

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

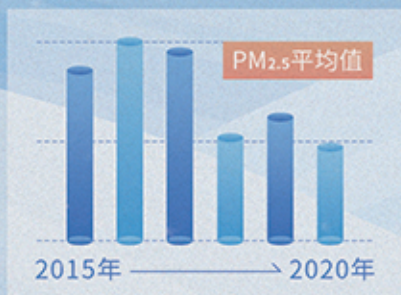
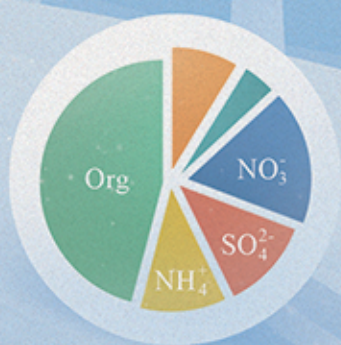
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响

杨嘉仪^{1,2,3}, 孙梦强^{2,3}, 肖羽堂¹, 韦行^{2,3}, 张建强^{2,3}, 陈志良^{2,3*}

(1. 华南师范大学环境学院, 广州 510006; 2. 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510530; 3. 广东省农田重金属污染土壤治理与修复工程技术研究中心, 广州 510530)

摘要: 通过天然生物质壳聚糖与有机硅制备壳聚糖负载氧化硅叶面喷施材料(NCSI), 并将其应用于灌浆期临稻 16、南粳 2728、郑早 10 号和农垦 58, 以探究其对水稻吸收砷(As)的影响。结果表明, 在 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 五价砷[As(V)]水培环境下, 叶面喷施 30 mL NCSI 促进叶片 As 的累积, 降低了根和籽粒 As 的累积。其中, 叶面喷施 NCSI 后 3 d, 南粳 2728、郑早 10 号和农垦 58 籽粒 As 含量较空白组分别降低 14.44%、21.66% 和 10.85%。同时, 叶面喷施处理 NCSI, 提高了水稻叶片 CAT 和 SOD 酶的活性, 并提高了 GSH 质量摩尔浓度, 表明 NCSI 的喷施缓解 As 对水稻的胁迫, 提高水稻对 As 耐受性, 降低 As 对水稻的毒害作用。叶面喷施 NCSI 降低水稻籽粒 As 积累的主要作用机制可能是 NCSI 诱导叶片 GSH 生成, 使更多的 As(V) 还原为三价砷[As(III)], 从而促进 As 在叶片螯合, 抑制 As 向籽粒迁移。因此, 叶面喷施 NCSI 可作为一种叶面调控技术解决水稻 As 超标问题, 为我国大米安全生产提供科学依据。

关键词: As(V); 壳聚糖; 二氧化硅; 叶面喷施; 氧化应激

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4282-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111148

Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice

YANG Jia-yi^{1,2,3}, SUN Meng-qiang^{2,3}, XIAO Yu-tang¹, WEI Hang^{2,3}, ZHANG Jian-qiang^{2,3}, CHEN Zhi-liang^{2,3*}

(1. School of Environment, South China Normal University, Guangzhou 510006, China; 2. South China Institute of Environmental Sciences, Guangzhou 510530, China; 3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Heavy Metal Pollution Control and Restoration in Farmland Soil, Guangzhou 510530, China)

Abstract: Chitosan loaded with silica foliar spraying material (NCSI) was prepared using natural biomass chitosan and organic silicon and was applied to Lindao 16, Nanjing 2728, Zhengnan 10, and Nongken 58 at the rice filling stage to study the effects on arsenic (As) absorption in rice. The results showed that under a 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ pentavalent arsenic [As(V)] hydroponic environment, foliar spraying of 30 mL NCSI on leaves promoted the accumulation of As in leaves and reduced the accumulation of As in roots and grains. Among them, the As contents of Nanjing 2728, Zhengnan 10, and Nongken 58 grains were decreased by 14.44%, 21.66%, and 10.85%, respectively, compared with those of the blank group on the 3rd day after spraying NCSI. Meanwhile, foliar spraying of NCSI improved the activities of CAT and SOD in rice leaves and increased the GSH content, indicating that the spraying of NCSI alleviated the stress of As on rice, improved the tolerance of rice to As, and reduced the toxicity of As to rice. The main mechanism of foliar application of NCSI to reduce As accumulation in rice grains may have been that NCSI induced GSH production in leaves, reducing more As(V) to trivalent arsenic [As(III)], thereby promoting As chelating in leaves and inhibiting As migration to grains. Therefore, foliar spraying of NCSI can be used as a foliar control technology to solve the problem of excessive As in rice and provide a scientific basis for the safe production of rice in China.

Key words: As(V); chitosan; silica; foliar spraying; oxidative stress

砷(As)是一种存在于自然环境中的类金属,毒害植物并积累在植株内,并通过食物链造成环境和健康风险^[1]。水稻(*Oryza sativa* L.)作为数十亿人的主要粮食作物,在淹水条件下,水稻比其他作物更容易吸收 As^[2]。水稻主要通过根部吸收 As 并转移至谷粒,并在根、茎、叶和谷粒中依次累积^[3]。有研究表明,随着土壤 As 含量的升高,水稻生长也受到抑制,在 $\omega(\text{As})$ 高于 60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤中生长的水稻植株出现生长迟缓、褐斑和叶片焦黄等毒害症状^[4]。由于高 As 污染土壤会导致水稻 As 积累增多,人类食用 As 积累量过高的水稻会引起一系列急性和慢性疾病,如心血管、神经和生殖系统损伤以及皮肤、膀胱、肺和胃癌等^[5-7]。因此,迫切需要寻找有效的方法来降低大米 As 污染的危害。

目前,通过田间水分管理、土壤添加药剂和叶

面材料喷施等方式能有效降低大米 As 污染^[8-10]。如:在土壤中添加硅类物质,可有效降低水稻根部三价砷[As(III)]的吸收^[8,11-13]。Wu 等^[14]的研究发现干湿交替结合施磷可以保持籽粒中相对较低的 As 含量,促进根表铁膜的形成。一般而言,叶面喷施可有效提高药剂的利用效率,通过叶面喷施将药剂高效释放到叶片细胞内,并与金属螯合,降低 As 迁移而达到解毒效果。如:Yang 等^[15]在田间试验中,

收稿日期: 2021-11-15; 修订日期: 2022-01-07

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B110207001, 2020B1111350002); 广东省自然科学基金项目(2019A1515012131); 广东省国际科技合作项目(2021A0505030045); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(PM-zx097-202104-105, PM-zx703-202104-088, PM-zx703-202002-021, PM-zx703-202104-092)

作者简介: 杨嘉仪(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤砷环境行为与防治, E-mail: 935756004@qq.com

* 通信作者, E-mail: chenzhiliang@scies.org

发现在开花期叶面喷施 2, 3-二巯基琥珀酸 (DMSA) 可提高旗叶 As 含量,降低水稻籽粒、穗节、穗颈和穗轴中 As 的含量,抑制 As 从旗叶向籽粒迁移. Cui 等^[16]的研究发现,叶面喷施纳米二氧化硅可提高果胶质的合成,增强细胞壁的厚度从而抑制 As 进入水稻细胞. 目前常见叶面喷施药剂在使用过程中存在渗透性不佳、合成成本高和造成环境污染等问题,需要进一步改良和优化.

壳聚糖是一种天然物质,具有可生物降解性、高渗透性和可提高作物的抗病性及产量特点,在有机农业中得到应用^[17]. 相较于壳聚糖,通过化学降解、酶降解或辐射降解等方式得到的小分子量壳聚糖,具有更广适用范围^[17]. 有研究表明,小分子量的壳聚糖能促进植物种子发芽、植物生长及抑制真菌的感染^[18]. 此外,壳聚糖具有丰富的胺基(—NH₂)和羟基(—OH)等官能团,可携带微量元素形成稳定性、溶解性高的生物聚合物,并作用于植物气生器官,通过叶面调控,促进植物生长和缩短生长周期^[19,20]. 如,叶面喷施壳聚糖负载锌纳米材料可提高小麦的锌含量,促进小麦的生长^[21]. 喷施壳聚糖负载氮磷钾纳米颗粒于砂质土壤上的小麦叶片,可在提高小麦产量的同时缩短其生长周期^[22]. 目前,改性壳聚糖纳米材料多用于水稻叶面喷施的抗病性和抗逆性研究,关于改性壳聚糖用于水稻 As 吸收的研究尚未见到报道,因此,利用叶面喷施改性壳聚糖应用于水稻 As 污染解毒具有重要的研究意义.

水稻作为典型的富硅植物,可通过外源补充硅来降低 As 的负荷,减少 As 诱导的氧化应激和对植物生长抑制等影响^[23]. 基于此,本文通过壳聚糖和有机硅制备壳聚糖负载氧化硅叶面材料 (NCSI),并研究高浓度五价砷 [As(V)] 污染下,在不同水稻品种灌浆期叶面喷施 NCSI 材料后,对水稻各器官的 As 积累特性及抗氧化防御系统的影响,进一步探究叶面喷施 NCSI 降低水稻 As 累积及解毒可行性.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻: 南粳 2728 (杂交稻,中熟中粳稻品种)、临稻 16 (杂交稻,中晚熟粳稻品种)、郑早 10 号 (常规稻,粳型常规早稻品种) 和农垦 58 (常规稻,粳型常规水稻); 试验所用主要试剂壳聚糖购置于阿拉丁试剂 (上海) 有限公司. 过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD) 和谷胱甘肽 (GSH) 试剂盒购买于江苏科铭科技有限公司. 本试验中 As(V) 由 Na₃AsO₄ 提供.

1.2 壳聚糖负载氧化硅的制备

称取 6 g 壳聚糖溶于 3% 150 mL 乙酸溶液中,水域 45℃ 加热搅拌溶解,逐滴缓慢加入 100 mL 4% H₂O₂ 溶液, 60℃ 保温 4 h,取出冷却至室温. 调节 pH 至中性,静置 12 h,抽滤后滤液中加入 450 mL 25% (体积分数) 乙醇溶液,静置 1 h,离心产物冷冻干燥后获得固体备用,记为材料 1.

氧化硅贮备液的制作参考 Wang 等^[24]的方法: 50 mL 无水乙醇和 5 mL 30% (体积分数) 氨水混合并用封口膜密封,磁力搅拌 1 h (40℃, 300 r·min⁻¹),将 1.05 mL 原硅酸四乙酯逐滴加至该混合物中,并封口膜密封搅拌 3 h (40℃, 300 r·min⁻¹),向混合物中添加 80 mL 去离子水,磁力搅拌 1 h (75℃, 300 r·min⁻¹) 以蒸发掉过量的乙醇和氨,最后用去离子水稀释至 200 mL,记为材料 2.

取 1 mg 的材料 1 溶于 0.5 L 的 1% 乙酸中,逐滴加入 0.05 L 材料 2,室温搅拌 0.5 h. 然后,逐滴加入 0.2 L 1 mg·mL⁻¹ TPP 溶液,搅拌 0.5 h. 最后用超纯水稀释至 1 L,获得浓度为 1.25 mmol·L⁻¹ (以可溶性硅计) 溶液,记为 NCSI.

1.3 试验设计与处理

1.3.1 水稻培育

供试水稻作为试验材料,在温室内进行试验. 挑选饱满均一的水稻种子在 100 mL 30% 过氧化氢 (H₂O₂) 中浸泡 15 min 后,用去离子水反复冲洗 3 次,均匀播撒于培养皿中并放入 28℃ 培养箱中进行催芽,待水稻苗长至三叶一心期转移至含有木村 B 营养液^[25]的水培桶中培养,营养液成分见表 1. 培养期间,每 3 d 更换一次营养液,整个水培过程均在温室内完成,本试验期间温室昼夜温度为 [(25/20 ± 5)℃],相对湿度为 60%.

表 1 木村 B 营养液成分及浓度

Table 1 Composition and concentration of Kimura B nutrient solution	
组分	浓度 / mmol · L ⁻¹
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0.274
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.183
KH ₂ PO ₄	0.091
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	0.183
KNO ₃	0.091
MnCl ₂ · 4H ₂ O	0.000 5
H ₃ BO ₃	0.003 0
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ · 4H ₂ O	0.000 1
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0.000 4
CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.000 2
NaFe(Ⅲ)-EDTA · 3H ₂ O	0.020 0

1.3.2 试验处理

待 4 个品种水稻长至灌浆期,各品种挑选长势一致的水稻,将其转移至含 100 μmol·L⁻¹ As(V)

木村 B 营养液中[相当于土壤中 ω (有效态 As)为 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,根据施强等^[26]以湖南省 6 种典型母质水稻土 As 剖面的研究,有效态 As 占总 As 的质量分数为 0.49%~15.46% (平均值为 3.04%)。通过计算,培养液 $100 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ As(V),相当于土壤 ω (总 As)为 $48.51 \sim 1530.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (平均值为 $246.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)],每个品种水稻设置 2 个试验组(一组为对照组,一组为叶面喷施处理组),每个处理设置 3 个平行,每个平行 3 颗水稻。处理组水稻叶面喷施上述方法制备好的 NCSI 溶液 30 mL(每亩地按种植密度株距 10 cm 约 15 000 株计算,需要喷施约 150 L 材料),对照组叶面喷施等量的去离子水。在喷施材料后 3 d、14 d 收取水稻样品。在喷施材料后 3 d,对照组记为 3 d 空白,叶面喷施组为 3 d 处理;喷施材料后 14 d,对照组记为 14 d 空白,叶面喷施组为 14 d 处理。

1.3.3 分析方法

(1)As 含量的测定 将收集到的水稻样品用去离子水反复冲洗,并用吸水纸吸干水稻样品表面水分。水稻根系样品置于冰浴的漂洗液中($1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ K_2PO_4 , $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MES, pH 6.0)浸泡 15 min,用于去除附着在根系表面的 As。然后将水稻的根、茎、叶和籽粒分开并放入牛皮纸信封中,在 80°C 下烘干至恒重,称取地上部样品 0.200 0 g(根系样品 0.100 0 g),放置于聚乙烯消解管中,加入 5 mL 优级纯浓硝酸,盖上盖子静置过夜,次日将管子放入石墨炉消解仪(广州格丹纳仪器有限公司, D4), 80°C 1 h,然后将温度提高到 130°C ,直至消解完全^[25]。分析过程以大米粉成分分析标准物质 GBW(E)100353 和加标回收试验进行质量控制,总 As 回收率为 95.8%~104.7%。消解完成并过滤后用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent, ICP-MS 7800)测定水稻样品中 As 含量。

(2)水稻各部分 As 转移系数 水稻叶片到籽粒的转移系数($\text{TF}_{\text{叶-籽粒}}$),茎部到籽粒的转移系数($\text{TF}_{\text{茎-籽粒}}$),茎部到叶子的转移系数($\text{TF}_{\text{茎-叶}}$)以及根到茎部($\text{TF}_{\text{根-茎}}$)的转移系数根据以下公式计算^[8]:

$$\text{TF}_{\text{叶-籽粒}} = C_{\text{Grain}}/C_{\text{Leaf}} \quad (1)$$

$$\text{TF}_{\text{茎-籽粒}} = C_{\text{Grain}}/C_{\text{Stem}} \quad (2)$$

$$\text{TF}_{\text{茎-叶}} = C_{\text{Leaf}}/C_{\text{Stem}} \quad (3)$$

$$\text{TF}_{\text{根-茎}} = C_{\text{Stem}}/C_{\text{Root}} \quad (4)$$

式中, C_{Grain} 、 C_{Leaf} 、 C_{Stem} 和 C_{Root} 分别为水稻籽粒、叶子、茎和根 As 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

(3)抗氧化系统指标分析 将收集到的新鲜水稻样品,先用超纯水反复冲洗水稻叶片表面,然后用

吸水纸把水稻表面水分吸干,采用酶试剂盒(购于苏州科铭生物技术有限公司)和紫外分光光度计(上海美谱达仪器有限公司, UV-1800)测定叶片中 GSH 的含量以及 CAT 和 SOD 活性。

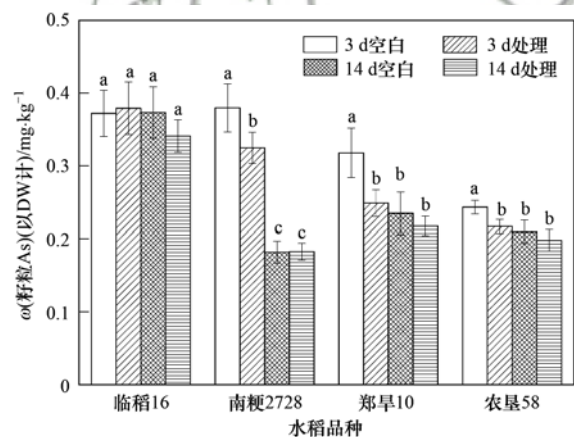
1.4 数据分析

使用 Excel 2017 进行试验数据计算、SPSS 21.0 进行方差分析和相关性分析,采用 Duncan 进行多重比较法,显著水平设为 0.05, Origin pro 对所有试验数据进行作图。

2 结果与分析

2.1 叶面喷施对水稻籽粒 As 吸收的影响

图 1 为叶面喷施 NCSI 对水稻灌浆期籽粒 As 积累的影响。从中可知,叶面喷施 NCSI 后 3 d,水稻籽粒中 As 的含量有明显降低,其中,南粳 2728、郑早 10 和农垦 58 籽粒的 As 含量较空白组分别降低 14.44%、21.66% 和 10.85%。喷施处理后 14 d,临稻 16、郑早 10 和农垦 58 籽粒 As 含量较空白组分别降低 8.63%、7.35% 和 5.54%。不同的是,南粳 2728 籽粒 As 含量较空白组未有明显变化。说明,叶面喷施 NCSI 可以有效降低水稻籽粒中 As 含量的积累,且在不同的水稻品种中存在一定差异。



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同

图 1 叶面喷施对水稻籽粒砷吸收的影响

Fig. 1 Effects of foliar NCSI spraying on arsenic concentrations in rice grains

在本研究选用的 4 个水稻品种,籽粒 As 积累量由多至少依序为:南粳 2728 > 临稻 16 > 郑早 10 号 > 农垦 58。一般而言,As 在籽粒中积累量排序为稻壳 > 麸皮 > 糙米 > 生米 > 精米 > 熟米^[27]。在叶面喷施 NCSI 后 3 d,水稻处于灌浆前期,胚的各器官还尚未完成,稻壳和麸皮占籽粒的比重大,而随着培养时间增长,胚的各器官大体发育完成,稻壳、麸皮在籽粒中的占比逐渐减小,因而 14 d 空白组及处理组的籽粒 As 含量均低于 3 d。喷施 NCSI 3 d 后,南粳

2728、郑早 10 号和农垦 58, 处理组的籽粒 As 含量均显著低于空白组, 临稻 16 的处理组籽粒 As 含量略高于空白组, 而 4 d 后, 临稻 16 处理组籽粒 As 含量低于空白组, 说明 NCSI 降低籽粒 As 积累量的效率可能与水稻品种有关. 随着培养时间增长, 郑早 10 号和农垦 58 叶面处理组籽粒 As 含量比空白组低, 但不显著, 而南梗 2728 处理组籽粒 As 含量略高于空白组, 这可能与叶面喷施 NCSI 的次数及浓度相关, 还需进一步探究. 总体而言, 叶面喷施 NCSI 可降低灌浆期籽粒 As 积累.

2.2 叶面喷施对水稻叶片 As 吸收的影响

图 2 表示叶面喷施 NCSI 对水稻灌浆期水稻叶片 As 积累的影响. 从中可知, 随着时间的增加, 无论是空白组还是处理组, 叶面中 As 积累量均有较明显增加. 不同的是, 喷施处理之后水稻叶片中 As 含量高于空白组, 当叶面喷施处理后 3 d, 临稻 16、南梗 2728、郑早 10 和农垦 58 水稻叶片中 As 含量较空白组分别升高了 30.83%、15.29%、18.41% 和 28.57%. 喷施处理后 14 d, 临稻 16、南梗 2728、郑早 10 和农垦 58 水稻叶片中 As 含量较空白组分别升高了 1.17%、9.20%、13.21% 和 11.01%. 这说明叶面喷施处理 NCSI 在较短时间内能促进 As 的叶面累积, 随着培养时间增加到 14 d, 叶面喷施处理水稻叶片 As 的累积能力减弱. 综上, 叶片喷施 NCSI 后, 可促进 As 在水稻叶面的积累.

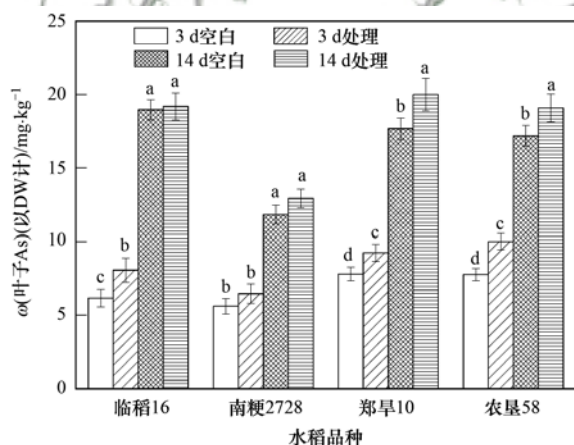


图 2 叶面喷施对水稻叶片砷吸收的影响

Fig. 2 Effects of foliar NCSI spraying on arsenic concentrations in leaves

2.3 叶面喷施对水稻茎部 As 吸收的影响

图 3 表示叶面喷施 NCSI 对灌浆期水稻茎部 As 积累的影响. 从中可知, 当叶面喷施处理后 3 d, 临稻 16、南梗 2728、郑早 10 和农垦 58 水稻茎部 As 含量较空白组分别升高了 65.91%、81.35%、34.36% 和 30.14%. 随着培养时间增加到 14 d, 临稻 16 和南梗 2728 水稻茎部 As 含量较空白组分别降低了

2.29% 和 7.27%, 相反的是, 郑早 10 号和农垦 58 水稻茎部 As 含量较空白组分别升高了 106.15% 和 75.98%. 这说明叶面喷施相同剂量的 NCSI 在短时间内能促进水稻 As 的累积. 但随着时间增加, 叶面喷施 NCSI 杂交稻品种水稻茎中 As 积累量降低, 常规稻品种水稻茎中 As 积累量升高. 这可能是由于常规稻和杂交稻经 NCSI 处理, 常规稻向茎部迁移的 As 含量较高, 多于杂交稻, 相似结果也在 Liu 等^[28] 研究中得到验证.

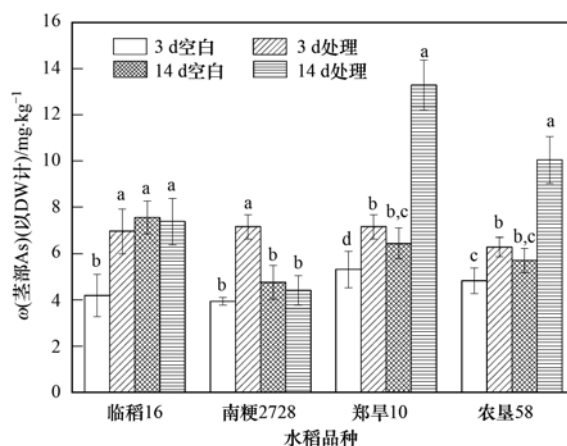


图 3 叶面喷施对水稻茎部砷吸收的影响

Fig. 3 Effects of foliar NCSI spraying on arsenic concentrations in stems

2.4 叶面喷施对水稻根部 As 吸收的影响

图 4 表示叶面喷施 NCSI 对水稻灌浆期水稻根 As 积累的影响. 从中可知, 叶面喷施 NCSI 处理后, 水稻根部 As 积累量降低. 叶面喷施处理后 3 d, 临稻 16、南梗 2728、郑早 10 和农垦 58 水稻根部 As 含量较空白组分别降低了 1.12%、7.27%、18.18% 和 22.79%. 随着培养时间的增加, 无论是空白组还是叶面处理组, 水稻根部 As 积累量均有较明显升高, 且叶面喷施 NCSI 处理不同水稻品种根部 As 含量低于空白组, 临稻 16、南梗 2728、郑早 10 和农垦 58

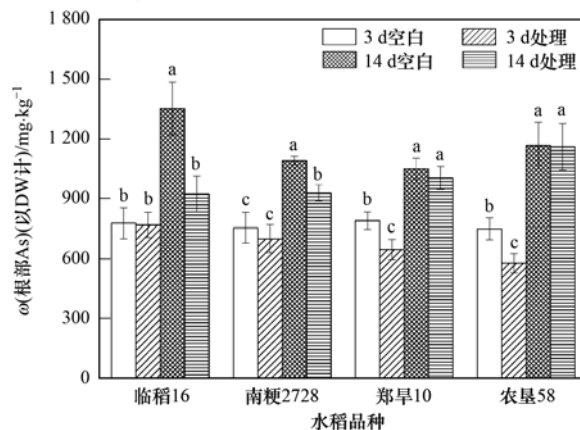


图 4 叶面喷施对水稻根部砷吸收的影响

Fig. 4 Effects of foliar NCSI spraying on arsenic concentrations in roots

水稻茎部 As 含量较空白组分别降低了 31.75%、14.86%、4.24% 和 0.43%。综上,叶面喷施 NCSI 后可降低水稻根部对 As 吸收。

由图 4 可知,4 个水稻品种根部 As 含量,3 d 和 14 d 时,叶面处理组均低于空白组,不同点在于,14 d 杂交稻叶面处理组根部 As 含量显著低于空白组,而常规稻叶面处理组根部 As 含量较空白组虽下降,但下降量不显著。这可能导致常规稻根部可往上迁移的 As 含量比杂交稻多,因而出现叶面喷施 NCSI 杂交稻品种水稻茎中 As 积累量降低,常规稻品种水稻茎中 As 积累量升高这一现象。

2.5 叶面喷施对水稻 As 转运系数的影响

图 5 表示叶面喷施对水稻根、茎、叶和籽粒之间 As 转运系数的影响。图 5(a) 显示,随着培养时间增加到 14 d,叶面喷施 NCSI 不同水稻叶片 As 向籽粒的迁移系数较空白组低,这进一步说明叶面喷施 NCSI 能有效降低 As 从叶片向籽粒的迁移,并在叶片中累积。图 5(b) 显示叶面喷施 NCSI 后 3 d,4 个品种水稻茎部 As 向籽粒迁移系数均显著下降,随着培养时间增加到 14 d,南梗 2728 叶面喷施 NCSI 组茎部 As 向籽粒迁移系数略高于空白组,其余 3 个品种水稻叶面处理组均低于空白组,说明叶面喷施 NCSI 可有效降低水稻茎部 As 向籽粒迁移。图 5(c) 显示,叶面喷施后 3 d,叶面喷施 NCSI 能有效降低 As 从茎部向叶片的迁移,然而在喷施 NCSI 14 d 之

后,不同水稻品种茎部 As 向叶片的迁移表现出差异性,其中,南梗 2728 和临稻 16 两个水稻品种的茎部 As 向叶的迁移系数较空白组高,而郑早 10 和农垦 58 两个水稻品种的茎部 As 向叶的迁移系数较空白组低。由图 5(d) 可知,叶面喷施 NCSI 促进水稻根部 As 向茎的迁移。综上,叶面喷施 NCSI 可有效降低 As 往籽粒迁移。

2.6 叶面喷施对水稻叶面抗氧化防御系统的影响

图 6 表示叶面喷施 NCSI 对水稻叶片抗氧化防御系统的影响。由图 6(a) 可知,叶面喷施处理后 3 d,临稻 16、南梗 2728、郑早 10 和农垦 58 水稻叶片 SOD 酶活性较空白组分别升高了 25.79%、4.01%、26.16% 和 5.73%。叶面喷施处理后 14 d,临稻 16、南梗 2728、郑早 10 和农垦 58 水稻叶片 SOD 酶活性较空白组分别升高了 24.83%、3.03%、20.99% 和 54.08%。同时,由图 6(b) 可知,叶面喷施处理后 3 d,临稻 16、南梗 2728、郑早 10 和农垦 58 水稻叶片 CAT 酶活性较空白组分别升高了 27.26%、8.23%、91.17% 和 14.11%。叶面喷施处理后 14 d,临稻 16、南梗 2728、郑早 10 和农垦 58 水稻叶片 CAT 酶活性较空白组分别升高了 121.23%、12.01%、2.33% 和 12.69%。

由图 6(c) 可知,叶面喷施处理后 3 d,临稻 16、南梗 2728、郑早 10 和农垦 58 水稻叶片 GSH 含量较空白组分别升高了 21.03%、40.83%、3.65% 和

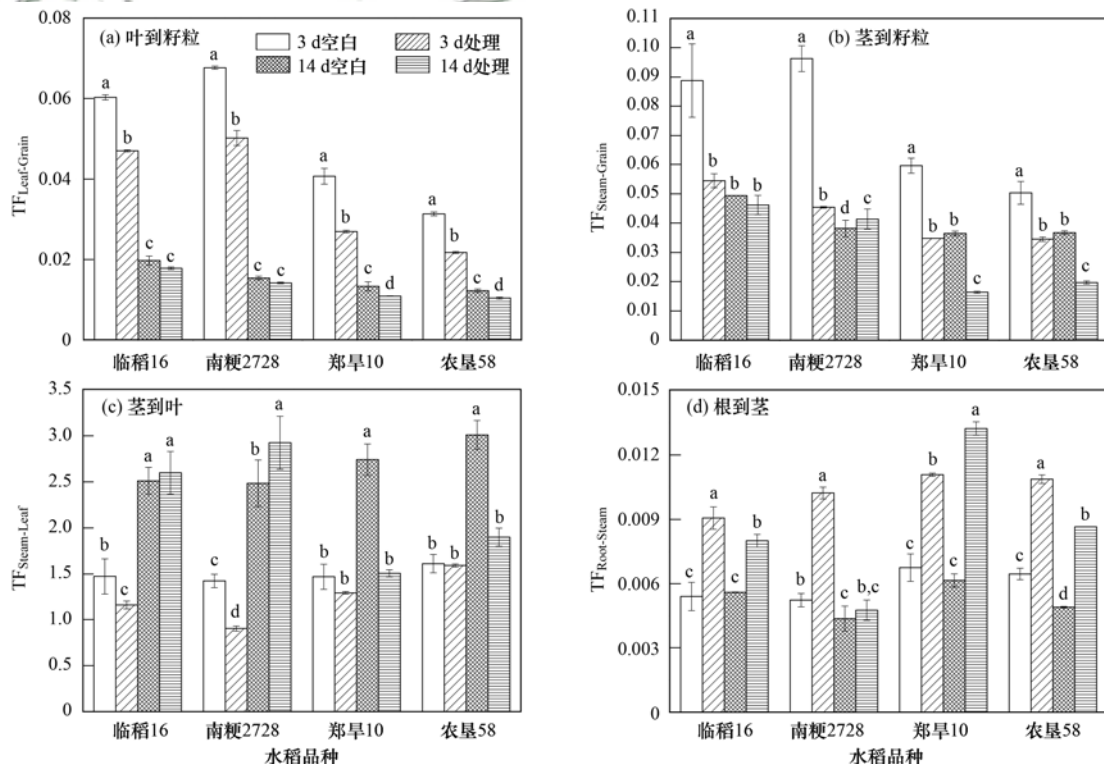


图 5 叶面喷施对水稻根、茎、叶和籽粒之间转运系数的影响

Fig. 5 Effects of foliar NCSI spraying on transfer coefficient between roots, stems, leaves and rice grains

49.22%。叶面喷施处理后 14 d, 临稻 16、南粳 2728、郑早 10 和农垦 58 水稻叶片 GSH 含量较空白组分别升高了 3.16%、40.62%、0.65% 和 4.36%。综上, 相较于空白组, 叶面喷施 NCSI 可提高 SOD、CAT 酶活性和 GSH 质量摩尔浓度, 即可提高受 As(V) 胁迫水稻叶片酶活性, 提高抗氧化防御能力从而减轻氧化应激, 缓解 As(V) 毒性。

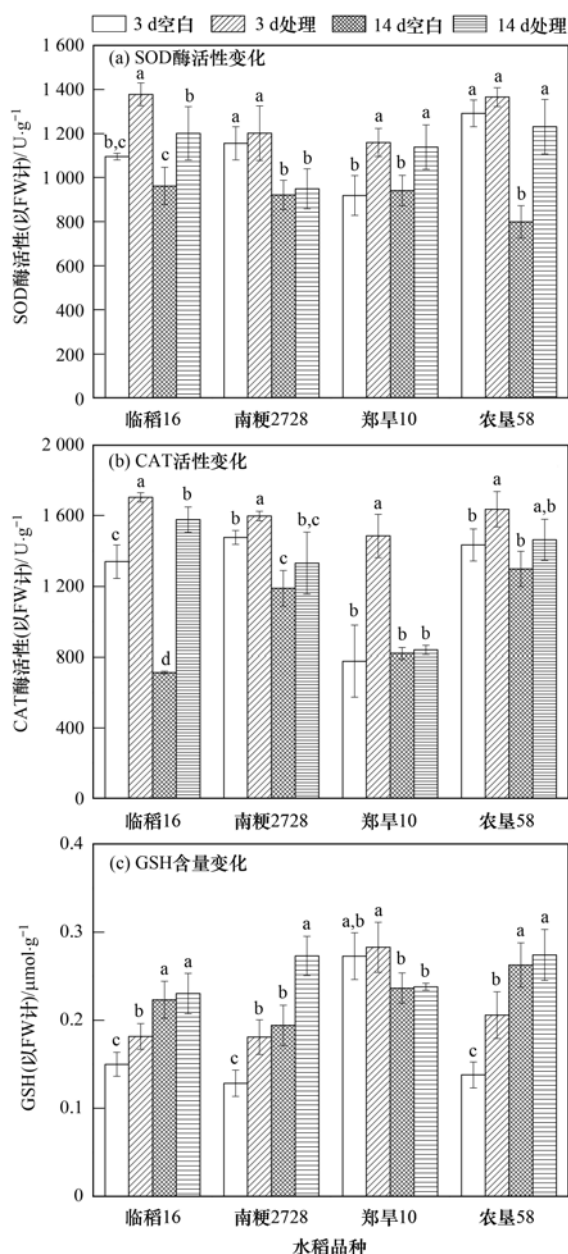


图6 叶面喷施对水稻叶面抗氧化系统的影响

Fig. 6 Effects of foliar NCSI spraying on the change in antioxidant system of rice leaves

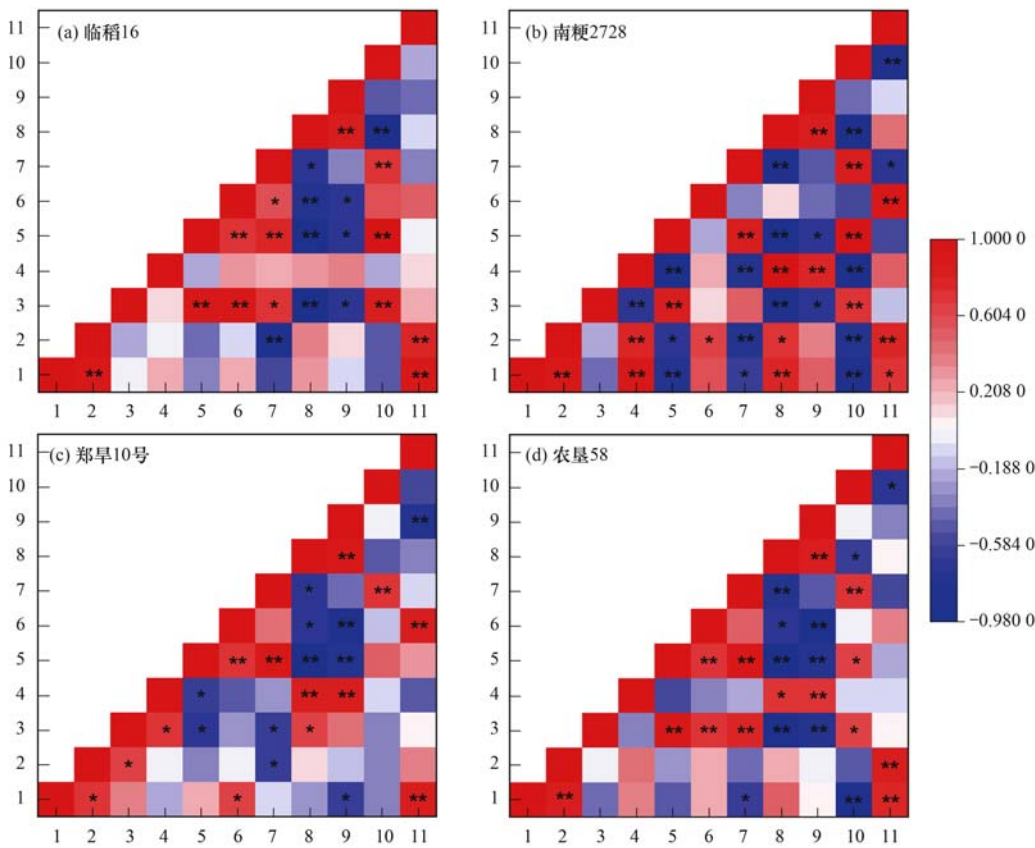
2.7 相关性分析

图7表示叶面喷施处理后的14 d, 4个品种水稻 SOD 酶活性、CAT 酶活性、GSH、 ω (籽粒 As)、 ω (叶片 As)、 ω (茎部 As)、 ω (根部 As)、 $TF_{\text{leaf-grain}}$ 、 $TF_{\text{stem-grain}}$ 、 $TF_{\text{stem-leaf}}$ 和 $TF_{\text{root-stem}}$ 之间的相关性。从中可知, 4个品种水稻叶片 SOD 酶活性与 CAT 酶活

性均表现为显著正相关。这说明 NCSI 喷施可增强 SOD 酶与 CAT 酶在植物抗氧化酶促防御系统中协同作用, SOD 酶通过清除植物体内 ROS 并生成毒性较低的 H_2O_2 , CAT 酶则进一步将 H_2O_2 分解^[29]; 在植物细胞中, GSH 可通过还原 As(V) 为 As(III) 并将其螯合在液泡中, 从而降低 As 对植物的胁迫, GSH 质量摩尔浓度的高低可一定程度上反映出细胞解毒作用^[30,31]。临稻 16、南粳 2728 和农垦 58 叶片中 GSH 质量摩尔浓度与叶子 As 含量在 0.01 水平上显著正相关, 这说明 NCSI 可提高叶片细胞中 GSH 质量摩尔浓度和 As 累积量。然而, 郑早 10 号在 0.05 水平上显著负相关, 这可能与植物品种有关。相似的, 临稻 16、南粳 2728 和农垦 58 这 3 个品种水稻 GSH 质量摩尔浓度与茎部 As 含量呈正相关, 与 $TF_{\text{stem-leaf}}$ 和 $TF_{\text{leaf-grain}}$ 呈负相关, 其中农垦 58 和临稻 16 在 0.01 水平上显著相关, 然而郑早 10 呈负相关, 这可能与上述郑早 10 号 GSH 与叶片 As 含量弱相关的原因一致, 叶面喷施 NCSI 可能存在其他机制降低郑早 10 籽粒 As 含量。综上, 通过 4 个品种水稻各指标间相关性分析可推测: 叶面喷施 NCSI 促进叶片 GSH 增加, 使更多的 As 固定在叶片中, 减少 As 向谷物的转运。

3 讨论

As 是植物正常生长发育非必需营养元素, As 可诱导植物氧化应激反应, 产生过量活性氧 (ROS) 并使 ROS 清除失衡, 从而降低光合作用, 导致气孔关闭, 改变多种酶的活性, 最终导致细胞损伤和死亡^[32]。植物通过增加抗氧化酶的产生来应对氧化应激^[33]。酶促防御系统中的 SOD 和 CAT 等几种酶可降低 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 等物质对细胞膜脂的伤害^[29]。在本研究中, 4 种水稻叶面喷施 NCSI 后, 叶片中 CAT 和 SOD 活性升高。产生这一现象的原因可能有两个。其一, 叶面喷施 NCSI 本身会导致抗氧化酶活性增加。壳聚糖诱导植物 H_2O_2 积累, 激活植物免疫系统, 导致 ROS 增加^[34]。Singh 等^[35]的研究发现, 壳聚糖可通过上调葡萄糖活性氧通道基因表达, 提高抗氧化能力。Geng 等^[36]的研究发现, 硅通过增强抗氧化剂防御能力改善受有机砷酸 (ASA) 胁迫的水稻幼苗的生长情况并减轻其氧化应激。其二, As 含量的变化也进一步诱导叶片酶促防护系统的表达^[36]。在本研究中, 叶面喷施 NCSI, 叶子 As 含量升高, 籽粒 As 含量降低, 这说明 NCSI 可抑制 As 从叶子向籽粒迁移, As 积累在叶片上, 刺激活性氧, 导致抗氧化酶增加。综上, 叶面喷施 NCSI 能诱导抗氧化酶活性的提高来增强水稻的抗氧化能力, 以清除 ROS 自由



1. SOD 酶活性, 2. CAT 酶活性, 3. GSH, 4. ω (籽粒 As), 5. ω (叶片 As), 6. ω (茎部 As), 7. ω (根部 As), 8. $TF_{\text{leaf-grain}}$, 9. $TF_{\text{stem-grain}}$, 10. $TF_{\text{stem-leaf}}$, 11. $TF_{\text{root-stem}}$; * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关; 样本数 $n = 12$

图 7 不同试验检测指标相关性分析的热图

Fig. 7 Heatmap of the correlations among different experimental factors

基,从而提高水稻对 As 耐受性,缓解 As 毒害.

水稻受重金属胁迫时,有两类抗氧化防御系统,一类为酶促防御系统,包括上述的 SOD 和 CAT 以及其他抗氧化酶,另一类为非酶促防御系统^[32]. GSH 作为非酶促防御系统中一种重要的抗氧化剂,在氧化还原信号传导和植物生长发育中发挥重要作用^[37]. 在植物抗氧化胁迫过程中,GSH 可通过改变膜蛋白巯基和二硫键化合物的含量对植物起保护作用^[31]. 本试验中,通过叶面喷施 NCSI 后,4 种水稻品种叶片处理组 GSH 含量较空白组有明显升高,表明 NCSI 大大提高了 GSH 清除 ROS 的能力,参与了水稻活性氧代谢,从而减弱了 As 对水稻的伤害.

As(V) 通过磷酸盐通道进入水稻^[38]. As(V) 进入水稻根部后,一部分通过磷酸盐协助蛋白进入木质部和韧皮部向上迁移,一部分会被还原为 As(III)^[39]. 被还原的 As(III) 部分通过 Lsi1(硅酸内流转运蛋白)外排至营养液中,部分被隔离在液泡,部分通过 Lsi2(硅酸外排转运蛋白)等协助蛋白通过木质和韧皮运输向上迁移. 在本研究中,叶面喷施 NCSI 的 4 个品种水稻根部 As 含量均低于空白组. 这一现象的原因可能有两个. 其一,壳聚糖提高水稻

生长,促进根部对营养液中的生长必需元素的吸收,如磷(P). As(V) 和 P 同时竞争磷酸盐协助蛋白,降低根部吸收 As(V). 其二,外源添加 Si 降低水稻根部吸收 As(V) 和 As(III). 添加 Si 促进水稻生长,促进水稻对营养液中 P 吸收,同时,可能减弱 As(III) 吸收转运蛋白 Lsi1 的表达,降低根部对 As 吸收^[40].

As 进入水稻根部后通过韧皮部和木质部向上迁移,到达茎叶主要通过木质部运输^[41]. 叶面喷施 NCSI,水稻茎叶 As 含量上升. 产生这一现象可能主要有 3 个方面原因. 其一,叶面喷施 NCSI 可提高茎叶对 As 耐受性. As 胁迫破坏细胞膜的完整性,影响水稻呼吸作用及叶面光合作用,危害水稻生长^[42]. 外源添加壳聚糖和硅可促进水稻幼苗生长. 有研究通过共表达网络分析(co-expression network analysis)发现^[43],施用 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 80% 脱乙酰度的壳聚糖可通过细胞核和叶绿体之间的基因表达网络促进水稻幼苗生长. 有研究通过外源添加 Si 发现^[44],Si 可通过调控受 As 胁迫水稻的基因表达,提高水稻的光合作用,提高水稻对 As 的耐受性. 研究发现^[45],受 As 胁迫下,在水稻生殖生长阶段外源添加 Si,可有效提高水稻光合作用. 其二,叶面喷施

NCSI 可调控协助 As 吸收转运蛋白的表达. 通过叶面喷施 NCSI, 根部 As 含量下降, 茎叶 As 含量较空白组上升, 这说明叶面喷施 NCSI 可抑制根部对 As 吸收, 但促进了根部向茎叶迁移. 在本试验中, 由图 5 可知, 处理组的根部向茎部的迁移系数较空白组大. 这可能是因为 NCSI 进入木质部后, 往下迁移的过程中, 促进 Lsi2 表达, 使根部的 As 往上迁移^[40,46]. 其三, 叶面喷施 NCSI 促进了叶和茎部的 GSH 和植物螯合素 (PCs) 含量, 从而使 As 固定在茎叶中. 通过相关性分析, 4 种水稻品种中, 除郑早 10 外, 其余 3 个品种水稻叶片 As 含量与 GSH 呈正相关. 叶面喷施 NCSI 提高 GSH 含量, 并间接促进了被水稻吸收的 As(V) 还原为 As(III). 一方面, GSH 直接与 As(III) 螯合, 使 As 固定在叶片中^[47]; 另一方面促进植物螯合素的增加^[47], 植物螯合素与 As(III) 螯合^[48], 从而使 As 固定在水稻叶片中, 降低 As 向水稻籽粒的迁移.

PCs 是影响水稻秸秆 As 往籽粒迁移的因素之一. 水稻对 As(V) 解毒机制之一是通过酶促或非酶促反应将 As(V) 还原为 As(III), As(III) 与 GSH 和 PCs 螯合在细胞液泡中, 从而降低 As 往上迁移. 水稻砷酸还原酶可将 As(V) 迅速还原为 As(III)^[39]. Duan 等^[49]的研究发现, 茎秆 PCs 含量与籽粒 As 积累呈负相关, 并指出通过提高促使 PCs 合成酶的表达是有效降低水稻 As 含量的有效方法之一. 在非酶促反应中, GSH 可作为还原剂被氧化为谷胱甘肽二硫化物 (GSSG), 将 As(V) 还原为 As(III)^[30]. 同时, GSH 在 As 的生物转化中发挥作用, 是植物细胞中非蛋白硫醇的主要来源之一, 以及合成金属螯合配体 PCs 所需的底物^[36]. Liu 等^[31]的研究发现, 拟南芥谷胱甘肽 (GSH) 缺失突变体 cad2-1 对 As(V) 的敏感性约为野生型的 20 倍, As 与 GSH 复合产生 As(III)-(GS)₃ 及 As 与 PCs 复合产生的 As(III)-PCs 含量降低. 在本研究中, 通过相关性分析, 水稻叶片中 GSH 含量与 $TF_{\text{leaf-grain}}$ 和 $TF_{\text{stem-grain}}$ 呈负相关. 这可能是因为 NCSI 进入叶面后, 往上迁移时促进韧皮部中 GSH 和 PCs 增加. Ye 等^[50]发现, 提高胁迫水稻 As(V) 浓度, 水稻韧皮部分泌物中检测到高浓度的 PCs. As 由茎叶向籽粒迁移通过木质部和韧皮部运输, 其中韧皮部占主导^[27]. 叶面喷施 NCSI 可能在韧皮部中促进 PCs 合成, 直接抑制籽粒 As 积累.

4 结论

(1) 在高浓度 As(V) 水培环境下, 通过叶面喷施 NCSI 处理灌浆期临稻 16、南粳 2728、郑早 10 号 and 农垦 58, 可降低籽粒和根部的 As 含量, 促进水稻

叶片 As 累积.

(2) 叶面喷施 NCSI 虽然促进了 As 从根部向茎部迁移, 但显著抑制 As 从茎部、叶片向籽粒的迁移.

(3) 叶面喷施处理 NCSI 后, 导致水稻抗氧化应激, 提高了水稻叶片 CAT 和 SOD 的活性, 以及增加了 GSH 质量摩尔浓度.

(4) 叶面喷施处理 NCSI 促进了 GSH 质量摩尔浓度以及叶片 As 含量增加, 根据相关性分析, GSH 质量摩尔浓度与叶片 As 含量显著相关, 可推断叶面喷施处理 NCSI 促进了 As 在水稻叶片的螯合, 从而抑制了 As 从叶片向籽粒的迁移.

参考文献:

- [1] Abedi T, Mojiri A. Arsenic uptake and accumulation mechanisms in rice species[J]. *Plants*, 2020, **9**(2), doi: 10.3390/plants9020129.
- [2] 钟松雄, 尹光彩, 陈志良, 等. Eh、pH 和铁对水稻土砷释放的影响机制[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2530-2537. Zhong S X, Yin G C, Chen Z L, et al. Influencing mechanism of Eh, pH and iron on the release of arsenic in paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2530-2537.
- [3] 张子叶, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻对镉和砷的吸收转运规律研究[J]. *杂交水稻*, 2020, **35**(6): 68-74. Zhang Z Y, Ji X H, Xie Y H, et al. Studies on the uptake and transport dynamics of cadmium and arsenic in rice[J]. *Hybrid Rice*, 2020, **35**(6): 68-74.
- [4] Mitra A, Chatterjee S, Moogouei R, et al. Arsenic accumulation in rice and probable mitigation approaches: a review [J]. *Agronomy*, 2017, **7**(4), doi: 10.3390/agronomy7040067.
- [5] Sahoo P K, Kim K. A review of the arsenic concentration in paddy rice from the perspective of geoscience[J]. *Geosciences Journal*, 2013, **17**(1): 107-122.
- [6] Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, et al. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals [J]. *Interdisciplinary Toxicology*, 2014, **7**(2): 60-72.
- [7] Kalita J, Pradhan A K, Shandilya Z M, et al. Arsenic stress responses and tolerance in rice: physiological, cellular and molecular approaches[J]. *Rice Science*, 2018, **25**(5): 235-249.
- [8] Pan D D, Liu C P, Yi J C, et al. Different effects of foliar application of silica sol on arsenic translocation in rice under low and high arsenite stress[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **105**: 22-32.
- [9] 王丙烁, 黄亦玫, 李娟, 等. 不同改良剂和水分管理对水稻吸收积累砷的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(8): 1835-1843. Wang B S, Huang Y W, Li J, et al. Effect of different amendments and water management on arsenic uptake and accumulation by rice in arsenic contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(8): 1835-1843.
- [10] 王建乐, 谢仕斌, 林丹虹, 等. 5 种钝化剂对镉砷污染稻田的田间修复效果对比[J]. *环境工程学报*, 2019, **13**(11): 2691-2700. Wang J L, Xie S B, Lin D H, et al. Comparative of the field remediation effect of cadmium and arsenic contaminated paddy by five passivators [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, **13**(11): 2691-2700.

- [11] Savant N K, Snyder G H, Datnoff L E. Silicon management and sustainable rice production[J]. *Advances in Agronomy*, 1996, **58**: 151-199.
- [12] Liu C P, Wei L, Zhang S R, *et al.* Effects of nanoscale silica foliar application on arsenic uptake, distribution and oxidative damage defense in rice (*Oryza sativa* L.) under arsenic stress[J]. *RSC Advances*, 2014, **4**(100): 57227-57234.
- [13] 李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 等. 硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 944-952.
- Li Y X L, Ye C C, Liu Y L, *et al.* Bioavailability of silicon fertilizer coupled water management on soil bioavailability and cumulative control of rice in compound contaminated paddy soils[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 944-952.
- [14] Wu Q H, Mou X Y, Wu H X, *et al.* Water management of alternate wetting and drying combined with phosphate application reduced lead and arsenic accumulation in rice[J]. *Chemosphere*, 2021, **283**, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.131043.
- [15] Yang X R, Wang C R, Huang Y C, *et al.* Foliar application of the sulfhydryl compound 2, 3-dimercaptosuccinic acid inhibits cadmium, lead, and arsenic accumulation in rice grains by promoting heavy metal immobilization in flag leaves[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **285**, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2021.117355.
- [16] Cui J H, Li Y D, Jin Q, *et al.* Silica nanoparticles inhibit arsenic uptake into rice suspension cells *via* improving pectin synthesis and the mechanical force of the cell wall[J]. *Environmental Science: Nano*, 2020, **7**(1): 162-171.
- [17] Das T K, Saharawat Y S, Bhattacharyya R, *et al.* Conservation agriculture effects on crop and water productivity, profitability and soil organic carbon accumulation under a maize-wheat cropping system in the North-western Indo-Gangetic Plains[J]. *Field Crops Research*, 2018, **215**: 222-231.
- [18] Puoci F, Iemma F, Spizzirri U G, *et al.* Polymer in agriculture: a review[J]. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 2008, **3**(1): 299-314.
- [19] Chouhan D, Mandal P. Applications of chitosan and chitosan based metallic nanoparticles in agrosociences-a review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, **166**: 1554-1569.
- [20] 杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 等. 壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1191-1196.
- Yang X L, Wang M X, Xu G M, *et al.* Effects of chitosan-modified biochar on formation of methylmercury in paddy soils and its accumulation in rice[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1191-1196.
- [21] Deshpande P, Dapkekar A, Oak M D, *et al.* Zinc complexed chitosan/TPP nanoparticles: a promising micronutrient nanocarrier suited for foliar application[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, **165**: 394-401.
- [22] Abdel-Aziz H M M, Hasaneen M N A, Omer A M. Nano chitosan-NPK fertilizer enhances the growth and productivity of wheat plants grown in sandy soil[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2016, **14**(1), doi: 10.5424/sjar/2016141-8205.
- [23] Tripathi P, Tripathi R D, Singh R P, *et al.* Silicon mediates arsenic tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) through lowering of arsenic uptake and improved antioxidant defence system[J]. *Ecological Engineering*, 2013, **52**: 96-103.
- [24] Wang C R, Rong H, Zhang X B, *et al.* Effects and mechanisms of foliar application of silicon and selenium composite sols on diminishing cadmium and lead translocation and affiliated physiological and biochemical responses in hybrid rice (*Oryza sativa* L.) exposed to cadmium and lead[J]. *Chemosphere*, 2020, **251**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126347.
- [25] Zhang M, Zhao Q L, Xue P Y, *et al.* Do Si/As ratios in growth medium affect arsenic uptake, arsenite efflux and translocation of arsenite in rice (*Oryza sativa*)? [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **229**: 647-654.
- [26] 施强, 王翠红, 卜思怡, 等. 湖南省典型母质水稻土剖面砷的含量及空间分布[J]. *河南农业科学*, 2021, **50**(7): 87-100.
- Shi Q, Wang C H, Bu S Y, *et al.* Arsenic content and spatial distribution in paddy soil profile of typical parent material in Hunan province[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, **50**(7): 87-100.
- [27] Suriyagoda L D B, Dittert K, Lambers H. Mechanism of arsenic uptake, translocation and plant resistance to accumulate arsenic in rice grains[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, **253**: 23-37.
- [28] Liu Z Y, Chen G Z, Tian Y W. Arsenic tolerance, uptake and translocation by seedlings of three rice cultivars[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(7): 3228-3235.
- [29] Dave R, Tripathi R D, Dwivedi S, *et al.* Arsenate and arsenite exposure modulate antioxidants and amino acids in contrasting arsenic accumulating rice (*Oryza sativa* L.) genotypes[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **262**: 1123-1131.
- [30] Mawia A M, Hui S Z, Zhou L, *et al.* Inorganic arsenic toxicity and alleviation strategies in rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **408**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124751.
- [31] Liu W J, Wood B A, Raab A, *et al.* Complexation of arsenite with phytochelatins reduces arsenite efflux and translocation from roots to shoots in Arabidopsis[J]. *Plant Physiology*, 2010, **152**(4): 2211-2221.
- [32] Pardo-Hernández M, López-Delacalle M, Martí-Guillen J M, *et al.* ROS and NO phytomelatonin-induced signaling mechanisms under metal toxicity in plants: a review[J]. *Antioxidants*, 2021, **10**(5), doi: 10.3390/antiox10050775.
- [33] Solórzano E, Corpas F J, González-Gordo S, *et al.* Reactive oxygen species (ROS) metabolism and nitric oxide (NO) content in roots and shoots of rice (*Oryza sativa* L.) plants under arsenic-induced stress[J]. *Agronomy*, 2020, **10**(7), doi: 10.3390/agronomy10071014.
- [34] Pal P, Pal A, Nakashima K, *et al.* Applications of chitosan in environmental remediation: a review[J]. *Chemosphere*, 2021, **266**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128934.
- [35] Singh R K, Soares B, Goufo P, *et al.* Chitosan upregulates the genes of the ROS pathway and enhances the antioxidant potential of grape (*Vitis vinifera* L. 'Touriga Franca' and 'Tinto Cão') tissues[J]. *Antioxidants*, 2019, **8**(11), doi: 10.3390/antiox8110525.
- [36] Geng A J, Wang X, Wu L S, *et al.* Silicon improves growth and alleviates oxidative stress in rice seedlings (*Oryza sativa* L.) by strengthening antioxidant defense and enhancing protein metabolism under arsenic acid exposure[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **158**: 266-273.
- [37] Noctor G, Mhamdi A, Chaouch S, *et al.* Glutathione in plants: an integrated overview[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2012, **35**(2): 454-484.
- [38] Cao Y, Sun D, Ai H, *et al.* Knocking out *OsPT4* gene decreases

- arsenate uptake by rice plants and inorganic arsenic accumulation in rice grains[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(21): 12131-12138.
- [39] Shi S L, Wang T, Chen Z R, *et al.* OsHAC1; 1 and OsHAC1; 2 function as arsenate reductases and regulate arsenic accumulation [J]. *Plant Physiology*, 2016, **172** (3): 1708-1719.
- [40] 张世杰, 樊利敏, 陈苗苗, 等. 叶面喷施硅调理剂对水稻砷累积及其赋存形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, **33** (4): 364-369.
- Zhang S J, Fan L M, Chen M M, *et al.* Effects of foliar silicon conditioner on the accumulation and speciation of arsenic in rice seedlings[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33** (4): 364-369.
- [41] Awasthi S, Chauhan R, Srivastava S, *et al.* The journey of arsenic from soil to grain in rice[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**, doi: 10.3389/fpls.2017.01007.
- [42] Huang F, Wen X H, Cai Y X, *et al.* Silicon-mediated enhancement of heavy metal tolerance in rice at different growth stages[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, **15**(10), doi: 10.3390/ijerph15102193.
- [43] Chamnanmanoontham N, Pongprayoon W, Pichayangkura R, *et al.* Chitosan enhances rice seedling growth via gene expression network between nucleus and chloroplast [J]. *Plant Growth Regulation*, 2015, **75**(1): 101-114.
- [44] Sanglard L M V P, Detmann K C, Martins S C V, *et al.* The role of silicon in metabolic acclimation of rice plants challenged with arsenic [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, **123**: 22-36.
- [45] Lavinsky A O, Detmann K C, Reis J V, *et al.* Silicon improves rice grain yield and photosynthesis specifically when supplied during the reproductive growth stage [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2016, **206**: 125-132.
- [46] 朱毅, 孙国新, 陈正, 等. 施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3400-3408.
- Zhu Y, Sun G X, Chen Z, *et al.* Effects of boron treatment on arsenic uptake and efflux in rice seedlings [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3400-3408.
- [47] de Souza Reis I N R, Alves de Oliveira J, Ventrella M C, *et al.* Involvement of glutathione metabolism in *Eichhornia crassipes* tolerance to arsenic[J]. *Plant Biology*, 2020, **22**(2): 346-350.
- [48] Schmööger M E V, Oven M, Grill E. Detoxification of arsenic by phytochelatin in plants[J]. *Plant Physiology*, 2000, **122**(3): 793-802.
- [49] Duan G L, Hu Y, Liu W J, *et al.* Evidence for a role of phytochelatin in regulating arsenic accumulation in rice grain [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, **71**(3): 416-421.
- [50] Ye W L, Zhang J J, Fan T, *et al.* Arsenic speciation in the phloem exudates of rice and its role in arsenic accumulation in rice grains[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **143**: 87-91.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)