

多方知库
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.7
第41卷 第7期

目 次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆(2981)
华北地区大气细颗粒物($PM_{2.5}$)年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽(2995)
郑州市民运会期间大气 $PM_{2.5}$ 改善效果评估	王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹(3004)
成都夏冬季 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强(3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈(3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波(3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文號(3042)
郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟(3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林(3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽(3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面 O_3 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音(3085)
稳定同位素模型解析大气氮来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霆(3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳(3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜(3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程 NO_x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博(3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫(3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香(3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成(3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰(3157)
木沕河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙(3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾(3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾珺杰, 李兆喜, 马明真, 温学发(3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳(3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨(3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 斯迪迪(3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英(3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡(3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 刘竹, 战楠(3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华(3249)
海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉(3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟(3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚羽敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃(3275)
分层型水库藻类垂向演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容(3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁(3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁(3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜(3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe ⁰ /WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉(3326)
一硫代砷在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧媚, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽(3337)
生物滤池快速启动 ANAMMOX 运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍(3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石烜, 金鹏康(3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏鹏, 方芳, 陈猷鹏(3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻(3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎(3384)
城镇河流 CO_2 及 CH_4 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱弈, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建锋(3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土 N_2O 排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林(3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠(3410)
不同母质发育土壤 Cd 环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波(3418)
锰基改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤团聚体结构以及 Cd 含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵(3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋(3434)
叶面喷施 2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波(3441)
《环境科学》征订启事(3011)	《环境科学》征稿简则(3084)
信息(3174, 3185, 3391)	

叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响

杨晓荣, 黄永春*, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波

(农业农村部环境保护科研监测所环境修复研究中心, 天津 300191)

摘要:稻米 Cd 超标问题已成为社会各界广泛关注的热点问题之一,探索降低 Cd 向地上部转运并缓解水稻 Cd 胁迫的新方法,对保障食品安全具有重要意义。本研究拟通过在水稻幼苗叶面喷施 2,3-二巯基丁二酸(DMSA)评估利用该重金属螯合剂降低 Cd 向水稻地上部转运并缓解 Cd 胁迫的可行性。以我国南方水稻主栽品种之一中早 35 幼苗为研究材料,采用水培法研究了叶面喷施不同浓度 DMSA 对 Cd 在水稻幼苗体内吸收转运的影响,同时考察了对水稻幼苗丙二醛(MDA)、谷胱甘肽(GSH)含量以及对抗氧化酶过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响。结果表明,叶面喷施 DMSA 0.2、0.4 和 1.0 mmol·L⁻¹ 4 次后,水稻幼苗地上部 Cd 含量随着 DMSA 喷施浓度增加呈显著降低趋势,3 种处理浓度与对照相比分别降低 22.1%、39.7% 和 43.5%,但是对水稻幼苗根部 Cd 含量无显著影响;对地上部及根中 K、Ca、Mg、Fe、Zn 和 Mn 这 6 种矿质元素含量无显著影响;喷施 4 次 DMSA 后显著降低了幼苗地上部 MDA 和 GSH 含量,同时使 CAT 和 SOD 活性显著增加,有效缓解了 Cd 对水稻幼苗造成的胁迫效应。DMSA 能抑制 Cd 从水稻根部向地上部转运,同时不影响对人体必需矿质营养元素的吸收和转运,具备成为水稻降 Cd 叶面调理剂的潜力。

关键词:水稻; 镉; 2,3-二巯基丁二酸(DMSA); 氧化损伤; 叶面喷施

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3441-08 DOI: 10.13227/j.hjkx.202001039

Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings

YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun*, LIU Zhong-qi, HUANG Yi-zong, CHENG Liu-long, ZHANG Chang-bo
(Research Center of Agro-Environmental Remediation, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: Rice contaminated by Cd has aroused widespread public concern. It is of great importance to find effective ways to reduce Cd translocation from roots to shoots and alleviate Cd stress in rice to ensuring food quality and safety. In this study, 2,3-dimercaptosuccinic acid (DMSA) was sprayed onto the leaves of rice seedlings to evaluate the feasibility of DMSA reducing Cd translocation to rice shoots and alleviating Cd stress. Therefore, seedlings of Zhongzao 35, one of the main rice cultivars in southern China, were used to study the effects of different concentrations of DMSA on the uptake and transport of Cd in rice seedlings by hydroponics. The effects of DMSA on MDA and GSH content, and activities of antioxidant enzymes such as CAT and SOD in rice seedlings, were also investigated. The results showed that after four iterations of foliar application of DMSA at concentrations of 0.2, 0.4, and 1.0 mmol·L⁻¹, the Cd concentration in the rice seedling shoots decreased significantly with increasing DMSA spraying concentration. Compared with the control, the Cd concentration in shoots decreased by 22.1%, 39.7%, and 43.5%, respectively, but had no significant effect on the root Cd concentration. There was no significant effect on the concentrations of K, Ca, Mg, Fe, Zn, or Mn in the shoot or root. The content of MDA and GSH in the shoots of rice seedlings decreased significantly after four spraying times of DMSA and the activity of CAT and SOD increased significantly, which shows that spraying DMSA alleviated the stress effect of Cd on rice seedlings. Foliar application of DMSA can significantly reduce the accumulation of Cd in rice shoots but has no significant effect on the content of six common mineral elements, and can effectively relieve the oxidative damage caused by Cd stress. DMSA has the potential to develop a foliar modulator for reducing rice grain Cd content.

Key words: rice; cadmium; 2,3-dimercaptosuccinic acid; oxidative damage; foliar application

由于人类的工农业生产活动日益增加,导致农田镉(Cd)污染问题日益显露和突出^[1]。Cd 具有较强的水溶性,易从土壤中转运到水稻体内并在水稻籽粒中富集^[2]。水稻是对 Cd 吸收能力最强的大宗谷类农作物^[3],也是我国第一大粮食作物,全国有近 2/3 的人口以稻米为主粮^[4]。食用稻米已经成为人体 Cd 的主要摄入源^[5]。为保障人体健康,我国食品中污染物限量标准规定大米 Cd 的最高允许限量

为 0.2 mg·kg⁻¹^[6]。探讨如何降低 Cd 向地上部转运并缓解水稻 Cd 胁迫,对保障食品安全和农业生产都具有重要意义。

叶面喷施技术是一种可以显著影响 Cd 在水稻

收稿日期: 2020-01-05; 修订日期: 2020-02-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801100)

作者简介: 杨晓荣(1994 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染防治,E-mail:1743852966@qq.com

* 通信作者,E-mail:nylab@126.com

体内转运的农艺调控措施。已有研究表明,叶面喷施硅^[7]、锌^[8]和锰^[9]等都可以显著降低 Cd 从水稻幼苗根部向地上部转运。为降低重金属对人及哺乳动物的毒害作用,医疗上通常采用金属螯合剂疗法^[10]。2,3-二巯基丁二酸(DMSA)是一种双巯基化合物,因其具有毒性低、水溶性好、对有毒重金属具有较强螯合作用的优点,故在医疗上可将该药物作为重金属中毒的解毒剂^[11]。DMSA 分子中含有两个巯基,与多种有毒重金属离子如 Cd²⁺^[12]、Pb²⁺^[13] 和 Hg²⁺^[14] 等都具有高度亲和性,能夺取与组织中酶系统结合的重金属,形成稳定的无毒螯合物。动物实验及大量的临床数据表明,DMSA 能显著降低 Cd 的毒性,而且给药吸收及排泄很快,没有蓄积作用。

本研究通过在水稻幼苗期叶面喷施 DMSA,分析了 DMSA 对 Cd 及微量元素向地上部转运的影响,探讨了 DMSA 对水稻幼苗 Cd 毒害的缓解机制,以期为进一步探讨将 DMSA 作为一种降 Cd 叶面调理剂提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与培养

以中早 35 早稻 (*Oryza sativa* L.) 作为实验材料,在人工气候室内进行实验。挑选饱满均一的水稻种子在 100 mL 浓度为 5% 的 NaClO 溶液中浸泡 30 min 后,用去离子水反复冲洗 5 次,均匀播撒于育苗盘上,在去离子水中进行第一阶段培养。待水稻幼苗长至两叶一心期,将其转移至盛有 1/10 Hoagland 营养液的 8 L 水培箱中进行第二阶段培养。待水稻幼苗长到三叶一心期,挑选长势一致的幼苗,在去离子水中缓苗 1 d 后,放置于含有 1/10 Hoagland 营养液并添加有 2.7 μmol·L⁻¹ CdCl₂ 的 8 L 水培箱中继续进行培养,每隔 3 d 进行一次喷施处理,共喷施 4 次。水培实验的整个过程均在人工气候室内完成。人工气候室条件参数:昼夜时间为 16 h/8 h,昼夜温度为 25℃/20℃,白天光量子强度 105 μmol·(m²·s)⁻¹,相对湿度为 60%^[15]。

1.2 实验处理及样品采集

水稻幼苗的 Cd 胁迫浓度统一设定为 2.7 μmol·L⁻¹ 的 CdCl₂ 溶液。分别用 pH = 7.4 的磷酸缓冲液 10 mL 溶解适量 DMSA,用蒸馏水稀释至 300 mL 配制成浓度为 0.2、0.4 和 1.0 mmol·L⁻¹ 的 DMSA 溶液,每个喷施处理浓度设定 5 次重复,同时设定只喷施含有 10 mL 磷酸缓冲液用蒸馏水稀释至 300 mL 的对照组(CK)。待水稻幼苗转移至水培箱中经 Cd 胁迫 3 d 后,立即进行第 1 次 DMSA 喷施处理,以后每隔 3 d 喷施处理 1 次,共计喷施 4 次。最

后一次喷施处理 3 d 后采集样品,喷施实验在水培箱中共计持续 15 d。

为研究喷施 DMSA 对水稻幼苗 Cd 胁迫的缓解机制,在上述 4 个处理基础上同时增加未经 Cd 胁迫且仅喷施含 10 mL pH = 7.4 的磷酸缓冲液用蒸馏水稀释至 300 mL 的完全空白对照处理(CK0)和未经 Cd 胁迫仅喷施 1.0 mmol·L⁻¹ DMSA 的对照处理(CK1),其它处理和采样时间同上。

1.3 测定方法

1.3.1 Cd 及 6 种矿质元素含量的测定

测定 Cd 及 K、Ca、Mg、Mn、Fe 和 Zn 这 6 种矿质元素含量的样品,先经 5 mmol·L⁻¹ 的 CaCl₂ 浸泡漂洗幼苗根系 10 min,再用去离子水反复冲洗根系表面,然后用吸水纸吸干表面水分,用剪刀将水稻幼苗的根部与地上部分开,装入信封,放入烘箱于 105℃ 杀青 20 min,置于 75℃ 下烘干至恒重。

参考潘瑶等^[16] 报道的方法,用剪刀将烘至恒重的样品剪碎,称取根系样品 0.1 g、地上部 0.25 g。将称好后的样品放入消解管中,加 7 mL 优级纯硝酸浸泡过夜。将消解管放入 ED54 消解仪上,于 110℃ 加热消煮 2.5 h。待消解液冷却至室温后,加入 1 mL H₂O₂ 混匀待反应平缓后继续于 110℃ 加热 1.5 h,将消煮管的盖子取下然后将消解仪温度调至 170℃ 赶酸至管内仅剩余 0.5 mL 左右,再用去离子水将消解液稀释并转移至 25 mL 容量瓶定容,用于全 Cd 含量及 6 种矿质元素含量的测定。用原子吸收光谱仪测定样品中 Cd 含量,用 ICP-MS 测定样品中 K、Ca、Mg、Mn、Fe 和 Zn 含量。本方法对 7 种元素的回收率均在 95%~105% 之间,检出限在 0.3~5.5 μg·kg⁻¹ 之间。

1.3.2 抗氧化系统相关指标的测定

将收集到的用于抗氧化系统相关指标测定的样品,先用去离子水反复冲洗根系表面,再用剪刀分开地上部和根系,立即在液氮中研磨,待酶活测定。

采用酶试剂盒法^[17] 测定水稻幼苗地上部和根部 MDA、GSH 含量及 CAT、SOD 活性。试剂盒购自苏州科铭生物技术有限公司。按照使用说明书进行操作:用分析天平称取约 0.1 g 新鲜叶片或根系,加入 1 mL 提取液,冰浴匀浆,4℃ 条件下以 8 000g 离心 10 min 后取上清,冰浴保存,待测。样品吸光值测定采用紫外可见分光光度计。

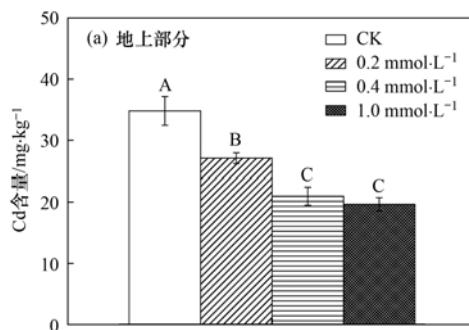
1.4 数据分析与处理

采用 Microsoft Excel 进行相关数据的计算处理。利用 SPSS 17.0 软件进行统计分析,新复极差法(Duncan's)进行多重比较、差异显著性检验。利用 Origin 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 叶面喷施DMSA对水稻幼苗Cd和6种矿质元素含量的影响

由图1可见,喷施DMSA后幼苗地上部Cd含量随着喷施浓度增加呈现出显著降低趋势,但



图中不同大写字母表示处理间差异达到5%显著水平($N=4$),下同

Fig. 1 Effects of foliar application of DMSA on Cd content in rice seedlings

由图2可见,水稻幼苗叶面分别喷施0.2、0.4和1.0 mmol·L⁻¹ DMSA处理后,对水稻幼苗地上部及根系中必需矿质营养元素K、Ca、Mg、Mn、Fe和Zn的含量均未造成显著影响。

2.2 叶面喷施DMSA对水稻幼苗转移因子的影响

元素的转移因子(TF)为不同器官间金属元素含量的比值^[18]:转移因子($TF_{\text{地上部}/\text{根}}$)=地上部金属元素含量/根部金属元素含量。该指标表征了元素在水稻体内不同器官间的迁移能力。由图3(a)可见,当喷施DMSA4次后显著降低了Cd由水稻根部向地上部的转移因子。随着DMSA喷施浓度增加,喷施4次后Cd的转移因子($TF_{\text{地上部Cd}/\text{根部Cd}}$)呈现出显著下降趋势。与对照相比,喷施0.2、0.4和1.0 mmol·L⁻¹的DMSA使Cd的转移因子分别降低23.6%、38.5%和45.0%。

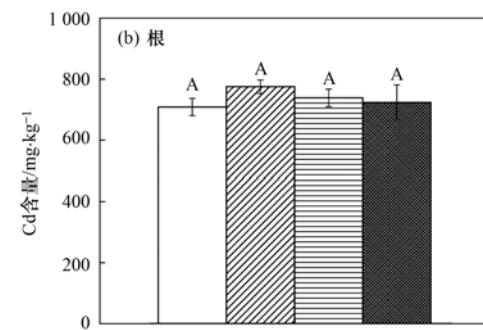
由图3(b)可见,中早35水稻幼苗对K、Mn、Mg和Ca这4种元素的富集能力较强($TF > 1$),但是对Zn和Fe的富集能力则较低($TF \leq 1$)。喷施DMSA处理4次后,对水稻幼苗矿质元素K、Ca、Mg、Mn、Fe和Zn的转移因子未造成显著影响,表明喷施DMSA对水稻幼苗吸收和转运矿质元素未造成影响。

2.3 叶面喷施DMSA对水稻幼苗抗氧化系统的影响

喷施4次DMSA后,对水稻幼苗酶活性及MDA和GSH含量影响如图4所示。

由图4(a)可见,与未经Cd胁迫处理的完全空白对照(CK0)相比,仅喷施高浓度(1.0 mmol·L⁻¹)的DMSA(CK1)即可使水稻幼苗叶片和根部MDA含量呈现增加趋势但是两个处理间差异未达显著程度,表明仅喷施4次高浓度DMSA即可对水稻幼苗

对水稻幼苗根部Cd含量无显著影响。与对照处理相比,叶面喷施0.2、0.4和1.0 mmol·L⁻¹ DMSA可使水稻幼苗地上部Cd浓度分别降低22.1%、39.7%和43.5%。随着DMSA喷施浓度的增加,水稻幼苗地上部Cd含量呈现出逐渐降低的趋势。



造成轻微损伤。Cd胁迫处理组(CK)与完全空白对照处理相比显著增加了地上部和根部的MDA含量。分别喷施0.2 mmol·L⁻¹和0.4 mmol·L⁻¹的DMSA后,显著降低了水稻幼苗地上部的MDA含量,使地上部MDA含量降到与CK0同一水平,说明喷施低浓度的DMSA即可对Cd胁迫造成的氧化损伤产生显著缓解作用。但是,当喷施的DMSA浓度增加到1.0 mmol·L⁻¹时,地上部MDA含量则出现反弹回升现象,表明过量的DMSA对水稻幼苗地上部具有一定的损伤作用。喷施DMSA后对水稻根部MDA含量也有一定影响,随着喷施DMSA浓度的升高,根部MDA含量也呈现出逐渐降低的趋势,说明对根部氧化损伤也有一定程度的缓解作用。

由图4(b)可见,仅喷施DMSA的处理(CK1)与未经Cd胁迫处理的完全空白对照(CK0)相比地上部GSH含量无显著差异。经Cd胁迫的实验组幼苗(CK),地上部GSH含量与完全空白对照(CK0)相比显著上升,喷施DMSA后地上部GSH含量出现降低趋势。根部GSH含量的变化情况与地上部类似,也表现为Cd胁迫诱导增加了GSH含量,喷施DMSA后则表现出GSH含量降低趋势。

由图4(c)可见,喷施高浓度DMSA处理组(CK1)显著增加了水稻幼苗地上部SOD酶活性,与完全空白对照处理组(CK0)相比酶活性增加48.8%,表明喷施高浓度DMSA对SOD酶活性具有显著的刺激作用。而仅经Cd胁迫处理组(CK)则显著抑制了地上部SOD酶活性,与完全空白对照组(CK0)相比酶活性降低31.5%。当喷施0.2 mmol·L⁻¹和0.4 mmol·L⁻¹的DMSA后使地上部

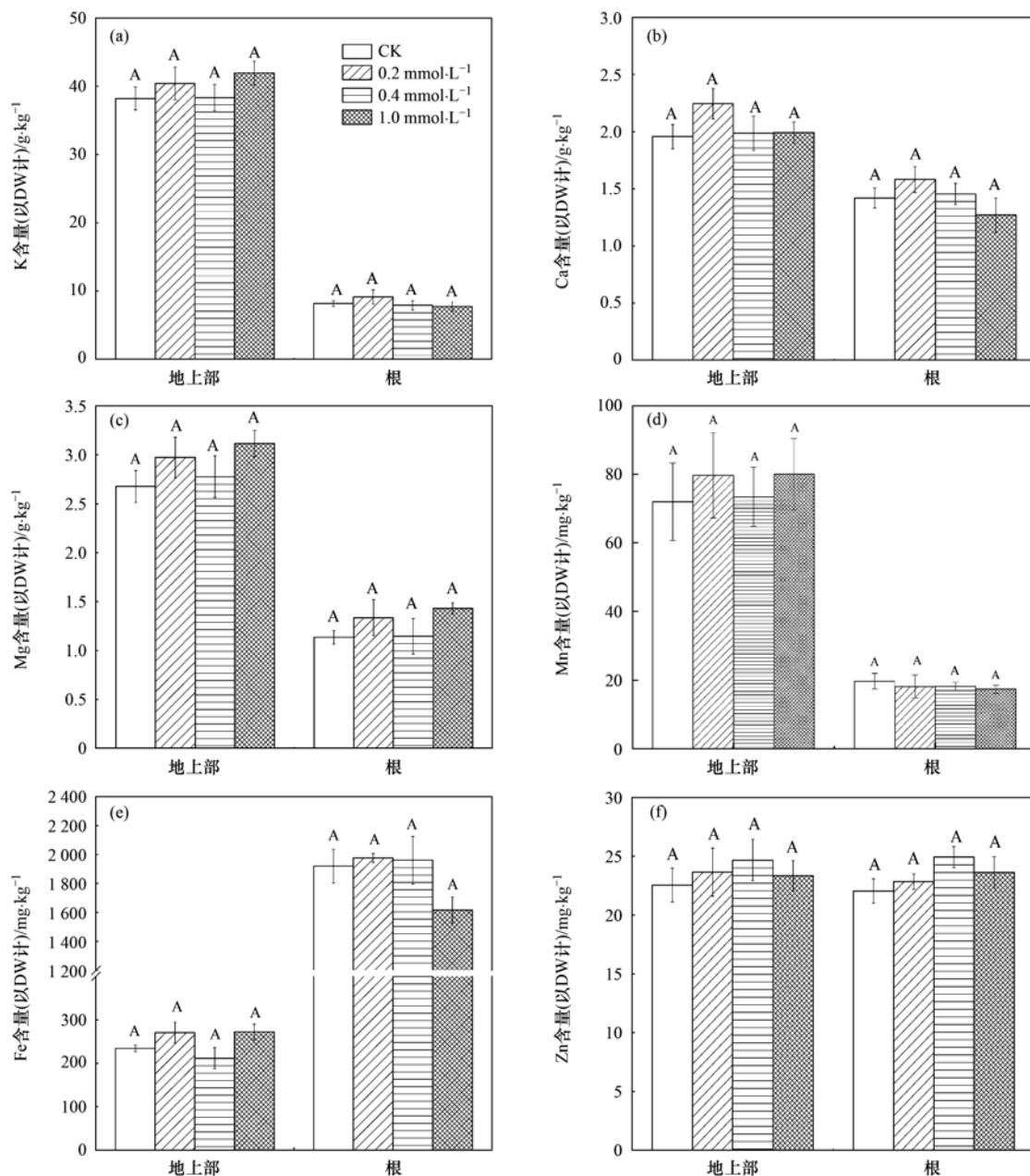


图2 喷施DMSA对水稻幼苗矿质元素含量影响

Fig. 2 Effects of foliar application of DMSA on mineral elements content in rice seedlings

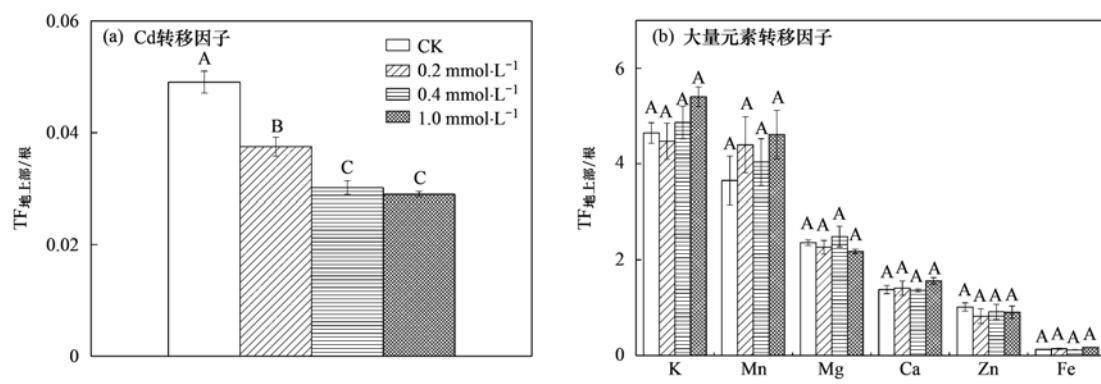


图3 喷施DMSA对水稻幼苗转移因子的影响

Fig. 3 Effects of foliar application of DMSA on transfer factors of rice seedlings

SOD酶活性恢复到与完全空白对照处理(CK0)差异不显著水平,当DMSA喷施浓度达到 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时SOD酶进一步显著增加,此时SOD酶活性在DMSA的刺激作用下已超出完全空白对照组(CK0)44.0%。仅喷施高浓度的DMSA对根部SOD酶活性与CK0处理相比未见显著影响,经Cd胁迫处理后根部SOD活性显著降低36.5%,但是喷施不同浓度的DMSA后对根部SOD活性未见显著影响。

由图4(d)可见,与未经Cd胁迫处理的完全空白对照(CK0)相比,喷施4次高浓度的DMSA对水

稻幼苗地上部和根部CAT酶活性均未造成显著影响。但是,经Cd胁迫处理组中(CK)地上部CAT酶活性出现显著降低。喷施DMSA后水稻幼苗地上部CAT酶活性表现出随DMSA喷施浓度增加而升高的趋势,喷施低浓度的DMSA即可使CAT酶活性恢复到与空白对照处理差异不显著水平。Cd胁迫处理组(CK),根部CAT酶活性与未经Cd胁迫处理的空白对照(CK0)相比也出现显著降低,降幅达30.2%。喷施不同浓度的DMSA后未对根部CAT酶活性造成显著影响。

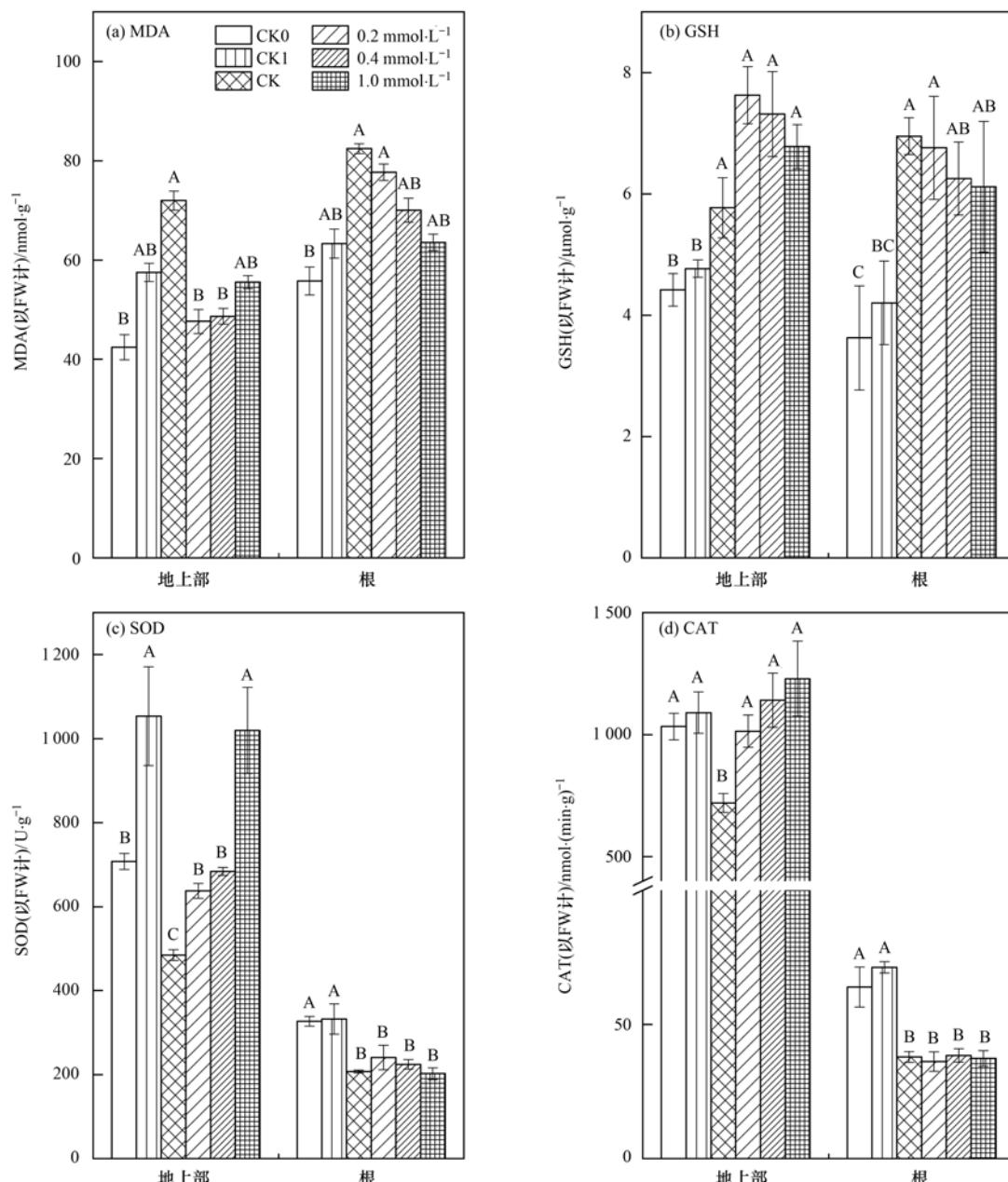


图4 喷施DMSA对水稻幼苗抗氧化酶及GSH和MDA含量影响

Fig. 4 Effects of foliar application of DMSA on antioxidant enzymes and GSH and MDA content in rice seedlings

3 讨论

Cd是一种对植物和人体均有毒害作用且非必

需的重金属元素^[19],1993年,国际肿瘤研究协会将Cd定义为I类(Group I)致癌物^[20]。由于农田Cd污染的隐蔽性、累积性和长期性以及不同品种间Cd

累积能力差异较大等原因,农田水稻 Cd 污染治理技术开发难度较大。已有研究表明,在水培条件下外源添加 Mn^{2+} 和 Zn^{2+} 通过与 Cd^{2+} 形成离子拮抗能显著抑制根系对 Cd 的吸收和向地上部的转运^[21,22]。叶面喷施锌^[8]、硅^[7]、硒^[23]和小分子酸类物质^[9]等可以显著降低水稻籽粒中 Cd 含量。可见,叶面喷施技术是一种可以显著影响 Cd 在水稻体内转运的农艺调控措施。

由于植物生长不需要重金属,因此植物没有专用的重金属转运子,重金属进入植物主要借助金属阳离子通道^[24]。 Cd^{2+} 主要经 Fe^{2+} ^[22] 和 Mn^{2+} ^[21] 转运子运输进入水稻根系。 Cd^{2+} 跨过脂膜进入根细胞后一部分在富含巯基的植物螯合素(PCS)和谷胱甘肽(GSH)作用下形成螯合物^[25],另一部分则在 OsHMA3 转运子运输下被转运到液泡中并和高分子量 PCS 结合储存在液泡内^[26],只有未被巯基络合的 Cd^{2+} 才有可能被 OsHMA2 转运子运输到地上部茎叶中^[27]。水稻受到 Cd 胁迫后通过启动应急机制合成富含巯基的螯合物,不仅降低了 Cd 对植物的胁迫效应而且在一定程度上也降低了 Cd 向地上部的转运,是水稻重要的自身防御机制。

在植物体内,硫代谢的最终产物半胱氨酸为植物合成 PCS 和 GSH 提供了前体物质^[28]。植物主要以硫酸盐的形式从土壤溶液中获得硫,此外还可以通过叶片从空气中以二氧化硫和硫化氢的形式获得硫^[25]。本研究中通过叶面喷施 DMSA,显著降低了 Cd 在水稻幼苗茎叶中的累积量,连续喷施 4 次 DMSA 地上部茎叶中 Cd 累积量与对照相比降低幅度达到 22.1%~43.5% 之间,对水稻幼苗根部 Cd 含量则未造成显著影响,说明喷施 DMSA 降低了 Cd 向地上部转运但是对根部 Cd 吸收未造成显著影响。本文推断,在水稻苗期喷施 DMSA,一方面可能与水稻幼苗体内的 Cd^{2+} 形成螯合物降低了 Cd 向地上部转运,另一方面喷施的 DMSA 中含有的硫醇($-SH$)基团可能进入植物自身的硫代谢循环增加了半胱氨酸的产量,促进了 PCS 的生物合成,从而降低了 Cd 向地上部的转运。

水稻是我国第一大粮食作物,然而水稻中多种矿质元素尤其是人体必需营养元素铁(Fe)和锌(Zn)含量较低^[29]。儿童缺锌可能导致生长迟缓生殖系统发育不健全^[30]。成人缺锌可引发尿毒症和贫血等症状^[31]。铁在大脑代谢过程中发挥重要作用,是神经递质合成及代谢酶的辅酶^[32],还参与人体能量代谢过程^[33]。其它常见金属阳离子 K、Ca、Mg 和 Mn 也对人体健康发挥重要作用。任何降低水稻籽粒 Cd 含量的同时伴随降低必需营养元素的农艺措施

都可能给人体健康带来潜在风险。动物实验表明,给动物注射 DMSA 后可以起到缓解 Cd 毒性的作用,同时不会降低动物肌肉组织内的必需金属离子浓度^[11]。本文研究了喷施 DMSA 对水稻幼苗地上部和根部 K、Ca、Mg、Mn、Fe 和 Zn 这 6 种常见必需矿质营养元素的影响,结果发现喷施 DMSA 对这 6 种营养元素无显著影响,表明 DMSA 拥有成为水稻降 Cd 叶面调理剂的潜力。

植物遭受 Cd 胁迫后会产生过量氧自由基,影响植物体内抗氧化酶活性,破坏细胞膜系统、蛋白质和核酸等生物大分子,抑制水稻叶绿素合成和植株生长^[34,35]。丙二醛(MDA)是植物组织在逆境胁迫下产生过量氧自由基使膜脂遭受氧化损伤的产物,反映细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱^[36]。MDA 已经成为反映植物遭受逆境胁迫程度的重要生理生化指标^[37]。在本研究中,水稻幼苗经 Cd 胁迫处理后地上部和根部 MDA 含量与未经胁迫处理的空白对照相比均显著提高,但是经喷施 DMSA 处理后地上部 MDA 含量迅速降低到与完全空白对照处理 MDA 含量同一水平,说明喷施 DMSA 有效缓解了 Cd 胁迫产生的氧化损伤作用。随着 DMSA 喷施浓度升高根部 MDA 含量也出现降低趋势,但是降低幅度没有达到显著程度,这可能与根部累积 Cd 浓度较高有关。GSH 含量变化趋势与 MDA 相类似,随着 DMSA 喷施浓度增加地上部 GSH 含量出现逐渐降低趋势,而根部降低趋势则相对较弱,表明 Cd 对水稻的胁迫效应降低后 GSH 的诱导合成量也相应减少。但同时需要注意的是,喷施高浓度 DMSA 对植物有一定的损伤作用,应用过程中应注意喷施浓度,这一结果对田间应用具有指导意义。

超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)是植物体内清除和减少破坏性氧自由基的保护酶。有研究表明,Cd 胁迫下会显著降低水稻 SOD 和 CAT 活性^[38,39]。在本研究中,Cd 胁迫处理对照组幼苗 SOD 和 CAT 酶活性与完全空白对照组相比出现显著降低。但是喷施较低浓度 DMSA 即可显著提高地上部 SOD 和 CAT 酶活性且酶活性随喷施浓度增加出现增加趋势,但是对根部 SOD 和 CAT 酶活性影响不显著。表明喷施 DMSA 可以显著降低水稻幼苗地上部的 Cd 胁迫效应。

4 结论

(1) 叶面喷施 DMSA 可显著降低 Cd 在水稻幼苗地上部的累积。与对照相比,叶面喷施 4 次 DMSA 后使水稻幼苗地上部 Cd 含量最高降幅可达 43.5%。

(2) 叶面喷施 DMSA 对水稻幼苗微量元素含量影响不显著。与对照相比,喷施 DMSA 后根系和地上部茎叶组织中常见 6 种矿质元素 K、Ca、Mg、Mn、Fe 和 Zn 浓度均未发生显著变化。

(3) 叶面喷施 DMSA 显著缓解了 Cd 对水稻幼苗的胁迫效应。喷施 DMSA 后使地上部茎叶组织中的 MDA 和 GSH 含量显著降低,同时使 CAT 和 SOD 的活性得到显著回升。

(4) DMSA 有可能用于防治水稻 Cd 污染,具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Liu Z Q. Research advance on the mechanism of cadmium transport in rice [J]. Meteorological and Environmental Research, 2014, **5**(5): 48-52.
- [2] 杨菲, 唐明凤, 朱玉兴. 水稻对镉的吸收和转运的分子机理 [J]. 杂交水稻, 2015, **30**(3): 2-8.
Yang F, Tang M F, Zhu Y X. Molecular mechanism of cadmium absorption and transport in rice [J]. Hybrid Rice, 2015, **30**(3): 2-8.
- [3] Chaney R L, Reeves P G, Ryan J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks [J]. Biometals, 2004, **17**(5): 549-553.
- [4] 凌启鸿, 张洪程, 丁艳锋, 等. 水稻高产技术的新发展——精确定量栽培[J]. 中国稻米, 2005, **11**(1): 3-7.
Ling Q H, Zhang H C, Ding Y F, et al. Development of rice high-yielding techniques-precisely fixed quantity planting [J]. China Rice, 2005, **11**(1): 3-7.
- [5] Qiao J T, Liu T X, Wang X Q, et al. Simultaneous alleviation of cadmium and arsenic accumulation in rice by applying zero-valent iron and biochar to contaminated paddy soils [J]. Chemosphere, 2018, **195**: 260-271.
- [6] GB 2762-2017, 食品安全国家标准食品中污染物限量[S].
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 张炼, 陆仲烟, 唐琦, 等. 水稻叶面调理剂的降 Cd 效果及其对营养元素转运的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(11): 2507-2513.
Zhang S, Lu Z Y, Tang Q, et al. Effects of foliar modulators on cadmium accumulation and transport of nutrient elements in rice [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(11): 2507-2513.
- [10] Zhai H Q, Wang Y L, Wang M H, et al. Construction of a glutathione-responsive and silica-based nanocomposite for controlled release of chelator dimercaptosuccinic acid [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, **19**(12): 3790.
- [11] 李莉, 丁光生. 二巯基丁二酸的解毒作用 [J]. 中国工业医学杂志, 1989, **2**(2): 31-33.
- [12] Sompamit K, Kukongviriyapan U, Donpunha W, et al. Reversal of cadmium-induced vascular dysfunction and oxidative stress by meso-2, 3-dimercaptosuccinic acid in mice [J]. Toxicology Letters, 2010, **198**(1): 77-82.
- [13] 刘占旗, 王秀琴, 战景明, 等. 口服二巯基丁二酸治疗慢性汞中毒 [J]. 辐射防护通讯, 2004, **24**(5): 39-40.
Liu Z Q, Wang X Q, Zhan J M, et al. Treatment of chronic mercury poisoning through oral administration of dimercaptosuccinic acid capsules [J]. Radiation Protection Bulletin, 2004, **24**(5): 39-40.
- [14] 于飞, 智绪平, 李岩溪, 等. 二巯基丁二酸与不同营养素联合干预小鼠铅中毒的研究 [J]. 毒理学杂志, 2010, **24**(6): 445-448.
Yu F, Zhi X P, Li Y X, et al. Study of combined use of DMSA with micronutrients in the treatment of lead-intoxicated mice [J]. Journal of Toxicology, 2010, **24**(6): 445-448.
- [15] 陆仲烟, 刘仲齐, 宋正国, 等. 大麦中镉的亚细胞分布和化学形态及 PCs 合成的基因型差异 [J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(11): 2125-2131.
Lu Z Y, Liu Z Q, Song Z G, et al. Subcellular distribution and chemical forms of Cd and the synthesis of phytochelatins (PCs) in different barley genotypes [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(11): 2125-2131.
- [16] 潘瑶, 尹洁, 高子平, 等. 硫对水稻幼苗镉积累特性及亚细胞分布特征的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2015, **32**(3): 275-281.
Pan Y, Yin J, Gao Z P, et al. Effects of sulfur on the accumulation and subcellular distribution of cadmium in rice seedlings [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, **32**(3): 275-281.
- [17] 程艳, 陈璐, 米艳华, 等. 水稻抗氧化酶活性测定方法的比较研究 [J]. 江西农业学报, 2018, **30**(2): 108-111.
Cheng Y, Chen L, Mi Y H, et al. Comparative study on various methods for determination of activity of antioxidant enzymes in rice [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, **30**(2): 108-111.
- [18] Stoltz E, Greger M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings [J]. Environmental and Experimental Botany, 2002, **47**(3): 271-280.
- [19] Rizwan M, Ali S, Akbar M Z, et al. Foliar application of aspartic acid lowers cadmium uptake and Cd-induced oxidative stress in rice under Cd stress [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(27): 21938-21947.
- [20] Cui Y J, Zhu Y G, Zhai R H, et al. Exposure to metal mixtures and human health impacts in a contaminated area in Nanning, China [J]. Environment International, 2005, **31**(6): 784-790.
- [21] Sasaki A, Yamaji N, Yokoshio K, et al. Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice [J]. The Plant Cell, 2012, **24**(5): 2155-2167.
- [22] Nakanishi H, Ogawa I, Ishimaru Y, et al. Iron deficiency enhances cadmium uptake and translocation mediated by the Fe²⁺ transporters OsIRT1 and OsIRT2 in rice [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2006, **52**(4): 464-469.
- [23] Gao M, Zhou J, Liu H L, et al. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice [J]. Science of the Total Environment, 2018, **631-632**: 1100-1108.
- [24] Kim Y Y, Yang Y Y, Lee Y. Pb and Cd uptake in rice roots [J]. Physiologia Plantarum, 2002, **116**(3): 368-372.
- [25] Gill S S, Tuteja N. Cadmium stress tolerance in crop plants: probing the role of sulfur [J]. Plant Signaling & Behavior, 2011, **6**(2): 215-222.
- [26] Sasaki A, Yamaji N, Ma J F. Overexpression of *OsHMA3* enhances Cd tolerance and expression of Zn transporter genes in

- rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2014, **65**(20): 6013-6021.
- [27] Satoh-Nagasawa N, Mori M, Nakazawa N, et al. Mutations in rice (*Oryza sativa*) heavy metal ATPase 2 (*OsHMA2*) restrict the translocation of zinc and cadmium [J]. Plant and Cell Physiology, 2012, **53**(1): 213-224.
- [28] Nocito F F, Lancilli C, Crema B, et al. Heavy metal stress and sulfate uptake in maize roots[J]. Plant Physiology, 2006, **141**(3): 1138-1148.
- [29] Yuan L, Wu L H, Yang C L, et al. Effects of iron and zinc foliar applications on rice plants and their grain accumulation and grain nutritional quality[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, **93**(2): 254-261.
- [30] Castro-Magana M, Collipp P J, Chen S Y, et al. Zinc nutritional status, androgens, and growth retardation[J]. American Journal of Diseases of Children, 1981, **135**(4): 322-325.
- [31] Prasad A S, Mantzoros C S, Beck F W J, et al. Zinc status and serum testosterone levels of healthy adults[J]. Nutrition, 1996, **12**(5): 344-348.
- [32] Hill J M, Switzer III R C. The regional distribution and cellular localization of iron in the rat brain[J]. Neuroscience, 1984, **11**(3): 595-603.
- [33] Zecca L, Youdim M B H, Riederer P, et al. Iron, brain ageing and neurodegenerative disorders [J]. Nature Reviews Neuroscience, 2004, **5**(11): 863-873.
- [34] 刘海亮, 崔世民, 李强, 等. 镉对作物种子萌发、幼苗生长及氧化酶同工酶的影响[J]. 环境科学, 1991, **12**(6): 29-31.
Liu H L, Cui S M, Li Q, et al. Effects of cadmium on seed germination, seedling growth and oxidase isozymes in crops[J]. Environmental Science, 1991, **12**(6): 29-31.
- [35] 张金彪, 黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展[J]. 生态学报, 2000, **20**(3): 514-523.
Zhang J B, Huang W N. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, **20**(3): 514-523.
- [36] 章秀福, 王丹英, 储开富, 等. 镉胁迫下水稻SOD活性和MDA含量的变化及其基因型差异[J]. 中国水稻科学, 2006, **20**(2): 194-198.
Zhang X F, Wang D Y, Chu K F, et al. Changes of SOD activity and MDA content in rice exposed to Cd stress as affected by genotype[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2006, **20**(2): 194-198.
- [37] 王阳阳, 任艳芳, 周国强, 等. 镉胁迫对不同抗性水稻品种幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(24): 450-454.
Wang Y Y, Ren Y F, Zhou G Q, et al. Effect of cadmium stress on seedlings growth and physiological characteristics in different rice cultivars[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, **25**(24): 450-454.
- [38] 邵国胜, Muhammad J H, 章秀福, 等. 镉胁迫对不同水稻基因型植株生长和抗氧化酶系统的影响[J]. 中国水稻科学, 2004, **18**(3): 239-244.
Shao G S, Muhammad J H, Zhang X F, et al. Effects of cadmium stress on plant growth and antioxidative enzyme system in different rice genotypes[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2004, **18**(3): 239-244.
- [39] Shah K, Kumar R G, Verma S, et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. Plant Science, 2001, **161**(6): 1135-1144.

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, et al. (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, et al. (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, et al. (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, et al. (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, et al. (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, et al. (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, et al. (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, et al. (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, et al. (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, et al. (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia: Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, et al. (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, et al. (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, et al. (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, et al. (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, et al. (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, et al. (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, et al. (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, et al. (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohe Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, et al. (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, et al. (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, et al. (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, et al. (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, et al. (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, et al. (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, et al. (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, et al. (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, et al. (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, et al. (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, et al. (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, et al. (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, et al. (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, et al. (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, et al. (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, et al. (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, et al. (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-ying, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, et al. (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, et al. (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, et al. (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, et al. (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, et al. (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, et al. (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, et al. (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, et al. (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, et al. (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, et al. (3441)