

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周姗, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动

张婷¹, 吴鹏^{1,2,3}, 沈耀良^{1,2,3}, 闫刚¹, 徐乐中^{1,2,3*}, Samwine Thomas¹

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 为实现短程硝化的快速启动, 采用完全混合反应器 (CSTR) 和膜生物反应器 (MBR) 进行短程硝化启动性能对比研究, 考察两个反应器在启动时间、氮素转化和污泥性能 3 个方面的差异. 结果表明在进水 C/N = 1, 温度为 30℃ ± 1℃, pH 为 7.5 ~ 8.0, DO 为 0.6 ~ 1.0 mg·L⁻¹, 结合缺氧/好氧比为 1:3 (15 min:45 min) 和缩短 HRT, CSTR 和 MBR 分别运行 56 d 和 44 d 成功启动短程硝化, MBR 启动周期较短. 运行至第 14 d、第 28 d 和第 56 d 时, CSTR 和 MBR 亚硝累积率平均为 51%、66%、89% 和 50%、71%、93%, 硝酸盐氮生成速率 (以 NO₃⁻-N/MLVSS 计) 依次为 7.4、4.0、1.7 和 7.6、3.5、1.0 mg·(g·h)⁻¹, MBR 在第 28 d 和第 56 d 表现出较高的亚硝累积率和较低的 NO₃⁻-N 产率, 有利于短程硝化的快速启动. 整个运行过程中, 两个反应器内的亚硝化污泥均呈黄色, SVI 在 55 ~ 110 mL·g⁻¹, MLVSS/MLSS 稳定在 0.6 ~ 0.8 左右, 良好的污泥性能为 CSTR 和 MBR 短程硝化的快速启动创造了有利条件. MBR 在短程硝化快速启动中展现出更明显的优势.

关键词: 短程硝化; 完全混合反应器; 膜生物反应器; 快速启动; 间歇曝气

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3399-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701080

Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR

ZHANG Ting¹, WU Peng^{1,2,3}, SHEN Yao-liang^{1,2,3}, LÜ Gang¹, XU Yue-zhong^{1,2,3*}, Samwine Thomas¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou 215009, China)

Abstract: In order to achieve fast start-up of shortcut nitrification, a continuous stirred tank reactor (CSTR) and a membrane bioreactor (MBR) were selected for a comparative study about the start-up characteristic of shortcut nitrification. The differences in three aspects of the two reactors were investigated, namely start-up time, nitrogen transformation, and sludge performance. The results showed that the start-up of shortcut nitrification was successfully achieved in the CSTR and MBR after 44 and 56 days of operation, respectively, with influent C/N = 1, temperature around 30℃ ± 1℃, pH of 7.5-8.0, and dissolved oxygen (DO) of 0.6-1.0 mg·L⁻¹, as well as combining anoxic/aerobic ratio 1:3 (15 min:45 min) with shortened hydraulic retention time (HRT). The start-up period of the MBR was shorter. On the 14th, 28th, and 56th day, the average nitrite accumulation efficiencies in the CSTR were 51%, 66%, and 89%, respectively, and 50%, 71%, and 93% in the MBR, and nitrate formation rates of the CSTR was successively 7.4, 4.0, and 1.7 mg·(g·h)⁻¹ (NO₃⁻-N/MLVSS), respectively, and 7.6, 3.5, and 1.0 mg·(g·h)⁻¹ (NO₃⁻-N/MLVSS) for the MBR. A higher nitrite accumulation efficiency and a lower nitrate formation rate were detected in the MBR on the 28th and 56th day, respectively, which could be beneficial to the fast start-up of shortcut nitrification. During the operation period, the shortcut nitrification sludge in the two reactors was yellow, the sludge volume index (SVI) was between 55 and 110 mL·g⁻¹, and the mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS)/mixed liquor suspended solids (MLSS) ratio was around 0.6-0.8. The good sludge performance created favorable conditions for the fast start-up of shortcut nitrification in both the CSTR and MBR. In conclusion, the MBR exhibited better performance in the fast start-up of shortcut nitrification.

Key words: shortcut nitrification; continuous stirred tank reactor (CSTR); membrane bioreactor (MBR); fast start-up; intermittent aeration

相比传统的全程硝化, 短程硝化具有节省 25% 曝气量和 30% 反应时间的优势^[1]. 同时, 短程硝化作为前置工艺, 耦合厌氧氨氧化可以经济脱氮^[2], 协同反硝化可以高效除磷^[3], 应用范围较广. 如何快速稳定地实现短程硝化, 一直是国内外学者研究的重点^[4,5]. 目前, 柱形 SBR 反应器是公认快速启动短程硝化的理想反应器, 其独特的运行模式创造了贫/富营养交替选择机制, 较强的物理选择压有助

于污泥颗粒化形成^[6]. 然而, 柱形 SBR 较高的运行基建费用、复杂的操作控制和严格的高径比要求成

收稿日期: 2017-01-11; 修订日期: 2017-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578353); 江苏省自然科学基金项目 (BK20160356); 江苏高校优势学科建设工程项目; 环境工程江苏省重点专业类项目; 江苏省高校自然科学基金研究项目 (16KJB610013); 苏州科技学院科研基金青年项目 (XKQ201504)

作者简介: 张婷 (1993 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理与回用, E-mail: zt70919@163.com

* 通信作者, E-mail: kgre505@163.com

为了推进短程硝化工业化道路上的难题. 研究报道,气升式反应器^[7,8]、推流式反应器^[9,10]和上流式厌氧污泥床反应器(UASB)^[11,12]等均能成功启动短程硝化. 但是,在这些系统中,随着出水均会不可避免的造成一部分微生物的流失,尤其是当系统处在不稳定阶段. 如负荷过低引起污泥膨胀,出水会携带较多活性污泥,导致出水水质急速恶化. 此外,氨氧化菌(AOB)生长速率缓慢、自固定能力弱和对外界环境敏感^[13],增大了短程硝化快速启动的难度. 故探寻一种经济合适、快速启动短程硝化的生物反应器显得十分必要.

完全混合反应器(CSTR)结构简单、操作方便,常被采用实现 SHARON 工艺^[14],是传统活性污泥法的典型代表. 膜生物反应器(MBR)较之传统生物反应器具有占地面积小、容积负荷高和剩余污泥量低等优势^[15],且膜过滤出水的运行方式可实现系统污泥的高效截留,有利于富集生长缓慢的 AOB,减少短程硝化的启动时间. 本研究选用 CSTR 和 MBR 反应器,接种同种硝化污泥启动短程硝化,对比两个反应器短程硝化启动过程中启动时间、氮素转化、污泥性能等方面的差异,进一步探究 CSTR 和 MBR 反应器在短程硝化启动过程中所具备的特性,以期快速启动短程硝化反应器的选型提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行条件

试验所采用的 CSTR(图 1)与 MBR(图 2)反应器均由有机玻璃制成. CSTR 反应器长 20 cm,宽 8 cm,有效高度 24 cm,包括曝气池和沉淀池两部分,有效容积分别为 1.9 L 和 0.7 L. 采用蠕动泵连续进水,溢流出水. MBR 反应器长 10 cm,宽 8 cm,有效高度 24 cm,有效容积为 1.9 L. 采用蠕动泵连续进水,经中空纤维微滤膜抽吸连续出水. 两个反应器底部采用曝气砂头供气,DO 控制在 0.6 ~ 1.0 mg·L⁻¹. 两个反应器均放置于水浴缸中,保持运行温度在 30℃ ± 1℃. CSTR 和 MBR 具体运行条件见表 1.

表 1 CSTR 和 MBR 具体运行情况

Table 1 Concrete operation of the CSTR and MBR			
阶段	运行时间/d	缺氧/好氧比	HRT/h
I	1 ~ 14	0:1	5
II	15 ~ 28	1:3	5
III	29 ~ 42	1:3	4
IV	43 ~ 56	1:3	3

1.2 接种污泥

本试验接种污泥取自苏州市某污水厂 A²/O 工

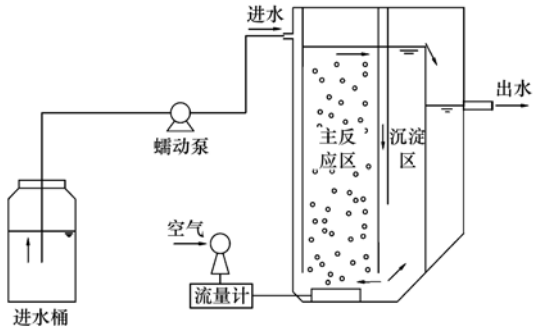


图 1 CSTR 反应器装置示意

Fig. 1 Schematic of the continuous stirred tank reactor

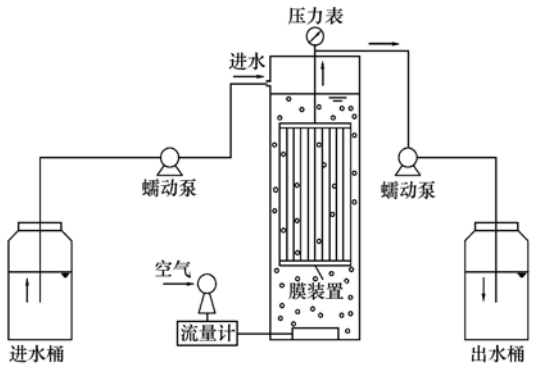


图 2 MBR 反应器装置示意

Fig. 2 Schematic of the membrane bioreactor

艺的硝化污泥, CSTR 和 MBR 反应器接种污泥浓度为 3 500 mg·L⁻¹ 左右, SVI 分别为 59 mL·g⁻¹ 和 62 mL·g⁻¹, 沉降性能良好. 两个反应器控制 SRT 为 30 d, 定期排泥.

1.3 试验进水

CSTR 与 MBR 试验进水相同, 均采用人工配水. 以乙酸钠作为有机碳源, 氯化铵作为氮源, 磷酸二氢钾作为磷源, 碳酸氢钠提供碱度, 调节进水 COD、NH₄⁺-N、TP 浓度和 pH 值, 并添加硫酸镁、氯化钙等生物所需营养元素及其他微量元素, 具体含量见表 2. 整个试验运行过程中, 两个反应器 pH 值均控制在 7.5 ~ 8.0.

表 2 人工配水的水质特征

Table 2 Characteristics of the synthetic wastewater

组分	质量浓度 /mg·L ⁻¹	组分	质量浓度 /mg·L ⁻¹
COD	130 ~ 160	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.15
NH ₄ ⁺ -N	140 ~ 160	MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.12
TP	4 ~ 6	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.12
MgSO ₄	10	NaMoO ₄ ·2H ₂ O	0.06
CaCl ₂	10	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.03
FeCl ₃ ·6H ₂ O	1.5	KI	0.03
H ₃ BO ₃	0.1	NaHCO ₃	根据实际情况添加

1.4 分析方法

试验过程中每隔 1 d 取水样测定, 测定项目主

要包括^[16]: $\text{NH}_4^+ \text{-N}$; 纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^- \text{-N}$; N -(1-萘基)-乙二胺分光光度法; $\text{NO}_3^- \text{-N}$; 紫外分光光度法; COD; 密闭消解-分光光度法; TN; 过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; MLSS、MLVSS; 标准重量法; SVI; 30 min 沉降法; pH; pHs-9V 数显酸度计; 溶解氧; YSI550A 溶氧仪。

当反应器出水水质稳定运行状态下时,通过批次试验测定该周期内氮素转化规律。具体方法为:将反应器静置吸出上清液,换入进水至有效容积,放置于水浴缸中。在停止进出水的条件下进行曝气,曝气时保持水中 DO 为 $0.6 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,曝气时间与反应器在该阶段运行条件一致,每 15 min 取样测定水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度。

2 结果与讨论

2.1 短程硝化快速启动

2.1.1 CSTR 反应器启动过程

CSTR 反应器在进水 COD 浓度为 $130 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度为 $140 \sim 160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 控制为 $7.5 \sim 8.0$, DO 浓度为 $0.6 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 通过调控缺氧/好氧比为 1:3 (15 min: 45 min) 和逐步缩短 HRT 的方式,运行 56 d,亚硝累积率连续 7 d 稳定在 85% 以上,作为短程硝化启动成功的标志。

反应器进出水水质如图 3 所示,经过 56 d 的运行可以获得稳定的短程硝化,整个培养过程分为 4 个阶段。在阶段 I (1~14 d) 时,通过连续曝气的运行方式,经过 14 d 的驯化,反应器出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度逐渐减少,氨氮去除率从起初的 28% 上升到最高值 97%,表明氨氧化菌的活性逐渐增强。值得一提的是,反应器至第 10 d,出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 呈减少趋势且出水

$\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在第 14 d 高达 $76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亚硝累积率降至 50%。分析原因是随着出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度的减少,游离氨的抑制作用逐渐减弱, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 呈上升趋势。

阶段 II (15~28 d) 采用缺氧/好氧比 1:3 (15 min: 45 min) 间歇曝气的运行方式,且反应器在停止曝气 10 min 后 DO 降至为零。至第 24 d 时,氨氮去除率回升至 93%, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度达 $93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度降至 $43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亚硝累积率为 68%。说明缺氧/好氧交替的运行方式有效抑制了硝态氮,有利于短程硝化的实现^[17]。这是由于在缺氧环境下 AOB 的活性受到抑制,氨氧化过程受阻,而一旦恢复曝气,经历长期“饥饿”的 AOB 可以更多地利用氨产能,使其自身大量增殖,此即 AOB 的“饱食饥饿”特性,而 NOB 不具有此种特性^[18]。从图 4 可知, TN 去除率平均为 3%。推测反应器内发生了同化或反硝化作用,由于缺少相关试验数据论证,具体原因不再进行解释。

阶段 III (29~42 d) 和阶段 IV (43~56 d) 分别在缺氧/好氧比 1:3 (15 min: 45 min) 运行条件下,缩短 HRT 至 4 h 和 3 h。在出水水质稳定状态下,阶段 III 和阶段 IV 氨氮去除率分别为 89% 和 85% 左右。表明随着 HRT 的缩短,氨氮去除率逐渐降低。运行至第 38 d,出水硝态氮浓度为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亚硝累积率达 80%; 第 54 d, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度减至 $11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亚硝累积率达 91%,成功启动短程硝化。采用间歇曝气可以抑制 NOB 活性,缩短 HRT 可以淘洗 NOB 数量,两者结合使得 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 不断累积,快速实现短程硝化^[19]。

此外,试验发现维持 $\text{C/N} = 1$ 有助于快速实现短程硝化。钱飞跃等^[20] 在 SBR 反应器内调控 $\text{C/N} = 1$,成功培养出具备短程亚硝化功能的颗粒污泥,出水亚硝累积率稳定在 94%~99%; Wu 等^[21] 在 4 个相同的 SBR 反应器内分别以 C/N 为 0、1、2 和 4 培养好氧颗粒污泥,发现以 $\text{C/N} = 1$ 成功实现颗粒化,且反应器内平均亚硝化速率(以 N/MLVSS 计)达 $0.019 \text{ mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$,通过荧光原位杂交技术观测到大量的硝化细菌菌种。这些报道均表明维持 $\text{C/N} = 1$ 有利于富集 AOB,加速短程硝化的启动,与本文观点一致。

2.1.2 MBR 反应器启动过程

MBR 与 CSTR 反应器进水水质和调控方式相同,两个反应器平行运行。MBR 反应器运行至第 44 d,亚硝累积率连续 7 d 稳定在 85% 以上,这表明成

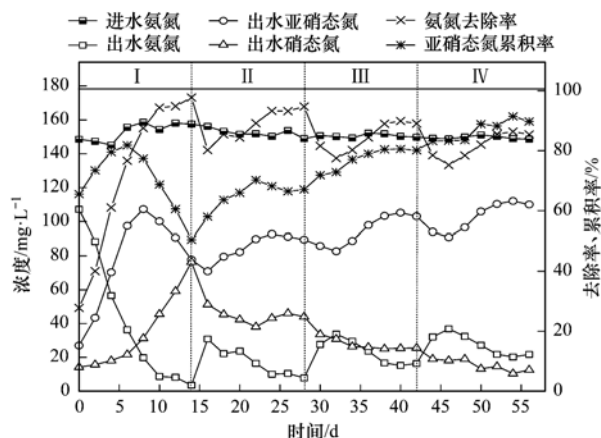


图 3 CSTR 启动阶段进出水参数变化

Fig. 3 Changes of influent and effluent parameters in the start-up stage of the CSTR

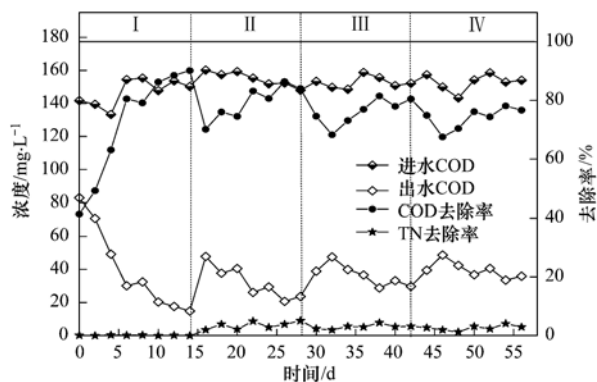


图4 CSTR中TN及COD进出水变化

Fig. 4 Changes of TN and COD in the influent and effluent of the CSTR

功启动短程硝化. 相比于巫恺澄等^[22] 45 d 亚硝累积率达 80% 的启动时间短, 亚硝累积率高.

根据 MBR 启动阶段进出水参数变化(图 5)可知, MBR 反应器的启动特征和 CSTR 反应器基本相似, 都经历了上述 4 个阶段. 相比于 CSTR 反应器, MBR 反应器在 4 个阶段都表现出更高的氨氮去除率. 在阶段 IV 稳定运行期内, MBR 氨氮平均去除负荷 $[1.057 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}]$ 明显高于 CSTR 氨氮平均去除负荷 $[1.024 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}]$. 说明 CSTR 反应器在淘洗 NOB 的同时造成了 AOB 数量的减少, 而 MBR 的完全截留作用避免了 AOB 的流失, 提高了氨氮去除负荷.

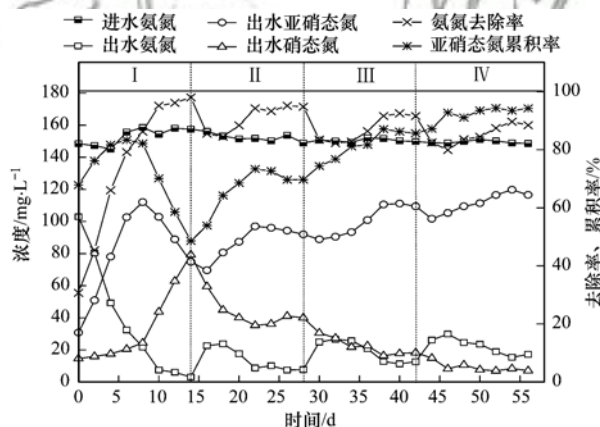


图5 MBR启动阶段进出水参数变化

Fig. 5 Changes of influent and effluent parameters in the start-up stage of the MBR

对比图 4 和图 6, 发现 MBR 反应器 TN 平均去除率为 5%, 高于 CSTR 反应器. 这是由于 MBR 反应器上存在 DO 浓度梯度, 导致好氧、缺氧和厌氧共存在一个系统内, 产生了同步硝化反硝化^[23]. 同样从图 3 和图 5 可以看出, MBR 反应器相比于 CSTR 反应器表现出较高的亚硝累积率和较低的确

态产率. 一方面是因为 MBR 反应器内富集了更多的 AOB, 通过硝化作用产生的 NO_2^- -N 较多, 且 NOB 经淘洗数量大幅减少; 另一方面 MBR 反应器内反硝化程度更高, 研究表明^[18] 反硝化消耗 NO_3^- -N, 且在碳源不足的情况下, 反硝化只能进行到亚硝酸盐阶段.

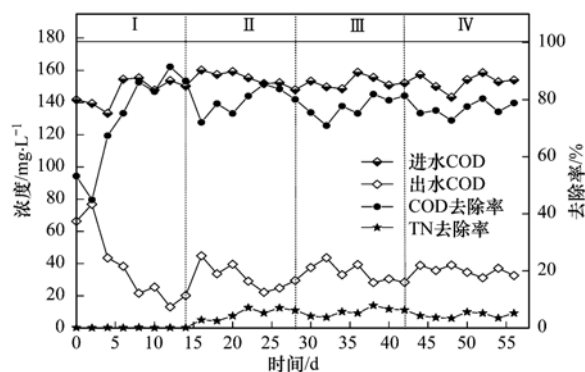


图6 MBR中TN及COD进出水变化

Fig. 6 Changes of TN and COD in the influent and effluent of the MBR

2.2 氮素转化规律分析

本试验在 CSTR 和 MBR 反应器运行至第 14、28 和 56 d 时进行了批次试验, 分析两个反应器在启动不同阶段的氮素转化规律. 结果如图 7.

图 7(a) 和 7(b) 分别为 CSTR 和 MBR 反应器运行第 14 d 时, NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 在连续曝气条件下运行 5 个周期的变化情况. 从中可知, 随着不断曝气 NH_4^+ -N 浓度逐渐降低, CSTR 和 MBR 反应器分别在 225 min 和 210 min 时 NH_4^+ -N 浓度降至 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 说明两个反应器内 AOB 活性逐渐增强, 且 MBR 反应器内 AOB 活性较好. CSTR 和 MBR 反应器在 240 min、225 min 前亚硝累积率均稳定在 50% 左右, 之后 NO_2^- -N 浓度逐渐降低, NO_3^- -N 分别上升至 $84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这是因为当反应器内存在少量 NH_4^+ -N 时, 不断曝气会造成亚硝酸盐氧化转变为硝酸盐, 可见连续曝气不利于 NO_2^- -N 的积累. 运行 5 个周期, CSTR 和 MBR 反应器硝酸盐氮生成速率 (以 NO_3^- -N/MLVSS 计) 分别为 $7.4 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $7.6 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 亚硝累积率平均为 51% 和 50%.

图 7(c) 和 7(d) 分别为 CSTR 和 MBR 反应器运行第 28 d 时, NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 在缺氧/好氧比 1:3 (15 min: 45 min) 条件下运行 5 个周期的变化情况. 从中可知, 在停曝阶段 NH_4^+ -N 去除速率较曝气阶段降低, 整个反应周期 CSTR 和 MBR 反应器氨氮去除率仍可达 94% 和 95%. 由于停曝 10 min

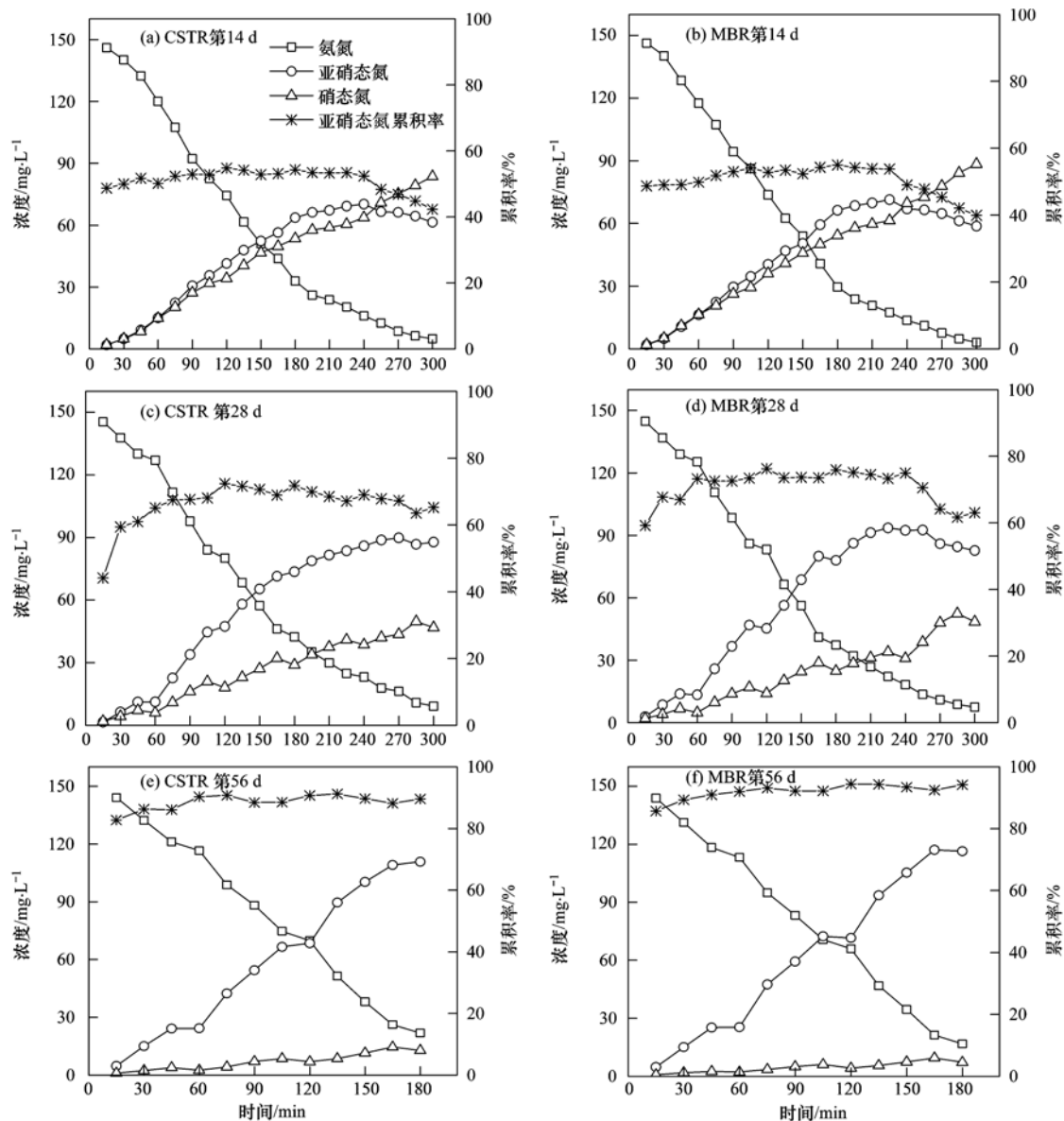


图7 CSTR 和 MBR 不同阶段氮素转化

Fig. 7 Nitrogen transformation for different stages of the CSTR and MBR

左右 DO 才完全降为零, AOB 对 DO 的亲和能力高于 NOB, 在低氧环境下 AOB 增殖速率加快, 补偿低氧所造成的代谢活动下降, 使得亚硝酸盐大量累积, 而 NOB 会受到明显抑制^[24]. 在间歇曝气条件下运行 5 个周期, CSTR 和 MBR 反应器亚硝累积率平均为 66% 和 71%, 硝酸盐氮生成速率 (以 $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{MLVSS}$ 计) 分别降至 $4.0 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $3.5 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 表明间歇曝气的方式有效抑制了 NOB 的活性, 但两个反应器出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度仍较高. 一方面反应器内 NOB 依旧存在, 曝气阶段产生大量 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 另一方面 HRT 过长会使反应器内 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 不断累积.

图 7(e) 和 7(f) 分别为 CSTR 和 MBR 反应器运

行第 56 d 时, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在缺氧/好氧比 1:3 (15 min: 45 min) 条件下运行 3 个周期的变化情况. 经过 3 h 的运行, CSTR 和 MBR 反应器氨氮去除率分别为 85% 和 89%, 相比第 28 d 的要低, 说明缩短 HRT 会使氨氮去除率降低. 随着 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度的降低, CSTR 和 MBR 反应器内 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 呈逐步上升趋势, 亚硝累积率平均可达 89% 和 93%, 出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为 $13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由此可见, 两个反应器均成功启动了短程硝化, 且 MBR 反应器亚硝累积率高, 出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度低. 此外, CSTR 和 MBR 反应器硝酸盐氮生成速率 (以 $\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{MLVSS}$ 计) 分别为 $1.7 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $1.0 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 较之第 14 d 和第 28 d 的显著降低, 表明结合间歇曝气和缩

短 HRT 的方式可以有效抑制 NOB.

2.3 污泥性能

2.3.1 污泥颜色

两个反应器中污泥颜色从刚接种的灰褐色,通过连续曝气 14 d 后逐渐变为黄褐色,最

后成功启动短程硝化时,污泥颜色均为黄色(图 8). 刘文如等^[25]接种絮状好氧污泥,采用 SBR 反应器以人工配置低 C/N 比为 2 的废水培养,获得黄色的亚硝化颗粒污泥,此结论与本文的研究一致.

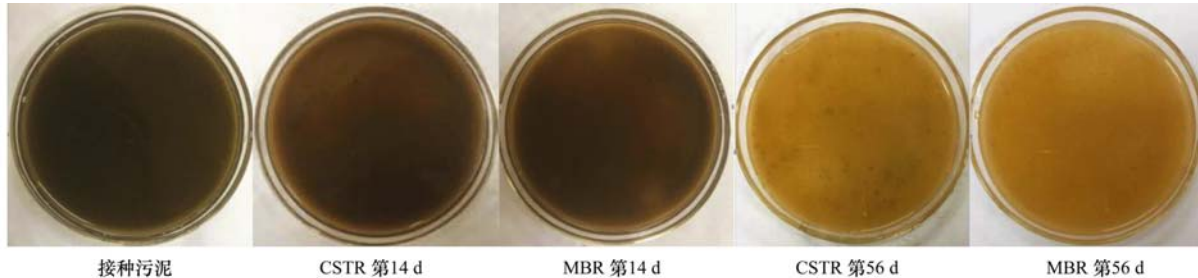


图 8 CSTR 和 MBR 不同阶段污泥颜色

Fig. 8 Color of the sludge in different stages of CSTR and MBR

2.3.2 SVI 和 MLVSS/MLSS

阶段 I 两个反应器内污泥 SVI 较低,在 $55 \sim 62 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 范围内波动. 这与连续曝气条件下,丝状菌与 AOB 和 NOB 的竞争处于劣势有关. 阶段 II 至阶段 IV,两个反应器内 SVI 均呈逐渐上升的趋势(图 9). 分析亚硝酸盐的积累是引起 SVI 变化的主要原因^[26],有研究发现亚硝酸盐能刺激菌胶团菌所分泌的胞外聚合物中多糖比例增加^[27],引起菌胶团菌贮存能力降低,使得丝状菌在底物竞争中占优势,导致污泥沉降性能变差. 同时,丝状菌的氧饱和常数很低^[28],在缺氧环境下与 AOB 和 NOB 竞争加剧. 此外,发现 CSTR 反应器 SVI 值在 III、IV 阶段较 MBR 增长缓慢,这是因为缩短 HRT 可以使沉降性能较差的污泥淘洗出反应器. 两个反应器的 MLVSS/MLSS 从 0.6 逐步增长至 0.8 左右并趋于稳定,且 MBR 反应器的 MLVSS/MLSS 值较大,分析是因为 MBR 的完全截留作用避免了微生物的流失,使得反应器内微生物数量较多.

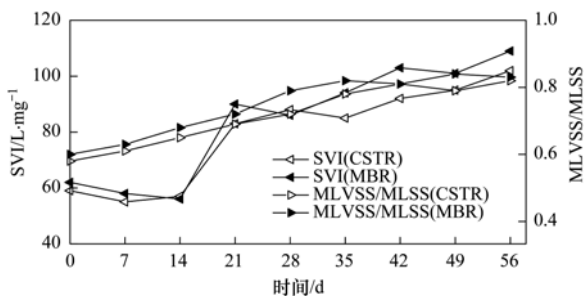


图 9 CSTR 和 MBR 中 SVI、MLVSS/MLSS 的变化

Fig. 9 Variations of SVI and MLVSS/MLSS in the CSTR and MBR

3 结论

(1)控制温度 $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、pH 7.5 ~ 8.0 和 DO

$0.6 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,协同间歇曝气和缩短 HRT,CSTR 和 MBR 反应器分别经过 56 d 和 44 d 成功启动短程硝化,突显 MBR 具有快速启动短程硝化的特性.

(2)运行至第 56 d 时,MBR 和 CSTR 反应器亚硝累积率平均可达 93% 和 89%,硝酸盐氮生成速率(以 $\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{MLVSS}$ 计)仅为 $1.0 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $1.7 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,较之第 14 d、第 28 d 的 7.6、3.5 和 7.4、 $4.0 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 显著减小,可见两个反应器均成功启动短程硝化,且 MBR 反应器亚硝累积率更高, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 产率更低,有助于短程硝化的快速启动.

(3)整个运行过程中,两个反应器 SVI 值稳定在 $55 \sim 110 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,MLVSS/MLSS 在 $0.6 \sim 0.8$ 范围内波动,确保了 CSTR 和 MBR 反应器短程硝化的快速启动.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,等. ABR 工艺 ANAMMOX 耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 3108-3113.
Wu P, Zhang S Y, Song Y L, et al. Nitrogen removal of municipal wastewater by ANAMMOX coupled shortcut nitrification in anaerobic baffled reactor [J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 3108-3113.
- [3] 程继辉,吴鹏,程朝阳,等. 基于优质碳源提供的 CAMBR 复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4539-4545.
Cheng J H, Wu P, Cheng C Y, et al. Shortcut nitrosation-denitrifying phosphorus removal based on high-quality carbon source in combined process of CAMBR [J]. Environmental Science, 2015, 36(12): 4539-4545.
- [4] 孙迎雪,徐栋,田媛,等. 短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3501-3506.

- Sun Y X, Xu D, Tian Y, *et al.* Mechanism of nitrogen removal by partial nitrification-denitrification biological filter [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3501-3506.
- [5] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences-an application survey [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 292-303.
- [6] Jungles M K, Campos J L, Costa R H R. Sequencing batch reactor operation for treating wastewater with aerobic granular sludge[J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2014, **31**(1): 27-33.
- [7] Jin R C, Xing B S, Ni W M. Optimization of partial nitrification in a continuous flow internal loop airlift reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **147**: 516-524.
- [8] Jemaat Z, Suárez-Ojeda M E, Pérez J, *et al.* Partial nitrification and o-cresol removal with aerobic granular biomass in a continuous airlift reactor[J]. *Water Research*, 2014, **48**(1): 354-362.
- [9] Ge S J, Peng Y Z, Qiu S, *et al.* complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process[J]. *Water Research*, 2014, **55**: 95-105.
- [10] 张昭, 李冬, 曾辉平, 等. 交替好氧/缺氧下城市污水部分亚硝化的实现[J]. *中国给水排水*, 2013, **29**(23): 18-22.
- Zhang Z, Li D, Zeng H P, *et al.* Achievement of partial nitrification of municipal wastewater under alternating aerobic/anoxic conditions [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, **29**(23): 18-22.
- [11] Wang L, Zheng P, Abbas G, *et al.* A start-up strategy for high-rate partial nitrification based on DO-HRT control [J]. *Process Biochemistry*, 2016, **51**(1): 95-104.
- [12] Liu J, Zuo J E, Yang Y, *et al.* An autotrophic nitrogen removal process: short-cut nitrification combined with ANAMMOX for treating diluted effluent from an UASB reactor fed by landfill leachate[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(5): 777-783.
- [13] Tan N C G, Kampschreur M J, Wanders W, *et al.* Physiological and phylogenetic study of an ammonium-oxidizing culture at high nitrite concentrations[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2008, **31**(2): 114-125.
- [14] Hellinga 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] Huang X W, Urata K, Wei Q Y, *et al.* Fast start-up of partial nitrification as pre-treatment for anammox in membrane bioreactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **105**: 371-378.
- [16] 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, 2002.
- [17] 高春娣, 李浩, 焦二龙, 等. 交替好氧缺氧短程硝化及其特性[J]. *北京工业大学学报*, 2015, **41**(1): 116-122.
- Gao C D, Li H, Jiao E L, *et al.* Alternate oxic-anoxic mode realizing nitrification and its characterization[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, **41**(1): 116-122.
- [18] 李亚峰, 秦亚敏, 谢新立, 等. 间歇曝气条件下短程硝化的实现及影响因素研究[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(7): 1518-1521.
- Li Y F, Qin Y M, Xie X L, *et al.* Study on achievement and influencing factors of shortcut nitrification in intermittent aeration [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5**(7): 1518-1521.
- [19] 吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 等. 连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1472-1477.
- Wu P, Zhang S Y, Song Y L, *et al.* Quick start-up and sustaining of shortcut nitrification in continuous flow reactor[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1472-1477.
- [20] 钱飞跃, 刘小鹏, 张念琦, 等. 协同调控 C/N 负荷提升好氧颗粒污泥亚硝化性能[J]. *化工学报*, 2016, **67**(9): 3946-3953.
- Qian F Y, Liu X P, Zhang N Q, *et al.* Enhancement of partial nitrification performance of aerobic granular sludge by coordinating C/N loading rate[J]. *CIESC Journal*, 2016, **67**(9): 3946-3953.
- [21] Wu L, Peng C Y, Peng Y Z, *et al.* Effect of waste water COD/N ratio on aerobic nitrifying sludge granulation and microbial population shift[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(2): 234-241.
- [22] 巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 等. ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4195-4201.
- Wu K C, Wu P, Shen Y L, *et al.* Research on cultivation and stability of nitrification granular sludge in integrated ABR-CSTR reactor[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4195-4201.
- [23] 谭冲, 刘颖杰, 王薇, 等. 碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3807-3813.
- Tan C, Liu Y J, Wang W, *et al.* Effect of carbon/nitrogen ratio on short-cut nitrification and denitrification of polyurethane biofilm reactor [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3807-3813.
- [24] Laanbroek H J, Gerards S. competition for limiting amounts of oxygen between *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter winogradskyi* grown in mixed continuous cultures[J]. *Archives of Microbiology*, 1993, **159**(5): 453-459.
- [25] 刘文如, 丁玲玲, 王建芳, 等. 低 C/N 比条件下亚硝化颗粒污泥的培养及成因分析[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(8): 2226-2233.
- Liu W R, Ding L L, Wang J F, *et al.* Granulation of granular nitrification sludge at low C/N ratio [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(8): 2226-2233.
- [26] Musvoto E V, Lakay M T, Casey T G, *et al.* Filamentous organism bulking in nutrient removal activated sludge systems. Paper 8: the effect of nitrate and nitrite[J]. *Water SA*, 1999, **25**(4): 397-407.
- [27] 宋姬晨, 王淑莹, 杨雄, 等. 缺/好氧条件下亚硝酸盐的存在对污泥沉降性能的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, **45**(4): 1361-1368.
- Song J C, Wang S Y, Yang X, *et al.* Influence of nitrite on sludge settleability under anoxic and aerobic conditions [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, **45**(4): 1361-1368.
- [28] Madoni P, Davoli D. Testing the control of filamentous microorganisms responsible for foaming in a full-scale activated-sludge plant running with initial aerobic or anoxic contact zones [J]. *Bioresource Technology*, 1997, **60**(1): 43-49.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i>	(3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i>	(3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i>	(3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i>	(3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i>	(3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i>	(3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i>	(3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i>	(3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i>	(3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i>	(3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie	(3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i>	(3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i>	(3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i>	(3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i>	(3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i>	(3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i>	(3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i>	(3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i>	(3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i>	(3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i>	(3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i>	(3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i>	(3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i>	(3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i>	(3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i>	(3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i>	(3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong	(3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i>	(3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i>	(3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i>	(3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i>	(3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i>	(3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i>	(3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i>	(3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i>	(3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i>	(3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i>	(3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i>	(3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-pei, SUN Yi-fei, <i>et al.</i>	(3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i>	(3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i>	(3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun	(3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i>	(3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i>	(3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(3544)