

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响	朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)
不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析	秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)
不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异	陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧祺, 胡建林 (635)
2006~2021年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析	郑庆峰, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)
基于大气成分观测网的山西省近地面O ₃ 体积分数分布特征	李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)
伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)
运城市四季VOCs特征、来源及臭氧形成敏感物种	阴世杰, 刘新翌, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)
郑州市秋冬季污染过程中大气VOCs污染特征、来源解析及活性分析	赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晚, 张瑞芹 (689)
郑州市PM _{2.5} 中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成	李子涵, 董喆, 尚瑞琪, 孔梓涵, 李晚, 张瑞芹 (700)
中国三大城市群PM _{2.5} 浓度非线性变化分析	吴舒祺, 顾杨旸, 张天岳, 赵文吉 (709)
基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析	吴琼, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)
碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化	郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)
考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析	马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)
我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析	韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)
不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响	谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)
深圳市2015~2021年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应	韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)
河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析	王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)
北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析	郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)
店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析	郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)
张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析	金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)
黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布	闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)
制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法	彭安萍, 高虎, 张新波 (844)
水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响	汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)
富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除	刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)
壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中Cd ²⁺ 的吸附机制	姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)
硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制	邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)
磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性	韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晚慢, 程建华, 胡勇有 (898)
广东省高分辨率温室气体排放清单及特征	卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志炯, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)
辽河口“退塘还湿”修复区生态系统CO ₂ 交换及其环境调控	刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)
生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)
生物炭改良盐碱地研究与应用进展	魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董昱辰, 代红文 (940)
免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta分析	徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)
黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例	李月, 罗红芬 (961)
不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响	李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)
Ca改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制	张超, 翟付杰, 单保庆 (983)
秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素	闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)
我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险	杨炳彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)
广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估	邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)
基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (1026)
基于Monte-Carlo模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析	罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)
基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估	袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)
基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析	沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)
PE-Cd复合污染土壤中Cd释放迁移特征及机制	王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)
氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性	李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓旻, 蒋建东 (1080)
昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析	张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)
钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果	王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)
氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复	袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣, 赵科理 (1107)
关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响	周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曹鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)
外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响	张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)
稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应	张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)
根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用	郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)
高密度聚乙烯微塑料与氯噻磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应	胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)
微塑料的人体富集及毒性机制研究进展	包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)
机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展	白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)
微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展	侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)
水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展	郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)
基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素	郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用

郭佳佳^{1,2}, 王常荣^{1*}, 刘仲齐¹, 黄青青¹, 张长波¹, 黄永春¹, 薛卫杰¹, 孙约兵^{1*}

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 农业农村部产地环境污染防控重点实验室, 天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191; 2. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为评估将伯克氏菌 Y4 (*Burkholderia* sp. Y4) 作为污染农田小麦降镉 (Cd) 菌的可行性, 通过微生物高通量测序、土壤 Cd 逐级提取、小麦 Cd 亚细胞分布和赋存形态检测等手段, 分析了菌株 Y4 处理下根际土壤微生物群落和 Cd 有效态变化, 以及小麦根、基节、节间和籽粒 Cd 含量及其转运特征。结果表明, 根施菌株 Y4 显著降低了小麦根部和籽粒 Cd 含量, 与对照处理相比降幅分别为 7.7% 和 30.3%。小麦营养器官 Cd 含量及 Cd 转移因子结果显示, 菌株 Y4 处理使 Cd 从基节向节间的转移因子降低 79.3%, 小麦节间 Cd 含量也随之降低 50.9%。Cd 赋存形态研究发现, 菌株 Y4 处理增加了根和基节中残渣态 Cd 占比, 降低了根系中无机态和水溶态 Cd 的含量, 并提高了基节中残渣态 Cd 含量。进一步检测 Cd 的亚细胞分布发现, 根细胞壁和基节细胞液中 Cd 含量增幅分别达 21.3% 和 98.2%, 可见菌株 Y4 处理提高了根细胞壁和基节细胞液对 Cd 的固定能力。深入研究根际土壤发现, 菌株 Y4 处理使小麦成熟期根际伯克氏菌的相对丰度由 9.6% 提高至 11.5%, 并改变了土著微生物的群落结构, 提高了 *Gemmatimonadales*、*Pseudomonadales* 和 *Chitinophagales* 等相对丰度, 并降低了 *Acidobacteriota* 等相对丰度。同时, 施加菌株 Y4 提高了根际土 pH 值, 增幅达 8.3%; 降低了土壤中的可交换态 Cd、碳酸盐结合态 Cd 和铁锰氧化物结合态 Cd 含量, 其降幅分别达 44.4%、21.7% 和 15.9%, 而残渣态 Cd 比例高达 53.6%。根施菌株 Y4 提高了土壤中硝态氮和铵态氮的含量, 增幅可达 22.0% 和 21.4%, 并且碱解氮含量也有一定程度提高。由此可见, 根施菌株 Y4 不但提高了土壤氮素可利用性, 同时能够通过降低根际土壤中 Cd 有效性、提高小麦根和基节的 Cd 拦截固定能力, “两段式”阻控污染土壤中 Cd 向小麦籽粒的转运积累。故伯克氏菌 Y4 作为小麦降 Cd 促生菌剂具有一定的应用潜力。

关键词: 伯克氏菌; 小麦; 镉 (Cd); 吸收; 微生物群落结构

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-1150-11 DOI: 10.13227/j.hjlx.202303030

Two-stage Inhibition Effects of *Burkholderia* sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat

GUO Jia-jia^{1,2}, WANG Chang-rong^{1*}, LIU Zhong-qi¹, HUANG Qing-qing¹, ZHANG Chang-bo¹, HUANG Yong-chun¹, XUE Wei-jie¹, SUN Yue-bing^{1*}

(1. Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (MARA), Tianjin Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (MARA), Tianjin 300191, China; 2. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to evaluate the feasibility of using *Burkholderia* sp. Y4 as a cadmium (Cd)-reducing bacterial agent in contaminated wheat fields, the changes in the rhizosphere soil microbial community and Cd available state, as well as the content and transport characteristics of Cd in the wheat root, basal node, internode, and grain under the treatment of strain Y4 were tested using microbial high-throughput sequencing, step-by-step extraction, subcellular distribution, and occurrence analyses. The results showed that root application of strain Y4 significantly reduced the root and grain Cd content of wheat by 7.7% and 30.3%, respectively, compared with that in the control treatment. The Cd content and Cd transfer factor results in wheat vegetative organs showed that strain Y4 reduced the Cd transfer factor from basal node to internode by 79.3%, and Cd content in the wheat internode stem also decreased by 50.9%. The study of Cd occurrence morphology showed that strain Y4 treatment increased the proportion of residual Cd in roots and basal ganglia, decreased the contents of inorganic and water-soluble Cd in roots, and increased the content of residual Cd in basal ganglia. Further examination of the subcellular distribution of Cd showed that the Cd content in root cell walls and basal ganglia cell fluid increased by 21.3% and 98.2%, respectively, indicating that the Cd fixation ability of root cell walls and basal ganglia cell fluid was improved by the strain Y4 treatment. In the rhizosphere soil, it was found that the microbial community structure was changed by strain Y4 application. Under the Y4 treatment, the relative abundance of *Burkholderia* increased from 9.6% to 11.5%, whereas that of *Acidobacteriota* decreased. Additionally, the relative abundance of *Gemmatimonadales*, *Pseudomonadales*, and *Chitinophagales* were also increased by strain Y4 treatment. At the same time, the application of strain Y4 increased the pH value of rhizosphere soil by 8.3%. The contents of exchangeable Cd, carbonate-bound Cd, and iron-manganese oxide-bound Cd in the soil decreased by 44.4%, 21.7%, and 15.9%, respectively, whereas the proportion of residual Cd reached 53.6%. Root application of strain Y4 increased the contents of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in the soil by 22.0% and 21.4%, respectively, and the contents of alkaline nitrogen also increased to a certain extent. In conclusion, the root application of strain Y4 not only improved soil nitrogen availability but also inhibited Cd transport and accumulation from contaminated soil to wheat grains in a "two-stage" manner by reducing Cd availability in rhizosphere soil and improving Cd interception and fixation capacity of wheat roots and basal nodes. Therefore, *Burkholderia* Y4 has application potential as a Cd-reducing and growth-promoting agent in wheat.

Key words: *Burkholderia* sp.; wheat; cadmium (Cd); uptake; microbial community structure

收稿日期: 2023-03-03; 修订日期: 2023-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U20A20108); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项

作者简介: 郭佳佳 (2000 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染防治与环境微生物, E-mail: guojiajia1192021@126.com

* 通信作者, E-mail: wangchangrong109@163.com; sunyuebin78@163.com

随着工矿业飞速发展,农田土壤镉(Cd)污染日趋严重. Cd因其移动性强、毒性高且污染面积较广被称为“五毒之首”^[1],极易被小麦等农作物吸收并积累在可食用部位,通过食物链进入人体,从而影响人体健康^[2,3]. 因此,为降低重金属污染农田中小麦可食用部位的Cd含量,保证粮食安全生产,研发探索一套环境友好和安全有效的小麦Cd污染防治技术尤为重要. 微生物修复是一种经济高效且环境友好的重金属污染修复方法,不但能够通过生物矿化等作用降低土壤中Cd的生物可利用性,同时还能间接调控土壤微生物组驱动的元素循环以促进植物对营养元素的吸收,具有提高土壤肥力、提升土壤健康水平的优势,在污染农田粮食安全生产方面具有良好的应用前景^[4,5]. 有研究发现,效果好的降Cd微生物能够较稳定地定殖于根际土壤和根表面,通过多种方式抑制根系对Cd的吸收,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^[6];微生物代谢产物与Cd²⁺形成稳定的难溶化合物或胞外络合物,并沉淀聚集在细胞表面形成凝结相,选择性地结合Cd²⁺并促进Cd的生物矿化或与Cd发生沉淀反应^[7];微生物吸收Cd²⁺并蓄积到体内,消耗能量利用离子转运系统将Cd隔离到细胞特定部位^[8]等. 由此可见,降Cd微生物可以通过吸收、吸附和络合等方式与Cd直接作用,降低根际土壤中可利用态Cd的含量,同时定殖在农作物根表的降Cd促生菌,还能够通过优先吸收或吸附Cd,成为拦截根系Cd吸收转运的一道屏障.

促生微生物的存在形式主要有两种,一种是定殖于植物根细胞内的胞内促生菌,通常会形成根瘤或根结;另一种则是自由生长在植物根系周围或根细胞与皮质之间,称之为胞外根际促生菌. 国内外已先后在20余个属中发现根际促生菌,包括固氮菌属、假单胞杆菌属、芽孢杆菌属、伯克氏菌属和黄单胞菌属等^[9-11],部分促生菌株能够改变土壤中Cd等重金属的生物可利用性,缓解重金属对农作物产生的毒性作用,抑制农作物对重金属的吸收积累,提高农作物的抗逆性以及农产品的产量和安全性^[12-14]. 如杨丽等^[15]将*B. megaterium* L44菌株接种辣椒后,其果实Cd和Pb含量分别显著降低39.1%和81.3%,接近食品安全国家标准限量要求,具有阻控辣椒吸收重金属的潜在应用价值. 刘悦畅等^[16]以沼泽红假单胞菌(*Rhodospseudanonas palustris*)联合枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)作为降Cd修复剂,通过盆栽试验研究表明2菌对小白菜根和茎中Cd去除率分别为58.06%~71.37%和73.66%~76.70%,并显著降低了土壤中Cd的生物有效性约32.7%. Wang等^[17]研究

发现在土壤中施加微生物菌剂可以显著降低植物根系Cd(12%~16%)和籽粒Cd(23%~32%)含量. Han等^[18]研究表明巨大芽孢杆菌N3和液化沙雷氏菌H12通过细胞外吸附和生物沉淀降低了小白菜根际土壤中DTPA-Cd(35.3%~58.8%)和Pb(37.8%~62.2%)含量以及小白菜的叶子(可食用组织)中Cd(76.5%~79.7%)和Pb(76.3%~83.5%)含量. 其中,伯克氏菌具有分泌吡啶乙酸、产ACC脱氢酶和产铁载体等植物促生特性,同时对于重金属具有较好的耐受性和吸附吸收作用^[19]. 有研究发现,伯克氏菌能够促进Cd胁迫下水稻、大豆和番茄等植物的生长,并降低其地上部Cd含量,具有较好的研究前景^[20,21].

本团队前期研究筛选得到1株伯克氏菌*Burkholderia* sp. Y4(GenBank编号MN134519),能够定殖在水稻根表以及根际土壤中,并通过优先吸附Cd的方式抑制水稻Cd积累,同时调控根际微生物菌群驱动的铁氮耦合循环,提高了水稻籽粒中铁和锰等营养元素的含量^[22]. 本研究通过盆栽试验探究菌株Y4对Cd重度污染土壤修复潜力,分析伯克氏菌Y4处理对根际土壤理化性质、Cd有效态和形态分布特征,探究菌株对小麦不同部位Cd吸收转运的调控作用,揭示根施菌株Y4抑制小麦籽粒Cd积累的作用机制,以期为其作为小麦降Cd微生物菌剂的应用提供数据支持和理论依据,对于粮食安全生产具有重要应用价值.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试小麦品种为津强8号,供试菌种为前期经筛选、分离和鉴定后的Y4菌株^[20],由本实验室保存. 供试土壤采集自河南省新乡市某村庄Cd污染小麦田,土壤经风干、打碎、混匀,用于小麦盆栽试验. 土壤pH为7.85,土壤 ω (有机质)为2.98 mg·kg⁻¹,土壤 ω (Cd)为6.13 mg·kg⁻¹.

1.2 试验方法

采用网室盆栽试验. 选用上口径为30 cm,下口径为22 cm,桶高为15 cm的盆装土. 每盆装土5 kg,播种前一周施氮肥、磷肥及钾肥,播种后正常进行水分管理. 菌株Y4接种至灭菌LB培养基中,于150 r·min⁻¹摇床中37℃培养36 h至稳定期后,将菌液于5 000 r·min⁻¹离心10 min后弃去上清液,收集菌体沉淀,然后用水将菌体细胞重悬后进行计数,取2×10¹⁰个菌株Y4细胞均匀施加在菌处理组(Y4组)盆栽土壤中,在小麦拔节期和抽穗期各施加1次,同时,空白组(CK组)盆栽土壤中施加等体积水作为对照,每组设置4盆重复. 小麦盆栽试验于2022年4月于天津市

南开区农业农村部环境保护科研监测所网室开展,于2022年6月收取成熟期小麦样品。

1.2.1 样品处理

小麦样品收获后,将其分为根、基节、节间和籽粒这4个部分,并测定小麦各个部分重金属Cd含量;同时采集小麦根际土,挑出石子、植物和残渣等杂物,一部分放-80℃冰箱中,留鲜样备用,一部分风干后,密封保存,供后续分析测试使用。

1.2.2 小麦不同器官Cd含量测定与转移因子的计算

小麦不同器官中Cd含量用HNO₃消解,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Ultimate 3000-iCAPQC)测定小麦中籽粒中Cd含量。小麦籽粒中Cd测定的标准样品为小麦粉GBW08503c, Cd回收率为101.3%;小麦其它营养器官中Cd含量测定的标准样品为柑橘叶GBW10020,回收率为98.7%,均符合质量控制要求。小麦不同部位的元素含量分布反映其迁移能力,用转移因子(transfer factor, TF)来表示: $TF_{ab} = a \text{ 器官元素含量} / b \text{ 器官元素含量}$,其中a器官和b器官为相邻的小麦器官。

1.2.3 小麦根和基节中Cd赋存形态提取方法

参照张雅荟等^[23]的方法并略有改动。称取0.3 g样品于50 mL的塑料离心管中,加入30 mL提取剂(样品与提取剂的比例是1:100),匀浆,室温下振荡22 h, 5 000 r·min⁻¹离心10 min后,分离提取液至聚四氟乙烯消解管中。按照相同比例加入去离子水,重复上述操作,将收集到的提取液及样品残渣分别在70℃电热板上蒸发至恒重,添加硝酸进行消解,蒸发至近干,然后定容至25 mL,并用电感耦合等离子体质谱仪测定Cd含量。采用以下2种提取剂逐步提取。①乙醇提取态:80%乙醇提取硝酸盐和氯化物为主的无机盐及氨基酸盐等;②水提取态:去离子水提取水溶性有机酸盐和一代磷酸盐等;③剩余部分为残渣态。

1.2.4 小麦根和基节中Cd亚细胞分布的测定

参照Yao等^[24]的方法并略有改动。准确称取鲜样0.5 g,加入25 mL缓冲液(0.25 mol·L⁻¹蔗糖、50 mmol·L⁻¹ Tris-HCl缓冲液和1 mmol·L⁻¹二硫赤鲜糖醇)研磨匀浆,匀浆液在冷冻离心机2 000 r·min⁻¹下漩涡5 min,然后用80 μm孔径的尼龙网布垫在漏斗里过滤。滤液接到冷冻离心机专用管中进行下一步操作。残渣用超纯水冲至消煮管中,少量多次冲洗,沉淀为细胞壁组分。滤液用高速冷冻离心机以4℃, 11 900 r·min⁻¹离心45 min,所得沉淀为细胞器组分,上清液为细胞液组分。将消煮管中的沉淀和上清液在消煮炉80℃加热至恒重,加入硝酸进行消解,蒸发近干,去离子水定容后待测,采用电感耦合等离子体

质谱仪测定。

1.2.5 土壤Cd含量测定

土壤Cd含量选用HNO₃-HF进行消解,利用电感耦合等离子体质谱仪测定土壤Cd含量,测定时选用土壤标准物质SRMs-2586进行质量把控,回收率为96.3%。土壤重金属Cd的赋存形态采用 Tessier 连续提取法进行测定。

1.2.6 土壤无机氮的测定

土壤中硝态氮、铵态氮含量采用分光光度法进行测定,试剂盒于北京索莱宝科技有限公司购买。

1.2.7 土壤理化性质测定

土壤pH值采用(土水比1:2.5)pH计(NY/T 1377-2007);土壤有机质含量和土壤养分的测定采用重铬酸钾氧化-分光光度法(HJ-615-2011)。

1.2.8 菌株定殖情况和土著菌群结构变化测定

小麦收获时,采集根际土壤样品,盆栽土壤细菌群落组成由奥维森科技公司提取并深度测序。

1.3 数据统计及分析

所用数据均使用Microsoft Excel 2007进行相关数据的计算、统计及处理。利用SPSS 17.0软件进行统计分析,使用Duncan新复极差法(SSR)在显著水平小于0.05时进行多重比较、差异显著性检验。利用Microsoft Excel 2007作图。

2 结果与分析

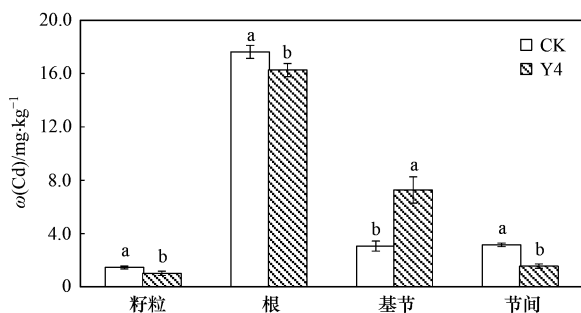
2.1 根施菌株Y4对小麦不同营养器官Cd含量的影响

2.1.1 营养器官Cd含量以及Cd转移因子

如图1所示,供试土壤为重度Cd污染土壤,空白处理下籽粒 $\omega(\text{Cd})$ 为1.45 mg·kg⁻¹,超出我国食品安全国家标准。小麦根、基节和节间对Cd的富集能力存在很大的差异,其中菌株Y4处理根 $\omega(\text{Cd})$ 最高,可达16.26 mg·kg⁻¹,其次是小麦基节和节间, $\omega(\text{Cd})$ 可达7.26 mg·kg⁻¹和1.54 mg·kg⁻¹;根Cd含量是基节和节间Cd的5倍左右,由此可见,根是小麦拦截Cd的重要营养器官。根施菌株Y4能够显著降低小麦籽粒Cd含量($P<0.05$),与对照相比,籽粒中Cd含量下降30.3%。

为了进一步探究根施Y4菌株的降Cd作用机制,分析Cd在小麦根、基节和节间的转运。如图2,在空白对照组中,Cd从基节向节间转运能力最强,说明在小麦营养器官中,基节对Cd转运的拦截起到关键作用。与空白对照组相比,根施菌株Y4对Cd在基节的转运有显著影响,转移因子 $TF_{\text{基节/根}}$ 显著提高,而 $TF_{\text{节间/基节}}$ 则显著降低。根施菌株Y4后, $TF_{\text{基节/根}}$ 增长157.6%,即Cd从根向基节的转运率成倍增加;

TF_{节间/基节}降低了 79.3%, 即 Cd 从基节向上到节间的转运率降低了近 3/4. 由此可见, 根施 Y4 促进了 Cd 从根向基节转运, 同时抑制了 Cd 从基节向节间的转运, 进而提高基节对 Cd 的固定拦截能力. 与 CK 相比, 根施菌株 Y4 提高了基节对 Cd 的拦截, 从 29.6% 提高到 70.4%, 拦截能力提高 138%. 与此同时, 其不但能够降低小麦籽粒中 Cd 含量, 同时还能降低根和节间 Cd 含量. 与空白对照组相比, 小麦根和节间 Cd 含量降低了 7.7% 和 50.9%. 综上, 根施菌株 Y4 能够有效抑制小麦根和节间的 Cd 含量, 提高基节对 Cd 的拦截, 并进一步降低了 Cd 向节间的转移.



不同小写字母表示不同处理之间的差异性 ($P < 0.05$), 下同

图1 根施菌株 Y4 对小麦器官中 Cd 含量的影响

Fig. 1 Effects of root application of *Burkholderia* sp. Y4 on Cd content in wheat organs

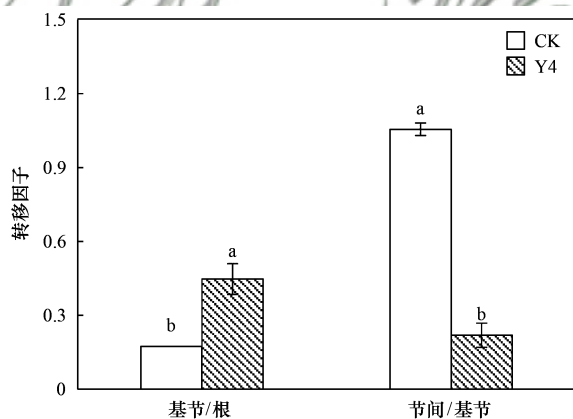


图2 根施菌株 Y4 对小麦器官中 Cd 转移因子的影响

Fig. 2 Effects of *Burkholderia* sp. Y4 application on TF in wheat organs

2.1.2 小麦根、基节中 Cd 赋存形态

如图 3(a) 所示, 根施 Y4 菌株, 与对照相比, 小麦根中的无机态、水溶态和残渣态 Cd 含量分别降低了 64.1%、23.8% 和 8.1%. 通过分析 Cd 的赋存形态占比发现, 小麦根中的 Cd 主要以残渣态形式存在, 占比高达 84.0%, 远高于可移动态 Cd 占比 (无机态 Cd 占比 9.5%, 水溶态 Cd 占比 6.5%). Y4 处理小麦根中的残渣态 Cd 占比提高至 90.2%, 达可溶态 Cd 占比 10 倍左右 [图 3(b)]. 由此可见, 根施 Y4 菌株能够同时降低小麦根中水溶态、无机态和残渣态 Cd 含量, 并改

变根中 Cd 的赋存形态, 促进可移动态 Cd 向残渣态 Cd 的转化, 提高其中残渣态 Cd 的占比, 从而提高了小麦根对 Cd 的固定拦截作用. 与对照相比, 根施 Y4 菌株后小麦基节中的无机态和水溶态 Cd 含量, 分别降低 8.3% 和 11.5%, 残渣态 Cd 含量上升了 69.1% [图 3(c)]. 通过分析 Cd 的赋存形态占比发现, CK 处理小麦基节中的 Cd 主要以残渣态形式存在, 占比高达 65.2%, 远高于可移动态 Cd 占比 (无机态 Cd 占比 17.0%, 水溶态 Cd 占比 17.9%). 从图 3(d) 还可以看出, 根施 Y4 菌株后小麦基节中的残渣态 Cd 占比提高至 78.0%, 达可溶态 Cd 占比 3 倍左右. 由此可见, 根施 Y4 菌株能够同时降低小麦根基节水溶态和无机态 Cd 含量, 并改变基节中 Cd 的赋存形态, 促进可移动态 Cd 向残渣态 Cd 的转化, 提高其中残渣态 Cd 的占比, 从而提高了小麦基节对 Cd 的固定拦截作用, 降低了可移动态 Cd 从基节到节间的转运, 最终降低节间即茎秆 Cd 含量.

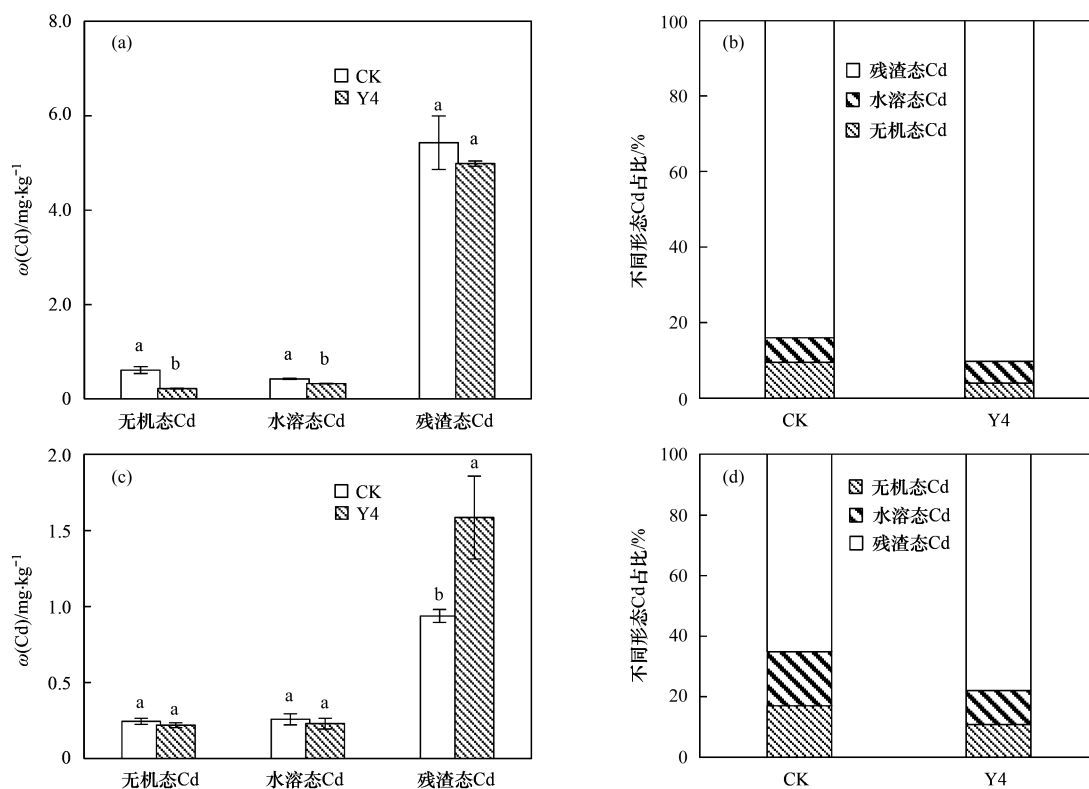
2.1.3 小麦根和基节中 Cd 亚细胞分布

在不同的器官部位, Cd 的富集规律也是不同的. Cd 在小麦主要富集器官是根和基节. 图 4(a) 所示, 小麦根部各亚细胞组分 Cd 的分布占比为: 细胞壁 > 细胞液 > 细胞器, 细胞壁 Cd 含量显著提高了 21.3%, 细胞液和细胞器 Cd 含量分别降低了 12.9% 和 45.6%. 通过分析发现, CK 处理小麦根中 Cd 含量主要分布在细胞壁中, 占比高达 44.2%, 远高于细胞器 Cd 含量 (12.3%). 小麦根中细胞壁 Cd 占比提高至 54.6%, 高达细胞器 (6.9%) 的 7 倍左右. 由此可见, 根施 Y4 菌株能够同时提高小麦根中细胞壁 Cd 含量, 从而将重金属固定而使其失去活性 [图 4(b)]. 与对照相比, 根施 Y4 菌株小麦基节各亚细胞组分 Cd 的分布占比为: 细胞液 > 细胞壁 > 细胞器, 小麦基节中的细胞壁和细胞液 Cd 含量分别提高了 5.8% 和 98.2%, 细胞器显著降低了 31.0%. 通过分析亚细胞 Cd 分布占比发现, CK 处理小麦基节中 Cd 含量主要存在细胞壁中, 占比高达 50.47%, 远高于细胞器 Cd 含量 (16.73%) [图 4(d)]. 根施菌株 Y4 小麦基节中的细胞液 Cd 占比提高至 50.2%, 高达细胞器 Cd (8.9%) 5 倍左右. 由此可见, 根施 Y4 菌株能够显著提高细胞液 Cd 含量, 说明菌株通过提高基节细胞液中螯合肽提高基节 Cd 拦截能力 [图 4(d)].

2.2 根施菌株 Y4 对小麦根际土壤理化性质和 Cd 不同形态分布的影响

2.2.1 土壤理化性质

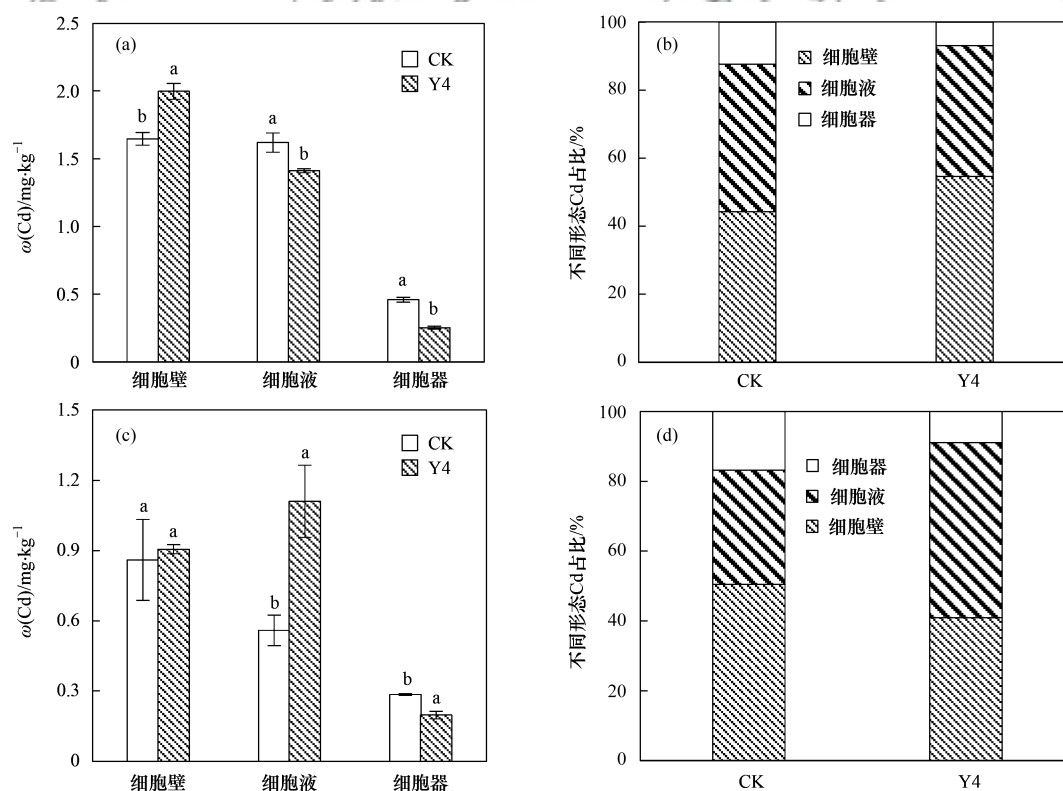
如表 1 所示, 加入菌株 Y4 后, 土壤 pH、有效磷、碱解氮、速效钾和全磷含量均有不同程度的提高. 表明根施 Y4 菌株, 土壤中营养物质增加, 促进土壤有



(a)根不同化学形态Cd的含量;(b)根不同化学形态Cd所占比例;(c)基节不同化学形态Cd的含量;(d)基节不同化学形态Cd所占比例

图3 根施菌株Y4后小麦根和基节中不同化学形态Cd的含量和占比

Fig. 3 Concentration and proportion of Cd with different chemical forms in wheat root and basal node under *Burkholderia* sp. Y4 application



(a)根中亚细胞Cd的含量;(b)根中亚细胞Cd所占比例;(c)基节中亚细胞Cd的含量;(d)基节中亚细胞Cd所占比例

图4 根施菌株Y4后小麦根和基节中Cd亚细胞分布的含量和占比

Fig. 4 Concentration and proportion of Cd with subcellular fractions in wheat root and basal node under *Burkholderia* sp. Y4 application

益微生物增长,提高了土壤对植物的养分供应,保障了植株正常的生长发育,缓解重金属的毒害作用. 根施菌株 Y4 后,pH、有效磷、碱解氮、速效钾和全磷增幅可达 8.3%、5.2%、6.4%、2.2% 和 5.3%,说明加入菌剂后土壤中微生物群落发生变化,进而使养分发生改变,添加菌剂后土壤养分转化为作物容易吸收的成分,作物吸收快,土壤中的养分比对照低. 且微生物菌剂含的有效菌能够活化土壤中的固定养分,促进沉积于土壤中难溶性磷、钾的溶解和释放,

促进土壤中营养元素转化为植物可吸收的形态,提高了土壤速效养分的供应能力,改善了土壤中养分的供应状况,增加土壤肥力.

为了探究根施菌株 Y4 对盆栽土壤的无机氮的影响,经检测发现菌株 Y4 能够显著增加土壤中的硝态氮和铵态氮含量,其增幅可达 22.0% 和 21.4%. 小麦土壤中的无机氮主要以硝态氮形式存在,其占比高达 87.2%,远远高于铵态氮(占比 12.8%),硝态氮含量约为铵态氮的 7 倍左右.

表 1 根施菌株 Y4 对小麦土壤理化性质的影响¹⁾

Table 1 Effects of *Burkholderia* sp. Y4 root application on soil physicochemical properties

处理	pH	ω(有效磷) /mg·kg ⁻¹	ω(碱解氮) /mg·kg ⁻¹	ω(速效钾) /mg·kg ⁻¹	ω(有机质) /g·kg ⁻¹	ω(全磷) /g·kg ⁻¹	ω(全氮) /g·kg ⁻¹	ω(硝态氮) /mg·kg ⁻¹	ω(铵态氮) /mg·kg ⁻¹
CK	7.85±0.08b	126.19±5.66a	34.60±0.48a	150.33±11.38a	2.98±0.12a	879.89±20.45b	527.59±1.38a	21.62±1.35b	3.18±0.08b
Y4	8.50±0.01a	132.74±4.53a	36.83±1.52a	153.60±2.67a	3.05±0.04a	926.31±8.19a	508.07±9.01a	26.37±1.43a	3.86±0.32a

1)不同小写字母代表不同处理之间的差异性($P<0.05$)

2.2.2 土壤 Cd 形态分布

为了深入探索根施菌株 Y4 对小麦土壤 Cd 拦截的作用机制,对土壤中 Cd 的赋存形态进行检测分析. 如图 5(a)所示,菌株 Y4 分别降低了小麦盆栽土壤中的可交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态 Cd 含量,其降幅达 44.4%、21.7% 和 15.9%. 通过对土壤中 Cd 的不同形态进行检测分析,CK 处理中的 Cd 主要以残渣态形式存在,其占比高达 53.6%,远高于可移动态(可交换态 Cd 占比为 16.9%、碳酸盐结合态 Cd 占比为 15.5%、铁锰氧化物结合态 Cd 占比为 12.9% 和有机态 Cd 占比为 1.1%)[图 5(b)]. 由此可知,接种菌株 Y4 促进了土壤 Cd 的可交换态向难溶态的转化.

2.3 菌株定殖情况和土著菌群结构变化

为了进一步评价菌株 Y4 对小麦根际总环境的影响,分析了小麦土壤细菌群落组成. Beta 多样性是衡量微生物群落之间的差别,可以更好地描述生境内的微生物种类的数量,可以将同一样品与不同样品不同条件下进行比较,也可以反映不同样品的群落组成的相似性及差异性. 如图 6(a)所示,空白对照土壤样本微生物与接种菌株的差异显著($P<0.05$),反映了二者 Beta 多样性是不同的. 因此,菌株 Y4 显著影响了土壤细菌群落的组成.

由图 6(b)可知,在小麦根际土壤细菌门水平群落结构上,主要由变形菌门(Proteobacteria)和酸杆菌门(Acidobacteriota)组成,二者所占比例接近 60%. 根施菌株 Y4 后,土壤中细菌相对丰度产生了明显变化. 与 CK 相比,土壤中酸杆菌门(Acidobacteriota)、放线菌门(Actinobacteriota)和疣微菌门

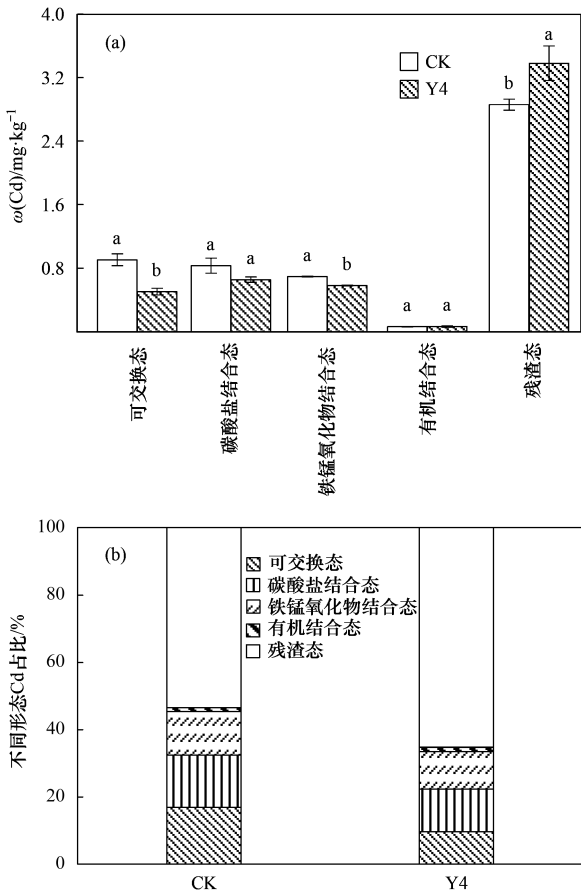


图 5 根施菌株 Y4 后小麦土壤中不同形态 Cd 的含量和占比
Fig. 5 Concentration and proportion of Cd with different forms in wheat soil under root application of *Burkholderia* sp. Y4

(Verrucomicrobiota) 相对丰度小幅降低,分别为 27.7%、17.2% 和 22.0%,而绿弯菌门(Chloroflexi)、变形菌门(Proteobacteria)、芽单胞菌门(Gemmatimonadota)、拟杆菌门(Bacteroidota)的相对丰度小幅升高,其中拟杆菌门(Bacteroidota)增幅最大,为 21.7%.

在目水平群落结构看出,如图 6(c),菌株 Y4 提高了土壤中的细菌相对丰度. 与空白对照相比,假单胞菌目 (*Pseudomonadales*)、芽单胞菌目 (*Gemmatimonadales*)、伯克氏菌目 (*Burkholderiales*) 和鞘氨醇菌目 (*Chitinophagales*) 的丰度明显增加,其中芽单胞菌目 (*Gemmatimonadales*) 丰度最大,总丰度从 5.5% 增加到 6.7%.

由图 6(d)可知,在小麦根际土壤细菌属水平群落结构上,接种菌株 Y4 后,与空白对照相比,土生单胞菌属 (*Terrimonas*)、砂单胞菌属 (*Arenimonas*)、*Haliangium* 属、假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 和黄杆菌属 (*Flavobacterium*) 相对丰度明显增加,其中空白对照假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 相对丰度仅为 0.4%,接种 Y4 后相对丰度提高至 2.1%. 而硝化螺旋菌属 (*Nitrospira*)、交替红色杆菌属 (*Altererythrobacter*) 和硝基酚类诺卡氏菌属 (*Nocardioide*) 相对丰度降低,并没有显著差异.

3 讨论

微生物具有巨大的代谢潜力,可以对污染物进行生物修复,降低重金属等污染物的毒性,包括细菌在内的众多微生物已显示出修复重金属污染土壤的能力^[25]. 目前微生物修复法工艺相对成熟,成本低、效率高,易获得、对生态系统无害、同时能改善土壤环境、提升土壤肥力,逐渐被公众所接受^[26]. 本研究发现,在拔节期根施菌株 Y4 既可显著降低小麦籽粒 Cd 含量,同时降低了小麦根部和节间 Cd 含量^[16,17]. 由此可见,利用降 Cd 促生菌缓解 Cd 污染对小麦产生的毒性作用并抑制其吸收积累,具有较好的安全性和应用前景.

根施菌株 Y4 后,小麦基节 Cd 含量提高. 进一步分析小麦不同营养器官之间的 Cd 转移因子发现,菌株 Y4 对小麦营养器官间的 Cd 转运起到调控作用,在促进 Cd 从根向基节转运的同时,显著抑制了 Cd 从基

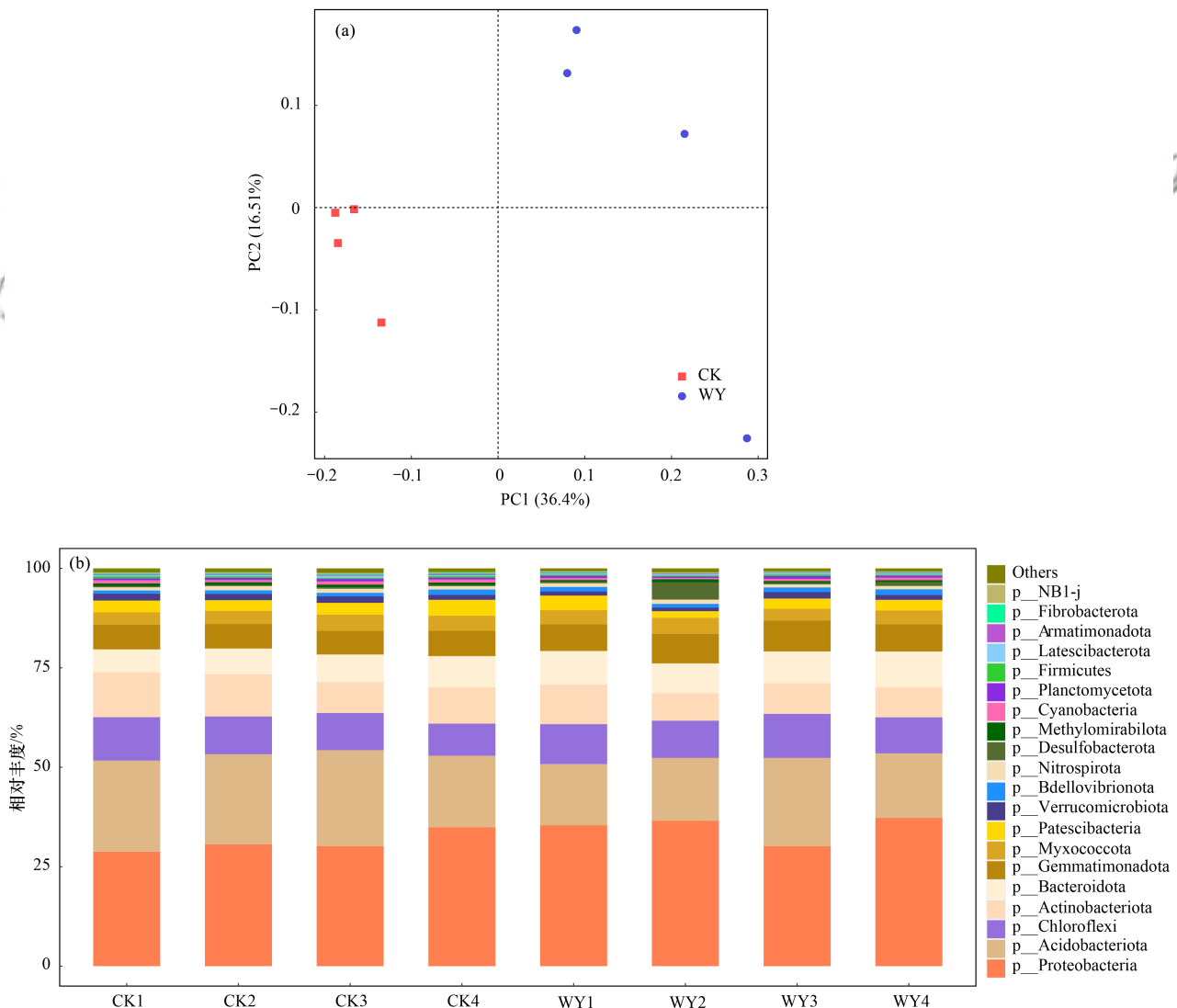
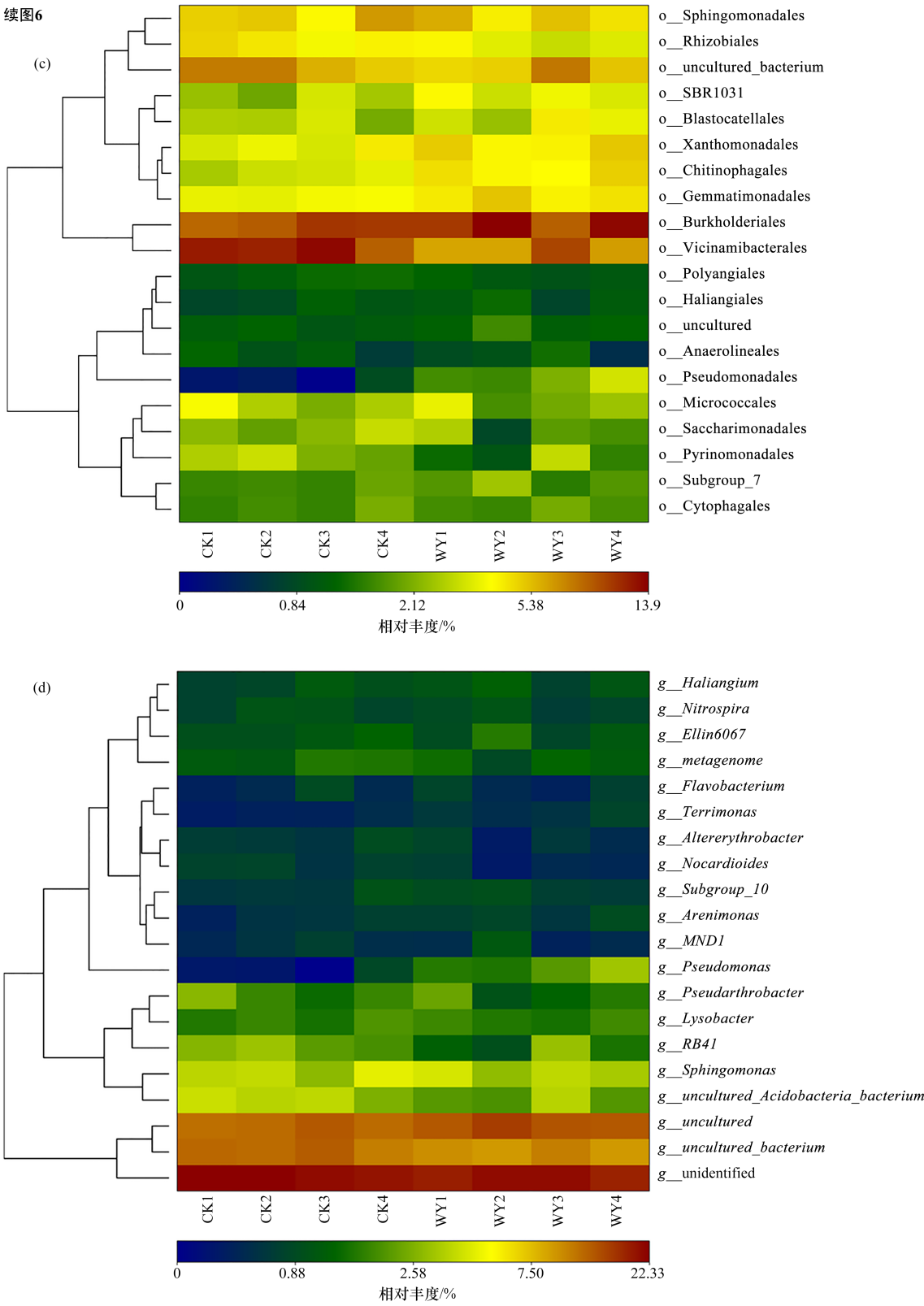


图 6 根施菌株 Y4 后小麦土壤微生物群落的影响

Fig. 6 Effects of *Burkholderia* sp. Y4 root application on microbial community in wheat soil



节向节间的转运,提高了小麦基节对Cd的拦截能力.深入研究小麦根和基节中的Cd赋存形态发现,菌株Y4分别降低了根和基节无机态和水溶态Cd含量,并提高了残渣态Cd的占比.通过小麦根内Cd的亚细胞分布研究发现,菌株Y4显著提高了Cd在细胞

壁分布占比并显著降低了在细胞器中的分布占比;而在基节中,显著提高了其细胞液分布占比并显著降低了细胞器的分布占比.结合分析Cd赋存形态和亚细胞分布发现,Y4能够通过提高根细胞壁整合能力提高根对Cd的拦截能力,而菌株Y4对小麦基节

的影响则可能是通过促进基节细胞液中植物螯合肽等成分合成的方式,提高小麦胞内螯合解毒物质与Cd离子的结合,以提高不可移动态Cd(残渣态Cd)的含量和占比,进而提高基节对Cd的拦截能力,降低基节中Cd向上到节间的转运。根系和基节是拦截Cd等重金属在农作物体内转运的重要营养器官,对抑制Cd向籽粒转运发挥重要作用^[27,28]。根施菌株Y4等微生物,能够通过改变小麦根和基节中Cd的赋存形态和亚细胞分布,提高其本身的Cd拦截能力,进而降低小麦地上部和可食用部位的镉积累量^[29]。

为了深入探究根施菌株Y4对小麦土壤Cd拦截的作用机制,对土壤中Cd的不同形态进行检测分析。本研究发现菌株Y4显著降低了土壤中游离态Cd和铁锰氧化物结合态Cd含量,提高了残渣态Cd含量。土壤不同形态Cd含量顺序为:残渣态>碳酸盐结合态>铁锰氧化物结合态>可交换态>有机结合态。因此,施加菌株Y4能够促进土壤Cd从有机结合态向残渣态的转化,进而降低土壤Cd可移动性,从而减轻农作物对Cd的吸收。此结果与前人的研究结果相似^[30]。由此可见,重金属总量在某种程度上反映其污染水平,而重金属形态及其生物有效性决定其在生物体中的富集能力及其生物毒性,通过改变土壤中重金属的赋存形态、降低其在土壤中的有效性和迁移性是降低重金属在植物体内富集和毒性的的重要途径^[31]。根施菌株Y4,能使土壤中可交换态Cd转化为残渣态Cd,从而达到修复土壤Cd污染的目的。

在本研究中,小麦根际细菌群落Beta多样性差异说明,拔节期根施菌株Y4能够影响土壤微生物群落结构^[32],并且与对照组相比,菌群结构变化在小麦成熟收获期仍具有显著差异,其中目水平上伯克氏菌的相对丰度显著提高,证明根施菌株Y4可以定殖并维持一段时间^[33]。由此可见,土壤元素的化学形态取决于复杂的微生物代谢网络,而微生物代谢网络与微生物群落结构密切相关^[34],根施菌株Y4能够改变土壤微生物群落组成和丰度。

与对照组相比,根施菌株Y4显著提高了土壤pH值,而pH在重金属生物吸附过程中起着至关重要的作用^[35]。并且根际菌群中酸杆菌门(Acidobacteriota)的相对丰度显著降低。有研究表明,土壤酸杆菌门的相对丰度与土壤pH值呈显著负相关关系^[36]。部分酸杆菌与土壤金属元素形态和矿物风化等相关。当pH值增大时,土壤中的有效态Cd向无效(缓效)态Cd转化,从而降低土壤中重金属的生物有效性和可移动性^[37,38]。由此可见,酸杆菌门可能是Cd污染小麦土中与Cd生物有效性相关的重要指示菌,本研究中施用菌株Y4后酸杆菌门与pH值的变化趋势一致,有利于

降低土壤中Cd的可移动性。此外,根施菌株Y4显著增加了土壤中硝态氮和铵态氮含量,土壤中碱解氮含量也有小幅提高,推测该菌株能通过促进土壤中氮素的矿化和利用,提高土壤肥力肥效,有利于促进小麦生长^[39]。同时,小麦根际铵态氮含量显著提高,也有利于竞争性抑制Cd通过非选择性阳离子通道进行跨膜转运进入小麦根系^[40]。

本研究中根施的菌株Y4为伯克氏菌,伯克氏菌可从受污染的土壤^[41]以及水溶液中去去除Cd等重金属^[12],即使在寡营养环境中,伯克氏菌也表现出较高的Cd积累能力^[42]。此外,菌株Y4增加了土壤中变形菌门(Proteobacteria)的相对丰度,变形菌门对于吸附污染土壤中的重金属具有较好的效果[其中包括化学营养型酸硫杆菌属(*Chemolithotrophic acidithiobacillus* spp.)],以上类群可通过促进铁氧化矿化等过程,提高土壤对Cd的吸附和沉淀能力,从而降低重金属的可移动性^[43]。根施菌株Y4同时提高了芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)和假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)的相对丰度,芽孢杆菌对Cd、Pb和Cr等重金属有较强的吸附作用,以表面吸附为主,细胞壁上的羧基、羰基和酰胺基含有大量孤对电子,能成为Cd²⁺的电子供体,发生络合作用,从而实现Cd的富集。假单胞菌同样具有较强富集和回收Cd的能力,通过透射电镜和扫描电镜发现其菌体表面和内部皆存在大量含Cd²⁺的颗粒,能通过吸收积累的方式降低根际Cd积累量^[44,45]。由此可见,根施菌种Y4能够通过改变土著微生物群落结构,影响根际Cd迁移转化和生物可利用性。

综上所述,在小麦拔节期根施菌株Y4,不但能够降低小麦营养器官的Cd含量,同时能够调控小麦营养器官本身的Cd拦截能力,将Cd固定在根和基节中,进而抑制Cd向节间等地上部器官的转运;菌株Y4通过改变根际微生物群落中特定微生物等方式,提高土壤中残渣态Cd而降低可移动态Cd含量,进而提高氮素利用率,减轻土壤受重金属的危害。由此可见,菌株Y4能够“两段式”阻控污染土壤中Cd向小麦籽粒的转运,对于污染麦田安全生产具有一定的应用潜力。

4 结论

(1)根施菌株Y4可以显著降低小麦营养器官和籽粒中Cd含量,提高了小麦根和基节对Cd的固定和拦截能力,抑制可移动Cd向籽粒的转运。

(2)根施菌株Y4能够在小麦根际定殖,并改变土著微生物群落结构,同时提高了土壤pH值,增加了硝态氮和铵态氮含量,并显著降低了根际土壤中的

游离态和铁锰氧化物结合态 Cd 含量。

(3) 菌株 Y4 能够“两段式”阻控污染土壤中 Cd 向小麦籽粒的转运, 降低籽粒 Cd 含量。

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] Chen X, Yang S, Ma J, *et al.* Manganese and copper additions differently reduced cadmium uptake and accumulation in dwarf Polish wheat (*Triticum polonicum* L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, **448**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.130998.
- [3] 任超, 任斌仲, 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.
- [4] 朱永官, 彭静静, 韦中, 等. 土壤微生物组与土壤健康[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, **51**(1): 1-11.
Zhu Y G, Peng J J, Wei Z, *et al.* Linking the soil microbiome to soil health[J]. SCIENTIA SINICA Vitae, 2021, **51**(1): 1-11.
- [5] Bahram M, Hildebrand F, Forslund S K, *et al.* Structure and function of the global topsoil microbiome[J]. Nature, 2018, **560** (7717): 233-237.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Biswas J K, Mondal M, Rinklebe J, *et al.* Multi-metal resistance and plant growth promotion potential of a wastewater bacterium *Pseudomonas aeruginosa* and its synergistic benefits [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2017, **39**(6): 1583-1593.
- [10] Sarkar A, Pramanik K, Mitra S, *et al.* Enhancement of growth and salt tolerance of rice seedlings by ACC deaminase-producing *Burkholderia* sp. MTCC 12259 [J]. Journal of Plant Physiology, 2018, **231**: 434-442.
- [11] Wang X, Zhang X, Liu X M, *et al.* Physiological, biochemical and proteomic insight into integrated strategies of an endophytic bacterium *Burkholderia cenocepacia* strain YG-3 response to cadmium stress [J]. Metallomics, 2019, **11**(7): 1252-1264.
- [12] Ashraf M A, Hussain I, Rasheed R, *et al.* Advances in microbe-assisted reclamation of heavy metal contaminated soils over the last decade: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2017, **198**: 132-143.
- [13] 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.
- [14] Verma S, Kuila A. Bioremediation of heavy metals by microbial process [J]. Environmental Technology & Innovation, 2019, **14**, doi: 10.1016/j.eti.2019.100369.
- [15] 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.
- [16] 刘悦畅, 李保珍, 王涛, 等. 2 种菌联合修复农田土壤镉污染的研究 [J]. 水土保持学报, 2020, **34**(4): 364-369.
Liu Y C, Li B Z, Wang T, *et al.* Study of two microbes combined to remediate field soil cadmium pollution [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(4): 364-369.
- [17] Wang X H, Luo W W, Wang Q, *et al.* Metal (loid) -resistant bacteria reduce wheat Cd and As uptake in metal (loid) -contaminated soil [J]. Environmental Pollution, 2018, **241**: 529-539.
- [18] Han H, Cai H, Wang X Y, *et al.* Heavy metal-immobilizing bacteria increase the biomass and reduce the Cd and Pb uptake by pakchoi (*Brassica chinensis* L.) in heavy metal-contaminated soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **195**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110375.
- [19] 王亚军, 冯炬威, 李雅倩, 等. 高产铁载体菌 *Burkholderia vietnamiensis* YQ9 促生特性研究及其对重金属胁迫条件下种子萌发的影响 [J]. 环境科学学报, 2022, **42**(2): 430-437.
Wang Y J, Feng J W, Li Y Q, *et al.* Studies on growth-promoting properties of an efficient siderophore producing bacterium, *Burkholderia vietnamiensis* YQ9, and its effects on seed germination under heavy metal stress [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(2): 430-437.
- [20] 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.
- [21] Guo J K, Zhao J, Ren X H, *et al.* Effects of *Burkholderia* sp. D54 on growth and cadmium uptake of tomato, ryegrass and soybean plants [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2020, **17**(2): 1149-1158.
- [22] Wang C R, Huang Y C, Zhang C B, *et al.* Inhibition effects of long-term calcium-magnesium phosphate fertilizer application on Cd uptake in rice: regulation of the iron-nitrogen coupling cycle driven by the soil microbial community [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125916.
- [23] 张雅荟, 王常荣, 刘月敏, 等. 叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿物质元素含量的影响 [J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 4045-4052.
Zhang Y H, Wang C R, Liu Y M, *et al.* Foliar application of L-cysteine: effects on the concentration of Cd and mineral elements in rice [J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 4045-4052.
- [24] Yao Q, Li W P, Liu Y, *et al.* FeCl₃ and Fe₂(SO₄)₃ differentially reduce Cd uptake and accumulation in Polish wheat (*Triticum polonicum* L.) seedlings by exporting Cd from roots and limiting Cd binding in the root cell walls [J]. Environmental Pollution, 2023, **317**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120762.
- [25] 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.
- [26] Liu L W, Li W, Song W P, *et al.* Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability [J]. Science of the Total Environment, 2018, **633**: 206-219.
- [27] Feng X M, Han L, Chao D Y, *et al.* Iomic and transcriptomic analysis provides new insight into the distribution and transport of cadmium and arsenic in rice [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **331**: 246-256.
- [28] Wei T, Liu X, Dong M F, *et al.* Rhizosphere iron and manganese-oxidizing bacteria stimulate root iron plaque formation and regulate Cd uptake of rice plants (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Environmental Management, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111533.
- [29] 姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 等. 产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 [J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5778-5788.
- Ji M F, Wu X J, Li X Z, *et al.* Poly amine-producing bacteria improve Cd resistance and reduce uptake of Cd in wheat [J]. Environmental Science, 2022, **43**(12): 5778-5788.
- [30] 张旭辉. 耐镉微生物与生物炭联合对土壤镉形态及植物镉吸收的影响研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- Zhang X H. The effect of cadmium-tolerant microorganism combined with biochar on cadmium fractions of soil and cadmium uptake by plants [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [31] Huang Q Q, Wang Y L, Qin X, *et al.* Soil application of manganese sulfate effectively reduces Cd bioavailability in Cd-contaminated soil and Cd translocation and accumulation in wheat [J]. Science of the Total Environment, 2022, **814**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152765.
- [32] 宋以玲, 于建, 陈士更, 等. 复合微生物菌剂对棉花生理特性及根际土壤微生物和化学性质的影响 [J]. 土壤, 2019, **51**(3): 477-487.
- Song Y L, Yu J, Chen S G, *et al.* Effects of complex microbial agent on cotton physiological characteristics, microorganism and physicochemical properties in rhizosphere soil [J]. Soils, 2019, **51**(3): 477-487.
- [33] Ju W L, Liu L, Fang L C, *et al.* Impact of co-inoculation with plant-growth-promoting rhizobacteria and rhizobium on the biochemical responses of alfalfa-soil system in copper contaminated soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **167**: 218-226.
- [34] Kuypers M M M, Marchant H K, Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network [J]. Nature Reviews Microbiology, 2018, **16**(5): 263-276.
- [35] 徐韶足, 王瑶, 毕文龙, 等. 一种改性微生物吸附剂的制备及其对镉离子的吸附特性 [J]. 环境科学学报, 2021, **41**(4): 1342-1350.
- Xu S Z, Wang Y, Bi W L, *et al.* Preparation of a modified microbial adsorbent and its adsorption characteristics for Cd²⁺ [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(4): 1342-1350.
- [36] Liu H X, Yang Y J, Yang Y Z, *et al.* Dynamics of fungal and bacterial communities in different types of soil ageing with different dosages of cadmium [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, **242**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113860.
- [37] 王立夫, 赵淑雯, 李杉杉, 等. 不同阴离子钠盐对土壤 Cd 形态与微生物群落的影响 [J]. 中国环境科学, 2021, **41**(9): 4221-4230.
- Wang L F, Zhao S W, Li S S, *et al.* Effect of sodium salt with varied anions on Cd fractions and microbial community in soil [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(9): 4221-4230.
- [38] Cheng C, Han H, Wang Y P, *et al.* Biochar and metal-immobilizing *Serratia liquefaciens* CL-1 synergistically reduced metal accumulation in wheat grains in a metal-contaminated soil [J]. Science of the Total Environment, 2020, **740**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139972.
- [39] Wang Q, Chen L, He L Y, *et al.* Increased biomass and reduced heavy metal accumulation of edible tissues of vegetable crops in the presence of plant growth-promoting *Neorhizobium huautlense* T1-17 and biochar [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, **228**: 9-18.
- [40] Zhou J, Du B Y, Liu H L, *et al.* The bioavailability and contribution of the newly deposited heavy metals (copper and lead) from atmosphere to rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **384**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121285.
- [41] Yang Z H, Zhang Z, Chai L Y, *et al.* Bioleaching remediation of heavy metal-contaminated soils using *Burkholderia* sp. Z-90 [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, **301**: 145-152.
- [42] Zhang J H, Li Q, Zeng Y F, *et al.* Bioaccumulation and distribution of cadmium by *Burkholderia cepacia* GYP1 under oligotrophic condition and mechanism analysis at proteome level [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **176**: 162-169.
- [43] 刘同旭, 程宽, 陈丹丹, 等. 微生物介导的硝酸盐还原耦合亚铁氧化成矿研究进展 [J]. 生态环境学报, 2019, **28**(3): 620-628.
- Liu T X, Cheng K, Chen D D, *et al.* Formation of Fe (III) -minerals by microbially mediated coupling of nitrate reduction and Fe (II) oxidation: a review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(3): 620-628.
- [44] 喻涌泉, 黄魏魏, 董建江, 等. 硝基还原假单胞菌吸附重金属镉的机理研究 [J]. 中国环境科学, 2017, **37**(6): 2232-2238.
- Yu Y Q, Huang W W, Dong J J, *et al.* Study on the removal of Cd (II) by *Pseudomonas nitroreducens*: biosorption characteristics and mechanism [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(6): 2232-2238.
- [45] Shi G Y, Hu J Y, Cheng Y Y, *et al.* *Pseudomonas aeruginosa* improved the phytoremediation efficiency of ryegrass on nonylphenol-cadmium co-contaminated soil [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **30**(10): 28247-28258.

CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> (617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang (626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> (635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> (700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> (709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> (721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> (732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> (744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> (802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong (813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> (826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> (837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo (844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> (854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> (862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> (873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> (885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> (898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> (909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> (920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> (929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> (940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> (952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province; Taking Puding County as An Example	LI Yue, LUO Hong-fen (961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> (974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing (983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> (1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> (1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> (1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> (1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> (1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> (1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> (1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> (1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> (1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> (1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> (1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> (1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> (1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> (1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang (1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li (1222)