

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勤之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
- 再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
- 基于多种新型受体模型的 PM_{2.5} 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
- 华中地区夏季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
- 淄博 2021 年元宵节 PM_{2.5} 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
- 浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
- 2001~2019 年气象条件对江苏省 PM_{2.5} 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
- 基于神经网络和数值模型的重点区域 PM_{2.5} 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
- 2015~2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
- 济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
- 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
- 基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
- 日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
- 泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
- 典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
- 2000~2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
- 西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
- 生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
- 不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
- 雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
- 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
- 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
- 河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
- 青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
- 鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
- 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
- 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
- 基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
- 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
- 铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
- 氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
- 环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
- 冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
- 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
- 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
- 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
- 地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
- 西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
- 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
- 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
- 不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘伟丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
- 温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
- 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全性的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
- 复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
- 产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 虎发虎, 韩辉 (1031)
- 土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
- 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
- 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
- 稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
- 模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
- 德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
- 陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
- 长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
- 《环境科学》征订启事(618) 信息(685, 935, 956)

产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应

李晓哲¹, 覃善梅¹, 陈兆进¹, 张君¹, 姚伦广¹, 李娜¹, 庞发虎^{1,*}, 韩辉^{1,2*}

(1. 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, 南阳 473061; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 土壤中的某些功能微生物能够通过吸附和沉淀等作用固定重金属, 降低其有效态含量, 从而阻控作物对重金属的吸收, 在中轻度重金属超标农田钝化修复中发挥着重要作用. 通过盆栽试验, 借助高通量测序技术研究外源产多胺细菌 *Bacillus* sp. N3 的接种对小麦 Cd 吸收和根际土壤细菌群落组成和功能的影响. 结果表明, 与不接菌对照相比, 菌株 N3 能够显著降低小麦籽粒中 Cd (64.7%) 和根际土壤 DTPA-Cd (50.1%) 的质量分数, 提高根际土壤 pH 值 (由 6.84 升高到 6.97) 和多胺的含量. 高通量测序结果表明, 菌株 N3 的接种降低了小麦根际土壤细菌群落的多样性, 但是提高了 β -Proteobacteria、Bacteroidetes 和 Firmicutes 的相对丰度. 与此同时, 菌株 N3 显著提高了小麦根际土壤中具有重金属固定和植物促生能力的菌属的相对丰度 (主要为 *Bacillus*、*Arthrobacter*、*Brevundimonas*、*Ensifer*、*Pedobacter*、*Rhizobium*、*Pseudomonas*、*Enterobacter* 和 *Serratia*). PICRUSt 功能预测表明, 菌株 N3 显著提高了小麦根际土壤中参与抗氧化能力、激素合成和硫代谢的基因拷贝数. 以上结果表明, 产多胺细菌 N3 通过提高小麦根际土壤的 pH 值、多胺含量、具有重金属固定或者植物促生细菌等功能菌株和参与抗氧化能力、激素合成和硫代谢等代谢途径的细菌群落丰度来降低根际土壤中 DTPA-Cd 的含量, 进而阻控了小麦对 Cd 的吸收. 结果可为重金属超标农田修复和保障小麦安全生产提供理论依据和技术支撑.

关键词: 重金属; 钝化修复; 细菌群落; 产多胺细菌; 小麦

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-1031-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202106216

Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat

LI Xiao-zhe¹, QIN Shan-mei¹, CHEN Zhao-jin¹, ZHANG Jun¹, YAO Lun-guang¹, LI Na¹, PANG Fa-hu^{1,*}, HAN Hui^{1,2,*}

(1. 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 Science and Agricultural Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Some functional microorganisms in the soil immobilize heavy metals by adsorption and precipitation, prevent the absorption of heavy metals by crops, and play an important role in the passivation and remediation of medium and mild heavy metal-contaminated soil. A pot experiment was conducted to study the effects of the exogenous polyamine-producing bacterium *Bacillus* sp. N3 on Cd uptake and the bacterial community composition and function in the rhizosphere soil. The results showed that strain N3 significantly reduced the contents of Cd (64.7%) in wheat grain and DTPA-Cd (50.1%) in rhizosphere soil and increased the pH (from 6.84 to 6.97) and polyamine content. High-throughput sequencing results showed that inoculation of strain N3 reduced the diversity of the bacterial community; however, it increased the relative abundances of β -Proteobacteria, Bacteroidetes, and Firmicutes in wheat rhizosphere soil. Meanwhile, strain N3 also increased the relative abundances of heavy metal-immobilizing bacteria and plant growth-promoting bacteria (*Bacillus*, *Arthrobacter*, *Brevundimonas*, *Ensifer*, *Pedobacter*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, and *Serratia*) in wheat rhizosphere soil. The PICRUSt function prediction showed that strain N3 increased the copy number of genes involved in antioxidant capacity, hormone synthesis, and sulfur metabolism in wheat rhizosphere soil. These results indicated that the polyamine-producing bacteria N3 reduced the DTPA-Cd content by increasing the pH; the polyamine contents; the abundances of bacteria with heavy metal-immobilizing or plant growth-promoting traits; and the metabolic pathway involved in antioxidant capacity, hormone synthesis, and sulfur metabolism in wheat rhizosphere soil, thus inhibiting the absorption of Cd by wheat. The results provide theoretical basis and technical support for restoring farmland with excessive heavy metals and ensuring the safe production of wheat.

Key words: heavy metals; immobilization; bacterial community; polyamine-producing bacteria; wheat

我国农田土壤重金属污染形势严峻, 已对粮食安全构成威胁, 尤其是广大偏酸性农田土壤, 给我国农作物 (尤其是水稻和小麦) 的安全生产带来了严峻挑战^[1~3]. 镉 (Cd) 是一种致癌性很强的重金属元素, 在很低的浓度下就能对生物造成毒害作用. 土壤环境中的 Cd 既能通过植物的累积作用进入食物链, 也能经径流和淋溶作用造成水污染^[4,5]. 因此探寻修复 Cd 污染农田和阻控小麦 Cd 吸收的方法迫在眉睫. 常用的阻控农田作物吸收重金属的方法主要有低累积品种的筛选、农艺调控措施、原位钝化

修复、水肥管理和叶面阻控剂的施用等^[6,7]. 对于广阔的中轻度重金属超标农田而言, 原位钝化修复是常用的修复方法. 例如在土壤中施用化学钝化剂, 种植高蓄积体植物, 在土壤中添加特殊的菌群等^[8,9]. 而微生物钝化修复有着成本低、操作简单和对原生

收稿日期: 2021-06-27; 修订日期: 2021-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41907143); 中国博士后科学基金项目 (2020M680775); 河南省科技攻关计划项目 (212102110391, 212102310076, 182102310077)

作者简介: 李晓哲 (1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: 3050568821@qq.com

* 通信作者, E-mail: pangfahu@163.com; 17657311626@163.com

态系统影响小等优点,越来越受到广泛地关注^[10,11].

环境中有些细菌具有抵抗高浓度重金属胁迫的能力,并且能够通过细胞吸附和螯合重金属,或者通过分泌磷酸酶和脱落酸等次级代谢物固定沉淀重金属从而降低重金属在环境中的移动性,被称为重金属固定细菌^[12,13]. 当外源接种这些菌株到植物根际土壤中,这些菌株能够降低重金属在土壤中的生物利用度,从而阻控作物对重金属的吸收. 菌株 *Serratia*. sp HY-22、*Pseudomonas*. sp WRS8 和 *Bacillus*. sp H3 被报道分别具有阻控蔬菜、小麦和水稻对 Cd 的吸收的能力^[14~16]. 有研究表明外源钝化剂的使用能够改变土壤的理化性质,同时对作物根际的微生物群落也会造成一定的影响^[9],但是关于外源菌株的接种对于作物根际功能细菌群落结构的影响以及这种影响对作物吸收重金属的影响的报道不多. 多胺是生物代谢过程中产生的一类化学结构中含有两个及以上氨基的低分子量脂肪族含氮碱,常见的多胺主要有腐胺、亚精胺和精胺^[17]. 产多胺细菌分泌的多胺能够促进植物生长,在应对重金属胁迫等方面具有重要的作用^[18,19]. 在前期研究中,笔者实验室筛选到 1 株产多胺重金属固定细菌 *Bacillus* sp. N3 (MH715353),具有阻控生菜吸收 Cd 和 Pb 的能力^[20]. 但是关于产多胺细菌对小麦 Cd 吸收和根际细菌群落结构的影响还不清楚. 因此本研究通过盆栽试验,借助高通量测序技术研究菌株 N3 的接种对小麦根系细菌群落结构和 Cd 吸收的影响,同时对小麦根际土壤中的优势菌株进行功能分类和代谢通路分析,在细菌群落层面探究菌株 N3 阻控小麦 Cd 吸收的机制,以期产多胺细菌修复重金属污染农田和保障小麦安全生产提供菌种资源和技术途径.

1 材料与方法

1.1 供试菌株和 Cd 污染土壤

菌株 *Bacillus* sp. N3 (MH715353) 分离自 Cd 污染生菜根际土壤中^[20]. 本研究表明菌株 N3 能够分泌精胺和亚精胺,对 Cd 的致死浓度为 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在 $\rho(\text{Cd})$ 为 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶液中培养菌株 N3, 24 h 后测定上清液 Cd 的质量浓度,发现菌株 N3 对 Cd 的吸附率为 93.4%. 因此菌株 N3 是 1 株产多胺重金属固定细菌. 采集 Cd 污染农田土壤,自然风干,过 80 目筛. 土壤 pH 为 6.84, ω (总 Cd) 为 $2.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (有机质) 为 $25.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (总氮) 为 $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (有效磷) 为 $0.574 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, ω (速效钾) 为 $1.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.2 小麦盆栽试验

称取 5 kg 土壤放入盆中,为了保证小麦能够正常生长,每盆土壤另外施加 5 g 尿素、2.5 g 磷酸二氢钾和 2.5 g 氯化钾. 本试验共设置两个处理:不接种对照组(CK)和接种 N3 处理组(N3),每个处理 3 个重复. 取河南地区常规小麦品种郑 7698 (*Triticum aestivum* L.) 若干,用 75% 的酒精消毒 3 min,再用去离子水清洗 3 遍,放在清洁纱布中,置于 25℃ 的条件下催芽. 待小麦种子露白,从中取出一部分种子放入含有菌株 N3 的菌悬液 ($10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$) 中浸泡 2 h,然后将所有种子均匀地撒在盆中的土壤表层,然后在种子上面铺一层薄土. 小麦种子出苗后进行逐步间苗,最后每盆留下 10 棵小麦苗. 等到小麦到了拔节期,对 N3 处理组中的小麦苗再次进行接种. 对含有培养基的菌液进行 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min,倒去上清液,加入无菌去离子水,使 $D_{600} = 1.0 \times 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$,即为接种所用的菌悬液. 用镊子沿小麦根部土壤划开一条小沟,倒入 25 mL 菌悬液,最后盖上土壤. 按照常规方法进行小麦管理,小麦于 2020 年 10 月 28 日种植,2021 年 5 月 25 日收获.

1.3 植物和土壤样品收获处理

小麦成熟后,分别收集小麦籽粒、秸秆和根,用去离子水洗干净后烘干和称重,然后用粉碎机磨碎,采用电热消解法消解样品,然后用电感耦合等离子体发射光谱仪(inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ICP-AES, SHIMADZ ICPE-9820)测定上清液中 Cd 质量浓度,进而计算小麦各组织 Cd 的含量. 采用国家标准参比物质(土壤:GBW-07402,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. 采集小麦根际土时,提前 1 d 在小麦盆中撒些无菌水,使盆中的土壤保持潮湿但又不粘黏的状态. 第 2 d 收获时,使整个小麦连根带土从盆中拨出来,然后用手轻轻剥掉外围的土壤. 由于小麦的根长得比较茂密,根与根之间会包裹住很多土,采用抖落法去掉大部分的土壤. 然后用镊子挑出距离小麦根 5 mm 以内的土,收集起来,即为根际土. 快速地收集每个处理的根际土,装入封口袋,存放于 -80°C 超低温冰箱中(每个处理 3 g 土壤). 剩下的根际土进行室温晾干,进行其他指标测定. 称取 5.0 g 晾干土壤加入 25 mL DTPA 提取剂,提取测定 DTPA-Cd 含量. 以 1:2.5 的土水比测定小麦根际土壤 pH 值. 采用重铬酸钾容量法测定小麦根际土壤中有机质的含量^[21]. 称取新鲜小麦根际土壤 5.0 g 放到含有 30 mL 无菌去离子水的摇瓶内, $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡培养 3 h, $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min. 取 2 mL 上清液,加入 2 mL

10% (体积分数) 的高氯酸, 混匀, 置于 4℃ 冰箱中浸提 2 h. 然后 10 000 r·min⁻¹ 4℃ 下离心 30 min. 采用高效液相法测定上清液中腐胺、精胺和亚精胺的含量^[22].

1.4 小麦根际土壤细菌群落测定和数据分析

采用土壤 DNA 提取试剂盒 FastDNA® SPIN (MP Biomedicals, Germany) 提取各处理小麦根际土壤的总 DNA, 16S rRNA 的 V3-V4 片段使用引物 5'-GACTACHVGGGTATCTAATCC-3' 和 5'-CCTACGGGNGGCWGCAG-3' 扩增^[23], 扩增产物送上海美吉生物医药科技有限公司, 使用 MiSeq PE300 测序仪 (Illumina Inc, San Diego, CA, USA) 完成序列测定.

数据分析在美吉云平台上在线分析 (<https://login.majorbio.com>). 其中, 采用 RDP classifier 贝叶斯算法对 97% 相似水平的 OTU 代表序列进行分类学分析, 并在各个分类水平下统计每个样品的群落组成. 基于 OTU 计算稀释曲线、群落丰富度指数 (Chao1、ACE) 和群落多样性指数 (Shannon、Simpson) 等^[24]. 采用 STAMP 软件不同处理优势属的差异情况. 细菌的功能和代谢途径预测采用 PICRUST2 软件进行分析, 利用 QIIME 获得的 closed OTU-table 与 COG、KEGG 数据库进行比对, 获得不同的数据库功能预测信息, 具体分析步骤基于在线分析平台 (<https://github.com/picrust/picrust2>)^[25].

1.5 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析, 用 Microsoft Excel 2010 和 AI 2020 软件进行绘图.

2 结果与分析

2.1 产多胺细菌 N3 对小麦 Cd 吸收和干重的影响

与不接菌对照相比, 接种外源产多胺细菌 N3 能够影响小麦对 Cd 的吸收 (表 1). 其中, N3 处理中小麦籽粒、秸秆和根部中 Cd 的含量与 CK 处理组相比, 分别降低了 64.7%、27.6% 和 50.5%. 这表明菌株 N3 具有阻控小麦各组织对 Cd 吸收的能力. 此外, 与不接菌对照相比, 菌株 N3 的接种对小麦籽粒的干重无显著影响, 但是提高了小麦根部的干重 (58.9%), 这表明菌株 N3 可能缓解了小麦遭受 Cd 胁迫的压力, 或者是分泌了一些物质, 促进了小麦根

系的生长. 但是由于小麦生长周期长, 外部环境影响大, 菌株 N3 对小麦地上部组织的生物量无显著影响.

表 1 接种菌株 N3 对小麦各组织 Cd 含量和干重的影响¹⁾

测定指标	dry weight of wheat tissues	
	CK	N3
小麦籽粒 $\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.17 ± 0.04a	0.06 ± 0.02b
小麦秸秆 $\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.29 ± 0.05a	0.21 ± 0.02b
小麦根部 $\omega(\text{Cd})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.93 ± 0.14a	0.46 ± 0.11b
小麦籽粒 (以干重计)/g·盆 ⁻¹	13.1 ± 1.75a	14.6 ± 2.54a
小麦秸秆 (以干重计)/g·盆 ⁻¹	6.84 ± 0.91a	6.97 ± 1.03a
小麦根部 (以干重计)/g·盆 ⁻¹	5.6 ± 0.44b	8.9 ± 0.87a

1) 数据为平均值 ± 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 产多胺细菌 N3 对小麦根际土壤 pH、DTPA-Cd、有机质和多胺含量的影响

菌株 N3 能够阻控小麦对 Cd 的吸收, 首先对小麦根际土壤中有有效态 Cd 含量及其影响因素进行了分析. 对照组中小麦根际土壤中 $\omega(\text{DTPA-Cd})$ 为 0.42 mg·kg⁻¹, 而菌株 N3 显著降低了小麦根际土壤中 DTPA-Cd 的质量分数 (50.1%). 作物吸收的重金属的量与土壤中重金属的总量关系不大, 而是跟重金属有效态含量密切相关. 因此外源菌株 N3 的接种降低小麦根际土壤中有有效态 Cd 的含量, 进而降低了小麦各组织, 尤其是籽粒中 Cd 的含量. 对照组根际土壤的 pH 值为 6.84, 而 N3 处理组中的 pH 值为 6.97, 表明菌株 N3 的接种提高了根际土壤的 pH 值, 但是对有机质含量无显著影响. 此外, 研究发现 N3 处理组小麦根际土壤中多胺的含量 (腐胺、精胺和亚精胺) 显著高于对照组中多胺的含量, 可能是因为菌株 N3 能够分泌多胺的原因, 同时多胺含量的增加也能提高土壤的 pH 值.

2.3 产多胺细菌 N3 对小麦根际土壤细菌群落结构和多样性的影响

采用高通量测序技术研究外源产多胺细菌的接种是否对小麦根际土壤细菌群落和多样性造成了影响. 对各样品多样性指数进行了分析 (表 2), N3 处理组样品的 Simpson 指数显著大于 CK 处理组样品的 Simpson 指数, 而 Shannon、Chao1 和 Sobs 指数均小于 CK 处理组样品的相应指数, 表明外源菌株 N3 的接种显著降低了小麦根际细菌群落的多样性.

表 2 不同处理小麦根际细菌群落 α 多样性指数¹⁾

Table 2 The α diversity index of bacterial community in wheat rhizosphere under different treatments						
处理	Sobs 指数	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Ace 指数	Coverage 指数
CK	1 560 ± 37a	1 759 ± 46a	5.692 ± 0.173a	0.015 1 ± 0.006b	1 757 ± 30a	0.991 9 ± 0.000 5a
N3	1 257 ± 32b	1 525 ± 21b	4.947 ± 0.029b	0.028 4 ± 0.001a	1 535 ± 11b	0.991 3 ± 0.000 3a

1) 数据为平均值 ± 标准差 (n = 3); 同一列不同小写字母表示处理之间有显著差异 (P < 0.05)

基于 UPGMA 和 PCA 分析接菌组和对照组的样品细菌群落结构差异. N3 处理组的 3 个重复聚在一个大枝上, 而 CK 处理组的 3 个重复聚在另一个大枝上[图 1(a)], 说明 N3 处理组的细菌群落结构与 CK 处理组的细菌群落结构不一样, 同时也说明各个处理之间的重复性较好, 结果可信. PCA 结果也表明 N3 处理组的 3 个重复聚在一起, 与 CK 处理组的 3 个重复明显分开[图 1(b)], 进一步表明了菌株 N3 显著改变了小麦根际土壤细菌的组成结构. 在门水平上分析发现, 两个处理组中小麦根际土壤细菌群落主要(相对丰度 > 1%) 由 7 个门组成[图 2(a)], 其中 β -变形菌门(β -Proteobacteria, 36.1% ~ 51.8%)、放线菌门(Actinobacteria, 18.1% ~ 30.5%)、拟杆菌门(Bacteroidetes, 8.9% ~ 11.2%)、绿弯菌门(Chloroflexi, 4.4% ~ 7.5%)、厚壁菌门(Firmicutes, 1.4% ~ 6.3%)和酸杆菌门(Acidobacteria, 1.7% ~ 3.4%)等优势门的总丰度占到了 97.4% ~ 98.4%. 与对照相比, 菌株 N3 的接种显著提高了变形菌门、拟杆菌门和厚壁菌门的相对丰度, 显著降低了放线菌门和绿弯菌门的相对丰度. 在目水平上分析可知两个处理组中小麦根际土壤细菌的优势目(相对丰度 > 1%) 主要有微球菌目(Micrococcales)、根瘤菌目(Rhizosphere)、 β -杆菌目(β -Proteobacteriales)、鞘氨醇单胞菌目(Sphingomonadales)、芽孢杆菌目(Bacillales)和假单胞菌目(Pseudomonadales)[图 2(b)].

2.4 菌株 N3 对小麦根际土壤功能细菌群落的影响

在土壤中发挥功能的微生物常常分析到属水平, 因此本研究对两个处理的小麦根际土壤细菌属水平的丰度占比前 40 种群进行分析. 同时, 把这些属主要分为重金属固定或者抗性细菌和植物促生细菌. 此外, 为了便于分析, 去掉了 norank 和 unclassified 的菌属, 最终获得的结果如图 3 所示. 与对照相比, 接种 N3 显著提高了根际土壤 *Bacillus*、*Arthrobacter*、*Brevundimonas*、*Ensifer*、*Microvirga*、*Aminobacter*、*Pedobacter*、*Rhizobium*、*Pseudomonas*、*Enterobacter*、*Rhodococcus* 和 *Serratia* 的相对丰度, 显著降低了 *Sphingomonas*、*Nocardioideis*、*Flavisolibacter* 和 *Arenimonas* 的相对丰度. 查阅文献[26 ~ 33]可知, *Bacillus*、*Arthrobacter*、*Brevundimonas*、*Ensifer*、*Pedobacter*、*Rhizobium*、*Pseudomonas*、*Enterobacter*、*Serratia*、*Geobacter* 和 *Lacibacter* 具有重金属固定或者抗性的特性, 而 *Brevundimonas*、*Bacillus*、*Ensifer*、*Rhizobium*、*Enterobacter*、*Serratia*、*Pseudomonas*、*Aminobacter*、*Pedobacter*、*Massilia*、*Allorhizobium*、

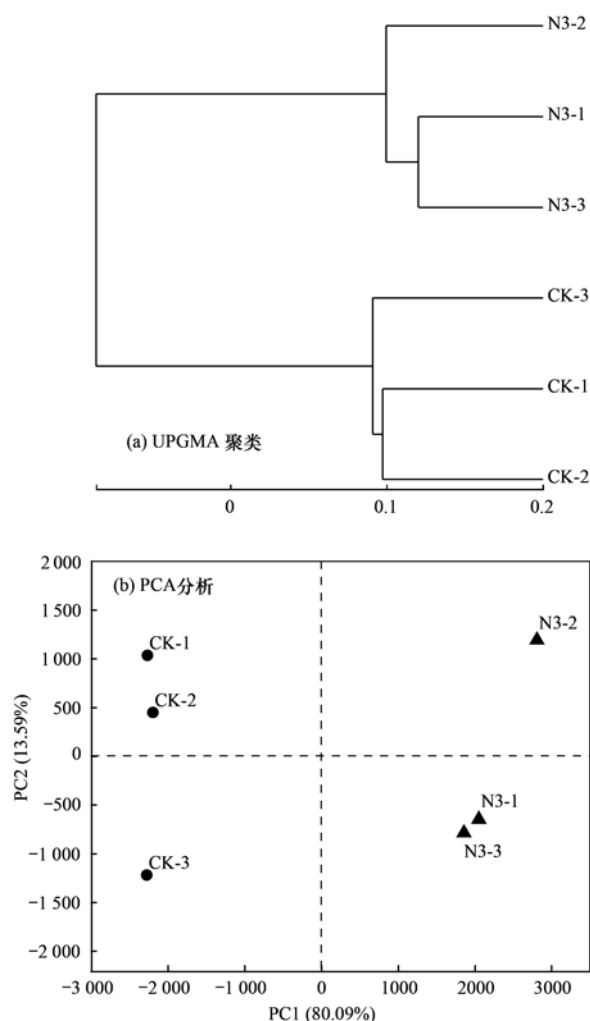


图 1 菌株 N3 对小麦根际土壤细菌群落多样性的影响

Fig. 1 Effects of strain N3 on the bacterial community diversity in wheat rhizosphere soil

Neorhizobium、*Pararhizobium*、*Rhizobium*、*Geobacter* 和 *Rubellimicrobiu* 具有植物促生的特性. 这表明菌株 N3 能够增加小麦根际土壤中具有重金属固定或者抗性以及植物促生细菌的比例的菌属(主要为 *Bacillus*、*Arthrobacter*、*Brevundimonas*、*Ensifer*、*Pedobacter*、*Rhizobium*、*Pseudomonas*、*Enterobacter* 和 *Serratia*), 而这些菌属在钝化土壤重金属和阻控小麦吸收重金属中发挥了重要作用.

2.5 PICRUST 功能预测

采用 PICRUST 软件对不同样品根际细菌功能进行预测分析, 选择第三级功能层生物代谢通路进行分析, 找到差异代谢通路, 同时去掉与土壤环境无关的代谢通路, 结果如图 4 所示. 共筛选到 15 个与土壤环境相关的差异代谢通路, 如 ABC 转运(ABC transporters)、DNA 修复与重组(DNA repair and recombination proteins)和精氨酸与脯氨酸代谢(arginine and proline metabolism)等. 与对照相比, 菌株 N3 显著提高了小麦根际土壤中与抗氧化能力

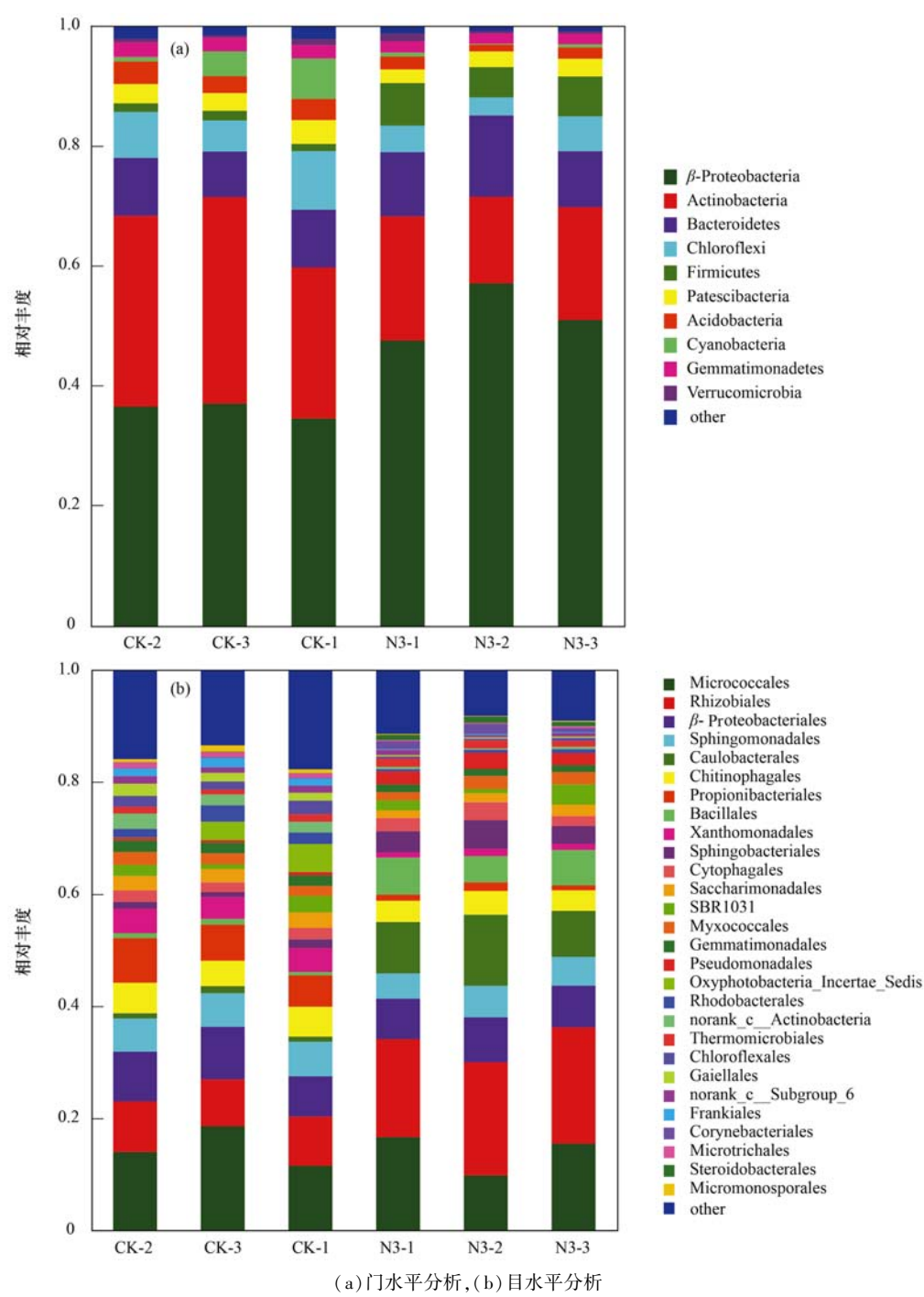


图2 菌株 N3 对小麦根际土壤细菌群落结构的影响

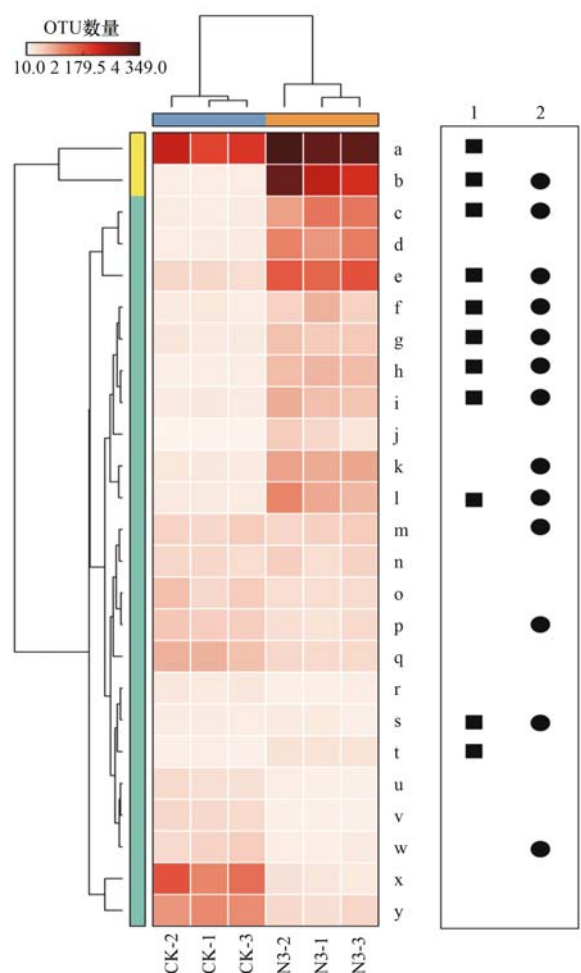
Fig. 2 Effects of strain N3 on the bacterial community structure in wheat rhizosphere soil

[谷胱甘肽代谢 (glutathione metabolism) 和 α -亚麻酸代谢 (α -Linolenic acid metabolism)]、激素合成[甜菜碱合成 (betalain biosynthesis)、吲哚生物碱合成 (indole alkaloid biosynthesis)、精氨酸与脯氨酸代谢 (arginine and proline metabolism)、细胞色素 P450 代谢 (metabolism of xenobiotics by cytochrome P450)]、元素循环[硫代谢 (sulfur metabolism) 和氮代谢 (nitrogen metabolism)] 的基因拷贝数, 表明这些代谢途径在土壤 Cd 固定、提高小麦抗 Cd 能力和促进小麦生长中发挥着重要作用. 与此同时菌株 N3 处

理组中参与能量代谢 [柠檬酸盐循环 (citrate cycle)、糖酵解与糖异生 (glycolysis/gluconeogenesis) 和能量代谢 (energy metabolism)] 相关的基因拷贝数显著降低, 可能是因为外源菌株 N3 的接入显著降低了土壤中 Cd 的有效态含量, 缓解了 Cd 对生物体造成的胁迫, 因此群落微生物消耗的额外能量也就降低了.

2.6 相关性分析

为了探究影响土壤中有效态 Cd 含量的主要因子, 选取小麦根际土壤 DTPA-Cd、pH、有机质和多



1. 重金属固定或者抗性细菌(a. *Arthrobacter*, b. *Brevundimonas*, c. *Bacillus*, e. *Ensifer*, f. *Rhizobium*, g. *Enterobacter*, h. *Serratia*, i. *Pseudomonas*, l. *Pedobacter*, s. *Geobacter*, t. *Lacibacter*), 2. 植物促生细菌(b. *Brevundimonas*, c. *Bacillus*, e. *Ensifer*, f. *Rhizobium*, g. *Enterobacter*, h. *Serratia*, i. *Pseudomonas*, k. *Aminobacter*, l. *Pedobacter*, m. *Massilia*, p. *Allorhizobium-Neorhizobium-Pararhizobium-Rhizobium*, s. *Geobacter*, w. *Rubellimicrobium*)

图3 属水平上菌株 N3 对小麦根际土壤功能细菌群落结构的影响
Fig. 3 Effects of strain N3 on the functional bacterial community structure in wheat rhizosphere soil at the genus level

胺含量以及相对丰度前 10 的细菌种属进行冗余分析(redundancy analysis, RDA), 结果如图 5 所示. 小麦根际土壤中 DTPA-Cd 的含量与 pH 值和多胺含量呈显著负相关, 同时 DTPA-Cd 的含量也与 *Bacillus*、*Arthrobacter*、*Brevundimonas*、*Ensifer* 和 *Enterobacter* 的相对丰度呈显著负相关, 而与 *Sphingomonas*、*Nocardioides* 和 *Flavisolibacter* 的相对丰度呈显著正相关. 以上结果表明菌株 N3 主要通过提高小麦根际土壤的 pH 值和多胺含量以及 *Bacillus*、*Arthrobacter*、*Brevundimonas*、*Ensifer* 和 *Enterobacter* 的相对丰度, 降低 *Sphingomonas*、*Nocardioides* 和 *Flavisolibacter* 的相对丰度来降低 DTPA-Cd 的含量, 进而阻控了小麦对 Cd 的吸收.

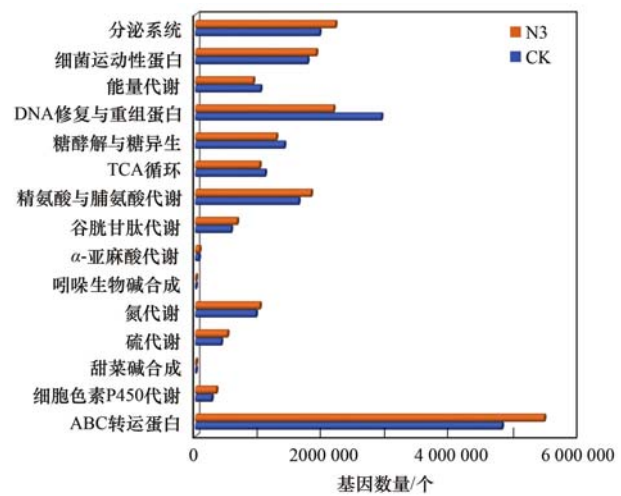
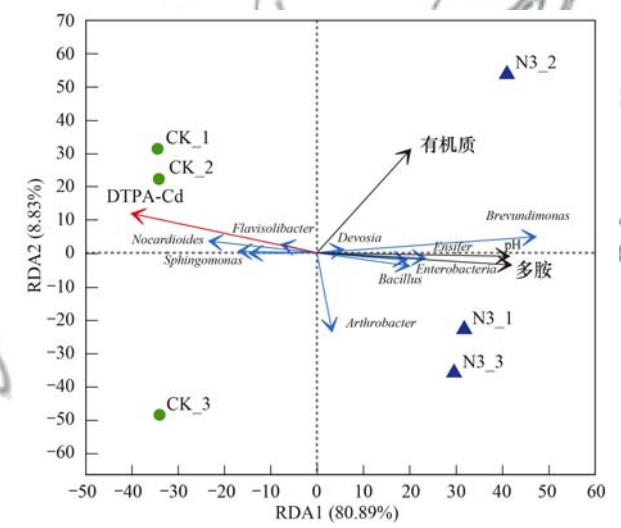


图4 不同样品细菌 PICRUSt 功能预测
Fig. 4 PICRUSt metabolic predictions of the bacterial communities from different samples



红色箭头表示主因子, 黑色箭头表示土壤部分理化性质, 蓝色箭头表示土壤细菌菌属
图5 小麦根际土壤中 DTPA-Cd 含量与土壤环境变量冗余分析(RDA)
Fig. 5 Redundancy analysis(RDA) between DTPA-Cd content and soil environmental variables in wheat rhizosphere soil

3 讨论

3.1 产多胺细菌阻控小麦 Cd 吸收

与土壤中的土著微生物相比, 经过筛选的外源重金属固定菌株具有更强的固定重金属和分泌植物促生物质的能力^[34,35]. 因此, 增强重金属固定的微生物钝化技术已成为一种有前景的修复重金属污染土壤的技术. 本研究发现产多胺重金属固定细菌 *Bacillus* sp. N3 具有阻控小麦吸收 Cd 的能力(表 1). 多胺被普遍认为是植物生长调节物质, 在促进植物生长、延缓植株衰老和提高种子活力等方面发挥着重要作用^[36]. Cd 胁迫下, 外源亚精胺处理能够显著增加苎麻维生素 E 含量, 提高超氧化物歧化酶

和过氧化物酶的活性,增幅达到 95% 和 49%^[37]. 此外,多胺还有助于植物抵御重金属胁迫. Hsu 等^[38]的研究发现外源多胺的添加可以提高水稻对重金属抗性. 菌株 N3 能够分泌精胺和亚精胺,提高小麦根际土壤中多胺的含量,进而提高了小麦根部对 Cd 的抗性,提高了小麦根的干重(表 1). 此外, PICRUST 功能预测表明菌株 N3 的接种显著提高了小麦根际土壤中与抗氧化能力、激素合成(生物碱、精氨酸和亚麻酸)有关的基因拷贝数,表明菌株 N3 还能调控小麦根际细菌群落,提高小麦的抗 Cd 能力和促进小麦生长. 前期研究表明菌株 N3 分泌的精胺和亚精胺具有螯合 Cd,降低有效态 Cd 含量的能力^[20]. 本研究中菌株 N3 也显著提高了小麦根际中多胺的含量,进而导致 DTPA-Cd 的含量显著降低. 此外,多胺是一类含氮碱,呈碱性,具有提高环境 pH 的能力. 这可能是小麦根际土壤 pH 升高的主要原因. 土壤 pH 的升高,能够显著降低土壤总有效态 Cd 的含量^[39]. 相关性分析也表明小麦根际土壤中 DTPA-Cd 的含量与 pH 值和多胺含量呈显著负相关,说明菌株 N3 通过提高小麦根际土壤 pH 值和多胺含量,降低了 DTPA-Cd 的含量,进而阻控了小麦对 Cd 的吸收和提高对 Cd 的抗性.

3.2 产多胺细菌调控小麦根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收

重金属固定细菌的有效性取决于其对环境变化的多功能性和适应性以及其在土著微生物群落其他成员中定殖和竞争的能力^[40]. CK 处理组中 *Bacillus* 的相对丰度为 0.41%, 而 N3 处理组中 *Bacillus* 的相对丰度为 4.3% (图 2), 表明 *Bacillus* sp. N3 能够很好地定殖在小麦根际土壤中. 一些研究人员认为重金属固定细菌或者植物促生细菌之所以成功定殖于作物根际土壤中,是因为它们具有重金属抗性和促生特性,例如植物激素生成、固氮和磷酸盐增溶作用,因此在根际和内层生态位竞争中获得了优势^[41]. 在微生物修复过程中,外源微生物的接种可能导致土壤-根界面微生物相互作用和高度适应的微生物群落共生模式发生改变,适应特定环境的微生物往往具有类似的资源利用策略^[42]. 外源产多胺细菌 *Bacillus* sp. N3 的接种能够阻控小麦对 Cd 的吸收,不仅仅是菌株 N3 自身的作用,还跟小麦根际土著微生物群落结构的变化密切相关. 菌株 N3 的接种显著提高了小麦根际土壤中 β -Proteobacteria 和 Firmicutes 的相对丰度. β -Proteobacteria 中的许多菌属均具有重金属固定或者 PGPB 的属,包括 *Rhizobium*、*Enterobacter*、*Pseudomonas*、*Sinorhizobium*、*Burkholderia* 和 *Serratia* 等^[26,43]. 重金

属固定或者植物促生细菌的存在会增加与 β -Proteobacteria 相关的共生关联,这并不奇怪,有人建议接种植物促生细菌会增加重金属污染土壤中植物促生细菌的比例,进而促进植物生长,提高植物抗性^[27]. 此外,菌株 N3 处理组的相对丰富较高的菌属中, *Bacillus*、*Brevundimonas*、*Ensifer*、*Rhizobium*、*Pseudomonas*、*Enterobacter* 和 *Serratia* 均具有重金属固定和植物促生的能力^[28-33]. 这些均表明菌株 N3 的接种增加了小麦根际土壤中具有 Cd 固定或者植物促生能力的菌属的丰度,进而阻控了小麦对 Cd 的吸收.

4 结论

(1) 产多胺细菌 *Bacillus* sp. N3 显著降低小麦籽粒中 Cd 和根际土壤 DTPA-Cd 的含量,提高根际土壤 pH 值和多胺的含量.

(2) 菌株 N3 的接种降低了小麦根际土壤细菌群落的多样性,但是提高了 β -Proteobacteria、Bacteroidetes 和 Firmicutes 的相对丰度. 此外,菌株 N3 还显著提高了小麦根际土壤中具有重金属固定或者植物促生细菌能力的菌属的相对丰度.

(3) 相关性分析表明菌株 N3 主要通过提高小麦根际土壤的 pH 值和多胺含量以及 *Bacillus*、*Arthrobacter*、*Brevundimonas*、*Ensifer* 和 *Enterobacter* 的相对丰度来降低 DTPA-Cd 的含量,进而阻控了小麦对 Cd 的吸收.

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] 周亚龙, 王乔林, 王成文, 等. 雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5977-5987.
Zhou Y L, Wang Q L, Wang C W, et al. Heavy metal pollution and cumulative effect of soil-crop system around typical enterprises in Xiong'an new district[J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 5977-5987.
- [3] Xu X B, Wang T, Sun M X, et al. Management principles for heavy metal contaminated farmland based on ecological risk-A case study in the pilot area of Hunan province, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 684: 537-547.
- [4] 戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 等. 南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 353-358.
Dai Y T, Fu K D, Yang Y, et al. Simulation cadmium (Cd) accumulation in typical paddy soils in south china [J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 353-358.
- [5] ur Rehman M Z, Rizwan M, Hussain A, et al. Alleviation of cadmium (Cd) toxicity and minimizing its uptake in wheat (*Triticum aestivum*) by using organic carbon sources in Cd-

- spiked soil[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **241**: 557-565.
- [6] 邹紫今. 水分管理与改良剂协同控制水稻吸收土壤重金属和砷的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- [7] Gong X M, Huang D L, Liu Y G, *et al.* Biochar facilitated the phytoremediation of cadmium contaminated sediments: metal behavior, plant toxicity, and microbial activity[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **666**: 1126-1133.
- [8] 杨忠兰, 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.
- [9] Han H, Wu X J, Yao L G, *et al.* Heavy metal-immobilizing bacteria combined with calcium polypeptides reduced the uptake of Cd in wheat and shifted the rhizosphere bacterial communities [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115432.
- [10] Chen H M, Zhang J W, Tang L Y, *et al.* Enhanced Pb immobilization via the combination of biochar and phosphate solubilizing bacteria[J]. *Environment International*, 2019, **127**: 395-401.
- [11] 陈颖明, 胡亦舒, 李真. 溶磷微生物改性生物炭吸附重金属的机理研究[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(2): 684-692.
Chen H M, Hu Y S, Li Z. Adsorption mechanism of heavy metals by phosphate-solubilizing microorganism modified biochar [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(2): 684-692.
- [12] Pan W, Lu Q, Xu Q R, *et al.* Abscise acid-generating bacteria can reduce Cd concentration in pakchoi grown in Cd-contaminated soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **177**: 100-107.
- [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] 王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 等. 重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5133-5141.
Wang T J, Su N N, Lei P, *et al.* Community structure of heavy metal immobilized bacteria in the lettuce (*Lactuca sativa* L.) rhizosphere in soil polluted by heavy metals and its effects on reducing heavy metal accumulation in lettuce[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5133-5141.
- [15] Cheng C, Wang Q, Wang Q X, *et al.* Wheat-associated *Pseudomonas taiwanensis* WRS8 reduces cadmium uptake by increasing root surface cadmium adsorption and decreasing cadmium uptake and transport related gene expression in wheat [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115850.
- [16] Li Y, Pang H D, He L Y, *et al.* Cd immobilization and reduced tissue Cd accumulation of rice (*Oryza sativa* wuyun-23) in the presence of heavy metal-resistant bacteria[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **138**: 56-63.
- [17] Lenis Y Y, Elmetwally M A, Maldonado-Estrada J G, *et al.* Physiological importance of polyamines [J]. *Zygote*, 2017, **25**(3): 244-255.
- [18] Tang C F, Zhang R Q, Hu X J, *et al.* Exogenous spermidine elevating cadmium tolerance in *Salix matsudana* involves cadmium detoxification and antioxidant defense[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, **21**(4): 305-315.
- [19] 王晓云, 邹琦. 多胺与植物衰老关系研究进展[J]. *植物学通报*, 2002, **19**(1): 11-20.
Wang X Y, Zou Q. Advances in studies on relationship between polyamines and plant senescence [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2002, **19**(1): 11-20.
- [20] Han H, Wang X Y, Yao L G, *et al.* Lettuce-derived rhizosphere polyamine-producing bacteria and their potential to reduce Cd and Pb accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, **178**, doi: 10.1016/j.envexpbot.2020.104161.
- [21] 王玉婷, 王紫玥, 刘田田, 等. 钝化剂对镉污染土壤修复效果及青菜生理效应影响[J]. *环境化学*, 2020, **39**(9): 2395-2403.
Wang Y T, Wang Z Y, Liu T T, *et al.* Effects of amendments on remediation of cadmium-contaminated soil and physiological characteristics of pakchoi [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(9): 2395-2403.
- [22] Ebeed H T, Hassan N M, Aljarani A M. Exogenous applications of polyamines modulate drought responses in wheat through osmolytes accumulation, increasing free polyamine levels and regulation of polyamine biosynthetic genes[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, **118**: 438-448.
- [23] 陈兆进, 林立安, 李英军, 等. 镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3997-4004.
Chen Z J, Lin L A, Li Y J, *et al.* Shifts in rhizosphere bacterial community structure, co-occurrence network, and function of *Miscanthus* following cadmium exposure [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3997-4004.
- [24] Schloss P D, Westcott S L, Ryabin T, *et al.* Introducing mothur: open-Source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(23): 7537-7541.
- [25] Zhao Q, Xie F X, Zhang F F, *et al.* Analysis of bacterial community functional diversity in late-stage shrimp (*Litopenaeus vannamei*) ponds using Biolog EcoPlates and PICRUSt2 [J]. *Aquaculture*, 2022, **546**(5), doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.737288.
- [26] Etesami H. Bacterial mediated alleviation of heavy metal stress and decreased accumulation of metals in plant tissues: mechanisms and future prospects [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **147**: 175-191.
- [27] 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* TI-17 and biochar [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **228**: 9-18.
- [28] Chen X C, Chen L T, Shi J Y, *et al.* Immobilization of heavy metals by *Pseudomonas putida* CZ1/goethite composites from solution[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, **61**(2): 170-175.
- [29] Du H H, Qu C C, Liu J, *et al.* Molecular investigation on the binding of Cd(II) by the binary mixtures of montmorillonite with two bacterial species[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **229**: 871-878.
- [30] Pattnaik S, Dash D, Mohapatra S, *et al.* Improvement of rice plant productivity by native Cr(VI) reducing and plant growth promoting soil bacteria *Enterobacter cloacae* [J]. *Chemosphere*, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124895.

- [31] Oves M, Khan M S, Qari H A. *Ensifer adhaerens* for heavy metal bioaccumulation, biosorption, and phosphate solubilization under metal stress condition [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017, **80**: 540-552.
- [32] Han H, Sheng X F, Hu J W, *et al.* Metal-immobilizing *Serratia liquefaciens* CL-1 and *Bacillus thuringiensis* X30 increase biomass and reduce heavy metal accumulation of radish under field conditions[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **161**: 526-533.
- [33] Xu C R, He S B, Liu Y M, *et al.* Bioadsorption and biostabilization of cadmium by *Enterobacter cloacae* TU [J]. Chemosphere, 2017, **173**: 622-629.
- [34] Jeong S, Moon H S, Shin D, *et al.* Survival of introduced phosphate-solubilizing bacteria (PSB) and their impact on microbial community structure during the phytoextraction of Cd-contaminated soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **263**: 441-449.
- [35] 郝丽娜, 常瑞雪, 李彦明, 等. 接种外源微生物对堆肥中重金属铜锌铅形态变化的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, **25**(5): 122-129.
- Hao L N, Chang R X, Li Y M, *et al.* Effects of exogenous inoculums on the fractions variation of heavy metals copper, zinc and lead in compost [J]. Journal of China Agricultural University, 2020, **25**(5): 122-129.
- [36] 黄作喜, 谢寅峰, 胥伟, 等. 黄瓜去根苗离体培养条件下多胺对雌花形成的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, **32**(4): 147-150.
- Huang Z X, Xie Y F, Xu W, *et al.* The effects of polyamines on formation of female flowers in derooted seedlings of *Cucumis sativus* L. *in vitro* [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2008, **32**(4): 147-150.
- [37] Gong X M, Liu Y G, Huang D L, *et al.* Effects of exogenous calcium and spermidine on cadmium stress moderation and metal accumulation in *Boehmeria nivea* (L.) Gaudich [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(9): 8699-8708.
- [38] 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.
- [39] Wan W J, Tan J D, Wang Y, *et al.* Responses of the rhizosphere bacterial community in acidic crop soil to pH: changes in diversity, composition, interaction, and function[J]. Science of the Total Environment, 2020, **700**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134418.
- [40] Yin C T, Vargas J M C, Schlatter D C, *et al.* Rhizosphere community selection reveals bacteria associated with reduced root disease[J]. Microbiome, 2021, **9**(1), doi: 10.1186/s40168-020-00997-5.
- [41] Bulgarelli D, Schlaeppi K, Spaepen S, *et al.* Structure and functions of the bacterial microbiota of plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2013, **64**: 807-838.
- [42] Kong Z Y, Wu Z J, Glick B R, *et al.* Co-occurrence patterns of microbial communities affected by inoculants of plant growth-promoting bacteria during phytoremediation of heavy metal-contaminated soils[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **183**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109504.
- [43] Teheran-Sierra L G, Funnice M I G, de Carvalho L A L, *et al.* Bacterial communities associated with sugarcane under different agricultural management exhibit a diversity of plant growth-promoting traits and evidence of synergistic effect [J]. Microbiological Research, 2021, **247**, doi: 10.1016/j.micres.2021.126729.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i>	(577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo	(586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li	(597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i>	(608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i>	(619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i>	(639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming	(649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i>	(675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i>	(686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i>	(696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i>	(707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i>	(714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i>	(723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i>	(735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao	(743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun	(752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i>	(762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i>	(770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i>	(782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i>	(813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i>	(826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i>	(837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i>	(859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong	(867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i>	(878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i>	(887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i>	(907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i>	(920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i>	(928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i>	(936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song	(946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei	(957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing	(965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i>	(975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i>	(985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i>	(995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i>	(1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i>	(1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i>	(1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i>	(1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i>	(1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i>	(1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i>	(1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i>	(1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i>	(1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i>	(1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1108)