

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

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

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的实验研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晟,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

Fontibacter sp. SgZ-2 厌氧腐殖质/Fe(Ⅲ)还原特性及电子传递机制研究

马晨¹, 杨贵芹², 陆琴^{2*}, 周顺桂²

(1. 中国热带农业科学院分析测试中心, 海南省热带果蔬产品质量安全重点实验室, 海口 571101; 2. 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650)

摘要: 腐殖质和Fe(Ⅲ)呼吸是重要的微生物胞外呼吸形式, 电子传递途径是胞外呼吸研究的核心科学问题。为全面理解1株铁还原新菌的电子转移特性和环境功能, 以该菌株 *Fontibacter* sp. SgZ-2 为研究对象, 考察其厌氧腐殖质和Fe(Ⅲ)还原特性, 并探寻不同电子受体条件下的电子传递链组成差异。采用厌氧恒温培养法研究了菌株厌氧还原特性。结果表明, 菌株 SgZ-2 具有还原腐殖质模式物[9,10-蒽醌-2,6-二磺酸(9,10-anthraquinone-2,6-disulfonic acid, AQDS)和9,10-蒽醌-2-磺酸(9,10-anthraquinone-2-sulfonic acid, AQS)]、腐殖酸(humic acids, HA)和可溶性Fe(Ⅲ)(Fe-EDTA 和柠檬酸铁)以及铁氧化物[水铁矿(hydrous ferric oxide, HFO)]的能力。发酵性糖类(葡萄糖和蔗糖)是菌株 SgZ-2 还原腐殖质和Fe(Ⅲ)的最佳电子供体。另外, 通过呼吸抑制剂法比较了菌株4种电子受体条件下(O₂、AQS、Fe-EDTA 和 HFO)参与电子传递的电子载体差异。结果表明, O₂ 和 Fe-EDTA 还原条件下, 菌株 SgZ-2 的电子传递链组分基本相似, 均包括脱氢酶、醌泵和细胞色素 b-c。AQS 和 HFO 还原条件下, 电子传递链组分只包含脱氢酶。因而, 菌株 SgZ-2 可溶性和不溶性Fe(Ⅲ)之间的电子传递链组分存在明显差异, 并且可溶性受体之间(O₂、Fe-EDTA 和 AQS)的电子传递链组成也不同。本研究建立了1株铁还原新菌 *Fontibacter* sp. SgZ-2 不同电子受体条件下的电子传递链模型, 并将电子传递机制的研究拓展到了 *Fontibacter* 菌属。此研究将为理解该属的电子转移特性及其环境行为提供理论基础。

关键词: *Fontibacter*; 腐殖质; Fe(Ⅲ); 呼吸抑制剂; 电子传递链

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3522-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.039

Anaerobic Reduction of Humus/Fe(Ⅲ) and Electron Transport Mechanism of *Fontibacter* sp. SgZ-2

MA Chen¹, YANG Gui-qin², LU Qin², ZHOU Shun-gui²

(1. Hainan Provincial Key Laboratory of Quality and Safety for Tropical Fruits and Vegetables, Analysis and Testing Center, Chinese Academy of Tropical Agriculture Sciences, Haikou 571101, China; 2. Guangdong Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Humus and Fe(Ⅲ) respiration are important extracellular respiration metabolism. Electron transport pathway is the key issue of extracellular respiration. To understand the electron transport properties and the environmental behavior of a novel Fe(Ⅲ)-reducing bacterium, *Fontibacter* sp. SgZ-2, capacities of anaerobic humus/Fe(Ⅲ) reduction and electron transport mechanisms with four electron acceptors were investigated in this study. The results of anaerobic batch experiments indicated that strain SgZ-2 had the ability to reduce humus analog [9,10-anthraquinone-2,6-disulfonic acid (AQDS) and 9,10-anthraquinone-2-sulfonic acid (AQS)], humic acids (HA), soluble Fe(Ⅲ) (Fe-EDTA and Fe-citrate) and Fe(Ⅲ) oxides [hydrous ferric oxide (HFO)]. Fermentative sugars (glucose and sucrose) were the most effective electron donors in the humus/Fe(Ⅲ) reduction by strain SgZ-2. Additionally, differences of electron carrier participating in the process of electron transport with different electron acceptors (i. e., oxygen, AQS, Fe-EDTA and HFO) were investigated using respiratory inhibitors. The results suggested that similar respiratory chain components were involved in the reducing process of oxygen and Fe-EDTA, including dehydrogenase, quinones and cytochromes b-c. In comparison, only dehydrogenase was found to participate in the reduction of AQS and HFO. In conclusion, different electron transport pathways may be employed by strain SgZ-2 between insoluble and soluble electron acceptors or among soluble electron acceptors. Preliminary models of electron transport pathway with four electron acceptors were proposed for strain SgZ-2, and the study of electron transport mechanism was explored to the genus *Fontibacter*. All the results from this study are expected to help understand the electron transport properties and the environmental behavior of the genus *Fontibacter*.

Key words: *Fontibacter*; humus; Fe(Ⅲ); respiratory inhibitor; electron transport chain

收稿日期: 2014-01-17; 修订日期: 2014-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201227, 41301257)

作者简介: 马晨(1986~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为环境微生物应用, E-mail: mc19860112@163.com

* 通讯联系人, E-mail: luqin@soil.gd.cn

腐殖质和Fe(Ⅲ)广泛存在于自然界中且含量十分丰富. 腐殖质/Fe(Ⅲ)还原在有机或无机污染物的厌氧生物转化中发挥了重要作用^[1~3]. 大量研究表明,微生物在厌氧条件下,可以将腐殖质和Fe(Ⅲ)作为电子受体,介导污染物的降解转化过程^[4]. 由于腐殖质/Fe(Ⅲ)还原在元素地球化学循环以及污染物原位修复等方面表现出重要应用前景,成为当前环境微生物研究的热点^[5]. 微生物电子传递途径的研究是揭示微生物环境行为及其电子转移特性的基础. 目前,已有大量关于腐殖质/Fe(Ⅲ)还原过程电子传递途径的研究,主要集中在革兰氏阴性模式菌地杆菌属(*Geobacter*)和希瓦氏菌属(*Shewanella*). 现有研究基本阐明了这一电子传递途径中相关电子载体以及关键细胞色素c蛋白和调控基因的功能^[6~9]. 但是,关于其它菌属的电子传递机制了解甚少. 另外,呼吸抑制剂实验和微生物基因组/转录组分析结果表明,不同电子受体条件下,微生物可能采取不同的电子传递方式实现物质还原. 特别是可溶性和不溶性电子受体条件下,微生物的电子传递链和相关基因表达可能存在明显差异^[10,11]. 然而,不同受体条件下,微生物电子传递途径的比较研究仍不深入,有许多问题待解决.

Fontibacter 属于鞘脂杆菌科(*Cyclobacteriaceae*), 2010年由Kämpfer等发现^[12]. 目前,该属仅有一个模式菌株*Fontibacter flavus*^[12]. 2012年,本实验室从厌氧污泥-微生物燃料电池中分离到该属的1株新菌,命名为*Fontibacter* sp. SgZ-2 (CCTCC M 2011498^T = KACC 16525^T),并首次发现该属具有Fe(Ⅲ)和腐殖质还原能力^[13]. 本文在前期研究基础上,将详细考察*Fontibacter* sp. SgZ-2 腐殖质/Fe(Ⅲ)还原特性,并比较氧气、9,10-蒽醌-2-磺酸(9,10-anthraquinone-2-sulfonic acid, AQS)、Fe-EDTA和水铁矿(hydrous ferric oxide, HFO)电子受体条件下的电子传递链组分,以期理解*Fontibacter*属的电子转移特性及环境行为提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 主要试剂和仪器

实验中使用的试剂除非特别注明,均为分析纯(A. R.). 腐殖酸购自Sigma-Aldrich corp. 和国际腐殖酸协会(International Humic Substances Society, IHSS), IHSS腐殖酸主要包括: Elliott Soil Humic Acid Standard (1S102H), S-HA; Pahokee Peat Humic Acid Standard (1S103H), PP-HA; Leonardite

Humic Acid Standard (1S104H), L-HA. 实验中用到的铁氧化物均自行配置,方法参照文献[14]. 呼吸抑制剂种类包括鱼藤酮(rotenone)、双香豆素(dicumarol)、二盐酸奎吖因水合物(quinacrine)、二环己基碳二亚胺(*N,N'*-dicyclohexylcarbodiimide, DCCD)、羰基氰基3-氯苯脒(carbonyl cyanide *m*-chlorophenyl hydrazone, CCCP)、抗霉素A(antimycin A)和辣椒素(capsaicin),纯度均为98%以上,购自成都贝斯特试剂有限公司和百灵威公司.

1.2 研究方法

1.2.1 厌氧恒温培养法研究菌株腐殖质/Fe(Ⅲ)还原特性

采用20.0 mL西林瓶厌氧培养体系,生物处理包含基础盐培养基($2.50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$, $0.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{Cl}$, $0.68 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $0.10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$)、 $10.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 电子供体(乙酸、丙酸、丙酮酸、乳酸、葡萄糖、蔗糖)、 1.0 mL 菌悬液($1.0 \times 10^7 \text{ CFU}$)和电子受体 [$10.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe(Ⅲ)}$, $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 9,10-蒽醌-2,6-二磺酸(9,10-anthraquinone-2,6-disulfonic acid, AQDS)或 $2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 腐殖酸(humic acids, HA)],对照为非生物对照(不添加细菌悬液)和不添加供体对照^[2,15]. 电子穿梭体对水铁矿(hydrous ferric oxide, HFO)的促进实验中,AQDS和AQS添加浓度为 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,腐殖酸的添加浓度为 $2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 可溶性Fe(Ⅱ)采用邻菲罗啉比色法测定^[16],还原态AQDS/AQS检测方法参照文献[2].

1.2.2 呼吸抑制剂法研究菌株电子传递链组分

呼吸抑制剂实验体系与厌氧还原体系基本相同,电子受体分别为氧气、 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ AQS、 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe-EDTA}$ 和 $5.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 水铁矿. 实验组中加入不同浓度的抑制剂,对照组中加入抑制剂溶剂(rotenone/DCCD-丙酮; dicumarol-NaOH、quinacrine-H₂O、CCCP/antimycin A/capsaicin-乙醇),比较抑制剂处理同抑制剂溶剂处理之间受体还原效果的差异,来确定相应电子传递链组分是否参与电子传递过程^[17,18]. 通过菌体生长量间接判断抑制剂是否影响菌株的氧气电子传递过程.

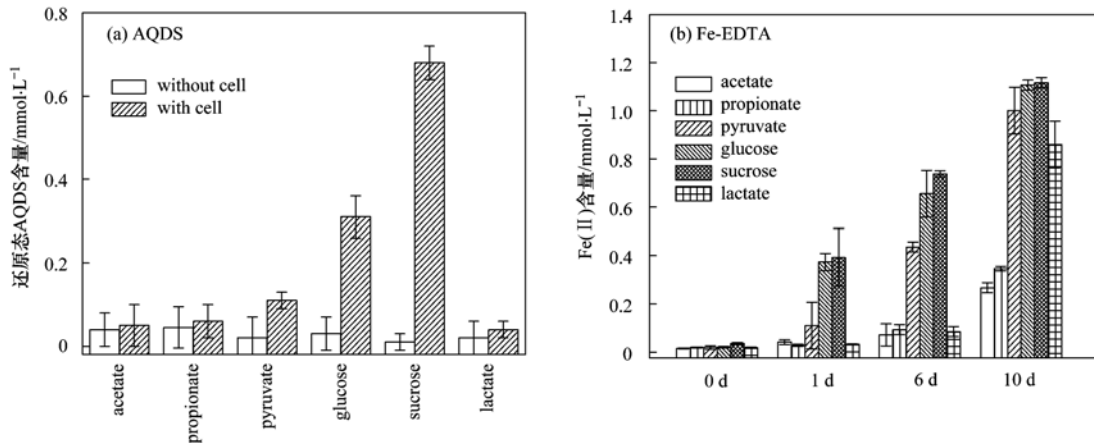
2 结果与讨论

2.1 腐殖质/Fe(Ⅲ)还原特性

菌株SgZ-2利用不同电子供体还原AQDS和Fe-EDTA的结果如图1所示. 经过10 d反应,在乙酸、丙酸、丙酮酸、葡萄糖、蔗糖和乳酸处理中分

别生成了 0.029 、 0.036 、 0.050 、 0.31 、 0.71 和 $0.047 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的还原态 AQDS (AHDS) [图 1 (a)]. 在所试供体中,葡萄糖和蔗糖是菌株 SgZ-2 还原 AQDS 的最佳电子供体,乙酸、丙酸、丙酮酸和乳酸为供体时还原效果较差. 图 1 (b) 揭示了菌株利用不同电子供体还原 Fe-EDTA 的效果,所试供体均可以还原 Fe-EDTA. 反应 10 d 后,可溶性 Fe(II) 生成量分别是 $0.27 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (乙酸)、 0.35

$\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (丙酸)、 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (丙酮酸)、 $1.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (葡萄糖)、 $1.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (蔗糖) 和 $0.86 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (乳酸). 因而,丙酮酸、葡萄糖、蔗糖和乳酸可以作为菌株 SgZ-2 还原 Fe-EDTA 的良好受体. 综合以上结果,菌株 SgZ-2 还原 AQDS 和 Fe-EDTA 的最佳电子供体是发酵性糖类(葡萄糖和蔗糖). 这一结果与菌株发酵产酸的生化实验结果基本一致^[13].



acetate: 乙酸; propionate: 丙酸; pyruvate: 丙酮酸; glucose: 葡萄糖; sucrose: 蔗糖; lactate: 乳酸

图 1 菌株 SgZ-2 利用不同电子供体还原 AQDS 和 Fe-EDTA 效果图

Fig. 1 Effects of alternative electron donors on AQDS and Fe-EDTA reduction by strain SgZ-2

菌株 SgZ-2 对腐殖质模式物和腐殖酸的还原效果见图 2. 菌株 SgZ-2 还原腐殖质模式物的效果较好,反应 12 h 可以观察到 AQDS 被还原(即样品颜色从无色变为黄色). 菌株对 AQS 的还原效果明显优于 AQDS. 反应 72 h 后,约有 $0.59 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ AQS 被还原, $0.32 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ AQDS 被还原. 菌株对不同来源 HA 的还原能力相当. 反应 8 d 后,在 sigma-HA、S-HA、L-HA 和 PP-HA 处理中,还原态 HA 还原柠檬酸铁生成的 Fe(II) 含量符合以下规律:

$\text{sigma-HA} (0.93 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}) > \text{PP-HA} (0.88 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}) > \text{L-HA} (0.79 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}) > \text{S-HA} (0.59 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1})$. 腐殖质及其模式物的醌基相对含量采用傅里叶变换红外光谱扫描 (FT-IR) 测定,波长 $1600 \sim 1680 \text{ cm}^{-1}$ 的峰响应值表示物质中具有 $\text{C}=\text{O}$ 和 $\text{C}=\text{C}$ 结构,响应强度代表相对含量,腐殖质中不含 $\text{C}=\text{C}$, 因此该波长范围内的峰值应为 $\text{C}=\text{O}$ (醌基)^[2]. 根据文献[2] 中红外光谱 FT-IR 数据和国际腐殖酸协会网站提供的商品化腐殖酸红

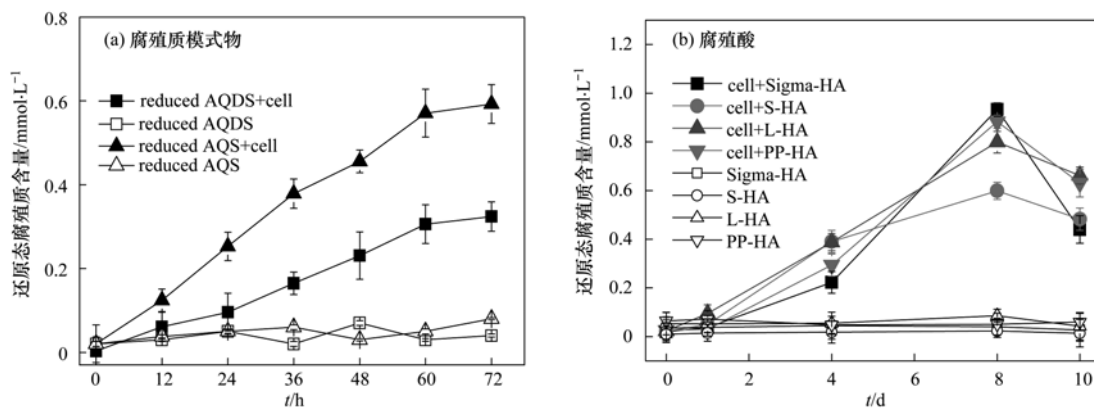


图 2 菌株 SgZ-2 以葡萄糖为供体时腐殖质及其模式物的还原效果

Fig. 2 Reductive ability of alternative humus and its analogy by strain SgZ-2

外光谱数据,常见腐殖质的醌基相对含量符合以下规律: AQS > AQDS > sigma-HA > L-HA > PP-HA > S-HA,菌株对不同腐殖质的还原规律与其醌基相对含量基本一致。

菌株 SgZ-2 对 Fe(Ⅲ) 的还原效果如图 3。菌株对 Fe-EDTA 的还原效果明显高于柠檬酸铁(Fe-cit),可溶性 Fe(Ⅱ) 生成量分别为 $1.60 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.60 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 3(a)]。Fe-EDTA (96 mV, pH 7.0, 25℃) 的氧化还原电位明显低于柠檬酸铁 (372 mV, pH 7.0, 25℃)。但是在实验培养温度下, Fe-cit 溶解度随时间而逐渐降低,可溶态三价铁的浓度不高,所以其还原效果较差。图 3(b) 显示了不同电子穿梭体作用下,菌株 SgZ-2 对水铁矿的还原效果。在反应初期,可溶性 Fe(Ⅱ) 生成量缓慢上升;反应第 30 d 时, Fe(Ⅱ) 生成量开始下降,可能由于 Fe(Ⅱ) 参与成矿作用而被消耗。通过零级动力学方程拟合,不同电子穿梭体条件下 Fe(Ⅲ) 还原速率符合: 不加电子穿梭体处理 ($0.0086 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, $R^2 = 0.894$) < S-HA 处理 ($0.0148 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, $R^2 = 0.985$) < AQDS 处

理 ($0.0355 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, $R^2 = 0.997$) < AQS 处理 ($0.0362 \text{ mmol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, $R^2 = 0.957$)。电子穿梭体本身的性质(如氧化还原电位、醌基相对含量和电子接受能力等)和反应条件都是影响 Fe(Ⅲ) 还原的重要因素^[19,20]。电子穿梭体对 Fe(Ⅲ) 还原的促进规律与穿梭体自身性质规律均吻合: Fe(Ⅲ) 还原速率与电子穿梭体氧化还原电位反相关,与其醌基相对含量和电子接受容量正相关。实验中还发现,腐殖酸模式物(AQDS 和 AQS)比腐殖酸对 Fe(Ⅲ) 还原的促进作用明显,可能原因有:①腐殖酸模式物分子量小,在铁氧化物界面和水相体系中穿梭能力强,因而电子运输速率快^[21];②在实验体系下(pH = 7.2),腐殖酸模式物的溶解度高,而腐殖酸的溶解度有限(碱性条件下易溶解),因而可自由移动的穿梭物质浓度低^[21];③活性基团数量决定了其对 Fe(Ⅲ) 还原的促进效果,腐殖酸模式物醌基相对含量明显高于腐殖酸^[2];④实验已经证明,腐殖酸模式物的电子接受容量大,所以其充当电子穿梭体时更容易接受电子并穿梭到铁氧化物表面^[2]。

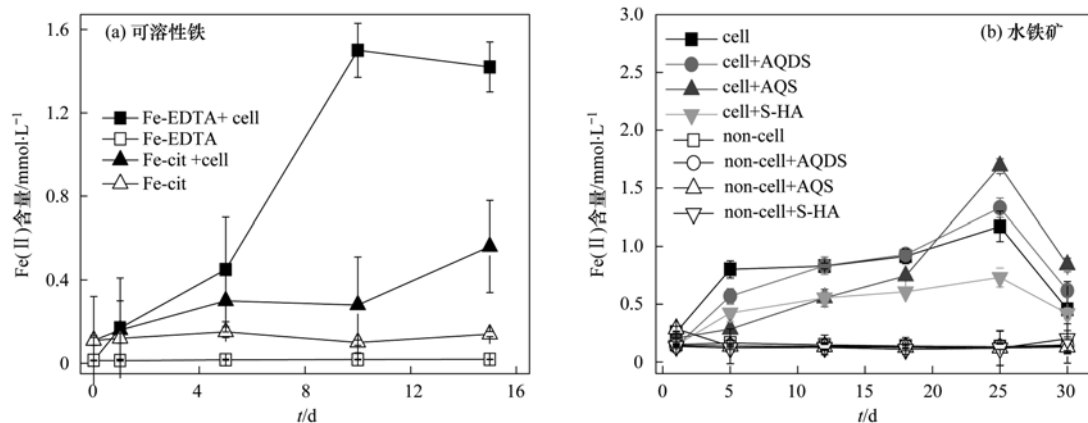


图3 菌株 SgZ-2 以葡萄糖为供体,添加电子穿梭体对 Fe(Ⅲ) 还原效果的影响

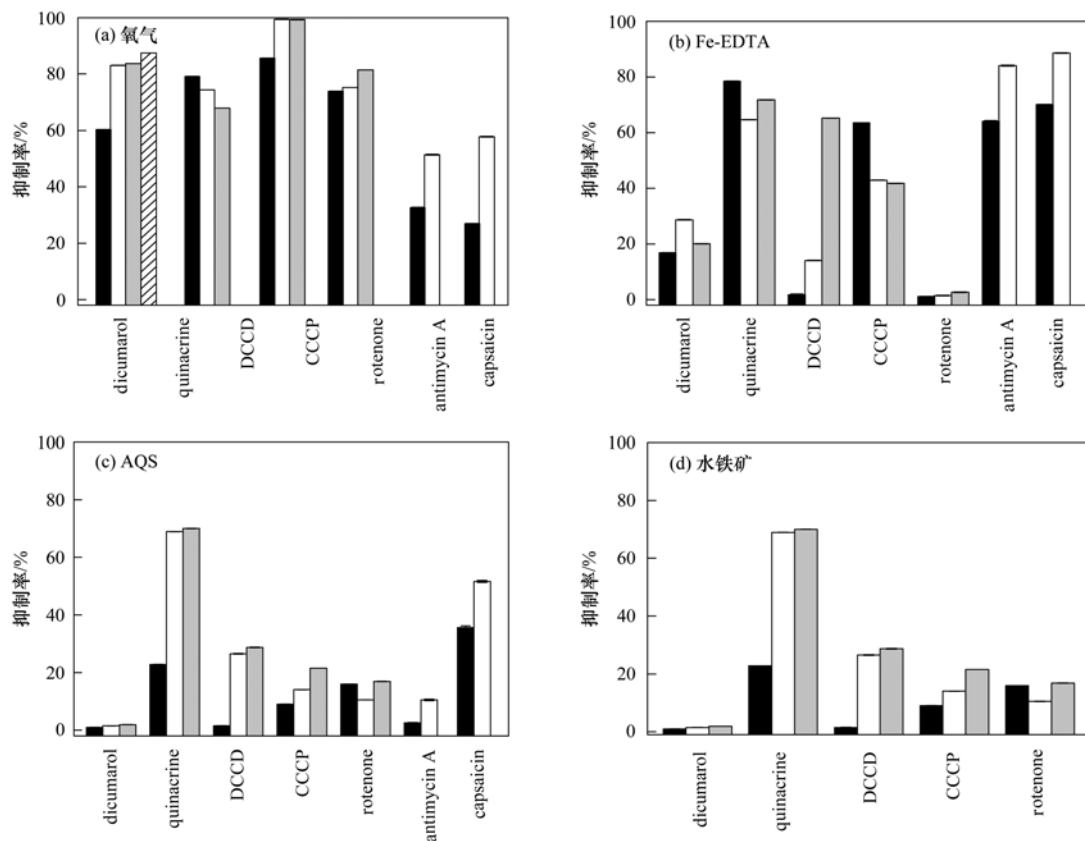
Fig. 3 Effects of electron mediators on the Fe(Ⅲ) reduction with glucose as electron donor by strain SgZ-2

2.2 菌株 SgZ-2 电子传递链组分比较

不同电子受体条件下,呼吸抑制剂对菌株 SgZ-2 电子传递过程的抑制作用如图 4 所示。呼吸抑制剂对电子传递链的抑制位点见图 5(a): quinacrine 抑制 FAD 脱氢酶活性, capsaicin 抑制 NADH 脱氢酶活性, dicumarol 抑制醌类活性, antimycin A 抑制细胞色素 b-c, DCCD 抑制 ATP 合成酶活性, CCCP 抑制质子跨质膜转运。通过综合分析呼吸抑制剂的抑制作用(图 4),得到了以下结果。

所试抑制剂对氧气电子传递过程均具有抑制作

用,抑制效率均在 50% 以上[图 4(a)]。所以,氧气条件下,菌株 SgZ-2 电子传递链与常规电子传递链基本相似[见图 5(a)],包括脱氢酶、醌类、细胞色素和 ATP 合成酶。quinacrine(抑制 FAD 脱氢酶)抑制效果(80%)稍高于 capsaicin(抑制 NADH 脱氢酶)(60%),所以 FAD 脱氢酶在氧气电子传递过程中的参与程度稍高于 NADH 脱氢酶。本实验结果与 *Aeromonas hydrophila* Fe(Ⅲ) 电子传递过程得到的结果相似^[17]。另外, DCCD 和 CCCP 对氧气电子传递过程均产生抑制作用,所以此过程可能偶联质子



抑制剂浓度(从左至右):dicumarol, (20, 200, 400, 500) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; quinacrine: (20, 200, 400) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;
DCCD: (20, 40, 80) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; CCCP: (10, 20, 40) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; antimycin A: (150, 300) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;
capsaicin: (500, 1000) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; rotenone: (40, 100, 200) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

图4 菌株 SgZ-2 不同受体条件下呼吸抑制剂对电子传递过程的抑制效果

Fig. 4 Respiratory inhibition on electron transport chains with alternative electron acceptors by strain SgZ-2

跨膜转运和 ATP 合成。

Fe-EDTA 电子受体条件下,除了 rotenone 外,所试抑制剂均对菌株 SgZ-2 电子传递过程产生抑制作用[图 4(b)]。其中,dicumarol 抑制率较低,仅为 20%~30%,所以醌类在此电子传递过程中的参与程度较低。另外,当 quinacrine(作用于 FAD 脱氢酶)对电子传递有明显抑制作用时,rotenone 抑制作用不明显(即 NADH 脱氢酶不参与电子传递),同时 capsaicin 也表现出明显抑制作用。据文献[22]报道,rotenone 和 capsaicin 抑制 NADH 脱氢酶活性。当 NADH 脱氢酶不参与电子传递时,这两种抑制剂的作用位点是辅酶 Q(也叫 quinone)。因此,Fe-EDTA 受体条件下,本实验中 capsaicin 抑制位点可能是 FAD 脱氢酶的辅基辅酶 Q。综合以上结果,参与 Fe-EDTA 还原的电子传递途径可能有两条[图 5(b)]:电子通过脱氢酶、醌类和细胞色素 b-c 或者通过另一条途径 FAD 脱氢酶(醌基作为其辅酶)和细胞色素 b-c。另外,DCCD 和 CCCP 对 Fe-EDTA 还

原过程均产生抑制作用,所以此过程可能偶联质子跨膜转运和 ATP 合成。但两者抑制率均低于氧气电子传递过程,因而产能效率较低。

以 AQS 作为电子受体时,dicumarol 和 antimycin A 对电子传递基本没有抑制作用,所以醌类和细胞色素 b-c 不参与 AQS 还原过程的电子传递。另外,当 quinacrine 抑制率为 70%时,rotenone 抑制作用不明显(抑制率仅有 17%左右)。同时,capsaicin 抑制率在 55%左右[图 4(c)]。因而,与 Fe-EDTA 还原过程相似,capsaicin 抑制位点也是 FAD 脱氢酶的辅基辅酶 Q。综上所述,菌株 SgZ-2 参与 AQS 还原的电子载体只包含 FAD 脱氢酶[图 5(c)]。另外,CCCP 和 DCCD 对此电子传递过程的抑制率较低(均在 20%左右),所以此过程偶联质子跨膜转运的产能效率也较低。

以水铁矿为电子受体时,CCCP、DCCD 和 rotenone 抑制作用较低,抑制率约在 20%~30%。quinacrine 的抑制作用最强(70%),因而 FAD 脱氢

酶参与水铁矿还原的电子传递过程[图 4(d)]. dicumarol、capsaicin 和 antimycin A 对水铁矿还原过程均没有明显的抑制作用(部分结果未列出). 所以,菌株 SgZ-2 参与水铁矿还原的电子载体主要是 FAD 脱氢酶,并且偶联质子跨膜的产能效率较低[图 5(d)]. 这一实验结果与已报道的结果存在差

异. 目前,多数研究者认为,这 3 种抑制剂对 Fe(Ⅲ)还原过程均具有抑制作用,即醌类、NADH 脱氢酶和细胞色素 b-c 均参与 Fe(Ⅲ)还原. 但是,多数研究结论是基于柠檬酸铁等可溶性 Fe(Ⅲ)的抑制剂实验^[22],关于不溶性 Fe(Ⅲ)还原过程电子载体的报道还十分罕见.

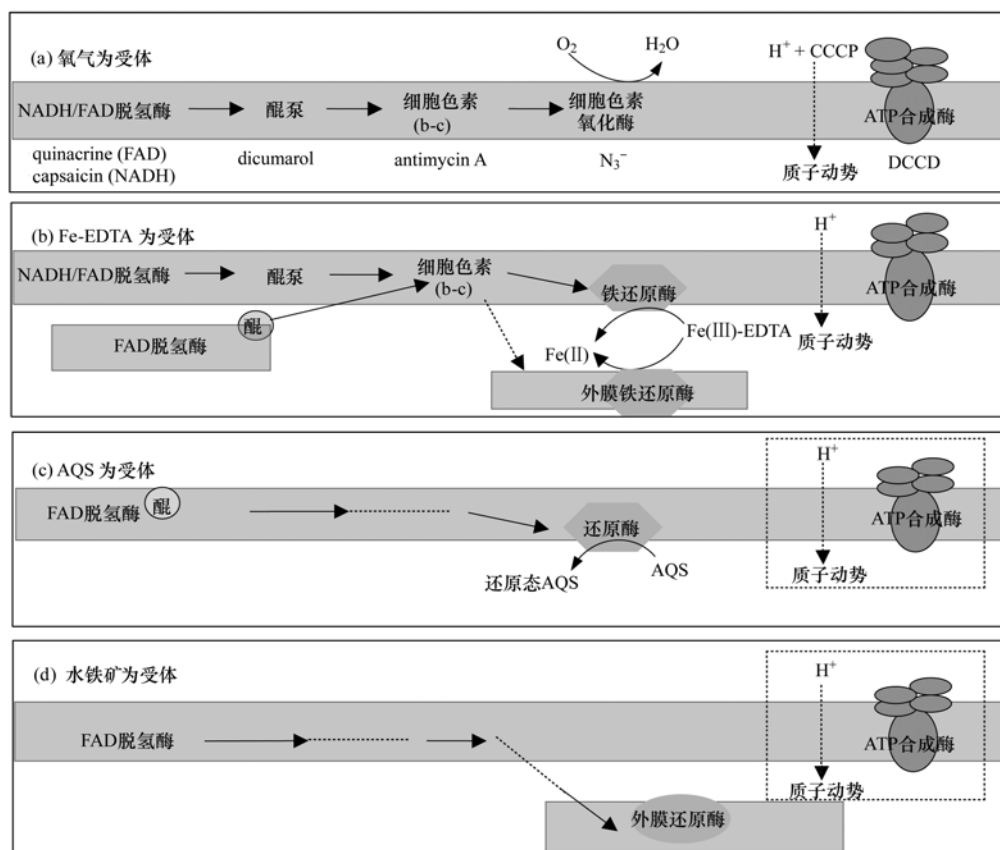


图 5 菌株 SgZ-2 不同受体条件下电子传递链模型

Fig. 5 Models of electron transport chains with different electron acceptors

综合以上结果,不同电子受体条件下,菌株 SgZ-2 电子传递链组分存在明显差异. 氧气和 Fe-EDTA 条件下,参与电子传递的电子载体与常规电子传递链基本相似,与参与 AQS 和 HFO 还原的电子传递链成分差别较大. AQS 电子受体条件下,参与电子传递的电子载体与 HFO 还原过程基本相似. 所以,可溶性和不溶性 Fe(Ⅲ)还原过程的电子传递链组分存在明显差异,并且可溶性受体之间的电子传递链成分也不同. 与模式菌 *Shewanella* 相比,菌株 SgZ-2 氧气条件下的电子传递链组分基本相似^[23,24]. 与模式菌 *Shewanella* 不同,醌类可能在菌株 SgZ-2 的厌氧电子传递中参与程度较低. 特别是在 AQS 和 HFO 还原过程中,醌类可能不是电子传递链主要组分. 另外,本实验结果也表明,不同电子

传递途径可能存在重叠性,即同一电子传递链可能同时具有多种电子传递功能,如氧气与 Fe-EDTA 条件下,菌株 SgZ-2 可能共用部分电子传递链组分. 据报道,微生物的硝酸盐还原和可溶性 Fe(Ⅲ)还原也共用部分电子传递链组分^[17,25].

目前,不同电子受体条件下,微生物电子传递途径的比较研究还不深入. 现有的观点也没有统一结论. 有研究认为,微生物利用可溶性电子受体 AQDS 和可溶性 Fe(Ⅲ)时,电子传递途径相似,部分还原酶位于周质中,部分存在于细胞外膜^[26,27]. 也有研究报道,可溶性电子受体 (AQDS 和螯合铁) 同不溶性电子受体 (电极和铁氧化物) 之间的电子传递途径存在差异^[28,29]. 另外,不溶性电子受体之间 (铁氧化物和电极),参与微生物电子传递的关键酶可

能相同或相似,但是每种酶的参与程度、功能或重要性可能差异较大^[10]。最近研究发现,革兰氏阳性嗜热菌 *Thermincola potens* 的 AQDS 与不溶性 Fe(Ⅲ) 的电子传递途径基本相似^[30]。本实验得到的结果更加证实了微生物不同电子受体之间的电子传递途径存在差异。与模式菌比较发现,这种差异可能有种属专一性。

3 结论

(1) 腐殖质/Fe(Ⅲ) 还原特性: *Fontibacter* sp. SgZ-2 具有还原腐殖质模式物 (AQDS 和 AQS)、腐殖酸 (HA) 和可溶性 Fe(Ⅲ) (Fe-EDTA 和柠檬酸铁) 以及铁氧化物 (水铁矿) 的能力。发酵性糖类 (葡萄糖和蔗糖) 是菌株 SgZ-2 还原腐殖质和 Fe(Ⅲ) 的最佳电子供体。添加腐殖质物质可促进菌株对水铁矿的还原速率。

(2) 不同电子受体条件下电子传递链组分比较: 氧气和 Fe-EDTA 可溶性电子受体条件下, *Fontibacter* sp. SgZ-2 的电子传递链组分基本相似, 包括脱氢酶、醌泵和细胞色素 b-c。AQS 和水铁矿电子受体条件下, 电子传递链组分只包含脱氢酶。所以, 可溶性和不溶性 Fe(Ⅲ) 之间的电子传递链组分存在差异, 并且可溶性受体之间 (氧气、Fe-EDTA 和 AQS) 的电子传递链组分也不同。

参考文献:

- [1] Perminova I V, Hatfield K, Hertkorn N. Use of humic substances to remediate polluted environments: from theory to practice[M]. Dordrecht: Springer, 2005. 3-36.
- [2] Wu C Y, Zhuang L, Zhou S G, et al. Humic substance-mediated reduction of iron(Ⅲ) oxide and degradation of 2, 4-D by an alkaliphilic bacterium *Corynebacterium humireducens* MFC-5[J]. Microbial Biotechnology, 2013, **6**(2): 141-149.
- [3] 谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 等. 微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3940-3944.
- [4] 武春媛, 李芳柏, 周顺桂. 腐殖质呼吸作用及其生态学意义[J]. 生态学报, 2009, **29**(3): 1535-1542.
- [5] Kutcherov V, Kolesnikov A. Hydrocarbon [M]. Croatia: InTech, 2013. 161-194.
- [6] Shi L, Squier T C, Zachara J M, et al. Respiration of metal (hydr) oxides by *Shewanella* and *Geobacter*: a key role for multi-heme c-type cytochromes [J]. Molecular Microbiology, 2007, **65**(1): 12-20.
- [7] Jiao Y Q, Qian F, Li Y, et al. Deciphering the electron transport pathway for graphene oxide reduction by *Shewanella oneidensis* MR-1 [J]. Journal of Bacteriology, 2011, **193**(14): 3662-3665.
- [8] Shi L, Rosso K M, Zachara J M, et al. Mtr extracellular electron-transfer pathways in Fe(Ⅲ)-reducing or Fe(Ⅱ)-oxidizing bacteria: a genomic perspective [J]. Biochemical Society Transactions, 2012, **40**(6): 1261-1267.
- [9] Yang Y G, Xu M Y, Guo J, et al. Bacterial extracellular electron transfer in bioelectrochemical systems [J]. Process Biochemistry, 2012, **47**(12): 1707-1714.
- [10] Bretschger O, Obraztsova A, Sturm C A, et al. Current production and metal oxide reduction by *Shewanella oneidensis* MR-1 wild type and mutants [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, **73**(21): 7003-7012.
- [11] Rosenbaum M A, Bar H Y, Beg Q K, et al. Transcriptional analysis of *Shewanella oneidensis* MR-1 with an electrode compared to Fe(Ⅲ) citrate or oxygen as terminal electron acceptor [J]. PLoS One, 2012, **7**(2): e30872.
- [12] Kämpfer P, Young C C, Chen W M, et al. *Fontibacter flavus* gen. nov., sp. nov., a member of the family 'Cyclobacteriaceae', isolated from a hot spring [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2010, **60**(9): 2066-2070.
- [13] Zhang J, Yang G Q, Zhou S G, et al. *Fontibacter ferrireducens* sp. nov., an Fe(Ⅲ)-reducing bacterium isolated from a microbial fuel cell [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2013, **63**(3): 925-929.
- [14] McCormick M L, Adriaens P. Carbon tetrachloride transformation on the surface of nanoscale biogenic magnetite particles [J]. Environmental Science and Technology, 2004, **38**(4): 1045-1053.
- [15] 武春媛, 李芳柏, 周顺桂, 等. 成团泛菌 MFC-3 的分离鉴定及其腐殖质/Fe(Ⅲ) 呼吸特性研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 237-242.
- [16] Li X M, Zhou S G, Li F B, et al. Fe(Ⅲ) oxide reduction and carbon tetrachloride dechlorination by a newly isolated *Klebsiella pneumoniae* strain L17 [J]. Journal of Applied Microbiology, 2009, **106**(1): 130-139.
- [17] Knight V, Blakemore R. Reduction of diverse electron acceptors by *Aeromonas hydrophila* [J]. Archives of Microbiology, 1998, **169**(3): 239-248.
- [18] Xi Z H, Guo J B, Lian J, et al. Study the catalyzing mechanism of dissolved redox mediators on bio-denitrification by metabolic inhibitors [J]. Bioresource Technology, 2013, **140**: 22-27.
- [19] 陶亚, 袁田, 周顺桂, 等. 水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 [J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1871-1877.
- [20] Yuan T, Yuan Y, Zhou S G, et al. A rapid and simple electrochemical method for evaluating the electron transfer capacities of dissolved organic matter [J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, **11**(3): 467-473.
- [21] Van Trump J I, Sun Y, Coates J D. Microbial interactions with humic substances [J]. Advances in Applied Microbiology, 2006, **60**: 55-96.
- [22] Woźnica A, Dzirba J, Mańka D, et al. Effects of electron transport inhibitors on iron reduction in *Aeromonas hydrophila*

- strain KB1[J]. *Anaerobe*, 2003, **9**(3): 125-130.
- [23] Bird L J, Bonnefoy V, Newman D K. Bioenergetic challenges of microbial iron metabolism[J]. *Trends in Microbiology*, 2011, **19**(7): 330-340.
- [24] Hunt K A, Flynn J M, Naranjo B, *et al.* Substrate-level phosphorylation is the primary source of energy conservation during anaerobic respiration of *Shewanella oneidensis* strain MR-1 [J]. *Journal of Bacteriology*, 2010, **192**(13): 3345-3351.
- [25] Gorby Y A, Lovley D R. Electron transport in the dissimilatory iron reducer, GS- 15 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, **57**(3): 867-870.
- [26] Myers C R, Myers J M. Localization of cytochromes to the outer membrane of anaerobically grown *Shewanella putrefaciens* MR-1 [J]. *Journal of Bacteriology*, 1992, **174**(11): 3429-3438.
- [27] Kaufmann F, Lovley D R. Isolation and characterization of a soluble NADPH-dependent of Fe(Ⅲ) reductase from *Geobacter sulfurreducens* [J]. *Journal of Bacteriology*, 2001, **183**(15): 4468-4476.
- [28] Straub K L, Schink B. Ferrihydrite reduction by *Geobacter* species is stimulated by secondary bacteria [J]. *Archives of Microbiology*, 2004, **182**(2-3): 175-181.
- [29] Voordeckers J W, Kim B C, Izallalen M, *et al.* Role of *Geobacter sulfurreducens* outer surface c-type cytochromes in reduction of soil humic acid and anthraquinone-2, 6-disulfonate [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(7): 2371-2375.
- [30] Carlson H K, Iavarone A T, Gorur A, *et al.* Surface multiheme c-type cytochromes from *Thermincola potens* and implications for respiratory metal reduction by Gram-positive bacteria [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(5): 1702-1707.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue, <i>et al.</i>	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing, <i>et al.</i>	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang, <i>et al.</i>	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang, <i>et al.</i>	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

《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9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 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

国内外公开发行人