

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



## 2019

Vol.40 No.9

第40卷 第9期

# 目次

|                                                                     |                                                       |
|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征 .....                                             | 杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)                                |
| 郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析 .....                                | 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)                         |
| 济南市背景区域大气 PM <sub>2.5</sub> 污染特征及其对能见度的影响 .....                     | 别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)            |
| 聊城市冬季 PM <sub>2.5</sub> 中多环芳烃来源解析及健康风险评估 .....                      | 刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875) |
| 2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势 .....                                 | 刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)                    |
| 长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征 .....                                             | 赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)                 |
| 燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征 .....                                               | 杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)          |
| 高速公路沿线 PM <sub>2.5</sub> 中重金属污染特征 .....                             | 李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)                     |
| 北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险 .....                                         | 胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)                 |
| 风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用 .....                                              | 秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (3935)                     |
| 京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 .....                                | 刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)                          |
| 成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱 .....                                          | 周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)          |
| 工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估 .....                                          | 孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)                          |
| 典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析 .....                                    | 王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)     |
| 不同方法制备 Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 催化剂 CO-SCR 性能及机制 .....        | 仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)            |
| 全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征 .....                                      | 崔杰文, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)              |
| 江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素 .....                                         | 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞 (4000)      |
| 城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浃江为例 .....                        | 高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)                          |
| 水华对沉积物中氮的转化和去除的影响 .....                                             | 肖琳, 杨佳怡 (4018)                                        |
| 沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性 .....                                         | 刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)  |
| 汾河下游雨季硝酸盐污染源解析 .....                                                | 汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)                                  |
| 新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律 .....                                           | 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)                      |
| 基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性 .....                  | 张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)                               |
| FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例 .....                           | 陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)                     |
| 天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制 .....                                              | 邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)                    |
| 镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb <sup>2+</sup> 的去除 .....                           | 何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)        |
| 2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb <sup>2+</sup> .....                       | 晋圣兆, 向阳, 张隽琦, 张凯, 吉庆华 (4091)                          |
| 钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验 .....                                              | 白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)      |
| 大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除 .....                                          | 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建峰 (4105)                      |
| A <sup>2</sup> /O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化 .....                    | 荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)                         |
| 上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能 .....                                   | 杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)                    |
| 微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析 .....                                      | 张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)                      |
| 基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验 .....                                        | 张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)                |
| 聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比 .....                                          | 易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)                               |
| 厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学 .....                                          | 唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)           |
| Ca <sup>2+</sup> 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响 .....                            | 张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)          |
| 从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷 .....                                        | 畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)                               |
| 信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响 .....                                         | 徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏清旋 (4177)                             |
| 海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响 .....                                         | 胡越航, 宣丽霞, 裴琼芬 (4185)                                  |
| 耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析 .....                            | 赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)                  |
| 稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响 .....                                         | 保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)                             |
| 地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响 .....                                         | 陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)                         |
| 氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N <sub>2</sub> O 排放的影响 .....                         | 吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)            |
| 三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N <sub>2</sub> O) 分布和释放 .....                       | 程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)                          |
| 沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响 .....                                       | 朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)                    |
| 新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征 .....                                | 丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)                |
| 不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响 .....                                   | 杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)                        |
| 基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法 .....                                      | 张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)                 |
| 缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征 .....                                       | 罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)                  |
| 西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响 .....                    | 田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)                               |
| 调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析 .....                                    | 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)          |
| 海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源 .....                                          | 陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)                  |
| 《环境科学》征订启事 (3923)      《环境科学》征稿简则 (3941)      信息 (4041, 4051, 4229) |                                                       |



# A<sup>2</sup>/O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化

荣懿<sup>1</sup>, 刘小钗<sup>1</sup>, 何音旋<sup>1</sup>, 章武首<sup>2</sup>, 金鹏康<sup>1\*</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 陕西朗正环保科技有限公司, 西安 710065)

**摘要:** 针对现有城市污水处理厂进水碳源不足的问题, 通过建立多段进水改良 A<sup>2</sup>/O 中试反应器处理低 C/N (C/N < 5) 城市污水, 以研究多段进水对其脱氮除磷性能和微生物种群结构变化的影响。结果表明, 与传统厌氧段进水的模式相比, 多段进水优化了进水碳源在厌氧段和缺氧段中的分布, 从而提高了系统的反硝化脱氮和反硝化除磷性能;  $Q_{\text{预缺}}:Q_{\text{厌}}:Q_{\text{缺}}=0.1:0.2:0.3$  (阶段IV) 为系统的最佳工况, 此时出水 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 的平均浓度分别为 30.10、1.85、9.41 和 0.71 mg·L<sup>-1</sup>, 去除率分别为 89.41%、95.30%、83.00% 和 90.09%; 在 120d 的试验过程中, 系统均未出现丝状菌膨胀现象, 曝气池活性污泥沉降性能良好, 好氧池活性污泥 SVI 随着缺氧段进水比例的增加而降低, 至阶段 V 达到最佳状态, 此时的 SVI 和 VSS/TSS 分别为 112.09 mL·g<sup>-1</sup> 和 0.84; 通过对各阶段好氧区活性污泥 16S rRNA 基因测序数据的梳理, 发现系统较好的脱氮除磷和污泥沉降性能分别与 6 类异养型菌属、4 类反硝化菌属、5 类聚磷菌属和 2 类菌胶团菌属的富集, 3 类丝状菌的淘汰密切相关。

**关键词:** A<sup>2</sup>/O 工艺; 流量分配; 低 C/N 生活污水; 脱氮除磷; 微生物种群结构

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-4113-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903192

## Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A<sup>2</sup>/O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater

RONG Yi<sup>1</sup>, LIU Xiao-chai<sup>1</sup>, HE Yin-xuan<sup>1</sup>, ZHANG Wu-shou<sup>2</sup>, JIN Peng-kang<sup>1\*</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Langzheng Environmental Protection Technology Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

**Abstract:** To resolve the issue of insufficient influent carbon sources in existing municipal wastewater treatment plants (WWTPs) in China, a pilot-scale step-feed A<sup>2</sup>/O process was used to treat low-C/N (C/N < 5) municipal sewage with five different inflow distribution ratios. In this study, the effects of influent flow distribution on the removal efficiencies of chemical oxygen demand (COD), ammonium nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) were investigated. The results showed that optimal removal efficiencies of 89.41% for COD, 95.30% for NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, 83.00% for TN, and 90.09% for TP were obtained at an inflow  $Q_{\text{PA}}:Q_{\text{AN}}:Q_{\text{A}}$  distribution ratio of 0.1:0.2:0.3. The activated sludge exhibited excellent settleability characteristics, showing a sludge volume index (SVI) < 120 mL·g<sup>-1</sup> with an average volatile suspended solids (VSS) total suspended solids (TSS) ratio of 0.84 (Phase 5), and no filamentous bacteria bulking occurred during the 120-day experiment. Moreover, the microbial community structure in the oxic zone was detected by high-throughput sequencing. The results demonstrated that excellent nutrient removal and sludge settling performance of the system were closely related to the enrichment of six types of heterotrophic bacteria, four types of denitrifying bacteria, five types of polyphosphate-accumulating organisms (PAOs), and two types of zoogloea and the elimination of three types of filamentous bacteria.

**Key words:** A<sup>2</sup>/O process; flow distribution; low-C/N municipal wastewater; nutrient removal; microbial community structure

传统的生物脱氮除磷技术 (biological nutrient removal, BNR) 作为应用最广泛的污水处理技术之一, 多年来一直备受关注。然而, 低 C/N 比的城市污水无法满足传统 BNR 中聚磷菌和反硝化细菌的碳源需求, 从而导致其生物脱氮除磷性能难以进一步提升<sup>[1,2]</sup>。城市污水处理厂进水碳源不足导致低脱氮除磷效率的难题一直是传统 BNR 难以突破的瓶颈<sup>[3]</sup>。“十三五”以来, 随着国家水体治理的稳步推进, 城市污水处理厂势必将面临更为严格的出水水质标准, 这其中氮和磷的降低至关重要。因此, 有必要寻找进一步提升传统 BNR 脱氮除磷效率的方法, 为实现传统 BNR 工艺强化脱氮除磷奠定理

论与技术基础。

面对进水碳源不足的问题, 传统 BNR 城市污水处理厂通常的处理对策是外加优质碳源, 如乙酸钠、葡萄糖、甲醇和乙醇等<sup>[4]</sup>。但是, 高昂的药品费用会给城市污水处理厂带来更大的经济负担, 而且外加优质碳源也会产生更多的剩余污泥, 因此, 这种方法在实际应用中受到了一定程度的限制<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2019-03-21; 修订日期: 2019-04-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400701); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016TZZC-S-19-3); 陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-13)

作者简介: 荣懿(1990~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水和废水的深度处理技术, E-mail: rongyi@xaust.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: pkjin@hotmail.com

除此之外,研发能降低碳源需求的新型工艺(短程硝化反硝化、厌氧氨氧化)也是污水处理厂解决进水碳源不足的另一条途径<sup>[6,7]</sup>。然而,由于各种原因的限制,致使新型工艺在国内城市污水处理厂中几乎没有成功应用的案例。

除了上述两种对策以外,面对城市污水处理厂进水碳源不足的问题,具有针对性地改造、优化现有污水处理厂结构和工艺也是提高城市污水处理厂脱氮除磷性能的有效途径,且相对而言更加经济、现实。比如Cao等<sup>[8]</sup>应用改良四段式分段进水工艺处理低C/N城市污水,其研究表明当4段A/O的流量分配比例为20:35:35:10时,系统处理效率达到最佳,此时系统平均出水COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN和TP浓度分别为33.05、0.58、9.26和0.46 mg·L<sup>-1</sup>;Peng等<sup>[9]</sup>在三段式分段进水工艺中同样实现了深度脱氮除磷的目的。大量研究表明,流量分配对生物脱氮除磷性能有着重要的影响<sup>[10,11]</sup>。然而,究竟是哪些微生物在发挥着至关重要的作用却鲜见报导。基于此,本文以低C/N(C/N<5)实际城市生活污水为研究对象,通过由传统式厌氧段进水向预缺氧和厌氧两段及预缺氧、厌氧和缺氧3段进水方式的转变,探讨分段进水对改良A<sup>2</sup>/O工艺脱氮除磷和污泥沉降性能的影响;除此之外,还分析了不同进水流量分配比例下系统内部分微生物种群结构

的变化规律,以期建立分段进水改良A<sup>2</sup>/O工艺宏观表现与微观结构的内在关联。

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行方式

中试反应器的平面示意如图1所示。A<sup>2</sup>/O反应器由厚约10 mm的方形钢板焊接制成,其整体尺寸为长3.7 m,宽1.5 m,高2.0 m,有效容积为7.8 m<sup>3</sup>;反应器内部设置了数块隔板,将反应器分割成11块相连的区域,依次为预缺氧区、厌氧区、缺氧区 and 好氧区,体积比为1:1:2:3;通过对隔板上下开孔的方式,保证了反应器内部污水的流态;反应器不同区域的进水流量通过阀门与电磁流量计控制,溶解氧浓度通过转子流量计控制。

中试反应器持续运行120 d,共分为以下5个阶段:阶段Ⅰ(0~23 d),传统式厌氧进水;阶段Ⅱ(24~47 d),预缺氧区与厌氧区两段进水,  $Q_{\text{预缺氧}}:Q_{\text{厌}}=0.3:0.3$ ;阶段Ⅲ(48~71 d),预缺氧区、厌氧区与缺氧区3段进水,  $Q_{\text{预缺氧}}:Q_{\text{厌}}:Q_{\text{缺}}=0.2:0.2:0.2$ ;阶段Ⅳ(72~95 d),  $Q_{\text{预缺氧}}:Q_{\text{厌}}:Q_{\text{缺}}=0.1:0.2:0.3$ ;阶段Ⅴ(96~119 d),  $Q_{\text{预缺氧}}:Q_{\text{厌}}:Q_{\text{缺}}=0.1:0.1:0.4$ 。整个试验过程中,总进水流量控制在0.6 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>,温度采用恒温器维持在25℃±1℃。反应器的其它工况参数如表1所示。

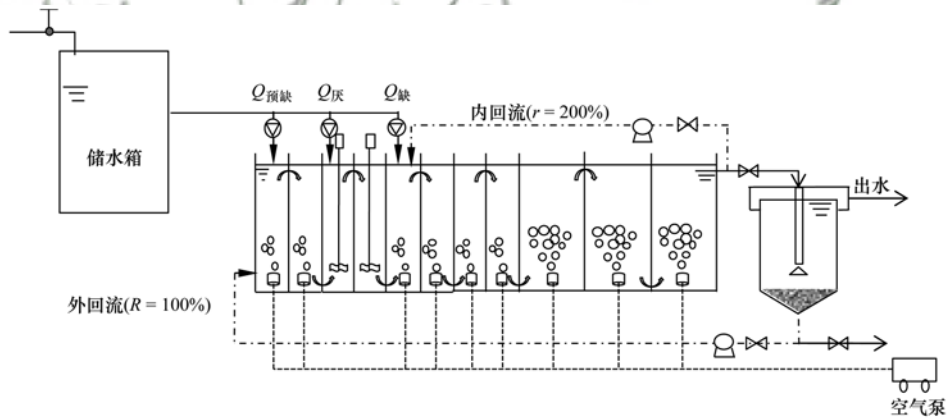


图1 中试反应器平面示意

Fig. 1 Schematic diagram of the step-feed A<sup>2</sup>/O process

表1 中试反应器工况控制参数

Table 1 Operational conditions for this study

| 阶段  | 时间/d   | 流量分配比例                                                 | SRT/d | HRT/h | 内回流/% | 外回流/% | MLSS/mg·L <sup>-1</sup> |
|-----|--------|--------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|
| I   | 0~23   | 传统厌氧进水                                                 | 25±2  | 13    | 200   | 100   | 4 235±200               |
| II  | 24~47  | $Q_{\text{预缺氧}}:Q_{\text{厌}}=0.3:0.3$                  | 25±2  | 13    | 200   | 100   | 4 235±200               |
| III | 48~71  | $Q_{\text{预缺氧}}:Q_{\text{厌}}:Q_{\text{缺}}=0.2:0.2:0.2$ | 25±2  | 13    | 200   | 100   | 4 235±200               |
| IV  | 72~95  | $Q_{\text{预缺氧}}:Q_{\text{厌}}:Q_{\text{缺}}=0.1:0.2:0.3$ | 25±2  | 13    | 200   | 100   | 4 235±200               |
| V   | 96~119 | $Q_{\text{预缺氧}}:Q_{\text{厌}}:Q_{\text{缺}}=0.1:0.1:0.4$ | 25±2  | 13    | 200   | 100   | 4 235±200               |

1.2 试验用水及接种污泥

中试反应器的进水为西安市某污水处理厂曝气

沉砂池的出水,该城市污水处理厂的处理规模为20万m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>,采用的污水处理工艺为传统A<sup>2</sup>/O工



艺,其进水水质如表 2 所示. 反应器活性污泥取自该污水处理厂好氧池的活性污泥,污泥维持了较高的活性,经过 30d 的驯化与适应,系统对各项污染物的去除性能趋于稳定状态.

表 2 中试反应器进水水质

| Table 2 Influent characteristics of the pilot-scale step-feed A <sup>2</sup> /O plant |         |                        |                       |                       |                                                    |                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 项目                                                                                    | pH      | COD/mg·L <sup>-1</sup> | TN/mg·L <sup>-1</sup> | TP/mg·L <sup>-1</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup> |
| 范围                                                                                    | 7.2~7.6 | 209.4~402.8            | 38.7~67.5             | 3.6~9.3               | 31.2~57.6                                          | 0.17~3.30                                          |
| 平均值                                                                                   | 7.5     | 254.9                  | 51.0                  | 6.3                   | 38.8                                               | 1.10                                               |

1.3 试验指标及测定方法

污泥体积指数 (SVI)、混合液悬浮固体浓度 (MLSS)、混合液挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS)、COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 和 TP 浓度的测定方法均采用标准方法<sup>[12]</sup>. DO、pH 和水温监测均采用哈希公司 WTW 多功能自动测定仪. 快速易生物降解 COD 组分 (S<sub>s</sub>) 和慢速可生物降解 COD 组分 (X<sub>s</sub>) 的测定方法见文献<sup>[13]</sup>, 可生物降解 COD (BCOD) 即为 S<sub>s</sub> 与 X<sub>s</sub> 之和. 系统缺氧区活性污泥反硝化速率的测定方法见文献<sup>[14]</sup>. PAOs/DPAOs 的测定方法见文献<sup>[2]</sup>.

不同试验阶段的污泥样均取自该阶段后 3 d 的好氧池,经离心机分离去除上清液后置于 -20℃ 保存备用. 采用 CTAB 或 SDS 方法对样本的基因组 DNA 进行提取,之后利用琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的纯度和浓度,取适量的样品于离心管中,使用无菌水稀释样品至 1 ng·μL<sup>-1</sup>. 以稀释后的基因组 DNA 为模板,根据测序区域的选择,使用带 Barcode 的特异引物, New England Biolabs 公司的 Phusion® High-Fidelity PCR Master Mix with GC Buffer 和高效高保真酶进行 PCR,确保扩增效率和准确性. 引物对应区域: 16S V4 区引物 (515F 和 806R); 16S V3-V4/16S V4-V5 区. 使用 Thermofisher 公司的 Ion Plus Fragment Library Kit 48 rxns 建库试剂盒进行文库的构建,构建好的文库经过 Qubit 定量和文库检测合格后,使用 Thermofisher 的 Life Ion S5™ 或 Ion S5™XL 进行上机测序. 使用 Cutadapt 先对 reads 进行低质量部分剪切,再根据 Barcode 从得到的 reads 中拆分出各样品数据,截去 Barcode 和引物序列初步质控得到原始数据,经过以上处理后得到的 reads 需要进行去除嵌合体序列的处理,reads 序列通过与数据库 (gold database) 进行比对,检测嵌合体序列,并最终去除其中的嵌合体序列,得到最终的有效数据.

2 结果与讨论

2.1 不同进水流量下污染物的去除性能

不同进水比例下系统对污染物的去除效果如图 2 所示. 从图 2(a) 中可以看出,5 种流量分配比例

下,系统各阶段出水 COD 平均浓度分别为 31.74、30.97、30.21、30.10 和 30.49 mg·L<sup>-1</sup>,平均去除率分别为 88.78%、89.38%、89.06%、89.41% 和 89.08%,由此可见不同进水流量比例对系统 COD 的去除效果影响不大,系统在 5 个阶段均有较好的 COD 去除效率,这与南彦斌等<sup>[2]</sup>的研究成果相符. 从图 2(b) 中可以看出,系统各阶段出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度变化不大,平均出水浓度分别为 1.16、1.15、1.18、1.85 和 1.23 mg·L<sup>-1</sup>,平均去除率分别为 97.14%、97.32%、97.23%、95.30% 和 96.82%,整个试验过程中系统均具有较强的硝化性能,这与系统好氧区具有充足的水力停留时间 (5.25 h) 和溶解氧浓度 (2~3 mg·L<sup>-1</sup>) 直接相关<sup>[15]</sup>. 从图 2(c) 和 2(d) 中可以看出,进水流量分配比例对系统 TN 和 TP 的去除均有着较明显的影响. 系统出水 TN 平均浓度分别为 14.49、13.48、11.74、9.41 和 9.05 mg·L<sup>-1</sup>,平均去除率分别为 73.63%、76.17%、79.66%、83.00% 和 83.68%; 系统平均出水 TP 浓度分别为 0.86、0.57、0.72、0.71 和 1.10 mg·L<sup>-1</sup>,平均去除率分别为 88.04%、91.97%、89.58%、90.09% 和 81.97%. 从以上数据可以看出,在改良 A<sup>2</sup>/O 工艺其它条件不变的情况下,与传统厌氧区单段进水的模式相比,预缺氧、厌氧两段和预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式可以提高系统脱氮除磷的性能;然而,进一步降低厌氧段进水流量会使 PAOs 厌氧释磷所需的碳源匮乏,从而降低系统除磷性能. 因此,从阶段 I~V, TN 去除率呈上升的趋势, TP 去除率呈先上升后降低的趋势. 综合考虑下,系统在阶段 IV (Q<sub>预缺</sub>:Q<sub>厌</sub>:Q<sub>缺</sub>=0.1:0.2:0.3) 对污染物的去除效果达到最佳状态,此时出水 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 的平均浓度分别为 30.10、1.85、9.41 和 0.71 mg·L<sup>-1</sup>,去除率分别为 89.41%、95.30%、83.00% 和 90.09%.

2.2 有机物去除机制及相关菌属相对丰度变化

不同进水比例下 COD 在反应器内的沿程变化如图 3 所示. 可以看出,不同阶段下反应器内各个功能区对 COD 的去除情况变化不大, COD 主要在系统厌氧和缺氧区去除. 通过物料衡算分析可得,各阶段下厌氧和缺氧区对 COD 的去除量分别占

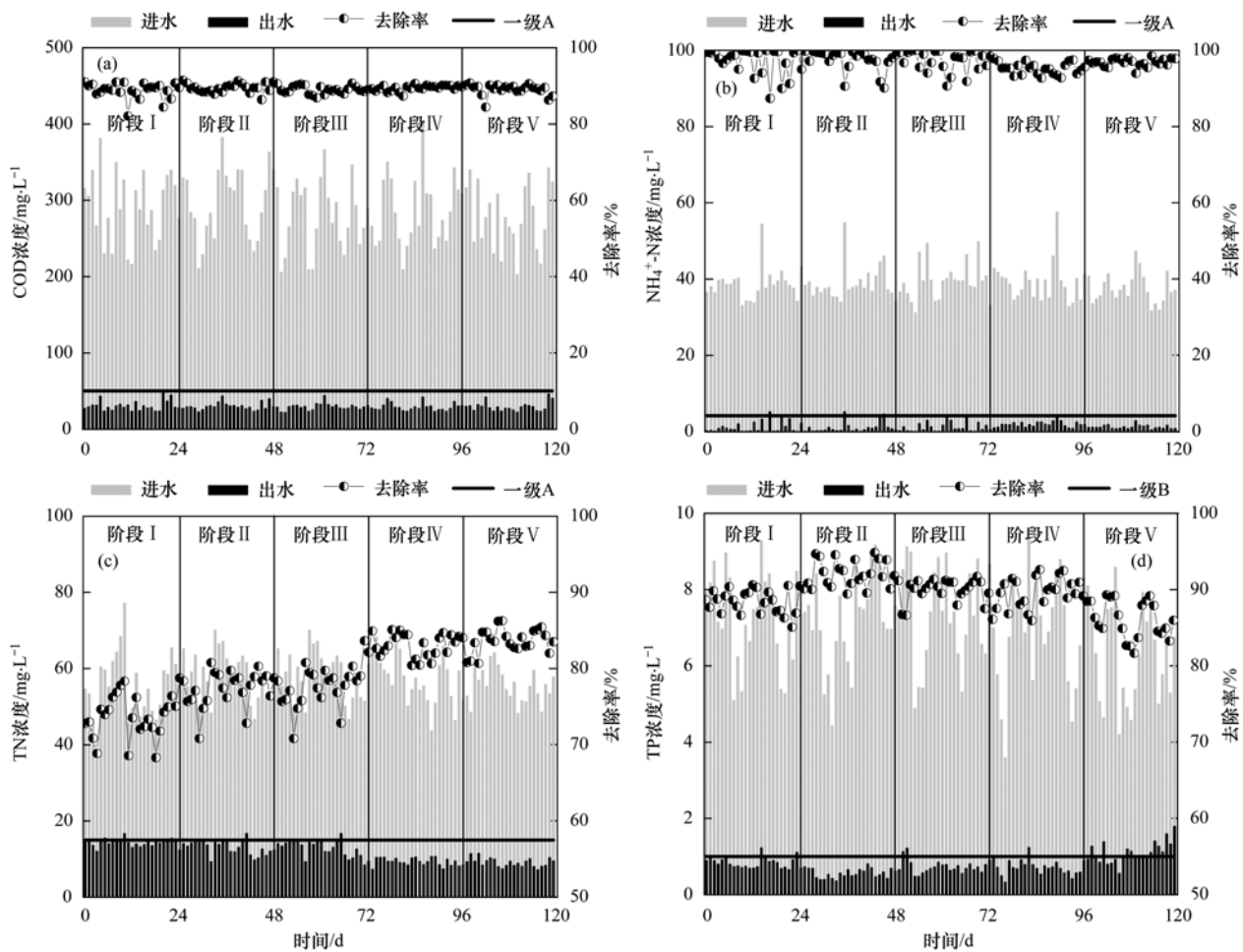


图2 各阶段下系统对污染物的去除效果

Fig. 2 Removal performance of nutrients in each stage

COD 去除总量的 74.56%、78.22%、81.60%、84.58% 和 86.72%，因此 COD 的主要去除途径是通过聚磷菌、反硝化细菌及其他异养型细菌代谢活动的有效利用。图 4 为各阶段系统进出水 COD 组分浓度变化及 BCOD 去除情况，可以看出，与传统厌氧区单段进水的模式相比，预缺氧、厌氧两段和

预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式可在一定程度上提高微生物对 BCOD 的利用效率，从而改善不同微生物的活性。

通过对各阶段好氧区活性污泥 16S rRNA 基因测序数据的梳理，可以发现系统内大量异养型细菌在属水平上的相对丰度都随着试验的进行而得到不同程度的提升，其中较为公认的且相对丰度变化规律较为明显的 6 类异养型菌属及所属菌门如表 3 所示。可以看出，与传统厌氧区单段进水的模式相

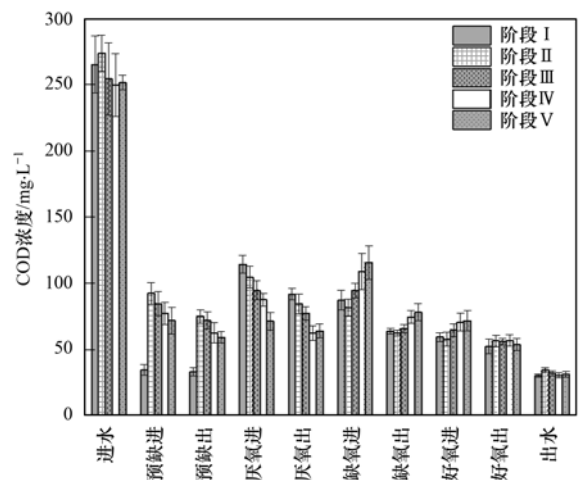


图3 各阶段 COD 的沿程变化规律

Fig. 3 Variation of COD concentrations in different sections of the reactor in each stage

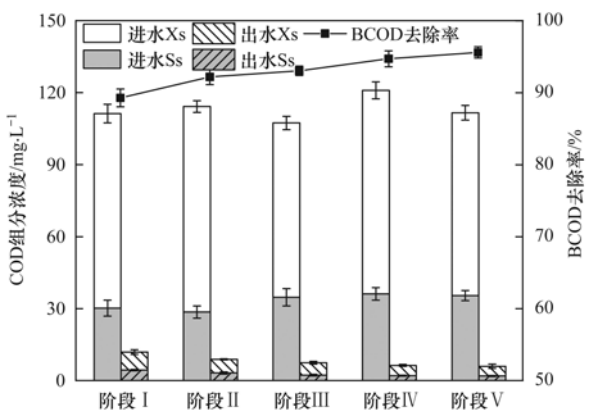


图4 各阶段进出水 BCOD 浓度及 BOD 去除率

Fig. 4 Concentration and removal efficiency of BCOD in each stage



比, 预缺氧、厌氧两段和预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式可提高原水中碳源的利用效率, 从而使 *Thauera*<sup>[16]</sup>、*Dechloromonas*<sup>[17]</sup>、*Candidatus Accumulibacter*<sup>[18]</sup>、*Bacillus*<sup>[19]</sup>、*Flavobacterium*<sup>[20]</sup> 和 *Denitratisoma*<sup>[21]</sup> 在属水平上的相对丰度得到不同程

度提高. 阶段 V 的进水模式更有利于这 6 类异养型菌属的富集, 其相对丰度总和与阶段 I 相比提高了 31.23%. 因此, 预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式更有利于这 6 类异养型菌属的富集, 这与系统较高的 COD 去除效率密切相关.

表 3 各阶段下系统内异养型菌属的相对丰度  
Table 3 Relative abundance of heterotrophic bacteria at genus level in each stage

| 门              | 属                                | 相对丰度/% |       |        |       |      |
|----------------|----------------------------------|--------|-------|--------|-------|------|
|                |                                  | 阶段 I   | 阶段 II | 阶段 III | 阶段 IV | 阶段 V |
| Proteobacteria | <i>Thauera</i>                   | 0.29   | 0.36  | 0.45   | 0.46  | 0.51 |
| Proteobacteria | <i>Dechloromonas</i>             | 0.53   | 0.75  | 0.63   | 0.71  | 0.64 |
| Proteobacteria | <i>Candidatus Accumulibacter</i> | 0.84   | 1.44  | 1.10   | 1.01  | 1.02 |
| Proteobacteria | <i>Denitratisoma</i>             | 1.52   | 1.55  | 1.78   | 1.94  | 2.17 |
| Bacteroidetes  | <i>Flavobacterium</i>            | 0.28   | 0.31  | 0.36   | 0.35  | 0.41 |
| Firmicutes     | <i>Bacillus</i>                  | 0.02   | 0.03  | 0.07   | 0.08  | 0.14 |
| 合计             |                                  | 3.48   | 4.44  | 4.39   | 4.55  | 4.89 |

2.3 氮去除机制及相关菌属相对丰度变化

不同进水比例下 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在反应器内的沿程变化如图 5 所示. 从图 5(a) 中可以看出, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的去除主要发生在反应器内缺氧区, 且在相同的 HRT(3.5 h) 内, 缺氧区去除的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 随着其进水流量分配比例的增大而增加. 通过反硝化速率测定试验可以得出, 从阶段 I ~ V 系统缺氧区反硝化速率分别为 2.14、2.44、3.15、3.56 和 3.86 mg·(g·h)<sup>-1</sup>. 因此, 与传统厌氧区单段进水的模式相比, 预缺氧、厌氧两段和预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式可极大程度地提高 A<sup>2</sup>/O 系统的反硝化性能, 从而保证系统 TN 的去除效率. 从图 5(b) 中可以看出, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除主要发生在反应器内好氧区, 且不同的进水模式对 A<sup>2</sup>/O 系统的硝化性能影响不大, 系统在各个阶段均具有较强的硝化性能. 结果表明, 氮在系统内的去除主要是通过传统的好氧硝化作用和缺氧反硝化作用完成的, 预缺氧、厌氧及缺氧

三段进水的模式可极大程度地提高 A<sup>2</sup>/O 系统的反硝化性能, 从而保证了 TN 的去除效率.

通过对各阶段好氧区活性污泥 16S rRNA 基因测序数据的梳理, 发现了系统内有 4 类反硝化细菌在属水平上的相对丰度随着试验的进行而得到较明显的提升, 如表 4 所示. 可以看出, 与传统厌氧区单段进水的模式相比, 预缺氧、厌氧两段和预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式可提高缺氧区反硝化细菌的代谢活性, 从而使 *Pseudomonas*<sup>[22]</sup>、*Thauera*、*Denitratisoma* 和 *Thermomonas*<sup>[23]</sup> 在属水平上的相对丰度得到不同程度提高. 阶段 V 的进水模式更有利于这 4 类反硝化菌属的富集, 其相对丰度总和与阶段 I 相比提高了 42.86%. 因此, 预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式更有利于这 4 类反硝化菌属的富集, 这与系统较强的反硝化性能密切相关.

2.4 磷去除机制及相关菌属相对丰度变化

不同进水比例下 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 在反应器内的沿程变

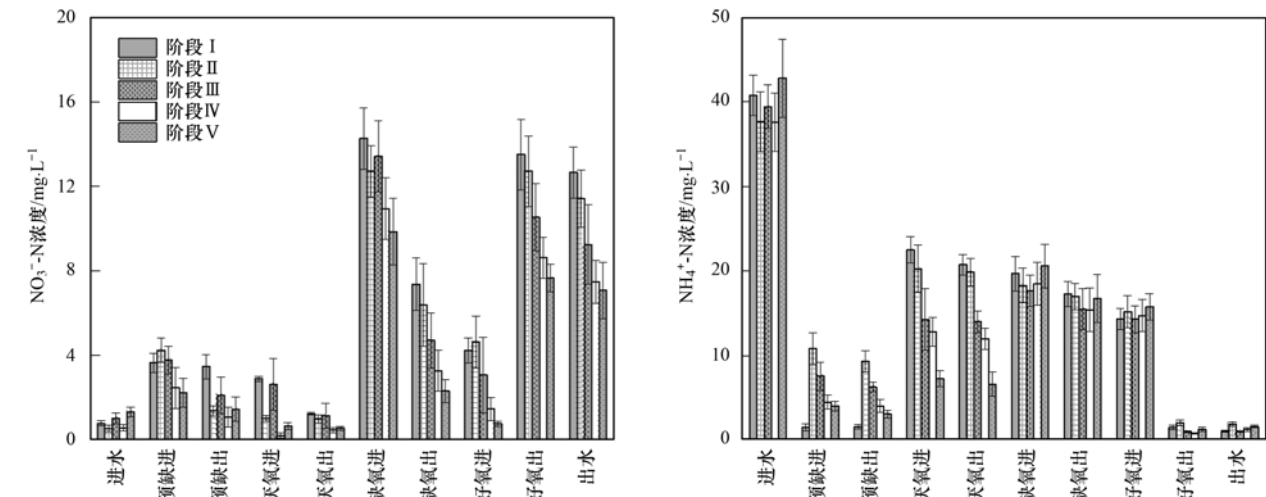


图 5 各阶段下 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的沿程变化规律

Fig. 5 Variations of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentrations in different sections of the reactor in each stage

表 4 各阶段下系统内反硝化菌属的相对丰度

Table 4 Relative abundance of denitrification bacteria at genus level in each stage

| 门              | 属                    | 相对丰度/% |       |        |       |      |
|----------------|----------------------|--------|-------|--------|-------|------|
|                |                      | 阶段 I   | 阶段 II | 阶段 III | 阶段 IV | 阶段 V |
| Proteobacteria | <i>Pseudomonas</i>   | 0.17   | 0.35  | 0.54   | 0.68  | 0.82 |
| Proteobacteria | <i>Thauera</i>       | 0.29   | 0.36  | 0.45   | 0.46  | 0.51 |
| Proteobacteria | <i>Denitratisoma</i> | 1.52   | 1.55  | 1.78   | 1.94  | 2.17 |
| Proteobacteria | <i>Thermomonas</i>   | 0.54   | 0.58  | 0.71   | 0.78  | 0.91 |
| 合计             |                      | 2.52   | 2.84  | 3.48   | 3.86  | 4.41 |

化如图 6 所示. 从中可以看出, 在传统厌氧区单段进水的模式下, 系统对  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除是通过 PAOs 的厌氧释磷和好氧摄磷实现的; 而预缺氧、厌氧两段和预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式将  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除途径改变为厌氧释磷和缺氧、好氧摄磷. 图 7 为各阶段下 DPAOs/PAOs 和缺氧除磷量/总除磷量的变化规律, 可以看出多段进水的模式给预缺氧和厌氧段的 PAOs 分配了更多的碳源, 使其充分释磷并合成大量内碳源, 为反硝化除磷的发生创造了必要条件. 在三段进水的模式下, 缺氧段除磷量随着缺氧段进水比例的增加而减少, 这是因为更多的  $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$  被反硝化细菌去除, 降低了 DPAOs 反硝化除磷所需的电子受体, 从而降低了系统反硝化除磷的性能<sup>[24]</sup>.

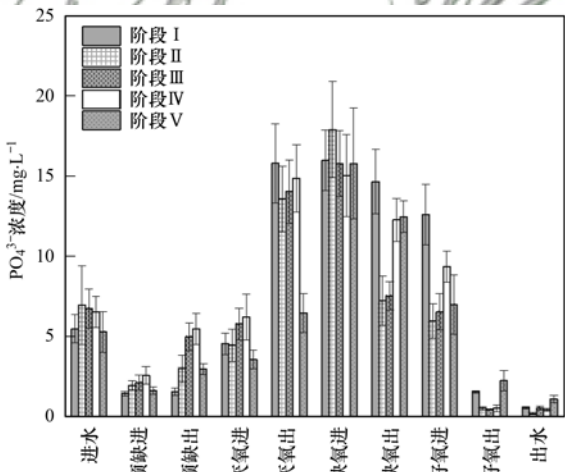


图 6 各阶段  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  沿程变化规律

Fig. 6 Variation of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  concentrations in different sections of the reactor in each stage

表 5 各阶段下系统内聚磷菌属的相对丰度

Table 5 Relative abundance of PAOs at genus level in each stage

| 门              | 属                                | 相对丰度/% |       |        |       |      |
|----------------|----------------------------------|--------|-------|--------|-------|------|
|                |                                  | 阶段 I   | 阶段 II | 阶段 III | 阶段 IV | 阶段 V |
| Proteobacteria | <i>Dechloromonas</i>             | 0.53   | 0.75  | 0.63   | 0.71  | 0.64 |
| Proteobacteria | <i>Candidatus_Accumulibacter</i> | 0.84   | 1.44  | 1.10   | 1.01  | 1.02 |
| Proteobacteria | <i>Acinetobacter</i>             | 0.12   | 0.21  | 0.22   | 0.18  | 0.16 |
| Actinobacteria | <i>Tetrasphaera</i>              | 0.79   | 0.87  | 0.86   | 0.53  | 0.68 |
| Proteobacteria | <i>Aeromonas</i>                 | 0.05   | 0.16  | 0.14   | 0.15  | 0.14 |
| 合计             |                                  | 2.33   | 3.43  | 2.95   | 2.58  | 2.64 |

2.5 污泥性状及相关菌属丰度变化

不同进水比例下系统好氧池内 MLSS、MLVSS

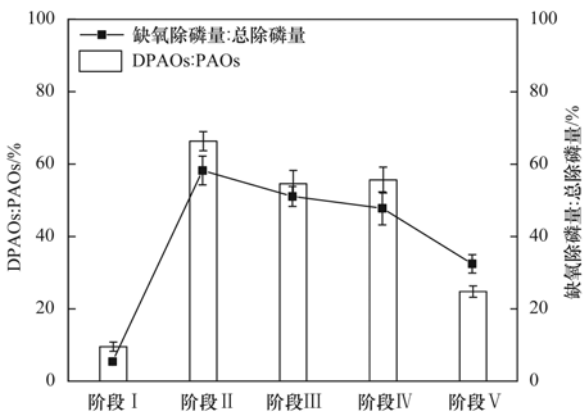


图 7 各阶段 DPAOs 与 PAOs 和缺氧除磷量与总除磷量比值变化规律

Fig. 7 Variations of DPAOs/PAOs and  $Q_{DP}/Q_{TP}$  in different sections of the reactor in each stage

通过对各阶段好氧区活性污泥 16S rRNA 基因测序数据的梳理, 发现了系统内有 5 类 PAOs 在属水平上的相对丰度随着试验的进行表现出较明显的规律, 如表 5 所示. 可以看出, 与传统厌氧区单段进水的模式相比, 预缺氧、厌氧两段和预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式可提高系统 PAOs 的代谢活性, 从而使 *Dechloromonas*、*Candidatus\_Accumulibacter*、*Acinetobacter*<sup>[25]</sup>、*Tetrasphaera*<sup>[26]</sup> 和 *Aeromonas*<sup>[21]</sup> 在属水平上的相对丰度得到不同程度提高. 阶段 II 的进水模式更有利于这 5 类 PAOs 的富集, 其相对丰度总和与阶段 I 和 III 相比分别提高了 32.07% 和 13.99%. 因此, 预缺氧、厌氧两段进水的模式更有利于这 5 类 PAOs 的富集, 这与系统在阶段 II 较强的除磷性能密切相关.

和 SVI 如图 8 所示. 据相关资料显示良好的活性污泥 SVI 一般在  $130 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$  以下<sup>[8]</sup>. 从中可以看出,



随着试验的进行,系统好氧池活性污泥平均 SVI 由阶段 I 的 140.66 mL·g<sup>-1</sup> 降至阶段 V 的 112.09 mL·g<sup>-1</sup>;与此同时,好氧池活性污泥平均 VSS/TSS 由阶段 I 的 0.73 升至 0.84. 结果表明,预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式可以改善系统活性污泥的沉降性能与活性. 分析原因是三段进水的模式,增大了系统内底物浓度梯度,菌胶团能够迅速利用底物并将大量底物以 PHA 的形式贮存起来,较高的

底物贮存能力有利于抑制丝状菌在好氧条件下的优势生长<sup>[27]</sup>,从而能够维持系统良好的沉降性能;好氧段适宜的 HRT、SRT 及 DO 浓度也为菌胶团的生长提供了有利的生存环境. 因此,随着试验的进行,系统活性污泥的沉降性能也在逐渐改善,整个试验阶段均未发生污泥膨胀现象.

通过对各阶段好氧区活性污泥 16S rRNA 基因测序数据的梳理,发现了系统内分别有 3 类丝状菌和 2 类菌胶团在属水平上的相对丰度随着试验的进行表现出较明显的规律,如表 6 所示. 可以看出,与传统厌氧区单段进水的模式相比,预缺氧、厌氧两段和预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式更有利于丝状菌的淘汰、菌胶团的富集,从而使 *Thiothrix*<sup>[28]</sup>、*Candidatus\_Microthrix*<sup>[29]</sup> 和 *Trichococcus*<sup>[30]</sup> 在属水平上的相对丰度得到不同程度的降低; *Zoogloea*<sup>[30]</sup> 和 *Acidaminobacter*<sup>[30]</sup> 在属水平上的相对丰度得到不同程度的提高. 因此,预缺氧、厌氧两段和预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式更有利于这 3 类丝状菌的淘汰、2 类菌胶团的富集,这与系统较好的污泥沉降性能密切相关.

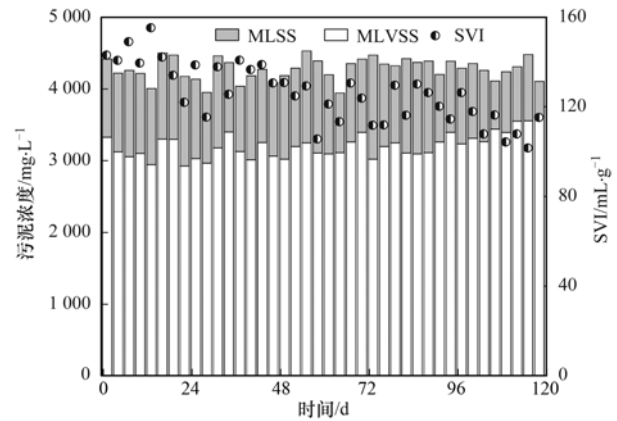


图 8 各阶段污泥性状

Fig. 8 Characteristics of activated sludge in each stage

表 6 各阶段下系统内丝状菌属和菌胶团属的相对丰度

Table 6 Relative abundance of filamentous bacteria and zoogloea at genus level in each stage

| 门              | 属                            | 相对丰度/% |       |        |       |      |
|----------------|------------------------------|--------|-------|--------|-------|------|
|                |                              | 阶段 I   | 阶段 II | 阶段 III | 阶段 IV | 阶段 V |
| Proteobacteria | <i>Thiothrix</i>             | 0.34   | 0.29  | 0.28   | 0.21  | 0.16 |
| Actinobacteria | <i>Candidatus_Microthrix</i> | 0.74   | 0.68  | 0.61   | 0.62  | 0.59 |
| Firmicutes     | <i>Trichococcus</i>          | 0.47   | 0.41  | 0.32   | 0.31  | 0.28 |
|                | 合计                           | 1.55   | 1.38  | 1.21   | 1.14  | 1.03 |
| Proteobacteria | <i>Zoogloea</i>              | 0.095  | 0.11  | 0.14   | 0.13  | 0.15 |
| Firmicutes     | <i>Acidaminobacter</i>       | 0.54   | 0.55  | 0.64   | 0.65  | 0.69 |
|                | 合计                           | 0.64   | 0.66  | 0.78   | 0.78  | 0.84 |

3 结论

(1) 预缺氧、厌氧两段和预缺氧、厌氧及缺氧三段进水的模式可有效提高 A<sup>2</sup>/O 系统的脱氮除磷性能,最佳进水比例为 Q<sub>预缺</sub>:Q<sub>厌</sub>:Q<sub>缺</sub>=0.1:0.2:0.3,此时出水 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 的平均浓度分别为 30.10、1.85、9.41 和 0.71 mg·L<sup>-1</sup>,去除率分别为 89.41%、95.30%、83.00% 和 90.09%.

(2) 多段进水优化了 A<sup>2</sup>/O 系统厌氧段和缺氧段中碳源的供给,从而提高了系统 BCOD 的去除效率、反硝化脱氮和反硝化除磷性能,这分别与 6 类异养型菌属、4 类反硝化菌属及 5 类聚磷菌属的富集密切相关.

(3) 多段进水可改善 A<sup>2</sup>/O 系统活性污泥的沉降性能与活性,系统阶段 V 的 SVI 和 VSS/TSS 分别为 112.09 mL·g<sup>-1</sup>、0.84,这与 3 类丝状菌属的淘

汰和 2 类菌胶团菌属的富集密切相关.

参考文献:

[1] Zhao W H, Huang Y, Wang M X, et al. Post-endogenous denitrification and phosphorus removal in an alternating anaerobic/oxic/anoxic (AOA) system treating low carbon/nitrogen (C/N) domestic wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 339: 450-458.

[2] 南彦斌,彭永臻,曾立云,等.分段进水对改良 A<sup>2</sup>/O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响[J].环境科学,2018, 39(4): 1704-1712.

Nan Y B, Peng Y Z, Zeng L Y, et al. Effect of step feed on denitrifying phosphorus and nitrate removal in a modification of the two sludge A<sup>2</sup>/O-BAF system[J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1704-1712.

[3] Zhang W, Peng Y, Ren N, et al. Improvement of nutrient removal by optimizing the volume ratio of anoxic to aerobic zone in AAO-BAF system[J]. Chemosphere, 2013, 93: 2859-2863.

[4] Gao Y Q, Peng Y Z, Zhang J Y, et al. Biological sludge reduction and enhanced nutrient removal in a pilot-scale system with 2-step sludge alkaline fermentation and A<sup>2</sup>O process[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(5): 4091-4097.

- [5] Zhang T, Wang B, Li X Y, *et al.* Achieving partial nitrification in a continuous post-denitrification reactor treating low C/N sewage[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **335**: 330-337.
- [6] Voets J P, Vanstaen H, Verstraete W. Removal of nitrogen from highly nitrogenous wastewaters[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1975, **47**(2): 394-398.
- [7] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences - An application survey [J]. Water Research, 2014, **55**: 292-303.
- [8] Cao G H, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* Biological nutrient removal by applying modified four step-feed technology to treat weak wastewater[J]. Bioresource Technology, 2013, **128**: 604-611.
- [9] Peng Y Z, Ge S J. Enhanced nutrient removal in three types of step feeding process from municipal wastewater[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(11): 6405-6413.
- [10] Zhu G B, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Effect of influent flow rate distribution on the performance of step-feed biological nitrogen removal process[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, **131**(1-3): 319-328.
- [11] Ge S J, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Enhanced nutrient removal in a modified step feed process treating municipal wastewater with different inflow distribution ratios and nutrient ratios [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(23): 9012-9019.
- [12] 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.
- [13] 金鹏康, 常晋, 王先宝, 等. 不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3443-3448.
- [14] Jin P K, Chang J, Wang X B, *et al.* Variation of different carbon sources in the sewage treatment process [J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3443-3448.
- [15] Jin P K, Wang X B, Wang X C, *et al.* A new step aeration approach towards the improvement of nitrogen removal in a full scale Carrousel oxidation ditch [J]. Bioresource Technology, 2015, **198**: 23-30.
- [16] Li H Y, Zhang Y, Gao F, *et al.* Effects of hydraulic retention time (HRT) on nitrification performance and microbial community of conventional activated sludge (CAS) [J]. Environmental Science, 2006, **27**(9): 1862-1865.
- [17] Liu B B, Mao Y J, Bergaust L, *et al.* Strains in the genus *Thauera* exhibit remarkably different denitrification regulatory phenotypes[J]. Environmental Microbiology, 2013, **15**(10): 2816-2828.
- [18] Coates J D, Chakraborty R, Lack J G, *et al.* Anaerobic benzene oxidation coupled to nitrate reduction in pure culture by two strains of *Dechloromonas*[J]. Nature, 2001, **411**(6841): 1039-1043.
- [19] Kim B C, Kim S, Shin T, *et al.* Comparison of the bacterial communities in anaerobic, anoxic, and oxic chambers of a pilot  $A_2O$  process using pyrosequencing analysis [J]. Current Microbiology, 2013, **66**(6): 555-565.
- [20] 温洪宇, 杨洋, 贾新宇, 等. 4 株细菌处理乳品废水效果的比较研究[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(8): 127-129.
- [21] Wen H Y, Yang Y, Jia X Y, *et al.* Dairy wastewater treated by 4 bacteria with different methods[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **32**(8): 127-129.
- [22] 胡正嘉, 李科德. 焦化废水活性污泥中的主要细菌类群和优良菌株的选育[J]. 华中农业大学学报, 1991, **10**(1): 52-57.
- [23] Hu Z J, Li K D. Major bacterial genera of activated sludge treated coking wastewater and selection of good strains [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 1991, **10**(1): 52-57.
- [24] 赵诗惠. 基于短程反硝化除磷的 ABR-MBR 工艺处理生活污水微生物种群分析[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.
- [25] Zhao S H. Analysis of microbial population of denitrifying phosphorus removal from domestic sewage in ABR-MBR process [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2017.
- [26] Kong Q X, Wang X W, Jin M, *et al.* Development and application of a novel and effective screening method for aerobic denitrifying bacteria[J]. FEMS Microbiology Letters, 2006, **260**(2): 150-155.
- [27] 张楠, 初里冰, 丁鹏元, 等. A/O 生物膜法强化处理石化废水及生物膜种群结构研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 80-86.
- [28] Zhang N, Chu L B, Ding P Y, *et al.* Enhanced treatment of petrochemical wastewater by using A/O biofilm reactor and analysis of biofilm community[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(1): 80-86.
- [29] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J, *et al.* Biological dephosphatation by activated sludge under denitrifying conditions pH influence and occurrence of denitrifying dephosphatation in a full-scale waste water treatment plant [J]. Water Science and Technology, 1997, **36**(12): 75-82.
- [30] Fuhs G W, Chen M. Microbiological basis of phosphate removal in the activated sludge process for the treatment of wastewater [J]. Microbial Ecology, 1975, **2**(2): 119-138.
- [31] Maszenan A M, Seviour R J, Patel B K C, *et al.* Three isolates of novel polyphosphate-accumulating gram-positive cocci, obtained from activated sludge, belong to a new genus, *Tetrasphaera* gen. nov., and description of two new species, *Tetrasphaera japonica* sp. nov. and *Tetrasphaera australiensis* sp. nov. [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2000, **50**(2): 593-603.
- [32] 王杰, 薛同来, 彭永臻, 等. A/O 系统中不同缺氧/好氧体积比对活性污泥沉降性能的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(2): 443-452.
- [33] Wang J, Xue T L, Peng Y Z, *et al.* Effect of different anoxic/aerobic volume ratio on activated sludge settleability in A/O system[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(2): 443-452.
- [34] Sarvajith M, Reddy G K K, Nancharaiyah Y V. Textile dye biodecolourization and ammonium removal over nitrite in aerobic granular sludge sequencing batch reactors [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, **342**: 536-543.
- [35] Rossetti S, Christensson C, Blackall L L, *et al.* Phenotypic and phylogenetic description of an Italian isolate of "*Microthrix parvicella*" [J]. Journal of Applied Microbiology, 1997, **82**(4): 405-410.
- [36] Li J R, Burrell P, Seviour E M, *et al.* The filamentous bacterial morphotype '*Nostocoida limicola*' I contains at least two previously described genera in the low G + C gram positive bacteria [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2000, **23**(4): 528-534.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                     |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols .....                                                                                                   | DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)                 |
| Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017 .....                                                                        | GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)            |
| Characteristics of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan .....                                                      | BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, <i>et al.</i> (3868)             |
| Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Liaocheng City .....                                                                       | LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)        |
| Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017 .....                                                                         | LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)            |
| Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta .....                                                                                               | ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)                  |
| Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers .....                                                                                | YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)       |
| Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> Near Highway .....                                                                                                   | LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)               |
| Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing .....                                                                              | HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)               |
| Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant .....                                                                                   | QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)               |
| Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei .....                                                               | LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)                 |
| Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu .....                                                                                               | ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)                 |
| Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources .....                                                            | MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)               |
| Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China .....                                                                                                | WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)    |
| CO-SCR Performance and Mechanism over Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Catalysts .....                                                                                                | ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)              |
| Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China .....                                  | ..... CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)      |
| Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province .....                                                    | ..... SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000) |
| Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City ..... | ..... GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)     |
| Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal .....                                                                                                             | ..... XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)                                      |
| Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs .....                                                                    | LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)                 |
| Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River .....                                                                                            | WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)                    |
| Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang .....                                                                              | WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)              |
| Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons .....                                             | ..... ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)          |
| Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau .....                                               | CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)                |
| Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals .....                                                                                                       | SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)            |
| Removal of Pb <sup>2+</sup> from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent .....                                                                               | HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)                   |
| Intensified Electrosorption of Pb <sup>2+</sup> by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode .....                                                                      | JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)           |
| Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....                                                                    | BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)        |
| Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants .....                                                             | JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)                   |
| Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A <sup>2</sup> /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater .....                                    | RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)               |
| Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment .....                                                                                             | YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)           |
| Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions .....                                              | ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)               |
| Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal .....                                                                      | ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)                  |
| Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal .....                                                                           | YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)                  |
| Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge .....                                                                  | TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)           |
| Effect of Ca <sup>2+</sup> on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge .....                                          | ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)       |
| Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge .....                                                                   | CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)                |
| Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur .....                                                      | XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)          |
| Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage .....                                                                            | HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)                          |
| Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process .....                               | ..... ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)            |
| Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils .....                                                                                        | BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)          |
| Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland .....                                                                           | CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)           |
| N <sub>2</sub> O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover .....                                                  | LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)          |
| Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River .....                                                                  | CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)                |
| Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters .....                                                                              | ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)               |
| Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment: A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals .....                  | ..... DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)         |
| Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings .....                                                                       | YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)        |
| Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety .....                                                         | ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)                   |
| Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain .....                                                                           | LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)              |
| Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China .....                           | ..... TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)          |
| Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice .....                                                                | PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)                |
| Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo .....                                                                                                              | CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)                   |