

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



2020

Vol.41 No.7  
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响 ..... 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)

华北地区大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 ..... 杨伟, 姜晓丽 (2995)

郑州市民运会期间大气PM<sub>2.5</sub>改善效果评估 ..... 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)

成都夏冬季PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机离子污染特征 ..... 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)

川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析 ..... 雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)

四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 ..... 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)

成都市工业挥发性有机物排源成分谱 ..... 周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)

郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估 ..... 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)

阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 ..... 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)

典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性 ..... 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)

华北地区典型重工业城市夏季近地面O<sub>3</sub>污染特征及敏感性 ..... 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)

稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 ..... 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运震 (3095)

苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析 ..... 卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)

轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 ..... 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日起, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)

非超低与超低排放煤电机组启动过程NO<sub>x</sub>排放特征对比分析 ..... 李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)

邢台市道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别 ..... 宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)

叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响 ..... 魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)

关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源 ..... 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)

岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析 ..... 田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)

木沥河流域氮素污染及其污染源解析 ..... 齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)

辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析 ..... 齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)

鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应 ..... 王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾璐杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)

象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析 ..... 王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)

乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献 ..... 张慧, 王世亮, 余杨 (3204)

连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征 ..... 李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)

茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险 ..... 吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)

金盆水库沉积物铁锰释放规律 ..... 路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)

城市湖泊沉积物微塑料污染特征 ..... 王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)

西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析 ..... 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)

海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响 ..... 王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)

梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律 ..... 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)

宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析 ..... 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)

分层型水库藻类垂向演替的水质与细菌种群调控 ..... 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)

长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响 ..... 毕薇薇, 叶胜, 于健全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)

供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 ..... 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)

碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制 ..... 崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)

弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe<sup>0</sup>/WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制 ..... 计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)

一硫代砷在针铁矿上的吸附及影响因素 ..... 廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)

生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征 ..... 王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)

低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 ..... 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)

羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 ..... 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)

低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 ..... 高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)

我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化 ..... 董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)

城镇河流CO<sub>2</sub>及CH<sub>4</sub>排放与市政排水管网污水输入的关联影响 ..... 李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)

控释尿素对黄河故道沙性潮土N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)

我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放 ..... 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)

不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异 ..... 黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)

锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响 ..... 孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)

钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响 ..... 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)

叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响 ..... 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)

《环境科学》征订启事 (3011) 《环境科学》征稿简则 (3084) 信息 (3174, 3185, 3391)

## 低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性

高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻

(北京工业大学环境与能源工程学院, 城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124)

**摘要:** 为探究低温下丝状菌污泥膨胀过程中微生物多样性的变化特征, 实验采用低温-SBR 反应器成功诱发污泥膨胀, 并借助 Illumina MiSeq 高通量测序技术, 考察了不同沉降性能下活性污泥微生物群落的整体变化特征、各特定菌群及特定菌属的变化特征。结果表明, 在系统运行温度降至  $(14 \pm 1)^\circ\text{C}$  后可成功诱发丝状菌污泥膨胀, SVI 可恶化至  $663.99 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ , 且膨胀后 COD 去除率和 TN 去除率仍能维持在 90% 和 86% 左右。低温下污泥膨胀的发生不仅会导致系统内微生物整体多样性和均一性的降低, 使特定菌群中丝状菌群的丰度由 0.49% 增至 26.04%, 还会使脱氮菌群的丰度由 21.04% 减少至 13.99%, 除磷菌群的丰度由 4.25% 减少至 1.93%。发现的 5 种丝状菌属中, 以 *Thiothrix* 为代表的 3 种菌属的丰度递增, 仅 *Haliscomenobacter* 的丰度递减; 发现的 19 种脱氮菌属中, 以 *Nitrosomonas* 为代表的 5 种菌属的丰度递增, 以 *Nitrospira* 为代表的 7 种菌属的丰度递减; 发现的 8 种除磷菌属中, *Pseudomonas* 和 *Tetrasphaera* 的丰度递增, 以 *Candidatus\_Cometibacter* 为代表的 5 种菌属的丰度递减。虽然污泥膨胀对微生物菌群结构产生较大影响, 但不同泥样中始终存在的 477 个 OTUs 和 227 个菌属说明膨胀过程中反应器内主体微生物仍呈相对稳定状态。

**关键词:** 低温; 污泥膨胀; 生物多样性; 丝状菌; 功能菌

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3373-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912048

## Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature

GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, REN Hao, LI Yue, HOU Chun-yan, WANG Chuan-de, PENG Yong-zhen  
(National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** To investigate the characteristics of microbial diversity during filamentous bulking at low temperature, the induction of sludge bulking was successfully carried out using a low-temperature sequencing batch reactor (SBR). With the help of Illumina MiSeq high-throughput sequencing technology, the overall changes in the microbial community structure of activated sludge, the characteristics of each specific microbial community, and the specific genera were all investigated under different sludge sedimentation performances. The results showed that filamentous bulking can be successfully induced after the system operating temperature drops to  $(14 \pm 1)^\circ\text{C}$ , and the COD and TN removal rates can still be maintained at approximately 90% and 86%, respectively, with the sludge volume index deteriorating to  $663.99 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ . The occurrence of sludge bulking at low temperature will not only reduce the overall diversity and uniformity of microorganisms in the system and increase the abundance of filamentous bacteria from 0.49% to 26.04% but also cause the abundance of denitrifying bacteria to reduce from 21.04% to 13.99% and that of dephosphorization bacteria to reduce from 4.25% to 1.93%. Of the five filamentous genera founded, the abundances of three filamentous bacteria represented by *Thiothrix* increased, whereas only that of the *Haliscomenobacter* decreased. Of the 19 denitrifier genera founded, the abundances of five species represented by *Nitrosomonas* increased, whereas those of seven species represented by *Nitrospira* decreased. Moreover, the abundances of *Pseudomonas* and *Tetrasphaera* increased out of the eight phosphorus-removing bacteria genera, whereas the abundances of the five bacteria genera represented by *Candidatus\_Cometibacter* decreased. Although sludge bulking has a significant impact on the structure of the microbial community, the 477 operational taxonomic units and 227 bacterial species that are always present in the different sludge samples indicate that the main microorganisms in the reactor are still relatively stable during the bulking process.

**Key words:** low temperature; sludge bulking; microbial diversity; filamentous; functional bacteria

活性污泥法自诞生以来就以其低廉的成本和优良的处理效果而在世界范围内得到了广泛应用<sup>[1]</sup>, 但冬季频发的污泥膨胀却始终制约着其进一步发展, 而在这些污泥膨胀中, 仅由丝状菌优势生长所引起的就能占到 90%, 因此, 过往大量关于污泥膨胀的研究报道都围绕着膨胀污泥的优势丝状菌展开<sup>[2-5]</sup>。然而, 尽管已有超过 30 种不同的丝状菌在污水厂中被发现和研究, 但不同丝状菌的生理特性往往具有差异, 如微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 的数量受季节影响很大, 冬季多夏季少, 而 Type 0092 则

与之相反; 软发菌 (*Haliscomenobacter hydrossis*) 和浮游球衣菌属 (*Sphaerotilus natans*) 很少出现在去除营养物质的污水处理厂, *M. parvicella* 却常常出现<sup>[6,7]</sup>。由于针对丝状菌进行的纯培养成功率低且所获得微生物学信息具有片面性, 加之污水处理厂中的优势丝状菌还会随水质和环境的变化而发生动

收稿日期: 2019-12-06; 修订日期: 2020-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51478012); 北京市科技重大专项 (Z181100005318001)

作者简介: 高春娣 (1973~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为城镇污水深度处理与资源化利用、丝状菌污泥膨胀机理与控制, E-mail: gaochundi@bjut.edu.cn

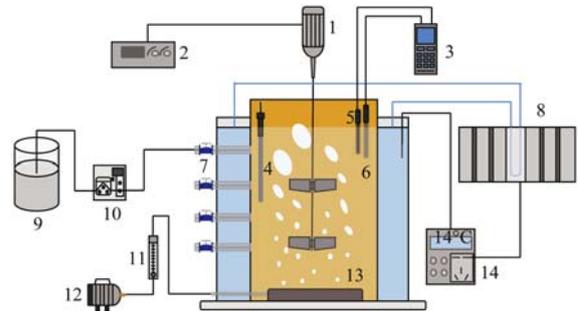
态的变迁,都使得当下膨胀污泥微生物学角度的研究难以实现进一步的突破<sup>[8,9]</sup>. 由于活性污泥的本质是由无数微生物组成的混合体,丝状菌污泥膨胀正是这一微生物混合体受外界因素影响而发生的群落失衡,故应将相关生物学研究视角转换到系统内不同微生物群落结构的整体研究和对比分析上来,才能弥补目前本领域研究内容的不足. 当下,随着高通量测序等先进分子生物学技术的发展和运用,不仅为实现微生物群落的深度测序带来了可能,也为膨胀领域微生物学研究内容的补充带来了可行性与技术支撑. 虽然基于高通量测序的研究已在水处理领域大规模展开,如针对养殖废水<sup>[10]</sup>、城市污水<sup>[11]</sup>、腈纶废水<sup>[12]</sup>、含油废水<sup>[13]</sup>及工业废水<sup>[14]</sup>等诸多水处理系统的菌群结构研究. 但针对污泥膨胀领域的研究,尤其是低温导致的污泥膨胀的相关微生物学多样性的研究仍然十分不足,而各大污水厂冬季仍面临着污泥膨胀高发的风险和困境. 故本实验以低温下发生的丝状菌污泥膨胀为切入点,采用低温-SBR装置,成功将反应温度控制在 $(14 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,深入研究了低温条件下污泥膨胀过程中微生物菌群整体的多样性变化,以及特定菌群、特定菌属的相对丰度变化,通过扩大污泥膨胀微生物学领域的研究视角,以期阐明污泥沉降性能变化的微生物学机制和丝状菌污泥膨胀的应对及解决提供更多的生物学支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

本实验采用序批式低温-SBR反应器作为主要装置,反应器容积8L,运行期间每日进水4L排水

4 L,排水比 50% (图 1). 与之连接的制冷器最低可在 30 min 内将 8 L 活性污泥的水温由  $28^\circ\text{C}$  降至  $8^\circ\text{C}$ ,配套的温控器的控温范围为  $-9 \sim 99^\circ\text{C}$ ,膨胀期间控制温度在  $(14 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,与城市污水厂冬季水温保持一致. 反应器下部安装的曝气盘与转子流量计和空气压缩机连接,为装置内的活性污泥提供溶解氧,同时配置的 WTW3420 型溶氧仪装有 DO 和 pH 探头,不仅可用于观察反应器内实际溶解氧水平,还可实现对系统内 pH 值的实时监测,装置上部电动搅拌器的主要功能是保证泥水充分混匀. 此外,还根据实际需求设置了进水口与排水口,分别于蠕动泵和电动阀相连,实现系统的自动进排水.



1. 电动搅拌器; 2. 电动机; 3. WTW3420 型溶解氧仪; 4. 加热棒; 5. pH 探头; 6. DO 探头; 7. 取样口; 8. 制冷器; 9. 配水水箱; 10. 蠕动泵; 11. 气体流量计; 12. 空气压缩机; 13. 曝气盘; 14. 温控器

图 1 低温-SBR 反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of the low-temperature SBR

### 1.2 实验水质和污泥

本实验接种污泥取自北京市高碑店污水处理厂二沉池回流污泥,该污泥脱氮除磷性能良好,沉降性正常. 进水水质采用人工配水,详细水质数据如表 1 和表 2 所示.

表 1 人工配水水质情况

Table 1 Characteristics of artificial wastewater

配水成分	乙酸钠/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4\text{Cl}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{KH}_2\text{PO}_4/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{CaCl}_2/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	微量元素/ $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$
参数值	384.38	57.32	13.2	11.1	91.2	1

表 2 微量元素配方/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Composition of the trace elements/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	EDTA	KI	$\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{CuSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_3\text{BO}_3$	$\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$
参数值	10	0.18	0.15	0.03	0.06	0.15	0.12	1.5

### 1.3 实验运行方案

本实验采取传统硝化反硝化工艺,分 3 个阶段共运行 80 d,阶段一为污泥驯化阶段,该阶段主要目的是使污泥适应本实验所采取的水质及运行方式,实验时控制溶解氧在  $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,温度在  $28^\circ\text{C}$  以上运行 30 d,阶段二为低温下丝状菌污泥膨胀的诱发阶

段,降低温度至  $(14 \pm 1)^\circ\text{C}$  左右运行 22 d,阶段三为恶性膨胀阶段,该阶段污泥沉降性能恶化严重,故将运行周期由  $3 \text{ 次}\cdot\text{d}^{-1}$  降至  $2 \text{ 次}\cdot\text{d}^{-1}$ ,并将沉淀时间由 40 min 延长至 280 min 后运行 28 d. 实验期间每周期进水 4 L 排水 4 L,排水比 50%,具体的运行方式如表 3 所示.

表 3 实验运行方案

Table 3 Operation stages and experimental procedure

项目	时间/d	周期数	运行模式	温度/°C	DO/mg·L <sup>-1</sup>
阶段一	1~30	每天3次	进水10 min; 好氧140 min; 厌氧280 min; 沉淀40 min; 排水10 min	28	2.0
阶段二	31~52	每天3次	进水10 min; 好氧140 min; 厌氧280 min; 沉淀40 min; 排水10 min	14±1	2.0
阶段三	53~80	每天2次	进水10 min; 好氧140 min; 厌氧280 min; 沉淀280 min; 排水10 min	14±1	2.0

#### 1.4 分析指标和方法

在本实验的分析过程中,对化学需氧量(COD)、总氮(TN)、污泥浓度(MLSS)和污泥指数(SVI),系统优势丝状菌以及微生物群落结构等内容进行了检测,其中COD、TN、MLSS和SVI依据标准方法测得<sup>[15,16]</sup>.在优势丝状菌的鉴定方面,在对污泥絮体进行革兰氏染色后,先根据Olympus BX61型显微镜的镜检结果以及Eikelboom丝状菌手册推测优势丝状菌,再通过荧光原位杂交技术(FISH)进行菌种定性,所用的FISH分析方法与焦二龙<sup>[17]</sup>所使用的方法一致,实验中FISH定性所使用的泥样采集于2019年5月6日,所使用的详细的寡核苷酸探针信息如表4所示.分别于2019年3月1日、4

月19及5月6日采集了不同运行阶段的污泥泥样进行了高通量测序,高通量测序的实验过程如下:首先采用Fast DNA Spin Kit for Soil(QBIO gen Inc, Carlsba, CA, 美国)DNA提取试剂盒并按照其步骤要求完成不同泥样中总DNA的提取,并将提取后的DNA送至上海美吉生物公司进行PCR扩增、PCR产物定量以及MiSeq文库构建,最终获得经Illumina MiSeq高通量测序后的微生物群落结构信息.借助美吉云平台iSanger对3个样本中获得的的不同序列按最小序列数进行数据抽平后,进行了 $\alpha$ 多样性分析和Venn图的绘制,以高通量测序后在不同分类学水平上获得的微生物相对丰度数据,借助Excel进行数据分类汇总后,采用Origin软件进行绘图.

表 4 FISH 分析中采用的寡核苷酸探针

Table 4 Oligonucleotide probes used in FISH

目标细菌	探针名称	序列(5'-3')	标记点位	荧光类型	甲酰胺/%	文献
全菌	EUB338	GCT GCC TCC CGT AGG AGT	338~355	FITC	0~60	[18]
	EUB338-II	GCA GCC ACC ACG AGG TGT	338~355	FITC	0~60	[19]
	EUB338-III	GCT GCC ACC CGT AGG TGT	338~355	FITC	0~60	[19]
<i>Thiothrix</i>	TN1	CTC CTC TCC CAC ATT CTA	652~669	CY3	45	[20]

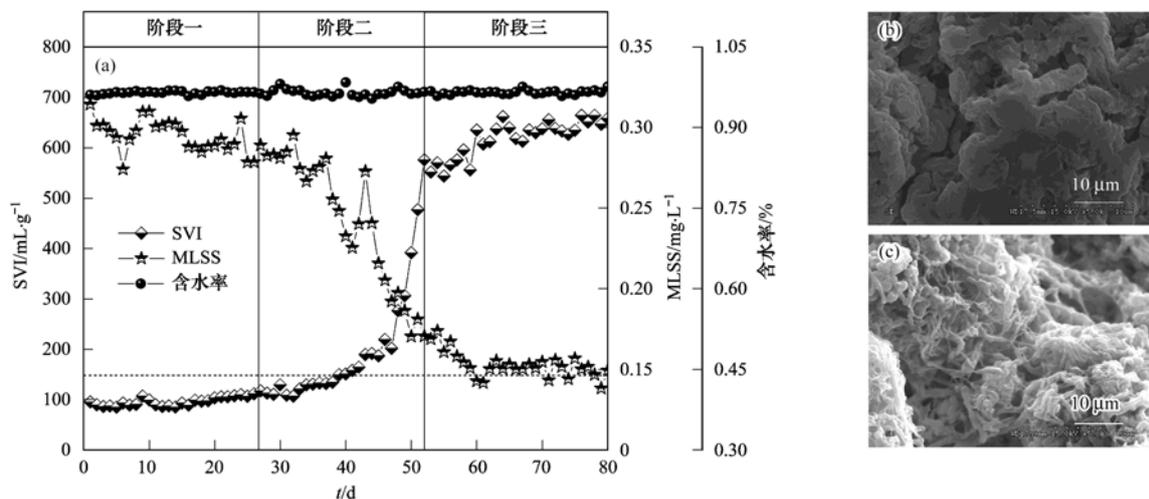
## 2 结果与讨论

### 2.1 SBR 工艺低温型丝状菌污泥膨胀的发生

#### 2.1.1 低温下丝状菌污泥膨胀过程中的沉降性变化

从北京高碑店污水处理厂二沉池内取泥后,于

0.5 h 内快速运回实验室,并投加到反应器中进行培养,测得原始泥样的 SVI 为  $95.6 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ,污泥沉降性能较好.正式实验共 3 个阶段,全阶段运行期间的污泥沉降性能及膨胀前后的扫描电镜效果见图 2.

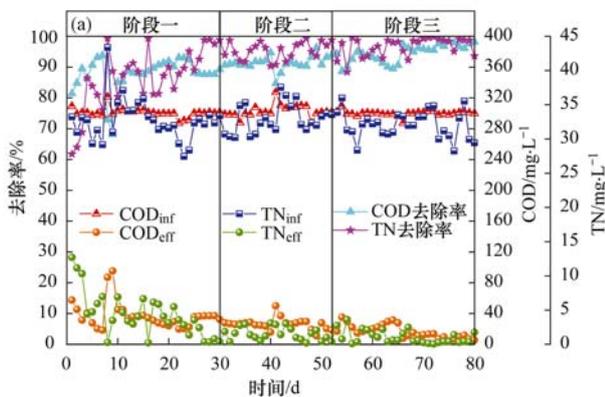


(a) 全阶段污泥沉降性能变化; (b) 原始泥样电镜图; (c) 膨胀泥样电镜图

图 2 运行期间污泥沉降性能变化及扫描电镜

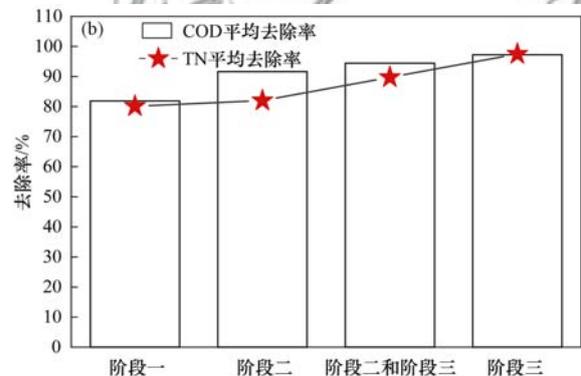
Fig. 2 Variations of SVI during operation and SEM observation

如图2所示,本实验全阶段共运行90 d,阶段一运行期间SVI值维持在 $85 \sim 100 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ,沉降性能良好.阶段二为诱发丝状菌污泥膨胀将温度降至 $(14 \pm 1)^\circ\text{C}$ 后,SVI显著提升,并在阶段二运行至第10 d时升至 $150 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ,发生污泥膨胀,至全阶段运行至第52 d时,污泥沉降性能已恶化至 $500 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 以上.为防止污泥流失进一步加剧,在不改变其它运行参数的前提下,延长反应器沉淀时间,进入阶段三,运行期间系统污泥沉降性能逐渐稳定在 $600 \sim 700 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右,污泥流失现象消失.鉴于扫描电镜能够更加直观地展现污泥絮体表面形态和结构特征,故对膨胀前后的污泥进行了扫描电镜观察,可明显看出,原始泥样的表面较为光滑,整体形态较好,而膨胀后的污泥絮体则粗糙多孔,表面被丝状菌密集覆盖.说明膨胀对絮体形态结构产生了较大影响,在污泥未发生膨胀时,丝状菌多处于絮体的内部,成为菌胶团菌絮凝在一起的骨架,而当膨胀发生后,原本位于絮体内部的丝状菌便会扩散生长,菌丝伸出至絮体表面,四散生长或包裹住原有的菌胶团菌.



### 2.1.2 低温下丝状菌污泥膨胀过程中的污染物去除效果

如图3所示,反应器运行期间全阶段污水处理效果较好,尽管COD和TN的去除效果在系统运行初期曾出现较小的波动,但随着反应器的运行波动现象消失,去除效果转好,说明污泥驯化较为成功.值得注意的是,尽管本实验在低温条件下成功诱发了丝状菌污泥膨胀,但污染物去除效果并未随沉降性能的恶化而变差,反而越来越好,造成该结果的原因主要有以下几点.首先,阶段一运行前期,污泥尚未完全适应本实验的进水水质,所以该阶段一些较差的出水水质拉低了膨胀前系统的污染物平均去除率.而在阶段二开始后,降低的温度虽会影响到部分降解污染物的功能菌的代谢与增殖,但随之发生的污泥膨胀使得丝状菌从絮体内部伸出,产生了网捕作用<sup>[21]</sup>,进而促进了水质的净化,提升了污染物的去除效果.之后,随着污泥沉降性能的继续恶化,丝状菌大量增殖使得网捕作用进一步加大,水质的净化作用进一步提高.此外,由于本实验中在低温条件下大量增殖的优势丝状菌为*Thiothrix*,其脱氮能力



(a) 全阶段污染物进出水及去除率; (b) 不同阶段内污染物平均去除率

图3 全阶段运行期间污染物去除效果

Fig. 3 Pollutants removal effect during the continuous operational period

已在相关报道中得到验证<sup>[22]</sup>,故该菌的大量增殖也是出水水质提升的重要原因.

## 2.2 微生物菌群多样性的整体变化

### 2.2.1 不同污泥样品的多样性分析

为克服传统丝状菌不易纯培养的困境,深度分析不同膨胀状态下活性污泥内微生物菌群结构及多

样性变化,探究污泥微生物与系统沉降性能、出水水质之间的相关关系,选取膨胀前、轻微膨胀及恶性膨胀3个阶段内的污泥样品进行Illumina MiSeq高通量测序,多样性分析结果如表5和图4所示.

由表5可知,从本次测序的3个污泥样品中分别获得了40 671、49 704和43 265条优化序列,为便

表5 不同污泥样品的 $\alpha$ 多样性分析

Table 5 The  $\alpha$  diversity analysis of different sludge samples

样本	序列数 (抽平前)	序列数 (抽平后)	OTU	0.97(相似水平)				
				Ace 指数	Simpson 指数	Sobs 指数	Coverage 指数	Shannon 指数
1	40 671	40 671	855	371	0.026	301	0.999	4.198
2	49 704	40 671	821	345	0.140	322	0.998	3.193
3	43 265	40 671	814	329	0.154	304	0.998	3.093

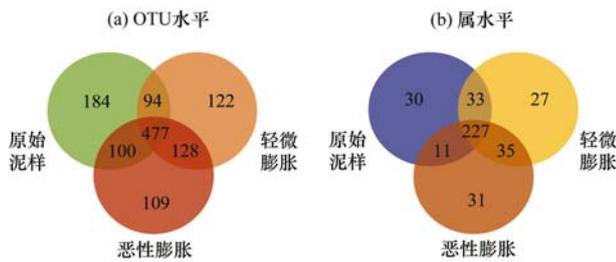


图4 Venn图

Fig. 4 Venn diagram

于后续不同样本微生物多样性之间的对比分析,以最少序列样本 40671 进行数据抽平,抽平后 3 个泥样的微生物序列数据总量一致. 在 97% 的相似水平下进行 Alpha 多样性分析,并对非重复序列进行操作分类单元(OTU)划分,在 3 个不同的污泥样本中分别得到 855、821 和 814 个 OTUs,呈降低趋势,说明随污泥沉降性能的恶化,系统内微生物种类数减少. 此外, Ace 与 Shannon 指数都呈降低趋势, Simpson 指数呈升高趋势,由于 Ace 指数和 Simpson 指数主要用来衡量样本的多样性及反映样品中微生物的丰富度, Ace 指数越小, Simpson 指数越大,则系统内物种多样性越小,而 Shannon 指数除用于评估污泥中的微生物的多样性外,还可用于评估其均一性,可见本实验中微生物的均一性也呈下降趋势. 故随污泥沉降性能的逐渐恶化,系统内的物种种类数、多样性、丰富度及均一性均呈降低趋势. 利用 Venn 图分别在 OTU 水平和属水平进行多样性分析,发现有 498 个 OTUs 和 232 个菌属同时存在于 3 种不同沉降性能的污泥中,这说明尽管运行条件如温度、沉淀时间和污泥沉降性能均发生了较大的改变,实验中污泥样品内的微生物种群整体仍呈稳定状态.

### 2.2.2 微生物菌群整体多样性变化

从图 5 中两种不同分类学水平上的测序结果来看,共有 10 种门类的微生物在膨胀过程中被发现,其中占比排在前三位的分别为变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)和绿弯菌门(Chloroflexi). 作为众多水处理领域微生物研究中的优势门类, Proteobacteria 门的相对丰度由原泥中的 48.54% 上升至恶性膨胀后的 77.96%, 扩大了 60%. 从纲水平的分析结果可知,在脱氮除磷中发挥重要作用的  $\beta$ -变形菌纲( $\beta$ -Proteobacteria)是该门类下的优势菌群,由于其在在本实验中的相对丰度随污泥膨胀的发生先升高后降低,整体呈升高趋势,故对污染物处理效果影响不大. 此外,同样来自 Proteobacteria 门下的  $\alpha$ -变形菌纲( $\alpha$ -Proteobacteria)、 $\gamma$ -变形菌纲( $\gamma$ -Proteobacteria)和  $\delta$ -变形菌纲( $\delta$ -Proteobacteria)的相对丰度分别呈现出

了递增、递减和先增后减的变化趋势,说明同一门类下微生物菌群的相对丰度变化趋势不具有共性.

作为本实验中占比第二大的微生物菌群, Bacteroidetes 门的相对丰度随污泥膨胀的发生呈递减趋势, Hill 等<sup>[23]</sup>的研究认为该门类的微生物具有非常强的营养物质代谢能力,可降解如蛋白质和脂类等复杂的有机物,该门类下的优势菌纲为拟杆菌纲(Bacteroidetes),相对丰度同样呈递减趋势. 有研究称 Chloroflexi 门的微生物不仅广泛存在于城市污水厂中<sup>[24]</sup>,在废水厌氧处理系统及颗粒污泥中也经常出现,且具有较好的生物除磷作用. 该门下的优势菌纲为厌氧绳菌纲(Anaerolineae),其相对丰度随污泥膨胀的发生而降低,而赵婷婷等<sup>[25]</sup>在淀粉废水下的膨胀污泥中也得到了相似结论,说明该菌对污泥膨胀具有一定的指示作用. 作为活性污泥中典型脱氮菌群的硝化螺旋菌门(Nitrospirae)以及该分类下的硝化螺旋菌纲(Nitrospira)随污泥膨胀的发生相对丰度同样不断降低,与 Wang 等<sup>[26]</sup>在实际污水厂中得到的研究结果较为一致. 值得注意的是,常引发活性污泥系统泥水分离问题的放线菌门(Actinobacteria),在本实验中的相对丰度虽呈递增趋势,但总样本量中的整体比例却很小,这说明造成此次污泥膨胀的优势丝状菌并非来自 Actinobacteria 门.

从微生物菌群的整体多样性分析中可以发现,不同菌群的丰度变化与其在污水处理中所执行的功能密切相关,而环境中温度的变化影响并改变了它们在活性污泥中的总体分布,从而引发了污泥膨胀的发生. 如 Nitrospira 及 Anaerolineae 纲在本实验以及其它膨胀研究中表现出的相同变化规律,说明某些菌群与污泥膨胀之间极有可能存在固定的相关关系,如能准确获得这些微生物的具体名称及生理生态学特性或许将为实现污泥膨胀的防治带来可能.

### 2.3 膨胀污泥各特定菌群与特定菌属的变化特征

由于不同菌群在污水处理过程中所执行的功能体现了其独特的生理特性,而环境的变化会通过影响微生物的生理特性来影响污水的处理效果与污泥的沉降性能,故将属水平下检测出的,除名称不明的微生物外的全部菌属进行文献检索后,按照其在研究报道中所展现出的主要功能进行分类,以便于对系统内不同微生物菌群多样性变化的分析. 如图 6 所示,将系统中所有相对丰度  $\geq 0.01\%$  的菌属按照其在污水处理过程中展现的性能进行分类合并后,共得到 5 种不同的微生物群体,分别为在活性污泥中扩散生长并起丝状骨架作用的丝状菌群、起脱氮

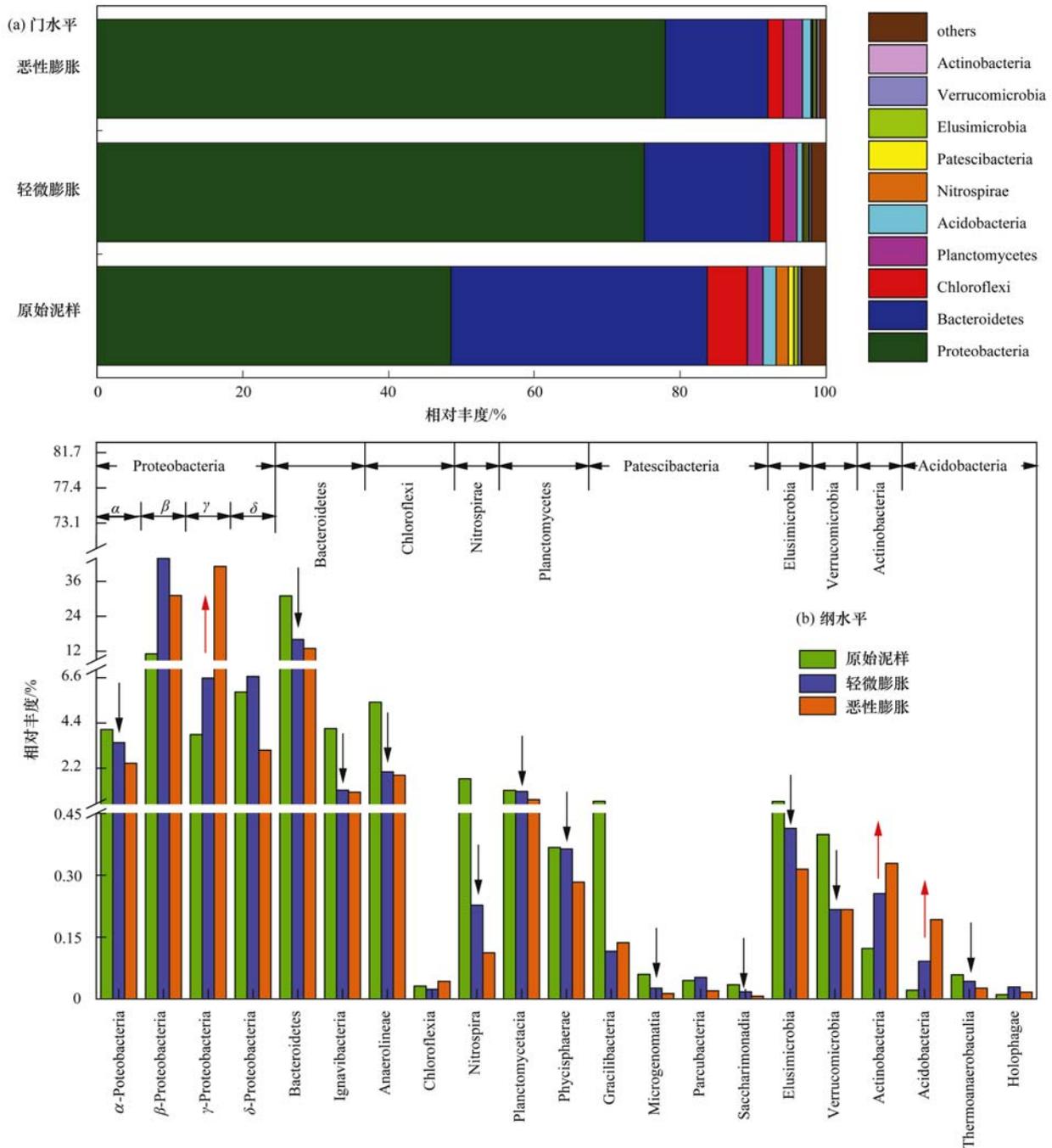


图5 微生物菌群整体多样性变化

Fig. 5 Overall changes in microbial community diversity

除磷作用的脱氮菌群和除磷菌群、其它功能不明的菌胶团菌以及没有检测出名称的其它微生物。可以发现,随污泥沉降性能的恶化,丝状菌群整体的相对丰度显著递增,由阶段一的 0.48% 升至阶段三的 26.04%,扩大了 53.25 倍,而脱氮菌和除磷菌两种功能菌群的相对丰度却呈降低趋势,分别由最初的 19.85% 和 4.25% 降低至轻微膨胀时的 18.43% 和 2.59%,并最终降低至恶性膨胀阶段的 13.51% 和 1.93%,减少了 32% 和 54.59%。除以上在污水处理过程中发挥主要作用的微生物外,系统中检测出的其它菌胶团菌的相对丰度无显著变化,而其它不明

微生物的相对丰度虽呈递减趋势,但由于菌属名称及性质不明,故后续不做进一步的分析。

### 2.3.1 丝状菌的相对丰度变化

如图 7 所示,对膨胀泥样进行的镜检染色显示优势丝状菌呈革兰氏阴性、无分枝、菌丝较粗且内有硫粒积累,推断为发硫菌属 (*Thiothrix*),进一步的 FISH 定性验证了这一推断。此外,实验中共发现 5 种丝状菌属,其中有 3 种的相对丰度随污泥沉降性能恶化呈递增趋势,1 种呈递减趋势,另一种无明显规律。优势丝状菌 *Thiothrix* 在初始泥样中的占比仅为 0.002% 左右,但随恶性膨胀的发生最终提高

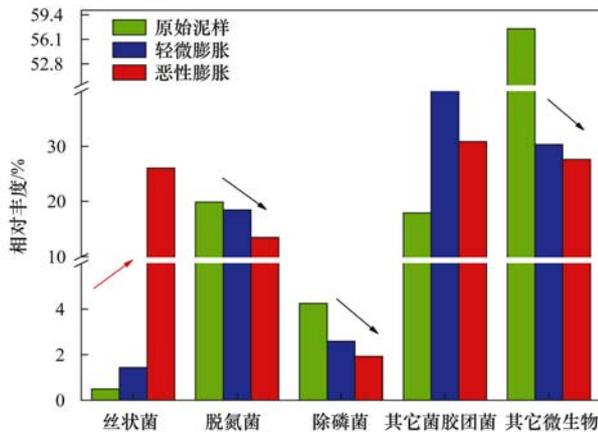
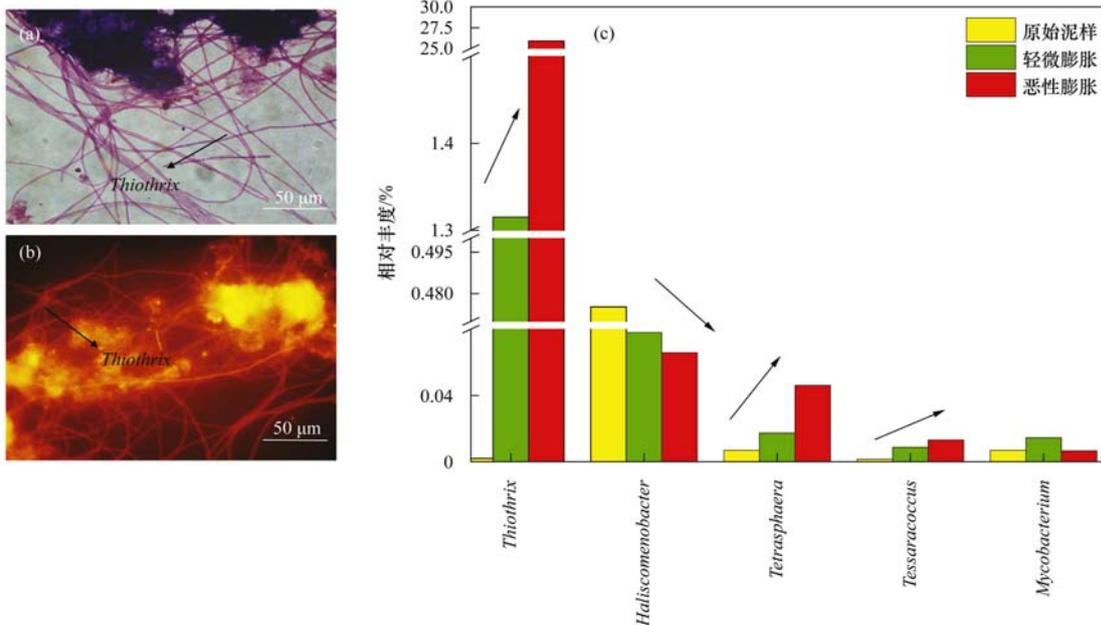


图 6 各特定菌群的微生物多样性变化

Fig. 6 Changes in microbial diversity of specific community

至 25.9%, 成为第一优势丝状菌. *Thiothrix* 来自变形菌门, 生理学的研究表明其具有自养、兼氧特性, 不仅能够以脂肪酸类的低分子化合物为营养源, 还能

将  $\text{NO}_3^-$  还原为  $\text{NO}_2^-$  [27]. *Haliscomenobacter* 是本实验中占比第二的丝状菌属, 研究称 [28] 其丰度一般随水温的升高而下降, 在低温甚至超低温 ( $\leq 10^\circ\text{C}$ ) 下丰度会相对较高, 而在本实验中, 其相对丰度却随温度的降低呈递减趋势, 这说明在本实验中有温度以外的因素对 *Haliscomenobacter* 的丰度产生了影响. 来自 Actinobacteria 门的 *Tetrasphaera* 在本实验中的相对丰度呈递增趋势, 该菌属下的诺卡氏菌 (*Nostocoida limicola*) 是造成活性污泥膨胀的常见物种. 虽然 *Tessaracoccus* 在原始泥样中的相对丰度仅为 0.0015%, 但至阶段末恶性膨胀发生时提升到了 0.013%, 扩大了约 8 倍, 它是一种革兰氏阳性的兼性厌氧菌, 不能运动且不产孢子. 尽管都来自 Actinobacteria 门, 分枝杆菌属 (*Mycobacterium*) 却与 *Tessaracoccus* 不同, 没有明显变化规律.



(a) 革兰氏染色图; (b) FISH 镜检图; (c) 丝状菌的相对丰度变化

图 7 染色镜检与丝状菌的相对丰度变化

Fig. 7 Microscopic staining and changes in relative abundance of filamentous bacteria

### 2.3.2 脱氮菌与除磷菌的相对丰度变化

如图 8 所示, 在本实验发现的参与生物脱氮的 19 种菌属中, 有亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*)、假黄色单胞菌属 (*Pseudoxanthomonas*)、黄杆菌属 (*Flavobacterium*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 和小梨形菌属 (*Pirellula*) 共 5 种菌属的相对丰度呈递增趋势, 硝化螺旋菌属 (*Nitrospira*)、*Dokdonella*、红长命菌属 (*Rubrivivax*)、嗜氢菌属 (*Hydrogenophaga*)、*Ideonella*、红杆菌属 (*Rhodobacter*) 和 *Gemmata* 共 7 种菌属的相对丰度呈递减趋势. 为便于分析, 将这些菌属分成了固氮菌、硝化菌、反硝化菌和厌氧氨氧化菌这 4 个部分, 发现唯一一种来自固氮菌群的菌属

*Bradyrhizobium* 在本实验中的相对丰度先升高后降低, 没有显著规律. 而来自反硝化菌群的 3 种菌属中, *Nitrospira* 是唯一一种丰度递减的菌属, 这可能与既能执行氨氧化功能, 又能执行亚硝酸盐氧化功能的独特性质有关, 作为一种典型的脱氮菌, 在相关研究中相对丰度也随膨胀的发生而逐渐下降 [25], 且被认为与丝状菌存在竞争关系. *Nitrosomonas* 是一种影响含氮污染物转化途径的关键菌属 [29], 在氨氮转化为羟胺的过程中起主导作用, 郝明辉等 [30] 曾筛选出 1 株能进行异养硝化作用, 快速繁殖且可以高效去除氨氮的 *Pseudoxanthomonas* 菌, 而本实验中 *Nitrosomonas* 和 *Pseudoxanthomonas* 菌两者同样递增

的相对丰度说明温度及膨胀对其增殖的影响不大. 在本实验发现的 13 种反硝化菌属中, 占比最大的为来自  $\beta$ -Proteobacteria 纲的 *Thauera*, 该菌属广泛存在于各种类型的废水处理装置中并能降解大部分主要有机物, 是一种具有多种芳香族污染物降解能力的重要功能菌<sup>[31]</sup>. 此外, 本实验还发现了 *Gemmata* 和

*Pirellula* 两种厌氧氨氧化菌属, 尽管黄方玉等<sup>[32]</sup> 在相关研究中认为, 由于厌氧氨氧化菌对温度更敏感, 所以低温条件会引起反应器脱氮性能的下降, 但在本实验中的低温条件下系统仍体现了较好的总氮的去除效果, 且 *Pirellula* 的相对丰度随温度下降呈上升趋势.

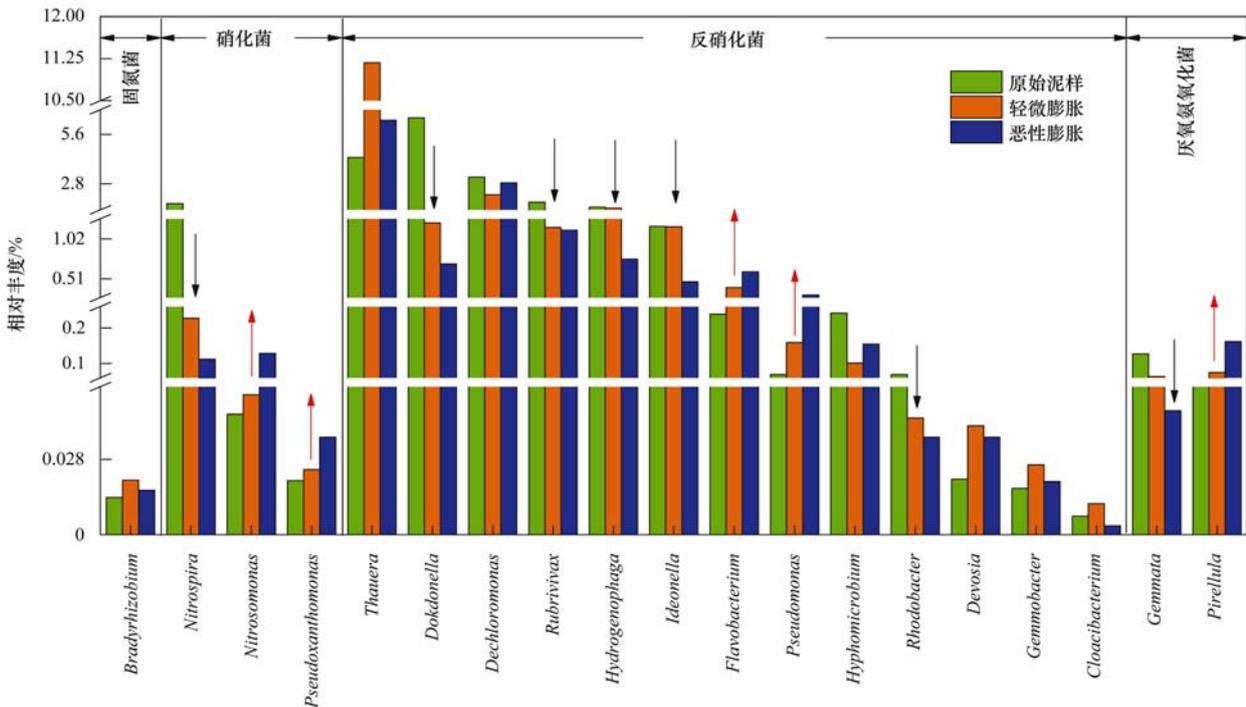


图 8 脱氮菌的相对丰度变化

Fig. 8 Changes in relative abundance of denitrifying bacteria

如图 9 所示, 将本实验中发现的 8 种参与除磷的菌属分为聚磷菌和聚糖菌两大类, 可看出 *Candidatus\_Accumulibacter* 是聚磷菌中占比最大的菌属, 其相对丰度随污泥沉降性能的恶化而逐渐降低, 这与高晨晨等<sup>[33]</sup> 和 Wang 等<sup>[34]</sup> 的研究结果较为

一致, 说明该菌在膨胀污泥中存在较为普遍的丰度降低现象. 同样作为聚磷菌的不动杆菌属 (*Acinetobacter*) 与其变化趋势相同, 该菌属在自然界中分布较为广泛且可以在很宽的温度范围内生长<sup>[35]</sup>, 故其在原泥中 0.39% 到恶性膨胀中 0.0033% 相对丰度的大幅降低表明有温度以外的因素对它的生长产生了影响. 假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 是本实验所发现的聚磷菌中唯一一种相对丰度递增的菌属, 由于其包含多种反硝化聚磷菌, 因而既可被归类于反硝化菌也可被归类于除磷菌. 在发现的 5 种聚糖菌属中, 有 3 种的相对丰度随污泥沉降性能的恶化而递减, 分别为 *Candidatus\_Cometibacter*、*Defluviococcus* 和 *Amaricoccus*, 其中 *C. Cometibacter* 和 *Defluviococcus* 的占比最大, 且在洪颖<sup>[36]</sup> 与 Henriet 等<sup>[37]</sup> 的研究中均被认为是有利于污泥沉降的微生物菌属, 而两者随污泥膨胀呈现出的丰度降低也印证了这种说法. 由于聚糖菌中的 *Amaricoccus* 在原泥中的占比微弱 (0.0034%), 在后续的轻微膨胀及恶性膨胀污泥中均消失不见, 故对污泥性质的影响较小. 作为 EBPR 系统中最丰富的

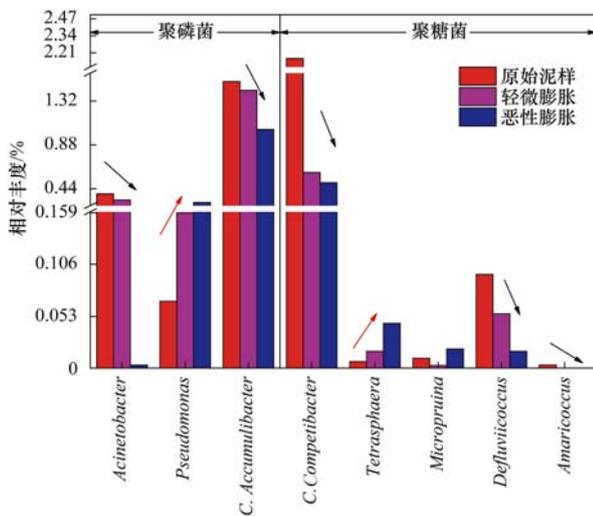


图 9 除磷菌的相对丰度变化

Fig. 9 Changes in relative abundance of phosphate-removing bacteria

除磷菌之一, *Tetrasphaera* 菌属的分类下还含有以 *N. limicola* 为代表的丝状菌, 因而可以参与到污泥膨胀中并表现出逐渐递增的丰度变化. 此外, 唯一一种相对丰度没有发生变化的菌属是 *Micropruina*.

### 2.3.3 其它菌胶团菌的相对丰度变化

如图 10, 为便于分析, 对属水平上发现的其它菌胶团菌中相对丰度占比在前 25 的菌属进行绘图, 发现共有 8 种菌属 (32%) 的相对丰度呈递增趋势, 8 种菌属 (32%) 的相对丰度呈递减趋势, 仅 6 种菌属 (24%) 在活性污泥中的相对丰度超过 1%, 所有菌属大多来自 Proteobacteria 门 (52%) 和 Bacteroidetes 门 (20%). 在 25 种菌属中, 占比最大的为来自  $\beta$ -Proteobacteria 纲的动胶菌属 (*Zoogloea*), 作为一种典型的好氧菌胶团菌, *Zoogloea* 不仅能够有效降低污水的生物需氧量 (BOD) 和化学需氧量 (COD), 在脱氮除磷过程中也发挥着重要作用, 从而在许多污水处理工艺中都占

有优势地位. 虽然在本实验中 *Zoogloea* 的相对丰度先增高后降低, 但其在恶性膨胀时的相对丰度 25.32% 仍远高于原泥中的 2.92%, 说明该菌在低温及膨胀条件下仍能较好地增殖. 在 8 种相对丰度递增的菌属中, 占比最大的为来自  $\delta$ -Proteobacteria 纲的 *Phaselicystis*, 该菌在其它报道中较为少见, 仅刘欣等<sup>[38]</sup>曾在土壤有关的研究中将其划分为类诺卡式菌, 这说明其相对丰度的增高可能与其本身与丝状菌的相似性有关. 而在 8 种相对丰度递减的菌属中, 占比最大的为来自 Bacteroidetes 门的 *Ferruginibacter*, 一种以颗粒态有机物作为电子供体进行降解的絮凝细菌, 且能够参与细胞合成和 EPS 的分泌<sup>[39]</sup>. 刘小博等<sup>[40]</sup>的研究认为该菌属可对菌胶团菌的生长起到积极促进的作用. 由于检测出的其它菌胶团菌数量较多, 且仍有大量菌属在活性污泥中的相对丰度不足 1%, 所以对于这些系统占比较低的微生物在水处理以及污泥膨胀中的影响及意义仍有待考证.

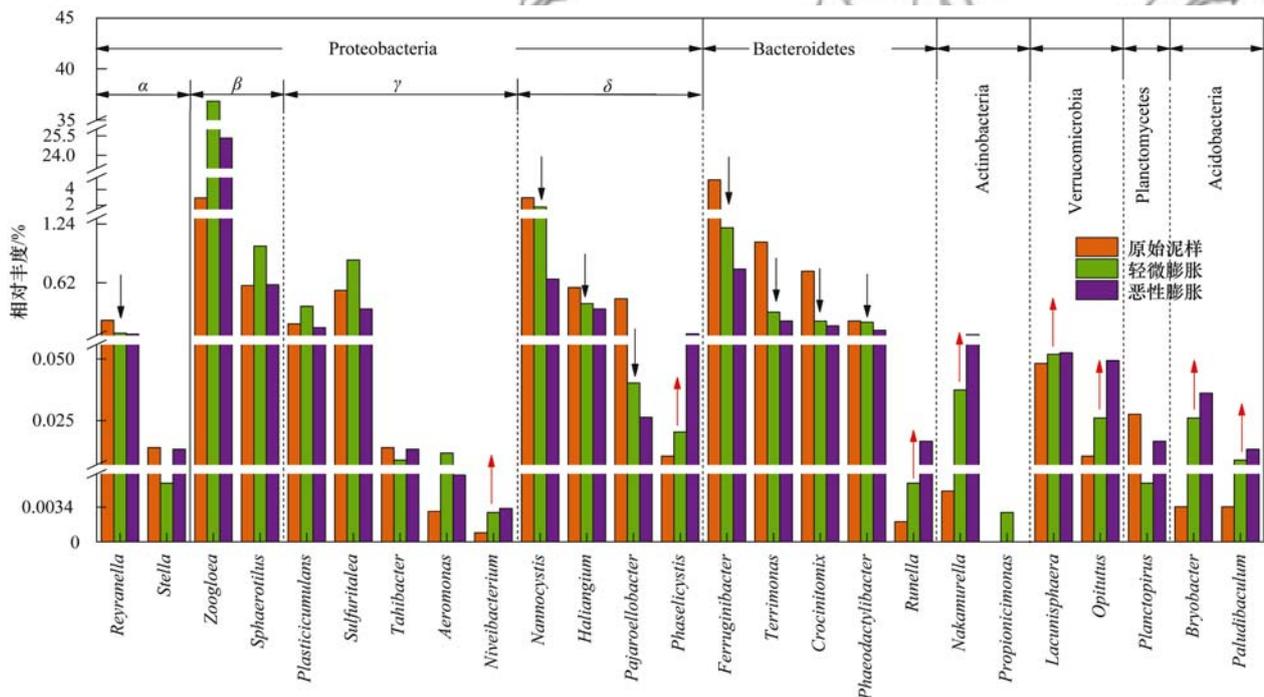


图 10 其它菌胶团菌的相对丰度变化

Fig. 10 Changes in relative abundance of other zoogloea bacteria

## 3 结论

(1) 采用传统硝化反硝化工艺并将运行温度降至  $(14 \pm 1)^\circ\text{C}$  后可成功诱发丝状菌污泥膨胀, SVI 最高可升至  $663.99 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ , 虽然全阶段运行期间污泥沉降性能恶化严重, 但并未影响到污水处理效果, COD 去除率可维持在 90% 左右, TN 去除率可维持在 86% 左右.

(2) 污泥膨胀的发生会导致系统内微生物的多样性减小、均一性降低, 常见门类中 Proteobacteria 门

相对丰度的升高以及 Bacteroidetes 门、Nitrospirae 门和 Patescibacteria 门丰度的降低. 虽然污泥膨胀对微生物菌群结构产生较大影响, 但不同泥样中始终存在的 477 个 OTUs 和 227 个菌属说明反应器内主要微生物的分布仍呈相对稳定状态.

(3) 在特定菌群的分析中, 发现低温下污泥膨胀的发生会引起丝状菌群丰度的升高以及脱氮菌群、除磷菌群丰度的下降. 在特定菌属的分析中, 共发现 5 种丝状菌属, 其中以 *Thiothrix* 为代表的 3 种菌属的丰度递增, 仅 *Haliscomenobacter* 的丰度递减;

共发现 19 种脱氮菌属,其中以 *Nitrosomonas* 为代表的 5 种菌属的丰度递增,以 *Nitrospira* 为代表的 7 种菌属的丰度递减;共发现 8 种除磷菌属,其中 *Pseudomonas* 和 *Tetrasphaera* 的丰度递增,以 *C. Competibacter* 为代表的 5 种菌属丰度递减.

(4)以 *Zoogloea* 为代表的 25 种其它菌胶团菌大多来自 Proteobacteria 门(52%)和 Bacteroidetes 门(20%),其中又以 *Niveibacterium* 为代表的 8 种菌属丰度递增,以 *Reyranella* 为代表的 8 种菌属的丰度递减.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Wang P, Yu Z S, Zhao J H, *et al.* Seasonal changes in bacterial communities cause foaming in a wastewater treatment plant [J]. *Microbial Ecology*, 2016, **71**(3): 660-671.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] Vuilleumier S, Nadalig T, Ul Haque M F, *et al.* Complete genome sequence of the chloromethane-degrading *Hyphomicrobium* sp. Strain MC1 [J]. *Journal of Bacteriology*, 2011, **193**(18): 5035-5036.
- [ 4 ] 高春娣, 安冉, 韩徽, 等. Type 0092 丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3722-3729.  
Gao C D, An R, Han H, *et al.* Realization of limited filamentous bulking with Type 0092 filamentous bacteria as the dominant filamentous bacteria in shortcut nitrification [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3722-3729.
- [ 5 ] 高春娣, 孙大阳, 安冉, 等. 间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3271-3278.  
Gao C D, Sun D Y, An R, *et al.* Stability of nitrification combined with limited filamentous bulking under intermittent aeration [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3271-3278.
- [ 6 ] Nielsen P H, Kragelund C, Seviour R J, *et al.* Identity and ecophysiology of filamentous bacteria in activated sludge [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2009, **33**(6): 969-998.
- [ 7 ] Rossetti S, Tomei M C, Nielsen P H, *et al.* " *Microthrix parvicella* ", a filamentous bacterium causing bulking and foaming in activated sludge systems: a review of current knowledge [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2005, **29**(1): 49-64.
- [ 8 ] 高春娣, 赵楠, 安冉, 等. FNA 对短程硝化污泥菌群结构的影响 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 1977-1984.  
Gao C D, Zhao N, An R, *et al.* Effect of FNA on microorganism community structures of partial nitrification sludge [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 1977-1984.
- [ 9 ] Yuan L, Zhi W, Liu Y S, *et al.* Lead toxicity to the performance, viability, and community composition of activated sludge microorganisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(2): 824-830.
- [ 10 ] 黄薇, 刘兰英, 吴妙鸿, 等. 养殖废水处理系统中微生物菌群结构及动态变化 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 839-848.  
Huang W, Liu L Y, Wu M H, *et al.* Microbial community structure and dynamics in swine wastewater treatment system [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 839-848.
- [ 11 ] Ji B, Zhang X C, Zhang S F, *et al.* Insights into the bacterial species and communities of a full-scale anaerobic/anoxic/oxic wastewater treatment plant by using third-generation sequencing [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2019, **128**(6): 744-750.
- [ 12 ] 谢慧娜, 王亚娥, 李杰, 等. 不同价态铁处理腈纶废水过程中菌群结构分析 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(9): 3406-3412.  
Xie H N, Wang Y E, Li J, *et al.* Analysis of microbial community structure in acrylic fiber wastewater treated by different valence forms of iron [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(9): 3406-3412.
- [ 13 ] Nakasaki K, Koyama M, Maekawa T, *et al.* Changes in the microbial community during the acclimation process of anaerobic digestion for treatment of synthetic lipid-rich wastewater [J]. *Journal of Biotechnology*, 2019, **306**: 32-37.
- [ 14 ] Bengtsson-Palme J, Milakovic M, Švecová H, *et al.* Industrial wastewater treatment plant enriches antibiotic resistance genes and alters the structure of microbial communities [J]. *Water Research*, 2019, **162**: 437-445.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] GB 18918-2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准 [S].
- [ 17 ] 焦二龙. 污水生物脱氮过程丝状菌污泥膨胀与控制研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [ 18 ] Amann R I, Binder B J, Olson R J, *et al.* Combination of 16S rRNA-targeted oligonucleotide probes with flow cytometry for analyzing mixed microbial populations [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1990, **56**(6): 1919-1925.
- [ 19 ] Daims H, Brühl A, Amann R, *et al.* The domain-specific probe EUB338 is insufficient for the detection of all *Bacteria*: development and evaluation of a more comprehensive probe set [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1999, **22**(3): 434-444.
- [ 20 ] Wagner M, Amann R, Kämpfer P, *et al.* Identification and *in situ* detection of Gram-negative filamentous bacteria in activated sludge [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1994, **17**(3): 405-417.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] Trubitsyn I V, Belousova E V, Tutukina M N, *et al.* Expansion of ability of denitrification within the filamentous colorless sulfur bacteria of the genus *Thiothrix* [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2014, **358**(1): 72-80.
- [ 23 ] Hill V R, Kahler A M, Jothikumar N, *et al.* Multistate evaluation of an ultrafiltration-based procedure for simultaneous recovery of enteric microbes in 100-liter tap water samples [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(13): 4218-4225.
- [ 24 ] Larsen P, Nielsen J L, Otzen D, *et al.* Amyloid-like adhesins produced by floc-forming and filamentous bacteria in activated sludge [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, **74**(5): 1517-1526.
- [ 25 ] 赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 等. 淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 321-329.  
Zhao T T, Qiao K, Wang L, *et al.* Measurements of bacterial community and biodiversity from activated sludge for a wastewater treatment containing starch [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 321-329.
- [ 26 ] 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.
- [27] Aruga S, Kamagata Y, Kohno T, *et al.* Characterization of filamentous Eikelboom type O21N bacteria and description of *Thiothrix disciformis* sp. Nov. and *Thiothrix flexilis* sp. nov.[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2002, **52**(4): 1309-1316.
- [28] Ma Z, Wen X H, Zhao F, *et al.* Effect of temperature variation on membrane fouling and microbial community structure in membrane bioreactor[J]. Bioresource Technology, 2013, **133**: 462-468.
- [29] Yu T, He P J, Lü F, *et al.* Mediating N<sub>2</sub>O emissions from municipal solid waste landfills: impacts of landfill operating conditions on community structure of ammonia-oxidizing bacteria in cover soils[J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(5): 882-889.
- [30] 郝明辉, 于鲁冀, 李廷梅, 等. 一株异养硝化菌的筛选及生长特性研究[J]. 生物技术通报, 2016, **32**(4): 168-174.  
Hao M H, Yu L Y, Li T M, *et al.* Screening and growth characteristics of a heterotrophic nitrification bacterium [J]. Biotechnology Bulletin, 2016, **32**(4): 168-174.
- [31] 郑林雪, 李军, 胡家玮, 等. 同步硝化反硝化系统中反硝化细菌多样性研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 116-121.  
Zheng L X, Li J, Hu J W, *et al.* Analysis of denitrifying bacteria community composition in simultaneous nitrification and denitrification systems[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(1): 116-121.
- [32] 黄方玉, 邓良伟, 杨红男, 等. 温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2357-2367.  
Huang F Y, Deng L W, Yang H N, *et al.* Effect of different temperatures on the performance of autotrophic nitrogen removal and microbial community from swine wastewater [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2357-2367.
- [33] 高晨晨, 游佳, 陈轶, 等. 丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2794-2801.  
Gao C C, You J, Zheng Y, *et al.* Effect of denitrification and phosphorus removal microorganisms in activated sludge bulking caused by filamentous bacteria [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2794-2801.
- [34] Wang J, Qi R, Liu M M, *et al.* The potential role of 'Candidatus *Microthrix parvicella*' in phosphorus removal during sludge bulking in two full-scale enhanced biological phosphorus removal plants[J]. Water Science & Technology, 2014, **70**(2): 367-375.
- [35] Saunders A M, Oehmen A, Blackall L L, *et al.* The effect of GAOs (glycogen accumulating organisms) on anaerobic carbon requirements in full-scale Australian EBPR (enhanced biological phosphorus removal) plants[J]. Water Science and Technology, 2003, **47**(11): 37-43.
- [36] 洪颖, 姚俊芹, 马斌, 等. 基于高通量测序的 SBR 反应器丝状膨胀污泥菌群分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3279-3285.  
Hong Y, Yao J Q, Ma B, *et al.* Filamentous sludge microbial community of a SBR reactor based on high-throughput sequencing [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3279-3285.
- [37] Henriot O, Meunier C, Henry P, *et al.* Filamentous bulking caused by *Thiothrix* species is efficiently controlled in full-scale wastewater treatment plants by implementing a sludge densification strategy [J]. Scientific Reports, 2017, **7**(1): 1430.
- [38] 刘欣, 李志英, 刘瑞瑞, 等. 大豆不同生育期根际土壤细菌群落结构的变化[J]. 广西植物, 2018, **38**(10): 1363-1370.  
Liu X, Li Z Y, Liu R R, *et al.* Changes of bacterial flora structure in rhizosphere soil of soybean at different growth stages [J]. Guihaia, 2018, **38**(10): 1363-1370.
- [39] 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.
- [40] 刘小博, 袁林江, 陈希, 等. 有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3186-3194.  
Liu X B, Yuan L J, Chen X, *et al.* Effect of organic characteristics on sludge settleability in an AAO System [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3186-3194.

## CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China .....	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change .....	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM <sub>2.5</sub> Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou .....	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter .....	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province .....	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan .....	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu .....	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou .....	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan .....	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode .....	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer .....	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language .....	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou .....	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode .....	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO <sub>x</sub> Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process .....	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City .....	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter .....	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain .....	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin .....	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin .....	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors .....	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake .....	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed .....	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China .....	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang .....	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin .....	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir .....	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes .....	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet .....	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater .....	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River .....	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo .....	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir .....	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems .....	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water .....	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar .....	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe <sup>0</sup> /WMF) .....	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite .....	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter .....	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater .....	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge .....	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature .....	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China .....	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network .....	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N <sub>2</sub> O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil .....	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China .....	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils .....	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil .....	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai .....	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings .....	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)