

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响

薛欢婷, 袁林江*, 刘小博, 孙恒锐

(西安建筑科技大学陕西省环境重点实验室, 西北水资源环境与生态重点实验室, 西安 710055)

摘要: 在好氧段3种溶解氧(DO) [$3.0 \sim 3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (I阶段)、 $2.0 \sim 2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (II阶段)和 $1.5 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (III阶段)]的 A^2/O 实验系统, 考察了本段及后续沉淀阶段污泥的变化, 以及对系统缺氧段反硝化的影响, 并与DO为 $1.5 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的缺氧-好氧(A/O)系统进行了对比。结果表明, 沉淀阶段污泥开始发生反硝化作用, 脱氮碳源由内、外碳源同时提供; 沉淀污泥优先利用外碳源进行反硝化; 好氧段DO为 $1.5 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 沉淀阶段污泥的硝酸盐还原酶活力及反硝化活性最强, 此时 A^2/O 系统缺氧段的反硝化效果也最佳; 在与 A^2/O 系统相同污泥负荷下的A/O系统中, 好氧段后污泥中细菌胞内残留的PHB含量要高于 A^2/O 系统; A^2/O 系统沉淀段污泥的反硝化活性高于A/O系统, 其硝酸盐还原酶活力是A/O系统的1.08倍; 该污泥回流后, 尽管硝态氮充分但A/O系统缺氧段反硝化效果却较 A^2/O 系统差; 沉淀阶段污泥的脱氮性能直接关系到缺氧段反硝化效果。因此, 本研究认为在保证沉淀污泥反硝化不严重影响泥水分离的前提下, 污水生物脱氮工程中应适当控制好氧段运行、维持沉淀池污泥适当反硝化来提升系统的脱氮效能, 而不能仅仅是考虑控制缺氧段。

关键词: 连续流系统; 生物脱氮; 活性污泥; 反硝化作用; 硝酸盐还原酶活力

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3675-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812154

Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System

XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang*, LIU Xiao-bo, SUN Heng-rui

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

Abstract: Using an A^2/O process with three dissolved oxygen (DO) levels [$3.0\text{--}3.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (I stage), $2.0\text{--}2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (II stage), $1.5\text{--}2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (III stage)], the sludge and denitrification characteristics of its aerobic unit and sedimentation unit were investigated and compared with that of an anoxic-aerobic (A/O) process with a DO content of $1.5\text{--}2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The results showed that denitrification in the sedimentation unit was accomplished with both internal and external carbon sources, but sludge's denitrification was more efficient with the use of external carbon sources. Nitrate reductase activity and denitrification activity in the sludge in sedimentation unit were highest when DO content was $1.5\text{--}2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ under aerobic conditions, and the denitrification efficiency of the A^2/O process was greatest under anoxic conditions. The residual PHB in the aerobic A/O process was higher than that in the A^2/O process with experimental sludge loading. The denitrification activity of the sludge in the A/O process was higher, and the nitrate reductase activity was 1.08 times higher than that in the A/O process. After returning of the sludge, denitrification in the anoxic A/O process was poor, although the removal of nitrate nitrogen was sufficient. In comparison, denitrification in the anoxic unit of the A^2/O process was better. Denitrification of the sludge in the sedimentation unit was directly related to denitrification in the anoxic unit. Therefore, to ensure that denitrification in sedimentation unit does not seriously affect the separation of sludge and water, appropriate control of the aerobic operation and the maintenance of denitrification in the sedimentation unit will contribute more to the denitrification efficiency of the system rather than simply controlling the level of anoxia.

Key words: continuous-flow system; biological nitrogen removal; activated sludge; denitrification; nitrate reductase activity

硝化-反硝化生物脱氮工艺(BNR)因良好的经济性而被广泛采用^[1,2]。好氧段氨态氮氧化为硝态氮, 为缺氧段的反硝化菌提供必需的电子受体——硝酸盐。在缺氧段反硝化菌接受来自好氧段的硝酸盐, 反硝化菌利用有机物将硝酸盐还原为氮气, 从而实现脱氮。不少研究表明^[3,4], 相对硝化过程, 反硝化易受影响, 导致脱氮效果不理想。即使进水中有足够的有机碳源, 相对氨氮, A/O系统出水中仍残留较多硝态氮, 大量硝态氮未被还原是脱氮效率低的主要原因^[5], 这也反映在我国城市污水处理

厂排放标准中(GB 18918-2002), 说明要实现污水高度硝态氮脱除非易事。

硝化-反硝化生物脱氮工艺脱氮效率一般为50%~70%, 很难进一步提高^[6]。方芳等^[7]发现厌氧-缺氧-好氧序批式反应器中随着溶解氧(DO)升高, 好氧末端聚β-羟基丁酸(PHB)含量降低, 影响

收稿日期: 2018-12-19; 修订日期: 2019-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078304, 50878180)

作者简介: 薛欢婷(1995~), 女, 硕士, 主要研究方向为城市污水生物处理理论与技术, E-mail: 1179077316@qq.com

* 通信作者, E-mail: yuanlinjiang@xauat.edu.cn

系统脱氮效果. 周健等^[8]的研究表明缺氧段硝态氮负荷对脱氮效率有显著影响. 李培等^[9]发现 A^2/O 内回流液中 DO 含量过高是影响缺氧池反硝化的主要因子, 高溶解氧会抑制硝酸盐还原酶的合成活性, 有些反硝化细菌必须在厌氧和有 $NO_3^- - N$ 存在的条件下, 才能诱导合成硝酸盐还原酶^[10]. 硝化-反硝化两阶段有着密切的关系并相互影响, 其中好氧段溶解氧不仅可能直接影响缺氧段反硝化作用, 还决定了进入沉淀段混合液残留的 COD 量和细胞内含物的量.

有研究表明^[11, 12], 二沉池除泥水分离外还是系统的生物量动态储存单元, 活性污泥会消耗残留的内外碳源继续发挥生物净化作用. 泥水分离是沉淀池的首要功能, 但控制适当条件, 不仅可以实现良好的泥水分离, 而且有助于污泥状态的转换——好氧呼吸到无机盐呼吸(反硝化), 为回流到缺氧池快速脱氮奠定基础. Baumann 等^[13]的研究发现, 从好氧向厌氧生长条件转变过程中, 如果没有过渡的过程, 快速的转变会影响反硝化还原酶的合成及其活性, 导致反硝化出现滞后. 因此, 除泥水分离外, 沉淀池也影响反硝化细菌对交替环境的适应能力, 适当的控制条件有利于缺氧段反硝化作用. 泥水分离和为脱氮做好铺垫和准备, 两者是不矛盾的, 这中间有度的控制, 而不是仅仅把沉淀当作纯粹的泥水分离环节, 忽略其生化的代谢问题. 二沉池中的

生化反应主要是反硝化反应^[14], 张帆等^[15]通过优化曝气控制提高二沉池反硝化效率来改善生物脱氮效果, Wild 等^[16]也发现在二沉池产生反硝化酶可改善脱氮效果. 对于沉淀池, 其反应特点与主反应区生化单元不同, 时间短, 不均相, 但代谢还在进行, 是最为复杂的生化单元. 因此, 对于单元切换和运行环境变化的系统, 沉淀池的生物代谢值得深入研究, 重新认识沉淀池在生物处理系统的角色.

本研究在连续运行的 A/O 脱氮和 A^2/O 脱氮除磷这 2 种 BNR 系统中, 考察了不同条件下好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段反硝化能力的影响, 以期优化连续流缺氧-好氧脱氮提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 实验装置

A/O 和 A^2/O 反应器均由有机玻璃制成, 总有效容积分别为 9 L(其中缺氧和好氧的体积比为 1:2)和 11 L(其中厌氧、缺氧和好氧的体积比为 1:1.5:3), 二沉池有效容积 2.5 L. 为了保证泥水混合均匀, 厌氧池和缺氧池均采用机械搅拌器均匀搅拌, 好氧池底部放入微孔曝气头进行曝气供氧. 本实验进水及内外回流均采用蠕动泵控制. A^2/O 反应器装置示意图如图 1 所示, A/O 系统是将如图的 A^2/O 系统中厌氧池去除同时调整进水和回流位置而成.

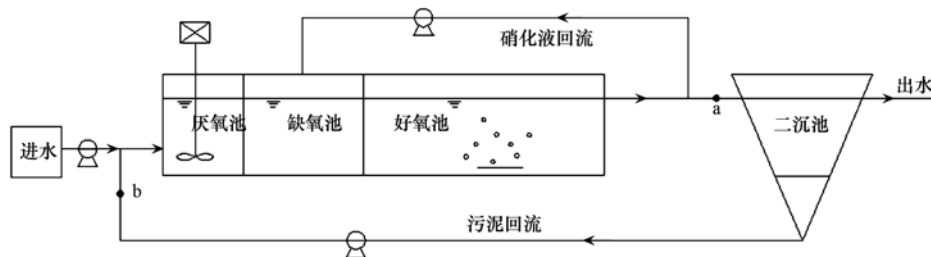


图 1 反应器装置示意

Fig. 1 Set-up of the reactor unit

1.2 反应器运行

本实验接种污泥取自西安某污水处理厂, 进水采用人工模拟废水, 其中碳、氮和磷源分别为 CH_3COONa (COD 约为 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、 NH_4Cl (TN 约为 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 KH_2PO_4 (TP 约为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 再加入硫酸镁、无水氯化钙、微量元素与自来水配制.

本实验采用蠕动泵控制进水流量为 $24\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$, A/O 和 A^2/O 系统主反应区水力停留时间分别为 9 h 和 11 h, 二沉池为 2.5 h. 实验过程中将各工艺参数均控制在合适的范围内. 混合液回流比为 200%, 污泥回流比为 100%. 反应器内 MLSS 控制在 3 000

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. A^2/O 工艺控制厌氧段溶氧在 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 缺氧段溶解氧控制在 $0.2\sim0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 反应器温度通过水浴保持在 25°C 左右. 反应系统的 pH 控制在 $7.0\sim8.0$. 污泥龄通过每天从好氧池末端排出剩余污泥来控制, 约 18 d. 稳定运行 A/O 系统 30 d 左右, 好氧段 DO 浓度控制在 $1.5\sim2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; A^2/O 系统实验期间控制好氧段的 DO 浓度分别为 $3.0\sim3.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (I 阶段)、 $2.0\sim2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (II 阶段) 和 $1.5\sim2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (III 阶段), 每阶段各运行 33 d 左右.

1.3 分析项目及方法

本实验中常规指标分析均采用国家标准方法测

定^[17]:TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, NH_4^+ -N 采用纳氏试剂比色法, NO_3^- -N 采用紫外分光光度法, COD 采用重铬酸钾法。

PHB 预处理^[18]后采用气相色谱法 (Agilent 6890N, FID 检测器, HP-5 型色谱柱) 测定, 进样方式为自动进样。色谱条件为: 进样口温度和检测器温度分别为 250℃ 和 300℃; 采用柱箱升温, 起始炉温为 50℃, 保留 1 min, 以 10℃·min⁻¹ 升到 120℃, 再以 120℃·min⁻¹ 升到 270℃, 保留 6 min; 进样量 2 μL 。糖原测定采用蒽酮法测定^[19]。

硝酸盐还原酶活力检测方法如下^[20]: 在 50 mL 锥形瓶中加入待测 50 mL 的活性污泥, 投加预先配置好的 3% 葡萄糖 1 mL 作为碳源, 同时在 50 mL 锥形瓶中加入 20 mg CaCO_3 保持碱度。投加现配制的硝酸钾溶液 (NO_3^- -N 浓度为 40 mg·L⁻¹) 作为反应底物。混合后在恒温振荡器 30℃ 下振荡培养, 转速为 100 r·min⁻¹, 随时间延长氮去除量增加, 作氮去除量与时间关系图。研究过程通常用硝酸盐去除量法来表征硝酸盐还原酶活力, 硝酸盐去除量越大说明硝酸盐还原酶活力越强^[20]。硝酸盐还原酶活力 E 定义为单位污泥浓度下, 单位时间内去除单位质量硝酸盐氮的能力。

批次实验^[21]: 从反应器好氧段取 1 L 活性污泥, 静置 15~20 min 弃去上清液后, 再加蒸馏水反复操作上述步骤 3 次, 再用蒸馏水将沉淀污泥定容至 500 mL, 并加入 500 mL 与反应器进水组分相同的实际污水。控制曝气量恒定, 反应开始后定时取样, 曝气 8.0 h。

2 结果与分析

2.1 系统对污染物的去除效果

2.1.1 COD 去除效果

图 2 为连续流系统在不同运行阶段 COD 的变化情况。在 A²/O 系统好氧段不同 DO 浓度下, 活性污泥对 COD 的去除效果基本不受影响, 系统保持了较为稳定的去除 COD 能力, 平均去除率为 89.06%。单纯从去除 COD 的角度来讲, A²/O 系统好氧段 DO 对 COD 去除几乎没有差别, 从节省曝气能耗的角度考虑, A²/O 系统可以采用相对较低的曝气量, 这与吴昌永等^[22]的研究结果一致。在系统转为 A/O 初始, 系统出水有所波动, 随着系统对环境的适应, COD 去除率趋于稳定, 约为 90% 左右。

2.1.2 脱氮效果

连续流系统在不同运行阶段脱氮效果如图 3 所示。从中可知, 在 A²/O 系统好氧段不同 DO 下系统

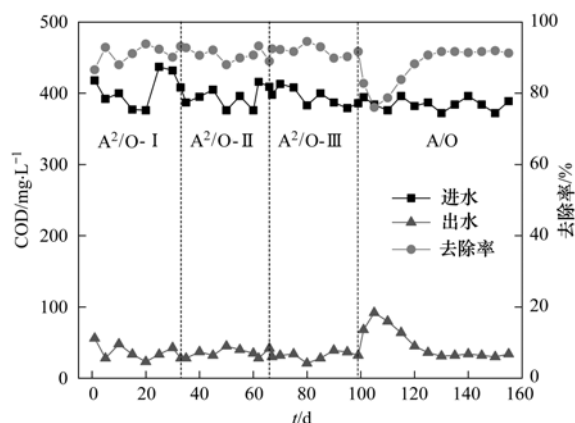


图 2 COD 去除效果

Fig. 2 Removal effect of COD

对氨氮的去除效果较好, 随 DO 降低, 氨氮去除率分别为 97.87%、96.68% 和 98.55%, TN 的平均去除率分别为 76.94%、78.94% 和 80.87%。在系统转为 A/O 初始, 系统对氨氮去除效果有所降低, 随着系统对环境的适应, 氨氮去除率稳定在 97% 左右, TN 的去除率稳定在 75% 左右。由此可见, 不同运行阶段对氨氮的去除效果差异不大, TN 去除有所差异主要是因为出水硝氮有所不同, 在好氧段 DO 浓度较高的情况下, 回流至缺氧段的混合液中的 DO 浓度也较高, 破坏缺氧环境, 导致反硝化效率下降。而当好氧段的 DO 浓度偏低时, 回流的混合液中携带的 DO 对缺氧段的影响较小, 这对缺氧环境的破坏及反硝化效果的影响相对较小。

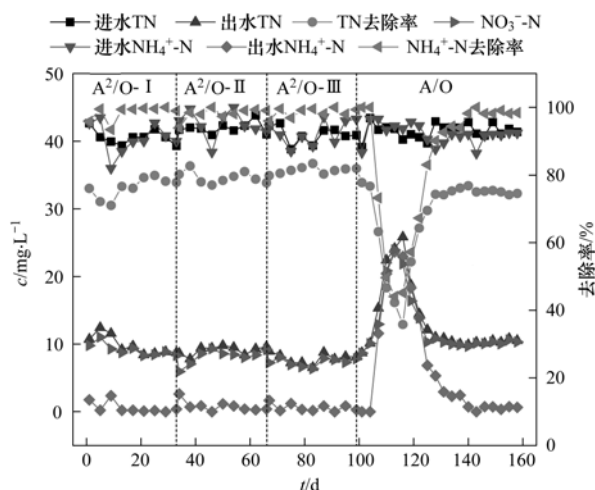


图 3 不同运行阶段的脱氮效果

Fig. 3 Removal effect of nitrogen during different operational stages

2.2 好氧段污泥特性

在好氧段 DO 为 1.5~2.0 mg·L⁻¹ 时, 从运行稳定的 A/O 和 A²/O 系统好氧段取活性污泥进行批次实验。图 4 所示为批次实验好氧段溶解氧、液相主体物质及胞内物质随曝气时间的变化曲线。

恒定曝气量下, A/O 系统在曝气时间至 360

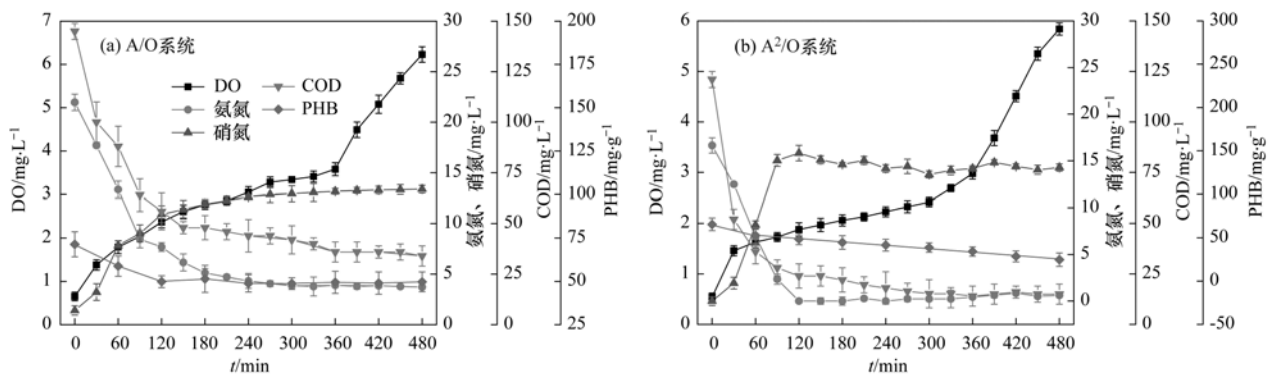


图4 好氧段 DO、液相主体物质及胞内物质变化曲线

Fig. 4 Variation in DO, the main substances in the liquid, and the intracellular substances in the aerobic unit

min 时出现了 DO 值跃升现象; 在 240 min 时, 氨氮基本得到去除, 相应地硝化反应基本完成; COD 在 360 min 后维持在 $35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右; PHB 在 90 min 后稳定在 $50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右. A^2/O 系统在曝气时间至 330 min 时出现了 DO 值跃升现象; 在 120 min 时, 氨氮基本得到去除; COD 在 360 min 时达到最低为 $14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; PHB 在 360 min 时为 $34.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

反应器曝气阶段, 当有机物的矿化及氨氮的硝化反应完成之后, 微生物逐渐进入内源呼吸阶段, 由于耗氧速率小于供氧速率, 溶解氧在反应器内迅速积累并在某一时刻出现 DO 值的跃升现象, 该时刻即 DO 突变点^[23]. DO 变化曲线上的突变点可作为判定曝气时段终点的依据, 进而控制曝气过程的结束. 同时, 两系统脱氮在 3.0 ~ 4.0 h 基本完成, 考虑到有机物的降解与去除, 适当延长好氧段停留时间到 5.0 ~ 6.0 h, 就可以基本保证出水水质, 并且还有适量的碳源为后续处理单元提供能量. 综合 DO 突变点、污染物去除效果、良好的硝化效果及后续碳源需求, 选择 6.0 h 为最佳曝气时间.

2.3 沉淀阶段污泥特性

2.3.1 沉淀阶段污染物变化

本实验在好氧段水力停留时间 (HRT) 为 6.0 h 的连续流系统中探究二沉池活性污泥代谢特征, A/O 系统控制好氧段 DO 浓度为 $1.5 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, A^2/O 系统控制好氧段的 DO 浓度分别为 $3.0 \sim 3.5$ (I 阶段)、 $2.0 \sim 2.5$ (II 阶段) 和 $1.5 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (III 阶段). 由于污泥回流过程较短, 故以外回流末端作为二沉池终点取样, 即为沉淀末端. 在不同工况下, 对好氧段末端 (a) 和沉淀末端 (b) 活性污泥液相主体物质与胞内物质变化进行测定, 如图 5 和图 6 所示.

由图 5 和图 6 可以看出: A/O 系统经主反应区作用后残留的 COD 为 $36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PHB 为 $48.75 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 沉淀阶段硝氮去除量为 $1.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN

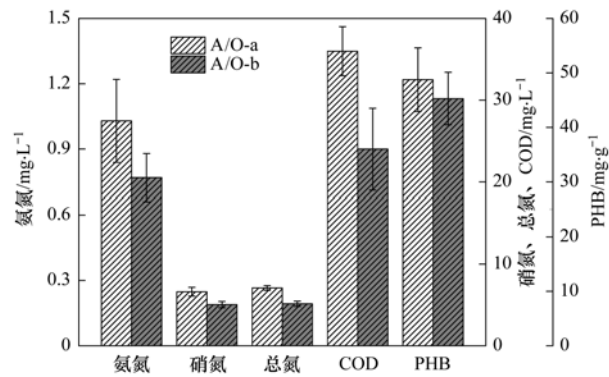


图5 A/O 系统沉淀前后液相主体物质与胞内物质变化

Fig. 5 Effects of the main substances in the liquid and the intracellular substances before and after precipitation of A/O

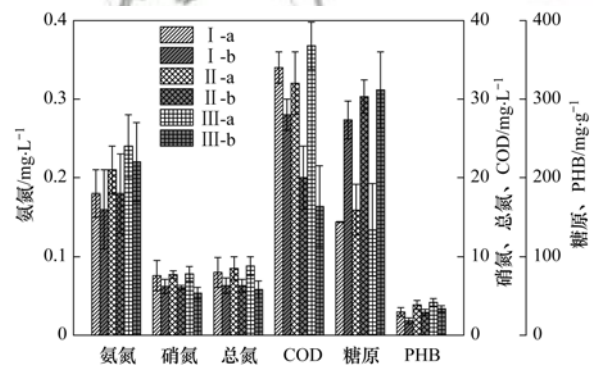
图6 A^2/O 系统好氧段不同 DO 对沉淀前后液相主体物质与胞内物质的影响

Fig. 6 Effects of the main substances in the liquid and the intracellular substances before and after precipitation under different DO in the aerobic unit of the A^2/O process

的去除量占系统总去除量的 6.47%, 消耗 COD $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、PHB $3.46 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; A^2/O 系统随着溶解氧的降低, 经主反应区作用后残留的 COD 分别为 34 、 32 和 $36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PHB 分别为 29.48 、 38.52 和 $41.78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 沉淀阶段硝氮去除量分别为 1.39 、 1.67 和 $2.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 的去除量占系统总去除量的比例分别为 5.56%、6.70% 和 9.22%, 同时对 COD 和 PHB 都有所消耗. 经主反应区作用后, 残留

的 COD 含量相差不大, 但 PHB 相差较大, 残留少量碳源可供污染物在沉淀阶段得到进一步去除, 在不同工况下, 沉淀前后氨氮变化量不大, 总氮的减少主要是反硝化作用的结果, 同时消耗内外碳源。

2.3.2 沉淀阶段活性污泥反硝化能力

本实验采用批式实验来研究二沉池活性污泥对硝氮的去除能力, 图 7 为不同条件下硝氮去除量随时间的变化。A/O 系统在 3.0 h 硝氮去除量达到 $15.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时硝酸盐还原酶活力为 2.09E; A^2/O 系统 I 阶段在 2.0 h 时硝氮去除量达到最大值 $4.14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硝酸盐还原酶活力为 1.04E; II 阶段在 3.0 h 时硝氮去除量达到 $6.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时硝酸盐还原酶活力为 1.19E; III 阶段在 3.5 h 时硝氮去除量达到 $19.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硝酸盐还原酶活力为 2.75E, 远大于 A^2/O 系统下的其他两种工况, 同时也大于 A/O 系统。

在 3.0 h 时, A/O 系统硝氮去除量达到最大, 此时 A^2/O 系统 III 阶段硝酸盐还原酶活力为 2.26E, 是 A/O 系统的 1.08 倍, 这是 A/O 系统沉淀阶段硝氮去除量低于 A^2/O 系统的主要原因。刘晓伟^[24]等表明缺氧条件下 ($0.5 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 硝酸盐还原酶活性显著高于高溶解氧组 ($> 8.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及厌氧组 ($< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。二沉池底部属于缺氧状态, 较低 DO 水平有利于底部活性污泥反硝化作用的进行。由于 DO 较高时反硝化菌体内硝酸盐还原酶的合成将会被抑制^[25], A^2/O 系统好氧段 DO 降低, 导致沉淀阶段活性污泥硝酸盐还原酶活力增强, 有利于硝酸盐还原。

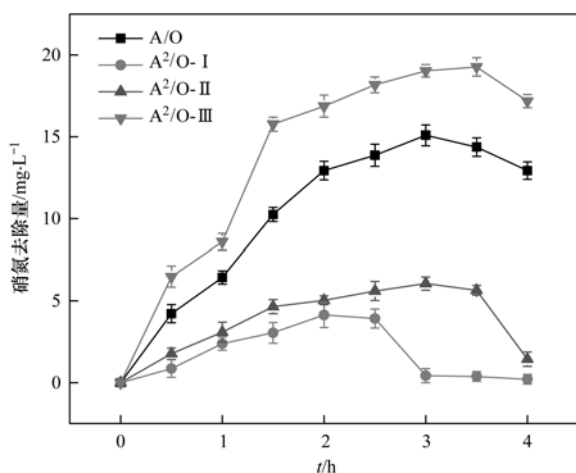


图 7 二沉池末端硝氮去除量随时间变化

Fig. 7 Variation of nitrate removal with time at the end of the secondary settling tank

2.3.3 沉淀阶段反硝化对碳源的利用

A/O 系统内源反硝化脱氮量可占到整个沉淀池总脱氮量的 12.66%, A^2/O -III 阶段污泥内源反硝

化脱氮量占 6.10%。在 A^2/O 系统中随着好氧段 DO 降低, 沉淀池污泥内源反硝化脱氮量占到整个沉淀池总脱氮量的比例分别为 50.36%、17.37% 和 6.10%。 A^2/O 系统随着好氧段 DO 降低, 沉淀阶段 PHB 消耗量有所减少, PHB 分解产能高低顺序为 I > II > III 阶段, 然而脱氮效果为 I < II < III 阶段, 同时外碳源利用量大小为 I < II < III 阶段。由此可见, 沉淀阶段反硝化过程对内外碳源都有所消耗。PHB 是由水中易生物降解 COD 转化而来, 被视为一种溶解性 COD, 但 PHB 的氧化速率要小于其它溶解性 COD^[26], PHB 被作为慢速可生物降解的 COD, 且污泥内碳源反硝化速率本来就低于易生物降解碳源的反硝化速率^[27], 因此活性污泥会优先利用外碳源, 当外界碳源缺乏时, 细胞内 PHB 也可作碳源为沉淀阶段的反硝化过程提供能量。

2.4 缺氧段反硝化效果

系统脱氮效果的关键取决于缺氧段反硝化作用。图 8 为不同条件下缺氧段硝氮及反硝化速率变化情况。 A^2/O 随着好氧段 DO 降低和 A/O 系统 4 种工况下, 缺氧段硝酸盐平均浓度分别为 4.43、1.63、0.95 和 $1.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反硝化速率分别为 1.01 、 2.17 、 2.69 和 $2.15 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

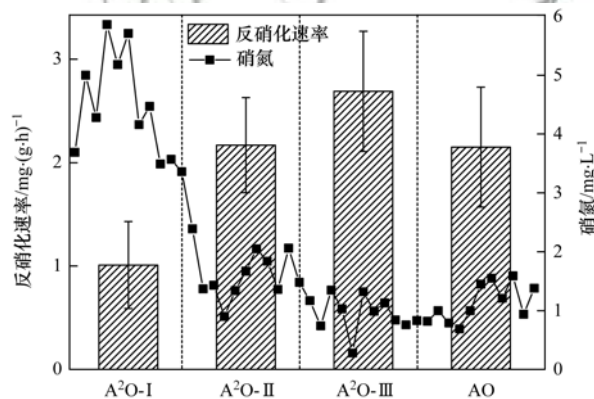


图 8 缺氧段污泥反硝化效果

Fig. 8 Effect of sludge denitrification under anoxic conditions

A/O 和 A^2/O -III 控制好氧段 DO 为 $1.5 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 混合液回流携带的 DO 水平相当, 主要是污泥回流位置不同, 对缺氧段带来的硝态氮负荷不同。A/O 系统缺氧段尽管硝态氮充分但由于同时接纳混合液和回流污泥, 反硝化效果却较差。 A^2/O 系统随着好氧段 DO 降低, 回流污泥携带的硝酸盐浓度降低, 缺氧段反硝化速率逐渐增大, 这表明硝化液中的溶解氧含量是影响缺氧段反硝化脱氮的重要原因, 这与李培等^[9]的研究结果一致, 同时回流污泥携带的硝氮含量对缺氧段反硝化有影响。

3 讨论

好氧段 DO 既要满足碳氧化,也需要用来进行硝化,连续流下好氧段 DO 水平决定了残留 COD 和氨氮/硝氮水平. 过高的 DO,虽有利于彻底去除有机物和氧化氨态氮,但不利于缺氧段污泥进行快速反硝化脱氮,这既有沉淀池污泥状态不到位的问题,也有混合液回流带入缺氧段过多 DO 的问题. 较低 DO 会使氨氧化菌(ammonia oxidizing bacteria, AOB)活性降低,导致其对氨氮的氧化速率下降,由于长期在低 DO 条件下,微生物内源呼吸衰减速率降低,使 AOB 的生物量增加^[28],在一定程度上补偿了由 DO 浓度较低所造成的微生物代谢水平下降,这种补偿特性使得在较低 DO 条件下系统仍保持良好的氨氮去除效果^[23]. 同时有研究表明^[29],在较高的有机物负荷($C/N > 10$)和低 DO 下异养硝化菌会占优势而进行硝化作用. 因此,在好氧段适当控制 DO 略微低些,既可保证好氧段功能的实现,也可借助沉淀阶段污泥和水分分离过程中的微弱代谢,进一步去除水中 COD,污泥尽快转换为无氧呼吸,以保证缺氧段的高效脱氮. 从这个意义上,沉淀阶段是 A^2/O 工艺应关注的核心,系统效率控制的关键是在好氧段.

经曝气段后活性污泥仍含有较多的硝化细菌和异养细菌等微生物^[30],这些细菌进入沉淀池后以曝气段残留的 COD 及胞内内含物为碳源继续发挥生物氧化降解作用,其中以反硝化作用为主. 沉淀池的反硝化作用可能导致污泥在反硝化时被产生的气泡所黏附而上升,导致漂泥影响处理效果,在生物脱氮工艺的运行中应尽可能予以避免. 有研究表明二沉池底部污泥上浮与进入二沉池的硝氮浓度过高(平均浓度为 $17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)有关^[31],而本实验进入二沉池的硝氮浓度均在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,因而并未出现污泥上浮现象,本研究均是在保证沉淀污泥反硝化不严重影响泥水分离的前提下进行的.

同样进水负荷下,缺氧-好氧 A/O 系统好氧段残留的 PHB 含量比厌氧-缺氧-好氧 A^2/O 系统的较高. 反应系统内高含量 PHB 的积累,有利于弥补碳源偏低污水发生同步硝化反硝化(SND)时所存在的碳源不足导致 TN 去除率降低的缺陷,提高 SND 的硝化和反硝化的平衡程度和脱氮效率^[32]. 但也有研究证明^[33],PHB 的积累及消耗是聚磷菌的明显特点. 利用内碳源进行反硝化大多是伴随反硝化除磷实现的,反硝化聚磷菌(DPAOs)在缺氧条件下以 PHB 为电子供体,利用 NO_3^- 代替 O_2 作为电子受体进行过量吸磷,并同时实现硝酸盐的去除. 因此,

在存在聚磷菌的系统中,硝酸盐的去除除了利用外碳源,还可利用 PHB,而 A/O 系统以脱氮为主,硝化和反硝化细菌为优势菌,对 PHB 利用较少. 微生物组成的变化导致代谢产物的变化,影响反硝化可利用碳源,进而影响系统脱氮效果.

A/O 系统缺氧段尽管硝态氮充分但反硝化效果相比 A^2/O 系统却较差. 充足的电子受体有利于反硝化作用的进行,但周健等^[8]表明低的硝态氮负荷有利于脱氮. A^2/O 系统回流污泥和混合液分别进入厌氧段和缺氧段,厌氧条件下能去除回流污泥所携带的硝态氮,降低缺氧段氮负荷,反硝化细菌在缺氧段以内回流携带的硝态氮为电子受体,进行反硝化作用,厌氧和缺氧段的“双重”脱氮使系统具有较好的脱氮效果. A/O 系统缺氧段同时接纳混合液和回流污泥,导致硝氮负荷过高,反硝化碳源利用率(即反硝化过程所用碳源量占细菌生命活动所用的总碳源量的比值)随硝酸盐负荷的增大而增大^[34],进而导致缺氧末端碳源不足,影响反硝化效果. 由于工艺设置差异,污泥回流位置不同导致缺氧段氮负荷不同,进而影响系统脱氮效果.

反硝化速率与废水中挥发性脂肪酸(VFA)含量的关系最大^[35],VFA 是生物脱氮除磷过程中最易于利用的碳源,直接利用进水可降解有机物进行厌氧发酵会获得较高的 VFA 产率^[36]. 实验控制进水负荷相同,但回流污泥进入厌氧段仍含有大量硝酸盐,由于反硝化速度快于释磷速度,反硝化会优先消耗易降解 COD^[37],系统主要通过异养菌利用外碳源进行反硝化作用去除硝氮. 但在 A^2/O 工艺中反硝化聚磷菌与反硝化异养菌同时存在,当碳源较低时,缺氧段反硝化聚磷量和脱氮量呈现出良好的线性关系^[38]. 研究发现缺氧段 COD 在 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,因此推断缺氧段反硝化效果是反硝化异养菌和反硝化聚磷菌共同作用的结果. A^2/O 系统 3 种状况下缺氧段 COD 相差不大,异养菌反硝化效果差异较小,而降低回流至厌氧段的硝氮浓度,避免反硝化异养菌与聚磷菌竞争有限的有机物有利于反硝化聚磷现象的发生^[39],进而促进缺氧段反硝化效果. A^2/O 系统在 3 种状况下好氧段出水硝氮含量相差不大,回流污泥携带的硝氮含量主要取决于沉淀阶段的反硝化作用. 因此,沉淀阶段污泥的脱氮性能直接关系到缺氧段反硝化效果.

在生物处理系统中,好氧段运行条件是影响系统反硝化作用的主要因素,在保证沉淀污泥反硝化不严重影响泥水分离的前提下,适当控制好氧段的工艺特性,维持沉淀池污泥适当反硝化有助于系统的脱氮活性.

4 结论

(1) 沉淀阶段污泥主要进行反硝化作用, A^2/O 系统优于 A/O 系统; 沉淀阶段反硝化作用碳源由内、外碳源同时提供且优先利用外碳源; 相同污泥负荷下, A/O 系统好氧段后活性污泥细菌胞内残留的 PHB 含量高于 A^2/O 系统; 控制好氧段 DO 为 $1.5 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, A^2/O 系统沉淀阶段污泥的反硝化活性最高。

(2) 沉淀阶段反硝化性能与缺氧段反硝化效果呈正相关。在保证沉淀污泥反硝化不严重影响泥水分离的前提下, 适当控制好氧段的工艺特性, 维持沉淀池污泥适当反硝化有助于系统的脱氮活性。

参考文献:

- [1] Seuntjens D, Han M F, Kerckhof F M, *et al.* Pinpointing wastewater and process parameters controlling the AOB to NOB activity ratio in sewage treatment plants[J]. *Water Research*, 2018, **138**: 37-46.
- [2] 彭永臻, 王晓莲, 王淑莹. A/O 脱氮工艺影响因素及其控制策略的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(8): 1053-1057.
- [3] Peng Y Z, Wang X L, Wang S Y. Study on influence factors and control strategies of A/O nitrogen removal process[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, **37**(8): 1053-1057.
- [4] Spérandio M, Queinnec I. Online estimation of wastewater nitrifiable nitrogen, nitrification and denitrification rates, using ORP and DO dynamics[J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(1): 31-38.
- [5] 马勇, 彭永臻, 孙洪伟. A/O 生物脱氮工艺内循环回流和外碳源投加综合控制的优化[J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1203-1209.
- [6] Ma Y, Peng Y Z, Sun H W. Optimization of nitrate recirculation flow and external carbon dosage integrated control for A/O biological nitrogen removal process[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(5): 1203-1209.
- [7] 李贺. 城市污水 A/O 生物脱氮过程中反硝化制约机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [8] Li H. Study on conditionality of denitrification in A/O process for municipal wastewater treatment[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [9] Olsson G, Newell B. Wastewater treatment system: modelling, diagnosis and control[M]. London: IWA Publishing, 1999.
- [10] 方芳, 鲍晓静, 操家顺. 溶解氧对活性污泥胞内贮存物和除磷性能的影响[J]. 环境工程, 2012, **30**(6): 8-11.
- [11] Fang F, Bao X J, Cao J S. Influence of dissolved oxygen on storage formation and phosphorus removal in activated sludge[J]. *Environmental Engineering*, 2012, **30**(6): 8-11.
- [12] 周健, 罗固源, 刘国涛, 等. 间歇曝气系统中硝酸盐氮负荷对脱氮效率的影响[J]. 四川环境, 1998, **17**(3): 1-5.
- [13] Zhou J, Luo G Y, Liu G T, *et al.* Influence of the nitrate nitrogen loading on denitrification efficiency in intermittent aeration system[J]. *Sichuan Environment*, 1998, **17**(3): 1-5.
- [14] 李培, 潘杨. A^2/O 工艺内回流中溶解氧对反硝化的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(1): 103-106.
- [15] Li P, Pan Y. Influence of DO in internal reflux of A^2/O process on denitrification[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(1): 103-106.
- [16] 王晓莲, 彭永臻. A^2/O 法污水生物脱氮除磷处理技术与应用[M]. 北京: 科学教育出版社, 2009.
- [17] Marsili-Libelli S. Dynamic modelling of sedimentation in the activated sludge process[J]. *Civil Engineering Systems*, 1993, **10**(3): 207-224.
- [18] Ghawi A, Kriš J. Improvement performance of secondary clarifiers by a computational fluid dynamics model[J]. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 2011, **19**(4): 1-11.
- [19] Baumann B, Snozzi M, Zehnder A J, *et al.* Dynamics of denitrification activity of *Paracoccus denitrificans* in continuous culture during aerobic-anaerobic changes[J]. *Journal of Bacteriology*, 1996, **178**(15): 4367-4374.
- [20] Siegrist H, Krebs P, Bühler R, *et al.* Denitrification in secondary clarifiers[J]. *Water Science and Technology*, 1995, **31**(2): 205-214.
- [21] 张帆, 袁晓东. 小红门污水处理厂 A^2/O 工艺优化运行研究[J]. 给水排水, 2009, **35**(9): 42-46.
- [22] Zhang F, Yuan X D. Study on operation optimization of A^2/O process in Xiaohongmen wastewater treatment plant[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2009, **35**(9): 42-46.
- [23] Wild D, Von Schulthess R, Gujer W. Synthesis of denitrification enzymes in activated sludge: modelling with structured biomass[J]. *Water Science and Technology*, 1994, **30**(6): 113-122.
- [24] 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.
- [25] 吕景花. 厌氧释磷上清液侧流化学磷回收对主流生物除磷系统的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [26] Lv J H. Study on the effects of chemical phosphorus recovery from supernatants of anaerobic stage in sidestream on the performance of main stream system of EBPR[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [27] 陈钧辉, 陶力, 朱婉华, 等. 生物化学实验[M]. (第三版). 北京: 科学出版社, 2003.
- [28] 杜晓娜. 反硝化过程中亚硝酸盐积累影响因素与稳定运行[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [29] Du X N. Factors affecting nitrite accumulation and operation stability during biological denitrification[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [30] 徐伟锋, 陈银广, 顾国维, 等. A^2/O 污水处理工艺中基质转化机理研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(11): 2228-2232.
- [31] Xu W F, Chen Y G, Gu G W, *et al.* Research on substrate transformation mechanism in A^2/O process[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(11): 2228-2232.
- [32] 吴昌永, 彭永臻, 王然登, 等. 溶解氧浓度对 A^2/O 工艺运行的影响[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(3): 5-9.
- [33] Wu C Y, Peng Y Z, Wang R D, *et al.* Effect of dissolved oxygen concentration on performance of A^2/O process[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, **28**(3): 5-9.
- [34] 赵丽君, 方芳, 郭劲松, 等. 溶解氧对 SBR 脱氮性能与脱氮方式的影响[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(3): 1148-1154.
- [35] Zhao L J, Fang F, Guo J S, *et al.* Impacts of dissolved oxygen level on nitrogen removal efficiencies and pathways in a sequential batch reactor[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(3): 1148-1154.
- [36] 刘晓伟, 谢丹平, 李开明, 等. 溶解氧变化对底泥酶活性及微生物多样性的影响[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(6): 6-11.
- [37] Liu X W, Xie D P, Li K M, *et al.* Effects of variation of DO on the enzyme activity and microbial diversity in sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(6): 6-11.

- [25] 徐亚同. 不同碳源对生物反硝化的影响[J]. 环境科学, 1994, **15**(2): 29-32, 44.
- Xu Y T. Influence of different carbon sources on denitrification [J]. Environmental Science, 1994, **15**(2): 29-32, 44.
- [26] 姜应和, 李超. 树皮填料补充碳源人工湿地脱氮初步试验研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 158-164.
- Jiang Y H, Li C. Preliminary study on denitrification capacity of constructed wetlands filled by bark[J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 158-164.
- [27] Takai T, Hirata A, Yamauchi K, *et al.* Effects of temperature and volatile fatty acids on nitrification-denitrification activity in small-scale anaerobic-aerobic recirculation biofilm process [J]. Water Science and Technology, 1997, **35**(6): 101-108.
- [28] Liu G Q, Wang J M. Long-term low DO enriches and shifts nitrifier community in activated sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(10): 5109-5117.
- [29] Van Niel E W J, Arts P A M, Wesseling B J, *et al.* Competition between heterotrophic and autotrophic nitrifiers for ammonia in chemostat cultures[J]. FEMS Microbiology Ecology, 1993, **102**(2): 109-118.
- [30] 刘浚, 陆少鸣. 沉淀池生物污泥回流工艺生物强化作用的研究[J]. 给水排水, 2008, **34**(9): 31-33.
- Liu X, Lu S M. Study on bio-enhancement effect of biological sludge return in sedimentation tank [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, **34**(9): 31-33.
- [31] 王社平, 邵军峰, 万琼, 等. A²/O 工艺中二沉池污泥上浮的原因与对策[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(13): 43-45, 49.
- Wang S P, Shao J F, Wan Q, *et al.* Causes and countermeasures on sludge floating in secondary sedimentation tank in A²/O process[J]. China Water & Wastewater, 2010, **26**(13): 43-45, 49.
- [32] Third K A, Gibbs B, Newland M, *et al.* Long-term aeration management for improved N-removal via SND in a sequencing batch reactor[J]. Water Research, 2005, **39**(15): 3523-3530.
- [33] 高尚, 戴兴春, 陈曦, 等. PHB 监测 A²/O 工艺除磷及负荷率耦合关系的研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3093-3097.
- Gao S, Dai X C, Chen X, *et al.* Relation analysis of phosphorus removal and BOD₅ loading using PHB monitoring in A²/O process[J]. Environmental Science, 2008, **29**(11): 3093-3097.
- [34] Jetten M S M, Schmid M, Schmidt I, *et al.* Improved nitrogen removal by application of new nitrogen-cycle bacteria [J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2002, **1**(1): 51-63.
- [35] Third K A, Burnett N, Cord-Ruwisch R. Simultaneous nitrification and denitrification using stored substrate (PHB) as the electron donor in an SBR [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, **83**(6): 706-720.
- [36] 刘智晓, 季民, 郝赞, 等. 利用活性污泥水解发酵补充碳源优化脱氮除磷[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(4): 12-16.
- Liu Z X, Ji M, Hao Y, *et al.* Application of activated sludge hydrolysis and fermentation to supplement of carbon source for optimized nutrient removal [J]. China Water & Wastewater, 2013, **29**(4): 12-16.
- [37] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two-sludge system[J]. Water Research, 1996, **30**(7): 1702-1710.
- [38] 吕冬梅, 彭永臻, 赵伟华, 等. A²O-BAF 工艺反硝化聚磷效果的影响因素[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(11): 3266-3274.
- Lü D M, Peng Y Z, Zhao W H, *et al.* Factors influencing the denitrifying phosphorus removal efficiency of A²O-BAF process [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(11): 3266-3274.
- [39] 彭轶, 彭永臻, 吴昌永. A²/O 工艺中的反硝化除磷[J]. 环境工程学报, 2008, **2**(6): 752-756.
- Peng Y, Peng Y Z, Wu C Y. Denitrifying phosphorus removal in A²/O process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, **2**(6): 752-756.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)