



目次

北京市 2014~2020 年 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 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<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> 污染影响 ..... 邵玄逸, 王晓琦, 钟焜盛, 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<sub>2.5</sub> 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的响应 ..... 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, 何品晶 (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 N<sub>2</sub>O 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 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 生物炭对土壤 N<sub>2</sub>O-N 排放和 NH<sub>3</sub>-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)

# 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<sup>1</sup>, 曹思雨<sup>1</sup>, 王琪<sup>1</sup>, 张杰<sup>1,2</sup>

(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:** 实际生活污水成分复杂, 且碳氮比较低, 而厌氧推流进水可以通过提供局部高底物浓度来加强好氧颗粒污泥对进水中 COD 的利用. 实验采用间歇曝气的方式在序批式反应器 (SBR) 中培养好氧颗粒污泥, 以实际生活污水为进水, 接种污水厂污泥. R1 采用厌氧快速进水, R2 采用厌氧推流进水, 探究不同进水模式对生活污水好氧颗粒污泥系统的影响. 结果表明, 快速厌氧进水条件下, R1 中更早出现颗粒结构, 但在运行 71 d 时出现颗粒破裂的现象; 应用厌氧推流进水模式的 R2 生成的颗粒结构较 R1 的更为致密, 颗粒表面更加光滑, 且反硝化聚磷菌 (DPAO) 的富集效果更好. 最终 R1 和 R2 反应器内 DPAO 占聚磷菌 (PAO) 的比例分别为 14.17% 和 22.07%. 结果表明, 厌氧推流进水模式能够加强颗粒污泥对进水中 COD 的利用, 有利于富集 DPAO, 生成结构更加致密稳定的颗粒, 实现“一碳两用”, 获得更好的脱氮除磷效果.

**关键词:** 好氧颗粒污泥 (AGS); 厌氧推流进水; 反硝化除磷菌 (DPAO); 进水模式; 生活污水; 脱氮除磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4399-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.202102016

## Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration

LI Dong<sup>1</sup>, CAO Si-yu<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1,2</sup>

(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:** Actual domestic sewage has a complex composition and relatively low carbon and nitrogen content. Anaerobic plug-flow influent can enhance the utilization of COD by aerobic granular sludge by providing a locally high concentration of substrate. In this study, intermittent aeration was used to cultivate aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor (SBR), and actual domestic sewage was used as the feed water to inoculate the sewage plant sludge. In the R1 experiment, rapid anaerobic feeding was adopted, while in R2, anaerobic plug-flow feeding was adopted, to explore the impact of different feeding modes on the aerobic granular sludge system of domestic sewage. Under rapid anaerobic feeding in R1, the particle structure appeared earlier, but particle breakage occurred after 71 days of operation; the particle structure generated in R2 was denser than that of R1, the particle surfaces were smoother, and the denitrifying phosphorous accumulating organisms (DPAO) had a more enriching effect. In the final R1 and R2 reactors, the proportion of DPAO to phosphorous accumulating organisms (PAO) was 14.17% and 22.07%, respectively. The results show that the anaerobic plug-flow feeding mode can enhance the use of influent COD by granular sludge, which is conducive to enriching DPAO, generating denser and more stable particles, realizing “one carbon dual purpose” operation, and removing more nitrogen and phosphorus.

**Key words:** aerobic granular sludge (AGS); anaerobic plug-flow; denitrifying phosphorus-removing bacteria (DPAO); feeding mode; domestic; nitrogen and phosphorus removal

好氧颗粒污泥 (AGS) 是基于自凝聚作用而形成的生物膜, 相对于传统活性污泥工艺具有沉降时间短和处理效果好等优点, 且水厂建设面积更小, 更节约建设费用, 因而受到了广泛关注<sup>[1]</sup>. 在过去的十多年中已有许多学者对好氧颗粒污泥进行了研究, 基于好氧颗粒污泥工艺的水处理技术也在国外的多个水厂得到了应用<sup>[2]</sup>.

但是由于我国城市生活污水碳氮比较低, 在低碳氮比污水中培养好氧颗粒污泥, 易发生丝状菌膨胀和颗粒污泥结构松散等问题<sup>[3-6]</sup>. 且早期培养好氧颗粒污泥多采用快速进水模式, 虽然能实现活性污泥的快速颗粒化, 但是颗粒污泥易解体, 污水处理效果并不理想<sup>[7-10]</sup>.

De Kreuk 等<sup>[5]</sup>对这种现象进行了分析, 认为是由于快速进水模式下, 厌氧段 COD 消耗不够彻底, 导致好氧段异养菌利用剩余的 COD 快速增殖, 带来丝状菌膨胀等问题, 造成好氧颗粒污泥系统失稳. 而聚磷菌 (PAO)、聚糖菌 (GAO) 和反硝化聚磷菌 (DPAO) 等微生物, 可以在厌氧条件下, 将污水中的营养物质水解产生挥发性脂肪酸 (VFA), 并将 VFA 转化为聚羟基链烷酸酯 (PHA) 作为内源碳储存在细胞内

收稿日期: 2021-02-03; 修订日期: 2021-02-08

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: 李冬 (1976 ~), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水质科学与水环境恢复技术, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

部<sup>[11]</sup>,且不易发生扩张性快速生长<sup>[12]</sup>,故以这种微生物为基础形成的颗粒污泥结构更加密实. DPAO 能利用这种内碳源同时进行反硝化和除磷<sup>[13]</sup>,为好氧颗粒污泥处理实际生活污水提供了新的思路.

Piciooreanu 等<sup>[14]</sup>的研究表明,底物浓度梯度平缓的条件有利于生成光滑致密的生物膜. 而厌氧推流进水与快速进水后厌氧搅拌的区别就在于能够形成局部高底物浓度,进而带来更深的底物渗透深度以及平缓的颗粒内底物浓度梯度,提高底物扩散转移效率<sup>[15]</sup>,加强对进水中 COD 的利用,促进对 PAO 和 DPAO 的富集,有利于生成结构更加致密稳定的颗粒.

基于此,本实验以实际生活污水为进水培养 AGS,通过研究运行过程中污泥形态、粒径、EPS 和污染物去除性能等的变化,探究不同进水方式对生活污水 AGS 工艺启动和运行的影响,以期在实际工程的应用提供技术支持.

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验装置与运行方式

本实验使用两组制作材料,为有机玻璃的序批式反应器(SBR)R1 和 R2,有效容积 6 L,换水比为

表 1 反应器运行时间/min

Table 1 Operational times of the reactors/min

| 项目 | 厌氧进水 | 厌氧搅拌 | 好氧(间歇曝气) | 沉淀 | 出水 + 闲置 |
|----|------|------|----------|----|---------|
| R1 | 10   | 60   | 270      | 3  | 17      |
| R2 | 70   | —    | 270      | 3  | 17      |

表 2 生活污水水质/mg·L<sup>-1</sup>

Table 2 Water quality of domestic sewage/mg·L<sup>-1</sup>

| 项目 | TN      | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N | TP      | COD       | pH        |
|----|---------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------|-----------|-----------|
| 范围 | 40 ~ 70 | 35 ~ 60                         | <2                              | <0.5                            | 2.5 ~ 8 | 150 ~ 350 | 7.2 ~ 8.1 |

### 1.3 分析项目及方法

本实验采用国家规定的标准方法对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、MLSS 和 SVI 等指标进行测定<sup>[16]</sup>,胞外聚合物(EPS)中的蛋白质(PN)采用 Lowry 法测定,多糖(PS)采用蒽酮硫酸法测定. 使用 WTW 多参数测定仪对 pH 和溶解氧(DO)进行测定. 使用 Mastersize 2000 型激光粒度仪测定颗粒粒径,通过 OLYMPUS 体式显微镜观察颗粒形态.

### 1.4 确定 DPAO 占比的批次实验

在实验运行过程中通过批次实验对系统中 DPAO 的富集情况进行考察. 实验方法如下:从搅拌状态下的反应器中取出 2 L 的泥水混合液,使用自来水搅拌清洗后静置沉淀,去除上清液. 重复此操作 3 次后加入丙酮酸,控制泥水混合液体积为 2 L 且

75%. 反应器采用底部进水的方式,通过 PLC 控制进水、搅拌、曝气和出水. 通过鼓风机进行底部曝气,通过转子流量计控制曝气流量.

反应器在室温条件下运行, R1 和 R2 两个反应器分别采用厌氧快速进水后搅拌、厌氧推流进水的方式进行好氧颗粒污泥的培养. 系统在间歇曝气的模式下运行,曝气强度设置为 0.5 L·min<sup>-1</sup>. 在启动期间不对污泥龄进行控制,待系统颗粒化完成后,通过手动排泥控制系统污泥龄为 30 d. 运行过程中不对 pH 进行控制.

反应器每周期运行时间为 6 h. 其中 R1 先进行 10 min 的快速厌氧进水,进水结束后进入厌氧搅拌阶段. R2 采用厌氧推流进水,厌氧进水持续 70 min. 好氧段间歇曝气设置为曝气 60 min 和停曝 30 min. 初始污泥沉降时间设置为 15 min,之后逐次将沉降时间减少 3 min,最终将沉降时间设置为 3 min,出水和闲置共 17 min. 周期内运行参数如表 1 所示.

### 1.2 接种污泥与实验用水

反应器接种污泥为北京市某污水处理厂二沉池回流污泥, R1 和 R2 的初始 MLSS 分别为 3 532、3 624 mg·L<sup>-1</sup>. 实验用水为实际生活污水,取自某小区化粪池,污水水质如表 2 所示.

COD 浓度为 300 mg·L<sup>-1</sup>,放入批次实验反应器中并在室温下厌氧搅拌 120 min. 之后再次使用自来水搅拌清洗污泥后静置沉淀,去除上清液,定容至 2L. 接着将泥水混合液平均分为两份,加入磷酸二氢钾控制 TP 浓度为 6 mg·L<sup>-1</sup>,其中一份通过曝气进行好氧吸磷实验,另一份加入硝酸钾控制初始硝氮浓度为 20 mg·L<sup>-1</sup>进行缺氧吸磷实验. 定时取样测定批次实验过程中好氧和缺氧实验的 TP 浓度.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同进水模式对好氧颗粒污泥形成的影响

#### 2.1.1 运行期间污泥粒径及形态变化

本实验期间 R1 和 R2 内污泥粒径变化如图 1 所示. R1 和 R2 接种污水处理厂的絮状物泥,初始

平均粒径为 70  $\mu\text{m}$ , 如图 2(a) 所示. 随着反应器的运行, 分别在第 16 和 20 d 观察到 R1 和 R2 中出现

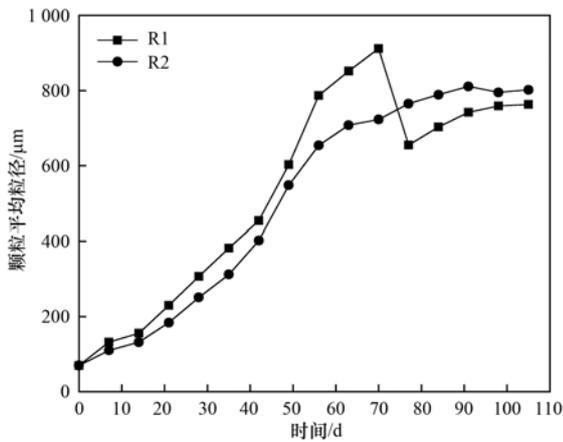
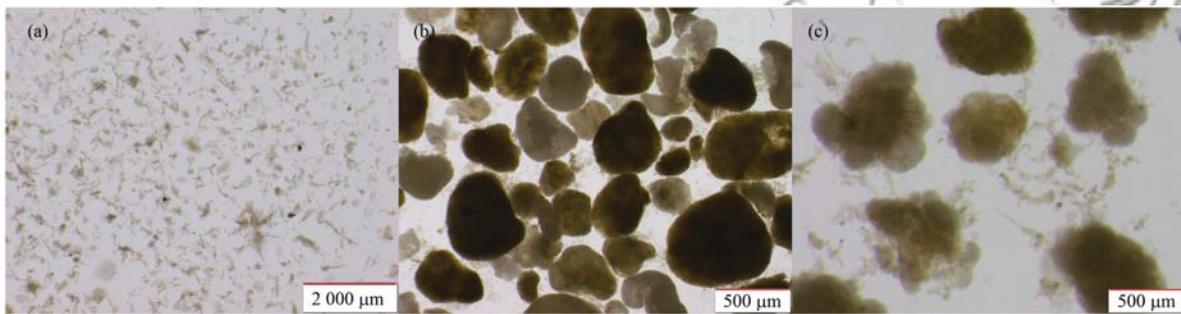


图 1 运行期间 R1 和 R2 反应器中颗粒平均粒径的变化

Fig. 1 Variation of particle size during the operation of R1 and R2

细小颗粒, 在这之后, 两个反应器中的污泥平均粒径逐渐增加. 经过为期 105 d 的培养, R1 和 R2 反应器内颗粒污泥的平均粒径达到 763  $\mu\text{m}$  和 802  $\mu\text{m}$ .

在本实验前期, R1 较 R2 更早出现细小颗粒. 但随着实验的进行, 发现 R1 反应器内所形成的颗粒较 R2 中所形成的颗粒更加疏松, 显微镜下可观察到表面有更多的丝状结构产生. 在实验中后期, R1 反应器中发生了颗粒解体的现象, 造成出水中悬浮物增多, 以及颗粒污泥平均粒径的下降. 这可能是由于进水中 COD 浓度较低且成分复杂不易降解, 快速进水模式下, 厌氧段 COD 并未彻底消耗, 导致进入好氧段后, 异养微生物利用剩余的 COD 快速增殖, 造成了丝状菌膨胀, 使颗粒结构失稳<sup>[5]</sup>. 在第 105 d, 如图 2(b) 所示, R2 反应器中形成的颗粒表面较 R1 中的更加光滑[图 2(c)].



(a) 接种活性污泥照片; (b) R2 在第 105 d 的颗粒污泥照片; (c) R1 在第 105 d 的颗粒污泥照片

图 2 污泥显微镜照片

Fig. 2 Microscopy images of sludges

进水升流速度小于  $0.5 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$  的推流状态, 有利于在反应器底部形成局部高有机负荷, 由此带来的高底物渗透深度可以在颗粒内部形成平缓的底物浓度梯度, 更利于有机物充分渗透进颗粒内部<sup>[17]</sup>, 由此使好氧段碳源缺乏, 抑制好氧异养微生物的大量快速繁殖. 厌氧推流进水条件下, 厌氧段对进水中 COD 的充分利用更有利于 PAO 和 DPAO 等微生物大量吸收底物储存为 PHA 等内碳源, 而 PAO 和 DPAO 等微生物的富集有利于形成光滑且结构致密的颗粒污泥<sup>[18]</sup>. 本实验中, 应用厌氧推流进水策略的 R2 反应器中形成的颗粒污泥表面更加光滑, 颗粒结构较 R1 中生成的颗粒更为致密, 可以看出厌氧推流进水策略对于形成结构致密稳定的颗粒污泥有促进作用.

### 2.1.2 运行期间污泥浓度及沉降性能变化

运行期间两反应器内 MLSS、SVI 值及  $\text{SV}_{30}/\text{SV}_5$  的变化如图 3 所示. 本实验通过逐步缩短沉降时间的方式筛选沉降性能较好的污泥, 故在实验初期, 随着沉降时间的缩短, 系统的 MLSS 呈现下降趋势. 当沉降性能差的活性污泥逐渐被淘汰后, 剩余沉

降性能好的活性污泥逐渐形成聚集体, 沉降性能进一步提高, 相应的功能菌得到保留并繁殖, 污泥也逐渐朝颗粒形态发展, 之后系统的 MLSS 逐渐上升. 实验过程中, 通过缩短沉降时间筛选沉降性能较好的污泥, 3 个反应器内的 SVI 值均呈现逐渐降低的趋势.  $\text{SV}_{30}$  与  $\text{SV}_5$  的比值可以反映系统的颗粒化情况, 当该比值接近 1 时, 表明系统已基本实现颗粒化<sup>[19]</sup>, 由这一判断标准, 如图 3 所示, R1 和 R2 分别在第 35 和 42 d 成功实现颗粒化.

本实验初期 R1 的 MLSS 较 R2 上升较快, 也更早出现微小颗粒, 但随着实验的进行, 在第 71 d 时, R1 中出现部分颗粒破裂、出水悬浮物增多、污泥流失的现象, 造成系统 MLSS 的降低. R2 的 MLSS 虽然在污泥培养过程中增长较为缓慢, 但是最终形成的颗粒污泥结构更加密实. 这可能是由于厌氧推流进水的方式更有利于富集 PAO、GAO 和 DPAO 等微生物, 而这些微生物对形成结构致密稳定的颗粒污泥有促进作用<sup>[18]</sup>. 最终在第 105 d, R1 和 R2 的污泥浓度分别为  $3766 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $3217 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , SVI 分别为  $36.12 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  和  $27.63 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ .

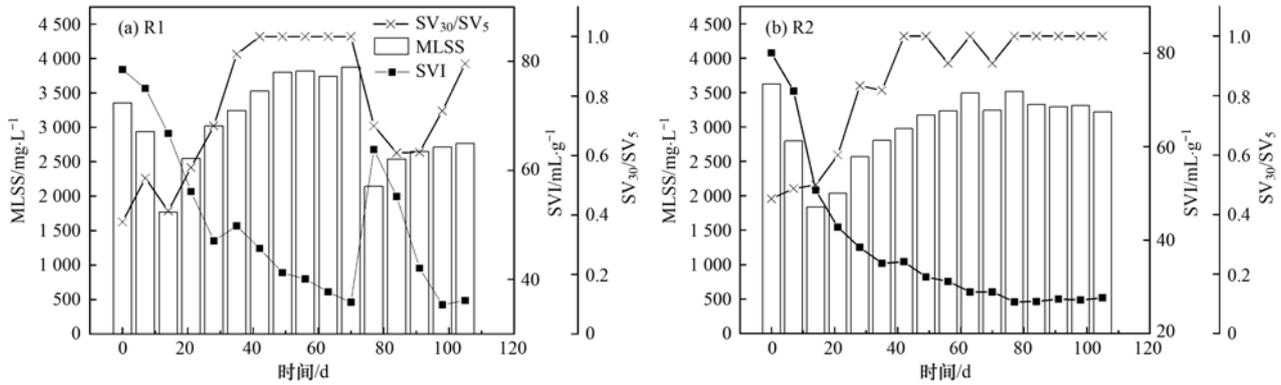


图3 R1和R2运行期间MLSS、SVI及 $SV_{30}/SV_5$ 的变化

Fig. 3 Variations of MLSS, SVI, and  $SV_{30}/SV_5$  during the operation of R1 and R2

### 2.1.3 运行期间污泥EPS变化

胞外聚合物EPS被认为是好氧颗粒污泥形成的关键, EPS含量过低不利于形成颗粒,而EPS含量过高又会阻塞颗粒内部孔隙,影响物质传输而导致颗粒失去稳定性。

图4为运行期间反应器中好氧颗粒污泥EPS的变化趋势. 本实验中,两个反应器在运行初期, EPS含量总体呈上升趋势. 其中, PN的含量变化幅度较大,而PS的含量仅出现小幅度增长. 这可能是由于蛋白质是疏水性物质,因而PN含量的增多更有利于提高污泥的疏水性,促进好氧颗粒污泥的形成. 随着颗粒污泥的形成并逐渐成熟稳定, PN和PS含量也逐渐趋于稳定,表明成熟的好氧颗粒污泥已

基本形成。

由于进水策略不同造成的影响,可以看出R1反应器当中的EPS总含量较R2上升更快,可能是由于厌氧快速进水模式下,厌氧段反应器内有机物底物消耗不够彻底,好氧段饱食期更长,促进了EPS的生成。

但R1在第71d由于颗粒结构失稳发生破裂,系统的EPS含量发生了波动,主要表现为PN含量的减少. 可能是由于EPS积累会造成颗粒内孔隙阻塞影响营养物质及氧气的传递效率,进而造成颗粒内部的微生物只能以EPS作为碳源和能量,导致部分颗粒的破碎<sup>[20]</sup>. 之后R1中的污泥再次聚集形成颗粒, EPS含量逐渐得到恢复。

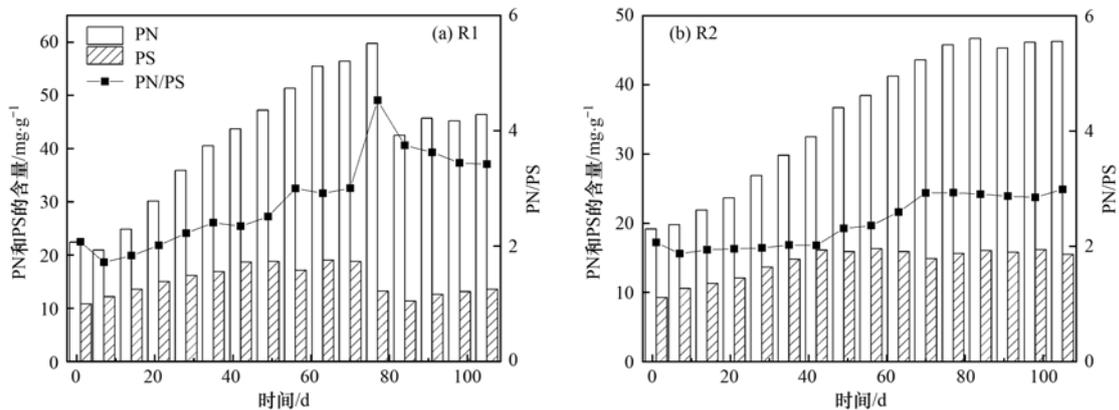


图4 R1和R2运行期间EPS、PN和PS的变化

Fig. 4 Variations of EPS, PN, and PS during the operation of R1 and R2

## 2.2 进水模式对好氧颗粒污泥系统处理性能的影响

### 2.2.1 COD处理效果

图5所示的是两个反应器在运行期间COD处理效果的变化趋势. 除实验进行初期反应器内COD去除率较差,及沉降时间缩短时COD去除效率略有波动外,在实验中后期, R1和R2的COD去除率均达到85%以上,出水COD均在 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,符

合国家标准. 表明在两种运行方式下,系统的COD去除效率并没有受到很大的影响,这可能是由于进水COD较低,且能够消耗COD的功能菌较多,在厌氧及缺氧条件下易降解COD已被消耗。

但在第71d由于R1发生颗粒破碎,污泥流失, COD处理效果略有下降,但是随着R1中颗粒污泥发生二次造粒, COD的处理效果很快得到恢复,之后出水COD浓度已达到国家排放标准要求。

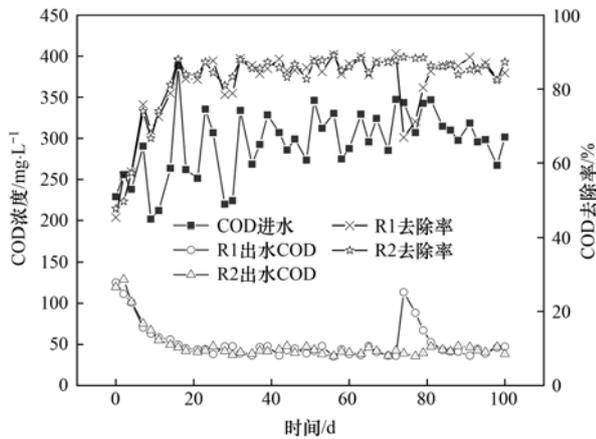


图5 运行期间 COD 去除效果的变化

Fig. 5 Variation of COD removal during the operation of R1 and R2

### 2.2.2 TN 处理效果

污泥接种初期,由于污泥中微生物对生存环境变化不适应等原因, R1 和 R2 反应器的脱氮效率均不佳,图6反映了在运行期间两个反应器脱氮效率的变化趋势.随着培养初期沉降时间的不断调整,两个反应器的脱氮效果呈波动并缓慢上升的趋势.之后随着微小污泥颗粒的出现,污泥沉降性能变好,出水中悬浮物也随之减少,脱氮相关功能菌更好地得到了保留,系统的脱氮效率进一步提升.

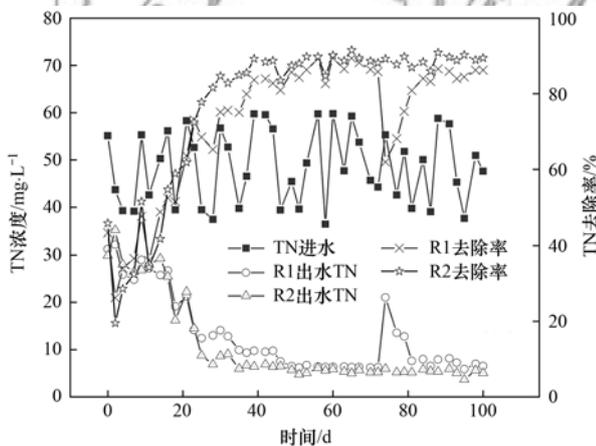


图6 运行期间 TN 去除效果的变化

Fig. 6 Variation of TN removal during the operation of R1 and R2

相对于 R2 而言, R1 中的污泥更早地实现颗粒化,粒径增长速度更快,随着颗粒结构的形成,在单个颗粒中可以提供外层好氧、中层缺氧、中心厌氧的环境,有利于实现同步硝化反硝化.故实验的前半段, R1 反应器的脱氮效率提升速率高于 R2.

但随着 R1 内颗粒发生破裂造成部分污泥流失, R1 的脱氮效率下降.这可能是由于 R1 应用厌氧快速进水模式,对于进水中有机物的利用不够充分.在实际生活污水中, COD 通常由两部分组成,分别为易降解有机物和缓慢生物降解有机物(也被称为颗粒有机物 POM)<sup>[21]</sup>.而 POM 在预处理后的生

活污水中占 40%~60%<sup>[22-24]</sup>.该进水模式下,进水中的 POM 附着在颗粒表面而非被 PAO、DPAO 等功能菌利用,传质效果较差,饥饿环境导致微生物的自我消耗<sup>[17]</sup>,最终引发 R1 内颗粒的破裂.在随后的实验阶段, R1 内破裂的颗粒碎片重新聚合为新的颗粒污泥,但脱氮效率较 R2 更差.

R2 由于采用了厌氧推流进水的策略,虽然在实验初期脱氮效率不如 R1,但由于在厌氧段对进水中的有机物利用更为充分<sup>[17]</sup>,为 PAO 和 DPAO 的富集提供了条件.虽然 R2 中颗粒形成的过程较 R1 略慢,但随着颗粒的出现及相关功能菌的富集,在实验中后期脱氮效果提升较为明显.且形成的颗粒结构更为密实,在实验运行过程中稳定性更好.

### 2.2.3 TP 处理效果

运行期间 R1 和 R2 的除磷性能变化如图7所示.可以看出,在反应器运行初期,两个反应器的除磷效果均不佳,出水 TP 浓度较高.随着实验的进行,微生物对生存环境逐渐适应,由于厌氧/缺氧/厌氧/缺氧/好氧交替的条件有利于 DPAO 的富集<sup>[25]</sup>,同时系统中开始有微小颗粒出现,颗粒内部的立体结构同时提供了好氧、缺氧和厌氧区,系统的除磷效果有所提升.但当沉降时间缩短造成反应器内污泥流失时,系统的除磷效果会随之发生一定波动,随后逐渐恢复稳定,并随着实验的进行,除磷效率逐步提升.

由于第 71 d 时 R1 内颗粒发生破裂,部分污泥流失,系统的除磷效果有所下降,在这之后,随着颗粒碎片重新聚合为小颗粒, R1 的除磷效果得到恢复.

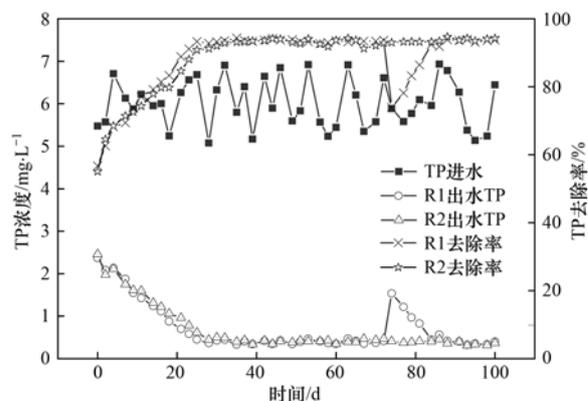


图7 运行期间 TP 去除效果的变化

Fig. 7 Variation of TP removal during the operation of R1 and R2

### 2.3 稳定运行阶段典型周期内污染物浓度变化

R1 和 R2 在运行周期中反应器内污染物浓度变化情况如图8所示.可以看出,由于 R1 和 R2 均采用厌氧+间歇曝气的方式运行,厌氧段 PAO、DPAO 将碳源转化为 PHA 的形式储存起来,并分解

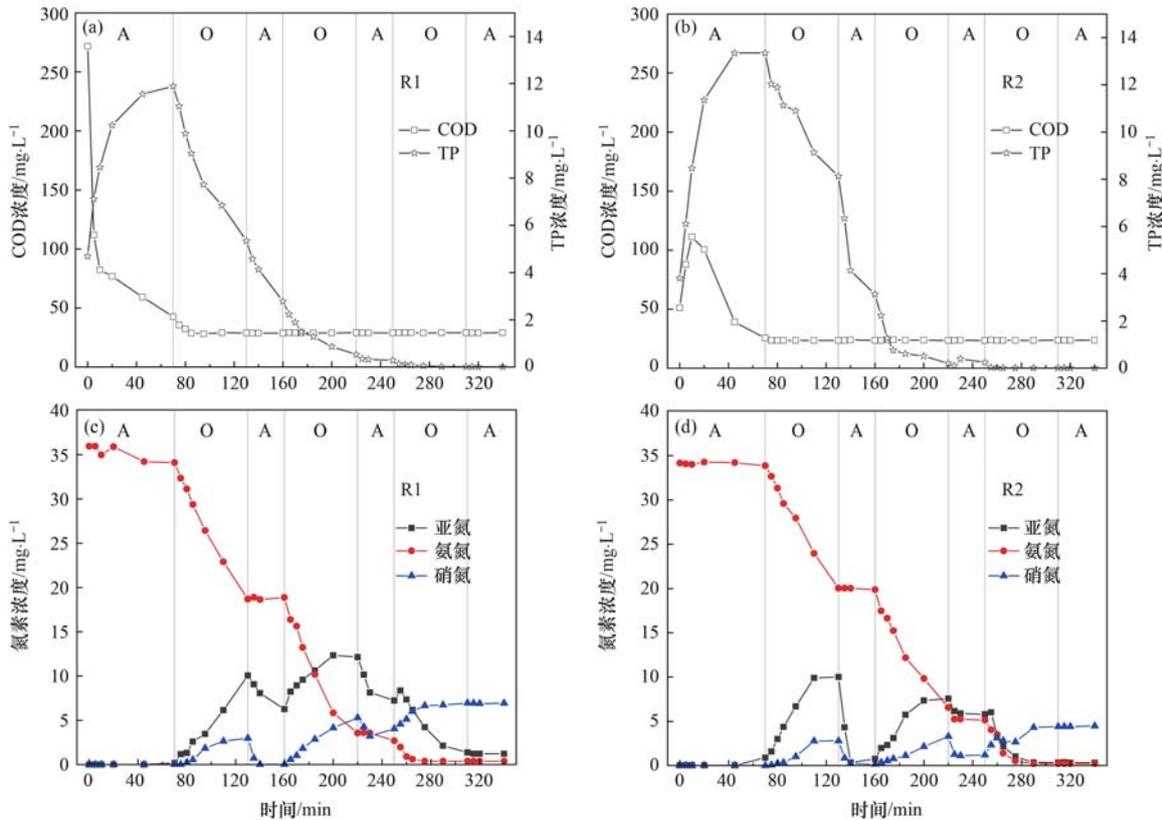


图8 R1和R2单个运行周期内污染物浓度变化

Fig. 8 Variation of pollutant concentrations in R1 and R2 during a single operation cycle

胞内多聚磷酸盐 (poly-P) 进行厌氧释磷, 在前 70 min 厌氧段, R1 和 R2 中的 TP 浓度均有所上升. 在之后的好氧/缺氧交替的间歇曝气段, 好氧条件下, 由硝化细菌将进水中的  $\text{NH}_4\text{-N}$  转化为  $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$ , 再经由反硝化菌及 DPAO 将其去除, 并通过 PAO 和 DPAO 实现除磷.

由于生活污水中有机物成分较为复杂, R2 通过厌氧推流进水的方式加强对水中有机物的分解和利用. 前 70 min 厌氧段, R2 通过反应器侧面固定的取样口进行取样, 由于使用了厌氧推流进水的模式, 在整个进水过程中, 反应器的 COD 浓度没有在规定时间内达到最高值, 而是经历了一个先上升后下降的过程, 并伴随系统内 TP 浓度的上升. 可以看出, 在厌氧阶段, 由于对进水中的 COD 利用更为充分, R2 的厌氧释磷量更高. 在随后的好氧/缺氧交替段, R2 中的好氧颗粒污泥通过利用好氧条件下生成的  $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  进行反硝化吸磷. R2 在厌氧推流进水的条件下, 加强了对进水中 COD 的吸收利用, 为 DPAO 的富集提供了更好的条件, 获得了更好的脱氮除磷效率.

#### 2.4 不同运行条件下 AGS 中反硝化聚磷菌的数量

有研究认为, 通过缺氧吸磷速率与好氧吸磷速率的比值可以反映系统中 DPAO 的增值情况及占全

部 PAO 的比例 (记为  $\sigma$ )<sup>[26]</sup>. 本实验在运行期间通过烧杯实验对两个反应器的  $\sigma$  值进行测定, 结果如图 9 所示. 由图中可以看出, 实验运行初期两反应器中 DPAO 的增值速率都比较缓慢, 随着实验的进行, R2 中 DPAO 占 PAO 的比例增长较 R1 更快, 且两者差距逐渐扩大. 第 71d 时由于 R1 内颗粒发生破裂导致部分污泥流失, R1 中 DPAO 占 PAO 的比例发生一定程度的波动, 随后几乎不再发生增长. 最终 R1 和 R2 反应器内  $\sigma$  值分别为 14.17% 和 22.07%.

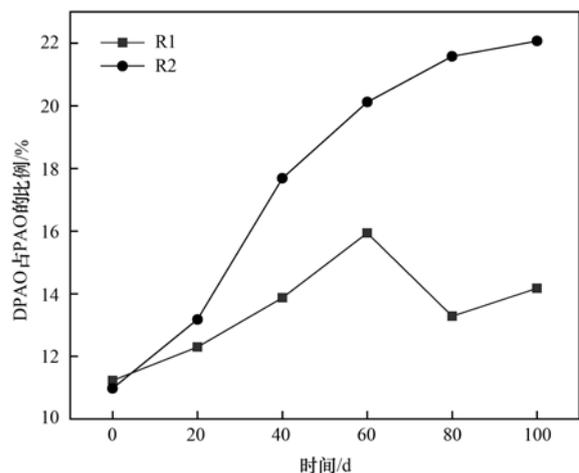


图9 运行期间 DPAO 占 PAO 比例的变化

Fig. 9 Variation of the proportion of DPAO to PAO during the operation of R1 and R2

说明在间歇曝气条件下有利于 DPAO 的富集, 而应用厌氧推流进水策略可以通过加强对进水中 COD 的利用来为 DPAO 的增殖提供更好的条件, 进而提高反应器内 DPAO 占 PAO 的比例, 提高系统的脱氮除磷效率。

### 3 结论

(1) 在间歇曝气条件下的 R1、R2 两反应器均能实现脱氮除磷好氧颗粒污泥的培养, 且出水 COD、TN 和 TP 均能满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准。

(2) 厌氧推流进水条件下培养的好氧颗粒污泥相对快速进水模式下培养的颗粒污泥, 颗粒表面光滑、丝状结构较少, 拥有更加稳定、致密的结构。

(3) 厌氧推流进水的条件更有利于好氧颗粒污泥利用进水中的 COD, 促进对 DPAO 的富集, 实现“一碳两用”同步脱氮除磷, 提高系统的脱氮除磷效率, 最终 R1 和 R2 系统中 DPAO 占 PAO 的比例分别为 14.17% 和 22.07%。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Pronk M, de Kreuk, M K, de Bruin, B, *et al.* Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment[J]. *Water Research*, 2015, **49**: 207-217.
- [ 2 ] Adav S S, Lee D J, Show K Y, *et al.* Aerobic granular sludge: recent advances[J]. *Biotechnology Advances*, 2008, **26**(5): 411-423.
- [ 3 ] Peyong Y N, Zhou Y, Abdullah A Z, *et al.* The effect of organic loading rates and nitrogenous compounds on the aerobic granules developed using low strength wastewater [ J ]. *Biochemical Engineering Journal*, 2012, **67**: 52-59.
- [ 4 ] Awang N A, Shaaban G, Weng L C, *et al.* Characterization of aerobic granular sludge developed under variable and low organic loading rate [ J ]. *Sains Malaysiana*, 2017, **46** ( 12 ): 2497-2506.
- [ 5 ] De Kreuk M K, Van Loosdrecht M C M. Formation of aerobic granules with domestic sewage [ J ]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, **132**(6): 694-697.
- [ 6 ] Derlon N, Wagner J, Da Costa R H R, *et al.* Formation of aerobic granules for the treatment of real and low-strength municipal wastewater using a sequencing batch reactor operated at constant volume[J]. *Water Research*, 2016, **105**: 341-350.
- [ 7 ] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor [ J ]. *Journal of Applied Microbiology*, 2001, **91**(1): 168-175.
- [ 8 ] Liu Y Q, Kong Y H, Tay J H, *et al.* Enhancement of start-up of pilot-scale granular SBR fed with real wastewater[J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, **82**: 190-196.
- [ 9 ] Beun J J, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor [ J ]. *Water Research*, 2002, **36**(3): 702-712.
- [ 10 ] Morgenroth E, Sherden T, van Loosdrecht M C M, *et al.* Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 1997, **31**(12): 3191-3194.
- [ 11 ] Wang X C, Chen Z L, Kang J, *et al.* The key role of inoculated sludge in fast start-up of sequencing batch reactor for the domestication of aerobic granular sludge [ J ]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **78**: 127-136.
- [ 12 ] Rocktäschel T, Klarmann C, Helmreich B, *et al.* Comparison of two different anaerobic feeding strategies to establish a stable aerobic granulated sludge bed [ J ]. *Water Research*, 2013, **47** ( 17 ): 6423-6431.
- [ 13 ] Pronk M, Giesen A, Thompson A, *et al.* Aerobic granular biomass technology: advancements in design, applications and further developments [ J ]. *Water Practice & Technology*, 2017, **12**(4): 987-996.
- [ 14 ] Picioreanu C, van Loosdrecht M C M, Heijnen J. Mathematical modeling of biofilm structure with a hybrid differential-discrete cellular automaton approach [ J ]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1998, **58**(1): 101-116.
- [ 15 ] Yuan Q, Gong H, Xi H, *et al.* Aerobic granular sludge formation based on substrate availability: effects of flow pattern and fermentation pretreatment [ J ]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2020, **14**(3): 49.
- [ 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 ] Layer M, Bock K, Ranzinger F, *et al.* Particulate substrate retention in plug-flow and fully-mixed conditions during operation of aerobic granular sludge systems [ J ]. *Water Research X*, 2020, **9**, doi: 10.1016/j.wroa.2020.100075.
- [ 18 ] de Kreuk M K, van Loosdrecht M C M. Selection of slow growing organisms as a means for improving aerobic granular sludge stability [ J ]. *Water Science & Technology*, 2004, **49**(11-12): 9-17.
- [ 19 ] Angela M, Béatrice B, Mathieu S. Biologically induced phosphorus precipitation in aerobic granular sludge process [ J ]. *Water Research*, 2011, **45**(12): 3776-3786.
- [ 20 ] Zheng Y M, Yu H Q, Liu S J, *et al.* Formation and instability of aerobic granules under high organic loading conditions [ J ]. *Chemosphere*, 2006, **63**(10): 1791-1800.
- [ 21 ] We A C E, Aris A, Zain N A M. A review of the treatment of low-medium strength domestic wastewater using aerobic granulation technology [ J ]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2020, **6**(3): 464-490.
- [ 22 ] Koch G, Kühni M, Gujer W, *et al.* Calibration and validation of activated sludge model No. 3 for Swiss municipal wastewater [ J ]. *Water Research*, 2000, **34**(14): 3580-3590.
- [ 23 ] Kappeler J, Gujer W. Estimation of kinetic parameters of heterotrophic biomass under aerobic conditions and characterization of wastewater for activated sludge modelling [ J ]. *Water Science & Technology*, 1992, **25**(6): 125-139.
- [ 24 ] Orhon D, Çokgör E U. COD fractionation in wastewater characterization-the state of the art [ J ]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1997, **68**(3): 283-293.
- [ 25 ] 李相昆, 张杰, 黄荣新, 等. 反硝化聚磷菌的脱氮除磷特性研究 [ J ]. *中国给水排水*, 2006, **22**(3): 35-39.
- [ 26 ] Li X K, Zhang J, Huang R X, *et al.* Study on characteristic of denitrification phosphorus removal bacteria [ J ]. *China Water & Wastewater*, 2006, **22**(3): 35-39.
- [ 26 ] Wachtmeister A, Kuba T, Van Loosdrecht M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [ J ]. *Water Research*, 1997, **31** ( 3 ): 471-478.

## CONTENTS

|   |   |
|---|---|
| Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing, from 2014 to 2020 .....  | CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)                       |
| High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> -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 ( <i>Nereididae</i> ) 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 <sub>2</sub> 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 <sub>4</sub> <sup>+</sup> -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)    |