

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明	(1)
厦门城区大气颗粒物 PM ₁₀ 中有机酸源谱特征分析	杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴永平	(8)
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思	(15)
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO ₂ 和 NO _x 的影响	王鸿,朱天乐,王美艳	(21)
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氮挥发特性比较	汪军,王德建,张刚,王远	(27)
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋	(34)
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨	(39)
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜 (DMSO) 的浓度分布	王敏,张洪海,杨桂朋	(45)
2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析	闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇	(51)
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测	李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙	(61)
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究	郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁	(69)
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍	(77)
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军	(84)
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元	(91)
湘江沉积物镉和汞质量基准的建立及其应用	蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山	(98)
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男	(108)
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	李晋昌,张红,石伟	(116)
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强	(121)
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军	(129)
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新	(137)
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦	(145)
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民	(150)
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳	(156)
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐	(163)
天然有机物的相对分子量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	胡孟柳,林洁,许光红,董秉直	(169)
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺	(177)
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	曾宪委,刘建国,聂小琴	(182)
负载型 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	张小娜,周少奇,周晓	(188)
污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析	吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇	(194)
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根	(198)
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N ₂ O 产生量的影响	韩雪,高大文	(204)
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢	(209)
嗜麦芽窄食单胞菌对铜镉的吸附特性与离子交换	白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立栉,何宝燕,李跃鹏	(217)
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳	(226)
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南	(231)
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛	(237)
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福	(244)
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估	千志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏	(251)
多效应残差法 (MERA) 表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	霍向晨,刘树深,张晶,张瑾	(257)
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌	吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远	(263)
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	孟瑶,梁红,高大文	(271)
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林	(277)
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国	(283)
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	董洪芳,于君宝,管博	(288)
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇	(293)
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,黄玉娟	(302)
无定形 Fe(OH) ₃ 和 Fe ₃ O ₄ 共沉淀态 As 的化学提取	陈义萍,王少锋,贾永锋	(308)
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	李华,黄建国,袁玲	(315)
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎	(321)
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	李坤权,李焯,郑正,桑大志	(328)
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易	(336)
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强	(347)
2012 城市生态学术研讨会会议论文		
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛	(357)
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正	(364)
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强	(373)
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	虎博,王铁宇,吕永龙,杜立宇,罗维	(379)
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析	施晓清,李笑诺,杨建新	(385)
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	邓俊,徐琬莹,周传斌	(395)
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	黄锦楼,陈琴,许连煌	(401)
《环境科学》征订启事(26)	《环境科学》征稿简则(68)	信息(76,144,301,400)
		专辑征稿通知(394)

模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响

谢鑫源, 孙培德*, 楼菊青, 郭茂新, 马王钢

(浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310012)

摘要: 从浙江温州某制革厂污泥中筛选到1株细菌, 对其形态和16S rDNA序列研究表明, 细菌细胞呈杆状, 革兰氏染色阴性, 其16S rDNA序列与嗜酸性氧化亚铁硫杆菌标准菌株 *Acidithiobacillus ferrooxidans* ATCC23270的序列相似度为99%, 可鉴定为嗜酸性氧化亚铁硫杆菌菌株, 暂命名为WZ-1。为了研究电镀污泥浸出液中重金属离子对WZ-1活性的影响, 考察了 Ni^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 这4种重金属离子及5种不同模拟电镀污泥重金属浸出液对WZ-1 Fe^{2+} 氧化活性和表观呼吸速率的影响, 结果表明菌株在接种量6.7%、初始pH 2.0、温度30℃、转速150 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下, 浓度分别为5.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Ni^{2+} 、 Cr^{3+} 对WZ-1的活性没有影响; WZ-1对 Ni^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 的最大耐受浓度分别为: 30.0、0.1、2.5、30.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 5种模拟电镀污泥重金属浸出液对WZ-1活性的影响有明显差异, 抑制强弱顺序为: $\text{Cu}/\text{Ni}/\text{Cr}/\text{Zn} > \text{Cu}/\text{Ni}/\text{Zn} > \text{Cu}/\text{Cr}/\text{Zn} > \text{Cu}/\text{Ni}/\text{Cr} > \text{Ni}/\text{Cr}/\text{Zn}$ 。

关键词: 嗜酸性氧化亚铁硫杆菌; 活性; 表观呼吸速率; 电镀污泥重金属浸出液

中图分类号: X172; X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)01-0209-08

Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of *Acidithiobacillus ferrooxidans*

XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, GUO Mao-xin, MA Wang-gang

(School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: An *Acidithiobacillus ferrooxidans* strain WZ-1 was isolated from the tannery sludge in Wenzhou, Zhejiang Province in China. The cell of WZ-1 strain is Gram negative and rod-shaped, its 16S rDNA sequence is closely related to that of *Acidithiobacillus ferrooxidans* ATCC23270 with 99% similarity. These results reveal that WZ-1 is a strain of *Acidithiobacillus ferrooxidans*. The effects of Ni^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} and 5 kinds of simulated leaching solutions of electroplating sludge on the bioactivity of Fe^{2+} oxidation and apparent respiratory rate of WZ-1 were investigated. The results showed that Ni^{2+} and Cr^{3+} did not have any influence on the bioactivity of WZ-1 at concentrations of 5.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and 0.1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. WZ-1 showed tolerance to high levels of Ni^{2+} , Zn^{2+} (about 30.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), but it had lower tolerance to Cr^{3+} and Cu^{2+} (0.1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ Cr^{3+} and 2.5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ Cu^{2+}). Different kinds of simulated leaching solution of electroplating sludge had significant differences in terms of their effects on the bioactivity of WZ-1 with a sequence of $\text{Cu}/\text{Ni}/\text{Cr}/\text{Zn} > \text{Cu}/\text{Ni}/\text{Zn} > \text{Cu}/\text{Cr}/\text{Zn} > \text{Cu}/\text{Ni}/\text{Cr} > \text{Ni}/\text{Cr}/\text{Zn}$.

Key words: *Acidithiobacillus ferrooxidans*; bioactivity; apparent respiratory rate; simulated heavy metal leaching solution of electroplating sludge

嗜酸性氧化亚铁硫杆菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, A. f) 是化能自养菌, 能生长在亚铁、单质硫及硫化物矿物上^[1], 且能通过直接作用或其代谢产物的间接作用, 产生氧化、还原、络合、吸附或溶解作用^[2], 达到浸出固相中重金属的效果。目前已在市政污泥^[3,4]、制革污泥^[5] 重金属脱除、矿山冶金^[6,7] 等领域成熟应用。同时, 在 A. f 浸出废弃电子材料^[8,9]、废旧电池^[10,11]、熔炼粉尘^[12,13] 中重金属方面取得较好试验效果。近年来, 电镀污泥生物浸出技术逐渐受到研究人员关注, Shi 等^[14] 利用 A. f 对 Ni、Cu、Cr 含量分别为 3.73%、1.34%、8.07% 的电镀污泥进行了生物浸出试验; Bayat 等^[15] 则以 Zn 含量为 2.29%, 其余重金属含量均低于 0.085% 的电镀污泥

作为处理对象, 进行重金属生物浸出试验。两者均取得了较好的处理效果, 但存在处理对象重金属含量低、处理污泥浓度小的缺点。

在利用 A. f 浸出固相中重金属之前, 需要对处理对象或浸出液中主要成分对功能菌株活性的影响进行研究, 为之后的浸出试验研究提供理论支持, 以较好地指导后续的工程推广应用。目前, 研究人员进行了 Ni^{2+} 、 Co^{2+} ^[16]、 Cu^{2+} ^[17]、 Mg^{2+} ^[18]、 Cr^{3+} 、 Cr^{6+} 、 Mn^{2+} ^[19] 单一重金属离子; Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{3+}

收稿日期: 2012-04-27; 修订日期: 2012-06-28

基金项目: 浙江省重大科技专项(2010C03003)

作者简介: 谢鑫源(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理与优化控制, E-mail: xxyuan1010@126.com

* 通讯联系人, E-mail: pdsun@126.com

复合重金属离子^[20];甲酸、乙酸、丙酸、苹果酸等低分子有机物^[2,21];NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻和PO₄³⁻等阴离子^[22];闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、方铅矿等硫化矿^[1,23]对*A. f*活性影响的研究。

为了研究、开发电镀污泥生物浸出技术,需考察电镀污泥浸出液对*A. f*活性的影响,本研究以电镀污泥中主要重金属离子作为影响因素,分析单一重金属离子及模拟电镀污泥重金属浸出液对*A. f*活性的影响,以获得电镀污泥浸出液中重金属离子对*A. f*活性的影响规律。

1 材料与方法

1.1 菌株的分离、纯化

取浙江省温州市龙湾区某制革厂污水处理站二沉池污泥进行目标菌株分离。吸20 mL污泥于200 mL已灭菌的9K液体培养基,培养基成分组成如下(g·L⁻¹):(NH₄)₂SO₄ 3.00, MgSO₄·7H₂O 0.50, K₂HPO₄ 0.50, KCl 0.10, Ca(NO₃)₂ 0.01, FeSO₄·7H₂O 44.20, pH 2.0。于30℃摇床中培养(150 r·min⁻¹)直至培养液的氧化还原电位(ORP)上升至500 mV以上^[4]。随后取1 mL培养液至装有9 mL 9K液体培养基的试管中,如此继续倍比稀释到10⁻⁹,于30℃摇床中培养(150 r·min⁻¹)至液体培养基显棕红色。取10⁻⁴~10⁻⁹稀释度的稀释液于9K固体培养基涂布培养(每个稀释度3个重复),固体培养基成分组成如下(g):(NH₄)₂SO₄ 3.00, MgSO₄·7H₂O 0.50, K₂HPO₄ 0.50, KCl 0.10, Ca(NO₃)₂ 0.01, FeSO₄·7H₂O 22.40, 琼脂粉 20.00, 蒸馏水 1000.00, pH 2.5, 培养7~8 d后在平板上出现针尖大小的褐色菌落,菌落周围为黄色,并同时有白色菌落和少量其他形态菌落的出现。挑取褐色菌落制成菌悬液按上法作稀释分离,取不同稀释度的稀释液作平板涂布并于30℃下培养。如此重复3次以后,基本分离得到较纯的菌落。将分离的单菌株转移到新鲜的9K液体培养基在30℃摇床中(150 r·min⁻¹)扩大培养,至培养基颜色变为棕红色时取菌,在光学显微镜下观察细菌形态和运动情况,革兰氏染色观察其染色情况。

1.2 16S rDNA的PCR扩增、序列测定及系统发育树分析

1.2.1 DNA的提取

采用9K液体培养基培养细菌40 h后,先用普通定性滤纸过滤液体培养基以尽量除去其中的铁矾沉淀,滤液先4000 r·min⁻¹离心5 min,取上清液于15000

r·min⁻¹条件下离心5 min,收集分离所得到的菌体,然后用pH 2.0稀硫酸清洗菌泥3次后转至1.5 mL EP中,按照SK1201-UNIQ-10柱式细菌基因组DNA抽提试剂盒内操作说明提取细菌的基因组DNA。

1.2.2 16S rDNA的PCR扩增、序列测定

用于16S rDNA PCR扩增的引物:上游引物7f(5'-CAG AGT TTG ATC CTG GCT-3'),下游引物1540r(5'-AGG AGG TGA TCC AGC CGC A-3')。50 μL的反应体系:引物各1 μL(10 μmol·L⁻¹),dNTP 1 μL,10×PCR Buffer 5 μL,DNA模板1 μL,*Taq* DNA聚合酶0.25 μL,无菌水补足至50 μL。PCR反应条件为98℃ 5 min;95℃ 35 s,55℃ 35 s,72℃ 1.5 min,35个循环;72℃ 8 min。测序由上海生物工程技术有限公司完成。

1.2.3 16S rDNA序列分析及系统发育树构建

将16S rDNA的测序结果输入GenBank中进行序列比对,将比对结果中不同同源性的序列和测得序列一起输入Clustalx1.8生成比对格式文件,再将生成的文件输入MEGA 3.1软件包,采用邻接法构建系统发育树^[24]。

1.3 单一重金属离子对WZ-1活性影响试验

试验选用低品位电镀污泥酸浸液中的主要金属离子:Ni²⁺、Cr³⁺、Cu²⁺和Zn²⁺作为试验用重金属离子,向9K液体培养基中投加不同量的金属盐配制不同浓度试验组。接种对数期WZ-1到试验组,用1.0 mol·L⁻¹稀硫酸调节体系初始pH至2.0,然后置于恒温摇床中在30℃、150 r·min⁻¹条件下培养。培养过程中,每12 h测定培养液pH值、ORP以及Fe²⁺氧化率。试验开始后第0 h、第48 h、第96 h测定WZ-1累计耗氧量。试验用金属盐分别为:NiSO₄·6H₂O、Cr₂(SO₄)₃·6H₂O、CuSO₄·5H₂O、ZnSO₄·7H₂O。试验组设置见表1。

1.4 模拟电镀污泥重金属浸出液对WZ-1活性影响试验

该试验以1.3节试验结果为设计依据,分别选取对WZ-1活性影响最小的重金属浓度作为模拟电镀污泥重金属浸出液中各重金属离子浓度,试验过程和方法同1.3节,试验组设置见表2。

1.5 指标监测分析方法

(1) pH、ORP和Fe²⁺监测方法

pH、ORP采用FE20K精密pH计测定,pH电极型号为LE438,ORP电极型号为LE510(梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司);Fe²⁺浓度测定采用邻菲罗啉分光光度法^[25]。

表 1 单一重金属离子对 WZ-1 活性影响试验组设置¹⁾

Table 1 Group settings of the experiment for investigating the influence of single heavy metal on WZ-1's bioactivity

试验组 编号	初始 pH	9K 液体培养基 /mL	蒸馏水 /mL	菌液 /mL	Cu ²⁺ 浓度 /g·L ⁻¹	Ni ²⁺ 浓度 /g·L ⁻¹	Cr ³⁺ 浓度 /g·L ⁻¹	Zn ²⁺ 浓度 /g·L ⁻¹
CK-1	2.0	140	10	—	—	—	—	—
CK-2	2.0	140	—	10	—	—	—	—
Cu-1	2.0	140	—	10	2.5	—	—	—
Cu-2	2.0	140	—	10	5.0	—	—	—
Cu-3	2.0	140	—	10	10.0	—	—	—
Ni-1	2.0	140	—	10	—	5.0	—	—
Ni-2	2.0	140	—	10	—	30.0	—	—
Ni-3	2.0	140	—	10	—	60.0	—	—
Cr-1	2.0	140	—	10	—	—	0.1	—
Cr-2	2.0	140	—	10	—	—	0.3	—
Cr-3	2.0	140	—	10	—	—	0.5	—
Zn-1	2.0	140	—	10	—	—	—	10.0
Zn-2	2.0	140	—	10	—	—	—	30.0
Zn-3	2.0	140	—	10	—	—	—	60.0

1) “—”表未添加该组分,下同

表 2 模拟电镀污泥重金属浸出液对 WZ-1 活性影响试验组设置¹⁾

Table 2 Group settings of the experiment for investigating the influence of simulated leaching solution of electroplating sludge on WZ-1's bioactivity

试验组 编号	初始 pH	9K 液体培养基 /mL	蒸馏水 /mL	菌液 /mL	Cu ²⁺ 浓度 /g·L ⁻¹	Ni ²⁺ 浓度 /g·L ⁻¹	Cr ³⁺ 浓度 /g·L ⁻¹	Zn ²⁺ 浓度 /g·L ⁻¹
CK-1	2.0	140	10	—	—	—	—	—
CK-2	2.0	140	—	10	—	—	—	—
Cu/Ni/Cr/Zn	2.0	140	—	10	2.5	5	0.1	10
Cu/Cr/Zn	2.0	140	—	10	2.5	—	0.1	10
Cu/Ni/Zn	2.0	140	—	10	2.5	5	—	10
Ni/Cr/Zn	2.0	140	—	10	—	5	0.1	10
Cu/Ni/Cr	2.0	140	—	10	2.5	5	0.1	—

(2) WZ-1 累计耗氧量和表观呼吸速率测定方法

WZ-1 累计耗氧量通过 BI-2000 电解呼吸仪测定^[26],表观呼吸速率为累计耗氧量曲线斜率。WZ-1 在液体培养基中进行好氧呼吸,同时进行 Fe²⁺ 氧化作用,两者的共同作用会导致水封瓶内 O₂ 被消耗,导致瓶内压力降低,外腔与大气相通,由于内外气压差,电解单元内腔液面上升、外腔液面下降,当外腔探针离开液面时,系统自动接通电解单元电源,开始电解稀硫酸生成 O₂ 补充瓶内被消耗的 O₂,外腔产生的 H₂ 逸出至大气中,压力恢复后,外腔液面上升,当探针重新接触液面后,电解单元停止工作。测试数据直接通过计算机记录,每 3 min 记录 1 次。BI-2000 电解呼吸仪具有自动磁力搅拌功能,转速为 100 r·min⁻¹,水浴温度为 30℃。试验时,准确量取 100 mL 混合培养液于 150 mL 水封瓶内,组装完毕后进行系统检漏,检漏成功后运行 1 h,待系统温度完全稳定后,正式启动呼吸仪开始监测。

2 结果与讨论

2.1 菌株形态特征及 16S rDNA 序列分析与系统发育树

2.1.1 菌株形态特征

菌株 WZ-1 是革兰氏阴性细菌,在 1 000 倍油镜下观察菌体形态,可见 WZ-1 单个菌体呈短杆状,菌体大小为 (0.5 ± 0.1) μm × (1.5 ± 0.2) μm。在 9K 固体培养基中,菌落呈圆形,表面干燥,直径约为 0.5 ~ 1.0 mm,边缘不规则,中间呈浅褐色,周边呈黄色。

2.1.2 16S rDNA 序列分析与系统发育树

细菌基因组 DNA 用引物 (7f、1540r) 扩增出 16S rDNA 序列,图 1 为 PCR 产物琼脂糖电泳图谱。对 16S rDNA 序列进行测序,序列长度为 1 368 bp,GenBank 中的序列登录号为 JQ968461。将测序结果输入 GenBank 于 Blast 中进行序列同源性比较,结果显示与嗜酸性氧化亚铁硫杆菌属 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) 的多株细菌具有较高的同源性 (99%),其中与 *Acidithiobacillus ferrooxidans* strain ATCC23270 相似性为 99%,结合其形态等特征可以确定该菌为嗜酸性氧化亚铁硫杆菌属,图 2 为 WZ-1 的系统发育树。

2.2 单一重金属离子对 WZ-1 活性的影响

2.2.1 单一重金属离子对 WZ-1 Fe²⁺ 氧化活性的影响

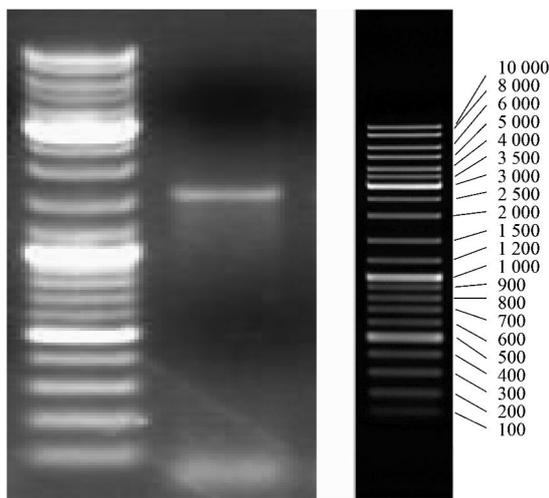


图1 基因组 DNA PCR 产物

Fig. 1 PCR products of extracted genomic DNA

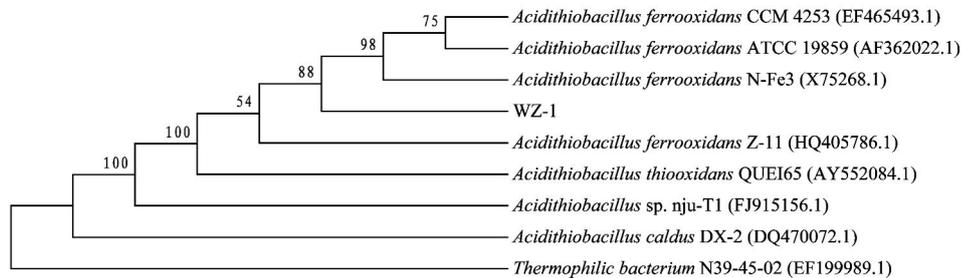


图2 基于 16S rDNA 序列的系统发育树

Fig. 2 Phylogenetic tree based on the 16S rDNA sequence of WZ-1 and the sequences of related species

99% 以上的 Fe^{2+} , Fe^{2+} 氧化平均速率分别为 105.77 、 $104.29 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$, 较空白组 CK-2 几乎没有差别. 这一结果与李洪枚^[16]、Cabrera^[28] 等的研究结果有所不同: 前者认为 Ni^{2+} 对氧化亚铁硫杆菌活性有较大影响; 后者认为 $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{Cr}^{3+}$ 存在时, 会降低 *A. f.* 的 Fe^{2+} 氧化速率. WZ-1 对上述浓度 Ni^{2+} 、 Cr^{3+} 所表现出的极佳适应能力或许与该菌原始生长环境有关. 当 Ni^{2+} 、 Cr^{3+} 浓度上升, WZ-1 的 Fe^{2+} 氧化活性则开始受到抑制, 至浓度分别达到 60.0 、 $0.3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, WZ-1 完全丧失 Fe^{2+} 氧化活性, 这与重金属的毒害作用及高渗透压有关. 研究表明: 浓度分别 5.0 、 $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Ni^{2+} 、 Cr^{3+} 对 WZ-1 的活性没有影响, 但随着浓度上升, WZ-1 的活性开始受到抑制.

图 3(c)、3(d) 分别为不同浓度 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 条件下, 培养基中 Fe^{2+} 氧化率的变化. 当 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 浓度分别为 2.5 、 $10.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, WZ-1 的停滞期较空白组 CK-2 均延长 12 h , 接种 24 h 后, Cu-1 进入对数增长期, 此时培养液中的 Fe^{2+} 开始被快速氧

Acidithiobacillus ferrooxidans 在生物浸出过程中, 依靠将 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 这一过程来获得自身生长繁殖所需能量, Fe^{2+} 的氧化程度能表征其代谢活性^[27], Fe^{2+} 氧化率依照式(1)计算.

$$\text{Fe}^{2+} \text{ 氧化率} = \frac{C_{\text{Fe}^{2+}\text{初始}} - C_{\text{Fe}^{2+}\text{剩余}}}{C_{\text{Fe}^{2+}\text{初始}}} \times 100\% \quad (1)$$

图 3 分别表明 Ni^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对 WZ-1 氧化 Fe^{2+} 的影响作用.

从图 3 可知, 空白组 CK-2 中 WZ-1 经 12 h 后即进入对数增长期, 培养液中的 Fe^{2+} 在 72 h 内被完全氧化, Fe^{2+} 氧化平均速率为 $107.83 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$, 表明 WZ-1 具有较好的 Fe^{2+} 氧化活性.

由图 3(a)、3(b) 分别可知, 低浓度 Ni^{2+} ($5.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)、 Cr^{3+} ($0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 对 WZ-1 的 Fe^{2+} 氧化活性几乎没有影响. 培养 72 h 时, Ni-1、Cr-1 已氧化

化, 72 h 时 Fe^{2+} 氧化率达到 94.13% , Fe^{2+} 氧化平均速率为 $98.16 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$, 相同时刻, Zn-1 的 Fe^{2+} 氧化平均速率为 $91.45 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$. 随着培养基中 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 浓度的提高, WZ-1 的 Fe^{2+} 氧化活性受到明显抑制. 由试验结果可知, WZ-1 对 Cu^{2+} 的耐受浓度低于 $5.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 对 Zn^{2+} 的最大耐受浓度为 $30.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 这一结果与 Cabrera 等^[28] 的研究结果一致.

根据上述试验结果可知, 试验所用 4 种重金属离子对 WZ-1 Fe^{2+} 氧化活性的影响顺序为: $\text{Cr}^{3+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$.

2.2.2 单一重金属离子对 WZ-1 累计耗氧量和表观呼吸速率的影响

针对 2.2.1 节的试验结果, 本研究利用 BI-2000 电解呼吸仪测定 WZ-1 在不同试验阶段的累计耗氧量并计算其表观呼吸速率, 以验证重金属离子对 WZ-1 活性的影响规律.

图 4 为不同浓度 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 存在时 WZ-1 在第 48 h 的累计耗氧量曲线. 图 4(a) 中, Ni-1 在第 48 h 时的 4.5 h 累计耗氧量达到 $135 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 大于空白

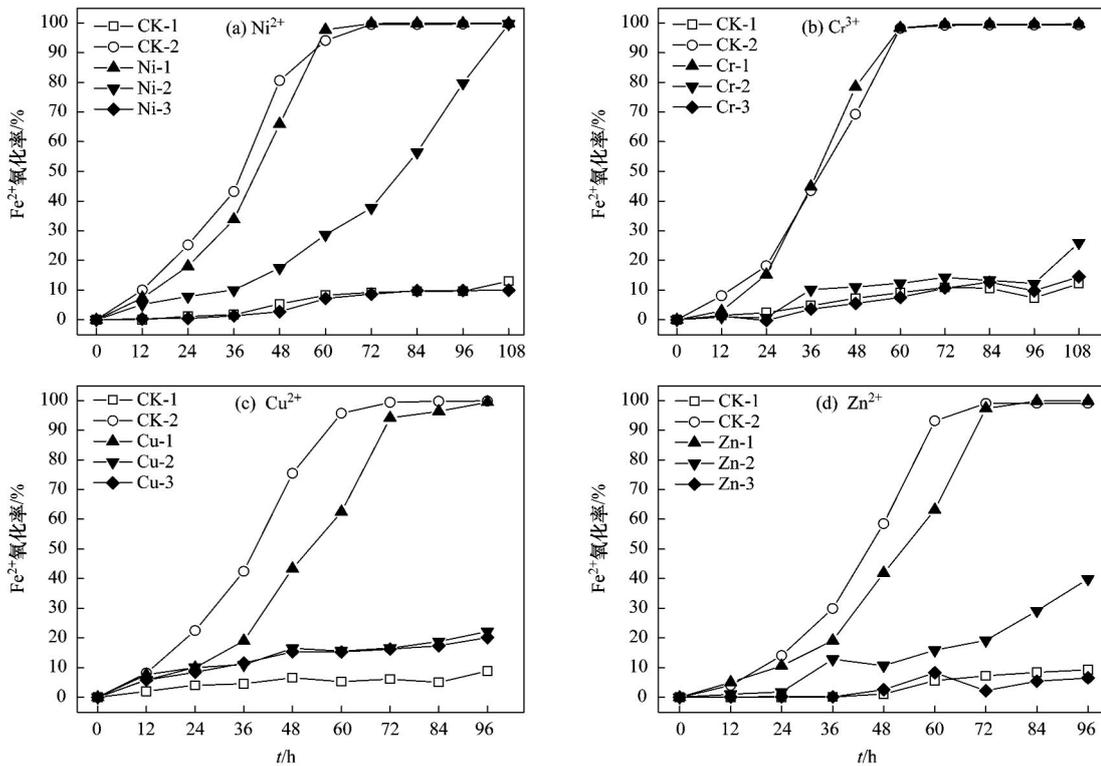


图3 不同浓度 Ni²⁺、Cr³⁺、Cu²⁺ 和 Zn²⁺ 对 WZ-1 氧化 Fe²⁺ 的影响

Fig. 3 Effect of different concentrations of Ni²⁺, Cr³⁺, Cu²⁺ and Zn²⁺ on Fe²⁺ oxidation of WZ-1

组 CK-2 相同时间内 100 mg·L⁻¹ 的累计耗氧量, Ni-2 与 CK-2 的曲线几乎重合, 两者相差不大, Ni-3 的曲线斜率则明显小于 CK-2; 从图 4(b) 中可以看出, Cu-1 试验组此时的累计耗氧量与空白组 CK-2 的基本相同, 2.5 h 的累计耗氧量达到 70 mg·L⁻¹, 而 Cu-2、Cu-3 则明显低于空白组 CK-2, 两者 3.0 h 的累计耗氧量仅有 30 mg·L⁻¹. 将图 4(a)、4(b) 中各试验组 WZ-1 的累计耗氧量曲线斜率(即: 表观呼吸速率)大小顺序与图 4 中对应的 Fe²⁺ 氧化率曲线进行比较, 可发现 WZ-1 在第 48 h 时的表观呼吸速率大小顺序与 Fe²⁺ 氧化曲线在第 48 h 的切线斜率

大小顺序一致, 例如, 图 4(a) 中 WZ-1 的表观呼吸速率与图 3(a) Fe²⁺ 氧化曲线在该时刻的切线斜率大小顺序同为: Ni-1 > CK-2 > Ni-2 > Ni-3. 从中可知, 表观呼吸速率可综合反映细菌在某时刻的呼吸强度和 Fe²⁺ 氧化状态.

图 5 分别为 Ni²⁺、Cr³⁺、Cu²⁺ 和 Zn²⁺ 各浓度梯度试验组在第 0 h、第 48 h、第 96 h 时的表观呼吸速率. 从中可以看出, 空白组 CK-2 中 WZ-1 的表观呼吸速率由第 0 h 的 10.0 ~ 12.5 mg·(L·h)⁻¹ 上升至第 48 h 时的 27.5 ~ 40.0 mg·(L·h)⁻¹, 第 96 h 时, 其表观呼吸速率又下降到 5.0 ~ 10.0

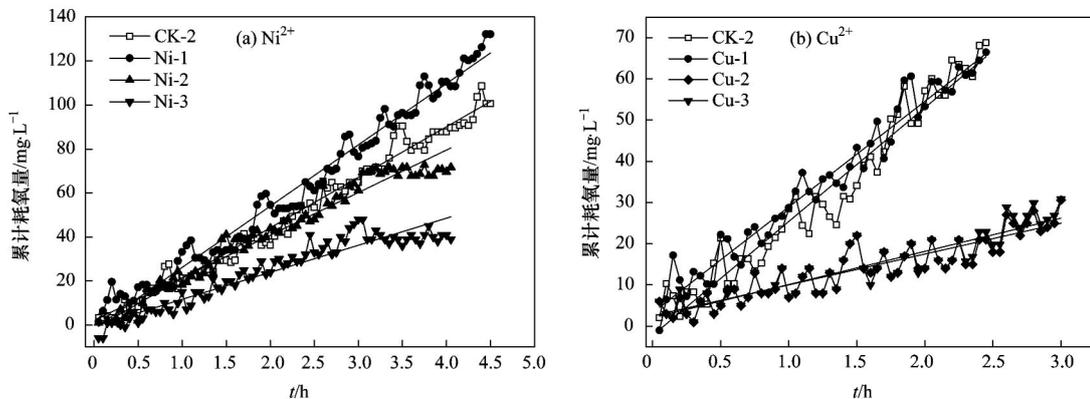


图4 不同浓度 Ni²⁺、Cu²⁺ 作用下 WZ-1 在第 48 h 时的累计耗氧曲线

Fig. 4 Accumulative oxygen consumption of WZ-1 under different concentrations of Ni²⁺ or Cu²⁺ at 48 h

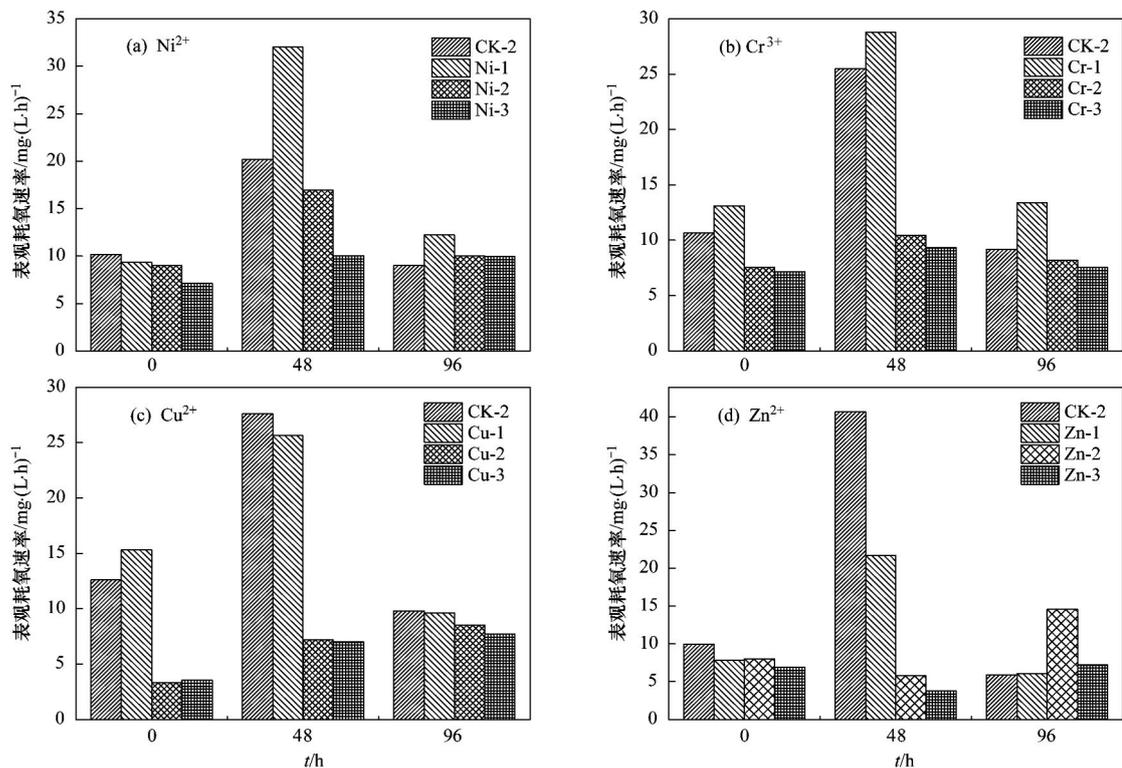


图5 不同浓度的 Ni^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 对 WZ-1 表观呼吸速率的影响

Fig. 5 Effect of different concentrations of Ni^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} and Zn^{2+} on the apparent respiratory rate of WZ-1

$\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 变化趋势呈抛物线. 比对各试验组的表观呼吸速率变化趋势和图3的 Fe^{2+} 氧化曲线, 发现 WZ-1 的表观呼吸速率变化趋势及变化幅度与对应 Fe^{2+} 氧化曲线切线斜率的变化趋势和变化幅度一致.

通过测定分析 WZ-1 的累计耗氧量和表观呼吸速率, 从细菌利用 O_2 进行生命活动的方面验证了单一重金属离子对 WZ-1 活性的影响. WZ-1 呼吸试验的结果与 2.2.1 节的试验结果一致.

2.3 模拟电镀污泥重金属浸出液对 WZ-1 活性的影响

为了考察电镀污泥重金属浸出液对 WZ-1 活性的影响, 根据 2.2 节试验结果, 选取对 WZ-1 活性抑制作用较小的各重金属浓度配制模拟电镀污泥重金属浸出液, Ni^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 浓度分别选取为 5.0、0.1、2.5、10.0 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

A. f. 被接种新鲜的 9K 液体培养基后, 能快速氧化其中的 Fe^{2+} , 而这一过程需要消耗培养液中的 H^+ [式(2)], 当培养液中大部分 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} 后, Fe^{3+} 开始水解, 并产生 H^+ [式(3)], 这就是培养过程中 pH 先升后降的主要原因^[29], 因此, pH 值也是 *A. f.* 培养过程中的一个重要指标.

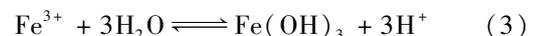
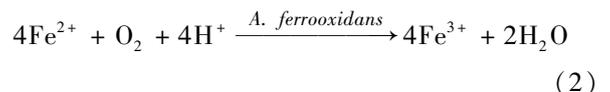


图6反映了不同模拟电镀污泥重金属浸出液对培养液 pH、ORP、 Fe^{2+} 氧化率以及 WZ-1 表观呼吸速率变化的影响. 所有试验组的 pH 值在 12 h 内均有所上升, 对比 CK-1 的 pH 值变化趋势, 可知这不是由 WZ-1 氧化 Fe^{2+} 所引起的 pH 值上升, 而是由于培养基具有一定的 pH 滞后性所造成的. 接种 12 h 后, CK-2 的 pH 值快速上升, 至第 48 h 时, pH 达到最大值 2.50, 之后由于 Fe^{3+} 水解作用不断释放 H^+ , 培养液的 pH 值持续下降. 相应地, CK-2 的 ORP 在前 48 h 缓慢上升, 由最初的 341 mV 上升至 427 mV, 之后快速上升, 至第 96 h 达到 613 mV. 比较不同试验组的 pH 值、ORP 变化曲线, 可明显看出不同模拟电镀污泥重金属浸出液对培养液 pH 值和 ORP 变化的影响差异. 结合图 6(c) 中各试验组 Fe^{2+} 氧化曲线, 可见试验组进入 Fe^{2+} 快速氧化期的拐点与 pH 快速上升的拐点处于相同时刻, 而当培养液中 Fe^{2+} 氧化率达到 50% 以上时, 溶液的 ORP 开始快速上升.

图 6(c) 中不同模拟电镀污泥重金属浸出液对

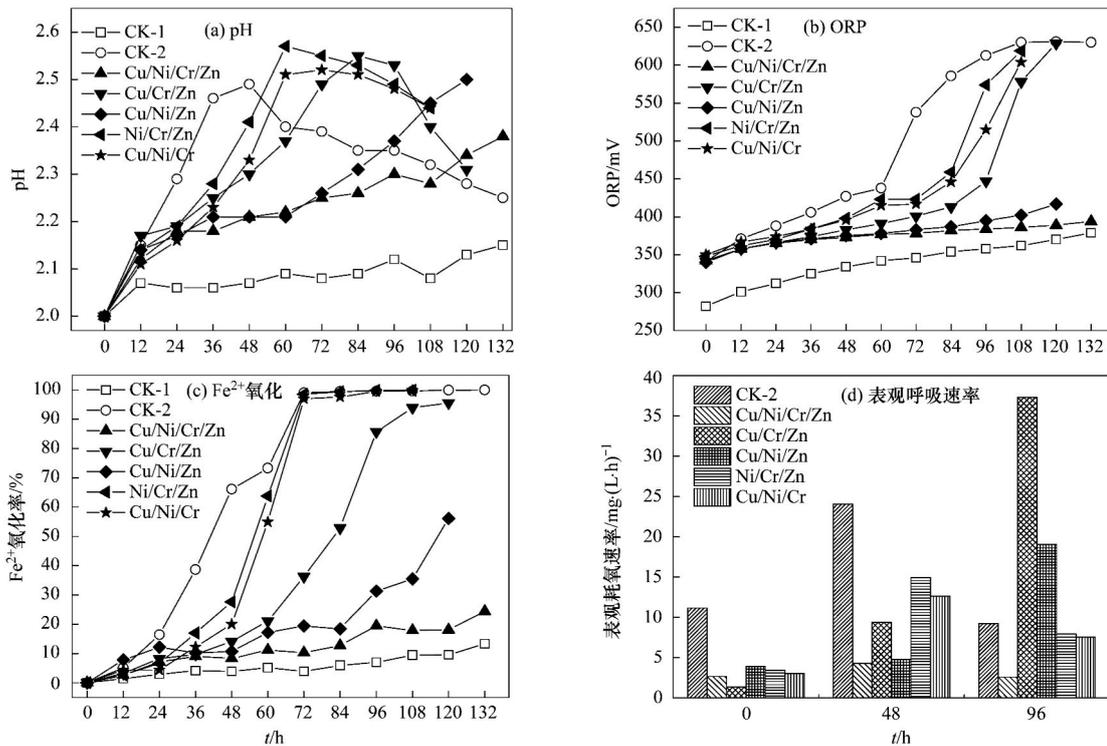


图6 模拟电镀污泥重金属浸出液对培养液 pH 值、ORP、Fe²⁺ 氧化及 WZ-1 表观呼吸速率变化的影响

Fig. 6 Effect of simulated leaching solution of electroplating sludge on the changes of pH, ORP,

Fe²⁺ oxidation and apparent respiratory rate of WZ-1

WZ-1 Fe²⁺ 氧化活性影响的差异明显. 由 Cu²⁺、Ni²⁺、Cr³⁺ 和 Zn²⁺ 组成的模拟电镀污泥重金属浸出液对 WZ-1 Fe²⁺ 氧化活性抑制最显著, Fe²⁺ 氧化率在试验结束时仅为 24.40%, 比较 CK-1 可知 WZ-1 几乎完全丧失 Fe²⁺ 氧化活性. 而分别由 Ni²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺ 和 Cu²⁺、Ni²⁺、Cr³⁺ 组成的模拟电镀污泥重金属浸出液对 WZ-1 Fe²⁺ 氧化活性影响较小, 试验中, WZ-1 虽然分别有近 36 h 和 48 h 的停滞期, 但进入对数期后, 其 Fe²⁺ 氧化速率较快, 第 72 h 即与空白组 CK-2 几乎同时实现 99% 以上的 Fe²⁺ 氧化. 图 6(d) 中各试验组 WZ-1 的表观呼吸速率大小顺序及变化趋势与图 6(c) 的 Fe²⁺ 氧化曲线在对应时刻的斜率大小及其变化趋势一致.

根据上述试验结果可知, 不同模拟电镀污泥重金属浸出液对 WZ-1 活性影响的差异明显, Cu²⁺、Ni²⁺、Cr³⁺、Zn²⁺ 配制浓度分别为 2.5、5.0、0.1、10.0 g·L⁻¹ 时, Ni/Cr/Zn, Cu/Ni/Cr 这 2 种模拟电镀污泥重金属浸出液对 WZ-1 活性的影响较小, Cu/Ni/Cr/Zn 这种模拟电镀污泥重金属浸出液对 WZ-1 活性的抑制作用最明显, 5 种模拟电镀污泥重金属浸出液对 WZ-1 活性影响的大小为: Cu/Ni/Cr/Zn > Cu/Ni/Zn > Cu/Cr/Zn > Cu/Ni/Cr > Ni/Cr/Zn.

3 结论

(1) 从浙江省温州市龙湾区某制革厂污水处理站二沉池污泥中分离得到了 1 株细菌 WZ-1, 通过细胞菌落形态、生理生化表现及分子生物学鉴定, 该菌为嗜酸性氧化亚铁硫杆菌, GenBank 中序列登录号为 JQ968461.

(2) 浓度分别为 5.0、0.1 g·L⁻¹ 的 Ni²⁺、Cr³⁺ 对 WZ-1 的 Fe²⁺ 氧化活性没有影响; WZ-1 对 Ni²⁺、Cr³⁺、Cu²⁺、Zn²⁺ 的最大耐受浓度分别为 30.0、0.1、2.5、30.0 g·L⁻¹.

(3) 根据模拟电镀污泥重金属浸出液对 WZ-1 活性影响大小的顺序, 从重金属这一影响因素角度考虑, WZ-1 较适合处理以 Ni、Cr、Zn 或 Cu、Ni、Cr 为主要重金属组分的电镀污泥.

参考文献:

- [1] 周吉奎, 钮因健, 覃文庆. 硫化矿对浸矿细菌 (Fe²⁺) 氧化活性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1278-1282.
- [2] 任婉侠, 李培军, 范淑秀, 等. 低分子量有机酸对氧化亚铁硫杆菌影响[J]. 环境工程学报, 2008, 2(9): 1269-1273.
- [3] Tyagi R D, Blais J F, Meunier N, et al. Simultaneous sewage sludge digestion and metal leaching-effect of sludge solids

- concentration[J]. *Water Research*, 1997, **31**(1): 105-118.
- [4] 周顺桂, 王世梅, 余素萍, 等. 污泥中氧化亚铁硫杆菌的分离及其应用效果[J]. *环境科学*, 2003, **24**(3): 56-60.
- [5] 周立祥, 周顺桂, 王世梅, 等. 制革污泥中铬的生物脱除及其对污泥的调理作用[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(6): 1014-1020.
- [6] Watling H R, Elliot A D, Maley M, *et al.* Leaching of a low-grade, copper-nickel sulfide ore. 1. Key parameters impacting on Cu recovery during column bioleaching[J]. *Hydrometallurgy*, 2009, **97**(3-4): 204-212.
- [7] Cameron R A, Lastra R, Gould W D, *et al.* Bioleaching of six nickel sulphide ores with different mineralogies in stirred-tank reactors at 30°C [EB/OL]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.03.016>, 2011-04-09.
- [8] Wang J W, Bai J F, Xu J Q, *et al.* Bioleaching of metals from printed wire boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* and their mixture[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **172**(2-3): 1100-1105.
- [9] Kasper A C, Berselli G B T, Freitas B D, *et al.* Printed wiring boards for mobile phones; characterization and recycling of copper[J]. *Waste Management*, 2011, **31**(12): 2536-2545.
- [10] Zeng G S, Deng X R, Luo S L, *et al.* A copper-catalyzed bioleaching process for enhancement of cobalt dissolution from spent lithium-ion batteries[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **199-200**: 164-169.
- [11] Xin B P, Zhang D, Zhang X, *et al.* Bioleaching mechanism of Co and Li from spent lithium-ion battery by the mixed culture of acidophilic sulfur-oxidizing and iron-oxidizing bacteria [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(24): 6163-6169.
- [12] Vakylabad A B, Ranjbar M, Manafi Z, *et al.* Tank bioleaching of copper from combined flotation concentrate and smelter dust [J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2011, **65**(8): 1208-1214.
- [13] Bakhtiari F, Atashi H, Zivdar M, *et al.* Bioleaching kinetics of copper from copper smelters dust[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2011, **17**(1): 29-35.
- [14] Shi Y, Zhang T P, Li M G, *et al.* Bio-leaching of heavy metals from electroplating sludge by *Thiobacillus* [J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(5): 1787-1791.
- [15] Bayat B, Sari B. Bioleaching of dewatered metal plating sludge by *Acidithiobacillus ferrooxidans* using shake flask and completely mixed batch reactor[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2010, **9**(44): 7504-7512.
- [16] 李洪枚, 柯家骏. Ni²⁺ 和 Co²⁺ 对氧化亚铁硫杆菌活性的影响[J]. *有色金属*, 2000, **52**(1): 49-51, 54.
- [17] 李洪枚, 柯家骏. Cu²⁺ 对氧化亚铁硫杆菌 (*T. f.*) 生长活性的影响[J]. *黄金*, 2000, **21**(6): 27-29.
- [18] 李洪枚, 柯家骏. Mg²⁺ 对氧化亚铁硫杆菌生长活性的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2000, **10**(4): 576-578.
- [19] Wong C, Silver M, Kushner D J. Effects of chromium and manganese on *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1982, **28**(5): 536-544.
- [20] Das A, Modak J M, Natarajan K A. Studies on multi-metal ion tolerance of *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. *Minerals Engineering*, 1997, **10**(7): 743-749.
- [21] 张再利, 沈镭, 贾晓珊. 有机碳源对氧化亚铁硫杆菌生长的影响[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2006, **45**(6): 121-124.
- [22] 张成桂, 张倩, 王晶, 等. 阴离子对嗜酸氧化亚铁硫杆菌生长和硫氧化活性的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2009, **19**(12): 2237-2242.
- [23] 周吉奎, 钮因健, 邱冠周, 等. 闪锌矿对氧化亚铁硫杆菌 Fe²⁺ 氧化活性的影响[J]. *有色金属*, 2003, **55**(4): 51-53.
- [24] 任婉侠, 李培军, 何娜, 等. 土壤中嗜酸性氧化亚铁硫杆菌的分离鉴定及其性能研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(2): 602-607.
- [25] HJ/T 345-2007, 水质 铁的测定 邻菲罗啉分光光度法(试行) [S].
- [26] 施群燕, 孙培德, 宋英琦, 等. 水蚯蚓对硝化细菌活性影响的试验研究[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(12): 2651-2656.
- [27] 谢海云, 刘中华, 周峨. 高铁离子浓度下氧化亚铁硫杆菌的生长行为[J]. *过程工程学报*, 2004, **4**(1): 43-46.
- [28] Cabrera G, Gómez J M, Cantero D. Influence of heavy metals on the growth and ferrous sulphate oxidation by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in pure and mixed cultures [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(8): 2683-2687.
- [29] Xiong H X, Guo R. Effects of chloride acclimation on iron oxyhydroxides and cell morphology during cultivation of *Acidithiobacillus ferrooxidans* [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, **45**(1): 235-240.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taotzi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinoloprop-ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人