生态环境知识网
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永，郜允兵，倪润祥，潘瑜春，阎跃观，杨晶，刘孝阳，顾晓鹤

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

双奖期刊

2022年9月
第43卷 第9期
Vol.43 No.9

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第9期
2022年9月15日

目 次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征 …… 陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)
面向二/三维城市形态指标的$PM_{2.5}$浓度调控模拟 …… 李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)
减排背景下成都大气$PM_{2.5}$碳质组分特征 …… 陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)
青岛秋冬季PM_1中金属元素污染特征及健康风险评估 …… 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)
港口地区大气$PM_{2.5}$中多环芳烃污染特征及来源分析 …… 王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 庹雄, 王浥铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)
天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析 …… 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)
北京市生物源一次气溶胶数浓度变化特征及影响因素 …… 梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)
北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析 …… 孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)
东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源 …… 周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠钧, 张智胜, 陶俊(4497)
生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果 …… 何品晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)
不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比 …… 武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)
沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析 …… 宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)
白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险 …… 许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)
喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子 …… 剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐(4543)
石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性 …… 陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)
不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源 …… 陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)
晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 …… 高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)
不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价 …… 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)
紫外活化过硫酸盐降解磷酸氯喹 …… 李阳, 许玻琿, 邓琳, 罗伟(4597)
微气泡臭氧化预处理实际制药废水去除SS和有机物性能 …… 刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)
废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响 …… 陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)
生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响 …… 郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)
有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含*phoD*基因细菌群落的影响 …… 夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)
煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响 …… 宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)
生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响 …… 袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)
黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化 …… 孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)
模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响 …… 翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性 …… 赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐(4684)
典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 …… 龚志伟, 马杰, 苏超, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)
作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响 …… 刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)
不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响 …… 王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)
总氮提标改造工程的微生物群落结构分析 …… 李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培基(4727)
IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析 …… 赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)
黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响 …… 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)
南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价 …… 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)
兰州市耕地"五毒"重金属的风险评价与归因分析 …… 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)
石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价 …… 孟晓飞, 郭俊姆, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)
典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价 …… 沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)
有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析 …… 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)
柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应 …… 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)
稻田落干过程砷甲基化效率变化与关键影响因素分析 …… 张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)
外源茉莉酸对水稻幼苗根系砷积累及抗逆应答效应 …… 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)
秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响 …… 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)
冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响 …… 张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)
庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测 …… 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)
小型养殖塘水体中CH_4、CO_2和N_2O浓度的时空变化特征及影响因素 …… 石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)
丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响 …… 胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)
秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征 …… 商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)
黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析 …… 张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)
植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用 …… 马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)
《环境科学》征订启事(4512) 《环境科学》征稿简则(4735) 信息(4696, 4790, 4887)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第9期 2022年9月
Vol.43,No.9 Sep.,2022

外源茉莉酸对水稻幼苗根系砷积累及抗逆应答效应

李颜, 黄益宗*, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠
(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要: 砷(As)污染对作物生长有毒害作用,导致作物品质和产量降低,因此亟需采取安全有效的策略以减轻其毒害. 采用水培法,通过荧光探针定位技术、差速离心技术和傅里叶红外光谱技术(FTIR)研究外源茉莉酸(JA)对水稻幼苗 As 积累及抗逆应答的影响. 结果表明,外源添加 JA 使水稻地下部和地上部的 As 含量分别降低 31.4% 和 51.4%,显著降低细胞壁和细胞液中的 As 含量. JA 改变亚细胞组分中 As 的分布比例,使细胞壁中 As 的分布比例提高 16.4%,细胞液中 As 的分布比例降低 17.3%,增强细胞壁对 As 的固定,减少细胞液中的 As 含量. 此外,JA 提高根细胞中 SOD、CAT、GSH 和 PEPC 的水平,降低 H_2O_2 和 MDA 含量,减轻脂质过氧化损伤,调节碳氮代谢,缓解 As 毒害. 研究为水稻 As 污染防治提供了新思路.

关键词:砷胁迫; 水稻; 茉莉酸(JA); 亚细胞分布; 抗氧化
中图分类号: X171.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)09-4831-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202111296

Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings

LI Yan, HUANG Yi-zong*, BAO Qiong-li, HUANG Yong-chun, ZHANG Sheng-nan
(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: Arsenic (As) pollution has a toxic effect on crop growth, leading to reduced crop quality and yield. Therefore, it is urgent to explore safe and effective strategies to reduce its toxicity. In this experiment, hydroponics, fluorescent probe locating technology, differential centrifugation, and Fourier infrared spectroscopy (FTIR) analysis were used to research the effect of exogenous jasmonic acid (JA) on the accumulation and stress resistance of rice seedlings. The results showed that JA application reduced the As content in the roots and shoots of rice by 31.4% and 51.4%, respectively, and significantly reduced As content in the cell wall and soluble fractions of rice roots. JA changed the distribution ratio of As in the subcellular components. The distribution ratio of As in the cell wall increased by 16.4%, and the distribution ratio of soluble fractions decreased by 17.3%. JA enhanced the fixation of As by the cell wall and reduced the As content in the soluble fraction. Furthermore, JA increased the levels of SOD, CAT, GSH, and PEPC in root cells and reduced the contents of H_2O_2 and MDA, indicating that JA reduced lipid peroxidation damage, regulated carbon and nitrogen metabolism, and alleviated As toxicity. This research provides a new approach for the prevention and control of rice As pollution.

Key words:arsenic stress; rice; jasmonic acid(JA); subcellular distribution; antioxidant

砷(As)是自然界中普遍存在的有毒类金属,严重污染全球地下水和土壤. 由于采矿、过度使用杀虫剂和污水灌溉等人类生活生产活动,使土壤中的 As 含量升高[1,2],对动植物造成危害. 在稻田土中,As 主要以无机盐的形式存在,如亚砷酸盐(As^{3+})和砷酸盐(As^{5+})[3]. As^{5+}多存在于好氧环境中,而 As^{3+}多存在于厌氧环境中[4],并且 As^{3+}的毒性远高于 As^{5+}约 30~60 倍[5]. 在植物细胞内,过量的 As 会导致植物发生不可逆转的生理、表型和遗传改变,常见有抑制种子萌发和根系生长,叶片萎黄,代谢紊乱和 DNA 受损,严重降低作物产量[6]. As 还可以通过食物链的途径进入人体,威胁人类的生命安全.

As 可与蛋白质的巯基发生反应,干扰酶和蛋白质的正常功能,从而产生毒害作用[7]. 作为具有氧化还原活性的类金属,As 还可以诱导产生过量的活性氧(ROS),造成脂质过氧化损伤[8]. 植物为缓解 As 毒害,已经进化出一系列复杂的抗氧化防御系统以减少氧化损伤. 此外,植物体内的有机酸或螯合物可以与 As 结合,例如 As 与植物螯合素(PCs)或还原性谷胱甘肽(GSH)螯合并被隔离在液泡中[9]. 因此,应当采取措施提高植物在 As 胁迫下的耐受性. 植物激素作为重要物质,不仅可以调节植物的生长发育,还能提高植物抗性以适应环境胁迫. 尽管已经明确几种与 As 耐受性相关的植物激素,但该领域仍需要深入研究.

茉莉酸(jasmonic acid, JA)是一种广泛存在于高等植物体内的脂肪酸衍生物,不仅调节植物的生长发育,而且可以提高植物的抗性[10]. 在干旱和盐胁迫下,JA 促进植物生长并提高植物调节渗透压和抗氧化酶合成的能力[11]. 适量添加 JA 可以减轻重金属对植物的伤害,例如 JA 通过提高紫花苜蓿的光合效率和减少氧化损伤减轻 Cr 毒性[12]. 外源添加 JA 可显著降低水稻和拟南芥中 Cd 积累,缓解 Cd 胁迫[13,14]. 关于 JA 缓解 As 毒害方面,有研究表明 JA

收稿日期: 2021-11-29; **修订日期**: 2022-01-11
基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1808702, 2017YFD0801500)
作者简介: 李颜(1987~),女,博士研究生,主要研究方向为重金属污染修复,E-mail: yanl811@163.com
* 通信作者,E-mail:yizonghuang@126.com

可以缓解 As 对油菜的毒害[15]. 然而,关于 JA 对 As 胁迫下水稻的作用效果还鲜见报道.

因此,本研究通过明确 JA 对水稻的生长参数、As 积累、As 亚细胞分布和抗氧化系统响应的潜在积极影响,以期助于理解 JA 对水稻 As 毒害的缓解机制,并为有效防治水稻 As 污染提供更多选择.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验的水稻供试品种为华润 2 号,购于湖南亚华种子有限公司.

亚砷酸钠,分子式为 $NaAsO_2$,分析纯; 茉莉酸(JA),化学名称为 3-氧-2-(2′-顺戊烯基)-环戊烷乙酸,分子式为 $C_{12}H_{18}O_3$,分析纯,购于梯希爱化成工业发展有限公司.

1.2 实验设计

选取饱满均匀的水稻种子,用 5% 的 H_2O_2 消毒 15 min,冲洗干净. 然后,将种子置于 28℃ 的恒温培养箱中发芽生长. 一周后,挑选长势一致的水稻幼苗转移至 1/10 的 Hoagland 培养液中,于人工气候室中生长. 人工气候室的温度控制在 28℃/22℃(白天/夜间),光周期为 16 h/8 h(明/暗),相对湿度控制在 65%. 待水稻长到三叶一心时期进行处理. 本实验中 $NaAsO_2$ 和 JA 的浓度分别为 20 μmol·L^{-1} 和 0.2 μmol·L^{-1},共设计 4 个处理,分别为:水稻幼苗在含有 0.2 μmol·L^{-1} JA 的营养液中预处理 24 h 后,继续在含有 JA 的营养液中培养 6 d,标记为 JA 处理; 水稻幼苗在含有 0.2 μmol·L^{-1} JA 的营养液中预处理 24 h,再加入 20 μmol·L^{-1}的 As^{3+} 作胁迫处理,在含有 JA 和 As^{3+} 的营养液中培养 6 d,标记为 JA + As 处理; 水稻幼苗在 20 μmol·L^{-1}的 As^{3+} 营养液中胁迫处理 6 d,标记为 As 处理; 正常营养液培养 7 d 的水稻幼苗为 CK 处理. 每 3 d 更换一次营养液,每个处理 3 次重复,完全随机区组排列.

1.3 测量指标

1.3.1 水稻幼苗生物量的测定

将收获后的水稻幼苗分为地下部和地上部,称鲜重,用刻度尺测量根长和株高. 每个处理测量 6 棵.

1.3.2 As 含量测定

将收获后的水稻幼苗置于烘箱中, 105℃ 杀青 30 min,然后 75℃ 烘干至恒重. 称取 0.25 g 植株样品于消煮管中,加入 7 mL 硝酸(优级纯),置于 110℃ 的消煮炉中消煮 4 h,赶酸,定容,过滤,得待测液. 用双道原子荧光光度计(AFS-9760)测定 As 含量,测定过程中用标准物质[GBW07603(GSV-2)]进行质量控制.

1.3.3 亚细胞中 As 含量分布测定

根据 Wan 等[16] 和 Wang 等[17] 的方法将水稻幼苗的亚细胞组分分为细胞壁、细胞液和细胞器这 3 部分. 称取适量的水稻根在 4℃ 预冷的提取液[250 mmol·L^{-1} 蔗糖, 1 mmol·L^{-1} 二硫赤藓糖醇和 50 mmol·L^{-1} Tris 缓冲液 (pH 7.5)]中匀浆. 然后,将匀浆液在3 000 *g* 下离心 5 min,收集底部沉淀作为细胞壁组分; 将上清液再次以 15 000 r·min^{-1}离心 40 min,收集上层清液为细胞液组分; 下层沉淀为细胞器组分. 将收集到的亚细胞组分置于 70℃ 的消煮炉上烘干,并按照 1.3.2 节的方法加酸消煮,测量各组分中 As 含量.

1.3.4 细胞壁的傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析

将细胞壁与 KBr 微粉(1∶100,质量比)混合制成片剂,选择波长在 400 ~ 4 000 cm^{-1}范围内用光谱仪(Nexus 670,Nicolet,美国)测定,用 OMNIC 32 软件进行标准化和基线校正.

1.3.5 H_2O_2 含量测定及显微观察

根据 H_2O_2 和硫酸钛反应,并在 415 nm 处具有特征吸收峰,测量 H_2O_2 的含量[18].

用 H_2O_2 特异性荧光探针 H_2DCFDA(2′,7′-二氯二氢荧光素二乙酸酯,Med Chem Express)标记水稻根尖细胞中 H_2O_2 的分布情况[19]. 将水稻样品与 10 μmol·L^{-1}的 H_2DCFDA 溶液混合,黑暗处孵育 2 h,洗去染液,用倒置荧光显微镜 (DYF-880,中国上海点应光学仪器厂)在蓝色荧光模块下观察拍照.

1.3.6 丙二醛(MDA)含量测定及细胞活力显微观察

根据 MDA 和硫代巴比妥酸(TBA)产生红色的显色反应,在 535 nm 处有特征吸收峰,测定 MDA 的含量[20].

采用 FDA(二乙酸荧光素,阿拉丁)和 PI(碘化丙啶,阿拉丁)检测细胞活力[19]. 将水稻根尖细胞用 10 mg·mL^{-1} FDA 和 5 mg·mL^{-1} PI 染色 10 min,用倒置荧光显微镜观察拍照,其中在蓝色荧光模块下观察 FDA 染色情况,在绿色荧光模块下观察 PI 染色情况.

1.3.7 酶活性的测定

参照格锐思生物提供的试剂盒对超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)以及磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)的活性进行测定.

1.3.8 GSH 含量的测定

根据 GSH 和 5,5′-二硫代-双-(2-硝基苯甲酸)反应生成黄色产物,在 412 nm 波长下有特征吸收峰,检测 GSH 的含量[21].

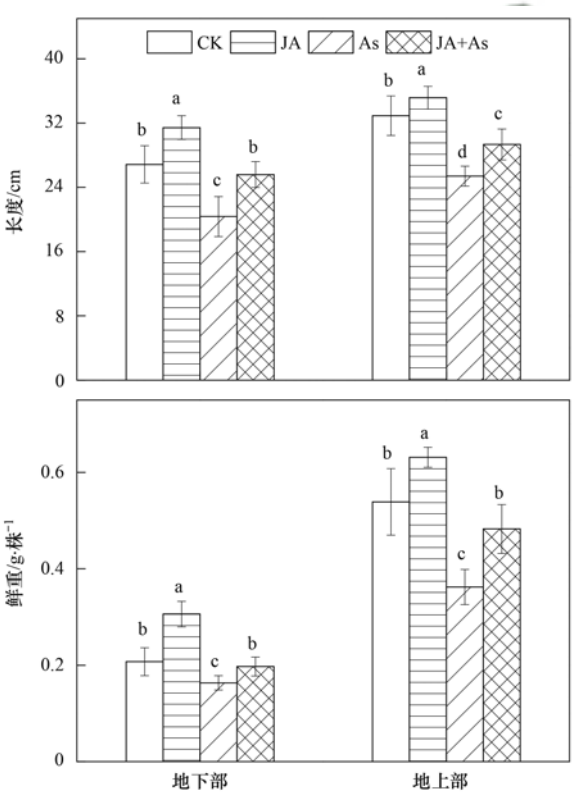
1.4　数据处理

应用 SPSS 26.0 软件统计分析数据，用 Origin 8.5 绘图. 方差分析和多重比较采用单因素(ANOVA)和 Duncan 检验，两组样本采用独立样本 T 检验. 图表中数据均用平均值 ± 标准差的形式表示.

2　结果与分析

2.1　JA 对 As 胁迫下水稻幼苗生物量的影响

图 1 为外源 JA 处理对 As 胁迫下水稻生长状况的影响. 从中可知，与 CK 相比，As 处理的幼苗在高度和鲜重方面均表现出生长抑制现象. JA 处理显著提高了水稻幼苗的生物量. 在 As 胁迫下，添加 JA 使水稻地下部和地上部的长度分别增加了 25.7% 和 15.6%，使水稻地下部和地上部的鲜重分别增加了 20.8% 和 33.2%.



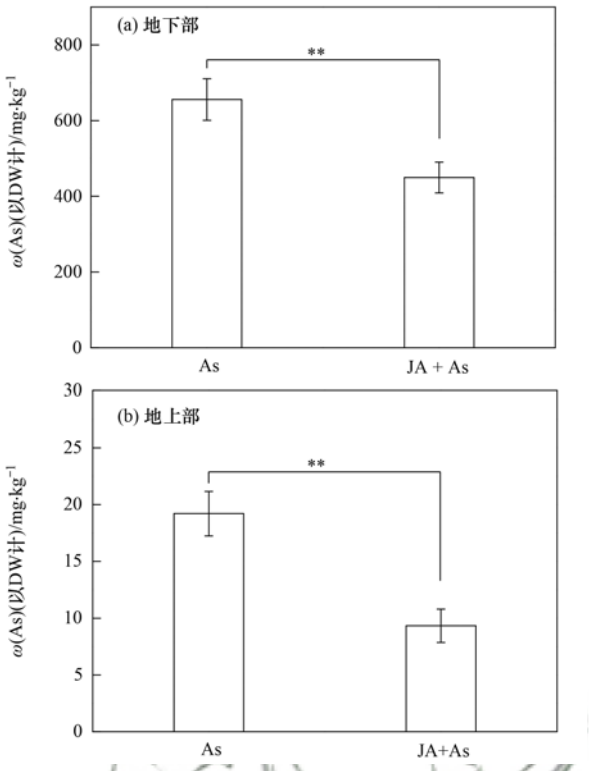
不同小写字母表明 4 种处理之间的显著差异($P<0.05$)

图 1　外源 JA 对 As 胁迫下水稻幼苗长度和重量的影响

Fig. 1　Effects of exogenous JA on the length and weight of rice seedlings under As stress

2.2　JA 对水稻幼苗中 As 含量的影响

通过测定水稻地下部和地上部的 As 含量，明确外源 JA 是否影响水稻对 As 的吸收累积. 如图 2 所示，外源添加 JA 显著降低了水稻体内 As 含量. 在 As 胁迫下，与未添加 JA 的处理相比，JA 处理使水稻地下部和地上部的 As 含量分别降低了 31.4% 和 51.4%.



** 表示通过独立样本 T 检验在 $P<0.01$ 条件下有显著性差异

图 2　外源 JA 对水稻幼苗地下部和地上部中 As 含量的影响

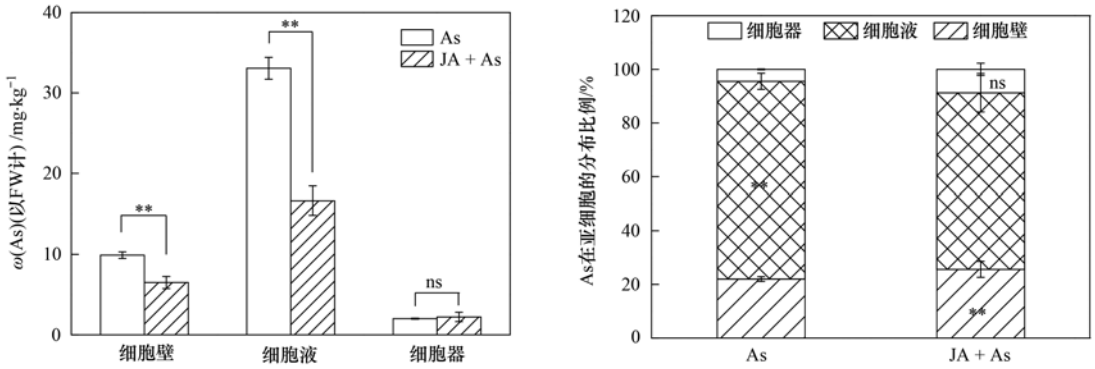
Fig. 2　Effects of exogenous JA on As concentrations of rice roots and rice shoots

2.3　JA 对水稻幼苗根系中 As 亚细胞分布的影响

As 被水稻吸收后，主要是积累在根部. 通过差速离心法，将水稻根系分成细胞壁、细胞液和细胞器这 3 个组分. 通过测定每个组分中的 As 含量，明确 JA 对水稻根中 As 亚细胞分布的调控. 由图 3 可知，在 As 胁迫下，As 大部分都积累在细胞液中，约占 60.8%. 添加 JA 处理后，细胞壁和细胞液中的 As 含量显著降低，但对细胞器中的 As 含量没有显著影响. JA 改变了 As 在水稻根系亚细胞中的分布比例，使 As 在细胞壁中的分布比例提高了 16.4%，在细胞液中的分布比例降低了 17.3%.

2.4　JA 对水稻根细胞壁中官能团的影响

为了明确 JA 是否提高细胞壁固定 As 的能力以及 JA 对细胞壁主要化学功能的影响，对水稻根部的细胞壁进行了 FTIR 光谱分析(图 4). 结果表明，在 As 胁迫下，水稻根细胞壁仅有少量吸收峰出现，而添加 JA 不仅提高了主峰的强度，而且有新峰产生. 在波数3 414 cm^{-1}和2 919 cm^{-1}处的吸收峰是有来自碳水化合物中的—OH 和来自果胶中饱和的C—H 存在[22]. 在波数1 636 cm^{-1}处的吸收峰是有C═O 官能团的存在[19]. 波数1 053 cm^{-1}处的峰值对应来自纤维素或碳水化合物链中的 C—O 和 C—C 官能团[23]. 与 As 处理相比，JA + As 处理使细胞壁中出



** 和 ns 分别代表通过独立样本 T 检验在 $P<0.01$ 条件下有显著性差异及处理之间无显著性差异

图 3 外源 JA 对水稻幼苗根系亚细胞组分中 As 含量和分布比例的影响

Fig. 3 Effects of exogenous JA on As concentrations and distribution ratio in the subcellular fractions of rice roots

现位于波数1 515 cm^{-1}的吸收峰,代表有来自酰胺Ⅱ带的 N—H 键产生[24]; 位于波数1 249 cm^{-1}和1 378 cm^{-1}处的吸收峰对应纤维素中饱和的C—H[25]. 表明 JA 增加了细胞壁中 As 的结合位点,提高了细胞壁对 As 的固定能力.

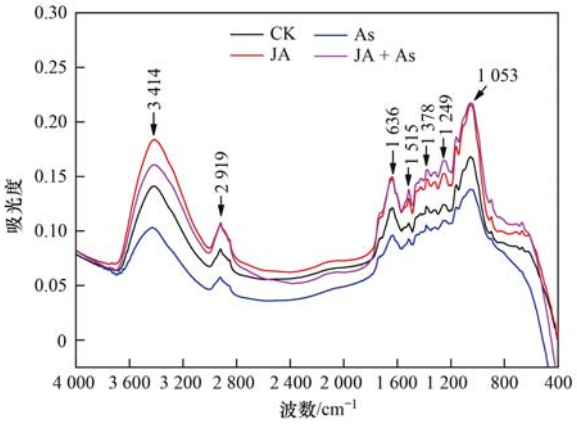


图 4 水稻根细胞壁的 FTIR 光谱图(4 000 ~ 400 cm^{-1})

Fig. 4 FTIR spectra (4 000-400 cm^{-1}) of the cell wall in the rice roots

2.5 外源 JA 对 As 胁迫下水稻根系细胞损伤的影响

通过测定H_2O_2含量、MDA 含量和细胞活力,明确 As 胁迫下根细胞中的氧化应激反应以及 JA 处理对根细胞损伤的缓解作用. 用 H_2DCFDA 荧光探针对水稻根细胞中的H_2O_2进行定位,结果表明,As 胁迫时,水稻根细胞产生强烈的绿色荧光,而 JA 处理可明显降低水稻根细胞的荧光强度(图 5). 检测水稻根细胞中H_2O_2的含量,其结果同荧光定位一致. As 处理的水稻根细胞中H_2O_2含量是 CK 处理的 3.1 倍,但是与 As 处理相比,JA + As 处理的根细胞中的H_2O_2含量降低了 54.7%(图 6). MDA 含量可指示水稻根细胞中膜脂过氧化损伤程度. 在 As 胁迫下,水稻根系中 MDA 含量是 CK 处理的 2.2 倍,而 JA 处理使水稻根系中 MDA 含量降低了 41.3%(图 7). 此外,通过 FDA-PI 双染观察到,CK 和 JA 处理的水稻根系展现出清晰的绿色荧光,表明水稻根细胞活力强盛; As 处理显著增强了水稻根中红色荧光的强度,表明有部分死细胞的产生,细胞活力下降; 和 As 处理相比,JA + As 处理降低了根细胞中的红色荧光强度,提高了水稻根细胞的活力(图 8). 结果表明,JA 有助于缓解 As 诱导产生的氧化损伤,提高细胞活力,缓解 As 毒害.

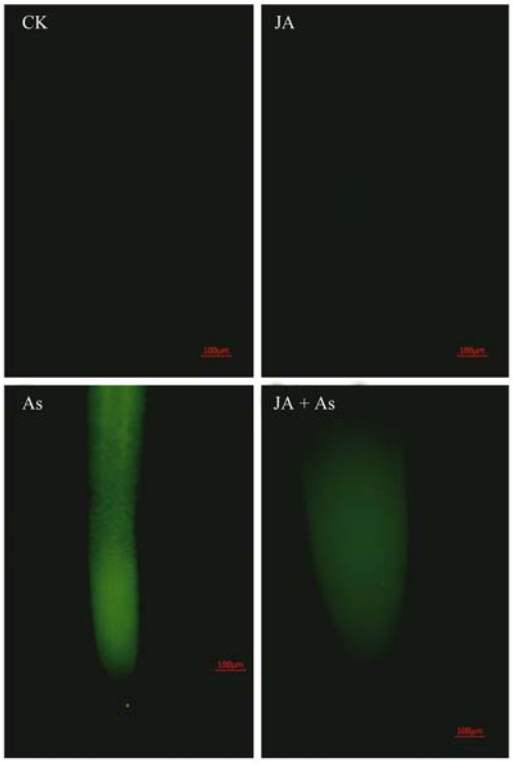
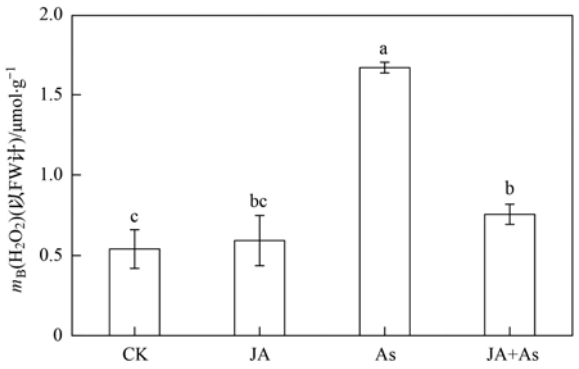


图 5 不同 JA 和 As 处理下水稻幼苗根细胞中H_2O_2的荧光染色图

Fig. 5 Fluorescence images of H_2O_2 in the root cells of rice seedlings under different JA and As treatments

2.6 外源 JA 对 As 胁迫下水稻根系抗氧化及代谢的影响

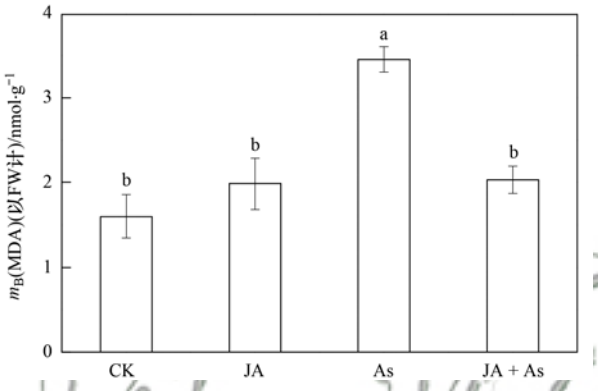
图 9 为 JA 对在 As 胁迫下水稻根系 SOD 活性、CAT 活性、GSH 含量和 PEPC 活性的影响. 与 CK 处理相比,单独 As 处理的根中 SOD 和 CAT 活性显著



不同小写字母表明 4 种处理之间的显著差异($P<0.05$)

图 6　外源 JA 对 As 胁迫下水稻幼苗根细胞中H_2O_2含量的影响

Fig. 6　Effects of exogenous JA on H_2O_2 content in root cells of rice seedlings under As stress



不同小写字母表明 4 种处理之间的显著差异($P<0.05$)

图 7　外源 JA 对 As 胁迫下水稻幼苗根细胞中 MDA 含量的影响

Fig. 7　Effects of exogenous JA on MDA content in root cells of rice seedlings under As stress

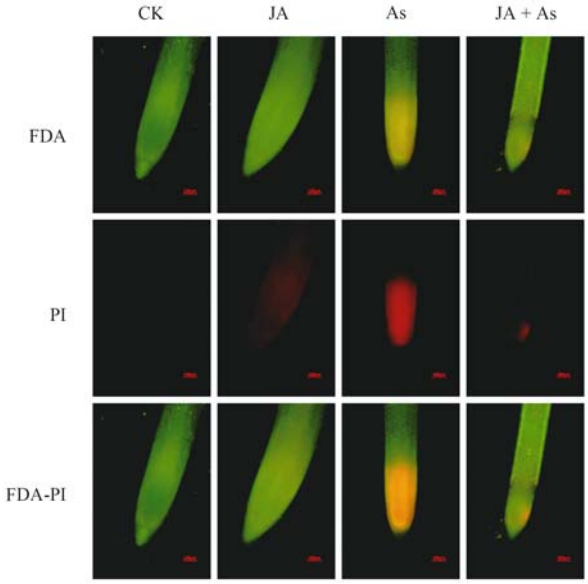


图 8　不同 JA 和 As 处理下水稻幼苗根细胞中的 FDA-PI 双染荧光图

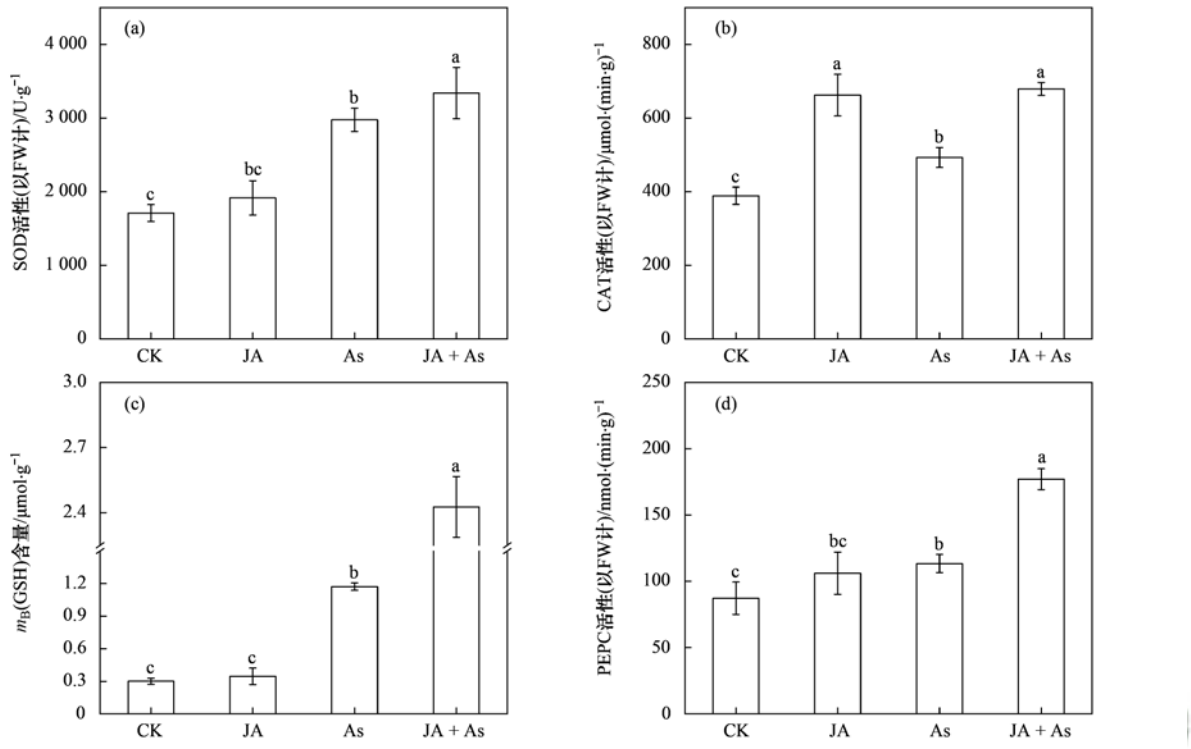
Fig. 8　FDA-PI double-stained fluorescence images in rice seedling root cells under different JA and As treatments

提高,分别提高了 74.1% 和 26.6%. 说明水稻细胞通过提高抗氧化酶的活性缓解 As 诱导的氧化损伤. 外源添加 JA,进一步提高了水稻根细胞中抗氧化酶的活性. 与 As 处理相比,JA + As 处理中水稻根中 SOD 和 CAT 的活性提高了 12.3% 和 37.9% [图 9(a)和 9(b)]. 此外,GSH 作为一种重要的抗氧化剂,可维持植物细胞氧化还原稳态. 从图 9(c)可以看出,As 处理的水稻根系中 GSH 含量是 CK 处理中的 3.9 倍. JA + As 处理的根中 GSH 含量是 As 处理的 2.1 倍. PEPC 属于羧基裂解酶,在呼吸作用、光合作用和物质代谢等方面有重要的作用. 与 CK 处理相比,As 处理的根中 PEPC 的活性显著提高,提高了 30.0%. 外源添加 JA,进一步提高了水稻根系 PEPC 的活性. 与 As 处理相比,JA + As 处理的水稻根中 PEPC 活性提高了 56.12% [图 9(d)]. 以上数据表明,茉莉酸可以提高水稻根细胞的抗氧化防御水平,改变碳氮代谢,从而提高植物的抗性.

3　讨论

近年来,JA 在植物抗性方面的应用受到越来越多的关注. JA 不仅可以调节种子萌发和幼苗生长,还可以提高植物对极端温度、干旱、重金属和盐等多种环境胁迫的抵抗力. 有研究表明在铁皮石斛叶片中,JA 可能作为信号分子,促进黄酮类生物合成,有助于植物适应盐胁迫[26]. 高温胁迫时,外源添加 JA 减轻高温对番茄的毒害[27]. 关于 JA 在响应植物重金属胁迫方面,有研究发现 JA 提高大豆在镍胁迫下的适应性[28],缓解铜对小麦的毒害[29],以及通过提高番茄体内花青素和酚类等物质的含量增强番茄对铅的耐受性[30]. 然而关于 JA 如何缓解水稻幼苗 As 胁迫的研究还很少.

与正常条件下生长的水稻幼苗相比,As 胁迫下水稻幼苗的鲜重和高度明显受到抑制,这与已有的研究结果一致[31]. 然而,在水稻 As 胁迫前添加 JA,水稻生长抑制情况得到显著缓解,生物量显著增加(图 1). 通过测量水稻地上部和地下部 As 含量发现,大部分 As 积累在水稻根部,水稻根部 As 含量是地上部的 34.1 倍(图 2). JA 预处理降低了水稻地上部和地下部中 As 含量. 细胞壁和液泡是植物抵抗重金属胁迫的重要防线[32]. 通过分析水稻根系中 As 亚细胞分布发现,As 含量的顺序为:细胞液 > 细胞壁 > 细胞器. 细胞壁是阻止 As 进入细胞的第一道防线. 在 As 胁迫下,22.0% 的 As 分布在细胞壁中,60.8% 的 As 分布在细胞液中(图 3),这是因为细胞壁对 As 的固定能力有限,当 As 浓度过高时,大部分 As 流入原生质体. 通过计算 As 在细胞组分的分布比例发现,JA 处理提高了细胞壁中 As 的分布比例,降低了细胞液中 As 的分布比例(图 3). 水稻根细胞



不同小写字母表明 4 种处理之间的显著差异($P < 0.05$)

图 9 JA 对 As 胁迫下水稻根系 SOD 活性、CAT 活性、GSH 含量和 PEPC 活性的影响

Fig. 9 Effects of MT on of SOD activities, CAT activities, GSH content, and PEPC activities in rice roots under As stress

壁的 FTIR 光谱图显示,JA 增加了细胞壁中 As 结合位点(图 4),增强了细胞壁对 As 的固定能力,从而降低水稻根系中 As 的含量. 有研究表明,水稻中 As 通过 Lsi1 和 Lsi2 转运蛋白进入根细胞,一部分 As 立即通过 Lsi1 蛋白的双向通道排出体外,一部分则向地上部分转运[2]. 这可能是由于 JA 通过调控相关基因的转录来影响水稻对 As 的吸收和积累,这一点仍有待深入研究.

在水稻细胞中,过量的 As 会导致产生大量的 ROS,其中 H_2O_2 是主要的非自由基类 ROS. 适当的 H_2O_2 对植物细胞的生理代谢和信号传导是必不可少的,而过量的 H_2O_2 会对细胞膜造成严重的损害[33]. 本研究中,As 胁迫导致水稻根细胞内 H_2O_2 和 MDA 大量积累,降低了细胞活力(图 6 和图 7). 已经证实 As 胁迫会对其他植物造成氧化损伤,例如卷心菜[34]、小油菜[35]和拟南芥[36]. 然而,JA 处理显著降低 H_2O_2 和 MDA 的含量,并提高水稻根系在 As 毒害下的细胞活力. 有研究发现,在 As 胁迫的早期阶段,异常高水平的 ROS 会启动细胞内抗氧化反应,包括改变酶水平(例如 SOD 和 CAT). 随着过量 ROS 的积累,则进入氧化抑制阶段,并被抗氧化防御消除. 最后,在抗氧化恢复阶段,由于抗氧化剂的持续作用,ROS 被清除,MDA 水平和机体各项生理功能逐渐恢复[37]. SOD 和 CAT 是酶促系统中消除 ROS 的关键防线,其中 CAT 酶能催化 H_2O_2 分解生成水和氧. 在 As 处理下,水稻根系中 SOD 和 CAT 的活性显著提高,且 JA + As 处理进一步提高了 SOD 和 CAT 的活性,这说明 JA 参与酶促反应,减少 ROS 的积累,降低细胞的氧化损伤[图 9(a)和 9(b)]. As 胁迫时,水稻根细胞内 GSH 含量明显增加[图 9(c)],说明水稻通过提高体内 GSH 水平缓解 As 诱导的损伤. 外源添加 JA 使水稻在 As 胁迫时生成更多的 GSH. GSH 不仅可以清除细胞内的 ROS[38],也是 As-GSH 循环的重要组成部分,可以螯合液泡中的重金属并发挥解毒作用[39]. 因此,JA 在提高植物抗氧化系统防御 As 诱导氧化损伤方面发挥重要的作用. 此外,PEPC 可通过调控谷胱甘肽 S-转移酶,改变碳氮代谢,在高等植物的碳氮代谢中起关键作用[40]. JA 处理提高 As 胁迫时水稻细胞内 PEPC 的活性[图 9(d)],说明 JA 参与了 As 胁迫时水稻细胞的代谢调控,然而这一过程的具体机制,还有待深入研究.

4 结论

(1)外源添加 JA 可有效缓解 As 胁迫产生的生长抑制,降低水稻中地下部和地上部的 As 含量,降幅分别为 31.4% 和 51.4%; 显著降低水稻根系亚细胞组分中细胞壁和细胞液中的 As 含量,提高细胞壁中 As 的分布比例,增强细胞壁对 As 的固定能力.

(2)外源添加 JA 提高水稻幼苗根系细胞中

SOD、CAT、GSH 和 PEPC 的水平，抑制H_2O_2和 MDA 的产生，减轻 As 诱导的氧化损伤，调控碳氮代谢过程，缓解 As 毒性.

参考文献：

[1] 郑顺安，刘代丽，倪润祥，等. 污染农田水稻中砷的积累与形态组成特点及其影响因素研究[J]. 江西农业学报，2021，**33**(4)：1-8.
Zheng S A，Liu D L，Ni R X，*et al*. Arsenic accumulation，speciation characteristics in rice plant in lead zinc mine polluted farmland and its influencing factors [J]. Acta Agriculturae Jiangxi，2021，**33**(4)：1-8.

[2] Abedi T，Mojiri A. Arsenic uptake and accumulation mechanisms in rice species[J]. Plants，2020，**9**(2)，doi：10.3390/plants9020129.

[3] Zhao F J，Harris E，Yan J，*et al*. Arsenic methylation in soils and its relationship with microbial *arsM* abundance and diversity，and As speciation in rice [J]. Environmental Science & Technology，2013，**47**(13)：7147-7154.

[4] 王钊，杨阳，崔江慧，等. 外源硅和有机质对水稻土溶液中砷形态变化的影响[J]. 水土保持学报，2013，**27**(2)：183-188.
Wang Z，Yang Y，Cui J H，*et al*. Effects of exogenous silicon and organic matter on arsenic species in As-contaminated paddy soil solution during flooded period[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2013，**27**(2)：183-188.

[5] Rai P K，Lee S S，Zhang M，*et al*. Heavy metals in food crops：health risks，fate，mechanisms，and management [J]. Environment International，2019，**125**：365-385.

[6] 张凤琳，姚顿，杨兆光. 砷胁迫下砷在生菜中迁移转化过程及其对营养元素含量的影响[J]. 安徽农学通报，2020，**26**(5)：18-21.
Zhang F L，Yao D，Yang Z G. The migration and transformation process of arsenic and its effect on nutrient content in lettuce under arsenic stress[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin，2020，**26**(5)：18-21.

[7] Sun S K，Chen Y，Che J，*et al*. Decreasing arsenic accumulation in rice by overexpressing *OsNIP*1；1 and *OsNIP*3；3 through disrupting arsenite radial transport in roots[J]. New Phytologist，2018，**219**(2)：641-653.

[8] Tripathi P，Mishra A，Dwivedi S，*et al*. Differential response of oxidative stress and thiol metabolism in contrasting rice genotypes for arsenic tolerance [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety，2012，**79**：189-198.

[9] 杨晓娟，李春俭. 植物砷的生理和分子生物学研究进展——从土壤、根际到植物吸收、运输及耐性[J]. 植物营养与肥料学报，2010，**16**(5)：1264-1275.
Yang X J，Li C J. Progress in studying physiology and molecular biology of arsenic in plants-uptake，translocation and tolerance in the soil-rhizosphere-plant system [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science，2010，**16**(5)：1264-1275.

[10] 朱家红，彭世清. 茉莉酸及其信号传导研究进展[J]. 西北植物学报，2006，**26**(10)：2166-2172.
Zhu J H，Peng S Q. Jasmonic acid and its signal transmission [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica，2006，**26**(10)：2166-2172.

[11] 宋云，李林宣，卓凤萍，等. 茉莉酸信号传导在植物抗逆性方面研究进展[J]. 中国农业科技导报，2015，**17**(2)：17-24.
Song Y，Li L X，Zhuo F P，*et al*. Progress on jasmonic acid signaling in plant stress resistant [J]. Journal of Agricultural Science and Technology，2015，**17**(2)：17-24.

[12] Kamran M，Wang D，Alhaithloul H A S，*et al*. Jasmonic acid-mediated enhanced regulation of oxidative，glyoxalase defense system and reduced chromium uptake contributes to alleviation of chromium (Ⅵ) toxicity in choysum (*Brassica parachinensis* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety，2021，**208**，doi：10.1016/j.ecoenv.2020.111758.

[13] Lei G J，Sun L，Sun Y，*et al*. Jasmonic acid alleviates cadmium toxicity in *Arabidopsis* via suppression of cadmium uptake and translocation[J]. Journal of Integrative Plant Biology，2020，**62**(2)：218-227.

[14] 张盛楠，黄益宗，李颜，等. Cd 胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及 Cd 吸收积累的影响[J]. 环境科学，2021，**42**(4)：2040-2046.
Zhang S N，Huang Y Z，Li Y，*et al*. Effects of different exogenous plant hormones on the antioxidant system and Cd absorption and accumulation of rice seedlings under Cd stress [J]. Environmental Science，2021，**42**(4)：2040-2046.

[15] 张盛楠，黄亦玟，陈世宝，等. 不同外源物质对镉砷复合污染胁迫下油菜生理指标和镉砷积累的影响[J]. 生态学杂志，2020，**39**(7)：2214-2222.
Zhang S N，Huang Y W，Chen S B，*et al*. Effects of spraying different exogenous substances on physiological indices and cadmium and arsenic accumulation in rape under combined pollution of cadmium and arsenic [J]. Chinese Journal of Ecology，2020，**39**(7)：2214-2222.

[16] Wan Y，Wang K，Liu Z，*et al*. Effect of selenium on the subcellular distribution of cadmium and oxidative stress induced by cadmium in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science and Pollution Research，2019，**26**(16)：16220-16228.

[17] Wang K，Wang Y Q，Wan Y，*et al*. The fate of arsenic in rice plants (*Oryza sativa* L.)：influence of different forms of selenium [J]. Chemosphere，2021，**264**，doi：10.1016/j.chemosphere.2020.128417.

[18] Sun C L，Lv T，Huang L，*et al*. Melatonin ameliorates aluminum toxicity through enhancing aluminum exclusion and reestablishing redox homeostasis in roots of wheat [J]. Journal of Pineal Research，2020，**68**(4)，doi：10.1111/jpi.12642.

[19] Wu X W，Song H X，Guan C Y，*et al*. Boron mitigates cadmium toxicity to rapeseed (*Brassica napus*) shoots by relieving oxidative stress and enhancing cadmium chelation onto cell walls [J]. Environmental Pollution，2020，**263**，doi：10.1016/j.envpol.2020.114546.

[20] Zhen S，Shuai H，Xu C，*et al*. Foliar application of Zn reduces Cd accumulation in grains of late rice by regulating the antioxidant system，enhancing Cd chelation onto cell wall of leaves，and inhibiting Cd translocation in rice[J]. Science of the Total Environment，2021，**770**，doi：10.1016/j.scitotenv.2021.145302.

[21] Singh S，Husain T，Kushwaha B K，*et al*. Regulation of ascorbate-glutathione cycle by exogenous nitric oxide and hydrogen peroxide in soybean roots under arsenate stress [J]. Journal of Hazardous Materials，2021，**409**，doi：10.1016/j.jhazmat.2020.123686.

[22] Riaz M，Kamran M，Fang Y Z，*et al*. Boron supply alleviates cadmium toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) by enhancing cadmium adsorption on cell wall and triggering antioxidant defense system in roots[J]. Chemosphere，2021，**266**，doi：10.1016/j.chemosphere.2020.128938.

[23] Abidi N，Hequet E，Cabrales L，*et al*. Evaluating cell wall structure and composition of developing cotton fibers using Fourier

transform infrared spectroscopy and thermogravimetric analysis [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, **107**(1): 476-486.

[24] Yu H Y, Yang A Q, Wang K J, *et al*. The role of polysaccharides functional groups in cadmium binding in root cell wall of a cadmium-safe rice line [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, **226**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112818.

[25] Yan L, Riaz M, Liu J Y, *et al*. Boron reduces aluminum deposition in alkali-soluble pectin and cytoplasm to release aluminum toxicity[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **401**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123388.

[26] Zhang M Z, Yu Z M, Zeng D Q, *et al*. Transcriptome and metabolome reveal salt-stress responses of leaf tissues from *Dendrobium officinale*[J]. Biomolecules, 2021, **11**(5), doi: 10.3390/biom11050736.

[27] Pan C T, Yang D D, Zhao X L, *et al*. Tomato stigma exsertion induced by high temperature is associated with the jasmonate signalling pathway[J]. Plant, Cell & Environment, 2019, **42**(4): 1205-1221.

[28] Sirhindi G, Mir M A, Abd-Allah E F, *et al*. Jasmonic acid modulates the physio-biochemical attributes, antioxidant enzyme activity, and gene expression in *Glycine max* under nickel toxicity [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, **7**, doi: 10.3389/fpls.2016.00591.

[29] Li G Z, Peng X Q, Xuan H M, *et al*. Proteomic analysis of leaves and roots of common wheat (*Triticum aestivum* L.) under copper-stress conditions [J]. Journal of Proteome Research, 2013, **12**(11): 4846-4861.

[30] Bali S, Jamwal V L, Kohli S K, *et al*. Jasmonic acid application triggers detoxification of lead (Pb) toxicity in tomato through the modifications of secondary metabolites and gene expression[J]. Chemosphere, 2019, **235**: 734-748.

[31] 史书林. 水稻及拟南芥砷酸盐还原酶基因的功能研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
Shi S L. Functional analysis of arsenate reductases in rice and *Arabidopsis* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.

[32] 唐敏, 张欣, 刘燕, 等. 镉在3种乔木中的积累及其亚细胞分布和化学形态研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(6): 2440-2447.
Tang M, Zhang X, Liu Y, *et al*. Accumulation, subcellular distribution and chemical forms of cadmium in three tree species [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(6): 2440-2447.

[33] Kärkönen A, Kuchitsu K. Reactive oxygen species in cell wall metabolism and development in plants [J]. Phytochemistry, 2015, **112**: 22-32.

[34] Huang W X, Chen X W, Wu L, *et al*. Root cell wall chemistry remodelling enhanced arsenic fixation of a cabbage cultivar[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **420**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126165.

[35] 张宏祥, 李丽娟, 曾希柏, 等. 土壤接种棘孢木霉菌降低小油菜砷胁迫及其可能机理[J]. 农业资源与环境学报, 2018, **35**(2): 139-146.
Zhang H X, Li L J, Zeng X B, *et al*. Reliefs the exposure stress of soils arsenic on *Brassica campestris* L. growth and its possible mechanisms by inoculation of *Trichoderma asperellum* SM-12F1 [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, **35**(2): 139-146.

[36] Navarro C, Mateo-Elizalde C, Mohan T C, *et al*. Arsenite provides a selective signal that coordinates arsenate uptake and detoxification through the regulation of PHR1 stability in *Arabidopsis*[J]. Molecular Plant, 2021, **14**(9): 1489-1507.

[37] Byeon E, Kang H M, Yoon C, *et al*. Toxicity mechanisms of arsenic compounds in aquatic organisms[J]. Aquatic Toxicology, 2021, **237**, doi: 10.1016/j.aquatox.2021.105901.

[38] May M J, Vernoux T, Leaver C, *et al*. Glutathione homeostasis in plants: implications for environmental sensing and plant development[J]. Journal of Experimental Botany, 1998, **49**(321): 649-667.

[39] Gill S S, Anjum N A, Hasanuzzaman M, *et al*. Glutathione and glutathione reductase: a boon in disguise for plant abiotic stress defense operations [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, **70**: 204-212.

[40] Lian L, Lin Y, Wei Y, *et al*. PEPC of sugarcane regulated glutathione S-transferase and altered carbon-nitrogen metabolism under different N source concentrations in *Oryza sativa*[J]. BMC Plant Biology, 2021, **21**(1), doi: 10.1186/s12870-021-03071-w.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 9

Sep. 15, 2022

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018 ····· CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, *et al.* (4413)

Simulation of $PM_{2.5}$ Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form ····· LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, *et al.* (4425)

Characteristics of Carbonaceous Species in $PM_{2.5}$ in Chengdu Under the Background of Emission Reduction ····· CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, *et al.* (4438)

Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM_1 During Autumn and Winter in Qingdao ····· LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, *et al.* (4448)

Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric $PM_{2.5}$-bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area ····· WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, *et al.* (4458)

Size Distribution and Source Appointment of Road Particles During Winter in Tianjin ····· ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, *et al.* (4467)

Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing ····· LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, *et al.* (4475)

Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer ····· MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, *et al.* (4484)

Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer ····· ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, *et al.* (4497)

Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill ····· HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, *et al.* (4506)

Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years ····· WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, *et al.* (4513)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin ····· SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, *et al.* (4522)

Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake ····· XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, *et al.* (4532)

Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors ····· JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, *et al.* (4543)

Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City ····· CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, *et al.* (4556)

Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments ····· CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, *et al.* (4566)

Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region ····· GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, *et al.* (4576)

Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations ····· ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, *et al.* (4587)

Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate ····· LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, *et al.* (4597)

Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation ····· LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, *et al.* (4608)

Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area ····· CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, *et al.* (4616)

Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation ····· GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, *et al.* (4625)

Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and *phoD*-harboring Bacterial Community in Karst Soil ····· XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, *et al.* (4636)

Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine ····· NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, *et al.* (4647)

Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities ····· YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, *et al.* (4655)

Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River ····· SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, *et al.* (4662)

Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in *Calamagrostis angustifolia* Wetland in Sanjiang Plain ····· WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, *et al.* (4674)

Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City ····· ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, *et al.* (4684)

Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments ····· GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, *et al.* (4697)

Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials ····· LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, *et al.* (4706)

Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process ····· WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, *et al.* (4717)

Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project ····· LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, *et al.* (4727)

Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China ····· HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, *et al.* (4736)

Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau ····· HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, *et al.* (4748)

Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas ····· WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, *et al.* (4756)

Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou ····· ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, *et al.* (4767)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City ····· MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, *et al.* (4779)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil ····· SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, *et al.* (4791)

Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City ····· WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, *et al.* (4800)

Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (*Pennisetum purpureum* Schum) ····· TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, *et al.* (4810)

Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis ····· ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, *et al.* (4820)

Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings ····· LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, *et al.* (4831)

Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield ····· SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, *et al.* (4839)

Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China ····· ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, *et al.* (4848)

Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangquangou Nature Reserve ····· LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, *et al.* (4858)

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond ····· SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, *et al.* (4867)

Effect of Butyl Xanthate on Pb^{2+} and Cd^{2+} Adsorption by Soil Around a Dressing Plant ····· HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, *et al.* (4878)

Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar ····· SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, *et al.* (4888)

Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau ····· ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, *et al.* (4902)

Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation ····· MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, *et al.* (4911)