

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

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

长三角典型站点冬季大气 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 $PM_{2.5}$ 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
山西省武乡县城大气 $PM_{2.5}$ 痕量重金属的生态和健康风险分析	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Baw, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笪文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 刘珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH_4^+ / NO_3^- 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α -FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
$DO/NH_4^+ -N$ 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年干垦地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性

顾澄伟^{1,2}, 陈方敏^{1,2}, 李祥^{1,2*}, 黄勇^{1,2}, 尤星怡^{1,2}, 金润^{1,2}, 张文静^{1,2}, 董石语^{1,2}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技大学环境生物技术研究所, 苏州 215009)

摘要: 为研究纤维载体在 CANON 工艺中的运行特性, 同时接种亚硝化污泥及厌氧氨氧化污泥启动 CANON 反应器。结果表明经过 85 d 运行, 成功启动了 CANON 反应器, NRR 从 $0.09 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 提升至 $0.9 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 并能稳定运行, 说明纤维载体有利于富集污泥, 反应器内能维持较高的生物量。随着微生物的富集生长, 生物膜变厚, 反应器的能力提升, 反应器中 DO 达到 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。利用微电极测得生物膜由表及里的 DO 梯度为 $0.32 \sim 0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明生物膜变厚, 氧对生物膜的穿透力减弱, 亚硝化微生物量降低。荧光定量 PCR 结果表明, 启动前后 NOB 菌数量维持在较低水平, AOB 菌的丰度增长不大, ANAMMOX 菌细胞增长了一个数量级。

关键词: CANON 工艺; 启动; 亚硝化; 厌氧氨氧化; 定量 PCR

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1272-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201708092

Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier

GU Cheng-wei^{1,2}, CHEN Fang-min^{1,2}, LI Xiang^{1,2*}, HUANG Yong^{1,2}, YOU Xing-yi^{1,2}, JIN Run^{1,2}, ZHANG Weng-jing^{1,2}, DONG Shi-yu^{1,2}

(1. School of Environment Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: A CANON reactor with fiber carrier was started up by seeding nitrification sludge and ANAMMOX sludge to study the operating characteristics of a fiber carrier. The results showed that total nitrogen removal load rose from $0.09 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ to $0.9 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ and remained steady in the 85th day. This indicated that fiber carrier is beneficial to the accumulation of sludge, and the reactor can maintain a higher biomass. The DO in the reactor reached $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ with the enrichment of microorganisms, biofilm thickening, and the improvement of the reactor's ability. The DO gradient of the biofilm from the outside to the inside was $0.32 \sim 0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which could be obtained by a microelectrode. It was shown that the permeability of oxygen to the biofilm decreased, and the amount of nitrifying microorganisms decreased with biofilm thickening. The quantitative PCR results showed that the abundance of ANAMMOX was an order of magnitude more than before. The abundance of AOB increased slightly, while the abundance of NOB stayed at a relatively low level.

Key words: CANON process; start-up; nitrosation; ANAMMOX; quantitative PCR

近年来, 厌氧氨氧化 (anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX) 技术的发展, 为氨氮废水尤其是有机碳源低的高氨氮废水提供了一个切实有效的方法。其与传统生物脱氮工艺相比具有耗能低, 效率高, 无需要添加有机碳源, 污泥产量低等诸多优点, 适用于许多高氨氮废水的处理^[1~5]。而 ANAMMOX 反应需要氨氮和亚硝氮作为反应基质, 因此, 应用 ANAMMOX 的前提是实现短程硝化, 在此基础上, 多种以 ANAMMOX 为主要手段的脱氮工艺被开发出来。这些工艺主要分为两类, 一类是亚硝化和 ANAMMOX 分开在两个反应器中进行的工艺, 代表工艺为 SHARON-ANAMMOX 工艺; 另一种工艺是亚硝化和 ANAMMOX 在一个反应器中进行的工艺, 代表工艺为 CANON (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite) 工艺。

CANON 工艺的启动方法大多是以生物膜为载

体或者是颗粒污泥技术, 其原理主要在膜外或颗粒污泥表面形成好氧区实现短程硝化, 在膜内及颗粒污泥内部形成厌氧区实现厌氧氨氧化, 这样得以实现联合脱氮^[6]。

利用生物膜法启动 CANON 工艺可以起到增加反应器单位体积的污泥浓度, 提高功能菌的单位体积数量。研究表明海绵、火山岩及活性炭等填料有利于微生物依附于其表面和内部孔道, 维持反应器内较高的生物量, 相比较而言, 聚乙烯填料黏附性差, 表面积小不具备保留污泥^[7~10]。本实验试图以

收稿日期: 2017-08-12; 修订日期: 2017-09-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401103); 国家自然科学基金项目(51478284, 51408387); 江苏省特色优势学科二期项目; 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目; 苏州市分离净化材料与技术重点实验室项目(SZS201512)

作者简介: 顾澄伟(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染理论与控制, E-mail: 2242291405@qq.com

* 通信作者, E-mail: lixiang@mail.usts.edu.cn

纤维载体为填料, 同时接种亚硝化污泥和 ANAMMOX 絮状泥启动 CANON, 研究生物膜在反应器中的运行特性, 以期为研究 CANON 反应器不同的运行方式提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验采用 30 cm × 15 cm × 100 cm 的反应器, 如图 1 所示, 由有机玻璃制成, 有效体积为 38.25 L, 废水从反应器底部进入, 由上部出水口排出, 反应器内挂有带状的辫带式填料。进水方式由蠕动泵

控制稳定连续流, 曝气量由转子流量计调节, 运行温度维持在 33℃ ± 1℃, 反应器整体 pH 控制在 8.0 左右。

1.2 接种污泥与进水水质

亚硝化污泥来源于实验室的亚硝化反应器, 厌氧氨氧化污泥来源于实验室长期运行的厌氧氨氧化种泥反应器出水絮状污泥。

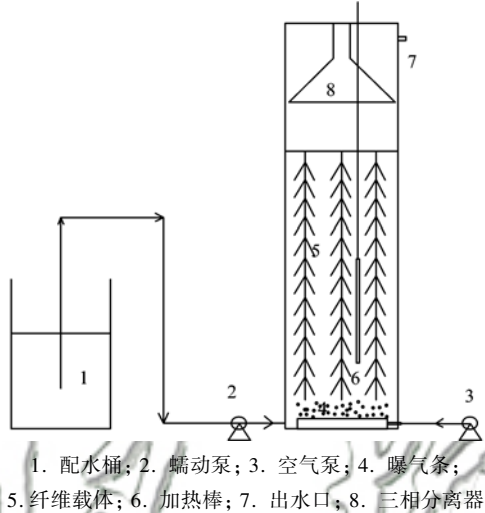
用水采用人工配水, 在自来水中添加适量的 NH₄HCO₃、NaHCO₃ 与 KH₂PO₄ 配制而成。考虑到自来水中含有大量的微量元素, 因此在原水中不再投加微量元素。由于自来水中含有接近饱和的溶解氧, 在实验过程中也没有对原水进行吹脱, 且大气中的氧气也会不断溶于水, 因此原水中会有一定的 NO₂⁻-N, 自来水中的 NO₃⁻-N 是进水中的 NO₃⁻-N 来源, 但含量很少, 可忽略不计。

1.3 分析方法

NH₄⁺-N 采用纳氏分光光度法 (哈希 2800, 美国); NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 采用离子色谱法 (戴安 IS-9001, 美国); pH 值采用 pHs-3E 型酸度计测定; DO 采用溶氧仪测定。

1.4 荧光定量 PCR

ANAMMOX、AOB 及 NOB 定量实验所用的引物对分别是 AMX809F/AMX1066R, AOB16sF/AOB16sR, NOB16sF/NOB16sR, 其引物序列如表 1 所示。



1. 配水桶; 2. 蠕动泵; 3. 空气泵; 4. 曝气条;
5. 纤维载体; 6. 加热棒; 7. 出水口; 8. 三相分离器

图 1 CANON 反应器实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of test equipment for the CANON reactor

表 1 ANAMMOX、AOB 及 NOB 菌 Real-time PCR 引物及反应条件

Table 1 Primers and parameters of the real-time PCR

菌种	序列	程序	文献
ANAMMOX	GCCCTAAACGATGGGCACT AACGTCTCACGACACGAGCTG	预变性 95℃, 2 min; 变性 95℃, 15 s; 退火温度 58℃, 30 s	[11]
AOB	GGAGRAAAGYAGGGGATCG CTAGCYTTGTAGTTTCAAACGC	预变性 95℃, 5 min; 变性 95℃, 30 s; 退火温度 58℃, 30 s, 延伸温度 72℃, 30 s	[12]
NOB	CCTACGGGAGGCAGCAG CGTTATCCTGGGCAGTCCTT	预变性 95℃, 5 min; 变性 95℃, 30 s; 退火温度 58℃, 30 s, 延伸温度 72℃, 30 s	[13]

为了考察启动前后 ANAMMOX、AOB 及 NOB 细菌丰度的变化, 对启动前后的污泥进行了定量 PCR 实验。采用 20 μL 反应体系, 其中包括 0.8 μL 上游引物, 0.8 μL 下游引物, 2 μL 基因组 DNA, 0.4 μL ROX II, 2 μL Dntp, 10 μL EXTaq II, 6 μL 超纯灭菌水。每个样品重复 3 次, 取其平均值。反应程序为: 95℃ 预变性 5 min, 接 40 个循环, 每个循环包括 95℃ 变性 30 s, 57℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 30 s, 最后延伸 5 min。

将提取好的基因组 DNA 采用 PCR 扩增后进行

纯化回收, 提取的 DNA 样品用 0.8% 琼脂糖凝胶电泳进行检测, 然后送入上海生物工程有限公司进行测序, 制作标准品。将制作好的标准品梯度稀释后进行荧光定量 PCR (ABI7500, 美国) 检测, 得到标准曲线。

2 结果与讨论

2.1 CANON 工艺启动阶段氮素的变化

反应器启动初期, 保证污泥能够吸附在生物载体上, 避免污泥流失。控制反应器内 pH 值为 8.0 ±

0.1, 温度为 $33^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 使得 AOB 处于最佳的生存条件, 从而获得稳定的亚硝酸盐积累. 为避免 DO 对 ANAMMOX 菌的影响, 以及亚硝酸氧化菌 (nitrite oxidizing bacteria, NOB) 和 AOB 形成竞争关系, 根据它们的氧半饱和常数不同 (分别为 $2.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 在初期控制反应器中 DO 浓度为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 这样 AOB 活性可以不受影响并充分利用 DO 进行半短程硝化, 而 NOB 活性受到影响从而抑制硝化反应发生.

从氮素变化 (图 2) 可知, 在开始的 10 d, 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度从 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 $350 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别稳定在 40、8、20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总氮去除速率 (NRR) 从 $0.09 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 上升到 $0.45 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 并且发现反应器内污泥有贴壁生长的现象. 在 10 ~ 55 d 进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在 $300 \sim 350 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 先快速增长到 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度只有 25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 此时总氮去除速率为 $0.6 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 反应器内纤维载体和壁上出现红色细小颗粒污泥. 当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度达到 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 不再提升浓度, 通过缩短 HRT 来提升进水负荷. 到 85 d 反应器的 NRR 达到 $0.9 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 左右并能稳定运行, 此时进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 410 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别稳定在 40、30、35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 其中 HRT 为 8 h, 反应器中的 DO 浓度达到了 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在 DO 浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 反应器出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度能够维持在 35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 说明 NOB 并没有处于竞争优势. 由已有报道得知当温度大于 25°C 时, AOB 的生长速率大于 NOB 形成竞争优势^[14], 当 pH 在 8.0

左右时 AOB 与 ANAMMOX 的反应速率最大^[15~17], 本实验控制温度在 33°C 左右, pH 在 8.0 左右, 在此条件下 AOB 对氧的竞争优势大于 NOB.

2.2 CANON 工艺运行效果

反应器的脱氮能力总体来看是一直在稳步上升的, 到稳定阶段总氮去除能力维持在 $0.9 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 左右 (图 3). 在反应器稳定运行一段时间后总氮去除能力开始降低, 但又很快恢复, 这是由于随着运行时间延长, 膜上生物不断生长使得生物膜变厚, 营养基质从膜外传到膜内阻力增大, ANAMMOX 细菌得不到足够的营养基质导致除氮效率降低. 此时, 将反应器中的膜取出, 刮掉表面的一层膜. 在刮下的污泥中发现有一部分泥已经发黑发臭, 这说明膜内有部分微生物因得不到营养基质已经死亡. 刮膜后 3 d NRR 就恢复到原来的 $0.9 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 左右并能够再次稳定运行. 膜内 ANAMMOX 泥没有受到抑制, 只是生物膜变厚, 在膜内的 AOB 菌因接触不到氧而数量减少, 不能产生足够的亚硝酸盐, 使得反应器表现出能力下降的现象. 需要注意的是如果不及时将死亡的污泥清除, 微生物死亡后所产生的有机物及毒素会对反应器内的 AOB 及 ANAMMOX 细菌产生毒害作用, 降低反应器脱氮能力甚至导致反应器系统失稳.

ANAMMOX 菌要实现脱氮功能需要 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 作为基质, 因此反应器中亚硝酸盐的积累也是 CANON 工艺启动过程中一个很重要的参数. 在反应器中亚硝酸盐生成速率 (NPR) 与 NRR 是一样的趋势, 在稳定阶段 NPR 与 NRR 保持稳定, 并占总氮去除速率的 60% 左右 (图 3). 这与 CANON 工艺中保证进水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有 50% ~ 60% 被短程硝化转化为亚硝酸盐, 接着 ANAMMOX 菌利用剩下的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 进行厌氧氨氧化反应实现脱氮效能, 说明此时 CANON 工艺的运行状态良好.

CANON 工艺运行稳定的另一个判定依据就是 $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{TN}$, 当 CANON 工艺运行良好时 $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{TN}$ 的理论值为 0.127. 本实验中 $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{TN}$ 在开始的 10 d 里从一开始的 0.6 左右降到 0.12 左右, 之后就一直稳定在 0.12 左右, 说明在刚开始阶段 NOB 菌在反应器中处于优势, 之后随着控制反应器中的运行条件, NOB 菌被抑制, AOB 和 ANAMMOX 菌处于良好的生存环境. 本实验中 $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{TN}$ 的平均值为 0.133, 较理论值 0.127 及其他研究人员所得的比值均高^[10,18], 这是

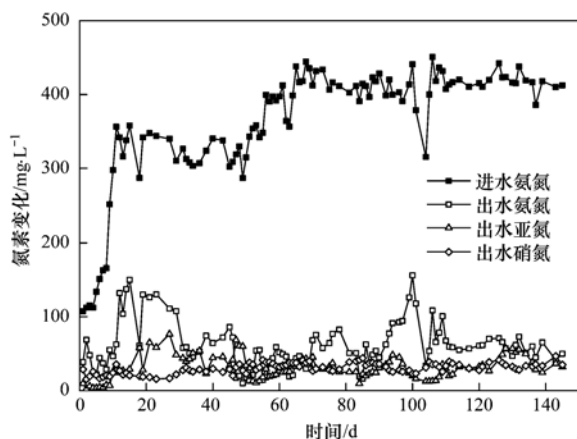


图 2 启动过程中氮素变化

Fig. 2 Variations of nitrogen concentrations during startup

因为反应器中的 DO 浓度达到了 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在高溶解氧下还是存在一定的硝化反应使得出水硝酸盐较理论值偏高.

综上所述, 以纤维载体为填料, 同时接种亚硝化污泥及 ANAMMOX 泥启动 CANON 工艺, 历时 145 d 反应器可成功启动 CANON 工艺. 在启动初期, ANAMMOX 菌并没有受到 DO 的影响. 这是由于纤维载体利于污泥挂膜, 形成生物膜不易流失, 使得 ANAMMOX 泥处于纤维载体内部的厌氧区, 亚硝化泥处于纤维载体表面的好氧区, 快速构成了 CANON 工艺模式. 经过 85d TN 去除负荷达到了 $0.9\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 但随着运行时间增长, 生物膜越长越厚会影响 TN 去除负荷, 需要刮泥, 刮完泥后能很快恢复. 虽然运用纤维载体作为填料启动 CANON 工艺长时间运行时需要刮泥, 但是考虑到它能够快速启动 CANON 工艺, 并且刮下的泥是成熟的 CANON 污泥, 也可以用来处理高氨氮废水. 因此纤维载体有利于快速启动 CANON 工艺.

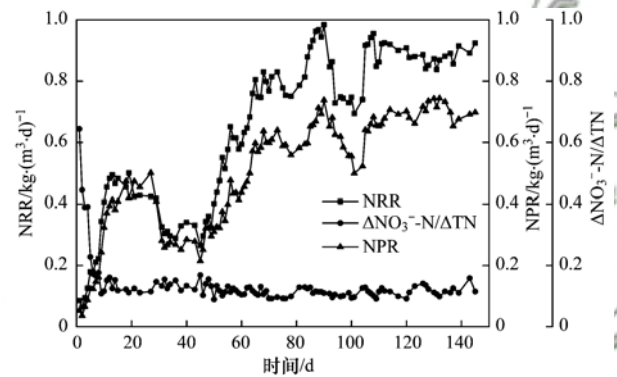


图3 启动过程中速率变化及 $\Delta\text{NO}_3^- \cdot \text{N}/\Delta\text{TN}$
Fig. 3 Speed change and $\Delta\text{NO}_3^- \cdot \text{N}/\Delta\text{TN}$ during startup

2.3 生物膜中 DO 的变化

CANON 是一种 AOB 与 ANAMMOX 菌在同一个反应器内的工艺, AOB 是好氧菌而 ANAMMOX 菌是厌氧菌, 因此 DO 对于 CANON 是一个至关重要的参数. 本实验在后期稳定阶段 DO 达到了 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这与文献 [19 ~ 22] 报道的高 DO 下 CANON 工艺容易脱稳失活, 脱氮过程被抑制有很大的不同, 这可能与生物膜的厚度有关. 本实验所用的纤维载体填料, 这种填料利于生物体吸附从而促进生物膜生长, 使得膜内外 DO 梯度明显. 生物膜变厚, 原先的好氧区会变成厌氧区, 导致好氧微生物量减少, 因此需要提高 DO 浓度来提高氧对生物膜的穿透力^[23~25]. 但生物膜的内部还是处于厌氧状态, ANAMMOX 菌不会受到 DO 的影响. 为验

证这一猜想, 采用微电极测定生物膜由表及里的 DO 的变化. 取小部分膜测定 DO 变化, 结果如图 4 所示. 从中可以看出, 生物膜的表面处于缺氧状态, 随着生物膜厚度增加, DO 不断下降, 在距离生物膜表面 $1\,000\text{ }\mu\text{m}$ 处 DO 几乎为 0. 这符合 CANON 工艺形成状态, 厌氧菌由好氧菌包裹, 在膜内部形成适合厌氧菌生存的厌氧环境. 为了让 CANON 工艺处于良好的运行状态, 生物膜厚度与 DO 之间要匹配恰当.

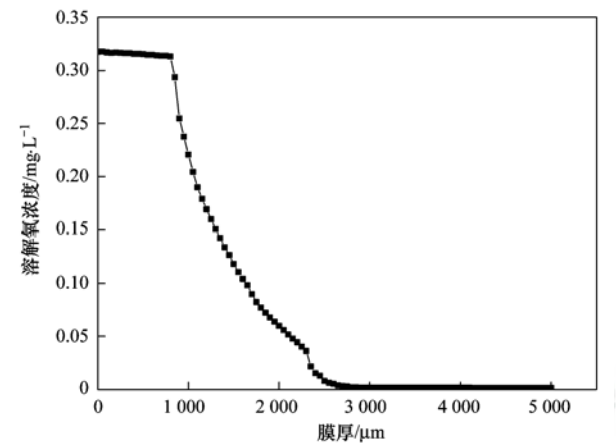


图4 生物膜内 DO 变化
Fig. 4 DO change in the biomembrane

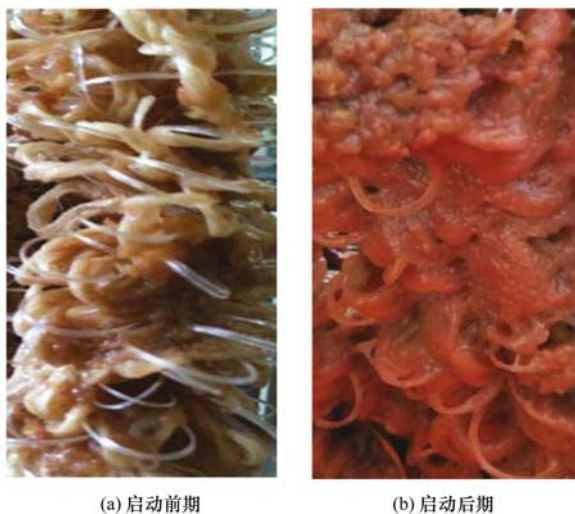
2.4 菌群的丰度

本实验还通过定量 PCR 研究了各阶段反应器内 AOB、ANAMMOX 和 NOB 的丰度, 如表 2 所示. 结果表明, 随着反应器中微生物的生长, 反应器内 ANAMMOX 菌和 AOB 均有较大增长, NOB 的丰度一直维持在较低的水平, 其中 ANAMMOX 菌的丰度增长了一个数量级, AOB 的丰度增长了 2 倍. 主要脱氮菌 AOB 和 ANAMMOX 菌都有所增长, 系统能够维持良好的脱氮能力(图 3). 根据文献得知, CANON 反应器中 NOB 的过量增殖会改变系统的脱氮途径, 使反应器的总氮去除能力下降, 这是 CANON 反应器崩溃的主要原因之一. 在本实验中可以看到 NOB 一直维持在较低的水平, 这样短程硝化-厌氧氨氧化是主要的脱氮途径, 并且运行良好. 从挂膜前后生物载体上泥的形状也可以看出 ANAMMOX 菌的增长, 在稳定阶段的生物载体上挂

表2 实验各阶段反应器内菌群丰度(平均值)/copies·g⁻¹

阶段	Abundance of microbial communities in each phase (average)/copies·g ⁻¹		
	ANAMMOX	AOB	NOB
刚开始	2.3 E + 10	1.9 E + 10	3.6 E + 9
能力上升	3.7 E + 10	3.8 E + 10	3.1 E + 9
稳定	1.81 E + 11	3.9 E + 10	3.7 E + 9

满了红色的生物膜(图5),这是 ANAMMOX 菌的典型特征之一。



(a) 启动前期

(b) 启动后期

图5 启动前后生物膜变化

Fig. 5 Biofilm changes before and after startup

3 结论

(1)以纤维载体为填料,同时接种亚硝化污泥和 ANAMMOX 泥,控制 pH、温度分别在 8.0, 33℃ 左右,在初始 DO 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下可成功启动 CANON 工艺. 启动初期也有总氮损失,说明 ANAMMOX 泥在膜内并没有受到 DO 的影响,并在膜内快速富集,很快由原来灰褐色变成了 ANAMMOX 泥典型的红色特征.

(2)随着生物膜越长越厚,反应器所需的 DO 也越来越高,从最初的 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提升至 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 为防止膜内微生物死亡,需要及时刮泥.

(3)通过定量 PCR 技术分析得出纤维载体填料有利于 ANAMMOX 泥的富集生长. 在适宜的条件下,ANAMMOX 菌的丰度很快就能比原来多一个数量级. 同时控制合理的 pH 及温度可以很好地抑制 NOB 生长.

参考文献:

- [1] Zhang L, Yang J C, Furukawa K. Stable and high-rate nitrogen removal from reject water by partial nitrification and subsequent anammox[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2010, **110**(4): 441-448.
- [2] 陈旭良, 郑平, 金仁村, 等. 味精废水厌氧氨氧化生物脱氮的研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(5): 747-752.
Chen X L, Zheng P, Jin R C, *et al.* Biological nitrogen removal from monosodium glutamate-containing industrial wastewater with the Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(5): 747-752.
- [3] Kuenen J G. Anammox bacteria: from discovery to application[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, **6**(4): 320-326.
- [4] Wang Z, Peng Y Z, Miao L, *et al.* Continuous-flow combined process of nitrification and ANAMMOX for treatment of landfill leachate[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **214**: 514-519.
- [5] Joss A, Salzgeber D, Eugster J, *et al.* Full-scale nitrogen removal from digester liquid with partial nitrification and ANAMMOX in one SBR [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(14): 5301-5306.
- [6] Sliekers A O, Derwort N, Gomez J L C, *et al.* Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2475-2482.
- [7] 左早荣. 全程自养脱氮工艺性能优化研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2014.
Zuo Z R. Full autotrophic denitrification process performance optimization research [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2014.
- [8] 付昆明. 全程自养脱氮(CANON)反应器的启动及其脱氮性能[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
Fu K M. Start-up and performance of nitrogen removal of CANON reactor[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.
- [9] 赵旭飞, 龚逸, 赖玮毅, 等. 不同载体材料对厌氧氨氧化效果影响的研究[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(10): 120-124.
Zhao X F, Gong Y, Lai W Y, *et al.* Effect of different carriers on anaerobic ammonium oxidation process [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(10): 120-124.
- [10] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. 改性聚乙烯填料 CANON 反应器的启动与运行[J]. *化工学报*, 2014, **65**(11): 4406-4412.
Fu K M, Zhang J, Cao X S, *et al.* Start-up of CANON reactor with modified polyethylene carrier and its performance [J]. *CIESC Journal*, 2014, **65**(11): 4406-4412.
- [11] Li X R, Du B, Fu H X, *et al.* The bacterial diversity in an anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) reactor community [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2009, **32**(4): 278-289.
- [12] Kowalchuk G A, Stephen J R, De Boer W, *et al.* Analysis of ammonia-oxidizing bacteria of the beta subdivision of the class Proteobacteria in coastal sand dunes by denaturing gradient gel electrophoresis and sequencing of PCR-amplified 16S ribosomal DNA fragments[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(4): 1489-1497.
- [13] Dionisi H M, Layton A C, Harms G, *et al.* Quantification of *Nitrosomonas oligotropha*-like ammonia-oxidizing bacteria and *Nitrospira* spp. from full-scale wastewater treatment plants by competitive PCR[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(1): 245-253.
- [14] Hellings C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al.* The sharon process: An innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(9): 135-142.
- [15] 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.
Ge S J, Wang S Y, Yang A M, *et al.* Analysis of nitrite accumulation during denitrification [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2011, **33**(1): 140-146.
- [16] Strous M, Pelletier E, Mangenot S, *et al.* Deciphering the

- evolution and metabolism of an anammox bacterium from a community genome[J]. *Nature*, 2006, **440**(7085): 790-794.
- [17] 秦宇, 方芳, 郭劲松. pH 值对 SBBR 自养脱氮系统效能及功能菌数量的影响[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(17): 36-39.
- Qin Y, Fang F, Guo J S. Effect of pH on SBBR autotrophic nitrogen removal process[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, **28**(17): 36-39.
- [18] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. 好氧条件下 CANON 工艺的启动研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1689-1694.
- Fu K M, Zhang J, Cao X S, *et al.* Study of CANON process start-up under aerobic conditions [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(6): 1689-1694.
- [19] Wantawin C, Juathea J, Noophan P L, *et al.* Autotrophic nitrogen removal in sequencing batch biofilm reactors at different oxygen supply modes[J]. *Water Science and Technology*, 2008, **58**(10): 1889-1894.
- [20] 杨虹, 李道荣, 朱章玉. 全程自养脱氮氨悬浮填料床反应器性能的研究[J]. *上海环境科学*, 2001, **20**(8): 369-371.
- Yang H, Li D T, Zhu Z Y. Study on the character of carrier-suspending bed reactor for autotrophic ammonia removal [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2001, **20**(8): 369-371.
- [21] 郭劲松, 董俐, 方芳, 等. 单级自养脱氮系统运行周期内的 DO 变化研究[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(3): 47-51.
- Guo J S, Dong L, Fang F, *et al.* Research on variation rule of DO in onestage completely autotrophic nitrogen removal system [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, **28**(3): 47-51.
- [22] 李冬, 崔少明, 梁瑜海, 等. 溶解氧对序批式全程自养脱氮工艺运行的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1131-1138.
- Li D, Cui S M, Liang Y H, *et al.* The effect of dissolved oxygen on running CANON process in sequencing batch reactor [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1131-1138.
- [23] 郑桂林, 张朝升, 曹勇锋, 等. DO 在 SBBR 生物膜中传递及对同步硝化反硝化的影响[J]. *中国给水排水*, 2016, (3): 22-26.
- Zheng G L, Zhang C S, Cao Y F, *et al.* Transfer of DO in biofilm and effect of DO on simultaneous nitrification and denitrification in sequencing batch biofilm reactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, (3): 22-26.
- [24] 赵丽敏, 张朝升, 曹勇锋, 等. DO 对 PU 填料系统脱氮功能菌数量的影响[J]. *中国给水排水*, 2017, **33**(3): 1-6.
- Zhao L M, Zhang C S, Cao Y F, *et al.* Effect of dissolved oxygen on amount of functional bacteria for nitrogen removal in polyurethane filler system [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, **33**(3): 1-6.
- [25] 荣宏伟, 李权斌, 张朝升, 等. DO 对生物膜 SND 脱氮及 N_2O 产量的影响[J]. *广州大学学报(自然科学版)*, 2016, **15**(3): 43-47.
- Rong H W, Li Q B, Zhang C S, *et al.* Effects of DO on SND and the N_2O production in biofilm reactor [J]. *Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)*, 2016, **15**(3): 43-47.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> (990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> (997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> (1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> (1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> (1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang (1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> (1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> (1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> (1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> (1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> (1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria natans</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> (1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> (1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> (1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> (1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> (1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen (1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng (1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Floc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> (1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> (1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the USB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LU Yu-feng, <i>et al.</i> (1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> (1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> (1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> (1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> (1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> (1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> (1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> (1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> (1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> (1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> (1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> (1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> (1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> (1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua (1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> (1438)