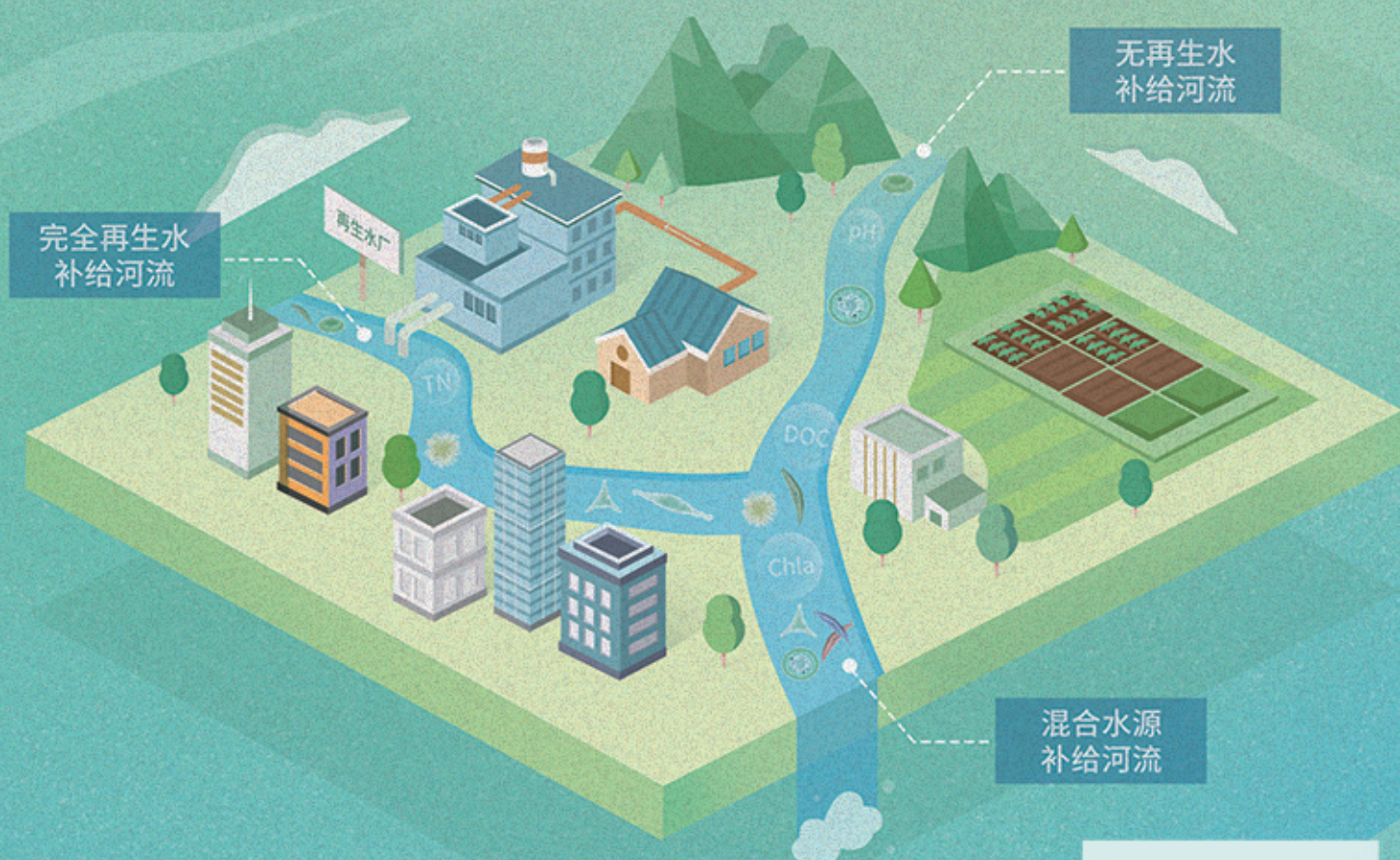


不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

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

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制

高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香*, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远

(太原科技大学环境科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: 通过土壤培养实验考察了硫酸盐还原菌(SRB)包括希瓦氏菌、梭状芽胞杆菌和两者混合菌对碱性和酸性农田土中有效态重金属(Cd、Pb、Cu和Zn)的钝化效果及其作用机制。结果表明,在相同接菌量下,希瓦氏菌处理组对碱性土中有效态重金属的钝化效果优于梭状芽胞杆菌和两者混合菌的处理组;而不同种类的SRB对酸性土中有效态重金属的钝化效果无显著差异。培养第20 d后土壤中有效态重金属的钝化率不再显著变化。SRB处理对碱性土中有效态重金属的钝化率可达80%以上,而对酸性土中有效态重金属的钝化率低于40%。在碱性土中,SRB能够有效还原 SO_4^{2-} ,并且提高土壤pH值,使 S^{2-} 可与重金属紧密结合,显著提高有效态重金属钝化率。尽管SRB使酸性土壤pH值升高,但土壤仍然呈酸性使 SO_4^{2-} 还原受到抑制,不利于有效态重金属的钝化。总体来看,SRB适用于碱性和酸性土壤的重金属污染治理,但与酸性土壤相比,SRB对碱性土壤中有效态重金属的钝化效果更好。

关键词: 土壤; 重金属; 硫酸盐还原菌(SRB); 钝化; 作用机制

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5789-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202202095

Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils

GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, JI Li, ZHANG Gui-xiang*, ZHANG Zhe-hai, XIA Hong-li, HE Wen-feng, ZHANG Bo-yuan

(School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The effects of sulfate-reducing bacteria (SRB), including *Shewanella* JN01, *Clostridium* ZG01, and their mixture, on the passivation efficiencies and mechanism of available heavy metals (Cd, Pb, Cu, and Zn) in an alkaline and acidic soil were investigated through a soil incubation experiment. The results showed that the passivation efficiencies of available heavy metals in alkaline soil treated by *Shewanella* JN01 were better than in that treated by *Clostridium* ZG01 and their mixture when the inoculum size was the same. However, there was no significant difference between the passivation efficiencies in acidic soils that were treated with different types of SRB. The passivation efficiencies of available heavy metals in soil did not obviously change after the 20th day. The passivation efficiencies of available heavy metals in the alkaline soils treated with SRB were greater than 80%, whereas those in the acidic soils were lower than 40%. In the alkaline soil, SRB could effectively reduce SO_4^{2-} and increase soil pH, which resulted in the tight bonding of S^{2-} with available heavy metals to evidently improve the passivation efficiencies of available heavy metals. Although the pH of acidic soil increased after inoculation with SRB, the reduction of SO_4^{2-} was inhibited because of the acidic condition in the soil, which was unfavorable for the passivation of available heavy metals. Collectively, SRB could be used to remediate the alkaline and acidic soils contaminated with heavy metals. Nevertheless, the passivation effect of SRB on available heavy metals in alkaline soil was better than those in acidic soil.

Key words: soil; heavy metal; sulfate-reducing bacteria (SRB); passivation; mechanism

随着我国工业化和现代化的快速发展,土壤重金属污染日益严重^[1~3]。重金属因无法被降解而在土壤中长期存在,且易被植物根系吸收,进入食物链最终危害人体健康^[4,5]。因此,降低土壤中重金属的生物可利用性,已成为农田土壤污染治理的重中之重^[6,7]。固化、稳定化技术因其操作简便,效率高,实用性强,已被广泛用于修复重金属污染土壤^[8,9]。添加化学钝化剂能改变重金属形态,从而有效地抑制其迁移性和生物有效性^[10,11]。然而,大量施加化学钝化剂会对土壤造成二次污染,破坏土壤结构,降低土壤肥力,影响后续土壤再利用^[12,13]。相比于化学钝化剂,微生物修复技术具有绿色高效和无二次污染等优点^[14]。因此,筛选能够高效钝化土壤中重金属的微生物,在推动重金属污染土壤治理技术发

展方面具有重要意义^[14~16]。

硫酸盐还原菌(sulfate-reducing bacteria, SRB)是一类厌氧微生物,能够将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} ,与金属离子结合,生成硫化物沉淀而将其去除^[17,18]。在土壤修复领域中,朱煜^[19]研究发现SRB对中高污染土壤中可交换态Cu和Cd含量降低85%以上;Zhao等^[20]探究了SRB与nZVI联合技术对沉积物中可交换态Cd降幅可达90%以上;Li等^[21]利用聚乙烯醇与固定化SRB能有效降低污染土壤中

收稿日期: 2022-02-15; 修订日期: 2022-03-29

基金项目: 山西省自然科学基金项目(20210302123204); 国家自然科学基金项目(42177057, 41401584); 太原科技大学UIT项目(XJ2020053)

作者简介: 高羽(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染土壤修复, E-mail: gy17806254912@163.com

* 通信作者, E-mail: zhanggx@tyust.edu.cn

Cu、Zn、Pb 和 Cd 的浸出毒性,其固定效率为 76.3%~100%。上述研究结果表明,SRB 对土壤中重金属的钝化效果较好,能有效降低环境风险。目前,利用 SRB 处理重金属污染土壤多为微酸性或微碱性(pH 为 6.00~8.00)^[5,8],关于 SRB 对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果和机制之间差异的研究鲜见报道。

本研究的目的是筛选出两种 SRB,通过土壤培养实验,考察其对碱性和酸性土壤中重金属(Cd、Pb、Cu 和 Zn)钝化效果的影响,并探讨钝化机制,以期利用 SRB 降低碱性和酸性土壤中重金属生态环境风险和保障农业生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试碱性土壤采自湖南省株洲市某金属冶炼厂周边重金属污染农田废弃地的表层(0~20 cm)土壤,酸性土壤采自广东省韶关市上坝村某金属冶炼厂下游水田的耕作层(0~20 cm)土壤,样品去除杂质、自然风干,磨细过尼龙筛(10 目和 20 目),备用。土壤基本参数分析包括 pH、 SO_4^{2-} 和有效态重金属含量。

供试硫酸盐还原菌菌种经 16S rDNA 序列测定,鉴定菌株分别为希瓦氏菌属和梭状芽胞杆菌属,分别命名为 *Shewanella* JN01 (希) 和 *Clostridium* ZG01 (梭)。富集培养基的组成: K_2HPO_4 (0.5 g·L⁻¹)、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (2.5 g·L⁻¹)、 NaHCO_3 (0.5 g·L⁻¹)、 CaCl_2 (0.2 g·L⁻¹)、 MgSO_4 (1 g·L⁻¹)、抗坏血酸(0.1 g·L⁻¹)、 $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0.5 g·L⁻¹)、L-半胱氨酸盐酸盐(0.5 g·L⁻¹)、酵母膏(1.5 g·L⁻¹)和乳酸钠(20 mL·L⁻¹),调整 pH 至 7.00。

1.2 实验设计

将土壤样品(160 g)置于塑料瓶中,再将复壮后的 SRB 稀释 4~5 倍至 $D_{600}=1$,按表 1 分别接种到碱性和酸性土壤样品中,充分搅拌,拧紧瓶盖,隔绝氧气,置于 35℃ 恒温培养箱中培养,分别于 0、5、10、15、20 和 25 d 取适量土壤样品,自然风干、磨碎和过筛,待测。每组实验设 3 个平行。

1.3 分析方法

土壤中 SO_4^{2-} 采用硫酸钡比浊法测定^[22]。土壤 pH 采用 pH 计测定(土壤:水=1:2.5,质量比)。土壤有效态重金属含量采用 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵浸提(土壤:提取液=1:8),土壤重金属全量采用 HCl-HNO₃-HF-H₂O₂ 消解,然后用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES,PerkinElmer Optima 7300V,美国)测定。

表 1 实验样品制备

序号	加入菌种	菌液体积/mL	去离子水体积/mL
1	无	0	80
2		8	72
3	希	16	64
4		24	56
5		8	72
6	梭	16	64
7		24	56
8		4+4	72
9	希+梭	8+8	64
10		12+12	56

1.4 数据分析与质量控制

有效态重金属钝化率的计算公式如下:

$$\text{钝化率} = [(C_0 - C_t)/C_0] \times 100\%$$

式中, C_0 表示初始土壤中有效态重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_t 表示 t 时间土壤中有效态重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

SO_4^{2-} 还原率的计算公式如下:

$$\text{还原率} = [(C_0 - C_t)/C_0] \times 100\%$$

式中, C_0 表示初始土壤中 SO_4^{2-} 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_t 表示 t 时间土壤中 SO_4^{2-} 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

本实验数据主要使用 SPSS 26.0 进行平均值、标准差和单因素方差分析(Duncan 检验确定各处理间的统计学差异, $P < 0.05$)以及统计学分析,使用 OriginPro 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 原始土壤 pH、 SO_4^{2-} 和有效态重金属含量

采自株洲的农田土壤为碱性土(pH=8.06), SO_4^{2-} 含量为 234.07 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态的 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的含量分别为 2.43、1.82、0.42 和 10.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd、Pb、Cu 和 Zn 的全量分别为 23.78、291.23、61.30 和 845.85 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。采自上坝的农田土壤为酸性土(pH=4.69), SO_4^{2-} 含量为 155.33 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态的 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的含量分别为 0.15、13.08、3.06 和 2.68 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd、Pb、Cu 和 Zn 的全量分别为 17.16、798.46、482.99 和 543.08 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据《土壤环境质量 农用地土壤风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中规定的农用地土壤污染风险标准,碱性土中 Cu 全量没有超过筛选值,Pb 和 Zn 分别为筛选值的 1.71 倍和 2.82 倍,而 Cd 全量是管制值 5.95 倍。酸性土中 Cu 和 Zn 分别为筛选值的 9.66 倍和 2.72 倍,Cd 和 Pb 分别为管制值的 11.44 倍和 2.00 倍。因此,供试碱性和酸性土壤重金属污染严重。

2.2 SRB 处理不同土壤后的 pH 变化

SRB 在处理碱性和酸性土壤过程中土壤 pH 变化趋势如图 1 所示. 碱性土的对照组 pH 随时间变化的波动不大(8.06 ~ 8.38). 所有 SRB 处理组的 pH 在前 10 d 呈缓慢上升趋势. 接菌量 10% 和 15% 的所有 SRB 处理组(除 10% 梭)在 10 ~ 20 d 时 pH 显著升高, 20 d 后又呈下降趋势. 接菌量 5% 的 SRB 处理组和 10% 梭在 10 ~ 15 d 期间土壤 pH 值呈下降趋势, 随后 pH 逐渐升高趋于平稳. 培养 20 d 时, 与对照相比, 接菌量 5%、10% 和 15% 的 SRB 处理组 pH 分别提高了 1.74% ~ 2.77%、3.10% ~ 7.70% 和 6.53% ~ 9.64%. 在接菌量相同的情况下, pH 在 20 d 达到稳定时的升高效果表现为: 希 > 希 + 梭 > 梭.

酸性土的对照组 pH 随时间变化不明显(4.69 ~ 5.19). 所有 SRB 处理组的土壤 pH 随时间延长逐渐升高. 培养 25 d 时, 与对照相比, 接菌量 5%、10% 和 15% 的 SRB 处理组 pH 分别提高了 6.40% ~ 12.31%、8.37% ~ 14.06% 和 12.40% ~ 17.91%. 当接菌量相同, 培养 25 d 时, pH 升高效果与碱性土相同.

总体而言, 接菌量越大, 碱性土和酸性土的 pH 随时间增幅越大. 相较于梭状芽胞杆菌处理组, 希瓦氏菌处理组对土壤 pH 影响更大, 混合菌处理组

的总体生长代谢速率介于两者之间.

2.3 SRB 对不同土壤中 SO_4^{2-} 还原率的影响

碱性土的对照组与 SRB 处理组中 SO_4^{2-} 还原率随时间延长而逐渐升高(图 2). 20 d 时 SRB 处理组 SO_4^{2-} 还原率显著高于对照组 34.42% ~ 66.76% ($P < 0.05$). 培养初期, 接菌量越高的处理组, SO_4^{2-} 还原率也越高. 到 20 d 时, 接菌量 10% 和 15% 的希和希 + 梭的处理组对 SO_4^{2-} 还原率无显著差异($P > 0.05$). 接菌量 10% 梭与 5% 希的处理组在第 20 d 时对 SO_4^{2-} 的还原率无显著差异($P > 0.05$), 说明希瓦氏菌处理组比梭状芽胞杆菌处理组对 SO_4^{2-} 还原效果好, 这与 pH 变化的结果相一致.

酸性土所有实验组的 SO_4^{2-} 含量随时间延长呈现先升高后降低的趋势. 与对照相比, 培养 25 d 时, 除 15% 希 + 梭外, 其他 SRB 处理组显著增加了酸性土壤中 SO_4^{2-} 还原率($P < 0.05$). 第 25 d 时, 接菌量 15% 的 SRB 处理组对 SO_4^{2-} 还原率(-4.23% ~ 57.87%)普遍低于接菌量 10% 的处理组(54.02% ~ 78.36%). 培养至 25 d 时, 在相同接菌量下, SRB 处理组中 5% 希、10% 梭和 15% 梭处理组对 SO_4^{2-} 的还原率最高.

总体来看, 碱性土中接菌量 10% 的希瓦氏菌处理组和酸性土中接菌量 10% 的梭状芽胞杆菌处理组随培养时间的延长, 都能达到较高的 SO_4^{2-} 还原率.

2.4 SRB 对不同土壤中有有效态重金属钝化效果的影响

不同菌种和接菌量对碱性土壤中有有效态 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的钝化率随时间变化趋势如图 3 所示. 与对照组相比, 所有 SRB 处理组在培养前 10 d 时的有效态 Cd、Cu 和 Zn 的钝化率逐渐降低; 到第 15 d 时, 土壤中有有效态 Cd、Cu 和 Zn 的钝化率增大; 在 20 d 时 SRB 对这些重金属的钝化效果趋于稳定. 培养第 20 d 时, 与对照相比, 接菌量 5%、10% 和 15% 对有效态 Cd 钝化率分别显著升高 18.02% ~ 74.84%、68.75% ~ 106.01% 和 102.68% ~ 116.36%, 对有效态 Cu 钝化率分别显著升高 -9.08% ~ 145.02%、120.88% ~ 171.98% 和 170.34% ~ 175.84%, 对有效态 Zn 钝化率分别显著升高 -22.73% ~ 17.86%、-10.28% ~ 76.97% 和 64.97% ~ 80.26%. 第 20 d 时, 接菌量为 10% 和 15% 的情况下, 希瓦氏菌处理组对有效态 Cd、Cu 和 Zn 的钝化效果优于梭状芽胞杆菌和混合菌处理组. 然而, SRB 对碱性土中有有效态 Pb 的影响与上述重金属不同. 从总体上来看, 除了第 15 d 时的 10% 和 15% 希对碱性土中有有效态 Pb 的钝化效果显著($P <$

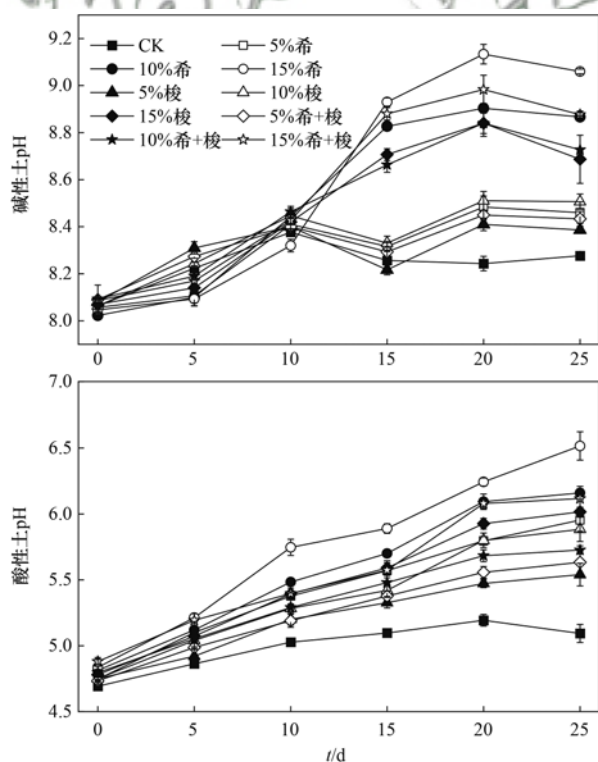
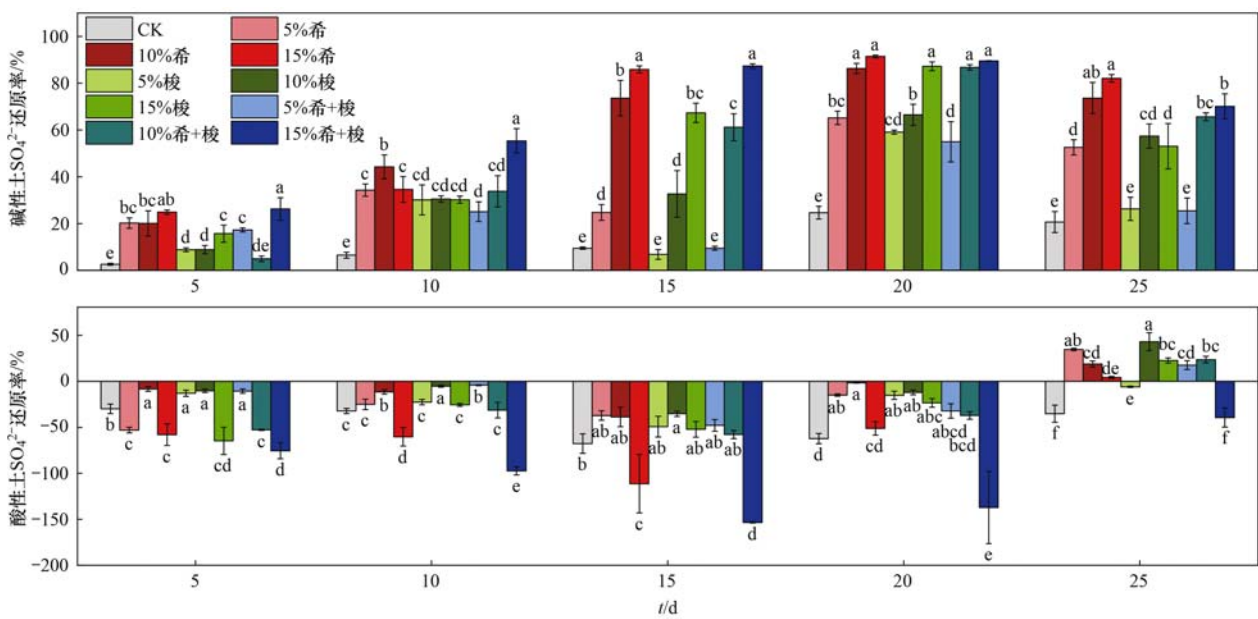


图 1 不同菌种和接菌量下碱性和酸性土 pH 值随时间的变化

Fig. 1 Changes in pH in alkaline and acidic soil with duration under different strains and inoculations



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同
图 2 不同菌种和接菌量下碱性和酸性土 SO_4^{2-} 的还原率

Fig. 2 Reduction efficiency of SO_4^{2-} in alkaline and acidic soil with different strains and inoculations

0.05), 钝化率可达 80% 以上, 其余处理中 SRB 对土壤中的 Pb 起到活化作用, 有效态 Pb 的含量随培养时间延长逐渐升高.

不同菌种和接菌量对酸性土中有效态 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的钝化率随时间变化趋势如图 4 所示. 所有 SRB 处理组的有效态 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量随培养时间逐渐降低, 在 20 d 左右达到稳定. 与对照相比, 第 20 d 时 SRB 接菌量 5%、10% 和 15% 对有效态 Cd 的钝化率分别显著升高 17.69% ~ 26.17%、21.97% ~ 31.14% 和 33.12% ~ 39.37%, 对有效态 Pb 的钝化率分别显著升高 8.31% ~ 11.51%、10.95% ~ 14.87% 和 13.58% ~ 18.26%, 对有效态 Cu 的钝化率分别显著升高 22.21% ~ 31.82%、27.63% ~ 35.47% 和 35.56% ~ 35.95%, 对有效态 Zn 的钝化率分别显著升高 7.53% ~ 12.30%、12.47% ~ 20.68% 和 15.10% ~ 22.10%. 接菌量 10% 和 15% 的处理组重金属的钝化率之间无显著差异 ($P > 0.05$). 培养至第 20 d 时, 在接菌量相同的情况下, 3 种 SRB 处理组对酸性土有效态 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的钝化率差异不

明显 ($P > 0.05$).

综上, SRB 对碱性土和酸性土中重金属钝化效果在第 20 d 时基本稳定, 且接菌量越大, 重金属的钝化率越高.

2.5 土壤中有有效态重金属与 pH、 SO_4^{2-} 的相关性分析

由于 SRB 对碱性土和酸性土中重金属钝化效果在第 20 d 时基本稳定, 所以分析第 20 d 碱性和酸性土壤中有有效态重金属 (Cd、Pb、Cu 和 Zn) 与 pH 和 SO_4^{2-} 的相关性. 由表 2 可知, 碱性土 pH 与 SO_4^{2-} 和有效态重金属含量呈显著负相关 ($P < 0.01$). SO_4^{2-} 含量与有效态重金属含量呈正相关. 各有效态重金属之间存在协同作用, 均呈正相关. 显然, 随着培养时间的延长, 碱性土 pH 逐渐升高, SO_4^{2-} 和有效态重金属含量逐渐降低.

由表 3 可知, 酸性土 pH 与 SO_4^{2-} 含量呈显著正相关 ($P < 0.01$). 有效态重金属含量与 pH 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与 SO_4^{2-} 含量呈负相关. 酸性土中各重金属有效态含量之间相互促进, 呈正相关. 随着培养时间增加, 土壤 pH 不断升高, 有效态重金属含量逐渐降低, 但 SO_4^{2-} 含量逐渐升高.

表 2 碱性土壤的 pH、 SO_4^{2-} 和有效态重金属含量的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficient of pH, SO_4^{2-} , and available heavy metals contents in alkaline soil

	SO_4^{2-}	Cd	Pb	Cu	Zn
pH	-0.909 **	-0.931 **	-0.635 *	-0.834 **	-0.903 **
SO_4^{2-}		0.944 **	0.489	0.867 **	0.855 **
Cd			0.575	0.969 **	0.885 **
Pb				0.579	0.815 **
Cu					0.843 **

1) * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关, 下同

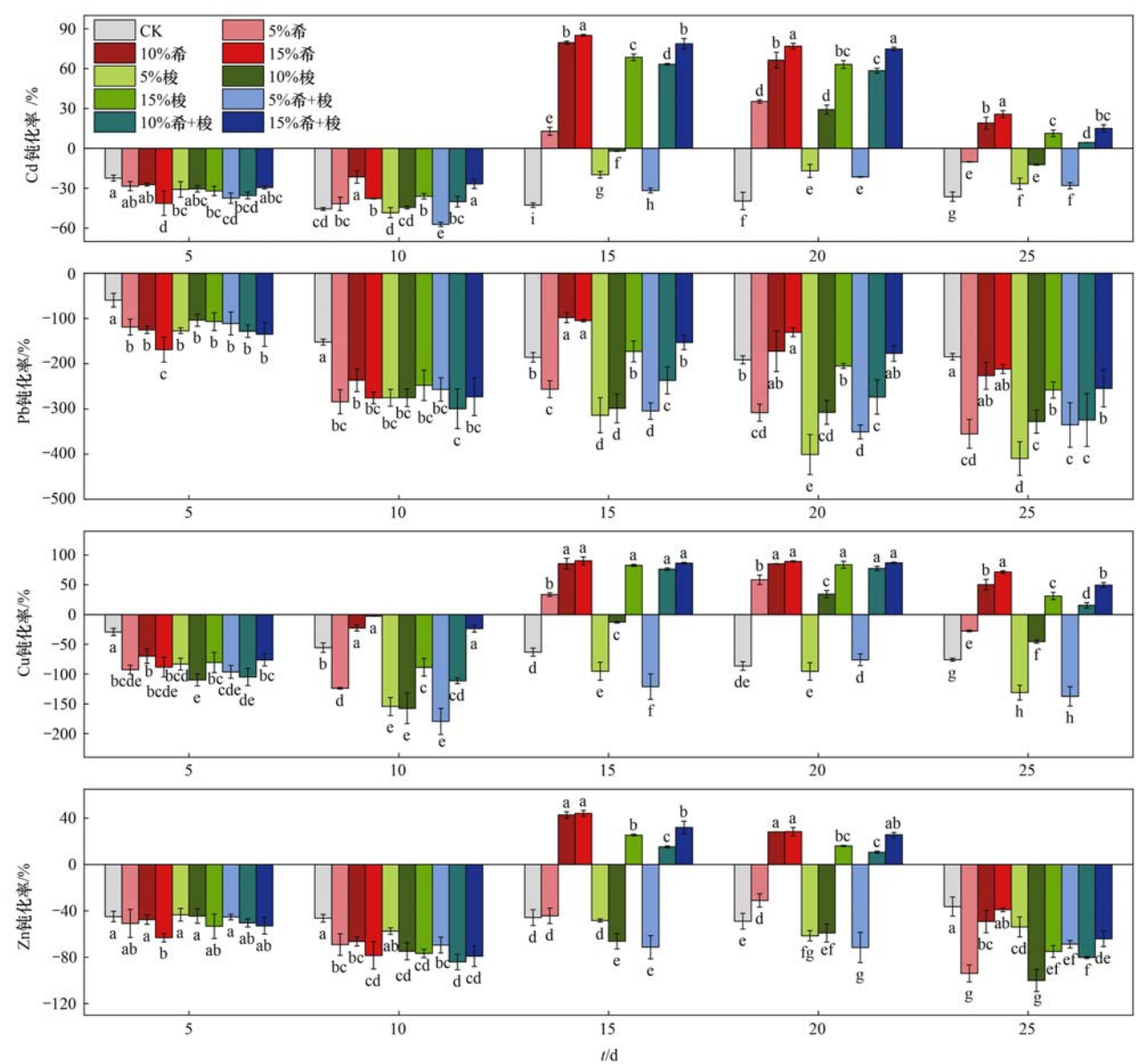


图3 不同菌种和接菌量下碱性土壤中有效态重金属钝化率

Fig. 3 Passivation efficiency of available heavy metals in alkaline soil with different strains and inoculations

表3 酸性土壤的 pH、SO₄²⁻ 和有效态重金属含量的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of pH, SO₄²⁻, and available heavy metals contents in acidic soil

	SO ₄ ²⁻	Cd	Pb	Cu	Zn
pH	0.864 **	-0.725 *	-0.953 **	-0.638 *	-0.769 **
SO ₄ ²⁻		-0.604	-0.853 **	-0.287	-0.747 *
Cd			0.815 **	0.807 **	0.775 **
Pb				0.695 *	0.852 **
Cu					0.614

3 讨论

3.1 SRB 处理不同土壤后的 pH 变化

在碱性土中,SRB 处理组的 pH 随时间逐渐升高后平稳. 接菌量 10% 和 15% 的所有 SRB 处理组 (除 10% 梭) 在 20 d 后 pH 下降的原因可能是菌株大部分处于衰亡期或体系中的 H₂S 浓度过高对微生物产生抑制作用导致消耗的 H⁺ 减少,且细胞代

谢过程中积累的有机酸也会使 pH 降低^[23~25].

在酸性土中,SRB 处理组的土壤 pH 随时间延长一直升高,主要是因为 SRB 在 pH 5.00~9.00 范围内适宜生长^[26,27],pH 过高或过低都会抑制微生物生长,代谢活性降低^[28,29]. 虽然酸性土初始 pH 较低,不适宜 SRB 生长,但土壤的复杂环境可为 SRB 生长提供营养物质和生存空间,从而缓慢生长使土壤 pH 逐渐升高.

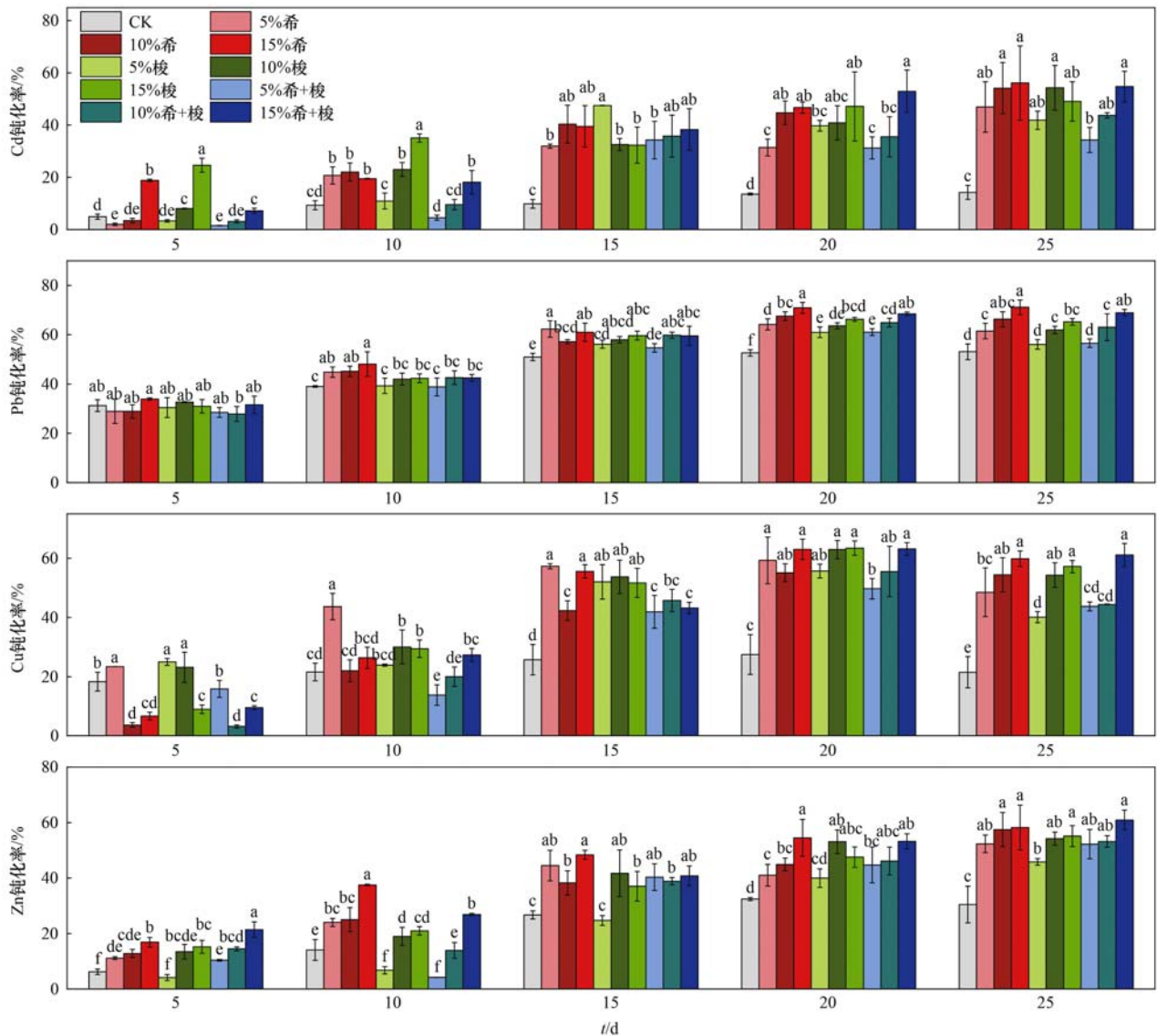


图 4 不同菌种和接种量下酸性土壤中有有效态重金属钝化率

Fig. 4 Passivation efficiency of available heavy metals in acidic soil with different strains and inoculations

在厌氧条件下,SRB 利用硫酸盐作为有机物代谢的末端电子受体时,一方面,氧化有机物过程中产生的碳酸盐和碳酸氢盐会使土壤 pH 升高^[30,31];另一方面,SRB 还原硫酸盐产生 H_2S ,易与金属离子结合成强碱弱酸盐^[25]. 因此 SRB 生长是一个碱度增加的过程.

3.2 SRB 对不同土壤 SO_4^{2-} 还原率的影响

碱性土的 SRB 处理组中 SO_4^{2-} 含量随时间延长而逐渐降低,说明微生物利用土壤中有机物作为电子供体,将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} ,这是微生物异化代谢的结果^[32~34]. 在缺氧条件下,亚硫酸盐和硫代硫酸盐也能被相当数量的 SRB 歧化,同时产生硫化物和硫酸盐^[5]. 因此,对土壤中 SO_4^{2-} 含量也造成一定影响.

酸性土的 SRB 处理组中 SO_4^{2-} 含量随时间延长呈现先升高后降低的趋势. 这一变化趋势可能是由于原始土壤的 pH 较低 ($pH < 5$),SRB 生长受到抑

制,土著微生物在厌氧条件下也可能会溶解土壤中部分 SO_4^{2-} ,使 SO_4^{2-} 含量逐渐升高;随着接种的 SRB 菌株逐渐适应环境,还原能力逐渐增强, SO_4^{2-} 含量又呈下降趋势^[35]. 酸性土中接种量 15% 比 10% 的 SO_4^{2-} 还原率低,这可能由于当 $pH < 7$ 时,较多游离的 H_2S 对菌株的抑制作用强,使 SO_4^{2-} 的还原速率较慢^[24,36].

在培养初期,SRB 对碱性土中 SO_4^{2-} 的还原起促进作用,而对酸性土起抑制作用. 一方面是因为碱性土初始 SO_4^{2-} 含量较高,为 SRB 生长代谢提供了充足的硫酸盐;另一方面,碱性土的 pH 在 SRB 适宜生长范围 (5.00 ~ 9.00) 内,而酸性土的 pH 对 SRB 生长有抑制作用. 因此,SRB 对碱性土中 SO_4^{2-} 的还原效果较好.

3.3 SRB 对不同土壤中有有效态重金属的钝化影响

SRB 处理碱性土过程中,对照组中有有效态重金

属的钝化率随时间延长出现显著波动是由土著微生物活性变化引起的^[13]。在培养第 15 d 时,有效态 Cd、Cu 和 Zn 的钝化率显著升高,此时土壤中有大量黑色斑点生成,且伴随着 H₂S 气味,表明 SRB 迅速增殖,产生的 H₂S 与土壤重金属生成硫化物沉淀,显著降低了有效态 Cd、Cu 和 Zn 的含量,进而降低了重金属离子对微生物的毒害作用^[19,37],此时 SRB 对有效态重金属的钝化率达到 80% 以上。黎少杰等^[38]也证实了高质量浓度的 Zn²⁺ 对 SRB 产生了毒性,Zn²⁺ 与 S²⁻ 生成 ZnS 能有效缓解 Zn²⁺ 和 H₂S 对 SRB 生长的抑制作用,保持 SRB 活性。25 d 时有效态重金属略有升高,可能土壤中 SRB 处于衰亡期,将细胞表面吸附的部分重金属重新释放回土壤中。接菌量较少时(5%),重金属对微生物生长产生胁迫,从而对 Cd、Cu 和 Zn 钝化效果不佳。在碱性土中 SRB 对 Cu 的钝化率最高,其次是 Cd 和 Zn,这与重金属硫化物的溶度积常数有关^[39]: CuS($K_{sp} = 6 \times 10^{-37}$) < CdS($K_{sp} = 8 \times 10^{-28}$) < ZnS($K_{sp} = 2 \times 10^{-25}$),溶度积常数越小,硫化物越容易形成。SRB 对碱性土中有效态 Pb 起活化作用,可能是 SRB 还原 SO₄²⁻ 使重金属在沉淀过程中其他共存离子优先沉淀的原因^[35]。接菌量越多,重金属钝化率越高,这与其他研究一致^[40]。这是因为菌量越多,SRB 生长代谢活性越高,重金属与 SRB 产生的 H₂S 生成硫化物沉淀。

与碱性土相比,SRB 对酸性土有效态重金属的钝化率较低(<40%),这主要是因为 pH 较低的情况下,土壤中 H⁺ 竞争吸附细胞表面的结合位点,产生的 H₂S 气体很容易从反应体系中逸出,进而降低重金属的钝化率^[41]。虽然在 SRB 生长过程中会使酸性土的 pH 升高,促进碳酸盐、磷酸盐或氢氧化物沉淀的形成,降低重金属的生物利用性,但酸性土处理后的 pH 仍然较低(pH < 7,图 1),生成碳酸盐、磷酸盐或氢氧化物沉淀受到限制。因此,与酸性土相比,SRB 对碱性土中有效态重金属的钝化效果较好。

3.4 不同土壤中有有效态重金属与 pH、SO₄²⁻ 之间的相互作用机制

通过相关性分析发现,碱性土壤 pH 与 SO₄²⁻ 和有效态重金属含量均呈显著负相关。一方面是由于 SRB 利用硫酸盐作为电子受体氧化有机物生成 HCO₃⁻ 和 H₂S,降低了 SO₄²⁻ 含量,使 pH 升高^[30];另一方面,土壤 pH 的升高能够增加土壤表面的负电荷,促进了土壤胶体对重金属的吸附,同时降低了 H⁺ 与重金属竞争的影响^[42],使碳酸盐、磷酸盐和有机质等载体可与重金属紧密结合,降低有效态重

金属含量,显著提高了有效态重金属的钝化率^[5]。SO₄²⁻ 含量与有效态重金属含量呈正相关,主要是因为 SRB 还原 SO₄²⁻ 产生 S²⁻,SO₄²⁻ 含量逐渐降低,S²⁻ 与土壤中重金属结合生成硫化物沉淀,有效地抑制重金属的生物有效性。SO₄²⁻ 含量与有效态 Cd、Cu 和 Zn 含量相关系数较高,这与 SRB 对有效态 Cd、Cu 和 Zn 钝化率较高相一致。各有效态重金属含量之间呈正相关,有效态 Pb 与有效态 Cd、Cu 和 Zn 含量的相关系数较低,这可能与其它共存离子优先沉淀和吸附有关,从而导致有效态 Pb 的钝化效果不佳。

在酸性土壤处理过程中,随培养时间延长,SRB 生长代谢促进土壤 pH 逐渐升高,从而使有效态重金属含量降低,而 SO₄²⁻ 含量升高,是因为 SRB 在酸性条件下更加敏感,其生长代谢产生游离的 H₂S 对自身有毒害作用,硫酸盐还原作用受到抑制^[25,43]。此外,重金属可以激发微生物的生理防御机制,促使微生物分泌胞外聚合物(EPS),通过静电和络合作用吸附重金属离子^[44,45]。酸性土中有效态重金属的降低可能主要归因于胞外聚合物吸附^[46,47],而形成金属硫化物的贡献较低,从而酸性土中 SRB 对有效态重金属的钝化效果不佳。

相较于酸性土,碱性土中重金属钝化率与硫酸盐还原率均较高,是因为碱性土有足够的硫酸盐和碳源确保 SRB 通过硫酸盐还原作用形成金属硫化物沉淀。硫酸盐还原率高能确保重金属高效形成硫化物沉淀,从而降低土壤中重金属生物利用性,削弱了重金属对微生物的毒害作用,这是 SRB 钝化重金属的主要机制。

4 结论

(1)SRB 处理碱性和酸性土过程中,能不同程度地提高土壤 pH 值、降低 SO₄²⁻ 和有效态重金属(Cd、Pb、Cu 和 Zn)含量,使土壤中重金属的生物可利用性降低。

(2)SRB 对碱性土中有效态重金属的钝化率可达 80% 以上,对酸性土有效态重金属钝化率在 40% 以下,SRB 对碱性土中有效态重金属钝化效果较好。

参考文献:

- [1] 张颖,赵欣,张圣虎,等. 3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4262-4270.
Zhang Y, Zhao X, Zhang S H, et al. Remediation potential of three dwarf bamboos on farmland soils contaminated with mixed heavy metals[J]. Environmental Science, 2022, 43(8): 4262-4270.
- [2] 张静静,朱爽阁,朱利楠,等. 不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(1):

- 460-468.
- Zhang J J, Zhu S G, Zhu L N, *et al.* Effects of different amendments on fractions and uptake by winter wheat in slightly alkaline soil contaminated by cadmium and nickel [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 460-468.
- [3] Wang Z Z, Wang H B, Wang H J, *et al.* Effect of soil washing on heavy metal removal and soil quality: A two-sided coin [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **203**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110981.
- [4] 殷飞, 王海娟, 李燕燕, 等. 不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2015, **34**(3): 438-448.
- Yin F, Wang H J, Li Y Y, *et al.* Remediation of multiple heavy metal polluted soil using different immobilizing agents [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(3): 438-448.
- [5] Chen Y, Chen F F, Xie M D, *et al.* The impact of stabilizing amendments on the microbial community and metabolism in cadmium-contaminated paddy soils [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, **395**, doi: 10.1016/j.cej.2020.125132.
- [6] Lan J R, Zhang S S, Dong Y Q, *et al.* Stabilization and passivation of multiple heavy metals in soil facilitating by pinecone-based biochar: Mechanisms and microbial community evolution [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **420**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126588.
- [7] 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 等. 两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3535-3548.
- Yuan F, Tang X J, Wu J Z, *et al.* Simultaneous immobilization of arsenic, lead, and cadmium in paddy soils using two iron-based materials [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3535-3548.
- [8] Yang F, Zhai W W, Li Z J, *et al.* Immobilization of lead and cadmium in agricultural soil by bioelectrochemical reduction of sulfate in underground water [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, **422**, doi: 10.1016/j.cej.2021.130010.
- [9] Zhai W W, Dai Y X, Zhao W L, *et al.* Simultaneous immobilization of the cadmium, lead and arsenic in paddy soils amended with titanium gypsum [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113790.
- [10] 许璐, 周春海, 刘梅, 等. 石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3299-3307.
- Xu L, Zhou C H, Liu M, *et al.* Utilization and remediation of heavily cadmium-contaminated agricultural soils by two crop rotation patterns after lime and sepiolite passivation [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3299-3307.
- [11] Li C F, Zhou K H, Qin W Q, *et al.* A review on heavy metals contamination in soil: effects, sources, and remediation techniques [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2019, **28**(4): 380-394.
- [12] Yao Z T, Li J H, Xie H H, *et al.* Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, **16**: 722-729.
- [13] Wang Y, Luo Y, Zeng G Q, *et al.* Characteristics and in situ remediation effects of heavy metal immobilizing bacteria on cadmium and nickel co-contaminated soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **192**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110294.
- [14] Chen M J, Li Y F, Jiang X R, *et al.* Study on soil physical structure after the bioremediation of Pb pollution using microbial-induced carbonate precipitation methodology [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **411**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125103.
- [15] Verbruggen N, Hermans C, Schat H. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2009, **12**(3): 364-372.
- [16] 闫潇, 刘兴宇, 张明江, 等. 分离自活性污泥的硫酸盐还原菌用于铅锌冶炼渣重金属污染修复[J]. *微生物学通报*, 2019, **46**(8): 1907-1916.
- Yan X, Liu X Y, Zhang M J, *et al.* Remediation of heavy metal pollution by sulfate reducing bacteria (SRB) isolated from activated sludge in lead-zinc smelter slag [J]. *Microbiology China*, 2019, **46**(8): 1907-1916.
- [17] Li X, Lan S M, Zhu Z P, *et al.* The bioenergetics mechanisms and applications of sulfate-reducing bacteria in remediation of pollutants in drainage: A review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **158**: 162-170.
- [18] Shahsavari S, Seth R, Chaganti S R, *et al.* Inhibition of anaerobic biological sulfate reduction process by copper precipitates [J]. *Chemosphere*, 2019, **236**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.06.216.
- [19] 朱煜. 硫酸盐还原菌对重金属污染土壤的处理研究[J]. *环境污染与防治*, 2021, **43**(8): 952-955.
- Zhu Y. Treatment of heavy metal contaminated soil using sulfate-reducing bacteria [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, **43**(8): 952-955.
- [20] 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.
- [21] Li X, Dai L H, Zhang C, *et al.* Enhanced biological stabilization of heavy metals in sediment using immobilized sulfate reducing bacteria beads with inner cohesive nutrient [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **324**: 340-347.
- [22] LY/T 1251-1999, 森林土壤水溶性盐分分析[S].
- [23] 邹琴琴. 氧化/还原菌及其与蒙脱石对重金属的联合滞固作用[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
- Wu Q Q. Oxidation/reduction bacteria and its combined immobilization with montmorillonite on heavy metal [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.
- [24] 余臣杰, 唐婕琳, 何环, 等. *Desulfuromonas alkenivorans* S-7 联合稻壳处理酸性重金属废水[J]. *煤炭学报*, 2019, **44**(9): 2851-2858.
- She C J, Tang J L, He H, *et al.* Combining *Desulfuromonas alkenivorans* S-7 with rice husk to treat acid heavy metal wastewater [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, **44**(9): 2851-2858.
- [25] 祝传静, 孙晶晶, 黄建洪, 等. 基于硫酸盐还原菌的气提内循环反应器处理酸性矿山废水[J]. *环境工程学报*, 2020, **14**(4): 970-976.
- Zhu C J, Sun J J, Huang J H, *et al.* Treatment of acid mine drainage by a gas stripping internal circulation reactor with sulfate reducing bacteria [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, **14**(4): 970-976.
- [26] 董净, 代群威, 赵玉连, 等. 硫酸盐还原菌的分纯及对 Cd²⁺ 钝化研究[J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(5): 34-40.
- Dong J, Dai Q W, Zhao Y L, *et al.* Isolation of sulfate-reducing bacteria and study on its passivation of Cd²⁺ [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(5): 34-40.
- [27] 陈炜婷, 张鸿郭, 陈永亨, 等. pH、温度及初始铈浓度对硫酸盐还原菌脱铈的影响[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(10):

- 4105-4109.
- Chen W T, Zhang H G, Chen Y H, *et al.* Effect of pH, temperature and initial concentration on thallium removal by sulfate-reducing bacteria[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(10): 4105-4109.
- [28] 柳凤娟, 张国平, 罗绪强, 等. Fe(II) 浓度对硫酸盐还原菌去除水体中砷和锑的影响[J]. 环境化学, 2021, **40**(10): 3171-3179.
- Liu F J, Zhang G P, Luo X Q, *et al.* Effect of different contents of Fe(II) on removal of arsenic and antimony from water by sulfate reducing bacteria[J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(10): 3171-3179.
- [29] 朱晓丽, 寇志健, 王军强, 等. 生物炭固定化硫酸盐还原菌对 Cd²⁺ 吸附及作用机制分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(7): 2682-2690.
- Zhu X L, Kou Z J, Wang J Q, *et al.* Adsorption of Cd²⁺ by sulfate reducing bacteria immobilized biochar[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(7): 2682-2690.
- [30] Li X, Wu Y E, Zhang C, *et al.* Immobilizing of heavy metals in sediments contaminated by nonferrous metals smelting plant sewage with sulfate reducing bacteria and micro zero valent iron[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **306**: 393-400.
- [31] Shan S P, Guo Z H, Lei P, *et al.* Simultaneous mitigation of tissue cadmium and lead accumulation in rice via sulfate-reducing bacterium[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **169**: 292-300.
- [32] Wu B, Liu F F, Fang W W, *et al.* Microbial sulfur metabolism and environmental implications[J]. Science of the Total Environment, 2021, **778**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146085.
- [33] 吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 等. 硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1366-1371.
- Wu X, Tan K Y, Hu X J, *et al.* Research on removal efficiency of Cd(II)-bearing wastewater by sulfate-reducing biological filter[J]. Environmental Science, 2014, **35**(4): 1366-1371.
- [34] Niu Z S, Pan H, Guo X P, *et al.* Sulphate-reducing bacteria (SRB) in the Yangtze Estuary sediments: abundance, distribution and implications for the bioavailability of metals[J]. Science of the Total Environment, 2018, **634**: 296-304.
- [35] 马保国. 硫酸盐还原菌与固体废物协同修复煤矸石污染的研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.
- Ma B G. Experimental research on remediation of contamination from coal wastes with SRB and solid wastes[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2009.
- [36] Azabou S, Mechichi T, Sayadi S. Zinc precipitation by heavy-metal tolerant sulfate-reducing bacteria enriched on phosphogypsum as a sulfate source[J]. Minerals Engineering, 2007, **20**(2): 173-178.
- [37] 曾远. 铅锌矿区土壤中特异性微生物吸附转化铅机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- Zeng Y. Mechanism of lead biosorption and biotransformation in specific microorganism in soils of lead-zinc mine area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [38] 黎少杰, 陈天虎, 周跃飞, 等. Zn(II) 对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(1): 293-298.
- Li S J, Chen T H, Zhou Y F, *et al.* Effect of Zn(II) on microbial activity in anaerobic acid mine drainage treatment system with biomass as carbon source[J]. Environmental Science, 2012, **33**(1): 293-298.
- [39] Kiran M G, Pakshirajan K, Das G. Heavy metal removal from multicomponent system by sulfate reducing bacteria: Mechanism and cell surface characterization[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **324**: 62-70.
- [40] 魏威, 余江, 王亚婷, 等. SRB-沸石联合技术对土壤铅的固定效果[J]. 深圳大学学报(理工版), 2018, **35**(6): 597-602.
- Wei W, Yu J, Wang Y T, *et al.* Effect of SRB-zeolite technology on immobilization of lead in soil[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2018, **35**(6): 597-602.
- [41] Guo J H, Li Y, Sun J L, *et al.* pH-dependent biological sulfidogenic processes for metal-laden wastewater treatment: Sulfate reduction or sulfur reduction? [J]. Water Research, 2021, **204**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117628.
- [42] 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 等. 改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4441-4451.
- Wang X Y, Meng H B, Shen Y J, *et al.* Characteristics of modified biochars and their immobilization effect on Cu and Cd in polluted farmland soil around smelter[J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4441-4451.
- [43] Zhang M L, Wang H X. Organic wastes as carbon sources to promote sulfate reducing bacterial activity for biological remediation of acid mine drainage[J]. Minerals Engineering, 2014, **69**: 81-90.
- [44] Su Z, Li X, Xi Y N, *et al.* Microbe-mediated transformation of metal sulfides: mechanisms and environmental significance[J]. Science of the Total Environment, 2022, **825**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153767.
- [45] Priyadarshane M, Das S. Biosorption and removal of toxic heavy metals by metal tolerating bacteria for bioremediation of metal contamination: A comprehensive review[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, **9**(1), doi: 10.1016/j.jece.2020.104686.
- [46] Hwang S K, Jho E H. Heavy metal and sulfate removal from sulfate-rich synthetic mine drainages using sulfate reducing bacteria[J]. Science of the Total Environment, 2018, **635**: 1308-1316.
- [47] Yue Z B, Li Q, Li C C, *et al.* Component analysis and heavy metal adsorption ability of extracellular polymeric substances (EPS) from sulfate reducing bacteria[J]. Bioresource Technology, 2015, **194**: 399-402.

CONTENTS

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