

## 研究报告



## 石灰石滤柱出水回流曝气生物滤池系统的处理效能及微生物群落多样性

严子春<sup>\*1,2</sup> 吴大冰<sup>1</sup> 史凌楠<sup>1</sup>

1 兰州交通大学环境与市政工程学院 甘肃 兰州 730070

2 甘肃省黄河水环境重点实验室 甘肃 兰州 730070

**摘要:**【背景】曝气生物滤池(Biological Aerated Filter, BAF)对有机物和氨氮的处理效果较好,但除磷效果不佳。【目的】提高 BAF 系统的除磷效能。【方法】在缺氧/好氧滤柱后设置了部分采用石灰石滤料的滤柱(未添加石灰石滤料的系统作为对照组),对比分析了使用石灰石滤柱出水回流 BAF 系统的处理效能,通过最大或然法(Most Probable Number, MPN)和高通量测序技术考察了石灰石滤柱出水回流对好氧柱中硝化细菌的数量和微生物群落结构的影响。【结果】对比试验表明,有回流的 BAF 系统对化学需氧量、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、总氮和总磷的去除率比无回流时分别提高了 3.16%、41.21%、40.62% 和 18.93%;采用石灰石滤料的系统对化学需氧量、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、总氮和总磷的去除率比对照组分别提高了 1.75%、2.3%、2.2% 和 23.1%;由高通量测序结果可知,试验组的好氧柱中变形菌门(*Proteobacteria*)、放线菌门(*Actinobacteria*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)、 $\alpha$ -变形杆菌纲(*Alphaproteobacteria*)、 $\beta$ -变形杆菌纲(*Betaproteobacteria*)、 $\gamma$ -变形杆菌纲(*Gammaproteobacteria*)和黄单胞菌科(*Xanthomonadaceae*)的丰度比对照组分别提高了 25.2%、4.8%、5.5%、7.4%、7.3%、12.0% 和 6.6%,属分类水平下两者不同物种数量为 170 种。【结论】石灰石滤柱出水回流能显著提高总氮和总磷的去除效果,回流液中的  $\text{Ca}^{2+}$  具有化学除磷的作用,同时也能改善好氧柱内的菌群结构,强化生物除磷效果。

关键词: 曝气生物滤池, 石灰石, 微生物群落多样性, 高通量测序

## Treatment efficiency and microbial community diversity in reflux biological aerated filter system of limestone filter column

YAN Zichun<sup>\*1,2</sup> WU Dabing<sup>1</sup> SHI Lingnan<sup>1</sup>

1 School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

2 Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China

**Abstract:** [Background] Biological aerated filter performs well on organic matter and ammonia nitrogen removal, whereas exhibits bad on phosphorus removal. [Objective] To improve the phosphorus removal efficiency of the BAF system. [Methods] The experimental group was an A/O filter, followed by a

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (51568034); National Key Research and Development Program of China (2016YFC0400700)

**\*Corresponding author:** E-mail: yanzichun@mail.lzjtu.cn

**Received:** 30-06-2020; **Accepted:** 08-08-2020; **Published online:** 20-10-2020

**基金项目:** 国家自然科学基金(51568034); 国家重点研发计划(2016YFC0400700)

**\*通信作者:** E-mail: yanzichun@mail.lzjtu.cn

**收稿日期:** 2020-06-30; **接受日期:** 2020-08-08; **网络首发日期:** 2020-10-20

limestone-filling filter column. The control group was an identical one only without limestone filter. The treatment efficiency of reflux BAF system in experimental group and control group was compared and analyzed. Additionally, based on MPN method and high-throughput sequencing technology, the nitrifying bacteria quantity and microbial community structure in aerobic column were also investigated. **[Results]** Comparative tests showed that, compared with the BAF system without reflux, the removal efficiency of the reflux BAF system for COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN, and TP increased by 3.16%, 41.21%, 40.62% and 18.93%, respectively. The removal efficiency of COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN and TP in the experimental group increased by 1.75%, 2.3%, 2.2% and 23.1%, respectively. According to the results of high-throughput sequencing, the abundance of *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Firmicutes*, *Alphaproteobacteria*, *Betaproteobacteria*, *Gammaproteobacteria* and *Xanthomonadaceae* in the aerobic filter column of the experimental group increased by 25.2%, 4.8%, 5.5%, 7.4%, 7.3%, 12.0% and 6.6%, respectively, compared with the control group. Meanwhile, the amount of different species between the experimental group and the control group at the genus level was 170. **[Conclusion]** The removal efficiency of TN and TP could be significantly improved by the reflux of limestone filter column. Calcium ions could improve the removal efficiency of phosphorus by chemical precipitation, and enhance the effect of biological phosphorus removal by improving the structure of bacteria in aerobic column.

**Keywords:** biological aerated filter, limestone, microbial community diversity, high-throughput sequencing

曝气生物滤池(Biological Aerated Filter, BAF)是一种高效的生物膜污水处理技术,对氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )和化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)有良好的去除效果,而且占地面积小、抗冲击负荷能力强<sup>[1]</sup>。许菲等采用 BAF 和地下渗滤系统组合工艺处理生活污水,其中 BAF 对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和总磷(Total Phosphorus, TP)的去除率分别为 85.3%、83.5%、56%<sup>[2]</sup>;郭小马等采用分格复合填料曝气生物滤池处理污水处理厂曝气沉砂池出水,对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 的去除率分别为 81%、91%和 14%<sup>[3]</sup>。BAF 对 TP 的去除效果有限,采用化学法辅助除磷的方式,能有效增强 BAF 的除磷效果<sup>[4-6]</sup>。研究表明,投加铁盐和铝盐可显著提高 BAF 对磷的去除效果<sup>[7]</sup>,但是会增加药剂处理费用。

石灰石是一种价格低廉、微溶的非惰性材料,将其作为 BAF 的滤料处理生活污水的研究鲜有报道。本试验使用石灰石作为回流式 BAF 处理系统的部分滤料,以期提高 BAF 的除磷效果,同时考察 BAF 的处理效能和微生物群落多样性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

试验采用两套回流式缺氧/好氧(Anoxic/Oxic,

A/O)曝气生物滤池系统,均为下向流,进水依次流经缺氧柱、好氧柱后进入第 3 根滤柱,出水部分回流至缺氧柱,如图 1 所示。缺氧柱内填料为 5–8 mm 的陶粒,高度为 1.2 m;好氧柱填料为 3–5 mm 的沸石,高度为 1.1 m。试验组 BAF1 系统的第 3 根滤柱内按体积比 1:1 填充粒径为 5–8 mm 的石灰石和沸石,厚度 60 cm,而对照组 BAF2 系统只填充 5–8 mm 的沸石,厚度 60 cm。

### 1.2 试验材料

陶粒:来自巩义市某公司,以黏土等为原料加工烧制而成,表面粗糙多孔,外观呈圆形或椭圆形球体,主要元素有 Si、Al、O 和 Ca 等,密度为  $1.51 \text{ g/cm}^3$ ,堆积密度为  $0.83 \text{ g/cm}^3$ 。

沸石:来自甘肃某矿石厂,一种主要成分为硅铝酸盐的天然多孔的红棕色矿物,密度为  $2.23 \text{ g/cm}^3$ ,堆积密度为  $1.26 \text{ g/cm}^3$ 。

石灰石:来自甘肃某矿石厂,一种块状白色矿物,  $\text{CaCO}_3$  含量在 95%以上,密度为  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ,堆积密度为  $1.54 \text{ g/cm}^3$ 。

### 1.3 接种污泥及试验用水

接种污泥取自兰州市某污水处理厂曝气池,BAF1 与 BAF2 系统用水均为校园生活污水,试验

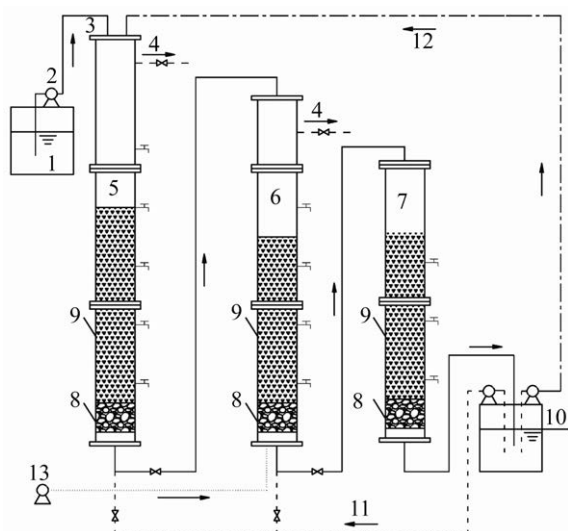


图1 试验装置图

Figure 1 Test device diagram

注: 1: 进水箱; 2: 蠕动泵; 3: 进水管; 4: 反冲洗排水; 5: 缺氧滤柱; 6: 好氧滤柱; 7: 石灰石/沸石滤柱; 8: 承托层; 9: 滤料层; 10: 出水管; 11: 反冲洗管; 12: 回流管; 13: 空气压缩机

Note: 1: Feed tank; 2: Peristaltic pump; 3: Sewage feed; 4: Backwash water discharge; 5: Anoxic column; 6: Aerobic column; 7: Limestone and zeolite column; 8: Graded gravel layer; 9: Filter material layer; 10: Effluent; 11: Backflush water pipe; 12: Reflux pipe; 13: Air compressor

期间其水质指标为: COD: 183–439 mg/L;  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ : 24.2–76.4 mg/L; 总氮 (Total Nitrogen, TN): 38.3–79.5 mg/L; TP: 2.8–7.3 mg/L。

#### 1.4 分析项目及测定方法

水质检测指标有: COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP, 分别采用重铬酸钾比色法、纳氏试剂分光光度法、过硫酸钾氧化-紫外分光光度法、钼锑抗分光光度法<sup>[8]</sup>测定。好氧柱中硝化菌的测定采用 MPN 法<sup>[9]</sup>, 高通量测序<sup>[10]</sup>委托上海派森诺生物医药科技有限公司进行。

## 2 结果与分析

在 BAF 系统中增加回流考察回流后 BAF 系统的处理效果。在此基础上, 缺氧、好氧柱后的滤柱中部分采用石灰石作为滤料, 根据试验测定回流液中的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 75.4 mg/L, 考察含  $\text{Ca}^{2+}$  回流液对

BAF 系统处理效果的影响。

### 2.1 石灰石滤柱出水回流对 BAF 系统污染物去除效果的影响

#### 2.1.1 BAF 系统增加回流后污染物去除效果的变化

试验在水力负荷  $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、气水比 10:1 条件下, 考察了有无回流系统(回流比 100%)对 BAF 去除污染物效果的影响, 结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 有回流(回流比 100%)的 BAF 系统对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、COD、TN 和 TP 去除率比无回流的系统分别高 41.21%、3.16%、40.62%和 18.93%, 其原因是增加回流后水流紊流程度提高, 一定程度上提高了传质效率, 在一定范围内对有机物的去除效果和磷的吸收有促进作用; 其次, 回流液为缺氧柱内反硝化作用提供了电子受体和底物浓度, 增强了反硝化效果, 加速了对碳源的消耗, 促进了好氧柱的硝化作用, 从而提高了  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 的去除效果。

#### 2.1.2 石灰石滤柱出水回流后 BAF 系统污染物去除效果

在水力负荷  $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、气水比 10:1 和回流比 100%条件下, 石灰石滤柱出水回流对 BAF 去除污染物效果的影响如图 3 所示, 试验组 BAF1 对 COD、TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率比对照组 BAF2 分别提高了 1.75%、2.2%和 2.3%, 去除效果略有

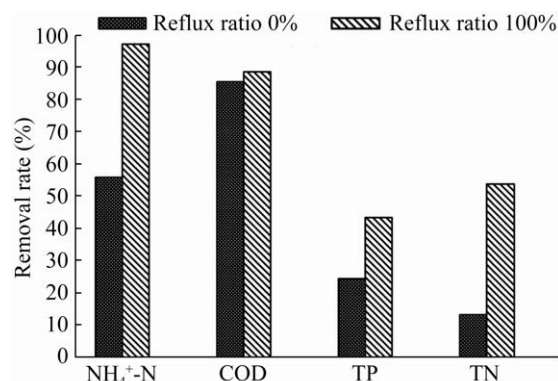


图2 有无回流对 BAF 去除污染物效果的影响

Figure 2 Influence of reflux or not on pollutant removal efficiency of BAF

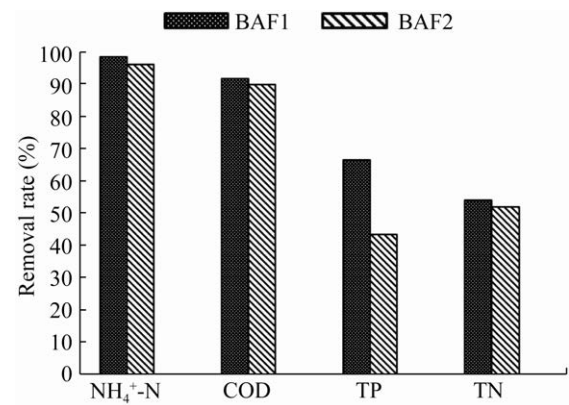


图 3 石灰石滤柱出水回流对 BAF 去除污染物效果的影响  
Figure 3 Influence of reflux of limestone filter column on BAF removal

提高。但是对 TP 而言, BAF1 和 BAF2 对 TP 的去除率分别为 66.4%和 43.3%, 前者对 TP 的去除率比后者提高了 23.1%。

2.2 石灰石滤柱出水回流对 BAF 柱中硝化菌的影响

在回流比为 100%、水力负荷 0.5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)和汽水比 10:1 条件下,BAF1 和 BAF2 系统中好氧柱(BAF 柱)内硝化菌的计数结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出, BAF1 系统中好氧柱内亚硝酸菌的数量相较于 BAF2 系统略有增加,但前者中硝酸菌数量明显高于后者,这与图 2 中 BAF1 对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率高于 BAF2 的规律是一致的。

表 1 硝化细菌计数结果  
Table 1 Nitrifying bacteria count results index

装置	细菌名称	稀释度 Dilution						细菌数目
		10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	
Device	Bacteria name	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	Bacteria count (CFU/mL)
BAF1	Nitrosomonas	5 <sup>+</sup>	5 <sup>+</sup>	5 <sup>+</sup>	5 <sup>+</sup>	2 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	5.0×10 <sup>6</sup>
	Nitrobacteria	5 <sup>+</sup>	5 <sup>+</sup>	5 <sup>+</sup>	3 <sup>+</sup>	2 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	1.4×10 <sup>6</sup>
BAF2	Nitrosomonas	5 <sup>+</sup>	5 <sup>+</sup>	5 <sup>+</sup>	5 <sup>+</sup>	1 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	3.6×10 <sup>6</sup>
	Nitrobacteria	5 <sup>+</sup>	5 <sup>+</sup>	5 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	4 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	7.5×10 <sup>5</sup>

注: +: 培养结果呈阳性, 存在硝酸菌(亚硝酸菌)  
Note: +: The culture result is positive, and there are nitrate bacteria (nitrite bacteria)

2.3 石灰石滤柱出水回流对 BAF 柱中微生物多样性的影响

2.3.1 微生物的丰富度变化

试验组 BAF1 系统和对照组 BAF2 系统中好氧柱中部的生物膜样本分别标记为 CO 和 RO, 取样条件为回流比 100%、水力负荷 0.5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)和汽水比 10:1。由表 2 可知, 从门、纲、目、科、属、种分类水平看, CO 样本共有 7 020 个 OTU (按序列相似性归类的小组),RO 样本共有 5 659 个 OTU, 各分类水平上样本 CO 的 OTU 均高于 RO。CO 样本的 Chao1 指数和 ACE 指数也高于 RO 样本。

2.3.2 门分类水平上菌群组成分析

由图 4 可知, 在门分类水平上, 变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、厚壁菌

表 2 微生物丰富度  
Table 2 Microbial richness

样本名称	OTU 数量	门 Phylum	纲 Class	目 Order	科 Family	属 Genus	ACE index	Chao1 index
Sample	OTU	name						
CO	7 020	1 579	1 531	1 471	1 389	985	1 571.0	1 581
RO	5 659	1 337	1 318	1 205	1 106	674	1 337.7	1 337

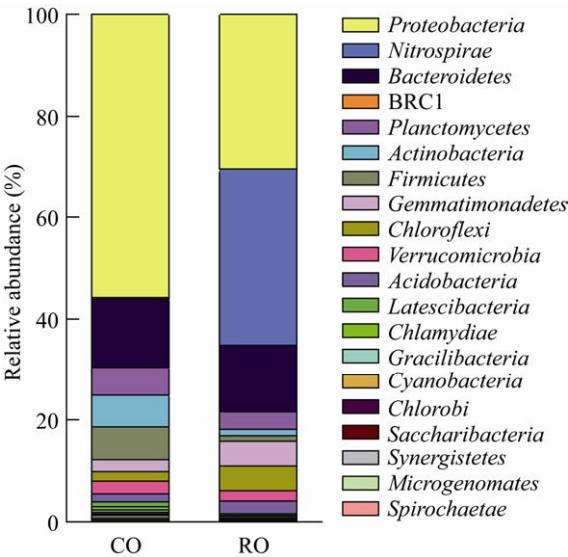


图 4 门分类水平上样本菌群组成分析  
Figure 4 Analysis of the composition of sample bacteria at the phylum level

门(*Firmicutes*)、放线菌门(*Actinobacteria*)等为试验组样本中丰度较高的菌门,试验组和对照组样本中菌门的丰度存在较为明显的差异。以上4种菌在试验组样本中的丰度分别为55.5%、13.4%、6.5%和6.2%;在对照组样本中的丰度分别为30.3%、13.1%、1.0%和1.4%。说明石灰石滤料溶解释放增加的 $\text{Ca}^{2+}$ 使变形菌门、厚壁菌门和放线菌门的丰度分别提高了25.2%、5.5%和4.8%。

### 2.3.3 纲分类水平上菌群组成分析

如图5所示,在纲分类水平上样本菌群组成分析中,试验组中丰度较高的菌种为 $\beta$ -变形菌纲(*Betaproteobacteria*)、 $\alpha$ -变形杆菌纲(*Alphaproteobacteria*)、 $\gamma$ -变形菌纲(*Gammaproteobacteria*)和鞘脂杆菌纲(*Sphingobacteriia*),在试验组样本中的丰度分别为22.0%、14.7%、15.5%和5.0%;在对照组样本中的丰度分别为14.7%、7.3%、3.5%和5.5%。在石灰石滤柱回流液的影响下, $\beta$ -变形菌纲、 $\alpha$ -变形杆菌纲和 $\gamma$ -变形菌纲的丰度分别提高了7.3%、7.4%和12.0%,鞘脂杆菌纲的丰度变化不大。

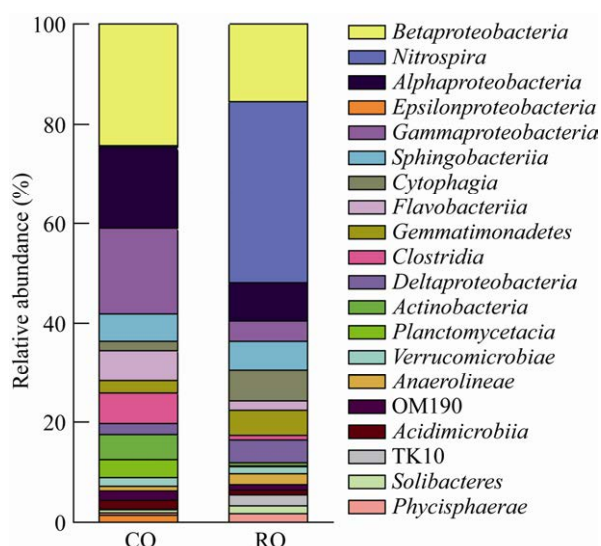


图5 纲分类水平上样本菌群组成分析

Figure 5 Analysis of the composition of sample bacteria at the class level

### 2.3.4 科分类水平上菌群组成分析

如图6所示,在科分类水平检测到的菌科中,丛毛单胞菌科(*Comamonadaceae*)、红环菌科(*Rhodobacteraceae*)、黄单胞菌科(*Xanthomonadaceae*)和噬纤维细菌科(*Cytophagaceae*)在试验组样本中的丰度分别为7.9%、8.4%、8.5%和1.7%,在对照组样本中的丰度分别为6.6%、1.3%、1.9%和6.0%。石灰石滤柱出水回流液中较多的 $\text{Ca}^{2+}$ 使丛毛单胞菌科、红环菌科和黄单胞菌科的丰度分别提高了1.3%、7.1%和6.6%,噬纤维细菌科的丰度降低了4.3%。

### 2.3.5 样本间物种组成差异分析

两个样本在门分类水平上的不同物种数量只有22种,而在属水平上的样本差异较为明显,样本间不同物种数量达到170种。从图7可以看出,*Candidatus\_Nitrotoga*和慢生根瘤菌属在试验组中的丰度明显高于其在对照组样本中的丰度。*Candidatus\_Nitrotoga*主要参与硝化反应,是一种可以功能性替代硝化螺旋菌(*Nitrospira*)的新型菌种<sup>[11]</sup>。试验组和对照组样本的菌群结构有明显的差异,石灰石滤柱通过溶解释放提供了更多 $\text{Ca}^{2+}$ 及碱度,可能促进了一些具有硝化功能微生物的生长。

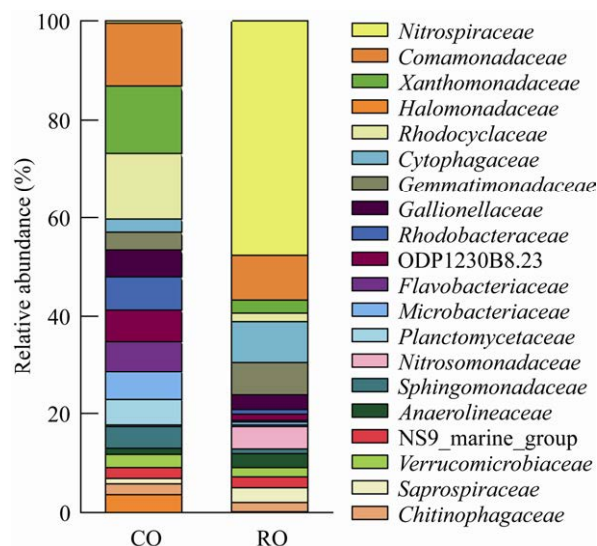


图6 科分类水平上样本菌群组成分析

Figure 6 Analysis of the composition of sample bacteria at the family level



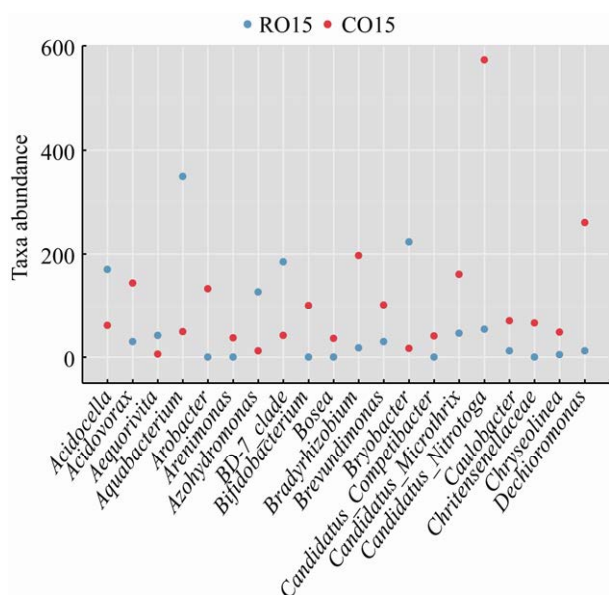


图7 属分类水平上前20个OTU丰度分布

Figure 7 The top 20 OTU abundance distributions under the classification level

### 2.3.6 样本分类学组成信息交互分析

热图(Heatmap)通过对不同样本间的相似程度及其丰度进行聚类,其颜色梯度的变化反映了样本中微生物新陈代谢功能基因数量在不同功能分类水平上的相似性和差异性,在图8中丰度较高的菌属用红色代表,丰度较低的菌属用绿色代表。

由图8可知,贝塔变形菌属(*Candidatus\_Nitrospira*)、热单胞菌属(*Thermomonas*)、盐单胞菌属(*Halomonas*)、丝硫细菌属(*Thiothrix*)以及陶厄氏菌属(*Thauera*)为样本CO在属分类水平上的主要菌种;硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)、固氮自养单胞菌(*Azohydromonas*)、木洞菌属(*Woodsholea*)及根瘤菌属(*Rhizobium*)为样本RO在属分类水平上的主要菌种;此外,黄杆菌属(*Flavobacterium*)和鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)在样本CO中的相对丰度高于样本RO。BAF1在石灰石滤料的溶出物影响下,其好氧柱内的优势菌群与BAF2系统存在较为明显的差异。

## 3 讨论

目前将石灰石应用于人工湿地中处理生活污水

水的研究较多,但将石灰石作为BAF的滤料处理生活污水的研究鲜有报道。因此,本研究将石灰石作为回流式BAF处理系统的部分滤料,考察BAF处理系统的处理效能,并结合高通量测序技术分析BAF柱内的微生物群落多样性。试验结果表明,BAF系统采用石灰石滤柱出水回流可提高对污染物尤其是总磷的去除效果。其原因可能是石灰石滤柱出水回流可以提供更多的 $\text{Ca}^{2+}$ 和碱度,改善了硝酸菌的生长环境并促进其生长,同时起到了化学除磷的作用,还可能影响了其他微生物的生长环境和增殖。

试验组样本的ACE指数和Chao1指数均高于对照组,而ACE指数和Chao1指数是表征微生物群落内物种丰富度和均匀度的重要参数<sup>[12]</sup>,石灰石滤柱出水回流的BAF柱中总体上微生物群落的丰富度增加了。在门分类水平上,变形菌门为试验组和对照组样本中丰度最高的菌门,这与宋淑芬等<sup>[13]</sup>的研究结果相一致。变形菌门的大多数细菌都在脱氮、生物除磷及诸多有机物降解过程中起重要作用<sup>[14]</sup>;放线菌门的部分细菌是异养微生物,具有降解有机物的功能,在好氧时可吸收磷<sup>[15-16]</sup>;厚壁菌门可降解COD、乳酸等<sup>[17]</sup>。变形菌门、放线菌门和厚壁菌门在试验组样本的丰度均高于对照组。在纲和科分类水平上, $\beta$ -变形菌纲、 $\alpha$ -变形杆菌纲、 $\gamma$ -变形菌纲、丛毛单胞菌科、红环菌科和黄单胞菌科等在试验组样本中的丰度高于对照组。 $\alpha$ -变形杆菌纲包含的一些微生物会直接参与硝化过程,如亚硝酸氧化菌; $\beta$ -变形菌纲是一种脱氮、除磷和降解其他有机物的重要菌群<sup>[18]</sup>;丛毛单胞菌科对污水中的有机物、氨氮和亚硝氮都有一定的降解作用,生长繁殖受碳源和氮源的影响较大<sup>[19]</sup>;红环菌科具有除磷功能<sup>[20]</sup>;黄单胞菌是具有去除污水中磷污染功能的微生物<sup>[21]</sup>;噬纤维细菌科与污水处理中的脱氮除磷有关<sup>[22]</sup>。灰石滤料溶解释放增加的 $\text{Ca}^{2+}$ ,促进了以上具有有机物降解和脱氮除磷功能的微生物的生长增殖,这可能是BAF1系统的处理

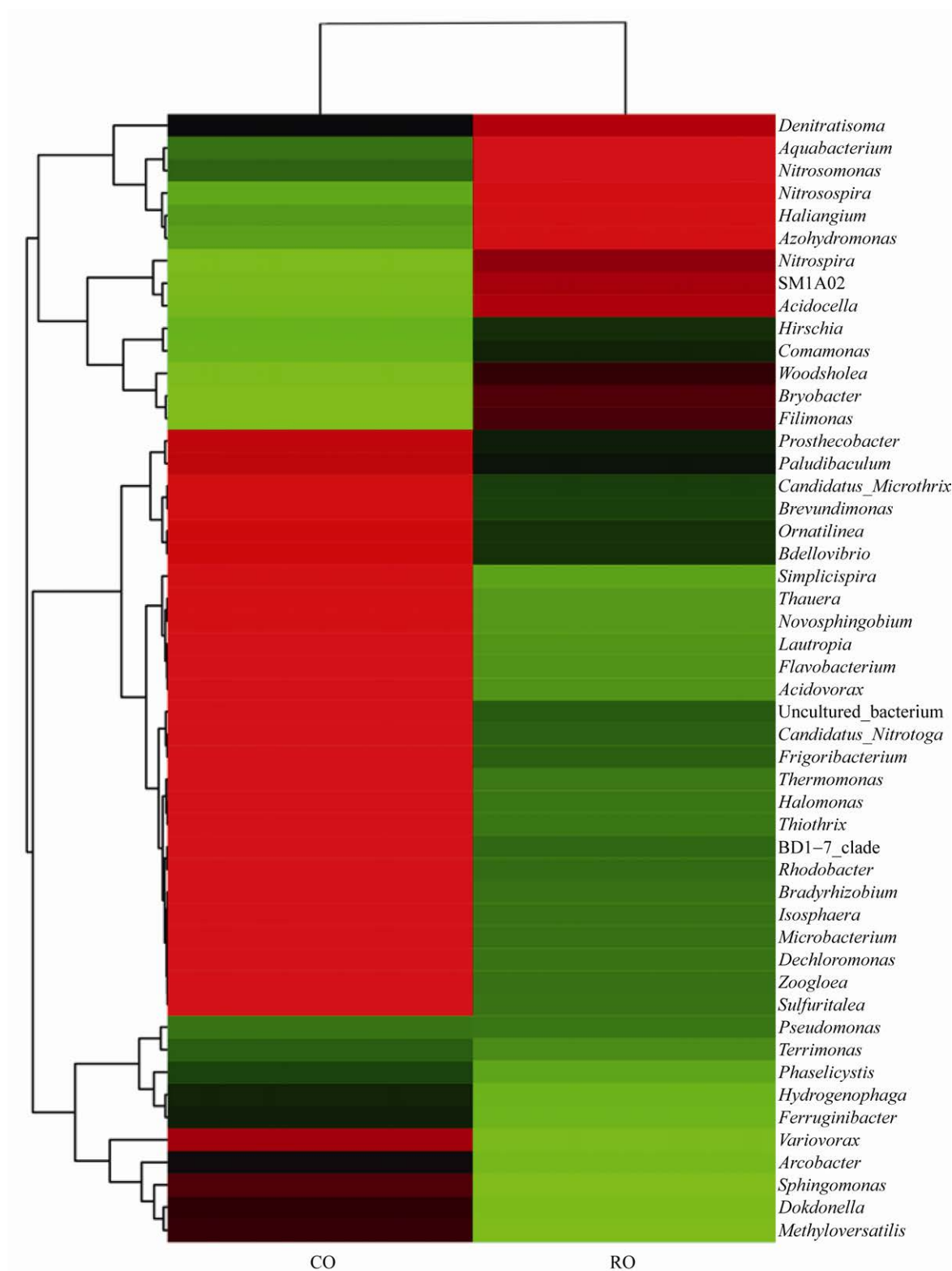


图 8 属水平上的热图和聚类分析

Figure 8 The heatmap and cluster analysis at genus level

效能优于 BAF2 系统的部分原因。同时, BAF1 系统在石灰石滤料的溶出物影响下, 其好氧柱内的优势菌属与 BAF2 系统存在较为明显的差异, 具有硝化功能的贝塔变形菌属、固氮功能的热单胞菌属<sup>[23]</sup>、COD 降解和反硝化功能的陶厄氏菌属<sup>[24-25]</sup>是试验组的优势菌属; 对亚硝酸盐有氧化作用的硝化螺旋菌属<sup>[26]</sup>、对氮污染物在污水处理中的转化有一定作用的固氮氢自养单胞菌和具有异养硝化功能的根瘤菌<sup>[27]</sup>是对照组样本的主要菌属; 而具有有机物降解及反硝化功能的黄杆菌属和异氧硝化功能的鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas*)<sup>[26,28]</sup>, 在样本 CO 中的相对丰度高于样本 RO, 可提高 BAF1 处理系统对污染物的去除效能。

#### 4 结论

(1) 石灰石滤柱出水回流可增加  $\text{Ca}^{2+}$  和碱度, 使 BAF 柱内微生物菌群的丰度发生变化; 变形菌门、放线菌门、厚壁菌门、 $\alpha$ -变形杆菌纲、 $\beta$ -变形杆菌纲、 $\gamma$ -变形杆菌纲、丛毛单胞菌科、黄单胞菌科和红环菌科等在试验组样本中的丰度相比对照组有所提高, 是强化系统生物除磷脱氮效果的基础。

(2) BAF 系统采用石灰石滤柱出水回流, 含  $\text{Ca}^{2+}$  回流液具有一定的化学除磷作用, 使 BAF 系统对 TP 的去除效果明显提高, 该方法具有一定的工程应用价值。

#### REFERENCES

- [1] Wu SQ, Qi YF, Yue QY, Gao BY, Gao Y, Fan CZ, He SB. Preparation of ceramic filler from reusing sewage sludge and application in biological aerated filter for soy protein secondary wastewater treatment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 283: 608-616
- [2] Xu F, Qi YP, Zhang CX, Wang XH, Hai RT, Li Y. Phosphorus and nitrogen removal by a combined process of BAF and subsurface wastewater infiltration system[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(3): 1465-1471 (in Chinese)  
许菲, 齐钰鹏, 张从轩, 王晓慧, 海热提, 李媛. 曝气生物滤池与地下渗滤系统工艺脱氮除磷[J]. 环境工程学报, 2017, 11(3): 1465-1471
- [3] Guo XM, Zhao Y, Wang KY, Zhao YG. Characteristics of microbial community, nitrogen and phosphorus removal in separated compartments of combined packing biological aerated filter[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(1): 152-160 (in Chinese)  
郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国. 分格复合填料曝气生物滤池脱氮除磷特性及微生物群落特征分析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 152-160
- [4] Wang HJ, Dong WY, Li T, Liu TZ. A modified BAF system configuring synergistic denitrification and chemical phosphorus precipitation: examination on pollutants removal and clogging development[J]. Bioresource Technology, 2015, 189: 44-52
- [5] Lee J, Kim J, Lee C, Yun Z, Choi E. Biological phosphorus and nitrogen removal with biological aerated filter using denitrifying phosphorus accumulating organism[J]. Water Science and Technology, 2005, 52(10/11): 569-578
- [6] Guo MK, Wu CY, Zhou YX, Wang Q, Wang Y, Guo HW, Gao W. Enhanced phosphorus removal in BAF treating petrochemical secondary effluent[J]. CIESC Journal, 2015, 66(10): 4236-4243 (in Chinese)  
郭明昆, 吴昌永, 周岳溪, 王群, 王翼, 郭洪文, 高薇. 强化除磷 BAF 处理石化二级出水[J]. 化工学报, 2015, 66(10): 4236-4243
- [7] Qiu LP, Ma J. A parallel study of phosphorus removal by chemical precipitation with  $\text{FeCl}_3$  and  $\text{AlCl}_3$  in biological aerated filters[J]. Modern Chemical Industry, 2007, 27(S1): 159-162 (in Chinese)  
邱立平, 马军. 曝气生物滤池铁盐及铝盐化学强化除磷的对比研究[J]. 现代化工, 2007, 27(S1): 159-162
- [8] The State Administration of Environmental Protection. Determination Methods for Examination of Water and Wastewater[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese)  
国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [9] Cavigelli MA, Robertson GP. Role of denitrifier diversity in rates of nitrous oxide consumption in a terrestrial ecosystem[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(3): 297-310
- [10] Zhou ZH, Peng SL, Bo XC, Li F. Computational methods in microbe detection using next-generation sequencing[J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2017, 44(1): 58-69 (in Chinese)  
周子寒, 彭绍亮, 伯晓晨, 李非. 基于高通量测序技术的微生物检测数据分析方法[J]. 生物化学与生物物理进展, 2017, 44(1): 58-69
- [11] Han M, Gao W, Cui FY. Identification of nitrifying bacteria in biological aerated filter in pretreatment of polluted raw water at low temperature[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(9): 16-20 (in Chinese)  
韩梅, 高伟, 崔福义. 对 BAF 预处理低温水源水系统中



- 硝化细菌的识别[J]. 给水排水, 2017, 43(9): 16-20
- [12] Qin WT, Zhang B, Sun CX, Chen Z, Wen XH. Differences of fungal community in wastewater treatment plants between south and north China[J]. Microbiology China, 2019, 46(8): 1876-1885 (in Chinese)  
秦文韬, 张冰, 孙晨翔, 陈湛, 文湘华. 我国南北区域城市污水处理系统内真菌群落的差异[J]. 微生物学通报, 2019, 46(8): 1876-1885
- [13] Song SF, Yang F, Gao XF, Ma LA. Effects of sewage treatment on microbial community structure of surface water in Xiantao wetland[J]. Microbiology China, 2019, 46(3): 512-521 (in Chinese)  
宋淑芬, 杨帆, 高绣纺, 马立安. 湿地法处理生活污水对仙桃湿地地表水微生物群落结构的影响[J]. 微生物学通报, 2019, 46(3): 512-521
- [14] Nguyen HTT, Le VQ, Hansen AA, Nielsen JL, Nielsen PH. High diversity and abundance of putative polyphosphate-accumulating *Tetrasphaera*-related bacteria in activated sludge systems[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2011, 76(2): 256-267
- [15] Xu LJ, Guo CY, Peng YZ, Yuan ZG. Review on the microbiological and biochemical characteristics of enhanced biological phosphorus removal system[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2011, 17(3): 427-434 (in Chinese)  
徐立杰, 郭春艳, 彭永臻, 袁志国. 强化生物除磷系统的微生物学及生化特性研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(3): 427-434
- [16] Zhou HX, Xu GR. Biofilm characteristics, microbial community structure and function of an up-flow anaerobic filter-biological aerated filter (UAF-BAF) driven by COD/N ratio[J]. Science of The Total Environment, 2019, 708: 134422
- [17] Lv ZP, Leite AF, Harms H, Glaser K, Liebetrau J, Kleinstuber S, Nikolausz M. Microbial community shifts in biogas reactors upon complete or partial ammonia inhibition[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103(1): 519-533
- [18] Zhang N, Chu LB, Ding PY, Wang X, Yang Q, Wang JL. Enhanced treatment of petrochemical wastewater by using A/O biofilm reactor and analysis of biofilm community[J]. China Environmental Science, 2015, 35(1): 80-86 (in Chinese)  
张楠, 初里冰, 丁鹏元, 王星, 杨琦, 王建龙. A/O 生物膜法强化处理石化废水及生物膜种群结构研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(1): 80-86
- [19] Zhao Y, Xue LG, Li L, Zhang HG. Advance in environmental pollutants degradation of *Comamonas*[J]. Microbiology China, 2012, 39(10): 1471-1478 (in Chinese)  
赵燕, 薛林贵, 李琳, 张红光. 丛毛单胞菌在环境污染物降解方面的研究进展[J]. 微生物学通报, 2012, 39(10): 1471-1478
- [20] Li BT, Hu ZQ, Liu DQ, Wu DS. Research progress of bacterial diversity and functional regulation in activated sludge[J]. Microbiology China, 2019, 46(8): 2009-2019 (in Chinese)  
李炳堂, 胡智泉, 刘冬敏, 吴丁山. 活性污泥中菌群多样性及其功能调控研究进展[J]. 微生物学通报, 2019, 46(8): 2009-2019
- [21] Zhang JK, Yin J, Sang L. Effect of composite bioactive filler on biological characteristics of activated sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(8): 3701-3706 (in Chinese)  
张居奎, 尹军, 桑磊. 复合生物活性填料对活性污泥生物特性的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(8): 3701-3706
- [22] Krustok I, Truu J, Odlare M, Truu M, Ligi T, Tiirik K, Nehrenheim E. Effect of lake water on algal biomass and microbial community structure in municipal wastewater-based lab-scale photobioreactors[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(15): 6537-6549
- [23] Huang YN, Wang XH, Cao Q, Fu XC, Fu WY, Ma J, Zhang M. Analysis of microbial community changes in pig excrement during compost process based on high-throughput sequencing technology[J]. Journal of Microbiology, 2018, 38(5): 21-26 (in Chinese)  
黄雅楠, 王晓慧, 曹琦, 傅学聪, 付文怡, 马杰, 张明. 高通量测序技术分析猪粪堆肥过程中微生物群落结构变化[J]. 微生物学杂志, 2018, 38(5): 21-26
- [24] Zhang CL, Xu G, Feng BR, Zheng P. Analysis of the characteristics of biological colonies in the process of BAC filter dealing with small molecular aldehyde pollutants[J]. Urban Water Supply, 2014(6): 35-41 (in Chinese)  
张春雷, 许光, 冯博然, 郑鹏. BAC 滤池应对小分子醛类污染物过程中生物菌落特性变化分析[J]. 城镇供水, 2014(6): 35-41
- [25] Mao YJ, Zhang XJ, Xia X, Zhong HH, Zhao LP. Versatile aromatic compound-degrading capacity and microdiversity of *Thauera* strains isolated from a coking wastewater treatment bioreactor[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2010, 37(9): 927-934
- [26] Zhou HX, Xu GR. Integrated effects of temperature and COD/N on an up-flow anaerobic filter-biological aerated filter: Performance, biofilm characteristics and microbial community[J]. Bioresource Technology, 2019, 293: 122004
- [27] Lü PY, Luo JX, Han ZF, Huang ZB. Purification of ammonia-polluted water through biofilm augmentation: operating conditions and key microbial community[J]. Microbiology China, 2017, 44(9): 2055-2066 (in Chinese)  
吕鹏翼, 罗金学, 韩振飞, 黄占斌. 生物膜法强化净化氨氮污染水体及其微生物群落解析[J]. 微生物学通报, 2017, 44(9): 2055-2066
- [28] Liu HY, Zhu LY, Tian XH, Yin YS. Seasonal variation of bacterial community in biological aerated filter for ammonia removal in drinking water treatment[J]. Water Research, 2017, 123: 668-677