and Yangdao 6 rice leaves, reduced the chlorophyll content and leaf area index, and subsequently led to a decline in the rice yield of 45.5% and 28.6%, respectively. However, compared with the natural control, the contents of most mineral metallic elements in the brown rice and glume of the harvested grains increased by 3.6%-19.8% and 3.9%-36.0%, respectively, thus resulting in a lack of essential trace elements or pollution of heavy metals; hence, the impact of O_3 on rice food quality and safety requires a comprehensive evaluation.

Key words: air pollution; ozone; food crops; toxic heavy metals; essential trace elements; food quality and safety

大气中 O_3 的环境效应因其所处的垂直高度不同而异,平流层的 O_3 (臭氧层)能够吸收太阳辐射的短波紫外线而保护地表生物,但在地表对流层中却是重要的空气污染物,且因其较强的氧化作用危害生物健康.环境空气中的 O_3 主要是由人为排放的氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)等在合适的气象条件下经一系列光化学反应生成的二次污染物^[1-3],在大气环境污染问题中作用日渐突出^[4,5].近年来, O_3 浓度在对流层中呈增加的趋势,年增长率达0.5%,近地层中增速为0.3%~2.0%^[6],按此预计到2050年地表 O_3 平均浓度将比现在高20%~25%,到本世纪末将增加40%~60%^[7].我国 O_3 污染也较为突出^[8],长三角地区对流层日最高

O_3 浓度达 $160\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[9],2015年全国1497个空气质量监测站点的监测数据表明我国地表 O_3 浓度在4~9月生长季12h(08:00~20:00)年均值已远超 O_3 危害阈值($40\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$),最高可达 $70\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[10].因此, O_3 污染的生态环境风险成为亟待重视的问题.

近地层 O_3 浓度升高危害农作物的生长发育^[11]. O_3 作为一种强氧化剂,对不同植物的器官、组织和细胞具有选择性氧化作用,当到达细胞的 O_3

收稿日期: 2019-12-31; 修订日期: 2020-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471418); 江苏省第五期“333工程”人才计划项目

作者简介: 方笑堃(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为气候变化的粮食品质安全影响, E-mail: xiaokun9518@163.com

* 通信作者, E-mail: xsluo@nuist.edu.cn

浓度增加至一定浓度时,可导致作物叶片出现明显可见伤,加快叶片衰老,对细胞壁和细胞膜造成损伤,破坏作物光合系统并降低光合作用^[12],最终导致作物生长期养分积累不足^[13],使其生长发育迟缓,生物量降低^[14],最终导致减产^[15,16],作物的品质也会受到影响^[17].据估算,地表 O₃ 污染对南京市水稻和冬小麦减产率高达 24.3% 和 32.8%,每年造成的经济损失分别高达 6.8 亿元和 2.8 亿元^[18].按照目前 O₃ 浓度上升的速度,预计到 2030 年前后全球主要农作物因 O₃ 导致减产而带来的经济损失将达到 120~350 亿美元^[19].可见,开展 O₃ 污染对农作物的影响研究对农业生产、环境保护和经济发展具有重大意义.

Ca、Mg、Zn、Fe、Mn 和 Cu 等矿质金属元素是影响农作物品质的重要指标之一^[20],这些元素不仅是植物生长发育必须的矿质元素,也是维持人类正常生命和新陈代谢活动的必须元素.目前全球约有 20% 的人口缺乏一种或多种微量营养素^[21],其中 Fe 和 Zn 两种矿质金属元素是人类最容易缺乏的两种元素,据估计全球 40% 的人口缺 Fe, 40% 的人口缺 Zn^[22].同时,Zn、Cu 和 Mn 虽然是人体正常生理过程必不可少的微量元素,但当其含量过高时,就属于有害的重金属污染物,危害人体健康,甚至会引发中毒危及生命^[23].水稻是中国南方、东亚乃至世界上重要的粮食作物,是上述地区人口摄取矿质营养元素的重要食物来源之一,因此稻米的矿质金属元素含量对人体健康有着重要影响.

鉴于以往研究都主要侧重于 O₃ 污染与农作物伤害特征、光合指数、水分关系、物质生产与分配、产量构成以及蛋白质含量、加工品质等因素,鲜有关于 O₃ 污染对作物矿质营养元素或污染物含量影响的研究,故本研究通过 O₃ 浓度升高处理(体积分数 100 nL·L⁻¹)的开顶箱(OTC)田间水稻试验,研究了 O₃ 污染对水稻的生长、产量及收获籽粒矿质金属元素含量的影响,以期 O₃ 污染加剧背景下我国水稻等农作物的优质高产乃至粮食安全提供科学依据和理论基础.

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验于 2018 年 5 月到 2018 年 10 月,在江苏省南京信息工程大学农业气象试验站内(118.70°E, 32.2°N)进行.该站地处亚热带季风性湿润气候区,常年平均气温 15.6℃,水稻季平均气温 23.5℃;常年平均降水量 1 040 mm,水稻季平均降水量 720 mm.土壤类型为潜育型水稻土,灰马肝土属,全氮及

有机碳含量为 1.19 g·kg⁻¹ 和 11.95 g·kg⁻¹,土壤 pH(H₂O) 值为 6.3.

1.2 研究设计

1.2.1 供试作物品种及种植方式

两种供试水稻品种为南粳 5055 和杂交稻扬稻 6 号,均是当地常见的水稻品种.2018 年 5 月 10 日育秧,6 月 10 日移栽至大田,株行距 20 cm×20 cm,10 月 22 日收获.

1.2.2 试验处理

本试验在开顶箱(OTC)中进行,OTC 直径约 3 m,高约 2.5 m,顶部留有直径约 2 m 的开口.6 个 OTC 气室分为 2 种处理,分别是高浓度 O₃ 处理(体积分数 100 nL·L⁻¹)和自然空气对照组,分别以 O₃ 和 CK 来表示,每种处理各 3 个重复,每个 OTC 气室对半分别种植 2 个品种水稻.通过电击式臭氧发生器(WH-H-Y60,南京沃环公司)产生 O₃,通过管道输送入 OTC 内,最终使 OTC 内 O₃ 均匀分布;OTC 内装有 O₃ 浓度传感器,当 O₃ 浓度未达到设定值(100 nL·L⁻¹)时会持续输入,当浓度超过设定值时传感器发出报警使臭氧发生器停止工作,待浓度降至设定值以下时发生器重启,使 OTC 内 O₃ 浓度维持在设定值,从而实现 OTC 内 O₃ 浓度的自动调控.供气时间从水稻移栽后一个月开始至收获结束,每日臭氧通气时段为 09:00~17:00,降水天气关闭臭氧发生器.

1.3 作物生理指标监测

叶绿素含量(SPAD 值):在水稻生长的关键时期(拔节期、抽穗期和灌浆期,下同),每个 OTC 内两个品种的水稻各选取 5 株具有代表性且生长一致的植株,采用便携式 SPAD 测量,每株测量 3 次取平均值.

叶面积指数(LAI 值):在水稻生长的关键时期,每个 OTC 内两个品种的水稻各选取 3 个点使用 LAI-2000 叶面积测量小区内叶面积指数后取平均值.

光合参数:用 LI-6400 便携式光合作用测定系统(LI-COR)测定水稻关键生育时期的净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s).选择红蓝光源叶室,将光合有效辐射(光量子强度)设为 1 200 μmol·(m²·s)⁻¹,每个 OTC 内两个品种的水稻选取生长一致的功能叶测定,进行 3 次以上重复.

产量及产量构成:在水稻收获期,每个 OTC 内两个品种的水稻各收获 0.5 m×0.5 m 范围内所有植株进行考种,分别测定收获植株有效穗数和千粒重等指标.千粒重采用随机选取每个小区的水稻籽粒 500 粒,称其重量,其中每个小区重复 3 次.根据

公式:理论产量 = 穗粒数 × 千粒重 × 0.25 m² 有效穗数计算 0.25 m² 内产量,再换算成亩产.

1.4 植株采样和金属元素含量分析

在水稻收获时采集部分生长一致的稻穗,依次使用自来水和超纯水洗净后在 70 ~ 80℃ 干燥箱内烘干至恒重,脱粒后剥壳获取糙米与颖壳,分别粉碎后贮存备用分析.

植株样品经过浓硝酸和高氯酸电热消解后使用电感耦合等离子体原子发射光谱 (ICP-OES, 美国 PerkinElmer) 测定 Ca、Mg、Zn、Fe、Mn 和 Cu 等矿质金属元素浓度,采用空白、重复和标准样品 (大米 GBW10043) 进行质量控制.

1.5 数据处理

本试验数据使用 Excel2016 处理和作图,使用

SPSS 21.0 进行单因素方差分析,并使用 LSD 法在 $P < 0.05$ 水平下对各处理间的差异进行显著性分析.

2 结果与分析

2.1 O₃ 浓度增高对水稻产量的影响

由表 1 可见,高浓度 O₃ 处理下,两种供试水稻的穗粒数、有效穗数和千粒重分别较对照处理均减少,南梗 5055 各指标降幅达到 20.0%、20.0% 和 15.1%; 扬稻 6 号各指标降幅达到 6.0%、15.6% 和 10.1%. 南梗 5055 的穗粒数和千粒重以及扬稻 6 号的千粒重和产量在高浓度 O₃ 处理与对照间差异达显著水平 ($P < 0.05$). 最终 O₃ 污染导致两个品种的水稻产量较对照组明显下降,降幅分别达到 45.5% 和 28.6%.

表 1 不同 O₃ 浓度对 2 种水稻产量的影响¹⁾

Table 1 Effects of different ozone concentrations on yields of two rice varieties					
水稻品种	处理	有效穗数/个·m ⁻²	千粒重/g	产量/kg·亩 ⁻¹	减产率/%
南梗 5055	CK	110 ± 2a	23.2 ± 0.5a	751	45.5
	O ₃	88 ± 17a	19.7 ± 1.0b	409	
扬稻 6 号	CK	45 ± 9a	27.8 ± 0.7a	563	28.6
	O ₃	38 ± 7a	25.0 ± 0.9b	402	

1) O₃ 处理与对照之间差异显著标记为 b, 否则标记为 a, 下同

2.2 O₃ 浓度增高对水稻叶片叶绿素相对含量 (SPAD) 的影响

由图 1 可见,高浓度 O₃ 使两种供试水稻在拔节期、抽穗期和灌浆期的 SPAD 值较对照均下降,南梗 5055 在 3 个生育期降幅分别达到 2.3%、14.2% 和 14.2%,扬稻 6 号在 3 个生育期降幅分别达到 3.5%、10.7% 和 10.8%. 生长后期的降幅较后期显著,各生育时期内的叶绿素含量在处理间差异性均达到显著水平 ($P < 0.05$).

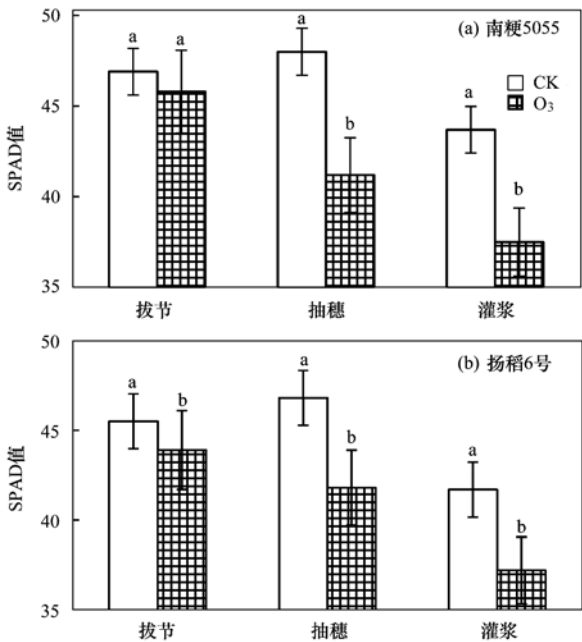
2.3 O₃ 浓度增高对水稻叶面积指数 (LAI 值) 的影响

由图 2 可见,高浓度 O₃ 使两种供试水稻的 LAI 值在各生育期内均下降,南梗 5055 在拔节期、抽穗期和灌浆期较对照分别下降 21.8%、15.3% 和 15.4%,扬稻 6 号 3 个生育期内降幅分别达到 21.8%、14.3% 和 14.3%. 生长前期的降幅较后期显著,各生育时期内的叶绿素含量在处理间差异性均达到显著水平 ($P < 0.05$).

2.4 O₃ 浓度增高对水稻光合作用的影响

由图 3 可见,在高浓度 O₃ 的条件下,南梗 5055 在拔节期、抽穗期和灌浆期的净光合速率 (P_n) 较 CK 分别下降了 24.1%、23.1% 和 46.4%,气孔导度 (G_s) 较 CK 分别减少了 24.6%、16.9% 和 25.6%,各生育时期内处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$).

由图 4 可见,扬稻 6 号在拔节期、抽穗期和灌浆



O₃ 处理与对照之间差异显著标记为 b, 否则标记为 a, 下同

图 1 不同 O₃ 浓度对 2 种水稻叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of different ozone concentrations on the SPAD of two rice varieties

期的净光合速率较 CK 分别下降了 44.1%、54.1% 和 50.9%; 气孔导度较 CK 分别减少了 16.3%、12.9% 和 34.7%,各生育时期内处理间差异均达到显著水平 ($P < 0.05$). 由此可见, O₃ 污染显著降低了两种水稻的光合作用水平.

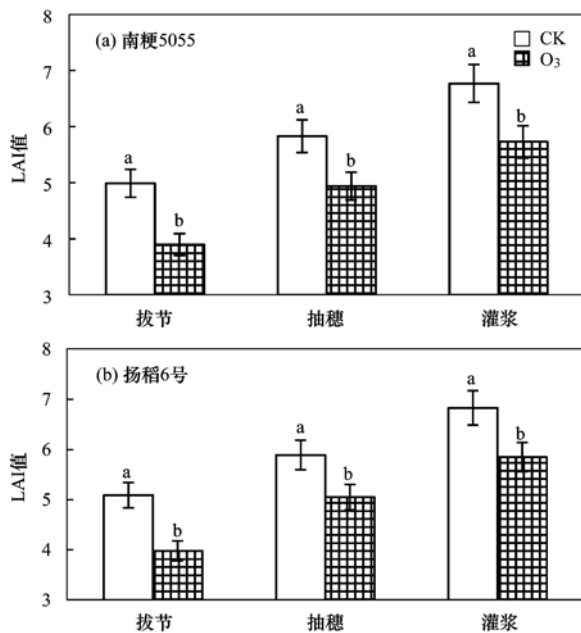
图2 不同 O₃ 浓度对 2 种水稻叶面积指数的影响

Fig. 2 Effects of different ozone concentrations on the LAI of two rice varieties

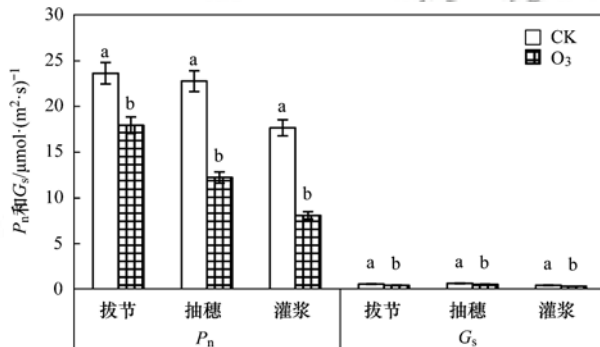
图3 不同 O₃ 浓度对南梗 5055 光合作用的影响

Fig. 3 Effects of different ozone concentrations on the photosynthesis of rice Nanjing 5055

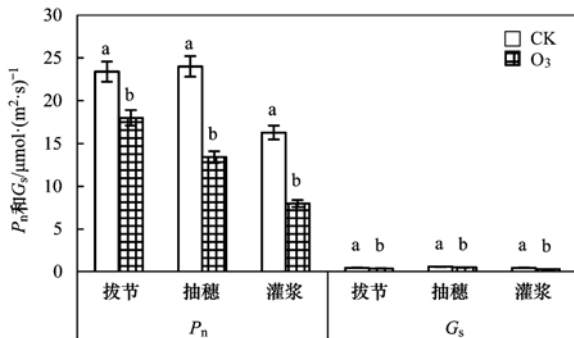
图4 不同 O₃ 浓度对扬稻 6 号光合作用的影响

Fig. 4 Effects of different ozone concentrations on the photosynthesis of rice Yangdao 6

2.5 O₃ 浓度增高对收获水稻籽粒矿质金属元素含量的影响

2.5.1 O₃ 浓度增高对糙米金属元素含量的影响

由图 5 可见,在 O₃ 浓度增加条件下,两种水稻

收获糙米中的大量元素 Ca 含量无明显变化,而 Mg 含量较 CK 分别增加 10.2% 和 6.3%。对于微量营养元素,南梗 5055 和扬稻 6 号糙米中 Zn 含量分别增加了 3.6% 和 7.6%;但南梗 5055 的 Fe 含量降低了 10.0%,而扬稻 6 号则增加了 11.5%。重金属元素方面,两种糙米中 Mn 含量分别增加 9.0% 和 7.7%;Cu 分别增加了 19.8% 和 14.1%,其中南梗 5055 处理间差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。结果表明, O₃ 污染使稻米中大部分金属元素含量略有增加趋势。

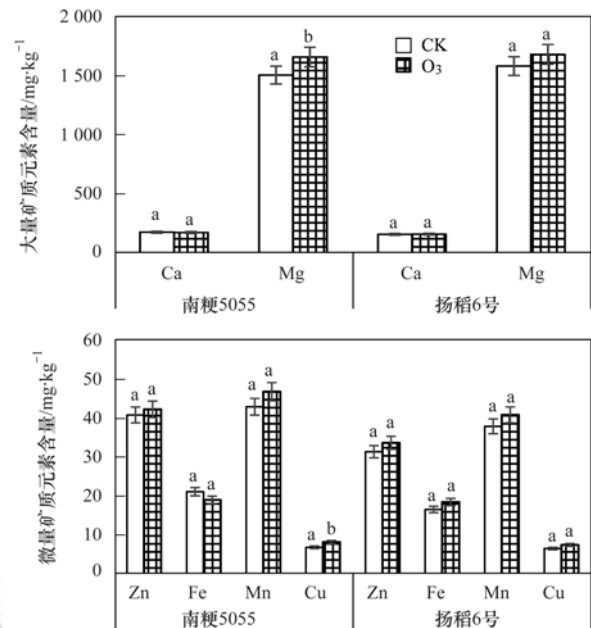
图5 不同 O₃ 浓度对 2 种水稻糙米吸收大量和微量矿质金属元素的影响

Fig. 5 Effects of different ozone concentrations on the major and trace metal contents in two varieties of harvested brown rice

2.5.2 O₃ 浓度增高对收获稻谷颖壳金属元素含量的影响

由图 6 可见,在 O₃ 浓度增加条件下,南梗 5055 颖壳中的 Ca 含量较 CK 增加 9.8%,而扬稻 6 号则降低 10.6%;两种水稻颖壳中的 Mg 含量分别增加了 36.0% 和 10.8%。南梗 5055 颖壳中 Zn 含量无明显变化,扬稻 6 号 Zn 含量则增加 12.3%;两种颖壳中 Fe 含量分别降低 15.3% 和增加 22.6%;Mn 含量分别增加 27.0% 和 3.9%;南梗 5055 颖壳 Cu 含量增加 26.4%,而扬稻 6 号则降低 4.3%,以上处理间差异均未达到显著水平 ($P < 0.05$)。结果表明, O₃ 污染也使水稻颖壳中大部分金属元素含量略有增加趋势。

3 讨论

本研究结果表明,经过高浓度 O₃ 处理的水稻叶片叶绿素含量随着熏气时间的增加较自然对照急剧

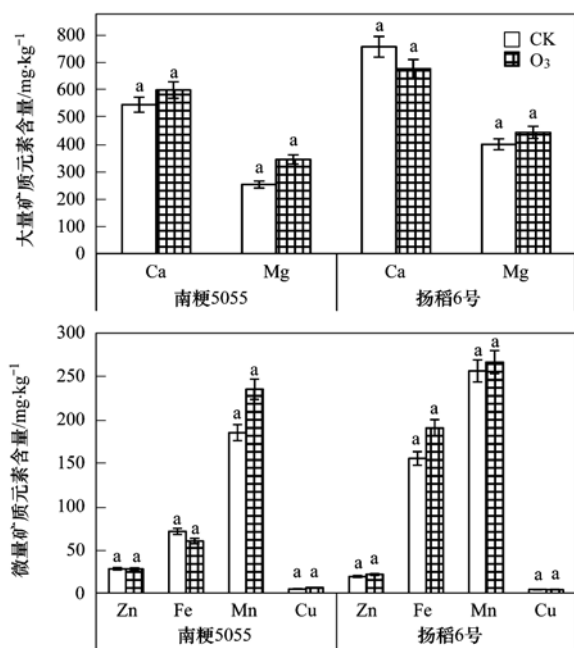


图6 不同O₃浓度对2种水稻颖壳吸收大量和微量矿质金属元素的影响

Fig. 6 Effects of different ozone concentrations on the major and trace metal contents in two varieties of rice husk

下降. 叶绿素是植物光合作用的关键物质^[24], 其含量降低与叶绿体膜系统膜脂过氧化有密切关系, 高浓度的O₃加剧了膜脂过氧化作用, 对水稻的膜系统产生了不可逆的伤害, 使叶片中叶绿素降解从而导致叶绿素含量下降, 影响光合产物的降解与合成. 与此同时, O₃可以通过气孔作用影响水稻的光合作用, 气孔作为O₃进入水稻植株体内的主要通道, 高浓度的O₃降低了植株的气孔导度, 必然导致进入植株的CO₂含量明显减少, 减少了植物光合作用必需的CO₂, 最终使其光合速率下降^[25]. 在本研究中两种水稻在高浓度的臭氧污染下气孔导度和净光合速率均显著下降, 符合预期. 叶片是作物的主要敏感器官之一, 高浓度O₃熏气下, 作物旗叶叶面积指数显著下降, 分蘖数显著降低, 黄叶率显著增加^[26~28]. 本研究印证了这些结果, 而且O₃浓度增加使水稻在各生育期内的叶面积指数较对照处理均不同程度下降, 且生育期后期的降幅较前期显著.

近年来国内外已开展了一些O₃污染对农作物产量影响的研究, 在O₃胁迫条件下作物产量大都呈下降趋势, 但因浓度不同, 减产幅度不同. 例如, 江苏江都FACE平台的试验结果发现, O₃污染使水稻籽粒产量平均下降16%, 其中, 低、中和高种植密度下分别下降24%、14%和10%^[29]; 邵在胜等^[30]利用气体熏蒸平台分析了23种不同敏感类型水稻产量及其构成因子对O₃胁迫的响应, 表明O₃污染使水稻产量构成因子一致下降(特别是饱实率), 导致的

产量损失平均降幅达到30%. 以往研究发现, O₃污染主要通过改变穗部的形态特征以及穗粒数、结实率、千粒重等产量构成要素从而对水稻产量造成损失^[31], 在本试验中, 两种供试水稻的穗粒数、有效穗数、千粒重较对照处理均减少. 本质上, 作物的产量通常与光合作用水平和营养器官生长发育水平直接相关^[32, 33]. 因而在本研究中, 高浓度O₃下两种水稻叶绿素含量降低, 导致其吸收光的能力减弱, 同时气孔导度降低也进一步降低了光合速率, 使光合作用对CO₂利用率降低, 减少了水稻的干物质积累, 最终使两种水稻分别减产45.5%和28.6%.

矿质元素在植株体内物质组成和代谢过程中都发挥着重要的作用, 因此O₃污染也可影响作物吸收矿质元素的能力, 进而影响作物正常的生长发育和产量形成^[34]. 水稻是中国南方、东亚乃至世界上重要的粮食作物, 是上述地区人口摄取矿质营养元素的重要食物来源之一, 因此水稻的矿质金属元素含量对人体健康有着重要影响, 但O₃浓度对农作物矿质元素吸收的影响鲜见报道. 王春雨等^[35]利用OTC在大气环境O₃浓度增加40 nL·L⁻¹的条件下, 大豆籽粒中K和N元素平均含量分别升高了11.0%和37.8%. 张庆等^[23]的研究表明, O₃浓度升高(100 nL·L⁻¹), 使冬小麦收获籽粒各组分的Zn含量较对照增加15%~41%. 在本试验中, O₃污染使水稻籽粒中大部分矿质金属元素含量增加. 有研究表明, 矿质营养元素对叶片光合作用、碳水化合物的代谢、蛋白质和淀粉的合成等生理过程都有直接影响, 因此O₃污染导致的水稻籽粒金属元素含量升高可能是水稻自身对不利环境的一种调节和适应, 如Ca元素可以通过调整并控制基因表达从而提高植物的抗逆境的能力, 也可以通过蛋白或酶的活性调节从而引发有利于植物适应逆境的生理生化反应^[28]. 另一方面, 高浓度的O₃改变了土壤中微量元素的生物有效性, 从而影响了植株对其的吸收作用^[36]. O₃污染导致水稻叶片受损, 降低了其光合作用生产效率, 导致光合产物的积累减少, 同时植株的干物质积累也减少, 而水稻营养元素吸收速率的下降速度可能大于物质积累速率下降速度, 致使水稻籽粒中矿质金属元素含量与质量的比例发生变化, 导致其中大部分矿质金属元素含量增加.

4 结论

大气O₃污染使水稻的有效穗数、穗粒数和千粒重等要素降低, 最终造成水稻减产, 对粮食生产造成了负面效应. 对于作物矿质元素吸收方面, 在O₃浓度增加的情况下, 水稻大部分金属元素含量略呈现

增加趋势,可能是作物抗逆响应。然而,由于金属元素含量也是农产品的重要品质指标,相对于通过食物链导致的人体健康效应,Fe、Zn 等微量必需营养元素缺乏和 Cu、Mn 等有害重金属过量则是一对矛盾体,因此关于 O₃ 对粮食品质的综合影响尚需进一步研究和探索。大气污染关联农业环境,应当综合看待地表 O₃ 浓度升高对水稻等农作物产量和品质的影响,以期在 O₃ 污染背景下找出应对方案,确保粮食的高产、优质和安全。

参考文献:

- [1] Feng Z Z, Hu E Z, Wang X K, *et al.* Ground-level O₃ pollution and its impacts on food crops in China: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **199**: 42-48.
- [2] 王红丽. 上海市大气挥发性有机物化学消耗与臭氧生成的关系[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3159-3167.
- Wang H L. Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the formation of ozone in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3159-3167.
- [3] Tai A P K, Martin M V, Heald C L. Threat to future global food security from climate change and ozone air pollution[J]. *Nature Climate Change*, 2014, **4**(9): 817-821.
- [4] Broberg M C, Feng Z Z, Xin Y, *et al.* Ozone effects on wheat grain quality-A summary [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **197**: 203-213.
- [5] Luo X S, Bing H J, Luo Z X, *et al.* Impacts of atmospheric particulate matter pollution on environmental biogeochemistry of trace metals in soil-plant system: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**: 113138.
- [6] Lu X, Hong J Y, Zhang L, *et al.* Severe Surface ozone pollution in China: a global perspective [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(8): 487-494.
- [7] Chuwah C, van Noije T, van Vuuren D P, *et al.* Global impacts of surface ozone changes on crop yields and land use [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **106**: 11-23.
- [8] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1582-1596.
- [9] 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 等. 2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4976-4982.
- Duan X T, Cao N W, Wang X, *et al.* Characteristics analysis of the surface ozone concentration of China in 2015 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4976-4982.
- [10] 冯兆忠, 李品, 袁相洋, 等. 我国地表臭氧生态环境效应研究进展[J]. *生态学报*, 2018, **38**(5): 1530-1541.
- Feng Z Z, Li P, Yuan X Y, *et al.* Progress in ecological and environmental effects of ground-level O₃ in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(5): 1530-1541.
- [11] Peng J L, Shang B, Xu Y S, *et al.* Ozone exposure- and flux-yield response relationships for maize [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **252**: 1-7.
- [12] 张巍巍, 王光华, 王美玉, 等. 东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1473-1478.
- Zhang W W, Wang G H, Wang M Y, *et al.* Responses of soybean cultivar Dongsheng-1 to different O₃ concentrations in northeast China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1473-1478.
- [13] Zhang W W, Feng Z Z, Wang X K, *et al.* Quantification of ozone exposure- and stomatal uptake-yield response relationships for soybean in Northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 710-720.
- [14] Hu E Z, Gao F, Xin Y, *et al.* Concentration- and flux-based ozone dose-response relationships for five poplar clones grown in North China [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **207**: 21-30.
- [15] 赵辉, 郑有飞, 李硕, 等. 麦田 O₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5315-5325.
- Zhao H, Zheng Y F, Li S, *et al.* Long term variations of ozone concentration of in a winter wheat field and its loss estimate based on dry matter and yield [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5315-5325.
- [16] 王春雨, 谢志煌, 李彦生, 等. 近地表臭氧浓度升高对不同东北品种大豆产量形成及品质的影响[J]. *大豆科学*, 2019, **38**(3): 385-390.
- Wang C Y, Xie Z H, Li Y S, *et al.* Effects of elevated surface O₃ on soybean yield formation and seed quality in different Northeast cultivars [J]. *Soybean Science*, 2019, **38**(3): 385-390.
- [17] Wang Y B, Wei S Y, Sun Y, *et al.* Elevated ozone level affects micronutrients bioavailability in soil and their concentrations in wheat tissues [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2017, **63**(8): 381-387.
- [18] 赵辉, 郑有飞, 魏莉, 等. 南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3418-3425.
- Zhao H, Zheng Y F, Wei L, *et al.* Seasonal variation in surface ozone and its effect on the winter wheat and rice in Nanjing, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3418-3425.
- [19] Yi F J, Feng J A, Wang Y J, *et al.* Influence of surface ozone on crop yield of maize in China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, **19**(2): 578-589.
- [20] 张丹, 罗小三, 赵朕, 等. 太阳辐射降低(遮阴)对小麦产量及矿质金属元素含量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, **47**(10): 75-78.
- Zhang D, Luo X S, Zhao Z, *et al.* Effects of solar radiation reduction (shading) on yield and mineral metals contents in wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, **47**(10): 75-78.
- [21] Luo X S, Zhang D, Hu Z H, *et al.* Effects of elevated carbon dioxide on metal transport in soil-crop system: results from a field rice and wheat experiment [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(11): 3742-3748.
- [22] 赵方杰, 谢婉滢, 汪鹏. 土壤与人体健康 [J]. *土壤学报*, 2020, **57**(1): 1-11.
- Zhao F J, Xie W Y, Wang P. Soil and human health [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(1): 1-11.
- [23] 张庆, 贾一磊, 杨连新, 等. 臭氧浓度升高和叶面施锌对小麦籽粒产量、锌浓度及有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(4): 728-736.
- Zhang Q, Jia Y L, Yang L X, *et al.* Impacts of elevated ozone concentration and foliar zinc application on yield, grain zinc content and bioavailability of wheat [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(4): 728-736.
- [24] 索晨, 罗小三, 赵朕, 等. 大气降尘污染对典型农作物生长发育及重金属含量的影响[J]. *浙江农业学报*, 2019, **31**(6): 938-945.
- Suo C, Luo X S, Zhao Z, *et al.* Effects of atmospheric dust-fall pollution on growth and heavy metal contents of typical crops [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, **31**(6): 938-945.

- [25] Singh P, Agrawal M, Agrawal S B, *et al.* Genotypic differences in utilization of nutrients in wheat under ambient ozone concentrations: growth, biomass and yield [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **199**: 26-33.
- [26] 曹嘉晨, 郑有飞, 赵辉, 等. 地表臭氧浓度升高对冬小麦和大豆生长和产量的影响[J]. *生态毒理学报*, 2017, **12**(2): 129-136.
- Cao J C, Zheng Y F, Zhao H, *et al.* Impact of elevated ozone concentration on growth and yield of winter wheat and soybean [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, **12**(2): 129-136.
- [27] 列淦文, 叶龙华, 薛立. 臭氧胁迫对植物主要生理功能的影响[J]. *生态学报*, 2014, **34**(2): 294-306.
- Lie G W, Ye L H, Xue L. Effects of ozone stress on major plant physiological functions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(2): 294-306.
- [28] Zhang L, Hoshika Y, Carrari E, *et al.* Ozone risk assessment is affected by nutrient availability: evidence from a simulation experiment under free air controlled exposure (FACE) [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **238**: 812-822.
- [29] 彭斌, 赖上坤, 李潘林, 等. 臭氧与栽培密度互作对扬稻 6 号生长发育和产量形成的影响——FACE 研究[J]. *中国水稻科学*, 2014, **28**(4): 401-410.
- Peng B, Lai S K, Li P L, *et al.* Interactive effects of ozone concentration and planting density on growth, development and yield formation of YangDao 6-a FACE study[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, **28**(4): 401-410.
- [30] 邵在胜, 沈士博, 贾一磊, 等. 臭氧胁迫对不同敏感型水稻生长和产量形成的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, **49**(17): 3319-3331.
- Shao Z S, Shen S B, Jia Y L, *et al.* Impact of ozone stress on growth and yield formation of rice genotypes with different ozone sensitivity[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(17): 3319-3331.
- [31] Chen Z, Wang X K, Feng Z Z, *et al.* Effects of elevated ozone on growth and yield of field-grown rice in Yangtze River Delta, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(3): 320-325.
- [32] 程小云, 罗春旺, 刘琪璟, 等. O₃ 胁迫对植物叶片光谱特征和叶绿素含量的影响[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(5): 1-8.
- Cheng X Y, Luo C W, Liu Q J, *et al.* Influence of ozone stress on spectral characteristics and chlorophyll content of woody plant leaves [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(5): 1-8.
- [33] 彭斌, 赖上坤, 李潘林, 等. 开放式空气中臭氧浓度升高对超级稻 II 优 084 生长和产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(2): 217-223.
- Peng B, Lai S K, Li P L, *et al.* Effects of free air ozone enrichment on growth and yield of super rice II-You 084 [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(2): 217-223.
- [34] Mills G, Sharps K, Simpson D, *et al.* Ozone pollution will compromise efforts to increase global wheat production [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(8): 3560-3574.
- [35] 王春雨, 谢志煌, 李彦生, 等. 大气臭氧浓度升高对大豆籽粒 C、N、P 和 K 浓度的影响[J]. *土壤与作物*, 2019, **8**(3): 258-265.
- Wang C Y, Xie Z H, Li Y S, *et al.* Effects of elevated atmospheric O₃ on C, N, P and K concentrations in soybean seeds[J]. *Soils and Crops*, 2019, **8**(3): 258-265.
- [36] 尹微琴, 朱红, 周宇澄, 等. 麦季土壤镉生物有效性对大气臭氧浓度升高的响应[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, **39**(2): 35-42.
- Yin W Q, Zhu H, Zhou Y C, *et al.* Effect of elevated atmospheric ozone concentration on the bioavailability of Cd in soil during the wheat season[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2018, **39**(2): 35-42.

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)