

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.1

第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM _{2.5} 污染演变的时空过程	时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)
2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析	郑庆峰, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)
夏季大气PM _{2.5} 中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例	刘威杰, 石明明, 程敏, 黎莹, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)
呼包鄂地区冬季、夏季PM _{2.5} 污染特征	李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)
2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM _{2.5} 污染特征及来源解析	周静博, 段青春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)
基于模型模拟的成都市PM _{2.5} 污染来源解析	许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)
北京市PM _{2.5} 中砷污染特征	石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段青春, 谭吉华, 陈荣志 (57)
夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析	易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)
安阳市大气PM _{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析	孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)
新乡市夏冬季节PM _{2.5} 稳定碳同位素特征分析	闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)
基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估	梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)
超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征	王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)
京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨	余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)
安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析	杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)
长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响	王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)
华东典型城市非道路移动机械排气烟度	鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昀, 黄成 (133)
国内外储油库VOCs排放现状与标准分析	胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)
四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响	庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)
乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比	徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张显, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)
长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素	汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)
巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征	沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)
城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例	田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)
典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估	陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)
长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估	李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)
白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析	汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)
松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评价	王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟丰, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)
鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系	李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)
臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响	刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)
兰州市西固区儿童饮水重金属暴露与健康风险精细化评估	陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)
镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制	吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)
一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制	廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)
酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能	谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)
脱氮菌剂在低溶解性黑臭水体中氮代谢特征	赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)
宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及抗性基因	陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)
淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析	赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)
基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控	陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)
基于间歇饥饿的SNAD工艺运行	李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)
反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液	陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)
硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现	刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)
高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)
中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评价	向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖偲, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)
某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征	孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)
北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征	张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征	杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)
亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征	宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)
宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化	陈志浩, 覃云斌, 丁帮琛, 胡优优, 陈湜, 李正魁 (412)
秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响	王晶, 马丽娟, 刘泽华, 陆伟, 侯振安 (420)
基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析	黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)
塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征	陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)
广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征	马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)
不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响	张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)
不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响	栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪艺凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)
黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应	周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)
炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响	蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)
《环境科学》征订启事(89)	
《环境科学》征稿简则(97)	
信息(303, 329, 344)	

高频曝停下停曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响

张杰^{1,2}, 劳会妹¹, 李冬^{1*}, 魏子清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: 间歇曝气中停曝时间对于 NOB 的抑制是积累亚硝酸盐的关键, 为探究曝气频次相同、停曝时间组合不同亚硝化颗粒污泥的稳定运行, 在 25~28℃, 接种好氧颗粒污泥于 SBR(R0) 反应器中, 通过间歇曝气与 DO 限制驯化为亚硝化颗粒污泥, 采用 3 组规格相同的 SBR 反应器(R1、R2 和 R3) 分析停曝时间组合(3 min:3 min、4 min:2 min 和 2 min:4 min) 对亚硝化颗粒污泥性能的影响. 实验表明, R1、R2 亚硝酸盐积累率较高, 平均亚硝酸盐积累率分别为 89% 和 95%, R3 亚硝化性能较差, 运行周期末期亚硝酸盐积累率仅为 57%. 结果表明, 在停曝时间为 2~4 min 下, 停曝时间越长, 越有利于颗粒污泥结构的稳定, 同时可保持良好的亚硝化性能; 停曝时间小于 2 min 时, 厌氧好氧交替的环境不能完全实现, 致使其运行效果倾向于连续曝气, 失去了间歇曝气的环境优势, NOB 菌得不到抑制, 颗粒污泥呈现解体的趋势, 导致亚硝化性能恶化; 此外, 较长曝气时间会有助于不规则形状颗粒的发展, 停曝时间越长, PN/PS 值越高, 有利于颗粒表面疏水性的增强, 污泥沉降性能越好.

关键词: 间歇曝气; 亚硝酸盐积累率; 亚硝化颗粒污泥; 停曝时间; PN/PS

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0360-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201907146

Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge

ZHANG Jie^{1,2}, LAO Hui-mei¹, LI Dong^{1*}, WEI Zi-qing¹

(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: The inhibition of the on/off aeration time ratio on nitrite oxidizing bacteria (NOBs) in intermittent aeration is the key to accumulating nitrite. This study explores the stable operation of nitrosated granular sludge under the same frequency of aeration and different combinations of stop exposure time. At 25-28℃, aerobic granular sludge was inoculated into a sequencing batch reactor (SBR) (R0) and acclimatized to nitrosated granular sludge by intermittent aeration and dissolved oxygen (DO) restriction. The effects of different on/off aeration time ratios in one sub-aeration cycle (3 min:3 min; 4 min:2 min; 2 min:4 min) on the performance of nitrosated granular sludge were analyzed using three same sets of SBRs (R1, R2, and R3). Experiments showed that the nitrite accumulation rates of R1 and R2 were higher, with average nitrite accumulation rates of 89% and 95%, respectively. The nitrosation performance of R3 was poor, and the nitrite accumulation rate at the end of the operation cycle was only 57%. The results showed that when the off-aeration time was between 2 and 4 minutes, the longer the off-aeration time was, the more stable the granular sludge structure was; hence, a good nitrosation performance could be maintained. When the off aeration time was less than 2 minutes, the alternation of anaerobic and aerobic environment could not be fully realized, which resulted in the sludge tending to stay in an environment of continuous aeration. Thus, the environmental advantage of intermittent aeration was lost; the NOBs could not be inhibited, and the granular sludge was disintegrated thereby leading to the deterioration of the nitrosation performance. Additionally, the longer aeration time contributed to the development of irregularly shaped particles. The longer the off-aeration time was, the higher the PN/PS value was, which was beneficial to the enhancement of the hydrophobicity of the particle surface and the sludge settling performance.

Key words: intermittent aeration; nitrite accumulation rate; nitrosated granular sludge; on/off aeration time; PN/PS

亚硝化厌氧氨氧化工艺与传统脱氮工艺相比, 具有节约曝气、节省外加碳源、减少污泥产量等优点^[1-4], 作为该工艺的前端工艺, 亚硝化的稳定运行十分重要^[5]. 但氨氧化细菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NOB)世代时间长和污泥流失严重, 致使亚硝化工艺受到了限制^[6]. 颗粒污泥具有沉降性能良好, 抵抗能力较强, 污泥停留时间长等优点, 亚硝化颗粒污泥的研究成为了热点^[5,7]. 刘文如等^[8]接种活性污泥于 SBR 反应器中, 通过缩短沉降时间和增加进

水负荷在 40 d 后获得黄色的亚硝化颗粒污泥. 然而 AOB 是自养菌, 世代周期长, 若直接采用逐渐降低沉降时间来启动颗粒污泥所需时间较长, 污泥流失严重, 导致污泥浓度过低. 又有研究表明, 完全接种好氧颗粒污泥也可以实现亚硝化颗粒污泥的启动.

收稿日期: 2019-07-16; 修订日期: 2019-08-03

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

作者简介: 张杰(1938~), 男, 博士生导师, 院士, 主要研究方向为水环境恢复理论及关键技术, E-mail: 1072678789@qq.com

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

Xu 等^[9]通过添加羟胺抑制 NOB 实现好氧颗粒污泥到亚硝化颗粒污泥的转变。

有研究表明^[10],在被破坏的亚硝化系统中保持较低的 DO 不能抑制 NOB,而采用 7 min 好氧/21 min 厌氧间歇曝气策略则能很好地抑制 NOB 的活性。目前,间歇曝停被认为是实现亚硝化工艺稳定的一种有效策略^[5,11],从厌氧到好氧过程中 AOB 较 NOB 能较快地恢复活性^[12~16],有研究表明^[17],在周期 8 h、曝停比相同、曝停频次为 75、52、23、8 和 2 次下,曝停频次大的运行方式能较好地抑制 NOB。

间歇曝气在维持亚硝化性能方面至关重要,厌氧时间对于 NOB 的抑制是积累亚硝酸盐的关键,为探究高频曝气下的停曝时间组合下亚硝化颗粒污泥的稳定运行,接种好氧颗粒污泥于 SBR 反应器中,通过间歇曝气与 DO 限制驯化其为亚硝化颗粒污泥,启动成功后在 3 个 SBR 反应器中,通过时控开关控制周期时间 6 h,曝气频次 54 次,调整停曝时间组合为 3 min:3 min、4 min:2 min 和 2 min:4 min,通

过比较 3 种运行方式中亚硝化性能、污泥形态、粒径变化、EPS 等参数,研究基于高频曝停下的停曝时间组合对亚硝化颗粒污泥性能的影响。

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行参数

实验采用两套由有机玻璃制成的 SBR 反应器,母反应器(R0)用于亚硝化颗粒污泥的启动,高 90 cm,内径 16 cm,有效容积 14.07 L。采用 3 组相同规格的 SBR 反应器(R1、R2 和 R3)用于曝停时间对亚硝化性能的影响研究,高 60 cm,内径 16 cm,有效容积 8.04 L,换水比为 3/4,底部设有曝气装置,采用鼓风曝气,转子流量计控制曝气量。SBR 反应器在 25~28℃ 下运行培养。

R0、R1、R2 和 R3 反应器每天运行 4 个周期,每个周期 6 h,其中包括 10 min 进水,厌氧搅拌、曝气搅拌、7 min 沉降和 10 min 排水闲置。SBR 反应器运行参数见表 1。

表 1 不同阶段反应器运行参数
Table 1 Reactor operating parameters at different stages

反应器	曝气:停曝/min	曝停频次/次	转子流量计流量/ L·(h·L) ⁻¹	曝气量/L	曝气 DO/ mg·L ⁻¹
启动	3:3	54	1.09	41.4	0.2~0.5
R1	3:3	54	1.74	37.9	0.8~1.2
R2	2:4	54	2.62	37.9	1.3~1.7
R3	4:2	54	1.31	37.9	0.5~0.8

1.2 接种污泥与实验用水

R0 反应器接种培养成熟的好氧颗粒污泥作为种泥,MLSS 为 5 400 mg·L⁻¹,SVI 为 38 mL·g⁻¹,R1、R2 和 R3 反应器接种本实验培养成熟亚硝化颗粒污泥作为种泥,MLSS 为 2 200 mg·L⁻¹,SVI 为 28 mg·L⁻¹。采用人工配水运行反应器,以丙酸钠为有机碳源(COD=50 mg·L⁻¹),硫酸铵提供氨氮(NH₄⁺-N=50 mg·L⁻¹),碳酸氢钠提供进水碱度,碱度与氨氮浓度质量比为 10:1,pH 维持在 7.6~8.1,水中含有 0.136 g·L⁻¹ KH₂PO₄、0.02 g·L⁻¹ MgSO₄·7H₂O 和 0.136 g·L⁻¹ CaCl₂,微生物生长必需的微量元素^[18]。

1.3 分析方法

定期检测反应器内混合液 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、MLSS、MLVSS 和 SVI 等参数,通过 WTW (pH/Oxi 340i) 便携式多参数测定仪监控 pH、DO 及温度。水样分析中 NH₄⁺-N 测定采用纳氏试剂分光光度法,NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法,NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法,MLSS、MLVSS 和 SVI 等参数采用国家规定的标准方法测定。颗粒的

粒径采用 Mastersize 2000 激光粒度仪测定。

胞外聚合物(EPS)中,多糖(PS):苯酚-硫酸比色法;蛋白质(PN):考马斯亮蓝法;EPS 的提取方法为首先取 30 mL 污泥样品,配平,4000g 离心 10 min,去掉上清液,加入缓冲液,恢复体积到 30 mL,配平,4000g 离心 15 min,去掉上清液,加入缓冲液,恢复体积至 30 mL,涡旋 1 min 使离心管底部污泥完全散开,60℃ 水浴加热 30 min,同时令离心机空转降温至 4℃,样品冷却至接近室温时,配平,20000g 离心 20 min,4℃,最后上清液经 0.22 μm 滤膜过滤得到 EPS。

本实验中氨氧化率和亚硝酸盐积累率分别按照式(1)、(2)计算:

亚硝酸盐积累率(NAR) =

$$\frac{\Delta(\text{NO}_2^- - \text{N})}{\rho(\text{NO}_2^- - \text{N}) + \rho(\text{NO}_3^- - \text{N})} \times 100\% \quad (1)$$

氨氧化率 =

$$\frac{\Delta(\text{NH}_4^+ - \text{N})_{\text{in}} - \Delta(\text{NH}_4^+ - \text{N})}{\Delta(\text{NH}_4^+ - \text{N})_{\text{in}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中,Δ(NH₄⁺-N)_{in} 为进水 NH₄⁺-N 浓度,mg·L⁻¹;

$\Delta(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为出水 NH_4^+-N 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\Delta(\text{NO}_2^--\text{N})$ 、 $\Delta(\text{NO}_3^--\text{N})$ 分别为进出水中 NO_2^--N 、 NO_3^--N 的浓度差, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 亚硝化的快速启动

运行期间,采用 3 min 曝气:3 min 停曝的间歇曝气以及 DO 限制策略来实现亚硝化颗粒污泥的快速启动,反应器 R0 的氮素变化如图 1 所示. 反应器接种污泥为好氧颗粒污泥,由图 1 可知,接种初期,进水氨氮为 $50.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,由于受到间歇曝气及曝气量限制的影响,出水氨氮比较高,为 $22.89 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氮去除率为 54%,并且初期接种污泥中含有大量的 NOB 菌,故反应初期大部分亚硝态氮转化成硝态氮,出水亚硝态氮及硝态氮为 $8.65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $17.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝酸盐积累率仅 33.6%. 有研究表明^[12~16],从厌氧到好氧阶段 AOB 会比 NOB 恢复较快,并且在低 DO 时 AOB 的相对增殖速率可达 NOB 的 2.6 倍^[19],低 DO 对 AOB 与 NOB 的生长做出了选择,随着运行天数的增加,AOB 逐渐适应厌氧好氧的交替的环境,NOB 的活性逐渐被抑制,系统的亚硝化性能逐渐增强,运行第 10 d,出水氨氮为 $10.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝态氮和硝态氮为 $26.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $9.87 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氮去除率及亚硝酸盐积累率为 78% 和 73%,且在随后的运行中,平均亚硝酸盐积累率逐渐上升并维持在 92%,亚硝化启动成功.

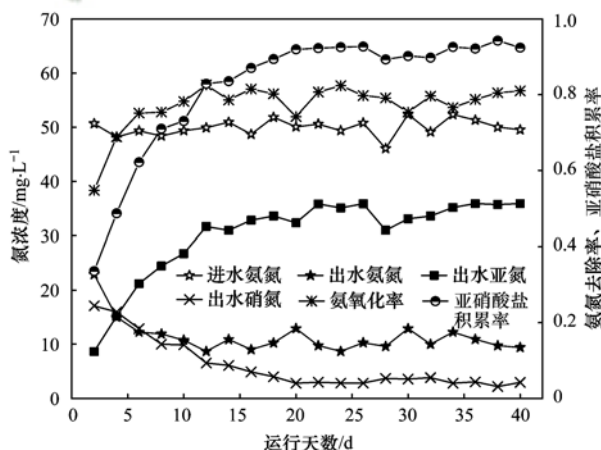


图 1 启动阶段氮素、氨氮去除率及亚硝酸盐积累率变化

Fig. 1 Variations of nitrogen, ammonia nitrogen removal efficiency, and nitrite accumulation efficiency during startup stage

2.2 不同曝气方式下亚硝化性能

间歇曝气在维持亚硝化性能方面至关重要,厌氧时间对于 NOB 的抑制是积累亚硝酸盐的关键,为研究高频曝气下停曝时间组合对于亚硝化系统的影响,采用 3 个 SBR 反应器 (R1、R2 和 R3),比较 3 种

间歇曝气方式为 3 min:3 min、4 min:2 min 及 2 min:4 min 对亚硝化系统稳定运行的影响,反应器 R1、R2 和 R3 运行期间的亚硝化性能变化如图 2 所示.

由图 2(a)可知,与启动阶段相比,由于增加了单位时间单位水量的曝气量,运行初期 R1 的氨氮去除率可达 91%,启动阶段较好地抑制了 NOB 的活性,运行第 1 d 亚硝酸盐积累率较高,可达 93%,随着运行天数的增加,在第 54 d,出水氨氮、亚硝态氮及硝态氮为 3.22 、 40.1 和 $4.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氮去除率及亚硝酸盐积累率为 93%、90%. 在运行期间内,氨氮去除率较高在 90% 以上,亚硝酸盐积累率有轻微下降,但基本保持稳定,平均亚硝酸盐积累率为 89%,亚硝化性能良好. 由图 2(b)可知,由于停曝时

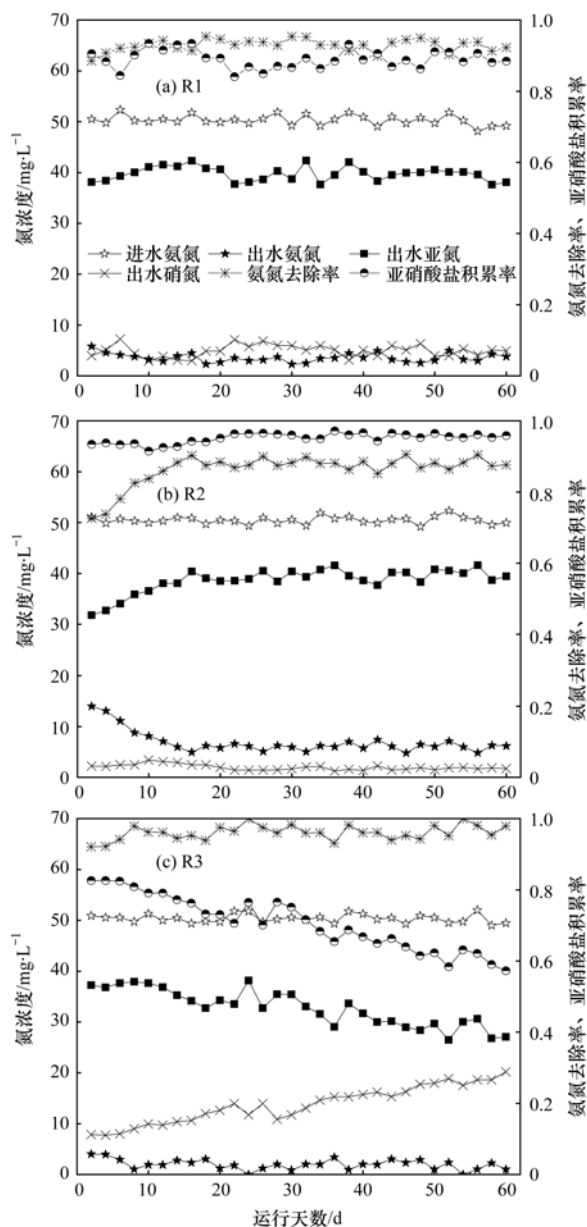


图 2 运行期间氮素、氨氮去除率及亚硝酸盐积累率变化

Fig. 2 Variations of nitrogen, ammonia nitrogen removal efficiency, and nitrite accumulation efficiency during operation

间的增加导致 AOB 与氧气接触的时间缩短,在接种污泥初期 AOB 菌不能及时将进水当中的氨氮转化为亚氮,出水氨氮为 $14.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮去除率仅能达到 72%,随着反应器的运行,AOB 逐渐适应短曝气时间的环境,并有研究表明^[17],在较高频曝气下会筛选出氨氧化率较快的 AOB 菌^[17],故氨氮去除率逐渐上升,在第 10 d,出水氨氮、亚硝态氮及硝态氮为 8.1、36.54 和 $3.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮去除率及亚硝酸盐积累率为 83% 和 91%,随着运行天数的进一步增加,停曝时间的增加对 NOB 活性的抑制进一步增强,故 R2 反应器的亚硝酸盐积累率在此后的运行中始终保持稳定并维持在 95% 以上,系统的亚硝化性能良好.由图 2(c)可知,由于停曝时间的缩短,因此 R3 在反应初期的氨氧化率可达到 92%,但与氨氮去除率不同的是,随着运行天数的增加,R3 反应器的亚硝化性能呈现恶化的趋势,此外,R3 中污泥沉降性能变差,颗粒呈现解体的趋势,至 32 d,出水氨氮、亚硝态氮及硝态氮为 2.01、33.03 和 $13.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亚硝酸盐积累率仅为 71%,运行期间,氨氮去除率较高并稳定维持在 95% 以上,但亚硝酸盐积累率逐渐下降,在运行周期末期亚硝酸盐积累率下降到 57%,亚硝化性能恶化.分析原因,由于 R3 中的停曝时间较短,厌氧好氧交替的环境不能完全实现,致使其运行效果倾向于连续曝气,失去了间歇曝气的环境优势,NOB 菌的活性逐渐恢复,导致亚硝化系统被破坏.

2.3 不同曝气方式下亚硝化污泥特性

图 3 表征了整个实验阶段污泥沉降性能及平均颗粒粒径的变化,从中可知,R1、R2 和 R3 这 3 个反应器中接种污泥后的 MLSS 分别为 2 256、2 236 和 $2 233 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,SVI 值分别为 28.72、28.61 和 $28.61 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,说明污泥活性较高活性及沉降性能良好.由于硝化细菌为自养型细菌,生长速率缓慢,故 R1、R2 和 R3 的污泥浓度增加缓慢.从图 3(a)和 3(b)可以看出,运行期间,R1 和 R2 反应器的污泥浓度和污泥沉降性能均较好,到 22 d,R1 和 R2 反应器

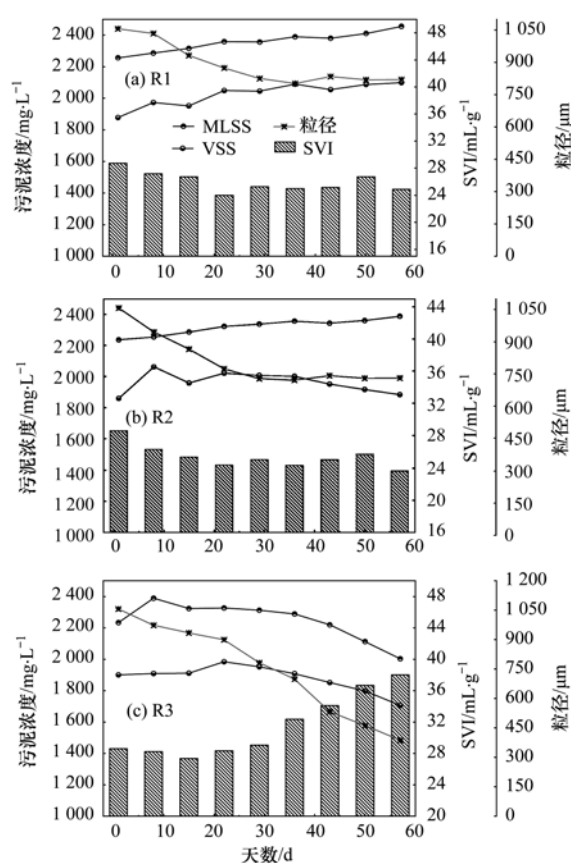


图 3 运行期间 MLSS、VSS、SVI、平均粒径的变化

Fig. 3 Variations of MLSS, VSS, SVI, and the mean particle during operation

中的污泥浓度分别增加到 $2 359 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2 322 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,SVI 值分别下降到 $24.01 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $24.34 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,并随后基本保持稳定,运行周期末,R1 和 R2 反应器中的污泥浓度分别为 $2 455 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2 387 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,SVI 值分别为 $24.87 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $23.63 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$.而与 R1 和 R2 不同的是,由图 3(c)可知,对于 R3 反应器,污泥浓度呈现先上升后下降的趋势,同样 SVI 呈现先下降后上升的趋势,运行周期末,R3 中的污泥浓度下降到 $2 003 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,SVI 值上升到 $38.01 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$.分析原因,有研究表明,低溶解氧会引起污泥结构的不稳定^[20],在 R3 反应器中,停曝时间过短,厌氧好氧交替的环境不能完全实现,致使其运行效果倾向于连续曝气,并且在停曝期间颗

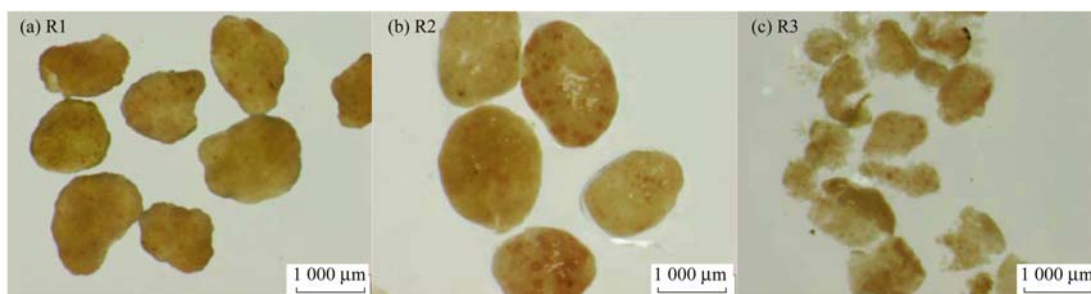


图 4 R1、R2、R3 颗粒污泥显微镜照片

Fig. 4 Microphotograph of granular sludge in R1, R2, and R3

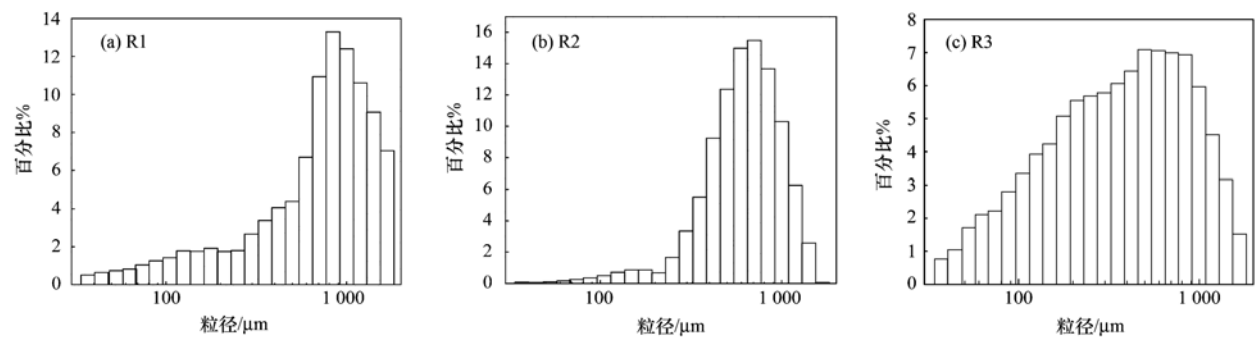


图 5 运行期间典型周期内粒径分布

Fig. 5 Particle size distribution in typical cycles during operation

粒污泥处于低 DO 环境下,致使污泥沉降性能变差,并且反应器内沉降时间较短,部分颗粒污泥解体,污泥的流失,故 R3 污泥浓度下降.而在 R1 和 R2 反应器内形成了交替厌氧/好氧的运行模式,而这种运行方式将增加缺氧异养菌的生长速度,使得缺氧异养细菌作为颗粒的核心,这有利于颗粒污泥结构的稳定^[21,22],故 R1 和 R2 运行阶段污泥沉降性能良好.

R1、R2 和 R3 运行初期,接种的颗粒污泥平均粒径为1 056 μm,为了减少较短的沉降时间对颗粒的选择压力的影响,运行期间维持控制 R1、R2 和 R3 反应器的沉降时长为 7 min.反应器内污泥的平均颗粒粒径如图 3 所示.

从图 3(a)和 3(b)可以看出,运行前期,R1、R2 和 R3 颗粒粒径呈现下降的趋势,在第 29 d,平均颗粒尺寸分别在 R1、R2 和 R3 中下降到 825、723 和 782 μm,R1、R2 随着运行时间的进一步增加,颗粒污泥粒径趋于稳定,R1 和 R2 中平均颗粒粒径分别稳定在 820 μm 和 725 μm,但 R3 运行期间,由图 3(c)所示,颗粒粒径呈现持续下降的趋势,在第 57 d,平均颗粒尺寸下降到 387 μm.由图 4 分析可知,在整个运行期间,R1 中微生物聚集体大多为不规则的致密颗粒,颗粒粒径较大,表面不光滑,密实度高;R2 中几乎所有的微生物聚集体都是规则的致密颗粒,颗粒污泥的粒径较大,呈椭圆形,表面较光滑,密实度较好.对于 R3 反应器,在运行中后期观察到大量的絮状污泥,颗粒污泥呈现解体趋势,结构变得比较松散,部分大粒径污泥破碎生成更小的颗粒.通过表 2 及图 5 的分析,结果表明,R2 中的 $d_{0.9}/d_{0.1}$ 比率达到其最小值为 3.18,从图 5

(b)可以看出 R2 中颗粒的大小是 3 个反应器中最均匀的一个.此外,R1 中的 $d_{0.9}/d_{0.1}$ 比率较大,可以推测较长曝气时间会有助于不规则形状颗粒的发育

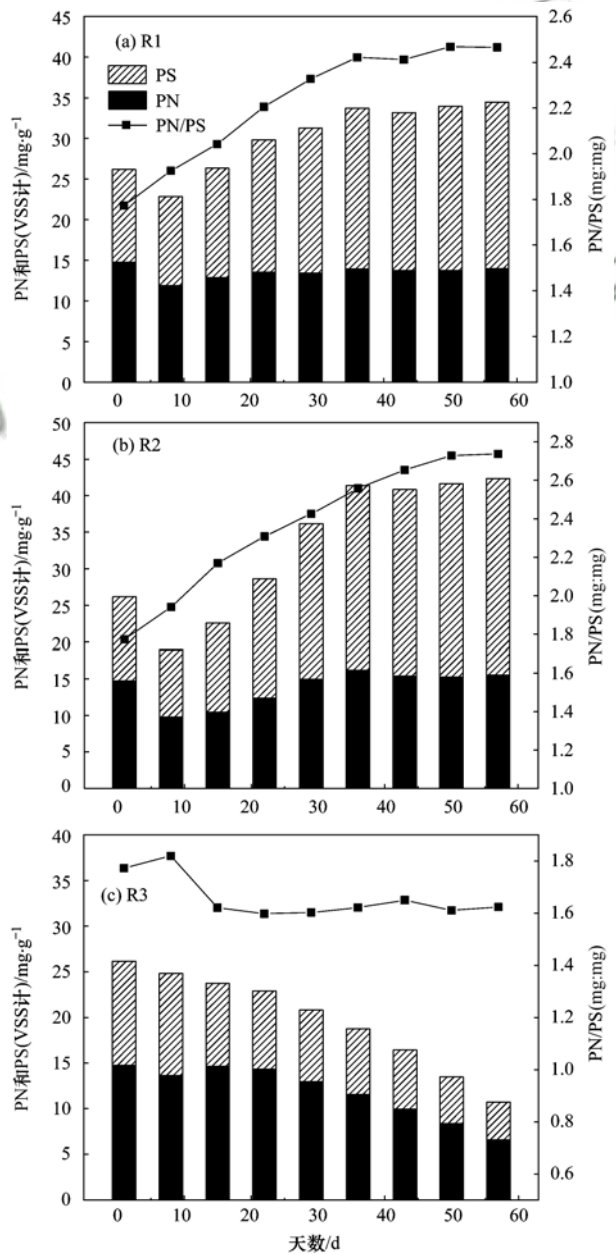


图 6 运行期间 EPS 和 PN/PS 变化

Fig. 6 Variations of EPS and PN/PS during operation

表 2 运行期间典型周期 $d_{0.1}$ 、 $d_{0.9}$ 和 $d_{0.9}/d_{0.1}$ 的变化

Table 2 Variations of $d_{0.1}$, $d_{0.9}$, and $d_{0.9}/d_{0.1}$ in typical cycles during operation

反应器	颗粒平均粒径/ μm	$d_{0.1}/\mu\text{m}$	$d_{0.9}/\mu\text{m}$	$d_{0.9}/d_{0.1}$
R1	819	145.02	1 466.29	10.11
R2	725	365.76	1 163.47	3.18
R3	462	87.77	1 159.73	13.21

展,而通过粒径分布图可以看出 R3 中小颗粒污泥数量较多,并结合图 4(c) 分析可知,颗粒污泥呈现解体状态,可推测停曝时间越短,越不利于颗粒污泥的结构稳定。

2.4 运行阶段胞外聚合物 EPS 的变化

为了进一步对颗粒污泥的性能进行分析,本实验结合 EPS 测定方法,对运行阶段颗粒污泥的 PN、PS 变化进行分析。R1、R2 和 R3 反应器 PN 和 PS 变化如图 6 所示,阶段初期 3 个反应器中的 PN 和 PS 分别为 $26.16 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $14.76 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

分析图 6(a) 可知,运行前期, R1 中的 PN 和 PS 随着运行天数的增加, PN 和 PS 呈现下降的趋势,在第 8 d, PN 和 PS 分别下降到 $22.86 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $11.88 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 在之后颗粒污泥逐渐稳定, PN 和 PS 出现上升趋势并保持平稳状态,至第 36 d, PN 和 PS 分别上升到 $33.73 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $13.93 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。由图 6(b) 可知, R2 与 R1 变化趋势相同, R2 反应器在第 15 d, PN 和 PS 分别下降到 $22.58 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $10.41 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 随后颗粒污泥逐渐适应运行环境, PN 和 PS

出现较大的增长,第 36 d, PN 和 PS 分别增加到 $41.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $16.18 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。由图 6(c) 分析可知,在运行周期内, R3 反应器中的 PN 和 PS 处于一直下降的趋势,运行周期末, R3 反应器的 PN 和 PS 仅为 $10.73 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $6.61 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 远远低于 R1 和 R2 反应器的 PN 和 PS, 且 R2 中的 PN 和 PS 值较高,由此分析,在相同曝气频率下,厌氧时间长越利于 PN 和 PS 的分泌,越有利于颗粒的稳定。分析原因,有研究表明,曝气产生的剪切力会刺激更多 EPS 的分泌^[23],并且厌氧好氧运行模式会强化反应器本身的饱食饥饿特性^[18],且会提高缺氧异养菌的生长速率,同时分泌出更多的 EPS 并利于 AOB 等自养微生物在颗粒表面的固着, R2 反应器中的曝气强度最大且停曝时间较长,故 R2 中 PN 和 PS 含量最高,颗粒最稳定。

有研究表明^[24], PN 比 PS 更易与金属离子发生静电作用而键合,较高的 PN 含量有助于增强颗粒表面疏水性、改善污泥沉降性能^[25, 26], PN/PS 值越大越有助于颗粒污泥的稳定^[27]。如图 6(a) 和 6(b)

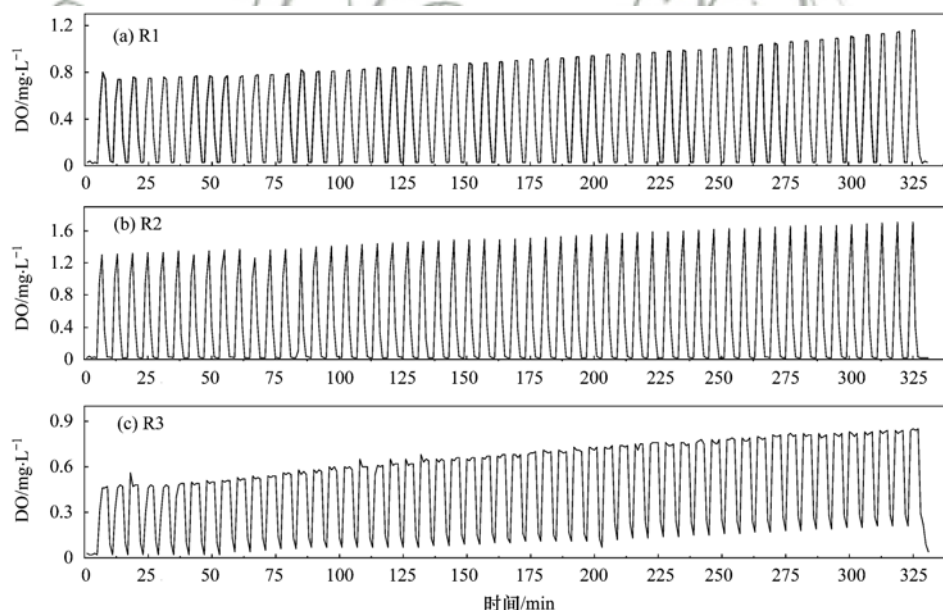


图 7 运行期间典型周期内 DO 的变化

Fig. 7 Variations of DO in typical cycles during operation

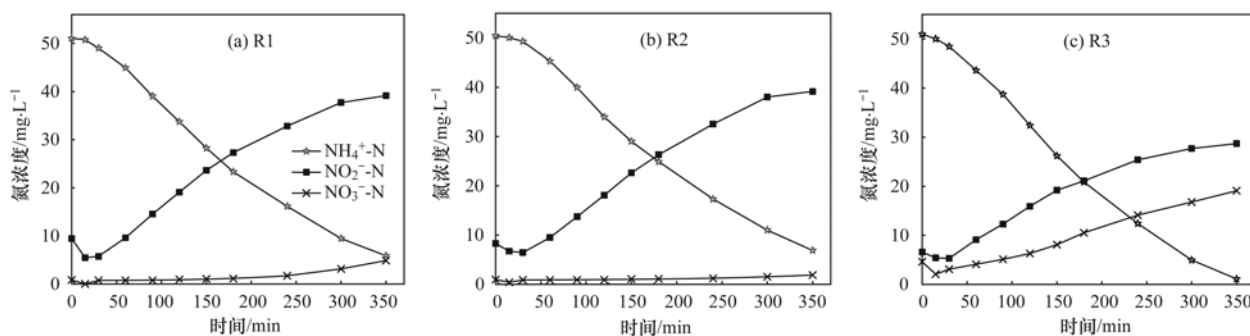


图 8 运行期间典型周期内氨氮、亚氮及硝氮的变化

Fig. 8 Variations of ammonia nitrogen, nitrite nitrogen and nitrate nitrogen in typical cycles during operation

所示,在第8 d, R1 和 R2 中 PN/PS 分别为 1.92 和 1.94,且均呈现上升的趋势,在第36 d, PN/PS 值分别上升到 2.42 和 2.56,随着运行时间的增加,颗粒污泥中的微生物逐渐适应运行环境,PN/PS 的比值逐渐平稳,在运行阶段末期, R1 和 R2 中 PN/PS 值分别为 2.46 和 2.73. 分析图 6(c),在 R3 反应器中由于颗粒污泥呈现恶化的趋势, R3 反应器 EPS 中多糖和蛋白呈现了较大地下降,但由于 PS 的含量较 PN 的含量下降较大,故 R3 反应器中 PN/PS 的值变化不大,在运行周期末期, PN/PS 值为 1.62.

2.5 典型周期内污染物浓度变化

如图 7 和 8 所示,分别为 R1、R2 和 R3 在运行期内的一个典型周期内氨氮、亚硝态氮、硝态氮和 DO 的变化. 分析图 7 可知, R1、R2 和 R3 的好氧段的 DO 分别在 0.8 ~ 1.2、1.3 ~ 1.7 和 0.5 ~ 0.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,由图 7(a) 和 8(a) 可以看出, R1 反应器厌氧段 DO 接近于 0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, R1 进水氨氮为 51.07 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,周期末氨氮、亚硝态氮、硝态氮为 5.88、39.13 及 4.87 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝化性能良好. 分析图 8(b), R2 初期进水氨氮为 50.48 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, R2 的周期出水氨氮、亚硝态氮、硝态氮为 6.88、39.13 及 1.87 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, R2 中的停曝时间为 4 min,较短的曝气时间致使反应器内筛选出氨氧化率较快 AOB 菌,并且较长时间的停曝时间使得 NOB 菌不能及时利用基质而受到了抑制,故实现了良好的亚硝化性能及氨氮去除效果. 由分析图 8(c) 可得, R3 反应器进水氨氮为 50.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,周期末的氨氮、亚硝态氮及硝态氮为 1.1、28.7 和 19.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与 R1 和 R2 不同的是, R3 的氨氮去除率较高为 97.8%,但亚硝酸盐积累率仅为 60%,分析原因, R3 反应器的好氧段 DO 在 0.5 ~ 0.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化,但厌氧段与 R1 和 R2 不同,反应初期,反应器处于好氧厌氧交替环境,在第 200 min 后,短的停曝时间导致 DO 并不能迅速降解为 0,致使反应后期停曝阶段处于低 DO 状态,由于反应器中并未形成良好的厌氧好氧交替的环境,随着反应器运行天数的增加,导致亚硝化颗粒污泥中的 NOB 菌得不到抑制,相对活性得到了提高,致使亚硝化系统遭到破坏.

3 结论

(1) 采用间歇曝气以及 DO 限制策略可以驯化好氧颗粒污泥为亚硝化颗粒污泥,在停曝时间组合为 3 min:3 min, 4 min:2 min 和 2 min:4 min 的运行方式下, 3 min:3 min 及 4 min:2 min 可以维持较高的亚硝酸盐积累,平均亚硝酸盐积累率分别为 89% 和 95%, 2 min:4 min 下亚硝化性能较差,运行周期

末亚硝酸态氮积累率仅为 57%.

(2) 在停曝时间为 2 ~ 4 min 下,停曝时间越长,越有利于颗粒污泥结构的稳定,同时可保持良好的亚硝化性能;停曝时间小于 2 min 时,厌氧好氧交替的环境不能完全实现,致使其运行效果倾向于连续曝气,从而失去了间歇曝气的环境优势, NOB 菌得不到抑制,导致亚硝化性能恶化;

(3) 较长曝气时间会有助于不规则形状颗粒的发展,在相同曝气频率下,厌氧时间长越利于 PN 和 PS 的分泌, PN/PS 值越高,越有利于颗粒表面疏水性的增强,污泥沉降性能越好;停曝时间小于 2 min 时,颗粒污泥呈现解体趋势,部分大粒径污泥破碎成较小的颗粒,结构变得比较松散,沉降性能恶化.

参考文献:

- [1] Li X J, Sung S. Development of the combined nitrification-anammox process in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor with anammox granules [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **281**: 837-843.
- [2] Vlaeminck S E, De Clippeleir H, Verstraete W. Microbial resource management of one-stage partial nitrification/anammox [J]. *Microbial Biotechnology*, 2012, **5**(3): 433-448.
- [3] Ruiz G, Jeison D, Chamy R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration [J]. *Water Research*, 2003, **37**(6): 1371-1377.
- [4] Fux C, Bohler M, Huber P, et al. Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in a pilot plant [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **99**(3): 295-306.
- [5] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, et al. Full-scale partial nitrification/anammox experiences-an application survey [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 292-303.
- [6] Tsuneda S, Nagano T, Hoshino T, et al. Characterization of nitrifying granules produced in an aerobic upflow fluidized bed reactor [J]. *Water Research*, 2003, **37**(20): 4965-4973.
- [7] Wang J F, Qian F Y, Liu X P, et al. Cultivation and characteristics of partial nitrification granular sludge in a sequencing batch reactor inoculated with heterotrophic granules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(21): 9381-9391.
- [8] 刘文如, 丁玲玲, 王建芳, 等. 低 C/N 比条件下亚硝化颗粒污泥的培养及成因分析 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(8): 2226-2233.
Liu W R, Ding L L, Wang J F, et al. Granulation of granular nitrification sludge at low C/N ratio [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(8): 2226-2233.
- [9] Xu G J, Xu X C, Yang F L, et al. Partial nitrification adjusted by hydroxylamine in aerobic granules under high DO and ambient temperature and subsequent Anammox for low C/N wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **213**: 338-345.
- [10] Miao Y Y, Zhang L, Yang Y D, et al. Start-up of single-stage partial nitrification-anammox process treating low-strength swage and its restoration from nitrate accumulation [J]. *Bioresour Technol*, 2016, **218**: 771-779.
- [11] Gilbert E M, Agrawal S, Brunner F, et al. Response of different nitrospirae species to anoxic periods depends on operational DO

- [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48** (5): 2934-2941.
- [12] 张功良, 李冬, 张肖静, 等. 延时曝气对常温低氨氮 SBR 亚硝化影响及恢复[J]. *中国环境科学*, 2014, **34** (8): 1998-2002.
- Zhang G L, Li D, Zhang X J, *et al.* Research on the recovery strategy for nitrosation at room temperature [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34** (8): 1998-2002.
- [13] Turk O, Mavinic D S. Preliminary assessment of a shortcut in nitrogen removal from wastewater[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1986, **13** (6): 600-605.
- [14] Katsogiannis A N, Komaros M, Lyberatos G. Long-term effect of total cycle time and aerobic/anoxic phase ratio on nitrogen removal in a sequencing batch reactor[J]. *Water Environment Research*, 2002, **74** (4): 324-337.
- [15] Katsogiannis A N, Komaros M, Lyberatos G. Enhanced nitrogen removal in SBRs bypassing nitrate generation accomplished by multiple aerobic/anoxic phase pairs [J]. *Water Science and Technology*, 2003, **47** (11): 53-59.
- [16] Bournazou M N C, Hooshiar K, Arellano-Garcia H, *et al.* Model based optimization of the intermittent aeration profile for SBRs under partial nitrification[J]. *Water Research*, 2013, **47** (10): 3399-3410.
- [17] 李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 等. 基于部分硝化的不同曝停频率下脱氮性能的比较[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, **51** (8): 8-13.
- Li D, Guo Y Z, Lao H M. *et al.* Comparison of nitrogen removal performances based on partial nitrification at different frequencies of alternating aerobic/anoxic[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, **51** (8): 8-13.
- [18] 张艳辉, 李冬, 梁瑜海, 等. 缺氧/好氧比对连续流半亚硝化稳定性的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36** (6): 1724-1731.
- Zhang Y H, Li D, Liang Y H, *et al.* Influence of anoxic/aerobic ratio on stability of partial nitrification in a continuous flow process [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36** (6): 1724-1731.
- [19] Tokutomi T. Operation of a nitrite-type airlift reactor at low DO concentration[J]. *Water Science & Technology*, 2004, **49** (5-6): 81-88.
- [20] 李冬, 陶晓晓, 李占, 等. 常温 SBR 亚硝化快速启动及优化试验研究[J]. *环境科学*, 2011, **32** (6): 1653-1659.
- Li D, Tao X X, Li Z, *et al.* Research on the rapid start-up and optimization of parameters for nitrosation at room temperature[J]. *Environmental Science*, 2011, **32** (6): 1653-1659.
- [21] 吴昌永, 周岳溪. 厌氧/好氧运行方式对颗粒污泥形成的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, **33** (7): 1237-1243.
- Wu C Y, Zhou Y X. Effect of anaerobic/aerobic alternative operating strategy on the formation of granular sludge in a sequencing batch reactor [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33** (7): 1237-1243.
- [22] Wan J F, Bessière Y, Spérandio M. Alternating anoxic feast/aerobic famine condition for improving granular sludge formation in sequencing batch airlift reactor at reduced aeration rate [J]. *Water Research*, 2009, **43** (20): 5097-5108.
- [23] Adav S S, Lee D J, Lai J Y. Effects of aeration intensity on formation of phenol-fed aerobic granules and extracellular polymeric substances [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, **77** (1): 175-182.
- [24] Lapidou C S, Rittmann B E. A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass [J]. *Water Research*, 2002, **36** (11): 2711-2720.
- [25] Zhu L, Lv M L, Dai X, *et al.* Role and significance of extracellular polymeric substances on the property of aerobic granule[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **107**: 46-54.
- [26] 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.
- [27] Li D, Lv Y F, Zeng H P, *et al.* Startup and long term operation of enhanced biological phosphorus removal in continuous-flow reactor with granules[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **212**: 92-99.

CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> (1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> (14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> (31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> (39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo (50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> (65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xinxian City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> (82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> (90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> (98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> (106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> (125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> (133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> (166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, JILILI Abuduwali, <i>et al.</i> (173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> (183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhao, WEI Hao, <i>et al.</i> (224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> (242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> (262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> (284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> (293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> (304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> (313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> (321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> (345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> (368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> (377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> (385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Tian-hui, <i>et al.</i> (394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> (412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> (420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Jiulong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> (449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> (460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> (479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> (489)