

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性

高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程丽阳, 彭永臻

(北京工业大学环境与生命学部, 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: 丝状菌作为污水生物处理中的常见菌种, 被认为是诱发污泥膨胀的主要因素。然而由于其特殊的丝状形态, 对污泥颗粒的形成起到了至关重要的作用。以丝状菌膨胀污泥为研究对象, 探究丝状菌对污泥颗粒化过程及维持污泥颗粒稳定性的影响, 并对污泥系统微生物多样性进行分析。试验分别接种丝状菌膨胀污泥 ($SVI = 241.56 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$) 和絮状污泥 ($SVI = 64.22 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$) 进行颗粒化培养, 结果表明, 膨胀污泥和絮状污泥颗粒出现时间分别为 20 d 和 40 d, 成熟颗粒粒径分别为 $650 \mu\text{m}$ 和 $700 \mu\text{m}$, 膨胀污泥颗粒化时间仅为絮状污泥的一半。缺氧区添加后, 颗粒都有不同程度破碎, 但膨胀污泥培养的成熟颗粒 SV_{30}/SV_5 值短期波动后恢复至 1, 维持稳定性能力更强。微生物群落结构分析表明, 膨胀污泥中 *norank_o_Saccharimonadales*、*unclassified_o_Saccharimonadales* 和 *unclassified_f_Saccharimonadaceae* 相对丰度从 0.05%、0.01% 和 0.01% 增长至 4.09%、3.15% 和 1.12%, 此类疏水性细菌存在及累积对快速颗粒化有重要意义。在膨胀污泥 SBR_1 和絮状污泥 SBR_2 反应器中, COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率分别为 94%、99%、35% 和 92%、97%、30%, 去除效果差别不大; 而 TP 去除率分别为 60% 和 30%。

关键词: 丝状菌; 膨胀污泥; 好氧颗粒; 稳定性; 微生物群落结构

中图分类号: X172; X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)07-3718-12 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202110105

Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge

GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, HAN Ying-lu, CHENG Li-yang, PENG Yong-zhen

(National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Faculty of Environment and Life, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Filamentous bacteria, as one of the common bacteria types in wastewater biological treatment, are considered to be the main factor to induce sludge bulking. However, because of its special filamentous shape, it plays a crucial role in the formation of sludge particles. Taking filamentous bulking sludge as the research object, the effect of filamentous bacteria on the sludge granulation process and maintaining the stability of sludge granules was studied, and the microbial diversity of the sludge system was analyzed. Filamentous bulking sludge ($SVI = 241.56 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$) and flocculated sludge ($SVI = 64.22 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$) were respectively inoculated to carry out granulation culture. The results showed that the time of particle appearance of bulking sludge and flocculated sludge was 20 days and 40 days, respectively; the mature particle sizes were $650 \mu\text{m}$ and $700 \mu\text{m}$, respectively; and the granulation time of bulking sludge was only half that of flocculated sludge. After adding the anoxic zone, the granules were broken to differing degrees, but the SV_{30}/SV_5 value of mature granules recovered to 1 after short-term fluctuation, and the stability of the mature granules was stronger. The analysis of microbial community structure showed that the relative abundance of *norank_o_Saccharimonadales*, *unclassified_o_Saccharimonadales*, and *unclassified_f_Saccharimonadaceae* increased from 0.05%, 0.01%, and 0.01% to 4.09%, 3.15%, and 1.12%. The existence and accumulations of these hydrophobic bacteria were important for rapid granulation. The removal rates of COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, and TN were 94%, 99%, and 35% and 92%, 97%, and 30%, respectively, in SBR_1 of bulking sludge and SBR_2 of flocculated sludge, and the removal rates of TP were 60% and 30%, respectively.

Key words: filamentous bacteria; sludge bulking; aerobic granule; stability; microbial community structure

好氧颗粒污泥 (AGS) 是微生物在一定条件下的自絮凝过程^[1]。和传统活性污泥法相比, 它具有沉速快, 微生物量大, 耐冲击负荷高以及对毒物的强耐受力等优势^[2,3], 但是, AGS 培养时间长和不稳定性制约了颗粒污泥在污水处理中的大规模应用^[4]。

加快 AGS 培养策略主要通过向良好絮状污泥中投加絮凝剂和惰性载体、添加钙铁金属离子、接种成熟 AGS 和投加特殊菌种等方法^[5]。宋志伟等^[6]的研究通过向系统投加生物絮凝剂, 加快污泥颗粒化过程。Kong 等^[7]的研究采用在良好絮状污泥中添加铁离子来培养 AGS。Pijuan 等^[8]的研究采用絮状污泥和破碎的 AGS 混合进行颗粒化培养, 18 d 完成颗粒化。尹志文等^[9]的研究为了加快 AGS 的培养, 将黄孢原毛平革菌 (*Phanerochaete chrysosporium*) 菌丝球作为诱导凝结核投入活性污泥

中, 力求缩短 AGS 培养时间。

近年来, 随着研究的不断深入, 丝状菌结构在 AGS 培养过程中逐渐受到关注。丝状菌作为污水生物处理中的常见菌种, 对 AGS 的良好运行起到重要作用^[10]。有研究证明, 丝状细菌可以促进大粒径 AGS 的形成^[11]。De Graaff 等^[12]的研究通过硫酸盐和硫代硫酸盐培养硫丝菌为主体的 AGS, 实现长期稳定运行。Zou 等^[13]的研究通过向 AGS 中添加 BAS, 促进 AGS 的形成。

丝状菌膨胀污泥含有丰富的丝状菌种类, 对其进行接种进行颗粒化培养, 探究丝状菌和 AGS 形成的相

收稿日期: 2021-10-14; 修订日期: 2021-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51478012)

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、丝状菌污泥膨胀机制与控制, E-mail: gaochundi@bjut.edu.cn

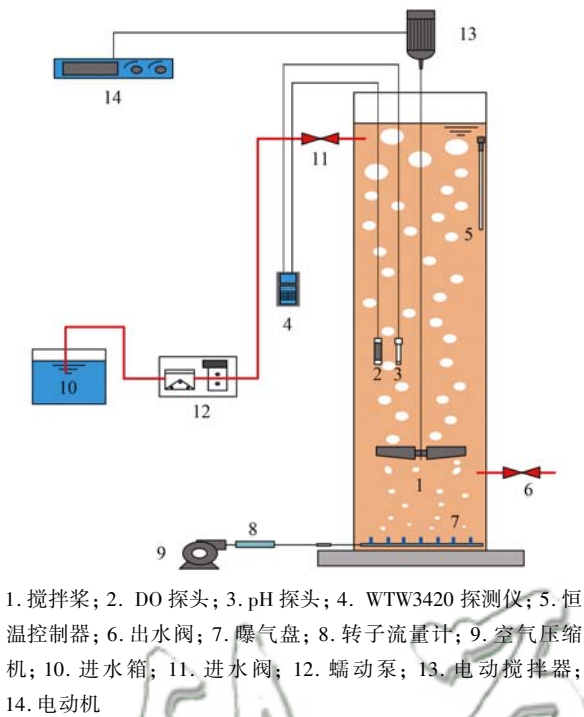
互作用的研究屈指可数. 关于影响 AGS 稳定运行方面的因素, 主要集中于运行条件的变化, 比如碳氮比、溶解氧、有机负荷、温度和水力剪切力等方面^[14]. 膨胀污泥和絮状污泥在相同运行条件下, 两者对于维持稳定性是否有差别, 需要深入研究.

因此, 本研究将分别接种膨胀污泥和絮状污泥作为试验种泥, 对比两种类型污泥的颗粒化过程及稳定性; 利用具有低成本、速度快、灵敏度高、准确度高^[15]且可全面分析环境中绝大部分微生物特点的高通量测序技术对微生物群落结构及多样性进行分析; 探究不同条件下污染物去除效果, 旨在为 AGS 的实际稳定运行提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行

本试验采用两个完全相同的序批式(SBR)反应器, 装置如图 1. SBR 反应器由双层有机玻璃构成, 配有曝气盘, 转子流量计和空气压缩机等. WTW-3420 型溶氧仪实时监测反应器内 DO 和 pH 值. 反应器有效容积(V)6 L, 高(H)90 cm, 高径比(H/D)10, 出水口距底部 24 cm. 进水、曝气、沉淀和排水时间均由智能控制装置进行控制, 恒温装置维持反应器运行温度在 25℃ 左右.



1. 搅拌桨; 2. DO 探头; 3. pH 探头; 4. WTW3420 检测仪; 5. 恒温控制器; 6. 出水阀; 7. 曝气盘; 8. 转子流量计; 9. 空气压缩机; 10. 进水箱; 11. 进水阀; 12. 蠕动泵; 13. 电动搅拌器; 14. 电动机

图 1 SBR 反应器示意
Fig. 1 Hint of SBR reactor

本试验每天运行 4 个周期, 每个周期为 6 h, 体积交换率为 67%. 反应器表观气速为 $5.24 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\text{DO} > 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各阶段运行方式见表 1.

表 1 反应各阶段运行方式

Table 1 Operation mode of each reaction stage

名称	阶段	周期/个	进水/min	缺氧/min	曝气/min	沉淀/min	说明
SBR ₁ (膨胀种泥)	I	1 ~ 250	4	无	306 ~ 350	50, 30, 10, 6	纯曝气
	II	250 ~ 350	4	120	230	6	增加缺氧段
SBR ₂ (絮状种泥)	I	1 ~ 250	4	无	306 ~ 350	30, 10, 6	纯曝气
	II	250 ~ 350	4	120	230	6	增加缺氧段

1.2 种泥来源及试验水质

SBR₁ 接种的膨胀污泥取自某水厂序批式反应器, MLSS 为 $2\,608 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SVI 为 $241.56 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. SBR₂ 接种的絮状污泥取自二沉池回流污泥, MLSS 为 $3\,737 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SVI 为 $64.22 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 革兰氏染色如图 2. 观察到 SBR₁ 污泥絮体结构松散, 大量丝状菌伸出絮体外部, 发生丝状菌污泥膨胀; SBR₂ 污泥絮体结构紧致, 存在极少丝状菌.

本试验采用人工配水, 水质成分见表 2 和表 3.

表 2 人工配水水质

Table 2 Quality of artificial water distribution

成分	浓度 /mg·L ⁻¹	成分	浓度 /mg·L ⁻¹
葡萄糖	566.1	CaCl ₂	11.11
NH ₄ Cl	229.3	MgSO ₄ ·7H ₂ O	91.2
KH ₂ PO ₄	43.9	微量元素	0.4

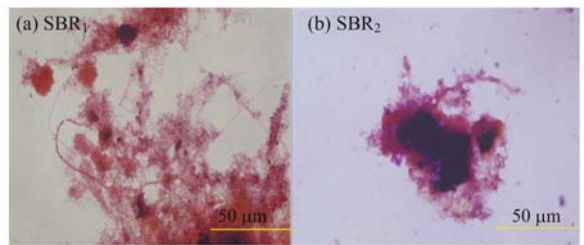


图 2 革兰氏染色

Fig. 2 Gram staining

表 3 微量元素配方

Table 3 Formula of trace elements

项目	浓度/g·L ⁻¹	项目	浓度/g·L ⁻¹
FeCl ₃ ·6H ₂ O	1.5	MnCl ₂ ·H ₂ O	0.12
H ₃ BO ₃	0.15	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.06
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.03	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.12
KI	0.18	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.15
EDTA	10		

1.3 常规分析项目与方法

SV 测定采用体积沉降比法; MLSS 和 MLVSS 测定分别采用重量法和马弗炉燃烧减重法; NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P 的测定参照文献[16]的方法. COD 采用连华科技 5B-3COD 快速测定仪器测定. pH、DO 和温度采用 WTW-3420 型测定仪测定.

EPS 提取采用 NaCl 热提法^[17], 其中的蛋白质(PN)和多糖(PS)分别采用酚试剂法(Lowry)和蒽酮硫酸法测定. 好氧颗粒污泥粒度分布采用激光粒度仪(MASTERSIZER S3500)分析测定. Olympus BX61 荧光显微镜进行常规镜检; AGS 形态结构采用扫描电镜(SEM S-3400N)测定.

1.4 高通量测序

高通量测序方法如下: 首先采用土壤 DNA 提取试剂盒完成泥样 DNA 提取, 并利用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测. 之后按指定测序区域(本文中细菌: 16S rRNA V3-V4 区域; 真菌: ITS1 区域), 合成特异引物. 其中 PCR 采用 TransGen AP221-02: TransStart Fastpfu DNA Polymerase; PCR 仪: ABI Geneamp@9700 型. 每个样品扩增 3 次并将 PCR 产物混合, 混合后用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测, 并使用

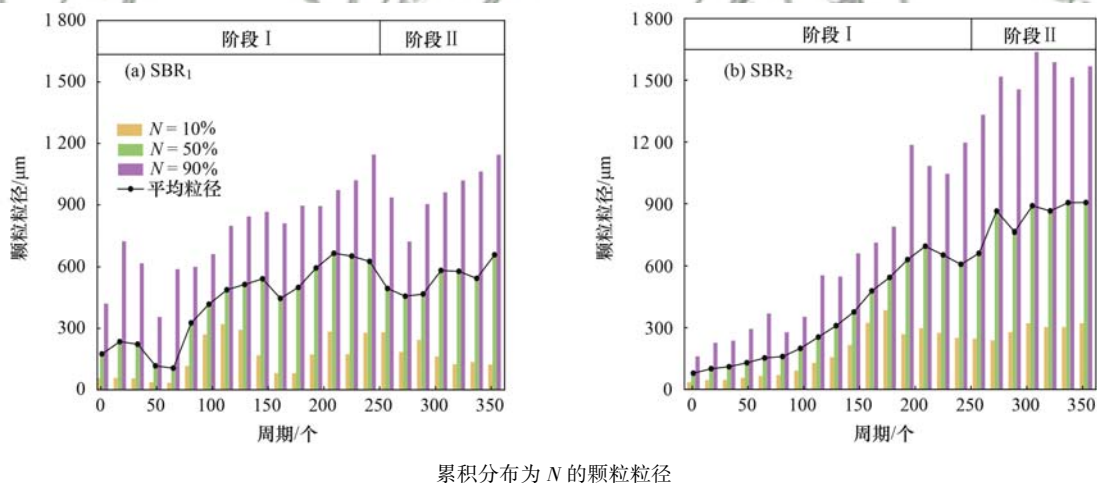
AxyprepDNA 凝胶回收试剂盒切胶回收 PCR 产物. 最后 PCR 产物用 QuantiFluor™-ST 蓝色荧光定量系统进行检测定量, 并按照每个样品的测序量要求, 进行相应比例混合, 后建库上机测序.

测序后得到的 PE reads 首先根据 overlap 关系进行拼接, 同时对序列质量进行质控和过滤, 均一化处理后, 按照相似度(一般为 97%)进行 OUT 聚类. 借助美吉生物云平台进行 α 多样性分析和物种组成分析, 借助 Excel 对相对丰度数据整理汇总, 采用 Origin 软件进行绘图.

2 结果与讨论

2.1 污泥颗粒化进程及颗粒形态分析

通常将粒径大于 0.3 mm 的污泥称为颗粒污泥. 如图 3, SBR_1 和 SBR_2 分别在 20 d 和 40 d 出现颗粒, SBR_1 颗粒化时间更短, 可能是 SBR_1 接种污泥来源于水厂序批式反应器, 较大的高径比和表观气速对颗粒生长的贡献作用^[18], 污泥初始粒径较大; 其次污泥处于膨胀状态, 存在部分疏水性丝状细菌加速颗粒化. Wilén 等^[19]的研究表明, 种泥存在一定数量的疏水性细菌可以导致更快的颗粒化速度.



累积分布为 N 的颗粒粒径

图 3 颗粒粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution

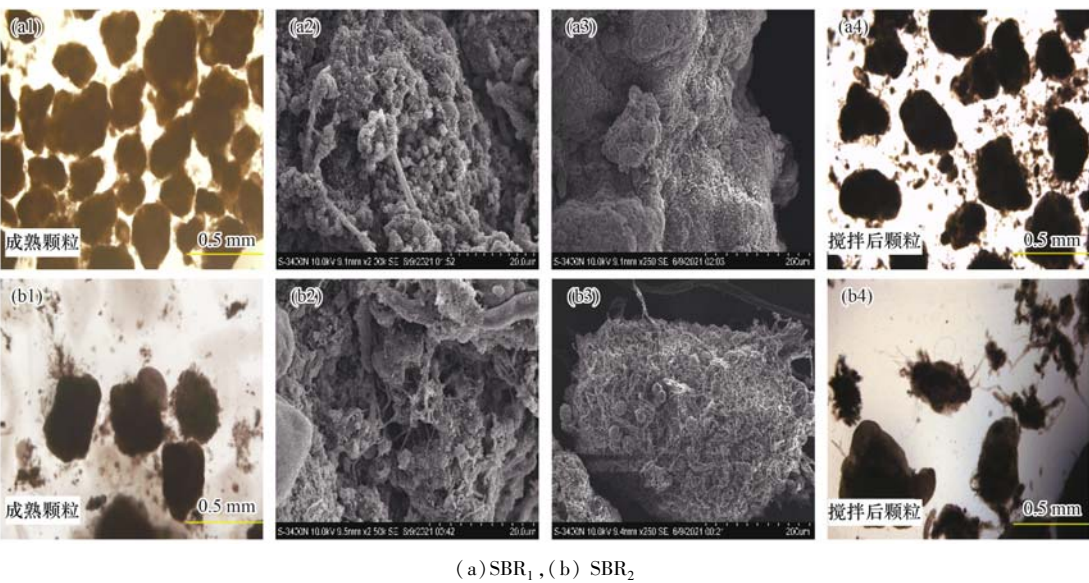
阶段 I, 两反应器污泥粒径都不断增大, SBR_1 和 SBR_2 颗粒成熟后粒径分别为 650 μm 和 700 μm . 如图 4(a1)~4(a3)所示, SBR_1 成熟颗粒污泥形状规则, 表面光滑, 大量的杆菌和球菌紧密结合在一起, 丝状菌作为骨架支撑颗粒结构. 此外, 观察到有少量缝隙存在, 这些缝隙可作为物质间的交换通道. 如图 4(b1)~4(b3)所示, SBR_2 成熟颗粒污泥形状不规则, 表面粗糙, 存在绒毛, 并伴随大量累枝虫出现, 整个颗粒结构疏松.

阶段 II, SBR_1 粒径明显下降, 从 650 μm 降到

400 μm , 但 15 d 内得到快速恢复, 最终稳定在 600 μm 左右. 如图 4(a4)所示, SBR_1 出现少量絮状污泥, 但整体颗粒状态未受到影响. SBR_2 粒径轻微增长到 800 μm . 如图 4(b4)所示, SBR_2 观察到丝状真菌从颗粒内部延伸出来, 干扰颗粒状态.

2.2 污泥沉降性能及稳定性分析

如图 5 所示, 阶段 I, SBR_1 和 SBR_2 污泥浓度分别从 2 608 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 3 737 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至成熟颗粒 5 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 4 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 逐渐减少沉淀时间的颗粒培养方式使 SBR_1 和 SBR_2 污泥浓度都反复



(a) SBR₁, (b) SBR₂

图 4 颗粒形态观察

Fig. 4 Particle morphology observation

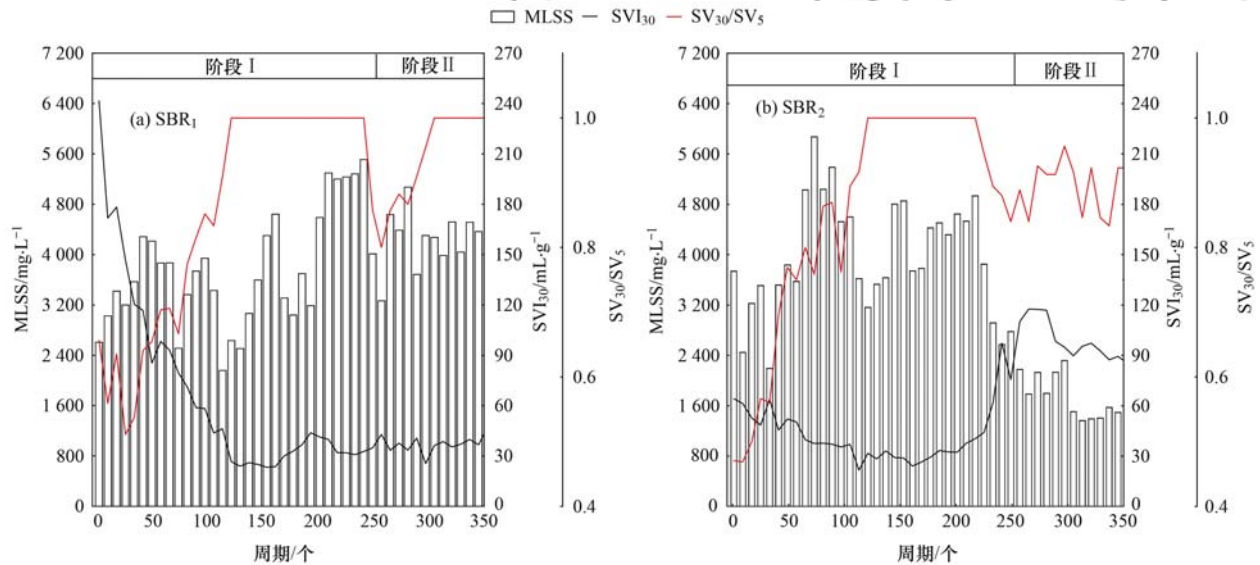


图 5 SBR₁ 和 SBR₂ 颗粒化过程的 MLSS、SVI₃₀ 和 SV₃₀/SV₅ 变化

Fig. 5 Changes in MLSS, SVI₃₀, and SV₃₀/SV₅ during granulation of SBR₁ and SBR₂

出现上升下降.成熟颗粒 SVI₃₀ 都稳定在 30 mL·g⁻¹ 左右,保持着良好的沉降性.此外, SV₃₀/SV₅ 还反映污泥颗粒化程度,成熟颗粒 SV₃₀/SV₅ 为 1,污泥颗粒化完整.

阶段 II, SBR₁ 颗粒破碎为絮体,MLSS 轻微下降并稳定在 4 000 mg·L⁻¹, SVI₃₀ 在 40 mL·g⁻¹ 左右. SV₃₀/SV₅ 下降,但很快重新得到恢复. SBR₂ 污泥流失严重,MLSS 下降至 1 000 mg·L⁻¹, SVI₃₀ 迅速上升,颗粒污泥发生真菌膨胀, SV₃₀/SV₅ 值持续波动,颗粒完整性遭到破坏.

2.3 污泥 EPS 含量及三维荧光分析

如图 6 所示,阶段 I, SBR₁ 和 SBR₂ 的 EPS 含量(以 VSS 计)分别从 108.10 mg·g⁻¹ 和 126.83

mg·g⁻¹ 增加至成熟颗粒 220.87 mg·g⁻¹ 和 174.39 mg·g⁻¹. EPS 是由特定微生物分泌的黏性物质,有利于细菌絮凝和颗粒化进程^[20]. 阶段 II, SBR₁ 和 SBR₂ 的 EPS 含量下降.

蛋白质(PN)和多糖(PS)是 EPS 的主要组成成分,且 PN/PS 对颗粒化及稳定性具有指示作用^[21]. 阶段 I, SBR₁ 和 SBR₂ 中 PN/PS 分别从 2.41 和 3.0 上升为成熟颗粒污泥 4.34 和 4.15. 整体来看, PN/PS 在 SBR₁ 中增速较快,且最终 PN/PS 大于 SBR₂ 中. 阶段 II, PN/PS 都有不同程度下降. 推测 SBR₁ 中较快的 PN/PS 增值和高 EPS 含量可能也是 SBR₁ 颗粒化速度比 SBR₂ 快的原因.

分别对 SBR₁ 和 SBR₂ 种泥及成熟颗粒污泥进

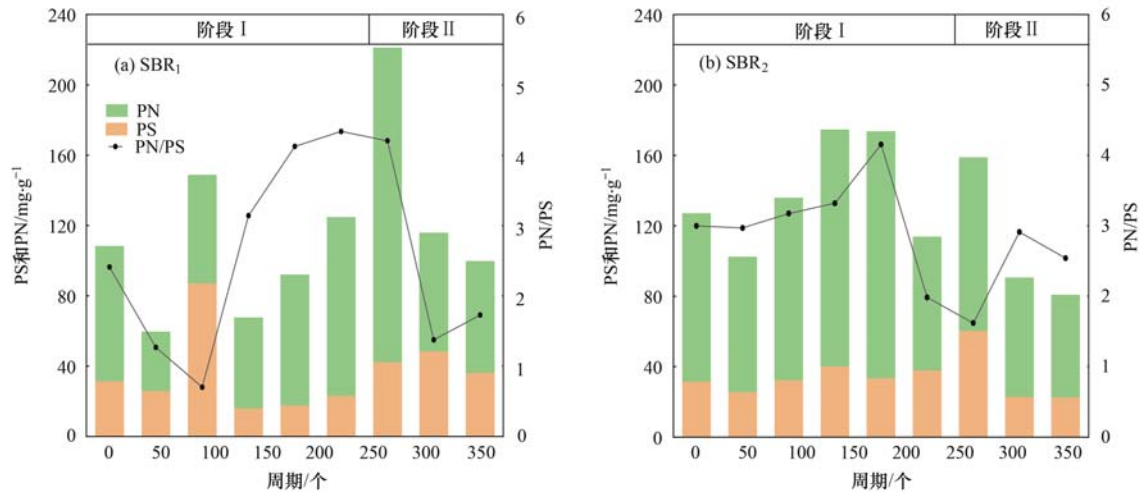


图6 EPS含量和PN/PS变化

Fig. 6 EPS content and PN/PS values

行三维荧光分析,如图7所示,出现的激发/发射(E_x/E_m)荧光峰如下:芳香族蛋白类荧光峰A^[22](E_x 为280~290 nm, E_m 为335~345 nm),荧光峰B(E_x 为225~230 nm, E_m 为305~335 nm);类腐殖酸荧光峰C^[23](E_x 为350~365 nm, E_m 为440~445 nm),荧光峰D(E_x 为275 nm, E_m 为440 nm)。

蛋白类荧光峰A和B出现在SBR₁和SBR₂成熟颗粒中,说明PN对AGS的形成至关重要,有研究证明蛋白质可以增强污泥的疏水性^[24],有利于污泥颗粒化。SBR₁成熟颗粒污泥荧光峰A和B的

荧光强度与膨胀污泥基本相同,是因为膨胀污泥在颗粒化过程中,SV₃₀下降导致污泥微生物种类变化,PN含量也随之变化,PN/PS先下降后上升。而SBR₂成熟颗粒污泥荧光峰A和B的荧光强度要高于接种的絮状污泥,说明在SBR₂颗粒化过程中,蛋白类物质的含量在增加。Lurie等^[25]的研究发现腐殖质成分中包含的羧基等官能团,氢离子可解离与溶液中阳离子进行置换,具有高负电荷,不利于污泥颗粒化。但类腐殖酸荧光峰C和D在两反应器中荧光强度弱,未对污泥颗粒化及絮凝能力产生负影响。

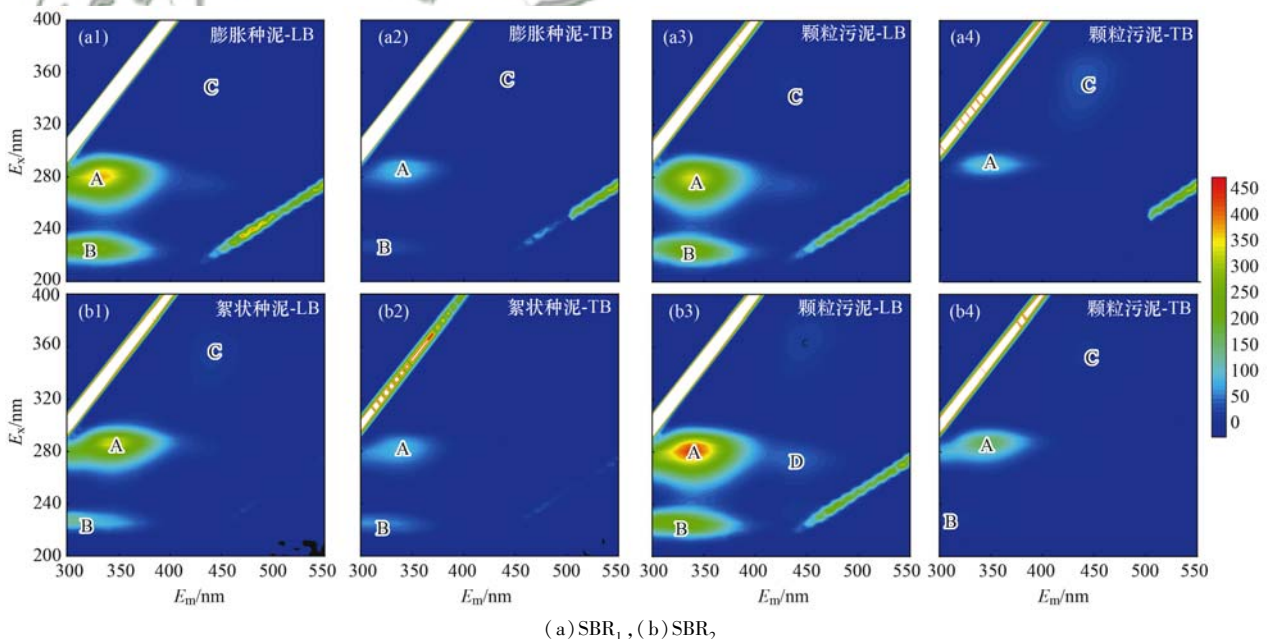


图7 不同状态下AGS的3D-EEM光谱

Fig. 7 3D-EEM spectra of AGS in different states

2.4 污染物去除效果

如图8所示,阶段I末期颗粒成熟后,SBR₁和SBR₂系统的COD、NH₄⁺-N、TN去除率分别为

94%、99%、35%和92%、97%、30%,去除效果接近,两系统的脱氮产物都是NO₃⁻-N。阶段II缺氧区添加后,SBR₁和SBR₂系统的COD和NH₄⁺-N去除效

果基本保持不变.但值得注意的是 SBR₁ 脱氮产物 NO₃⁻-N 含量明显减少,TN 去除率上升至 55%,提高了系统的反硝化能力. SBR₂ 系统出现 NO₂⁻-N 累积,

TN 去除率上升为 60%,比 SBR₁ 反硝化效果稍好.分析原因可能是 SBR₂ 平均粒径比 SBR₁ 大,同步硝化反硝化效果强,TN 去除效果好.

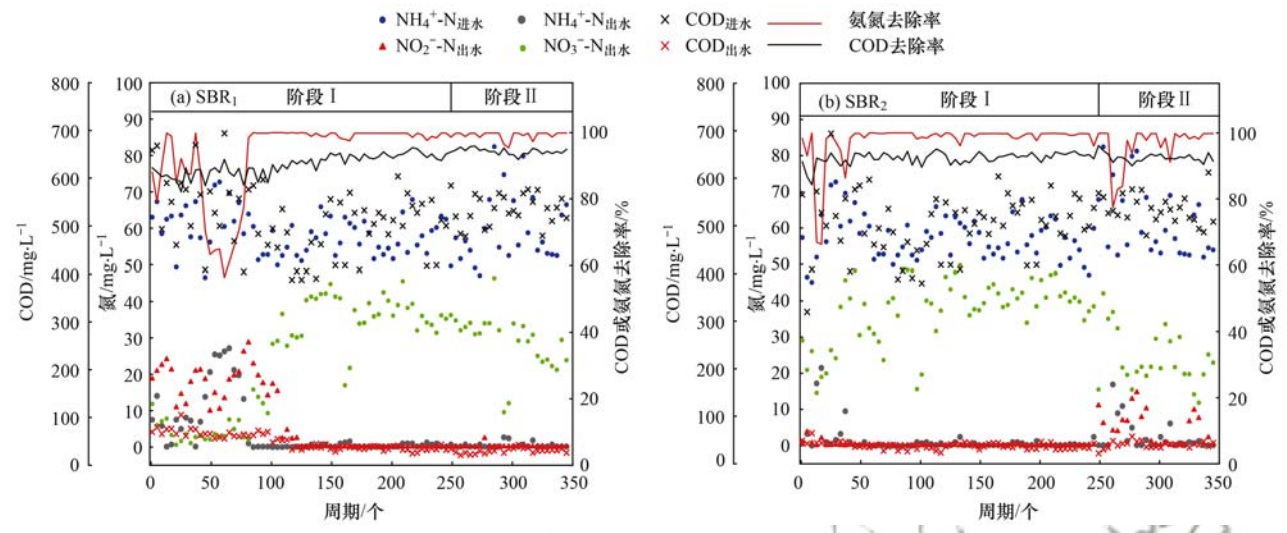


图 8 COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 变化情况
Fig. 8 Changes in COD, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, and NO₃⁻-N

两反应器除磷效果如图 9. 阶段 I 初期, SBR₁ 和 SBR₂ 随着沉降时间缩短, 沉降性能差的污泥排出反应器, 系统除磷效果良好. 末期, 好氧颗粒逐渐成为主体, 为保证系统的正常运行, 设定污泥龄在 10 d 左右. SBR₁ 和 SBR₂ 磷去除率分别是 65% 和

20%, SBR₂ 除磷效果差是因为系统中大量丝状真菌繁殖, 与聚磷菌间形成竞争. 阶段 II, SBR₁ 磷去除率轻微下降至 60%, SBR₂ 磷去除率上升至 30%. 缺氧区对部分丝状真菌抑制和 SBR₂ 粒径持续增大, 为聚磷菌提供生存空间, SBR₂ 磷去除率上升.

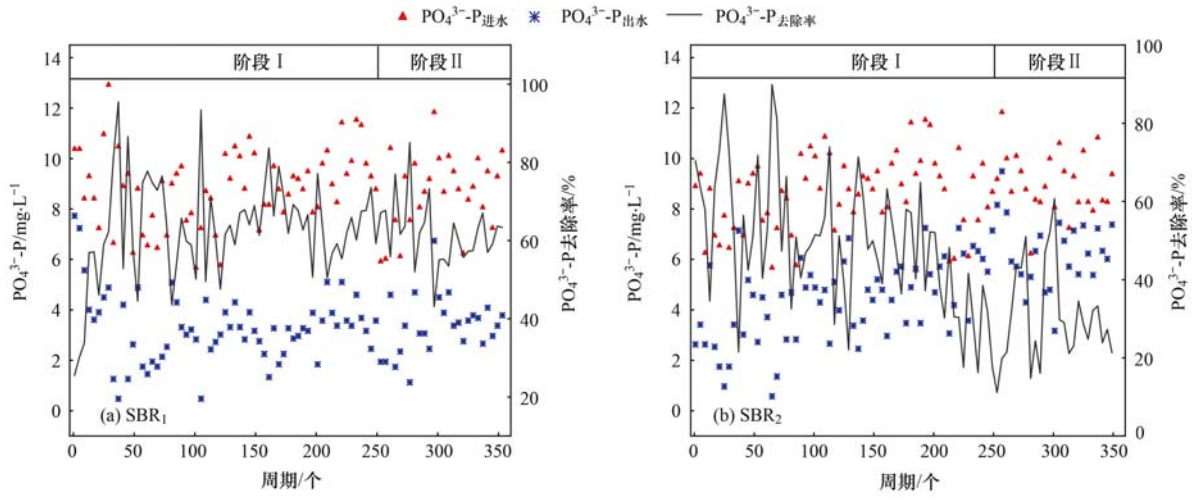


图 9 PO₄³⁻-P 变化情况
Fig. 9 Change in PO₄³⁻-P

2.5 微生物群落结构组成

2.5.1 细菌群落多样性分析

为探究污泥颗粒化过程中的微生物群落结构, 分别取种泥(第 1 d), 絮状-颗粒状混合污泥(SBR₁: 15 d; SBR₂: 25 d), 成熟颗粒污泥(SBR₁: 80 d; SBR₂: 90 d) 进行高通量测序分析, SBR₁ 命名为 Y1、Y2 和 Y3, SBR₂ 命名为 Z1、Z2 和 Z3.

Ace 和 Chao 指数用来表征微生物群落丰度. 由

表 4 可知, SBR₁ 和 SBR₂ 随着颗粒化进行, Ace 和 Chao 指数不断下降, 表明微生物群落丰度不断下降.

Shannon 和 Simpson 指数用来衡量微生物多样性. SBR₁ 中 Shannon 指数先上升后减少, Simpson 指数先减少后上升, 说明细菌群落多样性先增加后减少, 最终成熟颗粒细菌多样性大于膨胀种泥. 而 SBR₂ 中 Shannon 指数先减少后上升, Simpson 指数持续增长, 最终成熟颗粒细菌多样性小于絮状种泥.

有研究发现,在颗粒化过程中,细菌群落多样性降低可能与沉降时间缩短的生物选择机制有关^[26],这与在 SBR₂ 中的研究结果一致.但在 SBR₁ 中,生物淘

洗作用似乎不明显,可能是种泥中丝状菌为微生物生长提供附着点,加速颗粒形成,颗粒污泥占据主体后不断增长繁殖,细菌群落多样性增加.

表 4 细菌群落多样性指数¹⁾

Table 4 Bacterial community diversity index						
样本	OTU	覆盖率	Ace 指数	Chao 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
Y1	423	0.99	488	494	3.310	0.121
Y2	371	0.99	444	440	3.461	0.080
Y3	350	0.99	398	417	3.370	0.092
Z1	956	0.99	985	984	5.450	0.009
Z2	621	0.99	785	781	3.562	0.078
Z3	539	0.99	589	584	3.735	0.087

1) 在 97% 的相似水平下的 OTU (operational taxonomic units) 进行生物信息统计分析,下同

2.5.2 细菌群落结构分析

图 10 分别为 SBR₁ 和 SBR₂ 颗粒化阶段细菌优势门 (相对丰度 > 1%) 的相对丰度. 在 SBR₁ (Y3) 和 SBR₂ (Z3) 中,第一优势门为放线菌门 (Actinobacteria),相对丰度分别为 51.63% 和 41.97%;第二优势门为变形菌门 (Proteobacteria),相对丰度分别为 28.13% 和 36.20%. Li 等^[27] 的研究发现,在颗粒化过程中,缩短沉降时间可能导致 Actinobacteria 数量减少.但在本试验中,缩短沉降时间,Actinobacteria 相对

丰度却呈上升趋势,表明其在参与颗粒化进程中具有重要意义. Proteobacteria 主要参与 EPS 分泌,对 AGS 形成有贡献作用^[28].

在 SBR₁ (Y3) 和 SBR₂ (Z3) 中,第三优势门分别为 髌骨菌门 (Patescibacteria) 和 拟杆菌门 (Bacteroidetes),相对丰度为 14.44% 和 10.56%,有研究指出,Patescibacteria 与氮循环的相关基因 (*nifH* 和 *amaA*) 间有协同作用^[29],Patescibacteria 的存在可能与良好的氮去除效果有关. Bacteroidetes 属于异养菌,可参与有机碳和蛋白物质的循环^[30].

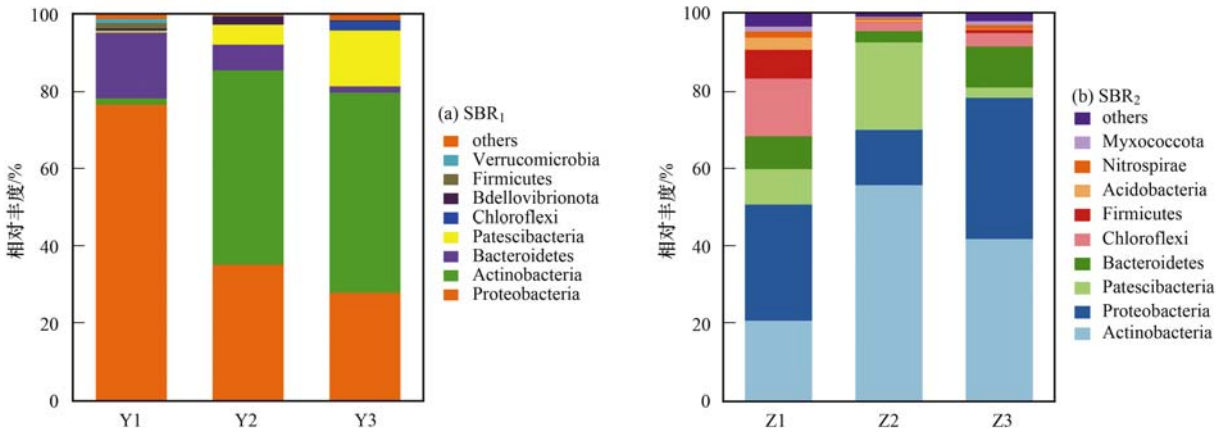


图 10 门水平微生物群落结构组成

Fig. 10 Composition of microbial community structure at phylum level

为更深入了解颗粒化进程中的相关特定菌株,对相对丰度 > 1% 的优势属变化情况进行分析. 如图 11 所示, SBR₁ (Y3) 中生物脱氮菌属主要有副球菌属 (*Paracoccus*, 7.85%)、博斯氏菌属 (*Bosea*, 2.5%)、*unclassified _ f _ Comamonadaceae* (0.83%)、黄杆菌属 (*Flavobacterium*, 0.35%) 等异养硝化菌属和部分自养硝化菌属. SBR₂ (Z3) 生物脱氮菌属主要有 *Plasticicumulans* (8.94%)、黄杆菌属 (*Flavobacterium*, 1.59%)、*unclassified _ f _ Comamonadaceae* (1.40%) 和自养硝化菌属 (*Nitrospira*, 0.97%) 等.

Paracoccus 可分泌 EPS, 促进颗粒稳定性^[31]. *Flavobacterium* 是 AGS 中常见且稳定存在的菌属,对 EPS 产生和有机物去除有重要作用,其存在还可作为 AGS 丝状骨架^[32]. *Plasticicumulans* 是活性污泥法中的主要菌属,能利用多种有机化合物作为碳和能源,例如醋酸盐,乙酸等^[33,34]. 在 SBR₁ (Y3) 和 SBR₂ (Z3) 中承担硝化功能的主要是异养硝化菌,这可能与本试验中高氨氮负荷 [$0.28 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$] 有关. Zhao 等^[35] 的研究表明,在高 COD 负荷及高 NH_4^+ -N 负荷下培养的 AGS,硝化作用也主要依靠异养硝化菌,但是氮去除机制仍需要进一步研究.

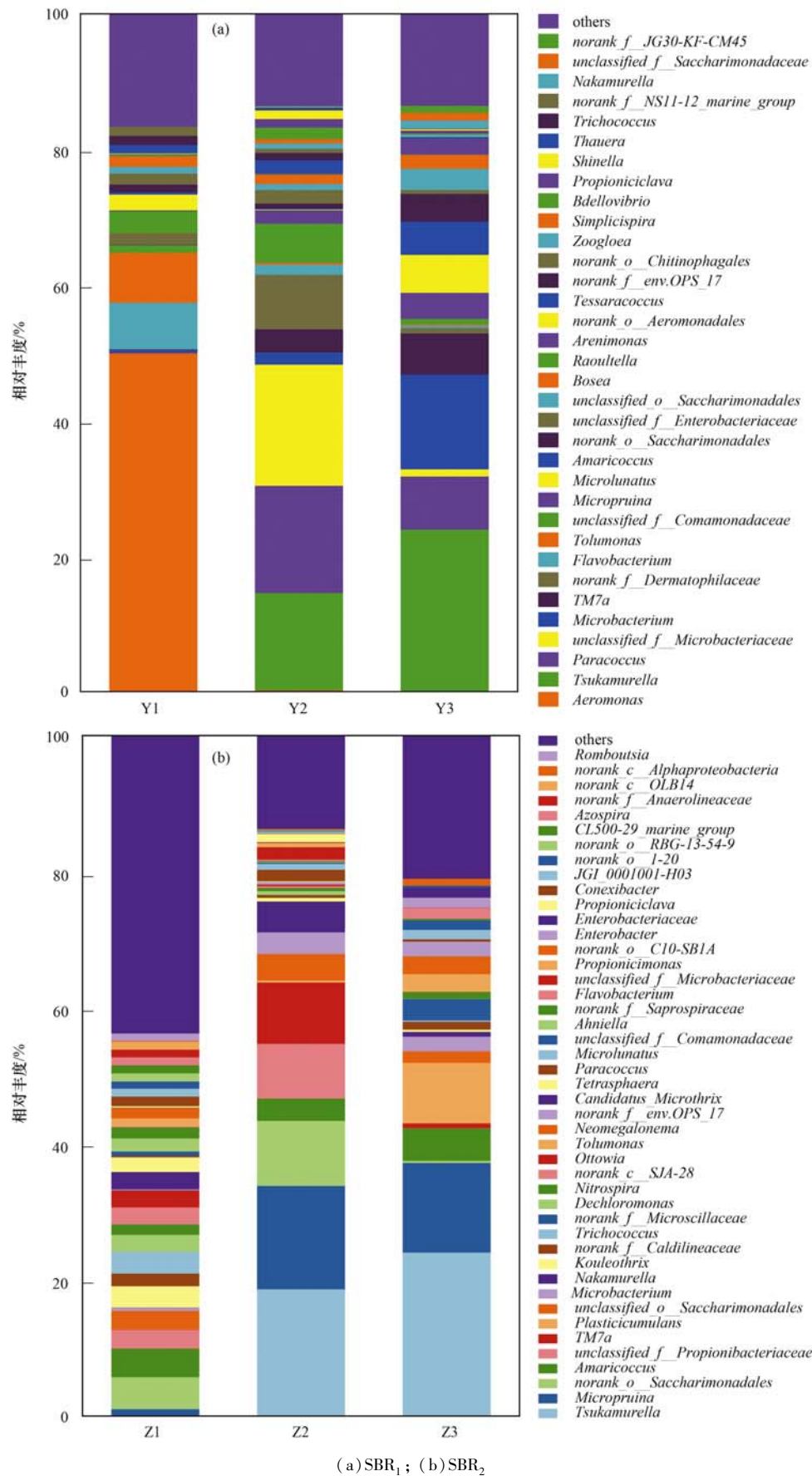


Fig. 11 Composition of microbial community structure at genus level

SBR₁ (Y3) 中除磷菌属主要有小月菌属 (*Microlunatus*, 5.57%)、*Amaricoccus* (4.91%)、微白霜菌属 (*Micropruina*, 3.85%) 和部分放线菌属, 相对丰度随颗粒化上升, 提升系统除磷效果. *Microlunatus* 在污水处理中普遍存在. *Amaricoccus* 和磷的去除效果联系紧密^[36]. *Micropruina* 属于放线菌门, 可以利用多种碳水化合物^[37] 和诱导良好沉降性^[38]. SBR₂ (Z3) 中微白霜菌属 (*Micropruina*, 13.21%)、*norank_f_Saprospiraceae* (0.20%) 和脱氯菌属 (*Dechloromonas*, 0.03%) 是主要除磷菌属, 除 *Micropruina* 相对丰度随颗粒化增加, 其余除磷菌属丰度都不断减少甚至消失, 导致 SBR₂ 除磷效果差. *norank_f_Saprospiraceae* 和 *Dechloromonas* 兼具反硝化与除磷功能^[39,40].

值得注意的是, *norank_o_Saccharimonadales*、

unclassified_o_Saccharimonadales 和 *unclassified_f_Saccharimonadaceae* 在 SBR₁ 和 SBR₂ 颗粒化过程中均有出现. Chen 等^[38] 的研究指出, 这类疏水性细菌的累积可以促进成熟 AGS 形成. SBR₁ (Y3) 中, *norank_o_Saccharimonadales*、*unclassified_o_Saccharimonadales* 和 *unclassified_f_Saccharimonadaceae* 的相对丰度为 4.09%、3.15% 和 1.12%, 而 SBR₂ (Z3) 中, 此类疏水性细菌相对丰度之和不足 2%, 这可能是 SBR₁ 颗粒化时间较短的原因.

2.5.3 真菌群落多样性分析

由表 5 可知, SBR₁ 和 SBR₂ 系统 Ace 和 Chao 指数不断下降, 表明系统内真菌丰度在减少. 此外, 两反应器 Shannon 指数下降, Simpson 指数上升, 说明真菌群落多样性在下降, 且 SBR₂ 中真菌多样性更丰富.

表 5 真菌群落多样性指数

Table 5 Fungal community diversity index

样本	OTU	覆盖率	Ace 指数	Chao 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
Y1	153	0.99	157	156	1.843	0.390
Y2	87	0.99	100	97	0.743	0.664
Y3	55	0.99	57	56	0.718	0.673
Z1	731	0.99	735	734	4.747	0.022
Z2	206	0.99	229	228	1.974	0.237
Z3	111	0.99	116	115	1.626	0.410

2.5.4 真菌群落结构分析

图 12 分别为 SBR₁ 和 SBR₂ 颗粒化阶段真菌优势门(相对丰度 > 1%) 的相对丰度. 在 SBR₁ (Y3) 中, 第一, 二优势门为担子菌门 (*Basidiomycota*) 和 *unclassified_k_Fungi*, 相对丰度分别为 97.1% 和

1.69%. 在 SBR₂ (Z3) 中, 第一, 二优势门为 *Rozellomycota* 和子囊菌门 (*Ascomycota*), 相对丰度分别为 62.9% 和 22.5%. *Basidiomycota* 在环境中很常见, 参与生态系统养分循环. *Ascomycota* 为好氧真菌, 是真菌类中最大的菌群. Sharaf 等^[41] 对好

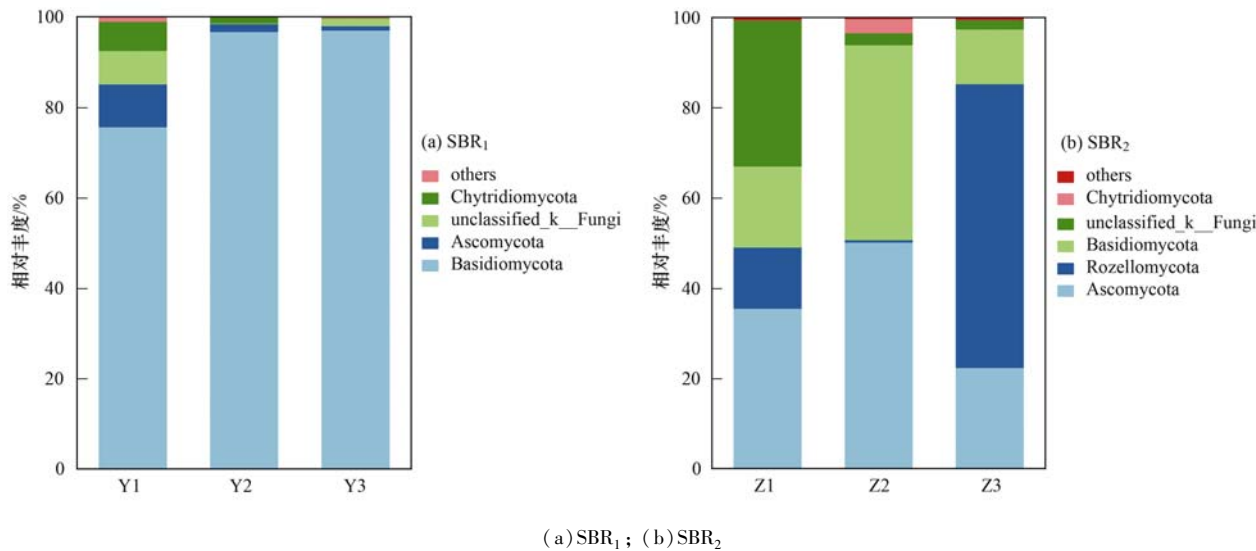


图 12 门水平微生物群落结构组成

Fig. 12 Composition of microbial community structure at phylum level

氧颗粒污泥丝状真菌 (Ascomycota) 过度生长研究发现, 此类菌对 COD 及氨氮去除效果影响微弱, 主要是造成系统除磷效果差. Rozellomycota 倾向存在于缺氧环境中, 喜食有机碎片, 具有几丁质孢子, 但是否通过几丁质孢子吸收营养物质, 尚不清楚^[42].

为更深入了解颗粒化进程中的相关特定菌株, 对相对丰度 >1% 的优势属变化情况进行分析, 如图

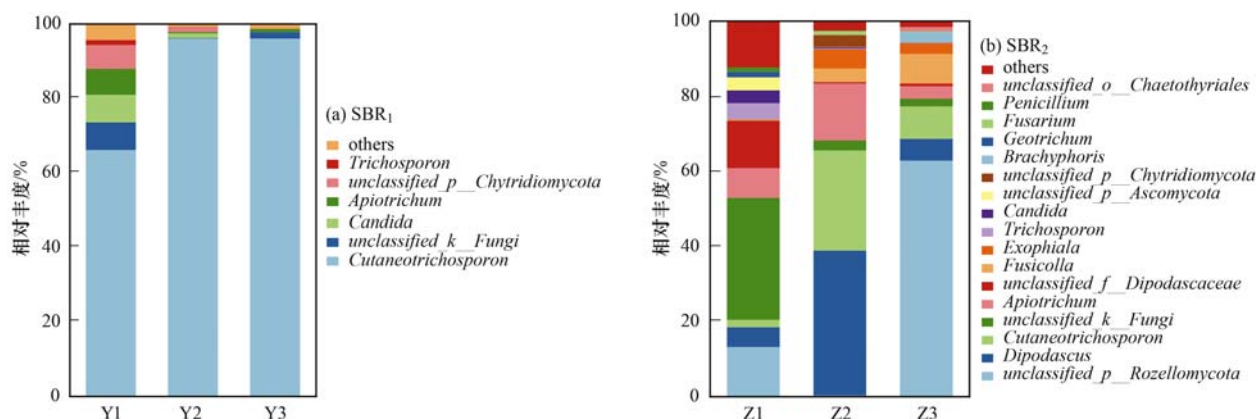


图 13 属水平微生物群落结构组成

Fig. 13 Composition of microbial community structure at genus level

在 SBR₂ 中, *unclassified_p_Rozellomycota* 的相对丰度从接种泥样 13.39% (Z1) 增加到 62.92% (Z3) 成为主要优势菌. Rozellomycota 属寄生真菌, 其菌丝体由寄主产生, 内寄生细胞分化为多刺且呈褐色的孢子囊. 本试验中真菌 *unclassified_p_Rozellomycota* 的相对丰度增加是 SBR₂ 沉降性能恶化的因素. 此外, Jiang 等^[45] 和 Tedersoo 等^[46] 在对环境因素与微生物多样性之间关系的研究中发现, Rozellomycota 丰度和总磷的浓度呈正相关, 此类真菌吸收磷用于生长. Sharaf 等^[41] 的研究也发现, 好氧颗粒污泥中 Rozellomycota 生长对碳、氮去除效果影响微弱, 主要是对磷去除效果产生影响, 这与本试验的结果一致. 其他菌如 *Fusicolla* 和 *Cutaneotrichosporon* 相对丰度从种泥 0.34% 和 2.04% 增加到 7.94% 和 8.70%.

3 结论

(1) 活性污泥中丝状菌的大量存在能显著缩短污泥颗粒的形成时间. 分别接种膨胀和絮状污泥进行颗粒化培养, 膨胀污泥和絮状污泥颗粒出现时间分别为 20 d 和 40 d, 膨胀污泥颗粒化时间更短, 且成熟颗粒形态规则, 表面光滑, 丝状菌作为骨架支撑颗粒结构.

(2) 丝状菌膨胀污泥培养形成的颗粒污泥稳定性更强更易维持. 缺氧区添加后, 膨胀污泥培养的成

13 所示. 在 SBR₁ 中, *Cutaneotrichosporon* 一直是颗粒化过程中的优势属, 其相对丰度从 66% (Y1) 上升到 96% (Y3). 该菌非丝状结构, 因此不是 SBR₁ 中的丝状骨架. 而种泥中的优势属假丝酵母菌属 (*Candida*)、*Apiotrichum* 和 *unclassified_k_Fungi* 相对丰度分别从 7%、7% 和 7% 下降至 0%、1% 和 2%. *Candida* 是公认的病原体, 可能会对水生态环境造成严重威胁^[43,44].

熟颗粒虽受搅拌破碎出现絮体, 但 SVI_{30} 稳定在 $40 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, SV_{30}/SV_5 值短期波动后迅速恢复至 1.

(3) 微生物群落结构分析表明, *norank_o_Saccharimonadales*、*unclassified_o_Saccharimonadales* 和 *unclassified_f_Saccharimonadaceae* 等疏水性细菌促进成熟 AGS 的形成. 真菌 *unclassified_p_Rozellomycota* 大量增殖是絮状污泥培养颗粒运行恶化的原因, 可能与缺氧区添加及流量计失调有关.

(4) 污染物去除效果表明, 膨胀污泥培养的成熟颗粒 COD、 NH_4^+-N 和 TN 去除效果与絮状污泥相差不多, 但除磷效果要更好.

参考文献:

- [1] Figueroa M, Val del Río A, Campos J L, et al. Filamentous bacteria existence in aerobic granular reactors [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2015, 38(5): 841-851.
- [2] Wang L, Liu X, Lee D J, et al. Recent advances on biosorption by aerobic granular sludge [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 357: 253-270.
- [3] 苟莎, 黄钧. 异养硝化好氧颗粒污泥培养条件研究 [J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3645-3651.
- [4] Gou S, Huang J. Culture conditions for heterotrophic nitrification-aerobic granular sludge formation [J]. Environmental Science, 2009, 30(12): 3645-3651.
- [5] Zhao X, Chen Z L, Shen J M, et al. Performance of aerobic granular sludge in different bioreactors [J]. Environmental Technology, 2014, 35(8): 938-944.
- [6] 龙焙, 程媛媛, 朱易春, 等. 好氧颗粒污泥的快速培养研究进展 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(2): 31-36.

- Long B, Cheng Y Y, Zhu Y C, *et al.* Research progress on rapid cultivation of aerobic granular sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, **34**(2): 31-36.
- [6] 宋志伟, 王秋旭, 宁婷婷, 等. 微生物絮凝剂投加方式对好氧颗粒污泥性能的影响[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, **45**(1): 247-254.
- Song Z W, Wang Q X, Ning T T, *et al.* Influence of microbial flocculant dosing way on performance of aerobic granules [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, **45**(1): 247-254.
- [7] Kong Q, Ngo H H, Shu L, *et al.* Enhancement of aerobic granulation by zero-valent iron in sequencing batch airlift reactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **279**: 511-517.
- [8] Pijuan M, Werner U, Yuan Z G. Reducing the startup time of aerobic granular sludge reactors through seeding floccular sludge with crushed aerobic granules [J]. *Water Research*, 2011, **45**(16): 5075-5083.
- [9] 尹志文, 董怡华, 张新月, 等. 菌丝球促进活性污泥颗粒化的研究进展[J]. *环境保护与循环经济*, 2019, **39**(7): 17-20.
- [10] Cheng W J, Zhang L G, Xu W J, *et al.* Formation and characteristics of filamentous granular sludge [J]. *Water Science & Technology*, 2020, **82**(2): 364-372.
- [11] Aqeel H, Basuvaraj M, Hall M, *et al.* Microbial dynamics and properties of aerobic granules developed in a laboratory-scale sequencing batch reactor with an intermediate filamentous bulking stage [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(1): 447-460.
- [12] De Graaff D R, Van Loosdrecht M C M, Pronk M, *et al.* Stable granulation of seawater-adapted aerobic granular sludge with filamentous *Thiothrix* bacteria [J]. *Water Research*, 2020, **175**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115683.
- [13] Zou J T, Pan J Y, Wu S Y, *et al.* Rapid control of activated sludge bulking and simultaneous acceleration of aerobic granulation by adding intact aerobic granular sludge [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **674**: 105-113.
- [14] 袁强军, 张宏星, 陈芳媛. 不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4661-4668.
- Yuan Q J, Zhang H X, Chen F Y. Long-term stability of aerobic granular sludge under low carbon to nitrogen ratio [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4661-4668.
- [15] 缪新年, 汪倩, 郭凯成, 等. ABR-MBR 耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4150-4160.
- Miu X N, Wang Q, Guo K C, *et al.* Start-up and optimization of denitrifying phosphorus removal in ABR-MBR coupling process [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4150-4160.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 唐虹, 康得军, 匡帅, 等. 胞外聚合物提取方法的研究进展[J]. *市政技术*, 2016, **34**(5): 162-166, 169.
- Tang H, Kang D J, Kuang S, *et al.* Research status of extracellular polymeric substance extraction method [J]. *Municipal Engineering Technology*, 2016, **34**(5): 162-166, 169.
- [18] 李冬, 王樱桥, 张杰, 等. 高径比对生活污水好氧颗粒污泥系统的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(1): 141-148.
- Li D, Wang Y Q, Zhang J, *et al.* The impact of height/diameter ratio on aerobic granular sludge (AGS) system in domestic sewage [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(1): 141-148.
- [19] Wilén B M, Gapes D, Keller J. Determination of external and internal mass transfer limitation in nitrifying microbial aggregates [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, **86**(4): 445-457.
- [20] He Q L, Zhang J, Gao S X, *et al.* A comprehensive comparison between non-bulking and bulking aerobic granular sludge in microbial communities [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **294**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122151.
- [21] 毛世超. 低碳氮比废水好氧颗粒污泥物化特征及微生物种群结构研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [22] Wei D, Wang B F, Ngo H H, *et al.* Role of extracellular polymeric substances in biosorption of dye wastewater using aerobic granular sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **185**: 14-20.
- [23] Wang Z C, Gao M C, Wang S, *et al.* Effect of hexavalent chromium on extracellular polymeric substances of granular sludge from an aerobic granular sequencing batch reactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, **251**: 165-174.
- [24] 李定昌, 王琦, 高景峰, 等. 不同粒径成熟好氧颗粒污泥 EPS 的三维荧光光谱特性[J]. *中国给水排水*, 2018, **34**(7): 26-31.
- Li D C, Wang Q, Gao J F, *et al.* Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of extracellular polymeric substances of mature aerobic granular sludge with different particle sizes [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, **34**(7): 26-31.
- [25] Lurie M, Rebhum M. Effect of properties of polyelectrolytes on their interaction with particulates and soluble organics [J]. *Water Science & Technology*, 1997, **36**(4): 93-101.
- [26] Fan X Y, Gao J F, Pan K L, *et al.* Shifts in bacterial community composition and abundance of nitrifiers during aerobic granulation in two nitrifying sequencing batch reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **251**: 99-107.
- [27] Li D C, Gao J F, Zhang S J, *et al.* Enhanced granulation process, a more effective way of aerobic granular sludge cultivation in pilot-scale application comparing to normal granulation process; from the perspective of microbial insights [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **707**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136106.
- [28] He Q L, Zhang W, Zhang S L, *et al.* Enhanced nitrogen removal in an aerobic granular sequencing batch reactor performing simultaneous nitrification, endogenous denitrification and phosphorus removal with low superficial gas velocity [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **326**: 1223-1231.
- [29] Shi L L, Zhang P, He Y H, *et al.* Enantioselective effects of cyflumetofen on microbial community and related nitrogen cycle gene function in acid-soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **771**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144831.
- [30] Zhou Z, Qiao W M, Xing C, *et al.* Microbial community structure of anoxic-oxic-settling-anaerobic sludge reduction process revealed by 454-pyrosequencing [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **266**: 249-257.
- [31] Szabó E, Liébana R, Hermansson M, *et al.* Microbial population dynamics and ecosystem functions of anoxic/aerobic granular sludge in sequencing batch reactors operated at different organic loading rates [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, **8**, doi: 10.3389/fmicb.2017.00770.
- [32] Liu X Y, Li R J, Chen R, *et al.* Formation of filamentous fungal pellets in aerobic granular sludge via reducing temperature and dissolved oxygen; characteristics of filamentous fungi and denitrification performance [J]. *Bioresource Technology*, 2021,

- 332, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125056.
- [33] Johnson K, Jiang Y, Kleerebezem R, *et al.* Enrichment of a mixed bacterial culture with a high polyhydroxyalkanoate storage capacity[J]. *Biomacromolecules*, 2009, **10**(4): 670-676.
- [34] Cai X X, Wen P, Yuan Y, *et al.* Identification of nitrogen-incorporating bacteria in a sequencing batch reactor: a combining cultivation-dependent and cultivation-independent method [J]. *Bioresource Technology*, 2020, **316**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123964.
- [35] Zhao Y G, Huang J, Zhao H, *et al.* Microbial community and N removal of aerobic granular sludge at high COD and N loading rates[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **143**: 439-446.
- [36] Wang L X, Yu X J, Xiong W, *et al.* Enhancing robustness of aerobic granule sludge under low C/N ratios with addition of kitchen wastewater[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110503.
- [37] Chen C M, Ming J, Yoza B A, *et al.* Characterization of aerobic granular sludge used for the treatment of petroleum wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **271**: 353-359.
- [38] Chen H, Li A, Cui D, *et al.* Evolution of microbial community and key genera in the formation and stability of aerobic granular sludge under a high organic loading rate [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2019, **7**, doi: 10.1016/j.biteb.2019.100280.
- [39] Jin Z, Ji F Y, Xu X, *et al.* Microbial and metabolic characterization of a denitrifying phosphorus-uptake/side stream phosphorus removal system for treating domestic sewage [J]. *Biodegradation*, 2014, **25**(6): 777-786.
- [40] 彭永臻, 钱雯婷, 王琦, 等. 基于宏基因组的城市污水处理厂生物脱氮污泥菌群结构分析[J]. *北京工业大学学报*, 2019, **45**(1): 95-102.
- Peng Y Z, Qian W T, Wang Q, *et al.* Unraveling microbial structure of activated sludge in a full-scale nitrogen removal plant using metagenomic sequencing[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2019, **45**(1): 95-102.
- [41] Sharaf A, Guo B, Liu Y. Impact of the filamentous fungi overgrowth on the aerobic granular sludge process [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2019, **7**, doi: 10.1016/j.biteb.2019.100272.
- [42] Grossart H P, Wurzbacher C, James T Y, *et al.* Discovery of dark matter fungi in aquatic ecosystems demands a reappraisal of the phylogeny and ecology of zoospore fungi [J]. *Fungal Ecology*, 2016, **19**: 28-38.
- [43] Chen H Y, Liu G G, Wang K, *et al.* Characteristics of microbial community in EGSB system treating with oxytetracycline production wastewater [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **295**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113055.
- [44] Lemons A R, McClelland T L, Martin S B, *et al.* Inactivation of the multi-drug-resistant pathogen *Candida auris* using ultraviolet germicidal irradiation[J]. *Journal of Hospital Infection*, 2020, **105**(3): 495-501.
- [45] Jiang T T, Sun S N, Chen Y N, *et al.* Microbial diversity characteristics and the influence of environmental factors in a large drinking-water source [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **769**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144698.
- [46] Tedersoo L, Bahram M, Puusepp R, *et al.* Novel soil-inhabiting clades fill gaps in the fungal tree of life[J]. *Microbiome*, 2017, **5**, doi: 10.1186/s40168-017-0259-5.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)