

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.7
第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)

基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)

郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析 杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)

能见度与 PM_{2.5} 浓度关系及其分布特征 王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)

基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征 白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)

太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源 李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)

办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征 王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦春春 (3008)

南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征 张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)

黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)

基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)

李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)

水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价 王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)

银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)

人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例 谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)

渝江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析 唐金平, 张强, 胡谦, 张宇, 聂保伟 (3089)

三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因素分析 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)

降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响 翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)

绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征 童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)

微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析 刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 鹏飞, 王凯军 (3126)

钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性 张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)

基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用 唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)

N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水 于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)

Cu²⁺ 对以 NO₂⁻ 为电子受体反硝化过程的影响 买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)

CANON 中试反应器启动及性能优化 孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)

好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响 徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)

有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响 刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)

不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响 吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王伟佳, 张树军 (3195)

ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性 张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)

在线 NaClO 反洗对倒置 A²O-MBR 系统微生物群落的影响 王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)

基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价 袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)

北京市清水与再生水协同利用优化模型 张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)

N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除 柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)

北京市生活污水中曲霉和芬太尼的赋存 周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)

贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险 杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅男 (3249)

紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征 程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)

四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)

热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归 李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)

鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响 武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)

宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制 王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)

石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析 张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)

磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度 湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)

会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较 贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)

湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析 蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)

改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)

重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应 韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)

不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异 彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)

添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N₂O 排放影响 孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)

渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)

不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)

西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征 廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)

生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 俞方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)

《环境科学》征订启事(3194) 《环境科学》征稿简则(3222) 信息(3256, 3284, 3323)

有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响

刘小博¹, 袁林江^{1*}, 陈希², 薛欢婷¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西省环境重点实验室, 西北水资源环境与生态重点实验室, 西安 710055; 2. 西安工程大学城市规划与市政工程学院, 西安 710048)

摘要: 研究了不同进水混合型有机物组成下 AAO 系统中活性污泥菌群结构演替规律以及微生物胞内、胞外聚合物的变化对污泥沉降性能的影响. 结果表明, 当进水中有机物全部为溶解态时, 污泥沉降性能最佳, 污泥体积指数 (sludge volume index, SVI) 为 $70 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 且优于进水有机物以溶解态为主 (SVI = $120 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$) 和以颗粒态为主 (SVI = $280 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$) 的系统. 根据菌群结构分析可知 *Thiothrix*、*Chryseolinea* 和 *Trichococcus* 这 3 种菌属对污泥沉降性能的影响至关重要. 其中颗粒态有机物可促进 *Trichococcus* 的生长, 而溶解态有机物可促进 *Thiothrix* 和 *Chryseolinea* 的生长. 此外, 菌群结构的改变也对胞内及胞外聚合物的变化有重要影响, 从而加剧污泥沉降性能改善或恶化的进程. 较高的溶解态有机物含量可提高胞内聚合物贮存能力, 并改善污泥沉降性能. 同时, 污泥沉降性能也与松散附着胞外聚合物 (loosely bound extracellular polymeric substances, LB-EPS) 中多糖、蛋白质和 Zeta 电位呈显著负相关关系.

关键词: 有机物; 污泥沉降性能; 菌群结构; 胞内聚合物; 胞外聚合物 (EPS)

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3186-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901116

Effect of Organic Characteristics on Sludge Settleability in an AAO System

LIU Xiao-bo¹, YUAN Lin-jiang^{1*}, CHEN Xi², XUE Huan-ting¹

(1. Key Laboratory of Environmental Engineering, Shaanxi Province, Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environmental and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of City Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: The effects of different mixed organic matter ratios on sludge settleability were examined from the succession patterns of microbial community structure, and changes of microbial intracellular and extracellular polymers in the activated sludge. The experimental results showed that when organic matter was dissolved in the influent, the sludge settleability was optimal (SVI = $70 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$), which was better than that for influent water with partially dissolved organic matter (SVI = $120 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$) and particulate organic matter (SVI = $280 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$). According to the analysis of microbial community structure, *Thiothrix*, *Chryseolinea*, and *Trichococcus* were important in influencing the sludge settleability. Of these, particulate organic matter promoted the growth of *Trichococcus*, and dissolved organic matter promoted the growth of *Thiothrix* and *Chryseolinea*. In addition, changes in the bacterial community also had an important influence on the changes of intracellular and extracellular polymers, which either enhanced or impeded settleability. The higher the content of dissolved organic matter in the influent, the higher the storage of intracellular polymeric substances and, therefore, the better the sludge settleability. The sludge settleability was significantly negatively correlated with polysaccharides, proteins, and the Zeta potential in the LB-EPS.

Key words: organic matter; sludge settleability; microbial community structure; intracellular polymeric substance; extracellular polymeric substance (EPS)

目前, 污水处理厂主要以活性污泥法工艺为主, 良好的泥水分离是保证系统高效稳定运行的前提^[1]. 然而, 该工艺在运行过程中常出现二沉池内污泥沉降性能差造成的污泥流失, 并导致较为严重的污水处理效率低下的问题^[2]. 而污泥沉降性能差主要是由于系统内发生污泥膨胀所致^[3]. 因此, 有效解决污泥膨胀问题已迫在眉睫.

大多污水处理厂发生污泥膨胀所导致的污泥沉降性能差的起因主要以丝状菌膨胀为主^[3]. 因此探讨丝状菌过度生长的影响因素, 对于污水处理厂中污泥膨胀的预防及控制、污水处理效率的提升起着至关重要的作用. 污泥膨胀的成因非常复杂, 且受多种因素的共同作用. 由于有机物组成、运行条件及

环境变化等因素的影响, 促使不同种类丝状菌过度生长, 导致污泥沉降性能变差^[4~6]. 其中有机物对污泥沉降性能的影响至关重要. Gulez 等^[7]通过 FISH 和 DGGE 技术, 分别研究了葡萄糖等 8 种单一型溶解态有机物对污泥沉降性能的影响, 发现溶解态有机物可促进 *Thiothrix* 的生长. 温丹丹等^[8]发现在 AAO 系统中, 当以乙酸钠作为进水碳源时, 系统内菌胶团结构密实, 污泥比重大, 污泥沉降性能好. 杨雄等^[9]研究了乙酸钠、葡萄糖和淀粉这 3 种

收稿日期: 2019-01-14; 修订日期: 2019-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51078304, 50878180)

作者简介: 刘小博 (1993~), 女, 硕士, 主要研究方向为污水生物处理理论与技术, E-mail: lxb19930720@163.com

* 通信作者, E-mail: yuanlinjiang@xauat.edu.cn

单一型有机物对污泥沉降性能的影响, 结果表明当以淀粉为碳源时, 污泥结构松散, 污泥沉降性能变差. 以乙酸钠和葡萄糖作为进水碳源时, 容易促进 *Thiothrix* 和 *S. natans* 的生长. 目前, 虽然有机物种类对污泥沉降性能的影响已有研究, 但主要以单一型有机物对污泥沉降性能的影响为主, 而混合型有机物对污泥沉降性能的影响研究较少. 然而在污水处理厂运行过程中, 污水中所含的有机物往往更为复杂多样, 其中颗粒态有机物含量占总有机物的 30% ~ 50%^[3], 这类有机物须水解成小分子有机物方可被微生物利用^[10]. 不同有机物组成, 必将影响到微生物的菌群结构、胞内和胞外聚合物的变化, 从而对污泥沉降性能产生重要影响. Casey 等^[11]从动力学和代谢假说的角度, 分析了污泥沉降性能产生差异的原因; Wang 等^[12]对比不同膨胀期内菌群结构的差异, 分析微生物菌群对污泥沉降性能的影响. 之前的研究鲜有将菌群结构和胞内及胞外聚合物相结合, 综合分析污泥沉降性能产生差异的内在原因. 因此, 从菌群结构和胞内及胞外聚合物两方面共同探讨混合型有机物对污泥沉降性能影响的研究更为实际.

本研究在进水总 COD 浓度不变的条件下, 通过改变进水混合型有机物比例(阶段 I: 溶解态有机物和颗粒态有机物分别占总有机物的 60% ~ 70% 和 30% ~ 40%; 阶段 II: 溶解态有机物占 100%; 阶段 III: 溶解态有机物和颗粒态有机物分别占总有机物的 30% ~ 40% 和 60% ~ 70%), 以探讨不同比例下混合型有机物对污泥沉降性能的影响, 并解析 AAO 系统内优势菌群的演替规律以及胞内、胞外聚合物的变化, 以期为解决污水处理厂污泥膨胀问题提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本研究在 AAO 系统中进行, 实验装置如图 1 所示. 反应器由 3 个功能区组成, 分别为厌氧区,

缺氧区和好氧区. 反应器有效容积约为 9 L, 长 45 cm, 宽 10.5 cm, 高 19 cm, 其 $V_{\text{厌}}:V_{\text{缺}}:V_{\text{好}}=2:2:5$, 材质为有机玻璃. 在整个实验阶段, 进水 pH 为 7.0 ~ 8.0, 其厌氧区和缺氧区溶解氧控制在 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内, 好氧区为 $2 \sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 有机负荷(以 COD/MLSS 计)为 $0.3 \sim 0.4 \text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 进水、硝化液回流和污泥回流流量由蠕动泵控制, 硝化液回流比 200%, 污泥回流比 100%. 水力停留时间(HRT)为 9 h, 污泥龄(SRT)为 20 ~ 30 d.

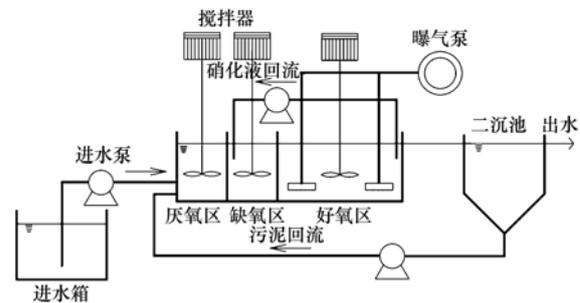


图 1 反应器装置示意

Fig. 1 Schematic of the experiment apparatus

1.2 实验材料

本实验所使用的活性污泥采自西安市第四污水处理厂的好氧池. 进水采用人工模拟生活污水, 由自来水配制. 其碳源主要由表 1 中物质提供, 不同阶段下组成比例不同, 其他成分在每个阶段均相同. 氮源和磷源: 尿素, $31.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NH_4Cl , $22.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; KH_2PO_4 , $17.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{K}_2\text{HPO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $29.42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 矿物质: $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $142 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; CaCl_2 , $41.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NaHCO_3 , $27.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 微量元素: KI , $60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; H_3BO_3 , $300 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$, $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $49.45 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $105.34 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $702.99 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $379.78 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 进水 COD 为 $400 \sim 450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总氮(TN)为 $30 \sim 35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总磷(TP)为 $8 \sim 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 1 进水有机物中碳源组成

Table 1 Carbon source composition of the organic influent

碳源	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
	阶段 I (0 ~ 48 d)	阶段 II (48 ~ 100 d)	阶段 III (100 ~ 160 d)
CH_3COONa	192.69	312.67	79.37
土豆淀粉	67.04	0	122
蛋白胨	17.41	17.41	17.41
全脂奶粉	96.86	96.86	96.86
酵母膏	52.24	52.24	52.24

1.3 分析方法

COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、TN、污泥浓

度(mixed liquid suspended solids, MLSS)以及污泥体积指数(sludge volume index, SVI)均按照标准方

法^[13]进行测定. pH 采用 pH5-3E 型酸度计测定. 溶解氧(DO)采用 HQ40d 型溶氧仪测定. 采用尼康 50i 显微镜观察活性污泥形态. 丝状菌丰度(FI)根据 Jenkins 等^[14]所提出的方法进行鉴定. EPS 采用超声-阳离子树脂交换法提取^[8], 多糖采用蒽酮比色法测定, 蛋白质采用福林酚比色法测定. 聚磷颗粒采用 4', 6-二脒基-2-苯基吡啶 (DAPI) 染色法^[15], 其中, 聚磷颗粒呈黄色, 细菌呈蓝白色.

批式实验:待反应器运行稳定后, 取好氧池末端活性污泥 1 L 于烧杯中, 反复淘洗 3 次, 以去除活性污泥中残留有机质, 加入营养物质 (COD:400 mg·L⁻¹; TN:30 mg·L⁻¹; TP:10 mg·L⁻¹), 定容至 1 L, 运行 1 个周期 (厌氧 2 h、缺氧 2 h、好氧 5 h). 其 pH 值为 7.0~8.0, 厌氧段和缺氧段 DO 控制在 0.2 mg·L⁻¹以下, 好氧段 DO 为 2~3 mg·L⁻¹. 反应开始后定时取样, 样品经过预处理之后, 分别测定氨氮、硝氮、磷酸盐和 PHA 含量的变化. PHA 采用气相色谱法 (Agilent 6890N 型, FID 检测器, HP-5 型色谱柱) 进行测定^[16].

采用高通量测序技术对污泥样品中菌群进行测定. 首先参照 OMEGA 试剂盒 E. Z. N. A TM Mag-Bind Soil DNA Kit 的使用说明提取 DNA, 利用细菌 V3~V4 区通用引物 341F (CCCTACACGACGCTCTTCCGATCTGCCTACGGGNGGCWGCAG) 和 805R (GACTGGAGTTCCTTGGCACCCGAGAATTCCAGACTACHVGGTATCTAATCC) 对合格的 DNA 样品进行 PCR 扩增. 之后采用 Illumina MiSeq 测序平台对采集的样品进行测序. 4 个污泥样品取自反应器运行的第 0、30、80 和 140 d, 分别代表接种污泥和 3 个阶段稳定期污泥样品. 取样位置均为反应器好氧池末端.

运用 SPSS 软件分析污泥沉降性能与 EPS 之间的关系. 使用 Canoco 软件进行多元直接梯度分析, 以解析活性污泥中菌群结构与理化因子之间的关系, 进而评估理化因子对菌群的影响.

2 结果与分析

2.1 污泥沉降性能的变化

在进水 COD 不变的条件下, 改变进水混合型有机物比例, 以考察对污泥沉降性能的长期影响. 图 2 为不同有机物进水下系统 SVI 和 MLSS 随时间的变化情况. 图 3 为污泥形态特征. 图 4 为丝状菌染色结果.

接种污泥如图 3(a) 所示, 其污泥絮体细碎, 呈分散状分布, 菌体周围存在较短的丝状菌, SVI 值为 160 mL·g⁻¹, 处于微膨胀状态, FI 值为 2, 优势

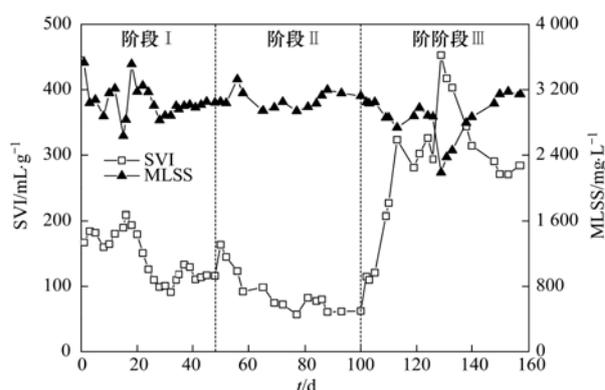


图 2 不同有机物进水下 SVI 和 MLSS 的变化

Fig. 2 Variations of SVI and MLSS for influence with different organic compositions

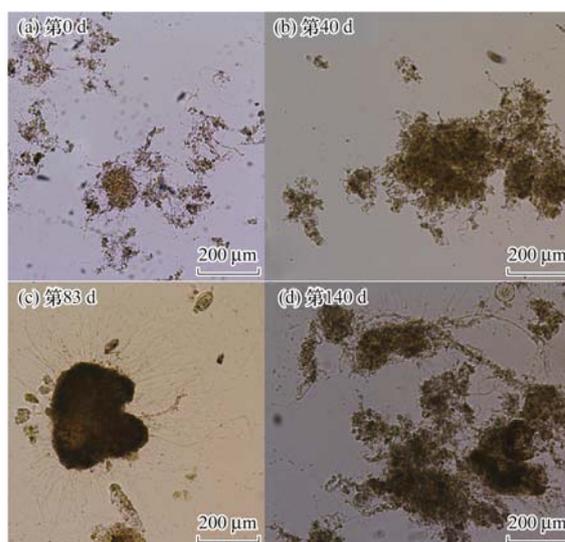


图 3 不同有机物进水下活性污泥形态

Fig. 3 Morphology of sludge fed with influence with different organic compositions

丝状菌为 Type 0092 和 *H. hydrossis*, 均是活性污泥法污水处理厂中常见的丝状菌^[17].

在阶段 I, 进水以溶解态有机物为主, 在 1~16 d, 污泥沉降性出现短暂的恶化现象, SVI 值为 220 mL·g⁻¹, 运行至第 32 d 时, 污泥沉降性得到明显地恢复, 并稳定在 120 mL·g⁻¹ 左右, FI 值为 2, 优势丝状菌为 *Thiothrix*、Type 0092 和 *N. limicola* I. 由图 3(b) 可以看出菌胶团密实程度逐渐增加, 只有少数丝状菌存在于菌胶团周围, 其中 Type 0092 数量有所减少, *H. hydrossis* 消失, 且出现少量的 *Thiothrix* 和 *N. limicola* I, 污泥沉降性逐步改善. 这主要是由于在该有机物比例条件下, 菌胶团菌和丝状菌可以达到稳定平衡生长状态, 既不会造成丝状膨胀, 又能促进菌胶团菌优势生长, 提升污泥密实度, 最终表现出良好的沉降性能.

在阶段 II, 系统进水全部为溶解态有机物, 最终 SVI 值稳定至 70 mL·g⁻¹ 左右, FI 值为 3, Type

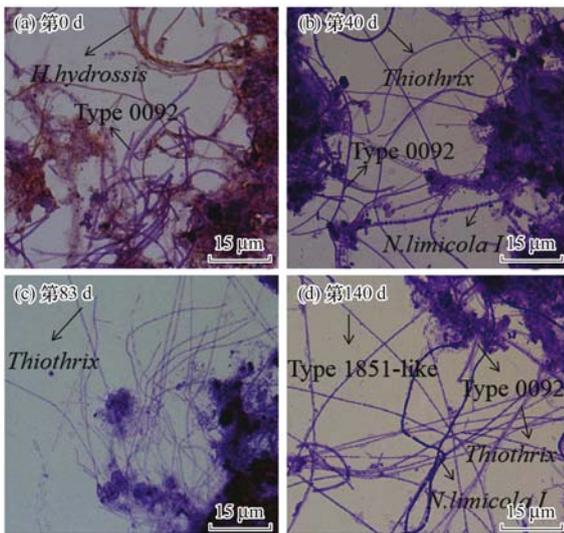


图 4 不同有机物进水下丝状菌染色结果

Fig. 4 Staining results of filamentous bacteria fed with influence with different organic compositions

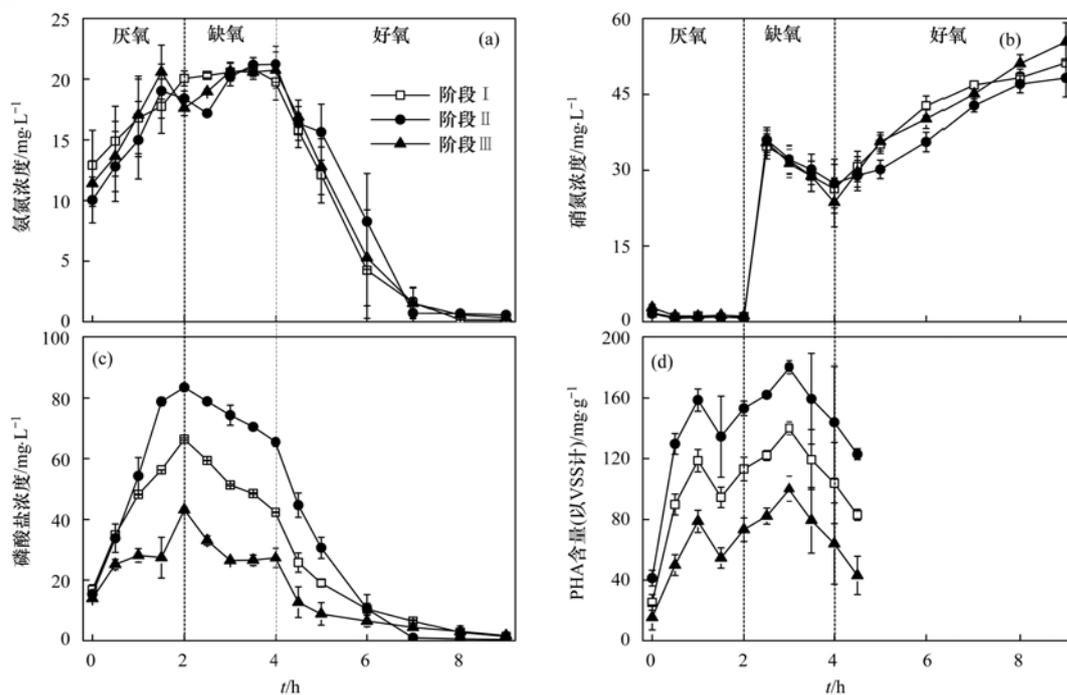
0092 和 *N. limicola* I 完全消失, 其优势丝状菌为 *Thiothrix*. 较阶段 I 相比, 菌胶团体积更大且更密实, 粒径达 200 μm 左右, 沉降性能更好. 众多研究者认为乙酸钠易引起污泥膨胀^[9], 但在 AAO 系统中, 乙酸钠的存在确实会促进 *Thiothrix* 的大量生长, 同时也会促使菌胶团密实度增加, 使污泥沉降性能进一步改善.

在阶段 III, 系统进水以颗粒态有机物为主, 在此阶段前期, SVI 值迅速上升到 450 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$. 这是由于有机物的改变导致系统污泥存在短暂的驯化

期, 当微生物适应新的进水条件后, SVI 值逐渐降低并稳定至 280 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, FI 值为 5. 此时 Type 0092 和 *N. limicola* I 再次出现, *Thiothrix* 数量降低, 出现大量的 Type 1851-like, 表明 Type 1851-like、Type 0092 和 *N. limicola* I 均易在颗粒态有机物中滋生, 而 *Thiothrix* 易在溶解态有机物中生长. 从图 3(d) 中可以看出丝状菌从污泥絮体内部延伸至外围, 且絮体结构较为松散, 丝状菌之间相互缠绕, 污泥沉降性能恶化. 根据 Casey 等^[11]的 NO 理论可知, 当颗粒态物质占主导时, 只有通过水解作用分解为小分子之后才能被微生物利用, 缓慢的有机物降解速率使得菌胶团菌的抑制作用不能立即解除, 丝状菌处于优势地位, 迅速增殖, 造成严重的丝状膨胀. 该结论与 Chen 等^[5]的研究结果一致, 在脱氮系统中, 当颗粒态有机物由缺氧区进入好氧区后, 由于缓慢的有机物降解速率导致对菌胶团菌的 NO 抑制作用不能迅速解除, 而使丝状菌处于优势地位, 迅速增殖.

2.2 典型周期下污染物去除效果和胞内聚合物的变化规律

批式实验结果如图 5 所示. DAPI 染色结果如图 6 所示. 从图 5 中可以看出氨氮和磷酸盐的去除率均在 95% 以上, 在缺氧阶段会出现少量磷酸盐吸收情况. 其中阶段 II 的 PHA 贮存量最高, 其次为阶段 I 和 III. 从图 6 中可以看出, 阶段 II 中菌胶团内聚磷颗粒明显多于阶段 I 和 III. 这主要是由于阶段 II 中进水全部为溶解态有机物, 有机物降解速率



由于 PHA 在好氧阶段浓度极低, 因此在好氧阶段后期未检测到 PHA, 图(d)中只显示 0~4.5 h 内 PHA 浓度的变化

图 5 典型周期下污染物去除效果和胞内聚合物的变化

Fig. 5 Variations in the pollutant-removal effect and intracellular polymeric substances under typical experimental cycles

快, 浓度梯度最高, 菌胶团菌能迅速利用大部分有机物进行增殖并将大量有机物以 PHA 的形式储存起来^[1]. 而在阶段 I 和 III 中由于淀粉水解速率受限, 没有充足的碳源可供微生物利用, 并且丝状菌的贮存能力差, 因此 PHA 的贮存量较低. PHA 是一种由膜包裹的颗粒态物质, 当 PHA 贮存量较大

时, 菌胶团内部的聚磷颗粒越多, 污泥絮体较密实, 这也是阶段 II 污泥沉降性能最好的重要原因. 一般认为菌胶团菌贮存 PHA 的能力远高于丝状菌^[1], 因此可以通过系统内 PHA 的贮存量反映菌胶团菌和丝状菌的优势生长情况, 即 PHA 含量越高, 菌胶团菌越占优势, 污泥沉降性能越好.

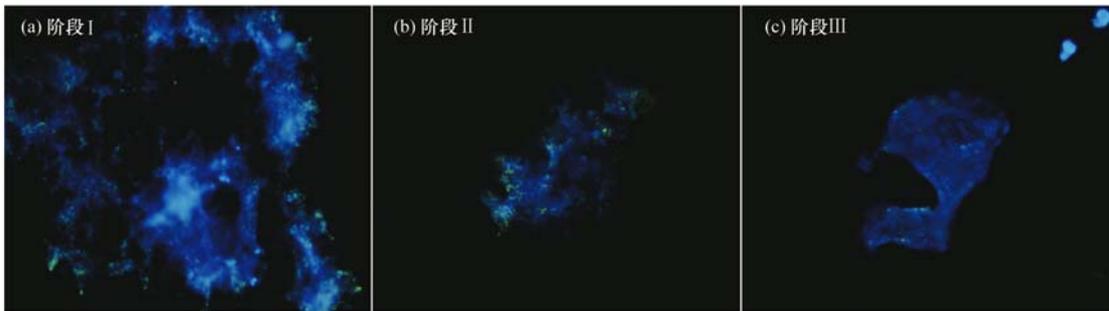


图 6 不同有机物进水下聚磷颗粒染色结果

Fig. 6 Results of phosphorus particle dyeing fed with influence with different organic compositions

2.3 EPS 的变化规律分析

EPS 主要由多糖 (PS) 和蛋白质 (PN) 组成, 其中 PS 带负电荷、PN 带正电荷, 两者共同决定 EPS 的 Zeta 电位^[8]. 图 7 为在不同有机物进水下 EPS 中各组分及 Zeta 电位变化情况, 从中可以看出不同阶段下 PS 和 PN 含量差异较大, 污泥沉降性能与 LB-EPS 中 PS、PN 和 Zeta 电位均呈显著负相关 ($r = -0.668, P < 0.05$; $r = -0.818, P < 0.01$; $r = -0.850, P < 0.01$), 而与紧密型 EPS (TB-EPS) 之间相关性较弱. 这是由于 TB 位于细胞内侧, 与细胞表面紧密结合, 对活性污泥沉降性能影响甚微. 而 LB 位于 TB 的外侧, 对活性污泥表面特性影响较大^[8]. 阶段 I ~ II, LB-EPS 中 PS 含量增加, 污泥沉降性能变好. 运行至阶段 III, LB-EPS 中 PS 含量减少, 污泥沉降性能随之变差, 这是由于 PS 中带负电的官能团与二价阳离子之间存在架桥作用, 使微生物容易聚集在一起, 形成污泥絮体, 从而改善

污泥沉降性能^[18]. 同时带正电荷的 PN 可中和羟基与磷酸基团等所带的负电荷, 进而压缩双电层结构, 降低表面电位, 促进絮体的絮凝和沉降^[19]. Li 等^[20]指出 Zeta 电位是影响污泥絮凝和沉降的关键因素, 在不同有机物培养条件下, EPS 和 Zeta 电位差异很大, 从而对污泥沉降性能产生不同的影响. 根据 DLVO 理论, 溶液中多价反离子的存在, 减少了细菌与絮体之间的静电排斥力, 进而更容易互相接触和黏附^[21].

2.4 微生物菌群结构

2.4.1 微生物属水平上的变化

为了进一步验证有机物组成与污泥沉降性能之间的关系, 将污泥样品进行菌群结构分析. 污泥中共探查到的细菌共 414 个属, 相对丰度小于 1% 的细菌属归为 others, 相对丰度变化见图 8. 随着系统的运行, 相比于接种污泥, 反应器内菌群发生了较大的变化, 比如 *Thiothrix* (丝硫菌属) 在接种污泥和阶段 I ~ III 的相对丰度分别为 0.09%、6.58%、10.9% 和 6.49%. 该菌属属于典型的丝状细菌属 (γ -变形菌亚门), 通常生长在进水含有大量小分子碳水化合物或还原性硫化物的环境中, 具有良好的脱氮除硫功能^[12]. 从相对丰度变化可知, 阶段 II 中相对丰度最大, 但是其沉降性能最好, 这是由于阶段 II 中菌胶团结构密实, 污泥密度大, 抵消了部分丝状菌对沉降性的不利影响. 阶段 I ~ III, *Trichococcus* (明串珠菌属) 相对丰度分别为 2.27%、0.54% 和 1.33%, 典型的丝状细菌, 为系统中的 *N. limicola* I^[17], 其相对丰度随着进水中颗粒态有机物含量的升高而升高, 表明颗粒态有机物会促进该菌的生长, 造成污泥膨胀. *Chryseolinea* 属于拟杆

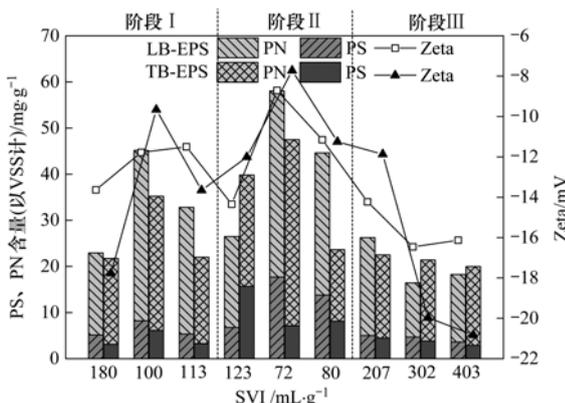


图 7 不同有机物进水下 EPS 中各组分及 Zeta 电位变化

Fig. 7 Variations of EPS and Zeta potential fed with influence with different organic compositions

菌门, 阶段 II 的相对丰度明显高于阶段 I 和 III, 该菌属为菌胶团菌, 与颗粒污泥的形成息息相关. Xu 等^[22] 的研究表明, *Chryseolinea* 是维持污泥颗粒化状态的主要细菌属, 促进了阶段 II 中污泥絮体密实度的增加, 使污泥沉降性能得到进一步提高.

Dokdonella、*Comamonas* 和 *Dechloromonas* 均属于变形菌门, 在阶段 II 中相对丰度最高且分别为

7.52%、2.01% 和 0.24%, 有研究表明 *Dokdonella* 和 *Comamonas* 常常存在于活性污泥系统中, 属于反硝化菌属^[23], 这也正是阶段 II 中 *Azospira* (固氮螺旋菌属) 相对丰度最低但脱氮效率并没有降低的主要原因, *Dechloromonas* 为典型的反硝化除磷菌^[24], 该菌属的存在解释了 2.2 节中缺氧阶段磷酸盐浓度下降的现象.

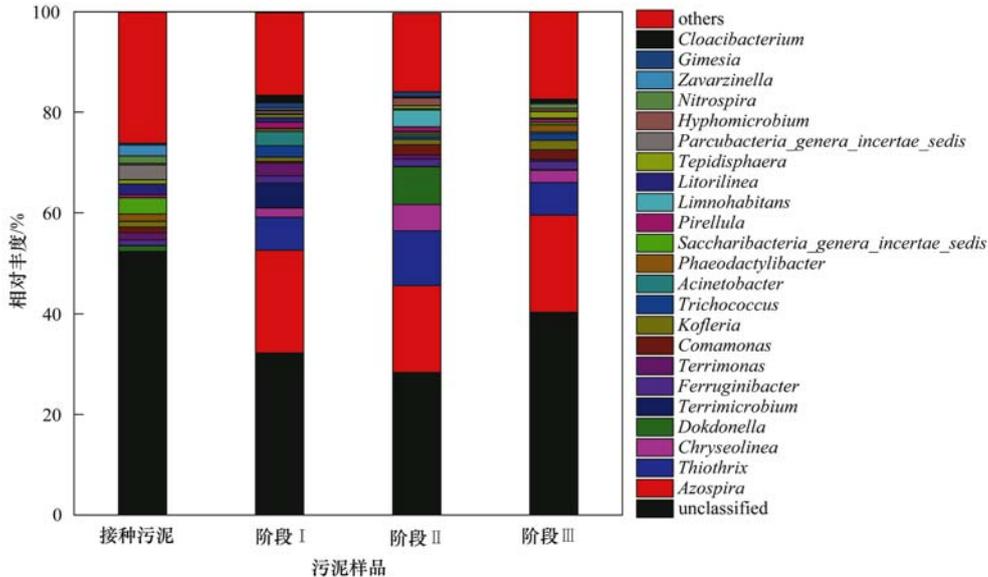


图 8 污泥样品属水平微生物群落结构分布

Fig. 8 Microbial communities and the distribution of sludge samples at the genus level

2.4.2 微生物菌群与理化因子相关性分析

多元直接梯度分析用于评估微生物菌群结构和理化因子之间的相关关系(图 9). 箭头代表理化因

子在平面上的相对位置, 箭头越长, 说明其作用越大; 样点-中心连线与箭头的夹角余弦值的绝对值大小可以判断相关性大小情况, 余弦值正负分别表示正、负相关性; 样点对箭头的连线做投影, 投影点距离箭头越近, 说明该理化因子对样点的影响越大.

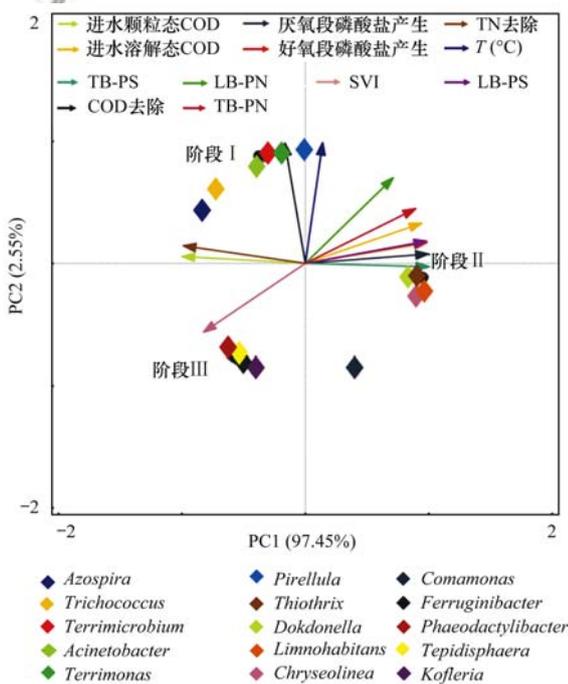


图 9 微生物菌群与理化因子的相关关系分析

Fig. 9 Redundancy Analysis of the relationship between microbial communities and different physical and chemical parameters

从分析结果可以看出, *Thiothrix*、*Dokdonella* 和 *Chryseolinea* 与阶段 II 相关性最大, 表明溶解态有机物会促进该菌属的生长. *Dokdonella* 可以利用溶解态有机物进行反硝化, 提高系统的脱氮效率^[25]. 此外 *Chryseolinea* 还与 LB-PS、TB-PS 和磷酸盐的释放、消耗量相关性较为明显, 表明该菌属对释磷和吸磷过程起到至关重要的作用, 同时该菌属属于多糖菌属, 可促进 PS 的分泌, 有利于形成颗粒污泥^[21], 进一步提高污泥沉降性能. *Ferruginibacter*、*Tepidisphaera*、*Phaeodactylibacter* 和 *Trichococcus* 与阶段 III 相关性最大, 表明颗粒态有机物会促进该菌属的生长. 其中 *Ferruginibacter* 是一种絮凝细菌, 以颗粒态有机物作为电子供体进行降解, 能够参与细胞合成和 EPS 的分泌^[26, 27], 对菌胶团菌的生长起到积极促进的作用. *Tepidisphaera* 和 *Phaeodactylibacter* 与碳氢化合物和含氮有机物的降解有关^[25, 28].

3 讨论

Eynde 等^[29]在 SBR 中研究了葡萄糖、乙酸盐、淀粉和酪蛋白对污泥沉降性能的影响,发现葡萄糖和乙酸钠容易引发污泥膨胀,而淀粉和酪蛋白不易引发污泥膨胀. 同样,杨雄等^[30]在 SBR 中通过 FISH 染色以及活性污泥中胞内、胞外聚合物的变化,分析了颗粒态淀粉、溶解态淀粉和葡萄糖这 3 种有机物对污泥沉降性能的影响,发现采用瞬时进水时,系统污泥沉降性能均良好,当切换成长时进水后,溶解态有机物容易造成膨胀,而颗粒态有机物不易造成严重的丝状膨胀现象. 而本实验结果与此恰恰相反,当进水中全部为溶解态有机物时,污泥沉降性能最佳,而当进水中含有大量颗粒态有机物时,污泥沉降性能最差. 这主要是由于在 SBR 中,采用瞬时进水时,底物浓度梯度较大,有利于菌胶团菌的生长,抑制丝状菌的生长,从而导致良好的沉降性能^[31]. 而在 AAO 反应器中,不存在底物浓度梯度,进水中乙酸钠含量的增加虽然会造成丝状菌的大量生长,但是乙酸钠分子量较小,扩散效果好,且伴随着聚磷菌大量生长,污泥絮体密实度增加,最终表现出良好的沉降性能. 而当进水中含有大量的颗粒态有机物时,由于水解速率受限,营养物质缺乏,一方面造成脱氮效率降低(82.55%→86.35%→78.09%),丝状菌大量生长^[11],另一方面会造成菌胶团菌结构较松散^[32],因此污泥沉降性能较差.

Chen 等^[6]采用复杂基质作为进水,研究了 A/O 除磷系统中温度(15、20 和 25℃)对污泥沉降性的影响. 结果发现,在不同温度条件下,污泥沉降性能主要受丝状菌含量、污泥密度和污泥含磷率的共同影响. 在 25℃ 时,污泥沉降性最好. 而温度过高或过低均不利于微生物的生长繁殖, Xie 等^[33]发现,在冬季低温环境下,实际营养盐去除工艺中易导致 *M. parvicella* 的生长繁殖并引发污泥沉降性能恶化. 控制好温度是减少污泥膨胀问题的关键一步,在本实验中始终控制水温 25~30℃,因此系统并未出现 *M. parvicella*.

马智博等^[34]研究了低溶解氧对污泥沉降性的影响. 结果表明,当污泥长期处于低氧条件时,污泥絮体结构松散,出水水质和沉降性能恶化,发生严重的丝状膨胀现象.

彭赵旭等^[35]研究了有机负荷冲击对污泥沉降性能的影响,发现低溶氧协同高负荷条件下,丝状菌大量增殖,污泥黏性增加,密度下降引发沉降性能恶化. 而在低负荷条件下,污泥絮体结构密实,

沉降性能良好. 在本实验中,将溶解氧和有机负荷控制在合理的范围内,确保不会对污泥沉降性能产生重要影响.

污泥膨胀的成因复杂多样,其中有机物对污泥沉降性能的影响至关重要. 在实际污水处理厂中由于进水有机物复杂多样,仅单独探讨单一型有机物对污泥沉降性能的影响是远远不够的. 此外,污泥沉降性能也与微生物菌群结构和胞内及胞外聚合物的变化密切相关^[8]. 目前的研究认为活性污泥絮体的形成是一种生物过程,胞内及胞外聚合物在此过程中同样发挥重要作用. 不同有机物组成比例对微生物菌群结构和胞内及胞外聚合物的影响差异较大,因此讨论混合型有机物对污泥沉降性能的影响至关重要.

本研究表明,在不同进水有机物组成的系统中,菌群结构的改变是影响污泥沉降性能的主要因素,同时胞内和胞外聚合物的变化对污泥沉降性能的改变有一定的辅助作用. 因此,以活性污泥为主体的运行工艺,污泥沉降性能与菌群结构及胞内和胞外聚合物的变化息息相关.

4 结论

(1) 在 AAO 系统中,当进水中全部为溶解态有机物时,胞内贮存的 PHA 含量最高,活性污泥菌胶团结构最密实,污泥沉降性能最好.

(2) 污泥沉降性能与 LB-EPS 中 PS、PN 和 Zeta 电位均呈显著负相关,而与 TB-EPS 之间的相关性较弱.

(3) *Thiothrix*、*Trichococcus* 和 *Chryseolinea* 这 3 种菌属相对丰度的变化与污泥沉降性能密切相关.

(4) 系统优势菌群丰度受进水有机物组成影响. 溶解态有机物促进 *Thiothrix* 和 *Chryseolinea* 的生长;颗粒态有机物促进 *Trichococcus* 的生长. 菌群结构的改变不仅影响了污泥沉降性能,而且影响了胞内、胞外聚合物的变化,进而加剧了污泥沉降性能改善或恶化的进程.

参考文献:

- [1] Martins A M P, Pagilla K, Heijnen J J, et al. Filamentous bulking sludge—a critical review[J]. *Water Research*, 2004, **38** (4): 793-817.
- [2] Mielczarek A T, Kragelund C, Eriksen P S, et al. Population dynamics of filamentous bacteria in Danish wastewater treatment plants with nutrient removal[J]. *Water Research*, 2012, **46** (12): 3781-3795.
- [3] Fan N S, Wang R F, Qi R, et al. Control strategy for filamentous sludge bulking: Bench-scale test and full-scale application[J]. *Chemosphere*, 2018, **210**: 709-716.
- [4] Guo J H, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Filamentous and non-filamentous bulking of activated sludge encountered under

- nutrients limitation or deficiency conditions [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, **255**: 453-461.
- [5] Chen X, Yuan L J, Lv J H, *et al.* Influence of anoxic to aerobic volume ratio on sludge settleability and bacterial community structure in a denitrifying-nitrifying activated sludge system[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, **56**(7): 1863-1876.
- [6] Chen X, Yuan L J, Lv J H, *et al.* Influence of temperature on sludge settleability and bacterial community structure in enhanced biological phosphorus removal systems [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, **57**(21): 9900-9913.
- [7] Gulez G, De Los Reyes III F L. Multiple approaches to assess filamentous bacterial growth in activated sludge under different carbon source conditions [J]. Journal of Applied Microbiology, 2009, **106**(2): 682-691.
- [8] 温丹丹, 袁林江, 陈希, 等. 3 种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响 [J]. 环境科学, 2018, **10**(39): 4644-4652.
- Wen D D, Yuan L J, Chen X, *et al.* Effect of microbial community structure and metabolites on sludge settling ability under three different switching condition processes [J]. Environmental Science, 2018, **10**(39): 4644-4652.
- [9] 杨雄, 霍明昕, 王淑莹, 等. 碳源类型对污泥沉降性能及丝状菌生长的影响 [J]. 化工学报, 2011, **62**(12): 3471-3477.
- Yang X, Huo M X, Wang S Y, *et al.* Effects of carbon sources on sludge settling and filamentous bacteria growth [J]. CIESC Journal, 2011, **62**(12): 3471-3477.
- [10] Martins A M P, Karahan Ö, Van Loosdrecht M C M. Effect of polymeric substrate on sludge settleability [J]. Water Research, 2011, **45**(1): 263-273.
- [11] Casey T G, Wentzel M C, Ekama G A. Filamentous organism bulking in nutrient removal activated sludge systems. Paper 11: A biochemical/microbiological model for proliferation of anoxic-aerobic (AA) filamentous organisms [J]. Water SA, 1999, **25**(4): 443-451.
- [12] Wang P, Yu Z S, Qi R, *et al.* Detailed comparison of bacterial communities during seasonal sludge bulking in a municipal wastewater treatment plant [J]. Water Research, 2016, **105**: 157-166.
- [13] 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. 105-107.
- [14] Jenkins D, Richard M G, Daigger G T. Manual on the causes and control of activated sludge bulking, Foaming and other solids separation problems (3rd ed.) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2004. 40-42.
- [15] Kulakova A N, Hobbs D, Smithen M, *et al.* Direct quantification of inorganic polyphosphate in microbial cells using 4'-6-diamidino-2-phenylindole (DAPI) [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(18): 7799-7803.
- [16] Fauzi A H M, Chua A S M, Yoon L W, *et al.* Enrichment of PHA-accumulators for sustainable PHA production from crude glycerol [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, **122**: 200-208.
- [17] 彭永臻, 郭建华. 活性污泥膨胀机理、成因及控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. 1-38.
- [18] Ding Z J, Bourven I, Guibaud G, *et al.* Role of extracellular polymeric substances (EPS) production in bioaggregation: application to wastewater treatment [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, **99**(23): 9883-9905.
- [19] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review [J]. Biotechnology Advances, 2010, **28**(6): 882-894.
- [20] Li H, Zhang J F, Shen L, *et al.* Production of polyhydroxyalkanoates by activated sludge: Correlation with extracellular polymeric substances and characteristics of activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, **361**: 219-226.
- [21] Grasso D, Subramaniam K, Butkus M, *et al.* A review of non-DLVO interactions in environmental colloidal systems [J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2002, **1**(1): 17-38.
- [22] Xu J, He J G, Wang M F, *et al.* Cultivation and stable operation of aerobic granular sludge at low temperature by sieving out the batt-like sludge [J]. Chemosphere, 2018, **211**: 1219-1227.
- [23] Li Y, Zhang J, Chen Q, *et al.* *Dokdonella kunshanensis* sp. nov., isolated from activated sludge, and emended description of the genus *Dokdonella* [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2013, **63**: 1519-1523.
- [24] Zhang T, Shao M F, Ye L. 454 pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants [J]. The ISME Journal, 2012, **6**(6): 1137-1147.
- [25] Kim B C, Kim S, Shin T, *et al.* Comparison of the bacterial communities in anaerobic, anoxic, and oxic chambers of a pilot A₂O process using pyrosequencing analysis [J]. Current Microbiology, 2013, **66**(6): 555-565.
- [26] Liu T, Mao Y J, Shi Y P, *et al.* Start-up and bacterial community compositions of partial nitrification in moving bed biofilm reactor [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, **101**(6): 2563-2574.
- [27] An W X, Guo F, Song Y L, *et al.* Comparative genomics analyses on EPS biosynthesis genes required for floc formation of *Zoogloea resiniphila* and other activated sludge bacteria [J]. Water Research, 2016, **102**: 494-504.
- [28] Chen Z R, Lei X Q, Lai Q L, *et al.* *Phaeodactylibacter xiamenensis* gen. nov., sp. nov., a member of the family *Saprospiraceae* isolated from the marine alga *Phaeodactylum tricorutum* [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2014, **64**: 3496-3502.
- [29] Van den Eynde E, Geerts J, Maes B, *et al.* Influence of the feeding pattern on the glucose metabolism of *Arthrobacter* sp. and *Sphaerotilus natans*, growing in chemostat culture, simulating activated sludge bulking [J]. European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology, 1983, **17**(1): 35-43.
- [30] 杨雄, 彭永臻, 宋姬晨, 等. 进水中碳水化合物分子大小对污泥沉降性能的影响 [J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 448-456.
- Yang X, Peng Y Z, Song J C, *et al.* Effect of influent carbohydrates with different molecule-size on sludge settleability [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(2): 448-456.
- [31] Chudoba J, Grau P, Ottová V. Control of activated-sludge filamentous bulking-II. Selection of microorganisms by means of a selector [J]. Water Research, 1973, **7**(10): 1389-1398, IN1-IN2, 1399-1406.
- [32] Wang B B, Zhang L, Peng D C, *et al.* Extended filaments of bulking sludge sink in the floc layer with particulate substrate [J]. Chemosphere, 2013, **93**(11): 2725-2731.
- [33] Xie B, Dai X C, Xu Y T. Cause and pre-alarm control of bulking and foaming by *Microthrix parvicella*—a case study in triple oxidation ditch at a wastewater treatment plant [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **143**(1-2): 184-191.
- [34] 马智博, 李志华, 杨成建, 等. 低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析 [J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3801-3806.

- Ma Z B, Li Z H, Yang C J, *et al.* Analysis of respirogram characteristics of filamentous bulking caused by low dissolved oxygen[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3801-3806.
- [35] 彭赵旭, 彭志远, 田林青, 等. 有机负荷冲击对缺氧-好氧活性污泥系统的影响[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学

版), 2017, **33**(4): 411-414, 431.

Peng Z X, Peng Z Y, Tian L Q, *et al.* Effect of impulse organic loading rate on anoxic-oxic operated activated sludge system[J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2017, **33**(4): 411-414, 431.

欢迎订阅 2019 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2019 年全年 12 期。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)