

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

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

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI 和M-AMBI 法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中 BOD ₅ 和 COD 污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季 pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 朱芳 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米 Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相 Fenton 反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳玉荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置 A ² /O- MBR 处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与 N ₂ O 释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的 QSAR/QSPR 研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌 N3 对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1 株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌 LY01 的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1 株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群 B-737 及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011 年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面 CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS 和 GC-ECD 同时在线观测本底大气中的 HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌 LY01 的鉴定及其氧化特性研究

刘玉娇, 杨新萍, 王世梅*, 梁银

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 从贵州省某煤矿废水中分离出1株嗜酸性的铁硫氧化细菌菌株 LY01, 经过对该菌株的形态特征、理化特征检测及16S rRNA序列分析, 初步鉴定菌株 LY01 为嗜酸性氧化亚铁硫杆菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*)。在无机盐培养液中菌株 LY01 可以从氧化 Fe^{2+} 、单质硫(S^0)及黄铁矿(FeS_2)获得能量生长, 对 Fe^{2+} 的氧化速率最快, 反应 30 h 即可将 $44.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 完全氧化, 菌体细胞达到 4.2×10^7 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$; 反应 21 d 可将溶液中 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 含量的 S^0 氧化 6.7%, 溶液中 SO_4^{2-} 浓度达 $2001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 菌体细胞达到 8.9×10^7 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$; 反应 20 d 可将溶液中 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 含量的 FeS_2 氧化 10%, 溶液中 SO_4^{2-} 浓度达 $4443 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 菌体细胞达到 3.4×10^8 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$ 。研究重金属离子 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 对菌株 LY01 氧化 FeS_2 活性的影响, 结果发现 $10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Ni^{2+} 对菌株 LY01 氧化 FeS_2 活性有一定的影响, 而 $10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb^{2+} 对菌株 LY01 氧化 FeS_2 的活性无影响。

关键词: 氧化亚铁硫杆菌; 分离; 鉴定; 氧化活性; 重金属离子

中图分类号: X172 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)05-1930-07

Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage

LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, LIANG Yin

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: An acidophilic iron-sulfur oxidizing bacterium LY01 was isolated from acid mine drainage of coal in Guizhou Province, China. Strain LY01 was identified as *Acidithiobacillus ferrooxidans* by morphological and physiological characteristics, and phylogenetic analysis of its 16S rRNA gene sequence. Strain LY01 was able to grow using ferrous ion (Fe^{2+}), elemental sulfur (S^0) and pyrite as sole energy source, respectively, but significant differences in oxidation efficiency and bacterial growth were observed when different energy source was used. When strain LY01 was cultured in 9K medium with $44.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ as the substrate, the oxidation efficiency of Fe^{2+} was 100% in 30 h and the cell number of strain LY01 reached to 4.2×10^7 cell $\cdot \text{mL}^{-1}$. When LY01 was cultured in 9K medium with $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ S^0 as the substrate, 6.7% S^0 oxidation efficiency, $2001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ SO_4^{2-} concentration and 8.9×10^7 cell $\cdot \text{mL}^{-1}$ cell number were observed in 21 d respectively. When LY01 was cultured with $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ pyrite as the substrate, the oxidation efficiency of pyrite, SO_4^{2-} concentration and cell number reached 10%, $4443 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and 3.4×10^8 cell $\cdot \text{mL}^{-1}$ respectively in 20 d. The effects of different heavy metals (Ni^{2+} , Pb^{2+}) on oxidation activity of strain LY01 cultured with pyrite were investigated. Results showed that the oxidation activity of strain LY01 was inhibited to a certain extent with the addition of Ni^{2+} at $10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to the medium, but the addition of $10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb^{2+} had no effect on LY01 activity.

Key words: *Acidithiobacillus ferrooxidans*; isolation; identification; oxidation activity; heavy metal ions

氧化亚铁硫杆菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) 广泛分布于酸性矿山/坑废水、酸性温泉及周边土壤中, 是一种中温、好氧、嗜酸的化能自养细菌, 可以从氧化亚铁及还原性的硫中获得能量生长, 主要用于生物湿法冶金、煤炭脱硫及污泥淋滤去除重金属等领域^[1~3]。自 1947 年 Colmer 等^[4]首次从矿山酸性废水中分离得到 1 株 *A. ferrooxidans* 以来, 关于这一类群微生物的分离、筛选及应用研究成为环境领域的关注热点。由于该类微生物的生物多样性, 针对不同的应用研究领域例如生物浸矿^[5]、生物脱硫^[6]或是重金属脱除^[7], 需要采用具有相应生物学

特征的菌株, 因此筛选、收集特定地域环境的高效微生物材料, 对相关科研工作的开展显得非常重要。在 *A. ferrooxidans* 的应用过程中, 亚铁离子、硫的生物氧化被证明是非常关键的环节。同时, 在这些应用过程中 *A. ferrooxidans* 的生物活性与它们能够耐受的反应体系中可溶性金属离子浓度的水平之间存在必然的联系。例如, 随着硫化矿生物浸出/脱硫过

收稿日期: 2012-08-19; 修订日期: 2012-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(21077054)

作者简介: 刘玉娇(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物, E-mail: 2010103082@njau.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: smwang@njau.edu.cn

程的进行,金属离子诸如铜、锌和镍等不断积累到反应体系中,当金属离子超过一定浓度时,必然会对 *A. ferrooxidans* 菌产生毒性,从而会影响其反应速率^[5]。因此,深入了解 *A. ferrooxidans* 菌对从硫化矿中释放的金属离子的抗性能力对其实际应用亦非常重要。

笔者从贵州省某煤矿酸性废水中筛选出 1 株氧化 FeS_2 活性高的铁硫氧化细菌 LY01。研究了菌株的形态特征、理化特征及 16S rRNA 序列分析,以确定菌株 LY01 的系统分类地位;考察该菌株在不同底物中的生长、对不同能源物质的氧化活性及对煤矿中常见伴生金属离子的耐受性,以期利用该菌株进行煤炭生物脱硫应用研究提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

样品采自贵州省金沙县某煤矿酸性废水,pH 值为 3.45。

黄铁矿(FeS_2):铁 38.5%,硫 49.2%,购自安徽银本矿产品有限公司,磨细过 100 目筛,备用。

1.2 9K 培养基

无机盐(MS): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 3.5 g、KCl 0.119 g、 K_2HPO_4 0.058 g、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.016 8 g、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.583 g,蒸馏水 1 L,用 $5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_2SO_4 调 pH 为 2.5,湿热灭菌(121°C , 15 min)

能源: $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $44.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_2SO_4 调 pH 为 2.5,过滤除菌。

1.3 菌株 LY01 的分离、纯化及鉴定

1.3.1 微生物富集及菌株分离纯化

取适量煤矿酸性废水于 250 mL 三角摇瓶中,补加一定量的 9K 液体培养基,于 28°C 、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的摇床上多次富集培养,并取样镜检观察富集液中菌体数量及形态变化。

取 10 mL 经富集培养的矿山废水水样于 90 mL 灭菌 9K 培养液中,在 28°C 的摇床上振荡培养,至三角瓶中液体颜色由澄清变成红棕色,然后稀释涂布于双层平板,双层平板的制备参照文献[8],分离纯化。于 28°C 培养 10~15 d,双层平板上出现针尖大小的棕色菌落,挑取单菌落接种至装有 10 mL 9K 培养液的小三角瓶中,继续振荡培养,至瓶内液体颜色变成红棕色,如此重复在液体培养基中扩大培养及在双层平板上分离,最终获得纯化的优势菌株 LY01。

1.3.2 菌株 LY01 鉴定

菌株 LY01 的形态特征和生理生化特征测定,参照文献[9]。其分子生物学鉴定和系统发育研究:菌株 LY01 DNA 的提取及 16S rRNA PCR 扩增参照文献[10~12]进行,PCR 产物经南京金思特公司测序,将 16S rRNA 的序列输入 Ribosomal Database Project (RDP) 中进行比对分析,选取基因库中相似性较高的菌株,利用 Mega 3.1 软件进行系统进化树的构建。

1.4 菌株 LY01 对 FeSO_4 、S 及 FeS_2 的氧化活性

将 LY01 的菌液在 9K 液体培养基中多次转接驯化,获得新鲜菌体,经显微计数当菌体数量达到 10^7 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$ 时,收集备用。取无机盐培养液 180 mL 于 500 mL 三角瓶中,按 10% 的接种量接入 20 mL LY01 新鲜菌液,分别以 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($44.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)、 S^0 ($10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 FeS_2 (100 目, $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 为底物,调节起始 pH 为 2.5,每处理设 3 个重复,置于 28°C 、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下振荡培养。定期取样(沉淀 15 min,取上清液)测定培养液中 pH、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 含量及菌体细胞的数量,以此来比较菌株 LY01 对各底物的氧化活性。

1.5 重金属离子对菌株 LY01 氧化活性的影响

在 500 mL 三角瓶中加入 100 mL 9K 无机盐培养液,按 10% 的接种量接入 LY01 新鲜菌液,以 FeS_2 ($30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 为底物,分别加入适当体积的高浓度 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} ,使其在培养液中终浓度分别为:10、50、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,然后用 9K 无机盐培养液补足至 200 mL,调节起始 pH 为 2.5,以不添加重金属的处理作对照,每处理设 3 个重复。将三角瓶置于 28°C 、 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下振荡培养,定期取样测定培养液中 SO_4^{2-} 含量变化,以此来比较不同浓度重金属离子对菌株 LY01 氧化 FeS_2 活性的影响。

1.6 分析方法

溶液 pH 值测定用雷磁 pH 计(pHS-3C); Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 浓度的测定用邻菲罗啉分光光度法^[13]; SO_4^{2-} 浓度的测定用离子色谱(Dionex 320)法;菌体数量变化用显微计数法测定^[14]。

2 结果与分析

2.1 菌株 LY01 的形态、理化特征及分子生物学鉴定

2.1.1 菌株 LY01 形态特征

菌株 LY01 在双层平板上培养 10~15 d,平板上出现琥珀色或红棕色区域,且区域内出现针尖大小的褐色菌落,菌落大小直径为 1 mm 左右,质地硬,难挑起,菌落周围有铁锈色的沉淀,说明有亚铁

被氧化成高铁. 经进一步分离纯化,油镜观察发现菌体呈短杆状,两端钝圆,以单个、成对或数个呈短链状存在(见图 1). 菌体大小 $(0.4 \sim 0.6) \times (1.0 \sim 1.5) \mu\text{m}$,革兰氏染色阴性.

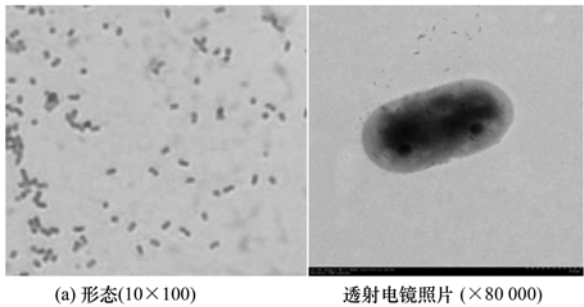


图 1 菌株 LY01 的形态和透射电镜照片
Fig. 1 Morphology of strain LY01 and TEM image

2.1.2 菌株 LY01 理化特征

表 1 所示为菌株 LY01 在 9K 无机盐培养液中添加不同的能源物质的生长情况. 从中可以看出,菌株 LY01 在亚铁为底物的培养液中生长良好,且在亚铁与低浓度葡萄糖混合培养时,比单独以亚铁为底物生长更好;以亚铁与低浓度蛋白胨混合培养时,菌体的生长情况与单独以亚铁为底物生长情况相似. 但是不能以蛋白胨和葡萄糖为唯一碳源生长,亦不能在牛肉膏蛋白胨细菌培养基上生长. 文献报道铁、硫氧化细菌为化能自养型,有机碳源(葡萄糖、果糖、纤维二糖、草酰乙酸及柠檬酸等)的存在对其有抑制作用^[15,16],1987 年 Johnson 等^[17]指出超过 $0.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的胰蛋白胨会抑制 *A. ferrooxidans* NCIB 9490 的生长. 但 2011 年 Mitesh 等^[18]指出在 *A. ferrooxidans* SRDSM2 的培养液中分别添加 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 蛋白胨、 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 大豆胰蛋白胨 (tryptone soya) 可以将铁氧化率提高 35.3% 及 29.6%. 说明来源不同的硫杆菌菌株对低浓度的有机物敏感程度不同.

表 1 菌株 LY01 对能源的利用情况
Table 1 Usage of substrates by strain LY01

能源物质	生长情况
4.42% $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	++
4.42% $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + 0.1% 葡萄糖	+++
4.42% $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ + 0.1% 蛋白胨	++
0.1% 葡萄糖	-
0.1% 蛋白胨	-
牛肉膏蛋白胨培养基	-

半固体穿刺接种,28℃ 培养 20 d,观察发现该菌沿穿刺线有明显的红棕色扩散带,且菌体沿穿刺线

呈倒三角锥体生长分布,长度由培养基表面向下延伸至穿刺区约 1/3 处,1/3 以下区域无明显菌体生长,结果表明,菌株 LY01 具有运动性且好氧生长. 氧化酶和过氧化氢酶试验呈阳性. 其理化特征符合文献[9]描述的 *A. ferrooxidans* 的特征.

2.1.3 菌株 LY01 的 16S rRNA 序列分析及系统发育树构建

菌株 LY01 的 16S rRNA 序列长度为 1 401 bp, GenBank 登录号为 JX242453. 将其 16S rRNA 测序结果输入 Ribosomal Database Project (RDP) 中进行序列比对,同源性分析,结果显示与 *Acidithiobacillus* 的多株细菌具有较高的同源性,与 *A. ferrooxidans* AF465604 相似性达 100%. 结合其生理生化特性可以初步鉴定该菌为 *A. ferrooxidans*,系统发育树见图 2.

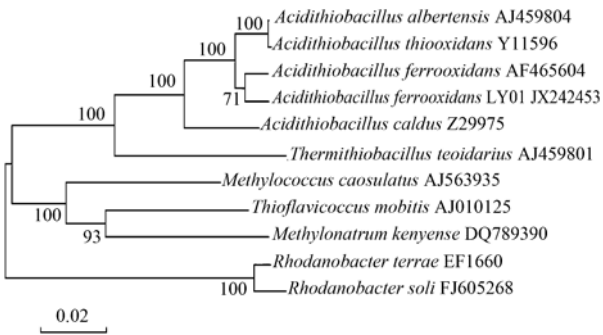


图 2 菌株 LY01 的 16S rRNA 序列系统发育树
Fig. 2 Phylogenetic tree based on the 16S rRNA sequence of strain LY01 and the sequences of related species

2.2 菌株 LY01 对 FeSO_4 、 S^0 及 FeS_2 的氧化活性

2.2.1 菌株 LY01 对 FeSO_4 氧化活性

菌株 LY01 有较强的亚铁氧化活性,在含 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的 9K 液体培养基中,随着菌体的生长,细菌氧化 Fe^{2+} 形成 Fe^{3+} ,培养液颜色随之发生改变,由最初的淡绿色到浅黄色,橙色,橙红色,再到暗红色,并在培养后期形成不同的络合铁离子,聚积较多黄色沉淀物质附着在瓶壁和瓶底. 培养液的 pH 值不断下降,具体变化见图 3.

图 3(a)可以看出,在以 Fe^{2+} 为能源物质的培养液中,LY01 接种到培养液中,6 h 之前 Fe^{2+} 氧化率较低,此时菌体适应新环境需要一个过程,之后菌体旺盛生长, Fe^{2+} 的氧化速率增加,24 h 后 Fe^{2+} 氧化率达到 95%,30 h 后 Fe^{2+} 被完全氧化, Fe^{2+} 平均氧化率为 $1.47 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. 张德伟等^[19]前期用相同的条件培养 *A. ferrooxidans* LX5,溶液中 Fe^{2+} 全部氧化需要 48 h,氧化率为 $0.92 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,蒋磊等^[20]

用亚铁做底物培养菌株 *A. ferrooxidans* Y1 (分离自广东云浮硫铁矿坑水), 完全氧化 $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 需要 84 h, Fe^{2+} 平均氧化率为 $0.48 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, *A. ferrooxidans* LY01 的氧化 Fe^{2+} 的速率是 *A. ferrooxidans* LX5 的 1.60 倍, 是 *A. ferrooxidans* Y1 的 3.06 倍。同时表明 *A. ferrooxidans* LY01 对 Fe^{2+} 氧化活性与菌体的生长密切相关, 菌体的生长越快, Fe^{2+} 氧化活性越强。菌体生长过程中, 培养液 pH 逐渐下降, 0 ~ 6 h 时溶液 pH 即由 2.5 降至 2.0, 之后缓慢下降, 这是因为随着时间的延长, 溶液中 Fe^{3+} 逐渐增多, Fe^{3+} 的水解及络合物的生成, 产生了大量 H^+ , 致使培养液 pH 持续下降, 培养 36 h, pH 降至 1.59。由图 3(b) 亦可以看出菌株 LY01 接种到培养液中, 延滞期很短, 菌体很快进入对数期生长, 考虑到 30 h 后 Fe^{2+} 完全氧化, 故培

养 36 h 即结束反应, 菌体数量达到 4.2×10^7 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$ 。

2.2.2 菌株 LY01 对单质 S^0 的氧化活性

A. ferrooxidans 能以 S^0 为能源, 以 O_2 为电子受体, 将 S 氧化为 SO_4^{2-} , 并释放出 H^+ , 即 $2\text{S} + 3\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$, 因此可通过培养液中 SO_4^{2-} 浓度和 pH 值的变化来表征菌株 LY01 对 S^0 的氧化活性。 S^0 粉疏水性强, 不易溶于水。LY01 接种在含 S^0 粉的 9K 无机盐培养液中, 起始 S^0 粉细小的颗粒漂浮在液体表面, 培养液澄清透明, 随着培养时间的延长, 3 d 后在细菌的作用下 S^0 粉逐渐沉入液体中, 培养液渐渐变成均一的淡黄色, 且颜色逐渐加深。图 4 所示为以 S^0 为底物时菌株 LY01 对 S^0 的氧化情况, 即溶液中 SO_4^{2-} 浓度 (扣除本底值的净增长量)、pH 变化及菌体数量变化曲线。

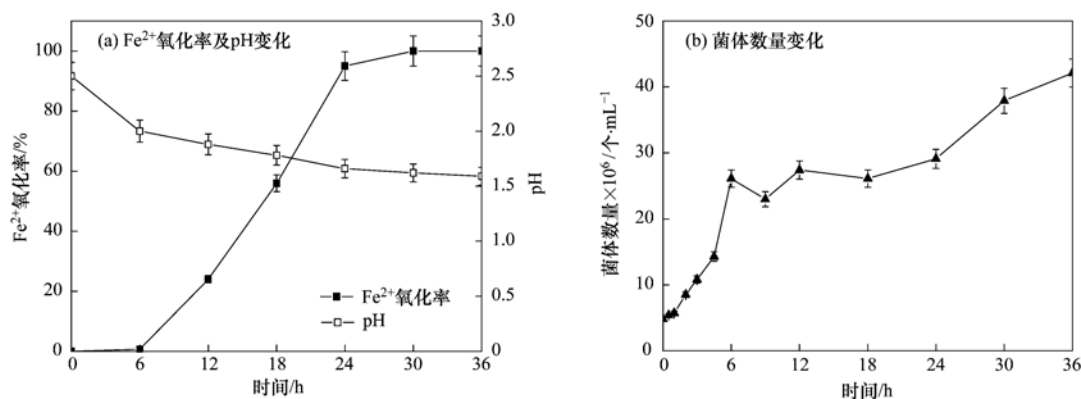


图3 菌株 LY01 利用 FeSO_4 的生长特性

Fig. 3 Growth characteristics of strain LY01 in culture medium with FeSO_4 as the substrate

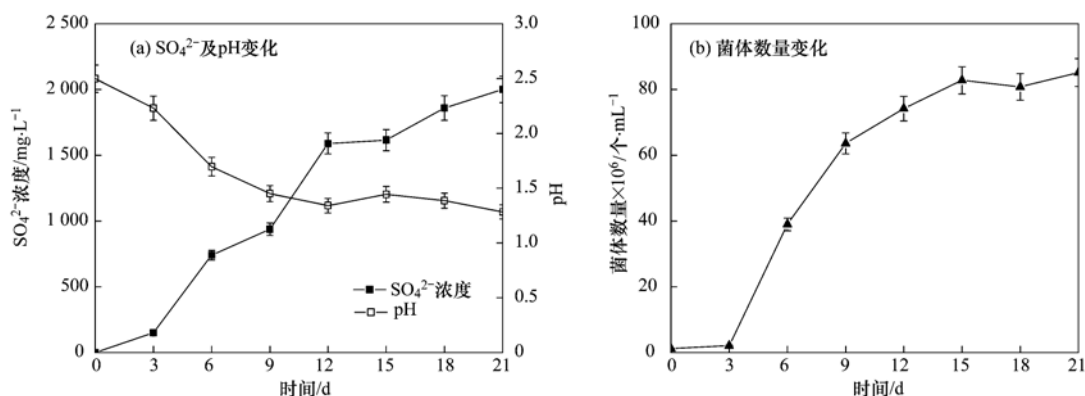


图4 菌株 LY01 利用 S^0 的生长特性

Fig. 4 Growth characteristics of strain LY01 in culture medium with sulfur as the substrate

由图 4(a) 可见, 菌株 LY01 对 S^0 的氧化是一个缓慢的产酸过程, 接种后的前 3 d 菌体的生长处于延滞期, 3 d 后培养液中 SO_4^{2-} 浓度逐渐增加, 12 d 时达 $1590 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应至 21 d 结束实验, 培养液中

SO_4^{2-} 浓度达到 $2001 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。经计算, 21 d 后 S^0 的氧化率达到 6.7%, 表明菌株 LY01 对 S^0 具有一定的氧化活性, 但其对 S^0 的氧化效率远低于对 Fe^{2+} 的氧化效率。有研究表明, *A. ferrooxidans* 对 S^0 的氧化

速率慢于对 Fe^{2+} 的氧化速率,原因是 S^0 粉的疏水性所致,菌体对 S^0 粉的吸附传质成为 S^0 氧化过程中的限速步骤^[21]. 培养液中 pH 值一直呈下降趋势,起始至第 9 d, pH 下降较快,9 d 后 pH 下降缓慢,并在 1.21 ~ 1.44 范围内小幅波动,21 d 反应结束, pH 值降至 1.28.

图 4(b) 与图 3(b) 相比,菌株 LY01 在含 S^0 的培养液中生长延滞期较长,0 ~ 3 d 内代谢缓慢,菌体浓度较低,这是由于接种后菌体需要对 S^0 粉进行活化与物理吸附,菌体的适应期较长. 随后菌体生长进入对数期,第 15 d 时菌体数量趋于稳定,达到 8.2×10^7 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$,第 21 d 反应结束时,菌体数量为 8.9×10^7 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$.

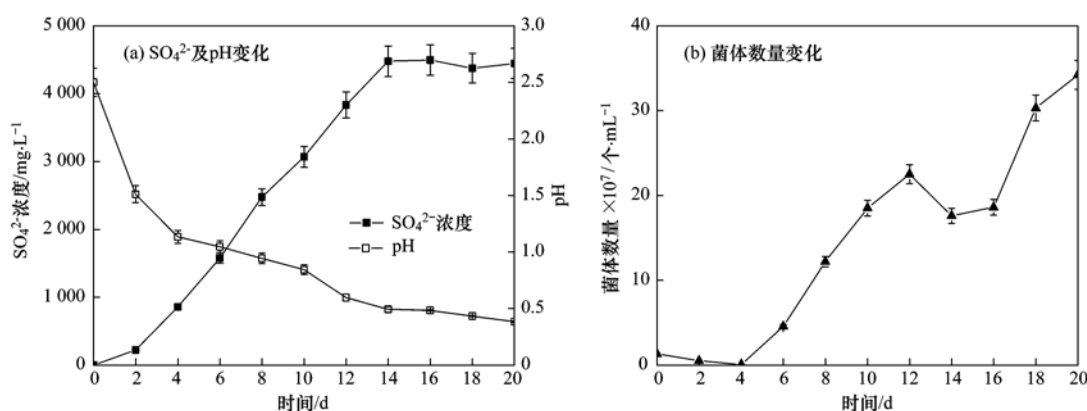


图 5 菌株 LY01 利用 FeS_2 的生长特性

Fig. 5 Growth characteristics of strain LY01 in culture medium with pyrite as the substrate

由图 5(a) 可以看出,菌株 LY01 在接入含有 FeS_2 的培养液后,反应体系中 SO_4^{2-} 含量一直保持较高的增长速率,第 12 d 时 SO_4^{2-} 含量 3833 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,之后 SO_4^{2-} 浓度增速减缓,反应至第 20 d 结束摇瓶实验, SO_4^{2-} 含量达到 4433 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 根据溶液中游离的 SO_4^{2-} 的含量,计算出 FeS_2 的氧化率大约 10% (不包括生成黄铁矾等矿物沉淀的 SO_4^{2-}). 2001 年 Yu 等^[22] 研究 *A. ferrooxidans* NCIMB 8455 对 FeS_2 的氧化活性,以 3.3 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 FeS_2 为底物反应 478 h (约 20 d) 产生 SO_4^{2-} 483 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, FeS_2 的氧化率约 9.9%,2007 年蒋磊等^[23] 研究 *A. ferrooxidans* Y1 氧化 FeS_2 的性能,以 40 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 FeS_2 为底物,反应 18 d,溶液中 SO_4^{2-} 的浓度 60.92 mmol (5848 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), FeS_2 的氧化率为 9.7%. 可见 *A. ferrooxidans* LY01 菌株与 *A. ferrooxidans* NCIMB 8455 及 *A. ferrooxidans* Y1 对 FeS_2 的氧化效率基本相当. FeS_2 的生物氧化是产酸反应,前期 pH 下降

2.2.3 菌株 LY01 对 FeS_2 的氧化活性

高硫煤中无机硫主要是以 FeS_2 的形式存在,因此研究 *A. ferrooxidans* 对 FeS_2 的氧化活性,可以作为其氧化脱硫能力的参照,实验以 FeS_2 为底物, *A. ferrooxidans* 可将 FeS_2 中的还原态 S 氧化成 SO_4^{2-} 而获得能量,通过检测培养液中 SO_4^{2-} 浓度及 pH 值的变化来表征菌株 LY01 对 FeS_2 氧化活性. 在反应的起始阶段, FeS_2 矿石颗粒在液体中沉降,液体澄清,4 d 后培养液逐渐变成乳黄色,随着时间的延长,培养液的颜色逐渐加深,并呈浑浊状态. FeS_2 颗粒被菌体吸附、氧化,产生较多黄黑色的矿物泥沉淀,不易过滤除去. 反应过程中溶液中 SO_4^{2-} 浓度 (扣除本底值的净增长量)、pH 变化及菌体数量变化曲线如图 5 所示.

较快,后期 pH 下降缓慢,第 6 d 时 pH 降至 1.05,20 d 时反应体系的 pH 降至 0.38. 由图 5(b) 可见,菌株 LY01 经过 4 d 的适应期,菌体数量开始迅速上升,并在第 12 d 时达到了一个峰值,细胞数量达到了 2.3×10^8 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$. 在 14 ~ 16 d 时反应体系中菌体数量出现了小幅下降,之后又迅速回升,20 d 时计数菌体细胞达到 3.4×10^8 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$. 从整体的变化趋势来看,菌株 LY01 在 FeS_2 反应体系中的生长规律基本符合单细胞微生物的变化规律. 值得注意的是, *A. ferrooxidans* 菌在 FeS_2 反应体系中悬浮的细胞数量应小于生成的细胞总数量, Nikolov 等^[24] 在研究 *A. ferrooxidans* 形成的生物膜特性时发现, *A. ferrooxidans* 进行分裂繁殖产生的 2 个子细胞,一个附着在 FeS_2 的表面,另一个则悬浮在溶液中,因此总的细胞数量应当是悬浮细胞与吸附在矿物表面细胞数量的总和.

综上所述, *A. ferrooxidans* LY01 可以氧化 Fe^{2+} 、 S^0 和 FeS_2 获得能量生长,但由于各种能源物质性质

的差异,该菌株在各反应体系中的生长状态和氧化能力不尽相同. 通过与相关文献报道的 *A. ferrooxidans* 菌株氧化活性比较,发现菌株 LY01 氧化 Fe^{2+} 的速率远高于文献报道的菌株,氧化 FeS_2 的效率与文献报道的菌株基本相当.

2.3 重金属离子 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 对菌株 LY01 氧化 FeS_2 活性的影响

A. ferrooxidans 在贵金属生物淋滤及高硫煤生物脱硫中广泛应用,矿石及煤炭中多含有重

金属离子如 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Hg^{2+} 等^[25],在利用 *A. ferrooxidans* 生物脱硫的过程中,重金属离子可被浸出. 因此,考察煤炭中常见伴生重金属离子是否影响 LY01 氧化 FeS_2 的活性,对菌株 LY01 的工程应用至关重要. 在以 FeS_2 为底物的培养液中分别加入适当体积的高浓度 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} ,定期取样测定溶液中 SO_4^{2-} 含量,以此来考察金属离子对菌株 LY01 氧化活性的影响. 结果如图 6 所示.

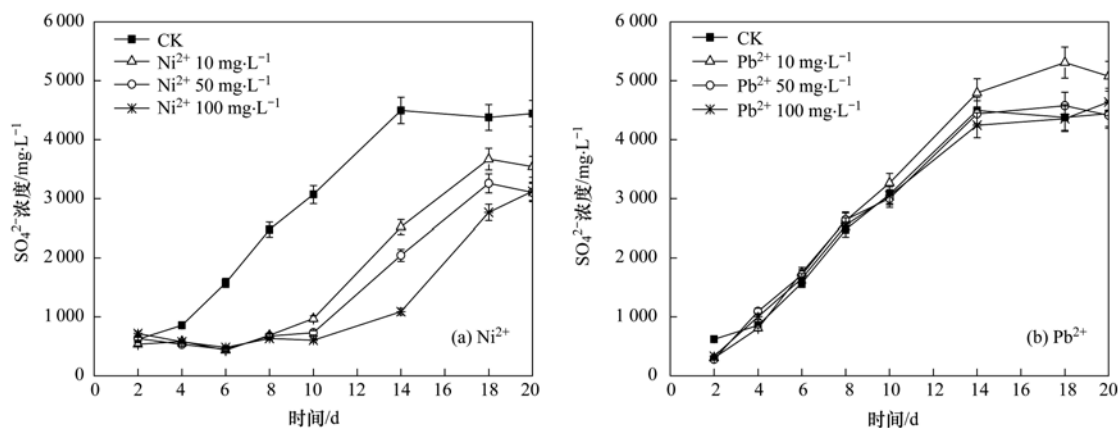


图 6 不同浓度 Ni^{2+} Pb^{2+} 对菌株 LY01 氧化 FeS_2 活性的影响

Fig. 6 Effect of different nickel and lead ions concentrations on the oxidation activity of strain LY01

由图 6(a)可见, Ni^{2+} 对菌株 LY01 氧化 FeS_2 具有一定的抑制作用,随着 Ni^{2+} 浓度的增加抑制作用增强. 在有 Ni^{2+} 存在的情况下,体系 SO_4^{2-} 含量于第 10 d 才开始缓慢上升,而未添加 Ni^{2+} 的对照,从第 4 d 开始 SO_4^{2-} 含量即迅速增加,20 d 时,添加 Ni^{2+} 处理的体系中 SO_4^{2-} 含量在 $3\,050 \sim 3\,349 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均比对照减少了 28.0%.

由图 6(b)可见, Pb^{2+} 几乎不影响菌株 LY01 对 FeS_2 的氧化活性. 添加了 Pb^{2+} 的处理体系中 SO_4^{2-} 含量变化与对照处理一致,并且在反应后期即第 10 d 开始,低浓度的 Pb^{2+} 对菌体的氧化活性起到了促进作用,在添加了 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb^{2+} 的处理中,20 d 时溶液中 SO_4^{2-} 含量为 $5\,077 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亦比对照提高 14.3%. 实验结果表明不同的重金属离子对菌株 LY01 的氧化 FeS_2 活性的影响不同. 煤炭中重金属离子 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 的平均含量在 $14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[25],煤浆生物脱硫过程中煤粉含量一般为 10%, Ni^{2+} 在煤浆中的浓度为 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,不足以对菌株 LY01 的氧化活性造成影响. 至于煤炭中其它重金属离子对菌株 LY01 氧化活性的影响,在后续工作中将继续研究.

3 结论

(1)从贵州某煤矿废水中分离得到了 1 株硫杆菌 LY01 初步鉴定为 *Acidithiobacillus ferrooxidans*,*A. ferrooxidans* LY01 在亚铁与低浓度葡萄糖、蛋白胨混合培养时生长良好.

(2)*A. ferrooxidans* LY01 可以氧化 Fe^{2+} 、 S^0 及 FeS_2 获得能量生长,对 3 种底物的氧化及菌体细胞生长情况各不相同,亚铁氧化速率最快, S^0 及 FeS_2 氧化速率较低.

(3) $10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的重金属 Ni^{2+} 对菌株 LY01 氧化 FeS_2 有一定的影响,而 $10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb^{2+} 对其的氧化 FeS_2 活性无影响.

参考文献:

- [1] Nestor D, Valdivia U, Chaves A P. Mechanisms of bioleaching of a refractory mineral of gold with *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. International Journal of Mineral Processing, 2001, **62** (1-4): 187-198.
- [2] Cara J, Morán A, Carballo T, et al. The biodesulphurization of a semianthracite coal in a packed-bed system[J]. Fuel, 2003, **82** (15-17): 2065-2068.
- [3] Pathak A, Dastidar M G, Sreekrishnan T R. Bioleaching of heavy metals from sewage sludge: A review [J]. Journal of

- Environmental Management, 2009, **90**(8): 2343-2353.
- [4] Colmer A R, Hinkle M E. The role of microorganisms in acid mine drainage: A preliminary report[J]. Science, 1947, **106**(2751): 253-256.
- [5] 高健, 丁建南, 康健, 等. 分离于酸性矿坑水的疑似钩端螺旋菌的鉴定及重金属对其铁氧化能力影响的评估[J]. 中国有色金属学报, 2011, **21**(1): 220-268.
- [6] 张哲, 杨琛, 党志, 等. 硫化物矿山尾矿缓释抑菌剂滴丸的制备及性能测试[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(6): 1087-1092.
- [7] 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.
- [8] 王世梅, 周立祥. 提高氧化亚铁硫杆菌和氧化硫硫杆菌平板检出率的方法: 双层平板法[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(10): 1418-1420.
- [9] 布坎南 R E, 吉本斯 N E. 伯杰细菌鉴定手册[M]. (第八版). 北京: 科学出版社, 1984. 622-651.
- [10] Miller S A, Dykes D D, Polesky H F. A simple salting out procedure for extracting DNA from human nucleated cells[J]. Nucleic Acids Research, 1988, **16**(3): 1215.
- [11] Joseph S, Fritsch E F, Maniatis T. Molecular cloning: A laboratory manual[M]. (2nd ed) New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1989. 378-386.
- [12] 奥斯伯 F·M(美). 马学军, 译. 精编分子生物学实验指南[M]. (第四版). 北京: 科学出版社, 2005. 1457-1574.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2002. 225-227.
- [14] 周群英, 王士芬. 环境工程环境微生物学[M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2008, 385-387.
- [15] Silver M, Margalith P, Lundgren D G. Effect of glucose on carbon dioxide assimilation and substrate oxidation by *Ferrobacillus ferrooxidans*[J]. Journal of Bacteriology, 1967, **93**(6): 1765-1769.
- [16] Tuttle J H, Dugan P R. Inhibition of growth, iron, and sulfur oxidation in *Thiobacillus ferrooxidans* by simple organic compounds[J]. Canadian Journal of Microbiology, 1976, **22**(5): 719-730.
- [17] Johnson D B, Macvicar J H M, Rolfe S. A new solid medium for the isolation and enumeration of *Thiobacillus ferrooxidans* and acidophilic heterotrophic bacteria[J]. Journal of Microbiological Methods, 1987, **7**(1): 9-18.
- [18] Mitesh J P, Devayani R T, Shailesh R D. Isolation, identification, characterization and polymetallic concentrate leaching studies of tryptic soy and peptone resistant thermotolerant *Acidithiobacillus ferrooxidans* SRDSM2 [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(2): 1062-1067.
- [19] 张德伟, 周立祥, 杨新萍, 等. 不同底物驯化氧化亚铁硫杆菌的差异及对煤炭生物脱硫效率的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 272-276.
- [20] 蒋磊, 周怀阳, 彭晓彤. 广东云浮硫铁矿山氧化亚铁硫杆菌的分离及生长规律研究[J]. 高校地质学报, 2006, **12**(1): 93-97.
- [21] 张俊, 范伟平, 方苹, 等. 底物对亚铁硫杆菌生物氧化过程的影响[J]. 南京化工大学学报(自然科学版), 2001, **23**(6): 37-41.
- [22] Yu J Y, Terence J, McGenity T J, *et al.* Solution chemistry during the lag phase and exponential phase of pyrite oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. Chemical Geology, 2001, **175**(3-4): 307-317.
- [23] 蒋磊, 周怀阳, 彭晓彤. 氧化亚铁硫杆菌对黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿的生物氧化作用研究[J]. 科学通报, 2007, **52**(15): 1802-1813.
- [24] Nikolov L, Karamanev D, Mamartarkova V, *et al.* Properties of the biofilm of *Thiobacillus ferrooxidans* formed in rotating biological contactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2002, **12**(1): 43-48.
- [25] 赵继尧, 唐修义, 黄文辉. 中国煤中微量元素的丰度[J]. 中国煤田地质, 2002, **14**(Supp.): 5-3, 17.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 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