E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

双奖期刊
中华人民共和国新闻出版总署

2019
Vol.40 No.3
第40卷 第3期

环 境 科 学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 40 卷 第 3 期
2019 年 3 月 15 日

目 次

2014 ~ 2017 北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估 …… 尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞(1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响 …… 李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王垚, 何迪, 权维俊, 马志强(1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 $PM_{2.5}$ 来源解析 …… 王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖(1035)
四川省典型工业行业 $PM_{2.5}$ 成分谱分析 …… 冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏(1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析 …… 赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏(1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源分析 …… 张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华(1062)
新乡冬季 $PM_{2.5}$ 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析 …… 闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎(1071)
烟台市环境受体 $PM_{2.5}$ 四季污染特征与来源解析 …… 刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂(1082)
常州市冬季 $PM_{2.5}$ 中类腐殖质昼夜特征分析 …… 顾远, 李清, 黄雯倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲(1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险 …… 曹红梅,赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏(1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析 …… 邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰(1111)
中国城市 O_3 浓度时空变化特征及驱动因素 …… 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永(1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征 …… 张倩倩, 张兴赢(1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析 …… 王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民(1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立 …… 高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小栓(1152)
异戊二烯和甲苯二次有机示踪物的臭氧非均相氧化 …… 黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰(1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征 …… 栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强(1172)
成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析 …… 胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城(1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO_2 扩散通量估算 …… 张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 仝川(1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化 …… 刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉(1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学 …… 劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa(1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征 …… 刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健(1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析 …… 王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王建力, 郭永丽, 张清华(1222)
鲜水河断裂带虾拉沱盆地断面地下水化学特征及控制因素 …… 何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛(1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征 …… 吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林(1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUSt 功能预测分析 …… 张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进(1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响 …… 刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林(1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价 …… 苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林(1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响 …… 黄磊, 梁银坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成(1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性 …… 何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳(1287)
$BiOCl\text{-}(NH_4)_3PW_{12}O_{40}$ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制 …… 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静(1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除 …… 吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平(1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除 …… 邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫(1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性 …… 易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏(1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素 …… 程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟(1328)
静止和水动力扰动状态下锆改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响 …… 俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜(1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制 …… 王大鹏, 张娴, 颜昌宙(1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析 …… 徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦婷, 汤同欢(1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响 …… 李冬, 曹美忠, 郭跃洲, 梅宁, 李帅, 张杰(1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复 …… 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博(1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能 …… 马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志(1375)
不同曝气量和好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能 …… 袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建园(1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水 …… 李田,曹家炜,谢凤莲,沈耀良,吴鹏,宋吟玲(1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性 …… 谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤(1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征 …… 任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇(1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征 …… 付昆明, 廖敏辉, 周厚田, 付巢, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹(1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析 …… 刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 陈昌明(1419)
温度对硝化杆菌(*Nitrobacter*)活性动力学影响 …… 于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛(1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化 …… 牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山(1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响 …… 彭晶, 王科, 谷月, 王爱杰(1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响 …… 张彦军, 郭胜利(1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的响应 …… 李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦(1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响 …… 王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅(1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征 …… 宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧(1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征 …… 童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水(1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征 …… 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕(1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征 …… 王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅(1504)
大气污染对居民健康影响研究进展 …… 秦耀辰, 谢志祥, 李阳(1512)
《环境科学》征订启事(1042) 《环境科学》征稿简则(1162) 信息(1208, 1235, 1286)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第 40 卷 第 3 期 2019 年 3 月
Vol. 40, No. 3 Mar., 2019

除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复

李海玲[1], 李冬[1*], 张杰[1,2], 刘博[1]
(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 针对生活污水低碳氮比的水质特点, 采用 SBR 反应器接种低温储存的强化生物除磷颗粒污泥, 来启动除磷亚硝化颗粒工艺, 通过控制曝气强度及污泥龄实现除磷亚硝化的稳定运行, 为后置 CANON 或厌氧氨氧化工艺(ANAMMOX)提供进水. 污泥龄为 30 d 的条件下实现了出水 TP 小于 0.5 mg·L^{-1}, COD 浓度小于 50 mg·L^{-1}, 亚硝酸盐氮积累率达到了 90% 以上. 实验还得出, 过高的曝气强度使除磷亚硝化性能恶化, 可采用降低曝气强度和减小污泥龄的方式来改善除磷性能. 污泥龄为 40 d 可以实现生活污水除磷亚硝化中的亚硝化性能进一步恢复, 最终实现出水磷浓度保持在 0.5 mg·L^{-1}以下, COD 及 TP 去除率分别稳定在 80% 及 95%, 亚硝酸盐积累率保持在 90% 以上, SVI 值从初始的 63 mL·g^{-1}降低到 35 mL·g^{-1}, 颗粒污泥沉降性能良好, 颗粒粒径在整个运行过程中保持在1 000 μm 以上.

关键词:序批式反应器(SBR); 除磷亚硝化颗粒污泥; 污泥龄; 溶解氧; 亚硝化积累率; 去除率
中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)03-1367-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201809062

Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification

LI Hai-ling[1], LI Dong[1*], ZHANG Jie[1,2], LIU Bo[1]
(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In this experiment, to determine the characteristics of low carbon and nitrogen water quality in domestic sewage, a sequencing batch reactor (SBR) was used to realize the stable operation of dephosphorization-nitrosation, by inoculating the enhanced biological phosphorus removal granular sludge, which was stored at low temperature. The sludge was activated by control of the aeration intensity and sludge age, which provided water for the influent of a CANON or anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX) process. In the experiment, when the concentration of dissolved oxygen was 6.5 mg·L^{-1} and the sludge age was 30 days, the effluent TP was less than 0.5 mg·L^{-1}, the concentration of COD was less than 50 mg·L^{-1}, and the accumulation rate of nitrite nitrogen was above 90%. It was also found that the performance of phosphorus removal can be improved by reducing the aeration intensity and reducing the age of sludge when the performance was damaged by excessive aeration strength. Aging the sludge for 40 days could restore nitrification during the process of phosphorus removal and nitrification. The final concentration of phosphorus was kept below 0.5 mg·L^{-1}, and the removal rate of COD and TP was stable at 80% and 95%, respectively, the accumulation rate of nitrite remained above 90%, and the SVI value decreased from the initial 63 mL·g^{-1} to 35 mL·g^{-1}. The settling performance of the granular sludge was good, and the particle size was kept above 1 000 μm.

Key words: sequencing batch reactor (SBR); phosphorus removal and nitrification granular sludge; sludge age; dissolved oxygen; nitrification rate; removal efficiency

在传统工艺中, 碳源不足是生活污水中氮、磷元素不能完全去除的主要原因[1,2], 因此在运营过程中需要采取外加碳源的方式来提高处理效果, 这样会产生额外费用. 强化生物除磷工艺(enhanced biological phosphorus removal, EBPR)在厌氧条件下吸收挥发性脂肪酸, 并以聚羟基脂肪酸酯(polyhydroxyalkanoate, PHA)的形式储存于体内, 在好氧或缺氧条件下利用 PHA 为碳源和能量, 过量吸收磷酸盐, 最终通过排放剩余污泥达到除磷效果, 同时去除污水中的有机碳源[3]. 亚硝化、厌氧氨氧化等自养脱氮工艺可以在有机碳源匮乏的条件下实现氨氮的转化和去除, 过高的有机碳源会对亚硝化、厌氧氨氧化工艺运行造成不利影响, 甚至导致系统崩溃[4~6]. 因此可以将强化生物除磷工艺与亚硝化和厌氧氨氧化工艺组合来解决生活污水存在的碳源不足问题[7].

厌氧/好氧交替运行模式有利于淘汰亚硝酸盐氧化菌(NOB), 实现亚硝酸盐积累[7,8]. 强化生物除磷工艺的运行模式为先厌氧后好氧的 A/O 运行模式, 为实现除磷工艺和亚硝化工艺相结合提供了

收稿日期: 2018-09-07; **修订日期**: 2018-09-19
基金项目: 北京市优秀青年拔尖团队项目(2014000026833TD02)
作者简介: 李海玲(1992~), 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:1330166589@qq.com
* 通信作者, E-mail:lidong2006@bjut.edu.cn

可行性，研究者开始对亚硝化与除磷工艺结合进行研究，实现了除磷亚硝化[9~11]. 颗粒具有沉降性能良好，微生物含量大，抗冲击性能强的特点[12]. 目前对于颗粒污泥的研究大多集中于好氧颗粒污泥，对于除磷亚硝化颗粒污泥的研究相对较少[13~17].

聚磷菌需要通过排泥达到除磷的目的，而硝化细菌的世代周期较长，因此污泥龄对于实现除磷亚硝化有重要的影响[18]. 曝气强度对于除磷及亚硝化工艺都有重要的影响，单一的亚硝化工艺中过高的曝气强度下亚硝化会转变成全程硝化. 由此本实验接种于低温储存的除磷颗粒污泥，控制污泥龄及曝气强度来实现除磷亚硝化的启动. 本文研究曝气强度对于除磷亚硝化颗粒的除磷性能和亚硝化性能的影响，同时探究除磷亚硝化性能破坏后的恢复方法，在整个运行阶段对反应器中的亚硝酸盐积累率、除磷特性、颗粒污泥特性和胞外聚合物进行测量和分析，考察除磷亚硝化颗粒的性能，以期为除磷亚硝化颗粒应用于实际工程提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行方法

本实验采取由有机玻璃制成的SBR反应器，高46 cm，内径15 cm，有效容积为6 L，其启动及稳定运行参数见表1. 通过搅拌机进行搅拌，同时底部设有直径为10 cm的曝气盘，并通过气体流量计控制曝气强度.

反应器每天均运行4个周期，每个周期6 h，包括10 min进水，2 h厌氧，3 h好氧，3 min沉淀，10 min排水，其余阶段为闲置阶段. 整个反应在室温条件下进行，不对温度进行控制，pH不进行控制，换水比为67%.

1.2 接种污泥与实验用水

反应器接种本实验室低温储存的成熟强化生物除磷颗粒污泥，初始污泥浓度为4 500 $mg\cdot L^{-1}$. 实验用水为北京工业大学家属区化粪池污水，其基本水质如表2所示.

表1 启动及稳定运行参数

Table 1 Start-up and stable operation parameters

阶段	运行时间	曝气强度/$mL\cdot min^{-1}$	厌氧时间/h	曝气时间/h	污泥龄/d
Ⅰ	1~27 d	600	2	3	30
Ⅱ	28~43 d	900	2	3	30
	44~60 d	600	2	3	30
Ⅲ	61~79 d	600	2	3	20
	80~105 d	600	2	3	40

表2 生活污水水质情况

Table 2 Water quality of domestic sewage

项目	COD/$mg\cdot L^{-1}$	NH_4^+-N/$mg\cdot L^{-1}$	NO_2^--N/$mg\cdot L^{-1}$	NO_3^--N/$mg\cdot L^{-1}$	PO_4^{3-}-P/$mg\cdot L^{-1}$	pH
范围	150~300	30~70	<1	0~2	4~8	7.0~8.0

1.3 分析项目与检测方法

NH_4^+-N采用纳氏试剂光度法；NO_2^--N采用*N*-(1-萘基)-乙二胺光度法；NO_3^--N采用麝香草酚紫外分光光度法；COD和TP的测定采用5B-3B型COD多参数快速测定仪；pH、DO和温度的测定均采用WTW-pH/Oxi 340i便携式多参数测定仪监测. MLSS、MLVSS、SV30、SVI等指标均采用国家规定的标准方法[19]. 颗粒的粒径采用Mastersize 2000激光粒度仪测定.

EPS的提取步骤[20]：取25 mL泥水混合物，8 000 $r\cdot min^{-1}$离心15 min；去掉上清液后加入PBS溶液(50 $mmol\cdot L^{-1}$磷酸钠、150 $mmol\cdot L^{-1}$ NaCl及pH=7)稀释至原体积；超声破碎3 min；然后80℃水浴加热30 min，冷却后，8 000 $r\cdot min^{-1}$离心15 min，取上清液测定蛋白质(PN)和多糖(PS)，剩余污泥测定MLSS. PN采用考马斯亮蓝法；PS采用苯酚硫酸法.

本实验中亚氮积累率(NAR)，游离亚硝酸(FNA，HNO_2-N/L)按下式计算：

$$NAR = \frac{\Delta C_{NO_2^-N} \times 100\%}{\Delta C_{NO_2^-N} + \Delta C_{NO_3^-N}} \quad (1)$$

$$FNA = \frac{NO_2^-N}{K_a \times 100^{pH}} \quad (2)$$

式中，K_a根据温度进行计算，其值为：$e^{-2\,300/(273+t)}$.

2 结果与讨论

2.1 生活污水除磷亚硝化颗粒处理性能

2.1.1 TP及COD去除性能

本实验接种污泥为实验室培养的低温储存的成熟除磷颗粒污泥. 根据实验的运行情况，将反应分

为 3 个阶段. 阶段Ⅰ、Ⅱ在运行过程中，污泥龄为 30 d，阶段Ⅲ的污泥龄为 20 d，第 78 d 将污泥龄调整为 40 d. 生活污水除磷亚硝化颗粒污泥对 COD 及 TP 的去除性能如图 1 所示.

阶段Ⅰ，控制污泥龄为 30 d，曝气量为 600 $mL\cdot min^{-1}$，好氧段控制溶解氧(DO)在 6.5 $mg\cdot L^{-1}$ 以下，是除磷亚硝化颗粒启动阶段. 在接种完成后经过了 10 d 的运行，除磷性能得以稳定，出水磷浓度稳定在 1 $mg\cdot L^{-1}$ 以下. 在反应器运行到第 15 d 后，总磷去除率持续稳定在 90% 以上，出水磷浓度在 0.5 $mg\cdot L^{-1}$ 以下，除磷性能稳定，实现了生活污水除磷颗粒的启动. 阶段Ⅰ前 15 d，COD 出水浓度处于 50 ~ 100 $mg\cdot L^{-1}$ 之间. 聚磷菌等异养菌在低温储存后性能还未得到充分恢复，此时进水中的 COD 浓度波动较大，且浓度较高，使得初始 COD 浓度相对偏高. 从第 15 d 开始出水 COD 降低到 50 $mg\cdot L^{-1}$ 以下，出水 TP 小于 0.5 $mg\cdot L^{-1}$，TP 去除率达到 90%，COD 去除率接近 80%.

阶段Ⅱ，将曝气量提高到 900 $mL\cdot min^{-1}$，进水水质没有明显波动，但是 TP 及 COD 的去除性能均发生了恶化. 有研究发现当 FNA 浓度超过 1.5×10^{-3} $mg\cdot L^{-1}$ 时，PAOs 好氧吸磷作用会被完全抑制[21,22]. 阶段Ⅰ，出水亚硝酸盐氮浓度虽然达到了 10 $mg\cdot L^{-1}$，FNA 浓度达到 1.37×10^{-3} $mg\cdot L^{-1}$，但并未对除磷性能产生影响. 而在阶段Ⅱ、Ⅲ亚硝酸盐积累量远低于阶段Ⅰ，FNA 的计算值没有达到完全抑制好氧吸磷的浓度. Zeng 等认为[23]，亚硝酸盐积累会导致聚磷菌与聚糖菌竞争碳源，使碳源不足导致除磷效果变差. 由于曝气量的提高，原有的聚磷菌与氨氧化菌之间的平衡被打破，硝酸盐氮的浓度明显升高，导致进入下一周期厌氧段的NO_3^--N 增多，易被生物降解的 COD 被用于反硝化脱氮，影响厌氧释磷阶段，导致除磷性能变差[22].

阶段Ⅲ曝气强度降为 600 $mL\cdot min^{-1}$. 在降低曝气后，厌氧释磷量有明显的升高，平均出水 TP 浓度也从 3 $mg\cdot L^{-1}$ 降低到了 1 $mg\cdot L^{-1}$. 阶段Ⅲ除磷性能的恢复进一步验证了在除磷亚硝化工艺中过高的曝气强度会引起反硝化细菌与聚磷菌竞争碳源，影响除磷效果. 在第 60 d，为了快速恢复除磷性能，控制污泥龄为 20 d，由于排泥量增大，有利于

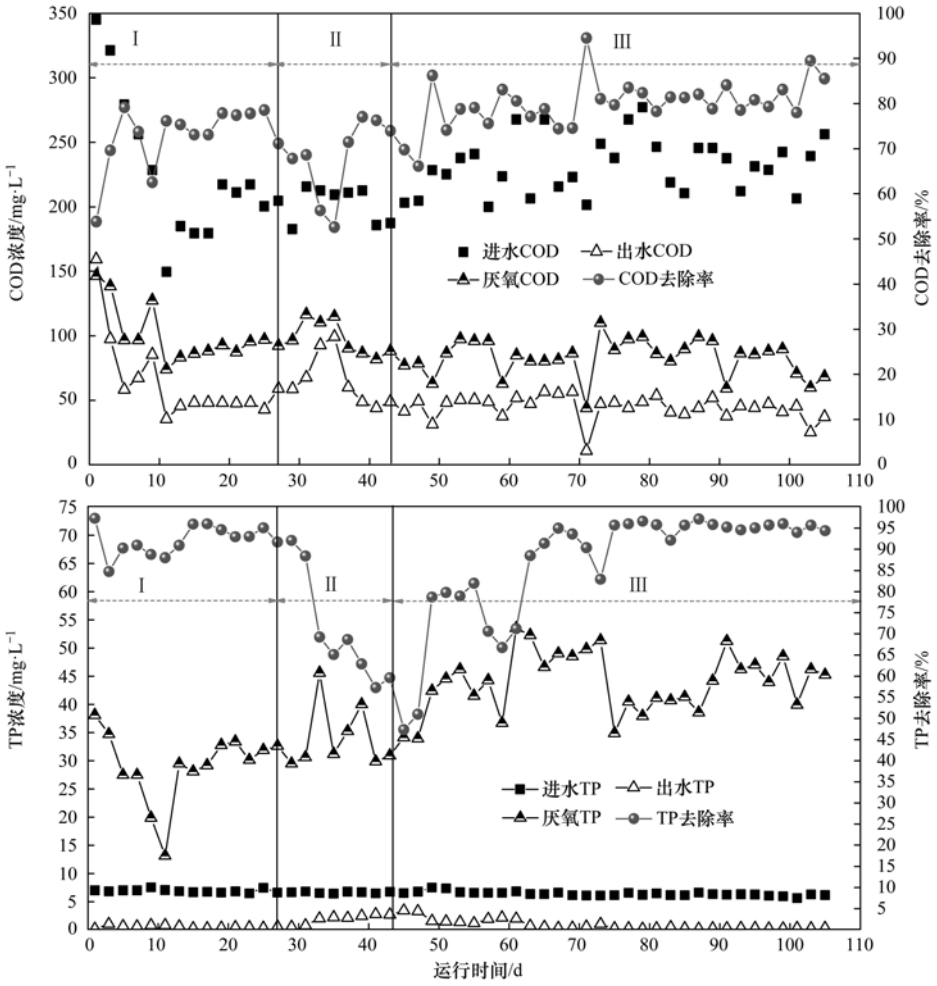

图 1　颗粒污泥中 COD 及 TP 去除性能

Fig. 1　Removal performance of COD and TP in the granular sludge

聚磷菌对磷的去除. 出水磷浓度在经过 4 d 的恢复后, 出水中的 TP < 0.5 mg·L^{-1}, COD < 50 mg·L^{-1}, 总磷去除率稳定在了 95% 左右, COD 去除率达到了 80%.

2.1.2 除磷亚硝化颗粒中的氮元素转化性能

如图 2 所示, 阶段 Ⅰ 在接种初期亚硝酸盐氧化菌(NOB)含量较高, 出水中的硝酸盐浓度达到了 7 mg·L^{-1}. NOB 相对于氨氧化菌(AOB)世代时间更长, 需要有一定亚氮积累, 才能促进其增长, 且 A/O 运行模式, 不利于 NOB 增殖. 基于以上原因, 随着实验进行, 除磷性能得到恢复, 并通过不断的排泥及控制较低的溶解氧浓度, 使得反应器中的 NOB 逐渐被排除出反应器, 亚硝酸盐积累率从 28% 增长到了 90% 以上. 亚氮积累量从 2 mg·L^{-1}逐渐增长到 10 mg·L^{-1}. 并趋于稳定, 出水硝酸盐浓度小于 1 mg·L^{-1}, 平均亚氮积累率达到了 95%.

阶段 Ⅱ, 由于曝气量的提高导致亚硝酸盐积累量从上一阶段的 10 mg·L^{-1}降低到了 2 mg·L^{-1}, 硝酸盐含量从 0 mg·L^{-1}增长到了 10 mg·L^{-1}, 亚硝化性能发生恶化, 聚磷菌活性降低. 在 900 mL·min^{-1}的曝气条件下, 好氧末溶解氧浓度达到了 8 mg·L^{-1}. 溶解氧含量高且有亚硝酸盐作为 NOB 的反应基质, 为 NOB 的增长提供了有利条件, 使得亚硝化遭到破坏. 阶段 Ⅲ, 为抑制 NOB 增长在不改变其他条件的前提下采取了降低曝气的方式, 将曝气量从 900 mL·min^{-1}降低到了 600 mL·min^{-1}, 好氧末溶解氧从 8 mg·L^{-1}降低到了 6 mg·L^{-1}, 通过此方式硝氮浓度降低到 5 mg·L^{-1}, 亚氮积累率从 15% 升高到 40%, 亚硝化性能恶化得到一定的抑制. 为进一步提高亚氮积累率, 排除 NOB, 同时改善系统除磷性能. 在第 60 d, 采取了缩短污泥龄的方式, 将污泥龄降低到了 20 d. 经过了 10 d 左右的运行, NOB 几乎全部被淘洗出反应器, 亚硝化积累率从 45% 逐渐升高到了 80% 以上. 亚硝化性能得到恢复. 但是亚氮积累量较低, 其值稳定在 3 mg·L^{-1}. 在第 80 d 将污泥龄提高为 40 d, 亚氮积累量逐渐升高到了 8 mg·L^{-1}且呈逐渐上升的趋势. 硝酸盐氮浓度保持在 1 mg·L^{-1}之下, 亚硝酸盐积累率保持在 90% 以上, 且性能稳定. 出现这种现象的主要原因是因为上一阶段的较低的污泥龄使得 NOB 被淘汰出反应器, 较高的污泥龄满足了世代周期时间较长的氨氧化细菌增值所需的必要条件, 反应器内氨氧化细菌随之增多, 另外除磷性能的恢复, 聚磷菌竞争氧气的能力增强, 使得在好氧开始阶段反应器内溶解氧保持在较低的水平, 也使得亚硝态氮积累能够保持稳定.

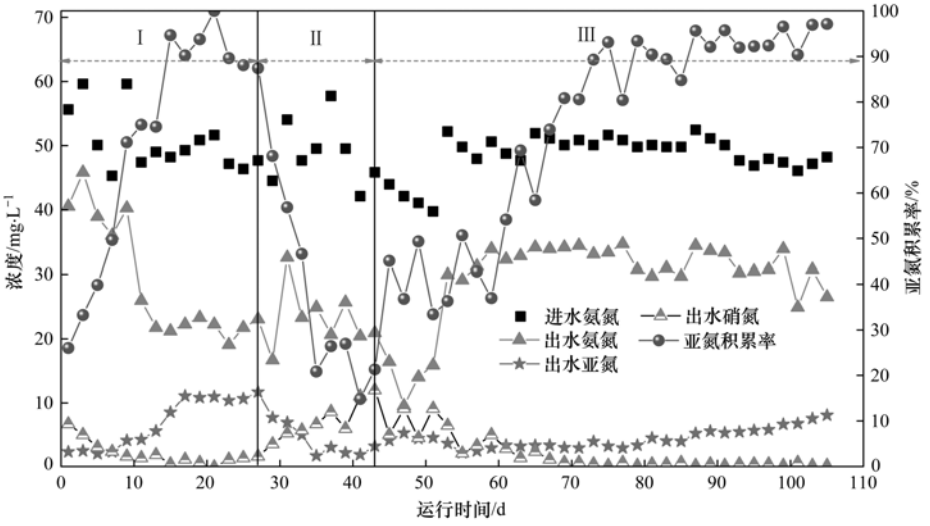

图 2 氨氮转化性能

Fig. 2 Ammonia nitrogen conversion performance

由以上各阶段的运行结果可知, 生活污水的水质条件下, 控制曝气强度为 600 mL·min^{-1}污泥龄为 30 d, 可以实现除磷亚硝化颗粒启动. 除磷亚硝化系统中亚硝化性能受除磷性能及曝气量的影响较大, 当系统中除磷性能良好时, 聚磷菌可以和硝化细菌竞争氧气, 使硝化性能保持稳定. 聚磷菌的活性受到抑制则硝化细菌所处环境中的溶解氧则相对更加充分, 有利于 NOB 的增殖, 使得亚硝化性能恶化. 另外在除磷亚硝化系统中溶解氧稳定在 6.5 mg·L^{-1}以下有利于亚硝酸盐积累, 过高的曝气强度会使除磷亚硝化性能恶化, 当溶解氧达到 8 mg·L^{-1}以上时, 打破原有除磷亚硝化系统的稳定性, 容易产生硝氮积累, 出水 TP 浓度有所升高. 在亚硝酸盐积累被破坏后可采用降低曝气强度, 减小污泥龄的方式实现 NOB 的控制, 在短期内使除磷性能得到恢复. 在

除磷性能得到恢复后，适当提高污泥龄为 40 d 有利于亚氮积累量的提高.

2.1.3 典型周期实验分析

生活污水除磷亚硝化实现的关键在于保证除磷性能良好的同时实现亚硝化，控制硝酸盐浓度处于较低的范围内. 本研究表明NO_2^--N积累对 TP 的释放和吸收会产生不利影响，但本实验在运行过程中厌氧释磷和好氧吸磷都没有受到影响，且 NOB 得到了淘洗. 选取阶段Ⅳ内的任意一天做典型周期实验，可以通过各参数的变化规律，来分析原因，同时对单周期内反应进行整体的把握和分析，实现反应的合理调控.

如图 3 所示，在厌氧开始前 40 min，COD 浓度从 220 mg·L^{-1}迅速降低到 90 mg·L^{-1}，TP 迅速升高到 39.82 mg·L^{-1}，此后基本保持不变. pH 呈现先降低，再升高，再降低的趋势. pH 从 0 min 的 7.38 先逐渐降低到 40 min 的 7.15 后保持不变. 厌氧阶段聚磷菌(PAOs)通过消耗多聚磷酸盐来释放能量，把水中的有机物分解以聚羟基脂肪酸酯的形式储存在体内[3]. 在厌氧释磷结束时，COD 仍有剩余，说明聚磷菌厌氧释磷的碳源充足，因此不会影响厌氧释磷过程. 此过程中伴随着 pH 值降低，当 pH 值保持不变时说明厌氧释磷过程基本完成.

好氧阶段开始后，pH 值从 7.16 开始升高到 7.81，此过程历时 40 min，此后 20 min 内稳定在 7.81 左右，不再升高. 在厌氧阶段产生的 PHA 被分解，用来为聚磷菌吸收磷提供能量，此过程会导致 pH 值下降. 在曝气 40 min 后，此时虽然还有吸磷的现象存在，但 pH 值却不再升高，由于水中存在未被消耗的 COD，颗粒内部的反硝化菌能够发生反硝化作用. 在好氧吸磷及短程硝化反硝化共同作用下 pH 值基本保持不变. 好氧阶段进行 60 min 后，pH 出现明显降低，产生这种现象的原因主要是由于吸磷已经基本完成且易被生物降解的 COD 被反硝化菌消耗殆尽，亚硝化占反应主导引起的.

整个周期好氧阶段的溶解氧浓度都保持在 3.5 ~6.5 mg·L^{-1}，相对于传统亚硝化，溶解氧浓度较高，不利于形成亚硝化，本实验过程中实现了对 NOB 的抑制和排除，实现了亚硝化，出现这种现象的原因可能有 3 点:第一，NOB 增值速度相对较慢，实验控制排泥，实现了 NOB 的淘洗；第二，本实验采取先厌氧再好氧的运行方式，且好氧时间仅为 3h，不利于 NOB 增值；第三，颗粒污泥特殊的结构特点，在溶解氧不超过 6.5 mg·L^{-1}的条件下，可以保证颗粒内部合适的溶解氧浓度，保证亚硝化性能的稳定.

图 3 中氨氮、亚硝态氮在厌氧阶段几乎没有变化，好氧阶段开始后的前 80 min 内，TP 浓度从厌氧末的 40.72 mg·L^{-1}降低到 3.58 mg·L^{-1}，此时亚氮几乎没有积累，随着反应的进行氨氮浓度从 43.98 mg·L^{-1}降低到 26.23 mg·L^{-1}，亚氮积累量逐渐上升到 6.7 mg·L^{-1}. 由此可知，好氧吸磷过程相对优先于亚硝酸积累，因此NO_2^--N并未对好氧吸磷产生影响.

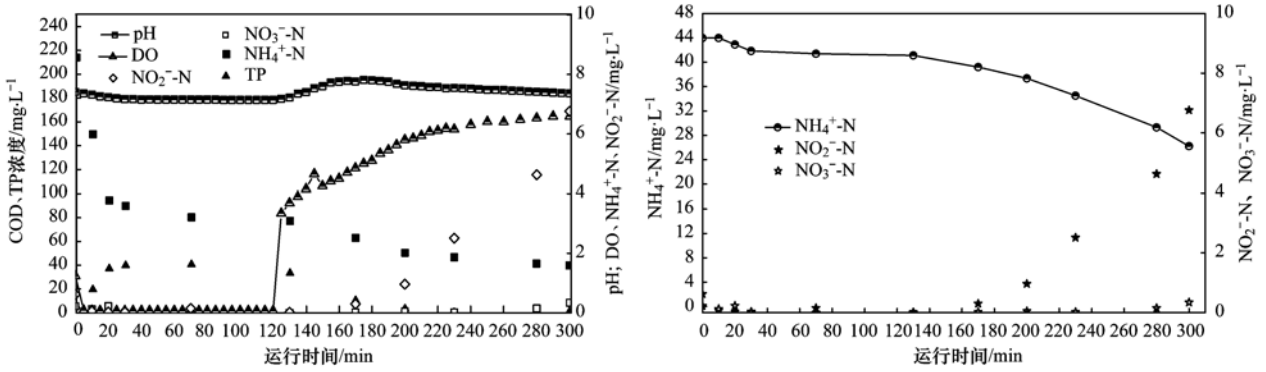

图 3　典型周期内各参数变化

Fig. 3　Change diagram of each parameter in a typical period

2.2 除磷亚硝化颗粒污泥颗粒性能分析

2.2.1 沉淀性能及生物量变化

MLSS、MLVSS、SVI 是常用来表征颗粒特性的参数. 用 MLVSS/MLSS 来表征系统内的生物量，SVI 来反映颗粒污泥的沉降性能. 如图 4 所示，在运行前 30 d 污泥的 MLSS 及 MLVSS 的浓度都呈现逐渐下降的趋势，MLSS 从接种初期的 4 300 mg·L^{-1}降低到了3 300 mg·L^{-1}，MLVSS 也从3 900 mg·L^{-1}将低到了2 900 mg·L^{-1}. 这一阶段污泥浓度的降低主要是因为接种的污泥浓度较高，实验污泥由于长期在4℃冰箱内储存，接种到反应器内存在适应阶段引起的颗粒部分解体，由于实验设置的沉淀时间仅为 3 min，较短的沉淀时间使得大量絮体被排出反应器，同时也将部分不适应反应器运行条

件的菌种淘汰，导致 MLSS/MLVSS 的值下降，絮体排出，SVI 值从 63 mL·g^{-1}降低到了 52 mL·g^{-1}，系统中的颗粒的沉降性能呈现出日趋良好的趋势. 经适应后，MLVSS/MLSSS 的值在 0.76 左右波动，说明系统中生物量保持相对稳定. 反应器在除磷性能恶化，亚硝化被破坏时，虽然污泥龄保持在 30 d 不变，但由于除磷菌在此阶段活性不高，只吸收少量的营养物质用于其自身生长，增殖速度较慢，导致反应器内污泥浓度仍有所降低，MLSS 从 3 300 mg·L^{-1}降低到了 2 700 mg·L^{-1}，MLVSS 从 2 900 mg·L^{-1}降低到了 1 900 mg·L^{-1}. 将污泥龄提高到 40 d 后，污泥浓度逐渐增高，从 3 000 mg·L^{-1}增长到 3 500 mg·L^{-1}. 随反应器的运行 SVI 值从 52 mL·g^{-1}降低到了 35 mL·g^{-1}. 表明颗粒的沉降性能日趋良好. MLVSS/MLSS 也一直保持在 0.8 左右，系统内微生物持续协调稳定.

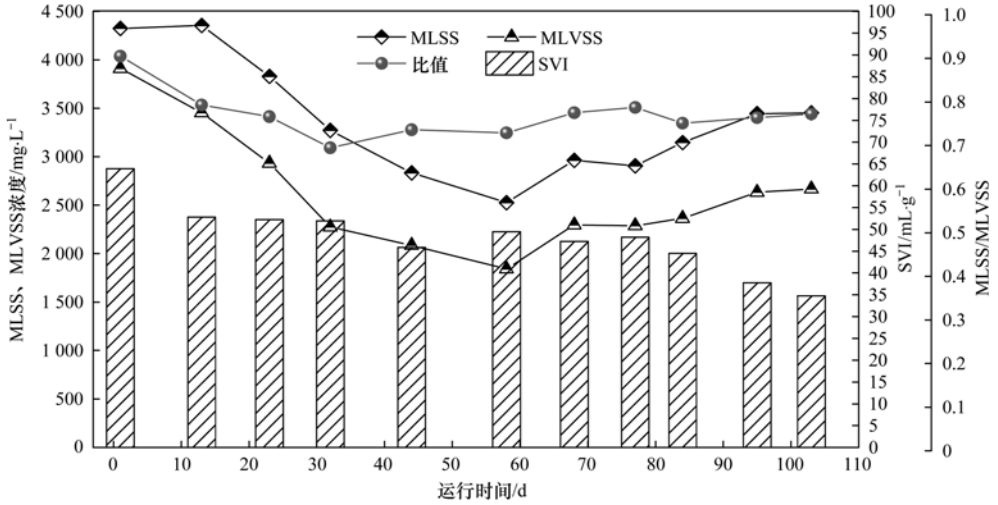

图 4 运行过程中 MLSS、MLVSS、MLVSS/MLSS 及 SVI 变化

Fig. 4 Change chart of MLSS, MLVSS, MLVSS/MLSS, and SVI during operation

2.2.2 EPS 变化

EPS 对颗粒的形成及其稳定起到重要的影响. 它的成分主要为蛋白(protein, PN)和多糖(polysaccharose, PS)，其中也含有少量的 DNA，而 PN/PS 作为表示颗粒稳定性的主要参数之一[24,25]. 污泥中的 EPS 分泌值的增加有利于颗粒污泥抵抗外界环境的变化[25].

如图 5 所示，实验运行的过程中，在阶段Ⅰ和阶段Ⅲ除磷亚硝化效果稳定时，PN 含量(以 VSS 计)稳定在 120 ~ 125 mg·g^{-1}之间，PS 的值基本稳定在 58 mg·g^{-1}，PN/PS 的值均在 2.0 左右；在运行不稳定时 PN 稍有降低，最低到达了 110 mg·g^{-1}，PS 相比 PN 有更明显的降低，最低达到了 47 mg·g^{-1}，而 PN/PS 的值最高达到了 2.6. 由此可见

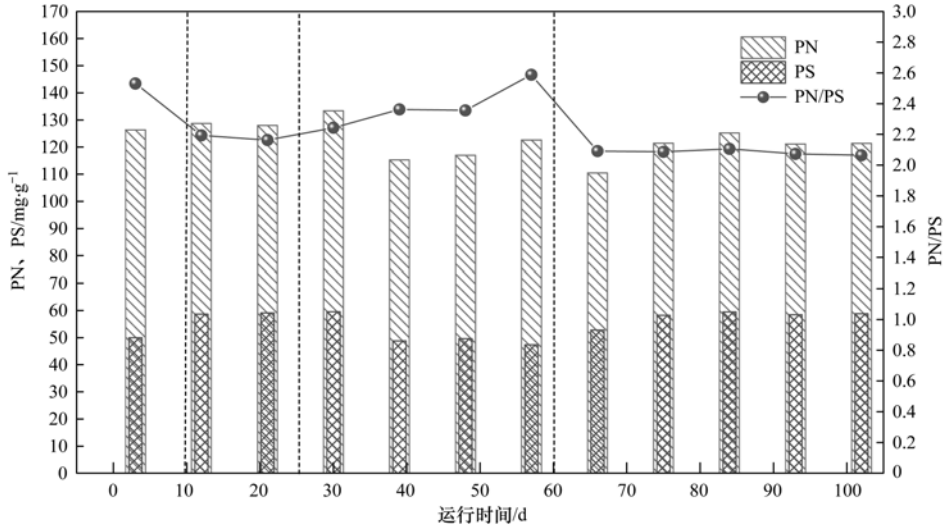

图 5 运行过程中 PN、PS 和 PN/PS 的变化

Fig. 5 PN, PS, and PN/PS changes during the process of operation

PN/PS 的值可以反映系统的运行稳定性，当系统发生失衡时 PN/PS 的值高于系统正常运行时的比值.

3　结论

(1)采用生活污水，保持污泥龄为 30 d 的条件下，通过调节曝气量为 600 mL·min^{-1}来控制溶解氧浓度保持在 6.5 mg·L^{-1}的条件下，可以实现生活污水启动除磷亚硝化颗粒启动，出水 COD 在 50 mg·L^{-1}以下，出水 TP 小于 0.5 mg·L^{-1}，COD 去除率接近 80%，TP 去除率达到 90%，亚氮积累量达到 10 mg·L^{-1}，出水硝酸盐浓度小于 1 mg·L^{-1}，平均亚氮积累率达到了 95%.

(2)在除磷亚硝化系统中曝气强度达到 900 mL·min^{-1}，会导致除磷性能下降，出水亚氮浓度降低，硝氮浓度升高. 当亚硝化出现恶化，降低曝气可以在一定程度上恢复亚硝化性能. 采取增大排泥量，降低污泥龄为 20 d 的方式，可以将 NOB 从反应器中淘汰，并实现除磷性能的恢复，适当提高污泥龄，能够使得亚氮积累量增加，实现了亚硝化性能的恢复.

(3)在除磷亚硝化颗粒工艺处理实际生活污水时，好氧阶段聚磷菌好氧吸磷相对优先于亚硝酸盐积累，因此吸磷过程受亚氮积累影响不大. PN/PS 值与除磷亚硝化颗粒性能相关，PN/PS 的值在除磷亚硝化效果良好时明显低于性能较差时的值.

参考文献：

[1] 张杰，臧景红，杨宏，等. A^2/O 工艺的固有缺欠和对策研究[J]. 给水排水，2003，**29**(3)：22-26.
Zhang J，Zang J H，Yang H，*et al*. A study on the inherent shortcomings and countermeasures of the A^2/O process[J]. Water & Wastewater Engineering，2003，**29**(3)：22-26.

[2] Siegrist H，Salzgeber D，Eugster J，*et al*. Anammox brings WWTP closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal[J]. Water Science & Technology，2008，**57**(3)：383-388.

[3] Oehmen A，Lemos P C，Carvalho G，*et al*. Advances in enhanced biological phosphorus removal：from micro to macro scale[J]. Water Research，2007，**41**(11)：2271-2300.

[4] 谭发，王敦球，金樾，等. 有机碳源对一体化厌氧氨氧化反应器脱氮性能的影响[J]. 安全与环境工程，2016，**23**(4)：44-50.
Tan F，Wang D Q，Jin Y，*et al*. Effect of organic carbon source on nitrogen removal performance of one-stage Anammox reactor[J]. Safety and Environmental Engineering，2016，**23**(4)：44-50.

[5] 高美云，刘兴国，曾宪磊，等. 有机碳对养殖池塘沉积物中反硝化、厌氧氨氧化的影响[J]. 环境工程学报，2018，**12**(1)：49-56.
Gao M Y，Liu X G，Zeng X L，*et al*. Effects of organic carbon for denitrification and anaerobic ammonium oxidation in sediments of aquaculture pond[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering，2018，**12**(1)：49-56.

[6] 李亚峰，马晨曦，张驰. pH 值和有机碳源对匹配厌氧氨氧化的 SBR 亚硝化的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版)，2014，**30**(6)：1128-1135.
Li Y F，Ma C X，Zhang C. Study on the impact of pH and organic carbon source on ANAMMOX adopting nitrosification in SBR[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)，2014，**30**(6)：1128-1135.

[7] 王俊安. 厌氧好氧除磷厌氧氨氧化脱氮城市污水再生全流程研究[D]. 北京：北京工业大学，2010.
Wang J A. Integrated process of anaerobic-Oxic phosphorus removal and anaerobic ammonium oxidation nitrogen removal for urban sewage regeneration[D]. Beijing：Beijing University of Technology，2010.

[8] 张杰，张艳辉，李冬，等. 缺氧/好氧和协同控制 DO/HRT 工艺对亚硝化的影响比较[J]. 哈尔滨工业大学学报，2016，**48**(8)：11-16.
Zhang J，Zhang Y H，Li D，*et al*. Comparison of effects on partial nitrification between anoxic-oxic and controling DO/HRT process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2016，**48**(8)：11-16.

[9] 周元正，李冬，苏东霞，等. 改良 SBR 工艺实现生活污水除磷与半亚硝化[J]. 中国环境科学，2015，**35**(5)：1351-1358.
Zhou Y Z，Li D，Su D X，*et al*. Partial nitritation and phosphorus removal in improved SBR process treating domestic wastewater[J]. China Environmental Science，2015，**35**(5)：1351-1358.

[10] 马斌，张树军，王俊敏，等. A/O 工艺实现城市污水半亚硝化与生物除磷[J]. 哈尔滨工业大学学报，2012，**44**(2)：70-74.
Ma B，Zhang S J，Wang J M，*et al*. Partial nitritation and biological phosphorus removal in A/O process treating municipal wastewater[J]. Journal of Harbin Institute of Technology，2012，**44**(2)：70-74.

[11] Zhang J H，Zhang Q，Li X Y，*et al*. Rapid start-up of partial nitritation and simultaneously phosphorus removal (PNSPR) granular sludge reactor treating low-strength domestic sewage[J]. Bioresource Technology，2017，**243**：660-666.

[12] López-Palau S，Pericas A，Dosta J，*et al*. Partial nitrification of sludge reject water by means of aerobic granulation[J]. Water Science & Technology，2011，**64**(9)：1906-1912.

[13] Devlin T R，Oleszkiewicz J A. Cultivation of aerobic granular sludge in continuous flow under various selective pressure[J]. Bioresource Technology，2018，**253**：281-287.

[14] Corsino S F，Di Trapani D，Torregrossa M，*et al*. Aerobic granular sludge treating high strength citrus wastewater：Analysis of pH and organic loading rate effect on kinetics，performance and stability[J]. Journal of Environmental Management，2018，**214**：23-25.

[15] 李冬，吕育锋，张金库，等. SBR 中曝气强度对除磷颗粒的影响[J]. 化工学报，2015，**66**(12)：4994-5001.
Li D，Lü Y F，Zhang J K，*et al*. Influence of aeration intensity on phosphorus removal granules in SBR[J]. CIESC Journal，2015，**66**(12)：4994-5001.

[16] 梁东博，卞伟，阚睿哲，等. 不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化[J]. 环境科学，2018，**39**(4)：1713-1719.
Liang D B，Bian W，Kan R Z，*et al*. Achieving partial nitritation in a continuous-flow aerobic granular sludge reactor at different temperatures through ratio control[J]. Environmental Science，2018，**39**(4)：1713-1719.

[17] 杨丹，刘东方，杜丽琼，等. 好氧颗粒污泥系统中溶解性微

生物代谢产物的特征及主要组分[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1325-1332.
Yang D, Zhang D F, Du L Q, *et al*. Characterization composition of soluble microbial products in an aerobic granular sludge system[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1325-1332.

[18] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al*. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, **50**(5): 589-596.

[19] 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.

[20] Wang Z P, Liu L L, Yao J, *et al*. Effects of extracellular polymeric substances on aerobic granulation in sequencing batch reactors[J]. Chemosphere, 2006, **63**(10): 1728-1735.

[21] Yoshida Y, Takahashi K, Saito T, *et al*. The effect of nitrite on aerobic phosphate uptake and denitrifying activity of phosphate-accumulating organisms[J]. Water Science & Technology, 2006, **53**(6): 21-27.

[22] Saito T, Brdjanovic D, van Loosdrecht M C M. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms[J]. Water Research, 2004, **38**(17): 3760-3768.

[23] Zeng W, Yang Y Y, Li L, *et al*. Effect of nitrite from nitritation on biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(12): 6657-6664.

[24] Chen Y, Jiang W J, Liang D T, *et al*. Structure and stability of aerobic granules cultivated under different shear force in sequencing batch reactors[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **76**(5): 1199-1208.

[25] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review[J]. Biotechnology Advances, 2010, **28**(6): 882-894.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 40 No. 3

Mar. 15, 2019

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017 ····· YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, *et al.* (1011)

Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014 ····· LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, *et al.* (1024)

Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter ····· WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, *et al.* (1035)

Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province ····· FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, *et al.* (1043)

Source Apportionment and Pollution Characteristics of $PM_{2.5}$ During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City ····· ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, *et al.* (1052)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Heating and Non-heating Periods in Shenyang ····· ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, *et al.* (1062)

Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in $PM_{2.5}$ During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment ····· YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, *et al.* (1071)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient $PM_{2.5}$ During Four Seasons in Yantai City ····· LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, *et al.* (1082)

Day-night Characteristics of Humic-like Substances in $PM_{2.5}$ During Winter in Changzhou ····· GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, *et al.* (1091)

Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China ····· CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, *et al.* (1101)

Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations ····· QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, *et al.* (1111)

Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China ····· HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, *et al.* (1120)

Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation ····· ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying (1132)

Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan ····· WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, *et al.* (1143)

Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China ····· GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, *et al.* (1152)

Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone ····· HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, *et al.* (1163)

Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City ····· LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, *et al.* (1172)

Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu ····· HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, *et al.* (1179)

Diffusive CO_2 Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model ····· ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, *et al.* (1188)

Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea ····· LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, *et al.* (1198)

Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir ····· LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, *et al.* (1209)

Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China ····· LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, *et al.* (1217)

Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring ····· WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, *et al.* (1222)

Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River ····· HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, *et al.* (1236)

Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City ····· WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, *et al.* (1245)

Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir ····· ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, *et al.* (1252)

Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China ····· LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, *et al.* (1261)

Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI) ····· SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, *et al.* (1270)

Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of *Acorus calamus* in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland ····· HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, *et al.* (1280)

Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials ····· HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, *et al.* (1287)

Preparation of BiOCl-$(NH_4)_3PW_{12}O_{40}$ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants ····· ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, *et al.* (1295)

High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source ··· WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, *et al.* (1302)

Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite ····· DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, *et al.* (1310)

Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar ····· YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, *et al.* (1318)

Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution ····· CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, *et al.* (1328)

Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions ····· YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (1337)

Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant ····· WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou (1347)

Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes ····· XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, *et al.* (1353)

Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System ····· LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, *et al.* (1360)

Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification ····· LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, *et al.* (1367)

Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance ····· MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, *et al.* (1375)

Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times ····· YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, *et al.* (1382)

ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater ····· LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, *et al.* (1390)

Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature ····· XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, *et al.* (1396)

ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics ····· REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, *et al.* (1405)

Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process ····· FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, *et al.* (1412)

Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System ····· LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, *et al.* (1419)

Effect of Temperature on the Activity Kinetics of *Nitrobacter* ····· YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, *et al.* (1426)

Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron ····· NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, *et al.* (1431)

Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems ····· PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, *et al.* (1439)

Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity ····· ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li (1446)

Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area ····· LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, *et al.* (1457)

Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area ····· WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, *et al.* (1468)

Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management ····· NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, *et al.* (1475)

Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil ····· TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, *et al.* (1483)

Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin ····· XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, *et al.* (1491)

Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain ····· WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, *et al.* (1504)

Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents ····· QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang (1512)