

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 郑庆锋, 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, 黎熒, 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, 段菁春, 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, 段菁春, 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, 陈昫, 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, 张昱, 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估 王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟羊, 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用水重金属暴露及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)

脱氮菌剂在低溶解氧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、来源及风险评估 向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖德, 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, 丁帮璟, 胡伏优, 陈伟, 李正魁 (412)

秸秆炭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, 闵伟, 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, 纪文凝, 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)

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^{1,2,3,4}, 宋家俊², 王建芳^{1,2,3,4}, 沈耀良^{1,2,3,4}

(1. 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 苏州 215009; 2. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 3. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 4. 苏州科技大学水污染治理与资源化研究所, 苏州 215009)

摘要: 在连续流气提内循环反应器中接种絮体硝化污泥, 研究硝化颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现过程。结果表明, 通过逐步缩短 HRT (由 5 h 降至 2.5 h), 3 周内基本实现污泥微颗粒化; 污泥微颗粒化过程中, 污泥颜色先由黄褐色转为米白色, 最后变成浅黄色; 污泥沉降性能经历了由好变差再转好的变化过程, 试验末期污泥 $SV_{30} = SV_5$ 为 4% ~ 5% 且 $SVI_{30} = SVI_5$ 为 12 ~ 13 mL·g⁻¹; 所得硝化微颗粒污泥平均粒径在 134 μm (第 27 d 时), 其中近 70% 的微颗粒污泥粒径在 59 ~ 163 μm 狭窄范围, 即微颗粒污泥粒径分布均匀性高。随后, 逐步提升反应器进水氨氮浓度 (由 50 mg·L⁻¹ 升至 200 mg·L⁻¹), 微颗粒污泥在 1 周内实现亚硝化率达 90% 以上且亚硝化负荷达 1.34 kg·(m³·d)⁻¹; 分析认为出水中较高的剩余氨氮浓度 (27 ~ 50 mg·L⁻¹) 或较低的 DO/NH₄⁺-N (0.03 ~ 0.09) 是该微颗粒污泥反应器快速实现亚硝化的主要原因。

关键词: 气提内循环反应器; 颗粒污泥; 亚硝化; 快速启动; 连续流

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0353-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907158

Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitritation Function

LIU Wen-ru^{1,2,3,4}, SONG Jia-jun², WANG Jian-fang^{1,2,3,4}, SHEN Yao-liang^{1,2,3,4}

(1. National and Local Joint Engineering Laboratory of Municipal Sewage Resource Utilization Technology, Suzhou 215009, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China; 4. Institute of Water Pollution Control and Resource Recovery, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The rapid achievement of nitrifying micro-granular sludge and its nitritation function was studied in a continuously operated internal-loop airlift reactor seeding with floccular sludge. Results showed that the sludge micro-granulation was almost realized within three weeks by gradually reducing the hydraulic retention time from 5 h to 2.5 h. The color of the sludge first changed from yellowish-brown to creamy white, and then changed to pale yellow during the micro-granulation process. The settleability of the sludge first changed from good to bad, and then recovered to good. The value of the sludge settling velocity (SV) at SV₅ and SV₃₀ were both equal to 4%~5%, while SVI₃₀ and SVI₅ were both around 12~13 mL·g⁻¹. The average size of the obtained nitrifying micro-granular sludge was 134 μm on day 27. Nearly 70% of the nitrifying micro-granular sludge was maintained in a relatively narrow range of 59~163 μm, thus indicating the largely homogeneous diameter distribution of these micro-granules. After sludge micro-granulation, the nitritation function was achieved within one week by progressively increasing the influent NH₄⁺ concentrations from 50 mg·L⁻¹ to 200 mg·L⁻¹. The NO₂⁻ accumulation ratio and the nitritation loading rate reached up to 90% and 1.34 kg·(m³·d)⁻¹, respectively. The high level of residual NH₄⁺ concentration in the effluent, or the low ratio of dissolved oxygen (DO) to NH₄⁺-N concentrations (0.03~0.09), should be the primary cause of the rapid achievement of nitritation in the micro-granular sludge reactor.

Key words: internal-loop airlift reactor; granular sludge; nitritation; rapid start-up; continuous flow

以短程硝化-反硝化、部分亚硝化-厌氧氨氧化为代表的基于亚硝酸盐途径(nitrite pathway)的新型污水生物脱氮技术在曝气能耗低、有机碳源节省以及剩余污泥产量少等方面表现突出,成为污水生物脱氮领域的研究热点之一^[1~3]。上述新型生物脱氮技术的共同基础是亚硝化的实现,即亚硝酸盐氧化细菌(nitrite oxidizing bacteria, NOB)的有效抑制。然而,目前稳定且高效的亚硝化控制技术仍属匮乏。

近年来,基于生物膜或颗粒污泥的亚硝化技术备受关注。有研究证实,颗粒污泥亚硝化系统不仅在高温高浓度氨氮污水处理领域表现出优良效

能^[4],即使对于低氨氮污水且在温度低至 12.5 ~ 10℃ 的条件下颗粒污泥亚硝化过程也可长期稳定运行并表现出 0.63 ~ 0.7 kg·(m³·d)⁻¹ 的处理能力^[5,6]。最近的研究表明,颗粒污泥中硝化菌群完整的成层空间分布结构(氨氧化细菌 AOB 占据颗粒污泥表层,NOB 主要分布于颗粒污泥内层)是其亚硝

收稿日期: 2019-07-17; 修订日期: 2019-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808367, 51578353); 江苏省高等学校自然科学基金项目(18KJD610003); 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室开放课题项目(2018KF05); 苏州市科技计划项目(SS201834)

作者简介: 刘文如(1987~),男,博士,讲师,主要研究方向为污水生物处理理论与技术, E-mail: liuwenru1987@126.com

化实现的一个重要前提^[7,8],有趣的是完全硝化颗粒污泥其中的硝化菌群亦呈明显的分层分布规律^[9~11].因此,可以推测颗粒污泥是亚硝化实现的基础条件之一,笔者前期研究亦证实用于颗粒污泥亚硝化的控制策略在絮体污泥系统中难以快速获取亚硝化功能.

需要指出的是,上述颗粒污泥亚硝化技术的研究均是通过直接接种成熟的颗粒污泥展开的,然而在实际工程中成熟颗粒污泥(尤其好氧颗粒污泥、硝化颗粒污泥)来源极其有限.同时,如何快速实现污泥颗粒化(包括厌氧颗粒污泥、普通好氧颗粒污泥以及硝化颗粒污泥)仍是颗粒污泥技术面临的一大挑战^[12],而这种挑战在连续流污水处理系统中表现更为显著^[13].因此,研究以絮体污泥接种如何快速获得稳定高效的亚硝化颗粒污泥意义重大.

本试验在连续流气提内循环反应器中接种絮状硝化污泥,研究硝化颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现过程,以期为进一步推进颗粒污泥亚硝化技术在实际工程中的应用提供科学依据.

1 材料与方法

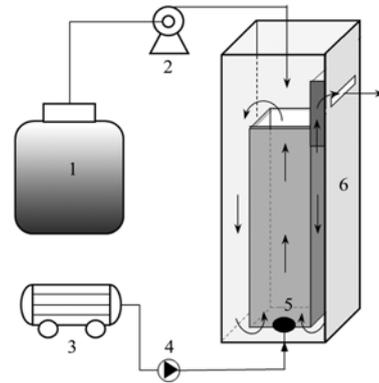
1.1 试验装置及运行

本试验装置为自行设计的气提内循环反应器(如图1),其有效高度和有效容积分别为25 cm和2.5 L,上升流区域横截面积与下降流区域横截面积之比约为1;该反应器内设沉淀区,沉淀区过水横截面积为10.5 cm².上升流区域底部装有曝气砂头,曝气砂头连通气体流量计和空气泵用于反应器内氧气供给和泥水混合,曝气量根据运行情况通过气体流量计进行调节.本研究过程中包括颗粒污泥培养和亚硝化功能实现两个阶段,在颗粒污泥培养阶段以进水流量(水质成分保持不变)或水力停留时间(hydraulic residence times, HRT)为主要控制参数,在亚硝化功能实现阶段保持HRT不变而逐渐提升进水氨氮浓度或进水氨氮负荷(nitrogen loading rate, NLR).整个研究过程中,无剩余污泥排放,反应器内水温通过水浴恒温系统控制在28℃左右.

1.2 试验用水及接种污泥

反应器进水为人工配制的无机含氨氮污水,具体组成如下:191~765 mg·L⁻¹ NH₄Cl, 50 mg·L⁻¹ K₂HPO₄, 20 mg·L⁻¹ CaCl₂·2H₂O, 25 mg·L⁻¹ MgSO₄·7H₂O以及1 mL·L⁻¹的微量元素,微量元素配方见文献[14].同时,向进水中投加NaHCO₃以保证反应器中pH在7.0~7.5.

反应器接种污泥来源于某新建中试污水处理系统的硝化区,该中试系统正常运行约1个月,硝化区进水



1. 模拟污水;2. 进水泵;3. 空气泵;4. 气体流量计;
5. 曝气砂头;6. 气提内循环反应器

图1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment

氨氮负荷在0.05 kg·(m³·d)⁻¹左右.本研究中接种污泥经过140目筛网过滤去除大粒径杂质后接种至反应器,反应器内初始接种污泥浓度约为2.7 g·L⁻¹.

1.3 分析方法

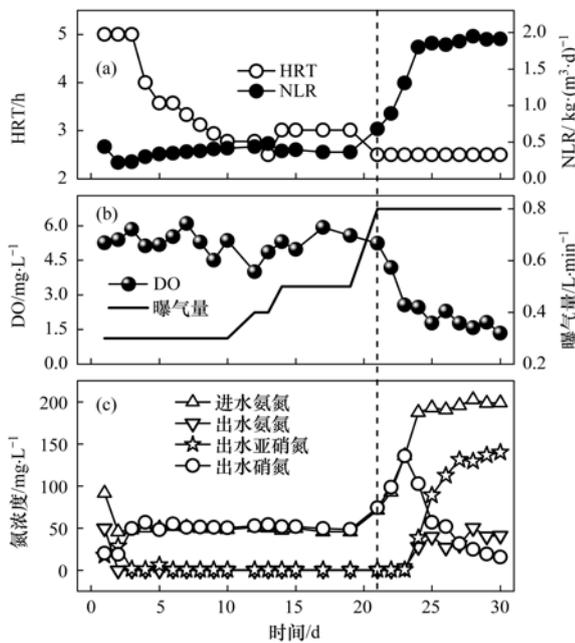
水样分析前用0.45 μm滤纸过滤,水样中NH₄⁺-N、NO₂⁻-N和NO₃⁻-N浓度以及混合液悬浮固体浓度(mixed liquor suspended solids, MLSS)、污泥沉降比(SV₅和SV₃₀)均采用国家标准分析方法测定^[15];pH由雷磁PHSJ-4A型pH计测定,温度和溶解氧(dissolved oxygen, DO)采用哈希便携式溶解氧测定仪(HQ30d)分析;污泥粒径分布采用马尔文激光粒度仪(Mastersizer 3000)测定;污泥形态通过OLYMPUS CX41型显微镜及数码相机观察.

2 结果与分析

试验之始(第1 d),为刺激污泥硝化活性,进水氨氮浓度、氨氮负荷及DO浓度均设置在较高水平,即分别为90 mg·L⁻¹、0.44 kg·(m³·d)⁻¹和5.3 mg·L⁻¹(图2);随后(第2 d),进水氨氮浓度降低至50 mg·L⁻¹左右,开始颗粒污泥培养.

2.1 反应器运行特征

第2~21 d为污泥颗粒化培养的主要阶段.如图2所示,该阶段在保证没有大量污泥随出水流失的前提下,反应器HRT从初始的5 h逐渐缩短至第13 d时的2.5 h,随后又回升至第14~20 d期间的3 h[图2(a)];相应地,进水氨氮负荷(NLR)从0.2 kg·(m³·d)⁻¹逐渐提升至0.48 kg·(m³·d)⁻¹,然后回落并保持在0.37 kg·(m³·d)⁻¹左右[图2(a)].同时,反应器中DO浓度始终保持在较高水平,即通过调节曝气量(由0.3提升至0.5 L·min⁻¹)使得DO浓度在4~6 mg·L⁻¹[图2(b)].较高的DO浓度保证了硝化菌群对进水氨氮的有效去除,如图2(c)所示,该阶段氨氮几乎全部转化为硝态氮(亦称



(a) 水力停留时间(HRT)和进水氨氮负荷(NLR);
 (b) 曝气量及溶解氧(DO)浓度;(c) 进、出水含氮物质浓度

图2 反应器运行状况

Fig. 2 Performance of the reactor

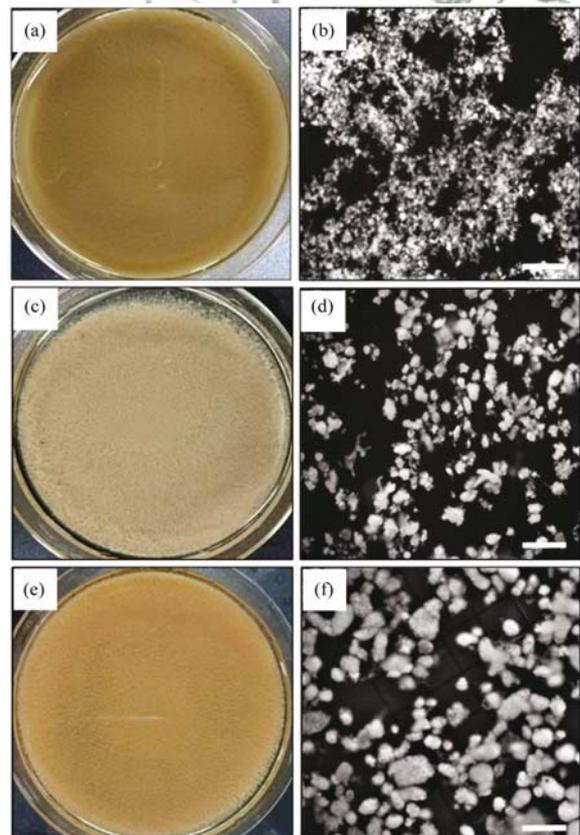
全硝化), 出水中氨氮和亚硝态氮浓度始终保持在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。

第 21 ~ 30 d 为亚硝化功能实现阶段. 该阶段 HRT 和曝气量分别维持在 2.5 h 和 $0.8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 氨氮浓度从 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐提高至约 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 相应地, 进水氨氮负荷从 $0.48 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 迅速上升至 $1.9 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右. 如图 2c 所示, 仅当第 24 d 进水氨氮浓度提升至 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时, 出水中开始出现氨氮剩余现象, 同时亚硝态氮出现累积而硝态氮浓度开始降低; 在随后的运行中, 反应器出水氨氮浓度保持在 $27 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝态氮浓度和硝态氮浓度分别快速上升至 $140 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和快速下降至 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即第 30 d 时反应器亚硝化率达 90% 以上. 需要指出的是, 尽管该阶段曝气量恒定在 $0.8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 而反应器中 DO 浓度却随着进水氨氮浓度和氨氮负荷的提升表现出同步下降趋势, 第 30 d 时 DO 浓度降至 $1.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右[图 2(b)], 表明随着进水氨氮浓度和负荷的升高硝化菌群耗氧速率增加. 本研究重在考察颗粒污泥亚硝化功能的快速启动, 因此所得亚硝化负荷 $1.34 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 并非本系统所能取得的最高效能, 但这一数值基本高于所有絮体污泥亚硝化系统效能的报道.

2.2 污泥形态变化

颗粒化过程中污泥颜色、形态以及粒径分布等变化如图 3 ~ 4 所示. 接种污泥为絮状污泥, 呈黄褐色且结构松散[图 3(a)和 3(b)], 该絮体污泥平均

粒径和中位粒径分别为 $86 \mu\text{m}$ 和 $77 \mu\text{m}$ [图 4(a)]; 随着反应器的运行, 污泥颜色转为米白色[图 3(c)]且大量污泥呈微颗粒形态[图 3(d)], 平均粒径和中位粒径分别增长至 $106 \mu\text{m}$ 和 $91 \mu\text{m}$ [图 4(a)], 污泥表现出明显的颗粒化趋势, 但此时微颗粒污泥无规则外形且仍有少量絮状污泥存在[图 3(d)]; 随着反应器的继续运行, 污泥颜色逐渐转为浅黄色[图 3(e)], 污泥颗粒化进程持续推进, 如图 3(f)所示在第 27 d 时反应器中基本无絮状污泥存在, 所得微颗粒污泥呈现出清晰、饱满的椭球型和球形. 粒径分布测量结果显示, 此时的微颗粒污泥平均粒径为 $134 \mu\text{m}$, 中位粒径为 $103 \mu\text{m}$, 同时 68% 以上的污泥粒径均分布在 $59 \sim 163 \mu\text{m}$ 如此狭窄的范围, 表明所得微颗粒粒径分布均匀性高, 亦表明该气提内循环反应器中优良的水力流态. 此外, 整个研究过程中无丝状菌产生.



(a) ~ (b) 接种污泥;(c) ~ (d) 第 14 d;(e) ~ (f) 第 27 d.

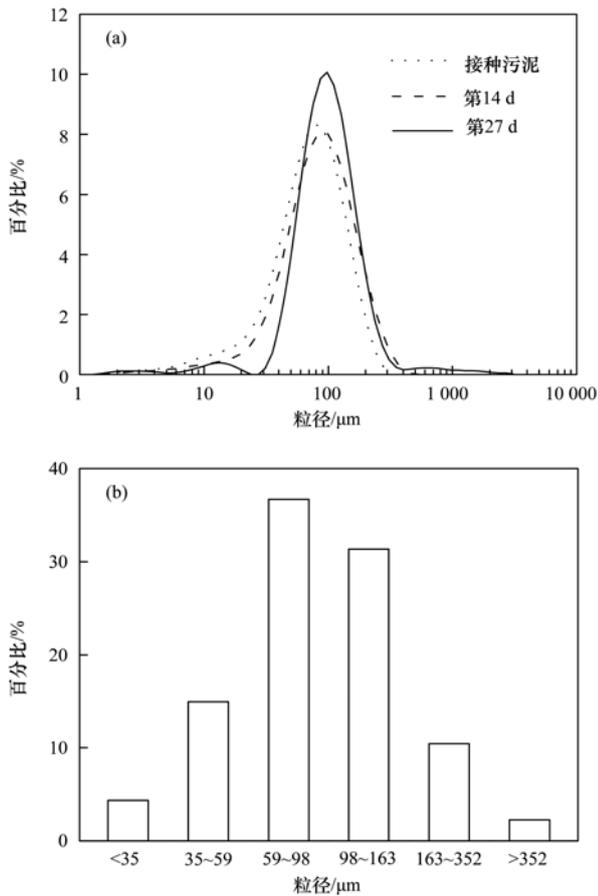
图中标尺长度为 0.5 mm

图3 污泥颜色及形态变化

Fig. 3 Change of the sludge color and morphology

2.3 污泥沉降性能变化

为表征污泥颗粒化过程中其沉降性能的变化, 本研究中 SV_5 和 SVI_5 两个指标与 SV_{30} 和 SVI_{30} 共同使用. 结果表明, 尽管本研究所得微颗粒污泥的平均粒径仅有 $134 \mu\text{m}$, 但其沉降性能显著优于接种絮状污泥. 污泥沉降性能的具体变化过程如图 5 所



(a) 接种污泥与第 27 d 时污泥的粒径分布;
(b) 第 27 d 时污泥粒径的主要分级

图 4 污泥粒径分布

Fig. 4 Distribution of the sludge size

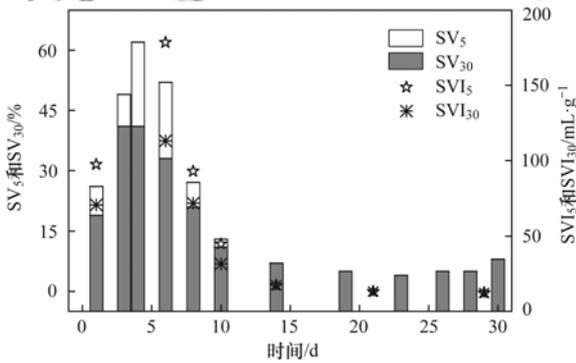


图 5 污泥沉降比 (SV_5 和 SV_{30}) 及污泥浓度 (MLSS)

Fig. 5 Sludge settling velocity (SV_5 and SV_{30}) and sludge concentration (MLSS)

示:接种污泥沉降性能和普通活性污泥接近,即 SV_{30} 和 SVI_{30} 分别为 19% 和 $71 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$;反应器运行第 1 周,污泥沉降性能呈现恶化趋势, SV_{30} 升至 40% 左右,且 SV_{30} 与 SV_5 之间差异显著,第 7 d 时 SVI_{30} 和 SVI_5 分别增至 $113 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $178 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,此时污泥浓度降低至约 $2.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;随着反应器的继续运行,污泥沉降性能开始改善且污泥浓度开始回升,在第 2 周期运行间 SV_{30} 、 SV_5 、 SVI_{30} 和 SVI_5 数值均呈

快速下降趋势,并且 SV_{30} 与 SV_5 之间、 SVI_{30} 与 SVI_5 之间的差异越来越小,到第 14 d 时 SV_{30} 和 SV_5 均为 7% 且 SVI_{30} 与 SVI_5 均为 $18.8 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,这与污泥形态大量微颗粒化相呼应,此时污泥浓度增至 $3.7 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$;反应器后续运行过程中,污泥始终保持着优良的沉降性能,即 $\text{SV}_{30} = \text{SV}_5$ 为 4%~5% 且 $\text{SVI}_{30} = \text{SVI}_5$ 为 $12 \sim 13 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,同时反应器中污泥浓度维持在 $4.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右。

3 讨论

3.1 硝化微颗粒污泥形成过程分析

污泥颗粒化是特定条件下微生物自凝聚的过程,污泥颗粒化亦是分散性絮状污泥不断淘洗和密实性微聚体持续增长的综合过程。无论是普通好氧颗粒污泥的培养,还是硝化颗粒污泥的形成,选择压(如沉降时间、进水负荷、HRT、剪切力以及基质组成等)都是污泥颗粒化过程的重要驱动力^[16,17]。在连续流反应器中缩短 HRT 或提升污泥沉降区表面水力负荷是驱动污泥颗粒化最常用的选择压提供手段^[13,18]。本研究采用连续流气提内循环反应器,即以缩短 HRT 为主要调控手段,HRT 的不断降低旨在提升反应器沉降区表面水力负荷,如图 6 所示,随着 HRT 的不断降低,沉降区表面水力负荷由初始的 $0.48 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 迅速提升至第 13 d 时的 $0.95 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,随后回落至 $0.8 \text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,在该运行过程中沉降性能较差的分散性絮状污泥不断随出水淘洗出反应器,结果仅在 2~3 周内成功实现污泥微颗粒化(或反应器内基本无絮体污泥存在)。

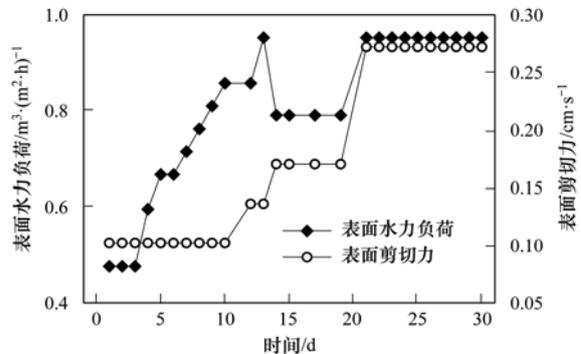


图 6 反应器升流区内表面气流速度和沉淀区内表面水力负荷

Fig. 6 Superficial air velocity in the riser and surface hydraulic loading rate in the settling area of the reactor

需要指出的是,本研究中所观测到的污泥沉降性能经历了由好变差再转好的变化过程(图 5),这亦和污泥形态由絮凝团到分散性絮体再到微颗粒污泥的变化过程相呼应(图 3)。原接种污泥中微生物组成(异养菌比例高)和生存环境与本研究有较大差异,在高 DO ($4 \sim 6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和无机进水的条件

下,絮凝团结构被破坏而形成沉降性能较差的分散性絮状污泥,主要表现在反应器运行第 1 周期间 SV 和 SVI 的升高(图 5);随后,在 HRT 不断降低且沉降区表面水力负荷持续提升的同时,大量分散性絮状污泥持续被淘洗出反应器,SV 和 SVI 数值不断回落且 SV_{30} 与 SV_5 、 SVI_{30} 与 SVI_5 趋于一致,显示出污泥颗粒化进展顺利,污泥沉降性能显著改善。

尽管本研究实现了硝化污泥的快速颗粒化,但所得颗粒污泥粒径较小,即使是在第 27 d 时的平均粒径也仅有 134 μm 。然而,这一结果亦在意料之中,具体解释如下:首先,颗粒污泥粒径变化和微生物增长速率密切相关^[19,20],尽管进水氨氮负荷不断提升,如第 24 d 时提升至 $1.9 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,但硝化菌群生长速度及细胞产率均较低(与好氧异养菌相比),因此硝化微聚体粒径增长缓慢;其次,颗粒污泥粒径大小亦和反应器中剪切力大小关系密切^[21,22],本研究中剪切力主要来自于曝气产生的空气上升流速,如图 6 所示,反应器升流区内气流上升速度始终在 $0.3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,类比好氧颗粒污泥培养结果,较低的剪切力 ($< 1.2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) 不利于颗粒污泥的形成和增长;第三,胞外聚合物(EPS)的大量分泌利于污泥颗粒化过程,然而一方面研究报道较强的剪切力促使微生物分泌大量 EPS,利于细胞间相互聚集粘附^[22],另一方面硝化菌 EPS 产率较低,因此上述两方面均不利于硝化颗粒污泥粒径的增长。综上,本研究所得硝化颗粒污泥仅为微颗粒,但随着反应器的继续运行,该硝化微颗粒污泥粒径仍有增长的趋势。需要强调的是,过分追求较大粒径颗粒污泥应是不必要的,颗粒污泥粒径过大会造成其内部中空、沉降性能恶化以及颗粒污泥破碎等问题^[20,23];此外,为保持较大粒径颗粒污泥良好的泥水混合效果其所需能耗亦较高且颗粒间磨损亦较为严重^[20]。

3.2 硝化微颗粒污泥亚硝化实现机制分析

本研究在污泥微颗粒化实现后,通过逐步提升进水氨氮浓度快速实现了出水中亚硝态氮的大量积累[图 2(c)],研究末期亚硝化率已达到 90% 以上。大量研究已经证实,基于颗粒污泥中 AOB 与 NOB 典型的成层空间分布特征^[7],颗粒污泥反应器亚硝化的实现依赖于对出水剩余氨氮或反应器中 DO 与剩余氨氮浓度之比 ($\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$) 的良好控制^[4-6,24,25]。本研究中亚硝化的实现正是基于上述控制策略,如 2.1 节中所述,在进水氨氮浓度提升的过程中,仅当出水中含有剩余氨氮时(即进水氨氮浓度提升至 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时),亚硝态氮随即出现累积而硝态氮浓度开始降低,并在随后的运行中保

持出水氨氮浓度在 $27 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,反应器亚硝化率迅速提升至 90% 以上。就 $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 而言,如图 7 所示,本研究出水中亚硝态氮的积累始于 $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 小于 0.1,即第 24 d 时的 $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N} = 0.094$;在后续的运行中 $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 保持在 0.03 ~ 0.09 之间,亚硝化率迅速升至第 30 d 时的 90% 以上且亚硝化负荷达 $1.34 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。需要指出的是,尽管本研究没有对污泥中微生物组成进行监测,但可以推测亚硝化功能的实现仅仅是微颗粒污泥中 NOB 活性受到抑制,而非 NOB 被彻底淘汰,即大量 NOB 仍然存在于微颗粒污泥中。正如已有研究报道的,对于颗粒污泥亚硝化系统其亚硝化功能实现与 NOB 淘汰并非同步进行,一般亚硝化功能实现远快于颗粒污泥中 NOB 数量削减^[4,5,7]。

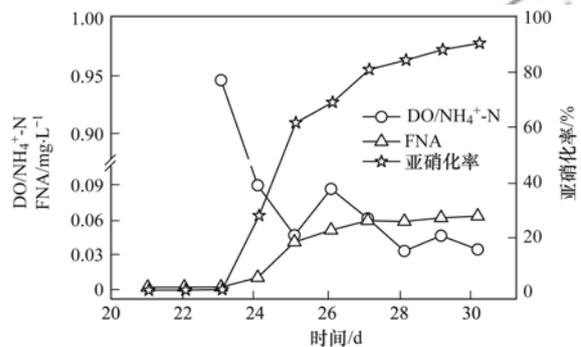


图 7 第 21~30 d 期间反应器中 $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、FNA 与亚硝化率的变化

Fig. 7 Variations of the $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$, free nitrous acid (FNA), and nitrite accumulation rate in the reactor during the day 21-30

值得注意的是,以往颗粒污泥亚硝化研究中所用颗粒污泥粒径多在 1 mm 左右^[4-6,25],而颗粒污泥粒径大小是影响其亚硝化颗粒污泥系统运行控制的重要因素之一^[26,27]。本研究中硝化微颗粒污泥第 27 d 时的平均粒径仅有 134 μm ,因此,本研究证实对于如此微颗粒污泥系统亦可通过调控剩余氨氮或 $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 快速实现优良的亚硝化目标;同时,如此微颗粒也正是其亚硝化功能实现需在 $\text{DO}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为 0.03 ~ 0.09 这样低水平的重要原因(即使温度在 28°C)。

此外,本研究推测亚硝化实现后形成的游离亚硝酸(free nitrous acid, FNA)亦对微颗粒污泥中 NOB 的抑制有积极贡献。NOB 对 FNA 的敏感性显著高于 AOB,研究报道 FNA 对 NOB 的完全抑制浓度仅为 $0.026 \sim 0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[28-30]。本研究中亚硝化实现阶段反应器液相 FNA 浓度如图 7 中所示,从第 24 d 时的 $0.009 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升至第 27 d 时的 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;更重要地,硝化颗粒污泥内层 pH 值一般显著低于液相中 pH 值(因颗粒污泥表层 AOB 氧化氨

氮消耗碱度)^[31,32],而 pH 是影响 FNA 浓度大小的关键因素^[33],因此可以推测本研究中硝化微颗粒污泥内的 FNA 浓度要远高于 0.06 mg·L⁻¹,因此将对颗粒污泥内 NOB 产生强烈抑制作用. 尽管本研究中 FNA 抑制并非微颗粒污泥亚硝化实现的主要机理,但对于后续运行中颗粒污泥内 NOB 的快速彻底淘汰将有重要意义.

4 结论

(1) 在含内置沉淀区的气提内循环反应器中,通过缩短 HRT(由 5 h 降至 2.5 h)提升沉淀区表面水力负荷由 0.48 m³·(m²·h)⁻¹ 升至 0.95 m³·(m²·h)⁻¹, 2~3 周内基本实现污泥微颗粒化或无絮体化.

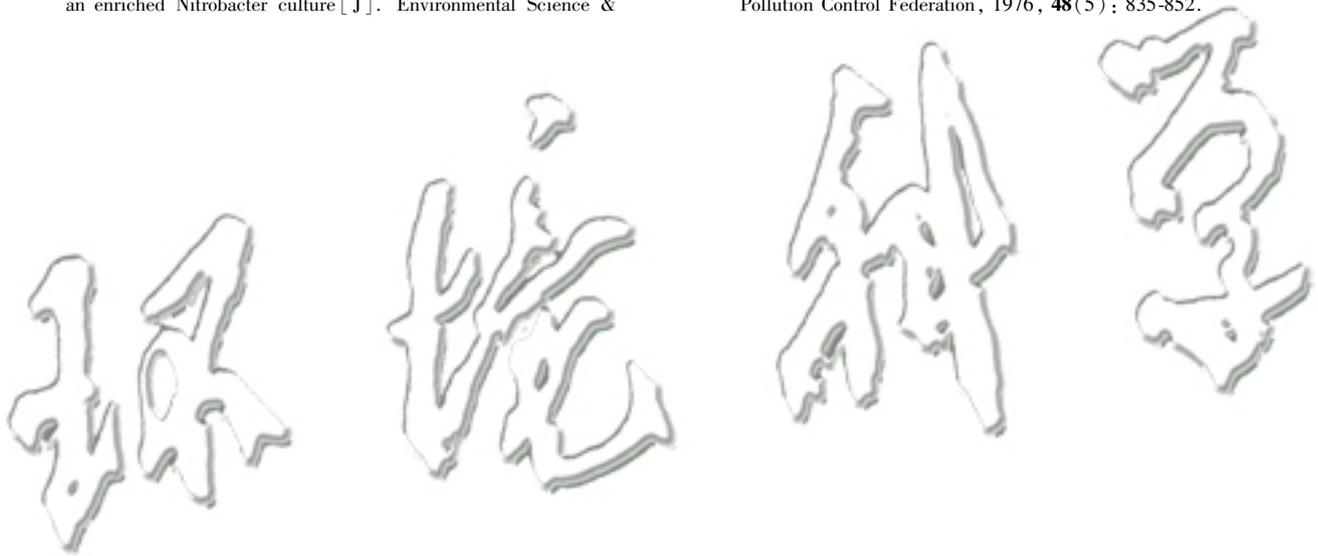
(2) 所得微颗粒污泥呈浅黄色,平均粒径在 134 μm(第 27 d 时)且粒径分布均匀性高,有近 70% 的微颗粒污泥粒径在 59~163 μm;微颗粒污泥沉降性能良好,SV₃₀ = SV₅ 为 4%~5% 且 SVI₃₀ = SVI₅ 为 12~13 mL·g⁻¹.

(3) 通过逐步提升进水氨氮浓度(由 50 mg·L⁻¹ 升至 200 mg·L⁻¹),微颗粒污泥在 1 周内实现亚硝化率达 90% 以上且亚硝化负荷达 1.34 kg·(m³·d)⁻¹;分析认为出水中较高的剩余氨氮浓度(27~50 mg·L⁻¹)或较低的 DO/NH₄⁺-N(0.03~0.09)是微颗粒污泥快速实现亚硝化的主要原因.

参考文献:

- [1] Ma B, Wang S Y, Cao S B, *et al.* Biological nitrogen removal from sewage via anammox: recent advances [J]. *Bioresour Technol*, 2016, **200**: 981-990.
- [2] 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.
- [3] Khin T, Annachhatre A P. Novel microbial nitrogen removal processes [J]. *Biotechnology Advances*, 2004, **22**(7): 519-532.
- [4] Bartrolí A, Peérez J, Carrera J. Applying ratio control in a continuous granular reactor to achieve full nitrification under stable operating conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(23): 8930-8935.
- [5] Isanta E, Reino C, Carrera J, *et al.* Stable partial nitrification for low-strength wastewater at low temperature in an aerobic granular reactor [J]. *Water Research*, 2015, **80**: 149-158.
- [6] Reino C, Suárez-Ojeda M E, Pérez J, *et al.* Kinetic and microbiological characterization of aerobic granules performing partial nitrification of a low-strength wastewater at 10°C [J]. *Water Research*, 2016, **101**: 147-156.
- [7] Soler-Jofra A, Wang R, Kleerebezem R, *et al.* Stratification of nitrifier guilds in granular sludge in relation to nitrification [J]. *Water Research*, 2019, **148**: 479-491.
- [8] Picioreanu C, Pérez J, van Loosdrecht M C M. Impact of cell cluster size on apparent half-saturation coefficients for oxygen in nitrifying sludge and biofilms [J]. *Water Research*, 2016, **106**: 371-382.
- [9] Matsumoto S, Katoku M, Saeki G, *et al.* Microbial community structure in autotrophic nitrifying granules characterized by experimental and simulation analyses [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, **12**(1): 192-206.
- [10] Fang F, Ni B J, Li X Y, *et al.* Kinetic analysis on the two-step processes of AOB and NOB in aerobic nitrifying granules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, **83**(6): 1159-1169.
- [11] Matsumoto S, Ishikawa D, Saeki G, *et al.* Microbial population dynamics and community structure during the formation of nitrifying granules to treat ammonia-rich inorganic wastewater [J]. *Microbes and Environments*, 2010, **25**(3): 164-170.
- [12] Sarma S J, Tay J H, Chu A. Finding knowledge gaps in aerobic granulation technology [J]. *Trends in Biotechnology*, 2017, **35**(1): 66-78.
- [13] Kent T R, Bott C B, Wang Z W. State of the art of aerobic granulation in continuous flow bioreactors [J]. *Biotechnology Advances*, 2018, **36**(4): 1139-1166.
- [14] Van de Graaf A A, de Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor [J]. *Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [15] 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.
- [16] 彭永臻, 吴蕾, 马勇, 等. 好氧颗粒污泥的形成机制、特性及应用研究进展 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 273-281. Peng Y Z, Wu L, Ma Y, *et al.* Advances: granulation mechanism, characteristics and application of aerobic sludge granules [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(2): 273-281.
- [17] 王建龙, 张子健, 吴伟伟. 好氧颗粒污泥的研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 449-473. Wang J L, Zhang Z J, Wu W W. Research advances in aerobic granular sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(3): 449-473.
- [18] 牛姝, 段百川, 张祚薰, 等. 连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 986-992. Niu S, Duan B C, Zhang Z L, *et al.* Cultivation of aerobic granular sludge with municipal wastewater and studies on its characteristics under the continuous flow [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 986-992.
- [19] Liu Y, Tay J H. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment [J]. *Biotechnology Advances*, 2004, **22**(7): 533-563.
- [20] Verawaty M, Tait S, Pijuan M, *et al.* Breakage and growth towards a stable aerobic granule size during the treatment of wastewater [J]. *Water Research*, 2013, **47**(14): 5338-5349.
- [21] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001, **57**(1-2): 227-233.
- [22] Liu Y, Tay J H. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge [J]. *Water Research*, 2002, **36**(7): 1653-1665.
- [23] Toh S, Tay J, Moy B, *et al.* Size-effect on the physical characteristics of the aerobic granule in a SBR [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, **60**(6): 687-695.
- [24] 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 nitrification in a continuous-flow aerobic granular sludge reactor at different temperatures through ratio control[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1713-1719.
- [25] Poot V, Hoekstra M, Geleijnse M A A, *et al.* Effects of the residual ammonium concentration on NOB repression during partial nitrification with granular sludge [J]. *Water Research*, 2016, **106**: 518-530.
- [26] Jemaat Z, Bartrolí A, Isanta E, *et al.* Closed-loop control of ammonium concentration in nitrification: convenient for reactor operation but also for modeling [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **128**: 655-663.
- [27] Pérez J, Lotti T, Kleerebezem R, *et al.* Outcompeting nitrite-oxidizing bacteria in single-stage nitrogen removal in sewage treatment plants: a model-based study [J]. *Water Research*, 2014, **66**: 208-218.
- [28] Vadivelu V M, Yuan Z G, Fux C, *et al.* The inhibitory effects of free nitrous acid on the energy generation and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(14): 4442-4448.
- [29] Zhou Y, Oehmen A, Lim M, *et al.* The role of nitrite and free nitrous acid (FNA) in wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2011, **45**(15): 4672-4682.
- [30] Blackburne R, Vadivelu V M, Yuan Z G, *et al.* Kinetic characterisation of an enriched *Nitrospira* culture with comparison to *Nitrobacter* [J]. *Water Research*, 2007, **41**(14): 3033-3042.
- [31] Song Y J, Ishii S, Rathnayake L, *et al.* Development and characterization of the partial nitrification aerobic granules in a sequencing batch airlift reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **139**: 285-291.
- [32] Winkler M K H, Kleerebezem R, Kuenen J G, *et al.* Segregation of biomass in cyclic anaerobic/aerobic granular sludge allows the enrichment of anaerobic ammonium oxidizing bacteria at low temperatures [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(17): 7330-7337.
- [33] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid [J]. *Journal Water Pollution Control Federation*, 1976, **48**(5): 835-852.



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 Xixiang 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-ethylguaiaicol 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 Abuduwalli, <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 Zhou, 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 Bing-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 Wanshandang 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 Julong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-ni, HU Gong-qi, <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)