

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对PM_{2.5}影响 段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)

京津冀内陆平原地区PM_{2.5}浓度时空变化定量模拟 郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)

成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响 刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)

华山地区PM_{2.5}中无机离子垂直分布特征 曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)

烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物(PM_{2.5})成分图谱 谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)

长三角地区中小燃煤锅炉PM_{2.5}成分谱特征 徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)

民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子 严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑容, 杨国威, 吴方琪 (1502)

冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素 张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)

青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度 李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)

辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配 张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)

典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露 李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)

苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平 王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)

上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响 杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)

城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性:以宁波市北仑区芦江为例 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)

艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨 曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)

三峡澎溪河水华期间水体CH₄浓度及其通量变化特征初探 秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)

漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源 苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)

柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价 张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)

黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析 刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)

白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)

典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟 高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)

河道水旁路处理中试工艺中PPCPs的去除效果及机制 李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)

茶普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价 樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵顺利, 王聿琳, 彭明国 (1645)

真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质 孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)

热活化过硫酸盐降解三氯生 蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆隽鹤 (1661)

水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律 徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)

海水优化ANAMMOX包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能 单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)

外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能 于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)

硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)

分段进水对改良A²/O-BAF双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响 南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)

不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化 梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)

智能化曝气控制A/O工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制 徐旻昉, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)

温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响 李玥, 胡奇, 高大文 (1731)

污泥臭氧原位减量工艺中抗生素的去除 汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)

零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响 杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛昱, 高品 (1748)

环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响 陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)

后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性 张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)

复合菌株YH01+YH02强化SBR好氧反硝化脱氮及菌群结构分析 陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)

氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化 贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)

1株铜绿假单胞菌对苊的降解特性及代谢途径 李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)

铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子 李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)

垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)

黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响 陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)

河岸带表层土壤的铁氨氧化(Feammox)脱氮机制的探究 丁帮环, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)

藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化 展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)

深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征 沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)

香港周边海域野生鱼体内DDTs和PCBs的含量分布和食用风险评估 苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)

偏远高山湿地土壤中PAHs污染特征:以神农架大九湖为例 胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)

西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征 孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)

广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估 宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)

长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响 张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)

三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响 辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)

稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)

钙基膨润土辅助对堆肥及土壤Cu、Zn形态转化和白菜吸收的影响 赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)

外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响 贺玉龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)

模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响 王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)

紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素 田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)

季节非对称升温对喀斯特土壤CO₂释放的影响 唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)

《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)

硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究

盛晓琳¹, 崔灿灿^{1,2}, 王家德², 刘锐^{1*}, 徐峰⁴, 陈吕军^{1,3*}

(1. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 浙江省水质科学与技术重点实验室, 嘉兴 314006; 2. 浙江工业大学环境学院, 杭州 310014; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084; 4. 嘉兴绿野环境工程有限责任公司, 嘉兴 314006)

摘要: 采用膜生物反应器(MBR)为富集装置, 以预处理后的城市污水外加硫酸铵为培养基质, 研究了温度、溶解氧、氨氮容积负荷、游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)等因子对硝化污泥富集的影响并核算富集成本, 同时考察了该硝化污泥用于强化废水生物系统抗氨氮冲击能力的效果. 结果表明, MBR 中富集培养 182 d 后, 污泥的硝化活性达到 $98.41 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 比启动时提高约 30 倍, 硝化菌产量为 $14.96 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 富集 1 kg 硝化污泥成本为 3.52 元. 温度是影响硝化污泥活性的主要因素, 低于 15.0°C 时污泥的硝化活性降至最高值的三分之一, 降低氨氮容积负荷在一定程度上可以减轻低温的影响. 此外, 溶解氧不足时, 亚硝氮积累减缓了硝化菌富集速度. 把上述富集的硝化污泥应用于受高氨氮负荷冲击的生物处理中试系统中, 投加 2% 硝化污泥后, 系统对氨氮的去除率由 29.4% 提高至 88.4%; 此后该系统在水温降至 $(13.3 \pm 1.6)^\circ\text{C}$ 时, 氨氮去除率也能高达 99.0%. 上述中试结果显示了硝化污泥富集后用于生物强化废水生物处理系统、提高其硝化功能启动与恢复速度的可能性.

关键词: 城市污水; 膜生物反应器; 硝化污泥富集; 硝化强化; 氨氮冲击

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1697-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201706191

Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads

SHENG Xiao-lin¹, CUI Can-can^{1,2}, WANG Jia-de², LIU Rui^{1*}, XU Feng⁴, CHEN Lǚ-jun^{1,3*}

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Environment in Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China; 2. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Jiaxing Lvy Environmental Engineering Co., Ltd., Jiaxing 314006, China)

Abstract: Nitrifying activated sludge (NAS) was enriched in a membrane bioreactor (MBR) with pre-treated municipal wastewater and additional ammonium sulfate as the culture medium. The influences of temperature, dissolved oxygen (DO), ammonia nitrogen volumetric load, free ammonia (FA), and free nitrite (FNA) on the enrichment of NAS were investigated, the cost of the process was evaluated, and then NAS's application in enhancing a wastewater biological treatment system against ammonia shocking loads was attempted. The results showed that after 182 days of cultivation in an MBR, NAS had a nitrification activity of $98.41 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, which was 30-times higher than that of the seeding sludge. The yield of NAS was $14.96 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, costing 3.52 Yuan for 1 kg. Temperature was found to be a key factor affecting the sludge nitrification activity. The sludge nitrification activity was decreased to 1/3 of the maximum value at temperatures below 15.0°C , while lowering the ammonium volumetric load retarded the decrease in the sludge nitrification activity to some extent. In addition, dissolved oxygen deficiency resulted in nitrite accumulation, and thereby slowed down the NAS enrichment rate. The enriched NAS was then applied to a wastewater biological treatment pilot equipment, which had just been exposed to an ammonium shocking load. The removal rate of ammonia nitrogen in the biological system increased from 29.4% to 88.4% after 2.0% of NAS was inoculated. The enhanced biological system retained ammonia removal rates of as high as 99.0%, even as the temperature dropped to $13.3^\circ\text{C} \pm 1.6^\circ\text{C}$ afterwards. The above pilot-experiment results suggested that enriched nitrifying sludge is suitable for quickly increasing the start-up or recovery rates of the nitrifying function in a biological system.

Key words: municipal wastewater; membrane bioreactor; nitrifying activated sludge enrichment; nitrification enhancement; ammonium shocking load

传统的生物脱氮过程需在硝化细菌的作用下将 氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)氧化成亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)和硝酸盐

收稿日期: 2017-06-19; 修订日期: 2017-10-18

基金项目: 国家水污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07305001-04); 嘉兴市科技计划项目(2015AY23003); 浙江省公益研究项目(2016C33046); 浙江清华长三角研究院青年基金项目

作者简介: 盛晓琳(1987~), 女, 硕士, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: shengxiaolin_azure@163.com

* 通信作者, E-mail: liuruitsinghuazj@gmail.com; chenlj@tsinghua.edu.cn

氮(NO_3^- -N), 再通过反硝化菌作用将 NO_3^- -N还原成 N_2 . 硝化细菌大多为自养好氧型, 相比于反硝化菌等异养菌, 其世代时间长、增殖速率慢、容易流失, 且易受温度、溶解氧(DO)、pH、毒性物质等影响^[1,2]. 硝化细菌的这些特性导致污水处理厂生物处理系统的硝化功能启动慢、易崩溃且崩溃后恢复慢等问题. 解决这些问题的主要方法为延长污泥龄、降低负荷或进行硝化强化. 硝化强化主要是通过投加高活性的硝化污泥或硝化菌剂, 快速增加生物处理系统中硝化细菌的数量与活性, 从而快速提高生物处理系统的硝化功能, 该方法比延长污泥龄更为高效^[3]. 目前, 硝化菌剂主要通过发酵罐扩大培养^[4,5]获得, 具有菌种纯度高、细菌数量高等特点, 但其在应用中存在投加大、投加成本高的问题. 硝化污泥中种群丰富, 具有制备成本低、生物相容性好等特点, 但其硝化菌含量低、富集速度慢制约了其工程应用. 为此, 学者们着力研究硝化污泥快速富集的方法, 研究了不同生物反应器对硝化菌的富集效果的影响^[6~13], 发现膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)利用膜截留作用可有效延长污泥龄(sludge retention time, SRT)并减少富集过程中硝化菌的流失, 从而达到高效快速富集硝化污泥之目的^[14~17].

前期小试研究发现, 使用浸没式 MBR 和纯无机培养条件下, 可富集得到硝化活性为 $250 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 的硝化污泥, 但污泥菌胶团很散, 容易

引起严重的膜孔堵塞^[4]. 改用高氮氮低碳源的富集基质, 在温度为 25°C 、 $\text{DO} > 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、不排泥条件下, 81 d 后富集得到硝化活性为 $103.40 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 的硝化污泥. 有机碳源的加入虽在一定程度上降低了污泥中硝化细菌的含量, 但是大幅度改善了污泥絮体形状, 减缓了膜污染速度^[18].

本文在上述前期小试实验^[18]的基础上开展中试研究, 将 MBR 富集装置扩大, 优化运行参数以及装置结构, 考察硝化污泥的硝化活性及硝化菌产率, 同时采用序批式反应器(sequencing batch reactor, SBR)模拟好氧池进行硝化污泥强化实验, 考察所富集的硝化污泥进行工程化应用的可行性, 以期将来的成果转化提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验共运行 2 个反应器, 一个是 MBR (图 1), 用于富集硝化细菌; 另一个是 SBR, 用于模拟城市污水处理厂好氧池, 开展高氨氮冲击下的硝化细菌强化实验. MBR 为不锈钢箱体, 有效容积 1 m^3 ($L = 120 \text{ cm}$, $W = 115 \text{ cm}$, $H = 120 \text{ cm}$), 内置膜面积为 20 m^2 的箱式平板膜(北京坎普尔环保有限公司, CPFC2020-40), 膜下部安装穿孔曝气管和曝气盘, 在充氧的同时减缓膜污染. SBR 为碳钢箱体, 有效容积为 20 m^3 ($L = 500 \text{ cm}$, $W = 200 \text{ cm}$, $H = 220 \text{ cm}$), 箱体底部均匀分布 40 个曝气盘($\Phi = 20 \text{ cm}$).

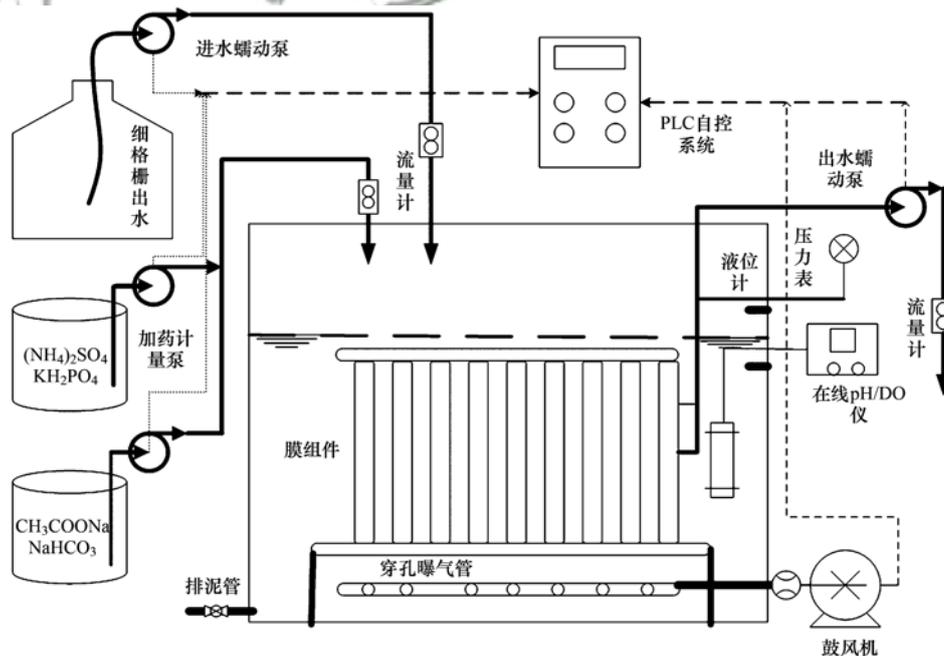


图 1 MBR 装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the MBR

1.2 实验用水

MBR 进水由宜兴某城市污水处理厂预处理污水、氨氮储备液、碱度和有机碳源储备液组成, 体积比为 8:1:1. 氨氮储备液的主要成分为硫酸铵和磷酸二氢钾, 氮磷质量比为 8:1. 碱度和有机碳源调节液为碳酸氢钠和乙酸钠, 碳酸氢钠与氨氮的质量比为 8~10. SBR 进水为某城市污水处理厂预处理污水, 预处理污水为城市污水处理厂原水经粗格栅、曝气生物滤池和细格栅处理后出水, 其 NH_4^+ -N 浓度为 10.1~34.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、总磷(TP)浓度范围为 1.52~5.89 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、COD 浓度为 170~237 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 NO_3^- -N 浓度为 1.0~3.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 NO_2^- -N 浓度为 0.08~0.21 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、悬浮固体(SS)浓度为 168~219 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 为 7.35~7.62. MBR 通过阶梯式提高储备液中氨氮浓度来提高 MBR 的氨氮容积负荷, SBR 通过外加硫酸铵将进水氨氮质量浓度提高至 $(110.52 \pm 14.61) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 来模拟高氨氮冲击.

1.3 反应器运行条件

MBR 装置通过自控系统实现连续曝气、连续进水和间歇出水(抽吸 8 min, 停止 2 min)的运行模式. 接种污泥取自宜兴某城市污水处理厂好氧池, 污泥浓度(MLSS)为 3473 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SV_{30} 为 15%~23%. 反应器共运行 246 d, 运行期间, DO 为 0.5

~4.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 温度为 7~35 $^{\circ}\text{C}$, pH 为 7~8. 运行共分为 4 个阶段, 运行前 15 d 为启动阶段; 16~37 d 为阶段一, 水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)为 48 h, 不排泥, 氨氮容积负荷为 0.4~1.0 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; 38~152 d 为阶段二, HRT 为 24 h, SRT 为 20 d, 氨氮负荷提高至 1.2 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 考察 SRT 对硝化菌富集的影响; 153~246 d 为阶段三, HRT 为 12 h, 氨氮负荷提高至 2.4 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 受冬季降温影响, 183 d 后温度降低至 16.9 $^{\circ}\text{C}$, 氨氮去除率下降, 为减小低温对硝化菌的冲击, 在 209 d 降低氨氮负荷至 0.5 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 具体运行参数见表 1.

SBR 强化实验共运行 72 d, 每天运行 4 个周期, 每个周期的运行模式为进水曝气 40 min → 曝气 200 min → 静置沉淀 60 min → 排水 60 min. 接种污泥取自宜兴某城市污水处理厂好氧池, MLSS 为 4214 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SV_{30} 为 19%. 运行期间, DO 为 2.0~4.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 温度 12~24 $^{\circ}\text{C}$, pH 6.5~8.0. 1~44 d 为启动期, 进水氨氮质量浓度 $(24.3 \pm 7.3) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 45~62 d 为高氨氮冲击期, 进水氨氮浓度为 $(110.5 \pm 14.6) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 63~72 d 为低温期, 进水恢复至 $(24. \pm 6.9) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 温度降至 $(13.3 \pm 1.6) ^{\circ}\text{C}$.

表 1 MBR 运行条件

Table 1 Experimental operational conditions of the MBR

项目	阶段一	阶段二	阶段三
运行天数/d	16~37	38~152	153~246
氨氮容积负荷/ $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$	0.4~1.0	1.0~1.2	0.5~2.4
HRT/h	48	24	12
SRT/d	∞	20/ ∞	∞ /20
COD 容积负荷/ $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$	0.82 \pm 0.35	1.56 \pm 0.42	2.09 \pm 0.37
NH_4^+ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	800~2200	800~1200	450~2200

1.4 分析项目与方法

COD、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、MLSS 测试方法均参照文献[19], 温度、pH 和 DO 采用便携式监测仪(DKK-TOACORPORATION, HM-30P、HM-31P)测定. 氨氧化速率测定方法参照文献[18]; 游离氨(FA)以及游离亚硝酸(FNA)、亚硝氮积累率(NAR)参照文献[20]; 生物相(54~196 d)检测应用荧光定量 PCR 分析方法测定, 特异性引物及扩增条件参考文献[21]送上海生工进行分析测定; 硝化菌产量(W)的计算在文献[22,23]基础上推算得到式(1):

$$W = \frac{Q}{V} \times \frac{\theta_x}{\theta} \left[\frac{Y_{\text{obs}} \times (N_0 - N_1 - N_h)}{1 + b \times \theta_x} \right] \quad (1)$$

式中, W 为硝化菌总产量, $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$; Q 为每日排泥量, $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$; V 为反应器有效容积, L; Y_{obs} 为硝化菌产率系数, $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; b 为硝化菌衰减系数, d^{-1} ; θ_x 、 θ 为污泥龄、水力停留时间, d; N_0 为进水总凯氮, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; N_h 为异养菌消耗氨氮, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; N_1 为出水总凯氮, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 硝化污泥的富集结果

硝化污泥的硝化活性、氨氮容积负荷和氨氮去除率如图 2 所示, 经过 15 d 的培养后, 接种污泥对氨氮的去除率稳定在 90.0% 以上, 表明硝化菌已经适应新的生长环境. 阶段一在不排泥的条件下通过

阶梯式提高进水氨氮至 $2\,200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，接种污泥的硝化活性从 $4.51\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 升高至 $41.20\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ ，与小试实验相比富集速度较慢，主要原因可能是：曝气不足使 DO 仅为 $0.5\sim 1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，导致亚硝氮积累对氨氮氧化菌(AOB)和亚硝酸氮氧化菌(NO_B)抑制^[24]；另外，中试实验进水主要为污水处理厂的预处理水，含有有毒有害物质也可能对硝化菌具有一定的抑制作用^[25]。

阶段二，为减少亚硝氮产物积累对硝化菌活性的抑制^[26, 27]，将进水氨氮浓度降低至 $800\sim 1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，同时为维持相同的氨氮容积负荷，将 HRT 缩短至 24 h。此外，在反应器底部均匀增设曝气盘和曝气管，DO 上升至 $1.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，出水亚硝氮浓度快速降低至 $76.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，氨氮去除率由 79.2% 提高至 95.0%，硝化活性也进一步提高至 $56.12\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 。亚硝氮的积累及其对硝化菌活性的抑制作用显著降低，这与文献^[27]的研究结果相似。

阶段三，运行至 182 d 时活性污泥的硝化活性达到最高为 $98.41\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ ，接近小试富集时的最高硝化活性 $103.40\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 。183 d 后随着入冬气温降低的影响，硝化活性随之显著下降，氨氮去除率出现较大波动，200 d 时氨氮去除率最低达到 47.8%，硝化活性降至 $33.82\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ ，仅为 182 d 最高硝化活性的三分之一。以往的研究表明，硝化菌最适宜的温度为 $20.0\sim 35.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[28, 29]，

而当温度低于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时硝化菌的生命活动几乎停止^[30]。为防止反应器崩溃，209 d 将氨氮负荷降至 $0.5\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ ，氨氮去除率逐渐回升至 90%。因此，在 MBR 富集过程中，水温低于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，可通过适时降低氨氮容积负荷的方式，来减少低温对硝化菌的冲击。

阶段二和阶段三的运行下，通过周期性排泥获得的硝化污泥产量分别为 $14.96\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $12.35\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ ，高于文献报道利用传统工艺富集硝化菌的 $10.37\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ ^[22, 23]。上述结果表明，硝化污泥中试富集实验虽然硝化菌的富集速度较小试减缓，但仍可以获得高活性的硝化污泥。

2.2 FA、FNA

据报道 FA 和 FNA 的质量浓度对硝化菌的生长具有重要影响^[31, 32]。MBR 运行过程中 FA 浓度、FNA 浓度、氨氮平均去除率、亚硝氮平均积累率和 DO 如表 2 所示。阶段一，FA 和 FNA 平均质量浓度分别为 $(5.48 \pm 4.84)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(0.44 \pm 0.31)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，在此质量浓度下氨氮去除率为 $(86.7 \pm 6.9)\%$ ，亚硝氮积累率为 $(68.9 \pm 22.2)\%$ ，FA 和 FNA 对 AOB 和 NO_B 均产生一定的抑制，但对 NO_B 的抑制更显著。阶段二提高 DO 后，FA 和 FNA 的浓度大幅降低，氨氮去除率显著提高，亚硝氮积累率显著降低。阶段三，受温度影响，FA 上升明显，氨氮去除率下降，亚硝氮积累率升高至 $(40.4 \pm 21.2)\%$ ，亚硝酸的积累量达 (254.3 ± 133.5)

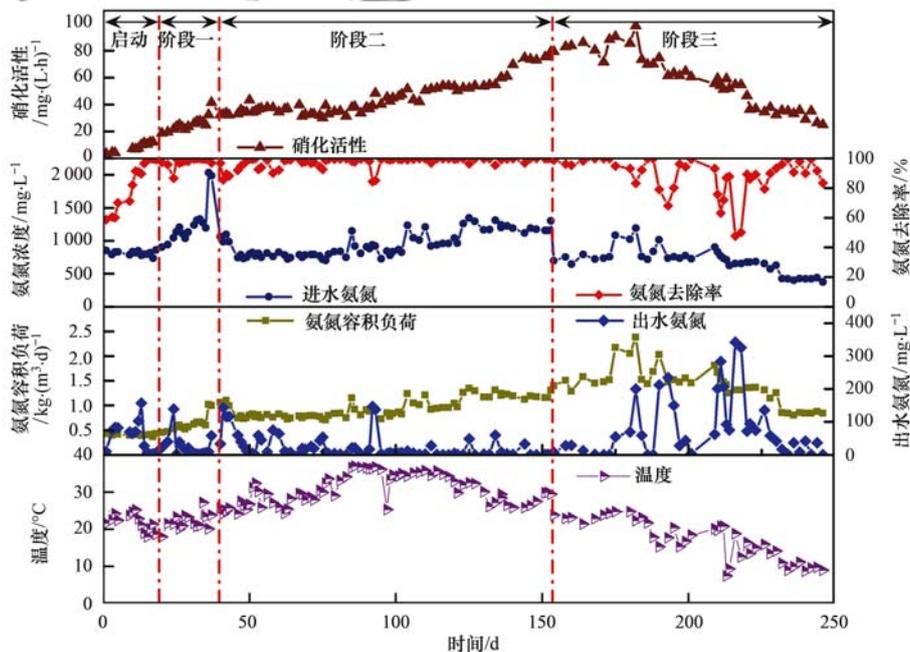


图2 硝化污泥中试富集过程中活性及运行参数

Fig. 2 Variations in the nitrification activity of enriched nitrifying activated sludge and operating parameters in the pilot-scale experiment

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 上述结果表明, DO 和温度对 FA 和 FNA 的影响较大, FA 和 FNA 对 NOB 的抑制作用更明显, 这与文献^[29-31]的报道一致. 因此, 在中试富集

过程中减少亚硝氮的积累以及控制 FA、FNA 浓度是保证富集效果的关键. 为此, 需要把 DO 控制在 $1.0\sim 4.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上, 温度控制在 $21.7\sim 38.2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

表 2 MBR 中 FA 和 FNA 的质量浓度

Table 2 Mass concentrations of FA and FNA in the MBR

阶段	FA/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	FNA/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	氨氮去除率/%	亚硝氮积累率/%	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
阶段一	5.48 ± 4.84	0.44 ± 0.31	86.7 ± 6.9	68.9 ± 22.2	$0.4\sim 3.6$
阶段二	0.32 ± 0.12	0.10 ± 0.004	94.7 ± 4.5	10.3 ± 6.2	$1.0\sim 4.4$
阶段三	4.89 ± 1.28	0.13 ± 0.006	73.6 ± 26.4	40.4 ± 21.1	$1.1\sim 7.6$

2.3 硝化菌种类和含量变化

MBR (54~96 d) 运行期间硝化菌种类和含量变化的结果如图 3 所示. 硝化细菌中包含 2 种 AOB (*Nitrosomonas*、*Nitrosospira*)、3 种 NOB (*Nitrobacter*、*Nitrolancea* 和 *Nitrospira*) 和 1 种固氮螺菌, 样品中 AOB 的含量显著高于 NOB, *Nitrosomonas* 和 *Nitrobacter* 分别为两个菌属的优势菌. 富集过程中, 硝化菌的含量由 6.0% 快速升高至 17.4%, 但又迅速降低至 2.2% 并缓慢增长至 5.0%. 进一步分析 COD 污泥负荷对硝化菌含量的影响发现, 硝化菌含量与 COD 污泥负荷呈现负相关的现象, 这是因为 COD 污泥负荷升高后异养菌大量增殖, 从而使硝化菌含量降低, 另外异养菌也会因争夺 DO 等抑制硝化菌的生长. COD 污泥负荷 (以 COD/MLSS 计) 为 $0.17\text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 时, 污泥絮体性状良好, 且硝化菌含量高, 表明在此 COD 污泥负荷下可得到硝化菌含量高且污泥絮体性状好的硝化污泥.

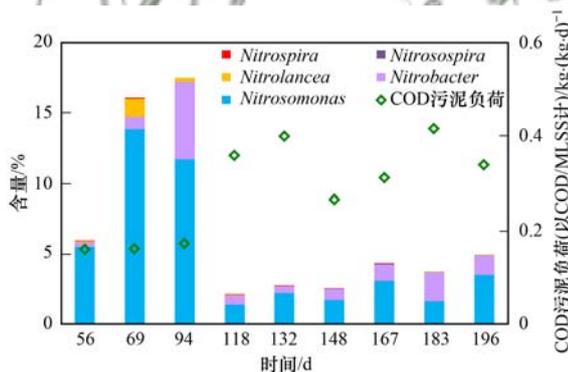


图 3 硝化菌种类、含量及 COD 污泥负荷变化

Fig. 3 Variations in the species of nitrifying bacteria, content, and COD sludge loading

2.4 高氨氮冲击与硝化细菌强化实验

在 SBR 中试反应器中开展了高氨氮冲击与硝化细菌强化实验, 结果如图 4 所示. 高氨氮冲击强化实验共运行 72 d, 启动期 1~44 d, 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 $(24.3\pm 7.3)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 $(0.2\pm 0.1)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮去除率为 $(98.0$

$\pm 1.3)\%$, 出水氨氮达到一级 A 排放标准. 45~62 d 开始高氨氮冲击, 冲击 12 h 后, 系统氨氮去除率下降至 29.4%. 冲击 24 h 时向 SBR 中投加 1% 体积比 ($V_{\text{硝化污泥}}/V_{\text{SBR}}$) 的硝化污泥 [硝化活性为 $46.67\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$], 出水氨氮先降低后升高; 因此又再次投加 1% 的硝化污泥, 出水氨氮浓度快速降低至 $16.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮稳定维持在 $(85.4\pm 3.2)\%$. 63~72 d, 高氨氮冲击结束后进水氨氮质量浓度恢复至 $(24.3\pm 7.3)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 同时受冬季降温影响, 温度降为 $(13.3\pm 1.6)\text{ }^{\circ}\text{C}$, 但 SBR 对氨氮的去除率仍高达 99.0% 以上, 表明强化后的 SBR 由于硝化菌数量增多, 硝化功能抗低温冲击的能力也有所提高, 比文献^[33]报道的低温硝化强化取得了更好的效果. 中试强化实验的硝化污泥累计投加量为反应器容积的 2%, 比尹子华^[18]小试实验的 14% 要低, 进一步显示了硝化污泥用于强化废水生物处理系统硝化性能的可行性.

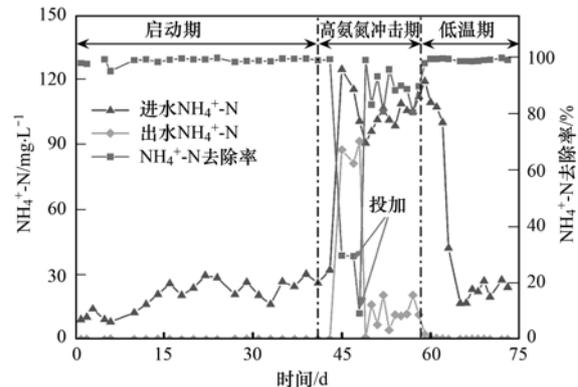


图 4 高氨氮冲击实验中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果

Fig. 4 Profiles of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations during the shock load period

2.5 MBR 运行成本核算

运行成本是衡量硝化污泥富集技术可否进行工程应用的重要标准. 运行成本主要包括鼓风机、蠕动泵、自控系统等所消耗的电费, 药剂费用、设备损耗维修及人工维护费.

(1) 电费 MBR 中试的设备总功率为 0.55 kW, 按电费 $1 \text{ 元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 计, 则每日电费为 13.2 元。

(2) 设备损耗和维修费用 MBR 中试装置的初始投资为 30 000 元, 按照十年折旧; 运行 246 d 设备修理费用共计 665 元。则粗略估算平均每天费用为 12.14 元。

(3) 人工维护费 以每天 100 元计。

(4) 药剂费用 MBR 中试过程中所用硫酸铵、乙酸钠等药剂共 12 490 元, 平均每天费用为 50.75 元。

以每天排出 50 L、MLSS 为 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、硝化活性为 $72.39 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 的硝化污泥计, 其生产成本为 $3.52 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。一般市售硝化菌剂至少 $80 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此, 富集的硝化污泥相对硝化菌剂的价格上有较大的优势。

3 结论

(1) 采用 MBR 中试装置富集硝化污泥, 182 d 后获得硝化污泥的活性为 $98.41 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 在 $\text{SRT} = 20 \text{ d}$ 时硝化菌产量为 $14.96 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 。将该硝化污泥用于强化废水生物系统抗氨氮冲击能力的中试研究, 发现投加 2% 硝化污泥后硝化功能快速恢复, 氨氮去除效率提高至 $(85.4 \pm 3.2)\%$ 。结合成本分析, 富集的硝化污泥比市售硝化菌剂具有明显的价格优势。

(2) MBR 富集硝化污泥过程中易受温度、氨氮容积负荷和 DO 等影响, 所以需依据环境变化对反应器工况进行相应调整。此外, 由于 MBR 中试反应器中曝气系统设计存在的不足, 导致 DO 低、膜污染问题, 需进一步考察与改进。

参考文献:

- [1] Faust L, Temmink H, Zwiijnenburg A, *et al.* Effect of dissolved oxygen concentration on the bioflocculation process in high loaded MBRs[J]. *Water Research*, 2014, **66**: 199-207.
- [2] 陈英文, 李凯, 何硕, 等. 硝化污泥强化培养及性能分析研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(3): 23-25, 32.
Chen Y W, Li K, He S, *et al.* Study on the nitrifying sludge enrichment and the performance analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(3): 23-25, 32.
- [3] Head M A, Oleszkiewicz J A. Nitrifying bacteria addition into reactors operating near washout conditions for nitrification [J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2005, **4**(4): 257-264.
- [4] 孙金凤. 硝化菌的筛选与扩增培养技术研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2012.
- [5] 崔迪. 低温生物强化系统中微生物群落结构解析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [6] 于莉芳. 污泥水富集硝化菌添加强化污水处理系统硝化的试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [7] Wang L, Zheng P, Abbas G, *et al.* Enrichment and characterization of acid-tolerant nitrifying sludge[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **184**: 196-203.
- [8] 杨宁. 污泥中硝化细菌富集培养技术的研究[J]. *科技情报开发与经济*, 2003, **13**(7): 103-105.
Yang L. Study on enrichment culture technique of nitrobacteria in sludge [J]. *Sci/Tech Information Development & Economy*, 2003, **13**(7): 103-105.
- [9] 刘芳, 赵鑫, 潘玉瑾, 等. 高效异养硝化细菌富集与强化脱氮[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, **46**(4): 807-811.
Liu F, Zhao X, Pan Y J, *et al.* Enrichment and enhanced nitrogen removal of heterotrophic nitrifying bacteria[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, **46**(4): 807-811.
- [10] 杨红亮. CAST 工艺启动与运行条件及硝化菌富集策略研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [11] 邓岩岩. 固定化包埋硝化菌去除废水中氨氮的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [12] 冯天喜. 固定硝化细菌强化 A/O 工艺脱氮性能的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2014.
- [13] 李凯, 赵金龙, 沈树宝, 等. 硝化污泥富集培养及用于强化硝化系统的研究[J]. *现代化工*, 2016, **36**(6): 145-147, 149.
Li K, Zhao J L, Shen S B, *et al.* Enrichment cultivation of nitrifying sludge and strengthen the system of nitrification [J]. *Modern Chemical Industry*, 2016, **36**(6): 145-147, 149.
- [14] Chienchaisri C, Yamamoto K. Performance of membrane separation bioreactor at various temperatures for domestic wastewater treatment [J]. *Journal of Membrane Science*, 1994, **87**(1-2): 119-129.
- [15] Dvořák L, Svojitka J, Wanner, J, *et al.* Nitrification performance in a membrane bioreactor treating industrial wastewater[J]. *Water Research*, 2013, **47**(13): 4412-4421.
- [16] 申欢, 陈建, 金奇庭, 等. 好氧膜生物反应器的硝化性能研究[J]. *环境科学与技术*, 2006, **29**(3): 79-81.
Shen H, Chen J, Jin Q T, *et al.* Performance of nitrification in aerobic membrane bio-reactor [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **29**(3): 79-81.
- [17] Sun F Y, Lv X M, Li J, *et al.* Activated sludge filterability improvement by nitrifying bacteria abundance regulation in an adsorption membrane bioreactor (Ad-MBR) [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **170**: 230-238.
- [18] 尹子华. 高活性硝化污泥的高效富集和生物强化效果研究 [D]. 上海: 上海师范大学, 2016.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [20] 董宝刚, 宋小燕, 刘锐, 等. 间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4309-4316.
Dong B G, Song X Y, Liu R, *et al.* A comparative study on performance of an intermittent aeration SBR and a traditional SBR for treatment of digested piggery wastewater [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4309-4316.

- [21] 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.
Zhao Z R, Ma B, Zhang S J, *et al.* Comparing microbial community of high ammonia wastewater and municipal sewage in a partial nitrification system[J]. Environmental Science, 2013, **34**(4): 1448-1456.
- [22] 贺亮. 城市污水处理厂污泥水处理与硝化菌富集中试试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [23] 于莉芳, 王圣伟, 郭天赐, 等. 污泥水富集硝化菌和强化城市污水低污泥龄硝化[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 2332-2337.
Yu L F, Wang S W, Guo T C, *et al.* Nitrifiers accumulation with reject water and bio-augmentation for nitrification of sewage at short SRT[J]. Environmental Science, 2008, **29**(2): 2332-2337.
- [24] Ciudad G, Werner A, Bornhardt C, *et al.* Differential kinetics of ammonia-and nitrite-oxidizing bacteria; a simple kinetic study based on oxygen affinity and proton release during nitrification[J]. Process Biochemistry, 2006, **41**(8): 1764-1772.
- [25] 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 等. 多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3460-3465.
Yin Z H, Sheng X L, Liu R, *et al.* Enhanced pollutants removal in a municipal wastewater treatment plant with multistage A/O process[J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3460-3465.
- [26] Ruiz G, Jeison D, Chamy R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration[J]. Water Research, 2003, **37**(6): 1371-1377.
- [27] Campos J L, Garrido J M, Mosquera-Corral A, *et al.* Stability of a nitrifying activated sludge reactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2007, **35**(1): 87-92.
- [28] 张巍, 赵军, 郎咸明, 等. 硝化细菌在不同温度下对氮素的去除效能研究[A]. 见: 2010 中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷)[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. 2709-2713.
- [29] Groeneweg J, Sellner B, Tappe W. Ammonia oxidation in nitrosomonas at NH_3 concentrations near k_m : effects of pH and temperature[J]. Water Research, 1994, **28**(12): 2561-2566.
- [30] 周玲玲, 张永吉, 宋正国, 等. pH 和温度对氯胺消毒给水管网硝化作用的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1627-1631.
Zhou L L, Zhang Y J, Song Z G, *et al.* Effect of pH and temperature on nitrification in a bench-scale drinking water distribution system during chloramination [J]. Environmental Science, 2011, **32**(6): 1627-1631.
- [31] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture[J]. Water Research, 2007, **41**(4): 826-834.
- [32] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1976, **48**(5): 835-852.
- [33] 魏继林, 彭党聪, 聂玲, 等. 硝化菌添加强化硝化实验研究[J]. 水处理技术, 2014, **40**(7): 111-115.
Wei J L, Peng D C, Nie L, *et al.* The experimental study of enhancing nitrification through augmentation[J]. Technology of Water Treatment, 2014, **40**(7): 111-115.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River; A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen; Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feamnox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajuhu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)