ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 34 卷　第 6 期
2013 年 6 月 15 日

目　次

2008 ~2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O_3 生成潜势 …… 曹函玉,潘月鹏,王辉,谭吉华,王跃思(2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态 …… 牟莹莹,楼晟荣,陈长虹,周敏,王红丽,周振,乔利平,黄成,李梅,李莉,王倩,黄海英,邹兰军(2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析 …… 张林静,张秀英,江洪,张清新(2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征 …… 刘鲁宁,申雨璇,辛金元,吉东生,王跃思(2089)
笼养肉鸡生长过程 NH_3、N_2O、CH_4 和 CO_2 的排放 …… 周忠凯,朱志平,董红敏,陈永杏,尚斌(2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化剂微波辅助催化氧化甲苯性能 … 王晓晖,卜龙利,刘海楠,张浩, 孙剑宇,杨力,蔡力栋(2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究 …… 张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之(2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气 …… 金圣,黄立维,李国平(2121)
模拟大气 CO_2 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响 …… 赵旭辉,汤龙升,史小丽,杨州,孔繁翔(2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法 …… 华祖林, 汪靓(2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究 …… 李燕,李兆富,席庆(2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究 …… 吴喜军,李怀恩,李家科,李强坤,董雯(2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究 …… 陈玲,刘德富,宋林旭,崔玉洁,张革(2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征 …… 李鸿妹,石晓勇,陈鹏,张传松(2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布 …… 张永生, 郑丙辉,王坤,姜霞,郑浩(2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性 …… 冯伟莹,张生,焦立新,王圣瑞,李畅游,崔凤丽,付绪金,甄志磊,郑浩(2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响 …… 侯金枝,魏权,高丽,孙卫明(2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换 …… 李大鹏,王晶,黄勇(2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征 …… 李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟(2198)
UV 和 H_2O_2 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究 …… 张一清, 周玲玲, 张永吉(2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素 …… 于丽,张培龙,侯甲才,庞立飞,李越,贾寿华(2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响 …… 毛雯,孙荣国,王定勇,马明,张成(2218)
炔雌醇氯化反应的动力学和机制研究 …… 王斌楠,刘国强,孔德洋,陆隽鹤(2225)
金属离子对 δ-MnO_2去除对叔辛基酚抑制作用的研究 …… 李非里,牟华倩(2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除 …… 刘建明, 李红红, 熊振湖(2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究 …… 闫梦玥,庞志华,李小明,谌建宇,罗隽(2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征 … 于红蕾,霍守亮,杨周生,席北斗,昝逢宇,张靖天(2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb^{2+}、Cd^{2+} 吸附性能研究 …… 吴宁梅,李正魁(2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色 …… 魏红,李克斌,李娟,陈经涛,张涛(2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究 …… 张磊,刘平,马锦,张静,张明,吴根(2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水的研究 …… 郭庆稳,张敏,王炜,杨治中,吴东雷(2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响 …… 李永峰,王艺璇,程国玲,刘春妍(2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究 …… 陈志强,邓毅,黄龙,温沁雪,郭子瑞(2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究 …… 刘文如,沈耀良,丁玲玲,丁敏(2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究 …… 杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清(2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析 …… 李志华,范长青,王晓昌(2314)
我国淡水水体中双酚 A(BPA)的生态风险评价 …… 汪浩,冯承莲,郭广慧,张瑞卿,刘跃丹,吴丰昌(2319)
麦穗鱼物种敏感性评价 …… 王晓南,刘征涛,闫振广,张聪,何丽,孟双双(2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究 …… 雷炳莉,文育,王艺陪,康佳,刘倩(2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究 …… 钱建平,张力, 李成超, 黄栋(2344)
直流电场处理后隆线溞趋光性对 Cr^{6+}和 Hg^{2+}的响应 …… 王飞祥,袁玲,黄建国(2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响 …… 宋新章,卜涛,张水奎,江洪,王志坤,赵明水,刘永军(2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征 …… 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聃聃(2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析 …… 于皓,陈川, 张莉,王爱杰(2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析:基于 PLFA 和 MicroResp™ 方法 …… 陈晓娟,吴小红,刘守龙,袁红朝,李苗苗,朱捍华,葛体达,童成立,吴金水(2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究 …… 韩建刚,曹雪(2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究 …… 刘意章,肖唐付,宁增平,贾彦龙,黎华军,杨菲,姜涛,孙旻(2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征 …… 陈志凡, 赵烨, 郭廷忠, 王水锋,田青(2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰尘重金属的影响 …… 李晓燕(2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征 …… 王登阁,崔兆杰,傅晓文,殷永泉,许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响 …… 段雷,马萧萧,余德祥,谭炳全(2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究 … 孙明明,滕应,骆永明,李振高,贾仲君,张满云(2428)
胶质芽胞杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响 …… 杨榕,李博文,刘微(2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征 …… 吴小莲,向垒,莫测辉,姜元能,严青云,李彦文,黄献培,苏青云,王纪阳(2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究 …… 张旭,席北斗,赵越,魏自民,李洋,赵昕宇(2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析 …… 王昭,李振山,冯亚斌,焦安英,薛安(2456)
氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟 …… 官贞珍,陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究 …… 朱芬芬,高冈昌辉,大下和徹,姜惠民,北岛義典(2473)
富含中孔与酸性基团的生物质炭的制备与吸附性能 …… 李坤权,李烨,郑正,张雨轩(2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估 …… 姜志翔,郑浩,李锋民,王震宇(2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究 …… 白桦,曾思育,董欣,陈吉宁(2493)
《环境科学》征订启事(2115)　《环境科学》征稿简则(2224)　信息(2217, 2289,2349,2398)　专辑征稿通知(2478)

溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析

于皓[1,2,3],陈川[1,2], 张莉[1,2],王爱杰[1,2]*

(1. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 3. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院,阜新 123000)

摘要: 为了研究溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落的影响,探索供氧条件下提高单质硫转化率的机制,实验采用基因芯片 GeoChip 技术来解析不同曝气量下采集的污泥样品中的微生物群落结构特征. 研究结果表明,微量的溶解氧能显著影响工艺中的微生物群落结构($P<0.001$), 相对较高浓度的溶解氧可以增加微生物的多样性但是却抑制了对溶解氧比较敏感的反硝化微生物的活性,导致工艺硝酸盐去除率下降. 与反硝化微生物相比硫酸盐还原菌(sulfate-reducing bacteria, SRB)能抵抗更高浓度的溶解氧,因此工艺的硫酸盐还原过程未受到影响,一直保持较高的硫酸盐去除率. 当曝气量为 20 mL·min^{-1}时单质硫的转化率最高,通过对 *sox*(sulfur-oxidation)基因丰度分析和聚类分析发现,在该曝气量条件下 *sox* 基因的丰度最高,与厌氧条件相比有极其显著的差异. 此外,GeoChip 还检测到一些硫氧化细菌(sulfur-oxidizing bacteria, SOB)的丰度明显提高,证明适量的溶解氧能够刺激一部分 SOB 的生长与代谢.

关键词:碳氮硫共脱除工艺; 溶解氧; 功能基因芯片; 微生物群落; 聚类分析

中图分类号: X172 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2013)06-2368-07

Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process

YU Hao[1,2,3], CHEN Chuan[1,2], ZHANG Li[1,2], WANG Ai-jie[1,2]

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to investigate the effect of dissolved oxygen (DO) on microbial community in simultaneous removal of carbon, nitrogen and sulfur process and reveal the mechanism of high elemental sulfur conversion rate under aerobic condition, GeoChip was employed to characterize the structure of microbial community. The results indicated that the microbial community structure significantly changed with different aerobic conditions ($P<0.001$). Diversity indices of microbial community increased at relatively high DO level. However, denitrifiers were greatly inhibited at this level due to the high sensitivity to DO. There was no significant change detected in the abundance of sulfate-reducing bacteria (SRB) with the changing DO. The relative abundance of *sox* gene showed significant difference between aeration rate of 20 mL·min^{-1} and aeration rate of 0 mL·min^{-1}, which might suggest that the activity of sulfur-oxidizing bacteria (SOB) was obviously improved by DO. Moreover, cluster analysis of *sox* gene confirmed this suggestion, with higher signal intensity found in numbers of probes derived from SOB under such aerobic conditions. Overall, the results revealed a positive effect of micro-aerobic conditions on the simultaneous removal of carbon, nitrogen and sulfur process.

Key words: simultaneous removal of carbon, nitrogen and sulfur process; dissolved oxygen; functional gene array; microbial community; cluster analysis

随着化工、制药、发酵、食品加工等行业不断的发展,在生产过程中产生的高浓度含硫含氮有机废水对环境的污染也日趋严重. 此类废水若处理不当会产生毒性较大的 H_2S,不仅腐蚀构筑物和排水管道而且更为严重的是会破坏周边的生态环境危及人类身体健康. 因此开发含硫含氮有机废水处理技术成为国内外研究的热点. 其中,利用微生物去除废水中碳氮硫不仅高效、低成本且无二次污染,已经引起了广泛的关注. Chen 等[1]研究利用碳氮硫共脱除工艺处理含硫含氮有机废水获得了较好的去除效果,但是工艺中单质硫 S^0 的转化率一直较低(<40%). 若能提高处理工艺的 S^0 转化效率不仅能有效地减少废水中含硫化合物,而且通过回收可以实现 S 元素的资源化. Marazioti 等[2]发现在反应器中通入低浓度的溶解氧可以有效抑制硫化物的生成,Diaz 等[3,4]通过在厌氧反应器中通入微量的氧去除硫化氢,Lohwacharin 等[5]在生物反应器中注入

收稿日期: 2012-09-13; **修订日期**: 2012-11-13
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2011AA060904)
作者简介: 于皓(1976~),男,博士研究生,讲师,主要研究方向为环境基因组学,E-mail:micro_yh@126.com
* 通讯联系人,E-mail:waj0578@hit.edu.cn, echo110244@126.com

微量的溶解氧使出水中的硫化物 90% 转化为 S^0，由此可见，微量的溶解氧有助于 S^{2-} 的氧化，能提高 S^0 的转化效率.

目前，针对微量溶解氧促进硫化物氧化以及 S^0 的生成的研究已经取得了一定的进展，但是针对溶解氧对厌氧反应器中微生物群落结构以及代谢机制影响的研究却非常有限. 这不仅仅是由于反应器内多种微生物共存，相互之间关系复杂，还由于传统的分子生物学方法灵敏度不高，得到的信息量有限[6]. 基因芯片(GeoChip)具有高通量、灵敏度高、背景值低等优点，是一种研究微生物群落结构、功能以及动力学的有力工具[7]，经常用于分析土壤、油田、水体以及生物反应器中微生物群落结构[8~16]. 本研究应用 GeoChip 技术研究在不同溶解氧浓度下碳氮硫同步脱除工艺中微生物群落结构特征，揭示溶解氧对功能菌群的影响机制，以期为工艺运行调控提供理论依据.

1　材料与方法

1.1　实验装置与取样条件

本实验采用张莉[17]改造后的 EGSB 反应器，总容积为 4.0 L，主反应区容积 1.0 L，反应器总高度 100 cm，内径 50 mm. 反应器主要有 3 部分构成，分别为反应区、沉淀区和三相分离区，主反应区内安装微孔曝气条，并连接曝气泵和气体流量计以控制气体流量，反应器运行温度 28℃ ±1℃.

反应器启动阶段水力停留时间(HRT)为 36 h，进水物质组成及浓度为 COD：6 000 $mg\cdot L^{-1}$、SO_4^{2-}：2 000 $mg\cdot L^{-1}$、NO_3^-：1 000 $mg\cdot L^{-1}$、$NaHCO_3$：3 000 $mg\cdot L^{-1}$、$K_2HPO_4\cdot 3H_2O$：220.6 $mg\cdot L^{-1}$、NH_4Cl：573.2 $mg\cdot L^{-1}$.

工艺运行共分为 4 个阶段即：不曝气阶段(A1)，曝气量为 30 $mL\cdot min^{-1}$(A2)，曝气量为 20 $mL\cdot min^{-1}$(A3)，曝气量为 10 $mL\cdot min^{-1}$(A4)，具体运行参数和处理效果见表 1. 工艺运行的每一个阶段待反应器运行效果稳定后连续取 3 个样品作为重复用于进一步的基因芯片分析. 水溶液中各项物质采用离子色谱、TOC 分析仪检测[17,18]，单质硫转化率根据 Chen 等[1]的方法进行推算.

1.2　样品 DNA 提取与杂交

每个样品取 250 μL 泥水混合物，加入 625 μL 的 DNA 提取液(100 $mmol\cdot L^{-1}$ Tris-HCl, pH 8)，100 $mmol\cdot L^{-1}$ EDTA(pH8)，100 $mmol\cdot L^{-1}$ 磷酸缓冲液(pH 8)，1.5 $mol\cdot L^{-1}$ NaCl，1% CTAB. 在液氮中反复冻融 3 次增加破壁效果，然后加入 75 μL 浓度为 20% SDS 采用 Zhou 等[19]的方法提取 DNA. 得到的 DNA 定量后各取 1.5 μg 用于荧光标记. 向待标记的 DNA 样品中加入随机引物(Invitrogen, carlsbad, CA, USA)，在 99.9℃ 下变性 5 min 后立即置于冰上冷却，加入 2.5 μL dNTP 混合液，2 μL Klenow 酶(Invitrogen, Carlsbad, CA, USA)和 1 μL Cy5 Dye (GE Healthcare, Piscataway, NJ, USA)，混匀后置于 37℃ 下反应 3 h，65℃ 下变性 10 min 终止反应[20,21]. 标记产物用 QIAquick 纯化试剂盒(Qiagen, Valencia, CA, USA)纯化、干燥. 杂交之前，干燥的 DNA 采用 50 μL 的杂交缓冲液溶解后在 98℃ 下变性 3 min，将样品置于 65℃ 下点样. 完成点样后将芯片置于 42℃ 下进行杂交 10 h. 杂交后的芯片经过洗涤干燥后用 ScanArray 500 (PerkinElmer, Boston, MA, USA) 型芯片扫描仪将信号转化为数值. 杂交用的芯片是 GeoChip 3.0，里面包含约 28 000个 50-mer 的寡核苷酸基因探针，292 个基因家族其中包括碳氮磷硫循环、能量代谢、金属抗性、有机污染物降解等[22].

表 1　EGSB 反应器运行效果

Table 1　Performance of EGSB bioreactor

阶段	样品编号[1)]	运行时间/d	曝气量/$mL\cdot min^{-1}$	溶解氧浓度/$mg\cdot L^{-1}$	进水负荷/$kg\cdot(m^3\cdot d)^{-1}$			去除率/%			S^0 转化率/%
					NO_3^--N	SO_4^{2-}-S	TOC	NO_3^-	SO_4^{2-}	TOC	
A1	a, b, c	1 ~ 18	0	—	0.62	1.82	6.5	99.6	96.1	34.0	26.2
A2	a, b, c	19 ~ 42	30	0.3 ~ 0.6	0.60	1.86	6.5	62.7	98.9	41.9	48.7
A3	a, b, c	43 ~ 66	20	0.1 ~ 0.4	0.59	1.83	6.7	98.4	96.1	57.7	86.8
A4	a, b, c	67 ~ 88	10	0.1 ~ 0.2	0.60	1.96	6.4	99.1	97.0	43.8	42.9

1)字母 a、b、c 为同一运行阶段内的重复样品编号

1.3　数据分析

得到的数据根据信噪比 SNR(signal to noise ratio) = (信号值 - 背景值)/背景值(标准偏差 ≥ 2.0)原则确定有效数据点[23]. 聚类分析采用斯坦福大学 Michael Eisen 开发的 CLUSTER，视图软件采用 TREEVIEW[24]. 群落分析采用的是主成分分析(principal component analysis, PCA)，微生物群落多

样性分析采用 Simpson 指数和 Shannon-Weaver 指数[25].

Simpson 指数:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{s} P_i^2$$

Shannon-Weaver 指数:

$$H' = - \sum_{i=1}^{s} P_i \log_2 P_i$$

式中,s 为样品中检测到的总的功能基因数量,P_i 为第 i 个基因的信号强度占总信号强度的比例.

2 结果与讨论

2.1 不同曝气条件对微生物群落结构的影响

通过对不同曝气量下检测到的功能基因进行 PCA 分析(图 1),发现经过曝气的样品点与未曝气的样品点相距较远,这说明曝气对反应器内的微生物群落结构的冲击较大,导致里面微生物各种群之间的生态位重新调整. 此外,曝气条件下各样品点按照曝气量多少从右至左延 PC1 轴分布,说明在实验过程中微生物群落一直随着曝气量的改变发生着演替变化. 图 1 里 PC1 轴解释了 28.1% 的微生物群落变异,PC2 轴解释了 18.8% 的微生物群落变异. 方差分析的结果也表明曝气显著地影响了反应器内的微生物群落的结构(adonis, $P < 0.001$).

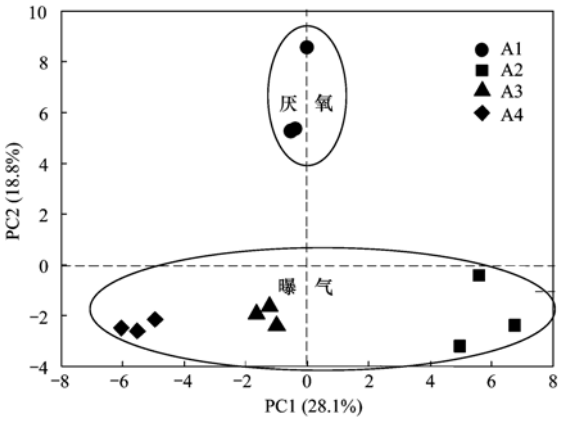


图 1 微生物群落功能基因主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis (PCA) of microbial communities based on functional genes detected

2.2 不同曝气量下微生物群落多样性研究

为了研究微生物群落多样性在不同溶解氧浓度下的变化情况,对各样品经过杂交得到的芯片数据选取辛普森(Simpson)和香农-维纳指数(Shannon-Weaver, H')进行评估. 由表 2 可见,检测到的基因数、辛普森指数和香农-维纳指数有相同的趋势:曝气量为 30 mL·min^{-1}(A2) > 厌氧(A1) > 曝气量为 20 mL·min^{-1}(A3) > 曝气量为 10 mL·min^{-1}(A4). 其中 A2 样品检测到的基因数和辛普森指数与 A3、A4 样品差异极其显著,而香农-维纳指数各样品之间差异不显著. 形成这种趋势的原因可能是由于对厌氧条件下的反应器曝气虽然抑制了部分原有的严格厌氧微生物的活性,但是可以刺激大量兼性厌氧、好氧或微好氧微生物的活性,使得这类微生物在反应器内快速地生长繁殖,致使群落中微生物的总体多样性增加. 而后,随着曝气量的减少,这些微生物的生长受到抑制,导致群落多样性迅速下降.

表 2 样品中检测到的功能基因数与多样性指数

Table 2 Detected gene numbers and diversity indexes based on GeoChip data

项目	样品(平均值 ± 标准误差)[1)]			
	A1	A2	A3	A4
检测到的基因数	1 333 ± 58.60 ab	1 475 ± 56.77 a	1 120 ± 19.64 bc	994 ± 55.59 c
Simpson's(1/D)	760.80 ± 37.20 ab	881.99 ± 24.57 a	556.67 ± 21.83 b	498.07 ± 99.48 b
Shannon-Weaver(H')	6.95 ± 0.04 a	7.08 ± 0.03 a	6.76 ± 0.02 a	6.60 ± 0.09 a

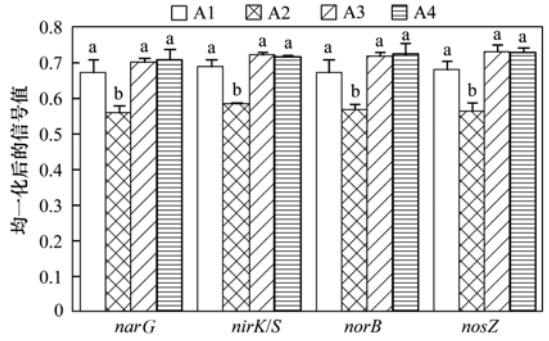
1)同一行不同字母表示基于 $\alpha = 0.05$ 显著水平的 LSD 检验结果

2.3 不同曝气量对反硝化脱硫过程中关键基因丰度的影响

2.3.1 反硝化基因丰度分析

反硝化包括硝酸盐还原、亚硝酸盐还原、NO 还原和 N_2O 还原这 4 个酶过程,分别由 4 种不同的酶催化完成还原反应. 这 4 种酶由 5 个关键基因编码,通过研究这些基因可以更好地了解反硝化进程以及反硝化微生物在环境中的动态. 硝酸盐还原酶由 *narG* 基因编码其活性中心,催化还原 NO_3^- 生成 NO_2^-. 亚硝酸盐还原由 Cu 型亚硝酸盐还原酶和细胞色素 *cd*1 型亚硝酸盐还原酶两种酶催化完成,分别由 *nirS* 和 *nirK* 基因编码. *norB* 基因和 *nosZ* 基因分别编码催化 NO 还原与 N_2O 还原的一氧化氮还原酶和氧化亚氮还原酶[26].

反应器 4 个阶段样品中的反硝化基因丰度见图 2. A2 组样品中各反硝化基因的丰度均明显低于 A1、A3、A4 组样品. LSD 检验的结果表明 A2 组样品与 A1、A3、A4 组样品相比,*narG* 基因、*nirK/S* 基



图中符号 a、b 是基于 $\alpha = 0.05$ 显著水平的 LSD 检验结果

图 2　反硝化基因相对丰度

Fig. 2　Relative abundance of key genes involved in the denitrification process

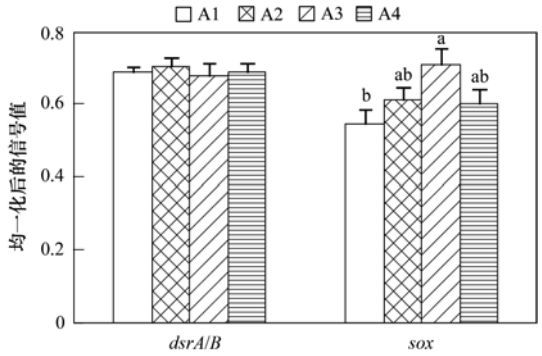


图 3　*dsr* 基因与 *sox* 基因相对丰度

Fig. 3　Relative abundance of *dsr* and *sox* genes

因、*norB* 基因和 *nosZ* 基因存在极其显著的差异. A1 组硝化基因的丰度略低于 A3、A4 组基因的丰度但差异不显著. 在整个实验过程中 4 个阶段的操作条件除了曝气量不同之外其他的均无较大的改变，因此导致 A2 组样品反硝化基因丰度下降的原因是在该阶段的曝气量较大造成的. 厌氧反硝化菌对溶解氧较为敏感，较高浓度的溶解氧会影响反硝化基因的丰度从而影响反硝化过程中酶的合成，从而导致出水 NO_3^- 去除率下降(表 1). 降低曝气量之后，反硝化基因的丰度增加酶的活性增强，NO_3^- 去除率又恢复到较高的水平.

2.3.2　*dsr* 基因与 *sox* 基因相对丰度分析

亚硫酸盐异化酶(dissimilatory sulfite reductase，*dsr*) 是硫酸盐还原菌(sulfate-reducing bacteria，SRB)体内重要的酶，参与催化硫酸盐还原过程最终产生 S^{2-}，由 *dsrA* 和 *dsrB* 基因编码. 因此通过研究 *dsr* 基因的变化可以反映出 SRB 的动态. *dsrA/B* 基因的丰度在不同的曝气量下比较接近，差异不显著(图 3). 通常认为 SRB 是严格厌氧细菌，但是 Mogensen 等[28]从连续供氧 120 h 的活性污泥里分离出 1 株 SRB，证明有一些 SRB 可以耐氧，而张小里等[27]也通过研究发现 SRB 能耐受一定浓度的溶解氧. 本实验的结果表明一定浓度的溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中 SRB 的活性没有明显的抑制作用.

sox 基因存在于硫氧化细菌(sulfur-oxidizing bacteria，SOB)体内，编码硫系物氧化过程中起催化作用的酶. 在 4 组样品中 A1 组样品 *sox* 基因的丰度最低，A3 组样品的丰度最高，它们之间的差异显著，而 A1、A2 和 A4 组样品之间的差异均不显著. Chen 等[18]在脱硫反硝化工艺活性污泥中筛选出 1 株菌 H7，研究发现该菌在微氧条件下氧化硫化物的速率得到提高. 图 3 的结果进一步证明了向厌氧反应器供微量的溶解氧能增强 SOB 的活性，尤其是适量的溶解氧(曝气量 20 $mL \cdot min^{-1}$)可以极大地刺激 SOB 的活性提高单质硫的转化率(表 1).

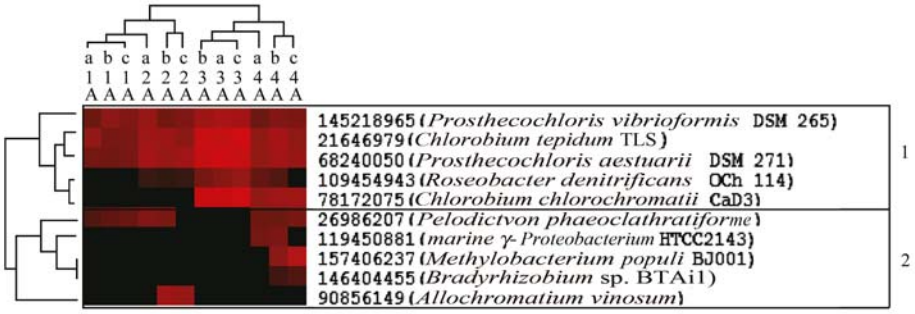
2.4　不同曝气条件下功能基因的聚类分析

2.4.1　*sox* 基因聚类分析

样品中包含的 *sox* 基因的聚类分析分成两个类群(图 4). 第 1 类群以绿菌门的微生物为主，与第 2 类群相比在各组样品中分布较广，检测到的信号值也较强，为反应器中优势菌群. 其中在 A3 组内 *Prosthecochloris aestuarii* DSM 271、*Chlorobium tepidum* TLS 和 *Chlorobium chlorochromatii* CaD3 探针检测到的信号值明显高于其他组样品，表明它们在该阶段的丰度非常高. 目前，有研究表明这 3 株菌都能快速氧化硫化物生成单质硫[29~31]. 图 4 结果表明适量的溶解氧可以有效的刺激第 1 类群中的 SOB，提高它们的丰度，从而增加单质硫的转化效率. 第 2 类群除 *Pelodictyon phaeoclathratiforme* 外都为变形菌门的微生物. 该类群微生物在样品中的分布较少，信号强度相对较弱表明它们的丰度较低. *Pelodictyon phaeoclathratiforme* 属于绿菌门的绿硫细菌，能利用硫代硫酸盐和硫化物作为电子供体[32]. 该菌在仅 A3 组样品中没有检测到，推测是因为在该阶段单质硫转化率较高，反应器中硫化物和硫代硫酸盐的浓度较低，*Pelodictyon phaeoclathratiforme* 同第 1 类群的微生物竞争有限资源时处于劣势，而被抑制使得其丰度低于检测的阈值. 此外，A4 组样品检测到的第 2 类群中微生物较多，可能是由于在本阶段继续减少曝气量使得原来处于优势地位的微生物受到了明显的抑制，导致菌群结构的演替加剧，在这个过程中一些原本丰度很低的微生物得到了增殖. 但是由于这些微生物氧化硫化物的能力有限，所以单质硫的转化率并不理想.

2.4.2 反硝化基因聚类分析

4 组样品中包含反硝化基因的微生物以未培养或未鉴定细菌为主(占 91.53%),基因经聚类分析分为 2 个类群(图 5). 类群 1 中的微生物主要存在于 A1 组样品中,而在曝气之后的 A2、A3、A4 组样品中检测到的较少. 推测它们是一些严格厌氧的反硝化微生物,当环境中溶解氧的浓度升高时,代谢与生长被强烈地抑制. 类群 2 中的微生物大多数出现在所有组的样品中,是反硝化过程中的关键微生物. 其中A3和A4组样品中第2类群的微生物的丰度



红颜色表示信号强度大小,黑颜色表示信号值为 0,颜色越深信号强度越弱; a、b、c 为同一操作条件下的重复样品编号,数字表示基因库(NCBI)登录号,括号中表示设计探针来源菌属或种,右面数字 1、2 为根据聚类分析的分类

图 4 基于 GeoChip 数据的 *sox* 基因聚类分析

Fig. 4 Hierarchical cluster analysis of *sox* gene based on GeoChip data

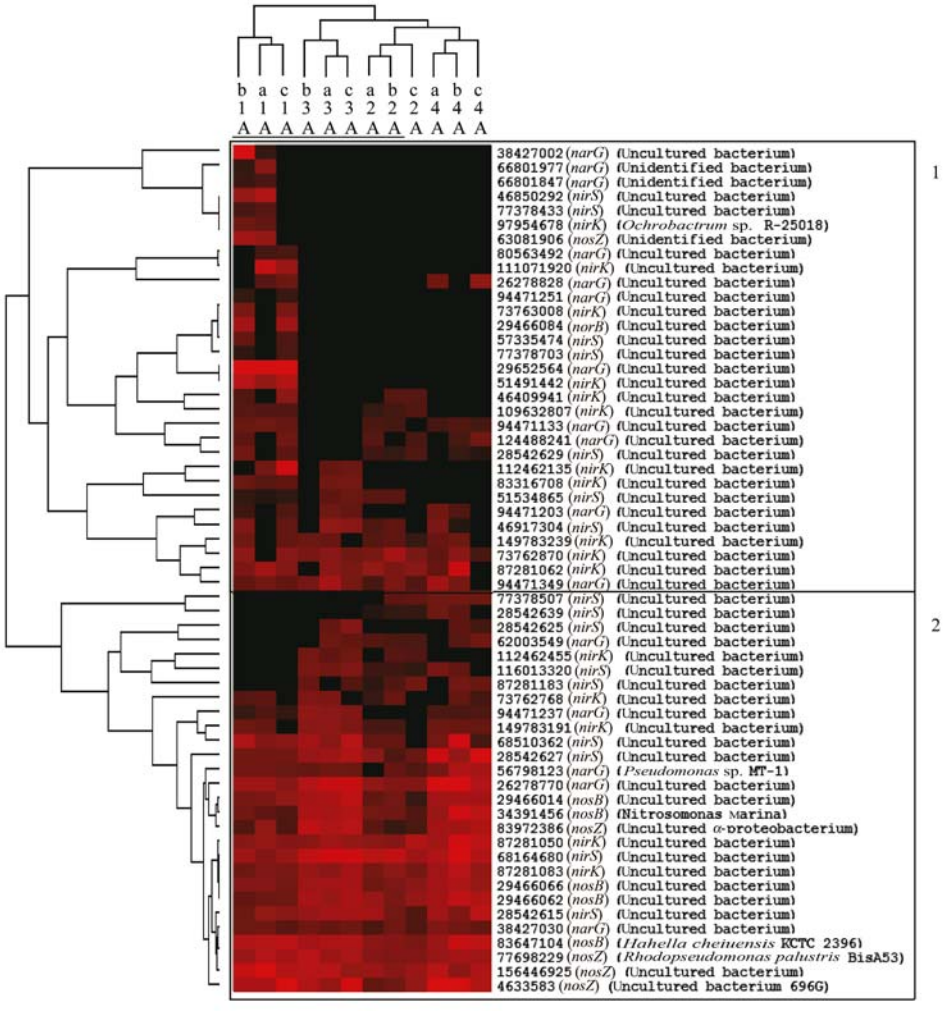


图 5 基于 GeoChip 数据的反硝化基因聚类分析

Fig. 5 Hierarchical cluster analysis of denitrification genes based on GeoChip data

较高，A1 和 A2 组样品的丰度较低. A1 组检测到的反硝化基因最多，对有限的 N 源的争夺也最为激烈，最终影响了大多数反硝化微生物的生长与代谢，因此微生物的相对丰度比较低. A2 组样品则是因为高浓度的溶解氧抑制了多数反硝化微生物的生长与代谢. Patureau 等[33]研究反硝化菌群时发现当 DO 值小于 0.35 $mg \cdot L^{-1}$ 时反硝化酶的活性与代谢速率迅速增加. 本实验也验证了这一结论，A3（DO <0.4 $mg \cdot L^{-1}$）和 A4（DO <0.2 $mg \cdot L^{-1}$）组样品的反硝化基因丰度比 A2（DO 0.3 ~ 0.6 $mg \cdot L^{-1}$）组样品的基因丰度明显提高，说明溶解氧对反硝化微生物的影响存在一个阈值，低于阈值的时候反硝化微生物的丰度与代谢活性明显提高.

3　结论

（1）对在厌氧条件下运行的碳氮硫同步脱除工艺进行连续曝气能显著地影响原有的微生物群落结构，并且当改变曝气量时群落结构也会发生相应的调整.

（2）较高浓度的溶解氧会抑制厌氧工艺中反硝化微生物的活性，影响工艺反硝化的效果.

（3）SRB 对溶解氧有一定的耐受能力，在其承受的范围内不会影响工艺的硫酸盐还原效果.

（4）适量的溶解氧能有效地提高 SOB 的丰度，增加工艺单质硫转化率.

参考文献：

[1] Chen C, Ren N Q, Wang A J, *et al*. Microbial community of granules in expanded granular sludge bed reactor for simultaneous biological removal of sulfate, nitrate and lactate[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, **79**(6): 1071-1077.

[2] Marazioti C, Kornaros M, Lyberatos G. Kinetic modeling of a mixed culture of *Pseudomonas denitrificans* and *Bacillus subtilis* under aerobic and anoxic operating conditions[J]. Water Research, 2003, **37**(6): 1239-1251.

[3] Díaz I, Lopes A C, Pérez S I, *et al*. Performance evaluation of oxygen, air and nitrate for the microaerobic removal of hydrogen sulphide in biogas from sludge digestion[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(20): 7724-7730.

[4] Díaz I, Pérez S I, Ferrero E M, *et al*. Effect of oxygen dosing point and mixing on the microaerobic removal of hydrogen sulphide in sludge digesters[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(4): 3768-3775.

[5] Lohwacharin J, Annachhatre A P. Biological sulfide oxidation in an airlift bioreactor[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(7): 2114-2120.

[6] He Z L, Xu M Y, Deng Y, *et al*. Metagenomic analysis reveals a marked divergence in the structure of belowground microbial communities at elevated CO_2[J]. Ecology Letters, 2010, **13**(5): 564-575.

[7] He Z L, Gentry T J, Schadt C W, *et al*. GeoChip: a comprehensive microarray for investigating biogeochemical, ecological and environmental processes[J]. The ISME Journal, 2007, **1**(1): 67-77.

[8] Deng Y, He Z L, Xu M Y, *et al*. Elevated carbon dioxide alters the structure of soil microbial communities[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, **78**(8): 2991-2995.

[9] He Z L, Piceno Y, Deng Y, *et al*. The phylogenetic composition and structure of soil microbial communities shifts in response to elevated carbon dioxide[J]. The ISME Journal, 2012, **6**(2): 259-272.

[10] Liang Y T, Li G H, Van Nostrand J D, *et al*. Microarray-based analysis of microbial functional diversity along an oil contamination gradient in oil field[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2009, **70**(2): 324-333.

[11] Liang Y T, Van Nostrand J D, Wang J, *et al*. Microarray-based functional gene analysis of soil microbial communities during ozonation and biodegradation of crude oil[J]. Chemosphere, 2009, **75**(2): 193-199.

[12] Liang Y T, Van Nostrand J D, Deng Y, *et al*. Functional gene diversity of soil microbial communities from five oil-contaminated fields in China[J]. The ISME Journal, 2011, **5**(3): 403-413.

[13] Van Nostrand J D, Wu W M, Wu L Y, *et al*. GeoChip-based analysis of functional microbial communities during the reoxidation of a bioreduced uranium-contaminated aquifer[J]. Environmental Microbiology, 2009, **11**(10): 2611-2626.

[14] Xie J P, He Z L, Liu X X, *et al*. GeoChip-based analysis of the functional gene diversity and metabolic potential of microbial communities in acid mine drainage[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, **77**(3): 991-999.

[15] Liu W Z, Wang A J, Sun D, *et al*. Characterization of microbial communities during anode biofilm reformation in a two-chambered microbial electrolysis cell (MEC)[J]. Journal of Biotechnology, 2012, **157**(4): 628-632.

[16] Liu W Z, Wang A J, Cheng S A, *et al*. Geochip-based functional gene analysis of anodophilic communities in microbial electrolysis cells under different operational modes[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(19): 7729-7735.

[17] 张莉. 限氧一体式碳氮硫同步脱除工艺运行效能及影响因素研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2010. 17-23.

[18] Chen C, Wang A J, Ren N Q, *et al*. High-rate denitrifying sulfide removal process in expanded granular sludge bed reactor[J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(7): 2316-2319.

[19] Zhou J Z, Bruns M A, Tiedje J M. DNA recovery from soils of diverse composition[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, **62**(2): 316-322.

[20] Wu L Y, Kellogg L, Devol A H, *et al*. Microarray-based characterization of microbial community functional structure and

heterogeneity in marine sediments from the Gulf of Mexico[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, **74**(14): 4516-4529.

[21] Wu L Y, Liu X D, Field M W, *et al*. Microarray-based whole-genome hybridization as a tool for determining procaryotic species relatedness[J]. The ISME Journal, 2008, **2**(6): 642-655.

[22] He Z L, Deng Y, Van Nostrand J D, *et al*. GeoChip 3.0 as a high-throughput tool for analyzing microbial community composition, structure and functional activity[J]. The ISME Journal, 2010, **4**(9): 1167-1179.

[23] He Z L, Zhou J Z. Empirical evaluation of a new method for calculating signal-to-noise ratio for microarray data analysis[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, **74**(10): 2957-2966.

[24] Eisen M B, Spellman P T, Brown P O, *et al*. Cluster analysis and display of genome-wide expression patterns[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1998, **95**(25): 14863-14868.

[25] 钟毅, 张旭, 梁玉婷, 等. 基于基因芯片技术的石油污染土壤微生物群落结构[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, **50**(9): 1396-1399.

[26] 梁丽华, 左剑恶. 反硝化功能基因——检测反硝化菌种群结构的分子标记[J]. 微生物学通报, 2009, **36**(4): 627-633.

[27] 张小里, 陈志昕, 刘海洪, 等. 环境因素对硫酸盐还原菌生长的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, **20**(4): 224.

[28] Mogensen G L, Kjeldsen K U, Ingvorsen K. *Desulfovibrio aerotolerans* sp. nov., an oxygen tolerant sulphate-reducing bacterium isolated from activated sludge[J]. Anaerobe, 2005, **11**(6): 339-349.

[29] Takashima T, Nishiki T, Konishi Y. Anaerobic oxidation of dissolved hydrogen sulfide in continuous culture of the phototrophic bacterium *Prosthecochloris aestuarii*[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2000, **89**(3): 247-251.

[30] Wahlund T M, Woese C R, Castenholz R W. A thermophilic green sulfur bacterium from New Zealand hot springs, *Chlorobium tepidum* sp. Nov[J]. Archives of Microbiology, 1991, **156**(2): 81-90.

[31] Vogl K, Glaeser J, Pfannes K R, *et al*. *Chlorobium chlorochromatii* sp. nov., a symbiotic green sulfur bacterium isolated from the phototrophic consortium 'Chlorochromatium aggregatum'[J]. Archives of Microbiology, 2006, **185**(5): 363-372.

[32] Overmann J, Fennig N P. *Pelodictyon phaeoclathratiforme* sp. nov., a new brown-colored member of the Chlorobiaceae forming net-like colonies[J]. Archives of Microbiology, 1989, **152**(4): 401-406.

[33] Patureau D, Bernet N, Delgens J P, *et al*. Effect of dissolved oxygen and carbon-nitrogen loads on denitrification by an aerobic consortium[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2000, **54**(4): 535-542.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 34 No. 6

Jun. 15, 2013

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China ····· CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, *et al.* (2065)

Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) ····· MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, *et al.* (2071)

Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang ····· ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, *et al.* (2081)

Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City ····· LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, *et al.* (2089)

NH_3, N_2O, CH_4 and CO_2 Emissions from Growing Process of Caged Broilers ····· ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, *et al.* (2098)

Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene ····· WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, *et al.* (2107)

Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter ····· ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, *et al.* (2116)

Decomposion of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere ····· JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)

Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO_2 Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake ····· ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, *et al.* (2126)

A New Method for Estimation the Lake Quality Reference Condition ····· HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)

Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF ····· LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)

Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution ····· WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, *et al.* (2146)

Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities ····· CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, *et al.* (2151)

Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring ····· LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, *et al.* (2159)

Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges ····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, *et al.* (2166)

Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Alage ····· FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, *et al.* (2176)

Influence of Decomposition of *Cladophora* sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water ····· HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, *et al.* (2184)

Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance ····· LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)

Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River ····· LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, *et al.* (2198)

Study on UV and H_2O_2Combined Inactivation of *E. coli* in Drinking Water ····· ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)

Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation ····· YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, *et al.* (2210)

Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body ····· MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, *et al.* (2218)

Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study ····· WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, *et al.* (2225)

Metal Ions Restrain the Elimination of 4-*tert*-Octylphenol by δ-MnO_2 ····· LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)

Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers ····· LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)

Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite ····· YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, *et al.* (2249)

Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water ····· YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, *et al.* (2256)

Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance ····· WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)

Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Posphotungstic Acid ····· WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, *et al.* (2271)

Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor ····· ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, *et al.* (2277)

Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater ····· GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, *et al.* (2283)

Effect of Fe^{2+} on Fermentation Hydrogen Production in an UASB ····· LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, *et al.* (2290)

Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate ····· CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, *et al.* (2295)

Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge ····· LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, *et al.* (2302)

Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge ····· YANG Min, LU Long, FENG Yong, *et al.* (2309)

Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems ····· LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)

Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters ····· WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, *et al.* (2319)

Species Sensitivity Evaluation of *Pseudorasbora parva* ····· WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, *et al.* (2329)

Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches ····· LEI Bing-Li, WEN Yu, WANG Yi-pei, *et al.* (2335)

Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin ····· QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, *et al.* (2344)

Changes in Phototaxical Index of *Daphnia carinata* Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr^{6+} and Hg^{2+} ····· WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)

Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of *Cyclobalanopsis glauca* Leaf Litter ····· SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, *et al.* (2355)

Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species ····· LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, *et al.* (2361)

Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process ····· YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, *et al.* (2368)

Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp™ ····· CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, *et al.* (2375)

Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study ····· HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)

Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition ····· LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, *et al.* (2390)

Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City ····· CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, *et al.* (2399)

Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City ····· LI Xiao-yan (2407)

Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying ····· WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, *et al.* (2416)

Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil ····· DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, *et al.* (2422)

Ex-situ Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl-β-Cyclodextrin Enhanced Soil Washing ····· SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, *et al.* (2428)

Effects of *Bacillus mucilaginosus* on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of *Brassica juncea* ····· YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)

Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm ····· WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, *et al.* (2442)

Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil ····· ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, *et al.* (2448)

Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing ····· WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, *et al.* (2456)

Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling ····· GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)

Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior ····· ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, *et al.* (2473)

Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups ····· LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, *et al.* (2479)

Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China ····· JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, *et al.* (2486)

Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis ····· BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, *et al.* (2493)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　汤鸿霄　陈吉宁　孟　伟　周宗灿　林金明

欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2013 年 6 月 15 日　34 卷　第 6 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 34　No. 6　Jun. 15, 2013

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	欧 阳 自 远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订　购　处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国 内 定 价：90.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行