

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性

谭文勃¹, 马晓丹¹, 黄聪¹, 陈川¹, 王爱杰^{1,2*}

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 环境生物技术重点实验室, 北京 100085)

摘要: 工业废水中的有机物、硫化物和含氮化合物是废水处理面临的重大挑战。利用生物技术, 可以实现在废水处理系统中同时去除这3种污染物。在污水处理反应器中, 分离出1株异养反硝化硫细菌 HDD1。基于16S rRNA基因的系统进化分析和生理特征显示菌株 HDD1 为 *Thauera* 属的一个种。菌株 HDD1 能够利用乙酸盐和硫化物作为电子供体, 硝酸盐作为电子受体进行呼吸作用。在15h之内, CH_3COO^- ($300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 S^{2-} ($200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 NO_3^- ($487 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 被完全代谢去除。扫描电子显微镜和能量色散谱结果显示硫化物氧化的主要产物为单质硫。菌株 HDD1 能够同时应用于工业废水处理和硫元素的资源化回收。

关键词: 硫化物; 单质硫; 乙酸盐; 硝酸盐; 反硝化作用

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0809-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201608034

Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain

TAN Wen-bo¹, MA Xiao-dan¹, HUANG Cong¹, CHEN Chuan¹, WANG Ai-jie^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biotechnology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Organics, sulfide and nitrogen compounds in industrial wastewater are significant challenges for wastewater treatment. These pollutants could be removed simultaneously from wastewater treatment system using biological technologies. In this study, a heterotrophic denitrifying sulfur bacterial strain HDD1 was isolated from wastewater treatment bioreactor. Strain HDD1 was identified as *Thauera* sp. based on the 16S rRNA gene phylogenetic analysis and physiological characteristics. Acetate and sulfide could be utilized as electron donors and nitrate as electron acceptor for respiration in *Thauera* sp. HDD1. The acetate ($300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), sulfide ($200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and nitrate ($487 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) were completely metabolized and removed within 15 hours. The main product of sulfide oxidation was elemental sulfur as identified by scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer. These results suggest that the newly isolated *Thauera* sp. HDD1 could be used for simultaneous industrial wastewater treatment and elemental sulfur resource recovery.

Key words: sulfide; elemental sulfur; acetate; nitrate; denitrification

多种工业废水及市政污水都同时含有碳、氮和硫系化合物。含氮化合物具有毒性和臭味, 而且能够引起水体的富营养化^[1]。基于目前的生物处理技术, 铵盐通常在好氧条件下被氧化为硝酸盐, 然后硝酸盐在厌氧条件下通过反硝化作用被还原成氮气^[2]。自然界多种异养微生物都能够利用各种有机物作为碳源和能源进行反硝化作用。它们具有丰富的生物多样性, 通常属于变形菌门中不同的属, 例如: *Rhodospirillum rubrum*、*Dechloromonas* 和 *Sulfuritalea*^[3]。

硫化物具有强烈的毒性和臭味, 它的超标排放是目前面临的严峻的环境问题之一。它能够和细胞色素中的金属离子进行反应, 进而抑制细胞的呼吸作用^[4]。此外, 它还具有腐蚀性并产生很高的化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD)。硫化物通

常在产甲烷的过程中伴随产生, 它也产生于多种工业加工过程, 例如: 石油化工、造纸、制革等^[5]。许多物理、化学和电化学方法已经用来处理气体和水中的硫化物, 例如: 沉淀法、气提、离子交换、电催化氧化、有机溶剂和化学氧化^[6]。其中, 利用无色硫细菌的生物处理技术具有低成本、低能耗和产物无害等优势。因此, 它是一种国际上日益关注的热门技术。*Thiobacillus denitrificans* 被发现能够利用无机硫化物作为能量来源, 无机碳化合物作为碳源进行生长^[7,8]。左剑恶等^[9]在升流式生物膜反应器

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51225802, 51308147)

作者简介: 谭文勃 (1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为工业废水处理技术, E-mail: wbt_hit@126.com

* 通信作者, E-mail: ajwang@rcees.ac.cn

中,利用无色硫细菌处理废水中的硫化物,去除率为90%,单质硫转化率为100%。这类能够利用无机硫化化合物的自养反硝化细菌具有较高的研究价值,因为它在反硝化过程中不需要再额外添加有机碳源并节约经济成本。相关技术目前已经得到广泛的应用,例如:市政污水、地表水和垃圾渗滤液的处理^[10,11]。

近年来,多单元联合生物技术快速发展并应用于处理含有碳、氮和硫系化合物的废水。此技术的过程原理为:厌氧发酵阶段硫酸盐还原所产生的硫化物及少量剩余 COD 在反硝化单元被来自硝化单元的硝酸盐氧化去除。在香港特别行政区,应用此技术已经成功建立了示范工程,主要进行沿海地区高硫酸盐生活污水的脱氮处理^[12,13]。脱氮单元中的活性污泥通常含有自养和异养反硝化细菌,其中有些物种能够利用含硫化化合物还原硝化单元所产生的硝酸盐^[14]。除能以含硫化化合物作为能源的自养反硝化细菌以外,一些异养细菌也被发现具有这样的功能。它们能够利用硫化物和硝酸盐进行呼吸作用,并产生单质硫和氮气作为反应产物^[15]。这种生物基单质硫具有亲水的特性,能够作为生产肥料和杀虫剂的原料,具有较高经济价值^[16]。

本研究分离 1 株能够利用硝酸盐作为电子受体,乙酸盐和硫化物作为电子供体进行生长代谢的细菌。在硫化物氧化过程中,单质硫为主要的反应产物。已有的研究结果显示 *Thauera* 属的物种是污水处理系统中最活跃的反硝化细菌^[17],但是其硫氧化的生理特性极少有研究报道。本研究揭示菌株 HDD1 在生态学以及污水处理技术应用中的重要意义。

1 材料与方法

1.1 菌株分离与培养条件

活性污泥来源于实验室运行的污水处理生物反应器。分离培养基包括以下物质($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$): $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$, 1.5; CH_3COONa , 0.387 5; KNO_3 , 0.757 5; NH_4Cl , 1.0; KH_2PO_4 , 1.8; $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$, 3.0; $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.1; Agar, 1.5。培养基灭菌后加入过滤灭菌的微量元素液^[18]。采用亨盖特厌氧培养技术结合稀释灭活法进行菌株的分离和纯化^[19]。活性污泥经过梯度稀释以后,接种到含有固体培养基的厌氧管中。在 30℃ 条件下静置培养 7 d 后,单克隆被接种到液体培养基中进行培养。液体培养基经过煮沸和充入氩气达到厌氧条件,加入 *L*-半胱氨酸

($0.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)和 1 mL 浓度为 0.2% 的刃天青作为除氧剂和指示剂。通过在固-液分离培养基中反复转接得到细菌培养物。通过显微镜观察和 16S rRNA 基因测序技术检测其是否为纯培养。

1.2 菌株鉴定

采用 Bacterial DNA Mini Kit (TianGen, 中国)提取细菌基因组 DNA。提取的基因组 DNA 经分光光度计(Nanodrop 2000, Thermo, 美国)定量后作为聚合酶链式反应的模板。采用细菌 16S rRNA 基因通用引物 F27 (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') 和 R1492 (5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3') 进行扩增反应^[20]。反应体系(50 μL)包括 Q5 Hot Start High-Fidelity 2X Master Mix (25 μL) (NEB, 美国), 浓度为 20 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的上下游引物(2 μL), 20 ng DNA 模板(1 μL) 和蒸馏水(22 μL)。采用 GeneAmp PCR system (9700, ABI, 美国)进行扩增反应,具体步骤设置如下: 94℃ 起始变性 3 min, 94℃ 变性 30 s, 55℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 1 min, 30 个循环。扩增产物经测序后,用 BLAST-N 程序和原核生物数据库进行比对分析^[21]。利用 MEGA 5.0 软件包^[22],采用邻位相连算法构建系统进化树^[23]。进化树的拓扑结构经过 1 000 次引导重复取样检验^[24]。

1.3 生理学和化学分析

细菌经离心收集后,用磷酸盐缓冲液清洗 3 次,用 2.5% 戊二醛固定 30 min。用 30%、50%、70%、90%、100% 的乙醇脱水后,以饱和叔丁醇做介质进行真空干燥。利用扫描电子显微镜(Quanta 200 FEG, FEI, 美国)观察细胞形态。利用生化试剂条(API 20NE, BioMérieux, 法国)检测菌株的生理特征。细胞经过标准革兰氏染色后,用氢氧化钾消散法复检^[25]。菌体蛋白浓度测定采用 Bradford Protein Assay Kit (Takara, 日本)的标准方法。 CH_3COO^- 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 和 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的浓度由离子色谱(ICS-90A, DIONEX, 美国)测定。 S^{2-} 的测定采用标准亚甲基蓝分光光度法^[26]。利用能量散射谱仪(EDAX, 美国)测定单质硫及其含量。菌株的 16S rRNA 基因序列的 GenBank 登录号为 KX242545。

2 结果与分析

2.1 菌株的分离与鉴定

经过 5 轮固-液分离培养基转接,得到菌株 HDD1。在显微镜视野下,细菌的形态呈统一的杆状; 16S rRNA 基因测序结果中不存在噪声信号,这

表明菌株 HDD1 为纯培养. 提交长度为1 397bp的 16S rRNA基因序列到数据库进行比对分析,结果显示 HDD1 与 *Thauera aminoaromatica* S2 的相似度最高,达到 98.7%. 进化树结果显示 HDD1 在 *Thauera* 属中形成一个单源的进化枝,并与 *Thauera*

humireducens 和 *Thauera terpenica* 形成一个进化群 (图 1). 用最大似然算法对系统进化树验证,得到相同结果. 这些结果表明菌株 HDD1 可能是 *Thauera* 属的一个新种,但是还需多相分类结果进行验证.

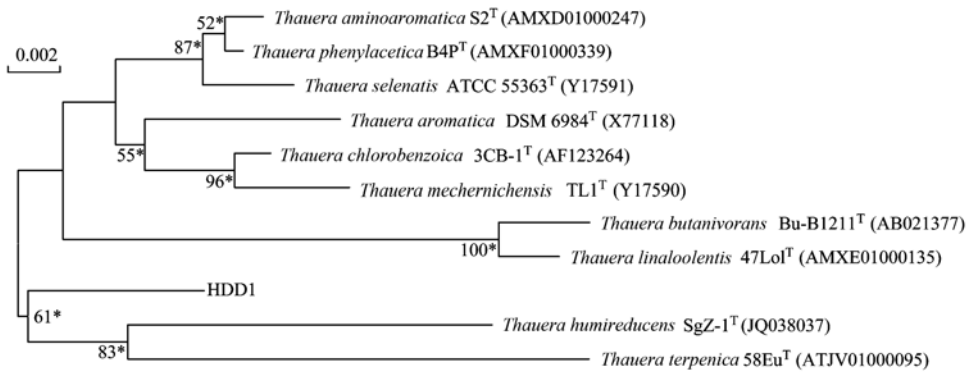


图 1 邻位相连法构建16S rRNA基因系统进化树

Fig. 1 Neighbour-joining phylogenetic tree based on 16S rRNA gene

2.2 菌株的生理特性

菌株 HDD1 革兰氏染色呈阴性,细胞呈杆状 (图 2). 反硝化作用、吡啉反应和有机酸同化作用呈阳性;糖类水解酸化反应呈阴性(表 1). 通常 *Thauera* 属的各个种是一类兼性厌氧,专性进行呼吸作用的细菌. 它们能够利用氧气、氮氧化物作为电子受体,在好氧呼吸和反硝化作用之间转化代谢状态. 有些种在厌氧条件下可以还原硒酸盐^[27]. 很多种能够利用有机酸、氨基酸、芳香和脂肪类化合物进行生长. 它们通常在污水处理厂、江河、池塘沉积物等被污染的地区被发现. 菌株 HDD1 的生理特征结果和伯杰氏系统微生物学手册中 *Thauera* 属的描述相同^[28].

表 1 菌株 HDD1 的生理学特性

Table 1 Physiological properties of <i>Thauera</i> sp. HDD1			
生理生化特征	结果	同化作用	结果
形态	杆状	葡萄糖	-
革兰氏染色	-	阿拉伯糖	-
反硝化作用	+	甘露糖	-
吡啉反应	+	甘露醇	-
葡萄糖酸化	-	N-乙酰葡萄糖胺	-
精氨酸水解酶	-	麦芽糖	-
脲酶	-	葡萄糖酸盐	-
七叶苷水解	-	癸酸盐	+
明胶水解	-	己二酸盐	+
		苹果酸盐	+
		柠檬酸盐	+
		苯乙酸盐	+

1) “+”表示阳性;“-”表示阴性



图 2 菌株 HDD1 扫描电子显微镜图像

Fig. 2 Transmission electron micrograph of *Thauera* sp. HDD1

2.3 菌株的代谢特性

菌株 HDD1 在厌氧条件下利用硝酸盐作为电子受体氧化乙酸盐和硫化物. 在 15 h 之内, CH_3COO^- 基本被完全代谢,其浓度由 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,菌体蛋白浓度由 $1.5 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 上升到 $11 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ [图 3(a)],生物量有所增加; NO_3^- 浓度由 $487 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^- 在第 15 ~ 20 h 之间有短暂的积累,最高浓度为 $67.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 3(b)];浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 S^{2-} 被完全代谢, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ($18.4 \sim 36.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 SO_4^{2-} ($85.5 \sim 127.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的浓度略有上升 [图 3(c)]. $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 和 SO_4^{2-} 的背景值可能是由于在灭菌过程中发生轻微

的氧化导致的. 在 0~5 h, CH_3COO^- 浓度快速地由 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $128 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 菌体蛋白浓度由 $1.5 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 上升到 $5.7 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$. 在代谢反应初期, 活化细菌直接进入对数生长期, 生物量快速增加, CH_3COO^- 浓度相应地快速下降. 在此阶段, NO_3^- ($487 \sim 283 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 作为电子受体并没有相应地大幅减少. 这是由于在对数生长期, 大部分 CH_3COO^- 通过同化作用直接合成细胞物质, 只有少部分通过与 NO_3^- 耦合进行呼吸作用. 进入稳定期和衰亡期后, 细菌同化作用速率减小, 需要产生大量能量维持细胞的生命活动. CH_3COO^- 和 S^{2-} 作为电子供体耦合 NO_3^- 进行呼吸作用, 大部分 NO_3^- ($283 \sim 38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 被代谢消耗. 为了限制 S^{2-} 过度氧化成 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 和 SO_4^{2-} , 增加单质硫的产量, 电子受体

NO_3^- 浓度 ($487 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 的初始设置较低. 它也是工艺实际运行过程中一个重要的参数, 根据进水 COD 含量和活性污泥状态而进行调整. 随着硫化物被逐渐氧化, 所形成的单质硫逐渐聚集成直径不同的颗粒 [图 4(a)]. 这些颗粒主要是由 C、O、S 和 P 等元素组成. 其中 S 元素占总含量的 20%; 由于样品中存在菌体等有机物, C 元素占总量的 68.6%; 由于培养基中存在磷酸盐等物质, O 元素和 P 元素分别占总含量的 9.2% 和 2.1% [图 4(b)]. 由于 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 和 SO_4^{2-} 含量很低, 根据化学反应元素平衡原理, 硫化物氧化的主要产物为单质硫. 硫酸盐被还原成硫化物, 硫化物再被氧化, 是硫元素生物地球化学循环中重要的过程^[29]. 这个过程涉及到多种复杂的反应、硫细菌和酶. 无色硫细菌分为 4 个系统进化世系, 3 个属于细菌域, 1 个属于古细菌域. 多数的无色硫细菌属于 Proteobacteria 门的 Gammaproteobacteria 纲^[30]. 根据碳源和能量代谢方式, 无色硫细菌可以分为不同的生理类型, 包括: 专性化能无机营养型、兼性化能无机营养型、化能无机异养型和化能有机异养型. 化能无机异养型是指能够利用还原性含硫化合物作为能量来源, 但是不能固定二氧化碳的细菌^[31]. 根据生理学特性, 菌株 HDD1 不能利用光能, 且只能利用乙酸盐等有机物作为碳源, 所以它属于化能异养型微生物. 在氧化硫化物过程中其是否获得能量还需进一步验证. 原位检测技术结果显示 *Thauera* 属在污水处理系统中是一类活跃的反硝化细菌^[32], 但是很少有研究报道它们的硫氧化功能. 微生物群落分析表明 *Thauera* 属在反应器的生态系统中具有很高的丰度, 但是由于缺乏菌株的纯培养, 深入的生理学特征研究很难开展^[33]. 在生理学研究, 菌株 HDD1 可以作为研究 *Thauera* 属硫氧化功能的模式种为进一步的研究提供基础; 在生态学研究中, 它的相关功能基因可以作为分子标记, 为搜索复杂群落中的功能微生物提供技术支撑. 目前, 造纸厂、煤气厂和制药厂等工业废水都含有大量的硫化物. 生物法短程氧化硫化物并回收单质硫作为资源具备很多优势. 首先, 它是化学和化肥工业的原料. 其次, 和物理化学法相比, 生物法更加节约能源和成本. 分离并研究功能菌株的生理学特性是这项生物技术应用的重要保障. 在这项技术中, 菌株 HDD1 和其他常见的硫化物细菌, 例如: *Thiobacillus denitrificans* 和 *Paracoccus denitrificans* 起到关键作用并有待更深入地研究.

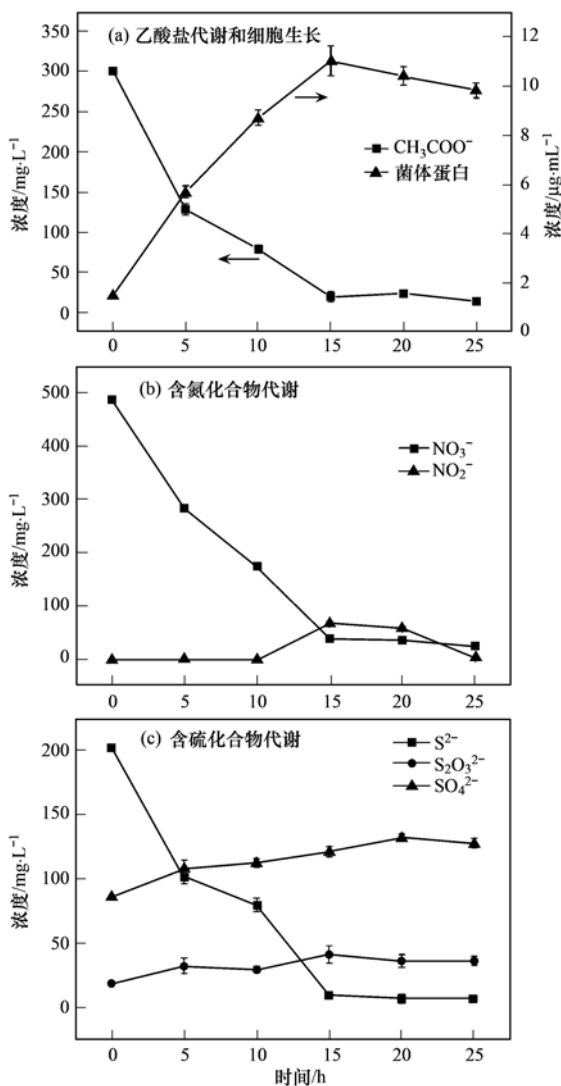
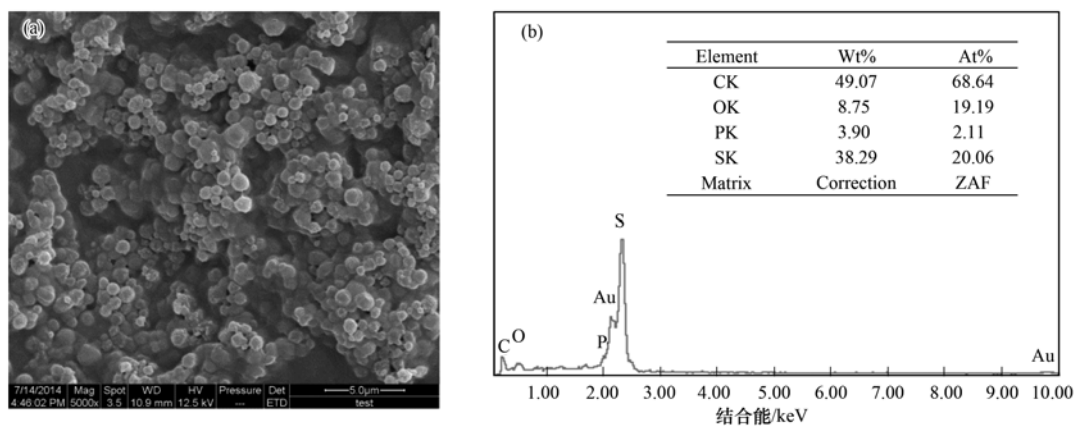


图 3 菌株 HDD1 的碳氮硫化物代谢

Fig. 3 Metabolism of C, N and S contaminants by *Thauera* sp. HDD1



(a)扫描电子显微镜图像;(b)能量色散谱分析

图4 菌株HDD1代谢产物分析

Fig. 4 Analysis of metabolic products of sulfide oxidation by *Thauera* sp. HDD1

3 结论

在本研究中,从反应器活性污泥中分离纯化出1株细菌HDD1. 基于16S rRNA基因的系统进化分析显示,它与 *Thauera* 属的物种具有亲缘关系并形成一个单源的进化枝. 生理特征实验结果验证表明菌株HDD1是 *Thauera* 属的一个种. 菌株HDD1能够利用硝酸盐作为电子受体同步氧化硫化物和乙酸盐. 在15 h之内,浓度为300 mg·L⁻¹的CH₃COO⁻、200 mg·L⁻¹的S²⁻和487 mg·L⁻¹的NO₃⁻被完全代谢去除. 根据其特殊的生理特征,菌株HDD1可以同时应用于处理含有碳、氮、硫系化合物的工业废水及硫元素的资源化回收.

参考文献:

[1] Baker L A. Design considerations and applications for wetland treatment of high-nitrate waters [J]. Water Science and Technology, 1998, **38**(1): 389-395.

[2] Reyes-Avila J, Razo-Flores E, Gomez J. Simultaneous biological removal of nitrogen, carbon and sulfur by denitrification [J]. Water Research, 2004, **38**(14-15): 3313-3321.

[3] McIlroy S J, Starnawska A, Starnawski P, et al. Identification of active denitrifiers in full - scale nutrient removal wastewater treatment systems [J]. Environmental Microbiology, 2016, **18**(1): 50-64.

[4] Visser J M, Robertson L A, Van Verseveld H W, et al. Sulfur production by obligately chemolithoautotrophic thiobacillus species [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, **63**(6): 2300-2305.

[5] Manconi I, Carucci A, Lens P, et al. Simultaneous biological removal of sulphide and nitrate by autotrophic denitrification in an activated sludge system [J]. Water Science and Technology, 2006, **53**(12): 91-99.

[6] Selvaraj H, Chandrasekaran K, Gopalkrishnan R. Recovery of solid sulfur from hydrogen sulfide gas by an electrochemical

membrane cell [J]. RSC Advances, 2016, **6**(5): 3735-3741.

[7] Baalsrud K, Baalsrud K S. Studies on Thiobacillus denitrificans [J]. Archiv für Mikrobiologie, 1954, **20**(1): 34-62.

[8] Claus G, Kutzner H J. Physiology and kinetics of autotrophic denitrification by *Thiobacillus denitrificans* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1985, **22**(4): 283-288.

[9] 左剑恶, 袁琳, 胡纪萃, 等. 利用无色硫细菌氧化废水中硫化物的研究 [J]. 环境科学, 1995, **16**(6): 7-10.

Zuo J E, Yuan L, Hu J C, et al. Biotechnological removal of sulfides in the effluent from sulfate reducing reactor [J]. Environmental Science, 1995, **16**(6): 7-10.

[10] Kuai L, Verstraete W. Autotrophic denitrification with elemental sulphur in small-scale wastewater treatment facilities [J]. Environmental Technology, 1999, **20**(2): 201-209.

[11] Zhang T C, Lampe D G. Sulfur: limestone autotrophic denitrification processes for treatment of nitrate-contaminated water: batch experiments [J]. Water Research, 1999, **33**(3): 599-608.

[12] Wu D, Ekama G A, Chui H K, et al. Large-scale demonstration of the sulfate reduction autotrophic denitrification nitrification integrated (SANI®) process in saline sewage treatment [J]. Water research, 2016, **100**: 496-507.

[13] Hao T W, Luo J H, Wei L, et al. Physicochemical and biological characterization of long-term operated sulfate reducing granular sludge in the SANI® process [J]. Water Research, 2015, **71**: 74-84.

[14] Chen C, Ren N Q, Wang A J, et al. Simultaneous biological removal of sulfur, nitrogen and carbon using EGSB reactor [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, **78**(6): 1057-1063.

[15] Tan W B, Jiang Z, Chen C, et al. *Thiopseudomonas denitrificans* gen. nov., sp. nov., isolated from anaerobic activated sludge [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2015, **65**(1): 225-229.

[16] van den Bosch P L F, van Beusekom O C, Buisman C J, et al. Sulfide oxidation at halo - alkaline conditions in a fed - batch bioreactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2007, **97**(5): 1053-1063.

- [17] Thomsen T R, Kong Y H, Nielsen P H. Ecophysiology of abundant denitrifying bacteria in activated sludge [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, **60**(3): 370-382.
- [18] Pfennig N, Lippert K D. über das vitamin B₁₂-bedürfnis phototropher Schwefelbakterien [J]. *Archiv für Mikrobiologie*, 1966, **55**(3): 245-256.
- [19] Hungate R. The anaerobic mesophilic cellulolytic bacteria [J]. *Bacteriological Reviews*, 1950, **14**(1): 1-49.
- [20] Heuer H, Krsek M, Baker P, *et al.* Analysis of actinomycete communities by specific amplification of genes encoding 16S rRNA and gel-electrophoretic separation in denaturing gradients [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(8): 3233-3241.
- [21] Kim O S, Cho Y J, Lee K, *et al.* Introducing EzTaxon-e: a prokaryotic 16S rRNA gene sequence database with phylotypes that represent uncultured species [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2012, **62**(3): 716-721.
- [22] Tamura K, Peterson D, Peterson N, *et al.* MEGA5: molecular evolutionary genetics analysis using maximum likelihood, evolutionary distance, and maximum parsimony methods [J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2011, **28**(10): 2731-2739.
- [23] Saitou N, Nei M. The neighbor-joining method: a new method for reconstructing phylogenetic trees [J]. *Molecular Biology and Evolution*, 1987, **4**(4): 406-425.
- [24] Felsenstein J. Confidence limits on phylogenies: an approach using the bootstrap [J]. *Evolution*, 1985, **39**(4): 783-791.
- [25] Cerny G. Studies on the aminopeptidase test for the distinction of gram-negative from gram-positive bacteria [J]. *European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology*, 1978, **5**(2): 113-122.
- [26] Trüper H G, Schlegel H G. Sulphur metabolism in Thiorhodaceae I. Quantitative measurements on growing cells of *Chromatium okenii* [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1964, **30**(1): 225-238.
- [27] Krafft T, Bowen A, Theis F, *et al.* Cloning and sequencing of the genes encoding the periplasmic-cytochrome *B*-containing selenate reductase of *Thauera selenatis* [J]. *DNA Sequence*, 2000, **10**(6): 365-377.
- [28] Garrity G, Staley J T, Boone D R, *et al.* *Bergey's manual of systematic bacteriology: volume two: the Proteobacteria* [M]. New York: Springer Science & Business Media, 2005.
- [29] Jørgensen B B. A thiosulfate shunt in the sulfur cycle of marine sediments [J]. *Science*, 1990, **249**(4965): 152-154.
- [30] Muyzer G, Kuenen J G, Robertson L A. Colorless sulfur bacteria [A]. In: Rosenberg E, DeLong E F, Lory S, *et al.* (Eds.). *The Prokaryotes* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2013. 555-588.
- [31] Robertson L A, Kuenen J G. The colorless sulfur bacteria [A]. In: Balows A, Trüper H G, Dworkin M, *et al.* (Eds.). *The Prokaryotes: A Handbook on the Biology of Bacteria: Ecophysiology, Isolation, Identification, Applications*, vol. I. 2nd ed [M]. New York: Springer-Verlag, 1992. 385-413.
- [32] Ginige M P, Keller J, Blackall L L. Investigation of an acetate-fed denitrifying microbial community by stable isotope probing, full-cycle rRNA analysis, and fluorescent in situ hybridization-microautoradiography [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(12): 8683-8691.
- [33] Cytryn E, van Rijn J, Schramm A, *et al.* Identification of bacteria potentially responsible for oxic and anoxic sulfide oxidation in biofilters of a recirculating mariculture system [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(10): 6134-6141.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrins During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172