

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

编者按 ..... (403)

我国化学品的风险评价及风险管理 ..... 王铁宇,周云桥,李奇锋,吕永龙 (404)

土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用 ..... 吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)

中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素 ..... 黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)

关中地区冬季PM<sub>2.5</sub>中碳气溶胶的污染特征及来源解析 ..... 田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)

利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分 ..... 刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)

南京夏季市区VOCs特征及O<sub>3</sub>生成潜势的相关性分析 ..... 杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)

北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系 ..... 孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)

重庆垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究 ..... 段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)

三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征 ..... 张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)

长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析 ..... 谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)

青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程 ..... 孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)

西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估 ..... 郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)

坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价 ..... 余成,陈爽,张路 (499)

近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征 ..... 沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)

舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征 ..... 郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)

模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究 ..... 李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)

中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究 ..... 王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)

江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献 ..... 韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)

巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征 ..... 奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)

合肥城郊典型农田溪流系统沉积物磷形态及释放风险分析 ..... 裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)

桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征 ..... 朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)

苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态 ..... 李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)

洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析 ..... 李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)

三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响 ..... 江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)

pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响 ..... 王辉,孙波,关小红 (588)

EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响 ..... 周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)

镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能 ..... 王婷,朱春山,胡承志 (602)

微生物对砷的氧化还原竞争 ..... 杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)

处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征 ..... 曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)

污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应 ..... 景明,王磊 (622)

异养硝化-好氧反硝化菌 *Burkholderia* sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析 ..... 邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫渊辉 (630)

基于新一代测序技术的A<sup>2</sup>O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析 ..... 田美,刘汉湖,申欣 (638)

1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性 ..... 孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)

纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究 ..... 舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)

3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性 ..... 徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)

合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究 ..... 范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)

芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性 ..... 吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)

芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能 ..... 张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)

季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响 ..... 林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)

增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响 ..... 陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)

基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征 ..... 王幼奇,白一茹,王建宇 (710)

不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制 ..... 朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)

紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素 ..... 王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)

几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响 ..... 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)

河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征 ..... 吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶澍,刘文新 (740)

湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响 ..... 罗鹏程,李航,王曙光 (750)

溴酸盐对水生生物的急性毒性效应 ..... 王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)

自组装哑铃状Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解 ..... 黄鑫辰,宗刚,刘焯焯,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)

盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N<sub>2</sub>O产生的影响 ..... 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)

污泥直接干化尾气中恶臭污染物重要性评价:以指标权重评分法为例 ..... 丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)

《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)

# 微生物对砷的氧化还原竞争

杨婷婷<sup>1,2</sup>, 柏耀辉<sup>2\*</sup>, 梁金松<sup>2</sup>, 霍旻<sup>2</sup>, 王明星<sup>1</sup>, 袁林江<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 中国科学院饮用水科学与技术创新重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 滤池被广泛运用于饮用水厂中, 前期研究发现某水厂生物滤池处理含砷地下水时, 一方面三价砷可被生物氧化锰氧化为五价砷, 另一方面滤池系统中存在的微生物砷还原酶可促使五价砷还原为三价砷, 而滤池表面存在的这种微生物竞争关系会影响滤池的稳定性及处理效率。为探讨其内在机制, 本研究选取 1 株锰氧化模式菌 (*Pseudomonas* sp. QJX-1) 和 1 株砷还原模式菌 (*Brevibacterium* sp. LSJ-9), 考察在  $Mn^{2+}$ 、As ( $As^{3+}$ 、 $As^{5+}$ ) 共存时, 两菌株对空间、营养物质以及对砷氧化/还原的竞争关系。结果表明, 不同的反应时间, Mn、As 质量浓度/价态不同, 三价及五价砷体系中, *Pseudomonas* sp. QJX-1 生成的锰氧化物在砷的氧化还原反应中占主导地位, 即能迅速氧化本身存在的  $As^{3+}$  (三价砷体系) 和砷还原菌产生的  $As^{3+}$  (五价砷体系), 最终两体系中砷都主要以  $As^{5+}$  的形式存在。PCR 及 RT-PCR 结果表明, 反应过程中锰氧化菌功能基因 (*cumA*) 抑制了砷还原酶 (*arsC*) 的表达, 锰氧化菌 16S rRNA 表达量始终比砷还原菌高两个数量级, 即锰氧化菌在生长竞争过程中占优势。实验结果表明滤池的水力停留时间是决定出水中砷价态的一个重要因素。

**关键词:** 砷氧化还原; 锰氧化; 微生物竞争; 生物滤池; 营养物质

中图分类号: X131.2; X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0609-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.028

## Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic

YANG Ting-ting<sup>1,2</sup>, BAI Yao-hui<sup>2\*</sup>, LIANG Jin-song<sup>2</sup>, HUO Yang<sup>2</sup>, WANG Ming-xing<sup>1</sup>, YUAN Lin-jiang<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Filters are widely applied in drinking water treatment plants. Our previous study, which explored the arsenic redox in a filter of drinking water plant treating underground water, found that  $As^{3+}$  could be oxidized to  $As^{5+}$  by biogenic manganese oxides, while  $As^{5+}$  could be reduced to  $As^{3+}$  by some microbial arsenic reductases in the biofilter system. This microbial competition could influence the system stability and treatment efficiency. To explore its mechanism, this study selected a manganese-oxidizing bacterial strain (*Pseudomonas* sp. QJX-1) and a arsenic-reducing strain (*Brevibacterium* sp. LSJ-9) to investigate their competitive relationship in nutrient acquisition and arsenic redox in the presence of  $Mn^{2+}$ ,  $As^{3+}$  or  $As^{5+}$ . The results revealed that the concentration and valence of Mn and As varied with different reaction time; biological manganese oxides dominated the arsenic redox by rapidly oxidizing the  $As^{3+}$  in the existing system and the  $As^{3+}$  generated by arsenic reductase into  $As^{5+}$ . PCR and RT-PCR results indicated that the arsenic reductase (*arsC*) was inhibited by the manganese oxidase (*cumA*). The expression of 16S rRNA in QJX-1 was two orders of magnitude higher than that in LSJ-9, which implied QJX-1 was dominant in the bacterial growth. Our data revealed that hydraulic retention time was critical to the valence of arsenic in the effluent of filter in drinking water treatment plant.

**Key words:** oxidation and reduction of arsenic; manganese oxides; microbial competition; biofilter; nutrient

砷在自然水体中主要以  $As^{3+}$  和  $As^{5+}$  两种形式存在, 其中  $As^{3+}$  毒性比  $As^{5+}$  毒性高出 60 倍。砷在人体新陈代谢过程中的迁移十分缓慢, 长期饮用受砷污染的地下水会造成皮肤癌、肺癌等疾病<sup>[1,2]</sup>。我国云南、山西、新疆、内蒙等地区的地下水均受到不同程度的砷污染<sup>[3]</sup>, 作为主要饮用水源, 某些地区地下水砷质量浓度高达  $1\ 530\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[4]</sup>, 远高于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 中规定的砷浓度。在常规饮用水处理系统中, 混凝/絮凝工艺<sup>[5]</sup>、滤池吸附工艺<sup>[6,7]</sup> 均可以在一定程度上降低砷质量浓度, 而与混凝/絮凝工艺相比, 滤池吸附工

艺兼具有净化效率高、处理成本低廉等优点。生物滤池主要利用进水中的锰氧化菌, 将  $Mn^{2+}$  氧化为锰的高价氧化物<sup>[8]</sup>, 生成的锰氧化物具有高效的氧化性和一定的吸附性<sup>[9,10]</sup>, 氧化吸附水体中的 As ( $As^{3+}$ 、 $As^{5+}$ ), 在氧化吸附的过程中形成包括锰氧化物、砷以及细菌在内的多重络合物附着在滤料表面, 从而达到通过价态转换降低 As 的毒性, 通过吸

收稿日期: 2015-09-04; 修订日期: 2015-10-14

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409029); 环境水质学实验室基金项目(13Z03ESPCT)

作者简介: 杨婷婷(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为铁锰生物氧化物除砷, E-mail: yangtt619@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: yhbai@cees.ac.cn

附作用去除水体中的 As 的效果。

通过前期对生物滤池微生物群落宏基因组的分析,发现滤池表面生物膜中含有丰度较高的砷还原酶<sup>[11]</sup>,这表明滤池中存在一定的砷还原菌。而当滤池中  $Mn^{2+}$ 、As ( $As^{3+}$ 、 $As^{5+}$ ) 和两种细菌同时存在时,针对 As 的氧化还原反应会同时发生,竞争对砷形态的影响;即锰氧化菌作用产生的锰氧化物,将  $As^{3+}$  氧化为  $As^{5+}$ ,而砷还原菌将  $As^{5+}$  还原成  $As^{3+}$ ;同时,两种细菌还会竞争空间、营养物质。以往很多研究发现<sup>[12,13]</sup>,经过生物滤池处理后的水含砷量明显降低,且残余的砷主要以  $As^{5+}$  的形式存在。据此提出如下假设:生物氧化锰导致的砷氧化相比微生物的砷还原在滤池表面占主导作用,即含 As ( $As^{3+}$ 、 $As^{5+}$ ) 的地下水经滤池作用后出水以  $As^{5+}$  为主。为验证此假设,以 1 株锰氧化模式菌和 1 株砷还原模式菌为研究对象,结合理化分析及分子检测,探究两菌株生长过程的竞争以及对砷的氧化/还原竞争的关系,以期为生物滤池转化去除地下水中  $Mn^{2+}$ 、As 提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 培养基和菌株

菌株培养采用 PYG 培养基 (peptoneyeast extract-glucose): 葡萄糖 0.25 g, 酵母膏 0.25 g, 蛋白胨 0.25 g,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  0.5 g,  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  60 mg, 蒸馏水 1 L, 用 HEPES (*N*-2-Hydroxyethylpiperazine-*N'*-2-ethanesulfonic acid, 4-羟乙基哌嗪乙磺酸) 调节 pH 为  $7.6 \pm 0.2$ , 高温灭菌。

实验采用的砷还原菌为短杆菌 LSJ-9 (*Brevibacterium* sp. LSJ-9), 该菌株为革兰氏阳性专性好氧无芽孢菌, 呈短杆状, 由湖南受砷污染严重的土壤分离纯化得到; 锰氧化菌为假单胞菌 QJX-1 (*Pseudomonas* sp. QJX-1)<sup>[14]</sup>, 该菌株为革兰氏阴性好氧无芽孢菌, 呈杆状或略弯, 细胞两端圆钝, 由湖南湘潭锰矿区域土壤分离纯化得到。

取保存于  $-80^\circ C$  冰箱中的 *Pseudomonas* sp. QJX-1 和 *Brevibacterium* sp. LSJ-9 菌液 3 mL, 分别加至装有 27 mL 新鲜 PYG 培养基的 100 mL 锥形瓶中,  $30^\circ C$ ,  $170 r \cdot min^{-1}$  恒温振荡培养 24 h, 取 3 mL 培养后的菌液, 重复上述操作, 完成菌株的活化。

### 1.2 两株菌对 $As^{3+}$ 、 $As^{5+}$ 的氧化还原

取上述活化后的菌液各 20 mL, 同时加至装有 160 mL 新鲜 PYG 培养基的 500 mL 锥形瓶中, 将 HEPES 缓冲液、 $Mn^{2+}$  母液和 As ( $As^{3+}$ 、 $As^{5+}$ ) 母液

一起用高温灭菌后的  $0.22 \mu m$  滤膜过滤, 添加到培养基中, 使得  $Mn^{2+}$  终浓度为  $5 mg \cdot L^{-1}$ , As ( $As^{3+}$ 、 $As^{5+}$ ) 终浓度为  $0.75 mg \cdot L^{-1}$ ,  $30^\circ C$ ,  $170 r \cdot min^{-1}$  恒温振荡培养 72 h。培养过程中间隔特定时间取样, 样品经  $0.22 \mu m$  滤膜过滤, 通过电感耦合等离子体原子发射光谱法 (700 series ICP-OES) 测定  $Mn^{2+}$  的浓度, 通过原子荧光光谱法测定  $As^{3+}$  和总 As 浓度。相同条件下, 设置 *Pseudomonas* sp. QJX-1 菌株单独氧化  $Mn^{2+}$  和 *Brevibacterium* sp. LSJ-9 菌株单独还原  $As^{5+}$  作为对照实验, 上述实验均设置 3 组平行。

### 1.3 两株菌生长及功能表达竞争

有研究表明, *cumA* 在假单胞菌锰氧化过程中是必不可少的基因, 而 *arsC* 是微生物细胞质砷还原的重要基因。因此采用 PCR 及 Real-time PCR 分析两菌株在同一环境下生长竞争及功能表达竞争的关系。

(1) RNA 提取与反转录 根据实验分析, 9 h 培养基中细菌数最多, 27 h 两菌株处于竞争关系, 51 h 达到“稳定”。因此选取 9、27、51 h 这 3 个时间点取样 1.8 mL, 用 Trizol 法 (Tiangen, China) 提取样品中菌体的总 RNA, 用 FastQuant RT Kit (With gDNase) (Tiangen, China) 将总 RNA 反转录为 cDNA。

(2) PCR 扩增 以上述 cDNA 为模板, 分别对两菌株的功能基因——多铜氧化酶 *cumA*<sup>[15]</sup> 和砷还原酶 *arsC*<sup>[16]</sup> 进行 PCR 扩增。根据 *Brevibacterium* sp. LSJ-9 和 *Pseudomonas* sp. QJX-1 纯菌株的 cDNA 序列, 设计并合成两菌株 16S rRNA 相对特异性的引物, 两对引物分别以纯菌株的 cDNA 为模板, 进行 PCR 扩增。所采用的 PCR 引物及扩增条件如表 1 所示。PCR 采用  $20 \mu L$  扩增体系,  $2 \times Taq$  PCR Master Mix  $10 \mu L$ , Forward primer ( $10 \mu mol \cdot L^{-1}$ )  $0.4 \mu L$ , Reverse primer ( $10 \mu mol \cdot L^{-1}$ )  $0.4 \mu L$ ,  $ddH_2O$   $7.2 \mu L$ , 模板  $2 \mu L$ , 实验设置 3 组平行。

(3) Real-time PCR 将两株纯菌的 16S rRNA 和 *arsC* 基因的 PCR 扩增产物纯化、回收后送至上海美吉生物公司合成质粒, 以合成的质粒作为标准品, 实验提取的总 RNA 反转录 cDNA 为模板, 进行 Real-time PCR, 计算各阶段 *Pseudomonas* sp. QJX-1 菌株和 *Brevibacterium* sp. LSJ-9 菌株 16S rRNA 拷贝数和各阶段两菌株 16S rRNA 拷贝数之比, 以及各阶段 *arsC* 基因的拷贝数。Real-time PCR 采用  $20 \mu L$  扩增体系,  $2 \times SuperRealPreMix Plus$  (with SYBR Green I)  $10 \mu L$ ,  $50 \times ROX$  Reference Dye  $2 \mu L$ ,

Forward primer( $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) $0.4 \mu\text{L}$ , Reverse primer ( $10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) $0.4 \mu\text{L}$ , ddH<sub>2</sub>O  $5.2 \mu\text{L}$ , 模板  $2 \mu\text{L}$ ,

实验设置 3 组平行. 所采用的 Real-time PCR 引物及扩增条件如表 1 所示.

表 1 PCR、RT-PCR 引物及扩增条件<sup>1)</sup>

Table 1 Sequence of the primers and thermocycling condition for PCR and RT-PCR

扩增产物	引物(5'-3')	扩增条件	文献
cumA(800bp)	cumAIdg2B:GAYGCCGGYAGCTACTGGTAYCACCC cumAIdgR:ACYTTGAARSYCATGCCRTGCARRTG	94℃ 3 min; 94℃ 30 s, 45℃ 30 s, 60℃ 1 min; 72℃ 2 min; 30 次循环	[17]
arsC(353bp)	amlt42f:TCGCGTAATACGCTGGAGAT amlt376r:ACTTTCTCGCCGTCTTCCTT	95℃ 5 min; 95℃ 45 s, 60℃ 45 s, 72℃ 1 min; 72℃ 2 min; 40 次循环	[16]
arsC(353bp)	amlt42f:TCGCGTAATACGCTGGAGAT amlt376r:ACTTTCTCGCCGTCTTCCTT	* 95℃ 15 min; 95℃ 45 s, 60℃ 45 s, 72℃ 1 min; 40 次循环	[16]
16S(短杆菌)	F:AGACGGTTTACGCTGTCACCT R:GGTACTTGTCTTCCCTAACACA	* 95℃ 15 min; 95℃ 30 s, 45℃ 30 s, 60℃ 1 min; 40 次循环	本研究
16S(假单胞菌)	F:GGTACTTGTCTTCCCTAACACA R:CCACTGGTGTTCCTTCCTATATC	* 94℃ 15 min; 94℃ 30 s, 45℃ 30 s, 60℃ 1 min; 30 次循环	本研究

1) \* 表示 Real-time PCR 扩增条件

## 2 结果与讨论

### 2.1 两菌株对 As<sup>3+</sup> 及 As<sup>5+</sup> 的氧化还原

为探究两菌株对 As<sup>3+</sup>、As<sup>5+</sup> 的氧化还原竞争, 按 1.2 节所示方法, 首先分析了 *Pseudomonas* sp. QJX-1 单独氧化 Mn<sup>2+</sup> 及 *Brevibacterium* sp. LSJ-9 单独还原 As<sup>5+</sup> 的过程, 如图 1. 可以看出, *Pseudomonas* sp. QJX-1 菌株 9 h 左右生长达到最大, 并开始生成不溶性氧化锰[图 1(a)]. 与 *Pseudomonas* sp. QJX-1 菌株生长趋势相似, *Brevibacterium* sp. LSJ-9 菌株 9 h 左右生长达到最大, 而与之不同的是, 在菌株生长达到最大之前, As<sup>5+</sup> 已经开始被还原[图 1(b)]. 这与两菌株的作用机制不同有关, 环境中的 As<sup>5+</sup> 可通过砷还原菌细胞膜上的磷脂通道进入细胞内, 为降低细胞内的砷浓度, 达到细胞解毒的目的, *arsC* 基因将 As<sup>5+</sup> 还原为 As<sup>3+</sup>, 再通过膜蛋白将 As<sup>3+</sup> 泵出细胞<sup>[18,19]</sup>. 因此砷还原微生物的生长伴随着五价砷的还原. 而 *cumA* 的活性并不需要 Mn<sup>2+</sup> 的诱导<sup>[20]</sup>, Mn<sup>2+</sup> 的存在是锰氧化菌生长的非必要因素, 因此锰氧化发生在菌体生长稳定之后.

同时设置了三价砷及五价砷体系, 考察两菌株对 As<sup>3+</sup>、As<sup>5+</sup> 的氧化还原竞争, 如图 2. 与菌株单独培养相比, 两菌株同时培养时, 三价砷体系中不溶性氧化锰生成的时间明显延后[图 2(a)], 但最终 Mn<sup>2+</sup> 的氧化率达 98.3%, 生成的生物氧化锰对 As<sup>3+</sup> 的氧化率也达 95%, 与报道的生物氧化锰单独氧化 As<sup>3+</sup> 的效率相似<sup>[10]</sup>, 即砷还原菌的存在, 并不影响生物氧化锰对 As<sup>3+</sup> 的氧化效率. 五价砷体系中, As<sup>5+</sup> 被还原到一定程度(73%), 生物氧化锰开始氧化生成的 As<sup>3+</sup>[图 2(b)], 而此时并

未达到砷还原菌单独还原砷的最大效率(86%), 且反应结束时, 砷基本以 As<sup>5+</sup> 的形式存在. 结果表明, 反应初期, 两菌株分别起到了锰氧化和砷还原作用, 但最终生物氧化锰对砷的氧化作用相比于砷还原菌的还原作用占优势. 同时也可以看出, 不同反应时间, 培养基中 Mn 与 As 存在的浓度以及价态不同, 由此可推出滤池水力停留时间(HRT)的不同会影响出水中锰、砷的质量浓度/形

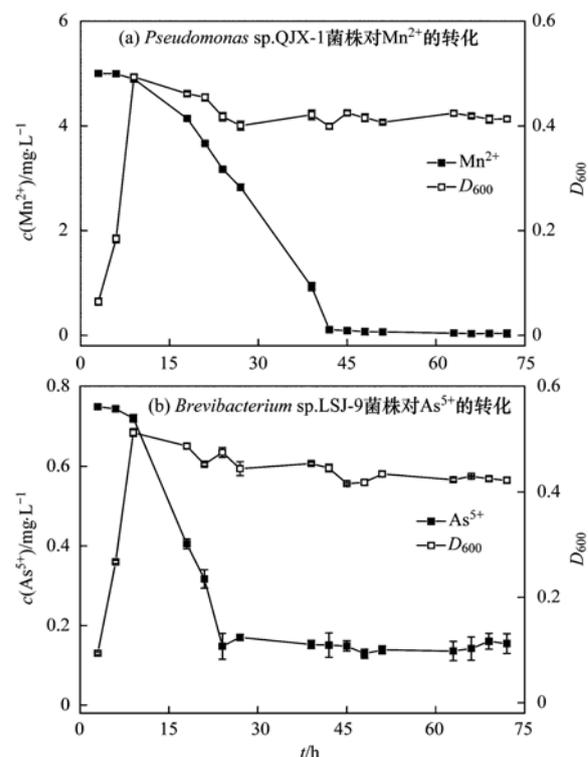


图 1 菌株生长曲线及分别对 Mn<sup>2+</sup>、As<sup>5+</sup> 的作用

Fig. 1 Strain growth curves and effect of Mn<sup>2+</sup> and As<sup>5+</sup>, respectively

态,从而影响出水水质. 停留时间短,生物氧化锰未完全氧化  $As^{3+}$ ,没有达到降低水体毒性的目的,并且很多氧化物对  $As^{3+}$  的吸附效果不如  $As^{5+}$  好<sup>[21]</sup>,因此  $As^{3+}$  的存在不利于对总 As 的吸附去除. Devi 等<sup>[13]</sup>在对不同 HRT 对砷去除效果的研究中也发现,相同条件下,停留 10 h 对砷的去除效果要优于停留 2~8 h.

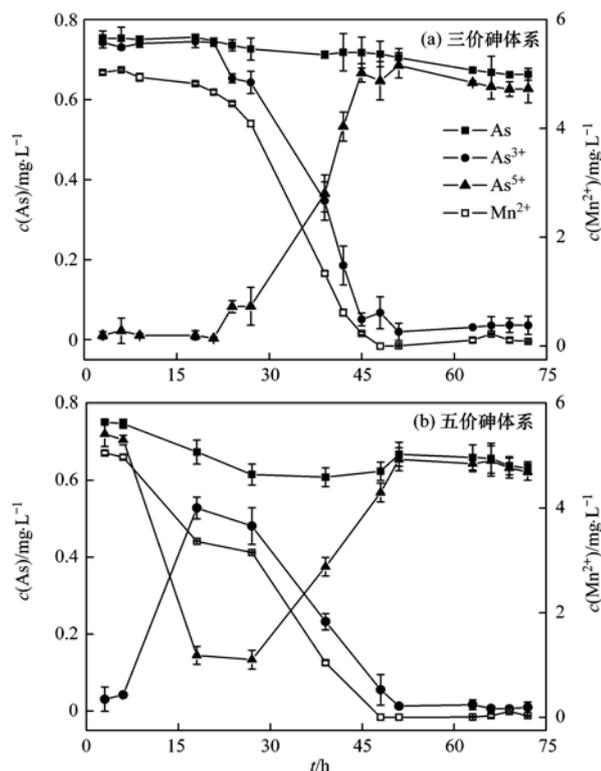


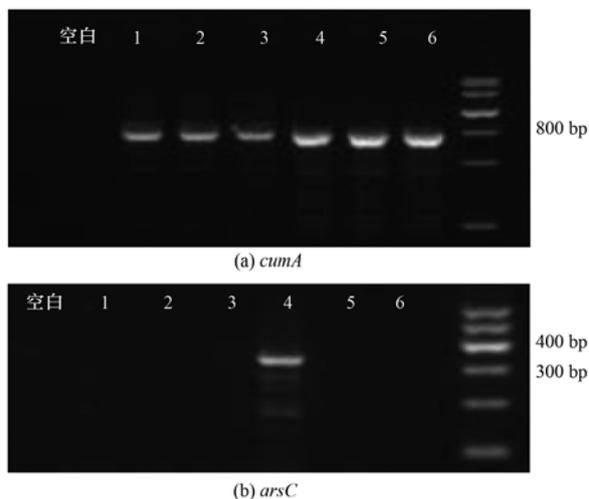
图2 两菌株共存时  $Mn^{2+}$ 、 $As^{5+}$  浓度变化

Fig. 2 Concentration changes of  $Mn^{2+}$  and As in the coexistence of two strains

## 2.2 两菌株生长及功能表达竞争

### 2.2.1 PCR 扩增

为分析生物氧化锰在对砷价态竞争中占优势的原因,对两菌株的功能基因进行了 PCR 扩增. 由图 3 可以看出,多铜氧化酶 *cumA* (800bp) 在两体系中均有表达,而砷还原酶 *arsC* (353bp) 只在五价砷体系 9h 样品中有表达,其余时间样品中均未表达. 由此推测反应过程中 *cumA* 基因抑制了 *arsC* 基因的表达,使得 *Brevibacterium* sp. LSJ-9 菌株的还原性受到抑制. Greene 等<sup>[22]</sup>在研究反硝化脱硫菌 (NR-SOB) 和硫酸盐还原菌 (SRB) 竞争时也得出相似的结论. 从而解释了反应末期,两体系培养基中  $Mn^{2+}$  最终基本完全被氧化,砷主要以  $As^{5+}$  的形式存在的原因. 也解释了虽然滤池中存在砷还原微生物,并不会导致滤池出水中含有大量  $As^{3+}$  的原因.



1~3 分别表示三价砷体系 9、27、51 h;  
4~6 分别表示五价砷体系 9、27、51 h

图3 功能基因 PCR 扩增产物的琼脂糖凝胶电泳图

Fig. 3 Agarose gel electrophoresis of PCR products of the functional genes *cumA* and *arsC*

### 2.2.2 Real-time PCR 分析

为进一步研究两菌株生长过程中对空间、营养物质的竞争关系,对两菌株 16S rRNA 进行 Real-time PCR 定量分析. 由图 4(a)、4(b) 可看出,反应初期 (9 h),16S rRNA 表达量均达最大值,与图 1 结果相符,即空间、营养物质丰富时,两菌株均可大量生长. 但两体系中 *Pseudomonas* sp. QJX-1 菌株与 *Brevibacterium* sp. LSJ-9 菌株 16S rRNA 表达量之比分别为  $2.63 \times 10^2$  和  $1.53 \times 10^2$ ,表明 *Pseudomonas* sp. QJX-1 是优势菌,在同一环境中更快生长. 随着空间、营养物质的逐渐减少,16S rRNA 的表达量均减弱,但比值逐渐增大,27 h 菌株的 16S rRNA 表达量之比分别为  $2.86 \times 10^2$  和  $1.76 \times 10^2$ ,51 h 分别为  $3.13 \times 10^2$  和  $4.4 \times 10^2$ . 表明空间、营养物质的改变影响菌体间的相互作用,从而增强菌体间的竞争关系<sup>[23,24]</sup>. 分析原因,这与两菌株对空间、营养物质的不同需求有关,有研究报道锰氧化菌属于贫营养菌<sup>[25]</sup>,在贫营养中生长得更好.

为进一步分析功能基因竞争关系,对 *arsC* 基因进行了 Real-time PCR 定量分析[图 4(c)],结果表明,反应初期,五价砷体系 *arsC* 基因量较多,较其余时期高出一个数量级,即  $As^{5+}$  的存在有利于 *arsC* 基因的表达. 随着反应的进行,*arsC* 基因量逐渐减少,且 *Brevibacterium* sp. LSJ-9 菌株 16S rRNA 与 *arsC* 基因表达量相比始终相差两个数量级以上. 对比图 3、图 4 可以看出,*Pseudomonas* sp. QJX-1 菌株在竞争非生物环境时占优势,但并没有抑制 *Brevibacterium*

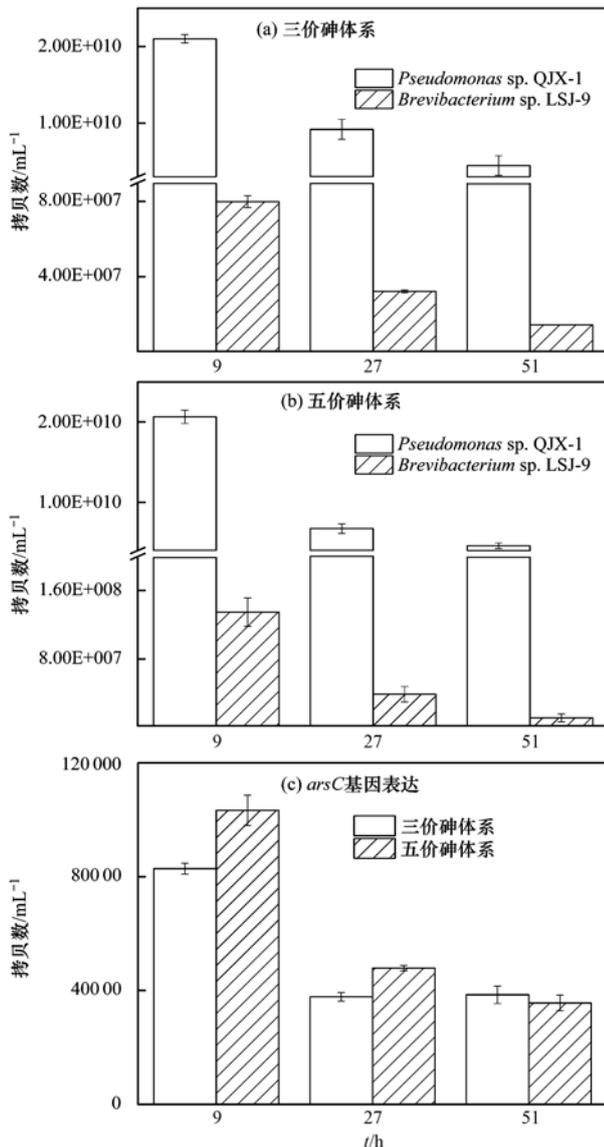


图4 两菌株各阶段16S rRNA表达量及 *arsC* 基因表达

Fig. 4 Expression of 16S rRNA and *arsC* at different growth stages of the two strains

sp. LSJ-9 菌株的生长,但随着反应的进行,*cumA* 基因抑制了 *arsC* 基因的表达。

### 2.3 环境学意义

生物处理工艺越来越多地被运用于水厂中,而微生物之间的竞争关系影响到处理工艺的稳定性及效率<sup>[26,27]</sup>。如由于菌体作用机制不同,导致水体中锰、砷的质量浓度/价态随着反应时间的不同而变化。由此推测,若滤池进水中以  $As^{5+}$  为主,反应时间短,砷还原菌迅速将  $As^{5+}$  还原,而生成的生物氧化锰未来得及将生成的  $As^{3+}$  氧化,反而提高了水体中砷的毒性。进一步验证了 HRT 短滤池对砷的氧化去除效果差,影响出水水质。因此研究滤池滤膜表面微生物的竞争,有利于了解滤池的作用机制,以便提高滤池去

除 Mn、As 等离子效率,降低出水毒性。

### 3 结论

(1) *cumA* 基因抑制 *arsC* 基因的表达,从而降低了 *Brevibacterium sp. LSJ-9* 菌株对  $As^{5+}$  的还原性,即生物氧化锰对砷的氧化相对于微生物对砷的还原占优势。

(2) *Pseudomonas sp. QJX-1* 菌株 16S rRNA 基因表达量始终比 *Brevibacterium sp. LSJ-9* 菌株高两个数量级,即在对非生物环境(空间、营养物质)竞争中,*Pseudomonas sp. QJX-1* 菌株始终占优势。

(3) 锰氧化菌与砷还原菌的作用机制不同,从而反应时间短,不利于降低水体中砷的毒性。验证了水厂滤池中 HRT 时间短,影响出水的水质。

### 参考文献:

- [1] EPA. Technologies and costs for removal of arsenic from drinking water[R]. Washington DC: U. S. EPA, 2000.
- [2] Herbert K J, Holloway A, Cook A L, et al. Arsenic exposure disrupts epigenetic regulation of SIRT1 in human keratinocytes [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2014, **281** (1): 136-145.
- [3] 吴佳, 谢明吉, 杨倩, 等. 砷污染微生物修复的进展研究 [J]. 环境科学, 2011, **32** (3): 817-824.
- [4] 丁爱中, 杨双喜, 张宏达. 地下水砷污染分析 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, **37** (2): 319-325.
- [5] Wang Y X, Duan J M, Liu S X, et al. Removal of As(III) and As(V) by ferric salts coagulation-Implications of particle size and zeta potential of precipitates [J]. Separation and Purification Technology, 2014, **135**: 64-71.
- [6] Katsoyiannis I A, Zouboulis A I. Application of biological processes for the removal of arsenic from groundwaters [J]. Water Research, 2004, **38** (1): 17-26.
- [7] Katsoyiannis I A, Zouboulis A I, Jekel M. Kinetics of bacterial As(III) oxidation and subsequent As(V) removal by sorption onto biogenic manganese oxides during groundwater treatment [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2004, **43** (2): 486-493.
- [8] Bruins J H, Petrussevi B, Slokar Y M, et al. Biological and physico-chemical formation of Birnessite during the ripening of manganese removal filters [J]. Water Research, 2015, **69**: 154-161.
- [9] Han X, Li Y L, Gu J D. Abiotic oxidation of Mn(II) and its effect on the oxidation of As(III) in the presence of nanohematite [J]. Ecotoxicology, 2012, **21** (6): 1753-1760.
- [10] Watanabe J, Tani Y, Chang J N, et al. As(III) oxidation kinetics of biogenic manganese oxides formed by *Acremonium strictum* strain KR21-2 [J]. Chemical Geology, 2013, **347**: 227-232.

- [11] Bai Y H, Liu R P, Liang J S, *et al.* Integrated metagenomic and physicochemical analyses to evaluate the potential role of microbes in the sand filter of a drinking water treatment system[J]. *PLoS One*, 2013, **8**(4): e61011.
- [12] Katsoyiannis I A, Zikoudi A, Hug S J. Arsenic removal from groundwaters containing iron, ammonium, manganese and phosphate: A case study from a treatment unit in northern Greece [J]. *Desalination*, 2008, **224**(1-3): 330-339.
- [13] Devi R, Alemayehu E, Singh V, *et al.* Removal of fluoride, arsenic and coliform bacteria by modified homemade filter media from drinking water[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(7): 2269-2274.
- [14] 周娜娜, 柏耀辉, 梁金松, 等. *Pseudomonas* sp. QJX-1 的锰氧化特性研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 740-745.
- [15] Brouwers G J, de Vrind J P M, Corstjens P L, *et al.* *CumA*, a gene encoding a multicopper oxidase, is involved in  $Mn^{2+}$  oxidation in *Pseudomonas putida* GB-1 [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(4): 1762-1768.
- [16] Sun Y M, Polishchuk E A, Radoja U, *et al.* Identification and quantification of *arsC* genes in environmental samples by using real-time PCR[J]. *Journal of microbiological methods*, 2004, **58**(3): 335-349.
- [17] Francis C A, Tebo B M. *CumA* multicopper oxidase genes from diverse Mn (II)-oxidizing and non-Mn (II)-oxidizing *Pseudomonas* strains [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(9): 4272-4278.
- [18] Gladysheva T B, Oden K L, Rosen B P. Properties of the arsenate reductase of plasmid R773[J]. *Biochemistry*, 1994, **33**(23): 7288-7293.
- [19] Achour A R, Bauda P, Billard P. Diversity of arsenite transporter genes from arsenic-resistant soil bacteria [J]. *Research in Microbiology*, 2007, **158**(2): 128-137.
- [20] Francis C A, Co E M, Tebo B M. Enzymatic manganese (II) oxidation by a marine alpha-proteobacterium [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(9): 4024-4029.
- [21] Xiu W, Guo H M, Liu Q, *et al.* Arsenic removal and transformation by *Pseudomonas* sp. strain GE-1-induced ferrihydrite: co-precipitation versus adsorption[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, **226**: 167.
- [22] Greene E A, Hubert C, Nemati M, *et al.* Nitrite reductase activity of sulphate-reducing bacteria prevents their inhibition by nitrate-reducing, sulphide-oxidizing bacteria [J]. *Environmental Microbiology*, 2003, **5**(7): 607-617.
- [23] Lawrence D, Fiegna F, Behrends V, *et al.* Species interactions alter evolutionary responses to a novel environment [J]. *PLoS Biology*, 2012, **10**(5): e1001330.
- [24] Collins S. Competition limits adaptation and productivity in a photosynthetic alga at elevated  $CO_2$  [J]. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2011, **278**(1703): 247-255.
- [25] Gouzinis A, Kosmidis N, Vayenas D V, *et al.* Removal of Mn and simultaneous removal of  $NH_3$ , Fe and Mn from potable water using a trickling filter [J]. *Water Research*, 1998, **32**(8): 2442-2450.
- [26] Begum S A, Batista J R. Impact of butyrate on microbial selection in enhanced biological phosphorus removal systems [J]. *Environmental Technology*, 2014, **35**(21-24): 2961-2972.
- [27] Carvalheira M, Oehmen A, Carvalho G, *et al.* The effect of substrate competition on the metabolism of polyphosphate accumulating organisms (PAOs) [J]. *Water Research*, 2014, **64**: 149-159.

## CONTENTS

Editor's comment .....	( 403 )
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China .....	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> ( 404 )
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution .....	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng ( 413 )
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010 .....	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming ( 420 )
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Guanzhong Area .....	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> ( 427 )
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS .....	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> ( 434 )
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District .....	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> ( 443 )
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area .....	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> ( 452 )
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing .....	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> ( 459 )
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China .....	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> ( 466 )
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha .....	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> ( 475 )
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau .....	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> ( 482 )
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet .....	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> ( 490 )
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika .....	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu ( 499 )
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang .....	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> ( 507 )
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qingbang Island, Zhoushan, China .....	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> ( 513 )
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch .....	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> ( 520 )
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed .....	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> ( 527 )
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province .....	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> ( 534 )
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake .....	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> ( 542 )
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China .....	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> ( 548 )
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay .....	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> ( 558 )
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou .....	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> ( 565 )
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors .....	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> ( 573 )
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas .....	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> ( 580 )
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate .....	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong ( 588 )
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe .....	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> ( 595 )
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property .....	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi ( 602 )
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic .....	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 609 )
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water .....	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> ( 615 )
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria .....	JING Ming, WANG Lei ( 622 )
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02 .....	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> ( 630 )
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A <sup>2</sup> O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology .....	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin ( 638 )
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment .....	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> ( 647 )
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe .....	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> ( 655 )
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water .....	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> ( 662 )
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions .....	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> ( 668 )
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions .....	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> ( 680 )
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge .....	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> ( 689 )
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period .....	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> ( 697 )
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland .....	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> ( 703 )
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City .....	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu ( 710 )
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas .....	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> ( 717 )
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil .....	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> ( 726 )
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies .....	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> ( 734 )
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province .....	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> ( 740 )
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment .....	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang ( 750 )
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms .....	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> ( 756 )
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls .....	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> ( 765 )
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N <sub>2</sub> O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor .....	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> ( 775 )
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method .....	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> ( 782 )

# 《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行