

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.19.009

# 反硝化深床滤池深度处理市政污水及其微生物特性

高阳<sup>1</sup>, 周利<sup>1</sup>, 李凌云<sup>2</sup>, 景香顺<sup>2</sup>, 李鑫玮<sup>2</sup>

(1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266000; 2. 北控水务<中国>投资有限公司, 北京 100102)

**摘要:** 将一种以圆弧形不锈钢筛网为主要结构的气水分布系统用于反硝化深床滤池,通过中试处理某市政污水处理厂高效沉淀池出水,并采用高通量测序技术考察反冲洗前后悬浮污泥以及滤料上生物膜、生化池污泥的物种多样性和微生物菌群结构。结果表明,反硝化深床滤池对沉淀池出水具有良好的深度处理效果,在进水TN浓度为7.25~15.27 mg/L条件下,可以保证出水TN<5.00 mg/L,并且出水TP、SS和COD浓度可以稳定达到北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)的A标准。生化池污泥的TN去除负荷仅为反硝化深床滤池污泥的31.48%,相比生化池污泥,反硝化深床滤池污泥中的微生物菌群物种差异性小、丰富度低,与反硝化过程相关的菌属相对丰度更高;滤池反冲洗对反硝化深床滤池污泥中的微生物菌群结构影响不大,但反冲洗过程会导致一段时间内部分相对丰度较低的好氧反硝化菌增多、脱氮效果变差。

**关键词:** 反硝化深床滤池; 市政污水; 深度处理; 微生物特性; 高通量测序

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)19-0054-07

## Deep Bed Denitrification Filter for Advanced Treatment of Municipal Wastewater and Its Microbial Characteristics

GAO Yang<sup>1</sup>, ZHOU Li<sup>1</sup>, LI Ling-yun<sup>2</sup>, JING Xiang-shun<sup>2</sup>, LI Xin-wei<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266000, China; 2. Beijing Enterprises Water Group <China> Investment Limited, Beijing 100102, China)

**Abstract:** A gas-water distribution system with circular stainless steel screen as the main structure was used in deep bed denitrification filter (DBDF). The effluent from a high-efficiency sedimentation tank of a municipal wastewater treatment plant was treated in a pilot scale test, and the diversity and microbial community of the suspended sludge, biofilm on the filter packing media and sludge in the biochemical tank before and after backwashing were investigated by high-throughput sequencing technology. The DBDF showed good performance for advanced treatment of the effluent from the sedimentation tank. When the influent TN was between 7.25 mg/L and 15.27 mg/L, the effluent TN was always less than 5.00 mg/L, and the effluent TP, SS and COD could stably reach the A criteria specified in *Discharge Standard of Water Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plants* (DB 11/890-2012). The TN load removed by the sludge in the biochemical tank was only 31.48% of that by the sludge in DBDF. Compared with the sludge in the biochemical tank, the microbial community of the sludge in DBDF had smaller species

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401103)

通信作者: 周利 E-mail: qtechzhouli@163.com

difference and lower richness, and the relative abundance of bacterial genera related to denitrification process was higher. Filter backwashing had little effect on the microbial community of sludge in DBDF. However, it would lead to the growth of some aerobic denitrifying bacteria with low relative abundance and poor nitrogen removal performance in a period of time.

**Key words:** deep bed denitrification filter; municipal wastewater; advanced treatment; microbial characteristics; high-throughput sequencing

反硝化深床滤池同时具有脱氮除磷和有效去除悬浮物(SS)的功能<sup>[1]</sup>,出水水质稳定,占地面积小,脱氮效率高,目前已被应用到多座城镇污水处理厂的提标改造中<sup>[2-5]</sup>。笔者将一种圆弧形的不锈钢滤网作为气水分布系统用于反硝化深床滤池中,其可直接承托滤料,无需设置承托层,可降低滤池的基建高度,节约基建成本;同时其过滤面积大,不易堵塞,水头损失小,气水分布均匀,可降低运行能耗。笔者以某污水厂高效沉淀池出水为处理对象,在中试条件下考察了该新型反硝化深床滤池对市政污水的深度处理效果。另外,采用高通量测序技术考察了反硝化深床滤池反冲洗前后悬浮污泥以及滤料生物膜、生化池污泥的物种多样性和微生物菌群结构,从机理上探究反冲洗对反硝化深床滤池菌群的影响,以及滤池与生化池中污泥的TN去除负荷存在差异的原因。

1 材料和方法

1.1 原水水质

中试基地位于北京某污水处理厂,该厂采用多段A/O+连续流砂滤处理工艺,生化池设置成一级厌氧区+多级好氧/缺氧区,采用多级进水,将污水分配到厌氧区和各级缺氧区的前端,污泥回流到厌氧区,无需混合液内回流,进水TN浓度为45~60 mg/L。中试进水为该污水厂的高效沉淀池出水,试验期间的水质见表1。

表1 试验原水水质

Tab.1 Quality of raw water mg·L<sup>-1</sup>

项目	COD	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	TP	DO
范围	6.70~23.76	5.32~12.29	0.007~0.093	0.40~1.80	7.25~15.27	0.09~0.39	3.41~5.35
均值	12.23	9.32	0.033	0.79	11.66	0.26	3.99

1.2 试验装置

反硝化深床滤池中试装置采用下向流式,由碳源投加系统、池体过滤单元、反冲洗系统以及进出

水管道等组成,如图1所示。滤池为1.0 m×0.8 m×6.0 m的矩形钢体设备,最大处理规模为170 m<sup>3</sup>/d;滤料层高度为1.9 m,滤料为石英砂,粒径为2~3 mm,均匀系数为1.3。

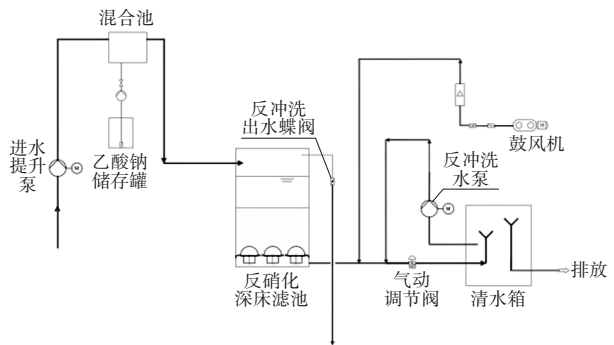


图1 反硝化深床滤池中试装置示意

Fig.1 Schematic diagram of pilot-scale DBDF

进水经提升泵、混合碳源后从滤池顶部进水管进入滤池,重力过滤后由新型气水分布系统收集后从底部排出,进入清水箱溢流排出。出水管道上安装气动调节阀,通过液位控制阀门开度,保证滤池恒液位过滤。碳源采用乙酸钠溶液,通过PLC自动控制系统中的投加公式计算后由碳源投加泵精确投加到混合池中。反冲洗过程由气洗、气水联合洗、水洗三个过程组成。气洗强度为100~110 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h);气水联合洗时,气洗强度为70~80 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h);水洗(驱氮)强度为18~20 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h);驱氮周期为3 h,反冲洗周期为24~48 h。通过鼓风机为反冲洗提供空气,清水箱提供反冲洗用水。反冲洗出水由顶部管道溢流排入厂区污水管网。

在系统稳定运行之后,采用淹没恒流24 h连续进水方式,将COD/TN控制在4.0左右,滤速为6.25 m/h,水温保持在23~26 ℃,考察反硝化深床滤池对市政污水的深度处理效果。

1.3 检测项目与方法

COD、DO、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N分别通过COD在线分析仪、DO在线分析仪、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N在线分析仪测定;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、

$\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP等指标按照国家标准方法测定。

#### 1.4 微生物样品采集及分析

在系统稳定运行期间,取生化池污泥和滤池反冲洗前后的滤料泥砂分离后进行高通量测序。样品分别命名为:SH. N(生化池污泥)、FQ. S(反冲洗前的石英砂生物膜)、FQ. N(反冲洗前的悬浮污泥)、FH. S(反冲洗后的石英砂生物膜)、FH. N(反冲洗后的悬浮污泥)。

采用CTAB方法提取样本的基因组DNA,利用琼脂糖凝胶电泳检测DNA的纯度和浓度,取适量样本DNA于离心管中,用无菌水稀释样本至 $1\text{ ng}/\mu\text{L}$ 。以稀释后的基因组DNA为模板,使用带Barcode的特异引物515F(CCTAYGGGRBGCASCAG)、806R(GGACTACNNGGGTATCTAAT)和高效高保真酶在16S rRNA基因的V3-V4区域进行扩增。根据PCR扩增产物浓度进行等量混样,充分混匀后使用2%的琼脂糖凝胶对PCR产物进行电泳检测,使用Qiagen公司提供的胶回收试剂盒回收产物。使用TruSeq® DNA PCR-Free Sample Preparation Kit建库试剂盒进行文库构建,构建好的文库经过Qubit和Q-PCR定量,文库合格后,使用NovaSeq6000进行上机测序。

根据物种注释结果,选取每个样本或分组在各分类水平(门、纲、目、科、属)上相对丰度排名前10或前30的物种,生成物种相对丰度柱形累加图,以便直观查看各样本在不同分类水平上相对丰度较高的物种及其比例。

绘制距离矩阵热图和等级聚类曲线图,距离矩阵热图利用生化池和反硝化深床滤池的微生物序列间进化信息来计算样本的间距离,得到一个距离矩阵。根据OTUs(操作分类单元)的丰度信息,对未加权间距离进一步构建加权间距离。等级聚类曲线图按照包含的序列数目将样本中的OTUs由大到小排序,从而得到对应的排序编号,以排序编号为横坐标,OTUs中序列数的相对百分含量为纵坐标,得到rank-abundance曲线。通过水平和垂直两个方面可以直观反映样本中物种的丰富度和均匀度。

## 2 结果与分析

### 2.1 市政污水深度处理效果

反硝化深床滤池对市政污水的深度处理效果如图2所示。

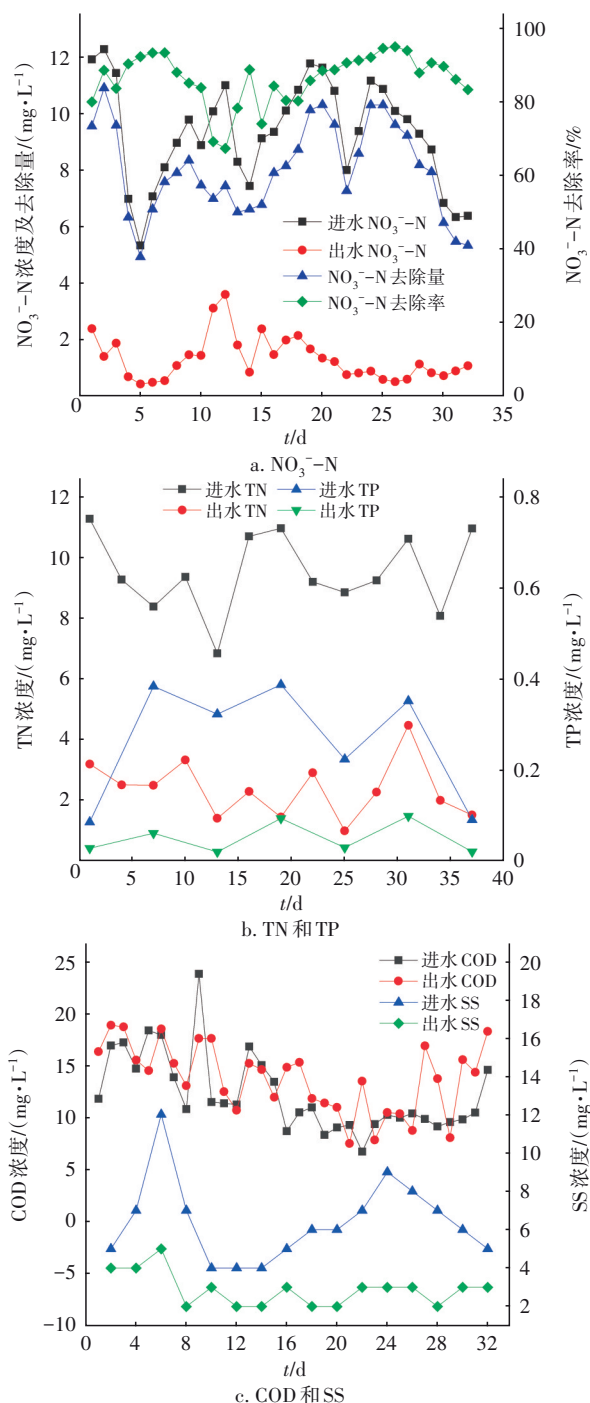


图2 反硝化深床滤池对市政污水的深度处理效果

Fig.2 Advanced treatment efficiency of municipal wastewater in DBDF

进水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度波动较大,出水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度在 $0.40\sim 3.58\text{ mg/L}$ 之间(均值为 $1.29\text{ mg/L}$ ),去除率为 $70\%\sim 94\%$ (均值为 $86.41\%$ )。出水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度在 $1.00\text{ mg/L}$ 以下的占比为 $50.0\%$ ,在 $2.00\text{ mg/L}$ 以下的占比可达到 $87.5\%$ 。出水 TN 浓度可以稳定保持在 $5.00\text{ mg/L}$ 以下,最低可达到 $0.98\text{ mg/L}$ ,平均值



为 2.37 mg/L;出水 TP 基本保持在 0.10 mg/L 以下,平均值为 0.06 mg/L;在控制好 COD/TN 的情况下,进出水 COD 基本持平,出水 COD 平均值为 13.74 mg/L,保持在 20.00 mg/L 以下;进水 SS 在 4.0~12.0 mg/L,出水 SS 可以保持在 5.0 mg/L 以下。

因此,反硝化深床滤池具备良好的深度脱氮效果,可保证出水  $TN < 5.00$  mg/L,而且对 TP 和 SS 也有良好的去除效果,可以替代传统砂滤池工艺;另外,通过控制碳源投加量,可实现碳源不穿透,出水 COD 达标。可见,中试采用的新型反硝化深床滤池兼具深度脱氮、除磷和过滤功能,对市政污水有良好的深度处理效果,出水水质可稳定达到北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890—2012)的 A 标准。

## 2.2 物种多样性和丰富度

经计算,生化池和反硝化深床滤池的单位污泥去除 TN 负荷分别为 9.67、30.72 mg/g,前者仅为后者的 31.48%。为探究两者脱氮能力差异性的根本原因,通过高通量测序技术对微生物群落进行物种多样性分析,结果如图 3 所示。

研究中,样本间的差异系数通过未加权间距离和加权间距离两个指标来衡量,数值越小,则表明这两个样本在物种多样性方面存在的差异就越小。图 3(a)中方格代表未加权间距离和加权间距离,可以看出, FQ.S 和 FQ.N 之间的差异系数为 0.367 和 0.189, FQ.S 和 FH.S 之间的差异系数为 0.277 和 0.088, FQ.S、FH.S 两个样本与 SH.N 之间的差异系数分别为 0.525 和 0.463、0.520 和 0.461。由此表明,滤池反冲洗前后污泥中的微生物菌群物种多样性差异较小,而滤池污泥与生化池污泥的物种多样性差异较大。

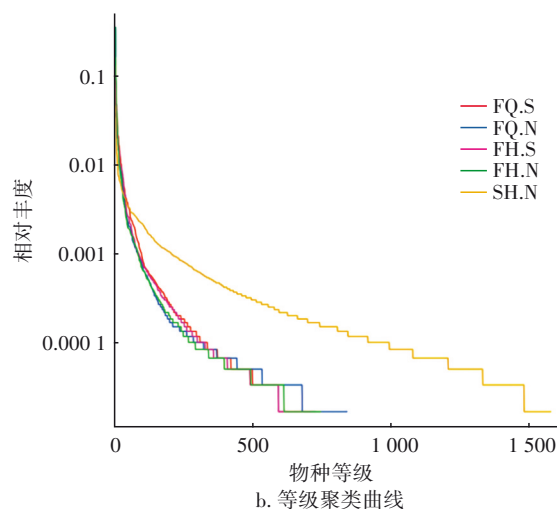
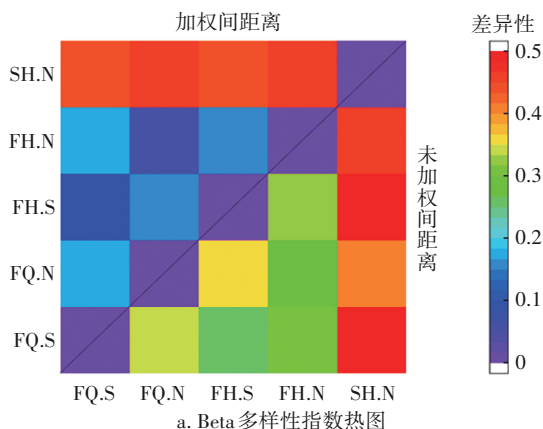


图 3 生化池与反硝化深床滤池的 Beta 多样性指数热图和等级聚类曲线

Fig.3 Beta diversity index heatmap and rank-abundance curves of biochemical tank and DBDF

等级聚类曲线图中,在水平方向上,由曲线的宽度来反映物种的丰富度,曲线跨度越大,物种的丰富度越高;在垂直方向上,由曲线的平滑程度来反映物种的均匀程度,曲线越平缓,物种分布越均匀。从图 3(b)可以看出,相比反硝化深床滤池污泥,生化池污泥中物种的丰富度更高,物种分布更不均匀。由此可见,污泥中物种丰富度和多样性的差异是导致生化池和反硝化深床滤池脱氮效率存在巨大差异的原因。

从环境条件分析,多级 A/O 工艺中缺氧、好氧交替,而且进水污染物成分比反硝化深床滤池复杂,所形成的微生物菌群丰富度更高;从功能角度分析,生化池具有除磷、氨化、硝化以及反硝化等作用,各个反应池内经过培养驯化和筛选后的污泥功能不同,反硝化菌群占比相对较低,但反硝化深床滤池的污泥经过培养驯化和筛选后,反硝化菌群占比较高,因此其脱氮效率高于生化池。

## 2.3 反冲洗的影响及微生物菌群结构分析

### 2.3.1 反冲洗对出水 $NO_3^-$ -N 的影响

反硝化深床滤池反冲洗结束之后出水  $NO_3^-$ -N 浓度的变化如图 4 所示。在反冲洗结束 10 min 之后,出水  $NO_3^-$ -N 浓度由 0.63 mg/L 开始上升,在反冲洗结束 30 min 时达到峰值。在反冲洗结束 60~180 min 之内,出水  $NO_3^-$ -N 浓度保持在 1.32~1.58 mg/L,低于反冲洗前的出水  $NO_3^-$ -N 浓度。由此可见,反冲洗会对反硝化深床滤池脱氮产生不利影响。

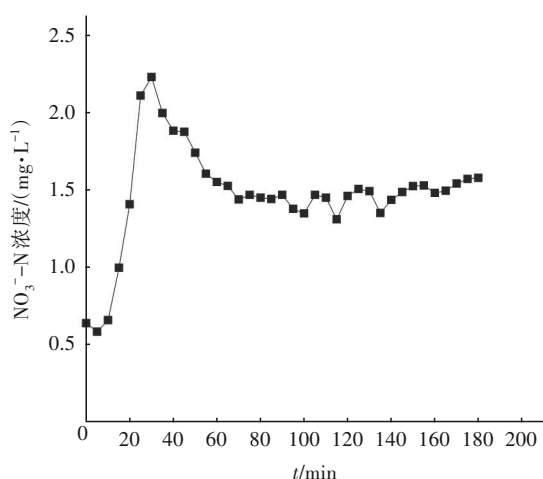
图4 反冲洗结束后出水 $\text{NO}_3^-$ -N浓度的变化

Fig.4 Change of nitrate nitrogen concentration in effluent after backwashing

### 2.3.2 反冲洗前后滤池的微生物菌群结构变化

在不同分类水平上分析反硝化深床滤池的微生物群落结构变化,结果如图5所示。在门、纲、属水平上,反硝化深床滤池反冲洗前后的悬浮污泥和滤料生物膜中的微生物群落结构在物种组成上具有相似性,但与生化池污泥相比,两者在物种相对丰度上存在较大的差异。

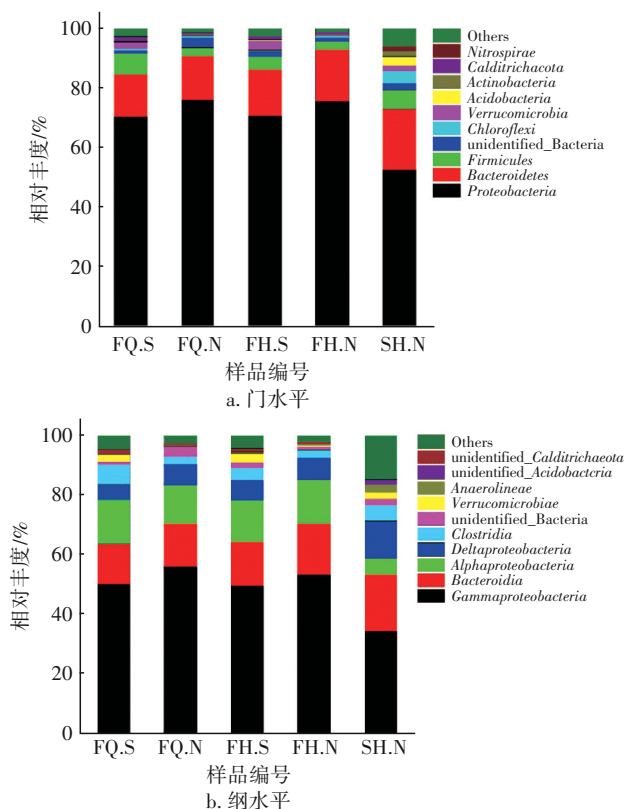


图5 不同分类水平上微生物群落结构及分布

Fig.5 Microbial community structure and distribution at different taxonomic levels

在门水平上,所有样品中优势菌门均为变形菌门(*Proteobacteria*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)和厚壁菌门(*Firmicutes*)。反硝化深床滤池反冲洗前后的悬浮污泥和滤料生物膜中的优势菌门相对丰度变化不大,变形菌门均占比较大,为主要优势菌门。变形菌门是微生物菌群中最大的门类,普遍存在于地表土壤与污水生化处理系统中。硝化螺旋菌门(*Nitrospirae*)和酸杆菌门(*Acidobacteria*)在反冲洗前后滤料生物膜中的占比很小,硝化螺旋菌门是革兰氏阴性菌,其中的硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)作为硝化菌,可将亚硝酸盐氧化成硝酸盐,因此这两门菌在反硝化深床滤池环境中不具备优势性。但生化池中好氧和缺氧交替,因此在生化池污泥中这两门菌的相对丰度比反硝化深床滤池中要高。

在纲水平上,所有样品中的优势菌群均为 $\gamma$ -变形菌纲(*Gammaproteobacteria*, 49.7%~56.1%)、拟杆菌纲(*Bacteroidia*, 13.4%~18.9%)、 $\alpha$ -变形菌纲(*Alphaproteobacteria*, 5.4%~14.7%)、 $\delta$ -变形菌纲(*Deltaproteobacteria*, 5.3%~12.5%)和梭菌纲(*Clostridia*, 2.3%~6.5%)。如图5(b)所示,反硝化深床滤池反冲洗前后菌群的物种和相对丰度并没有太大变化,但和生化池污泥相比,在相对丰度上略有差异。 $\gamma$ -变形菌纲、 $\alpha$ -变形菌纲和 $\delta$ -变形菌纲均属于变形菌门,反冲洗前后相对丰度变化较小,在生化池污泥中的相对丰度低于反硝化深床滤池。

从图5(c)可以看出,反硝化深床滤池反冲洗前后悬浮污泥和滤料生物膜与生化池污泥中的微生物菌群结构存在较大差异。反硝化深床滤池悬浮污泥和滤料生物膜中相对丰度排名前10的菌属丰

度总和为 53.74%,而生化池污泥仅为 24.15%,说明反硝化深床滤池中的微生物优势菌种更集中。

在反硝化深床滤池反冲洗前后的悬浮污泥和滤料生物膜中,优势菌属主要为脱氯单胞菌属(*Dechloromonas*)、动胶菌属(*Zoogloea*)、黄杆菌属(*Flavobacterium*)、井杆菌属(*Phreatobacter*)、弓形杆菌属(*Arcobacter*)、*Candidatus\_Paracaedibacter\_Inhella*、*Giesbergeria*、水螺菌属(*Aquaspirillum*)等,相对丰度分别为 13.6%~18.6%、10.1%~23.1%、3.6%~10.3%、1.7%~4.2%、0.9%~2.9%、3.6%~5.0%、1.4%~9.9%、0.1%~5.8%、0.1%~4.9%,其中具备反硝化功能的有脱氯单胞菌属、动胶菌属、水螺菌属、弓形杆菌属等,相对丰度总和达到 24.7%~49.5%。生化池污泥的优势菌属主要是陶厄氏菌属(*Thauera*)、*Dokdonella*、铁杆菌属(*Ferribacterium*)、脱氯单胞菌属、*Denitratisoma*等,相对丰度分别为 4.8%、4.1%、3.9%、2.2%、1.9%。其中具备反硝化功能的有陶厄氏菌属、脱氯单胞菌属、*Denitratisoma*等,相对丰度总和为 8.9%。由此可见,反硝化深床滤池较生化池具有更高丰度的反硝化功能菌群,脱氮能力更强。

研究表明<sup>[6-7]</sup>,反硝化相关菌属有 *Dechloromonas*、*Arcobacter*、*Zoogloea*、*Thauera*、*Methylothera*、*Aquimonas*、*Bacteriovorax*、*Methylophilus*等。其中,*Dechloromonas*属于红环菌科(*Rhodocyclaceae*)、 $\beta$ -变形菌纲(*Betaproteobacteria*)、变形菌门(*Proteobacteria*),在反硝化深床滤池反冲洗前后其相对丰度变化不大,说明反冲洗对其影响较小;该菌可以高效还原氯酸盐和硝酸盐,是典型的反硝化细菌<sup>[8]</sup>。在对膜生物反应器(MBR)及淹没式膜生物反应器(SMBR)的深度脱氮研究中,郭小马等人<sup>[9]</sup>发现脱氯单胞菌属是深度脱氮系统中的优势功能菌群。动胶菌属(*Zoogloea*)也属于红环菌科,是一类在好氧环境中存在的化能有机营养型反硝化菌,携带 *napA* 和 *nirS* 基因,具有好氧反硝化功能,通过氧化性呼吸来代谢产能,可以进行硝酸盐呼吸。反硝化深床滤池中存在相对丰度为 10.1%~23.1%的动胶菌属,与滤池进水 DO 浓度偏高、滤料层上方厌氧环境较差有关。黄杆菌属(*Flavobacterium*)在反冲洗后相对丰度有所升高,关于该菌属脱氮功能的研究较少,其主要是探究对多环芳烃的降解,该菌为好氧菌。陶

厄氏菌属(*Thauera*)属于红环菌科、 $\beta$ -变形菌纲,为革兰氏阴性菌,广泛存在于各类废水处理系统中,而且能够通过降解有机物作为电子供体将  $\text{NO}_3^-$ -N 转化为  $\text{N}_2$ <sup>[10]</sup>。陶厄氏菌属在厌氧条件下亚硝酸盐还原酶和一氧化氮还原酶的活性会受到抑制,生长较为缓慢,但在有氧条件下不受抑制,属于好氧反硝化菌<sup>[11]</sup>。因此在反冲洗后,该菌的相对丰度由 0.09% 上升到 0.21%,而在生化池由于缺氧、好氧环境交替,其相对丰度达到了 4.82%。

综上所述,在正常反冲洗条件下,反冲洗的冲刷作用对反硝化深床滤池的微生物菌群影响不大,但气洗过程会破坏滤池内部的厌氧环境,导致一部分相对丰度较低的好氧反硝化菌增多,同时,冲刷作用会使部分滤料上的生物膜脱落,导致滤池内的生物量减少,这也解释了反冲洗后一段时间内系统脱氮效果变差的现象。

### 3 结论

① 反硝化深床滤池不但具备良好的深度脱氮效果,可保证出水  $\text{TN} < 5.00 \text{ mg/L}$ ,而且对 TP 和 SS 也有较好的去除效果,在投加碳源的情况下出水 COD 浓度依然可以达标,为污水处理厂出水水质达标提供了很好的保障。

② 反硝化深床滤池的单位污泥去除 TN 负荷是生化池的 3.18 倍,通过物种多样性和不同分类水平上物种相对丰度的分析可知,相比生化池污泥,反硝化深床滤池污泥在物种多样性上差异大,物种丰富度更低,菌群功能专一,与反硝化相关的菌群相对丰度较高。

③ 在门、纲、属水平上,反硝化深床滤池反冲洗前后悬浮污泥和滤料生物膜中的微生物群落结构在物种组成上具有相似性,但每类物种所占的比例存在一定差异,而与生化池污泥相比,在物种相对丰度上存在较大的差异,反硝化深床滤池中相对丰度排名前 10 的菌属相对丰度总和为 53.74%,而生化池仅为 24.15%。

④ 反冲洗结束 180 min 内,出水  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度升高,气洗过程使一部分相对丰度较低的好氧反硝化菌增多,冲刷作用会导致滤池内生物量减少,这是反冲洗后短时间内脱氮效果变差的根本原因。

### 参考文献:

[1] 石兰兰,张宝林,吴云生,等.深圳横岭污水厂提标



- 中曝气生物滤池的升级及应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 104-108.
- SHI Lanlan, ZHANG Baolin, WU Yunsheng, *et al.* Upgrading and application of biological aerated filter in upgrading of Shenzhen Hengling Wastewater Treatment Plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14): 104-108 (in Chinese).
- [2] 张朋锋, 马乐宁, 赵金, 等. 深床反硝化生物滤池碳源优选研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(3): 92-96.
- ZHANG Pengfeng, MA Lening, ZHAO Jin, *et al.* Carbon source optimization for deep bed denitrification biological filter [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(3): 92-96 (in Chinese).
- [3] 胡香, 张辉, 许光远, 等. 反硝化深床滤池深度脱氮效果研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(21): 13-17, 24.
- HU Xiang, ZHANG Hui, XU Guangyuan, *et al.* Performance of advanced denitrification in deep bed denitrification filter [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(21): 13-17, 24 (in Chinese).
- [4] 陈莉, 雷睿, 刘洋, 等. 反硝化深床滤池/电磁催化臭氧氧化用于污水厂升级改造[J]. 中国给水排水, 2016, 32(20): 44-47.
- CHEN Li, LEI Rui, LIU Yang, *et al.* Application of denitrification deep bed filter and electromagnetic catalytic ozonation to upgrading and reconstruction of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(20): 44-47 (in Chinese).
- [5] 杜创, 雷振, 张铁源. 深床滤池在污水厂地表Ⅳ类水提标改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 99-103.
- DU Chuang, LEI Zhen, ZHANG Tieyuan. Application of deep bed filter in WWTP upgrading project to meet class IV standard of surface water [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 99-103 (in Chinese).
- [6] 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 Fei, MEI Xiaojie, WANG Zhiwei, *et al.* Diversity of operation performance and microbial community structures in MBR and CAS processes at low temperature [J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 1002-1008 (in Chinese).
- [7] LAPIDUS A, CLUM A, LABUTTI K, *et al.* Genomes of three methylophils from a single niche reveal the genetic and metabolic divergence of the methylophilaceae [J]. Journal of Bacteriology, 2011, 193(15): 3757-3764.
- [8] ACHENBACH L A, MICHAELIDOU U, BRUCE R A, *et al.* *Dechloromonas agitata* gen. nov., sp. nov. and *Dechlorosoma suillum* gen. nov., sp. nov., two novel environmentally dominant (per)chlorate-reducing bacteria and their phylogenetic position [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2001, 51 (Pt 2): 527-533.
- [9] 郭小马, 赵焱, 王开演, 等. MBR与SMBR脱氮除磷特性及膜污染控制[J]. 环境科学, 2015, 36(3): 1013-1020.
- GUO Xiaoma, ZHAO Yan, WANG Kaiyan, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus removal and control of membrane fouling in MBR and SMBR [J]. Environmental Science, 2015, 36(3): 1013-1020 (in Chinese).
- [10] HAO R X, LI S M, LI J B, *et al.* Denitrification of simulated municipal wastewater treatment plant effluent using a three-dimensional biofilm-electrode reactor: operating performance and bacterial community [J]. Bioresource Technology, 2013, 143: 178-186.
- [11] SCHOLTEN E, LUKOW T, AULING G, *et al.* *Thauera mechernichensis* sp. nov., an aerobic denitrifier from a leachate treatment plant [J]. International Journal of Systematic Bacteriology, 1999, 49(Pt 3): 1045-1051.
- 作者简介: 高阳(1995-), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 研究方向为水处理技术。
- E-mail: godyoung@163.com
- 收稿日期: 2020-09-10
- 修回日期: 2020-11-24

(编辑: 刘贵春)