

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

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(卷终)

京津冀区域 PM_{2.5} 污染相互输送特征 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)

基于多源数据的 PM_{2.5} 浓度时空分布预测与制图 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)

华东区域 PM_{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)

南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)

菏泽市 PM_{2.5} 碳组分季节变化特征 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)

辽宁典型城市道路扬尘 PM₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)

天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)

高原城市昆明公路隧道大气中 PM_{2.5} 理化特征分析 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)

2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远 (4983)

ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)

我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)

新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)

三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)

太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)

典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)

基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)

北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)

深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)

低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)

臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)

碱化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)

MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 王九妹, 关泽宇, 王金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)

载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)

海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)

游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)

厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)

活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)

pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)

长期暴露下纳米 TiO₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 李慧婷, 崔福义 (5229)

长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)

有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)

大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)

上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 高子翔, 周航, 杨文毅, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)

水稻对气态单质汞的吸收与挥发 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)

麦田 O₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)

缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N₂O 排放的影响 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)

成都平原不同类型沟渠 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量特征及其影响因素 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)

河流 CO₂ 与 CH₄ 排放研究进展 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)

《环境科学》第 38 卷(2017 年)总目录 (5367)

《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比

孙艺齐¹, 卞伟¹, 王盟², 赵青¹, 王文啸¹, 梁东博¹, 李军^{1*}

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

摘要: 在室温(25℃)条件下, 同时启动活性污泥和生物膜 SBR 亚硝化反应器并稳定运行后, 探究延长水力停留时间(HRT)和溶解氧(DO)对两工艺性能破坏与恢复的影响。结果表明, 活性污泥反应器更易启动亚硝化, 但当 DO 为 2~2.5 mg·L⁻¹ 时亚硝化被破坏, 且通过降低 DO 至 0.5~1 mg·L⁻¹ 可恢复性能, 而生物膜则基本不受 DO 影响。延长 HRT 均会破坏两种工艺的稳定运行, 活性污泥法相比于生物膜法, 其抵抗力较差但缩短 HRT 后恢复性能快于生物膜法。随后不断降低温度(20、15、10℃), 探究 DO 和温度对亚硝化稳定的协同作用, 结果表明温度的降低会破坏亚硝化的稳定运行, 但通过 DO 浓度的降低可以弥补温度降低带来的不利影响, 另外发现在温度大于 20℃ 时, 活性污泥法实现亚硝化速率优于生物膜法, 而在低温条件(15℃ 以下), 生物膜法更容易实现亚硝化的稳定运行, 活性污泥法在 10℃ 时, 几乎没有处理氨氮的能力。通过分子微生物学分析证实了以上结论, 并且发现在并不完全淘洗净 NOB 的条件下, 也可以实现亚硝化的稳定运行。

关键词: 活性污泥法; 生物膜法; 亚硝化; DO; 温度

中图分类号: X703.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5222-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201706018

Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitritation in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR

SUN Yi-qi¹, BIAN Wei¹, WANG Meng², ZHAO Qing¹, WANG Wen-xiao¹, LIANG Dong-bo¹, LI Jun^{1*}

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: This study investigates the effect of increased hydraulic retention time (HRT) and dissolved oxygen (DO) on the destruction and restoration of the performance of activated sludge and biofilm sequencing batch reactor (SBR) nitritation after the processes were simultaneously started up and stably operated at room temperature (25℃). The results showed that was easier to start nitritation in an activated sludge reactor, but nitritation was destroyed when DO was 2-2.5 mg·L⁻¹. The performance could be restored by reducing DO to 0.5-1 mg·L⁻¹. The biofilm process was not affected by DO. Prolonging HRT destroyed the stable operation of the two processes. Compared with the method of biofilm, the activated sludge method had less resistance, but restoring performance was better than for the biofilm process after shortening the HRT. Subsequently, the temperature (20, 15, and 10℃) was continuously reduced to investigate the synergistic effect of DO and temperature on nitritation stabilization. The results showed that the reduction of temperature destroyed the stable operation of nitritation, but the reduction of DO concentration could compensate for the adverse effects of temperature reduction. In addition, when the temperature was higher than 20℃, the rate of nitritation in the activated sludge process was better than that in the biofilm method. At low temperature (below 15℃), a stable operation of nitritation was easier to achieve with the biofilm method. The capacity of the activated sludge process was hardly changed at 10℃. The above conclusions were confirmed by molecular microbiological analysis, and it was found that the stable operation of nitritation could be achieved without complete wash-out of the nitrite-oxidizing bacteria (NOB).

Key words: activated sludge method; biofilm method; nitritation; DO; temperature

相比于全程硝化, 亚硝化由于可以节省约 40% 的碳源(以甲醇计)和 25% 的曝气量^[1, 2] 受到国内外学者的众多关注, 亚硝化作为多种工艺的前置处理工艺, 至关重要^[3~5]。近些年来, 大量实验研究如何实现亚硝化^[6, 7], 发现实现亚硝化的关键因素是抑制亚硝酸盐向硝酸盐的转化, 即促进 AOB 的繁殖, 抑制 NOB 的生长^[8]。从最新的研究成果来看, 间歇进水比连续进水更加容易实现亚硝化^[9], 而实现亚硝化的控制因素主要包括: 高温、高 pH、

高游离氨(FA)、高游离亚硝酸(FNA)^[9~11]。目前, 已经成功在垃圾渗滤液等高氨氮污水中实现亚硝化^[12], 而低氨氮污水的亚硝化相对难以实现^[13]。但研究低氨氮污水对处理生活污水很有实际意义。并

收稿日期: 2017-06-03; 修订日期: 2017-07-01

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07202-013)

作者简介: 孙艺齐(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水短程硝化启动、破坏及稳定运行, E-mail: 1037902374@qq.com

* 通信作者, E-mail: jgljun@bjut.edu.cn

且从经济等角度考虑, 不建议在污水厂进水时, 提高低氨氮污水的温度, 因此研究常温和低温条件下亚硝化的有效控制办法, 是处理低氨氮生活污水的关键. 目前, 实现亚硝化一般有 2 种工艺, 活性污泥法和生物膜法. 活性污泥法由于活性污泥易培养、恢复性能快、处理效果好, 目前成为广大学者和专家的重点研究内容. 而生物膜法由于其较长的污泥停留时间(SRT), 能够使微生物具有更丰富的生物多样性, 抵抗外界变化能力强, 并且生物膜可以充分利用 DO, 膜内 AOB 和 NOB 更易出现明显的分层, 呈现良好的亚硝化能力^[4], 已成为当下的研究热点. 但目前少有针对两种工艺在常温、低温下达到亚硝化的对比研究, 尤其是在处理低氨氮污水中.

本实验采用 2 个 SBR 反应器, 探索低氨氮污水在常温和低温条件下, 两种工艺亚硝化的启动、破坏和恢复的对比, 通过对比分析, 提出采用活性污泥法和生物膜法的最适温度, 为污水厂在各温度下选择工艺提供理论依据. 并且通过分子微生物学的分析, 证实这种对比分析结果的准确性.

1 材料与方法

1.1 实验装置

2 个相同的 SBR 反应器(R1、R2), 长、宽、高分别约为 180、120、260 mm, 有效工作容积约为 4

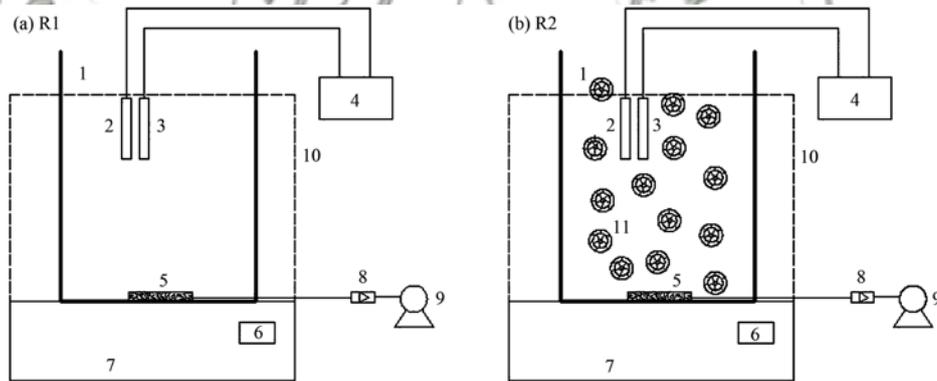
L(见图 1), 整个实验装置还包括定时搅拌器, DO 探头, pH 探头, 水质分析仪(WTW), 低温恒温槽(型号 DC-0516), 精确曝气装置. 鲍尔环作为生物膜反应器(R2)的载体, 约占整个工作容积的 22%.

1.2 实验水质

SBR 反应器(R1、R2)采用人工配水, 进入反应器的水质为: 氨氮由 NH_4Cl 提供质量浓度为 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 碱度由 NaHCO_3 提供(以 CaCO_3 计)质量浓度为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, P 由 KH_2PO_4 提供质量浓度为 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 接种污泥均来自北京高碑店污水处理厂曝气池, 其硝化性能良好, f 值在 0.7 左右, SVI 值在 90 左右, 2 个反应器的启动温度均在 25°C , pH 控制在 7.9 ~ 8.1, R1 反应器 MLSS 控制在 $3\ 500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

1.3 实验方案

本实验分别采用活性污泥法和生物膜法的 SBR 工艺, 整个实验包括两部分, 第一部分考察在 25°C 下 2 种工艺亚硝化的快速启动, 并在稳定运行后探究分别控制 DO 和 HRT 破坏、恢复这 2 种工艺亚硝化的可行性. 第二部分考察了在不同温度下 DO 对于亚硝化的长期稳定和破坏恢复的影响. 本实验中采用氨氮去除率(AAR)作为评价硝化性能的指标参数, 采用亚硝态氮积累率(NAR)作为评价亚硝化启动成功、稳定运行和破坏修复效果的指标参数.



1. 反应器; 2. DO 探头; 3. pH 探头; 4. WTW 主机; 5. 曝气装置; 6. 控制面板; 7. 底座; 8. 转子流量计; 9. 蠕动泵; 10. 低温恒温槽; 11. 鲍尔环

图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic of the experimental device

1.4 分析项目与方法

氨氮: 纳式试剂分光光度法、亚硝态氮: N -(1-萘基)-乙二胺光度法、硝酸盐氮: 麝香草酚分光光度法、DO、pH、温度采用在线检测探头监测(主机 WTW, 德国), MLSS 和 MLVSS: 质量法.

亚硝态氮积累率和氨氮去除率采用式(1)和(2)计算:

$$\text{NAR} = \frac{\Delta c_{\text{NO}_2} \times 100\%}{\Delta c_{\text{NO}_2} + \Delta c_{\text{NO}_3}} \quad (1)$$

式中, Δc_{NO_2} 和 Δc_{NO_3} 表示: 进出水亚硝态氮和硝氮的浓度差, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

$$ARR = \frac{\Delta c_{\text{NH}_4^+} \times 100\%}{c_{\text{NH}_4^+}} \quad (2)$$

式中, $\Delta c_{\text{NH}_4^+}$ 和 $c_{\text{NH}_4^+}$ 表示: 进出水氨氮浓度差和进水氨氮浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.5 微生物分析方法

根据 Zhang 等^[14] 的方法首先对活性污泥和生物膜进行预处理, 生物膜样品在预处理前, 使用棉签使生物膜从鲍尔环上脱离, 之后将预处理的样品送往上海生工进行高通量测序.

2 结果与讨论

2.1 常温下快速启动活性污泥法和生物膜法实现亚硝化

在 2 个反应器中各加入接种污泥 2 L, 再加入人工配水 2 L, R2 中加入鲍尔环. 在活性污泥法中张朝升等^[15] 认为实现亚硝化的 DO 上限为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Ciudad 等^[16] 指出实现亚硝化的 DO 应小于 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 卞伟等^[17] 在温度为 $21 \sim 23^\circ\text{C}$, DO 为 $0.25 \sim 1.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时均成功启动亚硝化. Zheng 等^[18] 在 DO 为 $3.5 \sim 7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的生物膜反应器中实现稳定亚硝化, Bian 等^[9] 在 MBBR 反应器中研究 DO 为 2.0 、 3.8 和 $6.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时均成功启动并维持了亚硝化的稳定运行, 因此本实验将活性污泥法中 DO 控制在 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 将生物膜法中的 DO 控制在 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 研究活性污泥法和生物膜法常温下在低氨氮 SBR 亚硝化工艺中的启动.

本文将 ARR 达到 90% 作为硝化反应的终点, 因此 R1 控制曝气时间 3 h 为一周期, DO 控制在 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 每周期排水率为 50%, 期间维持反应器 MLSS 在 $3500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. R2 将转子流量计流量调至最大进行闷曝 48 h 后, 百分之百排泥, 可以发现鲍尔环上有一层薄薄的生物膜, 意味着挂膜初步成功, 之后采用 DO 为 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 曝气时间为 4 h 作为一个反应周期进行实验. R2 其他工况条件与 R1 相同.

有研究指出中高温条件下是实现亚硝化的适宜温度^[13, 19], Farabegoli 等^[20] 指出在温度超过 20°C 时, AOB 的生长速率 $>$ NOB 的生长速率, 温度大于 25°C 时, 会使 AOB 的生长速率和 NOB 的生长速率产生明显差异, 本实验控制温度在 25°C 启动亚硝化, 为亚硝化的实现提供了一个良好的温度环境. 图 2 显示的是在 25°C 下活性污泥法和生物膜法亚硝化的快速启动. 从中可以看出相比于生物膜法, 活性污泥法运行 5 个周期 ARR 即达到 90%, 而生

物膜法运行近 60 个周期 ARR 才达到 90%, 并且活性污泥法达到亚硝化的周期时间也比生物膜法要缩短近 20 个周期, 意味着活性污泥法比生物膜法更快实现亚硝化. 分析原因: 在 25°C 时, 活性污泥具有良好的硝化性能, 因此 ARR 在短时间内就达到 90%, 且 DO、温度和 pH 等因素都严格控制在 AOB 生长的最适环境, 因此持续运行一段时间便成功实现亚硝化. 而生物膜法在反应初期是处于不停的挂膜时期, 李亚峰等^[21] 指出在常温条件下生物挂膜达到良好的硝化性能至少需要 20 d, 反应初期生物膜不易附着鲍尔环生长, 生物量低, 因此需要长时间地运行直到挂膜成熟, ARR 才会达到 90%. 并且在整个实验运行阶段, 通过严格控制 pH 在氨谷点停止曝气和人工换水淘洗 NOB, 为 AOB 的生长提供优良环境, 最终在运行 140 个周期后才实现亚硝化. 考虑到生物膜法载体挂膜成熟需要大量时间, 因此, 在 25°C 下, 硝化性能良好的活性污泥法比生物膜法更加容易实现亚硝化.

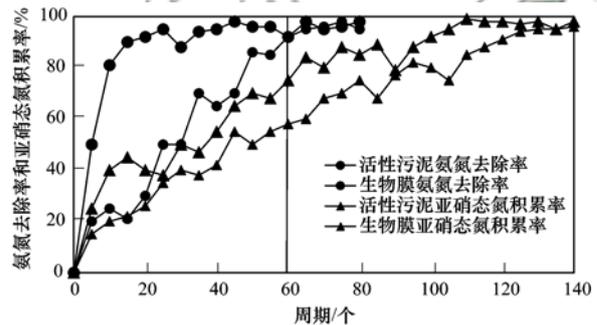


图 2 25°C 下 2 种工艺亚硝化的快速启动

Fig. 2 Two kinds of nitritation processes with rapid start-up at 25°C

2.2 活性污泥法和生物膜法亚硝化破坏与恢复研究

污水厂在实际运行过程中会出现短时间内污水量突增的现象, 需要提高 DO 或者延长 HRT 来处理污水. 因此本实验在第 140 个周期分别进行增大 DO 和延长 HRT 的小试, 小试 1 将活性污泥法的 DO 提高至 $2 \sim 2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 小试 2 将生物膜法的 DO 提高至 $5 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 进行运行, 小试 3 和 4 分别将活性污泥法和生物膜法 HRT 延长至 6 h 进行运行. 图 3 显示在 25°C 下增大 DO 和 HRT 对活性污泥法和生物膜法的影响.

从图 3 中可以看出, 提高 DO 对活性污泥法的影响显著, 运行 10 个周期亚硝态氮积累现象就开始被破坏, 继续运行约 45 个周期, 亚硝态氮积累现象完全破坏. 对于生物膜法, DO 的影响则较小, NAR 一直可以维持在 90% 以上. 分析原因生物膜小试中加大曝气量将 DO 提高至 $5 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 并没

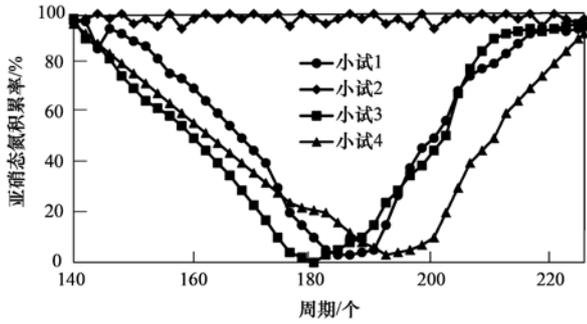


图3 25℃不同工况下对亚硝态氮积累率的影响

Fig. 3 Effect of NAR on the different factors at 25℃

有让生物膜轻易脱落是由于生长良好的生物膜具有一定厚度,抗冲击性能较强,并且生物膜各层具有的厚度会给 DO 的传质带来阻力,提供的 DO 并不能被完全利用,因此提供了相对稳定的 DO 环境;而活性污泥法是悬浮性生长,与氧气接触的面积较大,加大曝气量,相当于给活性污泥冲击力,生物量没有保护层且受到严重外力因而变成小絮体随出水离开反应器,因此 NAR 快速降低,故受 DO 的影响较大.考虑到 AOB 和 NOB 的饱和系数^[22],在反应的第 195 个周期将 DO 调低至 0.5 ~ 1 mg·L⁻¹,运行约 10 个周期亚硝态氮积累迅速恢复, NAR 达到 90% 以上,成功恢复亚硝化.

将 HRT 延长至 6 h,活性污泥法和生物膜法都受到了严重的冲击,不过从图 3 可以看出,活性污

泥法的破坏时间要早于生物膜法近 5 个周期,完全破坏的时间也比生物膜法要早 15 个周期,说明活性污泥法比生物膜法更容易受到破坏,稳定性较差,在第 195 个周期改变工况,将 HRT 缩短至 3h,活性污泥法和生物膜法分别用 13 和 25 个周期恢复到 NAR 为 90% 的状态.从此可以看出虽然活性污泥法稳定性差,但其恢复性能好,生物膜法抗冲击能力要强于活性污泥法,但其受到破坏后,需要恢复的时间也要长于活性污泥法.

2.3 不同温度下 DO 对 2 种脱氮工艺亚硝化的破坏与恢复

为了考察 DO 和温度对活性污泥法和生物膜法对硝化性能和 NAR 的协同影响(具体数据详见表 1),首先在 25℃ 条件下稳定运行 50 个周期后,再通过低温恒温槽进行温度精确控制设计了 3 个水平温度,分别是 20、15、10℃.文献[19, 23 ~ 25]通过在常温下逐步降低温度,成功实现了在低温条件下亚硝化的稳定运行,本实验虽然不是随室温逐步降低温度,但也考虑到从中温向低温的温度转变有利于 AOB 对于温度的适应,更加容易实现亚硝化.由图 4 和图 5 可以看出,在温度变化的范围内,除了 10℃ 外活性污泥法和生物膜法在每一个温度条件下都进行了由破坏到恢复进而稳定运行的过程.

表 1 不同温度 2 种工艺 DO 值

Table 1 Different temperatures and the DO in the two processes

阶段	温度 /℃	活性污泥周期 /个	调节前 DO /mg·L ⁻¹	调节后 DO /mg·L ⁻¹	DO 改变值 /mg·L ⁻¹	生物膜周期 /个	生物量 (以 VSS 计) /mg·g ⁻¹	调节前 DO /mg·L ⁻¹	调节后 DO /mg·L ⁻¹	DO 改变值 /mg·L ⁻¹
A	20	38	1.5 ± 0.2	1.0 ± 0.2	0.5	80	91	6 ± 0.2	5 ± 0.2	1
B	15	42	1.0 ± 0.2	0.5 ± 0.2	0.5	115	93	5 ± 0.2	4 ± 0.2	1
C	10	5	0.5 ± 0.2			105	90	4 ± 0.2	3 ± 0.2	1

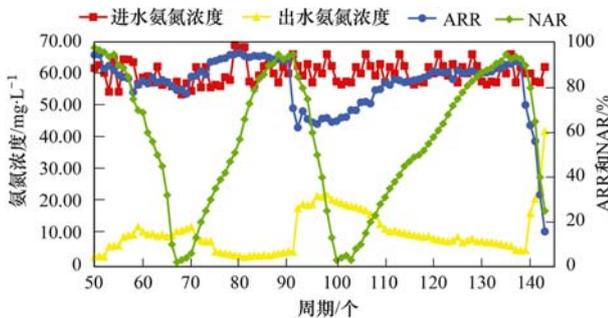


图 4 温度改变对活性污泥法性能影响

Fig. 4 Effect of temperature change on the performance of activated sludge

阶段 A 温度由 25℃ 降至 20℃,活性污泥在运行 6 个周期后,硝化性能开始破坏,连续运行 12 个

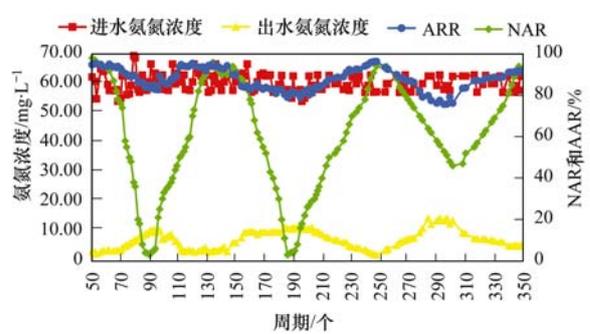


图 5 温度改变对生物膜法性能影响

Fig. 5 Effect of temperature change on biofilm performance

周期后, NAR 低至 2%, 被完全破坏,此时调节 DO 降至 1 mg·L⁻¹,经过 22 个周期后 NAR 逐渐恢复

至 90%，亚硝化性能良好，在整个破坏与恢复阶段硝化性能一直保持在 80% 以上。生物膜法在运行了 15 个周期后活性开始下降，继续运行 25 个周期后，NAR 低至 2%，此时调低 DO 经过近 40 个周期 NAR 才逐渐恢复到 90% 以上。阶段 A 由于温度的降低，活性污泥法和生物膜法开始时硝化性能和 NAR 都出现下降，不过活性污泥法降低速度快于生物膜法，分析原因在 20℃ 时活性污泥中硝化细菌由于没有保护层，缓冲抵抗能力受温度影响比生物膜要大，故抵抗外界条件变化的性能不如生物膜，但随着改变 DO 后反应继续进行，NAR 逐步上升并可以稳定在 90% 以上，表明 DO 的降低完全可以弥补温度降低给亚硝化带来的不利影响。在 20℃，活性污泥法完全破坏和恢复共用 40 个周期，而生物膜法由于恢复缓慢，恢复期比活性污泥法多用了近一倍的时间，综合考虑，笔者认为在 20℃ 时，活性污泥法的亚硝化能力要优于生物膜法。

阶段 B 活性污泥法经过 2 个周期硝化性能就开始破坏，8 个周期后 NAR 就近乎为 0，此时降低 DO 为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，经过近 35 个周期后 NAR 才逐步恢复到 90%，活性污泥法开始运行阶段 AAR 大幅度降低，出水氨氮浓度较高，并且在降低 DO 后，AAR 的效果也不是很明显，经过长时间的稳定运行，AAR 最后勉强达到 90%，而相对于活性污泥法，生物膜法在降低温度后经过 20 个周期后硝化性能才低于 90%，又连续运行 35 个周期后 NAR 才被完全破坏，此时 AAR 依旧高于 80%，降低 DO 至 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，经过约 60 个周期后 NAR 恢复到 90% 以上并稳定运行。通过阶段 B 的运行可以发现，在 15℃ 的条件下，活性污泥法中的硝化细菌活性受温度影响及其严重，NAR 的快速下降，一方面是温度的降低引起 AOB 细菌中酶的活性降低，反应生成亚硝态氮的能力变弱，另一方面更是由于此时 NOB 的生长速率 > AOB 的生长速率。Hellinga 等^[26]曾经指出在 15℃ 时 NOB 的生长速率要远大于 AOB 的生长速率，而此周期的生物膜硝化性能依旧良好，NAR 也是经过近 40 个周期才被完全破坏，说明在 15℃ 时只要控制好 DO 等因素生物膜完全有能力抵抗外界的干扰。

值得注意的是在此阶段 B 中，活性污泥法经过 8 个周期被完全破坏，生物膜法经过 35 个周期被完全破坏，活性污泥法经过 33 个周期 NAR 恢复到 90% 以上，而生物膜法经过约 60 个周期 NAR 恢复

到 90% 以上，说明活性污泥法相比于生物膜法，虽然其破坏迅速，但其恢复性能也快，分析原因生物膜因其具有一定的厚度，故有很强的抵抗能力，因此抗破坏性能较强，但其一旦被破坏，甚至生物膜出现脱落进行再挂膜尤其是在低温条件下就会比较困难，因此其恢复性能就会需要比较长的周期，而活性污泥法只要注入新鲜的具有良好硝化性能的活性污泥，在短时间内活性就会迅速提高，不过考虑到实际污水厂的运行状况，注入新鲜活性污泥的方法并不可行。虽然，生物膜法一旦破坏后恢复需要大量时间，但在实际运行中完全可以通过实时监测 pH 和测量亚硝态氮来及时调整 DO，通过降低 DO 来弥补温度带来的不足，保证生物膜法依旧有良好的处理能力，并且由于生物膜有较强的抵抗能力，它的破坏较为缓慢，可以被人们及时发现，迅速调整。因此，考虑到以上因素，在 15℃ 时，生物膜法的亚硝化能力要优于活性污泥法。

阶段 C 活性污泥法只运行 5 个周期，AAR 降至 15%，说明在 10℃ 时，活性污泥法根本无法抵抗此时低温带来的影响，生物量受此温度影响巨大，难以恢复。而生物膜法调节温度到 10℃ 后运行 10 个周期 NAR 开始下降，考虑到 15℃ 时，生物膜法 NAR 降低至 0，需要太久的时间进行恢复，并且 10℃ 是比 15℃ 更为严苛的低温环境，因此通过实时监测，在运行 35 个周期 NAR 下降到 45% 时，调低 DO 运行，经过 30 个周期后 NAR 恢复到 90%。阶段 C 的设置温度是 10℃，通过图 4、5 比较可以看出，在 10℃ 对于活性污泥的影响非常严重，硝化细菌在此时几乎没有活性，生物量骤减，根本无法发挥性能。而低温对生物膜法的不利影响要明显好于活性污泥法，Gilbert 等^[27]提出生物膜载体若有 10 mm 厚度就有能力维持足够的生物量以保持稳定的亚硝化，由此可以看出，在 10℃ 时生物膜依旧有很强的抵抗能力是因为生物膜中的生物量足够。拥有较强抵抗能力的生物膜可以在温度骤降 10℃ 时，依旧可以稳定地运行近 10 个周期，在 NAR 出现降低时，可以通过调整 DO 来弥补温度带来的不利影响。傅金祥等^[28]通过调查指出目前冬季污水厂的平均温度在 12 ~ 14℃，而本实验的结果显示在此温度间，生物膜法有良好的抗外界变化能力，活性污泥法则相对抵抗能力不足，在 10℃ 时，活性污泥法几乎就没有处理污水的能力，在 15℃ 时，ARR 时常偏低，出水氨氮浓度不达标。因此通过综合考量，处理低温污水生物膜法亚硝化的能力要优于活性污

泥法.

2.4 微生物种群结构分析

通过对来自 25、20、15℃ 达到稳定亚硝化的活性污泥和生物膜进行高通量测序, 结果列于表 2, 从中可以看出, 在生活污水处理中, 属于 AOB 的菌属主要是 *Nitrosomonas*、*Nitrosospira*, 属于 NOB 的菌属主要是 *Nitrobacter*、*Nitrospira*. 为估计活性污泥法和生物膜法在各温度下的亚硝化优劣势, 引入“AOB/NOB”来进行分析. 从 AOB/NOB 比值可以看出虽然在 25、20 和 15℃ 活性污泥法和生物膜法

均实现稳定的亚硝化, 并且比值越高实现亚硝化的能力越强, 但在 25 和 20℃ 时, 活性污泥法的亚硝化性能要优于生物膜法, 15℃ 时生物膜法的亚硝化性能要好于活性污泥法, 活性污泥法在 15℃ 下 AOB/NOB 值低至 2.33, 表明亚硝化的实现并不容易, 这些微生物分析数据与反应器中的性能表现一致. 另外, 在整个微生物分析中发现, NOB 的比例在总菌中最低为 0.03, 并不为 0. 这说明, 在并不完全淘洗净 NOB 的条件下, 也可以实现亚硝化的稳定运行.

表 2 AOB 与 NOB 在总菌中比例/%

Table 2 AOB and NOB ratio in total bacteria/%

T/℃	D1/D2 ¹⁾	<i>Nitrosomonas</i>	<i>Nitrosospira</i>	AOB ²⁾	<i>Nitrobacter</i>	<i>Nitrospira</i>	NOB ³⁾	AOB/NOB
25	50/50	0.23/0.29	0.06/0.09	0.27/0.38	0.01/0.01	0.03/0.03	0.04/0.04	6.75/9.5
20	38/80	0.25/0.18	0.08/0.03	0.33/0.21	0/0.01	0.03/0.03	0.03/0.04	11/5.25
15	51/110	0.26/0.13	0.09/0.01	0.35/0.14	0.01/0.03	0.05/0.03	0.06/0.06	5.83/2.33

1) 活性污泥法周期/生物膜法周期; 2) AOB 在 *Nitrosomonas* 和 *Nitrosospira* 总和中的比例; 3) NOB 在 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 总和中的比例

3 结论

(1) 25℃ 下 SBR 工艺, 活性污泥法比生物膜法更容易实现亚硝化. 提高 DO 对生物膜法几乎无影响, NAR 可以维持在 90% 以上, 对于活性污泥法, 稍高的 DO (2 ~ 2.5 mg·L⁻¹) 就会破坏亚硝态氮积累, 连续运行一段时间 (55 个周期后) 亚硝态氮积累就被完全破坏, 通过降低 DO (0.5 ~ 1 mg·L⁻¹) 可恢复亚硝化. 延长 HRT 对活性污泥法和生物膜法都具有破坏作用, 缩短 HRT 也均可恢复亚硝化, 不过两者各有优点与不足, 生物膜法的稳定性好于活性污泥法, 活性污泥法的恢复性好于生物膜法.

(2) 亚硝化稳定运行阶段, 研究温度和 DO 对亚硝化的协同作用发现, 降低 DO 可以弥补温度降低带来的不利影响. 降低温度对活性污泥法和生物膜法的 NAR 都造成一定程度的破坏, 但通过调节合适的 DO, 亚硝态氮均可以恢复, 不过在 10℃ 时, 活性污泥生物活性受低温影响严重, ARR 和 NAR 在短时间就被严重破坏, 难以恢复.

(3) 综合考虑实验的 4 个温度 (25、20、15、10℃) 得出结论: 在温度大于 20℃ 时, 活性污泥法亚硝化效果好于生物膜法, 在低温条件下 (10 ~ 15℃), 生物膜法亚硝化效果好于活性污泥法.

(4) 通过高通量分析更加证实了在低温条件下, 生物膜法更有利于实现亚硝化的稳定运行, 并且发现在并不完全淘洗净 NOB 的条件下, 也可以实现亚硝化的稳定运行.

参考文献:

- [1] 张功良, 李冬, 张肖静, 等. 低温低氨氮 SBR 短程硝化稳定性试验研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(3): 610-616.
Zhang G L, Li D, Zhang X J, et al. Stability for shortcut nitrification in SBR under low ammonia at low temperature [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(3): 610-616.
- [2] 苏东霞, 李冬, 张肖静, 等. 不同曝气方式 SBR 短程硝化试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(6): 2120-2129.
Su D X, Li D, Zhang X J, et al. Study on partial nitrification with different aeration modes in sequencing batch reactor [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, **45**(6): 2120-2129.
- [3] Soliman M, Eldyasti A. Development of partial nitrification as a first step of nitrite shunt process in a Sequential Batch Reactor (SBR) using Ammonium Oxidizing Bacteria (AOB) controlled by mixing regime [J]. Bioresource Technology, 2016, **221**: 85-95.
- [4] Zhang X J, Liang Y H, Ma Y P, et al. Ammonia removal and microbial characteristics of partial nitrification in biofilm and activated sludge treating low strength sewage at low temperature [J]. Ecological Engineering, 2016, **93**: 104-111.
- [5] Li X M, Xiao Y, Liao D X, et al. Granulation of simultaneous partial nitrification and Anammox biomass in one single SBR system [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2011, **163**(8): 1053-1065.
- [6] 解庆林, 李小霞, 李艳红, 等. SBR 反应器内短程硝化系统快速启动及影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(2): 134-137.
Xie Q L, Li X X, Li Y H, et al. Startup and factors affecting of partial nitrification in sequencing batch reactor [J]. Environmental Science and Technology, 2009, **32**(2): 134-137.
- [7] 高大文, 彭永臻, 王淑莹. 交替好氧/缺氧短程硝化反硝化生物脱氮 I. 方法实现与控制[J]. 环境科学学报, 2004, **24**

- (5): 761-768.
- Gao D W, Peng Y Z, Wang S Y. Alternating oxic-anoxic shortcut nitrification-denitrification I. realization and control [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, **24**(5): 761-768.
- [8] 赵昕燕, 卞伟, 侯爱月, 等. 季节性温度对短程硝化系统微生物群落的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(4): 1366-1374.
- Zhao X Y, Bian W, Hou A Y, *et al.* Characteristics of microbial community structure in the stable operation of the partial cut nitrification system with seasonal temperature [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(4): 1366-1374.
- [9] Bian W, Zhang S Y, Zhang Y Z, *et al.* Achieving nitrification in a continuous moving bed biofilm reactor at different temperatures through ratio control [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **226**: 73-79.
- [10] 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.
- [11] Guo J H, Peng Y Z, Huang H J, *et al.* Short-and long-term effects of temperature on partial nitrification in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **179**(1-3): 471-479.
- [12] Sun H W, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Achieving nitrification at low temperatures using free ammonia inhibition on *Nitrobaacter* and real-time control in an SBR treating landfill leachate [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **30**: 157-163.
- [13] 李冬, 刘丽倩, 吴迪, 等. 常温低氨氮 SBR 亚硝化启动策略研究 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(2): 215-220.
- Li D, Liu L Q, Wu D, *et al.* The start-up strategy of shortcut nitrification in SBR under low ammonia at room temperature [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(2): 215-220.
- [14] Zhang X J, Zhang H Z, Ye C M, *et al.* Effect of COD/N ratio on nitrogen removal and microbial communities of CANON process in membrane bioreactors [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **189**: 302-308.
- [15] 张朝升, 章文菁, 方茜, 等. DO 对好氧颗粒污泥短程同步硝化反硝化脱氮的影响 [J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(3): 413-416.
- Zhang C S, Zhang W J, Fang Q, *et al.* Effect of DO on nitrogen removal process by granular sludge in shortened simultaneous nitrification and denitrification [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, **3**(3): 413-416.
- [16] Ciudad G, Rubilar O, Muñoz P, *et al.* Partial nitrification of high ammonia concentration wastewater as a part of a shortcut biological nitrogen removal process [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(5): 1715-1719.
- [17] 卞伟, 李军, 王盟, 等. SBR 短程硝化工艺的启动及稳定运行适宜 DO 探究 [J]. *北京工业大学学报*, 2016, **42**(2): 269-276.
- Bian W, Li J, Wang M, *et al.* Suitable dissolved oxygen (DO) for startup and steady operation of SBR partial nitrification process [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2016, **42**(2): 269-276.
- [18] Zheng Z M, Li Z B, Ma J, *et al.* The nitrification performance of biofilm reactor for treating domestic wastewater under high dissolved oxygen [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **42**: 267-274.
- [19] 杨庆, 彭永臻, 王淑莹, 等. SBR 法短程深度脱氮过程分析与控制模式的确立 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(4): 1084-1089.
- Yang Q, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Analysis and establishment of control modes of advanced nitrogen removal via nitrite in SBR [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(4): 1084-1089.
- [20] Farabegoli G, Hellinga C, Heijnen JJ. Study on the use of NADH fluorescence measurements for monitoring wastewater treatment systems [J]. *Water Research*, 2003, **37**(11): 2732-2738.
- [21] 李亚峰, 张娟, 张佩泽, 等. 曝气生物滤池的自然挂膜启动分析 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2008, **24**(6): 1035-1038.
- Li Y F, Zhang J, Zhang P Z, *et al.* Analysis of the natural start-up of the biological aerated filter [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2008, **24**(6): 1035-1038.
- [22] Zekker I, Rikmann E, Tenno T, *et al.* Modification of nitrifying biofilm into nitrifying one by combination of increased free ammonia concentrations, lowered HRT and dissolved oxygen concentration [J]. *Journal of Environmental Science*, 2011, **23**(7): 1113-1121.
- [23] 郑雅楠, 滝川哲夫, 郭建华, 等. SBR 法常、低温下生活污水短程硝化的实现及特性 [J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(9): 935-940.
- Zheng Y N, Akio T, Guo J H, *et al.* Partial nitrification via nitrite at ordinary and low temperatures in an SBR treating domestic wastewater [J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(9): 935-940.
- [24] 杨庆, 彭永臻, 王淑莹, 等. SBR 法低温短程硝化实现与稳定的中试研究 [J]. *化工学报*, 2007, **58**(11): 2901-2905.
- Yang Q, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Achieving and stabilizing short-cut nitrogen removal at low temperature in pilot-scale SBR [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2007, **58**(11): 2901-2905.
- [25] Peng Y Z, Zhu G B. Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, **73**(1): 15-26.
- [26] Hellinga C, Schellen AAJC, 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.
- [27] Gilbert E M, Agrawal S, Karst S M, *et al.* Low temperature partial nitrification/anammox in a moving bed biofilm reactor treating low strength wastewater [J]. *Environment Science Technology*, 2014, **48**(15): 8784-8792.
- [28] 傅金祥, 王颖, 孙铁珩, 等. 低温条件下 SBR 系统中短程硝化研究 [J]. *水处理技术*, 2008, **34**(7): 29-32.
- Fu J X, Wang Y, Sun T H, *et al.* Study on shortcut nitrification in SBR system at low temperature [J]. *Technology of Water Treatment*, 2008, **34**(7): 29-32.

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)