

目次

“大气十条”实施期间南京市PM_{2.5}化学组成与来源的演变特征 陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)

河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位PM_{2.5}组分差异 王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)

廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)

天津市采暖季不同气团来向PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价 李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)

基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析 邓文博, 刘文娟 (38)

北京市PM_{2.5}-O₃复合污染数值响应解析 刘添强 (48)

长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单 田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李旻, 王鑫, 黄成 (58)

南京北郊工业乡村混合区秋季边界层VOCs垂直分布特征 王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)

广西柳城县VOCs组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性 吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 粟少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)

城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例 何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)

华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征 康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)

WRF模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用 杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)

西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响 魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)

青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征 魏文淑, 祁建华, 常成 (127)

中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子 黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)

长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征 徐秋鸿, 刘曙光, 娄厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金宇辰, 李鑫 (158)

人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共线性 秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)

我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估 何姝, 董慧峰, 任南琪 (180)

珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价 王思瑞, 张坤锋, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)

苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险 郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)

长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素 吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)

过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例 黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)

渭河微塑料污染现状与风险评价 山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)

不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响 王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)

苦草叶表附和浮游细菌群落多样性格局及其影响因素 张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)

基于16S rRNA测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性 璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)

基于eDNA的硅藻群落时空异质性及生态健康评价 姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)

三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制 罗晓佼, 张妍, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)

自然降雨下蔬菜土壤侵蚀及氮素流失特征 宁嘉丽, 黄艳芬, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)

绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重, 张文龙, 李华林 (303)

基于地理探测器的山西省2000~2020年NPP时空变化特征及驱动力分析 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)

2000~2020年西南地区植被NDVI时空变化及驱动机制探究 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)

青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性 胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)

四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素 刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)

宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析 陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进福, 梁翔宇 (356)

铜冶炼场周边土壤重金属污染特征与风险评价 彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)

西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系 凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)

外源Cd在不同类型土壤中的稳定化特征 王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)

基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素 王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)

基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价 陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)

贵州省旱地土壤和玉米As含量特征及其种植安全性评估 黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)

象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力 王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)

1株高耐性肠杆菌的筛选及对镉、砷同步钝化 尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄蔚铭, 张朴心, 铁柏清 (436)

黄土陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (444)

设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素 方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)

优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益 王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)

缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响 侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)

黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能 南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)

红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应 管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)

半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征 赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)

基于QMEC分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力 张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)

中国主粮作物生物炭产量效应的Meta分析 于滨杭, 姬建梅, 王丽宇, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)

生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的Meta分析 李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)

不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为 李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)

中国县城碳排放时空演变与异质性 宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)

近20年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)

中国1991~2018年突发环境事件时空特征及影响因素 余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)

季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应 张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)

1 株高耐性肠杆菌的筛选及对镉、砷同步钝化

尹雪斐^{1,2,3}, 刘玉玲^{1,2,3}, 伍德^{1,2,3}, 黄薪铭^{1,2,3}, 张朴心^{1,2,3}, 铁柏清^{1,2,3*}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 湖南省灌溉水水质污染净化工程技术研究中心, 长沙 410128; 3. 农业农村部南方产地污染防控重点实验室, 长沙 410128)

摘要: 从镉、砷复合污染农田土壤中筛选出 1 株具有硫酸盐还原功能的肠杆菌, 通过去除率实验结合表征实验来探究其对镉、砷钝化机制。结果表明, 经鉴定筛选出来的菌株 M5 为肠杆菌属 (*Enterobacter* sp.), 具有硫酸盐还原功能, 对镉、砷最大耐受浓度为 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。在模拟体系中, 菌株 M5 对镉去除率最大达 94.13%, 对砷去除率最大为 27.26%。SEM-EDS 和 XRD 的结果证实了 Cd 和 As 被固定成 CdS 和 As_2S_3 , XPS 结果表明该菌表面的羧基、羟基和酰胺基主要参与生物吸附。结果为微生物应用修复重金属及类金属污染土壤提供思路和理论依据。

关键词: 肠杆菌; 硫酸盐还原; 镉 (Cd); 砷 (As); 微生物成矿

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0436-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202202152

Inactivation of Cd and As by an *Enterobacter* Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil

YIN Xue-fei^{1,2,3}, LIU Yu-ling^{1,2,3}, WU De^{1,2,3}, HUANG Xin-ming^{1,2,3}, ZHANG Pu-xin^{1,2,3}, TIE Bo-qing^{1,2,3*}

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Hunan Engineering & Technology Research Center for Irrigation Water Purification, Changsha 410128, China; 3. Key Laboratory of Southern Farmland Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changsha 410128, China)

Abstract: A strain of *Enterobacter* was screened from cadmium and arsenic contaminated farmland soil and its passivation mechanism of cadmium and arsenic were explored through removing performance and characterization experiments. The results showed that the screened strain M5 was identified as *Enterobacter* sp. with a sulfate-reduction function, and its maximum resistance concentration was approximately $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ to cadmium and arsenic. In the simulation system, the maximum removal efficiencies of cadmium and arsenic were 94.13% and 27.26% by strain M5, respectively. The results of SEM-EDS and XRD confirmed that Cd and As were fixed to CdS and As_2S_3 , and XPS results showed that carboxyl groups, hydroxyl groups, and amide groups on the surface of the bacteria were mainly involved in biological adsorption. These results can provide new ideas and a theoretical basis for microbial applications to soil remediations for heavy metal pollution.

Key words: *Enterobacter*; sulfate reduction; Cd; As; microbial mineralization

农田土壤污染问题关乎国计民生, 一直以来受到社会各界广泛关注, 在“十三五”期间启动关于“农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发”的重点专项中, 农田镉 (Cd) 和砷 (As) 污染被列为重点研究对象^[1]. 据统计我国所有粮食作物中稻米 Cd-As 超标率最高, 严重威胁我国的粮食安全^[2,3]. 据 2014 年中国环境保护部公布的第二次全国土地调查结果显示, Cd-As 复合污染造成的耕地问题正在给我国造成越来越大的经济损失^[4]. Mu 等^[5]采集了中国 4 个主要水稻产区 19 个省份的 113 个土壤样本, 发现土壤中 $\omega(\text{Cd})$ 和 $\omega(\text{As})$ 的平均值分别为 $0.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $11.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中超过国家允许 Cd 和 As 含量的土壤分别占比 33.6% 和 6.19%. 在“有色金属之乡”湖南, 株洲某县受镉和砷复合污染的耕地面积约有 23.23 km^2 ^[6]. Cd 主要以 Cd(II) 阳离子的形式存在, 通过电镀、塑料色素、绘画和电池制造等工业活动进入环境^[7]. As 主要以 As(III) 和 As(V) 的形式存在, 且 As(III) 的毒性强, 通过施用农药、燃烧化石燃料和

采矿进入土壤. 进入土壤的 Cd 和 As 易累积、难降解且造成的污染几乎不可逆转^[8], 导致作物产量低和品质差, 经食物链进入人体后危害人体健康^[9], Cd 会影响肾脏和骨骼, 长期接触导致骨质疏松和脊柱畸形等^[10], As 在体内长期积累会引起皮肤癌、肝癌和肺癌等^[11]. 重金属复合污染的土壤中各种重金属元素相互作用极其复杂, 且这种作用会因各元素存在浓度的不同而表现出不同的作用形式^[12-14]. 据报道, 目前 Cd-As 复合污染在不同土壤环境下主要是拮抗和协同作用^[15,16].

近年来, 针对土壤的重金属污染问题, 微生物修复法正逐渐得以运用. 现阶段已证实的修复机制包括细胞代谢、吸附、沉淀和氧化还原反应等, 不同类群的微生物对重金属的修复机制不同^[17-21]. 如,

收稿日期: 2022-02-21; 修订日期: 2022-04-28

基金项目: 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目 (科技攻关类) (2020NK2001); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0801505)

作者简介: 尹雪斐 (1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染微生物修复技术, E-mail: 984927208@qq.com

* 通信作者, E-mail: tiebq@qq.com

张雅荟等^[22]筛选鉴定的菌株 *Burkholderia* sp. Y4, 能够有效定殖在水稻根表和根际土壤中, 通过生长代谢和菌体吸附等途径钝化 Cd, 降低水稻籽粒 Cd 积累量. 迄今为止, 国内外学者已经从自然界中分离出许多细菌^[23,24], 包括节杆菌属、微球菌属和假单胞菌属, 这些细菌都对重金属具有良好的耐受性, 大部分细菌主要通过细胞内外吸附固定镉和砷等, 从而增加重金属的生物稳定性^[25,26]. 而一些具有硫酸盐还原功能的菌株, 则能够将硫酸盐还原形成 H_2S 、 HS^- 和 S^{2-} , 进一步与重金属离子发生反应生成难溶性金属硫化物从而达到固定重金属的目的^[27,28]. 例如, Xia 等^[29]发现一种硫酸盐还原菌 *Alisewanella* sp. WH16-1, 可生成 H_2S , 其与 Cd 反应生成 CdS 沉淀, 将该细菌用于水稻盆栽试验发现土壤中的生物可利用 Cd, 降低糙米中 Cd 的含量 78%; 此外, 该类细菌的硫酸盐还原过程还间接参与了砷的生物地球化学循环^[30,31]. 通常可生成雌黄 (As_2S_3)、雄黄 (AsS) 和砷黄铁矿 ($FeAsS$) 从而降低了砷的可利用性^[32~34]. 在本研究中, 筛选了 1 株具有硫酸盐还原功能的肠杆菌, 通过去除率实验结合表征实验, 通过模拟体系从微观角度阐释了该细菌对镉、砷的固定机制, 以期为金属类金属复合污染微生物治理提供一定的修复思路.

1 材料与方法

1.1 菌株筛选及鉴定

1.1.1 菌种来源及培养基

菌株筛选供试土壤为湖南省株洲市某 Cd 和 As 复合污染农田, 取样土层为 10 ~ 15 cm 耕作层土壤, 其 pH 为 5.42, ω (Cd) 和 ω (As) 平均值分别为 $23.07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $44.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别超过《土壤环境质量 农用地土壤风险管控标准》(GB 15618-2018) 中的农用地土壤风险筛选值的 76.9 倍和 1.48 倍, 为 Cd 和 As 复合污染土壤. 菌株的筛选培养及富集培养均采用改进的 Postgate 培养基^[35], 其主要成分如下: NH_4Cl $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $CaCl_2$ $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 Na_2SO_4 $1.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 K_2HPO_4 $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $MgSO_4$ $2.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、酵母膏 $1.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、乳酸钠 $3.5 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 、L-半胱氨酸盐酸盐 $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、抗坏血酸 $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $FeSO_4$ (指示剂) $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 调至 7.0 ± 0.2 . 在以上培养基中加 2% 琼脂即为 Postgate 固体培养基.

1.1.2 菌株筛选

菌株筛选参照万海清等^[36]改进的一种筛选方法. 首先, 按 1g: 10 mL 将土样接入无菌水制成土壤菌悬液, 充分振荡后取 10 mL 接入选择培养基中, 充入 N_2 在 30 °C 厌氧培养. 培养 3 ~ 4 d 后接入液体分离富

集培养基进行厌氧培养, 待液体变成墨汁色 (FeS), 瓶口有臭鸡蛋味 (H_2S), 即可采用稀释涂布-夹层培养法进行厌氧分离培养. 培养 5 ~ 6 d 后平板中长出许多黑色球状小菌落, 将这些菌落连同琼脂块切割、适当捣烂分散移入液体培养基. 重复进行稀释涂布、夹层培养和挑选等 2 次, 可达到对菌株的分离纯化, 获得可以鉴定、保存和转接的纯菌株.

1.1.3 菌株鉴定

将筛选出的菌株培养至对数生长期, 送至湖南擎科生物技术有限公司进行扩增、测序. 菌株的 16S rRNA 基因使用通用引物 27F (5'-AGAGTTTG ATCCTGGCTCAG-3') 和 1492R (5'-TACGGCTAC CTTGTTACGACTT-3') 通过 PCR 扩增. PCR 反应程序为: 98°C 30 s; 30 次循环 (98°C 10 s, 55°C 30 s, 72°C 1 min); 72°C 10 min. PCR 产物纯化后测序. 根据测序结果在 NCBI 数据库进行同源性比较分析, 确定亲缘关系, 申请基因登录号. 使用 MEGA6.5 软件, 参考 Tamura 等^[37]的方法采用 Neighbor-Joining 算法构建 16S rRNA 基因序列的系统发育树, 自展次数设定为 1 000, 最终确定目标菌株的系统发育学地位.

1.1.4 菌株硫酸盐还原功能及镉、砷耐性

(1) 菌株硫酸盐还原功能 将目标菌株活化后, 以 2% 的接种量接种至含有 $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} FeSO_4$ (指示剂) 的液体培养基中并在手套箱中操作将锥形瓶充入 N_2 , 于 27 ~ 30 °C、 $120 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的振荡箱中培养, 观察培养基是否变为墨汁色, 瓶口是否有臭鸡蛋气味. 设置 3 个平行.

(2) 不同镉、砷浓度下菌株生长曲线 将目标菌株活化后, 以 2% 的接种量接种至含有不同镉、砷浓度 (使用 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $CdCl_2$ 和 Na_3AsO_4 母液稀释) 的液体培养基中并在手套箱中操作将锥形瓶充入 N_2 , 于 27 ~ 30 °C、 $120 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的振荡箱中培养. 镉、砷浓度设置为 0、0.2、0.5 和 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 在 0 ~ 126 h 内, 每 2 h 或 6 h 取一次样, 于 600 nm 的分光光度计下测定不同浓度下的生长曲线. 设置 3 个平行.

1.2 Cd 和 As 去除率实验及样品表征

1.2.1 菌株对 Cd 和 As 去除率实验

用去离子水配制 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $CdCl_2$ 和 Na_3AsO_4 母液. 将保存在平板培养基中的菌株切块捣碎移至液体培养基中, 活化 48 h 后, 以 2% 的接种量接种至含有 Cd、As 和 Cd 及 As 复合 (母液提前调节 pH 至 5.5 ~ 5.6) 的液体培养基中, 充入 N_2 , 在 25 ~ 27 °C 振荡箱中培养 48 h. 培养后, 将反应体系于离心机中以 $5000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度离心 5 min, 收集上层液体测定镉、砷浓度. 镉、砷浓度的测定使用电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-OES, PerkinElmer

Optima 8300). 无论在单一还是复合体系中, Cd 和 As 的浓度均设置为 0、0.01、0.05、0.1 和 0.2 mmol·L⁻¹. 每个浓度均设置一组对照, 3 组平行, 对照组不接种细菌. Cd 和 As 去除率由以下公式计算:

$$\text{Cd/As 去除率}(\%) = (c_1 - c_0) / c_1$$

式中, c_1 为相应浓度中对照组金属浓度, c_0 为相应浓度中实验组金属浓度.

1.2.2 样品表征 (SEM-EDS、XRD 和 XPS)

首先, 将参与固定 Cd 和 As 后的样品先用 0.2 mol·L⁻¹ 的磷酸缓冲盐溶液 (PBS 缓冲液) 冲洗 3 次, 再于 25% 戊二醛中固定过夜并离心收集菌体, 配制一系列浓度梯度的乙醇进行脱水 (30%、50%、70%、80%、90% 和 100%), 最后于 -53℃ 的冷冻干燥机中干燥并研磨成粉末. 使用场发射扫描电镜 (SEM)-形貌 (FEI Inspect F50, 美国) 观察菌株参与反应前后细胞形貌, 使用场发射扫描电镜 (SEM)-点扫 EDS (EDAX super octane, 美国) 测定元素组成.

将反应体系于离心机中以 5 000 r·min⁻¹ 的速度离心 5 min, 收集下层反应底物于 -53℃ 的冷冻干燥机中干燥并研磨成粉末. 使用 Bruker D8 Advance-广角 XRD (Bruker D8 Advance) 测定反应底物中的物质组成, 使用 Jade6 软件进行物质比对. 使用

KRATOS Axis Ultra X 射线光电子能谱仪 (Thermo Fisher Scientific, 美国) 对参与固定镉、砷前后的样品进行分析. 使用 C1s 峰 (284.8 eV) 校准结合能. 用软件包 XPSPEAK 41 进行数据处理, 背景信号用 Shirley 方法扣除, 采用 Lorentzian-Gaussian 方法进行分峰拟合.

2 结果与分析

2.1 菌株鉴定

2.1.1 菌株形态及菌种鉴定

从镉、砷复合污染土壤中成功分离 1 株细菌命名为 M5, 图 1(a) 为菌株在 Postgate 固体培养基中生长 72 h 左右的菌落形态. 单菌落呈白色、圆形且边缘较光滑. 目前保藏于中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心, 保藏号为 GCMCC NO. 22636. 基因测序表明, 该菌株的 16S rRNA 基因 (登录号为 MT641242) 与菌株 *Enterobacter*_strain_FC18569 (登录号为 MK577384.1) 具有 99.45% 的同源性. 系统发育分析表明 [图 1(b)], 该菌株与 *Enterobacter*_strain_fc18569 菌株可以形成一个簇, 并与其他菌株区分开来. 因此, 菌株 M5 被鉴定为肠杆菌属 (*Enterobacter* sp.).

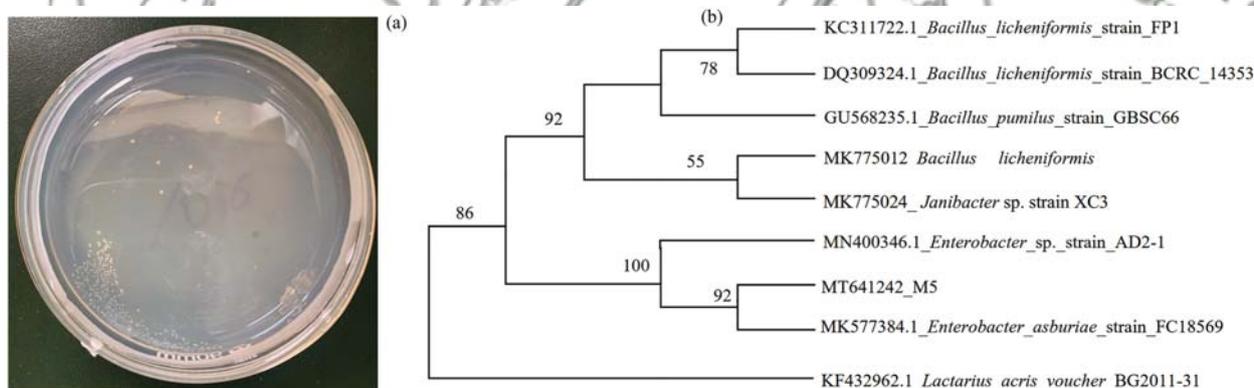


图 1 菌株 M5 的菌落形态及其 16S rRNA 基因序列的系统进化树

Fig. 1 Colony morphology and phylogenetic tree of 16S rRNA of strain M5

2.1.2 菌株硫酸盐还原功能及对镉、砷耐性

在液体培养基中添加 FeSO₄ (指示剂), 接种细菌培养后, 培养基变为墨汁色 (图 2) 且瓶口有臭鸡蛋气味, 且在 3 个平行中均产生以上现象, 这表明该菌的硫酸盐还原功能并非偶然. 原因在于培养基中的硫酸根被还原为 S²⁻ 进而分别与 Fe²⁺ 和 H⁺ 结合生成黑色沉淀 FeS 及臭鸡蛋气味的 H₂S. 以上现象验证了目标菌株具有硫酸盐还原功能.

图 3 为不同 Cd 和 As 浓度下肠杆菌 M5 的生长曲线. 在纯培养基中, 菌株 M5 大约在 60 h 达到对数生长期, 最大生长量时 D_{600} 为 1.4 ~ 1.5. Cd 和 As 的添加对其对数生长期的发生时间没有明显影响,



图 2 墨汁色的培养基

Fig. 2 Ink-colored medium

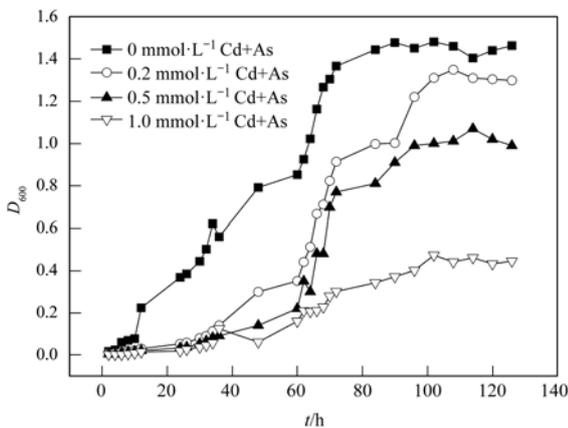


图3 不同 Cd、As 浓度下 *Enterobacter* sp. M5 的生长曲线

Fig. 3 Growth curve of *Enterobacter* sp. M5 under different Cd and As concentrations

但不同程度抑制菌株生长,且 Cd 和 As 浓度越高对其生长抑制程度越强,当 Cd 和 As 浓度达到 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,对 M5 的生长有明显抑制,生长量降低了约 68%. 但在 Cd 和 As 浓度均为 $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,菌株生长稳定后 D_{600} 值在 1.0 ~ 1.4 之间,生长状况良好,表明肠杆菌 M5 对 Cd 和 As 具有一定耐受性.

2.2 菌株 M5 对 Cd(II) 和 As(V) 去除率及表征

2.2.1 菌株对 Cd(II) 和 As(V) 去除率

由图 4 可知,在单一体系中,当 $c(\text{Cd})$ 为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,去除率最大达 94.13%,而当 $c(\text{Cd})$ 达到 $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,去除率最低为 80.12%;相比之下,菌株对 As 的去除率远低于对 Cd 的,当 $c(\text{As})$ 为 $0.01 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,去除率最大为 27.26%,在其他 3 个浓度中,去除率差异不明显,范围在 19.96% ~ 22.84%. 在复合体系中,由于 As 的添加,菌株对 Cd 的去除率有不同幅度的增加,其中浓度为 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时促进程度最大,菌株对 Cd 的去除率相较于单一体系增加了 15.50%;然而,Cd 的添加对 As 的去除率影响不显著.

2.2.2 扫描电镜-点扫(SEM-EDS)、X 射线衍射(XRD)和 X 射线光电子能谱(XPS)

(1) SEM-EDS 和 XRD 分析 电镜图片显示,纯细菌 M5 形态为杆状[图 5(a)],表面较为光滑,长约 $1.5 \mu\text{m}$,直径约为 $0.6 \mu\text{m}$. 而参与固定 Cd 和 As 后,细菌的细胞形态未发生明显变化,而是在细胞表面出现颗粒物质,推测为 Cd 和 As 被固定产生的硫化物沉淀[图 5(b)]. 结合 EDS 结果,在纯细菌中,细菌表面主要由 C、N、O、Na、Mg、P、S 和 Cl 等元素组成,固定 Cd 和 As 后,细菌表面主要组成元素增加 Cd 和 As,其中 Cd 和 As 所占质量分数分别为 1.64% 和 0.80%,所占原子分数分别为 0.31% 和 0.18%,这一结果表明部分镉、砷已经被细菌固

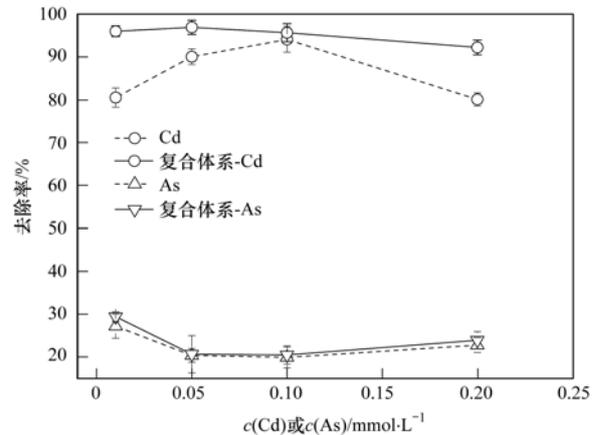


图4 菌株 M5 对 Cd(II) 和 As(V) 去除率

Fig. 4 Cd(II)/As(V) removal efficiency of the M5 strain

定. 通过菌株参与固定 Cd 和 As 的反应物的 XRD 分析可以确定(图 6),通过标准光谱比对,发现存在 CdS (JCPDS 卡片编号 43-0985; CdS) 和 As_2S_3 (JCPDS 卡片编号 71-2435; As_2S_3). 综合以上表征结果,可以确定菌株 M5 可以将 Cd 和 As 固定为 CdS 和 As_2S_3 .

(2) XPS 分析 图 7 是肠杆菌 M5 参与固定 Cd 和 As 前后的 C 1s 高分辨光谱. 针对肠杆菌,将其碳峰分解为 3 个部分:288 eV 处的峰归属于碳与氧形成单键或双键(C=O 和 C—O—C),主要包括羧酸盐;286 eV 处的峰归属于 C—(O, H);285 eV 处归属于 C—(O, N),这两部分主要包括醚、醇、胺和酰胺^[38,39]. 分析 C 1s 光谱发现,参与固定 Cd 和 As 前后的肠杆菌存在明显差异,即固定金属后的肠杆菌在 288 eV 和 286 eV 处的峰变宽且峰面积增大. 在纯肠杆菌中,C=O 和 C—O—C 所占面积比例为 6.04%,C—(O, N) 所占面积比为 28.03%,在参与固定 Cd 和 As 后这两种组分分别增加了 3.22% 和 3.74%. 这一结果表明金属离子与微生物的羧基、羟基和酰胺基的氢原子之间的离子交换主要参与生物吸附.

3 讨论

在本研究中,从镉、砷复合污染农田土壤中筛选出 1 株肠杆菌 M5 (*Enterobacter* sp.),在含有指示剂的培养基中生长可使指示剂显色 (FeS) 且瓶口有臭鸡蛋 (H_2S) 气味,表明该菌具有硫酸盐还原功能. Hoffmann 等^[40]于 2005 年首次发现并报道了该种细菌,近年来,其硫酸盐还原功能也逐渐被学者们广泛报道. 例如, Wang 等^[41]将肠杆菌 A11 (*Enterobacter* sp.) 和毛单胞菌 A23 (*Comamonas* sp.) 与 Cd 共培养发现可产生 H_2S 和琥珀酸等,并且 Cd 被高效固定形成 CdS. 同样地,在本研究中发现当 Cd 浓度为

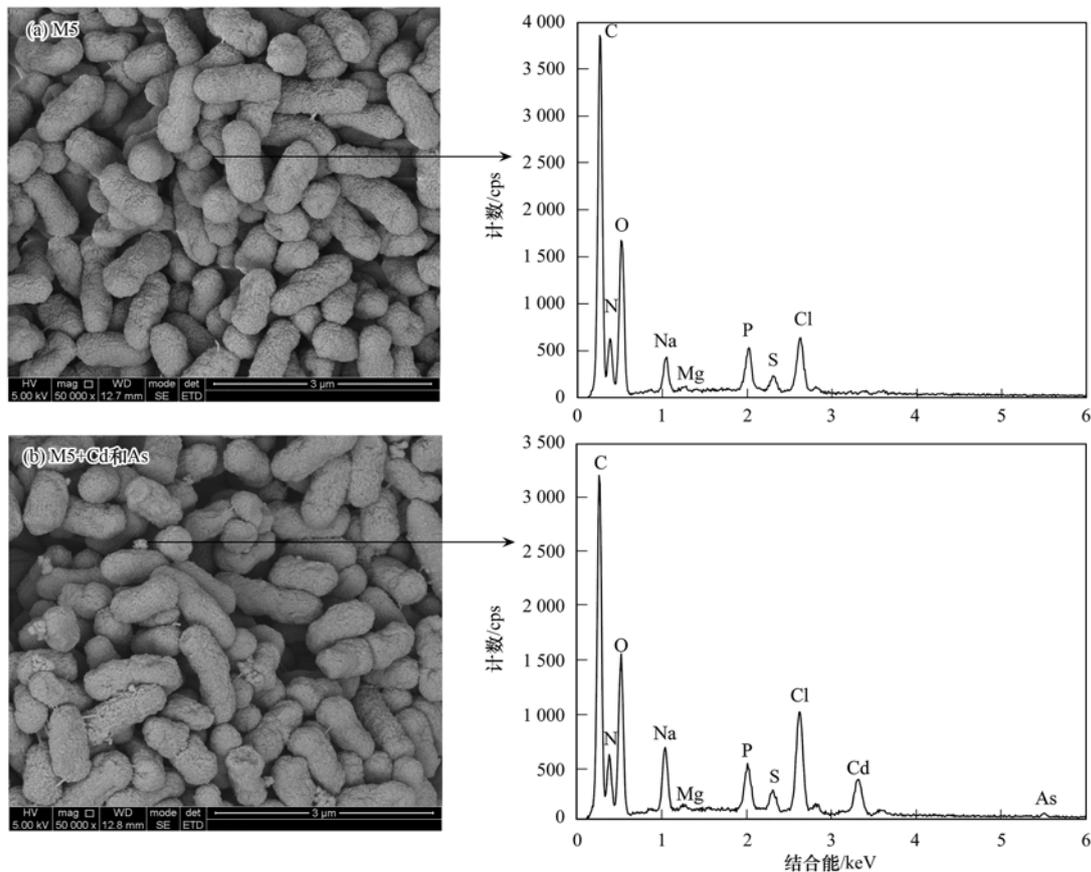


图5 菌株 M5 固定 Cd 和 As 前后的扫描电镜 (SEM) 和能量色散 X 射线光谱 (EDS)

Fig. 5 Scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) of strain M5 before and after fixing Cd and As

0.1 mmol·L⁻¹时,去除率最大达 94.13%,当 As(V) 浓度为 0.01 mmol·L⁻¹时,去除率最大为 27.26%,且在反应底物的表征中发现了 CdS 和 As₂S₃. 在厌氧还原条件下,菌株 M5 对硫酸盐进行还原形成 H₂S、HS⁻ 和 S²⁻ 的混合物,这些物质进一步与镉、砷反应生成金属硫化物. 此外,由于菌株 M5 可以利用电子供体将 As(V) 还原为 As(III),且 S²⁻ 等物质有较强的还原性也可以将 As(V) 还原为 As(III),故最终生成 As₂S₃ 而非 As₂S₅. 有大量研究报道了细

菌对重金属的吸附作用^[42,43],如尹雪斐等^[44]的研究表明 1 株蜡状芽孢杆菌 (*Bacillus cereus* sp.),其对 Cd 的吸附原因主要是通过胞外沉淀作用,Cd 与—COOH 和—OH 等官能团发生络合作用. Du 等^[45]报道表明细菌表面的—COOH 等活性官能团参与 Cd 的固定,以上报道与本研究的结论类似. 本研究的 XPS 结果显示该菌除了发挥硫酸盐还原功能,其表面丰富的官能团也发挥了生物吸附作用. 参与固定 Cd 和 As 后 C=O/C—O—C 和 C—(O,N) 这两类官能团所归属的峰面积分别增加了 3.22% 和 3.74%,表明金属离子与微生物的羧基、羟基和酰胺基的氢原子之间的离子交换主要参与生物吸附.

土壤重金属污染,尤其是 Cd 和 As 复合污染,不仅危及生物圈中的动植物生长,更涉及人类的食物安全问题. 由于镉、砷存在形式和化学性质等不同,能够对其同时钝化有一定难度. 目前微生物修复手段,一方面是利用微生物的胞外聚合物以及官能团对金属离子进行吸附固定,另一方面在于某些菌株功能性的发挥. 在本研究中发现的肠杆菌既能发挥其硫酸盐还原功能又能利用表面官能团同时钝化 Cd 和 As,此外,由于该菌筛选自南方弱酸性农田土壤并曾长期暴露于自然环境中,所以能够适应普遍

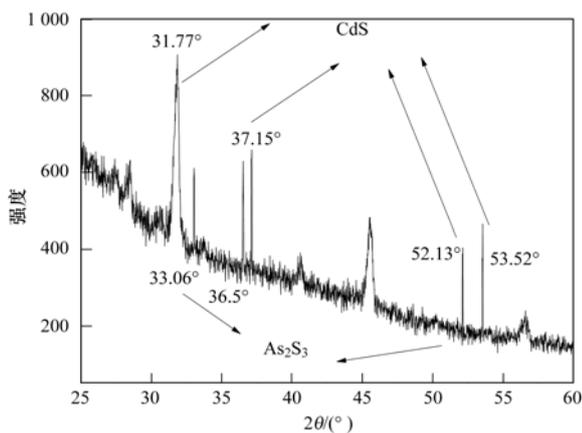


图6 反应底物的 X 射线衍射

Fig. 6 X-ray powder diffraction (XRD) of the precipitates

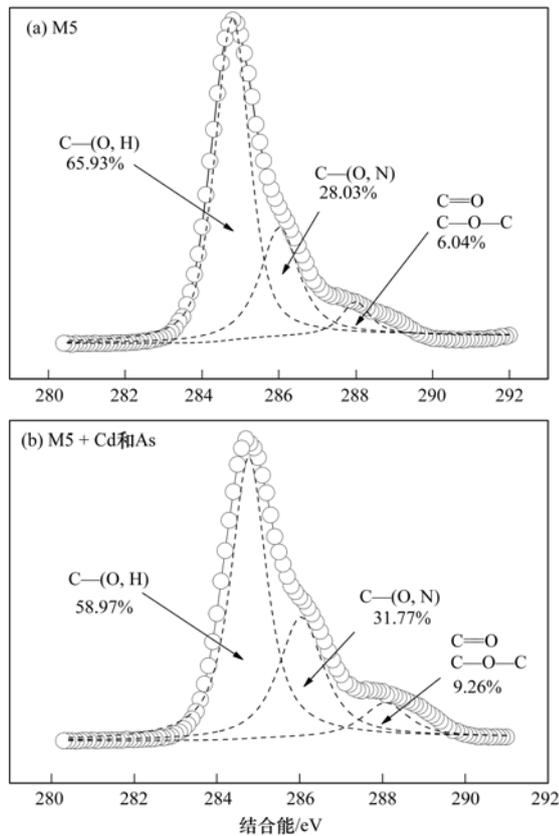


图7 肠杆菌 M5 固定 Cd 和 As 前后的高分辨率 C1s XPS 光谱

Fig. 7 High-resolution C 1s XPS spectra of M5 before and after the sorption of Cd(II)/As(V)

的农田环境,具有良好的应用前景. 综上,本研究为微生物应用修复重金属及类金属污染土壤提供思路和理论依据.

4 结论

(1) 从镉、砷复合污染的农田土壤中分离得到 1 株耐镉、砷菌株 M5,经鉴定该菌种为肠杆菌属 (*Enterobacter* sp.),该菌株具有硫酸盐还原功能,对镉、砷有高耐受性.

(2) 在模拟体系中,菌株 M5 对镉去除率最大达 94.13%,对砷去除率最大为 27.26%. SEM-EDS 及 XRD 的结果证实了 Cd 和 As 被固定成 CdS 和 As₂S₃,XPS 结果表明该菌表面的羧基、羟基和酰胺基主要参与生物吸附.

参考文献:

- [1] 徐长春,郑戈,林友华. “十三五”国家重点研发计划农田镉砷污染防治领域资助情况概述[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(7): 1321-1325.
Xu C C, Zheng G, Lin Y H. Brief introduction to research projects on prevention and control of cadmium and arsenic pollution in croplands supported by National Key R&D Program of China in 13th Five-Year Period[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(7): 1321-1325.
- [2] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, *et al.* Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies [J].

- Environmental Science & Technology, 2015, **49**(2): 750-759.
- [3] 李园星露,叶长城,刘玉玲,等. 硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 944-952.
Li Y X L, Ye C C, Liu Y L, *et al.* Bioavailability of silicon fertilizer coupled water management on soil bioavailability and cumulative control of rice in compound contaminated paddy soils [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 944-952.
- [4] Gu J F, Zhou H, Yang W T, *et al.* Effects of an additive (hydroxyapatite-biochar-zeolite) on the chemical speciation of Cd and As in paddy soils and their accumulation and translocation in rice plants[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(9): 8608-8619.
- [5] Mu T T, Wu T Z, Zhou T, *et al.* Geographical variation in arsenic, cadmium, and lead of soils and rice in the major rice producing regions of China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **677**: 373-381.
- [6] 周俊驰,铁柏清,刘孝利,等. 湖南矿区县域耕地重金属污染空间特征及潜在风险评价[J]. 湖南农业科学, 2017, (4): 75-79, 82.
Zhou J C, Tie B Q, Liu X L, *et al.* Spatial characteristics and potential risk assessment of heavy metal pollution in farmland in Hunan Mining Area [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2017, (4): 75-79, 82.
- [7] Mohan D, Singh K P: Single-and multi-component adsorption of cadmium and zinc using activated carbon derived from bagasse-an agricultural waste [J]. Water Research, 2002, **36**(9): 2304-2318.
- [8] 王英杰,邹佳玲,杨文毅,等. 组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 4004-4010.
Wang Y J, Zou J L, Yang W T, *et al.* Synergetic control of bioavailability of Pb, Cd and As in the rice paddy system by combined amendments [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 4004-4010.
- [9] 朱维,周航,吴玉俊,等. 组配改良剂对稻田土壤中镉铅形态及糙米中镉铅累积的影响[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3688-3694.
Zhu W, Zhou H, Wu Y J, *et al.* Effects of combined amendment on forms of cadmium/lead in paddy soil and accumulation of cadmium/lead in brown rice [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(11): 3688-3694.
- [10] Luo L, Ma C Y, Ma Y B, *et al.* New insights into the sorption mechanism of cadmium on red mud [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(5): 1108-1113.
- [11] Tseng C H. Cardiovascular disease in arsenic-exposed subjects living in the arseniasis-hyperendemic areas in Taiwan [J]. Atherosclerosis, 2008, **199**(1): 12-18.
- [12] 连斌,吴骥子,赵科理,等. 铁锰氧化物-微生物负载生物质炭材料对镉和砷的吸附机制[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1584-1595.
Lian B, Wu J Z, Zhao K L, *et al.* Novel insight into the adsorption mechanism of Fe-Mn oxide-microbe combined biochar for Cd(II) and As(III) [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1584-1595.
- [13] 丁萍,贺玉龙,何欢,等. 复合改良剂 FZB 对砷镉污染土壤的修复效果[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 917-924.
Ding P, He Y L, He H, *et al.* Remediation effect of compound modifier FZB on arsenic and cadmium contaminated soil [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 917-924.
- [14] Wang X Q, Yu H Y, Li F B, *et al.* Enhanced immobilization of

- arsenic and cadmium in a paddy soil by combined applications of woody peat and $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$: possible mechanisms and environmental implications [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 535-543.
- [15] 黄德乾, 汪鹏, 王玉军, 等. 污染土壤上水稻生长及对 Pb、Cd 和 As 的吸收[J]. *土壤*, 2008, **40**(4): 626-629.
Huang D Q, Wang P, Wang Y J, *et al.* Growth and uptake of Pb, Cd and As of rice in polluted soils[J]. *Soils*, 2008, **40**(4): 626-629.
- [16] Wu J Z, Huang D, Liu X M, *et al.* Remediation of As(Ⅲ) and Cd(Ⅱ) co-contamination and its mechanism in aqueous systems by a novel calcium-based magnetic biochar [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **348**: 10-19.
- [17] 牛之欣, 孙丽娜, 孙铁珩. 重金属污染土壤的植物-微生物联合修复研究进展[J]. *生态学杂志*, 2009, **28**(11): 2366-2373.
Niu Z X, Sun L N, Sun T H. Plant-microorganism combined remediation of heavy metals-contaminated soils [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(11): 2366-2373.
- [18] Kuffner M, Puschenreiter M, Wieshammer G, *et al.* Rhizosphere bacteria affect growth and metal uptake of heavy metal accumulating willows[J]. *Plant and Soil*, 2008, **304**(1): 35-44.
- [19] Li L J, Wang S T, Li X Z, *et al.* Effects of *Pseudomonas chenduensis* and biochar on cadmium availability and microbial community in the paddy soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **640-641**: 1034-1043.
- [20] Saeed Z, Naveed M, Imran M, *et al.* Combined use of *Enterobacter* sp. MN17 and zeolite reverts the adverse effects of cadmium on growth, physiology and antioxidant activity of *Brassica napus*[J]. *PLoS One*, 2019, **14**(3), doi: 10.1371/journal.pone.0213016.
- [21] Naveed M, Mustafa A, Azhar S Q T A, *et al.* *Burkholderia phytofirmans* PsJN and tree twigs derived biochar together retrieved Pb-induced growth, physiological and biochemical disturbances by minimizing its uptake and translocation in mung bean (*Vigna radiata* L.) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109974.
- [22] 张雅荟, 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.
- [23] Chiboub M, Saadani O, Fatnassi I C, *et al.* Characterization of efficient plant-growth-promoting bacteria isolated from *Sulla coronaria* resistant to cadmium and to other heavy metals[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2016, **339**(9-10): 391-398.
- [24] Prapagdee B, Wankumpha J. Phytoremediation of cadmium-polluted soil by *Chlorophytum laxum* combined with chitosan-immobilized cadmium-resistant bacteria [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(23): 19249-19258.
- [25] 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.
- [26] Peng W H, Li X M, Liu T, *et al.* Biostabilization of cadmium contaminated sediments using indigenous sulfate reducing bacteria: efficiency and process[J]. *Chemosphere*, 2018, **201**: 697-707.
- [27] Zhao Q, Li X M, Xiao S T, *et al.* Integrated remediation of sulfate reducing bacteria and nano zero valent iron on cadmium contaminated sediments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **406**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124680.
- [28] Shi W J, Song W J, Zheng J L, *et al.* Factors and pathways regulating the release and transformation of arsenic mediated by reduction processes of dissimilated iron and sulfate[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **768**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144697.
- [29] Xia X, Li J H, Liao S J, *et al.* Draft genomic sequence of a chromate-and sulfate-reducing *Alisewanella* strain with the ability to bioremediate Cr and Cd contamination [J]. *Standards in Genomic Sciences*, 2016, **11**(1): 48.
- [30] Alam R, McPhedran K N. Applications of biological sulfate reduction for remediation of arsenic-A review[J]. *Chemosphere*, 2019, **222**: 932-944.
- [31] Rodriguez-Freire L, Sierra-Alvarez R, Root R, *et al.* Biomineralization of arsenate to arsenic sulfides is greatly enhanced at mildly acidic conditions [J]. *Water Research*, 2014, **66**: 242-253.
- [32] Kocar B D, Borch T, Fendorf S. Arsenic repartitioning during biogenic sulfidization and transformation of ferrihydrite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, **74**(3): 980-994.
- [33] Rodriguez-Freire L, Moore S E, Sierra-Alvarez R, *et al.* Arsenic remediation by formation of arsenic sulfide minerals in a continuous anaerobic bioreactor [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2016, **113**(3): 522-530.
- [34] Le Pape P, Battaglia-Brunet F, Parmentier M, *et al.* Complete removal of arsenic and zinc from a heavily contaminated acid mine drainage via an indigenous SRB consortium [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, **321**: 764-772.
- [35] Postgate J R. *The Sulphate-reducing bacteria* [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [36] 万海清, 苏仕军, 葛长海, 等. 一种分离培养硫酸盐还原菌的改进方法[J]. *应用与环境生物学报*, 2003, **9**(5): 561-562.
Wan H Q, Su S J, Ge C H, *et al.* A improved method for isolation and cultivation of sulfate-reducing bacteria[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003, **9**(5): 561-562.
- [37] Tamura K, Stecher G, Peterson D, *et al.* MEGA6: molecular evolutionary genetics analysis version 6.0[J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2013, **30**(12): 2725-2729.
- [38] Lei M, Tao J, Yang R J, *et al.* Binding of Sb(Ⅲ) by Sb-tolerant *Bacillus cereus* cell and cell-goethite composite: implications for Sb mobility and fate in soils and sediments[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(6): 2850-2858.
- [39] 李杨, 周丽, 杜辉辉, 等. Cd(Ⅱ)与 As(V)在一株土壤细菌 *Delfia* sp. 上的共吸附研究[J]. *土壤*, 2020, **52**(5): 935-940.
- [40] Li Y, Zhou L, Du H H, *et al.* Co-adsorption of Cd(Ⅱ) and As(V) to soil bacterium *Delfia* sp. [J]. *Soils*, 2020, **52**(5): 935-940.
- [41] Hoffmann H, Stindl S, Stumpf A, *et al.* Description of *Enterobacter ludwigii* sp. nov., a novel *Enterobacter* species of clinical relevance [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2005, **28**(3): 206-212.
- [42] Wang X, Hu K, Xu Q, *et al.* Immobilization of Cd using mixed *Enterobacter* and *Comamonas* bacterial reagents in pot experiments with *Brassica rapa* L. [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(24): 15731-15741.
- [42] 刘玉玲, 朱虎成, 彭鸥, 等. 玉米秸秆生物炭固化细菌对镉

- 砷吸附[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4322-4332.
- Liu Y L, Zhu H C, Peng O, *et al.* Adsorption of cadmium and arsenic by corn stalk biochar solidified microorganism [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 4322-4332.
- [43] 王晓宇, 韩辉. 重金属固定细菌调控土壤铁氧化物阻控小麦 Cd 吸收效应[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 5160-5167.
- Wang X Y, Han H. Effects of heavy metal-immobilizing bacteria on reducing wheat uptake Cd by regulation soil iron oxides[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 5160-5167.
- [44] 尹雪斐, 杨蕊嘉, 刘玉玲, 等. Cd(II)与As(V)在土壤铁氧化物和细菌表面上的共吸附研究[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(3): 614-620.
- Yin X F, Yang R J, Liu Y L, *et al.* Co-adsorption of Cd(II) and As(V) on soil iron oxide and bacterial surface[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, **30**(3): 614-620.
- [45] Du H H, Chen W L, Cai P, *et al.* Cd(II) Sorption on montmorillonite-humic acid-Bacteria composites [J]. Scientific Reports, 2016, **6**: 2505-2511.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2021年12月27日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上发布了2020年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2020年度总被引频次12 709,影响因子2.736,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-jan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)