

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲,谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范嫻,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣,程品,张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭,季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)
1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁,高品,薛昱,何梦琦,吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏,邓琦,邹华,梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼,李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)
农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响

陈燕¹, 黄芳¹, 谢鑫源^{2*}

(1. 浙江工商大学环保设计研究院, 杭州 310005; 2. 浙江省工业环保设计研究院有限公司, 杭州 310005)

摘要: 利用课题组分离得到的氧化亚铁硫杆菌 WZ-1 (GenBank 序列登录号: JQ968461) 研究电镀污泥浸出液中无机阴离子对 WZ-1 活性的影响, 考察了 Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 这 3 种单一阴离子以及 4 种不同模拟电镀污泥阴离子浸出液对 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为 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 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、1.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cl^- 、 NO_3^- 对 WZ-1 的活性没有影响; WZ-1 对 Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 的最大耐受浓度分别为 10.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、25.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 4 种模拟电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 活性的影响有明显差异, 强弱顺序为: $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-/\text{F}^- \geq \text{NO}_3^-/\text{F}^- > \text{Cl}^-/\text{F}^- > \text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$ 。

关键词: 氧化亚铁硫杆菌; 亚铁; 活性; 表观呼吸速率; 电镀污泥阴离子浸出液

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1377-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.025

Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of *Acidithiobacillus ferrooxidans*

CHEN Yan¹, HUANG Fang¹, XIE Xin-yuan²

(1. Institute of Environmental Protection Design & Research, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310005, China; 2. Institute of Zhejiang Environmental Protection Design & Research Co., Ltd., Hangzhou 310005, China)

Abstract: An *Acidithiobacillus ferrooxidans* strain WZ-1 (GenBank sequence number: JQ968461) was used as the research object. The effects of Cl^- , NO_3^- , F^- and 4 kinds of simulated inorganic anions 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 Cl^- , NO_3^- didn't have any influence on the bioactivity of WZ-1 at concentrations of 5.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 1.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. WZ-1 showed tolerance to high levels of Cl^- and NO_3^- (about 10.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 5.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively), but it had lower tolerance to F^- (25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Different kinds of simulated inorganic anions leaching solutions of electroplating sludge had significant differences in terms of their effects on bioactivity of WZ-1 with a sequence of $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-/\text{F}^- \geq \text{NO}_3^-/\text{F}^- > \text{Cl}^-/\text{F}^- > \text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$.

Key words: *Acidithiobacillus ferrooxidans*; ferrous; bioactivity; apparent respiratory rate; simulated inorganic anions 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。

为较好地利用 A. f 浸出固相中重金属, 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+} ^[14]、 Cu^{2+} ^[15]、 Mg^{2+} ^[16]、 Cr^{3+} 、 Cr^{6+} 、 Mn^{2+} ^[17] 单一重金属离子; Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Fe^{3+}

复合重金属离子^[18]; 甲酸、乙酸、丙酸、苹果酸等低分子有机物^[2,19]; NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 PO_4^{3-} 等阴离子^[20]; 闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿、方铅矿等硫化矿^[1,21] 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, 本课题组之前研究了以 Ni^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 为主要组分的模拟电镀污泥重金属浸出液对自主分离纯化的氧化亚铁硫杆菌菌株 WZ-1 (GenBank 序列登录号: JQ968461) 活性的影响^[24], 获得了不同浓度、不同种类重金属离子分别在单一和复合条件下对氧化亚

收稿日期: 2013-07-22; 修订日期: 2013-09-22

作者简介: 陈燕(1978~), 女, 工程师, 主要研究方向为废水处理技术, E-mail: healthykid@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xxyuan1010@126.com

铁硫杆菌 WZ-1 活性的不同影响结果. 本研究在上述试验基础上,以电镀污泥浸出液中常见的无机阴离子作为影响因素,考察分析单一无机阴离子和模拟电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 活性的影响,以获得电镀污泥浸出液中无机阴离子对 *A.f* 活性的影响规律,以期为后续理论试验研究及技术开发应用奠定基础.

1 材料与方法

1.1 菌株的培养及试验装置

(1) 菌株的培养

氧化亚铁硫杆菌 WZ-1 分离自浙江省温州市龙湾区某制革污水处理站二沉池污泥,经细菌形态观察、革兰氏染色观察以及 16S rDNA 的 PCR 扩增、序列测定和系统发育树分析,确定该菌为 1 株氧化亚铁硫杆菌,取名 WZ-1,GenBank 中的序列登录号为 JQ968461. 氧化亚铁硫杆菌 WZ-1 的培养以及相关试验均于 9K 液体培养基中进行,培养基成分组成如下 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 3.00, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.50, K_2HPO_4 0.50, KCl 0.10, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 0.01, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 44.20, pH 2.0. 于 30°C 摇床中培养或试验 ($150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)^[22].

(2) 试验装置

试验采用 200 mL 已灭菌的锥形瓶作为培养容

器,并选用恒温摇床为试验培养提供恒温及规律摇晃环境. 图 1 为试验期间,某一时刻各试验组溶液的不同颜色区别.



图 1 试验期间某一时刻各试验组溶液的颜色区别

Fig. 1 Color difference between different liquids of experimental group at one point

1.2 单一无机阴离子对 WZ-1 活性影响试验

试验选用 Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 作为试验用无机阴离子,向 140 mL 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 $1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 稀硫酸调节体系初始 pH 至 2.0,然后置于恒温摇床中在 30°C 、 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下培养. 培养过程中,每 12 h 测定培养液 pH 值、ORP 以及 Fe^{2+} 浓度. 试验开始后第 0 h、第 48 h、第 96 h 测定 WZ-1 的累计耗氧量. 试验用金属盐分别为: ZnCl_2 、 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 、 NaF . 试验组设置见表 1.

表 1 单一无机阴离子对 WZ-1 活性影响试验试验组设置¹⁾

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

试验组编号	蒸馏水/mL	菌液/mL	Cl^- 浓度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	NO_3^- 浓度/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	F^- 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
CK-1	10	—	—	—	—
CK-2	—	10	—	—	—
Cl^- -1	—	10	5.0	—	—
Cl^- -2	—	10	10.0	—	—
Cl^- -3	—	10	20.0	—	—
Cl^- -4	—	10	30.0	—	—
NO_3^- -1	—	10	—	1.0	—
NO_3^- -2	—	10	—	3.0	—
NO_3^- -3	—	10	—	5.0	—
NO_3^- -4	—	10	—	10.0	—
F^- -1	—	10	—	—	25.0
F^- -2	—	10	—	—	50.0
F^- -3	—	10	—	—	75.0
F^- -4	—	10	—	—	100.0

1) “—”表示未添加该组分,下同

1.3 模拟电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 活性影响试验

该试验以 1.2 节试验结果为设计依据,分别选取对 WZ-1 活性影响最小的无机阴离子浓度作为模

拟电镀污泥阴离子浸出液中各无机阴离子浓度,其中,试验组初始条件、试验过程和方法同 1.3 节,试验组设置见表 2.

1.4 指标监测分析方法

表 2 模拟电镀污泥无机阴离子浸出液对 WZ-1 活性影响试验试验组设置¹⁾

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

试验组编号	蒸馏水/mL	菌液/mL	Cl ⁻ 浓度/g·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ 浓度/g·L ⁻¹	F ⁻ 浓度/mg·L ⁻¹
CK-1	10	—	—	—	—
CK-2	—	10	—	—	—
Cl ⁻ /NO ₃ ⁻	—	10	2.5	0.5	—
Cl ⁻ /F ⁻	—	10	2.5	—	12.5
NO ₃ ⁻ /F ⁻	—	10	—	0.5	12.5
Cl ⁻ /NO ₃ ⁻ /F ⁻	—	10	2.5	0.5	12.5

(1)pH、ORP 和 Fe²⁺ 监测方法^[22]

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^[23].

(2)WZ-1 累计耗氧量和表观呼吸速率测定方法^[22]

WZ-1 累计耗氧量通过 BI-2000 电解呼吸仪测定,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 单一无机阴离子对 WZ-1 活性的影响

2.1.1 单一无机阴离子对 WZ-1 Fe²⁺ 氧化活性的影响

Acidithiobacillus ferrooxidans 在生物浸出过程中,依靠将 Fe²⁺ 氧化成 Fe³⁺ 这一过程来获得自身生长繁殖所需能量,Fe²⁺ 的氧化程度能表征其代谢活性^[23],Fe²⁺ 氧化率依照式(1)计算.

Fe²⁺ 氧化率 =
$$\frac{(c_{\text{Fe}^{2+}\text{初始}} - c_{\text{Fe}^{2+}\text{剩余}})}{c_{\text{Fe}^{2+}\text{初始}}} \times 100\%$$
 (1)

图 2 为 Cl⁻、NO₃⁻、F⁻ 对 WZ-1 氧化 Fe²⁺ 的影响作用.

从图 2 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 Fe²⁺ 在 60 h 内被完全氧化,Fe²⁺ 氧化平均速率为 114.44 mg·h⁻¹,表明 WZ-1 具有较好的 Fe²⁺ 氧化活性.

由图 2(a)、2(b) 分别可知,低浓度 Cl⁻ (5.0 g·L⁻¹)、NO₃⁻ (1.0 g·L⁻¹) 对 WZ-1 的 Fe²⁺ 氧化活性几乎没有影响.培养 60 h 时,Cl-1、NO₃-1 已氧化 99% 以上的 Fe²⁺,Fe²⁺ 平均氧化速率分别为 115.41 mg·h⁻¹、120.69 mg·h⁻¹,较空白组 CK-2 几乎没有差别.这一结果与张成桂等^[20] 的研究结果有所不同,其研究表明:0.05 mol·L⁻¹ (1.775 g·L⁻¹) 的 Cl⁻ 完全抑制氧化亚铁硫杆菌活性,整个试验过程中,氧化亚铁硫杆菌数量没有增长趋势,pH 亦无下降变化;3.1 g·L⁻¹ 的 NO₃⁻ 亦对氧化亚铁硫杆菌产生完全抑制作用,而 WZ-1 在 3.0 g·L⁻¹ 甚至 5.0 g·L⁻¹ 的 NO₃⁻ 浓度条件下仍具有较好的 Fe²⁺ 氧化活性.当 Cl⁻、NO₃⁻ 浓度上升,WZ-1 的 Fe²⁺ 氧化活性则开始受到抑制,至浓度分别达到 20.0 g·L⁻¹、10.0 g·L⁻¹ 时,WZ-1 完全丧失 Fe²⁺ 氧化活性.这或许由于 WZ-1 分离于制革污泥,制革污水中各种阴离子较为复杂,包括 Cl⁻ 和 NO₃⁻,WZ-1 长期生活于该环境中,对其已产生一定的耐性,但当浓度上升至一定阶段后,WZ-1 还是无法适应高浓度 Cl⁻ 和 NO₃⁻.

由图 2(c) 可知,WZ-1 在 25.0 mg·L⁻¹ F⁻ 存在的条件下,活性受到一定的抑制,但经过近 50 h 的停滞期后,WZ-1 逐渐适应该环境,并开始快速氧化培养液中的 Fe²⁺,至第 96 h 时,Fe²⁺ 氧化率达到 85.87%,亚铁平均氧化率为 66.72 mg·L⁻¹.随着 F⁻ 浓度的不断上升,WZ-1 的 Fe²⁺ 氧化活性受到完全抑制.研究表明:WZ-1 较一般的氧化亚铁硫杆菌对 Cl⁻ 和 NO₃⁻ 有更好的耐受能力,5.0 g·L⁻¹ 的 Cl⁻ 和 1.0 g·L⁻¹ 的 NO₃⁻ 对 WZ-1 的活性几乎没有影响,

25.0 mg·L⁻¹ F⁻ 对 WZ-1 的活性有一定的抑制作用,随着浓度的上升,WZ-1 活性开始受到明显抑制,当 Cl⁻、NO₃⁻ 和 F⁻ 浓度分别达到 20.0 g·L⁻¹、10.0 g·L⁻¹ 和 50.0 mg·L⁻¹ 时,WZ-1 完全失活。

根据上述试验结果可知,试验所用 3 种无机阴离子对 WZ-1 Fe²⁺ 氧化活性的影响顺序为:F⁻ > NO₃⁻ > Cl⁻。

2.1.2 单一无机阴离子对 WZ-1 累计耗氧量和表观呼吸速率的影响

针对 2.1.1 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,以验证无机阴离子对 WZ-1 活性的影响规律。

图 3 分别为 Cl⁻、NO₃⁻、F⁻ 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 12.5 mg·(L·h)⁻¹ 上升至第 48 h 时的 27.5 mg·(L·h)⁻¹,第 96 h 时,其表观呼吸速率又下降至 9.5 mg·(L·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和图 2 的 Fe²⁺ 氧化曲线,发

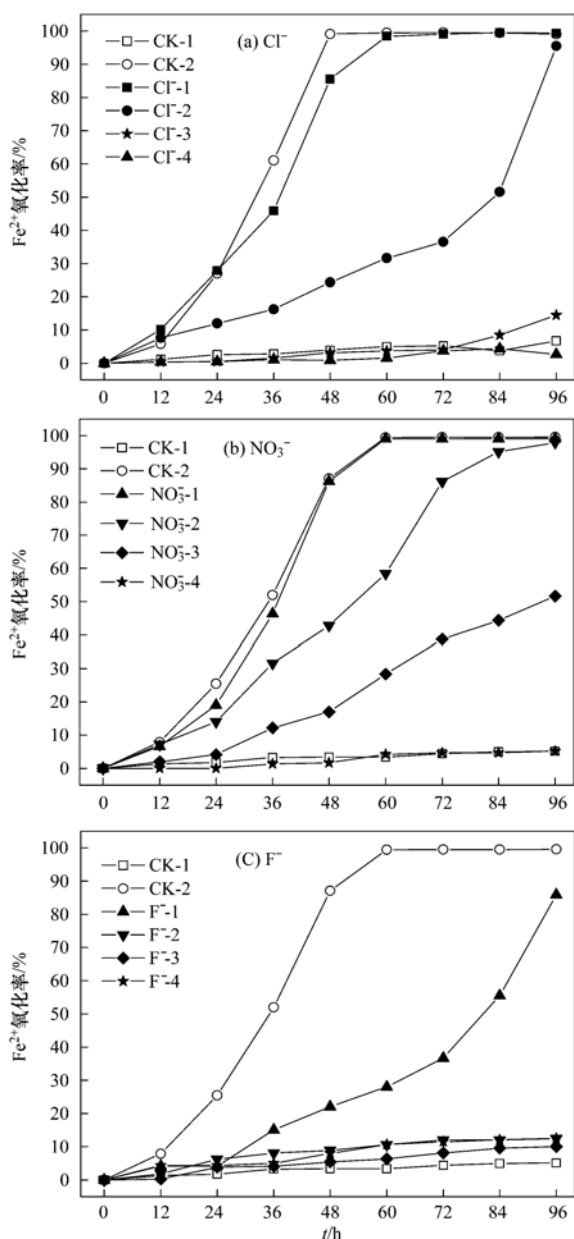


图 2 不同浓度 Cl⁻、NO₃⁻、F⁻ 对 WZ-1 氧化 Fe²⁺ 的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of Cl⁻, NO₃⁻, F⁻ on Fe²⁺ oxidation of WZ-1

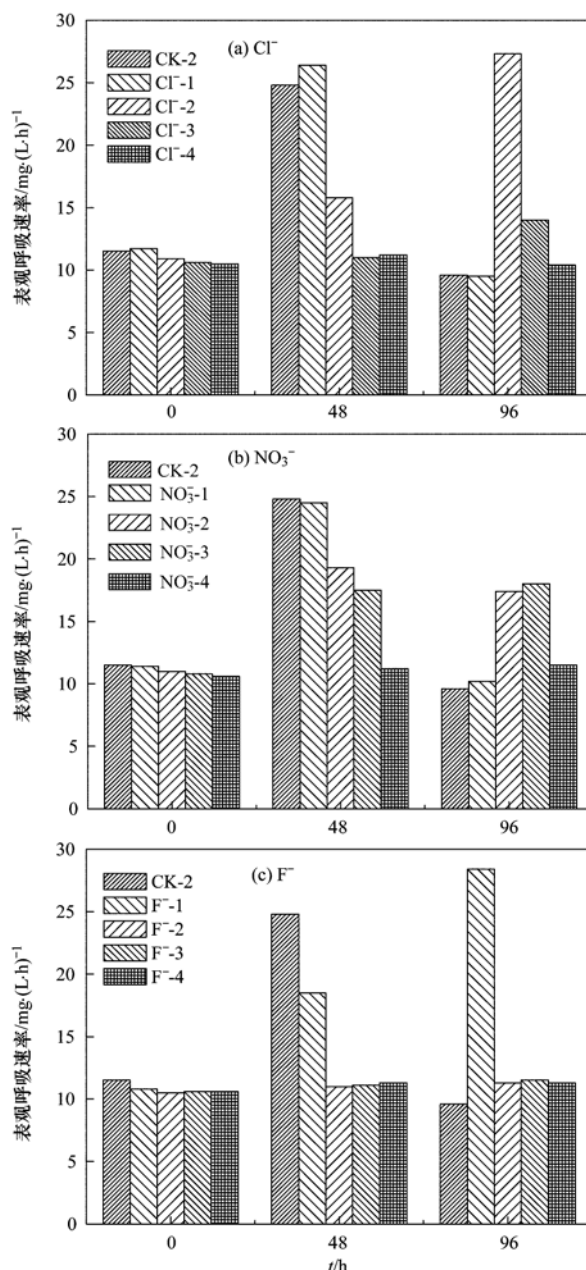


图 3 不同浓度 Cl⁻、NO₃⁻、F⁻ 对 WZ-1 表观呼吸速率的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of Cl⁻, NO₃⁻, F⁻ on the apparent respiratory rate of WZ-1

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,且各变化时刻点与 Fe^{2+} 氧化速率变化时刻点相吻合。

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 进行生命活动的能力方面验证了单一无机阴离子对 WZ-1 活性的影响。WZ-1 呼吸试验的结果与 2.1.1 节的试验结果一致。

2.2 模拟电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 活性的影响

为了考察电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 活性的影响,根据 2.1 节试验结果,选取对 WZ-1 活性抑制作用较小的各无机阴离子浓度配制模拟电镀污泥阴离子浸出液,而预试验结果显示: Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 浓度分别为 $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, WZ-1 完全失活,所有试验组无试验差异,因此, Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 的配制浓度改为: $2.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

氧化亚铁硫杆菌被接种到新鲜的 9K 液体培养基后,能快速氧化其中的 Fe^{2+} ,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^[24],因此,pH 值是氧化亚铁硫杆菌培养过程中的一个重要指标。

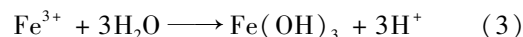
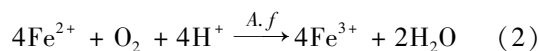


图 4 反映了不同模拟电镀污泥阴离子浸出液对培养液 pH、ORP、 Fe^{2+} 氧化率以及 WZ-1 表观呼吸速率变化的影响。所有试验组的 pH 值在 12 h 内均有所上升,对比 CK-1 的 pH 变化趋势,可知这不是由 WZ-1 氧化 Fe^{2+} 所引起的 pH 值上升,而是由于培养基具有一定的 pH 滞后性所造成的。接种 12 h 后,CK-2 的 pH 值快速上升,至第 48 h 时,pH 达到最大值 2.45,之后由于 Fe^{3+} 水解作用不断释放 H^+ ,培养液的 pH 值持续下降。相应的,CK-2 的 ORP 在前 36 h 缓慢上升,由最初的 356 mV 上升至 448 mV,之后快速上升,至第 96 h 达到 614 mV。比较不同试验组的 pH 值、ORP 变化曲线,可以明显看出不同模拟电镀污泥阴离子浸出液对培养液 pH 值和 ORP 变化的影响差异。结合图 4(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

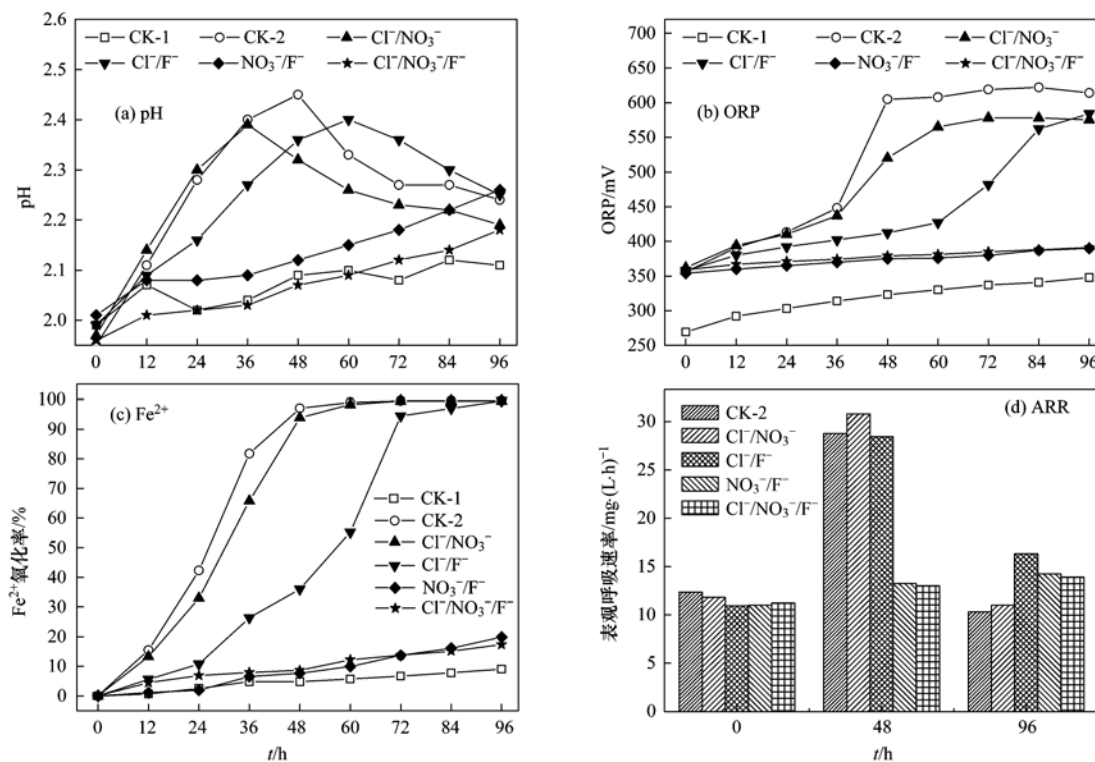


图 4 模拟电镀污泥阴离子浸出液对培养液 pH 值、ORP、 Fe^{2+} 氧化及 WZ-1 表观呼吸速率变化的影响

Fig. 4 Effects of simulated inorganic anion leaching solution of electroplating sludge on changes of pH, ORP, Fe^{2+} oxidation and apparent respiratory of WZ-1

养液中 Fe^{2+} 氧化率达到 50% 以上时,溶液的 ORP 快速上升.

图 4(c) 中不同模拟电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 Fe^{2+} 氧化活性影响的差异明显. $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-/\text{F}^-$ 和 NO_3^-/F^- 这 2 种模拟电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 的 Fe^{2+} 氧化活性抑制最显著, Fe^{2+} 氧化率在试验结束时分别仅为 17.32%、19.82%, 比较 CK-1 可知 WZ-1 几乎完全丧失 Fe^{2+} 氧化活性. 而分别由 Cl^- 、 NO_3^- 和 Cl^- 、 F^- 组成的模拟电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 Fe^{2+} 氧化活性影响较小, 试验中, WZ-1 虽然分别有近 12 h 和 24 h 的停滞期, 但随后即进入对数生长期, 其 Fe^{2+} 氧化速率较快, 分别于第 72 h 和第 96 h 达到 99% 以上的 Fe^{2+} 氧化率, 与此同时, CK-2 达到 99% Fe^{2+} 氧化率的耗时为 60 h. 图 4(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 4(c) 的 Fe^{2+} 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, 不同模拟电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 活性影响的差异明显, Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 配制浓度分别为 $2.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-/\text{F}^-$ 和 NO_3^-/F^- 这 2 种模拟电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 活性产生完全抑制, $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$ 和 Cl^-/F^- 这 2 种模拟电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 活性的影响较小, 5 种模拟电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 活性影响的大小为: $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-/\text{F}^- \geq \text{NO}_3^-/\text{F}^- > \text{Cl}^-/\text{F}^- > \text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$.

3 结论

(1) WZ-1 较一般的氧化亚铁硫杆菌对 Cl^- 和 NO_3^- 有更好的耐受能力, $5.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cl^- 和 $1.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NO_3^- 对 WZ-1 的活性几乎没有影响. WZ-1 对单一 Cl^- 、 NO_3^- 、 F^- 的最大耐受浓度分别为 $10.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $25.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

(2) 根据模拟电镀污泥阴离子浸出液对 WZ-1 活性影响大小的顺序, 从阴离子这一影响因素角度考虑, WZ-1 较适合处理含一定量 Cl^-/F^- 或 $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$ 为主要阴离子组分的电镀污泥, 对同时含有 $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-/\text{F}^-$ 或者 NO_3^-/F^- 的电镀污泥则完全失效.

参考文献:

[1] 周吉奎, 钮因健, 覃文庆. 硫化矿对浸矿细菌(Fe^{2+})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 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 & 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] 李洪枚, 柯家骏. Ni^{2+} 和 Co^{2+} 对氧化亚铁硫杆菌活性的影响[J]. 有色金属, 2000, 52(1): 49-54.

[15] 李洪枚, 柯家骏. Cu^{2+} 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.

[16] 李洪枚, 柯家骏. Mg^{2+} 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.

[17] 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.

[18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 周吉奎, 钮因健, 邱冠周, 等. 闪锌矿对氧化亚铁硫杆菌 Fe^{2+} 氧化活性的影响[J]. 有色金属, 2003, **55**(4): 51-53.
- [22] 谢鑫源, 孙培德, 楼菊青, 等. 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[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 209-216.
- [23] 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.
- [24] Xiong H X, Guo R. Effects of chloride acclimation on iron oxyhydroxides and cell morphology during cultivation of *Acidithiobacillus ferrooxidans* [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **45**(1): 235-240.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd (II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe (II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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