

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.1

第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM _{2.5} 污染演变的时空过程	时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)
2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析	郑庆峰, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)
夏季大气PM _{2.5} 中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例	刘威杰, 石明明, 程敏, 黎莹, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)
呼包鄂地区冬季、夏季PM _{2.5} 污染特征	李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)
2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM _{2.5} 污染特征及来源解析	周静博, 段青春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)
基于模型模拟的成都市PM _{2.5} 污染来源解析	许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)
北京市PM _{2.5} 中砷污染特征	石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段青春, 谭吉华, 陈荣志 (57)
夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析	易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)
安阳市大气PM _{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析	孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)
新乡市夏冬季节PM _{2.5} 稳定碳同位素特征分析	闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)
基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估	梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)
超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征	王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)
京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨	余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)
安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析	杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)
长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响	王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)
华东典型城市非道路移动机械排气烟度	鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昀, 黄成 (133)
国内外储油库VOCs排放现状与标准分析	胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)
四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响	庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)
乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比	徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张显, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)
长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素	汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)
巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征	沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)
城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例	田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)
典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估	陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)
长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估	李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)
白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析	汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)
松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评价	王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟丰, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)
鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系	李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)
臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响	刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)
兰州市西固区儿童饮水重金属暴露与健康风险精细化评估	陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)
镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制	吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)
一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制	廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)
酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能	谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)
脱氮菌剂在低溶解性黑臭水体中氮代谢特征	赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)
宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及耐药基因	陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)
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	赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)
基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控	陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)
基于间歇饥饿的SNAD工艺运行	李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)
反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液	陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)
硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现	刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)
高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)
中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评价	向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖偲, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)
某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征	孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)
北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征	张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征	杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)
亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征	宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)
宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化	陈志浩, 覃云斌, 丁帮琛, 胡优优, 陈湜, 李正魁 (412)
秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响	王晶, 马丽娟, 刘泽华, 陆伟, 侯振安 (420)
基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析	黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)
塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征	陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)
广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征	马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)
不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响	张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)
不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响	栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪艺凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)
黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应	周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)
炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响	蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)
《环境科学》征订启事(89)	
《环境科学》征稿简则(97)	
信息(303, 329, 344)	

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

赵婷婷¹, 乔凯¹, 王蕾¹, 张伟¹, 竺建荣^{1*}, 唐一^{2,3}, 胡滨², 王香莲^{2,3}, 杨静⁴, 景在涛⁴

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 南方科技大学工程技术创新中心, 北京 100083; 3. 北京南科大蓝色科技有限公司, 北京 100083; 4. 山东西王糖业有限公司, 邹平 256209)

摘要: 为探究淀粉废水处理活性污泥中微生物的群落结构及多样性, 基于 Illumina MiSeq 高通量测序方法, 分析了不同运行阶段的 A/O 处理系统中活性污泥的微生物群落与多样性组成。结果表明, A/O 系统中处理淀粉生产废水的活性污泥在同一种废水下微生物群落结构总体比较稳定, 优势细菌主要为变形菌门 (Proteobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、厚壁菌门 (Firmicutes) 和放线菌门 (Actinobacteria) 等; 最重要优势细菌类群为变形菌门 (45.66%~66.30%), 其中 γ -亚纲细菌是其主要成员, 占比 36.38%~66.65%。优势拟杆菌门主要成员鞘脂杆菌纲在污泥沉降性能较好时其占比下降, 但绿弯菌门主要成员厌氧绳杆菌纲在污泥沉降性能较好时其占比明显增加, 变化趋势正好相反, 或许它们二者之间的耦合变化与污泥沉降性能变化密切相关。活性污泥样品中存在大量特殊功能菌群, 它们在活性污泥的污染物分解和氮磷去除中发挥重要作用。

关键词: 细菌群落结构; 生物多样性; 活性污泥; 高通量测序; 淀粉废水

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0321-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201905116

Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch

ZHAO Ting-ting¹, QIAO Kai¹, WANG Lei¹, ZHANG Wei¹, ZHU Jian-rong^{1*}, TANG Yi^{2,3}, HU Bin², WANG Xiang-lian^{2,3}, YANG Jing⁴, JING Zai-tao⁴

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Innovative Engineering Center, Southern University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 3. Beijing SUSTech Blue Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China; 4. Shandong Xiwang Sugar Industry Co., Ltd., Zouping 256209, China)

Abstract: This study analyzes the microbial community and diversity composition of activated sludge in anoxic/oxic (A/O) treatment systems at different operation stages using Illumina MiSeq high-throughput sequencing to investigate the microbial community structure and diversity in activated sludge for starch wastewater treatment. The experimental results showed that the microbial community structure of activated sludge for starch production wastewater treatment in A/O systems was quite stable under the same wastewater condition, and that the dominant bacteria of the activated sludge were Proteobacteria, Bacteroidetes, Chloroflexi, Firmicutes, and Actinobacteria. The most important dominant bacterial group was Proteobacteria (45.66%-66.30%), of which γ -subclass bacteria were the main member and occupied 36.38%-66.65%. The proportion of Sphingobacteria, the main member of the Bacteroidetes, decreased when the sludge settling performance was better, but the proportion of Anaerolineae, the main member of Chloroflexi, increased significantly when the sludge sedimentation performance was better. These changes may have been closely related to the behavior of sludge settleability. There were a large number of functional bacteria in the activated sludge, which played an important role in the degradation of pollutants and in nitrogen and/or phosphorus removal.

Key words: bacterial community structure; biodiversity; activated sludge; high-throughput sequencing; waste water containing starch

活性污泥系统是一种以生物处理技术为主的污水处理工艺, 目前已经广泛应用于各种污水处理厂 (WWTPs) 的城市污水处理或工业有机废水处理。活性污泥含有高度复杂的微生物群落, 对污染物的去除起着至关重要的作用, 微生物的群落结构很大程度上会影响污水处理系统的整体运行性能。在迄今为止发现的污水处理系统中, 绝大部分细菌属于变形菌纲, 拟杆菌纲、放线菌纲等^[1]。大量研究表明, 不同废水处理系统存在着不同微生物群落^[2,3]。另一方面, 即使同一种废水, 活性污泥的微生物群落组

成也可能随水质或浓度波动而发生变化, 以响应或维持处理系统的稳定运行^[4]。因此, 对实际污水活性污泥中微生物群落结构及多样性进行研究, 有助于阐明活性污泥变化的微生物学机制并提供处理系统稳定运行的技术帮助。

借助传统的分离培养实验操作, 只能获取很有

收稿日期: 2019-05-16; 修订日期: 2019-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578069); 北京市重点研发计划项目 (171100000717012)

作者简介: 赵婷婷 (1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: 954962316@qq.com

* 通信作者, E-mail: zjrtshua@hotmail.com

限的样品微生物多样性及群落结构信息^[5]. 分子生物学技术的发展应用, 提供了微生物群落的新研究方法, 使微生物群落组成能更加全面准确地呈现出来^[6,7]. Illumina MiSeq 高通量测序, 增加了微生物群落分析中的测序深度, 同时降低了实验成本, 错误率低, 已经成功应用于食品^[5]、土壤^[8]、湖泊^[9]、植物^[10]和生物膜^[11, 12]等样品的微生物群落分析. 对实际活性污泥的高通量分析, 尤其是发生污泥膨胀的活性污泥的研究, 还是相对较少的. 高晨晨等^[13]的研究表明丝状菌膨胀对主要污染物的去除效果影响不大, 对主要菌群的丰度影响不大; 端正花等^[14]的研究表明其研究的丝状菌污泥膨胀的优势丝状菌为腐螺旋菌科的 *Saprospiraceae* 和黄杆菌科的 *Flavobacteriales*. 同样是发生污泥膨胀, 不同的活性污泥其中起着重要作用的菌也是不同的, 因此, 对于活性污泥样品特别是来自实际污水处理系统的分析是十分有必要的.

本实验选取某淀粉生产废水处理的活性污泥进行实验研究, 该废水组分比较复杂而且浓度多变, 因此导致现有 A/O 处理系统的活性污泥结构和活性不太稳定. 为更好地了解活性污泥微生物群落结构和多样性变化, 寻求更稳定的处理系统运行控制, 采用 Illumina MiSeq 高通量测序技术, 对淀粉废水 A/O 处理系统活性污泥的微生物群落与多样性结构从不同水平进行分析, 以期获得更多更全面的活性污泥微生物群落结构和多样性信息.

1 材料与方法

1.1 样品采集

活性污泥样品取自华北地区某污水处理厂, 该厂采用玉米淀粉生产多种产品, 因此, 最终废水组分复杂且浓度多变. 混合废水采用 A/O 处理工艺. 根据处理系统的表现特征即稳定运行和波动变化阶段按要求进行取样, 分别在 2018 年 7 月中、8 月底和 2019 年 1 月中取样品 3 个, 分别以样品号 1、2 和 3 表示, 其中 8 月的污泥沉降性能较好, 2018 年 7 月和 2019 年 1 月的样品沉降性能较差, 出现轻度活性污泥膨胀现象. 取样后污泥在 24 h 内送到实验室, 然后马上进行实验测定分析或样品处理. 剩余样品于 -80℃ 冰箱保存.

1.2 实验方法

1.2.1 运行参数测定

采用国家标准方法进行测定化学需氧量 (COD)、污泥浓度 (MLSS)、总磷 (TP)、氨氮 (NH_4^+-N)、污泥指数 (SVI)、污泥负荷 (F/M) 和污泥龄 (SRT) 等运行参数^[15,16].

1.2.2 电镜观察

样品经离心去除上清后浸没在 25% 戊二醛中固定, 于 4℃ 冰箱放置 24 h 后依次经体积分数为 50%、70%、85%、95% 和 100% 的酒精脱水. 采用临界点干燥法干燥, 干燥完成后将样品粘至金属台, 喷金处理, 采用扫描电子显微镜 (FE-SEM Hitachi SU8010, 日本) 进行观察.

1.2.3 粒度测定

活性污泥絮体粒径分布采用激光粒度分析仪 (Malvin Mastersizer 3000, 英国) 测量. 测定时根据仪器测定程序进行操作, 当粒度较小的时候加样量较少, 实验加样量 1 ~ 5 mL.

1.2.4 DNA 提取

活性污泥中微生物的 DNA 按照 OMEGA 试剂盒说明书的方法和步骤进行提取.

1.2.5 PCR 扩增及测序

依托北京美吉桑格生物医药科技有限公司进行 Illumina MiSeq 高通量测序. 扩增 16S rDNA 的 V3-V4 区域, 细菌的 PCR 引物为通用引物, 338F: ACTCTACGGGAGGCAGCAG 和 806R: GGACTA CHVGGGTWTCTAAT. 使用 2% 琼脂糖凝胶回收 PCR 产物, 利用 AxyPrep DNA Gel Extraction Kit (Axygen Biosciences, Union City, CA, USA) 进行纯化, Tris-HCl 洗脱, 2% 琼脂糖电泳检测. 利用 QuantiFluor™-ST (Promega, USA) 进行检测定量. 根据 Illumina MiSeq 平台 (Illumina, San Diego, USA) 标准操作规程将纯化后的扩增片段构建 PE 2 * 300 的文库.

1.3 数据分析

通过美吉云平台 iSanger 进行数据的分析整理. Illumina MiSeq 测序得到的是双端序列数据. 首先根据 PE reads 之间的 overlap 关系, 将成对 reads 拼接 (merge) 成一条序列, 同时对 reads 质量和 merge 效果进行质控过滤, 根据序列首尾两端的 barcode 和引物序列区分样品得到有效序列, 并校正序列方向, 即为优化数据.

数据去杂的方法为: ①过滤 reads 尾部质量值 20 以下的碱基, 设置 50 bp 的窗口, 如果窗口内的平均质量值低于 20, 从窗口开始截去后端碱基, 过滤质控后 50 bp 以下的 reads, 去除含 N 碱基的 reads. ②根据 PE reads 之间的 overlap 关系, 将成对 reads 拼接 (merge) 成一条序列, 最小 overlap 长度为 10 bp. ③拼接序列的 overlap 区允许的最大错配比率为 0.2, 筛选不符合序列. ④根据序列首尾两端的 barcode 和引物区分样品, 并调整序列方向, barcode 允许的错配数为 0, 最大引物错配数为 2.

2 结果与讨论

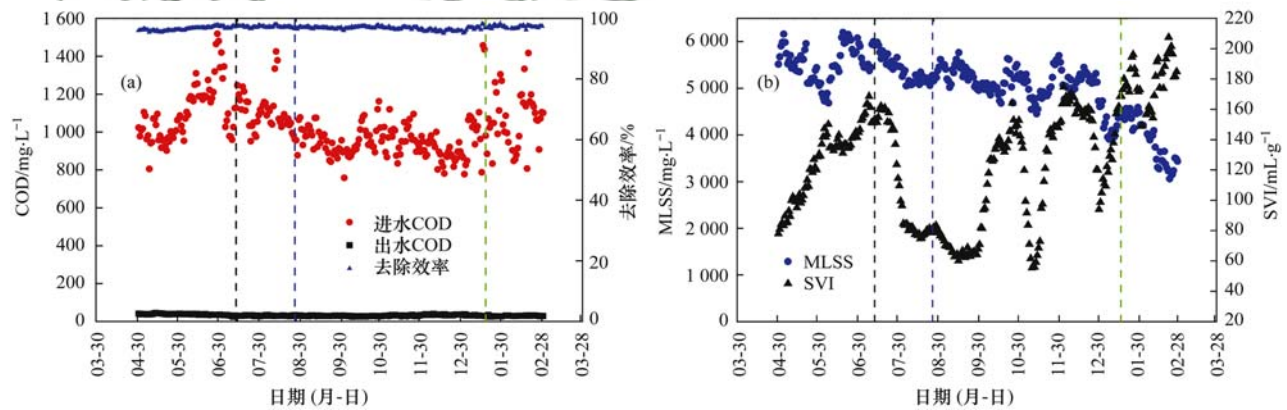
2.1 A/O 处理系统基本运行性能

2018 年 5 月至 2019 年 2 月 A/O 系统的基本运行性能见表 1, 运行系统的 COD 去除效率及 SVI 变化见图 1. 从表 1 中可以看出, 该处理工艺总体运行性能比较平稳, 尽管进水 COD 波动较大, 高低相差可达 2 倍多, 但出水 COD 相当稳定, 一般维持在 20~40 mg·L⁻¹ 水平, 有时会稍稍高一点, 大概接近 45 mg·L⁻¹ 左右. 氨氮去除效果很好, 出水氨氮仅在 0.2~0.5 mg·L⁻¹. 总磷去除效果良好, 出水 P 含量很低, 去除率最高可达 99%. 值得注意的是, 从图 1 可以看出, 该处理系统活性污泥性能变化较大, 污泥沉

降性能改变明显. 5 月初污泥沉降性能较好, 但之后沉降性能变差, SVI 值持续上升, 在 7 月最高达到 168 mL·g⁻¹, 出现污泥膨胀现象; 尔后污泥性能逐渐改善, 8 月 SVI 恢复到 5 月水平, 9 月沉降性能保持最好. 此后, 从 10 月开始, SVI 又从 60 急剧增加到 164 mL·g⁻¹, 出现轻度活性污泥膨胀现象. 虽然采取增加污泥回流量和进水中加化合物抑制丝状菌生长等调控方法使 SVI 回复到 60 mL·g⁻¹ 左右, 但最后 SVI 值又重复上升, 最高达到 196 mL·g⁻¹, 呈现明显的污泥膨胀现象. 由于活性污泥性能与其微生物群落结构及多样性紧密相关, 因此, 分析测定活性污泥微生物群落结构及多样性变化, 对更好地了解污水水质和浓度变化而产生的污泥结构与性能变化很有必要.

表 1 A/O 系统基本运行性能

Table 1 Main operational properties of the A/O wastewater treatment system				
项目	参数	最小值	最大值	平均值
进水	COD/mg·L ⁻¹	758.10	1 518.75	1 027.51
	TP/mg·L ⁻¹	9.06	60.60	36.77
	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	3.93	156.33	72.01
出水	COD/mg·L ⁻¹	24.33	44.66	32.23
	TP/mg·L ⁻¹	0.05	1.01	0.23
	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.2	0.5	0.3
污泥性能	SVI/mL·g ⁻¹	55.55	207.54	125.83
	F/M(以 BOD ₅ /VSS 计)/kg·(kg·d) ⁻¹	0.064	0.264	0.187
	MLSS/mg·L ⁻¹	3 060.66	6 197.66	5 064.37
	SRT/d	5.5	79.0	20.3



(a) COD 去除; (b) 活性污泥沉降性能; 图中 1、2 和 3 分别表示样品 1、2 和 3

图 1 A/O 处理系统 COD 去除和活性污泥沉降性能

Fig. 1 COD removal and sludge settleability of the A/O wastewater treatment system

2.2 活性污泥粒径测定和微生物观察

3 次取样结果相近, 典型的一次测定结果如图 2 所示, 为样品 2 的粒径分布. 从中可以看出, 污泥粒径呈正态分布, 在粒径 86.35 μm 占比最大, 达 7.95%, 是典型的絮体状活性污泥.

活性污泥的 SEM 观察结果见图 3. 在低放大倍数下, 可以看出活性污泥表面凹凸不平, 不同区域均分布着大量丝状菌, 结构比较松散. 活性污泥由大量

不同形态的微生物组成, 主要以丝状菌为主, 同时还含有其他杆菌和球菌等. 丝状菌较其它细菌大, 且表面粗糙, 较大的丝状菌作为活性污泥骨架, 穿插在活性污泥中间存在一些小型丝状菌与其它类型细菌缠绕形成的细菌团块. 大量丝状细菌的存在可能是导致污泥沉降性能不好的部分原因.

2.3 微生物群落和多样性的高通量测序分析
高通量分析样品共 3 个, 分别以样品 1、2 和

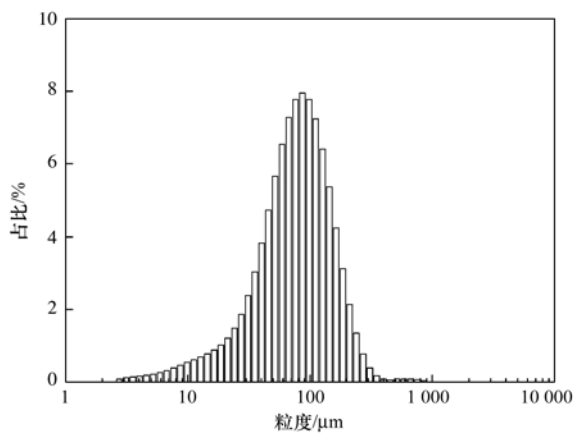


图 2 活性污泥粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of the activated sludge

3 号表示. 通过高通量测序, 对序列进行质量控制后, 根据差异水平 0.03 的水平上聚类得到操作分类单元(OTU). 经分析, 3 个活性污泥样品共得到了 186 478 条序列, 样品 1 得到了 73 328 条序列, 样品 2 得到了 49 154 条序列, 样品 3 得到了 63 996 条序列.

根据测序结果, 绘制 Venn 图(见图 4). 从中可以看出, 3 个活性污泥样品的 OTU 数目为 747 ~ 964, 说明淀粉废水活性污泥中微生物多样性较高. 3 个活性污泥样品共同存在的菌占多数(559 个), 样品 1 的 OTU 数目最多, 而样品 3 的 OTU 数目最少. 由此说明, 不同形态与结构的活性污泥微生物群落分布有一定稳定性, 在同一种废水条件下, 活性污泥微生物总体种类变化相对不大, 共同细菌占多, 微

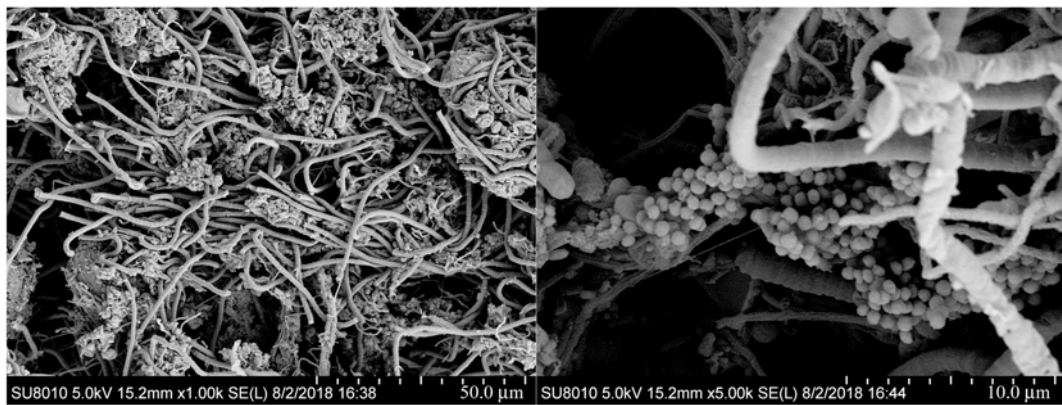


图 3 活性污泥扫描电镜观察

Fig. 3 SEM observation of the activated sludge

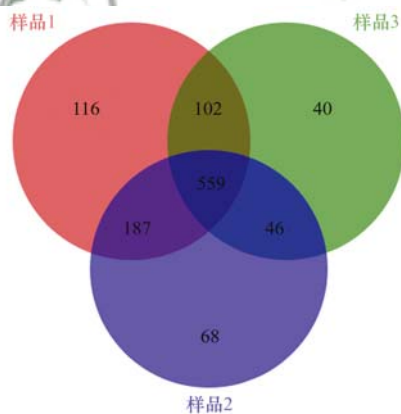


图 4 Venn 图

Fig. 4 Venn diagram

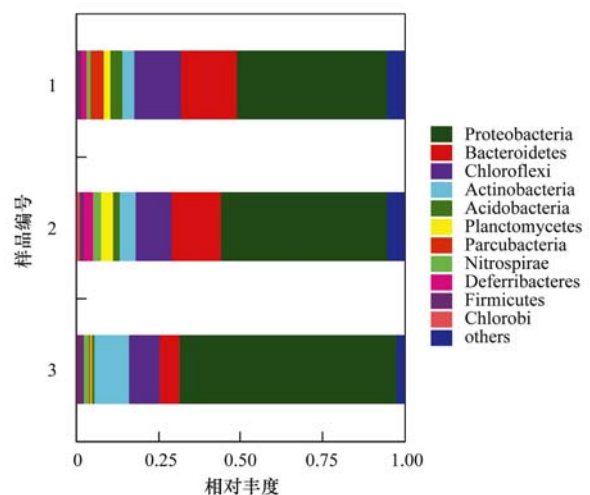


图 5 活性污泥中优势类群分类(门水平)

Fig. 5 Phyla classification of bacteria in the activated sludge

生物种群有相当程度的稳定性.

细菌高通量测序结果在门水平上的优势种群如图 5 所示, 从中可以看出, 3 个活性污泥样品中优势类群主要分布在变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、绿弯菌门(Chloroflexi)和放线菌门(Actinobacteria). 前 3 个门在很多环境样品中占比也都较大^[17~19]. 在本实验活性污泥样品中, 占绝对优势的微生物群落是变形菌门 45.66% ~

66.30%. 总体来说, 随着时间推移, 变形菌门、放线菌门占比相应增加, 拟杆菌门、绿弯菌门占比则逐渐降低. 结合已有研究中发表的不同活性污泥中优势种群的结构组成(见表 2), 与本研究样品相比, 可以看出普通生活污水、城市污水的变形菌门占比低于工业有机废水; 而在变形菌门中, α -变形菌纲在工

表 2 不同活性污泥微生物主要类群比较/%

污泥来源	Proteobacteria	Bacterioidetes	Chloroflexi	Actinobacteria	Firmicutes	α -Proteobacteria	γ -Proteobacteria	δ -Proteobacteria	β -Proteobacteria	文献
淀粉废水	46 ~ 66	6 ~ 17	9 ~ 14	4 ~ 11	1 ~ 2	20 ~ 37	36 ~ 67	8 ~ 15	6 ~ 14	本研究
皂化废水	80	18	1	3	—	32 ~ 62	12 ~ 22	1 ~ 3	~	[20]
生活污水	52.00	22.35	—	—	1	5	5	10	30	[21]
加工废水	78	9	2	2,	—	—	—	—	—	[22]
市政污水	42	21	6.50	4	6	3	10	5	21	[23]
生活污水	31	6	8	8	—	—	—	—	—	[24]
市政污水	45 ~ 69	7 ~ 18	—	10 ~ 19	3 ~ 6	4	50	—	5	[25]

1) “—”表示文章中没有相关数据

业废水中的占比远高于普通生活污水和城市污水。

在变形菌门中的优势菌纲如图 6 所示,从中可以看出,在变形菌门中, γ -变形菌纲(γ -Proteobacteria)细菌是主要成员(36.38% ~ 66.65%),其次为 α -变形菌纲(α -Proteobacteria)19.60% ~ 37.16%,然后是 δ -变形菌纲(δ -Proteobacteria)7.79% ~ 14.68%, β -变形菌纲(β -Proteobacteria)则相对较少(5.9% ~ 14.32%)。随着时间推移, γ -变形菌纲占比持续增加,而其他变形菌纲占比则逐渐降低。值得注意的是, β -变形菌纲随着时间推移也逐渐减少。因为该运行阶段总体趋势随着运行时间推移温度逐渐降低,而 β -变形菌纲一般认为在脱氮除磷中发挥重要作用,结合污泥取样时间测定的氮磷去除结果,1、2和3号样品取样时氨氮去除效率和总磷去除效率都是递减的,所以,它的减少与处理系统脱氮除磷相对变差是一致的。

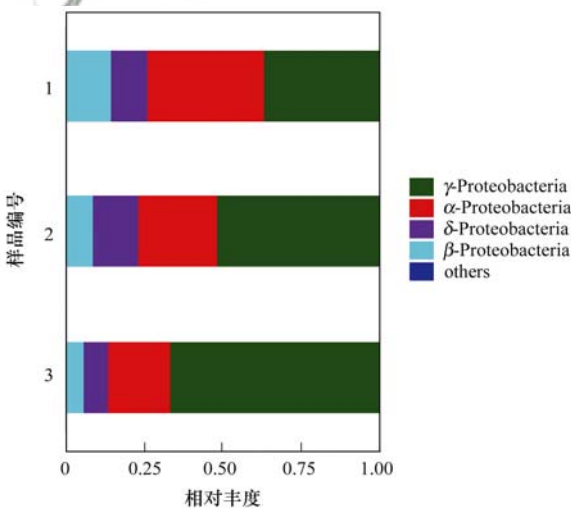


图 6 活性污泥中变形菌门分类

Fig. 6 Class classification of Proteobacteria in the activated sludge

在拟杆菌门中的优势菌纲如图 7 所示,从中可以看出,在活性污泥样品中,优势拟杆菌门的主要成员是鞘脂杆菌纲(Sphingobacteria),在活性污泥沉降性能较差时占据绝对优势(89.36% ~ 94.77%),而沉降性能较好时占比有所下降(64.60%)。因此,鞘

脂杆菌纲变化或许与污泥沉降性能变化有关。该纲细菌在软木工业、燃料等废水处理活性污泥中也被发现为拟杆菌门主要成员,但是有关它和污泥沉降性能之间的联系及作用未见描述^[26,27]。

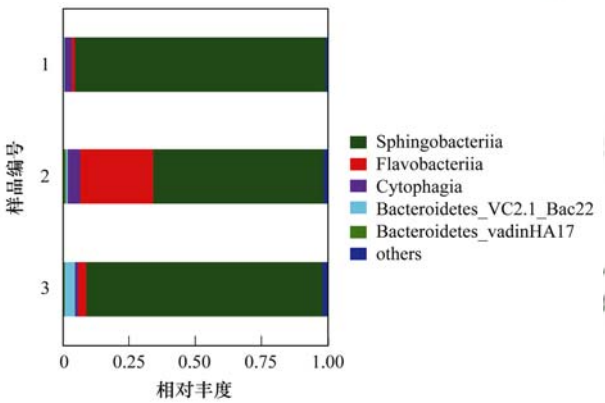


图 7 活性污泥中拟杆菌门分类

Fig. 7 Class classification of Bacteroidetes in the activated sludge

通常,丝状细菌大多属于绿弯菌门,所以对绿弯菌门菌群的变化予以关注是必要的。在绿弯菌门中的优势菌纲如图 8 所示,从中看出活性污泥样品中,优势类群绿弯菌门的主要成员是厌氧绳菌纲(Anaerolineae),其在污泥沉降性能稍差时含量在26.42%左右。令人感兴趣的是,在污泥沉降性能较好时其占比明显增加,可达43.15%,该结果说明它的变化趋势与鞘脂杆菌纲正好相反。或许,它们二者之间的耦合变化与污泥沉降性能变化密切相关。对此初步结论,尚需更多实验分析观察并进行验证。但是,这些细菌的变化至少初步提供了污泥膨胀时可能的生长状态改变,而有关这些细菌的生长调控或许能对更好地系统稳定运行并减少活性污泥膨胀提供很好地解决方案。在洪颖等的研究中^[28],丝状硫细菌在SBR系统污泥膨胀起主要作用,本实验结果与此不同,产生这一差异的原因可能是废水水质不同所致。绿弯菌门细菌在处理淀粉废水的上流式厌氧污泥床颗粒污泥中也有存在^[29],外观呈丝状。

对污泥样品的微生物属水平进行分析,选取了属水平丰度前20的物种,作Heatmap图(如图9)。

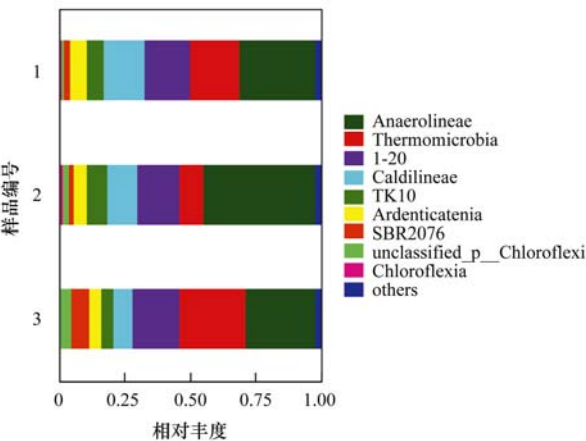


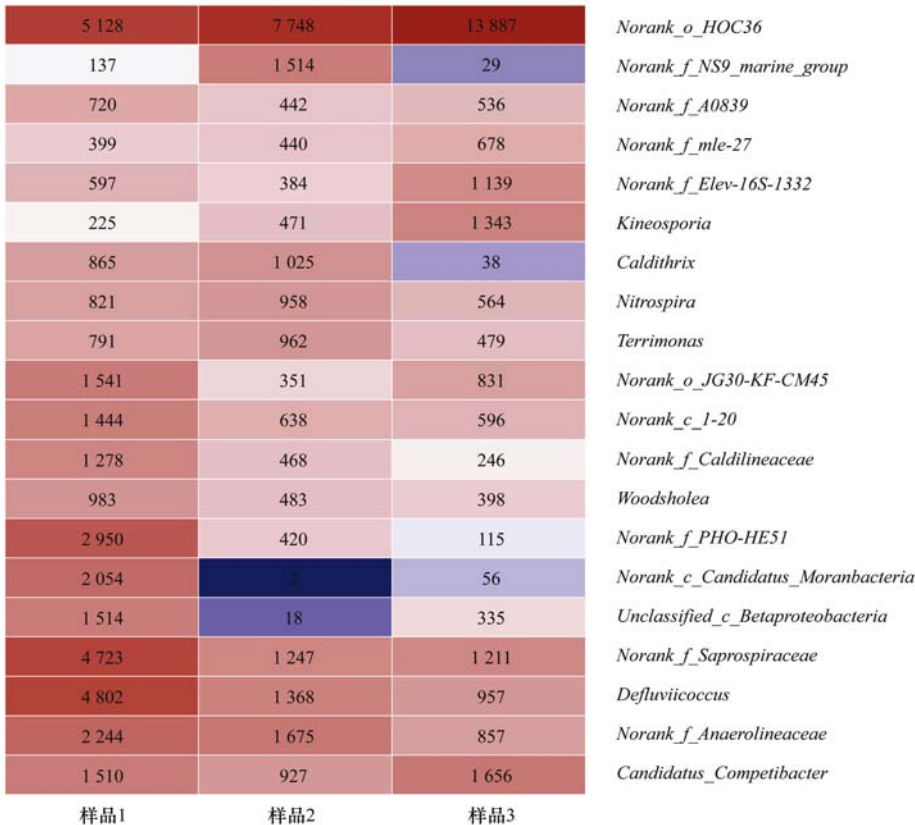
图 8 活性污泥中绿弯菌门分类

Fig. 8 Class classification of Chloroflexi in the activated sludge

从中可知,这 20 个属中未命名的属有 13 个. 丰度最高的 *norank_o_HOC36* 是 γ -Proteobacteria 纲的细菌, 在 3 个样品中的丰度都是最高的. *norank_f_NS9_marine_group* 在样品 2 中的丰度明显大于其他两个样品,结合之前对 3 个样品的沉降性能的分析,说明该菌的存在可能与改善污泥沉降性能有关. *Norank_o_JG30_KF_CM45*、*Unclassified_c_Betaproteobacteria* 和 *Candidatus_Competibacter* 在样品 2 中的占比明显比其他两个样品低,这些属的菌可能与污泥沉降性能变差有关.

从污泥样品中选取了 OTU 水平丰度前 30 的细菌种群,构建系统发育树(见图 10). 从中可以看出,优势 OTU 主要属于变形菌门、拟杆菌门、绿弯菌门和放线菌门(Actinobacteria),还有部分属于硝化螺旋菌门(Nitrospirae).

分析丰度占前 30 的 OTU 中,OTU37 及 OTU612 属于 γ -Proteobacteria 中占比较高的 HOC36 目,尤其值得关注的是 OTU612,其在 3 个样品中的丰度都很高. 该细菌在已有研究中报道较少,没有科学命名的种属名;同时,在活性污泥沉降性较好时该 OTU 丰度比性能较差时高,由此可能也与污泥沉降性能变化有关,其更多作用及其生长调控尚待后续更多研究解析. 另一变形菌成员 OTU1227 属于 *Deftuviicoccus*,有研究表明在以乙酸盐为进料培养的好氧颗粒污泥中,该菌为主要微生物^[30]. 此外还有很多与脱氮除磷过程相关的 OTU 存在,如 OTU576 属于 *Nitrospira*,为关键的亚硝酸盐氧化细菌(NO_B),有助于在淀粉废水处理过程中将亚硝酸盐氧化为硝酸盐^[31]. OTU459 属于 *Flavobacteriales*,该类细菌存在保守的硝酸盐还原和反硝化途径^[32]. 变形菌 OTU380 及 OTU620 属于 *Candidatus_Competibacter*,这些细菌具有反硝化和除磷功能^[33]. OTU516 及 OTU248 属于 *Caldithrix*,与其同种属的菌



图中数值表示该属在污泥样品中的序列数目

图 9 Heatmap 图

Fig. 9 Heatmap diagram

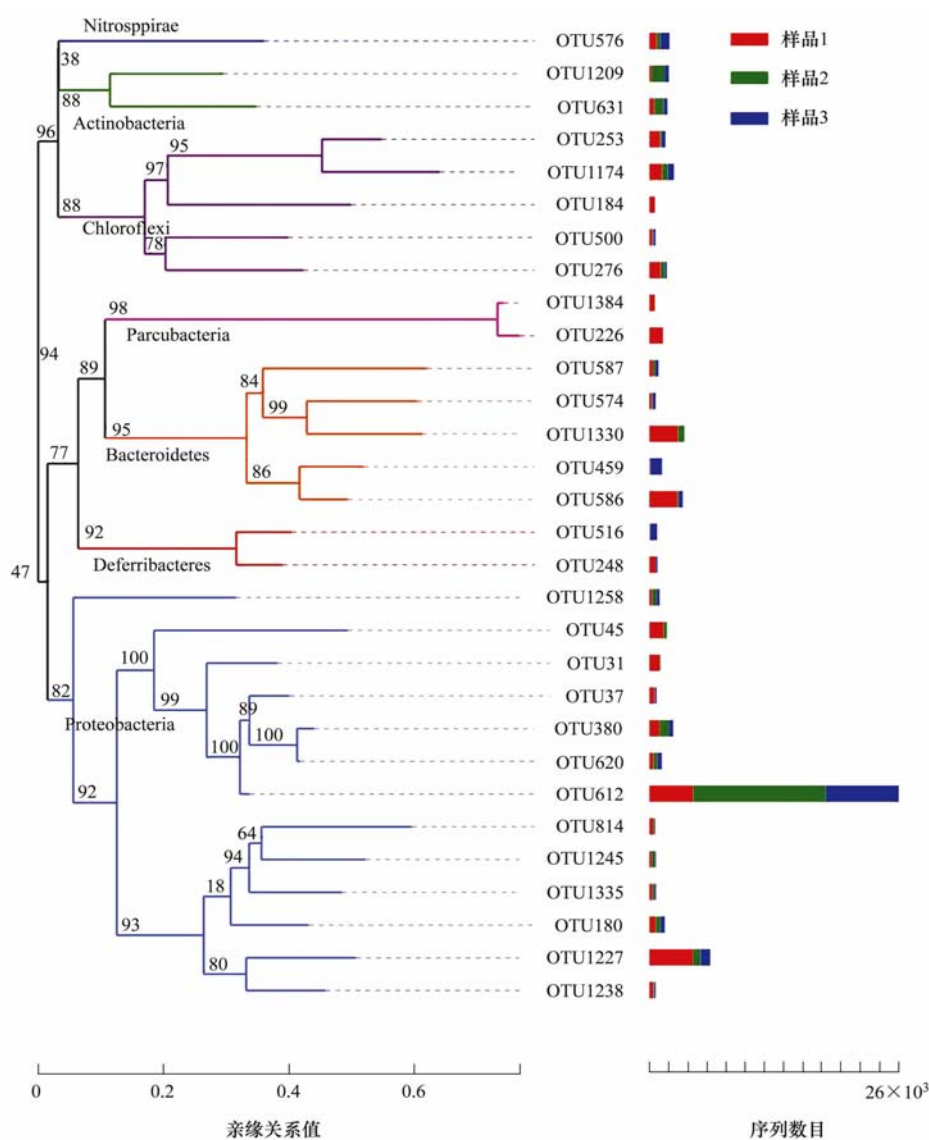


图 10 淀粉废水活性污泥系统发育树

Fig. 10 Phylogenetic tree of activated sludge for wastewater treatment containing starch

存在硝酸盐还原能力,具有嗜热和厌氧等生长特点^[34].综上所述,淀粉废水处理系统的活性污泥中存在大量特殊功能细菌,对该废水的污染物降解,尤其是氮磷去除发挥着重要作用.

3 结论

(1)淀粉废水活性污泥中微生物多样性较高,3个活性污泥样品共同存在的菌占多数,说明同一种废水条件下,不同形态与结构的污泥微生物群落分布有相当稳定性.

(2)活性污泥样品中优势类群主要是变形菌门、拟杆菌门、绿弯菌门和放线菌门等.随着运行时间推移,变形菌门和放线菌门占比逐渐增加,拟杆菌门和绿弯菌门占比逐渐降低.

(3)优势拟杆菌门的主要成员是鞘脂杆菌纲,在活性污泥沉降性能较差时占据绝对优势,而沉降

性能较好时占比下降.优势类群绿弯菌门的主要成员是厌氧绳菌纲,污泥性能较好时其占比明显增加,变化趋势正好相反,或许它们二者之间的耦合变化与污泥沉降性能变化密切相关.

(4)淀粉废水活性污泥样品中存在大量特殊功能菌群,它们在该淀粉废水处理过程中,对污染物分解和氮磷去除发挥着重要作用.

参考文献:

[1] Guo J H, Ni B J, Han X Y, *et al.* Unraveling microbial structure and diversity of activated sludge in a full-scale simultaneous nitrogen and phosphorus removal plant using metagenomic sequencing[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2017, **102**: 16-25.

[2] Allievi M J, Silveira D D, Cantão M E, *et al.* Bacterial community diversity in a full scale biofilter treating wastewater odor[J]. *Water Science & Technology*, 2018, **77**(8): 2014-2022.

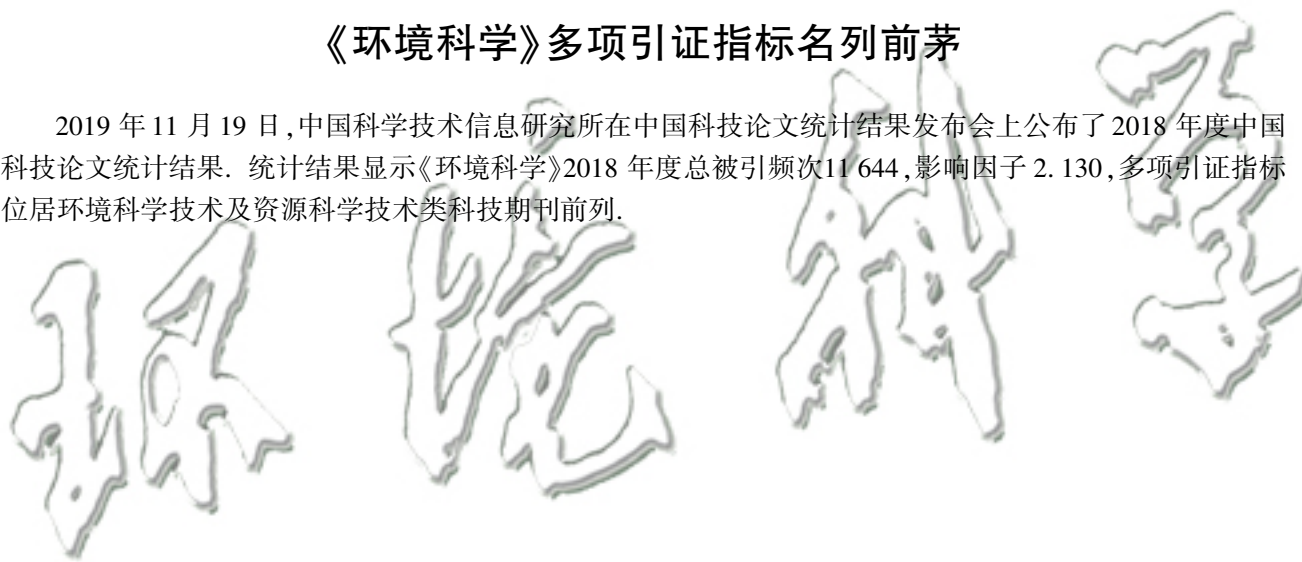
[3] Dunkel T, de León Gallegos E L, Bock C, *et al.* Illumina sequencing for the identification of filamentous bulking and

- foaming bacteria in industrial activated sludge plants [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2018, **15**(6): 1139-1158.
- [4] 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.
- [5] Sun X D, Lyu G, Luan Y S, *et al.* Analyses of microbial community of naturally homemade soybean pastes in Liaoning Province of China by Illumina MiSeq Sequencing [J]. Food Research International, 2018, **111**: 50-57.
- [6] 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.
- [7] 王绍祥, 杨洲祥, 孙真, 等. 高通量测序技术在水环境微生物群落多样性中的应用[J]. 化学通报, 2014, **77**(3): 196-203.
- Wang S X, Yang Z X, Sun Z, *et al.* Application of high throughput sequencing in the diversity of water microbial communities[J]. Chemistry, 2014, **77**(3): 196-203.
- [8] Huang X Q, Liu L L, Wen T, *et al.* Illumina MiSeq investigations on the changes of microbial community in the *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* infected soil during and after reductive soil disinfection [J]. Microbiological Research, 2015, **181**: 33-42.
- [9] Keshri J, Pradeep Ram A S, Colombet J, *et al.* Differential impact of lytic viruses on the taxonomical resolution of freshwater bacterioplankton community structure [J]. Water Research, 2017, **124**: 129-138.
- [10] Yang R X, Liu P, Ye W Y. Illumina-based analysis of endophytic bacterial diversity of tree peony (*Paeonia* Sect. *Moutan*) roots and leaves[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2017, **48**(4): 695-705.
- [11] Peng Y K, Li J, Lu J L, *et al.* Characteristics of microbial community involved in early biofilms formation under the influence of wastewater treatment plant effluent [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **66**: 113-124.
- [12] Ma X, Zhang G M, Li G W, *et al.* Biofilm bacterial community transition under water supply quality changes in drinking water distribution systems[J]. Environmental Science; Water Research & Technology, 2018, **4**(5): 644-653.
- [13] 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, Chen 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.
- [14] 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 等. 低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1070-1074.
- Duan Z H, Pan L M, Chen X O, *et al.* Changes of microbial community structure in activated sludge bulking at low temperature[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1070-1074.
- [15] GB 18918-2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- [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] Xie X H, Liu N, Ping J, *et al.* Illumina MiSeq sequencing reveals microbial community in HA process for dyeing wastewater treatment fed with different co-substrates [J]. Chemosphere, 2018, **201**: 578-585.
- [18] 罗晓, 郑向阳, 赵丛丛, 等. A/O 工艺中污泥浓度对微生物群落结构的影响[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(1): 275-283.
- Luo X, Zheng X Y, Zhao C C, *et al.* Effects of sludge concentration on microbial community structure in A/O process [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(1): 275-283.
- [19] Saunders A M, Albertsen M, Vollertsen J, *et al.* The activated sludge ecosystem contains a core community of abundant organisms[J]. The ISME Journal, 2016, **10**(1): 11-20.
- [20] 何荣. 环氧丙烷皂化废水活性污泥中微生物群落分析及利用剩余污泥合成聚羟基脂肪酸酯(PHA)[D]. 济南: 济南大学, 2017. 15-16.
- [21] 刘文龙, 刘超, 沈琛, 等. 活性污泥长期好氧饥饿下的微生物种群结构演化[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, **51**(8): 20-27.
- Liu W L, Liu C, Shen C, *et al.* Microbial community evolution in activated sludge during long-term aerobic starvation period [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, **51**(8): 20-27.
- [22] 陈启伟, 苏馈足, 陈丁丁, 等. 处理番茄酱加工废水的活性污泥颗粒化过程[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(2): 369-378.
- Chen Q W, Su K Z, Chen D D, *et al.* Process of aerobic granulation of activated sludge treating tomato paste processing wastewater[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(2): 369-378.
- [23] 韩岳桐, 赵堃, 王森, 等. 青岛海泊河污水处理厂缺氧池中微生物群落动态变化[J]. 中国海洋大学学报, 2018, **48**(7): 103-110, 129.
- Han Y T, Zhao K, Wang S, *et al.* Dynamic variation of microbial community in the anoxic tank from Haiho River wastewater treatment plant of Qingdao [J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, **48**(7): 103-110, 129.
- [24] 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 等. 同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4696-4705.
- Gao J F, Wang S J, Fan X Y, *et al.* Microbial population dynamics during sludge granulation in a simultaneous nitrogen and phosphorus removal system [J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4696-4705.
- [25] 叶程晨. Ca(II)介导的活性污泥微生物种群结构变化对活性污泥沉降性能的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2016. 31-32.
- [26] Ponce-Robles L, Polo-López M I, Oller I, *et al.* Practical approach to the evaluation of industrial wastewater treatment by the application of advanced microbiological techniques [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **166**: 123-131.
- [27] Gu M Q, Yin Q D, Wang Z Z, *et al.* Color and nitrogen removal from synthetic dye wastewater in an integrated mesophilic hydrolysis/acidification and multiple anoxic/aerobic process[J]. Chemosphere, 2018, **212**: 881-889.
- [28] 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.
- [29] Sun L W, Toyonaga M, Ohashi A, *et al.* Isolation and characterization of *Flexilinea flocculi* gen. nov., sp. nov., a filamentous, anaerobic bacterium belonging to the class

- Anaerolineae in the phylum Chloroflexi[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2016, **66** (2): 988-996.
- [30] Pronk M, Neu T R, Van Loosdrecht M C M, *et al.* The acid soluble extracellular polymeric substance of aerobic granular sludge dominated by *Deftuicoccus* sp. [J]. Water Research, 2017, **122**: 148-158.
- [31] Delgado Vela J, Dick G J, Love N G. Sulfide inhibition of nitrite oxidation in activated sludge depends on microbial community composition[J]. Water Research, 2018, **138**: 241-249.
- [32] Yang J A, Yang S H, Kim J, *et al.* Comparative genome analysis of the *Flavobacteriales* bacterium strain UJ101, isolated from the gut of *Atergatis reticulatus* [J]. Journal of Microbiology, 2017, **55**(7): 583-591.
- [33] Rubio-Rincón F J, Lopez-Vazquez C M, Welles L, *et al.* Cooperation between *Candidatus* Competibacter and *Candidatus* Accumulibacter clade I, in denitrification and phosphate removal processes[J]. Water Research, 2017, **120**: 156-164.
- [34] Kublanov I V, Sigalova O M, Gavrilov S N, *et al.* Genomic Analysis of *Caldithrix abyssi*, the thermophilic anaerobic bacterium of the novel bacterial phylum calditrichaeota [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, **8**: 195.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2019年11月19日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2018年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2018年度总被引频次11 644,影响因子2.130,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> (1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> (14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> (31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> (39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo (50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> (65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xinxiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> (82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> (90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> (98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> (106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> (125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> (133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> (166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, Jilili Abuduwali, <i>et al.</i> (173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> (183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhao, WEI Hao, <i>et al.</i> (224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> (242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> (262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> (284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> (293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> (304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> (313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> (321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> (345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> (368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> (377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> (385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Tian-hui, <i>et al.</i> (394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshangang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> (412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> (420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Jiulong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> (449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> (460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> (479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> (489)