

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

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

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究	郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)
北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征	于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)
奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析	张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)
华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素	苏彬彬 (2519)
北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究	方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2526)
民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究	海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)
醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究	张凡, 王建海, 王小臣, 王建昕 (2539)
微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究	曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)
生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析	李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)
炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究	周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)
春季东、黄海溶解甲烷的分布和海气交换通量	曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)
千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究	董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)
新安江流域土地利用结构对水质的影响	曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)
长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析	孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)
河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性	杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)
水藻暴发的影响因素定量化研究初步	张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)
深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响	卢金锁, 胡亚潘 (2611)
结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度	周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)
Subwet 模型在人工湿地设计中的应用	李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)
白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应	何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响	许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周峰 (2642)
铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究	汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)
铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究	杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)
不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响	赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)
邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H ₂ O ₂ 降解机制研究	刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)
二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd ²⁺ 离子的吸附研究	张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)
酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附	蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)
基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni ²⁺ 的吸附性能	张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)
树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐	王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)
Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究	朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)
化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究	王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)
镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究	陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)
HRT 对 A ² O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响	刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)
发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟	张超, 陈银广 (2741)
强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究	熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)
污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响	周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)
不同粒径铁铝泥对砷(Ⅲ)的吸附效果	林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)
我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析	仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)
浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离	徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)
三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响	张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)
吉林前郭水田土壤有机碳垂直分布规律和储量研究	汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)
关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例	张晓伟, 许明祥 (2793)
三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究	黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)
土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C 连续标记法	史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)
西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析	张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)
丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价	李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)
农药企业场地苯系物污染风险及调控对策	庞博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)
水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响	张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)
硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响	刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)
零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用	周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)
2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果	全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)
反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别	刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)
1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究	张倩, 王弘宇, 桑穗姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)
1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究	陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)
微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解	张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)
扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究	周际海, 孙向武, 胡锋, 李辉信 (2894)
固定化 <i>Lysinibacillus cresolovorans</i> 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解	李婷, 任源, 韦朝海 (2899)
生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析	黄翔峰, 张树聪, 彭开彰, 陆丽君, 刘佳 (2906)
A ² O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性	高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞薇, 白志辉 (2912)
生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究	李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)
专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)	

零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用

周庆^{1, 2, 3, 4}, 陈杏娟^{2, 3}, 郭俊^{2, 3}, 孙国萍^{2, 3}, 许玫英^{2, 3*}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 广东省微生物研究所广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广州 510070; 3. 广东省华南应用微生物重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 广州 510070; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 以脱色希瓦氏菌(*Shewanella decolorationis*) S12 为实验菌株, 研究了零价铁(ZVI)存在条件下微生物的厌氧偶氮还原特性及其最佳反应条件. 结果表明, ZVI可显著促进菌株S12的厌氧偶氮还原速率. 培养30 h后含有20 mmol·L⁻¹微米级ZVI和S12菌的培养体系中, 菌株S12对1 mmol·L⁻¹苋菜红的脱色率达100%, 比不含ZVI的S12菌培养体系和只含ZVI的体系的偶氮还原率分别提高了23.16%和94.66%; 在额外含20 mmol·L⁻¹甲酸钠的培养体系中, ZVI的存在也使S12菌对苋菜红的脱色率提高了20.54%. 此外, ZVI的存在可显著提高培养体系对偶氮染料的耐受能力. 在投加ZVI和菌株S12培养体系中, 连续批量投加浓度为1 mmol·L⁻¹的苋菜红可在276 h内实现11次有效脱色, 而不含ZVI的S12菌培养体系中只能实现3次有效脱色. 进一步的研究发现, ZVI与菌株S12协同培养体系的最适反应pH为9.0, 最适ZVI投加量为60 mmol·L⁻¹. 与毫米级和纳米级ZVI颗粒相比, 微米级ZVI颗粒具有更强的促进作用. 本研究结果将为利用ZVI协同促进偶氮染料的生物治理效果提供科学参数.

关键词: 偶氮还原; 脱色希瓦氏菌 S12; 零价铁(ZVI); 苋菜红; 脱色率

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2855-07

Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the *Shewanella decolorationis* S12

ZHOU Qing^{1, 2, 3, 4}, CHEN Xing-juan^{2, 3}, GUO Jun^{2, 3}, SUN Guo-ping^{2, 3}, XU Mei-ying^{2, 3}

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou 510070, China; 3. State Key Laboratory of Applied Microbiology Ministry-Guangdong Province Jointly Breeding Base, South China, Guangzhou 510070, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Characteristics and optimal reaction conditions of anaerobic azoreduction by the *Shewanella decolorationis* S12 in the presence of zero-valent iron (ZVI) were evaluated in this study. The results showed that the presence of ZVI significantly enhanced the decolorization rate of azo dye. In the presence of 20 mmol·L⁻¹ ZVI, the decolorization rate of 1 mmol·L⁻¹ amaranth reached up to 100% by the *Shewanella decolorationis* S12 after 30 h incubation, which was significantly higher than 23.16% and 94.66% in the pure strain S12 and pure ZVI treatment systems, respectively. When 20 mmol·L⁻¹ of sodium formate was added in the medium, ZVI still improved the decolorization rate of amaranth by 20.54%. In addition, the presence of ZVI significantly increased the azo dye treatment amount in the ZVI plus S12 system. In the system with ZVI, 1 mmol·L⁻¹ amaranth was completely reduced 11 times in fed-batch process within 276 h, while the dye could only be completely reduced 3 times in the system without ZVI. The optimal pH and the Fe⁰ dose for the ZVI plus S12 system was 9.0 and 60 mmol·L⁻¹, respectively. The microscale ZVI was more suitable for the decolorization than those with larger size and the nanoscale ZVI. This study may provide some useful information for improving the biodegradation of azo dye in the treatment system with ZVI.

Key words: azo reduction; *Shewanella decolorationis* S12; zero-valent iron; amaranth; decolorization rate

偶氮染料是一类含有偶氮基(—N=N—)的芳香烃化合物, 其中偶氮基常与一个或多个芳香环相连构成一个共轭体系而作为染料的发色基团, 助色基团为氨基、羟基、甲基和磺酸基等. 随着现代化学工业的发展, 染料广泛应用于多种行业的染色及印花过程^[1], 其中偶氮染料的使用量最大, 大约70%的合成染料是以偶氮化学为基础制成的^[2]. 目前使用的偶氮染料多达3 000多种, 几乎全部为人工合成产品, 其化学稳定性高、较难生物降解, 而且多数偶氮染料及其代谢中间产物都具有强烈的致突变

性、致癌性、致畸性及其他毒性, 直接排放于水体中将对生态环境构成威胁、对人体健康造成危

收稿日期: 2012-10-15; 修订日期: 2013-01-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2012CB22307); 国家自然科学基金项目(21207019); 广东省自然科学基金研究团队项目(9351007002000001); 广东省自然科学基金项目(S2011010004267, S2011040000770, 10451007002006300); 广东省国际合作项目(2011B050400005); 广东省科学院优秀青年科技人才基金项目(rcjj201103)

作者简介: 周庆(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物学, E-mail: qing_zhou10@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xumy@gdim.cn

害^[3]. 因此,有关偶氮染料降解的研究引起了人们广泛的重视.

零价铁(ZVI)还原技术近20年来被广泛应用于污染控制与修复领域,可促进多种难降解污染物质的转化,如氯代烃、硝基芳烃、无机盐、重金属、偶氮染料等^[4-7]. 当ZVI在适当的条件下与偶氮染料接触时,ZVI氧化反应产物中新生态的[H]和 Fe^{2+} ,能够直接将染料中的偶氮基还原成胺基,进而破坏染料的发色或助色基团,使之断链并失去发色能力^[8]. 然而偶氮染料脱色以后产生的胺基化合物却不能被ZVI继续降解,因此很多学者开始研究ZVI与微生物协同处理偶氮染料. 汤文琪等利用ZVI-厌氧污泥体系处理活性艳红X-3B,在相同实验条件下协同处理比单用ZVI或厌氧污泥体系达到相同脱色率所需时间分别缩短了约50%和70%^[9]. Liu等^[10]利用内置零价铁床-UASB工艺,实现了活性污泥对人工配水中染料X-3B的高效脱色. Zhang等^[11]同样利用内置ZVI-UASB工艺实现了厌氧污泥对染料废水的高效脱色. 在厌氧条件下,ZVI可作为电子供体协同微生物促进污染物质的还原降解^[12, 13],ZVI在厌氧条件下腐蚀产氢,为微生物持续提供还原有机污染物所必需的电子供体,从而加速污染物的降解^[14, 15]. 目前关于ZVI与微生物协同处理偶氮染料废水的研究已经开展,但采用的微生物都是活性污泥而未涉及纯培养微生物,而对ZVI与脱色微生物协同作用偶氮还原的机制还了解甚少.

本研究以本实验室分离自印染废水处理系统的高效脱色微生物脱色希瓦氏菌S12为对象,开展了ZVI与脱色菌株协同作用偶氮染料脱色的特性研究,并考察了该反应的最适pH、ZVI投加量和ZVI粒径等关键影响因素.

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 菌株

脱色希瓦氏菌(*Shewanella decolorationis*)S12是本实验室从广州某印染厂废水处理系统的活性污泥中分离纯化得到的希瓦氏菌新种^[16]. 该菌株已保藏于中国典型培养物保藏中心(保藏号为CCTCC M203093)和日本东京大学应用微生物研究所(保藏号为IAM 15094T),并已授权了国家发明专利(专利号ZL20031011236117).

1.1.2 培养基

好氧生长LB培养基:胰蛋白胨 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;酵母

抽提物 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; NaCl $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

厌氧还原培养基: $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $5.7\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{KH}_2\text{PO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $3.3\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; NH_4Cl $18.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; 丁二酸钠 $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; 酵母提取物 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; 甲酸钠或ZVI $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; 苋菜红 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 培养基pH值采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl和 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH调节.

1.1.3 主要试剂和仪器

偶氮染料苋菜红(Amaranth; C. I. 16185,最大吸收峰为520 nm)购自Sigam公司,为分析纯; $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (分析纯,纯度 $\geq 99.5\%$,广州化学试剂厂)、块状铁(纯度 $\geq 99.97\%$,A Johnson multhey Company)、微米级ZVI(纯度 $\geq 99.97\%$,广州化学试剂厂).

DU640紫外分光光度计(Beckman公司)、Bugbox厌氧工作站(Ruskinn公司).

1.2 方法

1.2.1 实验方法

将灭菌厌氧还原培养基30 mL分装于35 mL玻璃瓶中,放入Bugbox厌氧工作站中静置过夜,使溶液中的氧气通过平衡而排除. 将在LB培养基中好氧培养12 h(30°C , $160\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)、处于对数后期的S12菌液于 $6000\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心10 min收集菌体,用PBS缓冲液(pH 7.4)洗涤菌体2次,然后重悬于上述缓冲液中制成菌悬液,使菌体密度(D_{600})为1.0. 菌悬液以2%(体积比)接种量接种于厌氧还原培养基中,在厌氧培养箱中 30°C 静置培养. 以不接种菌体和不加电子供体的培养基为对照,按设计时间取样进行分析. 当使用ZVI为电子供体时,ZVI经过紫外照射灭菌后添加于培养体系中.

每次实验按上述步骤进行,分别考察ZVI+S12体系中pH、ZVI投加量、ZVI粒径和连续投加染料对苋菜红脱色效果的影响.

1.2.2 分析方法

所取样品经过 $12000\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心1 min,取其上清液采用DU640紫外分光光度计在苋菜红最大吸收波长520 nm下测定其吸光值,按以下公式计算其脱色率:

$$\text{脱色率} = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \times 100\%$$

式中, A_0 、 A_1 分别为脱色前后样品的吸光度.

采用Sevnmulti型pH/电导率综合测试仪测定培养液的pH值. 采用邻菲罗啉分光光度法测定样品中的 Fe^{2+} 浓度^[17].

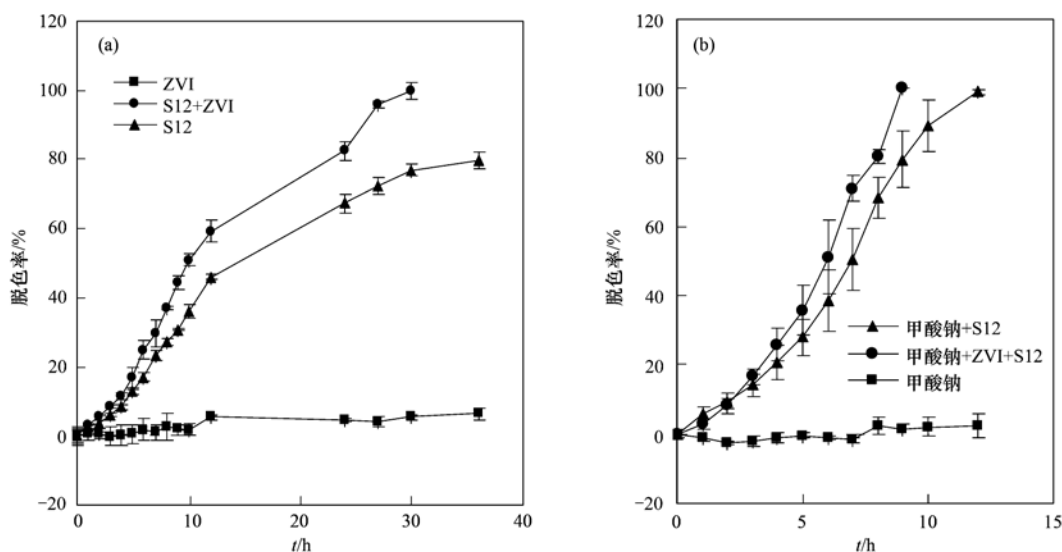
2 结果与讨论

2.1 ZVI 对 S12 菌还原苋菜红的影响

Hong 等^[18]前期研究表明 S12 菌能以甲酸钠、乳酸钠、氢气等作为电子供体实现苋菜红的脱色, 但丁二酸钠不能作为电子供体, 只能作为碳源被利用. 酵母抽提物中因含有部分有机酸, 故同样可以充当电子供体作用. 但本实验反应液中酵母抽提物添加量非常少, 仅为 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 因此不能满足苋菜红完全脱色的需要. 本实验采用甲酸钠添加与否的操作, 研究了在电子供体充足和不充足条件下, ZVI 投加对 S12 菌偶氮还原的影响(图 1)以及对 S12 菌生物量的作用(图 2), 其中甲酸钠、微米级 ZVI 的投加量分别为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 各体系 pH 均为 7.0.

结果表明, ZVI 本身对苋菜红化学还原作用的能力很弱, 在 30 h 内苋菜红脱色率仅为 5.34%. 在没有添加电子供体甲酸钠即反应体系电子供体不足条件下, S12 菌本身对苋菜红具有一定的脱色作用, 在 30 h 其对苋菜红的脱色率达到 76.84%. 而 ZVI 的投加则使得 S12 菌对 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 苋菜红在

30 h 脱色完全, 与只有 S12 菌的反应体系相比, 在相同反应时间内脱色率提高了 23.16%, 明显地促进了苋菜红的脱色[图 1(a)]. 另一方面, 当反应体系中添加甲酸钠使其处于电子供体充足的条件下, S12 菌对苋菜红的脱色率在 9 h 即达到 79.46%, 而额外投加 ZVI 的体系在相同时间内苋菜红的脱色率则达到 100%, 比前者提高了 20.54% [图 1(b)]. 这说明了在厌氧体系中 ZVI 的存在能够促进 S12 菌在不充足和充足电子供体下对苋菜红的脱色, 且 ZVI 对 S12 菌在不充足电子供体下偶氮还原的促进作用更为明显. 另外, 测定反应过程的菌体密度(D_{600})发现, 在 ZVI 存在条件下, 48h 时 S12 菌体密度(D_{600})从 0.008 增长到了 0.018, 而无 ZVI 存在条件下菌体密度(D_{600})从 0.008 仅增长到 0.010(图 2), 这说明了 ZVI 可以作为 S12 菌的又一电子供体实现偶氮染料的脱色以及菌体生物量的增加. 以上结果与程婷等^[19]研究 ZVI 对 2,4-二氯酚的降解作用时获得的结果一致, 即 Fe^0 既可以作用电子供体被微生物利用, 也可促进微生物在其他有机基质作为电子供体条件下对污染物的去除.



(a) 没有添加甲酸钠, 电子供体不足条件; (b) 添加甲酸钠, 电子供体充足条件

图 1 ZVI 对 S12 菌还原苋菜红的影响

Fig. 1 Effects of ZVI on the amaranth reduction by the *Shewanella decolorationis* S12

2.2 连续投加苋菜红条件下 S12 菌的偶氮还原能力

产物的连续积累会对微生物的活性产生负面的影响, 通过连续投加苋菜红来研究微生物对染料的脱色效果, 可以反映不同体系对这种毒性作用的耐受能力. 因此, 本实验设计在电子供体不足条件下, 在 S12 和 S12 + ZVI 体系的一个营养过程中连续投加 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 苋菜红, 研究各阶段苋菜红的脱色情

况(图 3).

图 3(a) 表明了 S12 体系中连续投加 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 苋菜红能够实现 3 次有效脱色, 第一次脱色完全所需的时间为 56 h, 其后两次脱色时间延长至 72 h, 第 4 次投加苋菜红在 72 h 其脱色率只达到 80.38%. 这很可能是偶氮键断裂生成的苯胺类物质积累, 从而对微生物产生了毒害抑制作用^[20]. 然

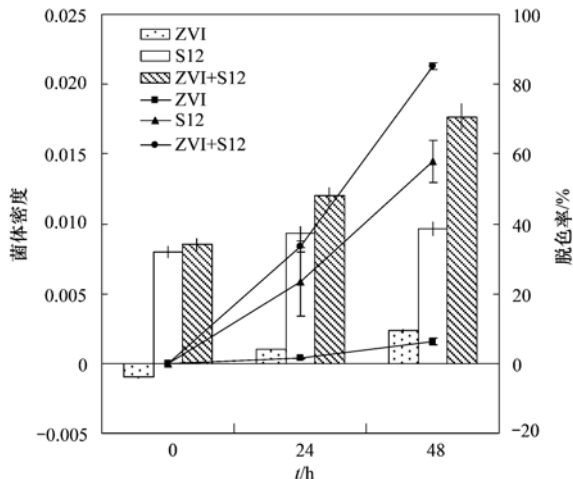


图2 厌氧脱色过程中 S12 的生长情况

Fig. 2 Anaerobic growth of S12 in the reduction of amaranth

而,在 S12 + ZVI 体系中连续投加 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 苋菜红却可以实现 11 次有效脱色;第一次苋菜红在 36 h 脱色完全,其后 10 次投加的苋菜红其脱色速率都

较第一次要快,在 24 h 内的脱色率维持在 98.85% ~ 85.97% 之间[图 3(b)]. 这可能是因为 ZVI 减弱了苋菜红厌氧脱色产物对 S12 菌的毒害作用,而且额外添加的电子供体 ZVI 可以被 S12 菌利用进行偶氮呼吸生长从而获得生物量的增加,其对染料的还原能力也不断增强. 当第 12 次投加苋菜红时,由于营养物质耗尽,苋菜红无法实现完全脱色,在 24 h 其脱色率仅达到 42%. 这些结果说明了 ZVI 作为电子供体加快了 S12 菌对苋菜红的脱色,也加强了 S12 菌对脱色产物积累产生的毒害作用的耐受能力.

在连续投加苋菜红过程中,随着苋菜红的不断还原 ZVI 的消耗越来越大,在实际应用中可能会导致 ZVI 的流失. 但是体系氧化生成的 Fe^{2+} 可以通过合适的方法进行回收再利用. 根据 Qiu 等^[21]研究方法,将反应后溶液中的 Fe^{2+} 进行回收,生成的 ZVI 固定在 SiO_2 上,形成 $\text{SiO}_2 @ \text{FeOOH} @ \text{Fe}$,实现了 ZVI 的再生利用,回收率可达 59.99%.

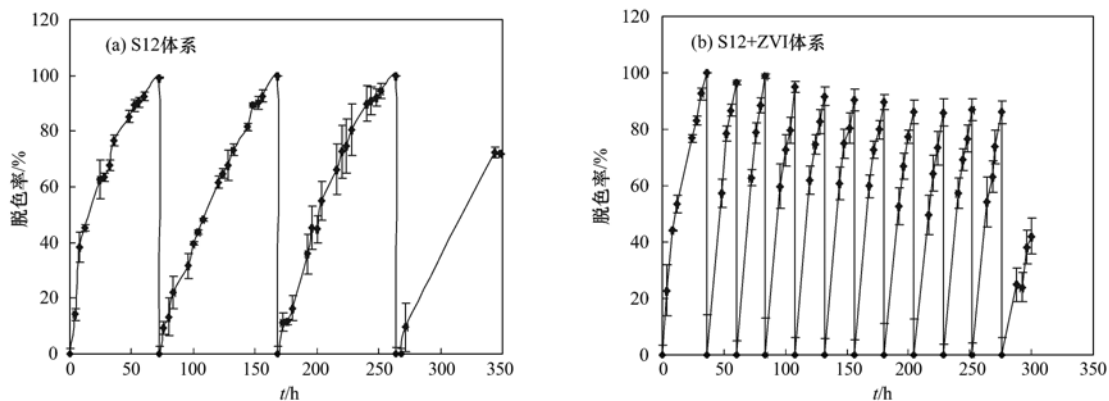


图3 不同体系中连续投加苋菜红的脱色效果

Fig. 3 Decolorization of amaranth in fed-batch process in the S12 + ZVI and S12 systems

2.3 反应初始 pH 值对不同体系脱色效率的影响

考虑到菌株 S12 的生长以及实际印染废水的 pH 范围,实验选定溶液初始 pH 为 5.0、6.0、7.0、8.0、9.0,分别考察了单独的 S12、单独的 ZVI 以及 ZVI + S12 体系在不同 pH 条件下苋菜红的脱色效果(图 4).

由图 4(a)可知,菌株 S12 对苋菜红的脱色能力随着 pH 的升高而增强, pH 9.0 条件下在反应 36 h 后就实现了苋菜红的完全脱色,而此时 pH 5.0、6.0、7.0、8.0 条件下的苋菜红脱色率分别为 3.19%、54.89%、78.47%、85.27%. 测定脱色后溶液 pH 发现,在碱性条件下脱色后的培养液 pH 都能变为中性,说明 S12 在代谢过程中能够产生有机酸调节溶液的 pH;但酸性条件下脱色后的培养液

pH 均无明显变化. 相反,单独的 ZVI 体系中苋菜红的脱色效率却随着 pH 的升高而减弱,36 h 在 pH 5.0、6.0、7.0、8.0、9.0 条件下的脱色率分别为 87.62%、27.56%、17.08%、15.63% 和 6.91% [图 4(c)]. ZVI 与苋菜红的直接还原脱色反应在酸性条件下更容易发生,在碱性条件下几乎没有脱色作用. 这是因为在酸性条件下 ZVI 产生自由电子的能力增强,且不易生成铁矿物沉淀^[22]. 在 ZVI + S12 体系中由于同时具有 S12 的生物还原作用和 ZVI 的化学作用,其受 pH 的影响将更为复杂. 但是实验结果表明 ZVI + S12 体系中同样是 pH 越高苋菜红的脱色效率越强,24 h 在 pH 9.0 条件下已经完成了 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 苋菜红的脱色[图 4(b)],而 pH 5.0、6.0、7.0、8.0 条件下其对苋菜红的脱色率分别为

32.85%、74.12%、82.97% 和 94.48%。另外, pH 8.0 和 9.0 条件下 ZVI + S12 体系脱色后其溶液的 pH 均变为 6.8 左右, 这说明 S12 在 ZVI + S12 中同样能够产酸并且调节溶液 pH, 使 ZVI 产生自由电子

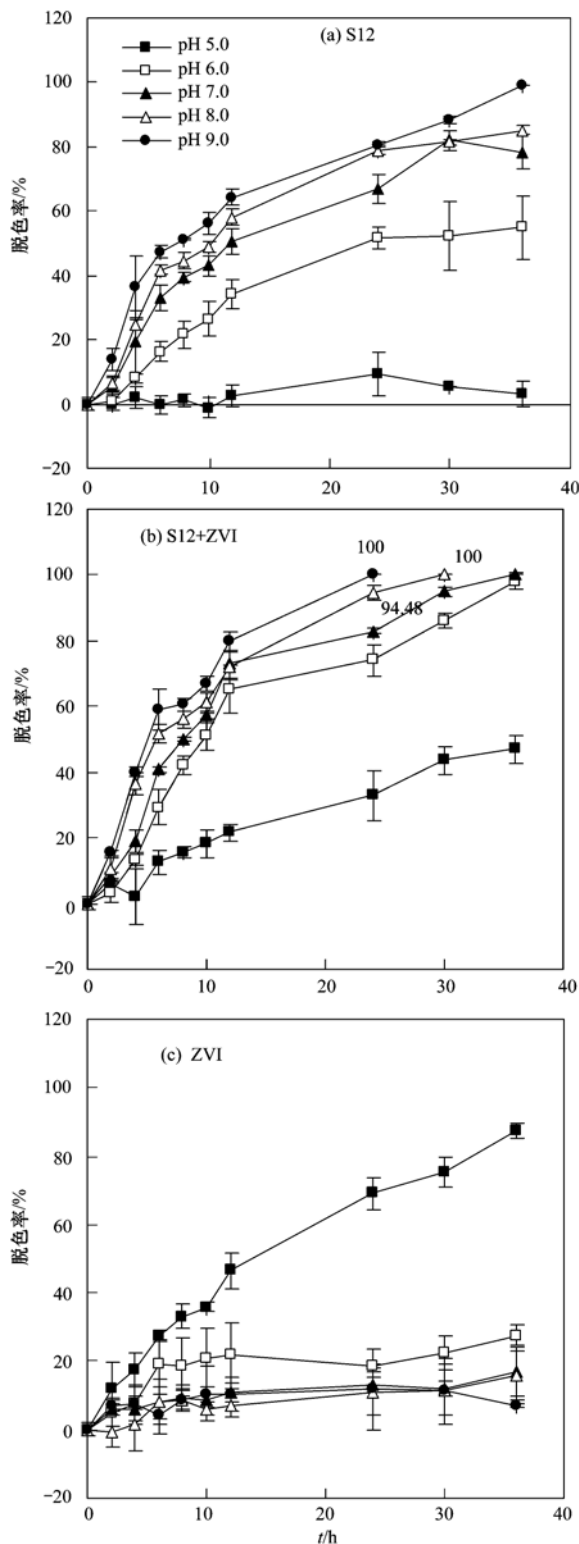


图 4 pH 对不同体系苋菜红脱色的影响

Fig. 4 Effects of pH on the decolorization of amaranth in the S12, S12 + ZVI and ZVI systems

的能力增强, 从而不易生成铁矿物沉淀, 有效减弱 ZVI 的钝化过程。

在 pH 5.0 ~ 9.0 条件下, ZVI 的投加不同程度都提高了苋菜红的还原脱色。在 24 h 时, pH 5.0 ~ 9.0 条件下 ZVI + S12 体系中的脱色率分别为 32.85%、74.12%、82.97%、94.48% 和 100%, 比单独的 S12 体系的脱色率分别提高了 29.66%、23.57%、16.07%、13.77% 和 19.29%, 比单独的 ZVI 体系的脱色率分别提高了 -36.20%、55.39%、69.91%、83.76% 和 88.29%。在酸性条件 pH 5.0 条件下, ZVI 体系的化学反应的脱色率反而比 ZVI + S12 体系的脱色率要高, 这可能是因为无活性的 S12 附着在 ZVI 表面, 阻碍了其与苋菜红的接触, 从而减低了其化学反应的速率。

2.4 ZVI 投加量对 ZVI + S12 体系脱色效率的影响

不同添加量的电子供体对染料的脱色效率可能产生不同的影响, 本实验在苋菜红浓度为 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、初始 pH 为 7.0 的反应体系中, 铁粉投加量分别为 0、20、60 和 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 研究不同 ZVI 投加量对苋菜红脱色效果的影响(图 5)。

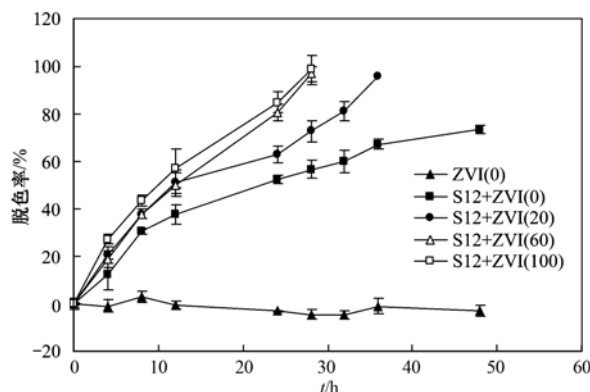


图 5 ZVI 投加量对苋菜红脱色效果的影响

Fig. 5 Effects of different ZVI doses on the decolorization of amaranth

由图 5 可以看出, 投加不同量的 ZVI 对菌株 S12 苋菜红脱色产生不同程度的促进作用。当 ZVI 投加量从 0 增加到 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应 28 h 的脱色率从 56.7% 增加到 100%。而当其投加量从 60 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 苋菜红脱色率仅提高了 2%。说明了 ZVI 的投加量并非越多越好, 这与 Fernandez-Sanchez 等^[23]在研究铁剂量对铁与微生物接触表面的影响结果类似。这主要是因为 ZVI 在水溶液中逐渐被腐蚀, 投加量低时 ZVI 腐蚀产生 H_2 的速率低, 难以满足 S12 菌对电子供体的需求, 从而导致脱色速率减慢; 而当 ZVI 投加量过高时, 会产生更多的 H_2 和 OH^- , 引起体系 pH 值上升, 使

得反应过程中产生的部分 Fe^{2+} 在 ZVI 表面生成铁矿物沉淀,影响了 ZVI 的持续氧化溶出^[24],或铁矿物沉积在微生物表面,降低了生物活性^[25]. 因此 ZVI 的投加量控制在 $60 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右为宜.

同时测定溶液中脱色后生成 Fe^{2+} 的量可知,各体系溶液中的 Fe^{2+} 浓度在 $5 \sim 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 本实验室前期研究发现低浓度的可溶性 Fe^{2+} 氧化和 Fe^{3+} 还原对偶氮还原都有一定的促进作用^[26]. 由此可知,在 ZVI + S12 体系中脱色后溶液生成的 $5 \sim 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Fe^{2+} 不会对 S12 产生毒害作用. 相反,形成的低浓度的 Fe^{2+} 对 S12 脱色苋菜红还起到了促进作用.

2.5 ZVI 粒径对 ZVI + S12 体系脱色效率的影响

由于 ZVI 的粒径及其与细菌细胞的附着关系会对细菌降解污染物的活性产生很大影响,因此本节实验考察了在 ZVI + S12 体系中不同粒径 ZVI (粒径 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 的块状铁、 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 的微米铁和纳米铁)对菌株 S12 苋菜红脱色效果的影响. 实验根据 Hoag 等的方法运用茶多酚合成纳米铁^[27],反应液中 ZVI 投加量 $60 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,初始 pH 为 7.0.

实验结果表明,不同粒径 ZVI 对菌株 S12 苋菜红脱色产生不同程度的影响. 在 28 h 时,块状铁、微米铁和纳米铁的投加使得苋菜红的脱色率分别达到 77.05%、100% 和 46.72%,而没有添加 ZVI 的体系中苋菜红的脱色率为 54.8% (图 6). 由此可见,块状铁和微米铁的投加明显促进了菌株 S12 对苋菜红的脱色能力,使脱色率分别提高了 22.25 和 45.20 个百分点. 相反,纳米铁的投加对菌株 S12 的脱色产生了抑制作用,脱色率降低了 8.08 个百分

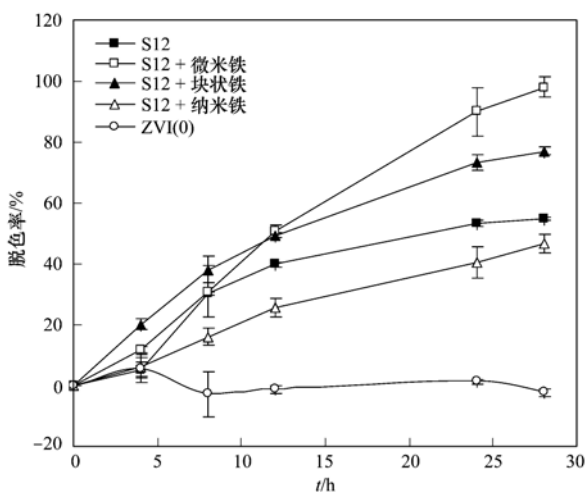


图 6 不同粒径 ZVI 对苋菜红脱色效果的影响

Fig. 6 Effects of different sizes of ZVI on the decolorization of amaranth in the S12 + ZVI system

点. 虽然理论上表明, ZVI 粒径越小其比表面积越大,表面与溶液中的溶质接触的活性质点就越多,越有利于反应的进行^[28]. 但是当 ZVI 粒径足够小时,它可以通过细胞膜进入细胞内部,对微生物造成一定的毒害作用^[29],从而造成细胞生物量的减少和活性的减弱. 由图 7 也可知,纳米铁的投加明显减少了溶液中菌株 S12 的数量. 由此可见,微米铁更适合与菌株 S12 协同作用实现偶氮染料的还原.

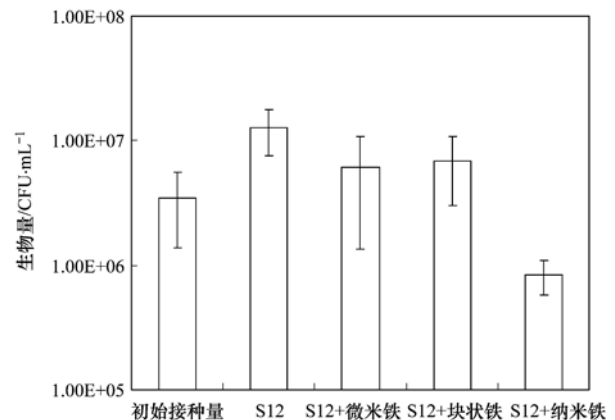


图 7 不同 ZVI 粒径下 28 h 时的生物量

Fig. 7 Biomass of S12 after 28 h reaction with difference sizes of ZVI

3 结论

(1) 厌氧条件下,无论反应体系中存在不存在甲酸钠等外加的电子供体, ZVI 均能够促进脱色希瓦氏菌 S12 对苋菜红的脱色. 在不存在外加电子供体的体系中, ZVI 对菌株 S12 脱色的促进作用更为明显. ZVI 主要是作为菌株 S12 还原偶氮染料的一种电子供体,使 S12 菌获取能量生长,而 ZVI 与偶氮染料的化学作用则非常微弱.

(2) 在连续投加苋菜红条件下, S12 + ZVI 体系能够实现苋菜红 11 次有效脱色,单独的菌株 S12 体系则仅能实现 3 次有效脱色. 可见, ZVI 可有效消除脱色产物积累对菌株 S12 所产生的毒害作用.

(3) 在 S12 + ZVI 体系中,苋菜红脱色的最适 pH 为 9.0、最适 ZVI 投加量为 $60 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、最适 ZVI 粒径为、微米级颗粒. S12 + ZVI 体系比单独的 S12 体系能在更广范围内实现苋菜红的有效脱色.

(4) 在 S12 + ZVI 体系中,菌体能够产酸并且调节溶液 pH,从而有效减弱 ZVI 的钝化过程. 而 ZVI 氧化产生的一定浓度的 Fe^{2+} 不会对菌株 S12 产生毒害作用,并且生成的 Fe^{2+} 可以通过合适的方法回收再利用.

参考文献:

- [1] Jin X C, Liu G Q, Xu Z H, *et al.* Decolorization of a dye industry effluent by *Aspergillus fumigatus* XC6 [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **74**(1): 239-243.
- [2] Saratale R G, Saratale G D, Chang J S, *et al.* Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: a review[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2011, **42**(1): 138-157.
- [3] Zhao X H, Hardin I R. HPLC and spectrophotometric Analysis of biodegradation of azo dyes by *Pleurotus ostreatus* [J]. Dyes and Pigments, 2007, **73**(3): 322-325.
- [4] Chatterjee S, Lim S R, Woo S H. Removal of Reactive Black 5 by zero-valent iron modified with various surfactants [J]. Chemical Engineering Journal, 2010, **160**(1): 27-32.
- [5] Farrell J, Kason M, Melitas N, *et al.* Investigation of the long-term performance of zero-valent iron for reductive dechlorination of trichloroethylene[J]. Environmental Science and Technology, 2000, **34**(3): 514-521.
- [6] Keum Y S, Li Q X. Reduction of nitroaromatic pesticides with zero-valent iron[J]. Chemosphere, 2004, **54**(3): 255-263.
- [7] Üzümlü C, Shahwan T, Eroğlu A E, *et al.* Application of zero-valent iron nanoparticles for the removal of aqueous Co^{2+} ions under various experimental conditions[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, **144**(2): 213-220.
- [8] Lin Y T, Weng C H, Chen F Y. Effective removal of AB24 dye by nano/micro-size zero-valent iron [J]. Separation and Purification Technology, 2008, **64**(1): 26-30.
- [9] 汤文琪, 肖利平, 戴友芝, 等. Fe^0 -厌氧微生物体系处理活性艳红 X-3B 的试验研究[J]. 环境工程学报, 2009, **3**(8): 1425-1428.
- [10] Liu Y W, Zhang Y B, Quan X, *et al.* Effects of an electric field and zero valent iron on anaerobic treatment of azo dye wastewater and microbial community structures [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2578-2584.
- [11] Zhang Y B, Jing Y W, Zhang J X, *et al.* Performance of a ZVI-UASB reactor for azo dye wastewater treatment[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2011, **86**(2): 199-204.
- [12] Scherer M M, Richter S, Valentine R L, *et al.* Chemistry and microbiology of permeable reactive barriers for in situ groundwater clean up[J]. Critical Reviews in Microbiology, 2000, **26**(4): 221-264.
- [13] Karri S, Sierra-Alvarez R, Field J A. Zero valent iron as an electron-donor for methanogenesis and sulfate reduction in anaerobic sludge[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, **92**(7): 810-819.
- [14] Shin K H, Cha D K. Microbial reduction of nitrate in the presence of nanoscale zero-valent iron[J]. Chemosphere, 2008, **72**(2): 257-262.
- [15] Rosenthal H, Adrian L, Steiof M. Dechlorination of PCE in the presence of Fe^0 enhanced by a mixed culture containing two *Dehalococcoides* strains[J]. Chemosphere, 2004, **55**(5): 661-669.
- [16] Xu M Y, Guo J, Cen Y H, *et al.* *Shewanella decolorationis* sp. nov., a dye-decolorizing bacterium isolated from activated sludge of a waste-water treatment plant [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2005, **55**: 363-368.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 368-370.
- [18] Hong Y G, Chen X J, Guo J, *et al.* Effects of electron donors and acceptors on anaerobic reduction of azo dyes by *Shewanella decolorationis* S12[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **74**(1): 230-238.
- [19] 程婷, 戴友芝, 罗春香, 等. 不同电子供体对 2, 4-二氯酚还原脱氯的影响[J]. 微生物学通报, 2008, **35**(8): 1209-1213.
- [20] Jadhav U U, Dawkar V V, Ghodake G S, *et al.* Biodegradation of Direct Red 5B, a textile dye by newly isolated *Comamonas* sp. UVS[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **158**(2-3): 507-516.
- [21] Qiu X H, Fang Z Q, Liang B, *et al.* Degradation of decabromodiphenyl ether by nano zero-valent iron immobilized in mesoporous silica microspheres [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **193**: 70-81.
- [22] Samarghandi M R, Zarrabi M, Amrane A, *et al.* Kinetic of degradation of two azo dyes from aqueous solutions by zero iron powder: determination of the optimal conditions[J]. Desalination and Water Treatment, 2012, **40**(1-3): 137-143.
- [23] Fernandez-Sanche J M, Sawvel E J, Alvarez P J J. Effect of Fe^0 quantity on the efficiency of integrated microbial- Fe^0 treatment processes[J]. Chemosphere, 2004, **54**(7): 823-829.
- [24] Nam S, Tratnyek P G. Reduction of azo dyes with zero-valent iron[J]. Water Research, 2000, **34**(6): 1837-1845.
- [25] Gu B H, Waston D B, Wu L Y, *et al.* Microbiological characteristics in a zero-valent iron reactive barrier [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2002, **77**(3): 293-309.
- [26] 陈杏娟, 许玫英, 孙国萍. 不同形态铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 230-236.
- [27] Hoag G E, Collins J B, Holcomb J L, *et al.* Degradation of bromothymol blue by 'greener' nano-scale zero-valent iron synthesized using tea polyphenols [J]. Journal of Materials Chemistry, 2009, **19**(45): 8671-8677.
- [28] 乔俊莲, 郑广宏, 闫丽, 等. 零价铁修复硝酸盐污染水体的研究进展[J]. 水处理技术, 2007, **35**(6): 6-10.
- [29] Thomas T P, Long T C, Lowry G V, *et al.* Partial oxidation ("Aging") and surface modification decrease the toxicity of nanosized zerovalent iron [J]. Environmental Science and Technology, 2009, **43**(1): 195-200.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophtic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qianguo, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《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7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 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