

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

叶面喷施纳米 MnO_2 对水稻富集镉的影响机制

周一敏¹, 黄雅媛¹, 刘晓月², 李冰玉¹, 刘羽翼³, 李卓晴¹, 王薪琪¹, 雷鸣^{1*}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 航天凯天环保科技有限公司, 长沙 410100; 3. 湖南博淼已环境科技有限公司, 长沙 410000)

摘要: 镉(Cd)容易被水稻富集, 从而造成稻米中 Cd 含量超标, 严重威胁人类健康. 锰(Mn)是植物必需元素, 为了探究叶面喷施纳米 MnO_2 对水稻富集 Cd 的影响机制, 本研究在酸性 Cd 污染土壤上进行田间小区试验, 在水稻抽穗早期叶面喷施 0.1%、0.3% 和 0.5% 的纳米 MnO_2 溶液. 结果表明与对照组相比, 叶面喷施不同浓度的纳米 MnO_2 可以有效降低水稻叶、壳和糙米中的 Cd 含量, 增加所有部位的 Mn 含量, 但对水稻的产量影响不大. 叶面喷施纳米 MnO_2 后, 提高了叶片光合作用效果, 抑制了叶片脂质过氧化, 增加了氧化应激酶的含量, 从而缓解 Cd 对水稻的胁迫. 此外, 叶面喷施纳米 MnO_2 增加了水稻根表铁锰胶膜的含量, 强化了铁锰胶膜对 Cd 的吸附/共沉淀作用, 从而限制水稻根系吸收 Cd. 因此, 在水稻抽穗早期叶面喷施纳米 MnO_2 是一种增加糙米中 Mn 含量和减少 Cd 含量的有效措施.

关键词: 水稻; 镉; 富集; 叶面喷施; 纳米 MnO_2

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0932-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202006292

Effect and Mechanism of Foliar Application Nano- MnO_2 on Cadmium Enrichment of Rice

ZHOU Yi-min¹, HUANG Ya-yuan¹, LIU Xiao-yue², LI Bing-yu¹, LIU Yu-yi³, LI Zhuo-qing¹, WANG Xin-qi¹, LEI Ming^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Aerospace Kaitian Environmental Technology Co., Ltd., Changsha 410100, China; 3. Hunan Breath Environment Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: Cadmium (Cd) is easily enriched in rice, resulting in an excessive Cd content in the grain, which seriously threatens human health. Manganese (Mn) is an essential element of plants. In a field experiment on Cd-contaminated acid soils, we investigated the effectiveness and mechanism of Mn in minimizing Cd accumulation in rice via foliar spraying using 0.1%, 0.3%, and 0.5% nano- MnO_2 solutions at an early stage of heading. Compared with a control treatment, foliar spraying effectively reduced the Cd content of rice leaves, husks, and brown rice; increased the Mn content of all rice organs; but had no effect on rice yield. Foliar application of nano- MnO_2 alleviated the plant stress induced by Cd by improving leaf photosynthesis, inhibiting lipid peroxidation, and increasing the content of the oxidative stress protein kinase. In addition, foliar application of nano- MnO_2 limited the absorption of Cd by roots by increasing the content of iron-manganese plaque on the surfaces of rice roots and strengthening its adsorption/co-precipitation of Cd. Therefore, foliar application of nano- MnO_2 during the early stages of rice heading is an effective measure to increase the Mn content and reduce the Cd content of brown rice.

Key words: rice; cadmium; enrichment; foliar spraying; nano- MnO_2

镉(Cd)是一种全球性的剧毒环境污染物,也是我国土壤污染的主要重金属之一,文献[1]显示,我国土壤 Cd 的点位超标率为 7%. 土壤中的 Cd 容易被农作物吸收和富集,然后通过生物富集和生物放大威胁人类健康^[2]. 水稻是富集 Cd 能力最强的谷类作物,能高效富集酸性土壤中的 Cd^[3]. 近年来,由稻米 Cd 污染造成的公众安全事件引起了人们对我国环境污染的关注,如 Cd 大米事件^[4]. 因此,探讨如何降低稻米中 Cd 含量是当前的热点和难点问题,对保障我国食品安全和农业生产具有重要意义.

叶面调控是文献[5]中推荐的重金属修复技术之一,适用于 Cd 污染农田的修复. 与土壤施肥相比,叶面施肥可以避免土壤的物理或化学固定,效果更直接^[6]. 有研究表明,通过叶面喷施硅^[6]、

锌^[7]和锰^[8]等有益元素,可以提高作物抗逆性,抑制作物根系向可食用部位转运 Cd,降低可食用部位 Cd 含量. 近年来,叶面应用型纳米材料在农业和粮食生产中受到了越来越多的关注,粒径较小的纳米肥比常规肥料更容易穿透叶片,被植物迅速、完全地吸收^[9]. 如 Chen 等^[9]的研究表明叶面喷施纳米硅肥可显著降低 Cd 胁迫下水稻糙米中的 Cd 含量.

锰(Mn)是植物生长发育所必需的营养元素,在

收稿日期: 2020-06-30; 修订日期: 2020-08-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800700); 国家自然科学基金项目(41671475)

作者简介: 周一敏(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: 852067708@qq.com

* 通信作者, E-mail: leiming8297@163.com

光合作用、呼吸作用及与蛋白质、碳水化合物合成等相关的酶的活化中起着关键作用^[10]。叶面 Mn 肥被广泛地应用到土壤重金属的修复中,如在受 Cd 污染的土壤生长的水稻上施用硫酸锰、螯合锰和碳酸锰叶面肥能降低糙米中的 Cd 含量^[8, 11]。此外,先前的研究表明向土壤施用纳米 MnO₂ 可以限制土壤中的砷向水稻迁移^[12, 13],但据笔者所知几乎没有研究把纳米 MnO₂ 作叶面阻控剂使用。因此,本研究使用水热法合成纳米 MnO₂ 材料,并制成叶面喷雾在水稻抽穗初期喷施不同浓度的纳米 MnO₂,旨在研究:①纳米 MnO₂ 对水稻生长的影响和 Cd 的分布;②纳米 MnO₂ 减轻 Cd 毒性并减少其在水稻中积累的可能机制。

表 1 水稻种植前和成熟期试验田土壤基本理化性质¹⁾

Table 1 Basic properties of topsoils at the beginning of the experiment and at the maturity stage of rice plants								
项目	pH (水土比 2.5:1)	有机质量 /g·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	Ca /g·kg ⁻¹	Cd /mg·kg ⁻¹	Fe /g·kg ⁻¹	Mn /mg·kg ⁻¹	Zn /mg·kg ⁻¹
水稻种植前	5.18	27.56	26.80	1.46	0.48	18.87	165.27	255.42
水稻成熟期	5.25	29.37	22.51	1.29	0.43	18.52	183.63	233.94

1)表中数据是全部试验小区 12 个土壤样本的平均值

1.2 纳米 MnO₂ 的制备

根据课题组的研究经验,通过水热法制备纳米 MnO₂^[12, 13],实验室制作纳米 MnO₂ 材料的成本约为 1.2 元·g⁻¹。具体操作步骤如下:首先将 0.341 5 g MnSO₄·H₂O 和 0.543 4 g K₂S₂O₈ 加入到 50 mL 50% 的 H₂SO₄ 溶液中,在室温下用磁力搅拌器搅拌 10 min,形成均匀溶液后将溶液转移至 100 mL 的高压反应釜内衬中;然后将高压反应釜置于电热鼓风干燥箱中,在 110℃ 下反应 6 h 后取出,冷却至室温,离心 3 次收集沉淀物质,每次离心后除去上层清液,并用超纯水洗涤产物直至 pH 为 7;最后在真空干燥箱 (DZF-6021,上海飞越仪器有限公司)中 60℃ 干燥 8 h,得到黑色纳米 MnO₂ 粉末备用。分别运用 X 射线衍射 (XRD) 和扫描电子显微镜 (SEM) 对其微观形态和结构进行表征,SEM 图像和 XRD 图谱详见文献[12,13]。

1.3 试验设计

2019 年 7 ~ 11 月,在长沙县北山镇某农田进行田间试验,将农田划分为 4 m×5 m 的小区。在小区四周起垄并用塑料薄膜覆盖,相邻小区间设 30 cm 宽的排水沟以避免各处理间相互影响。水稻种子 (泰优 390) 由航天凯天环保科技有限公司提供,6 月 22 日育种,7 月 24 日移栽。田间管理措施与当地生产中的模式相同,施用化学除草剂处理杂草。

2019 年 9 月中旬,水稻处于抽穗初期。分别称取 2.0、6.0 和 10.0 g 纳米 MnO₂ 粉末溶于 2.0L 含

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点为湖南省长沙市长沙县北山镇石常村代印桥 (E113°08'12",N28°42'68"),属亚热带季风气候区,光热充足,降水充沛,年平均气温为 17.6℃,年平均降雨量约 1 472.9 mm。试验田水稻种植前和成熟期表层土壤基本理化性质如表 1 所示,其中水稻种植前和成熟期土壤总 Cd (分别为 0.48 mg·kg⁻¹、0.43 mg·kg⁻¹) 含量均超出 GB 15618-2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》中酸性土 (pH≤5.5) 的风险筛选值 (0.3 mg·kg⁻¹)。

有 1% Tween 80 的去离子水中,超声振荡 30 min,制成质量分数为 0.1%、0.3% 和 0.5% 的纳米 MnO₂ 悬浊液。在一个无风晴朗的早晨,使用手持喷壶将 3 种浓度的纳米 MnO₂ 悬浊液均匀喷施在水稻叶片上,保证水稻叶片挂满液滴。对照组喷施 2.0L 含有 1% Tween 80 的去离子水。4 种处理重复 3 次且随机分布,共 12 个小区。

1.4 样品采集与分析

1.4.1 水稻叶片叶绿素和光合特征参数的测定

叶绿素和光合参数均在田间现场测定。叶面喷施纳米 MnO₂ 一周后,在每个小区随机挑选 10 片水稻功能叶,使用便携式叶绿素测定仪 (SPAD-502 Plus, Konica Minolta) 测定水稻叶片叶绿素 (SPAD 值),使用便携式植物光合作用测定仪 (Li-6400, Li-Cor Biosciences) 测定水稻叶片净光合作用率 (net photosynthetic rate, P_n)、气孔导度 (stomatal conductance, G_s)、胞间二氧化碳浓度 (intercellular CO₂ concentration, C_i) 和蒸腾速率 (transpiration rate, T_r)。

1.4.2 水稻叶片脂质过氧化和抗氧化应激酶含量的测定

叶面喷施纳米 MnO₂ 一周后,在每个小区随机采集 10 片水稻功能叶,用液氮保存运送到实验室后放入超低温冰箱保存待用。使用分光光度法测定水稻叶片丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量^[14,15],使用紫外分光光度计法测定水稻叶片中的过氧化氢

酶(catalase, CAT)含量^[16],使用比色法测定水稻叶片中过氧化物酶(peroxidase, POD)含量^[17],使用分光光度法测定水稻叶片中超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)的含量^[18].

1.4.3 土壤样品

在水稻种植前和水稻成熟期,每个试验小区按五点取样法采集5个表层土(0 cm ~ 20 cm)混合成一个样品.采集的土壤样品在室内阴凉处风干、去除杂质、用研钵研磨后分别过10、20和100目尼龙筛,保存在塑封袋中备用.土壤基本理化性质参照鲁如坤^[19]的方法测定,土壤pH值采用水土比2.5:1浸提,用pH计(Seven Compact S220, Mettler Toledo)测定;有机质采用高温外热重铬酸钾滴定法测定;阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵交换法测定.土壤样品采用王水-HClO₄湿法消解,消解液采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES iptima 8300, Perkinelmer)测定Ca、Zn、Mn、Cd和Fe含量,用土壤GB 07457进行质控,回收率为88.6%~101.2%,全程做空白试验.

1.4.4 植物样品

在水稻成熟期,每个试验小区按五点采样法采集5苑水稻混合成一个样品,用尼龙网袋装好,再将剩余水稻收割、脱粒及称重.用去离子水洗净水稻样品,将样品分为根、茎、叶和谷粒这4个部分,将谷粒置于室外阳光下晒干,取部分根放入冷冻干燥机(FD-1A-50,北京博医康实验仪器有限公司)冻干备用,其余部位放入电热鼓风干燥箱中,105℃杀青2 h, 60℃烘干至恒重.用砻谷机分离谷壳和糙米,用微型粉碎机将所有水稻部位粉碎后保存备用.

水稻根表铁锰胶膜采用DCB法浸提^[20].植物样品采用HNO₃-HClO₄(体积比4:1)湿法消解,浸提液和消解液采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES iptima 8300, Perkinelmer)测定Ca、Zn、Mn和Fe含量,采用电感耦合等离子体质谱(NexION 300X ICP-MS, Perkinelmer)测定Cd含量,用灌木枝叶GBW 07603和大米GBW 100348进行质控,回收率分别为86.7%~102.4%和89.5%~100.9%,全程做空白试验.

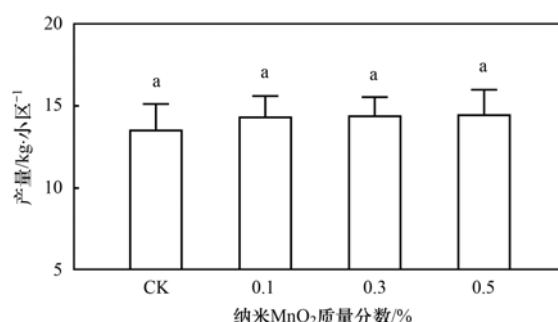
1.5 数据处理

本试验所有数据用Microsoft Excel 2010软件进行数据整理,用SPSS 24.0软件进行统计分析,用GraphPad Prism 8软件作图.使用单因素方差分析和LSD多重比较分析确定不同处理间差异,其中 $P < 0.05$ 表示具有统计学意义.通过双变量相关中的皮尔逊相关得到相关系数.

2 结果与分析

2.1 叶面喷施纳米MnO₂对水稻产量的影响

水稻成熟后收割水稻,现场测定试验小区的谷粒重量.如图1所示,叶面喷施0.1%、0.3%和0.5%浓度的纳米MnO₂后水稻产量分别为(14.40 ± 1.21)、(14.48 ± 1.06)和(14.54 ± 1.45) kg·小区⁻¹,较对照小区产量(13.60 ± 1.52) kg·小区⁻¹分别增加5.8%、6.4%和6.7%,但是增产效果不显著($P > 0.05$),即喷施不同浓度的叶面纳米MnO₂对水稻产量增加差异不显著($P > 0.05$).



图中不同小写字母表示差异达到显著水平($P < 0.05$),下同

图1 试验田水稻产量

Fig. 1 Rice yield in the experimental field

2.2 叶面喷施纳米MnO₂对水稻叶片叶绿素的影响

如图2所示,叶面喷施0.1%、0.3%和0.5%浓度的纳米MnO₂能显著增加水稻叶片中叶绿素含量($P > 0.05$),与CK相比分别增加了7.30%、9.68%和13.07%.随着喷施浓度的增加,水稻叶片叶绿素含量相应升高,0.5%处理显著高于0.1%和0.3%处理.

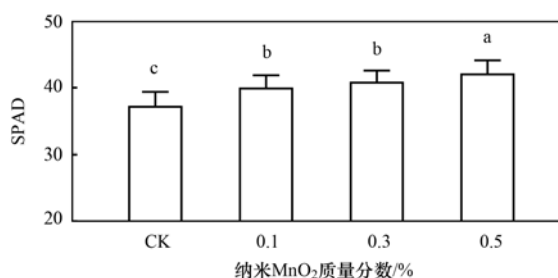


图2 水稻叶片中叶绿素含量

Fig. 2 Chlorophyll content of rice leaves

2.3 叶面喷施纳米MnO₂对水稻光合特征参数的影响

如图3(a)所示,与CK相比,叶面喷施纳米MnO₂对水稻叶片的 P_n 影响不一,均未观察到显著性差异($P > 0.05$),但0.5%处理和0.1%之间存在显著性差异($P < 0.05$).0.1%和0.3%处理能增加水稻叶片的 G_s 、 C_i 和 T_r ,但与CK相比,未观察到显著性差异[$P > 0.05$,图3(b)~3(d)].与CK比,

0.5% 处理能显著增加水稻叶片的 G_s 、 C_i 和 T_r [$P < 0.05$, 图 3(b) ~ 3(d)]. 因此, 叶面喷施纳米 MnO_2 能增加水稻叶片的光合作用, 各处理浓度的效果依次为: 0.5% > 0.3% > 0.1%.

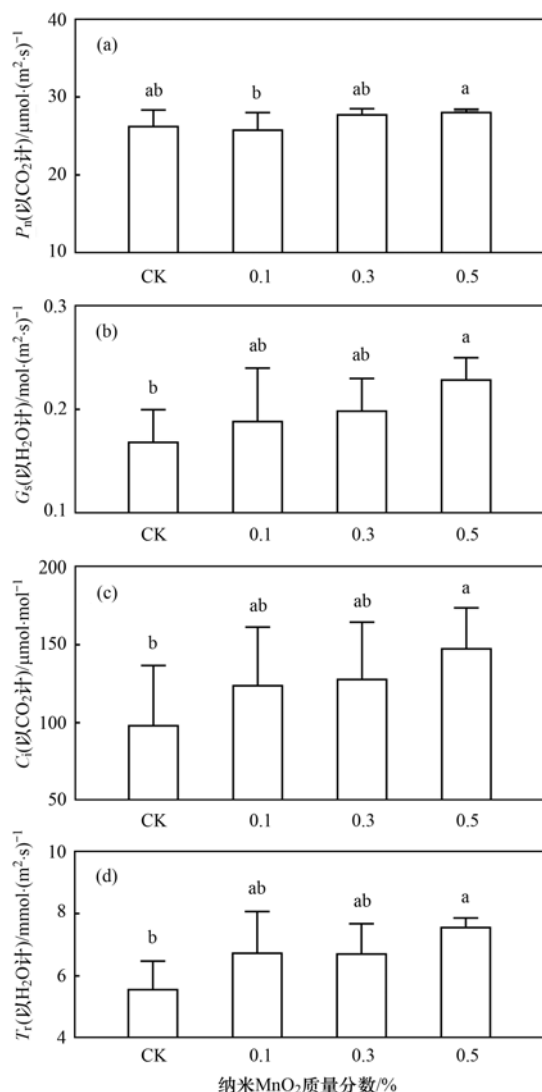


图3 水稻叶片中 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 的含量

Fig. 3 P_n , G_s , C_i , and T_r content of rice leaves

2.4 叶面喷施纳米 MnO_2 对水稻叶片中 MDA、CAT、POD 和 SOD 含量的影响

如图 4(a) 所示, 叶面喷施纳米 MnO_2 后水稻叶片中的 MDA 含量有不同程度降低, 与 CK 相比, 0.3% 和 0.5% 处理后叶片中 MDA 含量显著降低 ($P < 0.05$). 叶面处理能增加水稻叶片中 CAT、POD 和 SOD 的含量, 与 CK 相比, 0.1% 处理水稻叶片中 3 种酶含量均无显著性差异 ($P > 0.05$), 0.3% 处理能显著增加水稻叶片 POD 和 SOD 含量 ($P < 0.05$), 0.5% 处理能显著增加水稻叶片中 3 种酶含量 [$P < 0.05$, 图 4(b) ~ 4(d)]. 综上所述, 叶面喷施纳米 MnO_2 能缓解水稻叶片细胞的脂质过氧化, 提高抗氧化应激酶的含量.

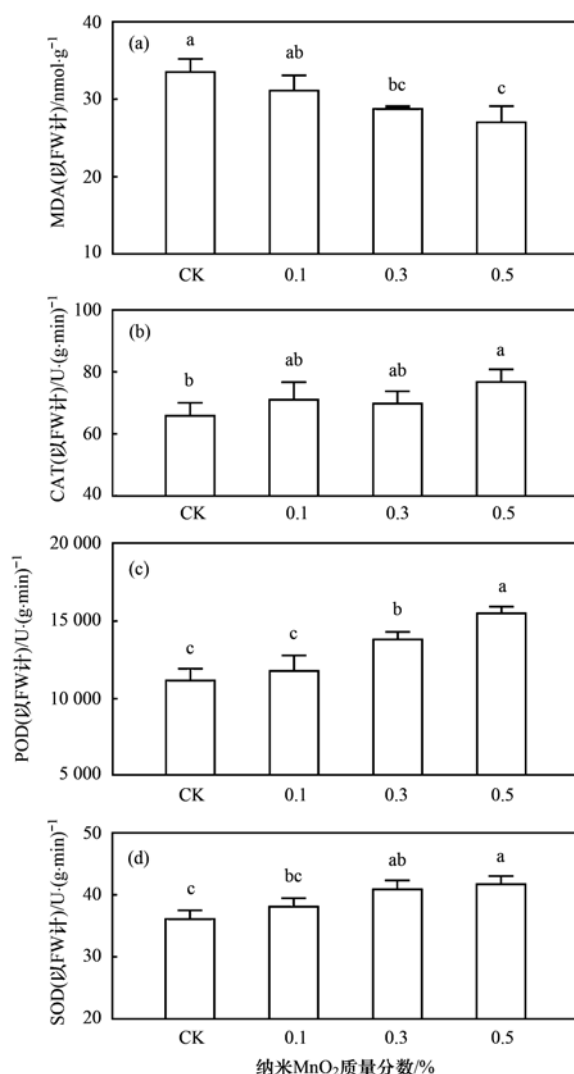


图4 水稻叶片中 MDA、CAT、POD 和 SOD 的含量

Fig. 4 MDA, CAT, POD, and SOD content of rice leaves

2.5 叶面喷施纳米 MnO_2 对水稻不同部位中 Cd 含量的影响

如图 5 所示, Cd 主要富集在水稻根茎部, 不同部位间 Cd 含量差异大, 不同处理下水稻各部位中 Cd 含量分布规律均为: 根 > 茎 > 叶 > 壳 > 米. 不同处理间水稻根、茎中 Cd 含量无显著性差异 ($P >$

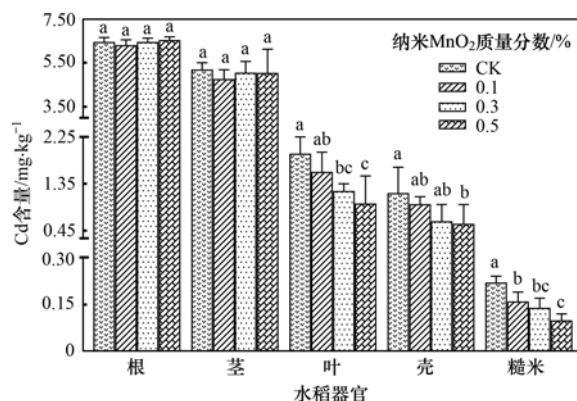


图5 水稻不同部位中 Cd 含量

Fig. 5 Cd content in different parts of rice under different treatments

0.05)。0.1%处理下水稻叶中Cd含量与CK相比差异不显著($P > 0.05$),而0.3%和0.5%处理能显著降低水稻叶中Cd含量($P < 0.05$)。与CK相比,0.1%和0.3%处理下水稻壳中Cd含量无显著性差异($P > 0.05$),而0.5%处理能显著降低水稻壳中Cd含量($P < 0.05$)。0.1%、0.3%和0.5%处理均能显著降低糙米中Cd含量($P < 0.05$),与CK相比,分别降低了27.27%、36.37%和54.55%,0.3%和0.5%处理糙米中Cd含量显著低于0.1%处理($P < 0.05$)。综上所述,叶面喷施纳米 MnO_2 能降低水稻叶、茎和糙米中的Cd含量,不同处理降Cd的效果为:0.5% > 0.3% > 0.1%。

2.6 叶面喷施纳米 MnO_2 对水稻不同部位中营养元素含量的影响

由表2可知,Mn在水稻叶片中含量最高,其次是茎,在稻壳和根中含量相近,糙米中最少。叶面处理能不同程度增加水稻根部的Mn含量,其中0.3%和0.5%处理根部Mn含量与CK相比差异性显著($P < 0.05$),0.5%处理根部Mn含量显著高于0.3%处理($P < 0.05$)。与CK相比,叶面处理均能显著增加水

稻茎、叶中Mn含量($P < 0.05$),其中0.5%处理增Mn效果最好,显著大于0.1%和0.3%处理($P < 0.05$)。叶面处理后稻壳和糙米中Mn含量显著高于CK($P < 0.05$),0.3%和0.5%处理稻壳和糙米中Mn含量显著高于0.1%处理。综上所述,叶面喷施纳米 MnO_2 能增加水稻各部位中Mn含量,不同处理增Mn的效果为:0.5% > 0.3% > 0.1%。

如表2所示,Fe主要富集在水稻根部,不同部位间Fe含量差异大,不同处理下水稻各部位中Fe含量分布规律均为:根 > 茎 > 叶 > 壳 > 米。与CK相比,叶面喷施纳米 MnO_2 能显著增加水稻根中Fe含量($P < 0.05$),对水稻茎和壳中Fe含量影响不大($P < 0.05$)。叶面处理降低了水稻叶和糙米中的Fe含量,与CK相比,0.1%处理显著降低了糙米中Fe含量($P < 0.05$),0.3%和0.5%处理显著降低了水稻叶和糙米中的Fe含量($P < 0.05$)。

由表2可知,叶面喷施纳米 MnO_2 对水稻各部位中Ca含量以及根、茎、稻壳和糙米中Zn含量影响不大($P > 0.05$)。与CK相比,0.3%和0.5%处理能显著降低水稻叶中Zn含量($P < 0.05$)。

表2 水稻不同部位中各元素含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Content of metal elements in different parts of rice/mg·kg⁻¹

水稻器官	处理水平	Mn	Fe	Ca	Zn
根	CK	343.40 ± 58.94c	25 971.14 ± 254.65c	1 641.86 ± 136.16a	270.57 ± 14.98a
	0.1%	428.02 ± 78.21bc	27 182.73 ± 333.68b	1 693.28 ± 75.41a	249.08 ± 10.45a
	0.3%	506.98 ± 74.52b	27 817.20 ± 524.72b	1 719.32 ± 60.15a	268.07 ± 22.28a
	0.5%	649.97 ± 22.65a	29 465.95 ± 1 046.38a	1 739.89 ± 39.30a	265.23 ± 27.76a
茎	CK	947.66 ± 27.38c	712.28 ± 8.29a	1 631.12 ± 17.17a	176.22 ± 33.42a
	0.1%	1 579.95 ± 51.35b	723.52 ± 52.42a	1 621.62 ± 62.44a	166.49 ± 32.52a
	0.3%	1 641.67 ± 32.91b	719.7 ± 39.10a	1 616.31 ± 70.53a	151.88 ± 23.99a
	0.5%	1 718.89 ± 56.14a	705.58 ± 28.59a	1 671.10 ± 30.08a	148.71 ± 10.08a
叶	CK	4 755.11 ± 339.12c	478.2 ± 21.92a	1 467.49 ± 259.19a	81.82 ± 3.72a
	0.1%	6 970.38 ± 279.99b	465.35 ± 15.3a	1 449.41 ± 250.62a	77.80 ± 6.01ab
	0.3%	7 376.72 ± 417.54b	439.38 ± 9.09b	1 523.90 ± 358.45a	75.18 ± 1.60b
	0.5%	8 744.01 ± 138.90a	379.56 ± 11.27c	1 482.18 ± 98.46a	75.42 ± 2.64b
壳	CK	594.32 ± 69.82c	185.24 ± 28.85a	1 273.07 ± 316.52a	72.55 ± 10.11a
	0.1%	707.44 ± 45.33b	174.16 ± 24.58a	1 383.75 ± 57.30a	75.45 ± 3.50a
	0.3%	759.95 ± 77.92ab	167.32 ± 23.89a	1 361.69 ± 487.81a	74.71 ± 14.37a
	0.5%	805.91 ± 73.45a	147.94 ± 26.35a	1 387.59 ± 80.41a	79.25 ± 6.27a
糙米	CK	43.29 ± 3.14c	84.77 ± 2.97a	240.47 ± 12.19a	36.55 ± 2.77a
	0.1%	47.73 ± 1.74b	76.85 ± 3.78b	242.01 ± 5.38a	34.13 ± 2.81a
	0.3%	51.16 ± 1.59ab	74.63 ± 1.12b	250.67 ± 9.49a	35.35 ± 0.86a
	0.5%	55.40 ± 3.58a	65.04 ± 2.38c	250.14 ± 9.35a	34.80 ± 2.43a

1) 同列中不同小写字母表示组内差异达到显著水平($P < 0.05$), $n = 3$

2.7 叶面喷施纳米 MnO_2 对水稻根表铁锰胶膜中各元素含量的影响

本研究用DCB法提取根表铁锰胶膜,测定浸提液中Cd、Mn、Fe、Ca和Zn的含量(表3)。与CK相比,叶面喷施纳米 MnO_2 后根表铁锰胶膜的Cd和

Mn的含量显著增加($P < 0.05$),且随喷施浓度的增加呈现出显著性差异($P < 0.05$)。叶面处理后根表铁锰胶膜中铁含量略有增加($P > 0.05$)。与CK相比,0.3%和0.5%处理能显著提高根表铁锰胶膜中Ca和Zn的含量($P < 0.05$)。

表 3 水稻根表铁锰胶膜中各元素含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 3 Content of metal elements in iron-manganese plaque on the surfaces of rice plant roots/mg·kg⁻¹

处理水平	Cd	Mn	Fe	Ca	Zn
CK	0.78 ± 0.06d	307.82 ± 21.7d	25 175.34 ± 1 470.53a	1 115.76 ± 66.48b	163.99 ± 14.08a
0.1%	1.01 ± 0.13c	345.48 ± 17.9c	26 646.97 ± 2 007.41a	1 122.43 ± 27.32b	146.62 ± 12.83b
0.3%	1.22 ± 0.1b	402.93 ± 21.82b	27 283.06 ± 2 249.31a	1 228.44 ± 93.41a	166.39 ± 8.5a
0.5%	1.45 ± 0.1a	566.64 ± 23.09a	28 587.44 ± 4 753.43a	1 279.27 ± 23.57a	168.33 ± 8.73a

1) 同列中不同小写字母表示组内差异达到显著水平 ($P < 0.05$), $n = 3$

2.8 水稻不同部位 Cd 含量与其它元素含量的相关系数

水稻不同部位中 Cd 含量与被测元素 (Mn、Fe、Ca 和 Zn) 含量之间的相关系数不同 (表 4)。水稻根中 Cd 含量与其他元素无显著相关性 ($P > 0.05$)，Mn 含量与 Fe 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，Mn 含量与 Ca 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。水稻茎中各元素之间无显著相关性 ($P > 0.05$)。水稻叶中 Cd 含量与 Mn 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，与 Fe 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，Mn 含量与 Fe 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，与 Zn 含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)，Fe 含量与 Zn 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。稻壳中 Cd 含量与 Fe 含量呈极显著

正相关 ($P < 0.05$)。糙米中 Cd 含量与 Mn 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，与 Fe 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，Mn 含量与 Fe 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

3 讨论

叶面喷施 Mn 肥对作物产量的影响不一。有研究表明在缺 Mn 或低 Mn 活性的生长环境中，叶面喷施 Mn 肥可以促进作物生长。如丁华萍等^[21]在有效 Mn 含量为 4.34 mg·kg⁻¹ 的土壤上，往初花期花生叶面喷施 0.2% 的 MnSO₄，显著提高了花生的鲜重 ($P < 0.05$)。然而，在 Mn 充足或高 Mn 活性土壤中，叶面施 Mn 并不能显著提高作物产量^[22,23]。本研究表明，不同浓度纳米 MnO₂ 的叶面施用对水稻的产量影响不显著 ($P < 0.05$, 图 1)，这可能是由于试验土壤中的 Mn 含量远高于酸性土壤缺锰的临界值 (10 mg·kg⁻¹)，因此叶面喷施纳米 MnO₂ 对水稻产量没有显著影响。

在本研究中，叶面喷施纳米 MnO₂ 降低了水稻叶、壳和糙米中的 Cd 含量，对水稻根和茎影响不大 (图 4)。彭鸥等^[24]的研究表明，水稻 (湘晚籼 13 号) 不同生育期镉积累速率依次为：分蘖期 ≈ 乳熟期 > 抽穗期 > 孕穗期 > 灌浆期。因此可能是在水稻生长前期 (分蘖期和抽穗期) 根和茎中富集了较多的 Cd，造成了叶面喷施纳米 MnO₂ 后水稻根和茎中 Cd 含量变化不大。叶面施用纳米 MnO₂ 后水稻叶、壳和糙米中 Cd 含量下降的原因可部分归因于水稻这些部位中 Mn 浓度的增加 (表 2)，因为两种金属的拮抗效应^[25]，水稻叶片 Mn 的增加可能抑制了 Cd 从水稻根茎向叶的转移。作为一种非必需金属元素，至今未发现 Cd 在水稻中有专属的转运体^[26]，Cd 通常通过 Ca、Fe、Mn 和 Zn 等必需阳离子的传输系统来吸收和转运^[25]。许多转运体通常能运输一种以上的金属离子，如 OsYSL2 可以运输 Mn 和 Fe^[27]，OsNRAMP1 可以运输 Fe 和 Cd^[28]，OsZNT1 可以运输 Zn 和 Cd^[29]。因此，这些金属会相互竞争转运体上的金属结合位点，一种金属的大量存在会干扰其他金属的吸收。在这种情况下，水稻地上部分

表 4 水稻不同部位 Cd、Mn、Fe、Ca 和 Zn 含量的相关系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficients between the Cd, Mn, Fe, Ca, and Zn content of different parts of rice plants

水稻器官	元素	Cd	Mn	Fe	Ca	Zn
根	Cd	1	-0.021	0.147	-0.478	0.350
	Mn		1	0.804 **	0.597 *	-0.043
	Fe			1	0.370	-0.232
	Ca				1	-0.050
	Zn					1
茎	Cd	1	-0.208	-0.267	-0.069	-0.174
	Mn		1	0.003	0.096	-0.371
	Fe			1	0.281	-0.081
	Ca				1	-0.487
	Zn					1
叶	Cd	1	-0.718 **	0.691 **	0.025	0.449
	Mn		1	-0.822 **	0.120	-0.567 *
	Fe			1	-0.087	0.498 *
	Ca				1	-0.035
	Zn					1
壳	Cd	1	-0.010	0.683 **	0.293	0.297
	Mn		1	-0.106	0.353	-0.133
	Fe			1	-0.028	-0.039
	Ca				1	0.208
	Zn					1
糙米	Cd	1	-0.761 **	0.826 **	-0.405	0.248
	Mn		1	-0.900 **	0.277	-0.231
	Fe			1	-0.298	0.356
	Ca				1	0.166
	Zn					1

1) ** 表示在 0.01 级别 (双尾) 相关性显著, * 表示在 0.05 级别 (双尾) 相关性显著; $n = 12$

中 Mn 与 Cd、Fe 和 Zn 的吸收和积累呈负相关也就不足为奇了(表 4)。徐菽等^[26]的研究也发现水稻细胞壁和细胞液组分中的 Cd 与 Mn 呈负相关,随着外源 Mn 的添加,水稻根系吸收 Cd 的量减少。由于水稻可以通过相同的转运体吸收和转运 Cd 和 Mn,如 OsNramp5^[30]。假设提高水稻叶片的 Mn 含量可以抑制水稻体内 Mn 转运体的表达,减少 Cd 的非特异性吸收和转运,事实证明,随着叶面喷施纳米 MnO_2 的浓度增加,水稻地上各部位的 Cd 含量降低(图 5),Cd 和 Mn 含量呈负相关(表 4)。因此,Mn 一方面与 Cd 竞争转运蛋白上的结合位点,抑制 Cd 的跨膜转运,另一方面能够调控这些转运蛋白基因的表达与合成。

叶面喷施纳米 MnO_2 后,水稻不同部位的 Mn 含量大幅上升(表 2)。一方面由于叶面喷施的纳米 MnO_2 通过叶片角质层或者气孔进入水稻叶,随后通过韧皮部和木质部向其他部位转运^[31];另外一方面,在喷施过程中,可能有部分纳米 MnO_2 滴落到土壤中,造成土壤中 Mn 含量的增加(表 1)。

高等植物的光合作用等生理过程对 Cd 非常敏感,以前的研究表明,低 Cd 浓度显著抑制水稻的生长和光合作用^[32]。Cd 对水稻的毒性体现在破坏光合器官,降低叶绿素含量,抑制气孔开放等方面^[2]。在 Cd 胁迫下,水稻的叶绿素(叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素)和光合特征参数(P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r)降低^[33]。本研究中,水稻叶片中 Cd 含量与叶片光合特征参数 P_n 、 G_s 、 C_i 和 T_r 呈负相关,这与之前报道的 Cd 抑制植物光合作用的研究一致^[32]。Mn 是植物细胞中维持叶绿体结构的关键元素之一,在植物光合作用中也起着关键作用,包括与光系统 II 相关的水分解系统、ATP 合成、RuBP 羧化酶反应以及脂肪酸、酰基脂质和蛋白质的生物合成^[8,34]。有研究表明,叶面喷施 Mn 肥能提高小麦^[22]和生菜^[23]叶片的叶绿素含量及光合作用能力。在本研究中,叶面喷施不同浓度的纳米 MnO_2 显著提高了水稻叶片的叶绿素含量($P < 0.05$,图 2),改善了叶片的光合作用能力(图 3)。因此,叶面喷施纳米 MnO_2 可能通过缓解 Cd 对水稻光合作用的抑制,提高叶片光合作用效果,从而缓解 Cd 胁迫。

水稻叶面喷施纳米 MnO_2 减轻 Cd 毒性的另一保护机制是通过消除 Cd 引起的自由基诱导的损伤。Chien 等^[35]的研究指出,Cd 对水稻叶片的毒性是通过脂质过氧化作用介导的。MDA 是脂质过氧化的产物,通常被认为是细胞氧化受损的重要指标。Cd 胁迫下,水稻幼苗中 MDA 含量升高^[35]。有研究表明,Mn 降低了植物细胞质膜的渗透性和膜脂的过

氧化,有助于保持细胞膜的完整性、稳定性和功能^[36]。本试验中,叶面喷施 MnO_2 后降低了水稻叶片中 MDA 的积累[图 4(a)],表明 Mn 在 Cd 诱导的脂质过氧化中具有保护作用。过量的活性氧积累会导致细胞氧化还原失衡和信号传导过程的紊乱,从而导致生长抑制和细胞损伤^[37]。CAT、POD 和 SOD 是植物体内重要的抗氧化酶,CAT 和 POD 参与细胞中 H_2O_2 分解的酶,SOD 活性的变化被用来指示超氧化物产量变化。研究表明,Mn 在植物抗氧化防御系统中起着重要的辅助作用,如 Mn-CAT 和 Mn-SOD^[38]。在本试验中,叶面喷施 MnO_2 后提高了 CAT、POD、SOD 的含量[图 4(b)~4(d)],因此,水稻叶片中较高水平的抗氧化酶活性可以清除 Cd 诱导的过量活性氧,避免氧化损伤。

由于水稻生长在特殊的淹水环境,其根系释放的氧气和氧化剂会把周围的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 离子氧化为铁锰氧化(氢氧化)沉淀物,在根部形成一层铁锰胶膜^[19]。以往的研究表明,铁锰胶膜对痕量金属有很强的亲和力,可以通过吸附或共沉淀作用,限制了根系对许多重金属的吸收^[39]。在本试验中,叶面喷施纳米 MnO_2 显著增加了根表铁锰胶膜中 Mn 含量($P < 0.05$),对 Fe 的含量影响不显著($P > 0.05$,表 3),这与董明芳等^[40]的报道一致。他们采用水培试验,发现了添加 Mn^{2+} 能增加水稻根表铁锰胶膜中 Mn 的含量,抑制 Cd 向地上部分的运输。尽管在根表铁锰胶膜中 Mn 的含量远远小于 Fe(表 3),但是由于锰膜比铁膜具有更大的表面活性和催化能力,因此,锰膜在对某些金属的吸附和富集中发挥了重要的作用^[41]。在本研究中,叶面喷施纳米 MnO_2 后根表铁锰胶膜中的 Cd 含量显著升高(表 3),而且根表铁膜中 Cd 含量与 Fe 和 Mn 的含量呈显著正相关($P < 0.05$),表明铁锰胶膜能固定 Cd,限制 Cd 往根部转移。因此,叶面喷施纳米 MnO_2 可以通过增加根表铁锰胶膜的含量及其对 Cd 的吸附/共沉淀作用限制水稻根系吸收 Cd。

纳米材料具有表面效应、量子尺寸效应、小尺寸效应和宏观量子隧道效应等独特的物理化学特性,更容易与有机体作用而产生细胞或组织损伤,因此也引起了人们对纳米材料的生物效应、环境和生物健康的影响问题的探讨^[42~44]。纳米材料对植物的毒性效应可能是植物和纳米颗粒自身理化特性(尺寸、化学成分、表面功能)综合影响的结果^[42,43]。杨新萍等^[44]指出,不是所有用纳米物质处理的植物都会表现出毒性效应,而是植物可能会产生积极影响或者没有显著毒性效应。本试验中,在水稻抽穗前期叶面喷施不同浓度的纳米 MnO_2 后,降低了水稻

叶片中 MDA 的积累,提高了 CAT、POD 和 SOD 的含量(图 4),并且叶面处理后各小区水稻产量有所增加($P>0.05$,图 1)。这些证据表明,在本试验中叶面喷施纳米 MnO_2 在微观和宏观层面上均未对试验水稻产生毒性效应。这可能是由于试验所用的纳米 MnO_2 的粒径较大(图 2),易造成生物毒性的物理化学特性不明显;此外,施用纳米 MnO_2 时水稻处于抽穗期,生物量较大,生长活动比较旺盛,所以叶面喷施纳米 MnO_2 未对试验水稻产生毒性效应。但是不排除更大剂量,其他施用时间或者其他水稻品种叶面喷施纳米 MnO_2 会产生毒性效应,这值得继续研究。

4 结论

(1)本研究结果表明抽穗期叶面喷施不同浓度的纳米 MnO_2 能使水稻叶、壳和糙米中的 Cd 含量降低,所有部位的 Mn 含量升高。

(2)叶面喷施纳米 MnO_2 为水稻提供了大量的 Mn 源,Mn 一方面与 Cd 竞争转运蛋白上的结合位点,抑制 Cd 的跨膜转运,另一方面能够调控这些转运蛋白基因的表达与合成。

(3)叶面喷施纳米 MnO_2 可能通过缓解 Cd 对水稻叶片光合作用的抑制和叶片脂质过氧化,提高叶片光合作用效果和叶片氧化应激酶含量,清除叶片中 Cd 诱导的过量自由基,从而缓解 Cd 胁迫。

(4)叶面喷施纳米 MnO_2 可以通过增加根表铁锰胶膜的含量及其对 Cd 的吸附/共沉淀作用限制水稻根系吸收 Cd。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [2] Rizwan M, Ali S, Adrees M, et al. Cadmium stress in rice: toxic effects, tolerance mechanisms, and management: a critical review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(18): 17859-17879.
- [3] 王学华,戴力. 作物根系镉滞留作用及其生理生化机制[J]. 中国农业科学, 2016, **49**(22): 4323-4341.
Wang X H, Dai L. Immobilization effect and its physiology and biochemical mechanism of the cadmium in crop roots[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, **49**(22): 4323-4341.
- [4] 雷鸣,曾敏,王利红,等. 湖南市场和污染区稻米中 As、Pb、Cd 污染及其健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2314-2320.
Lei M, Zeng M, Wang L H, et al. Arsenic, lead, and cadmium pollution in rice from Hunan markets and contaminated areas and their health risk assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(11): 2314-2320.
- [5] 农业农村部. 轻中度污染耕地安全利用与治理修复推荐技术名录(2019 年版)[EB/OL]. http://nynct.guizhou.gov.cn/zwgk/xxgkml/zdlyxx/nzccqk/201907/t20190710_25814041.html, 2019-04-26.
- [6] Liu C P, Li F B, Luo C L, et al. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161**(2-3): 1466-1472.
- [7] Wang H, Xu C, Luo Z C, et al. Foliar application of Zn can reduce Cd concentrations in rice (*Oryza sativa* L.) under field conditions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(29): 29287-29294.
- [8] 韩潇潇. 锌和锰对水稻镉吸收转运特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. 20-22.
- [9] Chen R, Zhang C B, Zhao Y L, Huang Y, et al. Foliar application with nano-silicon reduced cadmium accumulation in grains by inhibiting cadmium translocation in rice plants[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(3): 2361-2368.
- [10] Lidon F C, Barreiro M G, Ramalho J C. Manganese accumulation in rice: implications for photosynthetic functioning[J]. Journal of Plant Physiology, 2004, **161**(11): 1235-1244.
- [11] 尹晓辉,邹慧玲,方雅瑜,等. 施锰方式对水稻吸收积累镉的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(8): 8-12,42.
Yin X H, Zou H L, Fang Y Y, et al. Effects of manganese fertilizer on absorption and accumulation of Cd in rice[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(8): 8-12,42.
- [12] 周爽,彭亮,雷鸣,等. 纳米级二氧化锰材料阻控土壤镉向水稻迁移的研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(3): 855-861.
Zhou S, Peng L, Lei M, et al. Control of As soil-to-rice transfer (*Oryza sativa* L.) with nano-manganese dioxide[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(3): 855-861.
- [13] Li B Y, Zhou S, Wei D N, et al. Mitigating arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) from typical arsenic contaminated paddy soil of southern China using nanostructured $\alpha\text{-MnO}_2$: pot experiment and field application[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 546-556.
- [14] 赵世杰,许长成,邹琦,等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994, **30**(3): 207-210.
Zhao S J, Xu C C, Zou Q, et al. Improvements of method for measurement of malondialdehyde in plant tissues[J]. Plant Physiology Communications, 1994, **30**(3): 207-210.
- [15] GB 5009.181-2016, 食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定[S].
- [16] GB/T 23195-2008, 蜂花粉中过氧化氢酶的测定方法 紫外分光光度法[S].
- [17] GB/T 32131-2015, 辣根过氧化物酶活性检测方法 比色法[S].
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 267-268.
- [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, 1999.
- [20] 胡莹,黄益宗,黄艳超,等. 根表铁锰膜对不同生育期水稻吸收和转运 As 的影响[J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(2): 163-171.
Hu Y, Huang Y Z, Huang Y C, et al. Influence of iron and manganese plaque on root surface on arsenic uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) at different growth stages[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, **8**(2): 163-171.
- [21] 丁华萍,陈斌,陈兴惠,等. 花生缺锰症及锰肥喷施效果初报[J]. 花生学报, 2005, **34**(1): 33-36.
Ding H P, Chen B, Chen X H, et al. A preliminary study on Mn-deficiency of peanut and the effect of foliar application of MnSO_4 [J]. Journal of Peanut Science, 2005, **34**(1): 33-36.

- [22] 裴雪霞, 王姣爱, 党建友, 等. 后期喷肥对强筋小麦临汾138产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2005, **25**(6): 148-149.
- Pei X X, Wang J A, Dang J Y, *et al.* Effect of spraying fertilizers on yield and quality of high gluten wheat-Linfen 138 [J]. Journal of Triticeae Crops, 2005, **25**(6): 148-149.
- [23] 李光远, 王凤华, 蒋燕. 叶面喷施锰对生菜生长和品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2015, **43**(3): 54-57.
- Li G Y, Wang F H, Jiang Y. Effects of foliage spraying Mn on growth and quality of lettuce[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, **43**(3): 54-57.
- [24] 彭鸥, 铁柏清, 叶长城, 等. 稻米镉关键积累时期研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, **34**(3): 272-279.
- Peng O, Tie B Q, Ye C C, *et al.* The key period of cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, **34**(3): 272-279.
- [25] Sarwar N, Saifullah, Malhi S S, *et al.* Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, **90**(6): 925-937.
- [26] 徐菽, 杨益新, 李文华, 等. 锰离子浓度及其转运通道对水稻幼苗镉吸收转运特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(8): 1429-1435.
- Xu Y, Yang Y X, Li W H, *et al.* Effects of manganese concentrations and transporters on uptake and translocation of cadmium in rice [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(8): 1429-1435.
- [27] Ishimaru Y, Masuda H, Bashir K, *et al.* Rice metal-nicotianamine transporter, OsYSL2, is required for the long-distance transport of iron and manganese[J]. The Plant Journal, 2010, **62**(3): 379-390.
- [28] Takahashi R, Ishimaru Y, Senoura T, *et al.* The OsNRAMP1 iron transporter is involved in Cd accumulation in rice [J]. Journal of Experimental Botany, 2011, **62**(14): 4843-4850.
- [29] Ramesh S A, Shin R, Eide D J, *et al.* Differential metal selectivity and gene expression of two zinc transporters from rice [J]. Plant Physiology, 2003, **133**(1): 126-134.
- [30] Sasaki A, Yamaji N, Yokosho K, *et al.* Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice [J]. Plant Cell, 2012, **24**(5): 2155-2167.
- [31] Shahid M, Dumat C, Khalid S, *et al.* Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: a comparison of foliar and root metal uptake[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **325**: 36-38.
- [32] Cao F B, Cai Y, Liu L, *et al.* Differences in photosynthesis, yield and grain cadmium accumulation as affected by exogenous cadmium and glutathione in the two rice genotypes [J]. Plant Growth Regulation, 2015, **75**(3): 715-723.
- [33] 滕振宁, 方宝华, 刘洋, 等. 镉对不同品种水稻光合作用的影响[J]. 中国农业气象, 2016, **37**(5): 538-544.
- Teng Z N, Fang B H, Liu Y, *et al.* Effects of Cd on photosynthesis of different rice varieties [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, **37**(5): 538-544.
- [34] 杨中宝, 尤江峰, 杨振明. 植物对锰的吸收运输及对过量锰的抗氧化响应[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2007, **33**(6): 480-488.
- Yang Z B, You J F, Yang Z M. Manganese uptake and transportation as well as antioxidant response to excess manganese in Plants [J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2007, **33**(6): 480-488.
- [35] Chien H F, Wang J W, Lin C C, *et al.* Cadmium toxicity of rice leaves is mediated through lipid peroxidation [J]. Plant Growth Regulation, 2001, **33**(3): 205-213.
- [36] Ducic T, Polle A. Transport and detoxification of manganese and copper in plants [J]. Brazilian Journal of Plant Physiology, 2005, **17**(1): 103-112.
- [37] Sharma S S, Dietz K J. The relationship between metal toxicity and cellular redox imbalance [J]. Trends in Plant Science, 2009, **14**(1): 43-50.
- [38] Rahman A, Nahar K, Hasanuzzaman M, *et al.* Manganese-induced cadmium stress tolerance in rice seedlings: coordinated action of antioxidant defense, glyoxalase system and nutrient homeostasis [J]. Comptes Rendus Biologies, 2016, **339**(11-12): 462-474.
- [39] Yu H Y, Wang X Q, Li F B, *et al.* Arsenic mobility and bioavailability in paddy soil under iron compound amendments at different growth stages of rice [J]. Environmental Pollution, 2017, **224**: 136-147.
- [40] 董明芳, 郭军康, 冯人伟, 等. Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 对水稻根表铁膜及镉吸收转运的影响[J]. 环境污染与防治, 2017, **39**(3): 249-253.
- Dong M F, Guo J K, Feng R W, *et al.* Effects of Fe^{2+} and Mn^{2+} on rice root iron plaque formation and Cd uptake and transportation [J]. Environmental Pollution & Control, 2017, **39**(3): 249-253.
- [41] Deng X, Chen Y X, Yang Y, *et al.* Cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) alleviated by basal alkaline fertilizers followed by topdressing of manganese fertilizer [J]. Environmental Pollution, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114289.
- [42] 毛彩霞. 纳米二氧化锰的安全性评价[D]. 武汉: 华中师范大学, 2008. 1-16.
- [43] 黄一帆. 纳米二氧化锰吸附重金属铜、镉离子特性及安全性评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016. 8-21.
- [44] 杨新萍, 赵方杰. 植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4495-4502.
- Yang X P, Zhao F J. A review of uptake, translocation and phytotoxicity of engineered nanoparticles in plants [J]. Environmental Science, 2013, **34**(11): 4495-4502.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)