

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值	王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)
2015年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征	张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)
北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用	邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)
基于实测的建筑类涂料挥发性有机物 (VOCs) 含量水平及组分特征	高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)
2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析	王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)
北京市大气环境 PM _{2.5} 和 PM ₁ 及其碳质组分季节变化特征及来源分析	樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)
南京春季北郊地区大气 PM _{2.5} 中主要化学组分及碳同位素特征	周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)
热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物	马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)
杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系	王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)
基于远程通讯技术的混动公交车 SCR 系统运行及 NO _x 排放特征	杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)
基于环境风险排序的流域优先污染物筛选	李奇峰, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)
重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)
黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征	宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)
脱甲河水系 N ₂ O 关键产生过程及氮素来源探讨	赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)
生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响	王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)
黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复	史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)
城市黑臭水体的吸收特性分析	丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)
岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化	范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)
防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征	林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)
基于 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的农业区地下河硝酸盐污染来源	盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)
垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征	彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)
铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为	梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)
基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制	张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)
AAO 工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性	李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)
抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除	李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)
磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧铁氨氧化菌对废水氨氮去除的影响	刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)
海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能	杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)
低温下 A ² /O-BAF 反硝化除磷脱氮特性	黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)
O ₃ -BAC 深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析	张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)
基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析	吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)
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	温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)
硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制	张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)
包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析	杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)
中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析	尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)
典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价	马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)
秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响	黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)
不同肥料施用对设施蔬菜地 NH ₃ 挥发和 N ₂ O 排放的影响	山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)
施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响	田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)
长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响	王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)
典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征	陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)
凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制	陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)
天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果	刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)
水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响	万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)
窖水中微生物降解污染物的关键细菌	杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)
砷氧化菌对胡敏酸络合 As(III) 的氧化作用	李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)
海域高温油田 1 株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制	杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)
1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Zobellella</i> sp. B307 的分离及脱氮特性	白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岍然 (4793)
1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17 β -雌二醇的降解特性	吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)
氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响	李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)
林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析	任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)
DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤	平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)
生活垃圾焚烧灰灰矿物学特性及重金属分布	李建陶, 曾鸣 (4834)
《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)	

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

温丹丹¹, 袁林江^{1*}, 陈希², 王洋¹, 申童童¹, 刘小博¹

(1. 西安建筑科技大学, 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. 西安工程大学环境与化学工程学院, 西安 710048)

摘要: 均以乙酸钠为碳源, 考察了 AAO 脱氮除磷 (I 阶段)、AO 脱氮 (II 阶段)、好氧除碳 (III 阶段) 这 3 种工艺下污泥沉降性能的变化, 追踪了污泥中微生物群落结构的演替、监测了微生物代谢产物的含量及组分变化, 分析运行方式对污泥沉降性能变化的影响。结果表明, I 阶段沉降性能最佳, 其次为 III、II 阶段。运行条件的不同, 系统优势菌及菌群结构都发生了显著变化, 其中 *Thiothrix* 的相对数量是影响污泥沉降性能变化的主导细菌。在接种污泥和 I 阶段 *Thiothrix* 的丰度仅为 0.08% 和 1.51%, II 阶段上升至 9.41%, III 阶段降至 4.29%。I 阶段的厌氧区对该菌的生长具有抑制作用, 但 II 阶段的缺氧区却刺激其优势生长。同时对比了 3 个系统中微生物种群多样性, I 阶段最高, 其次为 II、III 阶段。缺氧区和厌氧区的引入导致系统功能与环境的复杂度增加, 微生物群落多样性有所升高。胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 中各组分含量及三维荧光测定结果表明, 微生物群落结构变化对 EPS 的组分及含量具有显著影响, 进而导致污泥沉降性能改善或恶化的进程加剧, 污泥沉降性能与松散附着胞外聚合物 (loosely bound EPS, LB-EPS) 中蛋白质/多糖的比值呈正相关。

关键词: 生物处理; 污泥沉降性能; 菌群结构; 胞外聚合物; 荧光特性

中图分类号: X172; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4644-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201801253

Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes

WEN Dan-dan¹, YUAN Lin-jiang^{1*}, CHEN Xi², WANG Yang¹, SHEN Tong-tong¹, LIU Xiao-bo¹

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

Abstract: Using sodium acetate as the carbon source, sludge settling ability (settleability) was investigated under three processes: AAO nitrogen and phosphorus removal (process I), AO nitrification-denitrification (process II), and aerobic carbon removal (process III). The succession of microbial community structures in sludge was traced, the content and composition of microbial metabolites were monitored, and the effects of operational mode on sludge settleability were analyzed. The results showed that the settleability of process I was the best, followed by process III and II. Under the different operating conditions, the dominant bacteria and microbial community structure of the system changed significantly. The relative amount of *Thiothrix* was the dominant bacteria affecting the sludge settleability. The abundances of *Thiothrix* were only 0.08% and 1.51% with fresh sludge and in process I; this abundance increased to 9.41% in process II and decreased to 4.29% in process III. The anaerobic zone of process I had an inhibitory effect on the growth of the bacterium, while the anoxic zone of process II stimulated its dominant growth. At the same time, comparison showed that the microbial population diversity was highest in process I, followed by processes II and III. The introduction of anoxic and anaerobic zones led to the increase of system function and environmental complexity, and increased microbial community diversity. Analyses of extracellular polymeric substances (EPS) and fluorescence characteristics showed that the changes in microbial community structure had a significant effect on the composition and content of EPS, which aggravated the process of improving or deteriorating settleability. The sludge settleability was found to be positively correlated with the ratio of protein and polysaccharide in loosely bound EPS.

Key words: biological treatment; sludge settleability; microbial community structure; extracellular polymeric substances; fluorescence characteristics

目前, 活性污泥法已成为城市生活污水和工业废水处理的主流工艺, 良好的泥水分离是保证该系统高效稳定运行的重要前提^[1,2]。Chen 等^[3]在研究脱氮系统中缺氧区与好氧区体积比对污泥沉降性及菌群结构影响时, 利用 CA 分析发现污泥沉降性能

与菌群结构存在相关性。Wang 等^[4]研究城镇污水

收稿日期: 2018-01-28; 修订日期: 2018-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50878180)

作者简介: 温丹丹 (1992~), 女, 硕士, 主要研究方向为城市污水生物处理理论与技术, E-mail: 781224035@qq.com

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

处理厂污泥膨胀过程中微生物群落结构的变化时发现, 当污泥沉降性能发生改变时, 细菌群落从变形菌门转向放线菌门. 陆鑫等^[5]利用 16S rRNA 基因克隆文库技术分析城市污水处理厂低温条件污泥膨胀的生物学成因, 研究发现该现象与工艺中 *Haliscomenobacter* (束丝杆菌属) 和 *Trichococcus* (毛球菌属) 这两类膨胀菌的生长繁殖息息相关. 由此可见, 污泥沉降性能的变化与系统中优势菌群的演替密切相关. 同时也有研究表明, 胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 对活性污泥的表面电荷、絮凝作用、吸附性能及脱水特性等物化性质有着重要影响, 进而改变活性污泥的沉降性能^[6,7]. Liu 等^[8]的研究发现 EPS 含量的增加有利于改善污泥微生物间的“聚结”性能, 进而提高污泥的沉降性. 王浩宇等^[9]的研究表明, 随着 EPS 中蛋白质含量的增加, 污泥的表面电位逐渐降低, 有助于污泥之间的聚集过程. 针对这种以微生物为主体的活性污泥工艺, 菌群结构和代谢产物均是影响沉降性能的重要因素, 而之前的报道鲜见将两者结合, 综合分析影响污泥沉降性能的内在原因.

本研究连续运行了 AAO 脱氮除磷 (I 阶段)、AO 脱氮 (II 阶段) 和好氧除碳 (III 阶段) 3 种具有不同污染物去除功能的系统, 通过分析优势菌群演替规律及代谢产物的相关变化, 以期解释不同的运行方式下污泥沉降性能产生差异的原因.

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行方式

反应器有效容积为 9 L (图 1). 整个实验阶段, 系统的 pH 值控制在 6.5 ~ 8.5. 好氧区溶氧控制为 2 ~ 3 mg·L⁻¹. 有机负荷控制 (以 COD/SS 计) 在 0.30 ~ 0.35 kg·(kg·d)⁻¹. 反应器温度通过水浴保持在 20 ~ 25℃. MLSS 为 3 000 ~ 3 500 mg·L⁻¹. 回流污泥和进水的流量由蠕动泵控制, 污泥回流比为 75% ~ 100%, 进水流量为 24 L·d⁻¹, 水力停留时间为 9 h. 污泥龄通过每天从好氧池的末端排出剩余污泥来控制, I、II、III 阶段 SRT 分别为 12 ~ 14、18 ~ 20、8 ~ 10 d. 不同阶段反应器的运行方式通过移动格室内的挡板、回流及曝气装置等进行调整.

1.2 实验用水及接种污泥

反应器的进水采用模拟废水, 其中碳、氮和磷源分别为 CH₃COONa (COD 为 380 ~ 420 mg·L⁻¹)、NH₄Cl (TN 为 20 ~ 40 mg·L⁻¹) 和 KH₂PO₄ (TP 为 5 ~ 10 mg·L⁻¹). 矿物质和微量元素的组分为:

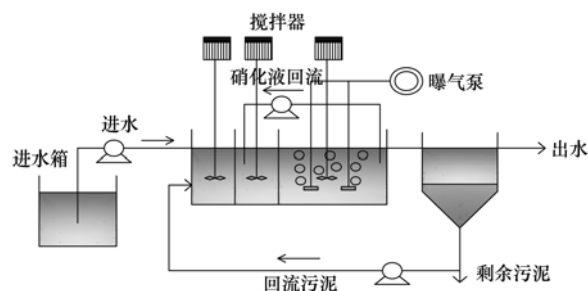


图 1 反应器装置示意

Fig. 1 Schematic of reactor unit

MgSO₄ · 7H₂O 44 mg·L⁻¹; CaCl₂ 26 mg·L⁻¹; NaHCO₃ 25 mg·L⁻¹; FeSO₄ · 7H₂O 10 mg·L⁻¹; KI 60 μg·L⁻¹; H₃BO₃ 60 μg·L⁻¹; MnSO₄ · H₂O 300 μg·L⁻¹; CoCl₂ · 6H₂O 49.45 μg·L⁻¹; (NH₄)₆Mo₇O₂₄ · 4H₂O 105.34 μg·L⁻¹; CuSO₄ · 5H₂O 702.99 μg·L⁻¹; ZnSO₄ · 7H₂O 379.78 μg·L⁻¹. 接种污泥取自西安市第四污水处理厂 (AAO 工艺) 曝气池.

1.3 检测项目与方法

污泥特性分析: MLSS 和 SVI 采用标准方法测定^[10]; 活性污泥形态及丝状菌镜检均采用尼康 50i 显微镜进行.

菌群结构: 采用细菌 16S rDNA 高通量测序技术分析微生物菌群结构. 首先参照 OMEGA 试剂盒 E. Z. N. A™ Mag-Bind Soil DNA Kit 的试剂盒使用说明提取 DNA, 利用细菌 V3-V4 区通用引物 341F (5'-CCTACGGGNGGCWGCAG) 和 805 (5'-GACTACHVGGGTATCTAATCC) 对提取的合格 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, 得到的原始数据采用 FASTQ 格式保存然后进一步分析处理, 对优质序列进行 OTU (operational taxonomic units) 的聚类 and 注释, 基于此结果进行多样性指数分析和群落结构的统计分析. 4 个污泥样品取自反应器运行的第 1、47、89 及 126 d, 分别代表接种污泥和 3 个阶段的稳定运行期污泥样. 取样位置均为反应器好氧池末端, 样品编号依次为 1 ~ 4.

胞外聚合物 (EPS): EPS 的提取采用超声-阳离子树脂交换法, 将其分为疏松型 EPS (loosely bound EPS, LB-EPS) 和紧密型 EPS (tightly bound EPS, TB-EPS). 具体方法: 于反应器的好氧池末端取 30 mL 的污泥混合物置于离心管中, 10 000 r·min⁻¹、4℃ 的条件下离心 5 min, 弃去上清液, 加入等体积的 PBS, 该步骤重复 3 次以去除污泥中的杂质. 放

入冰水中进行超声细胞分散(功率 5 W, 超声 3 s, 间隔 3 s, 工作 75 次). 之后 $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 4°C 的条件下离心 5 min, 抽滤的上清液即为 LB-EPS. 剩余的污泥中再次加入等体积的 PBS 摇匀置于锥形瓶中, 同时加入一定量的阳离子交换树脂(以 VSS 计, $75\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$), 放入恒温振荡器, $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 4°C 振荡 4 h. 随后将其转入离心管中, 4°C 下 $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 25 min, 将其上清液经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的滤膜过滤收集得 TB-EPS, 总 EPS 以两者之和计. 多糖和蛋白质分别采用蒽酮和福林酚比色法测定. 本实验中 9 个污泥样品分别取自系统运行的第 12、30、42、55、62、86、98、106 和 125 d, 分别代表 3 个阶段系统运行的初期、中期和末期.

2 结果与分析

2.1 反应器运行状况

图 2 为系统不同阶段 SVI 和 MLSS 的变化情况, 图 3 为活性污泥第 1、47、89、126 d 形态镜检.

接种污泥 SVI 约为 $150\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 絮体较小, 呈分散状分布, 菌体周围大量存在长度较短的丝状菌[图 3(a)]. 由图 2 看出, I 阶段(0~46 d)运行初期污泥沉降性能发生短暂恶化, 这是由于接种污泥采用模拟废水培养时, 水质条件的变化导致系统菌群产生波动, 丝状菌对环境变化的适应程度优于菌胶团^[11]. 随着系统持续运行, 菌胶团成团块状聚集[图 3(b)], 沉降性能逐渐改善, 最终 SVI 稳定在 $46\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右. 系统转入 II 阶段(46~90 d)后, 在 62 d 时系统 SVI 迅速升至 $168\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 污泥沉降性能逐渐变差, 最终稳定于 $198\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右. 此时污泥絮体结构松散且密实度下降, 少量丝状菌从菌胶团中呈束状突出生长, 菌丝为长直形[图 3(c)]. III 阶段(90~128 d)污泥沉降性能略有好转, 推流式反应器中沿程的基质浓度梯度有利于菌胶团的优势生长, 絮体之间的聚结状态致使部分丝状菌被包裹, 丝状菌的数量有所减少[图 3(d)], 第 106 d 时 SVI 为 $95\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$.

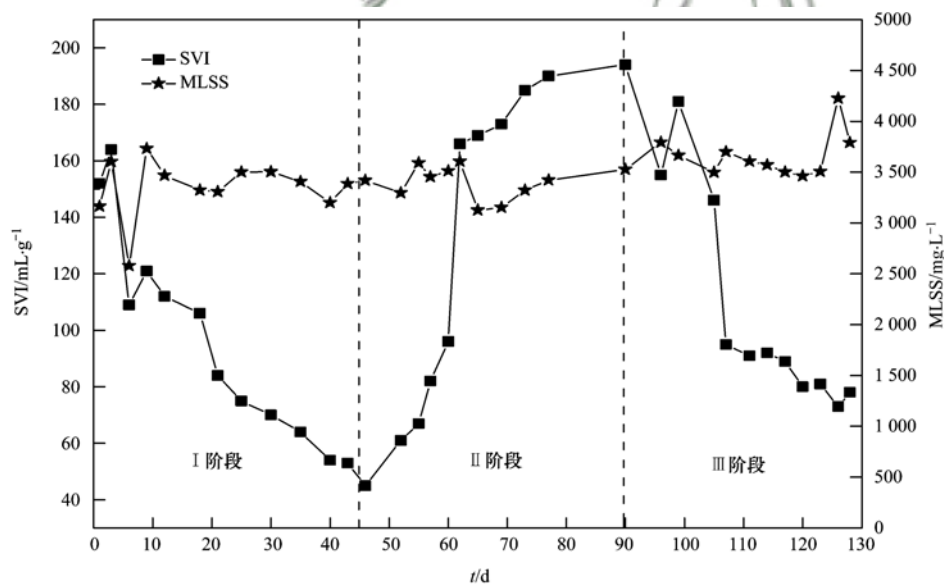


图 2 不同阶段污泥 MLSS 和 SVI 变化情况

Fig. 2 Variations of MLSS and SVI during different processes

2.2 微生物群落多样性分析

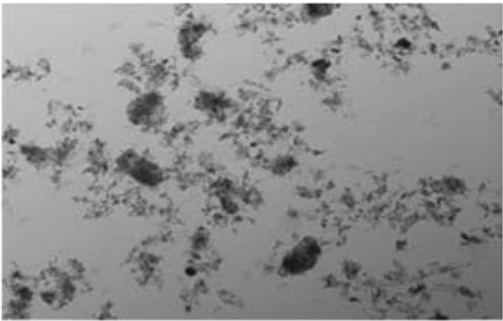
单样品的多样性分析(α 多样性)可以反映微生物群落的丰度和多样性, 基于相似度水平的差异, 对各样品的所有序列进行 OTU 划分, 在 97% 的相似水平下进行生物信息统计分析. 通常采用 Shannon 和 Simpson 这两个多样性指数来体现 α 的多样性. 由表 1 可以看出, 接种污泥的微生物多样性较高, 这是由于实际污水处理厂进水环境复杂, 水质条件多样, 营养物质的种类丰富, 多方位满足

了各类微生物的生长所需. 而在实验室采用模拟生活配水, 进水组分单一, 营养物质结构简单, 导致微生物种群多样性相对较低. 对比 3 种不同的污染物去除系统, I 阶段微生物种群多样性最高, 其次为 II、III 阶段. Zhao 等^[12]的研究发现, 反应器的运行状态及环境条件对微生物的多样性具有影响. 缺氧区和厌氧区的引入导致系统功能与环境的复杂度增加, 功能微生物相继增多, 因此系统中的微生物群落多样性丰富^[13].

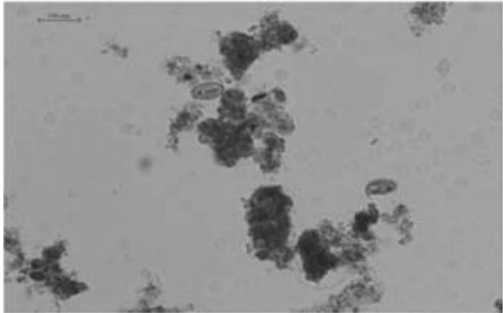
表 1 污泥样品 α 多样性

Table 1 The α diversity of the samples

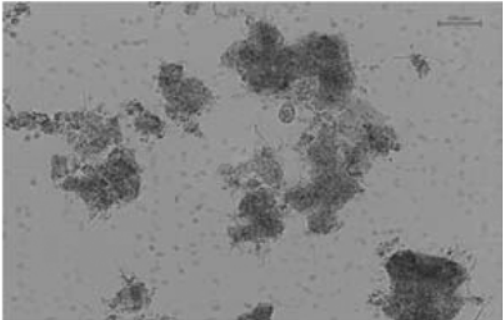
样品编号	序列条数	OTU 数	Shannon 指数	ACE 指数	盖度	Simpson 指数
1	44770	2793	6.45	3 170.46	0.99	0.005
2	41017	2547	5.95	3 522.42	0.98	0.009
3	35307	2107	4.60	4 328.24	0.97	0.050
4	39199	2078	4.25	3 912.13	0.98	0.090



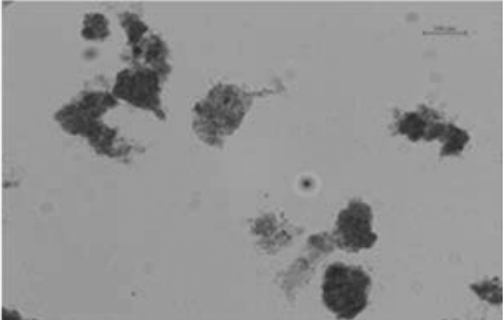
(a) 1 d



(b) 47 d



(c) 89 d



(d) 126 d

图 3 不同阶段活性污泥形态镜检 ($\times 100$)
Fig. 3 Morphologies observed results during different process ($\times 100$)

2.3 优势菌群分析

为了更加清楚地了解和识别微生物, 通常将微生物有次序地进行分门别类为: 界、门、纲、目、科、属、种^[14], 在本研究主要从属水平探讨菌群结构的演替规律. 图 4 为不同阶段属水平细菌群落结构分布. 从中可以看出, 不同的污染物去除系统中, 微生物属水平的分布存在较大差异. 测序结果总共约 400 个菌属, 其中丰度小于 1% 的计为 others. 随系统功能的改变, 优势菌 *Azospira* (固氮螺旋菌属) 的丰度发生显著变化, 接种污泥中仅含有 0.16%, I 阶段上升至 24.1%, II 阶段为 21.37%, III 阶段降至 9.6%. 该菌属于反硝化菌属, 丰度的变化规律与系统的功能改变完全吻合. 同时 *Thiothrix* (丝硫菌) 的丰度在接种污泥和 I 阶段时仅为 0.08% 和 1.51%, 却在 II 阶段达 9.41%, III 阶段时降至 4.29%, 丰度变化与系统的沉降性能完全一致. *Thiothrix* 是典型的丝状菌属, 属于 γ -变形菌亚门, 菌丝呈长直或弧形状, 从菌胶团中突出生长, 在其生长过程中能够进行良好的脱氮除硫功能^[15]. 通过本研究可以看出, 以乙酸钠为进水时, 具有厌氧区的 AAO 系统对该菌的生长具有选择抑制作用, 而含有缺氧的 AO 系统却刺激了该菌的优势竞争. 相比 I 阶段而言, 在 II 阶段中具有反硝化功能的 *Azospira* 丰度下降, 此时系统整体的脱氮效率未有影响, 这可能与系统 *Thiothrix* 的脱氮功能有关. *Ohtaekwangia* 菌以易降解有机物为底物, 属于严格的好氧菌^[16], 在系统具有厌氧、缺氧区时, 含量为 0.01% ~ 8.67%, 丰度较小, 而在 III 阶段稳定期丰度高达 17.87%, 单纯的好氧区环境有利于该菌的生长繁殖. 除此之外, *Azonexus* 菌在接种污泥和系统的 I 和 III 阶段含量较小, 而在 II 阶段时丰度却为 5.72%. *Azonexus* 属于变形菌门, 能够将 NO_3^- 还原完成脱氮功能^[17]. 通过本研究可以看出, 接种污泥和阶段 I 的 AAO 系统的中缺氧和好氧交替的脱氮环境并不利于该菌的生长. 同时, 据图 4 的进一步分析可以看出, *Kofleria* 菌也是 III 阶段系统中的优势菌种, 所占丰度达 15.85%. 该菌属于一种

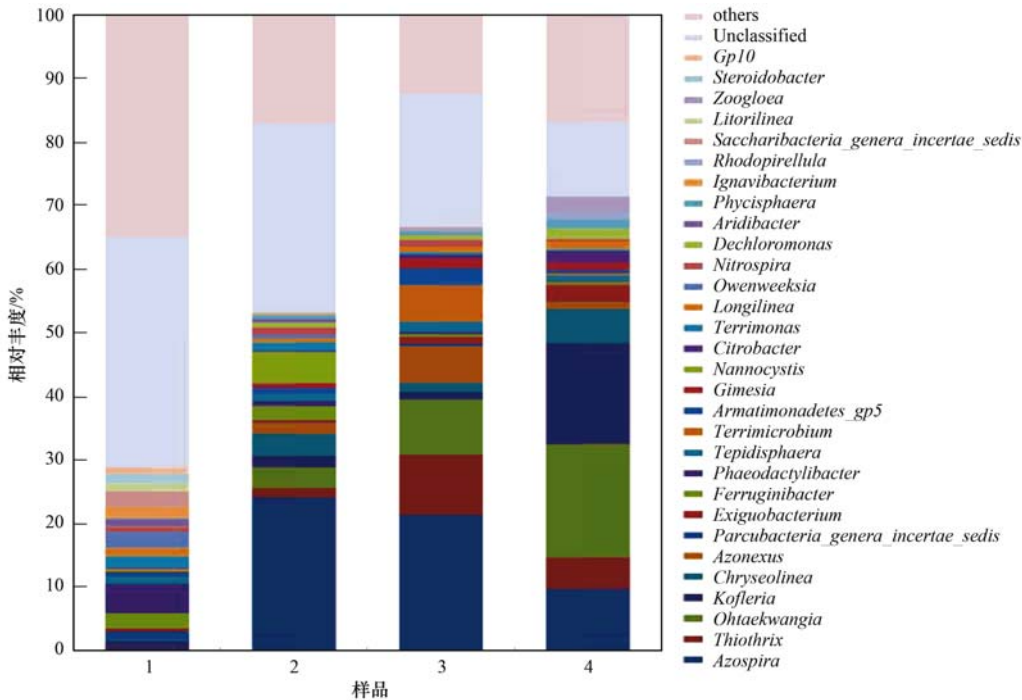


图4 样品中属水平细菌群落结构分布

Fig. 4 Genus level depiction of bacterial communities

典型的黏细菌，其生长繁殖受季节周期性的变化较为明显，通常在春季(3~5月)和秋季(9~11月)较多，而夏季和冬季则减少^[18]。虽在实验中持续保持了较好的水温环境，但明显可以看出Ⅲ阶段运行时的秋季环境依然诱发了该菌的大量生长。

2.4 不同系统中EPS含量变化

图5为3阶段不同时期EPS各组分含量变化情况。通常EPS主要由多糖(PS)和蛋白质(PN)组成，PS带负电荷，PN带正电荷，两者共同决定EPS的Zeta电位。从中可知，不同污染物去除系统中，LB-EPS、TB-EPS的主要成分均为PN，占EPS总含量的60%~90%。不同的运行系统中，随微生物群落结构的变化，代谢产物含量有所不同。为了分析污泥沉降性能与胞外聚合物组分之间的关系，采用

SPSS 软件进行统计 Spearman 等级相关性的分析时发现，污泥沉降性能与LB-EPS中PN/PS比值呈现显著的正相关性($r=0.767$, $P<0.05$)，而与TB-EPS之间的相关性较弱($r=0.159$, $P<0.05$)。这是由于TB位于细胞内侧，与细胞表面紧密结合，对活性污泥的絮凝作用及沉降性能影响甚微。而LB位于TB的外侧，对活性污泥的表面特性影响较大。Zhao等^[19]的研究发现，相比TB-EPS而言，LB-EPS能够加强细胞间的聚集性。图6为3阶段不同时期Zeta电位变化情况。从中可知，随Zeta电位的下降，污泥沉降性能逐渐改善，反之亦然。这是由于蛋白质带有正电荷，可以中和羟基与磷酸基团等带有的负电荷，进而压缩双电层降低表面电位^[20]。

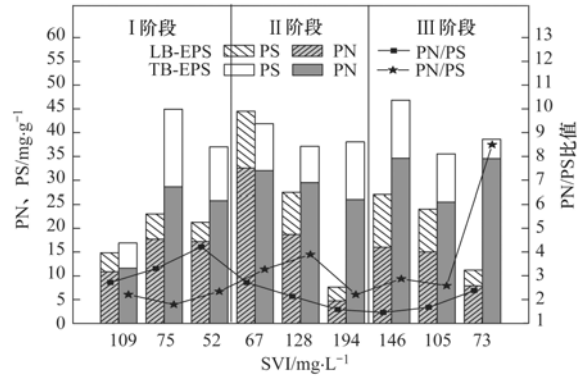


图5 污泥沉降性能与EPS各组分含量变化情况

Fig. 5 Sludge settleability and EPS components of changes

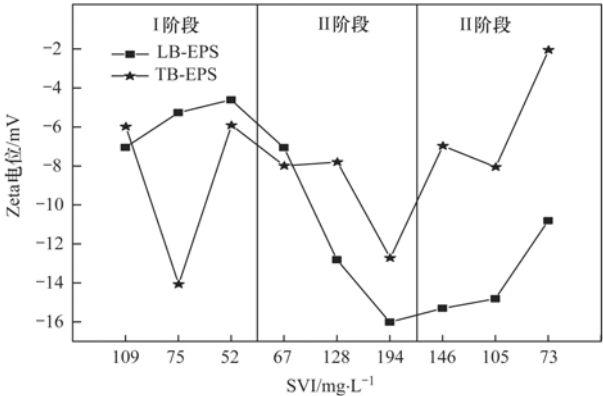


图6 污泥沉降性能与Zeta电位变化情况

Fig. 6 Sludge settleability and Zeta potential of changes

Zeta 电位的降低使得污泥絮体间的静电斥力有所减少, 有利于污泥之间的凝聚作用。

2.5 EPS 的三维荧光特性分析

三维荧光光谱技术主要针对有机物中含有的荧光基团(芳香结构和不饱和链), 根据不同物质的荧光反应测定相关物质的成分, 同时间接表示物质的相对含量等^[21]。图 7 为不同功能系统中稳定期 EPS 的 LB、TB 三维荧光光谱特性对比分析, 其中 Peak A: $E_x/E_m = 220 \sim 240/280 \sim 350\text{nm}$ (酪氨酸/色氨酸区), Peak B: $E_x/E_m = 220 \sim 290/280 \sim 360\text{ nm}$ (酪氨酸/色氨酸蛋白区), Peak C: $E_x/E_m = 260 \sim 290/420 \sim 460\text{ nm}$ (聚芳环类腐殖酸区), Peak D: $E_x/E_m = 330 \sim 370/420 \sim 460\text{ nm}$ (聚羧酸类腐殖酸

区)^[22]。据图 7 可以看出, 不同功能系统运行的稳定期 LB、TB 的化学物质组成截然不同, LB 中除蛋白质类物质外还有少量的腐殖酸。根据荧光强度发现内层的 EPS 具有更高的物质浓度, 这与之前的组分含量测定结果一致。同时, I、II、III 阶段的稳定运行期, TB 中荧光物质荧光强度基本稳定于 2000 ~ 3000 AU 之间, 浓度变化较小。而不同系统 LB 的物质浓度存在显著差异, I、II、III 阶段 LB 的 Peak A、Peak B 荧光强度分别为(2705 AU、2092 AU), (581.3 AU、432.4 AU), (1349 AU、848.7 AU)。

李志华等^[23]的研究认为, 活性污泥系统中代谢产物的荧光特性与污泥沉降性能之间存在一定的

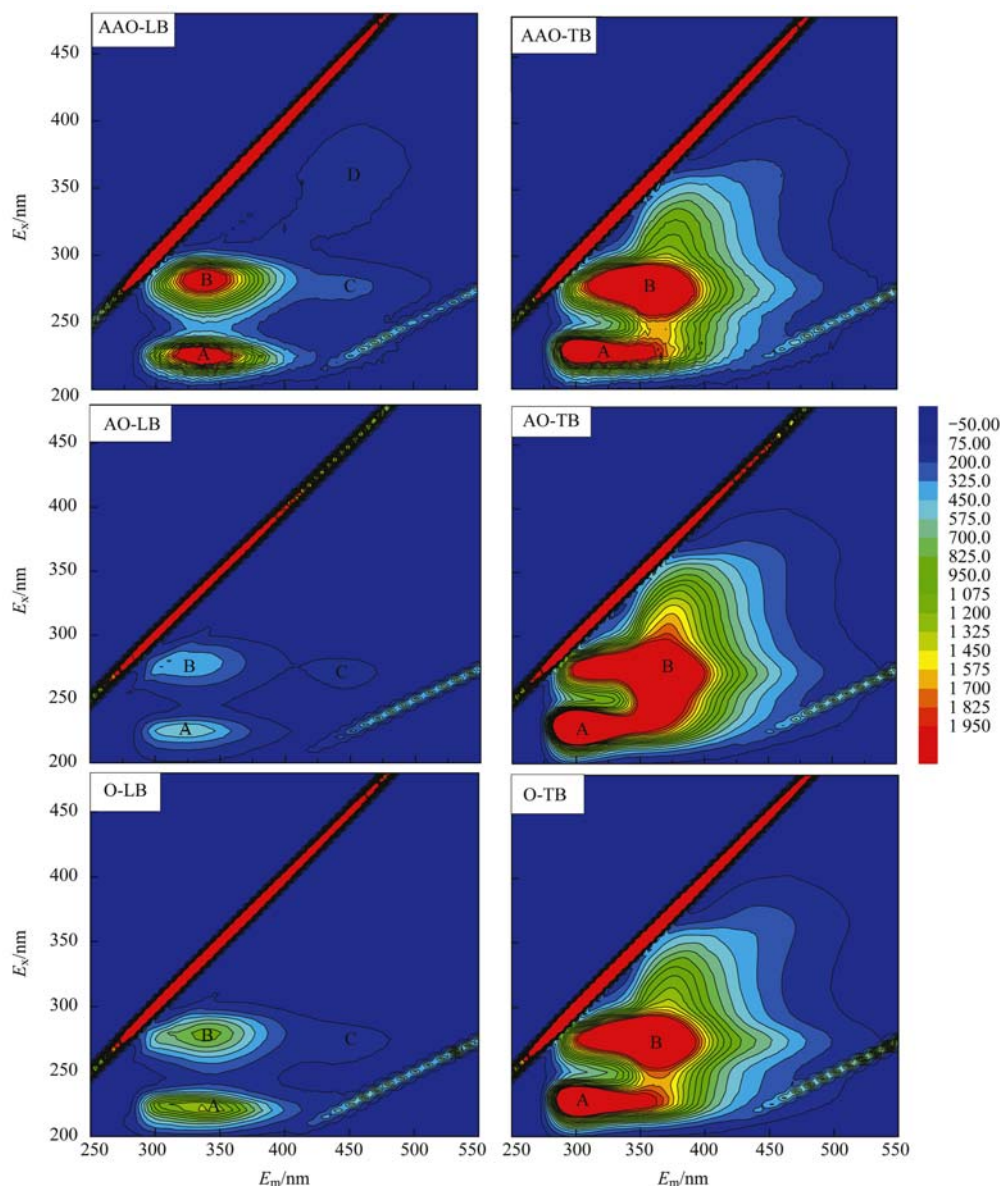


图 7 不同阶段稳定运行期 EPS 中 LB、TB 三维荧光特性对比

Fig. 7 Comparisons of three-dimensional fluorescence characteristics of LB-EPS and TB-EPS under stable conditions

内在联系,活性污泥沉降性能良好时会产生大量的代谢产物;而沉降性能较差时,微生物代谢产生的荧光物质强度则相对较弱.在3个阶段稳定期的沉降性能对比中发现,I阶段最佳、其次为Ⅲ、Ⅱ阶段,这与该时期的荧光峰荧光强度吻合良好.同时根据荧光峰在激发、发射波长所出现的位置,可以判断该荧光峰发生了蓝移或红移.据图7分析,Ⅱ阶段时LB中峰A、B均发生了蓝移,表明在该阶段某些官能团产生了消失,例如羰基、羟基或链结构中的共轭键减少等^[24].而在Ⅲ阶段LB中峰A、B均发生了红移,说明EPS中的某些官能团有所增加,例如氨基、羧基等.通过荧光峰位置的转移进一步发现在这3种不同的营养物去除系统中,菌群结构的演替导致微生物代谢产物有所差异,LB-EPS所带官能团发生改变,化学结构显著不同.

3 讨论

由于工艺的实现,不仅是运行反应器中需要形成特定的环境,而且还需要水质可以满足与该工艺应有的功能相适应的功能性微生物的生长.因此,在实验期间,为了满足单一的碳氧化菌、硝化菌和反硝化菌以及除磷菌的生长需求,保持碳源不变,根据不同工艺的功能特点对进水氮、磷负荷进行了适当的调整,以配合各工艺特点所需要的水质.

研究发现,从接种污泥到I阶段稳定期的运行过程中,*Thiothrix*的丰度变化从0.08%上升至1.51%,然而污泥的沉降性能却发生了显著下降.Hesham等^[25]探究了AAO系统在两种不同运行模式中活性污泥菌群结构的差异,通过移动窗口的相关分析发现,污泥沉降性能均与*Microthrix parvicella*和*Nostocoida limicola* I的生长繁殖相关.Knoop等^[26]的研究发现,在实际的营养盐去除系统中易于导致微丝菌的生长繁殖引发污泥沉降性能恶化,这一现象大多发生在秋末和冬季的低温环境.而在本实验过程中控制水温始终为20~25℃,因而并未出现微丝菌的大量繁殖.但通过EPS组分的测定发现,在此过程中微生物代谢分泌的LB-EPS中PN/PS的比值却逐渐上升.由于LB-EPS包裹在污泥的外表面,PN/PS的比值变化可直接影响污泥的表面特性.同时PN具有较强的疏水性,随含量的增加有助于减少污泥絮体与水分子之间的结合作用,进而促进污泥表面的絮凝性能,絮体之间聚集形成菌胶团,密实度逐渐增加.

系统转入Ⅱ阶段时,*Thiothrix*的丰度逐渐增加

至9.41%,此时污泥沉降性能变差.Guo等^[27]的研究表明,脱氮系统中常见的优势丝状菌为Type0041、Type0675和Type1851.然而,在本实验中并未发现此类丝状菌的生长,这可能与不同的进水基质相关,*Thiothrix*适宜生长在进水含有大量高浓度低分子碳水化合物或还原性硫化物的环境中,以乙酸钠为进水碳源时容易诱导*Thiothrix*的大量增殖^[15].此时的三维荧光特性分析看出,相比I阶段而言,LB-EPS所带官能团发生改变,化学结构有所不同.同时,LB-EPS中PN/PS的比值逐渐下降,由于PS含量的增加,其较强的亲水作用使得污泥絮体间形成一种类似流体通道的结构,进而导致污泥的密实度也显著下降,污泥沉降性能变差.王杰等^[28]探究缺氧/好氧体积比对活性污泥沉降性能影响时发现,不同的系统模式下优势丝状菌的种类发生显著改变,进而导致污泥的沉降性能有所差异.同时测定系统不同时期的EPS分泌情况表明,EPS中PN/PS的比值也与污泥沉降性能呈正相关.

系统转入Ⅲ阶段时,*Thiothrix*的丰度下降至4.29%,单纯的好氧环境似乎不利于该菌的生长繁殖,此时的污泥沉降性能逐步改善.通过EPS组分的测定发现,在此过程中微生物代谢分泌的LB-EPS中PN/PS的比值逐渐上升.夏志红等^[29]研究了自养菌和异养菌胞外聚合物与污泥絮体的关系,表明异养活性污泥的絮体形态依赖于TB-EPS的作用.然而王红武等^[30]的研究却发现,以异养菌为主的活性污泥中LB-EPS越多,污泥的絮凝和沉降性能变差,但TB-EPS对此基本无影响.通常由于反应器的运行状态、微生物组成以及环境条件的改变均有可能导致代谢产物的微观变化,不同体系中的结论有所差异,这可能还与该系统特定的生物有关.

由于废水组成、运行条件及环境因素等的不同,致使不同的污水处理厂引起沉降性能改变的优势丝状菌有所不同.但目前的研究认为活性污泥絮体的形成是一种生物过程,胞外聚合物在此期间同样发挥重要作用.本研究的结果显示,在不同的生物处理系统中,丝状菌的生长繁殖是影响污泥沉降性能的主导细菌,同时胞外代谢产物的相关变化加剧了污泥沉降性能改善或恶化的进程.因此,以微生物为主体的运行工艺,污泥沉降性能与优势丝状菌的变化及胞外聚合物的分泌情况均相关.

4 结论

(1)以乙酸钠为碳源,不同的运行条件下活性

污泥沉降性能有所差异, AAO 脱氮除磷(I 阶段) 沉降性能最佳、其次为好氧除碳(III 阶段)、AO 脱氮(II 阶段)。

(2) 3 种不同的污染物去除系统中, I 阶段微生物种群多样性最高, 其次为 II、III 阶段。缺氧区和厌氧区的引入导致系统功能与环境的复杂度增加, 微生物群落多样性有所升高。

(3) 不同的运行条件下, 系统优势菌群显著不同, *Thiothrix* 的丰度变化是影响污泥沉降性能变化的主导细菌。I 阶段的厌氧区对该菌生长具有抑制作用, 而 II 阶段的缺氧区却刺激了其优势生长。

(4) 微生物群落结构变化对 EPS 的组分有显著影响, 进而加剧了污泥沉降性能改善或恶化的进程, 污泥沉降性能与 LB-EPS 中 PN/PS 比值呈正相关。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Leal C, Amaral A L, de Lourdes Costa M. Microbial-based evaluation of foaming events in full-scale wastewater treatment plants by microscopy survey and quantitative image analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(15): 15638-15650.
- [3] 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.
- [4] Wang J, Li Q, Qi R, *et al.* Sludge bulking impact on relevant bacterial populations in a full-scale municipal wastewater treatment plant[J]. *Process Biochemistry*, 2014, **49**(12): 2258-2265.
- [5] 陆鑫, 刘波, 谭云飞, 等. 低温条件下城市污水厂污泥膨胀的生物学成因[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(7): 3925-3930.
Lu X, Liu B, Tan Y F, *et al.* Biological causes of sludge bulking in municipal wastewater treatment plant under low-temperature condition[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(7): 3925-3930.
- [6] Li X Y, Yang S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. *Water Research*, 2007, **41**(5): 1022-1030.
- [7] 周俊, 周立祥, 黄焕忠. 污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2752-2757.
Zhou J, Zhou L X, Huang H Z. Optimization of extracellular polymeric substance extraction method and its role in the dewaterability of sludge[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2752-2757.
- [8] Liu X M, Sheng G P, Luo H W, *et al.* Contribution of extracellular polymeric substances (EPS) to the sludge aggregation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(11): 4355-4360.
- [9] 王浩宇, 苏本生, 黄丹, 等. 好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1614-1620.
Wang H Y, Su B S, Huang D, *et al.* Profiles of Zeta potential and EPS in granulation process of aerobic sludge[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1614-1620.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Zhao W, Zhang G M. Optimization of photosynthetic bacteria wastewater treatment and study of microbial species diversity[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, **52**(28-30): 5357-5365.
- [13] Griffin J N, Jenkins S R, Gamfeldt L, *et al.* Spatial heterogeneity increases the importance of species richness for an ecosystem process[J]. *Oikos*, 2009, **118**(9): 1335-1342.
- [14] 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 等. 16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1704-1716.
Yang H, Zhang G Z, Yang X N, *et al.* Microbial community structure and diversity in cellar water by 16S rRNA high-throughput sequencing[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1704-1716.
- [15] Jenkins D, Richard M G, Daigger G T. Manual on the causes and control of activated sludge bulking and other solids separation problems (3rd edition) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2004. 40-42.
- [16] 周合喜. 变温下 A/O 复合系统的处理效能及菌群响应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
Zhou H X. Treatment performance and microbial community dynamics at different temperature in a hybiy A/O process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [17] Quan Z X, Im W T, Lee S T. *Azonexus caeni* sp. nov., a denitrifying bacterium isolated from sludge of a wastewater treatment plant[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2006, **56**(5): 1043-1046.
- [18] 李曙光. 粘细菌的环境分布、季节演替及其相互作用[D]. 济南: 山东大学, 2014.
Li S G. Distribution, seasonal succession and intraspecies interactions of myxobacteria[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014.
- [19] Zhao W Q, Yang S S, Huang Q Y, *et al.* Bacterial cell surface properties: role of loosely bound extracellular polymeric substances (LB-EPS) [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2015, **128**: 600-607.
- [20] 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.
- [21] Sun J, Guo L, Li Q Q, *et al.* Three-dimensional fluorescence excitation-emission matrix (EEM) spectroscopy with regional

- integration analysis for assessing waste sludge hydrolysis at different pretreated temperatures[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(23): 24061-24067.
- [22] Wang Z P, Zhang T. Characterization of soluble microbial products (SMP) under stressful conditions[J]. *Water Research*, 2010, **44**(18): 5499-5509.
- [23] 李志华, 贺春博, 张芹, 等. 基于代谢产物调控的活性污泥沉淀性能控制原理研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(12): 3030-3035.
- Li Z H, He C B, Zhang Q, *et al.* Control principle of settleability of activated sludge by regulation of metabolites[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(12): 3030-3035.
- [24] 金鹏康, 王斌. 城市污水管网对水质的生化改善特性[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(7): 3401-3408.
- Jin P K, Wang B. Improvement in biodegradability of wastewater quality in urban sewer system [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(7): 3401-3408.
- [25] Hesham A E L, Qi R, Yang M. Comparison of bacterial community structures in two systems of a sewage treatment plant using PCR-DGGE analysis [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(12): 2049-2054.
- [26] Knoop S, Kunst S. Influence of temperature and sludge loading on activated sludge settling, especially on *Microthrix parvicella* [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(4-5): 27-35.
- [27] Guo F, Zhang T. Profiling bulking and foaming bacteria in activated sludge by high throughput sequencing [J]. *Water Research*, 2012, **46**(8): 2772-2782.
- [28] 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.
- 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.
- [29] 夏志红, 任勇翔, 杨垒, 等. 自养菌和异养菌胞外聚合物对活性污泥絮凝特性的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(2): 468-475.
- Xia Z H, Ren Y X, Yang L, *et al.* Influence of extracellular polymeric substances of autotrophic and heterotrophic bacterium on flocculating characteristics of activated sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 468-475.
- [30] 王红武, 李晓岩, 赵庆祥. 胞外聚合物对活性污泥沉降和絮凝性能的影响研究[J]. *中国安全科学学报*, 2003, **13**(9): 31-34.
- Wang H W, Li X Y, Zhao Q X. Effect of extracellular polymeric substances (EPS) on bio-flocculation and settlement of activated sludge[J]. *China Safety Science Journal*, 2003, **13**(9): 31-34.



CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamnox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(Comammox <i>Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China: Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17 β -estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)