

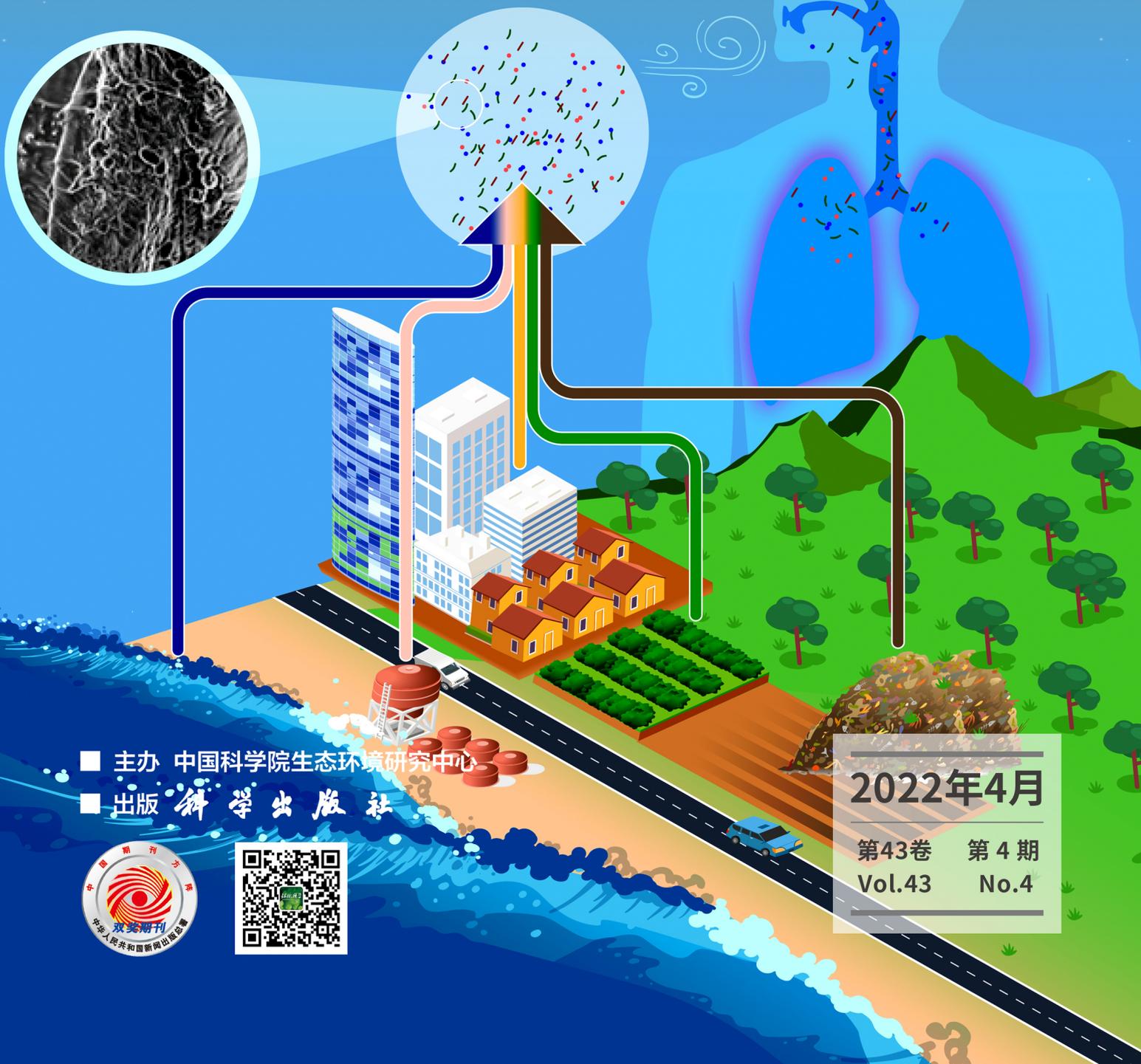
方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性
涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM_{2.5}时空特征与驱动因素分析 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)

郑州市大气PM_{2.5}中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)

宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)

上海城区PM_{2.5}中有机组分及硝基芳香化合物分布特征 庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)

南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新锋, 盖鑫磊 (1738)

春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化 江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)

重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势 李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)

珠三角某石化园区VOCs排放特征及影响评价 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)

基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)

基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源 韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)

基于SOA和O₃生成潜势的杭州市PM_{2.5}和O₃协同控制 林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)

超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响 王鹏程, 袁勃, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)

西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应 王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性 涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)

基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征 高宗源, 徐祀, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)

西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)

“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析 廖雅, 侯晓姝, 任晓红 (1853)

中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)

新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)

珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)

河套灌区浅层地下水NO₃⁻-N时空变化及驱动因素 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)

盐城地区地下水溶质来源及其成因分析 王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)

白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)

东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)

松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性 程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)

区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响 高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)

南水北调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)

千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评估 弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)

蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)

基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价 李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)

小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响 张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)

不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)

南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析 岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)

老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)

碳化泡沫负载Co₃O₄活化过硫酸盐降解罗丹明B 王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)

低总氮浓度下Fe²⁺促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮 郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)

污水管道增强通风作用下氧气的传质特性 杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)

长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价 张义, 周心劝, 曾晓辉, 冯娇, 刘玉荣 (2062)

中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)

贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评估及控制因素 张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)

地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)

矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)

农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评估 朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)

安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)

方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果 任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)

伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响 张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)

我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性 刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)

地膜覆盖和生物炭添加对菜地N₂O排放的影响 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)

氮肥运筹对稻田CH₄和N₂O排放的影响 郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)

松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性 王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)

棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)

pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)

生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)

有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)

九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征 黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)

碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)

《环境科学》征订启事(1929) 《环境科学》征稿简则(1975) 信息(1996, 2029, 2080)

伯克氏菌 Y4 对水稻幼苗镉损伤和镉吸收的影响

张雅荟^{1,2}, 刘月敏^{2*}, 王常荣^{1*}, 刘雅萍^{1,2}, 庞杰^{1,2}, 黄永春¹, 刘仲齐¹, 张长波¹

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 天津城建大学环境与市政工程学院, 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384)

摘要: 为探明伯克氏菌 Y4 (*Burkholderia* sp. Y4) 对镉 (Cd) 胁迫下水稻幼苗的生长和 Cd 吸收积累的影响及其作用机制, 以水稻低 Cd 积累品种湘早灿 24 (X24) 和高 Cd 积累品种 T 优 705 (T705) 为材料, 通过水稻种子萌发和幼苗试验, 利用非损伤微测技术和原子吸收等检测方法, 研究外源施加伯克氏菌 Y4 对 Cd 胁迫下水稻生长和毒性损伤的影响及其抑制水稻 Cd 吸收积累的作用机制。结果表明, 伯克氏菌 Y4 可以缓解 Cd 对水稻生长的抑制作用, 使种子发芽势提高 13.8%, 此外, 接种菌株 Y4 后 7 d, 水稻幼根和幼芽长度分别增长 83.3% 和 12.2%, 干重分别增加 56.8% 和 12.5%, 而接种菌株 Y4 后 10 d, 水稻幼根和幼芽长度分别增长 28.6% 和 20.0%, 干重分别增加 113.2% 和 46.0%。深入研究发现, 施加菌株 Y4 缓解了 Cd 胁迫下水稻的氧化应激损伤, 显著降低了幼苗地上部及根系中氧化损伤产物丙二醛 (MDA) 的水平, 降幅分别达到 21.5% 和 16.9%; 同时, Cd 胁迫下水稻抗氧化酶活性的变化也在菌株 Y4 的作用下得到缓解, 幼苗根系中超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化氢酶 (CAT) 的活性水平恢复至与无 Cd 空白对照组无显著差异, 而幼苗地上部中的酶活变化幅度也分别由 176.9% 和 74.8% 降低至 53.3% 和 21.5%。另一方面, 伯克氏菌 Y4 还能够抑制不同 Cd 积累型水稻品种幼苗对 Cd 的吸收, 外源施加菌株 Y4 显著降低了水稻幼苗地上部及根系中的 Cd 含量, 使高 Cd 积累品种 T705 地上部及根系中 Cd 含量分别下降 79.2% 和 62.7%, 而在低 Cd 积累品种 X24 中的降幅分别为 57.3% 和 24.1%。深入研究发现, 根施伯克氏菌 Y4 可使水稻幼苗根系表面形成黄色根膜, 同时降低了根伸长区的 Cd²⁺ 离子流速。高 Cd 积累品种 T705 对 Cd²⁺ 的吸收流速显著高于低 Cd 积累品种 X24, 外源施加菌株 Y4 使 3 d 苗龄 T705 和 X24 对 Cd²⁺ 的吸收流速分别下降 36.0% 和 35.0%, 而 10 d 苗龄 T705 和 X24 对 Cd²⁺ 的吸收流速则分别下降 44.6% 和 24.9%。由此可见, 伯克氏菌 Y4 通过缓解 Cd 胁迫造成的氧化应激反应, 能够降低 Cd 对水稻生长的抑制作用和毒性损伤, 此外, 菌株 Y4 还能够改变水稻根膜并有效降低不同品种水稻根伸长区对 Cd²⁺ 的吸收速率和根 Cd 积累量, 进而抑制 Cd 向地上部的转运积累, 为伯克氏菌 Y4 作为水稻降 Cd 促生菌剂的应用提供了理论依据和数据支持。

关键词: 伯克氏菌 Y4; 水稻; 镉 (Cd); 氧化应激; Cd²⁺ 流速

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-2142-09 DOI: 10.13227/j.hjcx.202108032

Effects of *Burkholderia* sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings

ZHANG Ya-hui^{1,2}, LIU Yue-min^{2*}, WANG Chang-rong^{1*}, LIU Ya-ping^{1,2}, PANG Jie^{1,2}, HUANG Yong-chun¹, LIU Zhong-qi¹, ZHANG Chang-bo¹

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to investigate the effects of *Burkholderia* sp. Y4 on rice seedlings under cadmium (Cd) stress, seed germination and vermiculite culture experiments were conducted using low Cd-accumulation xiangzaoxian 24 (X24) and high Cd-accumulation Tyou 705 (T705) varieties. The effects of *Burkholderia* sp. Y4 on rice growth, oxidative damage caused by Cd, and Cd accumulation were studied. Additionally, the Cd²⁺ flux rates in the elongation zone of rice roots under *Burkholderia* sp. Y4 application were detected using non-invasive micro-test technology. *Burkholderia* sp. Y4 alleviated the inhibition effect of Cd on rice seed germination by 13.8%. After inoculation with *Burkholderia* sp. Y4 for 7 d, the length of rice roots and buds increased by 83.3% and 12.2%, and their dry weight increased by 56.8% and 12.5%, respectively; those in the 10 d Y4 inoculation group increased by 28.6% and 20.0% in length and by 113.2% and 46.0% in dry weight, respectively. *Burkholderia* sp. Y4 inoculation also alleviated rice oxidative stress damage caused by Cd. The application of strain Y4 significantly reduced the content of the oxidative damage product malondialdehyde (MDA) in the shoots and roots of rice seedlings by 21.5% and 16.9%, respectively. Under *Burkholderia* sp. Y4 inoculation, the significant changes in antioxidant enzyme SOD and CAT activities caused by Cd stress disappeared in rice roots; those in shoots also decreased from 176.9% and 74.8% to 53.3% and 21.5%, respectively. Conversely, *Burkholderia* sp. Y4 inhibited Cd uptake by rice seedlings with different genotypes, including the low Cd-accumulation variety X24 and high Cd-accumulation variety T705. The root application of strain Y4 significantly reduced Cd accumulation in the shoots and roots of rice seedlings by 79.2% and 62.7% in T705 and by 57.3% and 24.1% in X24, respectively. The Cd²⁺ flux rate of high Cd-accumulation variety T705 was significantly higher than that of low Cd-accumulation variety X24. Under *Burkholderia* sp. Y4 inoculation, the yellow membrane was formed on the root surface of rice seedlings, and the Cd²⁺ flux rate in the elongation zone of T705 and X24 roots decreased by 36.0% and 35.0% in 3-day-old seedlings, as well as by 44.6% and 24.9% in 10-day-old seedlings, respectively. In conclusion, *Burkholderia* sp. Y4 inoculation inhibited the toxic effects of Cd on rice seedling growth through alleviating oxidative stress and damage caused by Cd. Furthermore, the root application of *Burkholderia* sp. Y4 effectively decreased the Cd²⁺ flux rate in the elongation zone of roots to inhibit the Cd uptake and accumulation in roots and shoots of rice seedlings. This study provides theoretical basis and data support for the application of *Burkholderia* sp. Y4 as a Cd-reducing and growth-promoting agent for rice in contaminated

收稿日期: 2021-08-05; 修订日期: 2021-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501249, 42077153); 中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-XTCX2016018)

作者简介: 张雅荟(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微生物资源利用与重金属污染防治, E-mail: 592534837@qq.com

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

farmland.

Key words: *Burkholderia* sp. Y4; rice; cadmium (Cd); oxidative stress; Cd^{2+} flux rate

随着工农业生产活动的迅速发展、农药的不当使用和矿产资源的大量开发利用等,农田重金属污染问题日趋严重. 据全国土壤污染状况调查公报显示, Cd 污染超标点位高达 7.0%, 为所有无机污染物之首^[1], 农田 Cd 污染形势不容乐观^[2,3]. Cd 的水溶性较高且蓄积性强, 容易被水稻等农作物的根系吸收后积累在籽粒中, 并通过食物链进入人体, 在肝、肾等器官中不断蓄积. 同时, Cd 的毒性强且作用持久, 能够诱发体内氧化应激^[4], 导致活性氧积累和氧化损伤, 影响生物体的生长发育, 而食用“镉大米”造成的长期低剂量 Cd 暴露具有致癌、致畸和致突变的三致作用, 严重威胁粮食安全生产和人体健康^[5-7].

目前, 稻田 Cd 污染治理的研究, 主要集中于低积累水稻品种选育、土壤改良剂和碱性肥料施用、水分管理以及生物修复等方面^[5,8,9]. 其中, 微生物修复技术利用不同种类的功能菌株^[10,11], 能够通过植物互作提高其抗逆性^[12], 缓解环境中的 Cd 污染胁迫造成的氧化应激等反应^[13], 降低重金属毒性损伤^[14], 在抑制水稻 Cd 吸收转运的同时促进植株生长^[9,15], 并且将降 Cd 促生菌应用于水稻拌种和插秧前的苗期也有效果, 具有操作简单、成本低廉和生态友好等优势. 伯克氏菌 *Burkholderia* sp. 是一种广泛分布于土壤、水和植物根周围等环境中的革兰氏阴性细菌^[12], 有较高的 Cd 耐受性, 可以促进植物生长^[16]. 因此, 水稻降 Cd 促生菌对于污染农田的治理和粮食安全生产具有较好的应用前景.

然而, 降 Cd 促生菌的作用机制研究还大多集中于对水稻 Cd 吸收累积情况的影响, 在菌株作用下实时监测水稻对 Cd 离子吸收速率的瞬时变化的研究还较少. 非损伤微测技术可以在不破坏植株生理结构的情况下, 通过微电极和微传感器获取离子信号, 实时测定水稻根系 Cd 等离子体的转运方向和流速^[17,18]. Wang 等^[19]的研究通过测量水稻中的 Cd^{2+} 流速, 证明了高积累品种 xiushui 11 对 Cd 的转运速度更快. 而外源添加降 Cd 剂能够通过抑制植株根系伸长区的 Cd^{2+} 流速, 显著降低其 Cd 积累量^[20,21]. 由此可见, 水稻根系 Cd 离子流速是影响其 Cd 吸收积累的重要因素, 实时检测 Cd 胁迫下根施降 Cd 促生菌后不同时间水稻根系 Cd^{2+} 流速和 Cd 积累量的变化, 以及水稻生长和氧化应激等指标差异, 能够深入揭示降 Cd 菌株影响水稻根 Cd 吸收和 Cd 毒性的作用机制, 同时也避免了传统的 Cd 积累

检测方法试验周期长和程序复杂等弊端.

笔者前期研究筛选鉴定的菌株 *Burkholderia* sp. Y4 (菌株 Y4), 能够有效定殖在水稻根表和根际土壤中, 通过生长代谢和菌体吸附等途径钝化 Cd, 降低水稻籽粒 Cd 积累量并提高其矿质元素含量^[22]. 在此基础上, 本研究拟深入分析施加菌株 Y4 对水稻幼苗生长和 Cd 毒性损伤以及 Cd 吸收积累的影响, 通过检测菌株 Y4 对 Cd 胁迫下水稻种子萌发和幼根幼芽生长、幼苗地上部和根系氧化应激损伤情况、以及实时监测水稻根系 Cd^{2+} 流速和长时间 Cd 胁迫后水稻不同部位 Cd 积累量, 探究菌株 Y4 抑制水稻根 Cd 吸收和缓解水稻幼苗 Cd 毒性的作用机制, 以期为伯克氏菌 Y4 作为水稻降 Cd 微生物菌剂的应用提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻分别为低 Cd 积累品种湘粳 24 (X24) 和高 Cd 积累品种 T 优 705 (T705), 购于湖南农丰种子子公司. 供试菌种为经筛选、分离和鉴定后的 *Burkholderia* sp. Y4 (菌株 Y4)^[22], 本实验室保存. 接种菌株 Y4 于 100 mL 灭菌 LB 培养基中, 150 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床中 30℃ 培养至稳定期, 在 25℃ 条件下于 8 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 收集菌体去掉上清液, 按原体积加入灭菌水重悬, 得到菌株 Y4 处理液, 菌体密度约为 $1 \times 10^7 \text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$, 备用.

1.2 试验及测定方法

1.2.1 萌发试验

挑选健康饱满水稻种子在 5% H_2O_2 水溶液中表面消毒 30 min, 然后用去离子水冲洗 3 次, 在 28℃ 恒温培养箱中避光催芽, 挑选露白头且长势一致的种子置于一次性塑料培养皿中, 每皿 20 粒. 试验分为 3 组: CK 组 (去离子水)、Cd 组 (25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CdCl_2) 和 Cd + Y4 组 (25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ CdCl_2 + 1/10 菌株 Y4 处理液), 其中, Cd + Y4 组的水稻种子在加 Cd 胁迫前在 1/10 菌株 Y4 处理液中浸种 30 min 后移入培养皿, 培养皿置入培养箱中继续培养, 每组处理 3 皿重复. 分别在加入处理液 3 d 和 7 d 后统计种子的有效发芽数 (水稻根长大于种子长, 且芽长大于种子长的一半时为有效发芽), 并计算发芽势和发芽率.

发芽势 = (3 d 内有效发芽数/种子总数) \times 100%

发芽率 = (7 d 内有效发芽数/种子总数) \times 100%

分别于处理 7 d 和 10 d 后收取部分样品,测量其幼根和幼芽长度,并将水稻样品拆分为根和芽,分别装入牛皮纸袋中,于 70℃ 的烘箱中烘干至质量恒定,冷却后,分别称量根和芽的干重。

1.2.2 幼苗试验

挑选健康饱满水稻种子,表面消毒后的种子均匀铺洒在大平皿中,黑暗条件下,28℃ 恒温培养 48 h,露白后将种子浸泡于 1/10 菌株 Y4 处理液中 30 min 后,采用蛭石培养的方法,将处理后的种子播种于蛭石盘中,每孔穴播种 2~3 株。于人工气候室培育 7 d 后,加入 1/10 的 Hoagland's 营养液继续培养,每 3 d 更新一次营养液。待水稻幼苗长至两叶一心时,处理组 Cd + Y4 每孔穴中再追加 1 mL 1/10 菌株 Y4 处理液。待水稻幼苗长至三叶一心时,将处理组 Cd 和 Cd + Y4 水稻幼苗移至含 0.5 mg·L⁻¹ CdCl₂ 的 1/10 Hoagland's 营养液的托盘中,继续培养 7 d。人工气候室条件:16 h/8 h 昼夜交替,光照强度:105 μmol·(m²·s)⁻¹; 温度:25℃; 相对湿度:60%^[23]。每个处理设 3 次重复。

挑选长势一致的水稻幼苗,用自来水冲洗干净,浸泡于 5 mmol·L⁻¹ 的 CaCl₂ 溶液中 30 min 以去除根系表面吸附的离子,然后用蒸馏水将水稻幼苗清洗干净,并分为地上部和根系部分。一部分按照北京索莱宝科技有限公司检测试剂盒方法,利用紫外分光光度计(上海菁华,759 MC)检测其中 MDA 含量以及 SOD 和 CAT 活性;另一部分样品置于 70℃ 烘箱中烘干至恒重,研磨成粉末,分别称取 0.25 g 地上部和根系粉末于聚四氟乙烯消解管中,加入 7 mL 浓硝酸,室温下静置过夜。于电热消解仪(Digi Block ED54)上进行消解,110℃ 加热 2.5 h 后冷却至室温,加入 1 mL H₂O₂ 摇匀,110℃ 继续加热 1.5 h,最后于 170℃ 下赶酸至近干,用去离子水稀释并转移至 25 mL 容量瓶内过滤定容,用原子吸收光谱仪(AanalytikJena, AAS ZEE nit700)测定样品 Cd 含量。

1.2.3 离子流速试验

本试验设置处理组和对照组,表面消毒后的种子均匀铺洒在育苗盘中,黑暗条件下 28℃ 恒温培养,露白后将处理组转移至 30 倍稀释的菌液中继续培养。每个处理设 5 次重复。

参照韩立娜等^[18]的方法,分别在 3 d 和 10 d 苗龄时选择生长良好、长势一致的水稻幼苗,用去离子水将根系表面冲洗干净,然后将其浸泡在 0.9 mmol·L⁻¹ 的处理液(含 0.9 mmol·L⁻¹ CdCl₂、0.1 mmol·L⁻¹ KCl、0.1 mmol·L⁻¹ CaCl₂ 和 0.3 mmol·L⁻¹ MES, pH 值为 5.8)中,胁迫 10 min 后,将根系转移至同浓度测试液中,利用非损伤微测系

统(SIET system BIO-001A; Younger USA Sci. & Tech. Corp.)对根系的 Cd²⁺ 流速进行实时监测,测试点位为距根尖端 300 μm 的伸长区,每次测定时间为 10 min。导出数据使用旭月(北京)科技有限公司提供的软件转换成 Cd²⁺ 流速。

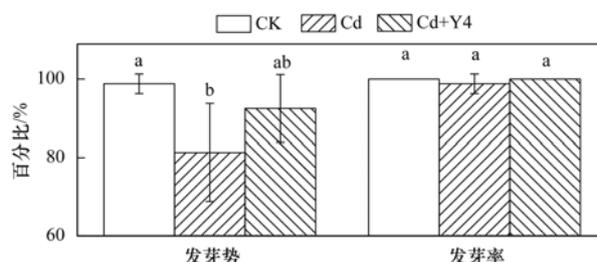
1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel 进行相关数据的计算、统计及处理。利用 SPSS 软件进行统计分析,新复极差法(Duncan's)进行多重比较和差异显著性检验。利用 Origin 2019 作图。

2 结果与分析

2.1 Burkholderia sp. Y4 对 Cd 胁迫下水稻种子萌发的影响

施加菌株 Y4 对 Cd 胁迫下水稻种子发芽势和发芽率的影响如图 1 所示。与空白对照组相比,Cd 胁迫下种子发芽势降低了 17.7%,而接种菌株 Y4 能够缓解 Cd 胁迫对种子萌发的抑制作用,使种子发芽势提高了 13.8%。Cd 胁迫 7 d 后种子发芽率也有所降低,但与空白对照组和菌株处理组无显著差异。然而,Cd 处理 7 d 显著降低了水稻幼苗的根长和芽长(图 2),其中 Cd 胁迫对根系生长的抑制作用更明显。与对照相比,Cd 胁迫 7 d 和 10 d 后,水稻幼苗根长分别降低 56.8% 和 37.8%,芽长分别降低 12.5% 和 15.4%。而接种菌株 Y4 能够显著促进 Cd 胁迫下水稻幼根和幼芽的生长,与 Cd 处理组相比,接种菌株 7 d 和 10 d 后,水稻幼苗根长分别增加 83.3% 和 28.6%,芽长分别增加 12.2% 和 20.0%,芽长基本恢复至无 Cd 胁迫水平。进一步对水稻幼根和幼芽的干重进行检测发现(图 3),与空白对照相比,Cd 胁迫下 7 d 和 10 d 苗龄的水稻幼根干重分别降低了 51.4% 和 59.2%,幼芽干重分别降低了 7.8% 和 20.2%。而接种菌株 Y4 缓解了 Cd 胁迫造成的水稻幼根和幼芽生物量的降低,与 Cd 胁迫相比,水稻幼根干重分别增长了 74.0% 和 113.2%,幼芽的干重分别增长了 25.5% 和 46.0%。由此可见,



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同
 图 1 菌株 Y4 对 Cd 胁迫下水稻种子发芽势及发芽率的影响
 Fig. 1 Effects of *Burkholderia* sp. Y4 on germination potential and germination rate of rice seeds under Cd stress

施加菌株 Y4 不但能够缓解 Cd 对水稻种子萌发的抑制作用,还能够促进 Cd 胁迫下水稻幼根和幼芽的生长。

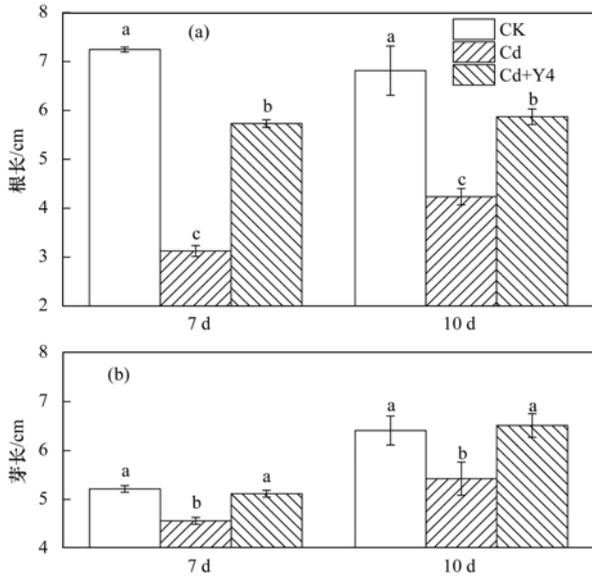


图2 菌株 Y4 对 Cd 胁迫下水稻根长和芽长的影响

Fig. 2 Effects of *Burkholderia* sp. Y4 on root and shoot length of rice seeds under Cd stress

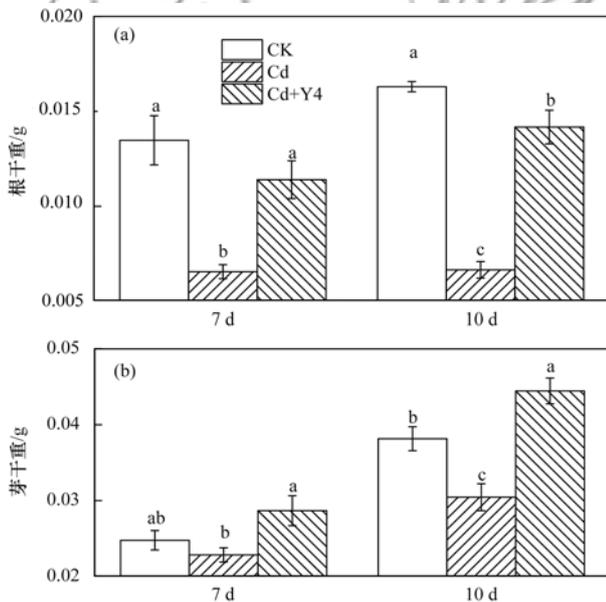


图3 菌株 Y4 对 Cd 胁迫下水稻根干重和芽干重的影响

Fig. 3 Effects of *Burkholderia* sp. Y4 on root and shoot dry weight of rice under Cd stress

2.2 *Burkholderia* sp. Y4 对 Cd 胁迫下水稻氧化应激的影响

施加菌株 Y4 不但能够促进 Cd 胁迫下水稻幼苗的生长,还能缓解 Cd 造成的氧化应激(图4)。自由基作用于脂质发生过氧化反应,氧化终产物 MDA 对细胞具有毒性,其含量能够反映组织过氧化损伤程度。由图4(a)可见,与空白对照相比,Cd 胁迫下水稻幼苗各部位 MDA 含量均显著增加,地上部

MDA 含量与根系 MDA 含量分别从 $15.38 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $6.74 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 $18.19 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $9.74 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$,增幅分别达 18.3% 和 44.6%,由此可见,Cd 胁迫下的水稻幼苗氧化损伤水平升高。而施加菌株 Y4 能够缓解 Cd 胁迫造成的脂质过氧化损伤,使幼苗地上部与根系 MDA 含量分别降至 14.27 和 $8.09 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$,与 Cd 处理组相比分别减少 21.5% 和 16.9%,也就是说,菌株 Y4 降低了 Cd 造成的水稻幼苗氧化损伤水平。

由图4(b)可见,Cd 胁迫下水稻幼苗地上部和根系中 SOD 活性显著升高,分别从 $77.98 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $34.03 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 $215.89 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $54.24 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,增幅分别达 176.9% 和 59.4%。而根施菌株 Y4 抑制了 Cd 胁迫下幼苗地上部和根系 SOD 活性的变化,施菌组幼苗地上部和根系 SOD 活性分别为 $119.56 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $38.58 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,与 Cd 处理组相比分别降低了 44.6%

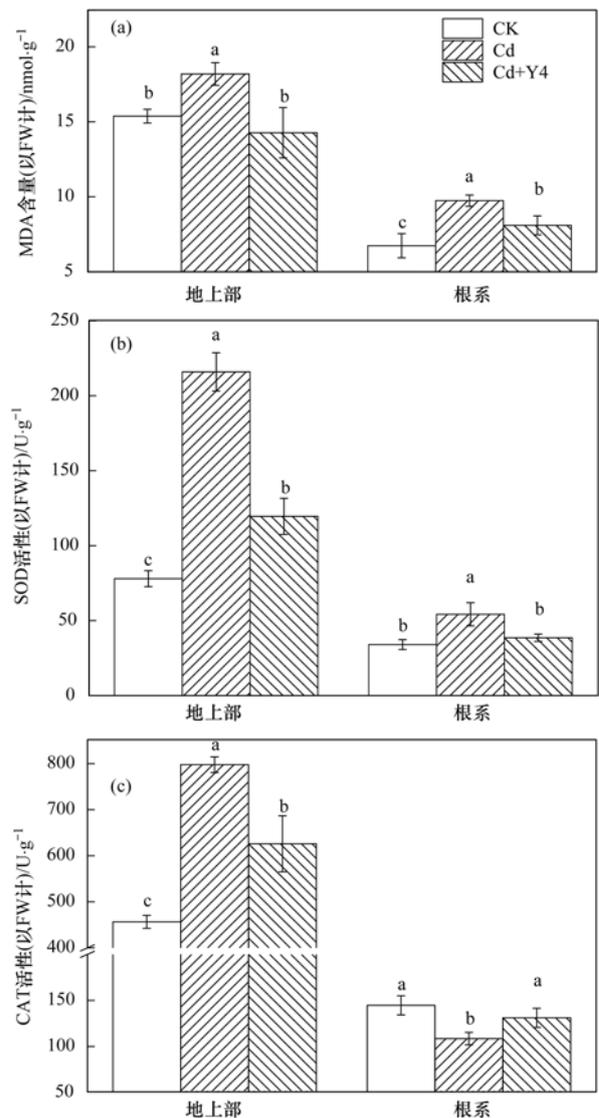


图4 施加菌株 Y4 对 Cd 胁迫下水稻幼苗氧化应激水平的影响

Fig. 4 Effects of *Burkholderia* sp. Y4 on oxidative stress level of rice seedlings under Cd stress

和 28.9%。也就是说,根施菌株 Y4 后根系 SOD 活性恢复至与空白对照组无显著差异水平,而地上部 SOD 活性的变化幅度也由 176.9% 降至 53.3%。

由图 4(c) 可见,Cd 胁迫显著提高了水稻幼苗地上部 CAT 活性,而降低了根系 CAT 活性,地上部 CAT 活性从 $456.52 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 显著增加至 $797.78 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,增幅达 74.8%,而根系 CAT 活性从 $144.64 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 降低至 $108.48 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,降幅达 25.0%。施加菌株 Y4 抑制了 Cd 胁迫下幼苗地上部和根系 CAT 活性的变化,根系 CAT 活性恢复至与空白对照组无显著差异水平 ($131.08 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$),而地上部 CAT 活性的变化幅度也由 Cd 胁迫下的 74.8% 降低至 21.5%。由此可见,菌株 Y4 缓解了 Cd 胁迫下氧化应激造成的水稻幼苗抗氧化酶活性变化。

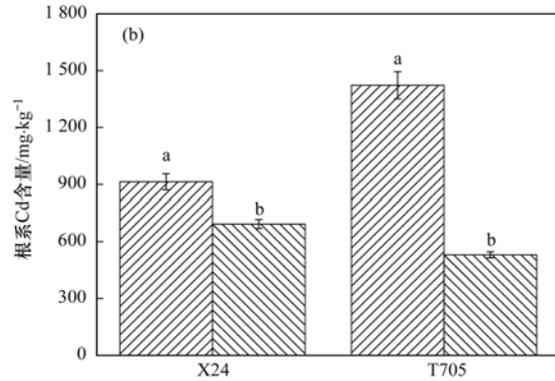
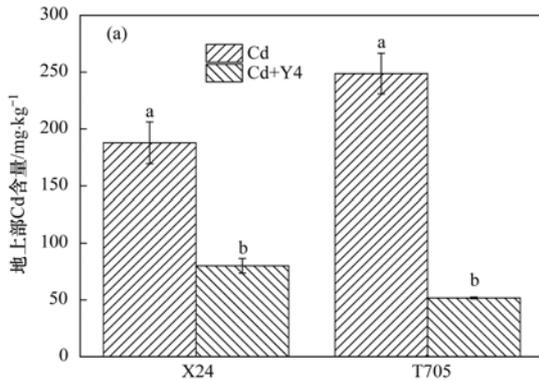


图 5 施加菌株 Y4 对不同基因型水稻幼苗 Cd 含量的影响

Fig. 5 Effects of *Burkholderia* sp. Y4 on Cd concentration in rice seedlings with different genotypes

水稻不同部位间 Cd 积累量的比值可以用转移系数 TF 表示:

$$TF(a/b) = a \text{ 器官 Cd 积累量} / b \text{ 器官 Cd 积累量}$$

转移系数 TF 反映了 Cd 在水稻各部位间的迁移能力。在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫条件下,X24 与 T705 的转移系数 $TF_{\text{(地上部/根系)}}$ 分别为 20.6% 和 17.5%,而施加菌株 Y4 后,X24 与 T705 的转移系数 $TF_{\text{(地上部/根系)}}$ 分别降为 11.6% 和 9.8%。由此可见,施用菌株 Y4 不但能够降低水稻幼苗根系对 Cd 的吸收积累,还能抑制 Cd 从根系向地上部的转运。

2.4 *Burkholderia* sp. Y4 对水稻根系及其 Cd 离子流速的影响

利用非损伤微测等技术,深入研究施加菌株 Y4 对水稻幼苗根系 Cd 吸收的影响(图 6),结果发现,施加菌株 Y4 促进了 Cd 胁迫下水稻三叶一心期幼苗根系的生长,同时使根系表面附着一层黄色薄膜[图 6(a)].进一步对根系伸长区 Cd^{2+} 流速进行检测,非损伤微测系统传感器尖端检测位置如图 6(b) 所示。由图 6(c) 可见,水稻根系暴露于 Cd 环境后,水稻幼苗根系伸长区的 Cd^{2+} 内流,显示为负值,而

2.3 *Burkholderia* sp. Y4 对不同品种水稻 Cd 积累量的影响

施加菌株 Y4 不但能够促进水稻生长并缓解 Cd 毒性损伤和氧化应激,还能抑制不同基因型水稻幼苗对 Cd 的吸收积累(图 5)。在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 处理下,低 Cd 积累品种 X24 的地上部和根系 Cd 含量均低于高 Cd 积累品种 T705,而施加菌株 Y4 能够显著降低不同 Cd 积累型品种水稻幼苗各部位的 Cd 含量,使 X24 和 T705 的地上部 Cd 积累量分别减少 57.3% 和 79.2%,根系 Cd 积累量分别减少 24.1% 和 62.7%。由此可见,施用菌株 Y4 能抑制不同品种水稻幼苗根系对 Cd 的吸收,且与低 Cd 积累品种 X24 相比,菌株 Y4 对高 Cd 积累品种 T705 幼苗 Cd 吸收积累的抑制作用更强。

不同基因型水稻 Cd^{2+} 流速表现出显著性差异。仅 Cd 处理下,不同苗龄的高 Cd 积累品种 T705 的 Cd^{2+} 流速均显著高于低 Cd 积累品种 X24,3 d 苗龄时 T705 的 Cd^{2+} 流速是 X24 的 1.7 倍,10 d 苗龄时 T705 的 Cd^{2+} 流速是 X24 的 1.9 倍。施加菌株 Y4 后,Cd 胁迫下不同品种幼苗根系伸长区 Cd^{2+} 流速均显著降低,3 d 苗龄时,X24 的 Cd^{2+} 流速显著下降 35.0%,T705 的 Cd^{2+} 流速显著下降 36.0%;10 d 苗龄时,X24 的 Cd^{2+} 流速显著下降 24.9%,T705 的 Cd^{2+} 流速显著下降 44.6%。由此可见,施加菌株 Y4 能够抑制不同品种水稻幼苗根系对 Cd 的吸收,且在 10 d 苗龄时,对 T705 的 Cd^{2+} 内流的抑制作用较 X24 的更强。

3 讨论

Cd 胁迫会影响水稻基因表达和酶的活性,抑制其种子萌发和生长^[24]。有研究表明,根际促生菌可以通过代谢产生吲哚乙酸、赤霉素和铁载体等物质^[25]或通过解磷等作用^[26]促进植物生长,其中部分菌株还兼具抑制植物重金属吸收和降低重金属生

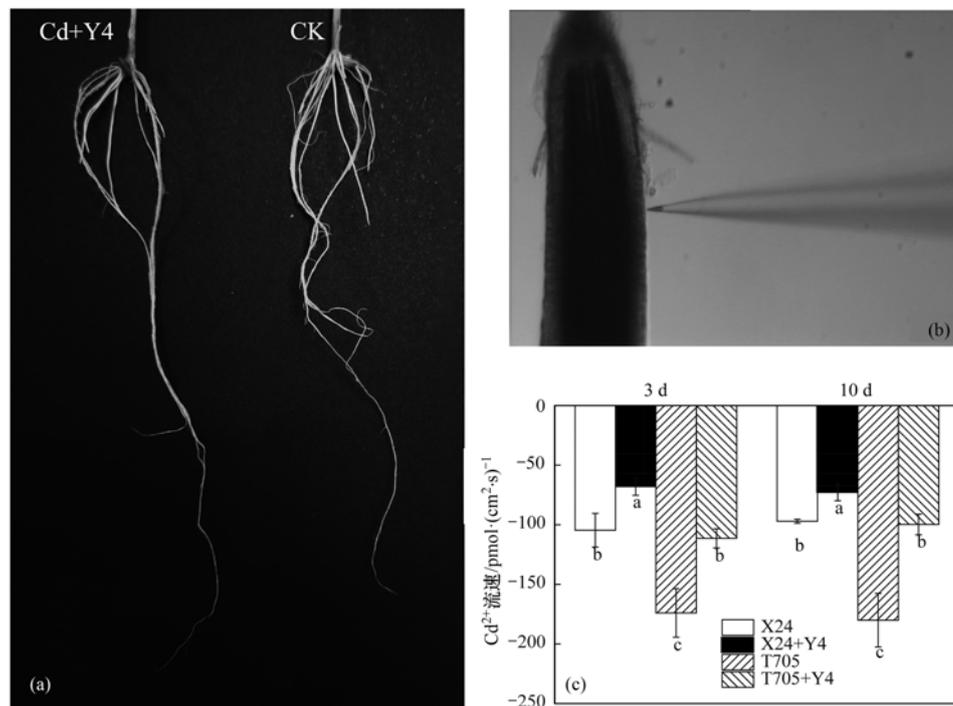


图6 菌株 Y4 对 Cd 胁迫下水稻幼苗根系和伸长区 Cd^{2+} 流速的影响

Fig. 6 Effects of *Burkholderia* sp. Y4 on roots and Cd^{2+} flux rate in the elongation zone of rice seedlings under Cd stress

物有效性的作用^[27]. 降 Cd 微生物通过多种方式抑制根系 Cd 吸收, 包括利用微生物细胞壁表面的巯基、羧基和羟基等配位基团, 以离子或共价键吸附 Cd^{2+} ^[28,29]; 利用代谢产物与 Cd 形成稳定的难溶化合物或胞外络合物, 并形成细胞表面凝结相, 选择性地结合 Cd 以促进其生物矿化或沉淀反应^[30]; 消耗能量利用离子转运系统将吸收的 Cd 隔离到细胞特定部位固定^[31]等. 由此可见, 除菌体细胞对 Cd 的吸附作用外, 降 Cd 菌还能通过生长代谢等活动, 降低根际环境中有效态 Cd 的含量以抑制水稻根对 Cd 的吸收, 并通过根表定殖成为拦截水稻 Cd 吸收转运的一道屏障. 因此, 利用降 Cd 促生菌缓解 Cd 污染对水稻产生的毒性作用并抑制其吸收积累, 具有良好的前景. 本研究以前期筛选的降 Cd 促生菌 *Burkholderia* sp. Y4 为材料, 该菌株 Y4 能够有效定殖在水稻根表和根际土壤中, 并且具有活性的菌株与死菌相比具有更强的 Cd 钝化能力, 在水稻全生育期盆栽试验中, 施加菌株 Y4 能够降低籽粒 Cd 积累量并提高其矿质元素含量^[22]. 以此为基础, 本研究进一步利用种子萌发和幼苗试验, 检测菌株 Y4 对 Cd 胁迫下水稻生长、氧化应激损伤、根 Cd 吸收速率及 Cd 转运积累的影响, 进而深入探究 *Burkholderia* sp. Y4 缓解水稻 Cd 毒性并抑制其 Cd 吸收积累的作用机制.

Cd 胁迫能够诱发氧化应激, 产生的活性氧在体内积累导致氧化损伤^[32], 影响植物生长发育. MDA

是活性氧自由基作用于膜脂发生过氧化反应的终产物, 其含量反映了过氧化损伤程度, 是逆境下植株受毒害损伤程度的重要指标^[33,34]. 而活性氧自由基的产生也影响了体内的抗氧化体系^[35], 包括 SOD 和 CAT 等抗氧化酶的活性^[36,37]. 本研究发现, Cd 胁迫下水稻幼根和幼芽的长度和生物量都显著降低, 同时幼苗地上部与根系中 Cd 含量和 MDA 含量显著增加, 证明 Cd 胁迫造成水稻脂质过氧化损伤, 对幼苗产生毒害作用并抑制其正常生长. 施加 *Burkholderia* sp. Y4 可以有效提高 Cd 胁迫下水稻种子的发芽势, 以及水稻根长、芽长和生物量, 有效缓解了 Cd 对水稻生长的抑制作用. 深入研究发现, 施加菌株 Y4 显著降低了水稻幼苗地上部与根系中氧化损伤产物 MDA 的含量, 缓解了 Cd 胁迫造成的氧化应激和毒性损伤. 同时, Cd 胁迫下水稻抗氧化酶活性的变化也在菌株 Y4 的作用下得到缓解, 根系 SOD 和 CAT 的活性水平恢复至无 Cd 胁迫水平, 而地上部 SOD 和 CAT 的活性变化也大幅降低. 由此可见, 菌株 Y4 不是通过提高抗氧化酶活性缓解 Cd 胁迫下水稻氧化应激, 而是抑制了氧化应激诱导的包括抗氧化酶调控在内的各种反应, 因此菌株 Y4 主要是通过抑制水稻对 Cd 的吸收, 从根本上降低 Cd 在植株内积累造成的毒性损伤和生长抑制.

水稻根系是 Cd 吸收的主要器官, 其 Cd 积累量与根际有效 Cd 浓度以及根系对 Cd 的吸收能力相关^[38,39], 不同基因型水稻根系对 Cd 的吸收积累能

力不同. 本研究利用不同 Cd 积累特性的水稻品种 X24 和 T705, 开展菌株 Y4 对水稻 Cd 吸收转运作用的研究发现, 幼苗根系伸长区 Cd^{2+} 流速在不同基因型水稻间存在差异, 在 3 d 和 10 d 苗龄时, 低 Cd 积累品种 X24 的 Cd^{2+} 流速都显著低于高 Cd 积累品种 T705. 施加菌株 Y4 能够改变水稻根表膜结构, 并降低不同品种不同苗龄水稻根系 Cd^{2+} 内流的瞬时速率, 证明菌株 Y4 对水稻根系 Cd 吸收的抑制作用不因其品种的差异而改变. 该结果与不同处理组间水稻幼苗根系 Cd 含量差异相符, 由此可见, 菌株 Y4 通过降低伸长区 Cd^{2+} 内流速率, 抑制了水稻根系对环境中 Cd 的吸收和积累. 同时, 施加菌株 Y4 还降低了不同品种水稻中 Cd 从根系向幼苗地上部的转移系数, 抑制了 Cd 从根向地上部的转运, 进而降低了幼苗地上部 Cd 积累量, 并且菌株 Y4 对高积累品种 T705 的降 Cd 效果要高于 X24. Cd 主要通过“蹭车”的方式, 借助营养元素阳离子通道, 进入水稻根系^[40,41], 并向地上部转运^[42,43], 同时调控 Cd 在不同器官和细胞组分之间的分布^[44]. 不同品种水稻 Cd 转运相关蛋白基因型的不同, 导致了其 Cd 耐性和吸收积累特性的差异, 以及不同降 Cd 剂在分子层面的作用机制差异^[45]. 由此推测, 菌株 Y4 对水稻幼苗 Cd 从根向地上部转运的抑制作用, 以及对不同 Cd 积累特性水稻品种降 Cd 效果的差异, 很可能与 *Burkholderia* sp. Y4 对水稻 Cd 转运相关蛋白的调控作用有关, 相关分子机制还有待深入研究.

综上所述, *Burkholderia* sp. Y4 能够有效缓解 Cd 胁迫对水稻生长的抑制作用, 提高种子萌发率, 促进幼根和幼芽的生长, 降低 Cd 胁迫下植株内氧化应激反应和毒性损伤. 根施 *Burkholderia* sp. Y4 能够改变水稻根表膜结构, 降低幼苗根系伸长区的 Cd^{2+} 内流速率, 从而抑制根际 Cd 向根内的转移, 同时还降低了根内 Cd 向幼苗地上部的转运率, 显著减少不同基因型水稻幼苗根系和地上部的 Cd 积累量. 因此, *Burkholderia* sp. Y4 作为水稻降 Cd 微生物菌剂具有一定的应用前景.

4 结论

(1) 施加 *Burkholderia* sp. Y4 有效缓解了 Cd 胁迫下的毒性损伤和氧化应激反应, 促进了水稻幼苗的生长.

(2) 根施 *Burkholderia* sp. Y4 显著降低了水稻根系伸长区 Cd^{2+} 流速和幼苗 Cd 转移系数, 抑制了幼苗根系和地上部中的 Cd 积累.

(3) 水稻品种 T705 的根系 Cd^{2+} 流速和幼苗各部位 Cd 含量均显著高于品种 X24, 施加

Burkholderia sp. Y4 对 T705 的降 Cd 效果更明显.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部国土资源部. 环境保护部国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2014-04/17/content_2661765.htm, 2014-04-17.
- [2] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5562-5570. Dou W Q, An Y, Qin L, et al. Technological classification of cadmium quality in the rice producing areas of south China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5562-5570.
- [3] 王祖光, 周其文, 赵玉杰, 等. 土壤筛选值在镉污染稻米产地环境评价与分类适用性探讨[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(10): 2328-2337. Wang Z G, Zhou Q W, Zhao Y J, et al. Applicability of risk screening values for soil contamination of agricultural land in evaluation and classification of cadmium-contaminated rice producing areas [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(10): 2328-2337.
- [4] 董峰, 杨佳, 李向阳, 等. 镉通过引发氧化应激和线粒体损伤诱导 PK-15 细胞凋亡[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2018, **34**(11): 1185-1193. Dong F, Yang J, Li X Y, et al. Cadmium induces apoptosis in PK-15 cells through oxidative stress and mitochondrial damage [J]. Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology, 2018, **34**(11): 1185-1193.
- [5] 章清杞, 林荔辉, 张青龄, 等. 水稻镉积累调控技术的研究进展[J]. 中国稻米, 2020, **26**(6): 27-31. Zhang Q Q, Lin L H, Zhang Q L, et al. Research progress on regulation technology of cadmium accumulation in rice[J]. China Rice, 2020, **26**(6): 27-31.
- [6] Clemens S, Ma J F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods [J]. Annual Review of Plant Biology, 2016, **67**: 489-512.
- [7] Hu Y A N, Cheng H F, Tao S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review [J]. Environment International, 2016, **92-93**: 515-532.
- [8] 黄连喜, 魏岚, 刘晓文, 等. 生物炭对土壤-植物体系中铅镉迁移累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(10): 2205-2216. Huang L X, Wei L, Liu X W, et al. Effects of Biochar on the migration and accumulation of lead and cadmium in soil-plant systems [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(10): 2205-2216.
- [9] Treesubuntorn C, Dhurakit P, Khaksar G, et al. Effect of microorganisms on reducing cadmium uptake and toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(26): 25690-25701.
- [10] Liu Y L, Tie B Q, Li Y X L, et al. Inoculation of soil with cadmium-resistant bacterium *Delftia* sp. B9 reduces cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grains [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **163**: 223-229.
- [11] 庞海东, 贺卓, 燕传明, 等. 耐重金属的植物促生芽孢杆菌筛选及其强化香蒲去除 Cd 的作用[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(11): 2314-2321. Pang H D, He Z, Yan C M, et al. Isolation of heavy metal resistant and plant growth promoting *Bacillus* strains and effects on cadmium removal by *Typha angustifolia* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(11): 2314-2321.
- [12] 孙韵雅, 陈佳, 王悦, 等. 根际促生菌促生机理及其增强植

- 物抗逆性研究进展[J]. 草地学报, 2020, **28**(5): 1203-1215.
- Sun Y Y, Chen J, Wang Y, *et al.* Advances in growth promotion mechanisms of PGPRs and their effects on improving plant stress tolerance[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, **28**(5): 1203-1215.
- [13] Ke T, Guo G Y, Liu J R, *et al.* Improvement of the Cu and Cd phytostabilization efficiency of perennial ryegrass through the inoculation of three metal-resistant PGPR strains [J]. Environmental Pollution, 2021, **271**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116314.
- [14] Khanna K, Jamwal V L, Gandhi S G, *et al.* Metal resistant PGPR lowered Cd uptake and expression of metal transporter genes with improved growth and photosynthetic pigments in *Lycopersicon esculentum* under metal toxicity [J]. Scientific Reports, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-41899-3.
- [15] Zhou J Y, Li P, Meng D L, *et al.* Isolation, characterization and inoculation of Cd tolerant rice endophytes and their impacts on rice under Cd contaminated environment [J]. Environmental Pollution, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.113990.
- [16] Nataly A T, Armando C G, Leonardo C A, *et al.* Resistencia a cadmio (Cd) de bacterias endófitas y bacterias rizosféricas aisladas a partir de Oriza sativa en Colombia [J]. Revista Colombiana de Ciencia Animal, 2017, **9**(2): 281-293.
- [17] 季丹丹, 魏树和, 王嗣淇. 非损伤微测技术及其在环境科学领域的应用[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(10): 2951-2955.
- Ji D D, Wei S H, Wang S Q. Non-invasive micro-test technique and its application in environmental science[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(10): 2951-2955.
- [18] 韩立娜, 居学海, 张长波, 等. 水稻镉离子流速的基因型差异及其与镉积累量的关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(1): 37-42.
- Han L N, Ju X H, Zhang C B, *et al.* Genotypic variation of Cd²⁺ flux and its relationship with Cd accumulation in rice plant [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(1): 37-42.
- [19] Wang F J, Wang M, Liu Z P, *et al.* Different responses of low grain-Cd-accumulating and high grain-Cd-accumulating rice cultivars to Cd stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2015, **96**: 261-269.
- [20] 徐筱. 锰离子对水稻镉吸收转运特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017. 18-22.
- Xu Y. Effects of manganese ions on cadmium absorption and translocation in rice [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. 18-22.
- [21] 张亚经, 马成仓, 郭军康, 等. 接种伯克氏菌 D54 对东南景天吸收富集 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(3): 449-457.
- Zhang Y J, Ma C C, Guo J K, *et al.* The effect of inoculating *Burkholderia* sp. D54 on cadmium uptake and accumulation in *Sedum alfredii* hance[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(3): 449-457.
- [22] Wang C R, Huang Y C, Yang X R, *et al.* *Burkholderia* sp. Y4 inhibits cadmium accumulation in rice by increasing essential nutrient uptake and preferentially absorbing cadmium [J]. Chemosphere, 2020, **252**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126603.
- [23] 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.
- [24] 汪敦飞, 郑新宇, 肖清铁, 等. 铜绿假单胞菌对镉胁迫前期水稻根系活力及叶片生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(8): 2767-2774.
- Wang D F, Zheng X Y, Xiao Q T, *et al.* Effects of *Pseudomonas aeruginosa* on root activity and leaf physiological characteristics in rice (*Oryza sativa* L.) seedling under cadmium stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(8): 2767-2774.
- [25] 杨丽, 燕传明, 贺卓, 等. 重金属耐性芽孢杆菌的筛选及其对辣椒吸收镉铅的阻控效应[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(6): 1086-1093.
- Yang L, Yan C M, He Z, *et al.* Effect of heavy metal-tolerant spore-forming bacteria on the cadmium and lead uptake of pepper [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(6): 1086-1093.
- [26] 渠露露, 彭长连, 李淑彬. 一株溶植酸磷类芽孢杆菌的分离筛选及对水稻幼苗的促生作用[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(1): 326-332.
- Qu L L, Peng C L, Li S B. Isolation and screening of a phytate phosphate-solubilizing *Paenibacillus* sp. and its growth promoting effect on rice seedling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(1): 326-332.
- [27] 郭军康, 董明芳, 丁永祯, 等. 根际促生菌影响植物吸收和转运重金属的研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(7): 1228-1234.
- Guo J K, Dong M F, Ding Y Z, *et al.* Effects of plant growth promoting rhizobacteria on plants heavy metal uptake and transport: A review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(7): 1228-1234.
- [28] Yu Q, Fein J B. Enhanced removal of dissolved Hg(II), Cd(II), and Au(III) from water by *Bacillus subtilis* bacterial biomass containing an elevated concentration of sulfhydryl sites [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(24): 14360-14367.
- [29] Carpio I E M, Ansari A, Rodrigues D F. Relationship of biodiversity with heavy metal tolerance and sorption capacity: A Meta-analysis approach [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(1): 184-194.
- [30] Chen S H, Cheow Y L, Ng S L, *et al.* Mechanisms for metal removal established via electron microscopy and spectroscopy: a case study on metal tolerant fungi *Penicillium simplicissimum*[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, **362**: 394-402.
- [31] Chen Y M, Chao Y Q, Li Y Y, *et al.* Survival strategies of the plant-associated bacterium *Enterobacter* sp. strain EG16 under cadmium stress[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2016, **82**(6): 1734-1744.
- [32] Dabral S, Yashaswee N, Varma A, *et al.* Biopriming with *Piriformospora indica* ameliorates cadmium stress in rice by lowering oxidative stress and cell death in root cells [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **186**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109741.
- [33] 刘玲, 戴慧芳, 唐凤雪, 等. 水稻幼苗根对羧基化多壁碳纳米管复合镉胁迫的生长生理响应[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(1): 252-259.
- Liu L, Dai H F, Tang F X, *et al.* Responses of growth and physiology of rice (*Oryza sativa* L.) seedling roots to MWCNTs-COOH combined with Cd stress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39**(1): 252-259.
- [34] 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 等. 外源亚精胺对 As⁵⁺ 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 As⁵⁺ stress[J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (3): 1505-1512.
- [35] Ren X Q, Zhu J Z, Liu H Y, *et al.* Response of antioxidative system in rice (*Oryza sativa*) leaves to simulated acid rain stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **148**: 851-856.
- [36] 任潇茜, 梁婵娟. 模拟酸雨对水稻叶片抗氧化系统影响的时间效应[J]. *安全与环境学报*, 2017, **17**(4): 1609-1613.
- Ren X Q, Liang C J. Time effect of the simulated acid rain on the antioxidant system in growing rice leaves [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, **17**(4): 1609-1613.
- [37] 谭佳缘, 单羽, 任晓宁, 等. 预处理及复水对 PEG 胁迫下水稻抗氧化系统的影响 [J]. *西南农业学报*, 2020, **33**(6): 1153-1157.
- Tan J Y, Shan Y, Ren X N, *et al.* Effects of pretreatment and rehydration on antioxidant system of rice under PEG stress [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, **33**(6): 1153-1157.
- [38] 刘仲齐, 张长波, 黄永春. 水稻各器官镉阻控功能的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(4): 721-727.
- Liu Z Q, Zhang C B, Huang Y C. Research advance on the functions of rice organs in cadmium inhibition: A review [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(4): 721-727.
- [39] Li H, Luo N, Li Y W, *et al.* Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **224**: 622-630.
- [40] Cai Y M, Wang M E, Chen B D, *et al.* Effects of external Mn²⁺ activities on *OsNRAMP5* expression level and Cd accumulation in indica rice [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.113941.
- [41] Yan H L, Xu W X, Xie J Y, *et al.* Variation of a major facilitator superfamily gene contributes to differential cadmium accumulation between rice subspecies [J]. *Nature Communications*, 2019, **10**(1), doi: 10.1038/s41467-019-10544-y.
- [42] Maghrebi M, Baldoni E, Lucchini G, *et al.* Analysis of cadmium root retention for two contrasting rice accessions suggests an important role for *OsHMA2* [J]. *Plants*, 2021, **10**(4), doi: 10.3390/plants10040806.
- [43] Luo J S, Huang J, Zeng D L, *et al.* A defensin-like protein drives cadmium efflux and allocation in rice [J]. *Nature Communications*, 2018, **9**(1), doi: 10.1038/s41467-018-03088-0.
- [44] Lu C N, Zhang L X, Tang Z, *et al.* Producing cadmium-free *Indica* rice by overexpressing *OsHMA3* [J]. *Environment International*, 2019, **126**: 619-626.
- [45] 程六龙, 黄永春, 王常荣, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 3037-3045.
- Cheng L L, Huang Y C, Wang C R, *et al.* Mechanism of S-allyl-L-cysteine alleviating cadmium stress in seedling roots and buds of rice seedlings [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 3037-3045.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-ni, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xiao-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Julong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)