

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源 李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)

河北张家口市大气污染观测研究 邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)

大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟 黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)

膜生物反应器处理甲苯性能及机制 叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)

厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析 张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)

北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究 徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)

枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价 李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)

三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险 吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)

东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征 陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)

三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征 安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)

长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价 王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)

江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性 李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁骥, 沈新强 (2607)

扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响 李大鹏, 黄勇 (2614)

干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用 张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)

常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响 李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)

温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应 周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)

沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征 于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)

城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响 杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)

基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究 边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)

基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析 白凤姣, 李天宏 (2667)

黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应 卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)

强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究 周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)

九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测 王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)

布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究 孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)

曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究 彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)

城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析 郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)

IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析 朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)

原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化 郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)

UV/H₂O₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果 李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)

蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa*-15 的异养培养条件优化及污水养殖 王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)

“Fe⁰/优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究 戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)

树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色 戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)

TiO₂/PS/Fe₃O₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能 王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)

微波加热下苯的催化氧化性能研究 张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)

纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究 高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)

好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述 苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺红, 沈俊 (2773)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)

微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响 宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)

实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化 饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)

西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态 吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)

典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究 尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)

土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响 胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)

土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应 张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)

可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复 张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)

广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究 蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)

北京市近郊区土壤砷累积特征 戚浩, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)

抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究 陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)

臭氧污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响 寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)

尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响 陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)

铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究 胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)

pH 和 Ni²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响 罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)

铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究 刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)

环丙沙星在潮土中的吸附特性 崔皓, 王淑平 (2895)

中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究 洪塗, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)

H₂S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状 郝郑平, 姜广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)

《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)

城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析

郭云, 杨殿海*, 卢文健

(同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 应用荧光原位杂交技术 (fluorescent *in situ* hybridization, FISH) 对我国北方某城市污水处理厂氧化沟工艺中的微生物进行种群分析, 考察系统活性污泥中聚磷菌 (phosphorus accumulating organisms, PAOs) 和聚糖原菌 (glycogen accumulating organisms, GAOs) 的种群结构特点及其空间分布变化关系. 结果表明, 厌氧池、氧化沟缺氧区和好氧区中 PAOs 占全菌百分比分别为 $2.0\% \pm 0.6\%$ 、 $3.4\% \pm 0.6\%$ 和 $3.5\% \pm 1.2\%$; GAOs 所占全菌百分比分别为 $25.3\% \pm 8.7\%$ 、 $30.3\% \pm 7.1\%$ 和 $24.4\% \pm 6.1\%$. 该厂氧化沟工艺 PAOs 含量低于已报道其他脱氮除磷系统水平 (7% ~ 22%), 其除磷性能较差. 数据统计分析显示, 氧化沟缺氧、好氧区中 PAOs 含量相对于厌氧池有显著上升, 而 GAOs 含量沿程变化不大.

关键词: 微生物种群; 聚磷菌; 聚糖原菌; 污水处理厂; 氧化沟

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2709-06

Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch

GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The microbial populations of the oxidation ditch process at the full-scale municipal wastewater treatment plants (WWTP) in a city in north China were analyzed by fluorescent *in situ* hybridization (FISH). Fractions structure varieties and distribution characteristics of *Accumulibacter* as potential phosphorus accumulating organisms (PAOs), and *Competibacter* as potential glycogen accumulating organisms (GAOs) were quantified. The results indicated that *Accumulibacter* comprised around $2.0\% \pm 0.6\%$, $3.4\% \pm 0.6\%$ and $3.5\% \pm 1.2\%$ of the total biomass in the anaerobic tank, anoxic zone and zone, respectively, while the corresponding values for *Competibacter* were $25.3\% \pm 8.7\%$, $30.3\% \pm 7.1\%$ and $24.4\% \pm 6.1\%$. Lower *Accumulibacter* fractions were found compared with previous full-scale reports (7% - 22%), indicating low phosphorus removal efficiency in the oxidation ditch system. Statistical analysis indicated that the amount of PAOs was significantly higher in the anoxic zone and the aerobic zone compared with that in the anaerobic tank, while GAOs remained at the same level.

Key words: microbial community; phosphorus accumulating organisms (PAOs); glycogen accumulating organisms (GAOs); wastewater treatment plants (WWTPs); oxidation ditch

磷能够刺激藻类及有毒微生物的生长, 是水体产生富营养化的主要限制因素, 当其浓度超过背景值时将会引发一系列环境问题, 如水质恶化, 溶解氧降低, 破坏水体生态平衡等. 因此, 研究和开发经济高效的生物脱氮除磷技术, 有效去除城市污水中的磷、氮等营养盐物质, 是控制水体富营养化和保证水质安全的关键. 将回流活性污泥顺序经过厌氧、好氧条件实现生物强化除磷 (enhanced biological phosphorus removal, EBPR), 是一种经济、环境友好的除磷方法, 活性污泥中聚磷菌 (phosphorus accumulating organisms, PAOs) 的富集是生物强化除磷系统正常运行的主要条件^[1]. 厌氧条件下, PAOs 利用胞内聚磷分解和糖原降解所产生的能量吸收挥发性脂肪酸 (volatile fatty acids, VFAs) 等碳源, 并储存为聚羟基脂肪酸 (poly-hydroxyalkanoates, PHAs);

好氧时, PAOs 以氧化 PHAs 为能量来源实现生物生长、糖原合成以及磷的吸收, 最终通过剩余污泥的排放实现污水中磷的有效去除^[2]. 研究表明, 污水处理厂生物脱氮除磷系统中聚糖原菌 (glycogen accumulating organisms, GAOs) 对 PAOs 具有竞争性生长关系, 若其大量存在会降低系统除磷性能, 成为 EBPR 性能退化、稳定性差的主要原因之一^[3-6]. 因此了解污水处理厂微生物的种群结构和分布特点能够为 EBPR 稳定性判断以及其影响因素的分析提供参考. Wong 等^[7] 利用荧光原位杂交技术 (fluorescent *in situ* hybridization, FISH) 对日本 9 个采用 AO、A²O

收稿日期: 2011-07-25; 修订日期: 2011-11-01

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07316-002)

作者简介: 郭云 (1987 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制工程与资源化, E-mail: thisisyun@126.com

* 通讯联系人, E-mail: yangdianhai@tongji.edu.cn

和 CAS 工艺污水处理厂中 13 种活性污泥包含的微生物进行种群结构的鉴定与分析; Lopez-Vazquez 等^[8]对荷兰 7 个污水处理厂的活性污泥进行 FISH 测定,研究操作运行与外部环境条件对污水处理厂改进型 UCT 以及 Phoredox 工艺中 PAOs 和 GAOs 的影响; 亢涵等^[9]对生物除磷系统启动期聚磷菌进行了 FISH 原位分析与聚磷特性的研究,污泥经过厌氧/好氧驯化后,聚磷菌大量富集;但是针对采用氧化沟工艺污水处理厂的微生物种群研究还较少。

本研究应用 FISH 对采用氧化沟工艺的污水处理厂中微生物的种群结构及其分布特点进行分析,考察 PAOs 与 GAOs 的沿程分布规律并分析其影响因素,以期对氧化沟工艺中微生物的种群分析以及污水处理厂的升级改造提供参考意见。

1 工程概况

我国北方某污水处理厂采用前置厌氧池的氧化

沟工艺,主要处理生活污水及部分工业废水,设计处理能力 $6 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,工艺流程如图 1 所示。

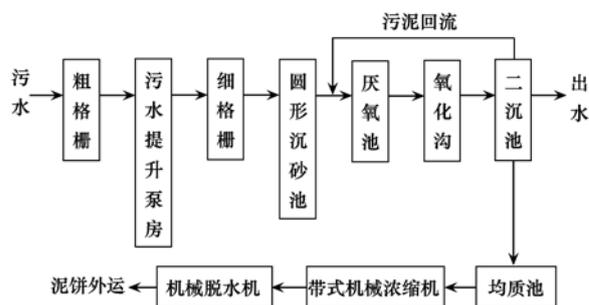


图 1 某污水处理厂氧化沟工艺流程示意

Fig. 1 Flow chart of oxidation ditch in some WWTP

其中氧化沟采用转碟曝气,水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT) 为 13.4 h,污泥停留时间 (sludge retention time, SRT) 为 17.5 d, MLVSS 约为 $4\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 进出水水质如表 1 所示。

表 1 污水处理厂进出水水质¹⁾

Table 1 Influent and effluent characteristics in the WWTP

项目	COD / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SOP / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	VFA/COD (浓度比值)	SOP/COD (摩尔比值)
进水	84 ± 24	1.52 ± 0.37	0.24	0.006
出水	23 ± 5	0.96 ± 0.29	n. d.	0.014

1) n. d. 表示未检测出

2 材料与方法

2.1 活性污泥样品

活性污泥样品取自该污水处理厂厌氧池、氧化沟缺氧区以及好氧区末段,样品离心后加入磷酸盐缓冲液 (phosphate buffered saline, PBS) 以及 4% 多聚甲醛,于 4°C 保温箱中运回实验室。

2.2 水质分析方法

试验中水样所采用水质分析方法均参照文献

[10].

2.3 FISH 分析方法

试验采用的 16S rRNA 探针包括 EUBMIX (EUB338、EUB338-II 和 EUB338-III), PAOMIX (PAO462、PAO651 和 PAO846) 以及 GAOMIX (GAOQ431 和 GAOQ989), 分别用于标记全菌、Beta-proteobacteria *Accumulibacter* spp. 以及 Gamma-proteobacteria *Competibacter* spp.^[11], 具体如表 2 所示。

表 2 氧化沟工艺微生物 FISH 鉴定的 16S rRNA

Table 2 16S rRNA-targeted probes used for FISH detection of microbial populations of relevance in oxidation ditch

探针名称	5'-3'序列	探针修饰	目标微生物
EUB338	GCTGCCTCCCGTAGGAGT	FITC	Bacteria
EUB338-II	GCAGCCACCCGTAGGTGT'	FITC	Bacteria
EUB338-III	GCTGCCACCCGTAGGTGT	FITC	Bacteria
PAO462	CCGTCATCTACWCAGGGTATTAAC	HEX	<i>Accumulibacter</i>
PAO651	CCCTCTGCCAAACTCCAG-	HEX	<i>Accumulibacter</i>
PAO846	GTTAGCTACGGCACTAAAAGG'	HEX	<i>Accumulibacter</i>
GAOQ431	TCCCCGCTAAAGGGCTT	ACMA	<i>Competibacter</i>
GAOQ989	TTCCCCGGATGTCAAGGC	ACMA	<i>Competibacter</i>

预处理过的样品涂布于明胶包被的载玻片上,依次加入溶菌酶、蛋白酶 K,放入 37°C 生化培养箱

30 min 并用 50% 乙醇,80% 乙醇,100% 乙醇依次脱水后在杂交炉中 46°C 杂交 2 h. 杂交液成分如下:

35% 去离子甲酰胺, $0.9 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$, $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Tris-HCl}$, $\text{pH} = 7.2$, 0.01% SDS. 杂交后载玻片在 48°C 的杂交洗脱液 ($40 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$, $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Tris-HCl}$, 0.01% SDS $50 \mu\text{L}$, $\text{pH} = 7.2$) 中洗脱 20 mins, 风干封固后用激光共聚焦扫描显微镜 (CLSM, Leica TCS, SP2 AOBs) 观察^[12]. 利用 Image-Pro Plus (Version 6.0 for Windows, Media Cybernetics) 对 CLSM 随机拍摄的 10 个视野进行定量分析^[13], 以统计 PAOs、GAOs 占全菌的百分比.

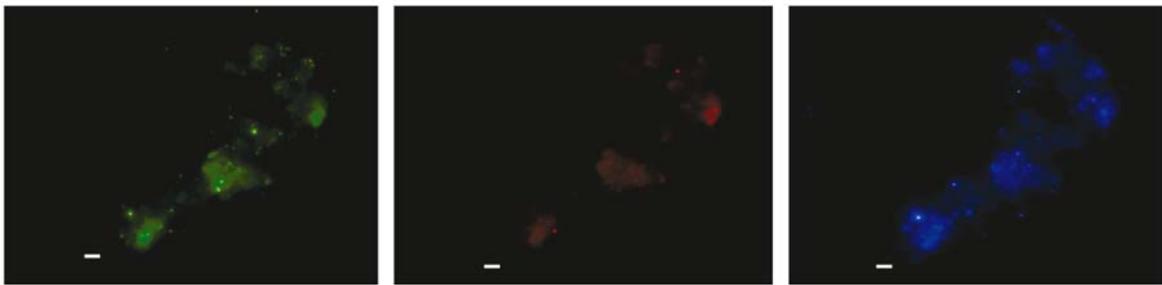
2.4 统计分析

利用标准偏差 (standard deviation, STDEV) 衡量 Image-Pro Plus 所得样本数据的分散程度. 利用方差分析 (analysis of variance, ANOVA) 对厌氧池、氧化沟缺氧区及好氧区的样本数据进行显著性检验.

3 结果与分析

3.1 微生物种群沿程结构

图 2~4 说明了该污水处理厂厌氧池、氧化沟缺氧以及好氧区中微生物种群 (*Bacteria*、*Accumulibacter* 和 *Competibacter*) 的不同结构. 结合图 5 的分析, 厌氧池、缺氧区、好氧区 PAOs (以 *Accumulibacter* 为主, 下同) 占全菌百分比分别约为 $2.0\% \pm 0.6\%$ 、 $3.4\% \pm 0.6\%$ 、 $3.5\% \pm 1.2\%$; GAOs (以 *Competibacter* 为主, 下同) 占全菌百分比分别约为 $25.3\% \pm 8.7\%$ 、 $30.3\% \pm 7.1\%$ 、 $24.4\% \pm 6.1\%$. 表 3 的 ANOVA 分析结果显示氧化沟缺氧区与好氧区中 PAOs 所占百分比相对于厌氧池有显著变化, 而 GAOs 沿程变化不大.



绿色为全菌, 红色为 *Accumulibacter*, 蓝色为 *Competibacter*, 比例尺为 $10 \mu\text{m}$, 下同

图 2 厌氧池活性污泥的 FISH 图

Fig. 2 FISH images from pre-anaerobic zone

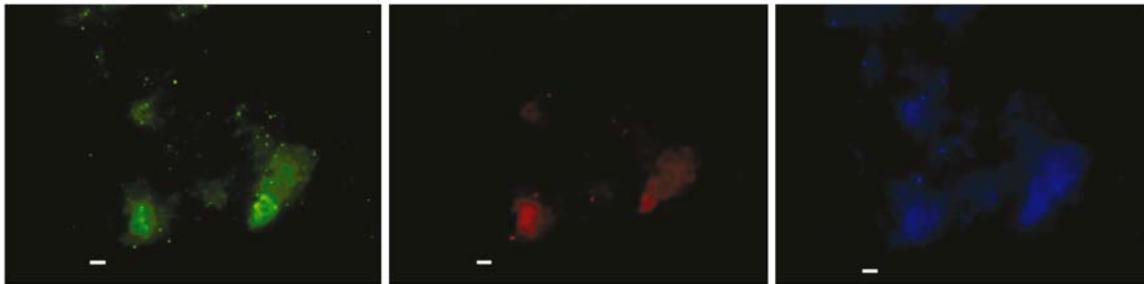


图 3 氧化沟缺氧区活性污泥的 FISH 图

Fig. 3 FISH images from anoxic zone of the oxidation ditch

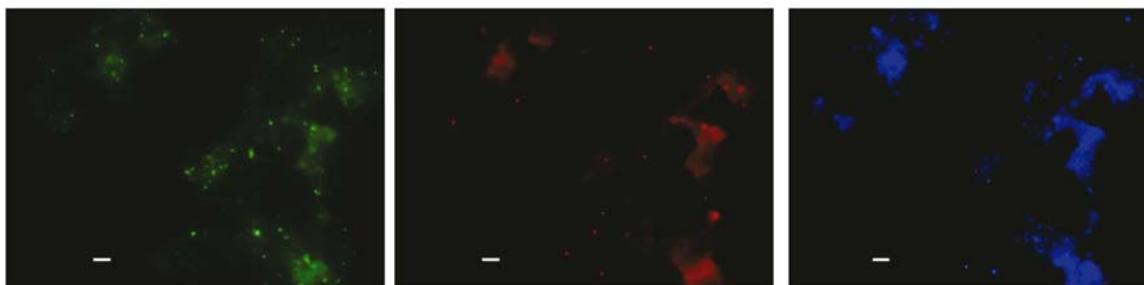


图 4 氧化沟好氧区活性污泥的 FISH 图

Fig. 4 FISH images from aerobic zone of the oxidation ditch

表 3 微生物种群参数的显著性分析

Table 3 Significant ($P < 0.05$) correlations found among the studied parameters of microbial populations

编号	参数 i	参数 j	F	F_{crit}	P	Results
1	Anoxic PAOs%	Anaerobic PAOs%	12.8	4.7	0.004	$P < 0.05$
2	Aerobic PAOs%	Anaerobic PAOs%	21.9	4.7	0.001	$P < 0.05$
3	Aerobic PAOs%	Anoxic PAOs%	3.7	4.7	0.080	$P > 0.05$
4	Anoxic GAOs%	Anaerobic GAOs%	0.9	4.7	0.355	$P > 0.05$
5	Aerobic GAOs%	Anaerobic GAOs%	0.2	4.7	0.690	$P > 0.05$
6	Aerobic GAOs%	Anoxic GAOs%	4.4	4.7	0.057	$P > 0.05$

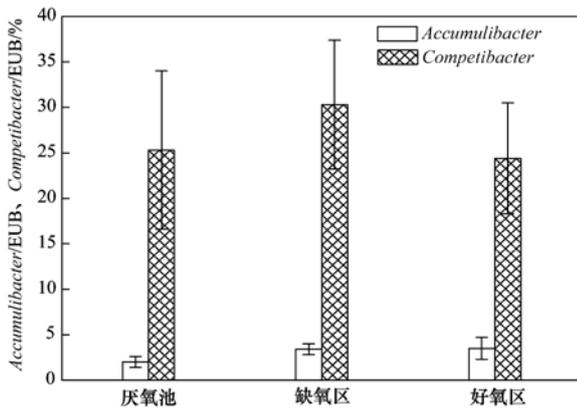


图 5 PAOs 与 GAOs 占全菌比例的沿程变化

Fig. 5 Variation in proportions of PAOs and GAOs in different zones of the WWTP

污水处理厂的工艺条件和操作水平能够影响 PAOs、GAOs 等微生物种群的生长。一些研究表明,污水处理厂脱氮除磷系统好氧区 PAOs 占全菌的百分比约为 7% ~ 22%^[3,14,15], GAOs 所占百分比约为 1% ~ 12%^[3], 10% ~ 31%^[7]。该污水处理厂氧化沟工艺好氧区 PAOs 含量(3.5% ± 1.2%) 低于已报道水平, GAOs 百分比含量位于 10% ~ 30% 的范围内, 约 0.96 mg·L⁻¹ 的出水 SOP 以及 36.8% 的 SOP 去除率表明该工艺除磷效果不理想。该厂的氧化沟含有前置厌氧池, 回流污泥直接进入厌氧池, 缺少预缺氧系统, 回流污泥所含的硝酸盐也进入了厌氧池内, 破坏了厌氧的条件, 造成厌氧段反硝化菌与聚磷菌对底物竞争, 减少了 PAOs 可利用的碳源, 最终导致 PAOs 厌氧释磷不完全, 在竞争中处于劣势, 因此也影响了好氧段对磷的吸收; 同时, 由于该厂进水的 COD 浓度较低, 不足以维持脱氮除磷的同时进行,

限制了除磷的作用, 应考虑添加碳源促进工艺除磷的能力。

3.2 微生物种群结构影响因素分析

近年来对强化生物除磷系统影响因素的研究较多, 研究表明, 进水碳源成分和种类、pH、DO、温度、硝态氮、SRT 以及 SOP/COD 等都是影响 PAOs 与 GAOs 竞争的因素。增加丙酸/乙酸比例有助于生物除磷系统的稳定, 但降低其比例有助于 PAOs 的竞争^[2,16]; 好氧条件下 pH(7 ~ 8) 在适当范围内提高有助于除磷系统中 PAOs 的竞争^[17]; 过高的 DO (4.5 ~ 5 mg·L⁻¹) 会使除磷效果恶化^[18], 为了降低曝气能耗以及兼顾反硝化脱氮的需要, EBPR 的 DO 通常控制在 0.5 ~ 1.5 mg·L⁻¹^[1] 范围内; 随着温度的上升(20 ~ 35°C), PAOs 释磷速率增加但吸磷速率降低^[19], 其所占比例下降而 GAOs 所占比例上升^[20], 说明低温更利于 PAOs 的生长; 硝态氮的存在会抑制 PAOs 而利于 GAOs 的生长^[21], 在 A²O 工艺中, 随着系统出水亚硝酸盐含量的升高, 好氧区存在较高的 FNA 浓度对聚磷菌好氧吸磷产生了抑制, 导致系统对磷的去除效果逐渐恶化^[22]; 在较低 SOP/VFA [$n(P)/n(C)$ 为 0.01 ~ 0.04] 条件下, 胞内的多聚磷酸盐被耗尽会使得 PAOs 失去重要的能量来源, 从而逐渐被淘汰^[23,24]。

表 4 显示了该污水处理厂氧化沟工艺沿程水质情况。可见, 温度与 DO 均属于正常范围内, 但厌氧池平均 COD 浓度却低于 50 mg·L⁻¹, 平均 SOP/COD [$n(P)/n(C)$] 处于 0.009 ~ 0.025 的范围内, 根据 Lopez-Vazquez 等^[24] 的发现, PAOs 会因为能量代谢受阻而被逐渐淘汰; 同时考虑到该厂氧化沟工艺没有明确分区等特点, 导致了活性污泥中 PAOs 含量

表 4 污水处理厂沿程水质

Table 4 Water quality of different zones in the WWTP

位置	温度/°C	DO/mg·L ⁻¹	COD/mg·L ⁻¹	SOP/mg·L ⁻¹	SOP/COD(摩尔比值)
厌氧池	23.7 ± 0.6	0.11 ± 0.02	24 ± 14	1.80 ± 0.90	0.025
氧化沟缺氧区	23.7 ± 0.6	0.16 ± 0.02	20 ± 3	0.84 ± 0.55	0.014
氧化沟好氧区	23.7 ± 0.6	1.11 ± 0.09	28 ± 6	0.73 ± 0.61	0.009

相对较少 (<4%), 而由于操作运行中 SRT 较长 (17.5 d), 进一步导致了水厂除磷能力的下降 ($SOP_{\text{effluent}} = 0.96 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 0.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 所以为了能够创造利于 PAOs、GAOs 等微生物生长的条件, 需要进一步开展中试研究, 有效控制影响微生物种群结构的各种因素, 提升水厂 EBPR 的稳定性.

4 结论

(1) 该污水处理厂氧化沟工艺厌氧池、缺氧区、好氧区 PAOs (*Accumulibacter*) 占全菌百分比分别为 $2.0\% \pm 0.6\%$ 、 $3.4\% \pm 0.6\%$ 、 $3.5\% \pm 1.2\%$; GAOs (*Competibacter*) 占全菌百分比分别为 $25.3\% \pm 8.7\%$ 、 $30.3\% \pm 7.1\%$ 、 $24.4\% \pm 6.1\%$, 氧化沟缺氧区与好氧区中 PAOs (*Accumulibacter*) 所占百分比相对于厌氧池有显著变化. 该工艺好氧区 PAOs 含量低于脱氮除磷工艺已报道的水平 ($7\% \sim 22\%$).

(2) 需进一步考察环境条件 (如碳源、溶解氧、温度、硝酸盐氮以及进水 P/VFA [$n(\text{P})/n(\text{C})$] 等) 对实际污水处理厂中 PAOs 种群结构的影响, 通过对各项参数的控制分析 PAOs 的最优吸磷/释磷条件, 以提高污水处理厂的处理性能.

(3) 需考察低碳源条件下如何实现有效脱氮除磷, 分析反硝化除磷的影响因素, 研究如何有效利用污泥内碳源, 并以此为依据设计改造氧化沟现有工艺.

参考文献:

- [1] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale[J]. *Water Research*, 2007, **41**(11): 2271-2300.
- [2] Mino T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J, *et al.* Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process [J]. *Water Research*, 1998, **32**(11): 3193-3207.
- [3] Saunders A M, Oehmen A, Blackall L L, *et al.* The effect of GAOs (glycogen accumulating organisms) on anaerobic carbon requirements in full-scale Australian EBPR (enhanced biological phosphorus removal) plants[J]. *Water Science and Technology*, 2003, **47**(11): 37-43.
- [4] Kong Y H, Xia Y, Nielsen J L, *et al.* Ecophysiology of a group of uncultured Gammaproteobacterial glycogen accumulating organisms in full-scale enhanced biological phosphorus removal wastewater treatment plants [J]. *Environmental Microbiology*, 2006, **8**(3): 479-489.
- [5] Wong M T, Liu W T. Ecophysiology of *Defluviococcus*-related tetrad-forming organisms in an anaerobic-aerobic activated sludge process[J]. *Environmental Microbiology*, 2007, **9**(6): 1485-1496.
- [6] 王旭东, 王磊, 张龙涛, 等. EBPR 中两类细菌 PAOs 和 GAOs 竞争的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33**(5): 81-84.
- [7] Wong M T, Mino T, Seviour R J, *et al.* In situ identification and characterization of the microbial community structure of full-scale enhanced biological phosphorous removal plants in Japan [J]. *Water Research*, 2005, **39**(13): 2901-2914.
- [8] Lopez-Vazquez C M, Hooijmans C M, Brdjanovic D, *et al.* Factors affecting the microbial populations at full-scale enhanced biological phosphorus removal (EBPR) wastewater treatment plants in the Netherlands[J]. *Water Research*, 2008, **42**(10-11): 2349-2360.
- [9] 亢涵, 王秀蓓, 李楠, 等. 生物除磷系统启动期聚磷菌的 FISH 原位分析与聚磷特性[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 80-84.
- [10] 国家环境保护总局. 水与废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] Crocetti G R, Hugenholtz P, Bond P L, *et al.* Identification of polyphosphate accumulating organisms and design of 16S rRNA directed probes for their detection and quantitation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(3): 1175-1182.
- [12] Amann R I. In situ identification of micro-organisms by whole cell hybridization with rRNA-targeted nucleic acid probes[A]. In: Akkermans A D L, Van Elsas J D, De Bruij F J (eds.). *Molecular microbial ecology manual* [C]. London: Kluwer, 1995. 1-15.
- [13] Bouchez T, Patureau D, Dabert P, *et al.* Successful and unsuccessful bioaugmentation experiments monitored by fluorescent in situ hybridization [J]. *Water Science and Technology*, 2000, **41**(12): 61-68.
- [14] Chua A S M, Onuki M, Satoh H, *et al.* Examining substrate uptake patterns of Rhodocyclus-related PAO in full-scale EBPR plants by using the MAR-FISH technique[J]. *Water Science and Technology*, 2006, **54**(1): 63-70.
- [15] Tykesson E, Blackall L L, Kong Y, *et al.* Applicability of experience from laboratory reactors with biological phosphorus removal in full-scale plants[J]. *Water Science and Technology*, 2006, **54**(1): 267-275.
- [16] 刘燕. 丙酸/乙酸比例及 pH 对聚磷菌富集系统的影响[D]. 上海: 同济大学, 2006. 68-69.
- [17] Oehmen A, Vives M T, Lu H B, *et al.* The effect of pH on the competition between polyphosphate-accumulating organisms and glycogen-accumulating organisms [J]. *Water Research*, 2005, **39**(15): 3727-3737.
- [18] Griffiths P C, Stratton H M, Seviour R J. Environmental factors contributing to the "G bacteria" population in full-scale EBPR plants[J]. *Water Science and Technology*, 2002, **46**(4-5): 185-192.
- [19] Panswad T, Doungchai A, Anotai J. Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal

- system[J]. *Water Research*, 2003, **37**(2): 409-415.
- [20] Lopez-Vazquez C M, Song Y H, Hooijmans C M, *et al.* Temperature effects on the aerobic metabolism of glycogen accumulating organisms[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, **101**(2): 295-306.
- [21] Saito T, Brdjanovic D, Van Loosdrecht M C M. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms[J]. *Water Research*, 2004, **38**(17): 3760-3768.
- [22] 曾薇, 李磊, 杨莹莹, 等. 亚硝酸盐积累对 A²O 工艺生物除磷的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 2106-2112.
- [23] Liu W T, Nakamura K, Matsuo T, *et al.* Internal energy-based competition between polyphosphate-and glycogen-accumulating bacteria in biological phosphorus removal reactors-effect of P/C feeding ratio[J]. *Water Research*, 1997, **31**(6): 1430-1438.
- [24] Lopez-Vazquez C M, Oehmen A, Hooijmans C M, *et al.* Modeling the PAO-GAO competition: Effects of carbon source, pH and temperature[J]. *Water Research*, 2009, **43**(2): 450-462.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yang, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-jiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行