

# 不同填料曝气生物滤池对养猪沼液的处理效果及微生物群落响应

张梦<sup>1</sup>, 张龙真<sup>2</sup>, 陶然<sup>1,3,4,✉</sup>, 廖若梅<sup>1</sup>, 杨扬<sup>1,3</sup>, 邵义萍<sup>1,3</sup>, 傅木星<sup>4</sup>

1. 暨南大学生命科学技术学院, 广州 510632; 2. 广州和源生态科技发展股份有限公司, 广州 510060; 3. 暨南大学水生生物研究中心, 广州 510632; 4. 厦门众仁合美生物科技有限公司, 厦门 361000

**摘要** 本文利用陶粒、沸石和砾石为填料分别构建 3 组三级串联式曝气生物滤池, 考察不同进水碳氮比条件下生物滤池对养猪沼液 (DPW) 中 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP 及抗生素的处理效果与差异, 并通过 16S rRNA 高通量测序对填料生物膜进行分析。结果表明: 以陶粒为填料的曝气生物滤池对污染物的去除效果最佳, 对养猪沼液中 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP 的平均去除率分别为 93.77%~94.14%、99.44%~99.89%、64.63%~85.23%、92.68%~95.74%, 对 SMZ2、OTC、TC、CFX、OFX 的平均去除率分别在 94.72%~97.07%、94.85%~95.27%、83.17%~92.05%、47.62%~65.02%、52.76%~69.45%。进水碳氮比提高后, 3 组曝气生物滤池对 TN 的处理效率显著提高 ( $P<0.01$ ), 对 SMZ2、TC 和 CFX 的去除效率也有所提高 ( $P<0.05$ ), 但对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 的去除无显著的提升; 16S rRNA 高通量测序分析表明, 3 组滤池填料生物膜上的细菌中变形杆菌门 (Proteobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 相对丰度较高; *Thauera* 属、*Zoogloea* 属、*Flavobacterium* 属和 *Arcobacter* 属为优势属, 其中以反硝化为主的 *Thauera* 属在陶粒组相对丰度最高, 达到 36.27%, 使陶粒组有良好污染物去除效率。该研究结果可为利用生物滤池技术处理养殖废水提供参考和借鉴。

**关键词** 曝气生物滤池 (BAF); 养猪沼液 (DPW); 抗生素; 微生物群落

我国是世界上最大的养猪国家, 近十年来每年饲养超过  $5\times 10^9$  头猪, 据统计 2022 年中国肉猪出栏量为近  $7\times 10^9$  头, 所产生的废水量相当于  $49\times 10^9$  人产生的生活污水排放量<sup>[1-2]</sup>。大多数规模化养猪场的废水经过厌氧池、消化池等处理后产生的养猪沼液 (digested piggery wastewater, DPW), 具有碳氮比低、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量高、微生物降解能力差等特点<sup>[3]</sup>。此外, 养殖过程中广泛使用的各种抗生素并不能被牲畜充分吸收利用, 大约有 75% 的抗生素释放到环境中<sup>[4]</sup>, 导致养猪废水中高浓度的抗生素残留<sup>[5]</sup>, 使养猪废水的处理面临严峻挑战, 对我国污水处理和生态环境造成严重压力。

曝气生物滤池 (biological aerated filter, BAF) 是一种集过滤、吸附、生物降解于一体的污水处理工艺, 具有高效率、低成本等优点<sup>[5-6]</sup>, 已经被广泛应用于各种废水的处理。有研究表明, 曝气生物滤池不仅可以高效去除氮、磷营养盐<sup>[5,7]</sup>, 对重金属<sup>[8]</sup>、农药<sup>[9]</sup>、抗生素<sup>[5]</sup>、药物及个人护理品 (pharmaceutical and personal care products, PPCPs)<sup>[10]</sup> 等各种毒害污染物也表现出很好的去除效果。钟鸣扬<sup>[7]</sup> 利用竹炭-陶粒组合填料的曝气生物滤池对养猪沼液进行处理, TP、COD 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率均达到 80% 以上。CHEN 等<sup>[5]</sup> 以弹性固体材料和砾石为填料构建曝气生物滤池, 用其处理养猪废水, 结果表明, 曝气生物滤池对常规污染物的去除率超过 80%, 对 9 种抗生素的去除率达到 82.1%~100%。填料是生物滤池的核心组成部分, 能够吸附污染物, 并为生物膜提供附着场所, 其性能直接影响污染物的去除效果<sup>[11]</sup>, 常用的填料有陶粒<sup>[7,9]</sup>、生物炭<sup>[6]</sup>、沸石<sup>[12]</sup>、聚氨酯泡沫<sup>[8]</sup> 等, 陶粒、沸石和砾石填料价格低廉, 是多种水处理工艺的常用填料。ZHOU 等<sup>[13]</sup> 通过持续添加人工废水评估陶粒、沸石、砾石介质在累积生物量和渗流特性之间的相互作用, 结果表明与沸石、砾石两种材料相比, 陶粒的形状导致其水头损失大, 但陶粒具有更高的水力效率, 生物膜生长产生更小的死

收稿日期: 2024-04-23; 录用日期: 2024-08-23

基金项目: 广东省科技计划应用研发专项 (2015B020235008); 广东省国际科技合作基地 (2019A050505005); 厦门市“双百计划”领军型创业人才项目

第一作者: 张梦 (2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水污染治理, [zhangmeng@stu2022.jnu.edu.cn](mailto:zhangmeng@stu2022.jnu.edu.cn) ✉通信作者: 陶然 (1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为水污染治理与环境微生物, [taoran@jnu.edu.cn](mailto:taoran@jnu.edu.cn)

区和短路。需要进一步探究这3种填料在污染物去除效果及微生物组成的差异。

目前曝气生物滤池已经应用于养殖废水处理<sup>[5,7]</sup>，去除效果受碳源不足和缺氧区域不明显的影响<sup>[14]</sup>。已有研究表明，在人工湿地<sup>[15]</sup>、SBR系统<sup>[16]</sup>、MBBR系统<sup>[17]</sup>等污水处理系统中通过外部添加碳水化合物来调节进水C/N比可以强化微生物的反硝化能力以增强处理效果。本文以养猪沼液为处理对象，利用砾石、陶粒、沸石3组填料分别构建三级串联式曝气生物滤池，考察不同进水C/N比下对养猪沼液中氮、磷营养盐及抗生素的去除效果，并对填料生物膜上的微生物群落进行分析。研究结果可优化曝气生物滤池处理养猪废水的工艺和参数设计，为我国养殖废水的治理提供参考和借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验装置

实验装置为3组三级串联曝气生物滤池，每组装置由3个体积为0.1 m×0.1 m×0.5 m(长×宽×高)的生物滤池单元串联而成(图1)。生物滤池单元为底部封口的PVC方管，顶部设进水口，底部设出水口和曝气口，内部填充高度为0.45 m填料，3组曝气生物滤池分别填充陶粒(TL,  $\Phi=0.3\sim 0.5$  cm)、沸石(FS,  $\Phi=0.4\sim 0.8$  cm)、砾石(LS,  $\Phi=0.5\sim 0.8$  cm)。每个滤池单元的有效体积为1.2~1.7 L，3个单元之间用水管连通。

装置进水为广州市某养猪场的养猪沼液。每组滤池每隔8 h进水1.2 L，每天进水3次，废水以下行方式依次流经3个滤池单元，总的水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)为24 h。利用气泵在滤池单元底部曝气，曝气流量为12 L·h<sup>-1</sup>。

### 1.2 装置运行

为探究填料和进水碳氮比对BAF去除污染物效果及微生物群落结构的影响，实验过程分为4个阶段。阶段I和阶段II进水为稀释后的养猪沼液，阶段III和阶段IV进水为养猪沼液原水。阶段I进水C/N比为1.18，阶段II进水投加葡萄糖至C/N比为6.17，阶段III和阶段IV进水C/N比为4~6，阶段IV在每次进水时对第II级和第III级单元分别投加1 g葡萄糖。不同阶段进水的污染物质量浓度列于表1。

### 1.3 采样及指标测定方法

在每个实验阶段，对3组BAF的各个单元分别采集进、出水，每个位点取3个平行样，测定废水常规污染物和抗生素。在阶段IV对进水W0和BAF各单元填料进行采集，用于分析微生物群落结构。

1) 常规水质指标测定。pH、DO和温度用便携式水质分析仪(YSI, USA)测定。水质指标总氮(TN)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)均采用国家标准水样化学分析方法测定<sup>[18]</sup>，总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度计法(HJ 636—2012)测定，氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)测定，总磷(TP)采用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)测定，化学需氧量(COD)采用重铬酸盐法(HJ 828—2017)测定。

2) 抗生素检测。本实验检测的目标抗生素为氧四环素(OTC)、四环素(TC)、磺胺二甲嘧啶(SMZ2)、环丙沙星(CFX)、氧氟沙星(OFX)5种抗生素。水样收集后经0.7 μm滤膜过滤后，用于测定抗生素浓度。通过高效液相色谱仪HP 1100 LC(Agilent Technologies, US)和AB 4000QTRAP质谱仪(AB sciex, US)进行测定。上机方法与分析条件见参考文献<sup>[19]</sup>。

3) 微生物群落分析。填料及水样滤膜用DNA提取试剂盒(PowerSoil TM DNA Isolation Kit,

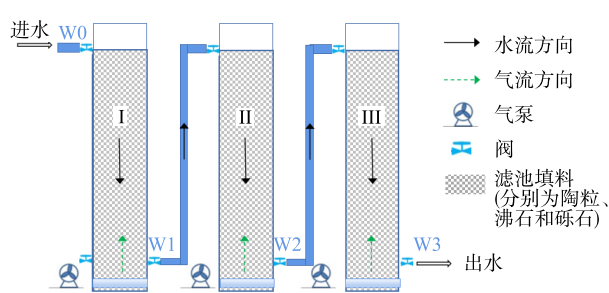


图1 BAF装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of BAF system

表1 不同阶段进水的污染物质量浓度  
Table 1 Pollutant concentrations in influent water at different stages mg·L<sup>-1</sup>

阶段	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TP	COD
阶段 I	96.58±8.39	87.55±9.84	20.09±3.01	113.51±14.58
阶段 II	102.00±6.99	95.37±7.99	26.15±1.03	629.00±25.01
阶段 III	269.17±14.62	251.35±14.15	60.65±1.50	1426.63±62.29
阶段 IV	287.60±8.49	277.57±9.43	61.77±4.03	1315.92±67.57

MOBIO) 提取 DNA, DNA 样品送到上海美吉生物公司进行 16S rRNA 高通量测序。使用引物 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 扩增细菌 16S rRNA 基因的 V3-V4 区域。

将相似性大于 97% 的序列归为一个 OTU, 再利用 RDP Classifier(<http://rdp.cme.msu.edu/>) 与 Silva 数据库进行比对, 比对阈值设为 70%, 得到各 OTU 的物种注释信息。利用上海美吉生物公司的云平台开展样品微生物多样性和差异性的分析。

#### 1.4 数据处理与分析

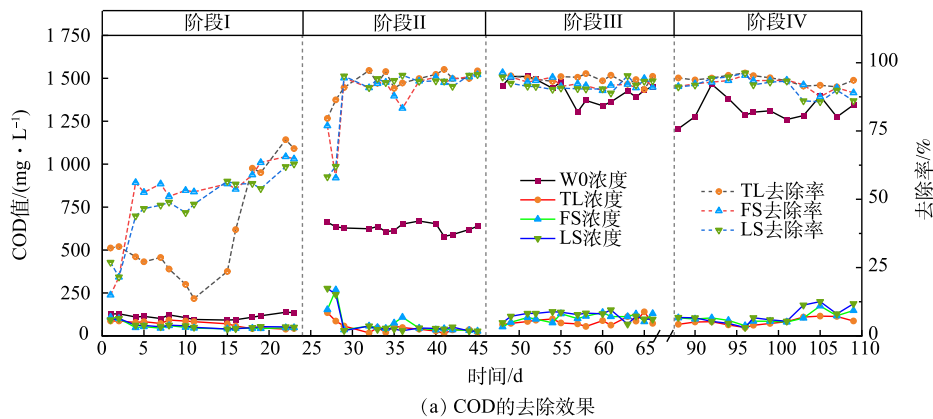
所有结果均由 Microsoft Excel 2016 进行统计分析, 并由 Origin 2021 制图, 采用 SPSS 26.0 软件进行统计差异, 在显著性水平  $P < 0.05$  或  $P < 0.01$  下表示差异显著。水样数据及填料材料样品均在重复实验中取平均值与标准差。

## 2 结果与讨论

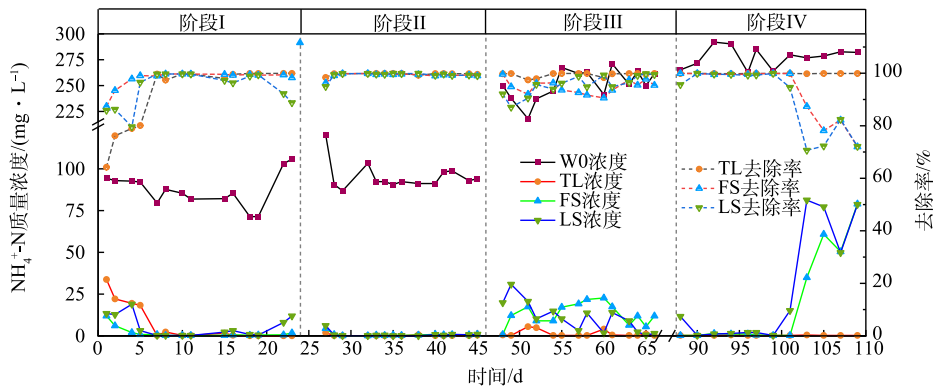
### 2.1 常规污染物的去除效果

实验期间的 4 个阶段, 3 组曝气生物滤池进出水中 COD、氨氮、总氮和总磷的质量浓度变化及去除效果如图 2 所示。在阶段 I, 进水的 COD 平均值为  $(113.51 \pm 14.58) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , TL、FS、LS 组曝气生物滤池的去除率分别为 37.89%、51.44% 和 48.25%; 阶段 II 提高进水碳氮比后, TL、FS、LS 组曝气生物滤池对 COD 的去除率显著提升 ( $P < 0.01$ ), 去除率分别为 92.82%、88.69% 和 88.85%。阶段 III 和阶段 IV 进水为沼液原液, 3 组装置对 COD 的去除率均超过 90%, 表明进水碳氮比和 COD 的提升有利于异养菌的增殖, 可强化曝气生物滤池对有机物的降解和 COD 的去除, 这与李冬等<sup>[20]</sup>、曾玉等<sup>[21]</sup>的研究结果一致。

3 组曝气生物滤池对  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  的平均去除率超过 90%。持续曝气使曝气生物滤池内部水体处于好氧环境, 每个阶段 3 种填料的滤池出水 DO 的平均质量浓度均超过  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (图 3), 这有利于提升硝化菌和氨氧化菌的硝化作用, 本研究结果与姜珊等<sup>[22]</sup>的研究结果一致。由于氨氧化菌为化能自养菌, 且持续曝气有利于



(a) COD 的去除效果



(b)  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  的去除效果

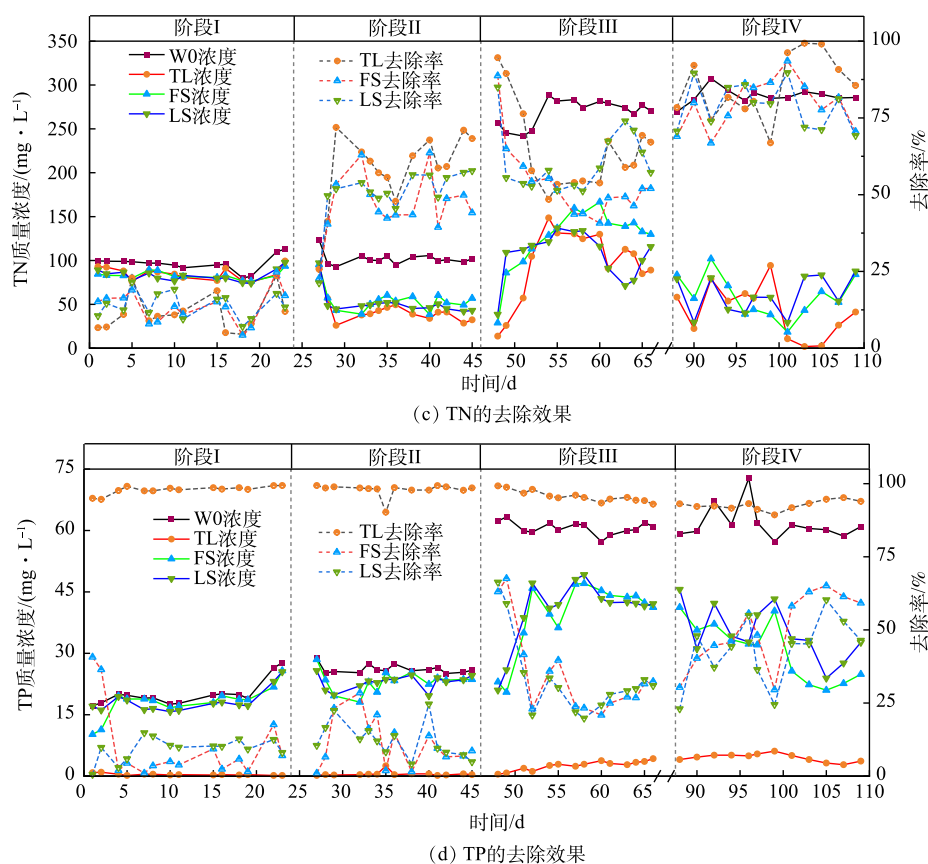


图 2 各阶段 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP 的去除效果

Fig. 2 Removal effect of COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP at each stage

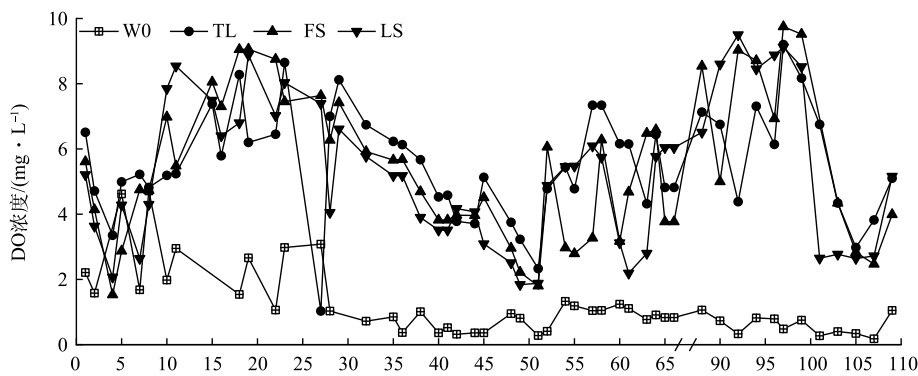


图 3 4 组曝气生物滤池各阶段溶解氧变化

Fig. 3 Variation of dissolved oxygen at each stage

硝化菌的硝化作用，因此，提升进水碳氮比增加水体有机物浓度对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除无显著影响 ( $P>0.05$ )。在阶段 IV 后期，曝气管可能发生堵塞，3 组曝气生物滤池出水 DO 的浓度降低，而 TL 组滤池对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率不变，FS 组和 LS 组装置的去除率降低，这可能是由于陶粒的多孔结构使其 TL 组曝气生物滤池高度富集具有脱氮除磷功能的细菌，即使 DO 下降，仍能保持 TL 组对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 优秀的去除效果。

不同阶段 TN 的去除率差异较大。阶段 I 进水 TN 平均质量浓度为  $(96.58\pm 8.39) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，3 组曝气生物滤池的 TN 平均去除率为 11.55%~14.10%。阶段 II 提高进水碳氮比后，TN 平均去除率达到 46.36%~58.00%，较阶段 I 明显提高 ( $P<0.01$ )。阶段 III 和阶段 IV 过程 TN 的去除率也表现出相同的趋势，阶段 IV 添加葡萄糖后对 TN 的去除率 (78.99%~85.23%) 比阶段 III (53.63%~64.63%) 显著提升 ( $P<0.01$ )。脱氮过程的反硝



化作用需要有机碳源充当电子供体,当进水碳氮比提高后,总氮的去除率提高<sup>[23]</sup>。董宝刚<sup>[24]</sup>利用间歇曝气序批式反应器处理养猪沼液得到了类似的结果。未稀释养猪沼液中含有更多的有机物,有利于反硝化菌等异养微生物的生长,进水有机负荷提高后, TN 的去除率也提高<sup>[25-26]</sup>。

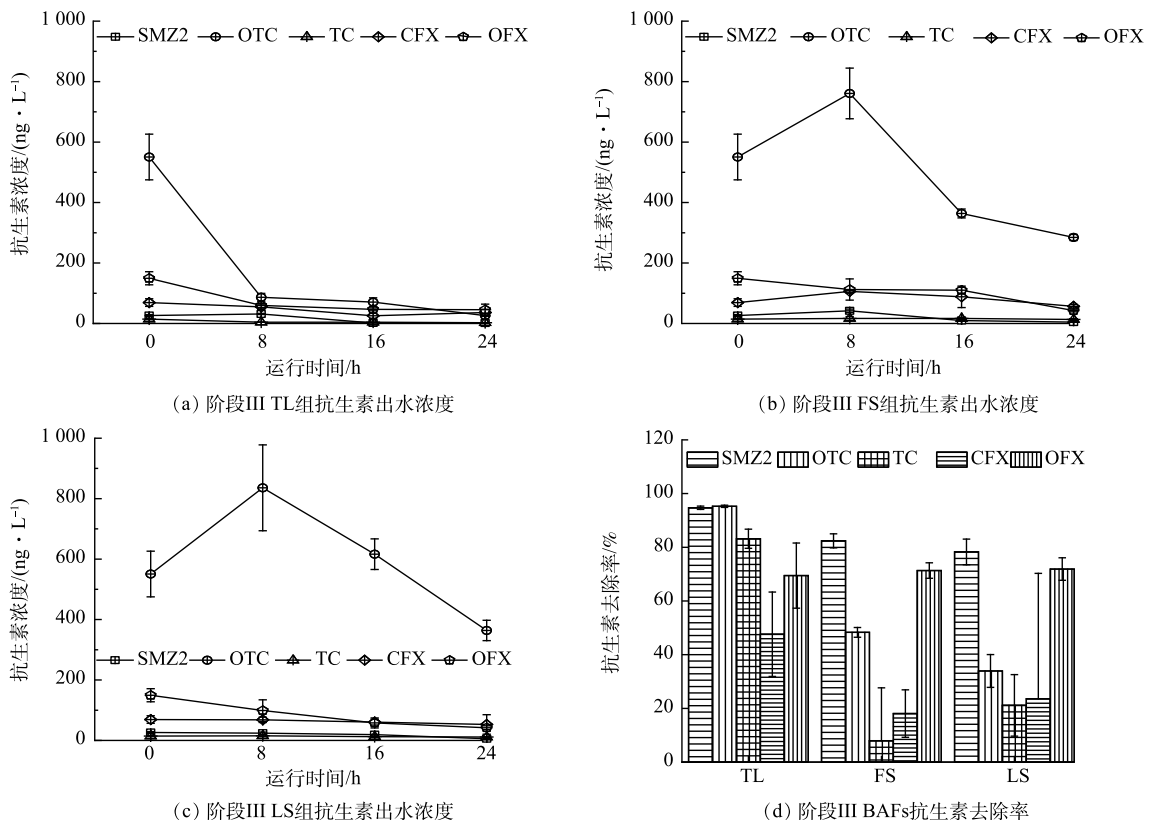
3 组曝气生物滤池对 TP 的处理效果显示, TL 组装置对 TP 的去除率再 90% 以上,而 FS 组和 LS 组曝气生物滤池对 TP 的平均去除率在 9.36%~50.13%, TL 组对 TP 的去除效果明显优于其他 2 组 ( $P < 0.01$ )。水体中的磷主要通过吸附、沉淀、吸收、离子交换、生物除磷等方式去除<sup>[27-28]</sup>, 填料吸附是 TP 去除的主要方式<sup>[29]</sup>, 填料比表面积、表面特征及化学组成元素

等对除磷效果有明显影响,陶粒表面积大、孔径结构多样、吸附力强<sup>[30]</sup>,已有相关研究证明陶粒对磷的吸附要优于沸石和砾石<sup>[31-32]</sup>。本实验装置全程持续曝气,装置内水体处于好氧条件下,有利于聚磷菌对磷素的吸收和去除<sup>[33]</sup>。此外,碳氮比的提高对 TP 的去除效果影响不大 ( $P > 0.05$ ),这可能是在生物除磷过程中,聚糖菌和聚磷菌之间的竞争影响除磷效果,外加葡萄糖提高碳氮比,聚糖菌比聚磷菌更具竞争优势,导致除磷性能没有显著变化<sup>[33-34]</sup>。

## 2.2 不同填料 BAFs 对抗生素的处理效果

图 4 为 3 组曝气生物滤池运行期间 5 种抗生素质量浓度变化及去除率。养猪沼液中所检测的 5 种抗生素为 SMZ2、OTC、TC、CFX 和 OFX,其平均质量浓度分别为  $25.52 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $484.03 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $18.18 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $72.93 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $116.19 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 抗生素质量浓度大小为:  $\text{OTC} > \text{OFX} > \text{CFX} > \text{SMZ2} > \text{TC}$ , OTC 的质量浓度远超其他 4 种抗生素。OTC 和 TC 为四环素类广谱抗菌药物,是猪饲料主要添加抗生素,导致养猪沼液中 OTC 含量最高<sup>[35]</sup>。而常规污水处理工艺对四环素类抗生素去除效果有限<sup>[36]</sup>。在本研究的 3 组曝气生物滤池中, TL 组对 OTC 和 TC 的平均去除率在 80% 以上, TL 组对 TC 和 OTC 的去除效果明显优于其他 2 组 ( $P < 0.01$ )。有研究<sup>[37]</sup>表明,四环素类抗生素的去除以填料吸附为主,李佳泽等<sup>[38]</sup>以陶粒为填料的曝气生物滤池处理制药废水,对四环素类抗生素有较好的去除效果,这与本文的研究结果一致。

阶段 IV 在提升进水碳氮比后,3 组曝气生物滤池对 TC 和 CFX 的去除率均有所提高。唐佳等<sup>[39]</sup>对抗生素在反硝化体系中去特性进行了探究,也得到了类似结论,提升碳氮比有利于某些抗生素的去除。3 组曝



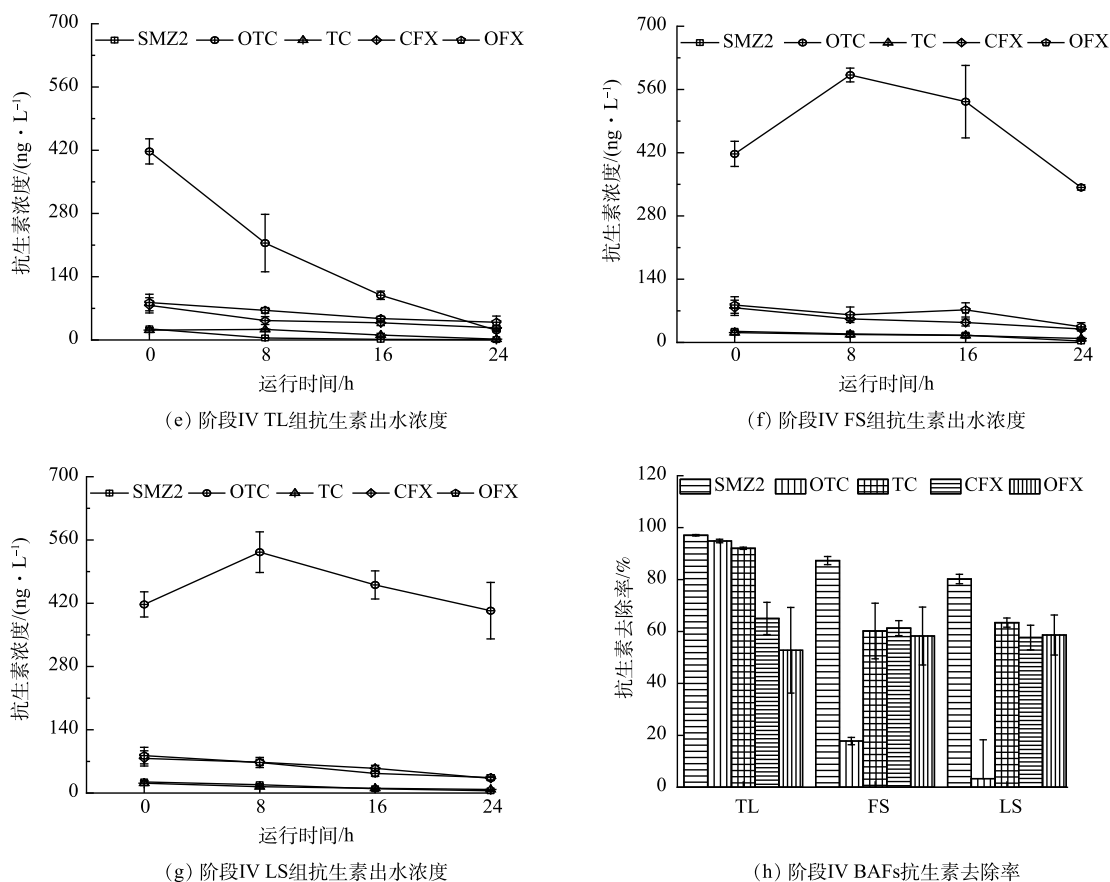


图 4 BAFs 运行期间抗生素质量浓度变化及抗生素去除率变化

Fig. 4 Changes in antibiotic concentration and antibiotic removal rate during the operation of BAFs

气生物滤池对 SMZ2 的去除率较好，其中 TL 组的去除率在 90% 以上。3 组曝气生物滤池对 OFX 的去除率在 52.76%~71.89%，去除效果良好。图中某些时刻出现抗生素的浓度比进水高的情况，这可能是由于填料上吸附的抗生素释放到水体中<sup>[5]</sup>。

### 2.3 不同填料 BAFs 微生物群落响应

样品中微生物群落的多样性和丰富度如表 2 所示。各组微生物样本覆盖率在 98% 以上，这表明测序足以覆盖样本中的大多数微生物。进水 W0 的 Shannon 指数最高，Simpson 指数最低；而 TL 组的 Shannon 指数最低，Simpson 指数最高，表明陶粒生物膜的细菌群落丰富度和多样性低。ZHOU 等<sup>[13]</sup> 研究发现，生物膜的生长会影响渗透系统（如人工湿地）的性能。随生物膜生长，最接近球形的陶粒虽然孔隙率低于其他 2 种材料，但陶粒的导水率变化小，表现出更高的水力效率。具有竞争优势的微生物更容易在陶粒填料上富集，使 TL 组的细菌群落多样性和均匀度都很低，而对污染物的去除效果优于其他两组填料。

如图 5 所示，在生物膜样品中检测到主要门包括变形菌门 (Proteobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、厚壁菌门 (Firmicutes) 和髌骨细菌门 (Patescibacteria)，在 4 组样品中的相对丰度之和均超过 75%。养猪沼液 W0 样品中变形菌门 (18.94%)、拟杆菌门 (26.63%) 和厚壁菌门 (22.31%) 的丰度较高，厚壁菌门是厌氧发酵过程中的优势菌门<sup>[40]</sup>，其细胞壁较厚，有利于他们在恶劣环境中生存。填料生物膜样品中变形菌门的相对丰度提高到 52.99%~69.15%，而拟杆菌门和厚壁菌门相对丰度有所降低，这是由于变形菌门细菌对环境的适应能

表 2 BAFs 中微生物群落的多样性和丰富度估算

Table 2 Estimation of diversity and abundance of microbial communities in BAFs

样品	Shannon	Simpson	Ace	Chao	Coverage/%
W0	4.99±0.03	0.03±0.002	1290.54±6.53	1267.19±14.16	98.36
TL	3.45±0.23	0.14±0.05	735.13±66.80	688.84±56.22	99.09
FS	4.08±0.47	0.06±0.04	874.38±156.39	879.54±166.96	98.83
LS	4.38±0.07	0.04±0.01	967.67±153.27	940.47±87.00	98.79

力强,更容易在填料上定殖,且其具有良好的脱氮除磷能力<sup>[41-42]</sup>,大多数脱氮微生物属于变形杆菌门<sup>[43]</sup>。Epsilonbacteraota 门和放线菌门(Actinobacteria)的相对丰度在填料生物膜中均有提高。LI 等<sup>[44]</sup>研究发现 Epsilonbacteraota 门细菌会选择性的附着在填料表面,而滤池填料为 Epsilonbacteraota 门细菌提供附着位点使其相对丰度提高。放线菌门细菌降解能力强,且对恶劣环境适应能力强,其相对丰度在填料上有所提高<sup>[45]</sup>。本研究结果表明陶粒填料有利于变形杆菌门和拟杆菌门细菌富集,其中变形杆菌门的相对丰度达到 69.15%,这可能与 TL 组曝气生物滤池污染物去除效果最佳有关。

属水平上微生物种群及其丰度如图 6 所示,养猪沼液 W0 中 *DMER64* 属和 *Smithella* 属相对丰度较高,*DMER64* 属和 *Smithella* 属均与厌氧消化产甲烷有关<sup>[46]</sup>,*DMER64* 属是一类参与种间氢转移的功能微生物,能分解丙酸和丁酸产生氢气,与产甲烷菌同时共生,提高产甲烷速率<sup>[47]</sup>。*Smithella* 属是丙酸盐氧化细菌,其可与产氢甲烷菌合作降解丙酸盐<sup>[48]</sup>。与养猪沼液相比,3 组填料生物膜微生物群落的优势菌属相对丰度和组成发生了显著变化,*Thauera* 属、*Zoogloea* 属、*Flavobacterium* 属和 *Arcobacter* 属为在 3 组填料生物膜的优势菌属,与污染物去除密切相关。*Thauera* 属大多为兼性反硝化细菌,具有异养硝化-好氧反硝化功能<sup>[49-50]</sup>,拥有与氮和磷代谢有

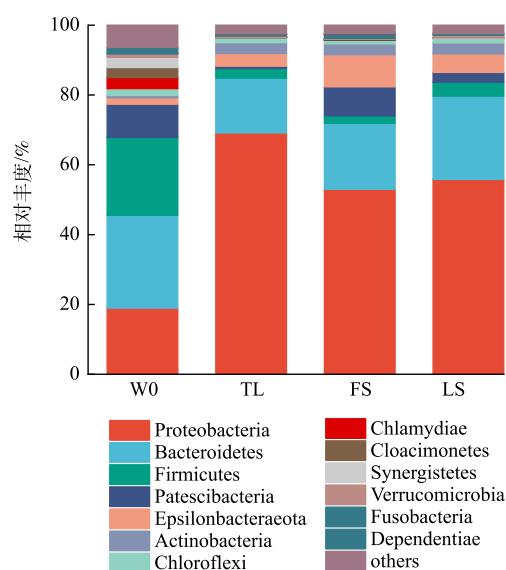


图 5 在门水平上细菌群落结构的分布

Fig. 5 Distribution of bacterial community structure at phylum level

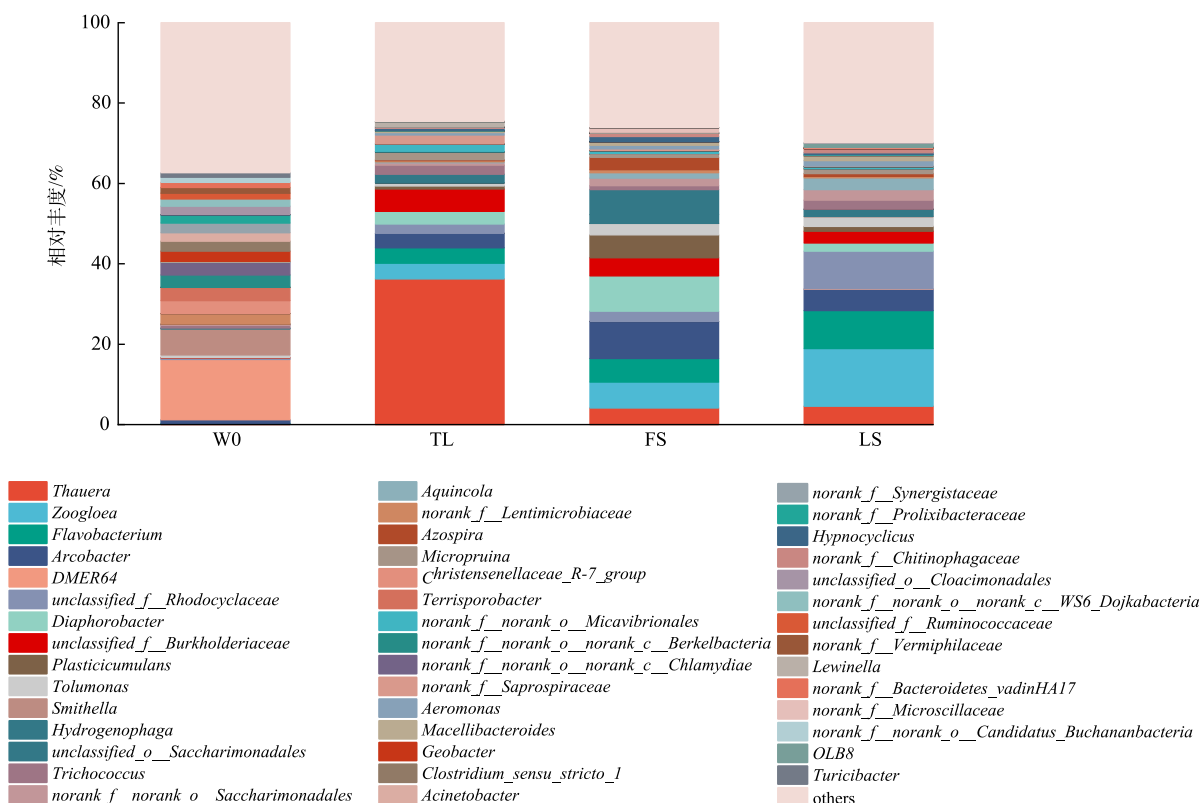


图 6 在属水平上细菌群落结构的分布

Fig. 6 Distribution of bacterial community structure at genus level

关的基因<sup>[51]</sup>, 耦合异养硝化和好氧反硝化两个过程, 使装置在曝气条件下同时具有硝化和反硝化功能, 对氨氮和总氮维持较高的去除率。由于填料的不同, 三组装置优势菌属的相对丰度存在差异。陶粒对微生物群落具有高度的优势筛选, 其中 *Thauera* 属的相对丰度最高 (36.27%), 使得陶粒组装置去除效果最佳, 但也导致其生物多样性降低。沸石生物膜样品中 *Arcobacter* 属和 *Diaphorobacter* 属的相对丰度较高, *Arcobacter* 属是脱硝脱硫系统中的核心菌属, 具有氧化硫化物的功能<sup>[52]</sup>。*Diaphorobacter* 属是活性污泥中常见菌属, 具有反硝化能力<sup>[53]</sup>。*Zoogloea* 属、*Flavobacterium* 属和 *unclassified\_f\_Rhodocyclaceae* 属在砾石组 (LS) 的相对丰度高, *Zoogloea* 属细菌具有絮凝能力, 在废水处理过程中形成好氧颗粒状污泥<sup>[54]</sup>。*Flavobacterium* 属细菌具有异养硝化能力及脱氮能力<sup>[55]</sup>, 可作为好氧颗粒污泥的丝状骨架<sup>[56]</sup>, 是好氧颗粒污泥中的常见菌属。*unclassified\_f\_Rhodocyclaceae* 属与氮和磷的去除密切相关<sup>[57]</sup>。

### 3 结论

1) 3 组曝气生物滤池对养猪沼液中污染物有较好且稳定的去除性能, 其中以陶粒为填料的曝气生物滤池装置对 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN 和 TP 均有良好的去除效果, 去除率分别为 93.77%~94.14%、99.44%~99.89%、64.63%~85.23%、92.68%~95.74%, 提升进水碳氮比后, TN 的去除效率显著提高 ( $P < 0.01$ )。

2) 以陶粒为填料的曝气生物滤池装置对抗生素去除效果表现好, 对 SMZ2、OTC、TC、CFX、OFX 的平均去除率分别在 94.72%~97.07%、94.85%~95.27%、83.17%~92.05%、47.62%~65.02%、52.76%~69.45%。3 组曝气生物滤池对养猪沼液中 SMZ2 和 OFX 均有良好的去除效果; 提升进水碳氮比后, SMZ2、TC 和 CFX 的去除效率提高。

3) 微生物群落分析表明, 3 组滤池填料生物膜上的细菌中变形菌门 (Proteobacteria) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 相对丰度高。*Thauera* 属、*Zoogloea* 属、*Flavobacterium* 属和 *Arcobacter* 属为填料生物膜中的优势菌属, 这些属是参与脱氮除磷的主要种群, 其中陶粒组中 *Thauera* 属的相对丰度高达 36.27%, 使以陶粒为填料的曝气生物滤池具有良好的生态净化效果。

### 参考文献

- [1] SUN X, ZHU B K, ZHANG S, et al. New indices system for quantifying the nexus between economic-social development, natural resources consumption, and environmental pollution in China during 1978–2018[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 804: 150180.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [3] WANG S, WANG L, DENG L W, et al. Performance of autotrophic nitrogen removal from digested piggery wastewater[J]. *Bioresour Technol*, 2017, 241: 465-472.
- [4] ZHANG J M, XIA A, YAO D X, et al. Removal of oxytetracycline and ofloxacin in wastewater by microalgae-bacteria symbiosis for bioenergy production[J]. *Bioresour Technol*, 2022, 363: 127891.
- [5] CHEN J, LIU Y S, ZHANG J N, et al. Removal of antibiotics from piggery wastewater by biological aerated filter system: Treatment efficiency and biodegradation kinetics[J]. *Bioresour Technol*, 2017, 238: 70-77.
- [6] XIN X, LIU S Q, QIN J W, et al. Performances of simultaneous enhanced removal of nitrogen and phosphorus via biological aerated filter with biochar as fillers under low dissolved oxygen for digested swine wastewater treatment[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2021, 44(8): 1741-1753.
- [7] 钟鸣扬. 竹炭-陶粒组合填料曝气生物滤池对养猪废水的处理性能研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2024.
- [8] 瞿艳芝, 李谦, 叶正芳, 等. 曝气生物滤池处理模拟选矿废水研究[J]. 中国有色冶金, 2018, 47(2): 79-83.
- [9] 朱乐辉, 邱俊, 徐星, 等. Fenton 氧化/厌氧/好氧工艺处理苯胺农药废水[J]. 中国给水排水, 2009, 25(2): 58-61.
- [10] 董伟羊. 曝气生物滤池联合中性光 Fenton 降解水中典型医药品污染物的效果及机理研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2020.
- [11] WU Q D, CHEN C, ZHANG Y L, et al. Safe purification of rural drinking water by biological aerated filter coupled with ultrafiltration[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 868: 161632.
- [12] 郝添翼, 曲婷, 王海媚, 等. 曝气生物滤池滤料改进研究[J]. 应用化工, 2023, 52(7): 2112-2116.
- [13] ZHOU Y C, WENG S C, ZHANG Y P, et al. Experimental study of seepage flow properties with biofilm development in porous media with different filter morphologies[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591: 125596.
- [14] 李怡, 朱恒亮. C/N 对 A~2O 耦合生物曝气滤池脱氮除磷的影响[J]. 水处理技术, 2018, 44(9): 120-123.
- [15] LU S L, HU H Y, SUN Y X, et al. Effect of carbon source on the denitrification in constructed wetlands[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(8): 1036-1043.
- [16] 陈翠忠, 李俊峰, 刘生宝, 等. 间歇式活性污泥法 (SBR) 系统碳氮比对同步硝化反硝化微生物群落分布及脱氮效能的影响[J]. 环境化学, 2021, 40(11): 3598-3607.
- [17] 曾锦涌, 柯水洲, 袁辉洲, 等. 碳氮比对 MBBR 系统脱氮性能及微生物群落的影响[J]. 环境工程, 2024, 42(4): 100-110.
- [18] 国家环境保护总局. 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: 132-284.
- [19] TSO J, DUTTA S, INAMDAR S, et al. Simultaneous analysis of free and conjugated estrogens, sulfonamides, and tetracyclines in runoff water and soils



- using solid-phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(6): 2213-2222.
- [20] 李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 等. 进水碳氮比对缺氧/好氧 SBR 亚硝化系统的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(2): 1-7.
- [21] 曾玉, 曾敏静, 程媛媛, 等. 好氧颗粒污泥的培养及处理低碳氮比废水效果[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(4): 104-111.
- [22] 姜娜, 黄锦楼, 阚凤玲, 等. 曝气条件对生态滤池处理农村生活污水的影响[J]. 环境工程学报, 2023, 17(4): 1252-1262.
- [23] PANG Y M, WANG J L. Various electron donors for biological nitrate removal: A review[J]. *The Science of the total environment*, 2021, 794: 148699.
- [24] 董宝刚. 间歇曝气序批式反应器处理养猪沼液的特性研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2017.
- [25] 杨慎华, 李家麟, 王晓玲, 等. 进水碳氮比对生物膜微生物群落及系统脱氮性能的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(11): 75-80.
- [26] MIQUELETO A P, DOLOSIC C C, POZZI E, et al. Influence of carbon sources and C/N ratio on EPS production in anaerobic sequencing batch biofilm reactors for wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(4): 1324-1330.
- [27] RAMASAHAYAM S K, GUZMAN L, GUNAWAN G, et al. A comprehensive review of phosphorus removal technologies and processes[J]. *Journal of Macromolecular Science, Part A - Pure and Applied Chemistry*, 2014, 51(6): 538-545.
- [28] BUNCE J T, NDAM E, OFITERU I D, et al. A review of phosphorus removal technologies and their applicability to small-scale domestic wastewater treatment systems[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6(8): 1-15.
- [29] 齐冉, 张灵, 杨帆, 等. 水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4296-4303.
- [30] 王明玉, 朱琳, 王鹏. 净水除磷基质的综合筛选与长效建模预测[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 119-126.
- [31] 柯德峰. 人工湿地基质的筛选及其除磷机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [32] 张海, 张旭, 梁军, 等. 处理含油地表水体的潜流湿地填料筛选及其性能评价[J]. 环境科学学报, 2007(7): 1121-1126.
- [33] 巩有奎, 王一冰, 孙洪伟. 生物反应器电子受体反硝化聚磷 PAOs-GAOs 竞争及 N<sub>2</sub>O 释放特性[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 241-249.
- [34] 陶虎春, 佟浩, 王健, 等. 碳氮比对 A/O-MBR 工艺中污水脱氮除磷的影响研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2022, 58(4): 680-686.
- [35] 李盟军, 申健, 姚建武, 等. 某规模化猪场废水中抗生素污染特征及生态风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 884-893.
- [36] DAGHRIR R, DROGUI P. Tetracycline antibiotics in the environment: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2013, 11(3): 209-227.
- [37] SON H J, YOON H S, RYU D C, et al. Characteristics of adsorption and biodegradation of tetracycline antibiotics by granular activated carbon and biofiltration process[J]. *Journal of Environmental Science International*, 2014, 23(3): 379-386.
- [38] 李佳泽, 吴宝利, 刘富荣, 等. BAF 工艺深度处理四环素类制药废水研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(5): 24-31.
- [39] 唐佳, 陈茜, 覃牧川, 等. 4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 3204-3210.
- [40] 陆玉, 钟慧, 丑三涛, 等. 乙酸驯化对厌氧污泥微生物群落结构及发酵特性的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(5): 1835-1842.
- [41] XU L N, ZHANG B, PENG X W, et al. Dynamic variations of microbial community structure in myriophyllum aquaticum constructed wetlands in response to different NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentrations[J]. *Process Biochemistry*, 2020, 93: 55-62.
- [42] ZHANG M J, QIAO S, SHAO D H, et al. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal by combined anammox and denitrifying phosphorus removal process[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2018, 93(1): 94-104.
- [43] YANG X Y, HE Q, GUO F C, et al. Nanoplastics disturb nitrogen removal in constructed wetlands: Responses of microbes and macrophytes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(21): 14007-14016.
- [44] LI Y Q, ZHANG C M, YUAN Q Q, et al. New insight into the effect of microplastics on antibiotic resistance and bacterial community of biofilm[J]. *Chemosphere*, 2023, 335: 139151.
- [45] ALVAREZ A, SAEZ J M, COSTA J S D, et al. Actinobacteria: Current research and perspectives for bioremediation of pesticides and heavy metals[J]. *Chemosphere*, 2017, 166: 41-62.
- [46] 李静, 张宝刚, 刘青松, 等. 导电材料强化微生物直接种间电子传递产甲烷的研究进展[J]. 微生物学报, 2021, 61(6): 1507-1524.
- [47] HU Y Y, WANG X F, ZHANG S H, et al. Microbial response behavior to powdered activated carbon in high-solids anaerobic digestion of kitchen waste: Metabolism and functional prediction analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 337: 117756.
- [48] GUO B, ZHANG Y D, YU N, et al. Impacts of conductive materials on microbial community during syntrophic propionate oxidation for biomethane recovery[J]. *Water Environment Research*, 2021, 93(1): 84-93.
- [49] ZHAO Y, HUANG J, ZHAO H, et al. Microbial community and N removal of aerobic granular sludge at high COD and N loading rates[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 143: 439-446.
- [50] 谭丰佚, 刘新颖, 党岩, 等. 有机碳源对异养硝化-好氧反硝化生物脱氮的影响及其优化[J]. 环境工程学报, 2024, 18(4): 1183-1191.
- [51] XIONG W, WANG S J, JIN Y, et al. Insights into nitrogen and phosphorus metabolic mechanisms of algal-bacterial aerobic granular sludge via metagenomics: Performance, microbial community and functional genes[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 369: 128442.
- [52] HUANG C, LIU Q, LI Z L, et al. Relationship between functional bacteria in a denitrification desulfurization system under autotrophic, heterotrophic, and mixotrophic conditions[J]. *Water Research*, 2021, 188: 116526.
- [53] WANG J L, CHU L B. Biological nitrate removal from water and wastewater by solid-phase denitrification process[J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34(6): 1103-1112.
- [54] XIE C H, YOKOTA A. *Zoogloea oryzae* sp. nov., a nitrogen-fixing bacterium isolated from rice paddy soil, and reclassification of the strain ATCC 19623 as *Crabtreeella saccharophila* gen. nov., sp. nov.[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2006, 56: 619-624.
- [55] 李龙山, 倪细炉, 李昌晓, 等. 生活污水对土壤及湿地植物根际细菌群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2163-2170.
- [56] LIU X Y, LI R J, CHEN R, et al. Formation of filamentous fungal pellets in aerobic granular sludge via reducing temperature and dissolved oxygen: Characteristics of filamentous fungi and denitrification performance[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 332: 339.
- [57] HUANG X, DONG W Y, WANG H J, et al. Sludge alkaline fermentation enhanced anaerobic- multistage anaerobic/oxic (A-MAO) process to treat low C/N municipal wastewater: Nutrients removal and microbial metabolic characteristics[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 302: 122583.

(责任编辑: 曲娜)

## Treatment effect of digested piggery wastewater by biological aerated filter with different fillers and microbial community response

ZHANG Meng<sup>1</sup>, ZHANG Longzhen<sup>2</sup>, TAO Ran<sup>1,3,4,\*</sup>, LIAO Ruomei<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>1,3</sup>, TAI Yiping<sup>1,3</sup>, FU Muxing<sup>4</sup>

1. College of Life Science and Technology, Jinan University, Guang Zhou 510632, China; 2. Guangzhou Heyuan Ecological Technology Development Co. Ltd., Guang Zhou 510060, China; 3. Research Center of Hydrobiology, Jinan University, Guang Zhou 510632, China; 4. Xiamen Zhongren Hemei Biotechnology Co. Ltd., Xia Men 361000, China

\*Corresponding author, E-mail: [taoran@jnu.edu.cn](mailto:taoran@jnu.edu.cn)

**Abstract** In this study, three groups of three-stage and tandem biological aerated filters (BAFs) were constructed with ceramic, zeolites and gravels as fillers, respectively. Under the conditions with different C/N ratio in BAF influent, the treatment effects and differences of COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN, TP and antibiotic in digested piggery wastewater (DPW) were investigated. The 16S rRNA high-throughput sequencing was used to analyze the biofilms of BAFs. The results showed that the BAF with ceramic as filler had the best effect on removing pollutants, and the average removal rates of COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN, and TP in DPW were 93.77%~94.14%, 99.44%~99.89%, 64.63%~85.23%, and 92.68%~95.74%, respectively; and the average removal rates of SMZ2, OTC, TC, CFX, and OFX ranged from 94.72% to 97.07%, 94.85% to 95.27%, 83.17% to 92.05%, 47.62% to 65.02%, and 52.76% to 69.45%, respectively. After the C/N ratio in BAF influent increased, the treatment efficiency of TN by the three groups of BAFs increased significantly ( $P < 0.01$ ), and the removal rates of SMZ2, TC and CFX also increased ( $P < 0.05$ ), while the removal rates of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and TP increased insignificantly. According to the 16S rRNA sequence analysis, the relative abundance of *Proteobacteria* and *Bacteroidetes* was high in the bacteria on the biofilm of the three groups of BAF; *Thauera*, *Zoogloea*, *Flavobacterium* and *Arcobacter* were the dominant bacteria in the bacteria on the biofilm of the three groups of BAF, of which the genus of *Thauera*, being mainly the denitrifying bacteria, had the highest relative abundance of 36.27% in the ceramic group, leading to its good removal efficiency of pollutant. This study can provide a reference for the treatment of aquaculture wastewater using biofilter technology.

**Keywords** biological aerated filter (BAF); digested piggery wastewater (DPW); antibiotics; microbial communities