

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In₂S₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究

高景峰¹, 李婷¹, 张树军², 樊晓燕¹, 潘凯玲¹, 马谦², 袁亚林²

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

摘要: 近期, 氨氧化古菌(ammonia-oxidizing archaea, AOA) 在各类环境中的发现, 打破了人们原来认为氨氧化主要是由氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB) 完成的观点. 但是在全程自养脱氮 (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON) 污水处理系统中关于 AOA 的研究却鲜有提及. 利用 PCR、克隆、实时荧光定量 PCR (quantitative real time PCR, qPCR) 等分子生物学技术, 对 1 个小试 (lab-scale, L) 和 1 个中试 (pilot-scale, P) CANON 系统中的生物膜和活性污泥絮体两种形态的污泥进行 AOA 数量和种属特征的研究. 结果表明: ① 系统 L 和 P 中, AOA 的 *amoA* 基因数量平均值 (以 dry sludge 计) 分别为 2.42×10^6 copies·g⁻¹ 和 6.51×10^6 copies·g⁻¹; ② AOA 的 *amoA* 基因丰度随污泥形态不同数量相差很大: L 系统中, 生物膜 AOA *amoA* 丰度约为活性污泥絮体的 11.1 ~ 15.1 倍; P 系统中, 污泥絮体 AOA *amoA* 数量是生物膜中的 2.8 倍; ③ 多样性方面: P 系统的 AOA 多样性较低, 仅出现一个 OTU, 该 OTU 属于 *Nitrosopumilus* subcluster 5.2 类群; L 系统 AOA 多样性较高, 共有 8 个 OTU 出现, 分别属于 *Nitrososphaera* subcluster 9、subcluster 8.1、subcluster 4.1、subcluster 1.1 和 *Nitrosopumilus* subcluster 5.2 这 5 个类群. 总之, 在同一个 CANON 系统中, 污泥形态不同, AOA 的丰度和群落结构相差较大; AOA 可能发挥着氨氧化的作用.

关键词: 氨氧化古菌; CANON; 生物膜; 活性污泥; 丰度; 多样性

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2939-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.029

Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems

GAO Jing-feng¹, LI Ting¹, ZHANG Shu-jun², FAN Xiao-yan¹, PAN Kai-ling¹, MA Qian², YUAN Ya-lin²

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Ammonia oxidation is the first and rate-limiting step of nitrification, which was thought to be only performed by ammonia-oxidizing bacteria (AOB). In recent years, ammonia-oxidizing archaea (AOA) was also confirmed to take part in ammonia oxidation. The diversity and abundance of AOA have been investigated in various environments, however, little is known regarding the AOA in the completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) wastewater treatment process. In this study, the abundance and diversity of AOA were investigated in the biofilm and flocculent activated sludge collected in a lab-scale (L) CANON system and a pilot-scale (P) CANON systems, respectively. The quantitative real time PCR (qPCR) was applied to investigate the abundance of AOA and the diversity of AOA was determined by polymerase chain reaction (PCR), cloning and sequencing. The qPCR results showed that the average abundance of AOA *amoA* gene of L and P was 2.42×10^6 copies·g⁻¹ dry sludge and 6.51×10^6 copies·g⁻¹ dry sludge, respectively. The abundance of AOA in biofilm was 10.1-14.1 times higher than that in flocculent activated sludge. For P system, the abundance of AOA in flocculent activated sludge was 1.8 times higher than that in biofilm. The results indicated that the abundance of AOA might be affected by different sludge morphology. The diversity of AOA in P system was extremely limited, only one OTU was observed, which was classified into *Nitrosopumilus* subcluster 5.2. The diversity of AOA in L system was higher, eight OTUs were observed, which were classified into five genera: *Nitrososphaera* subcluster 9, subcluster 8.1, subcluster 4.1, subcluster 1.1 and *Nitrosopumilus* subcluster 5.2. The diversity and abundance of AOA were different in CANON systems with different sludge morphology. AOA may play an important role in ammonia oxidation in CANON system.

Key words: ammonia-oxidizing archaea (AOA); completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON); biofilm; activated sludge; abundance; diversity

全程自养脱氮 (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON) 工艺作为一种新型的全程自养脱氮技术, 具有节约曝气和占地面积、污泥产量低和无需外加有机碳源、高效脱氮等优点, 并且适用于处理低碳氮比的城市污水或者有机碳缺乏而氨氮含量高的味精废水、养殖废水和垃圾渗滤液

等工业废水, 是一种经济、友好型的污水处理工艺, 极具应用前景^[1].

收稿日期: 2015-01-13; 修订日期: 2015-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51078007, 51378027); 北京工业大学“京华人才”项目 (2013-JH-L06)

作者简介: 高景峰 (1974 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: gao.jingfeng@bjut.edu.cn

在 CANON 系统中,脱氮主要是在氨氧化微生物的作用下,将进水中约一半的 NH_4^+ -N 氧化为 NO_2^- -N, 厌氧氨氧化菌 (anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX) 再将剩下一半的 NH_4^+ -N 和生成的 NO_2^- -N 转化为 N_2 ^[2]. 最初, 研究者们认为氨氧化细菌 (ammonia-oxidizing bacteria, AOB) 是污水生物处理系统中氨氧化的主要完成者. 例如, Wagner 等^[3] 利用荧光原位杂交技术对比了几个污水厂 AOB 群落的异同; Persson 等^[4] 研究了处理生活污水的生物膜系统内 AOB 的活性及分布; Hallin 等^[5] 研究了污泥停留时间对 AOB 群落的影响; Siripong 等^[6] 在 7 个污水处理厂使用末端限制性片段长度多样性技术检测到 AOB 的存在. 随着人们发现氨氧化古菌 (ammonia-oxidizing archaea, AOA) 在自然环境中的普遍存在, 证实 AOA 也可以实现氨氧化, 并将其归属于一个新的“门”——奇古菌门^[7]. 在污水处理领域, Park 等^[8] 首次在美国 5 个污水处理厂 (共考察了 9 个污水处理厂) 检测到 AOA; 随后 Zhang 等^[9] 在香港的 2 个污水处理厂中也发现了 AOA. 而后, 一些研究者开始同时研究 AOA 和 AOB 在污水脱氮工艺中的丰度和多样性, 例如: Limpiyakorn 等^[10] 研究了 4 个市政和 3 个工业污水处理厂的 AOA 和 AOB 的数量和种属, 对同一个系统内的 AOA 与 AOB 的数量进行了比较; Gao 等^[11] 采集了 8 个不同工艺、水质的市政和工业污水处理厂的污泥样品, 研究了 AOA 和 AOB 的种属和丰度以及影响因子; Zhang 等^[12] 对中国杭州一个化学工业园的污水处理厂和一个处理抗生素废水的污水厂中 AOA 和 AOB 的丰度进行了研究. 尽管有一些不同污水脱氮系统 AOB 和 AOA 的种属和数量的研究,

但是关于 CANON 系统的研究, 主要集中于研究其系统运行效能的影响因素, 如温度^[13]、pH^[14]、DO^[14]、 NH_4^+ -N 浓度^[2] 等, 关于该系统内氨氧化微生物的研究也主要集中于 AOB, 有关 CANON 系统中 AOA 的研究很少. 基于此, 本文研究了 2 个 CANON 污水处理系统中 (1 个小试和 1 个中试反应器) AOA 的数量和种属特征; 同时考察了生物膜和活性污泥絮体这 2 种不同污泥形态中 AOA 的数量区别, 分析了污泥形态对 AOA 的影响. 本研究将扩展人们对于 CANON 系统中氨氧化微生物的认识.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本研究的对象是 2 个 CANON 自养脱氮系统: 低氧运行下 0.12 m^3 的序批式生物膜反应器 (sequencing batch biofilm reactor, SBBR), 小试 (lab-scale, L); 低氧运行下 500 m^3 的填充有海绵和空心球填料的缺氧/好氧脱氮系统 (anoxic/oxic, A/O), 中试 (pilot-scale, P).

1.2 实验水质

系统 L 和 P 分别处理城市污水处理厂二沉池出水和高 NH_4^+ -N 浓度的污泥消化上清液. 系统 L 接种短程硝化污泥 0.06 m^3 , 并额外接种已富集 ANAMMOX 菌的海绵填料, 填料比为 10%; 系统 P 接种活性污泥泥饼 10 t, 并接种富含 ANAMMOX 菌的空心球和海绵两种填料, 填料比为 20%. 系统 L 和 P 进出水水质以及运行参数见表 1. 从中可知: L 系统 COD 和总氮去除率分别为 50.0% 和 78.3%, 而 P 系统 COD 和总氮去除率分别为 68.2% 和 84.0% ~ 86.7%, 2 个系统运行效果较好.

表 1 2 个 CANON 污水处理系统的各项水质参数

Table 1 Water quality parameters of wastewater in two CANON bioreactors

反应器	容积 / m^3	进水 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$				出水 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$				MLSS / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SRT /d	HRT /h	DO / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
		COD	TN	NH_4^+ -N	TP	COD	TN	NH_4^+ -N	TP				
L	0.12	206.58	51.52	43.89	4.09	40	10.7	7.24	0.17	3 000	4 ~ 5	3 ~ 4	0.2 ~ 0.5
P	500	516	500 ~ 600	450 ~ 500	14.6	164	60 ~ 80	< 15	2.65	3 000 ~ 5 000	8	10	< 0.5

1.3 实验样品

分别采集稳定运行的系统 L 和 P 中活性污泥絮体和生物膜填料, 存于 -20°C . 样品情况见表 2. L 和 P 中所有样品的 AOA 均采用实时荧光定量 PCR 技术 (quantitative real time polymerase chain reaction, qPCR) 进行定量分析. 其中, L 为投加富含 ANAMMOX 菌填料的海绵 SBBR 反应器, 该反应器自养脱氮的主体为生物膜; P 为投加富含 ANAMMOX 菌海

绵填料的 A/O 系统, 该系统的主体是絮体活性污泥. 选取样品 L1 (生物膜) 和样品 P4 (污泥絮体) 为代表, 采用聚合酶链式反应 (polymerase chain reaction, PCR) 和克隆技术研究 L 和 P 中 AOA 多样性.

1.4 样品分析

1.4.1 DNA 提取、PCR、克隆文库和系统发育树的构建

使用 Fast-DNA[®] Spin kit for soil (QIAGEN,

表 2 样品详细信息

Table 2 Information on samples from two bioreactors

反应器	样品	污泥形态	样品描述
L	L1	生物膜	常温运行 10 d 后边长为 1 cm 立体海绵方块
	L2	生物膜	低温 14℃ 运行 45 d 的边长 1 cm 立体海绵方块
	L3	活性污泥絮体	常温运行 10 d 的絮状活性污泥
P	P1	生物膜	直径 10 cm 聚乙烯球内边长 1 cm 的立体海绵填料
	P2	生物膜	直径 10 cm 聚乙烯球内 8 mm 厚度的片状海绵填料
	P3	生物膜	边长 1 cm 的立体海绵填料
	P4	活性污泥絮体	活性污泥絮体

CA, USA) DNA 试剂盒, 提取生物膜和活性污泥样品 DNA. 使用特异性引物 Arch-amoAF (5'-STAATGGTCTGGCTTAGACG-3') 和 Arch-amoAR (5'-GCGGCCATCCATCTGTATGT-3') 扩增 AOA 的 *amoA* 基因^[15], PCR 反应体系和程序见文献[15]. 使用 Zero Background TA TOPO Cloning Kit (Clone Smarter, Houston, USA) 将纯化的 PCR 产物连接到 pCloneEZ-TA-AMP 载体中, 并最终转入 DH108 感受态细胞, 随机挑取平板上生长的白斑, 送往中美泰和生物技术(北京)有限公司测序. 将测序序列经 MEGA 5.05 和 Mothur 1.19 软件处理后, 按 97% 的序列相似度计算得到代表性 OTU 和文库覆盖率及多个多样性指数, 并得到稀缺性曲线. 在 NCBI 库比对测序序列, 搜索并下载同源性高的序列. 利用 MEGA 5.05 软件, 将代表性 OTU 和下载的高同源性序列、前人研究发表的 AOA 的 *amoA* 基因序列采用邻接(Neighbor-joining)法构建系统发育树.

1.4.2 qPCR

首先, 通过特异性引物扩增 AOA *amoA* 目的片段, 将该片段克隆到 pCloneEZ-TA-AMP 载体, 再转入 DH108 感受态细胞生长, 最终挑斑、摇菌, 经测序验证为 AOA *amoA* 基因序列, 提取带有目的片段的质粒作为 qPCR 标准品. 采用引物 Arch-amoAF 和 Arch-amoAR, 参照文献[11]中的扩增体系和程序, 于 Stratagene MX3005p thermocycler (Agilent Technologies, USA) 仪器上采用 qPCR (SYBR Green I 核酸染料法) 对 AOA 定量. 质粒经过一系列稀释, 使其浓度(以 DNA 计)为 $10^1 \sim 10^8$ copies $\cdot \mu\text{L}^{-1}$, 建立标准曲线. 标准品和未知样品, 分别做 3 个平行, 并设置阴性对照. qPCR 的扩增斜率为 -3.33, 扩增效率为 99.6%, 标准曲线相关系数 R^2 为 0.997, 溶解曲线为单一峰.

1.4.3 序列登录号

L 和 P 系统共克隆、测序得到 58 条 AOA 序列, 提交到 GenBank 数据库, 登录号分别为 KM402140

~KM402168 和 KM402169 ~ KM402197.

2 结果与分析

2.1 2 个 CANON 污水处理系统 AOA 数量特征

本文研究了 2 个 CANON 污水处理系统(L 和 P)中不同污泥存在形态(生物膜和活性污泥絮体)对于 AOA 数量的影响. L 和 P 系统的 7 个样品中 AOA 的数量均较高, 其 qPCR 的结果如图 1 所示. 从中可以看出: 这 7 个样品 AOA 的 *amoA* 基因含量(以 dry sludge 计, 下同)范围为 $(2.67 \times 10^5 \pm 1.16 \times 10^5) \sim (1.26 \times 10^7 \pm 6.50 \times 10^5)$ copies $\cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 4.76×10^6 copies $\cdot \text{g}^{-1}$. 其中, 反应器 L 和 P 中, AOA 的丰度均值分别达到 2.42×10^6 和 6.51×10^6 copies $\cdot \text{g}^{-1}$. 反应器 L 中, 生物膜样品 L1 和 L2 中 AOA 的数量分别是 2.97×10^6 和 4.02×10^6 copies $\cdot \text{g}^{-1}$, 污泥絮体 L3 中 AOA 的数量较少为 2.67×10^5 copies $\cdot \text{g}^{-1}$, 生物膜样品中 AOA 的数量约为活性污泥絮体样品的 11.1 ~ 15.1 倍, 说明不同污泥形态对 AOA 数量有一定影响; 其次, 样品 L2 取自于低温环境中(14℃), 而其 AOA 数量最大, 表明低温(14℃)并未抑制 AOA 的生长, 温度对于 AOA 数量

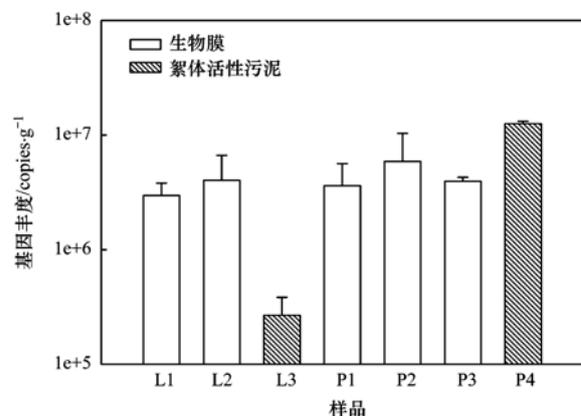


图 1 2 个 CANON 污水处理系统中 AOA 的定量结果

Fig. 1 Quantitative results of AOA *amoA* gene copies in samples of two CANON systems

的影响可能不大. 反应器 P 中, 3 种不同生物填料 (分别为 P1、P2 和 P3) 的 AOA 数量相差不大, 其 AOA 的数量分别为 3.61×10^6 、 5.90×10^6 和 3.96×10^6 copies·g⁻¹, 平均值为 4.49×10^6 copies·g⁻¹, 说明生物填料的大小、形状以及放置方式对 AOA 数量的影响不大. 污泥絮体 P4 中 AOA 的数量是 1.26×10^7 copies·g⁻¹, 约为生物膜中的 2.8 倍, 进一步说明污泥形态对于 AOA 的数量有影响, 但却与 L 系统的结果相反.

2.2 基于操作分类单元(OTU)的 AOA 多样性

样品 L1 和 P4 各自得到 29 条 AOA 序列, 其稀缺性曲线如图 2 所示, 多样性指数表如表 3 所示.

表 3 两个 CANON 污水处理系统中 AOA 克隆文库分析结果

Table 3 Sequence diversity of AOA and Good's coverage of the clone libraries in two CANON systems

样品	测序数	OTUs 数	文库覆盖度/%	Chao1 指数	测得 OTUs 数/实际 OTUs 数/%	香农指数
L1	29	8	86.21	10	80.00	1.46
P4	29	1	100.00	1	100.00	0.00

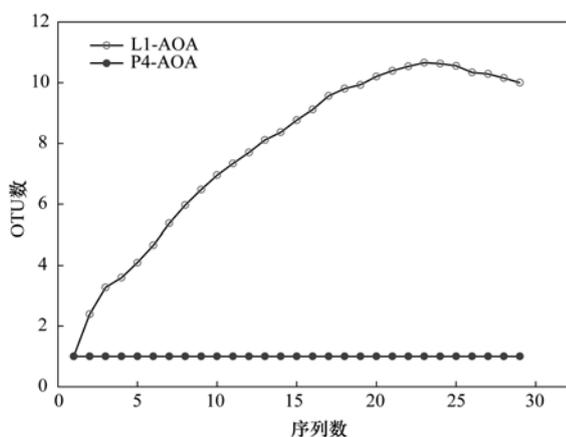


图 2 2 个 CANON 污水处理系统中 AOA 种群稀缺性曲线

Fig. 2 Rarefaction curves indicating the richness of AOA within clone libraries derived from different samples in two CANON systems

2.3 基于系统发育的 AOA 种属多样性

对于 AOA 种属的划分, 有 2 个阶段, 第一阶段是将 AOA 归为泉古菌的 group I. 1a 和 group I. 1b 的阶段^[16], I. 1a 主要是海洋硝化古菌, 而 I. 1b 主要是土壤硝化古菌^[17, 18]; 第二阶段将 AOA 划分到一个新的古菌门——“奇古菌门(Thaumarchaeota)”^[19], 并且将 AOA 分为 *Nitrosotalea* cluster、*Nitrosopumilus* cluster (即 group I. 1a)、*Nitrososphaera* cluster (即 group I. 1b)、*Nitrosocaldus* cluster 和 *Nitrososphaera* sister cluster 5 大类群^[20].

从图 4 可知, 本研究的 AOA 序列属于 *Nitrososphaera* cluster 和 *Nitrosopumilus* cluster 两个大

从图 2 可知, 两个样品的稀缺性曲线均达到平台期, 同时序列的文库覆盖度分别高达 86.21% 和 100%, 说明, 测序量足以反映样品中 AOA 的多样性. 在 97% 的序列相似度下, L1 和 P4 分别得到 8 和 1 个 OTU, 同时 L1 的香农指数明显高于 P4, 说明 L1 中 AOA 的多样性明显高于 P4. 图 3 表明了 L1 和 P4 样品中 OTU 的分布及含量: 其中 L1 中 OTU2 和 OTU4 为主要的 OTU, 其所占的比例分别为 55.17% 和 17.24%; 此外, OTU1 和 OTU3 所占的比例均为 6.9%, 而 OTU5 和 OTU6 所占比例更小, 均为 3.45%; 而 P4 中仅含有 OTU6, 也证明了 L1 中 AOA 的多样性明显高于 P4.

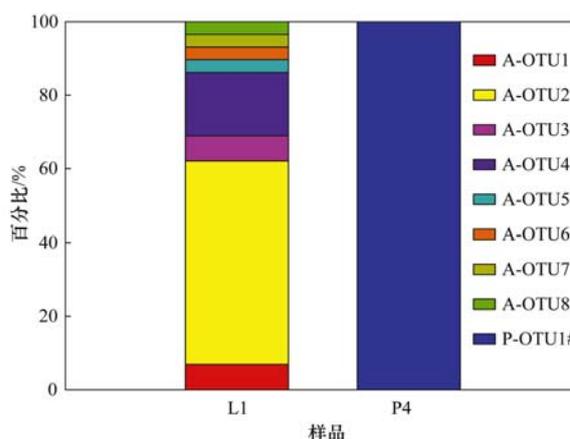


图 3 2 个 CANON 污水处理系统中 AOA 的 OTU 分布以及相对含量

Fig. 3 Distribution and relative abundance of OTUs of AOA in two CANON systems

簇; 第一簇 *Nitrososphaera* cluster 又分为 subcluster 9、subcluster 8.1、subcluster 4.1 和 subcluster 1.1 这 4 个亚簇; 第二簇 *Nitrosopumilus* cluster 仅含 subcluster 5.2 这 1 个亚簇. 第一簇中, L1 样品 OTU1、OTU4、OTU6 聚成亚簇 *Nitrososphaera* subcluster 9, 这 3 个 OTU 与长江河口沉积物样品 clone S7-A-21 (EU025160) 序列最相近, 序列相似度均为 92%. L1 样品 OTU8, 聚成亚簇 *Nitrososphaera* subcluster 8.1, 并且与西太平洋深海沉积物样品 clone 3063-A-28 (EU885697) 和土壤样品 clone SGX-362 (EU590481) 相近, 序列相似度分别为 94% 和 97%. L1 样品 OTU3, 聚成 *Nitrososphaera* subcluster 4.1 簇,

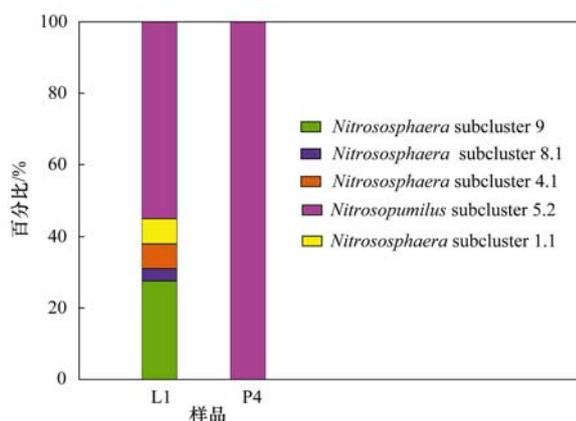


图5 2个CANON污水处理系统中AOA的种群分布以及种群相对含量

Fig. 5 Distribution and relative abundance of phylogenetic AOA groups in two CANON systems

CANON系统中不仅检测到AOA的存在,而且发现AOA的数量较高,达到 $10^6 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$,揭示了AOA可能在CANON系统发挥着氨氧化的作用。

就AOA在其他污水处理系统中的作用而言,当前的研究认为:AOA和AOB相似,主要完成硝化作用的第一步,即将 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 氧化为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 。而在CANON系统中,主要由2个反应完成脱氮,一是氨氧化微生物将 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 氧化为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$;二是ANAMMOX菌将进水中剩余的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和氧化生成的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 转化为 N_2 [22]。一般认为前者由AOB完成,近期有研究指出AOA也可完成 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的氧化,因此不难解释AOA在CANON系统中具有较高丰度的原因。

从上述反应可知,CANON系统中AOA与AOB、ANAMMOX菌可能共同存在、相互作用。对于AOA与AOB、ANAMMOX菌的具体关系,有学者探讨指出:AOA与AOB存在竞争关系,而且主要是针对 O_2 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 这两种底物的竞争;而AOA和ANAMMOX菌既协作又竞争,一方面AOA耗氧完成氨氧化反应生成 $\text{NO}_2^- \text{-N}$,为ANAMMOX菌提供底物并提供厌氧环境,两者协作;另一方面, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 是AOA与ANAMMOX菌共同的底物,两者竞争 [23]。具体到本文的CANON系统而言,AOA与两者的关系,仍有待研究。另外,AOA对于整个CANON系统脱氮中氨氧化相对贡献的大小,仍有待评定。

3.2 CANON系统与其他污水系统中AOA数量和类群的对比

近期有人研究了污水处理系统中AOA的数量和种类。就AOA丰度而言,在泰国一个市政污水厂

检测到AOA的数量(以dry sludge计)为 $(5.70 \times 10^6 \pm 3.30 \times 10^5) \text{ copies} \cdot \text{mg}^{-1}$ [24];在香港一个处理含盐污水的连续流反应器中检测到AOA丰度(以DNA计)为 $10^{1.33} \sim 10^{4.06} \text{ copies} \cdot \text{ng}^{-1}$ [25];在中国大陆和澳洲10个污水处理系统中,发现AOA的数量(以dry sludge计)在 $10^3 \sim 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ [26]。本研究中2个CANON系统中AOA的数量(以dry sludge计)为 $(2.67 \times 10^5 \pm 1.16 \times 10^5) \sim (1.26 \times 10^7 \pm 6.50 \times 10^5) \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$,AOA丰度较高,并且与前人在其他污水处理系统中发现的AOA数量相差不大。

本研究中AOA种属*Nitrososphaera* cluster(即group I.1b)和*Nitrosopumilus* cluster(group I.1a)曾经在河口、海洋、土壤、盐沼、生物膜、热泉、污水和淡水等多种环境样品中出现(图4),可知这2类AOA广泛存在于各类生态环境中。就AOA的多样性而言,在不同的污水处理系统中都检测到*Nitrosopumilus* cluster(group I.1a)和*Nitrososphaera* subcluster(group I.1b)这两大类群。日本某小试反应器的污泥中检测到的AOA与*Nitrosopumilus maritimus*(group I.1a)具有较高的相似度 [27],而Gao等 [26]研究了10个污水处理系统的AOA的种群数量和组成特征,发现AOA主要属于*Nitrososphaera* cluster(group I.1b,占75%的比例)和*Nitrosopumilus* cluster(group I.1a,25%的比例)这2大簇。就本研究中AOA所占这2大类群比例来看(见图5),*Nitrosopumilus* cluster(group I.1a)为这两个CANON污水处理系统的共同优势菌,而*Nitrososphaera* subcluster(group I.1b)仅在L系统出现。这一方面说明*Nitrosopumilus* cluster(group I.1a)在某些污水处理系统中为优势AOA种属;另一方面也说明*Nitrososphaera* cluster(即group I.1b)和*Nitrosopumilus* cluster(group I.1a)是污水生物系统中普遍存在的AOA类群。

3.3 CANON系统中污泥形态对AOA数量的影响

本研究中,L系统中生物膜的AOA数量大于污泥絮体;P系统中,生物膜和絮体污泥中的AOA数量均较多,污泥形态(聚集状生物膜和絮体活性污泥)影响着AOA的数量,并且同一形态的生物膜污泥(尽管不同的大小、形状、放置方式)AOA数量相差不大。其可能的原因有:①两个CANON系统中生物膜和活性污泥絮体的种泥皆不同,不同种泥中AOA的含量不同,导致驯化后稳态污泥中AOA的数量不同;② $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 是AOA氨氧化反应的底物,Wuchter等 [28]研究发现北海中的古菌*amoA*基因丰

度与 NH_4^+ -N浓度相关, 本文两个 CANON 反应器氨负荷不同, 可能导致 AOA 丰度不同; ③CANON 工艺的一个重要的特点是溶解氧较低, 而低溶解氧可能有利于 AOA 的生存^[29], 因此, CANON 系统中有大量 AOA 存在, 但是溶解氧与污泥形态及 AOA 之间的关系还需进一步深入研究。

4 结论

(1)CANON 这一特殊的污水处理系统中, AOA 存在并且数量较大, 均值达到 $4.76 \times 10^6 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 。L 系统 AOA 多样性明显高于 P 系统: 系统 P 中仅出现 *Nitrosopumilus* cluster 5.2 这一个亚簇, 而 L 中出现 *Nitrososphaera* subcluster 9、subcluster 8.1、subcluster 4.1、subcluster 1.1 和 *Nitrosopumilus* subcluster 5.2 这 5 个亚簇。

(2)在同一个 CANON 系统中, 污泥形态不同, AOA 丰度相差较大。系统 L 中, 生物膜样品 AOA 的数量约为污泥絮体样品的 11.1 ~ 15.1 倍; 而系统 P 中, 污泥絮体 AOA 的数量约为生物膜的 2.8 倍。

(3)AOA 在 CANON 系统中数量较高并且多样性丰富, 推测 AOA 可能在 CANON 系统中发挥氨氧化的作用。

致谢: 北京城市排水集团有限责任公司研发中心张亮博士以及邵和东等在采样时提供帮助, 特此感谢!

参考文献:

- [1] 操家顺, 蔡娟. 新型生物脱氮工艺——CANON 工艺[J]. 中国给水排水, 2005, **21**(8): 26-29.
- [2] Third K A, Sliekers A O, Kuenen J G, *et al.* The CANON system (completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite) under ammonium limitation: interaction and competition between three groups of bacteria [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2001, **24**(4): 588-596.
- [3] Wagner M, Rath G, Amann R, *et al.* *In situ* identification of ammonia-oxidizing bacteria [J]. Systematic and Applied Microbiology, 1995, **18**(2): 251-264.
- [4] Persson F, Wik T, Srensson F, *et al.* Distribution and activity of ammonia oxidizing bacteria in a large full-scale trickling filter [J]. Water Research, 2002, **36**(6): 1439-1448.
- [5] Hallin S, Lydmark P, Kokalj S, *et al.* Community survey of ammonia-oxidizing bacteria in full-scale activated sludge processes with different solids retention time [J]. Journal of Applied Microbiology, 2005, **99**(3): 629-640.
- [6] Siripong S, Rittmann B E. Diversity study of nitrifying bacteria in full-scale municipal wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2007, **41**(5): 1110-1120.
- [7] Könneke M, Bernhard A E, de la Torre J R, *et al.* Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon [J]. Nature, 2005, **437**(7058): 543-546.
- [8] Park H D, Wells G F, Bae H, *et al.* Occurrence of ammonia-oxidizing archaea in wastewater treatment plant bioreactors [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, **72**(8): 5643-5647.
- [9] Zhang T, Jin T, Yan Q, *et al.* Occurrence of ammonia-oxidizing archaea in activated sludges of a laboratory scale reactor and two wastewater treatment plants [J]. Journal of Applied Microbiology, 2009, **107**(3): 970-977.
- [10] Limpiyakorn T, Sonthiphand P, Rongsayamanont C, *et al.* Abundance of *amoA* genes of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in activated sludge of full-scale wastewater treatment plants [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(4): 3694-3701.
- [11] Gao J F, Luo X, Wu G X, *et al.* Quantitative analyses of the composition and abundance of ammonia-oxidizing archaea and ammonia-oxidizing bacteria in eight full-scale biological wastewater treatment plants [J]. Bioresource Technology, 2013, **138**: 285-296.
- [12] Zhang Y, Chen L J, Sun R H, *et al.* Ammonia-oxidizing bacteria and archaea in wastewater treatment plant sludge and nearby coastal sediment in an industrial area in China [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, published online: 15 January, 2015, doi: 10.1007/s00253-014-6352-9.
- [13] van Niftrik L A, Fuerst J A, Damsté J S S, *et al.* The anammoxosome: an intracytoplasmic compartment in anammox bacteria [J]. FEMS Microbiology Letters, 2004, **233**(1): 7-13.
- [14] 杨虹, 李道棠, 朱章玉. 全程自养脱氮氨悬浮填料床反应器性能的研究 [J]. 上海环境科学, 2001, **2**(8): 369-371.
- [15] Francis C A, Roberts K J, Beman J M, *et al.* Ubiquity and diversity of ammonia-oxidizing archaea in water columns and sediments of the ocean [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, **102**(41): 14683-14688.
- [16] Kayee P, Sonthiphand P, Rongsayamanont C, *et al.* Archaeal *amoA* genes outnumber bacterial *amoA* genes in municipal wastewater treatment plants in bangkok [J]. Microbial Ecology, 2011, **62**(4): 776-788.
- [17] Schleper C, Jurgens G, Jonuscheit M. Genomic studies of uncultivated archaea [J]. Nature Reviews Microbiology, 2005, **3**(6): 479-488.
- [18] Nicol G W, Schleper C. Ammonia-oxidising Crenarchaeota: important players in the nitrogen cycle? [J]. Trends in Microbiology, 2006, **14**(5): 207-212.
- [19] Pester M, Schleper C, Wagner M. The Thaumarchaeota: an emerging view of their phylogeny and ecophysiology [J]. Current Opinion in Microbiology, 2011, **14**(3): 300-306.
- [20] Pester M, Rattei T, Flechl S, *et al.* *AmoA*-based consensus phylogeny of ammonia-oxidizing archaea and deep sequencing of *amoA* genes from soils of four different geographic regions [J].

- Environmental Microbiology, 2012, **14**(2): 525-539.
- [21] 付昆明, 左早荣, 仇付国. 陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 995-1001.
- [22] 张红陶, 郑平. CANON 工艺研究进展[J]. 工业水处理, 2013, **33**(8): 1-5.
- [23] 郭建华, 彭永臻. 异养硝化、厌氧氨氧化及古菌氨氧化与新的氮循环[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(8): 1489-1498.
- [24] Sonthiphand P, Limpiyakorn T. Change in ammonia-oxidizing microorganisms in enriched nitrifying activated sludge [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, **89**(3): 843-853.
- [25] Ye L, Zhang T. Ammonia-oxidizing bacteria dominates over ammonia-oxidizing archaea in a saline nitrification reactor under low DO and high nitrogen loading [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2011, **108**(11): 2544-2552.
- [26] Gao J F, Luo X, Wu G X, *et al.* Abundance and diversity based on *amoA* genes of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in ten wastewater treatment systems [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, **98**(7): 3339-3354.
- [27] Oishi R, Hirooka K, Otawa K, *et al.* Ammonia-oxidizing Archaea in laboratory-scale activated sludge systems for wastewater of low-or high-ammonium concentration [J]. Animal Science Journal, 2012, **83**(7): 571-576.
- [28] Wuchter C, Abbas B, Coolen M J L, *et al.* Archaeal nitrification in the ocean [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, **103**(33): 12317-12322.
- [29] Park B J, Park S J, Yoon D N, *et al.* Cultivation of autotrophic ammonia-oxidizing archaea from marine sediments in coculture with sulfur-oxidizing bacteria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, **76**(22): 7575-7587.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carries on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFAS	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行