

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



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析	钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)
基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素	高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM _{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析	陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析	张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势	徐虹, 唐迦, 肖致美, 高璟赞, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析	李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)
长江三角洲 2010 ~ 2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单	朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)
北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性	许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子	高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析	李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价	冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析	樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)
超低排放高湿度气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试	胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征	王坚, 黄压, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立	潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)
基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演	黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨垠晖, 杜晓晨 (3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例	刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为	赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱奔, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析	许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)
过氧化钙 (CaO ₂) 联合生物炭对河道底泥的修复	李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)
基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ - $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪	徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)
三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷	严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算	高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)
Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附	赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为	薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响	江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS	李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮	方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性	张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)
基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策	刘晓蕾, 李安婕 (3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响	刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能	戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝辉, 张瑞良, 何欣昱 (3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移	袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)
四环素胁迫对 <i>Shigella flexneri</i> 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程	高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择	乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响	侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用	宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率	罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响	方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响	邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N ₂ O 排放的影响	周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素	葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力	黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响	蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响	刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响	魏宾斌, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)
螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响	覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测	俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)
《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)	

间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷

张玉君¹, 李冬^{1*}, 李帅^{1,2}, 张杰^{1,2}

(1. 北京工业大学建筑工程学院水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学环境学院城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 本研究设置了3个SBR反应器R1、R2和R3, 分别采用(A/O)₃-SBR梯度曝气、(A/O)₃-SBR恒定曝气和传统(A/O)-SBR方式运行, 以实际城市生活污水为进水基质, 探讨了不同曝气方式下的营养物去除性能和好氧颗粒污泥特性, 为低强度城市污水的碳源合理利用提供合理的方式。由实验结果可知, R1、R2和R3中颗粒在稳定时期对COD的平均去除率分别为88.68%、89.05%和88.96%, 对TN的平均去除率分别为76.97%、71.99%和64.92%, 对TP的平均去除率分别为96.28%、85.05%和78.97%, 且反硝化聚磷菌占聚磷菌的比例分别为25.52%、19.60%和12.77%。结果表明, 厌氧、好氧和缺氧交替的运行方式更有利于反硝化聚磷菌(DPAOs)的富集, 且梯度曝气较恒定曝气方式富集更多, 这对碳源不足的低强度城市生活污水处理有重要意义; 同时R1中曝气段溶解氧逐级降低, 提高了颗粒同步硝化反硝化率和降低了能耗, 有利于总氮(TN)的高效去除。3组反应器在运行后期颗粒粒径分别为727.368、815.072和895.041 μm, 且通过对颗粒进行显微观察可以看出, R2和R3中颗粒不如R1中密实。此外, R1、R2和R3运行后期PN/PS值分别为6.31、5.63和4.83, 颗粒稳定时期EPS含量(以VSS计)分别为103.97、92.22和76.98 mg·g⁻¹, 表明间歇梯度曝气的方式有利于刺激EPS的分泌, 尤其是PN的分泌, 使PN/PS值较高, 细胞疏水性增强, 颗粒密实稳定。

关键词: 好氧颗粒污泥(AGS); 间歇梯度曝气; 间歇恒定曝气; 胞外聚合物(EPS); 反硝化除磷菌(DPAOs)

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3707-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202001032

Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration

ZHANG Yu-jun¹, LI Dong^{1*}, LI Shuai^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In this study, three SBR reactors R1, R2, and R3 were set up and operated using (A/O)₃-SBR gradient aeration, (A/O)₃-SBR constant aeration, and the conventional (A/O)-SBR mode, respectively. The nutrient removal performance and aerobic granular sludge characteristics under these aeration modes were explored using real municipal wastewater as the influent matrix. The experimental results revealed that for the R1, R2, and R3 particles during the stable period, the average removal rate of COD was 88.68%, 89.05%, and 88.96%, respectively, the average removal rate of TN was 76.97%, 71.99%, and 64.92%, respectively, the average removal rate of TP was 96.28%, 85.05%, and 78.97%, respectively, and the proportion of denitrifying phosphorus accumulating bacteria to phosphorus accumulating bacteria was 25.52%, 19.60%, and 12.77%, respectively. The results showed that the operation mode of anaerobic, aerobic, and anoxic was more conducive to the enrichment of denitrifying phosphorus accumulating bacteria (DPAOs), and that the gradient aeration was more enriched than the constant aeration mode, which is of great significance to low-intensity municipal domestic sewage treatment with an insufficient carbon source. At the same time, the dissolved oxygen in the aeration section of R1 was reduced step-by-step, which improved the simultaneous nitrification and denitrification rates of particles and the utilization rate of the internal carbon source, which was beneficial for the efficient removal of TN. The particle size of the three groups of reactors was 727.368, 815.072, and 895.041 μm respectively. As the transfer rate of the matrix decreased with particle size, the microorganisms in R2 and R3 may have caused anaerobic respiration to release harmful gas, thus damaging the particle structure, such that the particles in R2 and R3 were less dense than those in R1. In addition, the PN/PS values of R1, R2, and R3 were 6.31, 5.63, and 4.83, respectively, and the EPS content (in terms of VSS) was 103.97, 92.22, and 76.98 mg·g⁻¹, respectively, at the time of particle stabilization, which revealed that the mode of intermittent gradient aeration was beneficial to stimulate the secretion of EPS. This was especially the case for the secretion of PN, which increased the PN/PS value, enhanced the cell hydrophobicity, and made the particles dense and stable.

Key words: aerobic granular sludge (AGS); intermittent gradient aeration; intermittent constant aeration; extracellular polymers (EPS); denitrifying phosphorus-removing bacteria (DPAOs)

收稿日期: 2020-01-03; 修订日期: 2020-02-28

基金项目: 北京高校卓越青年科学家计划项目(BJJWZYJH01201910005019)

作者简介: 张玉君(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水质科学与水环境恢复技术, E-mail: zhangyujun135@126.com

* 通信作者, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

好氧颗粒污泥(AGS)因其独特的优势而成为一项很有前途的废水处理技术^[1],例如:良好的沉降性、高生物量保持率、对污染负荷变化的高回弹能力^[2,3]以及对pH、温度等环境变化的高适应力^[4]。

目前为止,多数研究表明好氧颗粒污泥工艺在序批式反应器(SBR)中培养和运行效果良好^[5,6],在诸多类型反应器中,SBR反应器由于其运行方式,能为污泥颗粒的形成提供较为理想的环境,例如当污水一次性进入反应器后,可以只进行一次厌氧、好氧循环即传统A/O工艺,也可进行多次厌氧、好氧和缺氧交替循环,从而为颗粒提供实现同步脱氮除磷的理想环境^[7]。然而由于我国城镇污水C/N比低,碳源不足的问题限制了好的好氧颗粒污泥工艺在处理实际城镇污水时同步脱氮除磷的运行效果。目前已有研究证实在传统(A/O)工艺的好氧段引入缺氧段可以富集一类兼有反硝化和除磷功能的微生物反硝化聚磷菌(denitrifying phosphorus-removing bacteria, DPAOs),其细胞内代谢作用与聚磷菌(poly-P bacteria, PAOs)相似^[8],DPAOs可以以 NO_x^- -N为呼吸作用电子受体,且无需在反硝化阶段外加碳源,适用于处理低碳氮比的城镇污水。研究表明当好氧段中插入的缺氧段大于3时,随着分段数的增加,脱氮效率增加不明显,费用却线性增加,因此从经济和实际操作的角度厌氧、好氧交替次数一般为3~4^[9]。然而现如今的研究中厌氧、好氧和缺氧多级交替时的曝气段基本采用恒定曝气,在这种方式下前期溶解氧含量呈现规律性变化,溶解氧浓度保持较平稳的状态,然而随着氨氮氧化完全,后期好氧段溶解氧含量逐渐升高^[10],长时间保持较大曝气量将不利于DPAOs的积累^[11],同时造成污水处理厂能耗的浪费。因此,合理调节间歇曝气工艺好氧段曝气量有利于维持好氧颗粒污泥的稳定性同时提高同步硝化反硝化除磷(SNDPR)效率。

本研究设置3组SBR反应器,其中一组采用单级厌氧/好氧的运行方式作为对照,剩余两组分别采用三级A/O恒定曝气和梯度曝气的运行方式,对比3组反应器的启动和稳定运行情况,探讨了好氧颗粒特性、反应器性能和胞外聚合物(EPS)等,以期为好氧颗粒污泥的SNDPR系统提供一种更为合理的运行方式和曝气方式。

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行方法

本实验采用3套相同的实验室规模有机玻璃好氧颗粒序批式反应器R1、R2和R3,其工作体积为20 L,内径为18 cm,有效高度为80 cm。每个循环周

期的容积交换率为60%。通过底部曝气柄向反应器内注入空气,转子流量计控制曝气量大小。

3套反应器均每天运行3个周期,每周期8 h,基于上述研究,本文中厌(缺)氧、好氧的交替次数选择3次,R1和R2均采用(A/O)₃-SBR工艺运行(包括进水10 min、厌氧50 min、好氧100 min、缺氧50 min、好氧100 min、缺氧50 min、好氧100 min、沉淀3 min、出水10 min),其中R1曝气段采用曝气量($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)梯度为0.8→0.5→0.2的曝气方式,R2曝气段采用曝气量恒定为0.8 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 的曝气方式,R3采用单级(A/O)-SBR工艺运行(包括进水10 min、厌氧150 min、好氧300 min、沉淀3 min、出水10 min)作为对照,其中好氧段曝气量为0.8 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。R1中每个周期总曝气量为150 L左右,而R2和R3中每周期总曝气量为240 L左右,均由时控开关自动控制。

1.2 接种污泥与实验用水

反应器接种北京市某污水处理厂二沉池回流絮状污泥,R1、R2和R3初始混合液悬浮污泥(MLSS)分别为3 150、3 220和3 040 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

本实验用水为北京市某家属区化粪池污水,各项水质指标见表1。

表1 生活污水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

指标	COD	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	TN	TP
范围	180~350	28~60	0~2	35~70	2.5~8
均值	262.1	36.4	1.3	43.2	5.4

1.3 分析项目与检测方法

每个反应器的出水进行采样,检测碳、氮和磷的浓度,其中化学需氧量(COD)和总磷(TP)测定采用5B-3B型COD多参数快速测定仪,氨氮(NH_4^+ -N)测定采用纳氏试剂光度法,亚硝酸盐氮(NO_2^- -N)测定采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法,硝酸盐氮(NO_3^- -N)测定采用紫外分光光度法。pH、溶解氧(DO)与氧化还原电位(ORP)监测采用WTW多参数测定仪。MLSS按照称重法测定。颗粒粒径采用Mastersize 2000型激光粒度仪测定。颗粒形态采用OLYMPUS体视显微镜观察。胞外聚合物中蛋白质(PN)采用lowry法测定,多糖(PS)采用蒽酮硫酸法测定。

本实验中同步硝化反硝化(SND)率^[12,13]、厌氧段被PAOs和GAOs储存为内碳源的COD量占总消耗COD的比例($\text{COD}_{\text{in}}, \%$)^[14]计算方法如下:

$$\text{SND} = \left(1 - \frac{\Delta\text{NO}_2^- + \Delta\text{NO}_3^-}{\Delta\text{NH}_4^+} \right) \times 100\%$$

$$\text{COD}_{\text{in}} = \frac{\Delta\text{COD}_{\text{an}} - 1.71\Delta\text{NO}_2^- - 2.86\Delta\text{NO}_3^-}{\Delta\text{COD}_{\text{an}}}$$

式中, ΔNO_2^- 、 ΔNO_3^- 和 ΔNH_4^+ 分别为每个好氧段亚氮、硝氮和氨氮浓度变化量之和, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\Delta\text{COD}_{\text{an}}$ 、 $\Delta\text{NO}_2^-_{\text{an}}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^-_{\text{an}}$ 分别为厌氧段 COD、亚氮和硝氮变化量, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 1.71 和 2.86 分别为异养菌反硝化单位质量浓度亚氮和硝氮所消耗的 COD 量(以 N/COD 计), $\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}$ 。

1.4 批次实验

分别取 3 组 SBR 反应器在稳定运行阶段的好氧颗粒污泥进行烧杯实验, 计算系统中 DPAOs 占 PAOs 的比例。实验方法为: 分别取 R1、R2 和 R3 反应器中周期结束时的泥水混合液 1 000 mL, 将污泥清洗去除上清液后定容至 1 000 mL, 加入丙酸钠使其 COD 浓度为 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在室温下进行实验, 保持厌氧条件释磷 120 min 后, 再次清洗污泥后均分为两份, 分别加入等量的水定容至 500 mL, 加入磷酸二氢钾使其磷浓度与厌氧末端相同, 其中一份加入一定量的硝酸钾溶液, 另一份曝气使溶解氧浓度保持 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 分别运行 180 min, 测量其缺氧和好氧阶段的磷浓度变化, 计算出最大缺氧吸磷速率与好氧吸磷速率, 两者的比值即为反硝化聚磷菌在聚磷菌中所占的比例。

2 结果与讨论

2.1 不同运行条件下污泥特性

分别取 R1、R2 和 R3 培养 80 d 的成熟好氧颗粒污泥测其粒径分布, 如图 1 可以看出, R1 粒径明显较 R2 和 R3 小, 且其颗粒直径在 $600\sim 800\text{ }\mu\text{m}$ 占比最高为 38.09%, R1、R2 和 R3 的平均粒径分别为 727.368、815.072 和 895.041 μm , 可能是由于厌氧、好氧和缺氧多次交替的运行方式较单次厌(缺)氧、好氧的运行方式更有利于生长缓慢的微生物生

长, 因此 R1 和 R2 粒径略小; 并且 R1 采用梯度曝气的方式, 溶解氧浓度逐级降低, 导致 R1 反应器中培养的颗粒粒径较小^[15]。但由运行期间污染物去除效果可以看出, R1 中颗粒污泥处理效果最好, 分析原因, 随着颗粒尺寸的增大, 颗粒污泥的传质成为影响处理性能的重要因素^[16], 由于传质限制, 大颗粒内部生物量可能无法获得足够的底物, 影响脱氮除磷性能。

由图 1 也可看出, R1 中培养的颗粒小而密实; R2 和 R3 中的颗粒稍大但结构较为松散, 可能是由于大颗粒内部长时间处于贫营养状态使其死细胞增多造成的^[17]。

2.2 AGS 系统脱氮除磷性能变化

众所周知, 溶解氧浓度变化是影响 N 和 P 去除的重要因素, 因此本实验采用 R1、R2 和 R3 这 3 个 SBR 反应器, 通过对比得到不同的运行方式对脱氮除磷的影响。

整个运行过程中生活污水好氧颗粒污泥对 C、N 和 P 的去除性能如图 2 所示。由图 2(a) 可看出, 尽管城市生活污水 COD 浓度波动较大, 但 R1、R2 与 R3 的 COD 出水均可稳定在 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 去除率均达到 85% 以上, 符合《城镇生活污水厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准, 表明 3 种运行方式下均有较高的有机物去除能力, 这是由于原水的碳氮比较低, 在厌氧或缺氧段大部分易降解有机物均已被利用, 因此, 运行和曝气方式对 COD 的去除影响较小。如图 2(b) 和 2(c) 所示, R1、R2 与 R3 对 TN 和 TP 的去除有较明显差异。在颗粒化初期, R1 中 N 和 P 的去除率较低, 分析原因, R2 和 R3 由于运行过程中采用较大曝气量, 使其在运行周期内好氧段溶解氧含量保持在较高水平, 有研究表明, 溶解氧较高可以加快活性污泥颗粒化进程, 同时形成的颗粒粒径较大^[18], 因此 R2 和 R3 较 R1 更早形成微小颗粒, 使其在运行初期对有机物有更高的去除能力。随着运行时间的延长, R1 反应器即间歇梯度曝气的运行方式逐渐表现出较明显的优势, TN 和 TP 的去除率均较高。最终, R1、R2 和 R3 对 COD 去除率分别达到 88.68%、89.05% 和 88.96%, 对 TN 的去除率分别达到 76.97%、71.99% 和 64.92%, 对 TP 的去除率分别达到 96.28%、85.05% 和 78.97%。值得一提的是, R1 反应器在运行 50 d 时反应器底部曝气盘损坏导致颗粒污泥厌氧反应 1 d, 从而使出水 C、N 和 P 浓度分别为 80.73 、 30.68 和 $6.328\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 然而经过 3 d 后基本恢复至原来水平。

2.3 不同运行条件下典型周期实验

R1、R2 与 R3 反应器在颗粒稳定期时一个周期

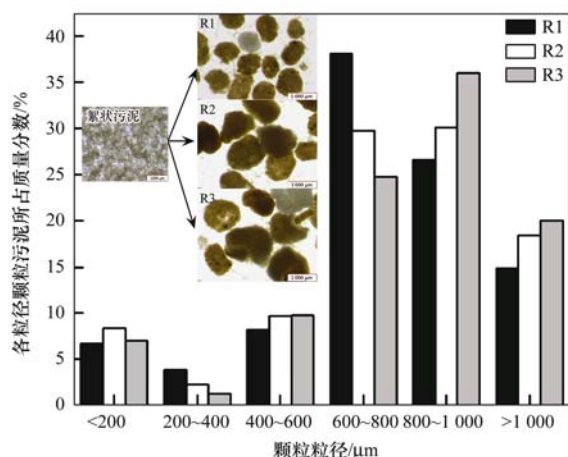


图 1 不同运行方式下污泥粒径分布及颗粒形态

Fig. 1 Particle size distribution and particle morphology of the sludge in different operation modes

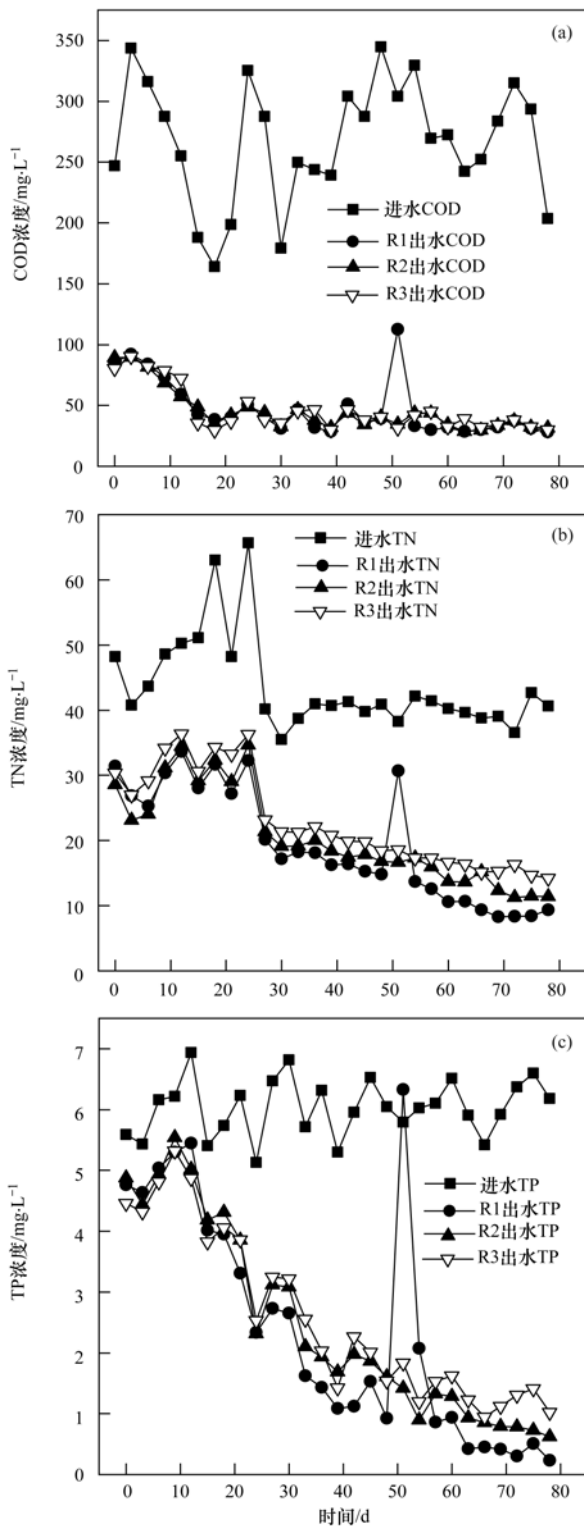


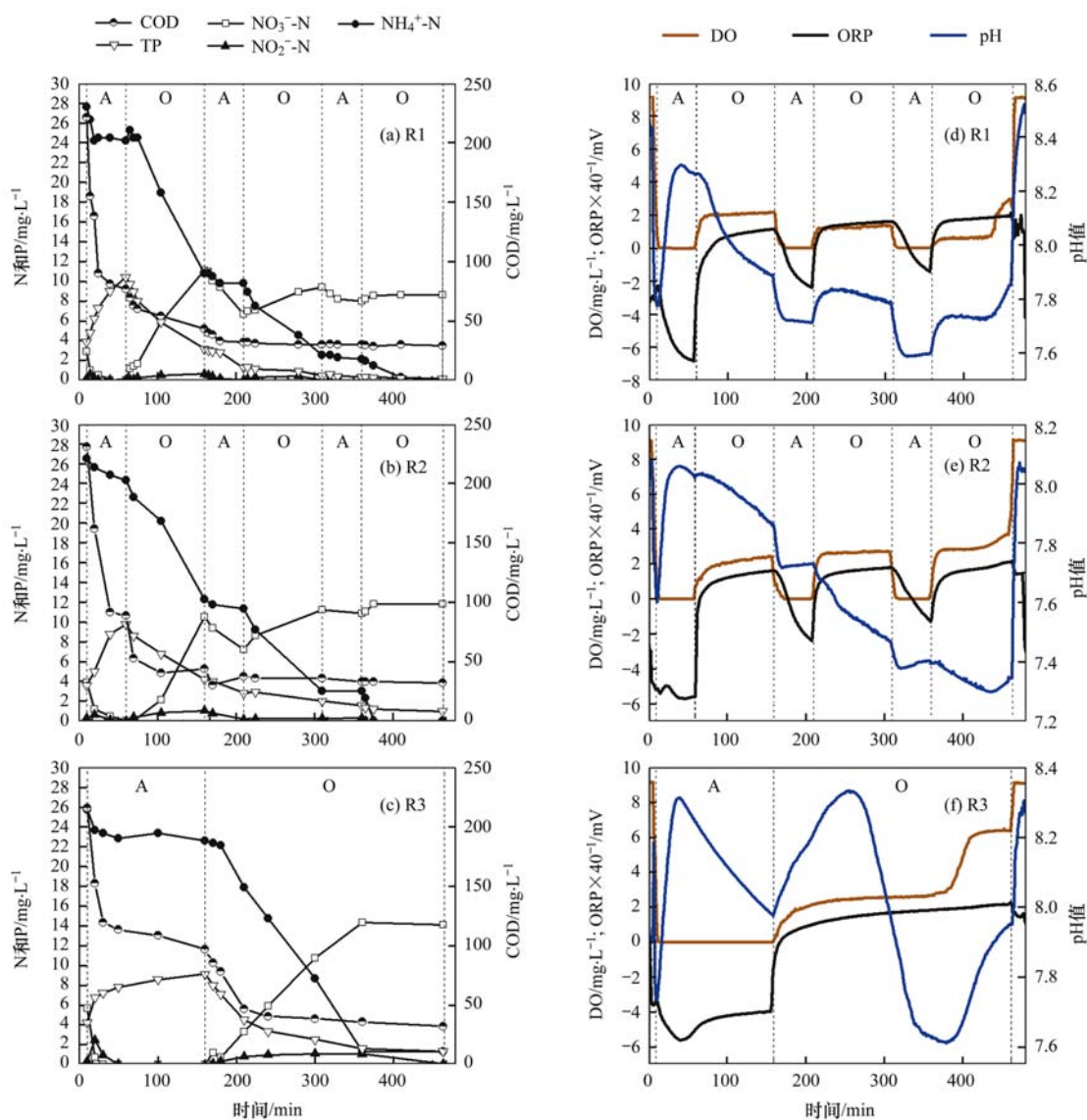
图2 运行期间 C、N 和 P 浓度变化

Fig. 2 Variations of C, N, and P concentrations during operation

内 C、N 和 P 浓度变化如图 3(a)~3(c). 反应器厌氧段进水后,微生物通过糖原酵解合成 PHA,使 COD 含量显著降低^[19],由于三组反应器中上一个周期残存的 NO_x^- -N 均由于进水稀释作用浓度较低,因此大部分 COD 被微生物进行胞内储存, R1、R2 和 R3 中 COD_{in} 分别为 94.11%、92.36% 和 85.85%,可见 R1 中颗粒污泥胞内聚合物较多,这与其粒径较

小有关,并且 R1 反应器中上一周期残留的 NO_x^- -N 浓度较低,从而减少了下一周期因外源反硝化消耗 COD,从而使内碳源储存量较高. 由于实际生活污水 COD 含量低且水质复杂, R1、R2 和 R3 反应器在厌氧末期 TP 浓度均较低,分别为 10.428、9.758 和 9.132 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 厌氧末期释磷量有所不同,分别为 6.524、6.188 和 4.894 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,有研究表明,释磷量被认为与 COD 的摄取效率有关^[17,20],同样也可看出 R1 中 COD 储存量较大;随后三组反应器均进入好氧段,由于硝化作用, NH_4^+ -N 浓度降低, NO_3^- -N 浓度升高,硝化过程中均没有出现 NO_2^- -N 积累现象. 由图 3 可以看出, R3 反应器由于没有后续缺氧段的设置,氮损失由好氧段同步硝化反硝化反应造成,最终仍有较多硝氮积累,出水硝氮含量达到 14.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同时由于 NO_3^- -N 积累对吸磷反应的抑制作用^[21]使出水 TP 浓度达到 1.326 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. R1 和 R2 在第一好氧段结束时 NO_3^- -N 浓度分别为 11.13 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 10.49 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 浓度分别为 3.180 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 3.176 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, R1 和 R2 中好氧产生的 NO_x^- -N 可为其随后缺氧段提供反硝化和反硝化除磷受体,如此交替. 如图 3(a) 和 3(b) 可以看出,第二、三缺氧段 R1 和 R2 中 TP 浓度均随着 NO_3^- -N 浓度的降低而有所下降,可以推测 DPAOs 利用 NO_3^- -N 为受体发生了反硝化吸磷作用,并且计算可得 R1 与 R2 中缺氧吸磷量占总吸磷量的比值分别为 21.47% 和 20.5%;第二、三好氧段 R1 中 NO_x^- -N 的产生量明显小于 R2,计算得知 R1 与 R2 好氧段 SND 率分别为 39.66% 和 33.76%,这是由于 R1 采用梯度曝气策略,前期采用较大曝气量,后期好氧段逐级降曝,既满足了在富营养期所需要的溶解氧浓度和水力剪切力,同时增大了同步硝化反硝化效率,提高了去除污染物的能力,还可以达到节约能耗的目的.

R1、R2 与 R3 反应器在颗粒稳定期时一个周期内 DO 浓度、pH 值和 ORP 变化情况如图 3(d)~3(f). 由图 3 溶解氧变化曲线可以看出, R1、R2 和 R3 在反应后期均出现溶解氧陡升现象,分别出现在第 430、415 和 375 min, R1 出现拐点时间最晚,表明间歇梯度曝气方式下 NH_4^+ -N 最晚消耗完毕,这在保证了氨氮去除率的同时充分体现节能的理念. 由图 3 中 pH 变化曲线可以看出, 3 个反应器在周期内 pH 基本稳定在 7.5~8.5 范围内,均有利于硝化菌与反硝化菌的生存,由于 R1 和 R2 采用间歇曝气系统,硝化与反硝化反应交替发生,有研究表明硝化反应过程中消耗的碱度可由反硝化反应产生的碱度补充,从而使 pH 值得到稳定^[22],因此其 pH 变化范围



ORP/40 表示仪器上测得的 ORP 数值除以 40 得到的数值

图 3 运行期间典型周期内 C、N、P 和 DO、pH、ORP 变化情况

Fig. 3 Changes in C, N, P, DO, pH, and ORP during a typical operational cycle

较 R3 窄,而 R1 梯度曝气的方式,同步硝化反硝化效率高,pH 变化 ($\Delta\text{pH} = 0.707$) 较 R2 中 pH 变化 ($\Delta\text{pH} = 0.782$) 更加平稳. 3 组反应器在反应后期均出现 pH 值上升现象,这与 DO 曲线在反应后期出现的特征点相一致,共同指示硝化反应的结束. 由图 3 中 ORP 曲线可以看出,3 组反应器 ORP 在进水阶段均不断下降,此时碳源充足,反应器内发生反硝化反应, NO_3^- -N 不断减少,ORP 均迅速下降,有研究表明,磷的释放和低 ORP 之间有良好的线性关系,释磷能力随 ORP 的降低而增强^[23]. 由 ORP 变化曲线图可以较明显看出,厌氧段 R1 反应器 ORP 最低, R2 次之, R3 最高,这与上述各反应器释磷量大小相符.

2.4 不同运行条件下 AGS 的胞外聚合物含量变化 EPS 对好氧颗粒结构的构建和维持起着至重

要的作用^[17]. 不同运行条件下好氧颗粒分泌的 EPS 含量见图 4 所示, EPS 含量被认为是蛋白质和多糖的总和, R1、R2 和 R3 反应器中 EPS 含量均随好氧颗粒污泥颗粒化程度先减少后逐渐增加,最终颗粒稳定时期 EPS 含量 (以 VSS 计) 分别为 103.97、92.22 和 76.98 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 分析原因,据报道,絮状污泥的 EPS 释放量高于颗粒污泥^[24],因此,分别接种絮状污泥至 3 组 SBR 反应器后,随着运行条件的改变及颗粒化快速进行,前期均出现 EPS 含量减少现象. 颗粒在厌氧、好氧环境下多次交替运行,可能会刺激微生物分泌更多的胞外聚合物来抵御环境的不断变化,导致 R1 与 R2 中 EPS 含量较高,并且 He 等^[25]的研究表明,当水力剪切力较小时,好氧颗粒污泥大量分泌 EPS 以维持颗粒的稳定性,这可能是 R1 中 EPS 含量略高的原因.

有研究表明 EPS 的急剧增加,尤其是 PN 含量的增加有利于好氧颗粒污泥的长期稳定运行^[26],生长速度较慢的微生物细胞表面的负电荷较低,疏水性较高,这使得不同微生物之间聚集斥力降低,细胞更容易聚集在一起,有利于维持颗粒结构的稳定性,据报道细胞表面疏水性与蛋白质含量呈正相关关系^[27],R1 中蛋白质含量较高更加印证了上述间歇

梯度曝气的方式有利于生长缓慢的微生物富集的想法. 由图 4 也可以看出,多糖含量在好氧颗粒污泥颗粒化过程中没有出现明显变化,这与张丽丽等^[28]的研究结果类似. R1、R2 和 R3 中 PN/PS 值总体呈现上升趋势,在第 70 d 时,R1、R2 和 R3 中 PN/PS 值分别上升至 6.31、5.63 和 4.83,这是 3 组反应器均能稳定运行的重要原因.

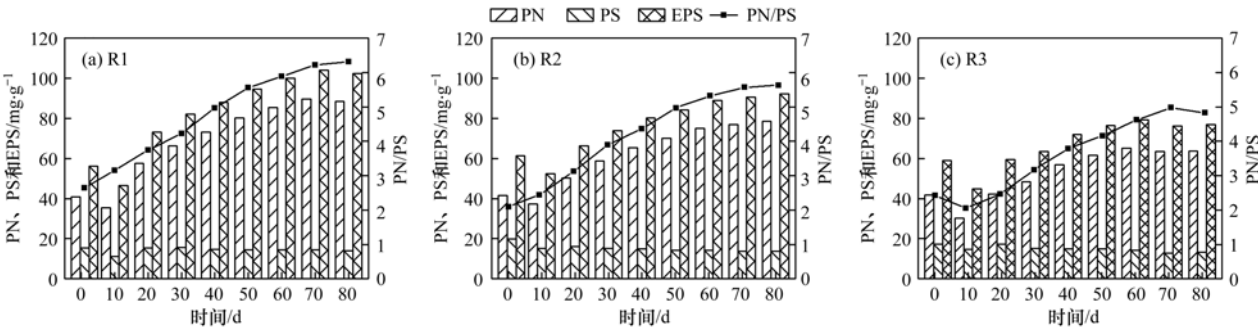


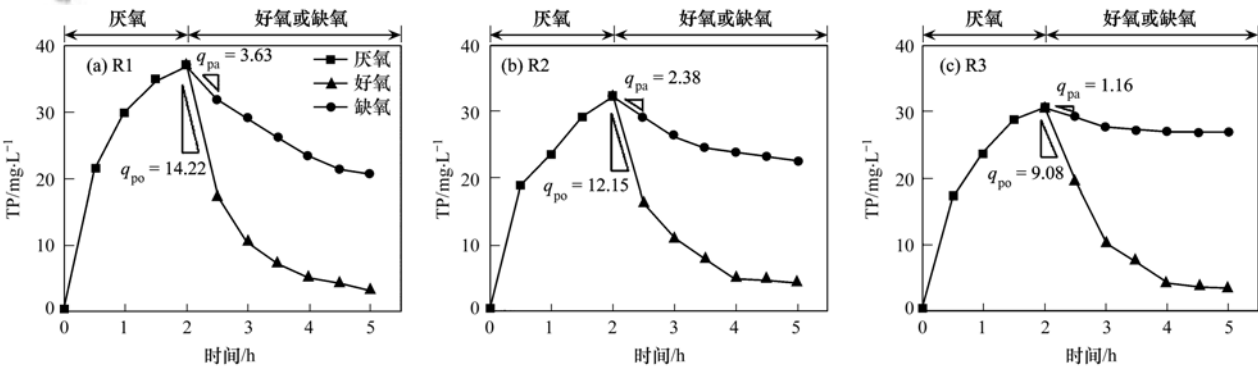
图 4 不同运行条件下 PS、PN 及 PN/PS 的变化

Fig. 4 Variation of PS, PN, and PN/PS under different operating conditions

2.5 不同运行条件下 AGS 中反硝化聚磷菌的数量
有研究表明^[29],通过 DPAOs 去除的磷酸盐对 TP 的去除贡献可以根据缺氧磷酸盐吸收速率(q_{pa})与好氧磷酸盐吸收速率(q_{po})的比值来计算.

如图 5 所示,由反硝化聚磷菌占比批次实验可知,3 组反应器均出现缺氧吸磷现象,但不同运行方式对于吸磷速率有较大影响. 由表 2 计算结果可

知,R1、R2 和 R3 系统中反硝化聚磷菌占聚磷菌的比例分别约为 25.52%、19.60% 和 12.77%,对比上述 R1 与 R2 周期实验污染物浓度变化曲线可以发现,其 DPAOs 所占的比例与缺氧吸磷量占总吸磷量的比值相近. 上述结果说明了采用(A/O)₃-SBR 模式较(A/O)-SBR 更有利于 DPAOs 的富集,并且可以看出,采用梯度曝气的 R1 反应器中反硝化聚磷菌数量略高于采用恒定曝气的 R2 反应器.



三角形表示相对应曲线最大斜率,即最大缺氧或好氧吸磷速率,三角形斜边表示最大斜率走势,即第一个点与第二个点的连线

图 5 不同运行条件下 DPAOs 占 PAOs 的比例

Fig. 5 Proportion of DPAOs to PAOs under different operating conditions

表 2 R1、R2 和 R3 中最大缺氧与好氧吸磷速率及其比值

Table 2 Maximum anoxic and aerobic phosphorus uptake rates and their ratio in R1, R2, and R3

项目	R1	R2	R3
最大缺氧吸磷速率 q_{pa} (以 P/VSS 计)/ $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$	3.63	2.38	1.16
最大好氧吸磷速率 q_{po} (以 P/VSS 计)/ $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$	14.22	12.15	9.08
$\frac{q_{pa}}{q_{po}}/\%$	25.52	19.60	12.77

3 结论

(1) 在 $(A/O)_3$ -SBR 梯度曝气、 $(A/O)_3$ -SBR 恒定曝气和传统的 (A/O) -SBR 方式下均能培养出性能稳定的好氧颗粒污泥, 而间歇梯度曝气的方式对 TN 和 TP 的去除略好, 第 80 d 时, 去除率分别达到 76.97% 和 96.28%, 并且梯度曝气的方式可以节省约 37.5% 的曝气量。

(2) R1、R2 和 R3 在相同的进水条件下, R1 中成熟的好氧颗粒污泥粒径较小且结构密实, 同时 R1 中厌氧段 COD_{in} 较高, 表明间歇梯度曝气的方式更有利于厌氧段微生物对碳源的储存。

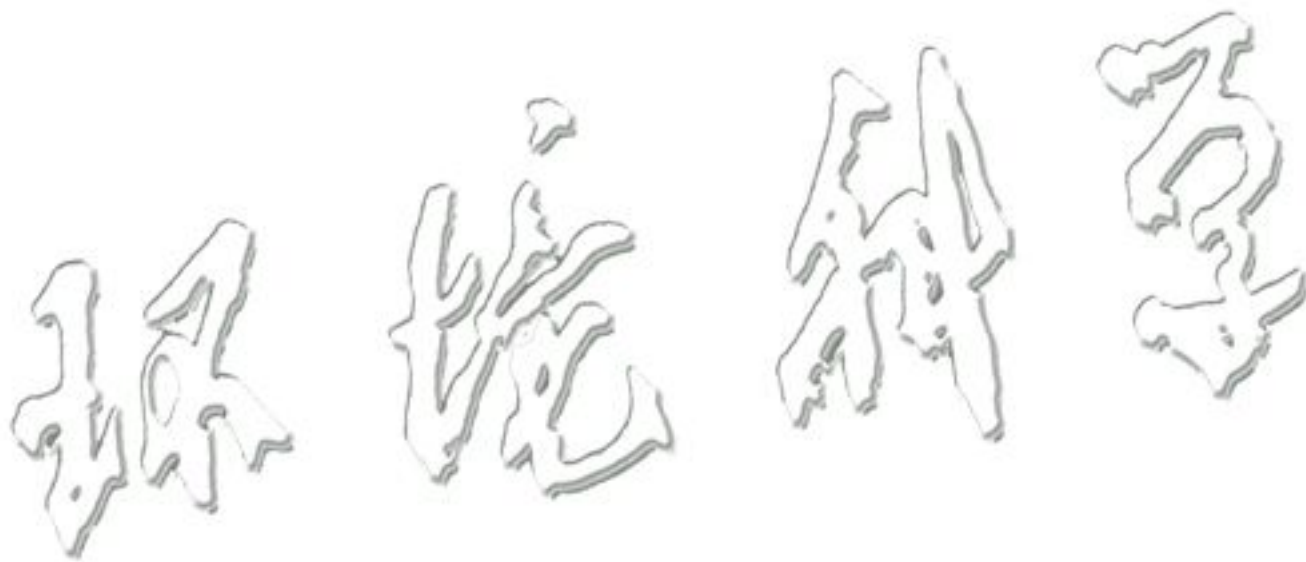
(3) R1、R2、R3 颗粒稳定时期 EPS 含量 (以 VSS 计) 分别为 103.97、92.22 和 76.98 $mg \cdot g^{-1}$, R1 中颗粒疏水性最高, 其 PN/PS 高达 6.31。

(4) 3 组 SBR 反应器在颗粒稳定期 DPAOs 占比分别为 25.52%、19.60% 和 12.77%, 表明厌氧、好氧、缺氧多次交替的运行模式更有利于反硝化聚磷菌的生长。

参考文献:

- [1] Adav S S, Lee D J, Show K Y, *et al.* Aerobic granular sludge: recent advances[J]. *Biotechnology Advances*, 2008, **26**(5): 411-423.
- [2] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2001, **91**(1): 168-175.
- [3] Moy B Y P, Tay J H, Toh S K, *et al.* High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2002, **34**(6): 407-412.
- [4] De Kreuk M K, Van Loosdrecht M C. Formation of aerobic granules with domestic sewage[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, **132**(6): 694-697.
- [5] De Sousa Rollemberg S L, Barros A R M, De Lima J P M, *et al.* Influence of sequencing batch reactor configuration on aerobic granules growth: engineering and microbiological aspects[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **238**: 117906.
- [6] Xin X, Wang Z L. Rapid startup of simultaneous nitrogen and phosphorus removal (SNPR) process and the bacterial community dynamics in a GSBP[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, **28**(4): 2931-2940.
- [7] 李亚峰, 李进, 姚敬博. 多级厌氧、好氧、缺氧交替 SBR 工艺脱氮除磷试验启动研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2009, **25**(2): 316-319.
- [8] Kern-Jespersen J P, Henze M, Strube R. Biological phosphorus release and uptake under alternating anaerobic and anoxic conditions in a fixed-film reactor[J]. *Water Research*, 1994, **28**(5): 1253-1255.
- [9] 钱晓迪. 分段进水多级 AO 工艺脱氮除磷特性及微生物作用机制研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2017.
- [10] 孙月鹏, 王火青, 孙广垠, 等. 不同污泥龄条件下多级 AO 工艺强化生物脱氮性能研究[J]. *水处理技术*, 2014, **40**(10): 47-52, 57.
- [11] Lochmatter S, Gonzalez-Gil G, Holliger C. Optimized aeration strategies for nitrogen and phosphorus removal with aerobic granular sludge[J]. *Water Research*, 2013, **47**(16): 6187-6197.
- [12] 赵骥, 王晓霞, 李夕耀, 等. DO 浓度对 EBPR 耦合 SND 处理低 C/N 污水的影响[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(1): 120-128.
- [13] Zhao J, Wang X X, Li X Y, *et al.* Effect of DO concentration on the combination of EBPR and SND for low C/N sewage treatment[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(1): 120-128.
- [14] Wang X X, Wang S Y, Xue T L, *et al.* Treating low carbon/nitrogen (C/N) wastewater in simultaneous nitrification-endogenous denitrification and phosphorous removal (SNDPR) systems by strengthening anaerobic intracellular carbon storage[J]. *Water Research*, 2015, **77**: 191-200.
- [15] 李冬, 刘博, 王文琪, 等. 除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 867-875.
- [16] Li D, Liu B, Wang W Q, *et al.* Simultaneous short-cut nitrification-denitrification phosphorus removal granules induced by phosphorus removal granules[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 867-875.
- [17] Mosquera-Corral A, De Kreuk M K, Heijnen J J, *et al.* Effects of oxygen concentration on N-removal in an aerobic granular sludge reactor[J]. *Water Research*, 2005, **39**(12): 2676-2686.
- [18] Chiu Z C, Chen M Y, Lee D J, *et al.* Oxygen diffusion in active layer of aerobic granule with step change in surrounding oxygen levels[J]. *Water Research*, 2007, **41**(4): 884-892.
- [19] He Q L, Chen L, Zhang S J, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in aerobic granular sequencing batch reactors with high aeration intensity: impact of aeration time[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **263**: 214-222.
- [20] 崔成武, 纪树兰, 任海燕, 等. 好氧颗粒污泥形成的影响因素及应用[J]. *中国给水排水*, 2005, **21**(10): 31-34.
- [21] Cui C W, Ji S L, Ren H Y, *et al.* Factors affecting the formation of aerobic granular sludge and its application[J]. *China Water & Wastewater*, 2005, **21**(10): 31-34.
- [22] Zhang T, Wang B, Li X Y, *et al.* Achieving partial nitrification in a continuous post-denitrification reactor treating low C/N sewage[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **335**: 330-337.
- [23] He Q L, Zhang W, Zhang S L, *et al.* Enhanced nitrogen removal in an aerobic granular sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, endogenous denitrification and phosphorus removal with low superficial gas velocity[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **326**: 1223-1231.
- [24] Peng Z X, Peng Y Z, Gui L J, *et al.* Competition for single carbon source between denitrification and phosphorus release in sludge under anoxic condition[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, **18**(3): 472-477.
- [25] Cheng J Y, Liu B. Nitrification/denitrification in intermittent aeration process for swine wastewater treatment[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2001, **127**(8): 705-711.
- [26] 唐玉朝, 伍昌年, 杨慧, 等. 改良氧化沟活性污泥 ORP 的调控及对磷吸收/释放的影响[J]. *工业水处理*, 2012, **32**(3): 19-22.

- Tang Y C, Wu C N, Yang H, *et al.* Regulation and control of oxidation reduction potential (ORP) of the activated sludge of modified Carrousel oxidation ditch and its influence on phosphorus absorption/release[J]. Industrial Water Treatment, 2012, **32**(3): 19-22.
- [24] Wang X, Zhang B, Shen Z Q, *et al.* The EPS characteristics of sludge in an aerobic granule membrane bioreactor [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(21): 8046-8050.
- [25] He Q L, Song Q, Zhang S L, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sequencing batch reactor with mixed carbon sources; reactor performance, extracellular polymeric substances and microbial successions[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **331**: 841-849.
- [26] Adav S S, Lee D J, Tay J H. Extracellular polymeric substances and structural stability of aerobic granule[J]. Water Research, 2008, **42**(6-7): 1644-1650.
- [27] Xiong Y H, Liu Y. Importance of extracellular proteins in maintaining structural integrity of aerobic granules[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013, **112**: 435-440.
- [28] 张丽丽, 陈效, 陈建孟, 等. 胞外多聚物在好氧颗粒污泥形成中的作用机制[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 795-799.
- Zhang L L, Chen X, Chen J M, *et al.* Role mechanism of extracellular polymeric substances in the formation of aerobic granular sludge [J]. Environmental Science, 2007, **28** (4): 795-799.
- [29] Wachtmeister A, Kuba T, Van Loosdrecht M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. Water Research, 1997, **31** (3): 471-478.



CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)