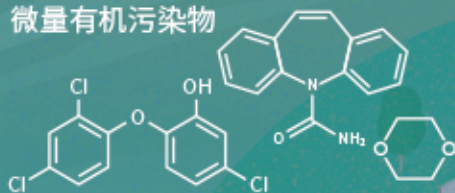


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

下游城市河湖

污水达标排放

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
南京市大气细颗粒物(PM_{2.5})中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沐, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
气溶胶中溶解性有机质(DOM)液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
基于光化学指标法的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量:以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI)的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 李诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仡, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
调理剂对磷富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅(Pb)污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制

程六龙, 黄永春*, 王常荣*, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽

(农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要: 土壤 Cd 污染对水稻种子萌发和植株生长发育都具有毒害作用, 最终可能导致稻谷产量下降及 Cd 含量超标. 本文采用种子萌发试验研究了来源于大蒜提取物的天然含硫有机化合物 S-烯丙基-L-半胱氨酸 (SAC) 缓解水稻种子幼根和幼芽 Cd²⁺ 胁迫的潜在机制. 本试验过程中选用我国南方稻区主栽水稻品种“中早 35”种子作为试验材料, 首先研究了 SAC 对水稻种子幼根和幼芽 Cd²⁺ 胁迫的缓解效应; 在此基础上, 通过研究 SAC 对种子幼根和幼芽生理生化系统及 Cd 含量影响, 探索了 SAC 缓解水稻种子幼根和幼芽 Cd²⁺ 胁迫的生理机制; 利用实时荧光定量 PCR 技术研究了 SAC 对水稻 Cd 转运蛋白编码基因表达水平的影响, 探讨了 SAC 缓解 Cd²⁺ 胁迫的分子机制. 结果表明, 当 Cd²⁺ 胁迫浓度达到 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时水稻种子幼根和幼芽发育会受到显著抑制; 当 SAC 添加浓度达到 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 幼根的总根长、根表面积和根体积与 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd²⁺ 胁迫处理组相比分别增加 173.5%、65.52% 和 37.04%; 幼根和幼芽中 CAT、SOD 活性分别增加 212.42%、110.76% 和 31.41%、47.31%; 幼根和幼芽中 MDA、GSH 含量分别降低 43.09%、34.12% 和 33.97%、35.74%; 幼根和幼芽中 Cd 含量分别降低 35.91%、28.86%. 实时荧光定量 PCR 分析结果表明, 添加 SAC 处理后 Cd 转运蛋白编码基因 *OsNramp5* 和 *OsHMA2* 的相对表达量与 Cd²⁺ 胁迫处理组相比分别显著降低了 33.38% 和 34.99%, *OsHMA3* 的相对表达量与 Cd²⁺ 胁迫处理组相比显著升高了 33.96%. 由以上试验结果可见, SAC 降低水稻幼根和幼芽 Cd²⁺ 胁迫的主要机制是 SAC 调控了 Cd 转运蛋白编码基因的表达水平, 降低了 Cd 向幼根和幼芽中的转运, 同时增加了 Cd 向液泡中的转运.

关键词: S-烯丙基-L-半胱氨酸 (SAC); 水稻; Cd 胁迫; 镉转运基因; 种子萌发

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-3037-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202010061

Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings

CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun*, WANG Chang-rong*, LIU Zhong-qi, HUANG Yi-zong, ZHANG Chang-bo, WANG Xiao-li

(Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: Cd has toxic effects on rice seed germination and plant growth, which may eventually lead to decreased yield and excessive Cd content in rice grains. The potential mechanism of S-allyl-L-cysteine (SAC), a natural sulfur compound derived from garlic extract, in alleviating Cd²⁺ stress in young roots and buds of rice seedlings was studied by a seed germination experiment. “Zhong zao 35”, one of the main rice varieties in Southern China, was selected as the test material. Firstly, the alleviating effect of SAC on Cd²⁺ stress in rice seedling roots and buds was studied. Following this, the physiological mechanism of Cd²⁺ stress alleviation by SAC was examined based on the expression of the Cd transporter coding gene using real-time fluorescent quantitative PCR. The results showed that when the Cd²⁺ stress concentration reached 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, the young roots and buds of rice seedlings were significantly inhibited, and when the SAC concentration reached 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, Cd²⁺ stress was significantly alleviated. Compared to a Cd²⁺ stress treatment group, the total root length, surface area, and volume of young roots was increased by 173.5%, 65.52%, and 37.04%, respectively; CAT and SOD activity in young roots and buds was increased by 212.42% and 110.76%, and 31.41% and 47.31%, respectively; MDA and GSH content was decreased by 43.09% and 34.12%, and 33.97% and 35.74%, respectively; and Cd content was decreased by 35.91% and 28.86%, respectively. The results of quantitative real-time PCR showed that the relative expression levels of *OsNramp5* and *OsHMA2* were significantly reduced by 33.38% and 34.99% compared with the Cd²⁺ stress group, respectively. However, the relative expression level of *OsHMA3* was significantly increased by 33.96%. From the above experimental results, the main mechanism by which SAC reduces Cd²⁺ stress in the young roots and buds of rice is via the regulation of Cd transporter-encoding genes, reducing Cd²⁺ transport to young roots and buds, and increasing transport to vacuoles.

Key words: S-allyl-L-cysteine (SAC); rice; Cd stress; cadmium transporter gene; seed germination

在人类工农业生产活动的影响下,有毒重金属镉(Cd)不断被释放到自然环境中. Cd 污染引发的环境危害已经引起世界各国的广泛关注. 2014 年,国家生态环境部和国土资源部联合发布的全国土壤污染状况调查公报显示,我国农田 Cd 点位超标率

收稿日期: 2020-10-21; 修订日期: 2020-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077153)

作者简介: 程六龙(1993~),男,硕士研究生,主要研究方向为农田重金属污染防治, E-mail: 82692619@qq.com

* 通信作者, E-mail: nylab@126.com; wangchangrong109@163.com

高达 7.0%^[1]. 相比于其它重金属元素, Cd 在土壤中具有较高的移动性^[2], 易被农作物富集并累积在可食部分^[3]. 大量研究表明, Cd 通过食物链进入人体后可以在肝、肾等器官中不断蓄积, 给人体健康造成潜在风险^[4]. 1993 年, 国际肿瘤研究协会 (IRAC) 将 Cd 定义为一级致癌物^[5]. 有研究表明, 在我国食用稻米已经成为人体 Cd 的主要来源, 占我国人群 Cd 摄入总量的 56%^[6]. Cd 污染不仅危害人体健康, 而且土壤中高浓度 Cd 还会抑制水稻种子萌发及幼苗生长, 表现为水稻生长缓慢, 根系发育受阻, 植株瘦弱鲜重和干重减轻^[7]. 此外还有报道表明, Cd 还会对水稻光合作用^[8]和蒸腾作用^[9]等生理过程造成影响, 最终导致水稻减产.

水稻不仅是我国的重要粮食作物而且也是东亚、东南亚以及南亚地区许多国家的主要粮食作物^[10]. 何俊瑜等^[11]的研究表明, 在 Cd 胁迫条件下, 水稻会应激产生大量的氧自由基, 影响体内的抗氧化酶活性, 抑制氧化磷酸化破坏细胞器的结构和功能. 杨晓蓉等^[12]的研究表明, 在 Cd 胁迫条件下水稻幼苗 MDA 含量显著升高, SOD 和 CAT 活性显著降低. 多种外源添加物均可显著缓解 Cd 胁迫作用. 王丙烁等^[13]通过外源添加褪黑素、钼酸钠和硼酸等显著缓解了 Cd 对水稻种子的胁迫作用, 促进了水稻种子萌发和幼苗的生长发育. 刘书锦等^[14]通过添加亚精胺显著缓解了 Cd 对水稻种子萌发和幼苗根系生长的胁迫效应. 在水稻生长发育的种子萌发阶段, 幼根和幼芽的生长状况会对水稻的后续生长发育和水稻产量产生重要影响^[15]. 因此, 通过种子萌发试验探究水稻幼芽时期 Cd 胁迫及缓解效应, 对缓解重金属 Cd 的毒害效应促进植株生长提高水稻产量具有重要意义.

由于 Cd 是水稻的非必需营养元素^[16], 因此在水稻体内 Cd 没有专用的转运蛋白. Cd²⁺ 主要借助其它阳离子转运蛋白实现在水稻体内的转运^[17]. Ishimaru 等^[18]的研究发现, Cd²⁺ 主要借助 Mn²⁺ 转运蛋白 OsNramp5 进入水稻根系. 当敲除编码该转运蛋白的基因后, 水稻籽粒中的 Cd 含量将显著降低, 同时 Mn²⁺ 的含量也会显著降低^[19]. Cd²⁺ 进入水稻根系后一部分在 OsHMA3 转运蛋白的作用下被转运进入液泡中^[20,21], 进一步与高分子量植物螯合素结合后被区隔在液泡中^[22], 该过程是一种植物降低 Cd 胁迫效应的重要途径. Takahashi 等^[23]的研究表明, Cd²⁺ 主要通过 Zn²⁺ 转运蛋白 OsHMA2 向水稻地上部转运. 当编码 OsHMA2 转运蛋白的基因 OsHMA2 失活后水稻幼苗地上部植株中 Cd 含量显著降低^[24]. 在种子萌发时期, 通过添加外源物调控

编码 Cd 吸收及转运蛋白基因的表达水平有可能降低幼根和幼芽中 Cd 含量并最终降低 Cd 的胁迫效应.

很早以前人们就发现大蒜具有良好的药用特性, 食用大蒜可以显著降低重金属毒性^[25]. 大蒜降低重金属对细胞的毒性主要是通过抗氧化活性并与重金属发生螯合作用^[26]. S-烯丙基-L-半胱氨酸 (S-allyl-L-cysteine, SAC) 是老化的大蒜中含量最丰富的一类具有抗氧化和抗癌活性的水溶性有机硫化物^[27]. 在大蒜体内, SAC 来源于 γ -谷氨酰转移酶催化 γ -谷氨酰-S-烯丙基半胱氨酸的生化反应^[28]. 大量的试验研究表明, SAC 可有效清除超氧阴离子 ($\cdot\text{O}_2^-$)^[29]、过氧化氢分子 (H_2O_2)^[30]、羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$)^[29]、过氧自由基 ($\text{ROO}\cdot$)^[28] 和过氧亚硝基阴离子 (ONOO^-)^[31], 还可以清除次氯酸和单线态氧 ($^1\text{O}_2$) 等^[31]. 此外, SAC 还可以防止脂质^[32] 和蛋白的氧化^[29]、硝化^[31]. SAC 是大蒜提取物中最主要的水溶性有机硫化物同时也是一种重要的重金属解毒剂^[33], 它可以穿过细胞膜降低细胞内部重金属离子的毒害作用^[34]. 但是目前尚未见有关 SAC 缓解植物重金属 Cd²⁺ 胁迫效应的报道. 本文通过在种子萌发期外源添加 SAC 研究: ①SAC 对水稻种子幼根和幼芽 Cd²⁺ 胁迫的缓解效应; ②探索 SAC 缓解水稻种子幼根和幼芽 Cd²⁺ 胁迫的潜在机制.

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验水稻品种为“中早 35”, 选取较为饱满且大小均等的种子, 于 5% 过氧化氢水溶液中浸泡消毒 20 min, 再用去离子水反复冲洗 3~4 遍, 备用.

本试验所用试剂 CdCl₂ 和 S-烯丙基-L-半胱氨酸 (SAC) 均为分析纯, 购于国药集团. 用分析天平准确称取 CdCl₂ 药品 0.183 g 溶于蒸馏水中定容至 1 000 mL, 制备成浓度为 1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的储备液, 备用. 称取 0.161 g 的 SAC 溶于蒸馏水中并定容至 1 000 mL, 制备浓度为 1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的储备液, 备用.

1.2 试验设计

1.2.1 Cd²⁺ 对水稻种子幼根发育的胁迫效应

经过消毒的种子在室温下于蒸馏水中浸种 1~2 d 后, 挑选 20 粒露白的种子置于铺有滤纸的培养皿中, 摆放整齐. 加入 10 mL 不同浓度的 CdCl₂ 处理液同时设置仅加入 10 mL 蒸馏水的空白对照处理 (CK₀). Cd²⁺ 胁迫浓度分别设置为 5、10、50、75、100、200 和 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 共 7 个不同浓度, 每个处理设置 5 个重复. 将培养皿称重并记录, 于 28℃ 生

化培养箱中在黑暗条件下进行培养,间隔 24 h 采用称重法补充蒸发的水分,7 d 后测定 Cd^{2+} 对种子根系的胁迫效应。

1.2.2 缓解 Cd^{2+} 胁迫的最佳 SAC 浓度

经消毒后的水稻种子于室温下在蒸馏水中浸种 1~2 d 后,分别挑选 20 粒露白的种子置于铺有滤纸的培养皿中,摆放整齐。SAC 处理浓度设置为 10、50、100、200 和 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 共 5 个不同浓度, CdCl_2 胁迫浓度为 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。每个处理设置 5 个重复,同时设置仅添加蒸馏水的完全空白对照样品 CK_0 和仅添加 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CdCl_2 但未经 SAC 处理的对照样品 CK。将培养皿在天秤上称重并记录,于 28℃ 生化培养箱中在黑暗条件下培养,间隔 24 h 采用称重法补充蒸发的水分,7 d 后取样,测定不同浓度 SAC 对幼根 Cd 胁迫的缓解效应。

1.2.3 SAC 对水稻种子幼根幼芽生理生化系统 Cd^{2+} 胁迫的缓解效应

经消毒的种子在蒸馏水中浸种 1~2 d 后,挑选 20 粒露白的种子置于铺有滤纸的培养皿中,摆放整齐。分别加入 10 mL 不同处理液,分别为蒸馏水对照 (CK_0)、50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 和 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 + 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC,每个处理重复 5 次。将每个培养皿称重并记录,于 28℃ 生化培养箱中在黑暗条件下培养,间隔 24 h 采用称重法补充蒸发的水分,7 d 后取样。分别测定幼根和幼芽中 MDA、GSH 含量、CAT 和 SOD 酶活性。

1.2.4 SAC 缓解水稻种子幼根幼芽 Cd^{2+} 胁迫的分子机制

经消毒的种子在蒸馏水中浸种 1~2 d 后,挑选 20 粒露白的种子置于铺有滤纸的培养皿中,摆放整齐。分别加入 10 mL 不同处理液,分别为蒸馏水对照 (CK_0)、50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 和 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 + 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC,每个处理重复 5 次。将每个培养皿称重并记录,于 28℃ 生化培养箱中在黑暗条件下培养,间隔 24 h 采用称重法补充蒸发的水分,7 d 后取样。分别测定幼根和幼芽中 Cd 含量以及 *OsNramp5*、*OsHMA3* 和 *OsHMA2* 基因的相对表达量。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 水稻种子幼根生长指标测定

在生化培养箱中于黑暗条件下 28℃ 培养 7 d 后,用剪刀将幼芽和幼根分开,采用根系扫描仪 (Epson Expression 10000XL) 测定幼根形态。扫描结果采用 WinRhizo 根系分析软件进行根系形态指标分析。

1.3.2 水稻种子幼芽和幼根生理生化指标测定

分别用剪刀分取水稻种子的幼芽和幼根,采用

试剂盒法测定幼芽和幼根样品中的 CAT 和 SOD 酶活性以及 MDA、GSH 含量。

1.3.3 水稻种子幼芽和幼根中 Cd 含量测定

分别用剪刀分取水稻种子的幼芽和幼根,在 70℃ 的烘箱中烘干。冷却至室温后,在玻璃研钵中手动研磨成粉。在分析天平上,分别称取 0.25 g 烘干后的幼根和幼芽粉末样品于消解管中,加入 MOS 级浓硝酸 7 mL 常温下浸泡隔夜。在恒温电热消解炉上于 110℃ 下高温消解至澄清透明后,去离子水转移至 25 mL 容量瓶中并定容,利用 ICP-MS 测定幼根和幼芽中的 Cd 含量^[35]。

1.3.4 Cd 转运基因相对表达量测定

用剪刀分取水稻种子的幼芽和幼根,采用 OMEGA 植物总 RNA 提取试剂盒,提取鲜样的总 RNA; 采用 HiScript® II Q RT SuperMix for qPCR (+gDNA wiper) R223 试剂盒于 PTC-100 反转录制备 cDNA; 采用 ChamQ™ Universal SUBR® qPCR Master Mix Q711 试剂盒于 Roche LightCycler 1.5 进行实时定量聚合酶链式反应。参考 Livak 等的方法^[36] 计算相对表达量,相对表达量 = $2^{-\Delta\Delta\text{CT}}$ 。扩增引物 (表 1) 由生工生物工程 (上海) 股份有限公司设计并合成。

表 1 扩增引物序列	
引物名称	5'→3'
<i>Actin1-F</i>	TCCATCTTGGCATCTCTCAG
<i>Actin1-R</i>	GTACCCTCATCAGGCATCTG
<i>OsNramp5-F</i>	AGTGGTTACAGGGAGGCATC
<i>OsNramp5-R</i>	GTCTTCTCGATAGCACCAG
<i>OsHMA2-F</i>	CATAGTGAAGCTGCCTGAGATC
<i>OsHMA2-R</i>	GATCAAACGCATAGCAGCATCG
<i>OsHMA3-F</i>	CGTCATGGCTGTCGTATGATCTG
<i>OsHMA3-R</i>	AATGGGCTGATAGAAATCGAACATG

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件进行数据计算,采用 SPSS 22 统计软件进行单因素方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 多重比较,采用 Origin 2019 绘制柱形图。文中数据以平均值 ± 标准差的形式表示。

2 结果与分析

2.1 Cd^{2+} 对水稻种子幼根发育的胁迫效应

不同浓度 Cd^{2+} 胁迫对水稻种子幼根生长发育的影响如表 2 所示。从中可知,随着 Cd^{2+} 胁迫浓度增加,水稻种子幼根生长受到的抑制作用呈现出显著 ($P < 0.05$) 增强趋势。水稻种子幼根形态测定结果表明:与蒸馏水完全对照处理组 (CK_0) 相比,50、75、100 和 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 胁迫下水稻种子总

根长分别降低了 29.26%、37.06%、57.78% 和 69.93%；根表面积分别降低了 13.39%、22.66%、34.50% 和 48.71%；根体积分别降低了 18.52%、20.37%、31.48% 和 50.00%；当 CdCl₂ 胁迫浓度达到 500 μmol·L⁻¹ 时,水稻种子萌发被完全抑制. 当

CdCl₂ 胁迫浓度低于 50 μmol·L⁻¹ 时,未对幼根发育造成显著抑制. 综上可见,当 CdCl₂ 胁迫浓度达到 50 μmol·L⁻¹ 时,幼根生长指标开始出现显著胁迫症状,为保障获得稳定的 Cd²⁺ 抑制效果,后续试验均采用该浓度 CdCl₂ 作为胁迫浓度.

表 2 Cd²⁺ 对水稻种子幼根发育的胁迫效应¹⁾

Table 2 Stress effect of Cd²⁺ on the root development of rice seedlings

CdCl ₂ 浓度 /μmol·L ⁻¹	总根长 /cm·plant ⁻¹	表面积 /cm ² ·plant ⁻¹	体积 /cm ³ ·plant ⁻¹	根尖数/个	分叉数/个
CK ₀	51.91 ± 0.91a	9.71 ± 0.33a	0.054 ± 0.0018a	157.61 ± 28.41a	110.80 ± 20.34a
5	50.90 ± 1.27a	9.16 ± 0.16ab	0.053 ± 0.0025a	139.00 ± 12.93ab	97.00 ± 5.07ab
10	47.72 ± 3.17a	8.71 ± 0.15bc	0.047 ± 0.004ab	127.00 ± 9.57bc	92.00 ± 2.93ab
50	36.72 ± 0.74b	8.41 ± 0.19b	0.044 ± 0.0039b	123.59 ± 11.25ab	87.00 ± 4.09ab
75	32.67 ± 1.88c	7.51 ± 0.31c	0.043 ± 0.0008bc	102.80 ± 4.49b	79.20 ± 3.71b
100	21.92 ± 1.10d	6.36 ± 0.16d	0.037 ± 0.0023c	83.20 ± 2.33b	73.81 ± 3.48b
200	15.61 ± 0.54e	4.98 ± 0.11e	0.027 ± 0.0002d	38.40 ± 2.46c	32.80 ± 1.59c
500	—	—	—	—	—

1) “—” 表示种子未发芽; 不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P < 0.05)

2.2 SAC 对种子幼根 Cd²⁺ 胁迫的缓解效应

不同浓度 SAC 对水稻种子幼根 Cd²⁺ 胁迫的缓解效应如表 3 所示. 当 SAC 浓度达到 200 μmol·L⁻¹ 时,对水稻 Cd²⁺ 胁迫的缓解效果最为显著 (P < 0.05). 当 SAC 浓度低于 200 μmol·L⁻¹ 时,水稻种子总根长、表面积、根体积、根尖数和分叉数等指标均随着 SAC 添加浓度的升高出现显著增加的趋势. 当 SAC 浓度达到 200 μmol·L⁻¹ 时,各项根系指

标分别恢复到 CK₀ 对照的 89.84%、86.58%、71.15%、82.03% 和 85.43%. 当 SAC 浓度继续升高达到 500 μmol·L⁻¹,根系各项指标反而出现下降趋势,分别降低到 CK₀ 的 48.00%、63.59%、51.92%、47.50% 和 63.59%. 说明添加高浓度 SAC 反而会出现抑制水稻种子幼根生长现象. 综上,选择 200 μmol·L⁻¹ 的 SAC 作为后续试验中缓解 Cd 胁迫的添加浓度.

表 3 SAC 对种子幼根 Cd²⁺ 胁迫的缓解效应

Table 3 Alleviating effect of SAC on Cd²⁺ stress in rice seed young roots

SAC 浓度 /μmol·L ⁻¹	总根长 /cm·plant ⁻¹	表面积 /cm ² ·plant ⁻¹	体积 /cm ³ ·plant ⁻¹	根尖数/个	分叉数/个
CK ₀	48.35 ± 2.50a	8.87 ± 0.24a	0.052 ± 0.0053a	128.00 ± 8.58a	71.40 ± 7.27a
CK	15.88 ± 0.75f	4.64 ± 0.09e	0.027 ± 0.0017c	35.00 ± 3.16e	35.00 ± 1.73d
10	25.59 ± 0.31de	6.91 ± 0.22c	0.032 ± 0.0014bc	62.60 ± 5.87d	52.20 ± 4.01bc
50	28.40 ± 1.49d	6.72 ± 0.25c	0.033 ± 0.0010bc	79.00 ± 3.90c	59.20 ± 2.35b
100	33.56 ± 0.66c	6.92 ± 0.20c	0.033 ± 0.0022bc	85.00 ± 3.75c	58.60 ± 3.85b
200	43.44 ± 1.83b	7.68 ± 0.30b	0.037 ± 0.0015b	105.00 ± 4.81b	61.00 ± 1.45ab
400	23.21 ± 1.11e	5.94 ± 0.23d	0.027 ± 0.0008c	60.80 ± 2.20d	45.40 ± 1.69cd

1) 不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P < 0.05)

2.3 SAC 对水稻种子幼芽和幼根生理生化系统 Cd²⁺ 胁迫的缓解效应

SAC 对 Cd²⁺ 胁迫下水稻种子幼芽和幼根生理生化系统的缓解效应如图 1 所示. 图 1(a) 可见,在 50 μmol·L⁻¹ CdCl₂ 胁迫下,水稻种子幼芽和幼根的 CAT 酶活性显著下降. 与 CK₀ 处理组相比,降幅分别为 67.91% 和 68.37%. 添加 200 μmol·L⁻¹ SAC 后,可显著提高幼根的 CAT 活性,与 50 μmol·L⁻¹ CdCl₂ 处理组相比,升幅为 212.42%,使得幼根的 CAT 活性恢复到与对照组并无显著差异水平;添加 SAC 后,幼芽的 CAT 活性也出现升高趋势,与 50

μmol·L⁻¹ CdCl₂ 处理组相比提高 31.41%,但未达到显著程度.

由图 1(b) 可见,在 50 μmol·L⁻¹ CdCl₂ 胁迫下,种子幼芽和幼根的 SOD 活性也出现显著降低. 与 CK₀ 处理组相比,降幅分别为 42.14% 和 61.84%. 添加 200 μmol·L⁻¹ SAC 后显著提高了幼芽和幼根的 SOD 活性,与 50 μmol·L⁻¹ CdCl₂ 处理组相比, SOD 活性分别提高了 47.31% 和 110.76%.

由图 1(c) 可见,在 50 μmol·L⁻¹ CdCl₂ 胁迫下,种子幼芽和幼根中 GSH 含量出现显著升高. 与 CK₀ 处理组相比,升高幅度分别达到 195.1% 和

503.7%. 添加 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC 后显著降低了幼芽和幼根中 GSH 的含量, 与 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 处理组相比, GSH 含量分别显著降低了 35.74% 和 34.12%.

由图 1(d) 可见, 在 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 胁迫下,

种子幼芽和幼根中 MDA 含量出现显著升高. 与 CK_0 处理组相比, 升高幅度分别为 21.51% 和 33.33%. 添加 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC 后显著降低了幼芽和幼根的 MDA 含量, 与 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 处理组相比, MDA 含量分别显著降低了 33.97% 和 43.09%.

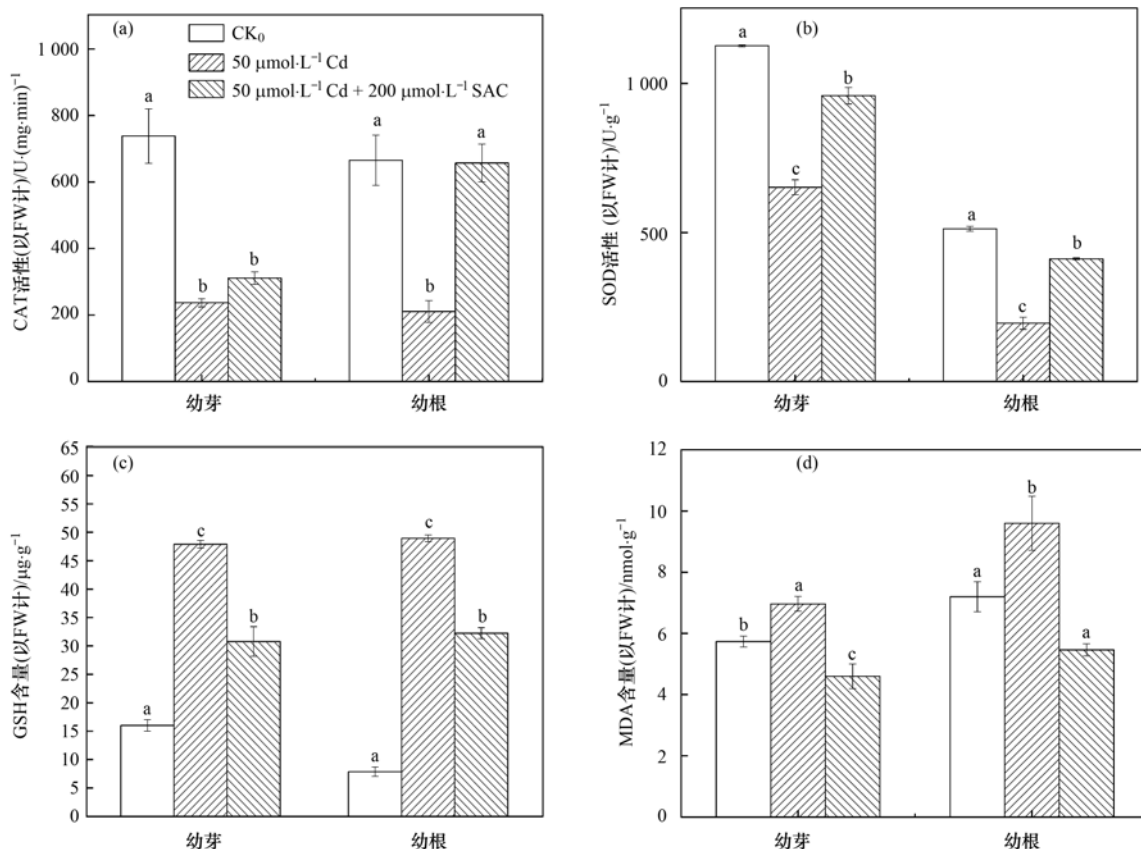


图 1 SAC 对 Cd 胁迫下水稻种子幼芽和幼根生理生化系统的缓解效应

Fig. 1 Effect of SAC on antioxidant enzyme activities in rice seedlings and young roots under Cd stress

2.4 SAC 缓解水稻种子幼芽和幼根 Cd^{2+} 胁迫的分子机制

添加 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC 对水稻种子幼芽和幼根中 Cd 含量的影响如图 2(a) 所示. 从中可知, 在 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 胁迫下, 水稻种子幼芽和幼根的 Cd 含量出现显著升高而且幼根中 Cd 含量远高于幼芽中 Cd 含量达到 $401.14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 添加 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC 后显著降低了水稻种子幼芽和幼根中的 Cd 含量, 与 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 处理组相比, 幼芽和幼根中 Cd 含量分别降低 28.86% 和 35.91%.

添加 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC 对水稻种子幼芽和幼根中 Cd 转运基因 *OsNramp5* 相对表达量的影响如图 2(b) 所示. 从中可知, 在 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 胁迫下, 水稻种子幼根和幼芽中 *OsNramp5* 的相对表达量显著增加, 升高幅度分别高达 217.67% 和 48.33%. 添加 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC 后, 水稻种子幼根中 *OsNramp5* 相对表达量显著降低, 与 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

CdCl_2 处理组相比, 水稻种子幼根中 *OsNramp5* 的相对表达量显著降低 33.38%, 幼芽中的 *OsNramp5* 相对表达量也出现降低, 但降低幅度未达到显著程度 ($P < 0.05$).

添加 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC 对水稻种子幼芽和幼根中 Cd 转运基因 *OsHMA3* 相对表达量的影响如图 2(c) 所示. 从中可知, 在 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 胁迫下, 水稻种子幼根中 *OsHMA3* 的相对表达量显著增加, 升高幅度达 168.00%. 经 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC 处理后, 幼根中 *OsHMA3* 相对表达量继续增加, 与 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 处理组相比, 水稻幼根中 *OsHMA3* 的相对表达量显著升高 33.96%. 经 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 胁迫后, 幼芽中 *OsHMA3* 的相对表达量也出现升高但增加幅度未达到显著程度, 添加 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC 后相对于 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 处理组, 幼芽中的 *OsHMA3* 相对表达量持续出现升高趋势, 但升高幅度也未达到显著程度 ($P < 0.05$).

添加 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC 对水稻种子幼芽和幼

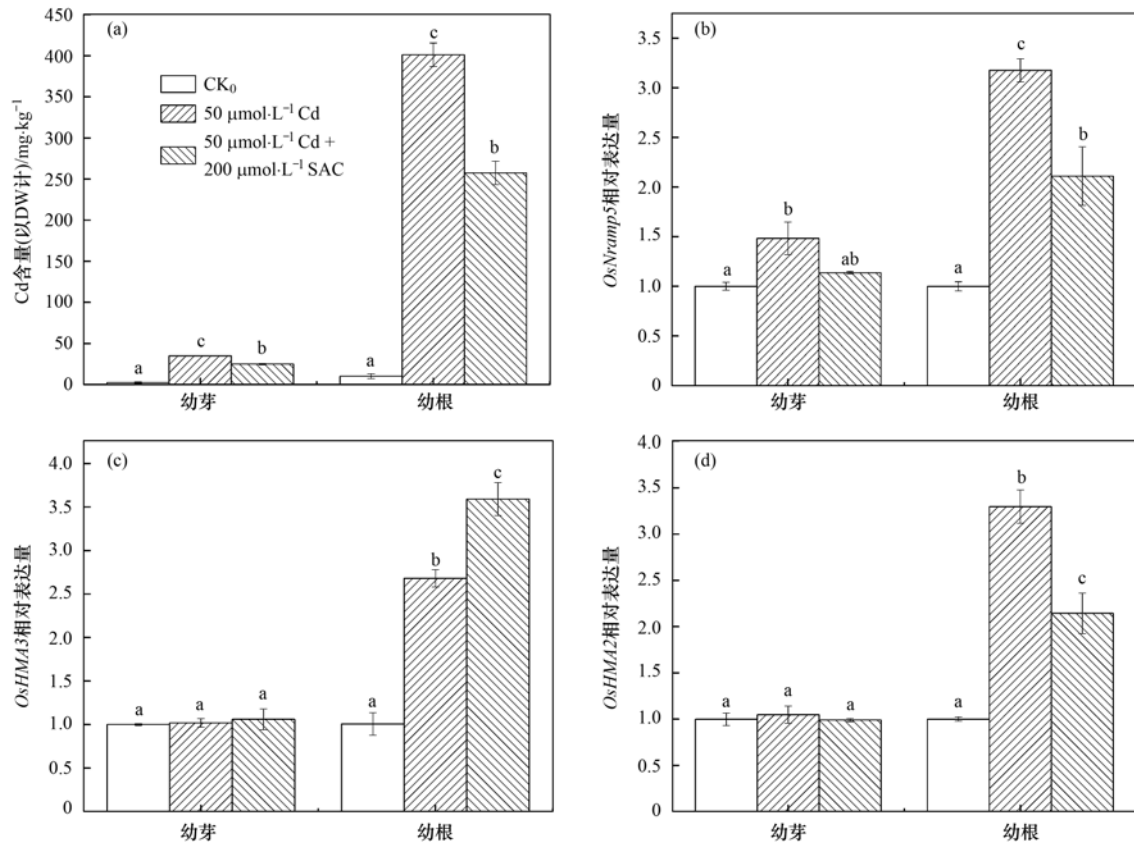


图2 SAC对Cd胁迫下水稻种子幼芽和幼根的Cd含量及相关基因相对表达量的影响

Fig. 2 Effects of SAC on Cd content and relative expression levels of related genes in rice seedlings under Cd stress

根中Cd转运基因*OsHMA2*相对表达量的影响如图2(d)所示.从中可知,在 $50\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 胁迫下,水稻种子幼根中*OsHMA2*的相对表达量显著升高,升高幅度达229.67%.经 $200\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC处理后,与 $50\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 处理组相比,幼根中*OsHMA2*相对表达量显著降低34.99%.在 $50\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 胁迫下,水稻种子幼芽中*OsHMA2*的相对表达量也出现升高但增加幅度未达到显著程度,添加 $200\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC后,与 $50\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 处理组相比,幼芽中的*OsHMA2*相对表达量也出现下降,但降低幅度也未达到显著程度.

3 讨论

S-烯丙基-L-半胱氨酸(SAC)是大蒜提取物中一种含有硫醚结构的化合物,易溶于水,化学性质相较于其他大蒜提取物较为稳定^[37].SAC具有显著的抗氧化、缓解细胞衰老、凋亡,抑制癌细胞增值和转移等功能,此外还具有预防和治疗心脑血管疾病的作用^[38].有报道表明,SAC还可作为动物体内的重金属解毒剂,能够很好地抑制重金属毒性,清除生物体内自由基的氧化作用,缓解重金属在动物体内的危害^[39].本文研究了SAC对水稻种子幼芽和根系 Cd^{2+} 胁迫的缓解效应及其潜在的分子机制.

种子萌发期和幼苗期是植物生长的重要阶段同时也是较为脆弱的阶段.在高度浓度 Cd^{2+} 胁迫下,会对水稻种子萌发及幼苗生长造成显著影响,表现为水稻生长缓慢,根系发育受阻^[7].植物体内会产生大量的活性氧自由基,损坏细胞膜系统,影响体内抗氧化酶的活性如CAT和SOD,抑制植株的生长发育^[40].本研究中,添加 Cd^{2+} 胁迫处理的水稻幼芽和幼根CAT和SOD活性均有显著降低,添加SAC后显著提高了 Cd^{2+} 胁迫下水稻幼芽和幼根中CAT和SOD活性.活性氧自由基作用于脂质的不饱和脂肪酸,丙二醛(MDA)是脂质过氧化后的重要产物,MDA含量常作为反映细胞膜脂质氧化水平和植物遭受逆境胁迫程度的重要参考指标^[41].当植物体受到 Cd^{2+} 胁迫时体内会产生大量的GSH,从而缓解重金属对植物体造成的毒害作用,因此GSH也常作为评价植物遭受Cd胁迫程度的重要参考指标^[42].本研究结果表明,在 Cd^{2+} 胁迫下水稻种子幼芽和幼根中的MDA和GSH含量均出现显著升高,添加SAC后有效缓解了 Cd^{2+} 对水稻种子幼芽和幼根的胁迫作用,使幼芽和幼根中MDA和GSH含量相较于 Cd^{2+} 胁迫处理组均有显著下降.以上结果表明,SAC具有缓解 Cd^{2+} 对水稻种子幼根和幼芽生理生化系统胁迫的作用.

水稻根系是通过吸收外界营养物质及水分保证水稻正常生长发育的重要器官^[43]. 总根长、总表面积、总体积、根尖数、根分叉数等根系生长活性指标是评估水稻幼芽种子萌发及生长发育的重要依据^[44]. 在本研究中随着 SAC 添加浓度的增加, Cd^{2+} 胁迫下幼根各项生长发育指标均出现显著增加趋势. 以上结果表明, SAC 具有显著缓解水稻种子萌发过程 Cd^{2+} 对幼根生长发育胁迫的功能.

降低重金属吸收是植物抵御重金属胁迫的主要机制^[45]. 本研究中, 添加 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC 后显著降低了水稻种子幼芽和幼根中的 Cd 含量, 与 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 处理组相比, 幼芽和幼根中 Cd 含量分别降低了 28.86% 和 35.91%. 添加 SAC 后, 随着 Cd 含量的降低, 幼根和幼芽的生理生化指标及根系生长发育指标均显著回升, 表明幼根和幼芽中 Cd 含量降低显著缓解了 Cd^{2+} 的胁迫. 有研究表明, 添加多种外源物如亚精胺^[14]、褪黑素和硼酸^[13] 等均可有效降低水稻种子幼根中重金属含量, 同时降低 MDA 含量, 提升抗氧化酶活性, 显著缓解重金属胁迫. 但是, 关于添加外源物对 Cd 转运蛋白编码基因表达影响, 降低水稻种子幼根及幼芽 Cd 含量, 缓解 Cd 胁迫的分子机制报道较少.

已有研究表明, Cd^{2+} 主要通过负责转运 Mn^{2+} 的 *OsNramp5* 转运子进入水稻根系^[18], 进入根系的部分 Cd^{2+} 在 *OsHMA3* 转运子的运输下进入液泡并储存在液泡中^[20], Cd^{2+} 在 *OsHMA2* 转运子的运输下从根系进一步运输到地上部^[23]. 为揭示添加 SAC 降低水稻种子幼根和幼芽中 Cd 含量缓解 Cd 胁迫的分子机制, 本研究采用实时荧光定量 PCR 技术研究了添加 SAC 对编码上述 3 个 Cd^{2+} 转运子基因表达的影响. 结果表明: 在 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 胁迫处理条件下水稻种子幼根中 Cd^{2+} 转运蛋白编码基因 *OsNramp5*、*OsHMA3* 和 *OsHMA2* 与空白对照相比的相对表达量分别显著提高了 217.67%、168.00% 和 229.67%, 该结果提示人们 Cd^{2+} 胁迫条件下同时增加了根系对 Cd^{2+} 的吸收、 Cd^{2+} 向液泡中储存以及向幼芽中转运. 将 Cd^{2+} 储存在液泡中是水稻的重要解毒机制, 较高 Cd^{2+} 浓度条件下增加了 *OsHMA3* 的相对表达量说明植物启动了自身解毒机制. 同时 *OsNramp5* 和 *OsHMA2* 基因相对表达量的增加说明在较高浓度 Cd^{2+} 存在条件下同时增加了幼根对 Cd^{2+} 的吸收和向幼芽中的转运, 据此推断根系和幼芽中的 Cd 含量也必然出现显著增加趋势. 本研究中对幼根和幼芽中 Cd 含量的测定结果显示幼根和幼芽中 Cd 含量均出现显著增加, 该结果与理论预测相吻合.

在 $50 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 胁迫处理条件下添加 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ SAC 处理后, 水稻幼根中 Cd^{2+} 转运蛋白编码基因 *OsNramp5* 的相对表达量显著降低了 33.38%、*OsHMA3* 的相对表达量显著升高 33.96%、*OsHMA2* 的相对表达量显著降低 34.99%. 添加 SAC 后, *OsNramp5* 的相对表达量显著降低, 表明添加 SAC 后显著降低了幼根从外界吸收 Cd^{2+} 的能力, 对幼根 Cd 含量的测定结果也表明幼根中 Cd 含量显著降低了 35.91%. 添加 SAC 后, *OsHMA3* 的相对表达量继续显著升高说明 SAC 提高了幼根细胞向液泡中运输 Cd^{2+} 的能力, 该结论可以从 SAC 显著缓解根系 Cd^{2+} 胁迫结果得到验证. 添加 SAC 后, *OsHMA2* 的相对表达量显著降低, 表明添加 SAC 显著降低了 Cd^{2+} 向幼芽中的运输. 本研究中对幼芽中 Cd 含量的测定结果也表明, 幼芽 Cd 含量显著降低 35.91%, 两者结果相吻合.

综上所述, 添加 SAC 后 Cd 转运相关基因相对表达量的变化较好揭示了幼根和幼芽中 Cd 含量降低及缓解 Cd^{2+} 胁迫的分子机制.

4 结论

(1) 适宜浓度的 SAC 可有效缓解 Cd^{2+} 对水稻幼根和幼芽的胁迫效应.

(2) 添加 SAC 可显著降低水稻幼根和幼芽中的 Cd 含量.

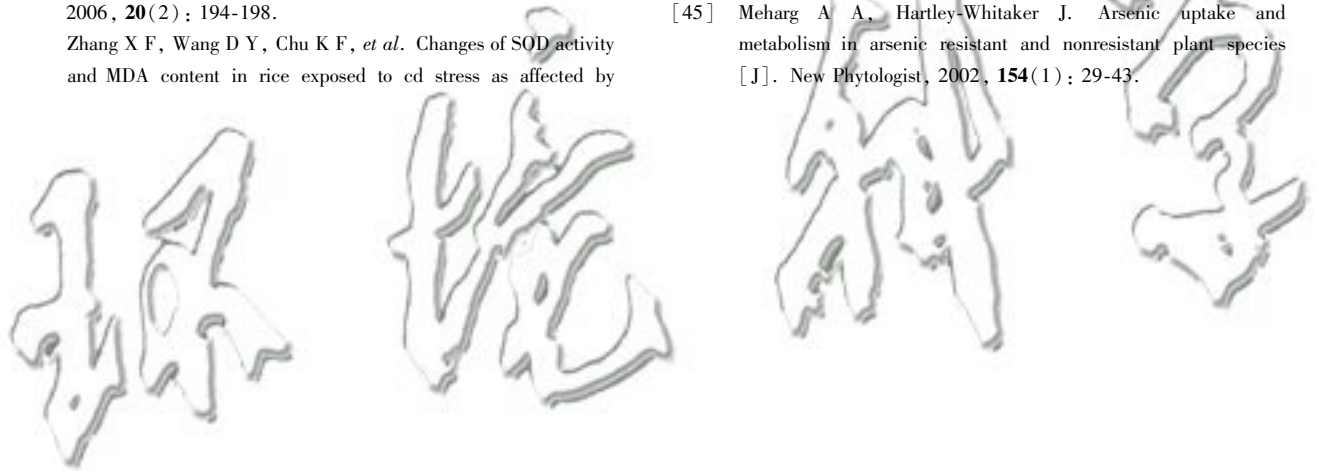
(3) SAC 可通过调控幼根和幼芽中 Cd 转运蛋白编码基因的相对表达量降低 Cd 的吸收及向幼芽转运.

参考文献:

- [1] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692.
Chen N C, Zheng Y J, He X F, et al. Analysis of the report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [2] 张秋月. 土壤污染治理问题研究——以镉大米事件为视角[J]. 法制与社会, 2017, (3): 77-78.
- [3] Wei R F, Guo Q J, Yu G R, et al. Stable isotope fractionation during uptake and translocation of cadmium by tolerant *Ricinus communis* and hyperaccumulator *Solanum nigrum* as influenced by EDTA[J]. Environmental Pollution, 2018, 236: 634-644.
- [4] 吴玲. 职业性镉中毒肾功能预后分析[J]. 国际感染病学(电子版), 2020, 9(2): 29-29.
- [5] Williams P N, Lei M, Sun G X, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(3): 637-642.
- [6] Song Y, Wang Y B, Mao W F, et al. Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population[J]. PLoS One, 2017, 12(5): e0177978.
- [7] Yang D Q, Liu S X, Xia G P, et al. Effects of cadmium stress

- on the growth of rice seedlings [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2019, **20**(3): 11-16.
- [8] Tsukahara T, Ezaki T, Moriguchi J, *et al.* Rice as the most influential source of cadmium intake among general Japanese population[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **305**(1-3): 41-51.
- [9] 肖清铁. 水稻耐镉胁迫的生理响应[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- Xiao Q T. Physiological response in rice (*Oryza sativa* L.) under cadmium stress conditions[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.
- [10] 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, (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, (1): 3-7.
- [11] 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 等. 不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应[J]. *生态学报*, 2011, **31**(2): 522-528.
- He J Y, Ren Y F, Wang Y Y, *et al.* Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(2): 522-528.
- [12] 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 等. 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[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3441-3448.
- Yang X R, Huang Y C, Liu Z Q, *et al.* Effects of foliar spraying of 2,3-dimercaptosuccinic acid on cadmium uptake, transport, and antioxidant system in rice seedlings [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3441-3448.
- [13] 王丙烁, 黄益宗, 李娟, 等. 镉胁迫下不同改良剂对水稻种子萌发和镉吸收积累的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(4): 746-755.
- Wang B S, Huang Y Z, Li J, *et al.* Effects of different amendments on seed germination and cadmium uptake and accumulation in rice seedlings under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(4): 746-755.
- [14] 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 等. 外源亚精胺对 As^{5+} 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1505-1512.
- Liu S J, Huang Y Z, Bao Q L, *et al.* Effects of exogenous spermidine on seed germination and As uptake and Accumulation of Rice under As^{5+} stress[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1505-1512.
- [15] 刘惠东, 李汉常, 姚邦松, 等. 不同氧磷管理对水稻根系活力和产量的影响[J]. *湖南农业大学学报*, 2020, **46**(2): 130-137.
- Liu H D, Li H C, Yao B S, *et al.* Effects of different management of oxygen and phosphorus on root activity and yield of rice[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2020, **46**(2): 130-137.
- [16] Luo J M, Meng J, Ye Y J, *et al.* Population health risk via dietary exposure to trace elements (Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, and As) in Qiqihar, Northeastern China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, **40**(1): 217-227.
- [17] Uruguchi S, Kamiya T, Clemens S, *et al.* Characterization of OsLCT1, a cadmium transporter from *Indica* rice (*Oryza sativa*) [J]. *Physiologia Plantarum*, 2014, **15**(3): 339-347.
- [18] Ishimaru Y, Takahashi R, Bashir K, *et al.* Characterizing the role of rice NRAMP5 in Manganese, Iron and Cadmium Transport [J]. *Scientific Reports*, 2012, **2**, doi: 10.1038/srep00286.
- [19] Tang L, Mao B G, Li Y K, *et al.* Knockout of *OsNramp5* using the CRISPR/Cas9 system produces low Cd-accumulating *Indica* rice without compromising yield[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-14832-9.
- [20] Ueno D, Yamaji N, Kono I, *et al.* Gene limiting cadmium accumulation in rice[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, **107**(38): 16500-16505.
- [21] 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.
- [22] Cobbett C S. Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification[J]. *Plant Physiology*, 2000, **123**(3): 825-832.
- [23] Takahashi R, Ishimaru Y, Shimo H, *et al.* The OsHMA2 transporter is involved in root-to-shoot translocation of Zn and Cd in rice [J]. *Plant Cell Environment*, 2012, **35**(11): 1948-1957.
- [24] 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.
- [25] Cha C W. A study on the effect of garlic to the heavy metal poisoning of rat[J]. *Journal of Korean Medical Science*, 1987, **2**(4): 213-223.
- [26] Ercal N, Gurer-Orhan H, Aykin-Burns N. Toxic metals and oxidative stress part I: mechanisms involved in metal induced oxidative damage[J]. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 2001, **1**(6): 529-539.
- [27] 严常开, 胡霞敏, 曾繁典. 烯丙基半胱氨酸的合成及其对脂质代谢的影响[J]. *中国新药杂志*, 2006, **15**(8): 616-620.
- Yan C K, Hu X M, Zeng F D. Synthesis and cholesterol-lowering activity of S-allylcysteine[J]. *Chinese Journal of New Drugs*, 2006, **15**(8): 616-620.
- [28] Colín-González A, Santana R A, Silva-Islas C A, *et al.* The antioxidant mechanisms underlying the aged garlic extract-and S-allylcysteine-induced protection [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2012, **2012**, doi: 10.1155/2012/907162.
- [29] Maldonado P D, Barrera D, Rivero I, *et al.* Antioxidant S-allylcysteine prevents gentamicin-induced oxidative stress and renal damage[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2003, **35**(3): 317-324.
- [30] Basu C, Sur R. S-Allyl Cysteine alleviates hydrogen peroxide induced oxidative injury and apoptosis through upregulation of Akt/Nrf-2/HO-1 signaling pathway in HepG2 cells[J]. *Biomed Research International*, 2018, **2018**, doi: 10.1155/2018/3169431.
- [31] Kim J M, Lee J C, Chang N, *et al.* S-Allyl-L-cysteine attenuates cerebral ischemic injury by scavenging peroxynitrite and inhibiting the activity of extracellular signal-regulated kinase[J]. *Free Radical Research*, 2006, **40**(8): 827-835.
- [32] Ide N, Matsuura H, Itakura Y. Scavenging effect of aged garlic extract and its constituents on active oxygen species [J]. *Phytotherapy Research*, 1996, **10**(4): 340-341.
- [33] Park T, Oh J H, Lee J H, *et al.* Oral administration of (S)-Allyl-L-Cysteine and aged garlic extract to rats: determination of metabolites and their pharmacokinetics [J]. *Planta Medica*, 2017, **83**(17): 1351-1360.
- [34] Agbana Y L, Ni Y L, Zhou M L, *et al.* Garlic-derived bioactive compound S-allylcysteine inhibits cancer progression through diverse molecular mechanisms[J]. *Nutrition Research*, 2020,

- 73: 1-14.
- [35] Liu Y, Zhang C B, Zhao Y L, *et al.* Effects of growing seasons and genotypes on the accumulation of cadmium and mineral nutrients in rice grown in cadmium contaminated soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **579**: 1282-1288.
- [36] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta C_T}$ method [J]. *Methods*, 2001, **25**(4): 402-408.
- [37] Lawal A O, Ellis E M. The chemopreventive effects of aged garlic extract against cadmium-induced toxicity [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2011, **32**(2): 266-274.
- [38] Amagase H, Petesch B L, Matsuura H, *et al.* Intake of garlic and its bioactive components [J]. *Journal of Nutrition*, 2001, **131**(3s): 955s-962s.
- [39] Ng K T P, Guo D Y, Cheng Q, *et al.* A garlic derivative, S-allylcysteine (SAC), suppresses proliferation and metastasis of hepatocellular carcinoma [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(2), doi: 10.1371/journal.pone.0031655.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Jiang M, Jiang J, Li S, *et al.* Glutamate alleviates cadmium toxicity in rice via suppressing cadmium uptake and translocation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **384**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121319.
- [43] 康书静, 钱前, 朱丽. 生长素对水稻根系生长发育调控的研究进展 [J]. *中国稻米*, 2014, **20**(4): 1-8.
- Kang S J, Qian Q, Zhu L. Advances on molecular mechanism of auxin in rice root [J]. *China Rice*, 2014, **20**(4): 1-8.
- [44] 代明龙, 王平, 孙吉康, 等. 盐碱胁迫对植物种子萌发的影响及生理生化机制研究进展 [J]. *北方园艺*, 2015, (10): 176-179.
- Dai M L, Wang P, Sun J K, *et al.* Research progress of saline-alkali stress effect on seeds' germination and its physiological and biochemical mechanism [J]. *Northern Horticulture*, 2015, (10): 176-179.
- [45] Meharg A A, Hartley-Whitaker J. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species [J]. *New Phytologist*, 2002, **154**(1): 29-43.



CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDs-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-juan, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yan, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)