

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦(4069)

浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇(4080)

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 闫雨龙,彭林(4086)

某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文(4094)

加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇(4103)

北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 崔彤,李金香,杨妍研,程刚(4110)

西安市人为源大气氨排放清单及特征 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟(4117)

佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华(4124)

天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧(4133)

戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪(4142)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华(4147)

玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武(4156)

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎春,王圣瑞,张文丽,肖尚斌(4162)

典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征:基于沿岸生态系统分析 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强(4168)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕(4179)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超(4187)

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥(4194)

多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇(4203)

丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏(4212)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 岳冬梅,李洁,肖琳(4220)

氯灭活地下水源中3种优势真菌的效能与机制 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前(4228)

净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧(4235)

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒(4241)

三维有序介孔 Co₃O₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖(4247)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4255)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N₂O 释放的影响 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田(4261)

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强(4268)

基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京(4275)

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良(4282)

中温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 袁砚,朱亮(4289)

生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉(4296)

ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程(4302)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军(4309)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明(4317)

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨(4326)

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 苗迎,孔祥胜(4333)

杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳(4341)

应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 王佳怡,毕二平(4349)

表流湿地细菌群落结构特征 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞(4357)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪(4366)

DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵(4372)

培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强(4380)

1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿(4389)

北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明(4395)

梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强(4402)

几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平(4410)

添加复合吸附剂对土壤吸附非和 Cr(VI) 的影响 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽(4419)

生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英(4428)

集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成(4437)

秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽(4446)

《环境科学》征稿简则(4161) 《环境科学》征订启事(4365) 信息(4123,4132,4409)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析

于莉芳, 杜倩倩, 傅学焘, 张茹, 李文江, 彭党聪

(西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要: 对西安市第二和第三污水处理厂进水中硝化菌群落结构与性能进行调查分析。荧光原位杂交结果发现, 进水中氨氧化菌(AOB)优势菌为 *Nitrosomonas europaea*/*Nitrosococcus mobilis* lineage; 亚硝酸盐氧化菌(NO₂-OB)的优势菌均为 *Nitrospira*, 次优势菌为 *Nitrobacter*, 且与 *Nitrococcus*、*Nitrospina* 并存。二污及三污进水中硝化菌个数占总细菌数(AOB + NOB)/EUB 的平均个数百分比分别为(5.35 ± 2.1)% 和(6.0 ± 2.8)%; 在曝气 2 ~ 16h 后, 活性基本恢复, 最大氨氧化速率分别为(0.32 ± 0.12) mg·(L·h)⁻¹ 和(0.43 ± 0.17) mg·(L·h)⁻¹, 亚硝酸盐氧化速率为(0.71 ± 0.18) mg·(L·h)⁻¹ 和(0.58 ± 0.27) mg·(L·h)⁻¹。因此, 城市污水中含有活性硝化菌, 对活性污泥系统有自然的连续接种作用, 根据进水及活性污泥中硝化活性可以估算出城市污水中 AOB 与 NOB 对活性污泥的连续接种强度分别为 0.08 ~ 0.09 g·(g·d)⁻¹ 和 0.11 ~ 0.24 g·(g·d)⁻¹。

关键词: 城市污水; 硝化菌; 群落结构; 硝化性能; 连续接种

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4366-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605026

Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants

YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, ZHANG Ru, LI Wen-jiang, PENG Dang-cong

(Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The communities and activity of nitrifiers collected from the raw sewage of the 2nd and 3rd wastewater treatment plants (WWTP) in Xi'an were investigated. FISH results indicated that the (AOB + NOB)/EUB percentages were (5.35 ± 2.1)% and (6.0 ± 2.8)% in the 2nd and 3rd WWTP, respectively. The dominant AOB was *Nitrosomonas europaea*/*Nitrosococcus mobilis* lineage and the dominant NOB was *Nitrospira*, the sub-dominant NOB was *Nitrobacter*, and coexisted with *Nitrococcus*, *Nitrospina*. Respirometric assays showed that the influent nitrifiers were active following a 2-16 hour period of metabolic induction. The ammonium utilized rate was (0.32 ± 0.12) mg·(L·h)⁻¹ and (0.43 ± 0.17) mg·(L·h)⁻¹, nitrite utilized rate was (0.71 ± 0.18) mg·(L·h)⁻¹ and (0.58 ± 0.27) mg·(L·h)⁻¹ for nitrifiers in raw sewage fed to the 2nd and 3rd WWTP, respectively. Therefore, nitrifiers were present and active in the raw sewage, and played the role of natural continuous seeding in the activated sludge system. Based on the nitrification activity, the estimated continuous seeding intensity of AOB and NOB was 0.08-0.09 g·(g·d)⁻¹ and 0.11-0.24 g·(g·d)⁻¹, respectively.

Key words: raw sewage; nitrobacteria; community structure; nitrification performance; continuous seeding

城市污水从用水设施排出时, 自身是不含或者仅含有极少量的硝化菌。但是, 城市排水管道内表面、管底沉积物和污水中存在着大量高活性的微生物^[1,2]。城市污水从排放口, 经过排水管道、明渠等下水管网长达数小时甚至十几小时的输送, 到达污水处理厂时, 往往会由于管渠壁上生物膜的脱落等原因可能会含有一定量的硝化菌。这也是在城市污水处理厂的启动时, 采用传统的自然培养方法或利用初沉污泥以进行快速自然培养可以达到良好的硝化效果的原因^[3]。Brion 等^[4,5]在对法国塞纳河的相关调查中证实城镇排水对巴黎下游河流具有重要的硝化菌接种作用。Jauffur 等^[6]运用 PCR 和 Roche 454 (GS FLX Titanium System) 超高通量测序技术对加拿大魁北克省蒙特利尔市附近的 3 个污水厂的进

水及活性污泥中硝化菌群落结构进行调查分析, 发现活性污泥中的硝化菌多样性低于进水中硝化菌多样性, 而且 78% 的 AOB 和 86% 的 NOB 一致。Saunders 等^[7]对 Denmark 的 3 个污水厂的进水与活性污泥进行微生物群落多样性测序分析发现, 活性污泥中有 35% OTUs (62% reads) 存在于进水中。但是 Lee 等^[8]利用 16S rRNA 基因序列分析法对韩国首尔的 4 个污水厂的进水与活性污泥中微生物进行鉴定, 发现二者仅有 4.3% ~ 9.3% 的 OTUs 一致, 从而认为原水中微生物对活性污泥系统的影响较小。

收稿日期: 2016-05-04; 修订日期: 2016-05-30

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51208414); 陕西省教育厅专项(12JK0650); 西安建筑科技大学校青年基金项目(QN1118)

作者简介: 于莉芳(1981~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为废水生物处理, E-mail: yulifang81@163.com

常用的活性污泥模型 ASM1、ASM2 和 ASM3 都假定进水中的硝化菌(自养菌 X_A)含量也是设定为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并假定相对过程中生成的微生物量,进水中微生物质量浓度可以忽略^[9].而目前许多有关硝化菌的研究集中在生化系统内,对于城市污水自身带入系统的硝化菌很少涉及,而要了解这部分硝化菌对污水处理厂活性污泥系统的影响,就需要明确以下 3 个问题:①城市污水中是否含有活性污泥中硝化菌的优势菌属?②这部分硝化菌是否具有硝化活性?③如果城市污水与活性污泥中硝化菌一致,而且具有硝化活性,那么这部分硝化菌对活性污泥系统将有着连续自然接种的作用,而城市污水处理厂进水带入的这部分硝化菌对活性污泥系统的连续接种强度有多少?

本研究利用荧光原位杂交技术等方法对西安市两个已运行多年的大型污水处理厂(西安市第二、第三污水处理厂)进水中的硝化菌群落结构与硝化性能进行初步调查分析,并通过硝化活性估算进水中硝化菌对活性污泥系统的连续接种强度,以期为活性污泥模型的优化及城市污水处理系统的设计与运行提供理论依据.

1 材料与方 法

1.1 实验样品

西安市第二污水处理厂(二污)、西安市第三污水处理厂(三污)样品取自曝气沉砂池出水,取样间隔为一至两周,连续调查 4 个月.

西安市第二污水处理厂主要服务南二环路以南到南三环路之间和曲江池以西的区域,服务面积为 53.5 km^2 ,自运行以来,污水厂一期自运行以来的日处理能力为 $10 \times 10^4 \sim 13 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$;西安市第三

污水处理厂主要服务纺织城地区,一期日污水处理能力约 $10 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,其中工业污水、生活污水量大约各占一半,服务面积为 25.09 km^2 .两个污水厂进水为典型的城市污水.

1.2 荧光原位杂交

样品用 $1 \times \text{PBS}$ 缓冲溶液洗涤 3 次,然后用 4% 的多聚甲醛固定 2 h,再用 $1 \times \text{PBS}$ 缓冲溶液洗涤 3 次^[10].实验中采用的探针序列及杂交条件见表 1,其中氨氧化细菌采用 CY3 标记,亚硝酸盐氧化细菌采用 CY5 标记,Comp Ntspa662、Comp NIT3 无荧光标记,EUB 采用 FITC 标记.按照杂交缓冲液中甲酰胺浓度由低到高的顺序进行杂交^[11].

样品杂交后用封片剂封片,并在共聚焦显微镜(Leica TCS SP8 X, Leica Microsystems, Mannheim, Germany)下观察.每个样品随机取 10~20 个视野,最终结果采用 Leica Microsystems LAS AF-TCS SP8 软件分析.

实验中以 NSO1225 探针杂交的细菌数量表示氨氧化细菌(AOB)总数量,亚硝酸盐氧化细菌(NO_B)的总数是以 Ntspa662、NIT3、Ntccoc206 和 Ntspn693 所杂交的细菌数量的总和表示,总细菌数量是以 EUB_{mix}所杂交的细菌数量表示,AOB 和 NO_B 数量各占真细菌比例计算参照张岩等的方法^[13].

1.3 硝化速率测定

5~10 L 水样离心($12\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, Z36HK 离心机,Beckman Coulter Inc., USA)浓缩,离心后的污泥再稀释至 1 000 mL,将温度控制在 20°C ,pH 控制在 7.5.曝气 3~4 h,以去除污泥中少量未淘洗干净的有机物.测定氨氧化速率时,加入叠氮化钠(浓度为 $24 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)以抑制 NO_B 呼吸,测定亚硝酸盐氧化速率时,加入聚丙烯基硫脲(浓度为 86

表 1 荧光原位杂交所用的探针及对应杂交条件^[12]

Table 1 Probes used for FISH and the corresponding hybridization conditions

探针名称	探针序列(5'-3')	专一性	质量分数 ¹⁾ /%
NSO1225	CGC CAT TGT ATT ACG TGT GA	Ammonia oxidizing beta-proteobacteria	35
Nsv443	CCG TGA CCG TTT CGT TCC G	<i>Nitroso-spira</i> , <i>-lobus</i> , <i>-vibrio</i>	30
Nmv	TCC TCA GAG ACT ACG CGG	<i>Nitrosomonas europaea</i> / <i>Nitrosococcus mobiles</i> lineage	35
Ntspa662	GGA ATT CCG CGC TCC TCT	<i>Nitrospira</i>	35
Comp Ntspa662	GGA ATT CCG CTC TCC TCT	Competitor for Ntspa662	—
NIT3	CCT GTG CTC CAT GCT CCG	<i>Nitrobacter</i>	40
Comp NIT3	CCT GTG CTC CAG GCT CCG	Competitor for NIT3	—
Ntccoc206	CGG TGC GAG CTT GCA AGC	<i>Nitrococcus mobilis</i>	10
Ntspn693	TTC CCA ATA TCA ACG CAT T	<i>Nitrospina gracilis</i>	20
EUB338	GCT GCC TCC CGT AGG AGT	Most bacteria	0~40
EUB338 II	GCA GCC ACC CGT AGG TGT	Planctomycetales	0~40
EUB338 III	GCT GCC ACC CGT AGG TGT	Verrucomicrobiles	0~40

1) 杂交缓冲溶液中甲酰胺的质量分数

$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$),前一至两小时测定内源呼吸速率(溶解氧仪,Seven2Go S9, Mettler Toledo),内源呼吸速率(以 N 计)稳定后分别加入 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NH_4Cl 和 NaNO_2 ,测定氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率^[14,15].

2 结果与讨论

2.1 城市污水中硝化菌群落结构

图 1 为城市污水样品的荧光原位杂交照片(绿色为 CY3 标记的 AOB_{mix} ,红色为 Cy5 标记的

NOB_{mix} ,蓝色为 FITC 标记的 EUB_{mix}).采用 Leica Microsystems LAS AF-TCS SP8 软件对杂交照片进行统计分析,二污与三污进水中硝化菌占总细菌数的平均个数百分比 $[(\text{AOB} + \text{NOB})/\text{EUB}_{\text{mix}}]$ 分别为 $(5.35 \pm 2.1)\%$ 和 $(6.0 \pm 2.8)\%$,与硝化正常的二污与三污活性污泥中硝化菌百分含量接近[平均分别为 $(6.6 \pm 1.5)\%$ 和 $(8.4 \pm 3.1)\%$]^[16].这个结果证实了进入生物反应池的城市污水中存在大量的硝化菌.

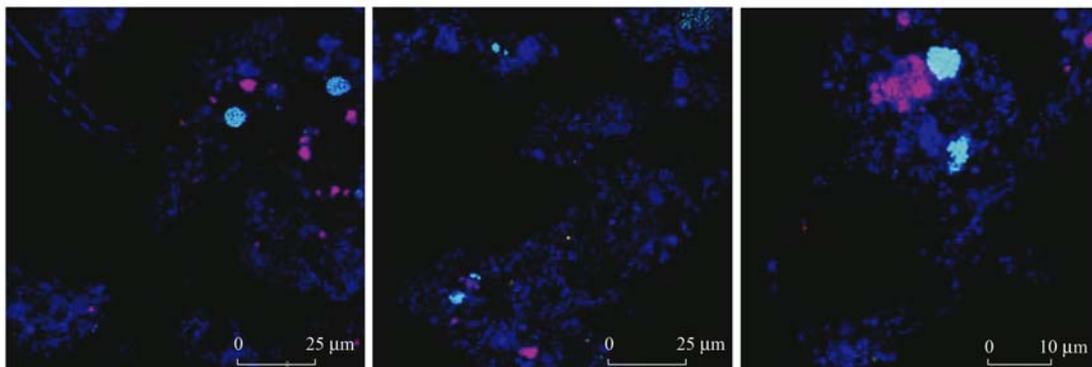


图 1 城市污水样品荧光原位杂交照片

Fig. 1 FISH images of the raw sewage samples

由于城市污水的来源包括工业废水和生活污水,自身一般都不会含有硝化菌,所以这部分硝化菌很有可能是在城市污水管网输送过程中产生,虽然一般认为城市污水处于缺氧或者厌氧状态,但是由于城市污水管网非满流设计、城市污水输送过程中存在跌水甚至明渠等原因,空气中的氧会不断传递至城市污水中,从而为硝化菌的繁殖创造一定的条件,但是城市污水中硝化菌的确切来源有待进一步调查分析. Brion 等^[4,5]发现城市污水中硝化菌的含量与排水管网的服务面积正相关,服务面积越大,硝化菌浓度越高.

图 2 和图 3 分别为两个污水厂进水中 AOB 和 NOB 的硝化菌群落结构分布.从中可以看出,*Nitrosomonas europaea/Nitrosococcus mobilis* lineage 为城市污水中氨氧化菌的优势菌,同时也检测到 *Nitrospira* 的存在,与二污和三污活性污泥中氨氧化菌群落结构接近^[16].以往研究中对城市污水中的硝化菌优势菌属的检测尚未见到,一般都集中在污水处理系统内的活性污泥中,而对活性污泥的检测中,Limpiyakorn 等^[17]发现在城市污水传统活性污泥法处理系统中,*Nitrosomonas europaea/Nitrosococcus mobilis* lineage 为氨氧化菌的优势菌; Siripong 等^[18]对 7 个污水处理厂分别在冬季和夏季进行硝化菌群

落结构调查,发现尽管污水厂在冬季和夏季的温度、污泥龄不同,但是其中氨氧化菌的优势菌均为 *Nitrosomonas europaea/Nitrosococcus mobilis* lineage,冬季 *Nitrospira* 份额略有增加. Wang 等^[19]和曾薇等^[20]对多个污水处理系统中的氨氧化菌群落结构进行分析^[21],也发现氨氧化菌优势菌均为 *Nitrosomonas*.在硝化运行正常的北石桥和第三污水处理厂的进水中氨氧化优势菌与以上诸多研究中的活性污泥的氨氧化优势菌一致,均为 *Nitrosomonas europaea/Nitrosococcus mobilis* lineage.这个结果也可根据 K/r 繁殖策略解释, *Nitrosomonas europaea/Nitrosococcus mobilis* lineage 属于 r-strategists, *Nitrospira* 属于 K-strategists, *Nitrosomonas europaea/Nitrosococcus mobilis* lineage (r-strategists) 在高氨氮浓度条件下更具竞争优势^[22, 23].而调查期间二污与三污城市污水中氨氮平均浓度分别为 $38.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $39.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,因此在城市污水中 *Nitrosomonas europaea* (r-strategists) 与 *Nitrospira* (K-strategists) 相比,更具竞争优势.

由图 3 可以看出,进水中 NOB 的优势菌均为 *Nitrospira*,次优势菌为 *Nitrobacter*,且与 *Nitrococcus*、*Nitrospina* 并存,与二污和三污活性污泥中亚硝酸盐氧化菌群落结构接近^[16]. Jauffur 等^[6]运用 PCR 和

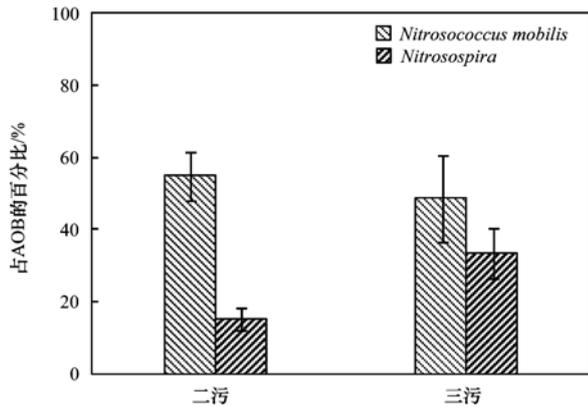


图2 城市污水中 AOB 的种群结构

Fig. 2 AOB community structure in raw sewage

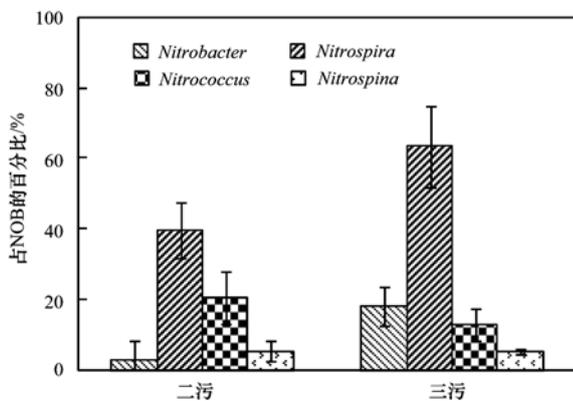


图3 城市污水中 NOB 的种群结构

Fig. 3 NOB community structure in raw sewage

Roche 454(GS FLX Titanium System) 超高通量测序技术对加拿大魁北克省蒙特利尔市附近的 3 个污水厂的进水与活性污泥中的 *Nitrospira* 细菌进行分析, 结果发现城市污水中平均有 99 个细菌分类操作单位(OTUs), 而活性污泥中仅有 83 个细菌分类操作单位(OTUs). 这些结果证实城市污水中存在大量的 *Nitrospira*, 而且其多样性高于活性污泥. 而污水厂活性污泥中 *Nitrospira* 与 *Nitrobacter* 并存, 而且 *Nitrospira* 是活性污泥系统中 NOB 的优势菌属^[18, 20]. 这说明常规活性污泥中亚硝酸盐氧化菌的优势菌属也大量存在于城市污水中. 这些结果同样可以利用 K/r 繁殖策略解释, *Nitrobacter* 属于 r-strategists, *Nitrospira* 属于 K-strategists^[24, 25], 而一般城市污水中亚硝酸盐浓度低于常规检测方法的检测下限, 活性污泥系统中亚硝酸盐浓度一般也低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 因此在活性污泥系统中 *Nitrospira* 与 *Nitrobacter* 相比, 更具竞争优势, 而城市污水中由于亚硝酸盐浓度更低, *Nitrospira* 的竞争优势更为明显.

2.2 城市污水中硝化菌活性

为考察城市污水处理厂进水中硝化菌的活性, 实验采用呼吸法对检测两个污水处理厂进水中硝化菌的氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率进行测定.

图 4 和图 5 分别为进水中硝化菌在加入氨氮和曝气后, 氨氧化速率、亚硝酸盐氧化速率随时间的变化趋势, 从中可以看出, 与常规活性污泥硝化性能测定不同的是, 原污水中硝化菌在曝气初期活性较低, 氨氧化菌活性在曝气 2~12 h 后, 亚硝酸氧化菌活性在曝气 6~16 h 后, 活性基本恢复至最大值. 亚硝酸盐氧化菌活性恢复所需要的时间比氨氧化菌活性恢复所需要的时间长. 调查期间二污进水中平均最大氨氧化速率为 $(0.32 \pm 0.12) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 平均最大亚硝酸盐氧化速率为 $(0.71 \pm 0.18) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$; 三污进水中平均最大氨氧化速率为 $(0.43 \pm 0.17) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 平均最大亚硝酸盐氧化速率为 $(0.58 \pm 0.27) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. 因此, 可以判断出, 城市污水中的氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌具有硝化活性, 在建立活性污泥模型及污水厂设计时, 应当考虑城市污水中硝化菌对活性污泥系统的

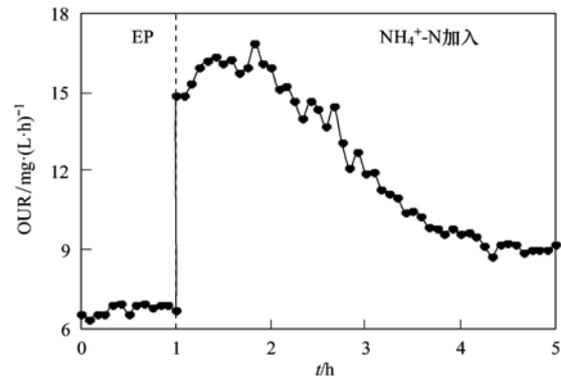


图4 OUR 历时变化

Fig. 4 OUR profiles

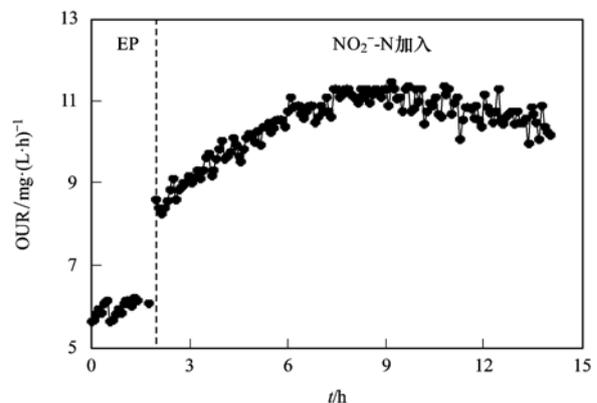


图5 OUR 历时变化

Fig. 5 OUR profiles

影响,但也应当充分考虑进水中硝化菌所需要的适应时间。

2.3 城市污水中硝化菌对活性污泥系统的影响

调查结果表明,城市污水中含有活性硝化菌,这部分硝化菌将对活性污泥系统进行自然连续接种(natural continuous seeding)。为了衡量城市污水中硝化菌对活性污泥系统的影响,定义每天由城市污水带入的硝化菌数量与活性系统中原有硝化菌数量的比值为原污水中硝化菌对活性污泥的连续接种强度,可以根据公式(1)计算:

$$q_{\text{seed}} = \frac{Q_{\text{in}} X_{\text{in, nitrifiers}}}{V X_{\text{nitrifiers}}} \quad (1)$$

式中, q_{seed} 为硝化菌连续接种强度, $\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$; Q_{in} 为城市污水处理厂的日进水量, $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$; $X_{\text{in, nitrifiers}}$ 为城市污水中硝化菌浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为城市污水处理厂生物反应池的容积, L ; $X_{\text{nitrifiers}}$ 为活性污泥中硝化菌浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

表2为调查期间二污与三污进水与活性污泥的硝化活性平均值,以及根据公式(1)所计算的添加强度。

表2 二污、三污进水及活性污泥的硝化性能及连续接种强度

Table 2 Nitrification activity of raw sewage, activated sludge and continuous seeding intensity

类型	项目	AOB	NOB
二污 HRT = 0.54 d SRT = 12d	进水硝化性能/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$	0.32 ± 0.12	0.71 ± 0.18
	活性污泥/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$	7.32 ± 1.60	5.50 ± 0.31
	连续接种强度/ $\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$	0.08	0.24
三污 HRT = 0.75 d SRT = 18 d	进水硝化性能/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$	0.43 ± 0.17	0.58 ± 0.27
	活性污泥/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$	6.26 ± 1.78	7.32 ± 1.51
	连续接种强度/ $\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$	0.09	0.11

由表2可以看出,城市污水每天给活性污泥系统带入了大量的具有硝化活性的硝化菌,氨氧化菌连续接种强度在 $0.08 \sim 0.09 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$,亚硝酸盐氧化菌连续接种强度在 $0.11 \sim 0.24 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 。低于 Jauffur 等^[6]所计算加拿大 LaPrairie 污水处理厂 $0.3 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 的接种强度,该厂的进水流量为 $65\,000 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$, HRT 为 15 h, SRT 为 7 d,二级处理工艺采用传统活性污泥法。LaPrairie 污水处理厂的温度与污泥龄低于本研究所调查的污水处理厂,而接种强度会受进水中硝化菌浓度与活性污泥硝化菌浓度的影响,温度越低,污泥龄越短,活性污泥中硝化菌的含量就会大幅降低,而进水中硝化菌的接种效应就会越明显。

但这些结论与 Lee 等^[8]调查发现的进水与活性污泥中的微生物仅有 4.3% ~ 9.3% 的 OTUs 一致,并得出进水中微生物对活性污泥系统的影响较小这一观点相矛盾。引起这一矛盾的原因可能是因为:硝化菌生长缓慢,活性污泥系统中硝化菌自身增殖的数量少,由城市污水带入的硝化菌对活性污泥系统的影响较大,因此二者硝化菌种群结构接近。而异养菌则相反,它在活性污泥系统中增殖的数量远大于城市污水带入的异养菌数量,因此异养菌的种群结构更容易受活性污泥系统的设计与运行条件的影响。由于活性污泥中硝化菌的份额较小, Lee 等^[8]的调查结果主要是针对异养菌。

Larsen 等^[26]在 2008 年的研究结果中表明硝化菌尤其是亚硝酸盐氧化菌比活性污泥中一般的细菌

更容易形成密实和牢固的小菌落,从图1城市污水样品的荧光原位杂交照片中也可以观察到这个现象。根据这一特性,如果污水处理工艺中包含初沉池时,进水中的大部分硝化菌将进入初沉污泥。因此,在活性污泥模型及污水处理厂的设计尤其是初沉池的设计中有必要考虑由城市污水自身带入的硝化菌对污水处理厂运行的影响。

3 结论

(1)西安市第二、第三污水处理厂进水中硝化菌占总细菌数的平均个数百分比 $[(\text{AOB} + \text{NOB}) / \text{EUB}_{\text{mix}}]$ 分别为 $(5.35 \pm 2.1)\%$ 和 $(6.0 \pm 2.8)\%$,进水中氨氧化菌(AOB)优势菌为 *Nitrosomonas europaea*/*Nitrosococcus mobilis* lineage;亚硝酸盐氧化菌(NO)的优势菌均为 *Nitrospira*,次优势菌为 *Nitrobacter*,且与 *Nitrococcus*、*Nitrospina* 并存。

(2)城市污水中硝化菌具有硝化活性,在曝气 2 ~ 16 h 后,活性基本恢复,最大氨氧化速率分别为 $(0.32 \pm 0.12) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(0.43 \pm 0.17) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,亚硝酸盐氧化速率为 $(0.71 \pm 0.18) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(0.58 \pm 0.27) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

(3)城市污水中含有活性硝化菌,对活性污泥系统有连续自然接种的作用,根据进水及活性污泥中硝化活性估算出城市污水中 AOB 和 NOB 对活性污泥的连续接种强度分别为 $0.08 \sim 0.09 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.11 \sim 0.24 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 。因此,在活性污泥模型建立及污水处理厂设计中有必要考虑由城市污水自

身带入的硝化菌对污水处理厂运行的影响.

参考文献:

- [1] 金鹏康, 焦丁, 王宝宝, 等. 城市污水管网内生物菌群演替规律[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(11): 2785-2791.
Jin P K, Jiao D, Wang B B, *et al.* Variation of microbial population in sewer networks[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(11): 2785-2791.
- [2] 冯良记, 唐军. 下水道中微生物反应及水质转化的数值研究[J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(6): 1-4, 10.
Feng L J, Tang J. Numerical study of wastewater quality transformation in sewerage system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(6): 1-4, 10.
- [3] 万琼, 贺亮, 裴立影, 等. 接种初沉污泥快速启动活性污泥系统[J]. 水处理技术, 2011, **37**(9): 47-50.
Wan Q, He L, Pei L Y, *et al.* Inoculate primary sludge to quick start-up activated sludge system [J]. *Technology of Water Treatment*, 2011, **37**(9): 47-50.
- [4] Brion N, Billen G. Wastewater as a source of nitrifying bacteria in river systems; the case of the river seine downstream from Paris [J]. *Water Research*, 2003, **34**(12): 3213-3221.
- [5] Brion N, Billen G, Guézennec L, *et al.* Distribution of nitrifying activity in the Seine river (France) from Paris to the estuary [J]. *Estuaries*, 2000, **23**(5): 669-682.
- [6] Jauffur S, Isazadeh S, Frigon D. Should activated sludge models consider influent seeding of nitrifiers? Field characterization of nitrifying bacteria [J]. *Water Science and Technology*, 2014, **70**(9): 1526-1532.
- [7] Saunders A M, Albertsen M, Vollertsen J, *et al.* The activated sludge ecosystem contains a core community of abundant organisms [J]. *The ISME Journal*, 2016, **10**(1): 11-20.
- [8] Lee S H, Kang H J, Park H D. Influence of influent wastewater communities on temporal variation of activated sludge communities [J]. *Water Research*, 2015, **73**: 132-144.
- [9] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3* [M]. London: IWA Publishing, 2000. 16-18.
- [10] Yu L F, Peng D C, Ren Y X. Protozoan predation on nitrification performance and microbial community during bioaugmentation [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(23): 10855-10860.
- [11] 陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 等. FISH-NanoSIMS 技术在环境微生物生态学上的应用研究 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 244-251.
Chen C, Bai Y H, Liang J S, *et al.* Application of FISH-NanoSIMS technique in environmental microbial ecology study [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 244-251.
- [12] Loy A, Maixner F, Wagner M, *et al.* probeBase — an online resource for rRNA-targeted oligonucleotide probes; new features 2007 [J]. *Nucleic Acids Research*, 2007, **35**: D800-D804.
- [13] 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 等. 四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3339-3344.
Zhang Y, Sun F X, Xie H J, *et al.* Start-up characteristics of four-zone integrated reactor for nitrogen removal in winter and analysis of nitro bacteria community [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3339-3344.
- [14] Sánchez O, Aspé E, Martí M C, *et al.* Rate of ammonia oxidation in a synthetic saline wastewater by a nitrifying mixed - culture [J]. *Journal of Chemical Technology Biotechnology*, 2005, **80**(11): 1261-1267.
- [15] Chandran K, Hu Z Q, Smets B F. A critical comparison of extant batch respirometric and substrate depletion assays for estimation of nitrification biokinetics [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, **101**(1): 62-72.
- [16] 于莉芳, 傅学焘. 城市污水处理厂活性污泥中硝化菌群落结构与功能分析研究 [EB/OL]. [http://www. paper. edu. cn/ releasepaper/ content/201512-184](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201512-184), 2015-12-03.
Yu L F, Fu X T. Nitrifiers'community in activated sludge of sewage treatment plants [EB/OL]. <http://www. paper. edu. cn/ releasepaper/ content/201512-184>, 2015-12-03.
- [17] Limpiyakorn T, Kurisu F, Sakamoto Y, *et al.* Effects of ammonium and nitrite on communities and populations of ammonia-oxidizing bacteria in laboratory-scale continuous flow reactors [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007, **60**(3): 501-512.
- [18] 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.
- [19] Wang X H, Wen X H, Criddle C, *et al.* Community analysis of ammonia-oxidizing bacteria in activated sludge of eight wastewater treatment systems [J]. *Journal of Environmental Science*, 2010, **22**(4): 627-634.
- [20] 曾薇, 张丽敏, 王安其, 等. 污水处理系统中硝化菌的菌群结构和动态变化 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(11): 3257-3265.
Zeng W, Zhang L M, Wang A Q, *et al.* Community structures and population dynamics of nitrifying bacteria in activated sludges of wastewater treatment plants [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(11): 3257-3265.
- [21] Zeng W, Bai X L, Zhang L M, *et al.* Population dynamics of nitrifying bacteria for nitrification achieved in Johannesburg (JHB) process treating municipal wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **162**: 30-37.
- [22] Srithep P, Khinthong B, Chodanon T, *et al.* Communities of ammonia-oxidizing bacteria, ammonia-oxidizing archaea and nitrite-oxidizing bacteria in shrimp ponds [J]. *Annals of Microbiology*, 2015, **65**(1): 267-278.
- [23] 王雪, 赵大勇, 曾巾, 等. 河蚬(*Corbicula fluminea*) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2314-2321.
Wang X, Zhao D Y, Zeng J, *et al.* Effects of corbicula fluminea bioturbation on the community composition and abundance of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in surface sediments [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2314-2321.
- [24] Tangkitjawisut W, Limpiyakorn T, Powtongsook S, *et al.* Differences in nitrite-oxidizing communities and kinetics in a brackish environment after enrichment at low and high nitrite concentrations [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **42**: 41-49.
- [25] Ge S J, Wang S Y, Yang X, *et al.* Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment; a review [J]. *Chemosphere*, 2015, **140**: 85-98.
- [26] Larsen P, Nielsen J L, Svendsen T C, *et al.* Adhesion characteristics of nitrifying bacteria in activated sludge [J]. *Water Research*, 2008, **42**(10-11): 2814-2826.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-rui, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggyery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	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	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行