

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

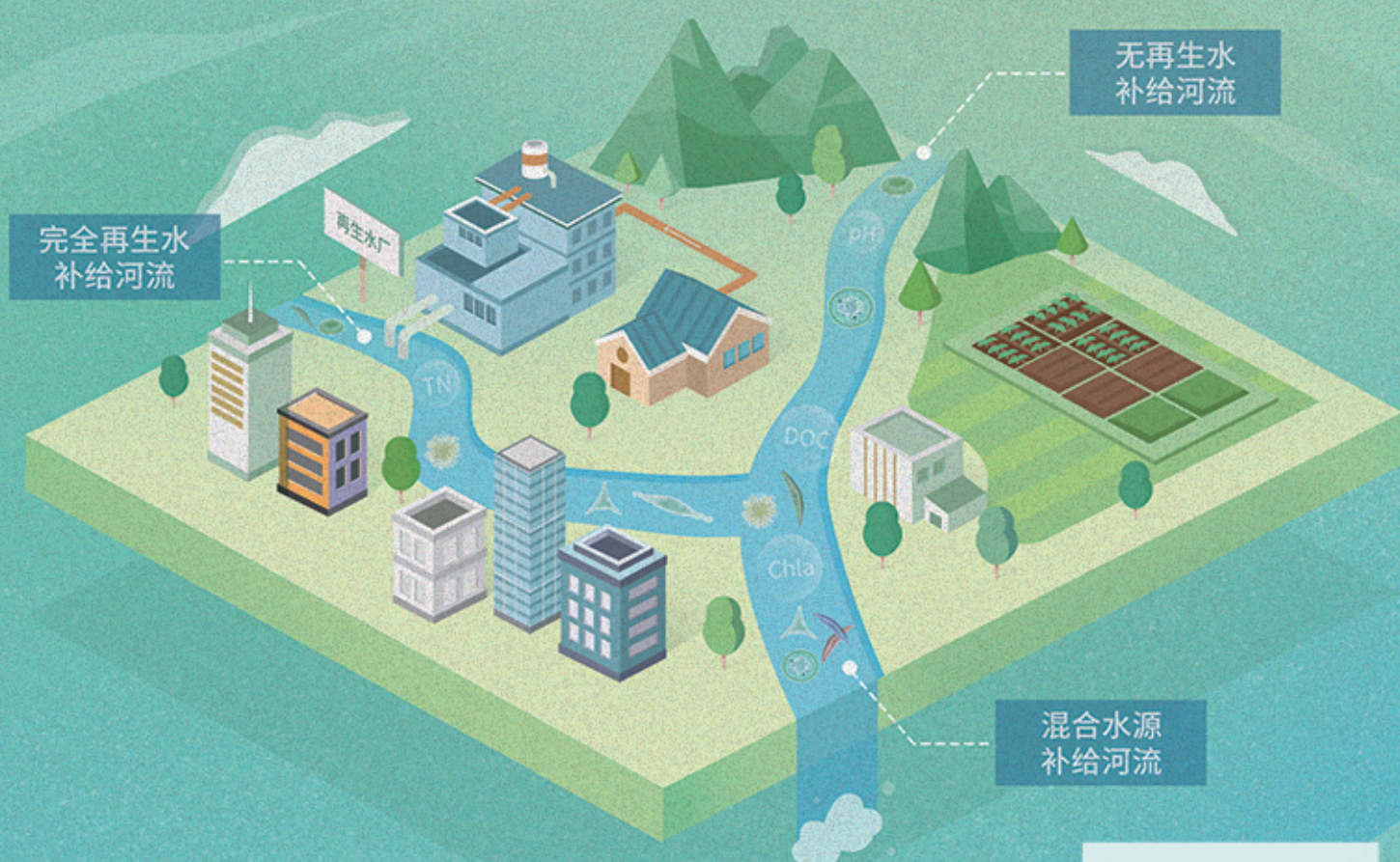
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜璨, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制

姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉*

(南阳师范学院生命科学与农业工程学院, 南水北调中线水源区水安全河南省协同创新中心, 河南省南水北调中线水源区生态安全重点实验室, 南阳 473061)

摘要: 为了探究重金属固定植物促生细菌强化作物消减对重金属的吸收及其机制, 以产多胺细菌 *Enterobacter bugandensis* YX6 和小麦为研究对象, 通过水培试验研究 Cd 胁迫下菌株 YX6 对小麦生长和 Cd 吸收以及 Cd 在小麦根系中亚细胞分布的影响, 同时借助非标记蛋白质组学技术研究菌株 YX6 对小麦根系蛋白质表达的影响. 结果表明, 与单独 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理相比, Cd 胁迫下接种菌株 YX6 显著提高了小麦根(42.71%)和叶片(82.83%)的干重, 显著降低了小麦根(48.56%)和叶(61.41%)中 Cd 的含量. 同时, 菌株 YX6 的接种显著提高了小麦根和叶中多胺的含量, 进而增强了小麦对 Cd 的抗性. 此外, YX6 + Cd 处理组中小麦根细胞器和可溶性部分中 Cd 的比例显著低于单独 Cd 处理中的比例, 而细胞壁中 Cd 的比例则要高于单独 Cd 处理中的比例. 非标记蛋白质组学显示, Cd 胁迫下菌株 YX6 提高了小麦根系中与 DNA 修复(蛋白质-DNA 复合物和 DNA 包装复合物)和激素(脱落酸和茉莉酸)合成相关蛋白质的表达, 从而提高了小麦对 Cd 的抗性和消减 Cd 吸收. 结果可为阐明产多胺细菌消减小麦 Cd 吸收的分子机制和保障小麦安全生产提供科学依据和技术途径.

关键词: 产多胺细菌; 小麦; 镉(Cd); 蛋白质组学; 钝化

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5778-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202203048

Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat

Ji Ming-fei, Wu Xue-jiao, Li Xiao-zhe, Chen Zhao-jin, Yao Lun-guang, Zhang Jun, Pang Fa-hu, Han Hui*

(Henan Key Laboratory of Ecological Security for Water Source Region of Mid-line of South-to-North Diversion Project, Collaborative Innovation Center of Water Security for Water Source Region of Mid-route Project of South-North Water Diversion of Henan Province, College of Life Sciences and Agricultural Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

Abstract: In order to study the mechanisms of heavy metal-immobilizing and plant growth-promoting bacteria inhibiting the absorption of heavy metals by crops, the polyamine-producing bacteria *Enterobacter bugandensis* YX6 and wheat were used as the research objects. The effects of strain YX6 on the growth and Cd absorption of wheat and the distribution of Cd in subcells of wheat root were studied using a hydroponic experiment under $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd. Moreover, the effect of strain YX6 on wheat root protein expression was studied using the unlabeled proteomics technique. The results showed that under $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd, strain YX6 significantly increased the dry weight of wheat roots (42.71%) and leaves (82.83%) and reduced the content of Cd in wheat roots (48.56%) and leaves (61.41%). The inoculation of strain YX6 significantly increased the contents of polyamines in wheat roots and leaves and enhanced the resistance to Cd and reduced the absorption of Cd in wheat. In addition, the proportions of Cd in the organelles and soluble parts of wheat roots in the YX6 + Cd treatment group were significantly lower than that in the single Cd treatment, whereas the proportion of Cd in the cell wall was higher than that in the single Cd treatment. Unlabeled labeled proteomics showed that under Cd stress, strain YX6 increased the expression of proteins related to DNA repair (protein DNA complex and DNA packaging complex) and hormone (abscisic acid and jasmonic acid) synthesis in wheat roots, thus improving wheat resistance to Cd and reducing Cd absorption. These results provide a theoretical basis and technical way for clarifying the molecular mechanism of polyamine-producing bacteria reducing Cd absorption in wheat and ensuring the safe production of wheat.

Key words: polyamine-producing bacteria; wheat; cadmium (Cd); proteomics; immobilization

由于不合理的采矿和农业废弃物的随意处置等,大量的镉(Cd)等重金属进入农田,造成土壤重金属含量超标^[1,2]. 重金属在土壤中会随着土壤-植物系统进入到作物中,再通过食物链积累到人体中,严重威胁人类的健康^[3~5]. 我国北方地区是小麦主产区,近年来“镉麦”事件的不断曝光,引起了全社会对小麦重金属超标问题的广泛担忧^[6,7]. 目前,有效阻控作物富集土壤重金属的途径主要包括:低积累重金属品种的培育,叶面阻控剂的喷施、原位钝化修复技术和农艺调控技术等^[8~11]. 其中原位钝化是目前研究较多、效果较好的一种修复方法,其核心思路就是通过钝化剂的施加,使重金属固定在土

壤中,减少重金属的流动性,进而阻控作物对重金属的吸收^[12]. 重金属固定植物促生细菌是一类研究较多的具有固定重金属和阻控作物吸收重金属的微生物,这类细菌吸附固定重金属的机制主要有细胞壁的表面吸附、胞内富集、胞外吸附整合、生物沉淀和氧化还原等^[13,14]. 此外,重金属固定植物促生细

收稿日期: 2022-03-05; 修订日期: 2022-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907143); 河南省青年人才托举工程项目(2022HYTP033); 河南省科技攻关计划项目(212102310844, 212102110391, 212102310076); 南阳市重大科技专项项目(2019ZDZX10)

作者简介: 姬明飞(1983~),男,博士,副教授,主要研究方向为植物-微生物-重金属相互作用, E-mail: jimingfei@gmail.com

* 通信作者, E-mail: 17657311626@163.com

菌还能够产生铁载体、生长素和脱落酸等物质,促进作物生长、提高作物抗逆性和改善土壤质量^[15,16],这也是微生物钝化剂相比化学钝化剂具有的最大优势。

当植物受到环境胁迫时,可诱导体内某些蛋白质的表达,来抵抗外界的环境胁迫^[17]。功能微生物可以调节植物根系中的蛋白质表达,以阻止重金属进入根系^[18]。蛋白质组学技术已经成为应用于研究植物生长、种子发育和抵抗胁迫机制的重要手段。Li 等^[19]研究表明重金属抗性植物促生细菌 *Pseudomonas* sp. TLC 6-6.5-4 的接种显著提高了玉米根系与植物发育和应激反应相关的蛋白质的表达,降低了玉米对 Cu 的吸收。笔者实验室筛选到 1 株产多胺细菌 *Enterobacter bugandensis* YX6,能够分泌精胺和亚精胺、钝化固定 Cd 和阻控空心菜对 Cd 的吸收^[20]。然而,Cd 胁迫下菌株 YX6 对小麦吸收 Cd 和根系蛋白质表达的影响还不清楚。因此,本文通过水培试验研究了菌株 YX6 对小麦根系和叶片生长、Cd 吸收和抗氧化酶活性以及 Cd 在小麦根系中亚细胞分布的影响,利用非标记蛋白质组学分析了 Cd 胁迫下菌株 YX6 对小麦根系蛋白质表达的影响,以期阐明产多胺细菌消减小麦 Cd 吸收的分子机制和保障小麦安全生产提供理论依据和技术途径。

1 材料与方法

1.1 供试菌株和小麦

菌株 *Enterobacter bugandensis* YX6 来自于南水北调中线水源区水安全协同创新中心实验室。郑麦 7698 (*Triticum aestivum* L.) 购自于南阳市种子站,为河南地区常规小麦品种。

1.2 小麦水培试验

选取籽粒饱满的小麦种子若干,先用无菌去离子水冲洗 3 次,然后用 5% 乙醇溶液消毒 3 min,最后用无菌去离子水冲洗 3 次,铺于湿纱布上,28℃ 催芽 24 h。小麦种子发芽后,选择 20 粒大小相同的种子,移栽到花盆中(直径 15 cm,高 30 cm)。花盆的上层装有 1.0 kg 石英砂,下层含有 1.8 L 霍格兰营养液。水培试验共有 4 种处理:①未经 Cd 处理且未接种菌株 YX6 的小麦(CK);②用 3 mg·L⁻¹ Cd 处理的小麦(Cd);③接种菌株 YX6 的小麦(YX6);④含有 3 mg·L⁻¹ Cd 并且接种菌株 YX6 的小麦(YX6 + Cd)。每个处理做 3 个重复。小麦幼苗培养 14 d 后,添加 Cd 母液,使培养液中的 Cd 浓度为 3 mg·L⁻¹,同时接种菌株 YX6。首先制备菌株 YX6 的细菌悬浮液($D_{600} = 10^8$ CFU·mL⁻¹)。采用浸根的方法

式进行接种,即把小麦根放入到细菌菌悬液中,浸泡 2 h。为了让小麦持续地受到 Cd 胁迫,每周更换营养液后会继续添加 Cd 母液,使 Cd 初始浓度为 3 mg·L⁻¹。所有的植物都生长在温室中,温室的室温保持在(25 ± 2)℃。从第 1 次添加 Cd 开始算,40 d 后进行收获处理。

1.3 小麦样品收获和菌株 YX6 的定殖检测

用剪刀把小麦的茎叶和根分开。为了去除吸附在小麦组织表面的 Cd,使用 EDTA-2Na (0.01 mol·L⁻¹)溶液浸泡样品 10 min,再用去离子水冲洗 3 遍。为了检测菌株 YX6 在小麦根上定殖的情况,取部分新鲜小麦根研磨成糊状物,进行梯度稀释,涂于含有 400 mg·L⁻¹ Cd 的产多胺筛选培养基^[15],28℃ 下培养 3 d,数出菌落数。在平板上随机挑取一定数量的菌落,采用细菌 DNA 提取试剂盒提取各个菌株的 DNA,然后使用通用引物 27F (5'-AGAGTTT GATCCTGCTCAG-3') 和 1492R (5'-GGTACCTT GTTACGACTT-3') 进行 16S rRNA 基因扩增,扩增产物送到上海生工进行测序,得到每个菌株的种属信息。选取一定量的小麦根和叶,用电子秤测量鲜重和干重。称取烘干后的植物样品 0.200 g,粉碎机粉碎后放到聚乙烯坩埚中,加入 3 mL 的盐酸和 9 mL 的硝酸,在通风橱中加盖浸泡过夜。第 2 d 放在电热板上,120℃ 低温加热,使样品初步分解,4 h 后打开盖子,升温至 160℃ 进行消解和赶酸,直至内容物为透明黏稠状为止。若消解不彻底,再加入 3 mL 硝酸和 1 mL 盐酸,重复上述消解过程。最后用去离子水进行定容,过 0.22 μm 滤膜后进行 Cd 含量测定。使用电感耦合等离子体发射光谱仪(Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ICP-AES)测定小麦叶和根的 Cd 含量。同时采用国家标准参比物质(植物:GBW-08501)进行质量控制,标样测定结果均在允许误差范围内,回收率在 97.3%~98.9%。用抗氧化酶试剂盒测定新鲜小麦根和叶的超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化物酶(POD)活性。

1.4 小麦样品中多胺含量的测定

将 2 g 新鲜小麦根或叶加到含有 60 mL 80% 甲醇溶液中,用研磨棒研磨成匀浆,4℃ 下振荡 24 h,并过滤。滤液在旋转蒸发干燥器中蒸发至原始体积的一半,然后添加 10 mL 石油醚并均匀混合样品,去除甲醇溶液并浓缩以获得水溶液。通过高效液相色谱法测定小麦叶或根中的精胺和亚精胺的含量^[21]。

1.5 小麦根中 Cd 的亚细胞分布测定

参考 Wu 等^[22]的方法测定不同处理下小麦根中 Cd 的亚细胞分布。将 0.5 g 在液氮中冷冻的小麦根添加到含有 154 mg·L⁻¹ 二硫代三糖醇、0.05

$\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris-HCl (pH 7.5) 和 $85.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 20 mL 蔗糖溶液中, 研磨成匀浆. 然后, 匀浆通过尼龙布 ($80\text{ }\mu\text{m}$) 过滤, 尼龙布上的残留物被认为是细胞壁部分; 滤液在 $5\,000\text{ g}$ 下离心 10 min , 离心管底部的颗粒被指定为细胞器部分; 而上清液被指定为可溶性部分. 采用 ICP-AES 测定各个组分的 Cd 含量.

1.6 非标记蛋白质组学

将 2.0 g 小麦根在液氮中磨成细粉, 然后在含有 2.5% SDS 和 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris-HCl (pH 8.0) 的裂解缓冲液中超声处理 15 min , $12\,000\text{ g}$ 下离心 15 min . 加入 2 倍体积的丙酮溶液, 沉淀上清液中的蛋白质, 然后将其溶解在 $8\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 尿素和 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Tris-HCl (pH 8.0) 的缓冲液中. $12\,000\text{ g}$ 下离心 15 min , 加入 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ DTT, 37°C 反应 1 h . 然后进行烷基化反应 ($40\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碘乙酰胺, 25°C 下黑暗处理 30 min). 以 $1:50$ 的比例添加胰蛋白酶 (酶: 蛋白质, 质量比), 并在 37°C 下过夜消化混合物. 次日, 用 TFA 将 pH 降至 6.0 以结束消化, 然后 $12\,000\text{ g}$ 离心 15 min , 使用 Sep-Pak C18 脱盐柱对上清液进行多肽纯化, 洗脱液真空干燥并储存在 -20°C 备用. 数据采集在配备纳米喷雾源的混合四极 TOF LC-MS/MS 质谱仪 (TripleTOF 5600, SCIEX) 上进行. 将约 $2\text{ }\mu\text{g}$ 肽溶解在 MS 加载缓冲液 (0.1% 甲酸) 中, 通过自动进样器加载到 C18 柱上 ($5\text{ }\mu\text{m}$, $5\times 0.3\text{ mm}$, Agilent Technologies), 然后洗脱到 C18 分析柱 ($75\text{ }\mu\text{m}\times 150\text{ mm}$, $3\text{ }\mu\text{m}$ particle size, 10 nm pore size, Eksigent) 中. 使用流动相 A (3% DMSO, $97\%\text{ H}_2\text{O}$, 0.1% 甲酸) 和流动相 B (3% DMSO, $97\%\text{ ACN}$, 0.1% 甲酸) 建立 100 min 的梯度. 恒定流速设置为 $300\text{ nL}\cdot\text{min}^{-1}$. 使用 2.3 kV 的喷雾电压、 20 PSI 的幕气和 150°C 的界面加热器温度获取数据. 使用 MaxQuant 软件 (V1.6.2.10) 和 Andromeda 数

库对来自 TripleTOF 5600 的原始数据进行分析. 使用默认参数对照 UniProt *Triticum aestivum* 蛋白质数据库搜索光谱文件. 使用无标签量化模式, 最小比率计数设置为 1, 并检查运行间匹配功能. 在蛋白质和肽水平上用 1% 的 FDR 筛选搜索结果. 基于具有相同或相似氨基酸序列的蛋白质共享相似功能的原理, 使用 BLASTed 算法针对 NR 数据库中指定的分类单元 ID 对从蛋白质组分析中获得的蛋白质序列进行分析.

1.7 荧光定量 PCR 验证

选取茉莉酸生物合成相关酶基因 (OPR, OPR-F: $5'\text{-ACAGGGAGGAAGGGAAC AAGG-3'}$, OPR-R: $5'\text{-TTGGGCAGGTCAGGGTTAGC-3'}$) 和谷胱甘肽 S-转移酶 (*tau*GST, GST-F: $5'\text{-AAGAGATTGTCGGTG TCAGTTTGG-3'}$, GST-R: $5'\text{-CGGCGTGTCTGTTTA GAGAATAG-3'}$) 进行验证上述蛋白质组学的结果. 使用 TransZol 植物试剂 (TransGen Biotech) 提取小麦根的 RNA, 并使用带有 gDNA 擦除器 (TaKaRa) 的 PrimeScript™ RT 试剂盒进行反转录^[23].

1.8 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析, 用 Microsoft Excel 2010 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 菌株 YX6 在小麦根的定殖检测

结合平板梯度稀释法和 16S rRNA 测序来检测菌株 YX6 在小麦根表面的定殖情况. 由表 1 可知, CK 和 Cd 处理组中肠杆菌属菌株的数量都在 $100\text{ CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ 以下, 而 YX6 和 YX6 + Cd 处理组中肠杆菌属菌株的数量都在 $35\,000\text{ CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ 以上. 这表明菌株 YX6 能够在小麦根表面大量地定殖.

表 1 菌株 YX6 在小麦根表面的定殖数量¹⁾/ $\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 1 Number of strain YX6 colonizing the wheat root surface/ $\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$

处理	CK	Cd	YX6	YX6 + Cd
肠杆菌属菌株的数量	$71\pm 12\text{c}$	$58\pm 14\text{c}$	$42\,571\pm 344\text{a}$	$37\,841\pm 327\text{b}$

1) 数据为平均值 $\pm$ 标准差 ($n=3$); 同一行不同小写字母表示处理之间有显著差异 ($P<0.05$)

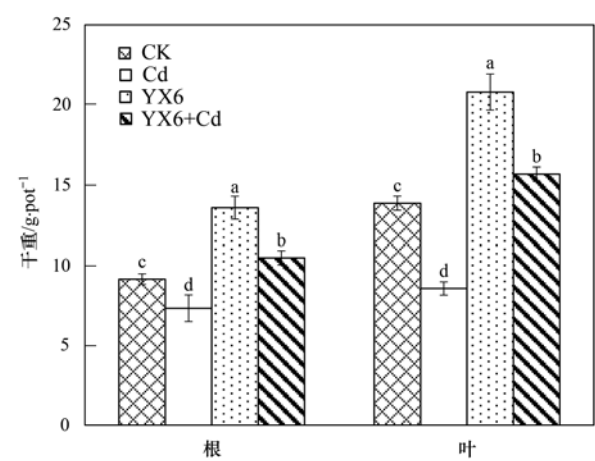
2.2 不同处理对小麦干重的影响

图 1 显示了 Cd、YX6 和 YX6 + Cd 处理对小麦生长的影响. 对照处理组中小麦根的干重为 $9.14\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$, 小麦茎叶的干重为 $13.83\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$. 与对照相比, Cd 处理抑制了小麦的生长, 显著降低了小麦根 (19.81%) 和叶片 (38.15%) 的干重. 菌株 YX6 显著提高了小麦根 (48.36%) 和叶片 (50.01%) 的干重. 菌株 YX6 + Cd 则显著提高了小麦根

(14.44%) 和叶片 (13.08%) 的干重. 此外, 与 Cd 处理相比, YX6 + Cd 处理显著增加了小麦根系 (42.71%) 和叶片 (82.83%) 的干重, 表明菌株 YX6 在 Cd 胁迫下仍能促进小麦生长.

2.3 不同处理对小麦各组织 Cd 吸收的影响

在未添加 Cd 的处理下, CK 处理组中小麦根的 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.04\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, YX6 处理组中小麦根的 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cd 含量均非常低. 而在小



同一小麦组织不同小写字母表示处理之间有显著差异 ($P < 0.05$)

图 1 不同处理对小麦各组织干重的影响
Fig. 1 Effects of different treatments on the dry weight of wheat roots and leaves

表 2 不同处理对小麦 Cd 吸收的影响¹⁾

处理	CK	Cd	YX6	YX6 + Cd
小麦根 $\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$0.03 \pm 0.02\text{c}$	$2.43 \pm 0.32\text{a}$	$0.02 \pm 0.01\text{c}$	$1.25 \pm 0.17\text{b}$
小麦叶 $\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	$1.14 \pm 0.12\text{a}$	—	$0.44 \pm 0.03\text{b}$
小麦根 Cd 吸收量/ $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$	$0.33 \pm 0.02\text{c}$	$17.81 \pm 0.82\text{a}$	$0.36 \pm 0.03\text{c}$	$13.07 \pm 0.74\text{b}$
小麦叶 Cd 吸收量/ $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$	—	$9.75 \pm 0.42\text{a}$	—	$6.88 \pm 0.35\text{b}$

1) 数值为平均值 $\pm$ 标准偏差 ($n=3$) ; “—” 表示未检测到数值; 同一行不同小写字母表示处理之间有显著差异 ($P < 0.05$)

(47.80%) 和 POD 的酶活 (144%) ,表明小麦根在遭受到 Cd 胁迫时,会进行自我调节,提高 SOD 和 POD 的活性.而菌株 YX6 的接种对小麦根 SOD 和 POD 的酶活无显著影响.与单独 Cd 胁迫相比,Cd 胁迫下接种菌株 YX6 显著降低了 SOD(19.15%) 和 POD(32.96%) 的酶活,表明菌株 YX6 的接种降低了 Cd 对小麦造成的压力,缓解了 Cd 毒害,从而使小麦无需再额外表达过量的抗氧化酶.同样的对于小麦叶来说,与 CK 处理相比,Cd 的添加则显著提高了 SOD(59.15%) 和 POD(79.59%) 的酶活.而与单独 Cd 胁迫相比,Cd 胁迫下菌株 YX6 的接种显著降低了 SOD(26.74%) 和 POD(25.01%) 的酶活.

2.5 不同处理对小麦组织多胺含量的影响

菌株 YX6 具有分泌精胺和亚精胺的能力,因此会对小麦根和叶内多胺(腐胺 + 精胺 + 亚精胺)的含量造成一定的影响.由图 3 可知,对照组小麦根的 ω (多胺)为 $38.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,叶的 ω (多胺)为 $18.38\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.Cd 的添加对小麦根和叶的多胺含量无显著影响,而菌株 YX6 的接种则显著提高了小麦根(104%) 和叶(169%) 多胺的含量.此外,与单独接种 YX6 相比,Cd 胁迫下,菌株 YX6 的接种也显著提高了小麦根(32.01%) 和叶(35.27%) 多胺的含量.多胺既是一种促生物质,可以促进小麦的生长,也是

麦叶中未检测到 Cd 含量.在 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,小麦根和叶中 $\omega(\text{Cd})$ 分别为 $2.43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.14\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而菌株 YX6 的接种则显著降低了小麦根(48.56%) 和叶(61.41%) 中的 Cd 含量(表 2),说明水培条件下菌株 YX6 具有阻控小麦对 Cd 吸收的能力.此外,与无菌株的对照相比,菌株 YX6 显著降低了小麦根(26.59%) 和叶片(29.43%) 吸收的 Cd 总量.

2.4 不同处理对小麦根和叶抗氧化酶活性的影响

植物中的抗氧化酶是抵抗外界胁迫的重要物质,能够保护植物组织在逆境胁迫下正常生长.选取 SOD 和 POD 作为代表探究菌株 YX6 的接种对小麦根部抗氧化酶活性的影响,结果如图 2 所示.对照组小麦根的 SOD 酶活为 $364\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,POD 的酶活为 $7.22\text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$,Cd 的添加则显著提高了小麦根 SOD

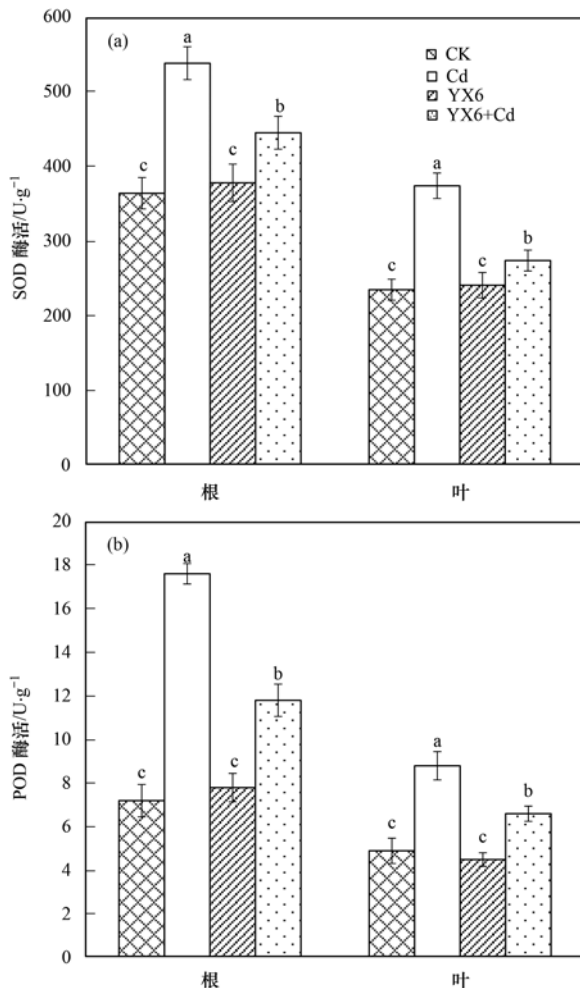
一种抗氧化物质,可缓解 Cd 对小麦的毒害.菌株 YX6 通过分泌多胺,促进了小麦的生长,提高了小麦抗 Cd 的能力.

2.6 Cd 在小麦根系中的亚细胞分布

YX6 和 YX6 + Cd 处理对 Cd 在小麦根系不同组织(细胞壁、细胞器和可溶性部分)中分布的影响如图 4 所示.在 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd 胁迫下,小麦根细胞壁、细胞器和可溶性部分 Cd 的比例分别为 26.63%、51.64% 和 22.45%.而与单独 Cd 处理相比,菌株 YX6 的接种显著降低了小麦根细胞器(20.04%) 和可溶性部分(39.33%) 中 Cd 的比例,显著增加了小麦根系细胞壁(69.92%) 中 Cd 的比例.这说明菌株 YX6 能增加 Cd 在小麦根细胞壁中的积累,从而抑制 Cd 从根外向根内的转运.此外,菌株 YX6 在根系表面吸附了大量的 Cd,从而进一步阻止了其他 Cd 进入根内.

2.7 不同处理对小麦根蛋白质表达的影响

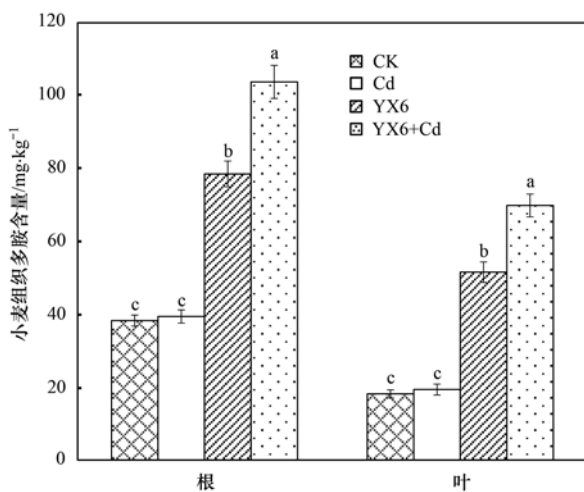
采用无标记蛋白质组学方法鉴定了不同处理下的小麦根的蛋白质表达情况,并鉴定筛选了一些差异表达蛋白(differentially expressed proteins,DEPs).分析共分为 3 组: A 组, Cd 处理组/对照组(Cd/CK); B 组,菌株 YX6 + Cd 处理组/对照组(YX6 + Cd/CK); C 组,菌株 YX6 + Cd 处理组/Cd 处理组



同一小麦组织不同小写字母表示处理之间有显著差异 ($P < 0.05$)

图2 不同处理对小麦 SOD 和 POD 酶活的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on SOD and POD activities in wheat

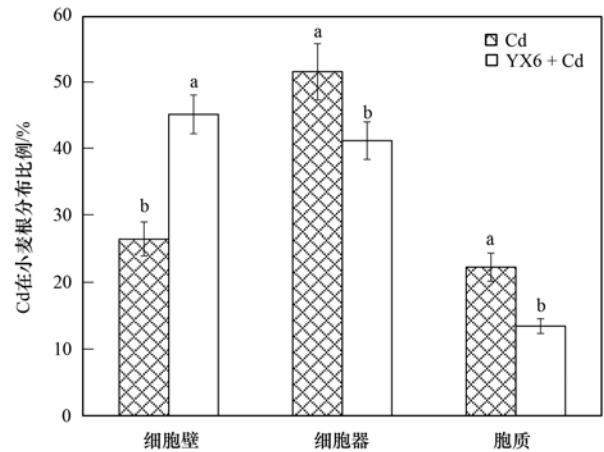


同一小麦组织不同小写字母表示处理之间有显著差异 ($P < 0.05$)

图3 不同处理中小麦组织多胺含量

Fig. 3 Polyamine content of wheat tissue in different treatments

(YX6 + Cd/Cd), 结果如图 5 所示. A、B 和 C 组中分别有 132、165 和 112 个 DEPs. 在 A 组中, 87 个 DEPs 被上调表达, 45 个 DEPs 被下调表达. 在 B 组



不同小写字母表示处理之间有显著差异 ($P < 0.05$)

图4 Cd 在小麦根中亚细胞的分布比例

Fig. 4 Distribution proportion of Cd at the subcellular level in wheat roots

中, 102 个 DEPs 被上调表达, 63 个 DEPs 被下调表达. 在 C 组中, 72 个 DEPs 被上调表达, 40 个 DEPs 被下调表达. 对这些 DEPs 进行功能注释 (Gene ontology functional annotation, GO), 所有 DEPs 的功能共分为三类: 生物过程 (biological processes)、细胞成分 (cellular components) 和分子功能 (molecular functions) (图 5). 在生物过程中, A、B 和 C 组的 DEPs 主要参与细胞过程、刺激反应和生物调节. 其中, 重点是对外界胁迫的差异蛋白, 主要涉及氧化还原酶活性蛋白、谷胱甘肽 S-转移酶活性蛋白和金属硫蛋白 (具有重金属结合活性的 4B 蛋白) 等被上调表达. 在细胞成分中, A、B 和 C 组的 DEPs 主要参与细胞部分、细胞器、细胞器部件和含蛋白质复合物和膜部分. 在分子功能方面, A、B 和 C 组的 DEPs 主要参与抗氧化活性、催化活性、结合锚定和转运活性.

2.8 差异蛋白的 GO 富集分析

基于所有已鉴定蛋白质的背景, 在 <https://www.uniprot.org/> 上输入每个 DEPs 的登录号, 进行查找每个 DEPs 的功能, 同时对其 Go 富集条目进行分析, 找出 $P < 0.05$ 的富集条目, 结果如表 3 所示. 对 A 组 (Cd/CK) 的 DEPs 进行差异条目富集分析, $P < 0.05$ 条件下共有 3 个显著富集条目, 主要包括外封装结构 (external encapsulating structure)、过氧化物酶活性 (peroxidase activity) 和氧化还原酶活性 (oxidoreductase activity). 通过查询这些 DEPs 的分子功能, 主要涉及清除 H_2O_2 和应对环境胁迫, 如氧化应激、FMN 结合、氧化还原酶活性、过氧化物酶活性、电子转移活性、铁硫簇结合. 这一结果表明, Cd 胁迫会刺激小麦根产生更多的抗氧化酶等, 增强小麦抗 Cd 胁迫的能力. 对 B 组 (YX6 + Cd/CK) 的

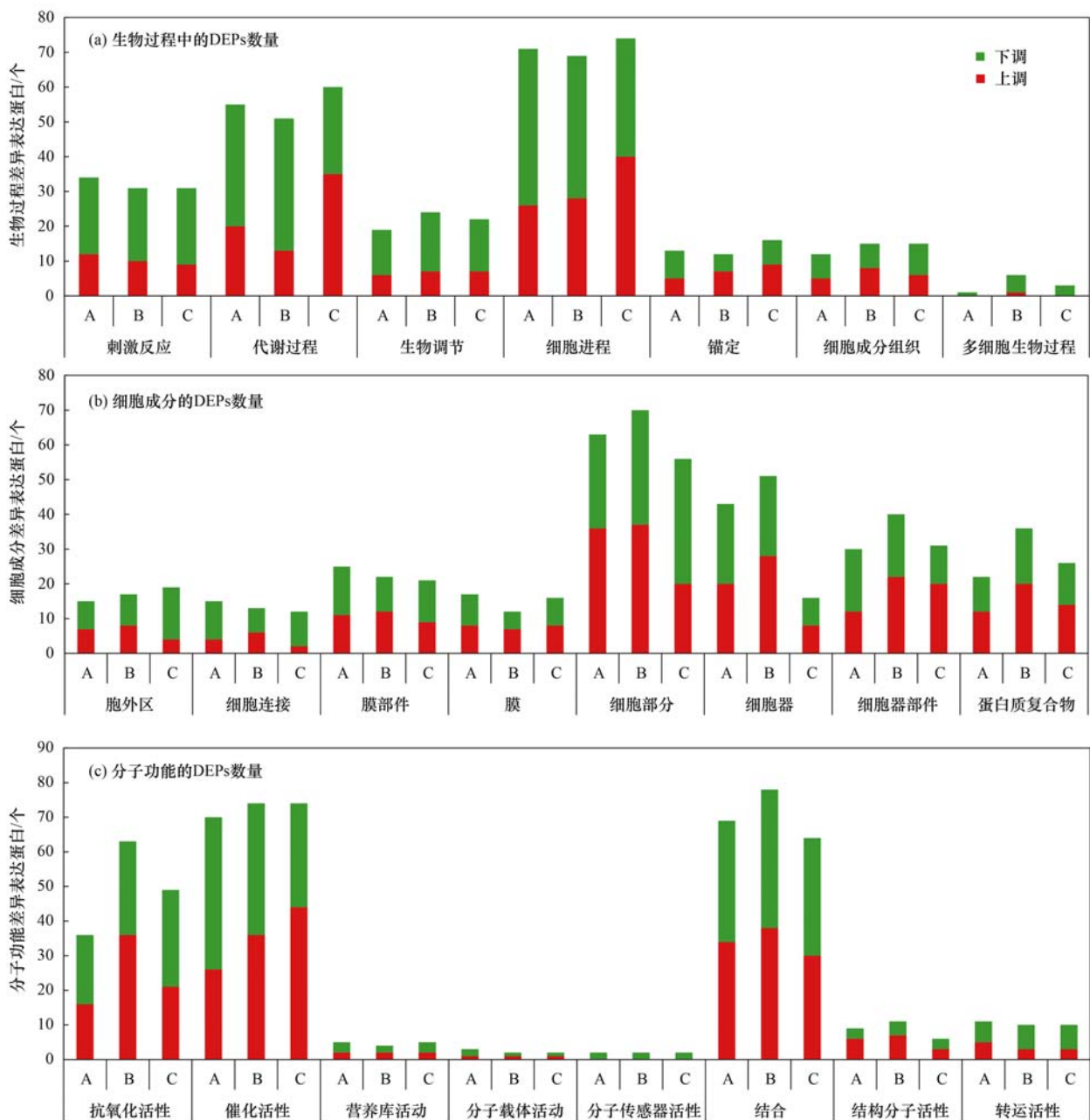


图 5 不同处理下的小麦根差异表达蛋白

Fig. 5 Differentially expressed proteins in wheat roots under different treatments

DEPs 进行差异条目富集分析, $P < 0.05$ 条件下共有 3 个显著富集条目, 主要包括蛋白质-DNA 复合物 (protein-DNA complex)、DNA 包装复合物 (DNA packaging complex) 和转移酶活性 (transferase activity). 这些 DEPs 的功能主要与 DNA 结合、蛋白质异源二聚体活性、ATP 结合、转移酶活性和金属离子结合有关. 结果表明, 与空白对照相比, Cd 胁迫下, 菌株 YX6 保护了小麦根系的 DNA 免受损伤, 提高了 DNA 复制和蛋白质翻译水平, 从而提高了小麦根系的活力. 对 C 组 (YX6 + Cd/Cd) 的 DEPs 进行差异条目富集分析, $P < 0.05$ 条件下共有 5 个显著富集条目, 分别为蛋白质-DNA 复合物、DNA 包装复合物、细胞间转运 (intercellular transport)、过氧化

物酶活性和转移酶活性. 这说明在 Cd 胁迫下, 菌株 YX6 增加了小麦根系中 DNA 修复、抗氧化酶相关蛋白的表达, 从而提高了小麦对 Cd 的抗性和耐受性.

2.9 差异蛋白的代谢通路分析

对差异蛋白进行代谢通路 (Kyoto encyclopedia of genes and genomes, KEGG) 富集分析, 筛选 $P < 0.05$ 的富集代谢条目, 结果如表 4 所示. A 组有 4 条显著富集的代谢途径: 矿物质吸收、次生代谢物的生物合成、谷胱甘肽代谢和糖酵解/糖异生. 这说明小麦根通过谷胱甘肽会上调表达, 以此应对 Cd 的胁迫. 同时也会消耗更多的能量, 来抵抗 Cd 的胁迫. B 组有 3 条显著富集的代谢途径: α -亚麻酸代

表 3 小麦根的差异蛋白的显著性富集条目分析¹⁾

Table 3 Analysis of significant enrichment items of DEPs in wheat roots

处理	差异蛋白登陆号(部分)	分子功能	富集条目	ID 号	P 值
A 组 Cd/CK	A0A3B5XVI4、A0A3B5ZQ34 和 A0A3B6B5B2	H ₂ O ₂ 的去除;有毒还原剂的氧化;对环境应激的反应,如创伤和氧化应激	外部封装结构	GO:0030312	0.001 889
	A0A3B6CCM3、A0A3B6HTP4 和 A0A3B6IZ67	去除过氧化氢;有毒还原剂的氧化;木质素的生物合成和降解、木栓化和生长素分解代谢	过氧化物酶活性	GO:0004601	0.013 825
	A0A1D5UTZ2、A0A1D5YYZ5 和 A0A3B5XVI4	FMN 结合;NAD(P) H 脱氢酶(醌)活性;电子转移活性;铁硫簇结合;H ₂ O ₂ 的去除	氧化还原酶活性	GO:0016491	0.025 062
B 组 YX6 + Cd/CK	A0A3B6DFK7 和 A0A3B6EEW7	DNA 结合;蛋白质异源二聚体活性	蛋白质-DNA 复合物	GO:0032993	0.005 474
	A0A3B6DFK7 和 A0A3B6JK95	DNA 结合;蛋白质异源二聚体活性	DNA 包装复合物	GO:0044815	0.005 474
	A0A1D6B308 和 A0A3B5XZ71	TP 结合;金属离子结合;蛋氨酸腺苷转移酶活性	转移酶活性	GO:0016740	0.019 39
C 组 YX6 + Cd/Cd	A0A1D5YKH2 和 A0A3B6DFK7	DNA 结合;蛋白质异源二聚体活性	蛋白质-DNA 复合物	GO:0032993	0.000 856
	A0A1D5YKH2 和 A0A3B6DFK7	DNA 结合;蛋白质异源二聚体活性	DNA 包装复合物	GO:0044815	0.000 856
	A0A3B6GPM2 和 A0A3B6PRZ5	营养库活性;锰离子结合	细胞间转运	GO:0010496	0.012 662
	A0A3B5XVI4 和 A0A3B5XWG5	去除过氧化氢;有毒还原剂的氧化;木质素的生物合成和降解、木栓化和生长素分解代谢	过氧化物酶活性	GO:0004601	0.020 641
	A0A3B5XZ71、A0A3B5ZY48 和 A0A3B6KAT3	锌离子结合;铁硫簇结合金属离子结合;谷胱甘肽转移酶活性	转移酶活性	GO:0016740	0.032 413

1) $P < 0.05$,表示差异蛋白的表达量具有显著差异

谢、细胞色素 P450 对外源性物质的代谢和植物激素信号转导。C 组有 5 条显著富集的代谢途径:次生代谢物的生物合成、苯丙烷生物合成、 α -亚麻酸代谢、植物激素信号转导和谷胱甘肽代谢。值得注意的是,在含有菌株 YX6 的处理组中,均有 α -亚麻酸代谢和植物激素信号转导途径,而这两条途径均与缓解小麦 Cd 胁迫密切相关。Cd 胁迫下,菌株 YX6 增

加了 12-氧代二烯酸还原酶和 4-香豆酸辅酶 A 连接酶 4 的表达量,这两种酶分别催化 12-氧代二烯酸转化为 OPC8 和 OPC8 辅酶 A,表明菌株 YX6 可使小麦根系合成更多的茉莉酸。此外,在 Cd 胁迫下,菌株 YX6 还上调表达了 ABA 转运蛋白合成基因 PYP/PYL 1.78 倍。这些结果表明,菌株 YX6 提高了小麦根系的激素水平,增强了小麦根系对 Cd 的抗性。

表 4 各个处理组差异蛋白的代谢通路分析的显著富集条目¹⁾

Table 4 Significantly enriched pathways of the DEPs based on KEGG analysis in each treatment

处理	KEGG 代谢通路	通路 ID 号	具有通路注释的差异蛋白数	P 值
A 组 Cd/CK	矿物质吸收	map04978	3	0.000 607
	次生代谢物的生物合成	map01110	43	0.000 966
	谷胱甘肽代谢	map00480	10	0.047 849
	糖酵解/糖异生	map00010	10	0.049 045
B 组 YX6 + Cd/CK	α -亚麻酸代谢	map00592	6	0.023 914
	细胞色素 P450 对外源性物质的代谢	map00980	10	0.029 14
	植物激素信号转导	map04075	3	0.045 931
C 组 YX6 + Cd/Cd	次生代谢物的生物合成	map01110	35	0.000 912
	苯丙烷生物合成	map00940	16	0.001 042
	α -亚麻酸代谢	map00592	5	0.035 741
	植物激素信号转导	map04075	2	0.041 543
	谷胱甘肽代谢	map00480	8	0.043 567

1) $P < 0.05$,表示代谢通路具有显著差异

2.10 荧光定量 PCR 验证

采用荧光定量 PCR 技术,选择 OPR 和 *tauGST* 两个基因的表达量验证蛋白质组学的准确性。结果表明,YX6 + Cd 处理组的 OPR 基因表达水平比 Cd 治疗组高 1.79 倍,YX6 + Cd 处理组的 *tauGST* 基因表达水平比 Cd 治疗组高 0.74 倍。而在蛋白质组学中,与对照相比,YX6 + Cd 处理组中茉莉酸生物合

成相关酶和谷胱甘肽 S-转移酶的表达量也分别上调表达 1.21 倍和 0.58 倍。总的来说,基因和蛋白质表达的趋势是相似的。

3 讨论

3.1 多胺促进小麦生长和消减小麦 Cd 吸收

水培试验结果表明,小麦根和叶片在含有 3

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 的溶液中吸收了大量 Cd, 而产多胺细菌 YX6 的接种可以降低小麦根和叶片中 Cd 的含量, 表明菌株 YX6 可以作为重金属钝化剂, 阻控小麦对 Cd 的吸收, 确保 Cd 污染条件下小麦的安全生产. 作为一种优良的重金属钝化剂, 重金属固定植物促生细菌已被证明能抑制小麦和水稻等作物对重金属的吸收^[24~26]. 有研究分离到 1 株 Cd 抗性菌株 *Pseudomonas* sp. B7, 在溶液中吸附去除 Cd 的效率达到了 100%, 且具有阻控大白菜吸收 Cd 的能力^[27]. Cd 在小麦根中的分布表明, 菌株 YX6 在小麦根表面吸收了大量的 Cd, 并诱导 Cd 在根的细胞表面积累, 从而阻止了 Cd 向根内的转运. 多胺是一类具有较强生物活性的小分子脂肪族含氮碱, 可以作为“第二信使”, 参与植物胁迫的信号调控, 从而缓解逆境胁迫对植物的伤害^[28,29]. YX6 和 YX6 + Cd 处理下的小麦各组织多胺含量高于对照组和 Cd 处理组的, 表明菌株 YX6 的接种能够提高小麦组织中多胺的含量, 以应对 Cd 胁迫, 主要是因为菌株 YX6 能够分泌亚精胺和精胺, 因此小麦吸收了更多的外源亚精胺和精胺. Soudek 等^[30]研究表明外源多胺可以增强作物对重金属的抗性. Alzahrani 等^[31]的研究也表明外源喷施腐胺、亚精胺和精胺, 能够提高小麦对 Cd 的抗性和抑制小麦对 Cd 的吸收. 产多胺细菌分泌的多胺能够被小麦吸收, 因此提高了小麦根和叶中多胺的含量. 但蛋白质组学数据中没有多胺代谢相关蛋白的变化, 主要是由于小麦吸收的外源多胺直接参与调控了小麦根系蛋白质的表达(如上调 DNA 修复和激素表达相关蛋白), 可能没有涉及小麦自身多胺的合成变化, 所以小麦自身多胺合成代谢相关的蛋白的表达没有变化. 此外, 其他研究也表明多胺可以通过多种途径缓解植物重金属毒害: ①作为抗氧化物质或者增强抗氧化系统缓解重金属诱导的氧化胁迫. 例如, 多胺本身可以作为抗氧化物质清除活性氧降低 Cd 和 Cu 对小麦的氧化损伤^[32]; ②减少植物体内金属离子的积累. 例如, 外源精胺和亚精胺可以减少 Cd 吸收积累而缓解水稻 Cd 胁迫损伤^[33]; ③多胺还可以与油菜素内酯互作调控植物激素代谢以及与抗性相关的基因表达, 提高萝卜对 Cu 胁迫的耐性^[34]. 此外, 本研究发现 Cd 胁迫下, 导致小麦根的 SOD、POD 酶活比 CK 处理显著提高, 而菌株 YX6 处理组小麦根的 SOD 和 POD 酶活与 CK 处理组小麦根的 SOD 和 POD 酶活相比无显著差异, 主要是因为小麦根在遭受到 Cd 胁迫时, 会进行自我调节, 提高自身 SOD 和 POD 的活性, 进而抵抗外源 Cd 的胁迫. 而 YX6 细菌处理后, 由于 YX6 一方面会阻控 Cd 进入到小麦根内, 降低了小麦受

到 Cd 的毒害. 另一方面 YX6 能够分泌多胺, 植物吸收了外源的多胺后, 也能够抵抗 Cd 的胁迫. 此时也就不再需要小麦自身 SOD 和 POD 活性的提高.

3.2 Cd 胁迫下产多胺细菌调控小麦根与 DNA 修复和激素产生的相关蛋白的表达

非标定蛋白质组学显示 Cd 胁迫下菌株 YX6 提高了小麦根中与 DNA 复制和植物激素产生相关的蛋白质的表达, 增强了小麦根系对 Cd 的抗性, KEGG 代谢途径分析表明, 谷胱甘肽代谢、 α -亚麻酸代谢和植物激素信号转导显著丰富. 在重金属胁迫下, 植物中活性氧物种 ($\text{O}_2^{\cdot -}$ 、 $\cdot \text{O}_2^{\cdot -}$ 、 $\cdot \text{OH}$ 和 H_2O_2) 的代谢平衡被破坏, 导致活性氧的过度积累^[35,36]. 活性氧的积累会损害植物的 DNA, 主要表现为碱基变化、碱基错配、插入或缺失、嘧啶组合、DNA 加合物、DNA 链断裂和甲基化损伤^[37]. 植物细胞受到 Cd 和 Pb 胁迫时, DNA 复制、蛋白质翻译和错误折叠易发生, 导致错误折叠的蛋白质占据空间并浪费资源, 严重影响植物的正常生理生化过程. 在菌株 YX6 存在下, 小麦根系中的蛋白质 DNA 复合物和 DNA 包装复合物显著富集. 这表明菌株 YX6 通过调节 DNA 修复来抑制小麦对 Cd 的吸收. 在这些胁迫下, 植物细胞改变其过程以避免 DNA 损伤, 错误折叠的蛋白质必须被植物降解和运输. 因此, 与单独 Cd 处理相比, 菌株 YX6 保护了小麦根系的 DNA 免受损伤, 改善了 DNA 复制和蛋白质翻译, 提高了小麦根系的活力和抵御 Cd 胁迫的能力.

α -亚麻酸经过脂氧合酶途径可以生成茉莉酸和茉莉酸甲酯. 作为信号传导物质, 茉莉酸和茉莉酸甲酯参与植物的重金属和低温等逆境的抗逆反应^[38]. 在植物应对重金属胁迫时, 茉莉酸和茉莉酸甲酯通过提高抗氧化酶的活性和光合作用来促进作物生长. 茉莉酸和茉莉酸甲酯也可以增加还原型谷胱甘肽和抗坏血酸来缓解植物的重金属胁迫. 有研究指出, 外源茉莉酸甲酯可以诱导植物细胞防卫基因的表达, 缓解重金属对植物的损害^[39]. 陈俊^[40]以秋茄幼苗为研究对象, 对 Cd 胁迫下的秋茄幼苗使用茉莉酸甲酯并分时间段采样, 测量叶绿素含量、丙二醛和抗氧化物质含量等指标, 结果显示茉莉酸甲酯可以有效缓解 Cd 对秋茄生长的抑制. Chen 等^[41]研究发现施加 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 茉莉酸甲酯和 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 茉莉酸, 可以有效降低植物组织内金属硫蛋白的表达, 减少重金属向地上部位的运输, 从而有效地缓解重金属的毒害作用. Cd 胁迫下, 菌株 YX6 使小麦根内催化 OPC8 转化为 OPC8-CoA 的 4-coumarate-CoA ligase-like 4 显著上调了 1.76 倍, 说明菌株 YX6 的接种促使小麦根生成更多的茉莉酸,

进而缓解了 Cd 的胁迫. 脱落酸(ABA)能够提高植物的抗逆性的作用早已引起人们的关注. ABA 在植物体内属于含量少但作用巨大的一种激素, 逆境胁迫时, ABA 浓度会升高并诱导植物体代谢过程发生变化, 起到抵抗逆境的作用^[42]. 在本研究中, 菌株 YX6 能够使 ABA 转运基因 PYP/PYL 的表达显著上调 1.68 倍, 提高了小麦对 Cd 的抗性. Hsu 等^[43]研究发现 Cd 胁迫下, 与 Cd 敏感品种水稻相比, 耐 Cd 水稻根部中 ABA 的含量显著增加, 说明 ABA 在植物耐 Cd 胁迫中发挥一定作用. ABA 可以通过调控植物的抗氧化系统来抵抗 Cd 的胁迫. Li 等^[44]指出绿豆在 Cd 处理下其体内的 GSH 的含量显著下降, 但是添加 ABA 之后, 绿豆体内的 GSH 含量能够显著提高. 说明 ABA 能够调控 Cd 胁迫下由 ROS 积累引起的氧化应激. 此外 ABA 也可通过调控植物整合肽的合成和调节维持植物水分平衡, 从而帮助植物适应 Cd 胁迫^[45,46].

4 结论

(1) 水培试验表明与单独 Cd 处理相比, Cd 胁迫下产多胺细菌 *Enterobacter bugandensis* YX6 的接种显著提高了小麦根和叶片中多胺的含量, 降低了小麦根和叶中 Cd 的含量.

(2) 与单独 Cd 处理相比, YX6 + Cd 处理显著降低了小麦根细胞器中和可溶性部分中 Cd 的比例, 增加了小麦根系细胞壁中 Cd 的比例.

(3) 在 Cd 胁迫下, 菌株 YX6 的接种提高了小麦根系中与 DNA 修复和激素(脱落酸和茉莉酸)合成相关蛋白的表达, 进而提高了小麦对 Cd 的抗性和耐受性.

参考文献:

- [1] 崔祥芬, 张琴, 田森林, 等. 中国稻田土壤镉污染及务农性暴露概率风险[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(8): 3878-3886.
Cui X F, Zhang Q, Tian S L, *et al.* Status of paddy soil Cd pollution and probabilistic health risk via agricultural contact in China[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(8): 3878-3886.
- [2] 彭瑜, 王海娟, 王宏宾. 农田土壤砷、镉协同钝化修复的研究进展[J]. 土壤, 2021, **53**(4): 692-699.
Peng Y, Wang H J, Wang H B. Advances in synergistic passivation remediation of arsenic and cadmium in farmland soil[J]. Soils, 2021, **53**(4): 692-699.
- [3] Ren S Y, Song C Q, Ye S J, *et al.* The spatiotemporal variation in heavy metals in China's farmland soil over the past 20 years: a meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150322.
- [4] 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 900-908.
Meng X F, Guo J M, Li R H, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils surrounding a typical industrial area of Henan province[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 900-908.
- [5] 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运伟, 等. 中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1863-1872.
Qin N, Ayibota T, Liu Y W, Non-carcinogenic risk assessment of cadmium exposure through drinking water in Chinese residents based on age-stratification weight[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1863-1872.
- [6] 管伟豆, 肖然, 李荣华, 等. 土壤镉污染北方小麦生产阈值及产区划分初探[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(5): 969-977.
Guan W D, Xiao R, Li R H, *et al.* Investigations on the derivation of a safe wheat-producing threshold of soil Cd content and classification of Cd contaminated wheat-producing areas in northern China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(5): 969-977.
- [7] Wang Y L, Xing W Q, Liang, X F, *et al.* Effects of exogenous additives on wheat Cd accumulation, soil Cd-availability and physicochemical properties in Cd-contaminated agricultural soils: a meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2022, **808**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152090.
- [8] 任超, 任彧仲, 王浩, 等. 镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1606-1619.
Ren C, Ren Y Z, Wang H, *et al.* Cadmium accumulation characteristics of different wheat varieties under cadmium stress[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1606-1619.
- [9] 赵娜娜, 彭鸥, 刘玉玲, 等. 不同形态硫叶面喷施对水稻镉积累影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(7): 1387-1401.
Zhao N N, Peng O, Liu Y L, *et al.* Effect of foliar spraying different forms of sulfur on cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(7): 1387-1401.
- [10] Haider F U, Wang X K, Farooq M, *et al.* Biochar application for the remediation of trace metals in contaminated soils: implications for stress tolerance and crop production[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, **230**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113165.
- [11] 张雅芸, 刘月敏, 王常荣, 等. 伯克氏菌 Y4 对水稻幼苗镉损伤和镉吸收的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 2142-2150.
Zhang Y H, Liu Y M, Wang C R, *et al.* Effects of *Burkholderia* sp. Y4 on cadmium damage and uptake in rice seedlings[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 2142-2150.
- [12] 杨忠蓝, 曾希柏, 孙本华, 等. 铁氧化物固定土壤重金属的研究进展[J]. 土壤通报, 2021, **52**(3): 728-735.
Yang Z L, Zeng X B, Sun B H, *et al.* Research advances on the fixation of soil heavy metals by iron oxide[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, **52**(3): 728-735.
- [13] 韩辉, 王晓宇, 蔡红, 等. 重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3339-3346.
Han H, Wang X Y, Cai H, *et al.* Isolation of heavy metal immobilizing and plant growth-promoting bacteria and its effects on reducing heavy metal accumulation in wheat[J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3339-3346.
- [14] Qiao S Y, Zeng G Q, Wang X T, *et al.* Multiple heavy metals immobilization based on microbially induced carbonate precipitation by ureolytic bacteria and the precipitation patterns exploration[J]. Chemosphere, 2021, **274**, doi: 10.1016/j.

- chemosphere. 2021. 129661.
- [15] Wang Y, Li Z H, Wu J J, *et al.* Absciscic acid-catabolizing bacteria: a useful tool for enhancing phytoremediation [J]. Science of the Total Environment, 2022, **812**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151474.
- [16] Tirry N, Tahri Joutey N, Sayel H, *et al.* Screening of plant growth promoting traits in heavy metals resistant bacteria: prospects in phytoremediation [J]. Journal of Genetic Engineering and Biotechnology, 2018, **16**(2): 613-619.
- [17] Chakdar H, Thapa S, Srivastava A, *et al.* Genomic and proteomic insights into the heavy metal bioremediation by cyanobacteria[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **424**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127609.
- [18] Zhang W H, He L Y, Wang Q, *et al.* Inoculation with endophytic *Bacillus megaterium* 1Y31 increases Mn accumulation and induces the growth and energy metabolism-related differentially-expressed proteome in Mn hyperaccumulator hybrid pennisetum[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **300**: 513-521.
- [19] Li K F, Pidatala V R, Shaik R, *et al.* Integrated metabolomic and proteomic approaches dissect the effect of metal-resistant bacteria on maize biomass and copper uptake[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(2): 1184-1193.
- [20] 韩辉, 蔡红, 王晓宇, 等. 产多胺细菌阻控空心菜富集 Cd 和 Pb 效应[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(6): 2692-2699.
- Han H, Cai H, Wang X Y, *et al.* Screening of polyamine-producing bacteria and their effects on reducing Cd and Pb accumulation in *Ipomoea aquatica* [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(6): 2692-2699.
- [21] 林绍艳, 张芳, 徐颖洁. 植物中多胺含量超高效液相色谱法的建立[J]. 南京农业大学学报, 2016, **39**(3): 358-365.
- Lin S Y, Zhang F, Xu Y G. The establishment of UPLC method for measuring polyamines content in plants [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, **39**(3): 358-365.
- [22] Wu Z P, McGrouther K, Chen D L, *et al.* Subcellular distribution of metals within *Brassica chinensis* L. in response to elevated lead and chromium stress[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2013, **61**(20): 4715-4722.
- [23] Fisher K A, Yarwood S A, James B R. Soil urease activity and bacterial ureC gene copy numbers: effect of pH[J]. Geoderma, 2017, **285**: 1-8.
- [24] Pramanik K, Mandal S, Banerjee S, *et al.* Unraveling the heavy metal resistance and biocontrol potential of *Pseudomonas* sp. K32 strain facilitating rice seedling growth under Cd stress [J]. Chemosphere, 2021, **274**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129819.
- [25] Sharma P, Chaturvedi P, Chandra R, *et al.* Identification of heavy metals tolerant *Brevundimonas* sp. from rhizospheric zone of *Saccharum munja* L. and their efficacy in in-situ phytoremediation[J]. Chemosphere, 2022, **295**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133823.
- [26] 马莹, 王玥, 石孝均, 等. 植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4911-4922.
- Ma Y, Wang Y, Shi X J, *et al.* Mechanism and application of plant growth-promoting bacteria in heavy metal bioremediation [J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4911-4922.
- [27] Wu S J, Zhou Z J, Zhu L, *et al.* Cd immobilization mechanisms in a *Pseudomonas* strain and its application in soil Cd remediation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **425**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127919.
- [28] Yang K X, Xi Z A, Zhang Y X, *et al.* Polyamine biosynthesis and distribution in different tissues of *Agaricus bisporus* during postharvest storage[J]. Scientia Horticulturae, 2020, **270**, doi: 10.1016/j.scienta.2020.109457.
- [29] 张灵, 陶亚军, 方琳, 等. 植物多胺的代谢与生理研究进展[J]. 植物生理学报, 2020, **56**(10): 2029-2039.
- Zhang L, Tao Y J, Fang L, *et al.* Metabolism and physiological function of polyamine in plants[J]. Plant Physiology Journal, 2020, **56**(10): 2029-2039.
- [30] Soudek P, Ursu M, Petrová Š, *et al.* Improving crop tolerance to heavy metal stress by polyamine application [J]. Food Chemistry, 2016, **213**: 223-229.
- [31] Alzahrani Y, Rady M M. Compared to antioxidants and polyamines, the role of maize grain-derived organic biostimulants in improving cadmium tolerance in wheat plants [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **182**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109378.
- [32] Hsu Y T, Kao C H. Cadmium-induced oxidative damage in rice leaves is reduced by polyamines[J]. Plant and Soil, 2007, **291**(1-2): 27-37.
- [33] Groppa M D, Tomaro M L, Benavides M P. Polyamines and heavy metal stress: the antioxidant behavior of spermine in cadmium- and copper-treated wheat leaves [J]. BioMetals, 2007, **20**(2): 185-195.
- [34] Choudhary S P, Bhardwaj R, Gupta B D, *et al.* Epibrassinolide induces changes in indole-3-acetic acid, abscisic acid and polyamine concentrations and enhances antioxidant potential of radish seedlings under copper stress[J]. Physiologia Plantarum, 2010, **140**(3): 280-296.
- [35] 王若男, 乜兰春, 张双双, 等. 植物抗重金属胁迫研究进展[J]. 园艺学报, 2019, **46**(1): 157-170.
- Wang R N, Nie L C, Zhang S S, *et al.* Research progress on plant resistance to heavy metal stress [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2019, **46**(1): 157-170.
- [36] Berni R, Luyckx M, Xu X, *et al.* Reactive oxygen species and heavy metal stress in plants: impact on the cell wall and secondary metabolism [J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, **161**: 98-106.
- [37] Song J L, Zou X Y, Liu P D, *et al.* Differential expressions and enzymatic properties of malate dehydrogenases in response to nutrient and metal stresses in *Stylosanthes guianensis* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, **170**: 325-337.
- [38] 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.
- [39] 鲜靖苹, 王勇, 张平. 外源茉莉酸甲酯对镉胁迫下多年生黑麦草种子萌发及幼苗生理的影响[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2019, **55**(6): 74-82.
- Xiao J P, Wang Y, Zhang P. Effects of exogenous methyl jasmonate on seed germination and physiological characteristics of *Lolium perenne* under cadmium stress [J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2019, **55**(6): 74-82.
- [40] 陈俊. 外源茉莉酸酯对红树幼苗重金属抗性的调控作用研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- Chen J. Regulatory effect of exogenous jasmonates on heavy metal resistance of mangrove seedling [D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [41] Chen J, Yan Z Z, Li X Z. Effect of methyl jasmonate on

- cadmium uptake and antioxidative capacity in *Kandelia obovata* seedlings under cadmium stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, **104**: 349-356.
- [42] Lu Q, Weng Y N, You Y, *et al.* Inoculation with abscisic acid (ABA)-catabolizing bacteria can improve phytoextraction of heavy metal in contaminated soil[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113497.
- [43] Hsu Y T, Kao C H. Role of abscisic acid in cadmium tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2003, **26** (6) : 867-874.
- [44] Li S W, Leng Y, Feng L, *et al.* Involvement of abscisic acid in regulating antioxidative defense systems and IAA-oxidase activity and improving adventitious rooting in mung bean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] seedlings under cadmium stress [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21** (1) : 525-537.
- [45] Zehra A, Choudhary S, Wani K I, *et al.* Exogenous abscisic acid mediates ROS homeostasis and maintains glandular trichome to enhance artemisinin biosynthesis in *Artemisia annua* under copper toxicity [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, **156**: 125-134.
- [46] 刘栋栋. 硫化氢与脱落酸缓解植物镉胁迫的机制研究 [D]. 西安: 西北农林科技大学, 2021.
- Liu D D. Mechanism of hydrogen sulfide and abscisic acid to alleviate cadmium stress in plants [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2021.

环 境 科 学

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i> (5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning (5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i> (5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i> (5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu (5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i> (5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i> (5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i> (5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i> (5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i> (5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i> (5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i> (5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i> (5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i> (5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i> (5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i> (5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i> (5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i> (5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i> (5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i> (5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i> (5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i> (5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i> (5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i> (5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i> (5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i> (5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i> (5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i> (5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i> (5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i> (5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i> (5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i> (5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i> (5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i> (5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i> (5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i> (5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i> (5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i> (5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i> (5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i> (5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin (5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao (5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i> (5861)