

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM _{2.5} 成因分析及效果评估	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSON的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈葭, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志伟, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行

李冬¹, 郭跃洲¹, 劳会妹¹, 曹美忠¹, 张杰^{1,2}

(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: 在室温下(17~19℃), 通过接种成熟的亚硝化颗粒污泥于缺氧-好氧连续流反应器中, 研究连续流亚硝化颗粒污泥的启动及稳定运行. 结果表明, 在启动阶段, 颗粒污泥系统的亚硝态氮积累率(NAR)平均超过95%, 成功启动了缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥系统. 将好氧区溶解氧(DO)由(3±0.2)mg·L⁻¹提高到(4.5±0.2)mg·L⁻¹, 探究DO对于该连续流系统的影响. 结果表明, 在较高DO下, 缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥系统仍能保持良好的亚硝化性能, 平均NAR大于95%. 另外, 通过改变进水的水力停留时间(HRT), 探究HRT对于该连续流系统的影响. 较短的水力停留时间(8.4h)会加快污泥颗粒在系统中的循环, 使破碎的颗粒污泥不能及时重组, 致使污泥颗粒沉淀性变差, 造成污泥颗粒的流失. HRT增加到12.2h时, 颗粒污泥系统得到了恢复, 并且可以稳定运行. 在运行末(166d), 氨氮去除率和NAR分别为86.7%和96.2%.

关键词: 亚硝化颗粒污泥; 缺氧-好氧; 亚硝态氮积累率(NAR); 溶解氧(DO); 水力停留时间(HRT)

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0369-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807053

Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules

LI Dong¹, GUO Yue-zhou¹, LAO Hui-mei¹, CAO Mei-zhong¹, ZHANG Jie^{1,2}

(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: Matured nitrosation granules were inoculated to an anoxic-aerobic continuous-flow reactor at room temperature (17-19℃). The startup and stabilization of nitrosation with granules were studied. The results show that the nitrosation of the continuous-flow was successfully achieved with an average nitrite accumulation rate (NAR) above 95%. With the increase of the dissolved oxygen (DO) content from (3±0.2) to (4.5±0.2) mg·L⁻¹ in the aerobic zone, the NAR remained above 95%. The effect of the hydraulic retention time (HRT) of the continuous-flow reactor was investigated. The short HRT (8.4 h) sped up the circulation of the sludge particles in the continuous-flow system such that the broken granular sludge could not be integrated in time, resulting in the deterioration of granular sludge settling and the loss of sludge granules. The performance of the system was restored with the increase of the HRT to 12.2 h and the continuous-flow system stabilized. The ammonia removal efficiency and NAR were 86.7% and 96.2% on day 166, respectively.

Key words: nitrosation granules; anoxic-aerobic; nitrite accumulation rate (NAR); dissolved oxygen (DO); hydraulic retention time (HRT)

氮素是水体富营养化的主要促进因素之一. 与传统的生物脱氮工艺(硝化-反硝化工艺)相比, 亚硝化-厌氧氨氧化工艺由于节约曝气、节省外加碳源、减少污泥产量等优点, 已成为生物脱氮研究的热点^[1-4]. 作为该耦合工艺的前端工艺, 亚硝化的稳定运行非常关键^[5]. 亚硝化工艺的实质是抑制亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidizing bacteria, NOB)以及富集氨氧化细菌(ammonia oxidizing bacteria, AOB).

由于较低的生长速率, 硝化细菌在普通活性污泥直接富集较为困难^[6]. Bian等^[7]和Feng等^[8]利用膜反应器(membrane bio-reactor, MBR)较高污泥停留时间的特性, 成功实现了亚硝化并取得较高的

亚硝态氮积累. 颗粒污泥以其良好的沉降性能、较强的抵抗能力以及较长的污泥停留时间而受到广大研究者的青睐, 亚硝化工艺与颗粒污泥结合的研究势必成为热点^[9]. 目前, 亚硝化颗粒污泥的研究主要集中于SBR反应器, 但在实际污水处理中, 因SBR具有序批式反应、操作复杂等缺点, 故亚硝化工艺的研究正由SBR过渡到连续流工艺. 连续流工艺具有较低的安装费用、操作简单、容易控制等优点成为实际应用的首选^[10]. Ruiz等指出^[11], 与

收稿日期: 2018-07-07; 修订日期: 2018-07-16

基金项目: 北京市青年拔尖团队项目(2014000026833TD02)

作者简介: 李冬(1976~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为水环境恢复理论与关键技术, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

SBR 相比, 在连续流工艺反应器中更难实现亚硝化.

Kishida 等^[12] 和 Wan 等^[13] 接种好氧颗粒污泥于连续流工艺反应器中并且改变进水基质, 快速获得了亚硝化颗粒污泥. 有研究表明, *Nitrospira* 和 *Nitrobacter* 是污水生物处理系统中最为常见的 NOB 种类^[14, 15]. *Nitrospira* 适应在低溶解氧条件下增殖, 而 *Nitrobacter* 适应在较高溶解氧条件下增殖^[16], 因此, 亚硝化颗粒污泥系统长时间在连续流中的高溶解氧或低溶解氧曝气条件下运行, NOB 极易适应性增殖, 导致亚硝化系统崩溃. 间歇曝气是实现亚硝化的一种有效方法, 可以成功抑制 NOB^[5, 17]. 然而, 间歇曝气应用到连续流的研究大多是基于絮状污泥^[18, 19], 而应用到连续流亚硝化颗粒污泥系统的研究目前仍无报道.

因此, 本实验利用缺氧-好氧两级反应器运行连续流亚硝化颗粒污泥工艺, 并用微型沉淀池进行污泥回流, 实现连续流亚硝化颗粒污泥的启动, 通过优化溶解氧(DO)和水力停留时间(HRT), 实现缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥的稳定运行.

1 材料与方法

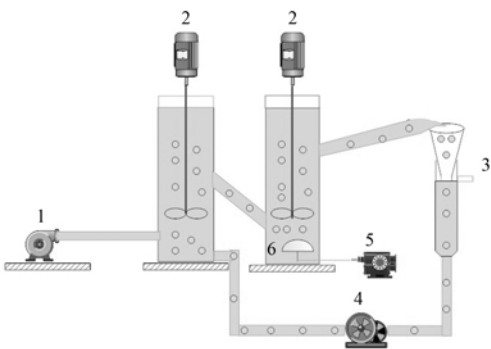
1.1 实验装置与运行参数

本实验采用 2 个串联的相同规格圆柱状反应器, 且均由有机玻璃制成. 好氧区底部设有曝气装置, 采用鼓风曝气, 转子流量计控制曝气量. 实验装置示意如图 1 所示, 各部分体积如表 1 所示. 反应器在室温(17~19℃)下运行, 反应器具体运行参数见表 2.

表 1 连续流系统各反应区体积

Table 1 Sizes of each tank of the continuous-flow system

区域	有效体积/L	直径/cm	高度/cm	高径比
缺氧区	6	15	35	2.33
好氧区	6	15	35	2.33
沉淀区	0.085	2	23	11.5



1. 进水蠕动泵, 2. 搅拌器, 3. 沉淀池, 4. 回流泵, 5. 曝气泵, 6. 微孔曝气器

图 1 连续流亚硝化颗粒污泥反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of the continuous-flow nitrosation granular reactor

表 2 连续流系统运行阶段的运行参数

Table 2 Operation parameters of the continuous-flow system

阶段	DO /mg·L ⁻¹	反应器的 HRT /h	沉淀区的 HRT /min
I (0~25 d)	3±0.2	10.6	4.5
II (26~40 d)	4.5±0.2	10.6	4.5
III (41~55 d)	3±0.2	10.6	4.5
IV (56~70 d)	3±0.2	8.4	3.6
V (71~166 d)	3±0.2	12.2	5.2

1.2 接种污泥和实验用水

反应器接种实验室培养的成熟亚硝化颗粒污泥作为种泥, 如图 2 所示. 采用人工配水模拟生活污水启动反应器, 以丙酸钠为有机碳源(COD 为 100 mg·L⁻¹), 硫酸铵为氮源(NH₄⁺-N 为 150 mg·L⁻¹), 碳酸氢钠提供进水碱度, 碱度与 NH₄⁺-N 质量比为 10:1, pH 为 7.5~8.0, 每 L 水中含有 0.136 g KH₂PO₄、0.02 g MgSO₄·7H₂O、0.136 g CaCl₂, 同时还有微生物生长必需的微量元素^[20].

1.3 分析方法

定期检测反应器内混合液 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、混合液悬浮固体浓度(MLSS)、挥发性悬浮固体浓度(VSS)、污泥体积指数(SVI)等参数,



图 2 接种亚硝化颗粒污泥数码照片

Fig. 2 Digital pictures of the seeding granules

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 NH_4^+ -N 测定采用纳氏试剂分光光度法, NO_2^- -N 采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法, NO_3^- -N 采用紫外分光光度法, COD 采用快速测定仪, 其 COD 值扣除了亚硝酸盐的干扰, MLSS、VSS、SVI 等参数采用国家规定的标准方法测定. 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泥水混合样品于 10 mL 离心管中, 室温下用离心机以 $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 离心 15 min, 倒掉上清液, 加入适量磷酸盐缓冲溶液, 将污泥稀释至原体积, 之后将污泥摇散后超声处理 3 min, 接着 80°C 水浴 30 min (每隔 10 min 左右将泥摇匀 1 次), 最后用离心机 $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 取上清液测定多糖、蛋白质含量, 剩余污泥测定 MLSS.

亚硝态氮积累率、氨氧化率和 COD 去除率分别按照式(1)、(2)、(3)计算:

亚硝态氮积累率 (NAR) =

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

$$\text{氨氧化率} = \frac{\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N}_{\text{in}}) - \rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})}{\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N}_{\text{in}})} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{COD 去除率} = \frac{\rho(\text{COD}_{\text{in}}) - \rho(\text{COD})}{\rho(\text{COD}_{\text{in}})} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 、 $\rho(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 、 $\rho(\text{COD})$ 是出水中 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、COD 的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N}_{\text{in}})$ 、 $\rho(\text{COD}_{\text{in}})$ 为进水 NH_4^+ -N、COD 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

HRT 和回流比 (*R*) 按式(4)、(5)计算^[21]:

$$R = \text{回流流量} / \text{进水流量} \quad (4)$$

$$\text{HRT} = \text{反应器体积} / \text{进水流量} \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 连续流亚硝化颗粒污泥的启动

在室温 ($17 \sim 19^\circ\text{C}$) 下, 接种 SBR 培养成熟的亚硝化颗粒污泥于缺氧-好氧两级连续流反应器中, 并且设定进水流量为 $1.13\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, 污泥回流比为 1, 缺氧区 and 好氧区反应器有效体积均约为 6 L, 故反应器系统的 HRT 为 10.6 h, 好氧区溶解氧为 $(3 \pm 0.2)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.1.1 启动过程中亚硝化性能的变化

接种后, 连续流系统的亚硝化性能变化如图 3 所示. 由图 3(a) 可知, 氨氮的去除率呈现先下降后上升的趋势, 在第 5 d, 氨氮去除率下降至 21%, 说

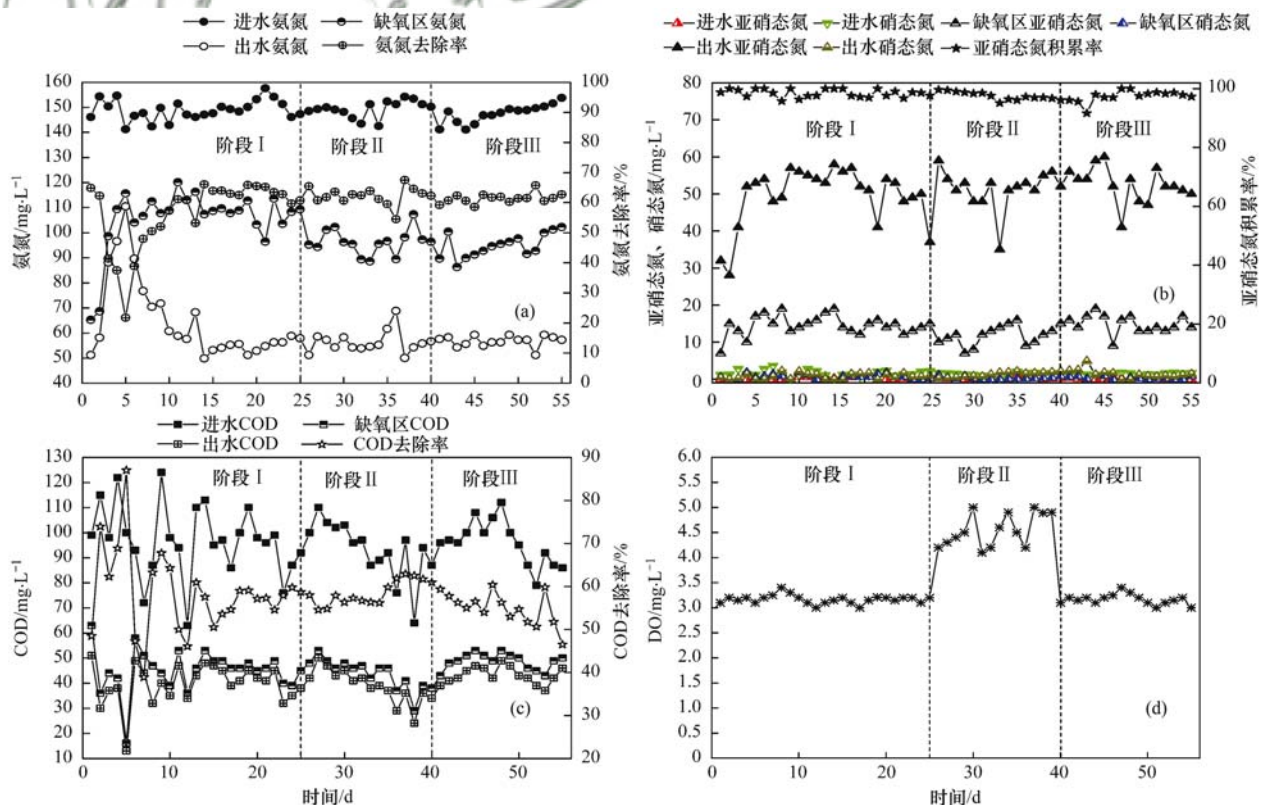


图 3 在阶段 I-III, 连续流系统中氨氮、亚硝态氮、硝态氮、COD 及 DO 的变化

Fig. 3 Variations of the NH_4^+ -N, NO_2^- -N, NO_3^- -N, COD, and DO in the continuous-flow system during the phase I-III

明空间上交替缺氧、好氧环境较时序上的间歇曝气更加抑制 AOB 的活性, 另一方面也说明 AOB 抵抗环境变化的能力较弱. 在随后的实验中, AOB 逐渐适应连续流缺氧、好氧交替环境, 在第 11 d, 氨氮的去除率上升到 61% 并且随后保持稳定.

在启动阶段(第 I 阶段), 连续流系统中交替缺氧、好氧环境可以很好地抑制 NOB, 维持非常好的亚硝化性能. 由图 3(b) 可知, 在第 2 d, 缺氧区中的亚硝态氮和硝态氮分别为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水中的亚硝态氮和硝态氮分别为 $28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水亚硝态氮积累率高达 100%, 并且在随后的运行中, 连续流系统的 NAR 始终维持在 95% 以上, 出水的硝态氮均在 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 亚硝化性能稳定. 分析图 3(c) 可知, 在连续流亚硝化颗粒污泥的启动阶段, 缺氧区去除了进水中大部分的 COD. Shi 等^[22] 在 SBR 反应器以缺氧/好氧的运行方式时, 缺氧段同样也是去除了进水中大部分 COD. 在第 1 d, 进水 COD 为 $99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 在缺氧区减少了 $26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而在好氧区减少了 $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 到第 25 d 在好氧区仅减少了 $7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其原因是交替缺氧、好氧运行筛选了兼性异养菌, 淘汰了大部分好氧异养菌. 先前的研究表明, 生长速度较缓的兼性异养菌会使颗粒致密, 这有助于颗粒重新凝聚和稳定^[23].

2.1.2 启动过程中颗粒特点及形态变化

如图 4(a) 所示, 接种后, 连续流反应器中 MLSS、SVI 分别为 $3846 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $31 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 运行模式的改变对颗粒污泥的沉降过程产生较大的影响, 以 SBR 运行时污泥颗粒的沉降过程是静止的, 而连续流反应器的污泥颗粒在微型沉淀池中沉降时会受到水流的干扰^[24], 因此会淘汰部分沉降性差

的颗粒污泥, 故系统中颗粒污泥的沉降性能增加, SVI 值减少, 在第 25 d, SVI 值降到 $23 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 同时, 系统中 MLSS 出现下降, 在第 13 d, MLSS 降到 $2874 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在启动阶段的后期, MLSS 维持在 $(2600 \pm 200) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 保持了亚硝化颗粒污泥系统中稳定的生物量.

由于本实验通过微型沉淀池进行泥水分离后, 利用蠕动泵进行颗粒污泥回流, 蠕动泵会在一定程度上破坏颗粒的完整性, 故接种后的污泥颗粒平均粒径由初始的 $735.8 \mu\text{m}$ 下降到第 7 d 的 $503.2 \mu\text{m}$. 有研究表明在絮状污泥添加较大比例的破碎颗粒, 大大地促进了污泥的颗粒化, 破碎颗粒污泥会诱导形成新的颗粒污泥^[25]. 经过蠕动泵的破坏后, 破碎的污泥颗粒很快进行重组, 并且大量地兼性异养菌会使新生的颗粒致密^[23, 26]. 随着反应器的运行, 连续流颗粒污泥逐渐稳定在 $(450 \pm 10) \mu\text{m}$ 的范围内, 保持了运行系统中污泥颗粒的完整性.

2.2 DO 对连续流亚硝化颗粒污泥系统的影响

在启动阶段, 维持反应器好氧区 DO 为 $(3 \pm 0.2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 先前的众多研究表明, 较高溶解氧会增加亚硝化系统失稳的可能性, 使 NOB 易增殖^[27, 28], 故本实验在第 II 阶段增加溶解氧探究高溶解氧对于该工艺的影响.

实验第 II 阶段, 维持好氧区的 DO 在 $(4.5 \pm 0.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 然而, 出水的硝态氮并没有出现增加, 在第 II 阶段, 出水的硝态氮保持在 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, NAR 保持在 95% 以上. 说明即使在高溶解氧的条件下, 交替缺氧、好氧环境会很好地抑制 NOB. 提高好氧区 DO 并没有提高氨氧化率, 第 26 d, 系统的氨氮氧化率为 65.4%, 且在整个第 II 阶段氨氮氧化率均小于 63%. 其原因可能是连续流反应

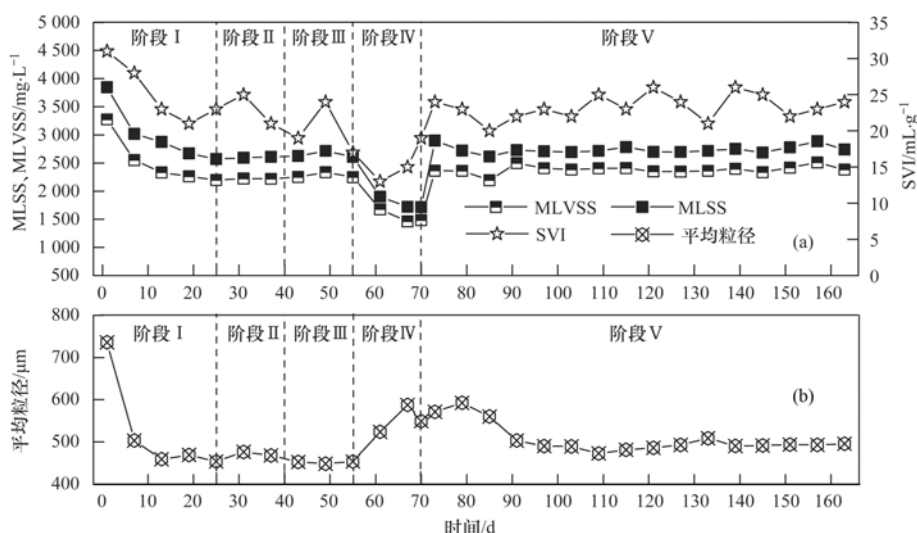


图 4 连续流系统中 MLSS、MLVSS、SVI 及颗粒平均粒径的变化

Fig. 4 Variations of the MLSS, MLVSS, SVI, and mean diameter of the particles in the continuous-flow system during the operation

器运行时的 HRT 跟 SBR 运行相比, 大大地减少, 故进水中的基质不能和 AOB 充分接触; 另外, AOB 在交替缺氧-好氧的环境中频繁地降低活性和恢复活性, 这在一定程度上抑制了 AOB 的活性, 但是这种连续流运行方式能较为彻底地抑制 NOB, 维持良好的亚硝化性能。

增加好氧区曝气后, 系统 COD 的去除率几乎没有影响, 维持在 50% ~ 60% 之间。增加曝气并没有增加好氧区对于 COD 的去除, 缺氧区仍然去除进水中大部分的 COD。原因可能是交替缺氧-好氧环境已经淘洗了大部分的好氧异养菌, 使 COD 的去除主要是靠兼性异养菌。

2.3 HRT 对连续流亚硝化系统的影响以及连续流系统的稳定运行

HRT 是连续流系统中的重要参数之一。连续流运行模式给颗粒污泥提供的环境和 SBR 中是有很大的差别的, 这些差别均受 HRT 影响^[21]。本实验在第 IV 阶段, 保持回流比为 1, 调整进水流量, HRT 减少至 8.4 h, 且在第 V 阶段, HRT 增加至 12.2 h。

2.3.1 HRT 对于亚硝化性能的影响

在第 IV 阶段, HRT 减少到 8.4 h, 一方面会导致反应器中 AOB 不能充分氧化进水中氨氮; 另一方面会加快系统中颗粒污泥在缺氧、好氧环境交替的频率, 进而导致 AOB 的活性进一步降低。由图 5(a) 和图 5(b) 可知, 在第 70 d, 氨氧化率降低至 34.57%。然而, 缺氧、好氧交替频率的增加, 并没有进一步抑制 NOB 的活性, 亚硝态氮积累率降低至 84%, 出水的硝态氮为 $4.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 较之前的硝态氮产生量并没有大幅度升高, 亚硝态氮积累率的降低主要是由于 AOB 的活性降低导致亚态盐氮的产生量减少, 在第 70 d, 出水的亚硝态氮的浓度为 $27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 较第 55 d 时的出水亚硝态氮减少了 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

由于 HRT 的减少, 导致连续流系统的 MLSS 减少, 在第 70 d, MLSS 减少到 $1716 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 较第 55 d 减少了 $893 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进而 AOB 的数量减少, 直接削弱了系统的硝化能力, 而且 COD 去除率也出现了降低, COD 的去除率在第 70 d 降低至 27.9%, 缺氧区的 COD 浓度为 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水的 COD 为 $68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

鉴于 AOB 的世代时间较长, 故在第 IV 阶段结束后重新接种部分 SBR 培养成熟的亚硝化颗粒污泥于连续流反应器中。重新接种后, 连续流系统的 MLSS 为 $2898 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并且接种后亚硝化颗粒污泥系统的 HRT 增加至 12.2 h, 以探究较高 HRT 对于该系统的影响。

在第 V 阶段, AOB 与进水基质接触的时间变长, 系统的氨氧化率呈现上升的趋势, 从第 71 d 的氨氮氧化率 45.17% 上升到稳定运行时的 $(80 \pm 2)\%$, 出水的氨氮浓度维持在 $(25 \pm 5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。亚硝态氮的积累率也出现了上升趋势, 从第 71 d 的积累率为 88% 上升到稳定运行时的 95% 以上, 稳定运行时期的出水亚硝态氮浓度维持在 $(60 \pm 5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并且在第 89 d, 取得了完全的亚硝化, 亚硝态氮积累率达到 100%, 出水的亚硝态氮浓度达到 $61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中, 缺氧段的亚硝态氮浓度为 $24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为短程反硝化提供基质, 保证了缺氧环境。

在第 72 d, COD 的去除率达到了 45.6%, 其中缺氧区 COD 去除率达到了 33.3%, 去除了进水中大部分的 COD, 由于好氧异养菌的活性被抑制, 在好氧段仅降解了 12.3% 的 COD。随着反应器的运行, COD 的去除率逐渐升高, 稳定运行时期 COD 的去除率达到了 80% 以上。在运行周期末(第 115 d), COD 的去除率达到了 84.7%, 其中, 进水、缺氧段、出水的 COD 分别为 101.0、18.3、15.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 缺氧段 COD 的去除率高达 81.8%, 说明长期的交替缺氧、好氧环境可以充分抑制好氧异养菌的生长, 并且筛选出的缺氧或兼性异养菌, 有助于维持系统颗粒的稳定性。

2.3.2 HRT 对于颗粒稳定性的影响

MLSS、SVI、平均粒径等参数可以反映出连续流系统中颗粒的稳定性, 本实验测量上述参数的频率为每周一次。SVI 值越小, 颗粒污泥系统沉降性能越好。由反应器和微型沉淀池的体积比例关系, 可以计算出缺氧区、好氧区以及微型沉淀池中颗粒污泥的 HRT(见表 2)。

如图 5(d) 所示, 第 IV 阶段, 微型沉淀池中的 HRT 为 3.6 min 较第 III 阶段的 HRT 减少了 0.9 min, 这就意味着污泥颗粒在微型沉淀池中的沉降时间缩短了 0.9 min, 这直接导致系统中部分沉降性能较差的颗粒污泥流失。另外, 较大的进水流量会形成对微型沉淀池较大的水流冲击, 对污泥沉降过程产生较大干扰, 加强了对沉降性较差的颗粒污泥的淘洗。沉降性能较差的颗粒污泥的流失也增强了系统中颗粒污泥的沉降性能。如图 4 所示, 在第 IV 阶段的初始(第 55 d), SVI 值为 $17 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 第 61 d、70 d 系统的 SVI 值分别为 $13 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $19 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 呈现了先变小后增加的趋势。这可能是因为 HRT 的减少, 颗粒污泥长期频繁地经蠕动泵碾压, 而颗粒重新凝聚的时间与机会减少, 故系统的沉降性能变差。在第 IV 阶段, 连续流系统的颗粒污泥平

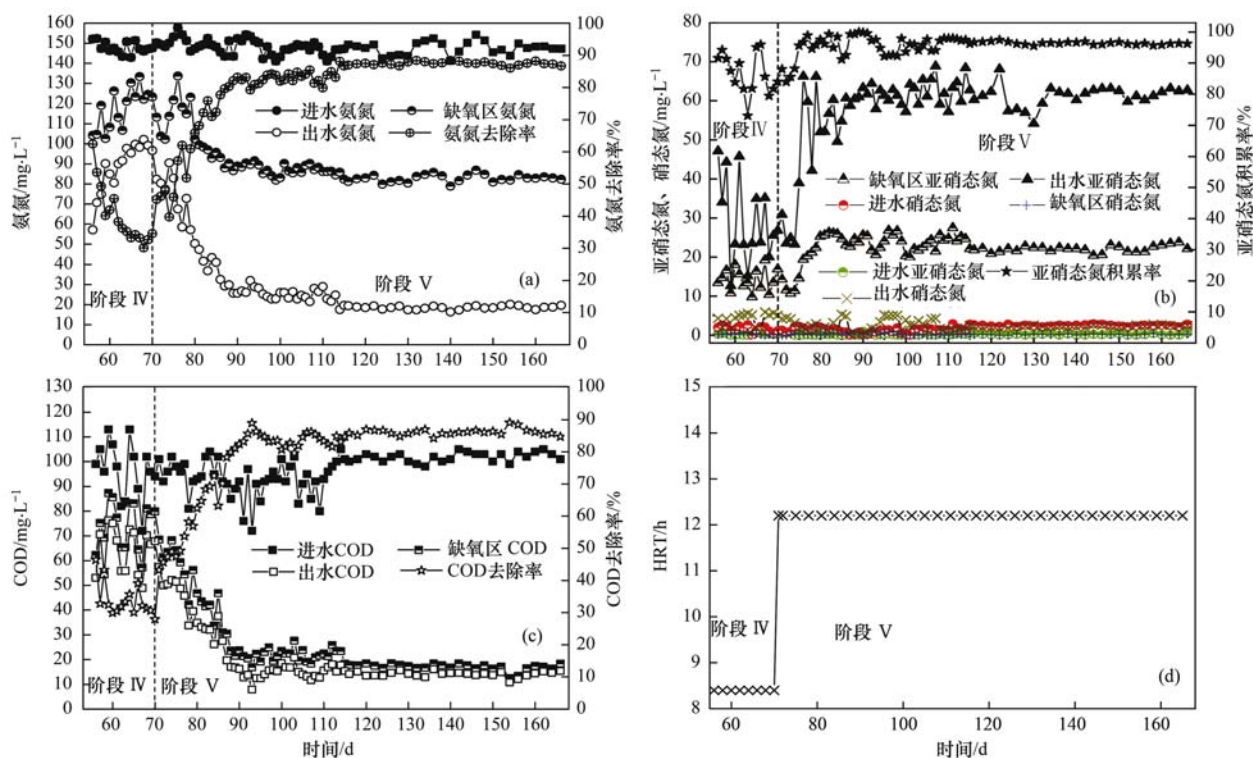


图5 在阶段IV-V, 连续流系统中氨氮、亚硝态氮、硝态氮、COD及HRT的变化

Fig. 5 Variations of the NH_4^+-N , NO_2^--N , NO_3^--N , COD, and HRT in the continuous-flow system during the phases IV and V

均粒径同样呈现先增加后减少的趋势. 在第55、67、70 d时的颗粒平均粒径分别为453.4、587.4、549.1 μm , 其原因可能是HRT的减少, 导致系统的小颗粒被排出, 因此平均粒径有所升高, 而随着反应器运行, 系统中较大颗粒频繁经过蠕动泵碾压而没有足够时间重新凝聚, 故颗粒的平均粒径减小. 因此, 较短HRT对于连续流反应器中颗粒污泥浓度及沉降性能有重要的影响, 容易导致连续流颗粒污泥系统失稳.

在第V阶段, 系统的HRT增加到12.2 h, 在第73 d, 系统的污泥浓度恢复到 $2898 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SVI为 $24 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 在随后运行中, MLSS变化趋势与本实验启动阶段类似, MLSS呈下降再稳定的趋势. 在稳定运行期间, MLSS维持在 $(2700 \pm 100) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 系统的SVI值在 $20 \sim 25 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间波动, 相比于絮状污泥, 颗粒污泥系统沉降性能要好很多.

HRT对于连续流系统的稳定是至关重要的, HRT缩短至8.4 h时, 系统将流失大部分颗粒污泥, 甚至导致系统崩溃. HRT增加到12.2 h时, 系统可以维持良好的微生物浓度以及稳定的颗粒沉降性能.

3 结论

(1) 以人工配水模拟生活污水, 接种SBR培养成熟的亚硝化颗粒污泥可以快速实现缺氧-好氧两

级连续流亚硝化颗粒污泥的启动, 并且交替缺氧、好氧环境可以完全抑制NOB, 维持系统良好的亚硝化性能.

(2) 缺氧-好氧连续流系统形成的交替缺氧、好氧环境可以提高亚硝化颗粒污泥对于较高DO的忍受力, 好氧区DO由 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $4.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 系统依然可以抑制NOB, 维持良好的亚硝化性能.

(3) 较短的HRT(8.4 h)会对微型沉淀池产生较大的水流冲击, 连续流系统产生了部分污泥流失. 同时, 加快了颗粒污泥在连续流系统中的循环, 使破碎颗粒不能及时重新凝聚, 系统颗粒的完整性以及亚硝化性能变差; HRT增加到12.2 h时, 系统保持较高的氨氧化率和亚硝态氮积累率, 同时系统的颗粒污泥可以维持较好的颗粒特性, 实现连续流亚硝化颗粒污泥的稳定运行.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Schmidt I, Slikers O, Schmid M, et al. New concepts of microbial treatment processes for the nitrogen removal in wastewater [J]. Fems Microbiology Reviews, 2006, 27(4): 481-492.
- [3] 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.

- [4] Li X J, Sung S W. 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.
- [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] Ni B J, Fang F, Xie W M, *et al.* Growth, maintenance and product formation of autotrophs in activated sludge: taking the nitrite-oxidizing bacteria as an example [J]. Water Research, 2008, **42**(16): 4261-4270.
- [7] Bian W, Zhang S Y, Zhang Y Z, *et al.* Achieving nitrification in a continuous moving bed biofilm reactor at different temperatures through ratio control [J]. Bioresource Technology, 2016, **226**: 73-79.
- [8] Feng Y J, Tseng S K, Hsia T H, *et al.* Partial nitrification of ammonium-rich wastewater as pretreatment for anaerobic ammonium oxidation (Anammox) using membrane aeration bioreactor [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2007, **104**(3): 182-187.
- [9] 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.
- [10] Juang Y C, Adav S S, Lee D J, *et al.* Stable aerobic granules for continuous-flow reactors: precipitating calcium and iron salts in granular interiors [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(21): 8051-8057.
- [11] 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.
- [12] Kishida N, Saeki G, Tsuneda S, *et al.* Rapid start-up of a nitrifying reactor using aerobic granular sludge as seed sludge [J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2012, **65**(3): 581-588.
- [13] Wan C L, Sun S P, Lee D J, *et al.* Partial nitrification using aerobic granules in continuous-flow reactor: rapid startup [J]. Bioresource Technology, 2013, **142**: 517-522.
- [14] Peng Y Z, Zhu G B. Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, **73**(1): 15-26.
- [15] Spieck E, Hartwig C, McCormack I, *et al.* Selective enrichment and molecular characterization of a previously uncultured *Nitrospira*-like bacterium from activated sludge [J]. Environmental Microbiology, 2006, **8**(3): 405-415.
- [16] 包鹏, 王淑莹, 马斌, 等. 不同溶解氧间歇曝气对亚硝酸盐氧化菌的影响 [J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2696-2702.
- Bao P, Wang S Y, Ma B, *et al.* Effect of dissolve oxygen on the microbial community of the nitrite-oxidizing bacteria in an intermittent aeration reactor [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2696-2702.
- [17] Gilbert E M, Agrawal S, Brunner F, *et al.* Response of different *Nitrospira* species to anoxic periods depends on operational DO [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(5): 2934-2941.
- [18] Ge S J, Peng Y Z, Qiu S, *et al.* Complete nitrogen removal from municipal wastewater via partial nitrification by appropriately alternating anoxic/aerobic conditions in a continuous plug-flow step feed process [J]. Water Research, 2014, **55**: 95-105.
- [19] Zeng W, Li L, Yang Y Y, *et al.* Nitrification and denitrification of domestic wastewater using a continuous anaerobic-anoxic-aerobic (A^2O) process at ambient temperatures [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(21): 8074-8082.
- [20] 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.
- [21] Li D, Lv Y F, Cao M Z, *et al.* Optimized hydraulic retention time for phosphorus and COD removal from synthetic domestic sewage with granules in a continuous-flow reactor [J]. Bioresource Technology, 2016, **216**: 1083-1087.
- [22] Shi Y J, Wang X H, Yu H B, *et al.* Aerobic granulation for nitrogen removal via nitrite in a sequencing batch reactor and the emission of nitrous oxide [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2536-2541.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Pijuan M, Werner U, Yuan Z G. Reducing the startup time of aerobic granular sludge reactors through seeding floccular sludge with crushed aerobic granules [J]. Water Research, 2011, **45**(16): 5075-5083.
- [26] de Kreuk M K, van Loosdrecht M C. Selection of slow growing organisms as a means for improving aerobic granular sludge stability [J]. Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2004, **49**(11-12): 9-17.
- [27] Brockmann D, Morgenroth E. Evaluating operating conditions for outcompeting nitrite oxidizers and maintaining partial nitrification in biofilm systems using biofilm modeling and Monte Carlo filtering [J]. Water Research, 2010, **44**(6): 1995-2009.
- [28] Zekker I, Rikmann E, Tenno T, *et al.* Nitrifying-anammox biomass tolerant to high dissolved oxygen concentration and C/N ratio in treatment of yeast factory wastewater [J]. Environmental Technology, 2014, **35**(12): 1565-1576.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i>	(1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i>	(11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i>	(24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i>	(33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i>	(44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i>	(55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i>	(67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i>	(76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i>	(86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i>	(104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i>	(114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i>	(121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i>	(126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i>	(143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i>	(149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i>	(157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i>	(164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue	(192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i>	(200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i>	(211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i>	(219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i>	(228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan	(239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i>	(248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i>	(256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i>	(263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i>	(273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i>	(281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i>	(293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i>	(300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i>	(310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i>	(318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>	(327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i>	(336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i>	(343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i>	(360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i>	(369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i>	(376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i>	(383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i>	(392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i>	(401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i>	(412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i>	(421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i>	(430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i>	(437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping	(445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i>	(453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong	(461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i>	(480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i>	(488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i>	(496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i>	(504)