

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征 ..... 秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)

基于 LUR 模型的中国 PM<sub>2.5</sub> 时空变化分析 ..... 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)

长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制 ..... 黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)

春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析 ..... 杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)

成都双流夏秋季环境中 VOCs 污染特征 ..... 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)

佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成 ..... 李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)

四川省人为源大气污染物排放清单及特征 ..... 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)

炼焦工序颗粒物排放特征 ..... 王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)

小流域大气氮干湿沉降特征 ..... 王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)

流域氮素主要输出途径及变化特征 ..... 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)

生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响 ..... 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)

长江上游农业源溪流雨季中 N<sub>2</sub>O 间接排放特征 ..... 田琳琳, 王正, 朱波 (5391)

不同氮污染特征河流 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度、释放通量与排放系数 ..... 王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)

多种同位素手段的硝酸盐污染源解析, 以会仙湿地为例 ..... 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)

典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ<sup>18</sup>O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例 ..... 吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)

沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析 ..... 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)

2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响 ..... 廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)

周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征 ..... 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)

三峡库区沉积物中镍污染特征评价 ..... 张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)

四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律 ..... 郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)

大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响 ..... 周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)

模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征 ..... 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)

典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化 ..... 王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)

4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析 ..... 江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)

微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响 ..... 王木兰, 姜玥璐 (5514)

广东省水库拟柱孢藻 (*Cylindrospermopsis raciborskii*) 的分布特征及影响因素分析 ..... 雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)

磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸 ..... 尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)

臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果 ..... 兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)

水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能 ..... 顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)

“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性 ..... 刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)

静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应 ..... 王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)

多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制 ..... 王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)

主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程 ..... 刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)

不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响 ..... 高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)

主流厌氧氨氧化工艺的运行优化及其微生物的群落变迁 ..... 付昆明, 付冀, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)

厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性 ..... 陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)

低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能 ..... 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)

复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险 ..... 吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)

不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险 ..... 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)

某大型神渣场地土壤 As 污染特征及生态风险评价 ..... 刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)

亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系 ..... 辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)

岩溶区典型灌丛植物根系从枝菌根真菌群落结构解析 ..... 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)

模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响 ..... 李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)

添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响 ..... 柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)

长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响 ..... 马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)

黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系 ..... 乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)

生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解 ..... 刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)

CO<sub>2</sub> 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征 ..... 唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)

基于层次分析法的医疗废物处置技术评价 ..... 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)

中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力 ..... 刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)

《环境科学》第 39 卷(2018 年) 总目录 ..... (5740)

《环境科学》征订启事 (5343) 《环境科学》征稿简则 (5439) 信息 (5595, 5619, 5638)

## 4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析

江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊\*

(武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070)

**摘要:** 为了从微生物层面探讨曝气、挂膜周期、池形(或流态)改变对生物滤池净化效率的影响, 试验设计了 4 种不同工况的生物滤池, 即 MAVF、NAVF、NVF、BHF, 其中前三者为垂直流滤池, 最后一种为折流式水平流滤池. 4 组滤池框架和滤料相同, MAVF 与 BHF 串联, 且于试验前期运行 1 a, NAVF 及 NVF 为新启用滤池. 4 组滤池采取同步序批次运行, 其中 MAVF、NAVF 进行间歇曝气, 其余两组未曝气. 于新启用滤池挂膜阶段, 对 4 组滤池同步处理生活污水的净化效率进行持续监测, 并于挂膜结束后采集基质样品分析滤池微生物群落结构特征. 结果表明, 3 组垂直流滤池的净化效率显著高于水平流滤池; 曝气显著提高了滤池的净化效能, 但与滤池微生物成熟度相比, 前者的影响更弱. 4 组滤池内均无明显硝氮、亚硝氮积累, 反硝化进行得很彻底. 16S rDNA 高通量测序分析表明, 4 组滤池的多样性指数高低是 BHF > MAVF > NAVF > NVF, 表明滤池愈成熟, 多样性指数愈高. 4 组滤池内微生物以兼性异养菌为主, 且以异养反硝化脱氮菌最为丰富. NVF 及 BHF 滤池内发生了异养硝化过程, 曝气促进了滤池内好氧硝化菌的富集. 4 组滤池内均未检测到好氧聚磷菌, 磷的去除以反硝化聚磷为主. 试验工况下, 滤池对总氮的去除率不高主要归结于滤池内尚未富集到自养硝化菌或其丰度不高, 后者导致滤池的氨氧化能力有限, 进而影响总氮去除. 以上研究结果表明, 不同工况的调整会影响到生物滤池的氧化还原状态和功能菌富集, 进而最终影响净化效率.

**关键词:** 生物滤池; 净化效能; 微生物群落结构; 高通量测序; 自养硝化; 异养反硝化

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5503-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804203

## Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions

JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, ZHANG Shi-yang\*

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** To explore the effects of aeration, microbial acclimation period, and pool shape or flow pattern change on the purification efficiency of biofilters at the microbiological level, four biofilters with different working conditions, that is, MAVF, NAVF, NVF, and BHF, were studied. The first three are vertical-flow biofilters and the last one is a baffled-flow biofilter. The four filters filled with the same ceramsite were made of organic glass. The MAVF filter was connected with the BHF filter in series and was operated for one year prior to the trial. The NAVF and NVF filters are newly activated filters. The four filters that were used to treat domestic sewage were synchronously operated in batch mode in this study. The MAVF and NAVF filters were intermittently aerated in contrast to the other two. During the period of microbial acclimation of the newly activated filters, the purification efficiency of the four filters was continuously monitored and the microbial community structure characteristics were analyzed at the end of microbial acclimation. The results show that the purification efficiency of the three vertical-flow filters is significantly higher than that of the horizontal-flow one and aeration significantly enhances the purification efficiency. However, aeration has a weaker effect on the efficiency than the microbial maturity of the filter. An apparent accumulation of nitrates or nitrites in the four filters was not observed, indicating that the denitrification was rather thorough. The 16S rDNA high-throughput sequencing analysis shows that the diversity index of the four filters is BHF > MAVF > NAVF > NVF, indicating that the more mature the filter is, the higher is the diversity index. Most of the packing microorganisms are facultative heterotrophic bacteria and the most abundant are heterotrophic denitrifying bacteria. Heterotrophic nitrification occurs in the NVF and BHF filters and aeration promotes the enrichment of aerobic ammonium-oxidizing bacteria. Aerobic phosphorus-accumulating organisms were not detected in the four filters. Therefore, phosphorus was mainly removed via denitrifying phosphorus accumulation. Under the test conditions, the removal rate of total nitrogen was not high, mainly because nitrifying bacteria were not enriched in the filter or their abundance was insufficient. The latter resulted in the limited ammonium-oxidizing ability of the filter, thus affecting the removal of total nitrogen. The above-mentioned results show that the adjustment of different working conditions will affect the redox status and associated enrichment of functional bacteria inside the biofilter, which will ultimately affect the purification efficiency.

**Key words:** biofilter; purification efficiency; microbial community structure; high-throughput sequencing; autotrophic nitrification; heterotrophic denitrification

收稿日期: 2018-04-24; 修订日期: 2018-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31202034); 湖北省自然科学基金项目(2017CFB511); 中央高校基本科研业务费专项(163106004)

作者简介: 江肖良(1994 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理与资源化, E-mail: 3512255742@qq.com

\* 通信作者, E-mail: zhangshiyang7@126.com

作为生物膜法处理技术之一,生物滤池在污水处理领域已有不少应用,如工厂化水产养殖用到的各种生物包<sup>[1]</sup>,低污染源水的深度处理<sup>[2]</sup>,以及与其它水处理工艺的耦合<sup>[3]</sup>等.在城市污水处理方面,生物滤池常用于污水深度脱氮,一般是强化硝化-反硝化,对应的构筑物有曝气生物滤池、反硝化滤池等.曝气生物滤池是目前研究和应用较多的一种,有关其净化机制、效能评价、参数优化、技术开发等研究较多<sup>[4]</sup>.然而持续曝气的生物滤池不仅耗能高,同时滤池内的好氧环境也不利于反硝化.为此,研究者们又提出了间歇曝气生物滤池,通过创造滤池内的交替好氧/厌氧(或缺氧)状态,不仅节能,还有利于同步脱氮除磷<sup>[5]</sup>.

对于新启用的生物滤池而言,挂膜所需时间长短会影响到实际生产应用.挂膜通常是指进行微生物适应性驯化,定向培育或富集功能微生物.由于生物滤池的构筑方式、处理对象、运行环境条件等多样,目前关于生物滤池的启动时间长短报道不一<sup>[2, 6~8]</sup>.另外,生物滤池的净化效率不仅受控于滤料种类、填充深度、水力负荷、污染负荷、环境条件等,还与池形(或流态)密切相关,如硝化型曝气滤池可设计成下行流,通过水-气对流增加氧气传质效果;反硝化滤池可设计成折流式,减小死水区,增加污染物与基质的充分接触,延长停留时间.

生物滤池的净化作用主要依赖于功能微生物,后者又与上述影响因素密切相关.然而目前从微生物层面深入剖析滤池工况调整与净化效率的量化关系及其机制的报道较少.为了探究曝气、挂膜周期(或生物膜发育成熟度)、池形(或流态)等改变对生物滤池净化效率的影响,本文设计了4种不同运行工况的生物滤池,即3组垂直流滤池(MAVF、NAVF、NVF)和一组折流式水平流滤池(BHF).4组滤池在同一环境条件下同步处理模拟配制的生活污水,通过各组滤池净化效率的比较及微生物群落结构解析,明确滤池净化效率与上述影响因素的量化关系,以期为实际生产应用提供理论指导.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验系统设计与构建

试验构建的4组生物滤池框架均为有机玻璃,其中3组垂直流滤池规格一致,即 $L \times W \times H$ 为 $48 \text{ cm} \times 48 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ ,水平流滤池为 $100 \text{ cm} \times 48 \text{ cm}$ ,

$48 \text{ cm}$ ,水平流滤池内还设置了9个等间距平行交错的折流板( $39 \text{ cm} \times 0.9 \text{ cm} \times 48 \text{ cm}$ ).4组滤池内均填充孔径 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 、孔隙率为 $0.433$ 的多孔陶粒;垂直流、水平流滤池填充深度分别为 $38$ 、 $34 \text{ cm}$ .曝气滤池安装了曝气系统,具体在曝气滤池底部铺设PVC布气管,布气管直径 $20 \text{ mm}$ ,表面钻有间距 $5 \sim 8 \text{ mm}$ 、大小 $5 \sim 6 \text{ mm}$ 的出气孔;布气管内穿插纳米微孔曝气管(内径 $\times$ 外径 $= 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ),后者通过聚乙烯软管(内径 $\times$ 外径 $= 10 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ )与旋涡风机相连(风量: $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;最大风压: $10 \text{ kPa}$ ;品牌:亚士霸;型号:HG-250;产地:浙江台州).运行时,污水经水泵抽提后通过垂直流滤池表面的布水管流入滤池内,其中MAVF滤池出水流入BHF滤池,而NAVF和NVF滤池出水直接外排.各组滤池底部或末端装有出水阀,用于调控滤池排水(图1).

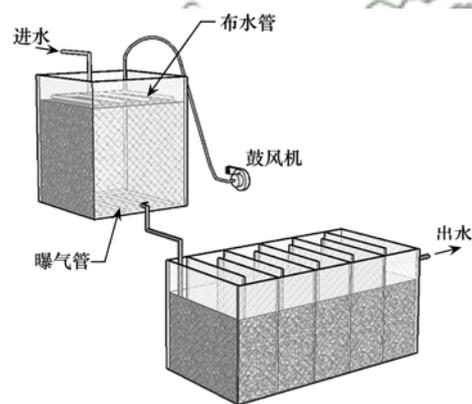


图1 垂直流和折流式水平流滤池的结构示意

Fig. 1 Schematic diagrams of the vertical-flow and baffled horizontal-flow biofilters

### 1.2 滤池运行与数据采集

本试验开始之前,MAVF、BHF滤池已于前期运行1 a,主要用于处理模拟配制的高浓度养殖废水<sup>[9]</sup>,滤池内已形成成熟的生物膜;而NAVF、NVF为新启用滤池.试验启动时,于各组滤池内接种采自武汉某污水处理厂生化池末端的活性污泥,每天接种1次,连续接种3 d.过后,再往滤池内引入模拟配制的生活污水进行挂膜/微生物驯化,并开始采集数据,期间MAVF、NAVF滤池进行曝气,其余未曝气.生活污水的配制参考该污水厂沉砂池的出水.生活污水的配制方案如下:每升水含面粉、葡萄糖(含少量钠、钙、铁、锌等元素)、碳酸氢铵、磷酸二氢钾的质量依次为 $0.30$ 、 $0.15$ 、 $0.2256$ 和 $0.0439 \text{ g}$ .配制废水对应各项污染物的质量浓度见表1.

表 1 试验模拟配制的废水组成<sup>1)</sup>/mg·L<sup>-1</sup>  
Table 1 Composition of the simulated wastewater used  
for the experiment/mg·L<sup>-1</sup>

水质指标	质量浓度
TCOD	97.79 ± 2.42
DCOD	75.02 ± 2.99
TP	9.54 ± 0.78
IP	9.02 ± 0.61
TAN	36.58 ± 1.29
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	2.06 ± 0.08
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	0.01 ± 0.00
TN	45.80 ± 2.29
DIN	38.65 ± 1.33
Org-N	7.15 ± 2.73
Na	0.45 ± 0.07
Ca	0.38 ± 0.06
Fe	0.01 ± 0.01
Zn	0.02 ± 0.02

1)表中数据表达为平均值 ± 标准差; DIN = TAN + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N + NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N; Org-N = TN - DIN, 下同

目前关于生物滤池启动时间长短尚无定论,如张菊萍等<sup>[6]</sup>采用接种挂膜方式,在平均水温为 16.7℃时,仅需 17 d 就可以实现曝气生物滤池成功挂膜;王建华等<sup>[7]</sup>考察了进水是否含有有机物对硝化型曝气生物滤池挂膜的影响,发现进水不含有机物的滤池成功挂膜仅需 18 d,而进水含有有机物的滤池成功挂膜需 24 d;端艳等<sup>[8]</sup>称悬浮陶粒曝气生物滤池处理城镇污水的自然挂膜启动时间为 23 d;王东等<sup>[2]</sup>比较了沸石和陶粒填料曝气生物滤池处理微污染水源水的低温启动特性,在水温为 10~14℃的启动条件下,均可在 30 d 内完成接种挂膜。本研究将新滤池挂膜时间设定为一个月,期间将各垂直流滤池水力负荷设为 0.05、0.10、0.18 m<sup>3</sup>·(m<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup> 这 3 个水平,每个水平持续运行 10 d。

3 组垂直流滤池每天间歇进水 1 次,其中 MAVF 出水即为 BHF 进水。曝气滤池每天间歇曝气 6 h,即上午 09:00~12:00、下午 14:30~17:30;对应 3 种水力负荷的气水比约为 1 200:1、600:1 和 300:1。水样采集点为滤池进、出水,采样频率为每天 1 次。采用美国 YSI 多参数水质分析仪(型号: Pro Plus)现场测定温度(*T*)、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、碱度(pH)、电导率(Cond)、比电导率(SC)、总溶解固体(TDS)、盐度(Sal)等在线参数。水样采集后,按国家标准方法<sup>[10]</sup>测定 COD、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、TAN、TP、IP 等指标,其中 COD 为高锰酸盐指数。COD 又分为总有机物(TCOD)和溶解性有机物(DCOD)。DCOD 为水样

经 0.45 μm 滤纸过滤后测定值,TCOD 为直接测定值。

挂膜结束后,采集各组滤池陶粒样品送杭州联川生物技术股份有限公司进行微生物检测,具体是通过 16S rDNA 高通量测序方法完成微生物群落结构分析。测序平台为 MiSeq,采用细菌 16S rDNA V3 + V4 区域通用引物:338F ACTCCTACGGGAGGC AGCAG 和 806R GGACTACHVGGGTWTCTAAT。下机原始数据利用 overlap 将双端数据进行拼接,并进行质控、嵌合体过滤以获得高质量的有效数据,随后对其进行 97% 的相似度聚类。为了降低假阳性率,过滤 singleton 序列以获得最终的 OTU 丰度及代表序列。

### 1.3 数据分析

生物滤池的净化效率除受污染负荷影响外,还与滤料类型、填充深度密切相关,后者会影响到构建成本。为了综合多方面因素,本文采用去除率和一阶去除率常数 *k* 来评价滤池的净化效能,即:

$$\text{去除率} = (c_i - c_e) / c_i \times 100\%$$

$$k = \text{HLR} \times (\ln c_i - \ln c_e) / (h_w \times \varepsilon)$$

式中,*k* 为一价去除率常数, d<sup>-1</sup>; HLR 为水力负荷, m·d<sup>-1</sup>; *c<sub>i</sub>*、*c<sub>e</sub>* 分别为进、出水污染物质量浓度, mg·L<sup>-1</sup>; *h<sub>w</sub>* 为基质填充深度;  $\varepsilon$  为孔隙率。

采用独立 *t*-test 检验各组滤池进出水间理化特征的差异。因为 BHF 滤池进水即为 MAVF 出水,为了屏蔽进水浓度对滤池净化效率的影响,以进水污染负荷为协变量,采用协方差分析比较各组滤池间净化效率的差异。此外,为了比较各组滤池微生物群落结构及净化效率的相似性,采用层次聚类法对优势菌种的相对丰度、所有 OTU 序列数及一阶去除率常数 *k* 进行聚类;同时为了探究优势菌种与滤池出水理化环境特征及净化效率的关系,还对这些变量进行了冗余度(redundancy analysis, RDA)排序分析。选择 RDA 是因为某些污染物指标的 *k* 值为负。排序、聚类分析分别在 CANOCO 4.5、ORIGIN8.6 软件中完成,其它分析在 SPSS 19.0 软件中完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同运行工况滤池进出水理化特征比较

由表 2 可知,4 种不同工况生物滤池进出水理化参数间的差异主要体现在温度、溶解氧、氧化还原电位、碱度等指标上,而电导率、比电导率、总溶解固体、盐度等指标的变化较小。另外,与 3 组

垂直流滤池相比,水平流滤池进出水间的差异更小(仅氧化还原电位存在显著差异)。进一步比较发现,经垂直流滤池处理后,出水温度显著升高,溶解氧、pH 显著降低。温度升高可能是因为曝气所致(鼓风机持续运行发热,吹出的空气高于室温);溶解氧、pH 降低是因为滤池内部存在硝化过程,需要消耗溶解氧和碱度。曝气显著提高了滤池出水溶解氧和 pH(NVF 出水的 DO、pH 分别与 NAVF、

MAVF 出水的 DO、pH 相比,所有  $P < 0.05$ ),原因可能是因为硝化过程需要消耗  $\text{CO}_2$ ,曝气能不断地向滤池内部输送  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$ ,而未曝气滤池硝化过程需要消耗原水中的  $\text{CO}_3^{2-}$  或  $\text{HCO}_3^-$ ,后者致使 pH 降低<sup>[11]</sup>。此外,依据高立杰等<sup>[12]</sup>提出的 DO 等级划分方法,即  $< 0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  代表厌氧、 $0.4 \sim 0.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  代表兼氧及  $> 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  代表好氧,本研究 4 组滤池内溶解氧含量处于好氧和兼氧水平。

表 2 4 组滤池进出水理化参数比较<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison of the physicochemical parameters between inflow and outflow of the four biofilters

位点	滤池类型 <sup>2)</sup>	温度 / $^{\circ}\text{C}$	DO 范围 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DO / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	氧化还原电位 /mV	碱度 pH	电导率 / $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	比电导率 / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	总溶解固体 / $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	盐度 $\times 10^{-6}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
进水		17.1 $\pm$ 2.0	7.74 ~ 10.37	8.92 $\pm$ 0.69	95 $\pm$ 73	7.44 $\pm$ 0.32	0.35 $\pm$ 0.18	422 $\pm$ 216	0.27 $\pm$ 0.14	0.21 $\pm$ 0.11
出水	MAVF	19.5 $\pm$ 1.9 ***	1.36 ~ 9.71	2.26 $\pm$ 1.77 ***	71 $\pm$ 48	7.24 $\pm$ 0.20 **	0.29 $\pm$ 0.08	326 $\pm$ 94 *	0.21 $\pm$ 0.06 *	0.16 $\pm$ 0.05 *
	NAVF	19.6 $\pm$ 1.9 ***	0.87 ~ 2.61	1.64 $\pm$ 0.40 ***	72 $\pm$ 43	7.23 $\pm$ 0.17 **	0.40 $\pm$ 0.11	451 $\pm$ 124	0.29 $\pm$ 0.08	0.22 $\pm$ 0.06
	NVF	19.6 $\pm$ 2.0 ***	0.96 ~ 1.62	1.28 $\pm$ 0.16 ***	48 $\pm$ 62 **	6.89 $\pm$ 0.26 ***	0.44 $\pm$ 0.13 *	491 $\pm$ 138	0.32 $\pm$ 0.09	0.24 $\pm$ 0.07
	BHF	19.4 $\pm$ 1.9	0.99 ~ 2.15	1.70 $\pm$ 0.26	19 $\pm$ 68 **	7.18 $\pm$ 0.32	0.28 $\pm$ 0.08	311 $\pm$ 96	0.20 $\pm$ 0.06	0.15 $\pm$ 0.05

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $< 0.01$ ; \*\*\* 表示  $< 0.001$ ; 2) MAVF、NAVF 和 NVF 的进水相同, BHF 的进水即为 MAVF 的出水,下同

## 2.2 不同运行工况滤池净化效能比较

由表 3 可知,4 组滤池的出水硝氮、亚硝氮含量都很低(出水硝氮、亚硝氮的均值分别在  $0.40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下),表明 4 组滤池内均无明显的硝氮、亚硝氮积累,这也说明滤池内反硝化进行得很充分。相应地,各组滤池出水中溶解性氮素以未被硝化的氨氮为主。此外,通过比较滤池出水溶解性氮素和有机氮含量,发现 MAVF 及 BHF 滤池出水总氮以有机氮为主,而 NAVF 及 NVF 滤池出水总氮以溶解性氮素为主,这可能是由于前两组滤池内生物膜相对成熟,微生物数量丰富,并由生物膜更新脱落所致。因此,成熟滤池出水经沉

淀处理后可进一步提高总氮去除效果。比较各组滤池的去除率,发现 3 组垂直流滤池对有机物的去除率均较高,其中 TCOD 的去除率都在 80% 以上,但水平流滤池除对有机物/有机氮有一定的去除作用外,对其它指标的去率基本为负。BHF 滤池对有机物、有机氮及总氮的去率为正,对氨氮、硝氮、亚硝氮及溶解性氮素的去除率为负,表明滤池内发生了有机物的氨化、氨氮的硝化/亚硝化及反硝化等。同时,由 BHF 滤池进出水各氮素指标的数值大小可知, BHF 滤池内发生的上述氮素转化强度非常弱,可能归结于 BHF 滤池内部较低的溶解氧水平。

表 3 4 种不同工况滤池的进出水浓度、去除率及一阶去除率常数比较<sup>1)</sup>

Table 3 Comparison of the inflow/outflow pollutant concentrations and their percent removal rate or  $k$  of the four biofilters operated under different working conditions

项目	滤池类型	TCOD	DCOD	TP	IP	TAN	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	TN	DIN	Org-N
出水浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	MAVF	7.89 $\pm$ 2.73	6.93 $\pm$ 2.21	6.18 $\pm$ 2.35	5.49 $\pm$ 2.29	5.76 $\pm$ 5.62	0.01 $\pm$ 0.01	0.06 $\pm$ 0.07	21.75 $\pm$ 6.28	5.84 $\pm$ 5.61	15.91 $\pm$ 2.03
	NAVF	15.06 $\pm$ 3.16	13.70 $\pm$ 3.13	7.24 $\pm$ 1.00	6.46 $\pm$ 1.17	25.39 $\pm$ 2.79	0.02 $\pm$ 0.01	0.26 $\pm$ 0.22	39.16 $\pm$ 4.02	25.66 $\pm$ 2.76	13.50 $\pm$ 3.28
	NVF	18.34 $\pm$ 3.21	16.68 $\pm$ 3.13	7.50 $\pm$ 0.68	6.53 $\pm$ 1.27	30.41 $\pm$ 2.15	0.01 $\pm$ 0.00	0.40 $\pm$ 0.19	43.26 $\pm$ 3.12	30.81 $\pm$ 2.13	12.45 $\pm$ 3.42
	BHF	5.03 $\pm$ 2.22	4.40 $\pm$ 1.90	6.47 $\pm$ 1.22	5.31 $\pm$ 0.99	5.99 $\pm$ 4.57	0.02 $\pm$ 0.02	0.22 $\pm$ 0.18	21.31 $\pm$ 5.96	6.23 $\pm$ 4.72	15.08 $\pm$ 2.83
去除率 /%	MAVF	91.9 $\pm$ 2.8A	90.8 $\pm$ 2.9A	36.0 $\pm$ 22.9A	40.1 $\pm$ 23.5A	84.4 $\pm$ 15.1A	-190.7 $\pm$ 342.5AB	97.0 $\pm$ 3.2A	51.9 $\pm$ 16.2A	85.0 $\pm$ 14.3A	-275.2 $\pm$ 544.8A
	NAVF	84.6 $\pm$ 3.3B	81.7 $\pm$ 4.4B	23.9 $\pm$ 10.2AB	28.3 $\pm$ 12.2A	30.4 $\pm$ 8.6B	-281.7 $\pm$ 223.6A	87.5 $\pm$ 11.0A	14.5 $\pm$ 7.6B	33.5 $\pm$ 8.1B	-168.1 $\pm$ 310.7A
	NVF	81.2 $\pm$ 3.4C	77.7 $\pm$ 4.6C	21.2 $\pm$ 7.0B	27.7 $\pm$ 12.2A	16.9 $\pm$ 4.9C	-142.7 $\pm$ 168.7B	80.6 $\pm$ 9.7A	5.6 $\pm$ 5.0C	20.3 $\pm$ 4.7C	-126.2 $\pm$ 211.4A
	BHF	36.2 $\pm$ 18.8D	36.5 $\pm$ 18.5D	-28.1 $\pm$ 72.7C	-33.0 $\pm$ 102.0B	-36.1 $\pm$ 72.7C	-102.8 $\pm$ 216.6B	-300.7 $\pm$ 672.4B	0.2 $\pm$ 20.1bC	-38.3 $\pm$ 76.1D	4.2 $\pm$ 19.6B
$k$	MAVF	1.65 $\pm$ 0.70a	1.56 $\pm$ 0.67a	0.28 $\pm$ 0.17a	0.32 $\pm$ 0.19a	1.29 $\pm$ 0.49a	-0.56 $\pm$ 0.73a	2.05 $\pm$ 1.50a	0.44 $\pm$ 0.16a	1.31 $\pm$ 0.49a	-0.76 $\pm$ 0.90a
	NAVF	1.22 $\pm$ 0.54b	1.11 $\pm$ 0.49b	0.20 $\pm$ 0.14a	0.24 $\pm$ 0.16ab	0.24 $\pm$ 0.13b	-0.83 $\pm$ 0.62b	1.67 $\pm$ 1.23a	0.11 $\pm$ 0.11b	0.27 $\pm$ 0.15b	-0.54 $\pm$ 0.70a
	NVF	1.10 $\pm$ 0.53b	0.98 $\pm$ 0.46b	0.16 $\pm$ 0.11a	0.19 $\pm$ 0.08ab	0.12 $\pm$ 0.07c	-0.47 $\pm$ 0.61a	1.23 $\pm$ 0.76a	0.05 $\pm$ 0.06b	0.15 $\pm$ 0.09c	-0.47 $\pm$ 0.58a
	BHF	0.17 $\pm$ 0.13c	0.17 $\pm$ 0.14c	0.00 $\pm$ 0.18b	0.05 $\pm$ 0.26b	-0.07 $\pm$ 0.20d	-0.16 $\pm$ 0.52a	-0.36 $\pm$ 0.63b	0.01 $\pm$ 0.09b	-0.08 $\pm$ 0.20d	0.03 $\pm$ 0.10b

1) 采用字母标记法标注各组滤池间去除率及一阶去除率常数  $k$  的差异,且分别以大、小写区分

3 组垂直流滤池对硝氮都有较高的  $k$  值(表 3), 表明滤池内部反硝化作用较为明显, 可能是因为反硝化异养菌易于增殖, 滤池的间歇曝气运行没有对反硝化过程造成抑制。相反, 在水平流滤池中, 各项氮素指标的  $k$  值基本为负(总氮和有机氮除外), 表明水平流滤池内部硝化-反硝化过程都受到了一定程度的抑制, 可能是因为水平流滤池没有曝气, 滤池内部的低溶解氧水平和相对不高的环境温度不利于硝化过程的进行, 进而不能为反硝化提供足够的反应底物。

方差分析结果显示, 不同工况滤池之间各项指标的  $k$  值都存在显著差异(表 3)。多重比较发现, 4 组滤池对碳、氮、磷的净化效率基本是 MAVF > NAVF > NVF > BHF。在有机物去除方面, MAVF 显著高于 NAVF 和 NVF, 后者显著高于 BHF。MAVF 较 NAVF 的 TCOD、DCOD 的  $k$  值分别提高了 35.2%、40.5%, 而 NAVF 较 NVF 的 TCOD、DCOD 的  $k$  值分别只提高了 10.9%、13.3%。类似地, MAVF 较 NAVF 的 TP、IP、TAN、 $\text{NO}_3^-$ -N、TN、DIN 等  $k$  值分别提高了 40.0%、33.3%、437.5%、22.8%、300.0%、385.2%, 而 MAVF 较 NAVF 的 TP、IP、TAN、 $\text{NO}_3^-$ -N、TN、DIN 等  $k$  值分别只提高了 25.0%、26.3%、100.0%、35.8%、120.0%、80.0%。这些增加值表明, 试验工况下滤池内碳、氮、磷的去除主要依赖于微生物的吸收和降解, 且

生物膜成熟度对污染物去除的影响大于曝气。有例外曝气较生物膜成熟度对硝氮去除的影响更大, 可能是因为试验装置反硝化易于发生, 且主要受控于硝氮底物浓度, 而后者又主要来源于氨氮的氧化。此外, 各组滤池对磷的去除率均不高, 可能是因为滤池除磷仍然以生物除磷为主, 这与笔者之前报道的结果相似<sup>[9]</sup>。

### 2.3 不同运行工况滤池微生物群落结构比较

4 种不同工况滤池在试验末期取陶粒样品进行微生物群落结构检测, 通过 16S rDNA 高通量测序分析共获得 96 708 条有效序列, 它们在 4 组滤池内的分布是: MAVF(16676)、NAVF(57367)、NVF(11161) 和 BHF(11504)。这些有效序列经聚类后共获得 2 260 个 OTU, 它们在 4 组滤池内的分布是: MAVF(680)、NAVF(691)、NVF(413) 和 BHF(828)。再依据 4 组滤池所含 OTU 序列数绘制等级丰度图和相应的  $\alpha$  多样性指数。由样品测序稀释曲线图 2(a) 可知, Chao1 曲线趋于平缓, 表明测序数据量已饱和; 由图 2(b) 可知, 4 组滤池的辛普森指数(Simpson)一致(均为 0.98), 而观察种(Observed species)、香农(Shannon)、Chao1 等指数存在明显差别, 顺序都是 BHF > MAVF > NAVF > NVF, 表明滤池的成熟度与微生物多样性密切相关, 即滤池愈成熟, 多样性指数愈高。

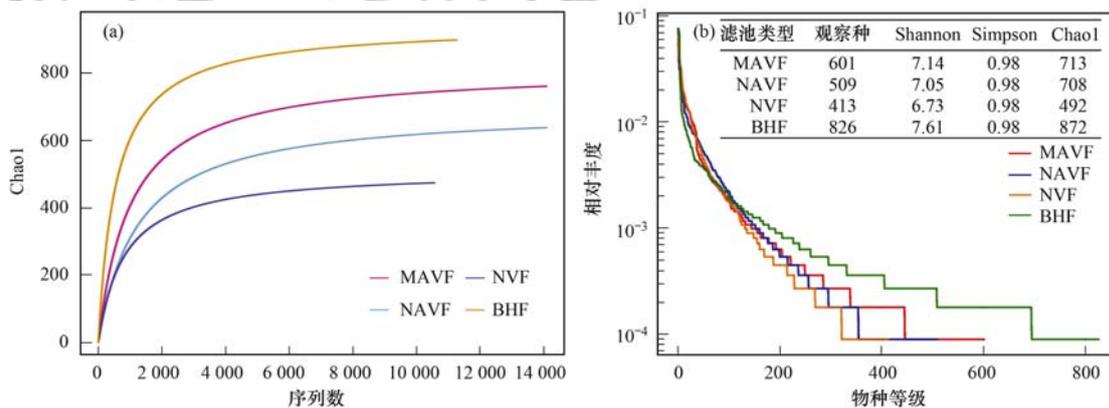


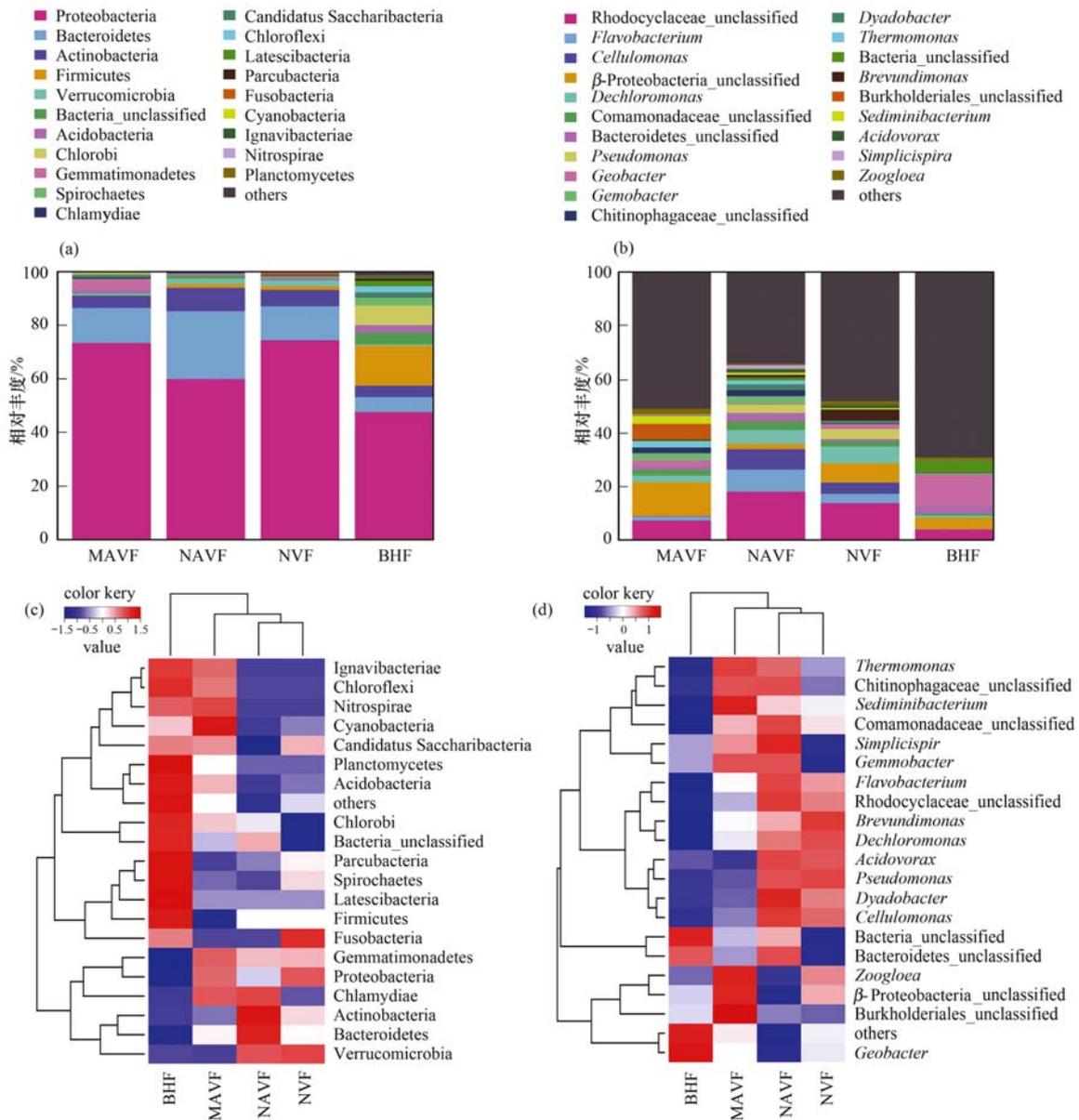
图 2 4 种不同工况滤池的稀释曲线、等级丰度图和  $\alpha$  多样性指数

Fig. 2 Rarefaction curves, rank abundance curves, and  $\alpha$  diversity index of the four biofilters under different working conditions

依据测序获得的特征序列进行物种注释, 4 组滤池共注释到 341 属种微生物, 其中 MAVF、NAVF、NVF、BHF 的物种数分别为 212、200、161、257, 这与前面描述的多样性指数变化趋势一致。此外, 将所有物种的相对丰度均列出并不便于分析, 而且优势物种往往就能反映群落结构的主要特

征。因此, 本文选取丰度最高的前 20 个物种或功能分类, 将其余的设置 of others, 进行相对丰度计算, 并据此绘制相对丰度堆叠柱状图[图 3(a) 和 3(b)] 和物种分类热图[图 3(c) 和 (d)], 便于直观进行样品间物种丰度的比较。

由相对丰度堆叠柱状图可知, 在门水平上,



(a)和(c): 门水平; (b)和(d): 属水平  
图3 4种不同工况滤池的微生物相对丰度和物种分类热图

Fig. 3 Relative microbial abundance and taxa heatmap of the four biofilters under different working conditions

各组滤池的变形菌(Proteobacteria)丰度最高,其次是拟杆菌(Bacteroidetes)和放线菌(Actinobacteria),而厚壁菌(Firmicutes)仅在BHF中相对丰度较高。在属水平上,相对丰度最高的是红环菌(Rhodocyclaceae\_unclassified),其余依次是黄杆菌(*Flavobacterium*)、纤维单胞菌(*Cellulomonas*)、 $\beta$ 变形菌( $\beta$ -proteobacteria\_unclassified)、脱氮单胞菌(*Dechloromonas*)等。郭晓娅等<sup>[13]</sup>以玉米淀粉废水为反硝化碳源进行试验,发现反应器内优势菌群中红环菌目相对丰度较大,据此推测红环菌目可能较易于降解淀粉,

这与本研究以面粉(含淀粉)和葡萄糖为碳源进行脱氮除磷微生物富集相似。

从门水平的热图组成来看,NAVF和NVF的优势菌种组成最相似,其中疣微菌(Verrucomicrobia)、拟杆菌、放线菌等丰度较高,而Ignavibacteriae、绿弯菌(Chloroflexi)、硝化螺旋菌(Nitrospirae)、蓝细菌(Cyanobacteria)等丰度较低。相反,Ignavibacteriae、绿弯菌、硝化螺旋菌、蓝细菌等在BHF和MAVF中丰度较高。聚类结果显示,NAVF和NVF最相似,而BHF与3组垂直流滤池差异最大。在属水平上,聚类结果与门水平一致。同样,4

组滤池的优势菌种组成存在明显差别, BHF 滤池中地杆菌(*Geobacter*)丰度最高, 而 $\beta$ 变形菌、红环菌、伯克氏菌(*Burkholderiales\_unclassified*)、沉积物杆菌(*Sediminibacterium*)、芽殖杆菌(*Gemmobacter*)、

脱氮单胞菌、热单胞菌(*Thermomonas*)等在 MAVF 中丰度较高. 各组滤池的优势菌种相对丰度组成存在明显差别, 它们的代谢特征和主要功能注释见表 4.

表 4 图 3 中优势菌种的功能注释

Table 4 Functional annotation of dominant bacteria in Fig. 3

名称	营养类型	对氧的需求	主要代谢功能	文献
红环菌科( <i>Rhodocyclaceae_unclassified</i> , 1)	化能异养	兼性好/厌氧	降解淀粉 + 硝化 + 异养或氢自养反硝化 + 聚磷	[3, 5, 13 ~ 16]
黄杆菌属( <i>Flavobacterium</i> , 2)	化能异养	兼性好/厌氧	反硝化	[14]
纤维单胞菌属( <i>Cellulomonas</i> , 3)	化能异养	兼性好/厌氧	发酵淀粉产葡萄糖 + 反硝化	[17]
$\beta$ 变形菌( <i><math>\beta</math>-Proteobacteria_unclassified</i> , 4)	化能异养	兼性好/厌氧	反硝化	[13]
脱氮单胞菌属( <i>Dechloromonas</i> , 5)	化能异养	兼性好/厌氧	反硝化 + 聚磷	[3, 5, 14]
丛毛单胞菌科( <i>Comamonadaceae_unclassified</i> , 6)	化能异养	兼性好/厌氧	反硝化 + 聚磷	[14]
拟杆菌门( <i>Bacteroidetes_unclassified</i> , 7)	化能异养	兼性好/厌氧	降解淀粉和葡萄糖	[3, 18]
假单胞菌属( <i>Pseudomonas</i> , 8)	化能异养	兼性好/厌氧	硝化 + 反硝化 + 聚磷	[5]
地杆菌属( <i>Geobacter</i> , 9)	化能异养	兼性好/厌氧	Fe(III)还原	[19]
芽殖杆菌属( <i>Gemmobacter</i> , 10)	化能异养	兼性好/厌氧	反硝化	[20, 21]
Chitinophagaceae_unclassified(11)	化能异养	兼性好/厌氧	降解淀粉和葡萄糖	[22]
成对杆菌属( <i>Dyadobacter</i> , 12)	化能异养	兼性好/厌氧	发酵淀粉产葡萄糖 + 反硝化	[23]
热单胞菌属( <i>Thermomonas</i> , 13)	化能异养	兼性好/厌氧	反硝化 + 聚磷	[3, 21, 24]
Bacteria_unclassified(14)	/	/	/	
短波单胞菌属( <i>Brevundimonas</i> , 15)	化能异养	兼性好/厌氧	反硝化	[25]
伯克氏菌目( <i>Burkholderiales_unclassified</i> , 16)	化能异养	兼性好/厌氧	降解淀粉 + 反硝化	[13]
沉积物杆菌属( <i>Sediminibacterium</i> , 17)	化能异养	兼性好/厌氧	硝化 + 反硝化	[26]
食酸菌属( <i>Acidovorax</i> , 18)	化能异/自养	兼性好/厌氧	异养或氢自养反硝化	[3, 27]
简易螺旋菌属( <i>Simplicispira</i> , 19)	化能异养	兼性好/厌氧	反硝化 + 聚磷	[3, 21]
动胶菌属( <i>Zoogloea</i> , 20)	化能异养	专性好氧	反硝化 + 聚磷	[28]

传统观点认为, 硝化过程属于化能自养过程, 且严格好氧<sup>[26, 29]</sup>. 本研究通过物种注释, 于 4 组滤池内仅检测到了 3 种专性硝化微生物, 即亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)、亚硝化螺菌属(*Nitrospira*)及硝化螺菌属(*Nitrospira*), 且三者的相对丰度都很低(表 5). 这与戴琦<sup>[30]</sup>、黄菲<sup>[31]</sup>等报道的硝化/亚硝化菌富集低丰度结果相似. 戴琦等<sup>[30]</sup>采用膜生物反应器处理含环丙沙星(CIP)的模拟废水, 发现在 0、5、10 mg·L<sup>-1</sup>的 CIP 投加浓度下, 亚硝化单胞菌属的总相对丰度依次为 0.02、0.01、0.006, 硝化螺菌属的总相对丰度依次为 0.73、1.57、0.82; 黄菲等<sup>[31]</sup>研究了在冬季

低温条件下, 膜生物反应器与传统活性污泥法工艺运行效果及微生物群落特征差异, 发现 R1(高污泥浓度膜生物反应器)、R2(低污泥浓度膜生物反应器)、R3(传统活性污泥工艺)中主要的硝化菌为 *Nitrospira*, 其总相对丰度依次为 1.22%、1.64%、0.15%. 将上述 3 种自养硝化菌与表 4 中前 20 种优势菌种按代谢功能进行合并统计, 结果见表 5. 从中可知, 4 组滤池内丰度最高的微生物为异养反硝化脱氮菌, 其次为异养反硝化聚磷菌, 再次为异养硝化菌. 因为很多异养反硝化脱氮菌兼为异养反硝化聚磷菌和(或)异养硝化菌(表 4), 因此, 三者丰度相对较高.

表 5 4 组生物滤池中自养硝化菌及优势功能菌占细菌总丰度的百分比/%

Table 5 Percentage of autotrophic nitrifiers and dominant functional bacteria of the total bacterial abundance among the four biofilters/%

分类	名称	MAVF	NAVF	NVF	BHF
自养硝化菌	亚硝化单胞菌属( <i>Nitrosomonas</i> )	1.28	0.02	0	0
	亚硝化螺菌属( <i>Nitrospira</i> )	0.02	0.03	0	0
	硝化螺菌属( <i>Nitrospira</i> )	0.38	0	0	0.12
功能菌门类	自养硝化	1.68	0.05	0	0.12
	异养硝化	10.25	21.96	18.07	4.03
	自养反硝化脱氮	0.16	1.30	1.14	0.21
	异养反硝化脱氮	42.98	57.52	47.72	11.31
	异养反硝化聚磷	16.90	32.97	27.44	6.10

进一步分析自养硝化菌相对丰度数值,发现 NVF 滤池缺乏自养硝化及亚硝化菌, BHF 滤池内缺乏自养亚硝化菌,而 NAVF 中缺乏自养硝化菌,只有 MAVF 滤池同时含有硝化及亚硝化菌,且 MAVF 滤池自养硝化菌(硝化+亚硝化菌)丰度明显高于其它 3 组滤池.这与 2.2 节观测到的 MAVF 滤池氨氧化作用最强, BHF 滤池氨氧化作用最弱相一致. NVF 及 BHF 滤池内的氨氧化过程均由异养菌完成,且 NVF 滤池的氨氧化能力强于 BHF 滤池,这是因为前者的异养硝化菌丰度明显高于后者(表 5).此外,与两组曝气滤池(MAVF 和 NAVF)相比,其余两组未曝气滤池(NVF 和 BHF)内均未检测到亚硝化菌,说明曝气促进了滤池内氨氧化菌的富集.将表 5 中各功能菌相对丰度与碳、氮、磷去除的  $k$  值进行相关性分析,发现仅自养硝化菌(硝化+亚硝化菌)与氨氮、总氮及溶解性氮素之间存在显著正相关( $P < 0.05$ ), Pearson 相关系数分别为

0.97、0.97 和 0.96,这可能也暗示影响各种滤池脱氮的主要过程仍然为硝化过程,且主要依赖于自养硝化菌.

#### 2.4 滤池净化效能与微生物结构特征耦联分析

如 2.3 节所述,将获得的 2260 个 OTU 按各自所含的序列数进行样品聚类,结果如图 4(a)所示;同样地,按测定的各项污染物指标  $k$  值进行样品聚类,结果如图 4(b)所示.由图 4 可知,两种不同途径聚类结果与丰度最高的前 20 个优势物种热图聚类[图 3(c)和 3(d)]具有一致性,即丰度最高的前 20 个优势物种基本能涵盖所有物种的聚类信息.另外,各组滤池净化效率聚类结果与物种聚类结果一致,这也表明滤池之间净化效率的差异主要由滤池内微生物结构差异所致.为了进一步探讨滤池净化效率与微生物群落组成的关系,将滤池的净化效率与图 3 中优势物种组成以及后者与滤池出水理化特征进行多元排序分析,结果如图 5 所示.

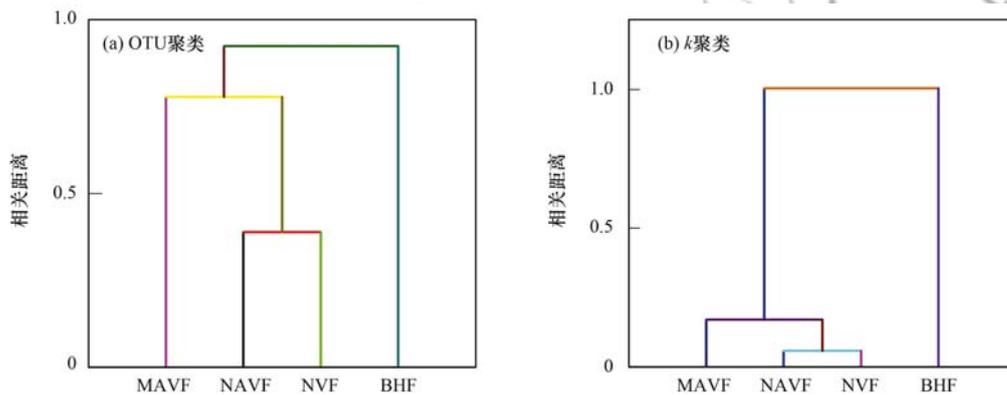


图 4 基于 4 种滤池所有 OTU 和各项指标  $k$  值的层次聚类图

Fig. 4 Hierarchical cluster dendrogram based on all OTU and  $k$  values of the four biofilters

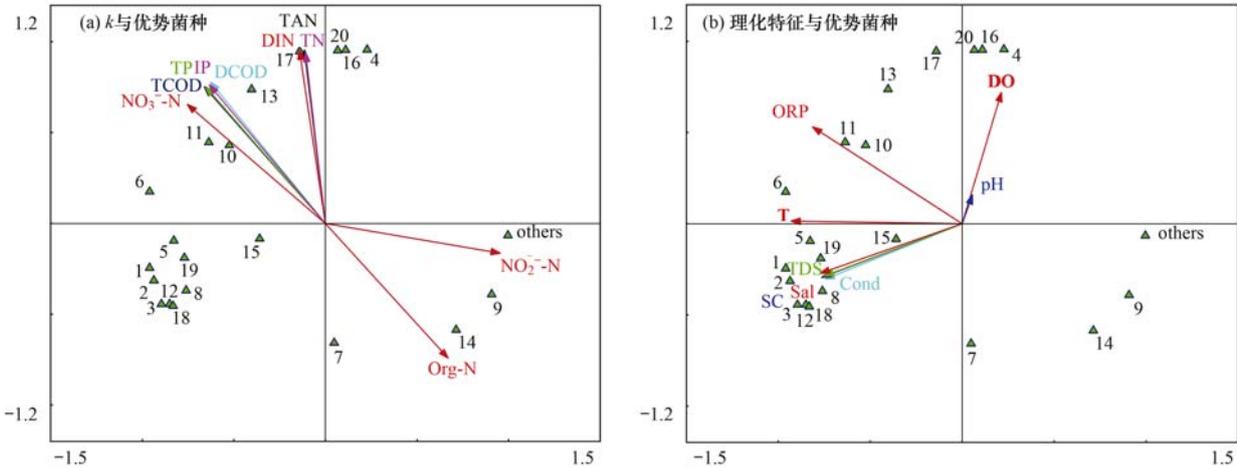
由各项污染物指标的  $k$  值与优势菌种的排序图 5(a)可知,总氮、氨氮及溶解性氮素的去除具有一致性,且与沉积物杆状菌、动胶菌(*Zoogloea*)、伯克氏菌、 $\beta$ 变形菌、热单胞菌等正相关,这是因为这些细菌兼有异养硝化和(或)反硝化功能(表 4),而上述 3 种形态氮素的去除主要依赖于硝化-反硝化.沉积物杆状菌为兼性好氧异养菌,在中性条件下的最佳生长温度为  $10 \sim 37^\circ\text{C}$ <sup>[32]</sup>. Papirio 等<sup>[26]</sup>以芬兰坦佩雷市某污水处理除厂活性污泥为接种物进行硝化菌的富集培养,当流化床反应器的起始氨氮浓度为  $66.5 \sim 77.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、平均溶解氧为  $7.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,经过 35d 富集培养后于接种污泥及富集物中都检测到了优势菌属沉积物杆状菌的存在,表明沉积物杆状菌可能具有硝化功能,这与本研究结果相似.本研究中,虽然沉积物杆状菌相对丰度不

高(在 MAVF、NAVF、NVF、BHF 中的相对丰度分别为 2.92、0.82、0.49、0.09),但与自养硝化菌一样,仍然发挥着一定的硝化功能.本研究中 NVF 滤池缺乏自养硝化菌,但却发生了硝化作用,证明了异养硝化菌的存在.此外,排序图中有机物、磷及硝氮的去除也具有一致性,表明磷主要通过反硝化聚磷方式去除.本研究通过 16S rDNA 高通量测序和物种注释并未检测到好氧聚磷菌.

由优势菌种与滤池出水的理化特征排序图 5(b)可知,动胶菌、伯克氏菌、 $\beta$ 变形菌、沉积物杆状菌、热单胞菌、Chitinophagaceae\_unclassified、芽殖杆菌、丛毛单胞菌科(Comamonadaceae\_unclassified)等与溶解氧或氧化还原电位正相关,表明这些菌倾向于好氧环境,与这些菌为兼性好氧菌相符(表 4).各组滤

池出水总溶解固体、盐度、电导率及比电导率的变化具有一致性, 这是因为上述指标之间的关联性较强, 而且这些指标高低主要取决于出水中溶解性氮素高低(尤其是硝氮)。此外, 由图 5(b) 还可知, 上述 4 项指标与脱氮单胞菌、短波单胞菌(*Brevundimonas*)、简易螺旋菌(*Simplicispira*)、

红环菌、黄杆菌、假单胞菌(*Pseudomonas*)、成对杆菌(*Dyadobacter*)、食酸菌(*Acidovorax*)、纤维单胞菌等正相关。据表 4, 这些优势菌属基本兼有反硝化脱氮功能, 它们与总溶解固体、盐度、电导率及比电导率的正相关, 表明反硝化强度主要取决于反应底物浓度。



图中数字 1~20 代表的物种见表 4

图 5 微生物优势菌种与滤池净化效率  $k$ 、出水理化特征间的冗余度排序

Fig. 5 Ordination plots of redundancy analysis (RDA) between the dominant microorganisms and purification efficiency  $k$ /physicochemical characteristics of the outflow

### 3 结论

(1) 配制原水经垂直流滤池处理后, 出水溶解氧、pH 显著降低。曝气显著提高了滤池出水溶解氧和 pH。与 3 组垂直流滤池相比, BHF 滤池对进出水理化参数的影响更弱。本试验期间 4 组滤池内的溶解氧水平处于好氧和兼氧状态。

(2) 本试验工况下 4 组滤池内都无明显的硝氮、亚硝氮积累, 说明滤池内反硝化进行得很充分。各组滤池出水中溶解性氮素以未被硝化的氨氮为主, MAVF 及 BHF 滤池出水总氮以有机氮为主, 而 NAVF 及 NVF 滤池出水总氮以溶解性氮素为主。垂直流滤池对碳、氮、磷的去除效率显著高于水平流滤池, 且水平流滤池内部发生的氮素转化过程非常微弱。各滤池内碳、氮、磷的去除主要依赖于微生物的吸收和降解, 且生物膜成熟度对污染物去除的影响大于曝气。

(3) 4 组滤池的多样性指数高低是 BHF > MAVF > NAVF > NVF, 表明滤池愈成熟, 多样性指数愈高。滤池之间净化效率的差异主要由滤池内微生物结构差异所致。各组滤池的优势菌种以兼性异养菌为主, 且以异养反硝化脱氮菌最为丰富。NVF

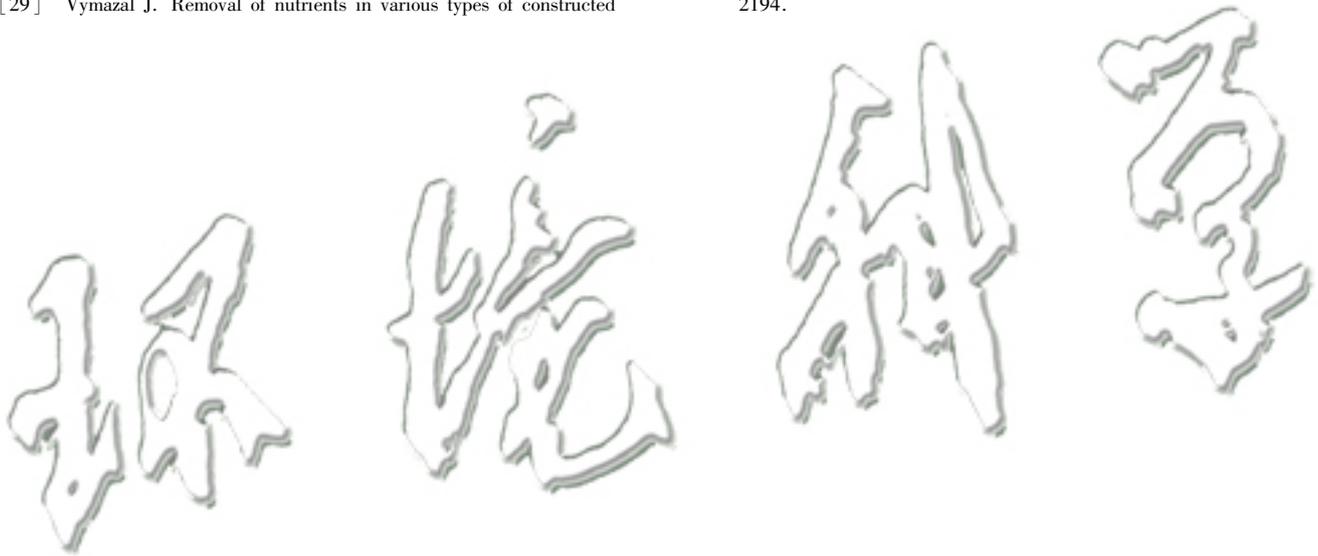
滤池内缺乏自养硝化菌, 但发生了异养硝化过程; MAVF 滤池内自养硝化菌相对丰度最高, 与其最强的硝化作用相呼应。曝气促进了滤池内亚硝化菌的富集, 进而增强了氨氧化能力。4 组滤池内均未检测到好氧聚磷菌, 磷的去除以反硝化聚磷为主。滤池对总氮的去除率不高主要归结于富集的自养硝化菌数量不高, 后者导致硝化作用较弱——这不仅引起出水中氨氮残余较高, 还会减少反硝化的底物浓度, 最终致使总氮去除率不高。

#### 参考文献:

- [1] 王峰, 雷霖霖, 高淳仁, 等. 国内外工厂化循环水养殖模式水质处理研究进展[J]. 中国工程科学, 2013, 15(10): 16-23, 32.  
Wang F, Lei J L, Gao C R, et al. Research progress of water conditioning in industry recirculating aquaculture mode at home and abroad[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(10): 16-23, 32.
- [2] 王东, 邱立平, 谢康, 等. 曝气生物滤池处理微污染源水低温启动特性及效能研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(8): 103-106, 110.  
Wang D, Qiu L P, Xie K, et al. Startup characteristics and efficiency of micro-polluted source water treatment by biologically aerated filter in low temperature [J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(8): 103-106, 110.
- [3] 钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 等. DNBF-O<sub>3</sub>-GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 247-

255.  
Zhong L Y, Hao R X, Wang W D, *et al.* Combined process of DNBF-O<sub>3</sub>-GAC for nitrogen and phosphorus and metabolite advanced removal[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 247-255.
- [ 4 ] 朱加乐, 林燕, 王欣泽, 等. 曝气生物滤池脱氮的研究进展[J]. *化工进展*, 2017, **36**(3): 1077-1083.  
Zhu J L, Lin Y, Wang X Z, *et al.* Research progress on nitrogen removal by biological aerated filter[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, **36**(3): 1077-1083.
- [ 5 ] 孙成江. 交替曝气两级生物滤池反硝化除磷工艺效能及其菌群结构研究[D]. 济南: 济南大学, 2015.  
Sun C J. Efficiency of denitrifying phosphorus removal and community structure in two stage biological filters operated by alternative aeration[D]. Ji'nan: University of Jinan, 2015.
- [ 6 ] 张菊萍, 陆少鸣, 夏莉, 等. 不同挂膜方式启动中置曝气生物滤池的对比研究[J]. *水处理技术*, 2015, **41**(6): 108-111.  
Zhang J P, Lu S M, Xia L, *et al.* Comparison of different forming film methods in biological aeration filter (BAF) [J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, **41**(6): 108-111.
- [ 7 ] 王建华, 陈永志, 彭永臻. 硝化型曝气生物滤池的挂膜与启动[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(10): 2199-2203.  
Wang J H, Chen Y Z, Peng Y Z. Biofilm formation and startup of nitrification biological aeration filter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, **4**(10): 2199-2203.
- [ 8 ] 端艳, 陆少鸣, 江荻. 悬浮陶粒曝气生物滤池在城镇污水处理中的挂膜启动[J]. *水处理技术*, 2018, (2): 88-92.
- [ 9 ] 张世羊, 张胜花, 张翔凌, 等. 组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2419-2428.  
Zhang S Y, Zhang S H, Zhang X L, *et al.* Purification efficiency and influencing factors of combined bio-filters for aquaculture wastewater[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2419-2428.
- [ 10 ] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [ 11 ] 张自杰, 张忠祥, 龙腾锐, 等. 废水处理理论与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [ 12 ] 高立杰, 肖羽堂, 高冠道, 等. 微氧水处理技术的特性及应用研究进展[J]. *工业用水与废水*, 2007, **38**(2): 5-8.  
Gao L J, Xiao Y T, Gao G D, *et al.* Characteristics of micro-aerobic water treatment technology and its research progress[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2007, **38**(2): 5-8.
- [ 13 ] 郭晓娅, 年跃刚, 闫海红, 等. 以玉米淀粉废水为反硝化碳源的污染物降解特征与微生物群落结构研究[J]. *环境工程技术学报*, 2016, **6**(5): 427-433.  
Guo X Y, Nian Y G, Yan H H, *et al.* Pollutants degradation characteristics and microbial community structure using cornstarch wastewater as denitrification carbon source [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2016, **6**(5): 427-433.
- [ 14 ] 张瑾. 基于不同固体碳源生物反硝化性能及典型碳源生物膜特征研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.  
Zhang J. Studies on denitrification performance and biofilm characteristics of the different solid carbon source-based denitrification system [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [ 15 ] 余鸿婷, 李敏. 反硝化聚磷菌的脱氮除磷机制及其在废水处理中的应用[J]. *微生物学报*, 2015, **55**(3): 264-272.  
Yu H T, Li M. Denitrifying and phosphorus accumulating mechanisms of denitrifying phosphorus accumulating organisms (DPAOs) for wastewater treatment-a review [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2015, **55**(3): 264-272.
- [ 16 ] 李鹏, 毕学军, 王军, 等. 常规和倒置 A<sup>2</sup>/O 工艺活性污泥微生物群落结构的比较[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(3): 1137-1145.  
Li P, Bi X J, Wang J, *et al.* Microbial diversity in activated sludges of conventional and reversed A<sup>2</sup>/O processes[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(3): 1137-1145.
- [ 17 ] 高惠玲, 袁其朋, 周延, 等. 两种碳源对纤维单胞菌生长及代谢的影响[J]. *北京化工大学学报*, 2004, **31**(6): 40-43.  
Gao H L, Yuan Q P, Zhou Y, *et al.* Effect of two carbon sources on growth and metabolism of *Cellulomonas* sp. [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology*, 2004, **31**(6): 40-43.
- [ 18 ] Foley M H, Martens E C, Koropatkin N M. SusE facilitates starch uptake independent of starch binding in *B. thetaiotaomicron* [J]. *Molecular Microbiology*, 2018, **108**(5): 551-566, doi: 10.1111/mmi.13949.
- [ 19 ] 丁帮璟, 李正魁, 朱鸿杰, 等. 河岸带表层土壤的铁氨氧化 (Feammox) 脱氮机制的探究[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1833-1839.  
Ding B J, Li Z K, Zhu H J, *et al.* Insight into the mechanism of feammox in the surface soils of a riparian zone [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1833-1839.
- [ 20 ] Hirsch P, Schlesner H. Gemmobacter [A]. In: Whitman W. *Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria* [M]. John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
- [ 21 ] 王思宇, 李军, 王秀杰, 等. 添加芽孢杆菌污泥反硝化特性及菌群结构分析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(12): 4649-4656.  
Wang S Y, Li J, Wang X J, *et al.* Denitrification characteristics of *Bacillus subtilis* sludge and analysis of microbial community structure [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(12): 4649-4656.
- [ 22 ] 戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 等. 环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1333-1341.  
Dai Q, Liu R, Liang Y T, *et al.* Influence of ciprofloxacin on the microbial community and antibiotics resistance genes in a membrane bioreactor [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1333-1341.
- [ 23 ] Lee M, Woo S G, Park J, *et al.* *Dyadobacter soli* sp. nov., a starch-degrading bacterium isolated from farm soil [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2010, **60**(11): 2577-2582.
- [ 24 ] Mergaert J, Cnockaert M C, Swings J. *Thermomonas fusca* sp. nov. and *Thermomonas brevis* sp. nov., two mesophilic species isolated from a denitrification reactor with poly ( $\epsilon$ -caprolactone) plastic granules as fixed bed, and emended description of the genus *Thermomonas* [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2003, **53**(6): 1961-1966.
- [ 25 ] Kavitha S, Selvakumar R, Sathishkumar M, *et al.* Nitrate

- removal using *Brevundimonas diminuta* MTCC 8486 from ground water[J]. *Water Science & Technology*, 2009, **60**(2): 517-524.
- [26] Papirio S, Zou G, Ylinen A, *et al.* Effect of arsenic on nitrification of simulated mining water [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **164**: 149-154.
- [27] 王建超, 郝瑞霞, 孟成成, 等. 3DBER-S 反硝化脱氮性能及其菌群特征[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(2): 310-317.  
Wang J C, Hao R X, Meng C C, *et al.* Study on performance and bacterial community of coupling 3-dimensional biofilm-electrode with sulfur autotrophic denitrification[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(2): 310-317.
- [28] 安卫星, 高娜, 夏明, 等. 动胶菌属系统分类、生理特征及其在活性污泥中的作用[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, **22**(6): 1167-1174.  
An W X, Gao N, Xia M, *et al.* Physiological characteristics and systematic classification of the *Zoogloea* species and their role in the activated sludge [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, **22**(6): 1167-1174.
- [29] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **380**(1-3): 48-65.
- [30] 戴琦, 刘锐, 舒小铭, 等. 环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 212-218.  
Dai Q, Liu R, Shu X M, *et al.* Removal and influence of ciprofloxacin in a membrane bioreactor [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 212-218.
- [31] 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 等. 冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1002-1008.  
Huang F, Mei X J, Wang Z W, *et al.* Diversity of operation performance and microbial community structures in MBRs and CAS processes at low temperature[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1002-1008.
- [32] Qu J H, Yuan H L. *Sediminibacterium salmoneum* gen. nov., sp. nov., a member of the phylum *Bacteroidetes* isolated from sediment of a eutrophic reservoir[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2008, **58**(9): 2191-2194.



## CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants .....	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM <sub>2.5</sub> in China Based on the LUR Model .....	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta .....	..... HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing .....	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn .....	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China .....	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province .....	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process .....	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments .....	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China .....	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer .....	..... SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River .....	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N <sub>2</sub> O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features .....	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland .....	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and δ <sup>18</sup> O in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City .....	..... WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River .....	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River .....	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir .....	..... ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir .....	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains .....	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains .....	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding .....	..... YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City .....	..... WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions .....	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i> .....	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs .....	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide .....	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region .....	..... LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process .....	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process .....	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions .....	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process .....	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions .....	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria .....	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community .....	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process .....	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature .....	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments .....	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health .....	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site .....	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir .....	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions .....	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland .....	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO <sub>2</sub> -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field .....	..... BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil .....	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region .....	..... QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill .....	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO <sub>2</sub> Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios .....	..... TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP .....	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China .....	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)