

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

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

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)

2013年1月北京市PM_{2.5}区域来源解析 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)

2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)

上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)

厦门春季PM₁₀中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)

硫氧同位素示踪南京北郊大气PM_{2.5}中硫酸盐来源 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)

结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)

春季华东高山背景区域PM_{2.5}和PM_{2.5-10}中水溶性无机离子特征 苏彬彬,张智胜,陶俊,许榕洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)

四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)

深圳市船舶排放清单与时空特征研究 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)

空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)

黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 张永领,王明仕,董玉龙(1249)

调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)

降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 钟惠舟,韦朝海(1277)

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)

三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖(1301)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)

河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)

γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)

电化学氢化物发生法处理含镉废水及对镉的回收 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)

Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)

308 nm光作用下α-Fe₂O₃表面HNO₃的光解 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)

L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)

酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)

枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)

嗜咪降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 李静,李文英(1385)

Fe³⁺对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N₂O释放的影响 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)

利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)

进水渗滤液总氮和BOD₅/TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)

重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)

湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)

施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)

不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)

陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)

玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)

硼钨交互作用对水稻吸收积累镉和硼的影响 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)

丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)

工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)

《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究

赵志瑞^{1,2,3}, 焦海华⁴, 崔丙健³, 黄迪¹, 曹世超¹, 王云¹, 刘上千¹, 马斌⁵, 白志辉^{3*}

(1. 石家庄经济学院水资源与环境学院, 石家庄 050031; 2. 河北省水资源可持续利用与开发重点实验室, 石家庄 050031; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 4. 长治学院生物科学与技术系, 长治 046011; 5. 北京工业大学市政环境工程学院, 北京 100124)

摘要: 在内循环半短程亚硝化工艺中, 污泥浓度为 $4\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、溶解氧小于 $0.2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、温度 ($15\sim 29\text{ }^\circ\text{C}$)、水力停留时间 $4.6\ \text{h}$ 条件下, 不同的回流比对系统中微生物群落有着明显的影响, 回流比 75% 时, 微生物的生物量达到最高值, 出水中的亚硝态氮和氨氮的浓度比可控制在 1. 定量 PCR 和 16S rRNA 基因的克隆文库结果表明: 在低溶解氧浓度下氨氧化菌是主要脱氮菌群, 该菌群促进了半短程亚硝化反应的进行, 与传统的硝化系统比较, 在内循环半短程亚硝化工艺中没有检测到硝化螺旋菌 (*Nitospira*) 和硝化杆菌 (*Nitrobacter*), 在内循环半短程亚硝化系统中浮霉菌属 (*Planctomycetes*) 的量也高于传统的脱氮系统. 氨单加氧酶基因克隆文库结果表明, 系统中的氨氧化菌群主要属于亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*). 因此内循环半短程亚硝化工艺在经济和技术上是可行的.

关键词: 半短程亚硝化; 氨氧化菌; 定量 PCR; 克隆文库; 氨单加氧酶基因

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1399-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.036

Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System

ZHAO Zhi-ru^{1,2,3}, JIAO Hai-hua⁴, CUI Bing-jian³, HUANG Di¹, CAO Shi-chao¹, WANG Yun¹, LIU Shang-qian¹, MA Bin⁵, BAI Zhi-hui^{3*}

(1. College of Water Resources and Environment, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China; 2. Key Laboratory of Water Resources Sustainable Use and Development of Hebei, Shijiazhuang 050031, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. Department of Biological Sciences and Technology, Changzhi University, Changzhi 046011, China; 5. School of Municipal and Environmental Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In partial nitritation process, the sludge concentration was higher than $4000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, DO was less than $0.2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the temperature of $15\sim 29\text{ }^\circ\text{C}$, the reactor HRT of $4.6\ \text{h}$, and the circulation ratio was 75% , not only the microbial biomass reached the highest value but also the ratio of nitrite to ammonium of the effluent could be controlled at approximate 1.0 by adjusting the dissolved oxygen concentration. A quantitative PCR and the 16S rRNA genes clone library results demonstrated that ammonia-oxidizing bacteria were the dominant among nitrite-oxidizing bacteria at low dissolve oxygen concentration, that the bacteria promoted the running of the partial nitritation. Compared with conventional nitrification systems, in partial nitritation process, *Nitrobacter* and *Nitospira* could not be detected among the system, and abundance of *Planctomycetes* was higher in partial nitritation process than that of conventional nitrification systems. Phylogenetic analysis of bacterial *amoA* gene sequences suggested that ammonia-oxidizing bacteria of the partial nitritation system was dominated by *Nitrosomonas* sequences, so partial nitritation is to be feasible technically and economically.

Key words: partial nitritation; ammonia-oxidizing bacteria; quantitative PCR; clone library; *amoA* gene

我国水环境中氮的污染十分严重, 传统的生物脱氮技术, 以硝化 (自养菌) 和反硝化 (异养菌) 为基础, 硝化菌以 O_2 为最终电子受体将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 氧化为硝酸盐, 反硝化菌以有机物为电子供体将硝酸盐还原为 N_2 , 从而最终实现污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的脱除^[1]. 传统生物脱氮工艺, 存在供氧动力消耗大, 需投加有机碳源, 产生大量剩余污泥和温室气体 (CO_2) 等先天性不足. 近年来开发了大量新型工艺, 以 CANON 工艺为代表的短程硝化-反硝化工艺^[2], 是在生物膜或单个反应器内通过控制较低 DO 浓度来实现短程硝

化和 ANAMMOX, 从而达到脱氮的目的^[3,4], 其主要缺点是单级反应器所能达到的全程自养脱氮效率较低; 工艺运行的稳定性差^[5,6]. 新工艺都力求缩短“氮”的转化途径和过程, 即将亚硝酸盐氧化菌 NOB 从反应器中淘洗掉, 同时将 AOB 有效保留在反应器

收稿日期: 2014-06-24; 修订日期: 2014-11-28

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-09-3); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07203-006); 水利部公益性行业科研专项 (201401078)

作者简介: 赵志瑞 (1975~), 女, 博士, 主要研究方向为水处理及环境微生物, E-mail: zhiruizh@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhbai@cees.ac.cn

中^[7,8],把氨氮氧化为亚硝酸盐,而不再继续被氧化为硝酸盐^[9,10].

亚硝酸盐(NO_2^- -N)是 ANAMMOX 工艺运行的必需基质之一^[11,12],ANAMMOX 反应是一个以 NO_2^- -N 为电子受体和以 NH_4^+ -N 为电子供体的生物反应,该反应不但需要氨,还需亚硝酸盐^[13,14].若单独添加亚硝酸盐,将会使运行成本成倍增加^[15,16],因此,氨的亚硝化(半短程硝化)工艺就成为了 ANAMMOX 过程的合适前处理工艺^[17,18].半短程硝化理论上比全程硝化要减少 60% 硝化需氧量、50% 污泥产量和反应器容积、40% 反硝化碳源^[19].然而大部分研究都局限于高 NH_4^+ -N 废水水质条件,通过对单一因素或者多个因素(温度 pH 值等)协同的控制,可以较容易地实现亚硝态氮累积^[20,21].但对于低 NH_4^+ -N 废水,在常温连续流中实现亚硝态氮累积并稳定维持的报道较少,而考察该反应中微生物群落的结构变化和 AOB 与 NOB 动态变化研究更鲜有报导.

为了促进半亚硝化短程反应的顺利进行,对系统中硝化细菌的分析和研究是重要的^[22,23].过去通过传统的技术对 AOB 和 NOB 研究是非常困难的,而且容易对环境中的微生物造成错误的估算,近年来发展起来的不依靠培养的分子生物学和生态学技术为精确研究环境样品中微生物的变化提供了可

能.为了获得半亚硝化短程工艺的稳定运行,深入研究脱氮菌群是非常必要的,以为城市污水处理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置和样品

半短程亚硝化反应器有效容积为 24 L,由有机玻璃做成被等分为 6 个格室(如图 1),每个隔室装有套筒,套筒内曝气是好氧环境,外部是厌氧环境.反应器接种 20 L 高氨氮废水的短程硝化污泥,接种后反应器内悬浮固体浓度(MLSS)约为 $4\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.半亚硝化反应器实验原水采用城市污水 A/O 除磷工艺的出水,具体水质指标如表 1 所示.

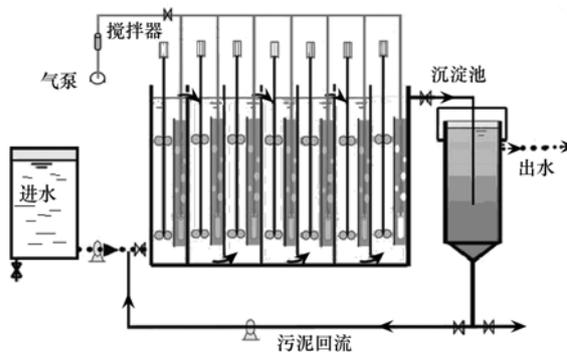


图 1 半短程亚硝化工艺流程示意

Fig. 1 Schematic drawing of partial nitritation process

表 1 原水水质

Table 1 Characteristics of raw wastewater

指标	pH	COD /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	NH_4^+ -N /mg·L ⁻¹	NO_2^- -N /mg·L ⁻¹	NO_3^- -N /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹
范围	7.5~8.0	23.4~92.8	45.6~60.7	43.0~54.7	0~0.1	0.1~1.4	0.12~0.82

1.2 样品收集

半亚硝化反应器在室温下运行,控制反应器各格室中曝气筒外 $\text{DO} < 0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,不排泥.实验稳定运行历时 4 个月,每月考察一个回流比,共分为 4 个不同回流比,回流比从 25% 依次增加 50%,75% 最后至 100%.实验中采集了不同回流比稳定运行状态下的活性污泥.

1.3 实验方法

1.3.1 DNA 提取与聚合酶链式反应(PCR)

样品总 RNA 提取采用活性污泥提取试剂盒,依照说明进行 RNA 的提取(Omega, USA).取 0.5 g 活性污泥样品,提取 RNA 的浓度为 $90\text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$.提取到的 RNA 使用细菌 16S rRNA 通用引物,上游引物 27f,下游引物 1492r 进行 PCR 扩增^[24].PCR 扩

增总体积为 $50\ \mu\text{L}$:引物 27f/1492r(浓度为 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)各 $1\ \mu\text{L}$,dNTPs($2.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) $4\ \mu\text{L}$, $10\times\text{ buffer } 5\ \mu\text{L}$,Taq 酶(2.5 u) $0.5\ \mu\text{L}$,RNA 模板 $0.5\ \mu\text{L}$,灭菌的超纯水补足至 $50\ \mu\text{L}$.反应条件为,预变性 $94^\circ\text{C } 5\text{ min}$, $94^\circ\text{C } 1\text{ min}$, $55^\circ\text{C } 1\text{ min}$, $72^\circ\text{C } 1\text{ min}$,30 个循环; 72°C 延伸 10 min;最后 4°C 保存.

1.3.2 荧光定量分析

实验采用 SYBR Green 染料法,采用 AOB (Eub338/Nso1225)^[25]与 NOB 特异性引物(NSR1113/FNSR 1264R)^[29]扩增 16S rRNA 基因片段,构建标准质粒,抽提,经测量计算样品浓度的数值,结果 AOB 的拷贝数为 5.9×10^{11} ,NOB 的拷贝数为 3.61×10^{10} .把两种质粒 DNA 作为定量的标准品,将标准品稀释成不同浓度的样品,并作为模板用

Real Master Mix (SYBR Green, TIANGEN) 体系进行 PCR 反应, 仪器为 Mx3000P 荧光定量 PCR 仪 (Genetimes 公司). 25 μL 反应体系中含 2 μL 待测样品和质粒标准品 DNA, 正向引物和反向引物各 0.5 μL ($10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), 9 μL 2.5 \times Master Mix, 每个样品 3 个平行实验. 以标准品拷贝数的对数值为横坐标, 以测得的 C_t 值为纵坐标, 绘制标准曲线. 对系统中的 AOB 与 NOB 进行定量.

1.3.3 克隆文库的构建

使用 Omega 琼脂糖胶 RNA 回收试剂盒将 PCR 产物切胶纯化, 根据载体说明书将纯化后的 PCR 产物与 pGEM-T easy vector (Promega, USA) 进行连接. 连接体系为 pGEM-T easy vector ($50 \text{ ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$) 1 μL , 2 \times Rapid Ligation Buffer 5 μL , PCR 产物 4 μL 混匀, 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中过夜. 转入大肠杆菌 *DH5 α* (Tiangen), 放入摇床 37 $^{\circ}\text{C}$ 培养 3 h, 取培养后的菌液 150 μL 涂布在含青霉素 (AMP) 抗生素以及表面涂布有 IPTG 和 X-Gal 的 LB 平板上, 37 $^{\circ}\text{C}$ 培养 12 h 后, 挑取一定数量的带有插入片段的白色克隆构建克隆文库. 挑选 250 个鉴定为阳性克隆的克隆子再用 T7/SP6 进行 PCR 扩增, 扩增产物用限制性内切酶 *HhaI* (Promega, USA) 和 *RsaI* (Promega, USA) 进行分型, 以获得 OTU 分型, 将酶切图谱一致的克隆子分为一个 OTU, 每个酶切类型挑取 1~2 个代表菌株进行测序 (北京博迈德生物技术有限公司). 同时按照上述步骤, 上述样品进行氨单加氧酶基因克隆文库分析, 上游引物为 AmoA-1F: 5'-GGGG TTT CTAC TGG TGGT-3' PCR, 下游引物为 Amia-2R: 5'-CCCC TCK GS AAA GCC TTC TTC, 产物经连接、转化后挑取 102 个克隆子全部进行测序. 用 Bioedit 对所有测序结果进行编辑, 序列在 GenBank 中同源性检索后下载同源性序列构建系统发育树, 采用 clustalx1.83 进行比对, 用 Bootstrap N-J tree 重复 1000 次构建系统进化树, 系统发育树的绘制使用 MEGA 4.1 的软件完成.

2 分析与讨论

2.1 实时定量 PCR 结果

从图 2 可看出, AOB 和 NOB 的量在回流比 25% 和 75% 时, 它们的量相差不多, 而在回流比 50% 时 AOB 和 NOB 的量相差一个数量级, 但在回流比 75% 时, AOB 和 NOB 的量相差 3 个数量级, 而在 100% 时和 25% 时结果相似. 因此本研究选择回流比 75% 的样品构建克隆文库, 以进一步研究微生

物群落和脱氮菌群的变化.

2.2 16S rRNA 基因克隆文库结果

克隆文库中每个 OUT 所含的克隆子数, 去嵌合体后, 共得到 31 个 OTU, 通过稀有度曲线检测, 检测结果如图 3.

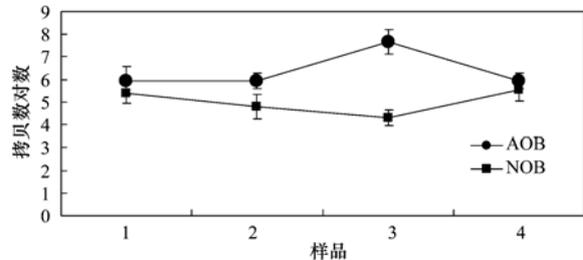
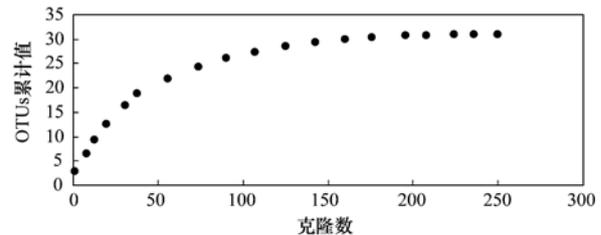


图 2 内循环反应器中 AOB 和 NOB 的 16S rRNA 基因在每毫升废水中拷贝数的对数

Fig. 2 AOB and NOB log numbers of 16S rRNA gene copies per milliliter wastewater



用 Rarefactwin Version 1.3. 软件绘制, 代表了 99% 的置信度

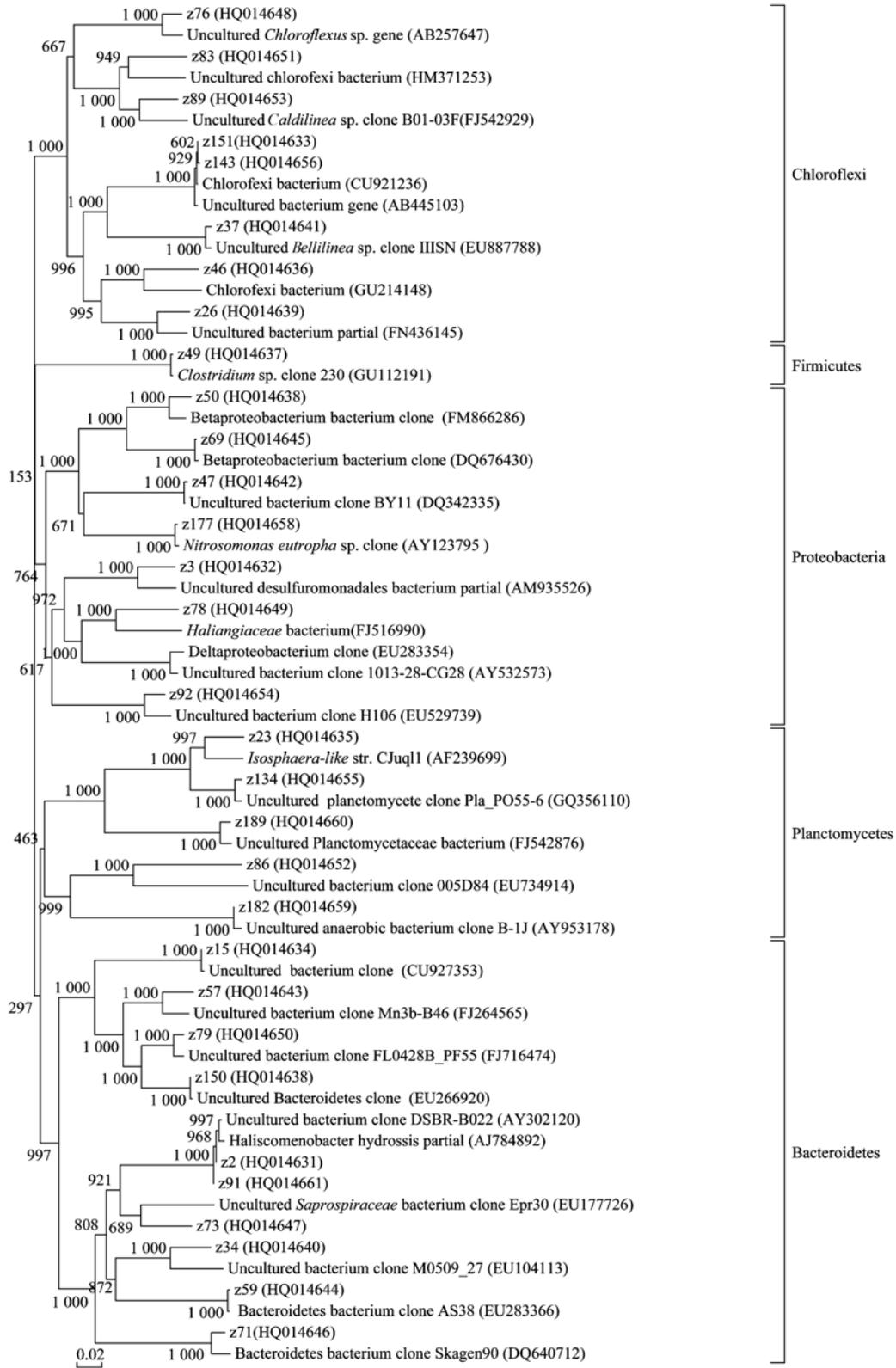
图 3 16S rRNA 基因克隆子稀有度曲线

Fig. 3 Rarefaction analysis of 16S rRNA gene clones

从图 3 可以看出, 稀有度曲线趋向饱和, 说明克隆文库中 250 个克隆子能很好地反映系统中 16S rRNA 基因的变化, 序列分析显示, 文库中 38.7% 的克隆子有很低的相似性 ($< 97\%$), 说明系统中存在很多新的菌群. GenBank 登录号: HQ01463 ~ HQ014661.

内循环半短程亚硝化系统中硝化细菌系统发育分析显示, 共计 250 个克隆子, 31 个 OTUs. 从图 4 可以看出, 所有 OTU 分别属于细菌域的 5 个主要类群, 主要是变性菌门 (Proteobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、厚壁菌门 (Firmicutes)、浮霉菌门 (Planctomycetes). Proteobacteria 类群又可分为 β -变形菌纲、 δ -变形菌纲. β 变性菌门 (β -Proteobacteria) 是主要的脱氮菌群, 而 AOB 是这个菌群中最主要的菌群, 在好氧氨氧化过程中起着主要的作用, OTUs z47、z50、z69、z177 被发现属于这个菌群, 研究认为, 在脱氮废水处理中 *Nitrosomonas* 是主要的氨氧化菌群. 在本研究中 AOB 与 *Nitrosomonas* 也有很高的相似率, 同时

系统中出现了浮霉菌属 (*Planctomycetes*), 包括 OTUs z23、z134、z189、z86、z182, 因此可以看出浮霉菌门在内循环脱氮系统中也占相当的比例. 厌氧氨氧化菌 (anaerobic-ammonium oxidation



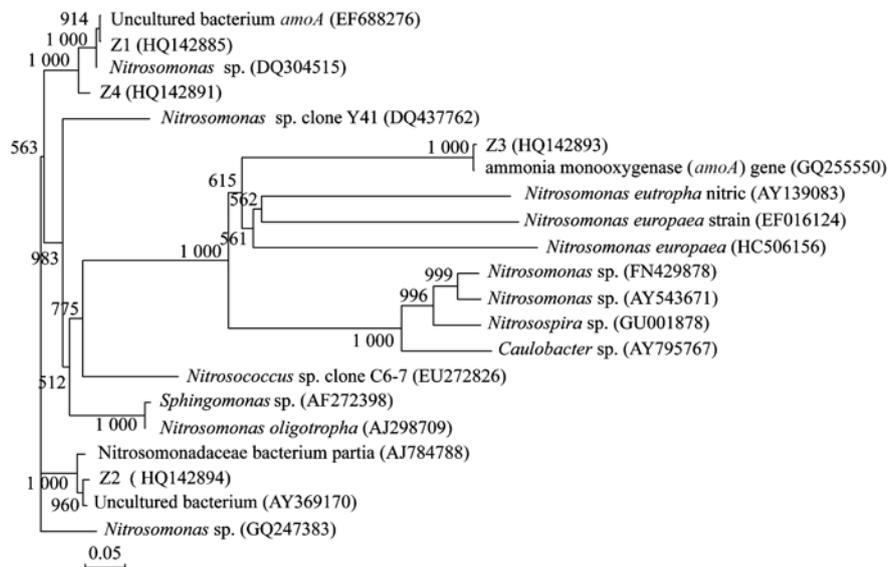
基于 1 000 个重复计算

图 4 半短程硝化系统中细菌 16S rRNA 基因系统发育树

Fig. 4 Neighbour-joining analysis showing phylogenetic relationships of 16S rRNA gene sequences from the partial nitritation system clone library to sequences in other related organisms

bacteria) 属于浮霉菌门,其可以利用亚硝态氮(NO_2^- -N)氧化氨态氮(NH_4^+ -N)生成氮气(N_2),在氧化过程中获得能量,厌氧氨氧化菌在低溶解氧和长的水力停留时间状态下可以和氨氧化菌共存. NOB 是氧化亚硝态到硝态氮的主要菌群,它的活性通过降低氧的浓度可以受到抑制,在本系统中未被检测到. 熟悉了每种菌群的工作机制,能更加提高半亚硝化短程反应器的运行效果. 各个 OUT 的系统发育位置如图 4.

2.3 氨单加氧酶基因克隆文库分析



1 000 个重复计算

图 5 半亚硝化短程系统中细菌 *amoA* 基因的系统发育树

Fig. 5 Neighbour-joining analysis showing phylogenetic relationships of clone library *amoA* in the partial nitrification system sequences to other related organisms

3 讨论

在半亚硝化短程系统中,一半的氨氮被 AOB 转化到亚硝态氮,使得氨态氮与亚硝态氮的比值大致为 1,然后进入下一级的厌氧氨氧化反应器,研究中通过控制恰当的回流比和溶解氧来控制微生物群落结构. 16S rRNA 位于核糖体小亚基上,大约 1 500 bp 即包括可变区也包括恒定区,所以具有高度保守性,也具有可变性,携带信息量大,用于种属的定量更加准确. 定量结果表明随着回流比增加, AOB 的量逐渐增加;但是,当回流比达到 100% 时, AOB 的量反而降低. 通过这个结果可以假设,在回流比达到 100% 反应器出现了其它反应时(可能出现了一些厌氧反硝化菌,该菌不利于半亚硝化短程反应的进行),在回流比为 75% 时, NOB 的量达到最低. 可能由于在半亚硝化短程系统中,溶解氧的浓

度非常低, AOB 的溶解氧的半饱和系数(溶解氧的半饱和系数代表了和氧的亲合程度)是 $16 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,而 NOB 的溶解氧的半饱和系数是 $62 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,因此导致 NOB 的量变化更加明显. 通过上面分析可以得出,在半亚硝化短程系统中把溶解氧控制在 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,该工况 AOB 的增长比 NOB 更加有利,另外由于对 AOB 的有利条件,使得 AOB 的细胞生长得更大和强壮,在竞争有限能量的条件下比 NOB 增长速度更加迅速,细胞也更强壮. 因此在该系统中亚硝态氮更加容易积累,而 NOB 也容易洗出系统.

在先前研究的传统城市污水 A/O 硝化系统中 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 都存在^[27],且所占比例较高. *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 都是革兰氏阴性菌,主要是把亚硝态氮氧化为硝态氮,可以通过控制溶解氧来限制它们的生长. *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 是两

种不同的 NOB, 它们分别在不同的条件下快速增长. 在 NO_2^- 浓度较高的条件下 *Nitrobacter* 是主要的 NOB, 而当 NO_2^- 浓度较低时 *Nitrospira* 是主要的 NOB^[28]. 但在一些条件下这两种菌群可以共存, 研究还发现 *Nitrobacter* 有独特的异养能力, 而 *Nitrospira* 在异养条件下不能增长^[29]. 在本研究中, 在半亚硝化短程系统中没有 NOB 被发现, 可能由于高的 NO_2^- 累积率和 AOB 的高增长率, NOB 已经从系统中被洗脱出去. 半亚硝化短程系统中出现的浮霉菌属可能在半亚硝化短程系统中发生了厌氧氨氧化反应, 这主要是由于较低的溶解氧浓度和系统中亚硝态氮和氨态氮同时共存, 这些可以作为厌氧氨氧化菌反应的基质, 因此半亚硝化反应器更适合与厌氧氨氧化反应器联用.

16S rRNA 基因和 *amoA* 基因的克隆文库对 AOB 的特征在基因水平上提供了更加细致的研究, 而且可以通过 *amoA* 基因更加深入地研究 AOB 的 16S rRNA 基因, 可以作为研究 AOB 多样性的分子尺. *amoA* 基因系统发育分析表明, 半亚硝化系统中主要的 AOB 是 *Nitrosomonas* 菌属. 在本研究中主要的 *Nitrosomonas* 是 OTUs Z1 (67 clones). 序列分析显示和 *Nitrosomonas* sp. (DQ304515) 亲缘关系最近, 而另一类亚硝化细菌 *Nitrospira* sp. 没有被发现 (如图 5), 该菌可能已经被逐渐从系统中洗脱出去, 同时证明 *Nitrosomonas* 在低溶解氧中比 *Nitrospira* 增长迅速, 本研究中出现的序列与以前的研究相似性很高. *Nitrosococcus oceani* 和 *Nitrosococcus halophilus* 在 AOB 的系统发育树中没有被发现. 因此这些发现也证明 *Nitrosomonas* sp. 在半亚硝化短程系统中是最主要的 AOB 菌群.

4 结论

(1) 传统的 A/O 工艺需要较高的溶解氧来完成全程硝化, 而新工艺需氧率较低因此节省了需氧量, 即节约了曝气所需费用. 当溶解氧小于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 回流比为 75% 时, 系统的出水氨态氮和亚硝态氮的比率几乎为 1, 更有利于与厌氧氨氧化反应器联用.

(2) 在半短程硝化系统中的主要 AOB 菌群是 *Nitrosomonas* sp., *Nitrospira* sp. 没有被发现, NOB 已经被从系统中洗脱出去, 提高了亚硝态氮的累计效率.

参考文献:

[1] 葛士建, 王淑莹, 杨岸明, 等. 反硝化过程中亚硝酸盐积累

特性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, **33**(1): 140-146.

- [2] 赵志瑞, 侯彦林. 半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2834-2842.
- [3] Moussavi G, Khavanin A, Sharifi A. Ammonia removal from a waste air stream using a biotrickling filter packed with polyurethane foam through the SND process [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(3): 2517-2522.
- [4] Rahimi Y, Torabian A, Mehrdadi N, et al. Simultaneous nitrification-denitrification and phosphorus removal in a fixed bed sequencing batch reactor (FBSBR) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **185**(2-3): 852-857.
- [5] Walters E, Hille A, He M, et al. Simultaneous nitrification denitrification in a biofilm airlift suspension (BAS) reactor with biodegradable carrier material [J]. *Water Research*, 2009, **43**(18): 4461-4468.
- [6] Wu C Y, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Effect of sludge retention time on nitrite accumulation in real-time control biological nitrogen removal sequencing batch reactor [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2011, **19**(3): 512-517.
- [7] Hao Y J, Wu W S, Wu W X, et al. Research progress on the microbial ecology of aerobic ammonia-oxidizing bacteria [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(3): 1573-1582.
- [8] Xia W W, Zhang C X, Zeng X W, et al. Autotrophic growth of nitrifying community in an agricultural soil [J]. *The International Society for Microbial Ecology Journal*, 2011, **5**(7): 1226-1236.
- [9] Zeng W, Li L, Yang Y Y, et al. Nitrification and denitrification of domestic wastewater using a continuous anaerobic-anoxic-aerobic (A^2O) process at ambient temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(21): 8074-8082.
- [10] Ma Y, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Achieving nitrogen removal via nitrite in a Pilot-scale continuous Pre-denitrification plant [J]. *Water Research*, 2009, **43**(3): 563-572.
- [11] 刘冬英, 邱艳玲, 袁宪正, 等. 厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3208-3213.
- [12] 徐少阳, 蒋进元, 周岳溪, 等. 三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3172-3176.
- [13] Jaroszynski L W, Oleszkiewicz J A. Autotrophic ammonium removal from reject water: partial nitrification and anammox in one-reactor versus two-reactor systems [J]. *Environmental Technology*, 2011, **32**(3-4): 289-294.
- [14] Van Hulle S W H, Vandeweyer H J P, Meesschaert B D, et al. Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **162**(1): 1-20.
- [15] Siegrist H, Salzgeber D, Eugster J, et al. Anammox Brings wwtP closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal [J]. *Water Science and Technology*, 2008, **57**(3): 383-388.

- [16] Ma B, Zhang S J, Wang J M, *et al.* Bio-augmentation for achieving stable nitrification in a continuous anoxic/aerobic reactor treating sewage[A]. In: Cities of the Future Xi'an; Technologies for Integrated Urban Water Management" (CoF-XIAN2011) [C]. Xi'an, China, 2011. 15-19.
- [17] De Clippeleir H, Yan X G, Verstraete W, *et al.* 2011. OLAND is feasible to treat sewage-like nitrogen concentrations at low hydraulic residence times [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **90**(4):1537-1545.
- [18] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 135-144.
- [19] Ciudad G, Rubilar O, Munoz P, *et al.* Partial nitrification of high ammonia concentration wastewater as a part of a shortcut biological nitrogen removal process [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(5): 1715-1719.
- [20] Kim J H, Guo X J, Park H S. Comparison study of the effects of temperature and free ammonia concentration on nitrification and nitrite accumulation [J]. *Process Biochemistry*, 2008, **43**(2): 154-160.
- [21] Takehiko S, Sen Q, Taichi Y, *et al.* Partial nitrification treatment of underground brine waste with high ammonium and salt content [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2009, **108**(4): 330-335.
- [22] Perez J, Costa E, Kreft J U. Conditions for partial nitrification in biofilm reactors and a kinetic explanation [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, **103**(2): 282-295.
- [23] Kornaros M, Dokianakis S N, Lyberatos G. Partial nitrification/denitrification can be attributed to the slow response of nitrite oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(19): 7245-7253.
- [24] Gu L K, Bai Z H, Jin B, *et al.* Assessing the impact of fungicide enostroburin application on bacterial community in wheat phyllosphere [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(1): 134-141.
- [25] Li H M, Cheng L, Wang B L, *et al.* RFLP analysis of ammonia oxidizing bacteria diversity in paddy soil [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2011, **20**(5): 111-116.
- [26] Geets J, de Cooman M, Wittebolle L, *et al.* Real-time PCR assay for the simultaneous quantification of nitrifying and denitrifying bacteria in activated sludge [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **75**(1): 211-221.
- [27] 赵志瑞, 马斌, 张树军, 等. 高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1448-1456.
- [28] Noguera R, Melo L, Purkhold U, *et al.* Nitrifying and heterotrophic population dynamics in biofilm reactors: effects of hydraulic retention time and the presence of organic carbon [J]. *Water Research*, 2002, **36**(2): 469-481.
- [29] Knapp C W, Graham D W. Nitrite-oxidizing bacteria guild ecology associated with nitrification failure in a continuous-flow reactor [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, **62**(2): 195-201.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 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