

目次

北京市2014~2020年PM_{2.5}和O₃时空分布与健康效应评估..... 陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)

京津冀地区高分辨率PM_{2.5}浓度时空变化模拟与分析..... 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)

京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对PM_{2.5}污染影响..... 邵玄逸, 王晓琦, 钟巖盛, 王瑞鹏 (4095)

太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析..... 王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)

嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析..... 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏崢 (4116)

基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析..... 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)

新乡市大气PM_{2.5}载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险..... 刘桓嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)

黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化..... 袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)

天津市2020年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源..... 李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐逸 (4158)

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素..... 何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邸彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)

乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究..... 张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)

珠江三角洲海岸背景区大气VOCs污染特征与来源..... 云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)

永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析..... 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)

汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别..... 程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)

环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估..... 赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)

柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价..... 张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)

雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价..... 师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)

龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价..... 谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)

硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源..... 任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)

包头南海湿地磷形态及污染源定量识别..... 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)

城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析..... 李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析..... 齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)

锰砂人工湿地对污染物的强化去除..... 马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)

4种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果..... 陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)

输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应..... 周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)

木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性..... 孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)

海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用..... 王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)

纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)生长的拮抗效应及其作用机制..... 王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)

螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析..... 武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)

螯合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响..... 廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)

溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响..... 池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)

间歇梯度曝气下缩短SRT强化短程SNEDPR系统脱氮除磷..... 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)

生物膜系统中部分反硝化实现特性..... 于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)

厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响..... 李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)

不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)

中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的Meta分析..... 张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)

青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价..... 杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)

电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价..... 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)

改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响..... 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)

组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响..... 周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)

不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响..... 魏玮, 李平, 郎漫 (4462)

1株草螺属植物内生菌R-13的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响..... 鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)

不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应..... 李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)

高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征..... 刘晓华, 魏天兴 (4489)

餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验..... 邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)

秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系..... 马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制..... 廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)

降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响..... 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)

氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米N₂O排放的影响..... 符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)

负载NH₄⁺-N生物炭对土壤N₂O-N排放和NH₃-N挥发的影响..... 马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)

微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响..... 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)

1985~2019年中国全氟辛酸磺酰基化合物的动态物质流分析..... 王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)

《环境科学》征订启事(4201) 《环境科学》征稿简则(4340) 信息(4382, 4537, 4565)

间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷

张玉君¹, 李冬^{1*}, 王歆鑫¹, 张杰^{1,2}

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

摘要: 为了探究间歇梯度曝气下污泥龄对氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO₂-OB)的影响, 研究短程硝化内源反硝化除磷系统对于处理低 C/N 比生活污水的优势作用, 本文采用 SBR 反应器培养好氧颗粒污泥, 实验进水采用实际生活污水. 结果表明, 在 SRT 由 50 d 逐渐降低至 30 d 过程中, 比氨氧化速率由 3.16 mg·(g·h)⁻¹ 增加至 4.38 mg·(g·h)⁻¹, 比亚硝酸盐氧化速率由 3.4 mg·(g·h)⁻¹ 降为 1.8 mg·(g·h)⁻¹ 左右, 可知 NO₂-OB 活性降低约 44%, 从而使系统实现了短程硝化. 当 SRT 为 30 d 时, 由典型周期实验可知亚硝酸盐最大积累量可达 6.93 mg·L⁻¹. 由于系统中污泥浓度随 SRT 的减少而略有降低, 因此在反应进行至 40 d 左右时根据 DO 曲线采取降低曝气量的策略, 最终 SRT 为 30 d 时系统出水 COD 浓度为 40.76 mg·L⁻¹, TN 浓度为 12.4 mg·L⁻¹, TP 浓度为 0.31 mg·L⁻¹, 强化了系统中 C、N 和 P 的同步去除, 最终得到了稳定运行的短程硝化内源反硝化除磷系统. 同时好氧颗粒污泥 EPS 含量与 SRT 呈现负相关性, 蛋白质含量由污泥龄为 50 d 的 66.7 mg·g⁻¹ 升为 30 d 的 95.1 mg·g⁻¹, 多糖保持在 12.1~17.2 mg·g⁻¹ 的范围内, 说明 SRT 的降低对蛋白质含量的影响较多糖大, 当 SRT 为 30 d 时, PN/PS 值保持在 6.2 左右, 好氧颗粒污泥在该条件下仍能保持较好的结构稳定性.

关键词: 好氧颗粒污泥(AGS); 间歇梯度曝气; 污泥龄(SRT); 氨氧化菌(AOB); 亚硝酸盐氧化菌(NO₂-OB)

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4383-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.202101190

Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System

ZHANG Yu-jun¹, LI Dong^{1*}, WANG Xin-xin¹, ZHANG Jie^{1,2}

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

Abstract: This study explored the effect of sludge retention time (SRT) on ammonia oxidizing bacteria (AOB) and nitrite oxidizing bacteria (NO₂-OB) under intermittent gradient aeration, as well as the effect of the short-range nitrification endogenous denitrification phosphorus removal system on the treatment of low C/N ratio domestic sewage. In this study, an SBR reactor was used to cultivate aerobic granular sludge, using actual domestic sewage as the influent substrate. As the SRT decreased from 50 d to 30 d, the specific ammonia oxidation rate increased from 3.16 mg·(g·h)⁻¹ to 4.38 mg·(g·h)⁻¹, and the specific nitrite oxidation rate decreased from 3.4 mg·(g·h)⁻¹ to 1.8 mg·(g·h)⁻¹. The activity of NO₂-OB decreased by about 44%, resulting in short-range nitrification within the system. With an SRT of 30 d, the maximum nitrite accumulation was 6.93 mg·L⁻¹. Because the reduced SRT led to a slight decrease in sludge concentration within the system, an aeration reduction strategy was adopted after 40 d, according to the DO curve. When the final SRT was 30 d, the effluent COD concentration was 40.76 mg·L⁻¹, the TN concentration was 12.4 mg·L⁻¹, the TP concentration was 0.31 mg·L⁻¹, and the simultaneous removal of C, N and P was realized. Thus, a stable short-range nitrification endogenous denitrification phosphorus removal system was finally obtained. At the same time, the EPS content of aerobic granular sludge was negatively correlated with SRT, the protein content increased from 66.7 mg·g⁻¹ to 95.1 mg·g⁻¹, and the polysaccharide content remained in the range of 12.1-17.2 mg·g⁻¹, indicating that the decreased SRT had a great effect on the protein content. With an SRT of 30 d, the PN/PS value was maintained at approximately 6.2, and the structural stability of aerobic granular sludge can be maintained under such conditions.

Key words: aerobic granular sludge(AGS); intermittent gradient aeration; sludge retention time (SRT); ammonia oxidizing bacteria (AOB); nitrite oxidizing bacteria (NO₂-OB)

我国生活污水普遍存在碳氮比较低的问题, 进水碳源不足导致传统脱氮除磷工艺处理效果不佳^[1,2], 但是投加外碳源会使污水处理厂运行费用显著增加, 因此对于微生物内碳源的利用显得尤为重要^[3,4]; 短程硝化由于节省 40% 反硝化碳源和减少污泥产量等优点而广受关注^[5,6]. 因此, 在处理低

C/N 比生活污水时, 除了充分利用颗粒污泥沉降性

收稿日期: 2021-01-22; 修订日期: 2021-02-10

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601-001); 北京高校卓越青年科学家计划项目(BJJWZYJH01201910005019)

作者简介: 张玉君(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水质科学与水环境恢复技术, E-mail: 1193814068@qq.com

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

能好和抵御不良环境能力强等优势之外^[7,8],同时在反应器中实现以亚硝酸盐为电子受体和内碳源为电子供体的短程硝化内源反硝化除磷系统(短程 SNEDPR 系统),是一种可行且有效的强化污水脱氮除磷策略。

污泥龄(sludge retention time, SRT)是影响亚硝酸盐积累的重要因素,将 SRT 控制在亚硝酸菌(ammonia oxidizing bacteria, AOB)和硝酸菌(nitrite oxidizing bacteria, NOB)世代周期之间,即可实现对 NOB 的淘汰,进而实现系统亚硝酸型硝化^[9,10],然而由于两种细菌仍具有一定的相似性,以 SRT 单一抑制 NOB 来实现亚硝化仍不能使系统保持稳定,有研究表明间歇曝气有利于抑制 NOB^[11~13],而且梯度曝气(各好氧段溶解氧浓度依次降低)的策略也可以保持系统中低溶解氧的状态,由于低溶解氧可有效抑制 NOB 增殖^[14],因此间歇梯度曝气的运行方式结合渐减 SRT 的调控理论上可以实现系统的短程硝化。而且间歇曝气的运行方式有利于反硝化聚磷菌(DPAOs)的积累^[15],以 NO_2^- -N 为受体的 DPAOs 在保证脱氮效率的同时提高了除磷效率,使生活污水得到高效处理。

本实验采用间歇梯度曝气的运行方式培养好氧颗粒污泥(aerobic granular sludge, AGS),同时缩短

系统的污泥龄,实现短程 SNEDPR 系统的稳定运行。通过考察运行过程中碳、氮和磷污染物的去除、周期实验和硝化实验等,通过探究间歇梯度曝气下渐减 SRT 调控对强化系统脱氮除磷的影响,以期为亚硝化前提下的污水脱氮除磷提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行方法

本实验采用 SBR 反应器进行好氧颗粒污泥的培养,有效体积为 8 L,每天运行 3 个周期,每周周期换水比为 60%,运行方式为间歇梯度曝气, SBR 运行过程中的进水、曝气、沉淀和出水均由时控开关控制,曝气由气体流量计控制,具体操作方法如图 1 所示,本实验分为 3 个阶段,具体参数如表 1 所示。

表 1 实验运行阶段及条件/d

运行阶段	I	II	III
运行天数	1~20	21~50	51~110
SRT	50	40	30

1.2 接种污泥与实验用水

反应器接种实验室前期培养成熟的好氧颗粒污泥,污泥浓度为 $3\ 740\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。进水基质为北京市某家属区化粪池污水,各项水质指标见表 2。

表 2 生活污水水质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Domestic sewage quality/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

指标	COD	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	TN	TP
范围	218~341	32~78	0~2	38~83	3.3~8.1
均值	290.8	52.1	1.1	58.3	5.5

1.3 分析项目与检测方法

溶解氧(DO)测定采用便携式 WTW 在线测定仪测定, NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、TP、COD、MLSS 和 MLVSS 均采用标准方法测定^[16]。污泥粒径采用 Mastersize 2000 激光粒度仪测定。胞外聚合物(EPS)中多糖采用蒽酮硫酸法,蛋白质采用 lowry 法测定。

内碳源储量占总 COD 消耗量用 $\text{COD}_{\text{in}}(\%)$ 来表示,具体计算方法如下:

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

式中, ΔCOD 、 ΔNO_3^- -N 和 ΔNO_2^- -N 分别为系统进水与首段厌氧后的浓度变化量, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.4 批次实验

用比氨氧化速率 [$r(\text{NH}_4^+ - \text{N})$] 与比亚硝酸盐氧化速率 [$r(\text{NO}_2^- - \text{N})$] 来表征颗粒中 AOB 和 NOB 活性^[17],具体步骤如下:分别取缺氧处理后的颗粒污泥 3 L 离心后,用蒸馏水洗泥,而后置于烧杯中,用人工

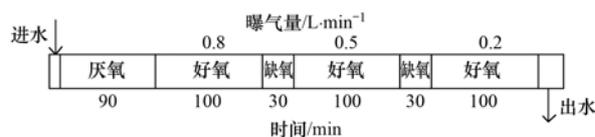


图 1 周期运行示意

Fig. 1 Schematic diagram of periodic operation

配水恢复体积至 3 L,同时投加氯化铵和亚硝酸盐,使得 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 初始浓度分别为 $30\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,实验过程中添加碳酸氢钠以补充碱度,曝气 2.5 h,每间隔 0.5 h 取样测定 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的含量,其浓度降低速率分别记为 $\mu(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 和 $\mu(\text{NO}_2^- - \text{N})$. 因此可得: $r(\text{NH}_4^+ - \text{N}) = \mu(\text{NH}_4^+ - \text{N})$, $r(\text{NO}_2^- - \text{N}) = \mu(\text{NH}_4^+ - \text{N}) + \mu(\text{NO}_2^- - \text{N})$,当 NO_2^- -N 含量呈上升趋势时, $\mu(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 为负值。

2 结果与讨论

2.1 缩短 SRT 过程中污泥特性变化

SRT 是影响颗粒污泥粒径分布的重要参数^[18]。

图 2 为缩短 SRT 过程中粒径的变化情况,可以看出整个过程中粒径大于 200 μm 的颗粒污泥始终占优势地位,粒径在 600 ~ 800 μm 范围内颗粒污泥始终占总质量的 30% 以上. 当 SRT 由 50 d 缩短至 40 d 时,粒径在 800 ~ 1 000 μm 范围的污泥由 28% 降低至 21% 左右,同时粒径在 600 ~ 800 μm 的污泥质量分数增加至 41%,当 SRT 由 40 d 缩短至 30 d 时,最突出的变化就是粒径 <200 μm 的污泥增多,相应地 800 ~ 1 000 μm 和 600 ~ 800 μm 粒径范围的颗粒污泥分别减少了约 7% 和 6%,反应器内絮状污泥增多,综上所述随着 SRT 的降低,颗粒粒径会略有下降,系统中絮状污泥增多. 分析原因可能为,好氧颗粒污泥表面主要分布的是增殖速度较慢的硝化细菌,而内部分布的是增殖速度快的反硝化细菌,当 SRT 缩短后,颗粒内部的异养菌没有足够的时间向外延伸生长,颗粒表面的张力变弱,使颗粒污泥的粒径受到限制,从而使反应器内颗粒粒径略有下降^[19].

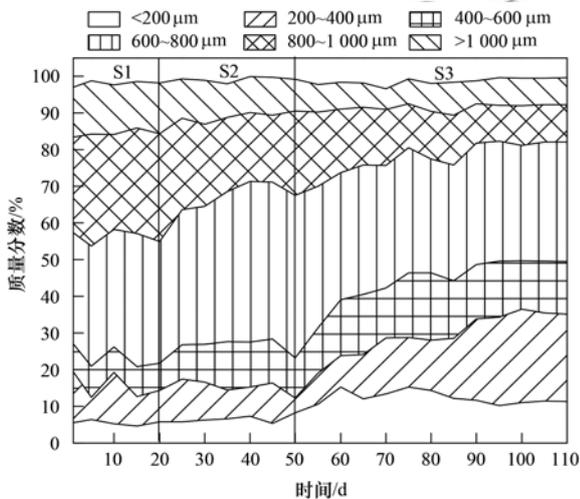
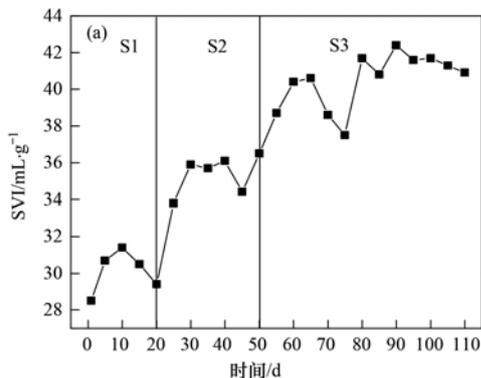


图 2 运行过程中颗粒粒径变化

Fig. 2 Variation of particle size during operation

图 3 分别为不同 SRT 下颗粒污泥沉降性能和生物量的变化. 如图 3 (a) 所示,当 SRT 依次为 50、



40 和 30 d 时, SVI 分别稳定在 30.4、35.6 和 41.6 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右,整个过程中 SVI 逐渐增大,这表明随着 SRT 的降低,污泥沉降性能逐渐下降,分析原因为阶段 S3 系统中絮状污泥较前两个阶段增多,使颗粒污泥的 SVI 值增大,但由图 4 污染物去除效率可以看出好氧颗粒污泥仍能保持较稳定的状态. 如图 3 (b) 所示, MLSS 随着 SRT 的降低而减小,在 SRT 分别为 50、40 和 30 d 时,其后期较稳定阶段平均 MLSS 浓度分别为 4 848、4 164 和 3 734 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 运行过程中 MLVSS/MLSS 值保持在 0.57 ~ 0.75 的区间内,可见系统中好氧颗粒污泥生物活性始终较高.

2.2 缩短 SRT 过程中脱氮除磷性能变化

图 4 (a) 为运行过程中 COD 浓度变化情况,可以看出有机物的去除效果始终较好,出水 COD 浓度平均值为 38.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 且 COD 去除效率平均为 86.7%,结果表明, SRT 的变化对 COD 的去除影响不大. 由 COD_{in} 变化曲线可以看出,阶段 S2 将 SRT 由 50 d 缩短为 40 d 后,虽然系统污泥浓度有所降低,但 COD_{in} 在短期内小幅度增加,随后在阶段后期再次降低至 87% 左右,分析原因可能为反应器内污泥浓度降低明显,系统内 DO 浓度升高, NOB 活性有所恢复,出水 NO_3^- -N 浓度升高,厌氧进水碳源用作反硝化作用的比例增大,从而使系统中 COD_{in} 降低. 阶段 S3 在降低曝气量的条件下,缩短 SRT, NOB 活性再次受到抑制,出水 NO_2^- -N 含量较高, NO_3^- -N 含量降低,由于单位质量浓度的 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 反硝化消耗的 COD 质量浓度分别为 2.86 $\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}$ 和 1.71 $\text{mg}\cdot\text{mg}^{-1}$,同时污泥浓度逐渐保持稳定[图 3 (b)],因此 COD_{in} 回升至 90% 左右.

图 4 (b) 为运行过程中 N 元素变化情况,从中可以看出,由于整个运行过程中微生物活性保持较高水平且稳定,因此系统的硝化效果较好,但不同 SRT 下系统亚硝酸盐积累率(NAR)有较大差异. 在阶段 S1, NH_4^+ -N 平均去除率约为 98.4%,平均出水

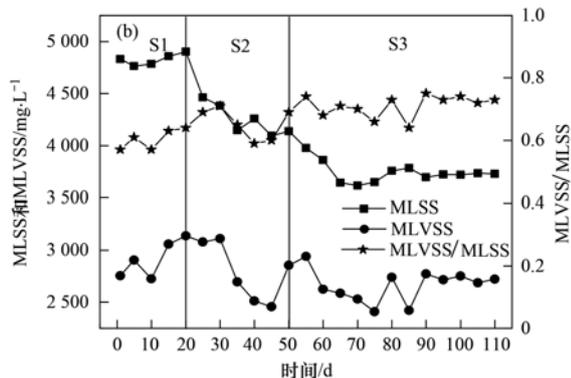


图 3 运行过程中颗粒污泥沉降性能和生物量的变化

Fig. 3 Variation of settling performance and biomass of granular sludge during operation

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 $1.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 此时 NAR 仅为 18.7% 左右, 表明硝化作用为全程硝化, 主要产物为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$. 在阶段 S2 前期 SRT 缩短后, 前期 NAR 有所升高, 达到 40% 左右, 但系统在运行到 40 d 左右时由于 DO 浓度升高使 NAR 逐渐下降, 随后为了恢复亚氮积累而降低系统曝气量导致氨氮去除效果略有下降, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率保持在 95% 左右, 但进入阶段 S3 后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效率逐渐回升至 98% 左右, 系统内 NAR 也升高至 70% 左右, 此时反应器 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 出水平均浓度分别为 8.2 和 $3.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 由此可见, 间歇梯度曝气的运行模式在保持较低 SRT 和控制 DO 浓度的条件下可以实现较好的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累.

图 4(c) 为运行过程中 TP 浓度的变化情况, 其变化趋势与 COD_{in} [图 4(a)] 的变化相似, 阶段 S1

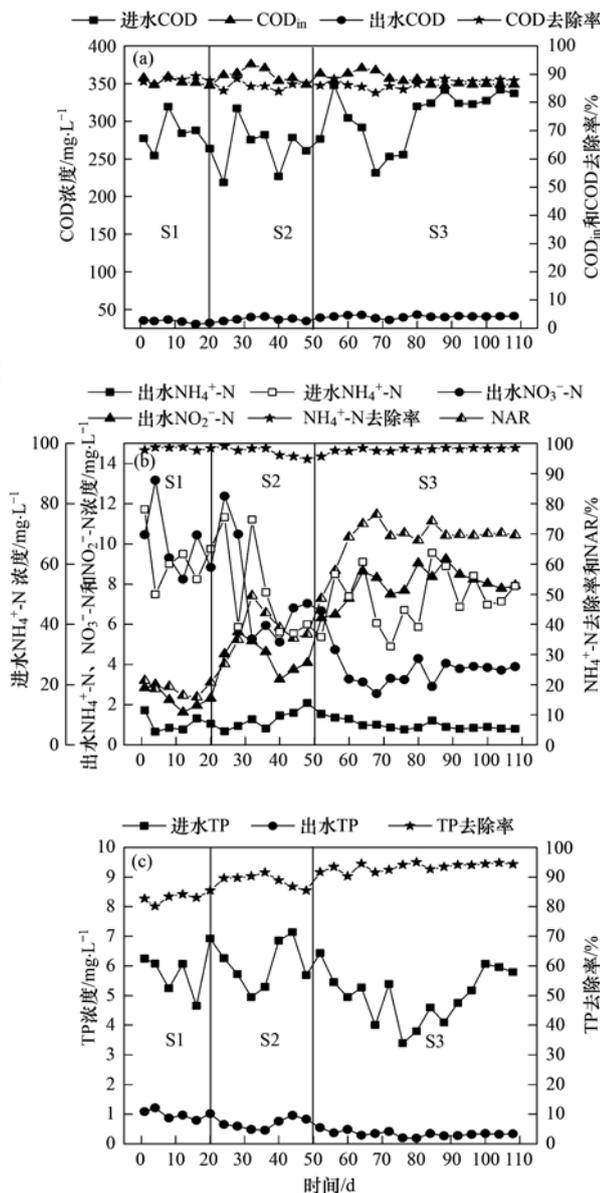


图4 运行过程中 C、N 和 P 浓度变化

Fig. 4 Variation of C, N, and P concentration during operation

由于系统保持较长 SRT, 反应器中富磷污泥得不到及时排放, 影响 PAOs 和 DPAOs 的除磷效果, TP 去除率平均值仅为 84.3% 左右. 阶段 S2 缩短 SRT 后系统 TP 去除率升高至 90.2%, 但后期由于 COD_{in} 减小, 从而使 PAOs 和 DPAOs 的释磷作用受到影响, TP 去除率降低至 87%, 出水 TP 浓度约为 $0.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 仅达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 B 标准. 进入阶段 S3 后, 系统亚硝酸盐积累恢复后, 使系统中 COD_{in} 升高, 系统 TP 去除性能增强, 出水 TP 浓度可达 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, TP 的去除效率可达 93% 左右.

2.3 AGS 系统中脱氮除磷路径分析

由系统运行过程中脱氮除磷变化情况可以看出, 反应器在阶段 S2 后期污染物去除能力和亚硝酸盐积累量下降, 可以判断出 NOB 活性有所恢复, 为了解决这一问题同时更深入地了解该系统脱氮除磷机制, 因此在运行第 42 d 时进行周期批次实验. 图 5 分别为第 42 d 和 75 d 时反应器典型周期中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP、COD 和 DO 的变化情况. 从中可以看出大部分 COD 均在首个厌氧段被去除, 首段厌氧结束时 COD 浓度低于 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 消耗的 COD 一部分用于反硝化作用, 可以看到上一周期剩余的 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 被迅速去除, 一部分用于内碳源储存, 为后续反应提供主要碳源. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在这一阶段由于用于细胞合成而略有减少, 同化的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在第 42 d 和 75 d 分别为 $3.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在较低的 SRT 下, 略高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被同化, 表明在这种条件下微生物的生长速度较高. TP 浓度在首段厌氧结束时均达到最大值, 第 42 d 和 75 d 分别为 $12.57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $14.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 好氧段发生的是聚磷菌以 O_2 为电子受体进行吸磷作用, 同时由于硝化作用, $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 含量均增加, 但不同的是, 在第 42 d 时, 主要是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的增加, 虽然 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 也有少量积累, 但随着后续硝化作用的继续, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 会逐渐消失, 而第 75 d 时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量同样增加明显. 随后进入缺氧段后, 反硝化菌利用内碳源进行反硝化作用, 同时反硝化聚磷菌利用 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 进行反硝化吸磷, 但由图 5 看出, DPAOs 分别利用的是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 为受体进行的反硝化吸磷反应, 有研究表明, 利用 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 为电子受体比 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为受体时脱氮除磷效率高^[20]. 最后一个缺氧段系统主要进行的是内源呼吸反硝化作用, 其对脱氮作用贡献极小, 但在 75 d 时的 $\text{NO}_x^-\text{-N}$ 减少量 ($1.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 较 42 d 时的减少量 ($0.91 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 略大, 可能是因为以 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 为受体节省的内碳源还有少量剩余. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均在最后一

个好氧段被氧化到最低水平,氧化完全的时间分别为 400 min 和 450 min 左右,这是由于第 75 d 时采取降低曝气量的调整策略,导致系统中溶解氧含量降低,使 NH_4^+ -N 氧化所需时间相对较长.对比图 5 的 DO 变化可知,第 42 d 的 DO 浓度明显较高,这可能

是由于缩短 SRT 后污泥浓度有所降低导致的,此时若不及时调节曝气量必然会导致 NOB 活性的恢复,因此在将系统曝气量降低同时再次降低 SRT 后,NOB 活性得到较快恢复,系统脱氮除磷性能逐渐恢复稳定.

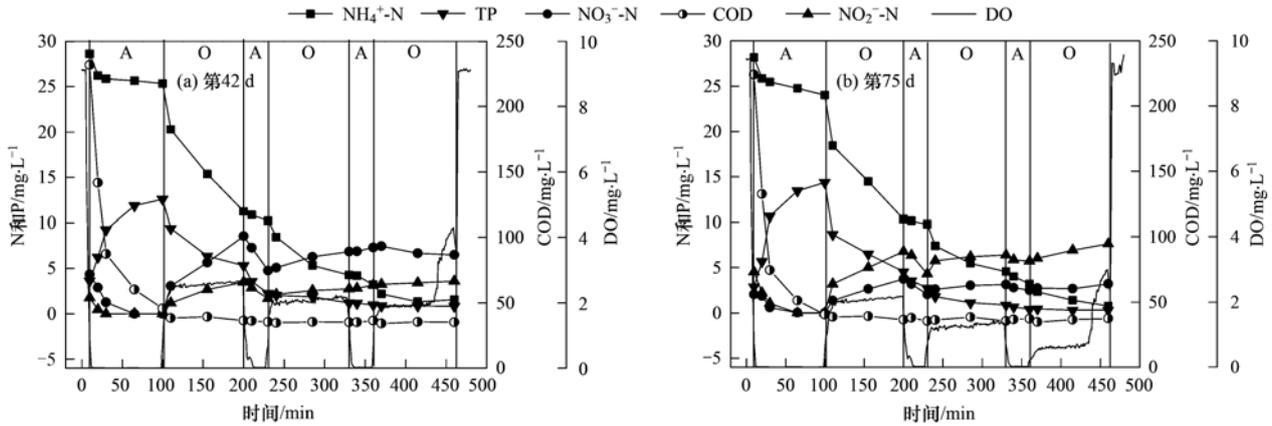


图 5 典型周期内污染物浓度和 DO 变化

Fig. 5 Variation of pollutant concentrations and DO in typical cycles

2.4 缩短 SRT 过程中 AGS 的 EPS 含量变化

胞外高分子物质 (EPS) 在维持污泥稳定中起着重要作用,其产生也受到 SRT 的影响^[21,22],图 6 为 SRT 的缩短过程中 EPS 的变化情况,可以看出,随着系统中 SRT 的降低, EPS 的产量升高,可能原因是在相对低的 SRT 条件下,污泥负荷 (F/M) 相对较高,基质可能会更多地转化为 EPS,相应地,在高 SRT 时,由于 F/M 相对低, EPS 的产量下降^[23].蛋白质是 EPS 的主要成分,其次是多糖^[24].在 SRT 为 50 d 时,蛋白质的浓度明显较小,随着 SRT 从 50 d 缩短到 30 d,蛋白质的含量从 $66.7 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 升高到 $95.1 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右,而多糖浓度仅略有升高,变化范围为 $12.1 \sim 17.2 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右,这与阴方芳^[25]的研究结果类似,但与 Li 等^[26]指出的多糖含量随着 SRT 的降低而升高的结果不同,因此,关于 SRT 对

EPS 产生的影响仍需进一步探究.随着 SRT 的降低,在 SRT 为 40 d 时,蛋白质与多糖的比值从 50 d 的 5.4 降低至 4.5 左右,然后在 SRT 为 30 d 时升高至 6.2.

2.5 缩短 SRT 过程中 AOB 与 NOB 活性变化

为了更加直观充分了解该系统 C、N 和 P 污染物的去除机制,图 7 显示了不同 SRT 下颗粒污泥活性对比,从中可以看出,随着系统 SRT 的缩短,比氨氧化速率 (以 VSS 计) 从 $3.16 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 增加至 $4.35 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,分析原因可能为,缩短系统 SRT,颗粒污泥粒径逐渐减小,此时营养物质传质效率相对提高,微生物活性略有提高^[27],并且高 SRT 造成的高污泥浓度也会影响底物在溶液和颗粒之间的传递,进而影响微生物活性.而比亚硝酸盐氧化速率随着 SRT 的缩短而呈现先减小后增大随后减小的趋

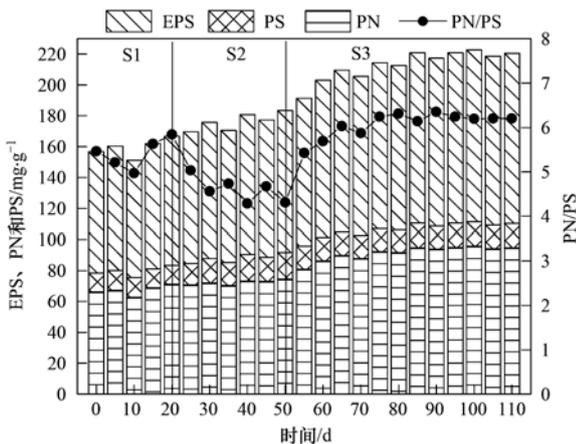


图 6 运行过程中 PS、PN 及 PN/PS 的变化

Fig. 6 Variation of PS, PN, and PN/PS during operation

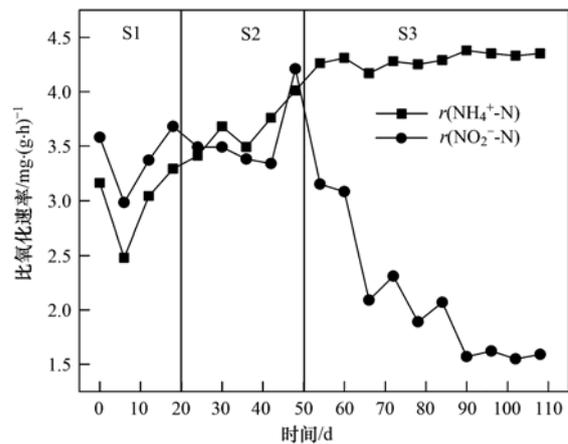


图 7 运行过程中 AOB 和 NOB 活性变化

Fig. 7 Variation of AOB and NOB activity during operation

势,由前文周期变化曲线可知,在 SRT 缩短至 40 d 时,运行后期出现 DO 浓度上升情况,导致系统中 NOB 活性增强,亚硝酸盐氧化速率增大至 $4.21 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,随后进入阶段 S3 后,在 SRT 缩短至 30 d 和降低系统曝气量的双重控制下,NOB 的活性再次受到抑制,比亚硝酸盐氧化速率降至 $1.57 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右,系统中 AOB 取得优势地位。

3 结论

(1)随着 SRT 由 50 d 缩短至 30 d,系统 COD 的去除效果基本不变,SRT 主要影响了系统脱氮和除磷性能,在 SRT 为 30 d、曝气量梯度为 $0.6 \rightarrow 0.4 \rightarrow 0.1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,脱氮和除磷性能均有改善,出水 TP、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度分别为 0.30、3.59 和 $8.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,NOB 活性受到抑制,表现出较好的亚硝化性能。

(2)随着 SRT 的降低,好氧颗粒污泥粒径会略有下降,同时污泥浓度逐渐减少,但运行过程中 MLVSS/MLSS 值始终保持在 0.66 左右,生物活性较高。

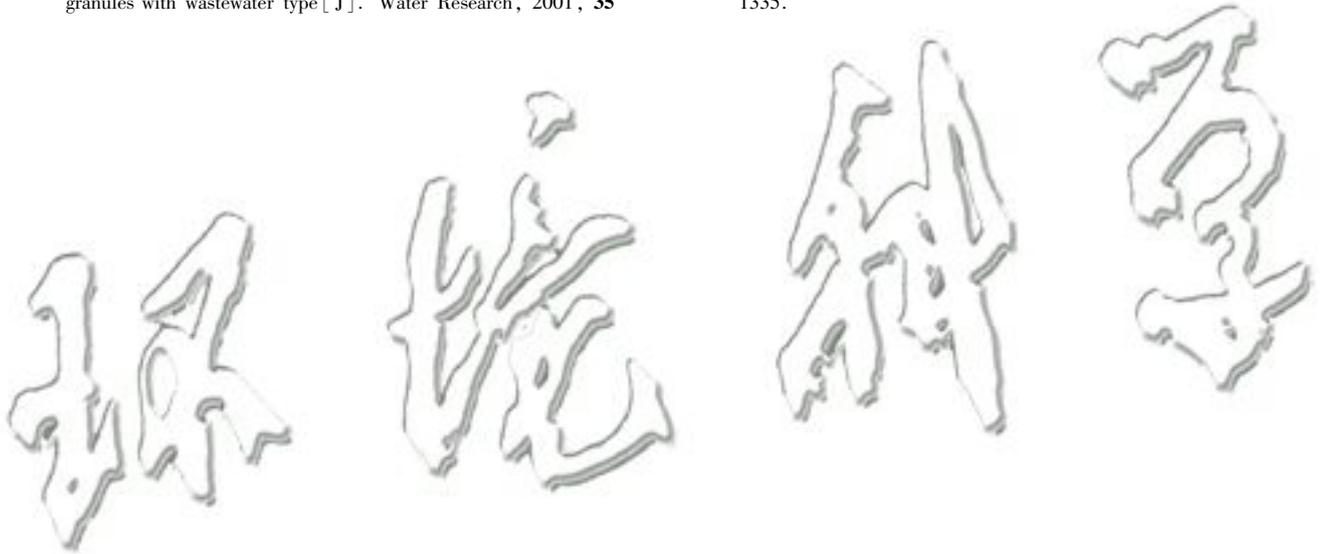
(3)EPS 的产量随着系统中 SRT 的降低而升高,其中蛋白质含量从 $66.7 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 升高至 $95.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,变化明显,PN/PS 呈现先降低后升高的趋势。

(4)随着系统 SRT 的缩短,比氨氧化速率从 $3.16 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 增加至 $4.38 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,比亚硝酸盐氧化速率呈现先减小后增大随后减小的趋势,最后保持在 $1.57 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右,系统实现了以亚硝酸盐为受体的短程硝化反硝化除磷。

参考文献:

- [1] Tao M N, Guan L, Jing Z Q, *et al.* Enhanced denitrification and power generation of municipal wastewater treatment plants (WWTPs) effluents with biomass in microbial fuel cell coupled with constructed wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **709**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136159.
- [2] 王于靖. 外加铁源对低碳氮比污水处理系统脱氮及微生物多样性影响研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2019.
Wang Y J. Study on the effect of additional iron sources on nitrogen removal and microbial diversity in low carbon and nitrogen ratio wastewater treatment systems[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2019.
- [3] Xu Y X, Wang H L, Wang Z H, *et al.* Hydrocyclone breakage of activated sludge to exploit internal carbon sources and simultaneously enhance microbial activity[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, **117**: 651-659.
- [4] Campo R, Sguanci S, Caffaz S, *et al.* Efficient carbon, nitrogen and phosphorus removal from low C/N real domestic wastewater with aerobic granular sludge[J]. *Bioresour Technol*, 2020, **305**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.122961.
- [5] Dutta A, Sarkar S. Sequencing batch reactor for wastewater treatment: recent advances [J]. *Current Pollution Reports*, 2015, **1**(3): 177-190.
- [6] 李冬, 刘博, 王文琪, 等. 除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 867-875.
Li D, Liu B, Wang W Q, *et al.* Simultaneous short-cut nitrification-denitrification phosphorus removal granules induced by phosphorus removal granules [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 867-875.
- [7] Dai Y J, Jiang Y X, Su H J. Influence of an aniline supplement on the stability of aerobic granular sludge [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, **162**: 115-122.
- [8] Haaksman V A, Mirghorayshi M, van Loosdrecht M C M, *et al.* Impact of aerobic availability of readily biodegradable COD on morphological stability of aerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 2020, **187**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116402.
- [9] 李冬, 刘博, 王文琪, 等. 污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5048-5056.
Li D, Liu B, Wang W Q, *et al.* Effects of solid retention time on the phosphorus removal and nitrosation granules system [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5048-5056.
- [10] 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.
- [11] Ma Y J, Domingo-Félez C, Plósz B G, *et al.* Intermittent aeration suppresses nitrite-oxidizing bacteria in membrane-aerated biofilms: a model-based explanation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(11): 6146-6155.
- [12] Yang J J, Trela J, Zubrowska-Sudol M, *et al.* Intermittent aeration in one-stage partial nitritation/anammox process [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **75**: 413-420.
- [13] Zhang F Z, Peng Y Z, Miao L, *et al.* A novel simultaneous partial nitrification anammox and denitrification (SNAD) with intermittent aeration for cost-effective nitrogen removal from mature landfill leachate [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **313**: 619-628.
- [14] Yin Z X, dos Santos C E D, Vilaplana J G, *et al.* Importance of the combined effects of dissolved oxygen and pH on optimization of nitrogen removal in anammox-enriched granular sludge [J]. *Process Biochemistry*, 2016, **51**(9): 1274-1282.
- [15] Zhang C Y, Qian Y K, Yuan L M, *et al.* Nutrients removal performance of a denitrifying phosphorus removal process in alternate anaerobic/anoxic-aerobic double membrane bioreactors ($\text{A}_2\text{N-DMBR}$) [J]. *Water Science & Technology*, 2018, **78**(8): 1741-1752.
- [16] 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. 100-124.
- [17] 委燕, 王淑莹, 马斌, 等. 缺氧 FNA 对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的选择性抑菌效应[J]. *化工学报*, 2014, **65**(10): 4145-4149.
Wei Y, Wang S Y, Ma B, *et al.* Selective inhibition effect of free nitrous acid on ammonium oxidizing bacteria and nitrite oxidizing bacteria under anoxic condition [J]. *CIESC Journal*, 2014, **65**(10): 4145-4149.
- [18] 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 等. 颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 672-678.
Sun Y F, Han X Y, Zhang S J, *et al.* Start-up of combined floc-granule CANON process and the effects of SRT on reactor performance [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 672-678.
- [19] 周曼, 杨昌柱, 濮文虹, 等. 不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性

- 能的研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 896-902.
- Zhou M, Yang C Z, Pu W H, *et al.* Research of aerobic granule characteristics with different granule age [J]. Environmental Science, 2012, **33**(3): 896-902.
- [20] 张立成, 傅金祥, 李冬, 等. 不同电子受体反硝化除磷脱氮性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, **25**(3): 544-547.
- Zhang L C, Fu J X, Li D, *et al.* Research on the characteristics of denitrifying phosphorus and nitrogen removal by different electron acceptors [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2009, **25**(3): 544-547.
- [21] Urbain V, Block J C, Manem J. Biofloculation in activated sludge: an analytic approach [J]. Water Research, 1993, **27**(5): 829-838.
- [22] Liao B Q, Allen D G, Droppo I G, *et al.* Surface properties of sludge and their role in biofloculation and settleability [J]. Water Research, 2001, **35**(2): 339-350.
- [23] Batstone D J, Keller J. Variation of bulk properties of anaerobic granules with wastewater type [J]. Water Research, 2001, **35**(7): 1723-1729.
- [24] 王晓慧. 好氧污泥强化造粒初期 EPS 变化规律及主要组分研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- Wang X H. Study on the changes and main component of EPS in the initial stage of aerobic sludge enhancing granulation [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [25] 阴方芳. 亚硝化颗粒污泥的稳定运行及其调控研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
- Yin F F. Stable operation and control strategy of partial-nitrifying granules [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015.
- [26] Li B, Wu G X. Effects of sludge retention times on nutrient removal and nitrous oxide emission in biological nutrient removal processes [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, **11**(4): 3553-3569.
- [27] Ouyang K, Liu J X. Effect of sludge retention time on sludge characteristics and membrane fouling of membrane bioreactor [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(10): 1329-1335.



CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (Nereididae) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China, 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)