



# 模块化生物滤池-人工湿地对农村生活污水的处理

张恒熙<sup>1</sup>, 聂正鑫<sup>2</sup>, 刘燕青<sup>1</sup>, 杨珂<sup>1</sup>, 李先宁<sup>1,✉</sup>

1. 东南大学能源与环境学院, 南京 210096; 2. 江苏省环保产业技术研究院有限公司, 南京 210096

**摘要** 以常用的农村污水处理工艺“厌氧池+好氧生物滤池”为研究对象, 对好氧生物滤池进行模块化设计, 并与人工湿地相组合, 将滤池出水接入潜流人工湿地。通过运行参数的调控, 考察了工艺对 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP 的去除效果, 使其成为用于处理农村生活污水的新型组合处理装置。结果表明: 在好氧生物滤池回流比为 300%, 布水间歇为 2 min: 8 min 时, 组合工艺的出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、COD 和 TP 均满足《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB32/3462-2020) 一级 A 标准中水质要求。对滤池不同高度上的微生物组成进行了分析, 结果表明, 池内微生物种类丰富, 并以 *Proteobacteria*、*Firmicutes* 菌门为主。根据属水平上的微生物分析以及冗余性分析, 对氮的去除主要发生在滤池的中下部。**关键词** 农村生活污水; 模块化生物滤池; 生物脱氮; 微生物群落

农村生活污水具有污水来源多、水质波动较大、水量日夜变化较大、冬季水量小但是污染质量浓度高, 夏季水量大但是污染质量浓度低、管网收集难度大等特点<sup>[1-2]</sup>。我国农村地区人口、地形、气候环境、经济条件差异较大<sup>[3]</sup>, 不同农村地区处理需求也有所不同。当前农村生活污水处理设施很难在满足不同地区不同需求的条件下做到能耗低、建设运行费用低<sup>[4]</sup>。

生物膜工艺具有抗冲击负荷能力强、运行管理简单、处理效果好等优点, 较适用农村生活污水处理<sup>[5]</sup>。人工湿地系统具有建设成本较低、维护简便、效率高和美观等特点<sup>[6]</sup>。人工湿地工艺通过物理、化学和生物的协同作用, 能够高效处理污水, 在我国已得到广泛应用<sup>[7]</sup>。相较于目前已有的生物膜组合工艺处理农村生活污水, 如金秋等<sup>[8]</sup>使用脉冲双层生物滤池与人工湿地组合处理农村生活污水, 稳定运行期间对各污染物都有显著去除效果; 如苏功平等<sup>[9]</sup>使用复合生物滤池组合人工湿地处理农村生活污水, 去除污染物效果良好, 达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002) 一级 B 标准。本研究开发的模块化生物滤池是一种可自由拼装, 可灵活增加或减少多孔箱体的模块化生物滤池。具有以下优点: 1) 整套工艺可以现场安装, 施工简便, 拆卸容易; 2) 可根据不同的处理规模和处理要求灵活增加或减少箱体数量; 3) 自然溅水通风供氧, 无需曝气; 4) 整套装置运行只需一台水泵, 能耗及运行费用低。

因此, 本研究采用“生物+生态”处理技术, 在模块化生物滤池出水后衔接潜流人工湿地对污水深度净化, 实现生物和生态处理技术优势互补。对实际运行的污水处理装置进行研究, 探究了装置回流比及装置布水时间对污染物去除效果的影响, 并在最佳工况下长期运行监测组合工艺出水各污染物指标, 考察其污染物去除效果, 以为农村生活污水治理提供一种可行的方法。

## 1 实验装置与研究方法

### 1.1 实验装置及工艺流程

实验装置搭建于江苏省常州市某公司厂区内, 设计处理量 5 t·d<sup>-1</sup>。实验装置如图 1 所示。

脱氮池位于模块化生物滤池前段, 水力停留时间 HRT 为 14 h, 总容积为 3 m<sup>3</sup>, 采用 3 个容积为

收稿日期: 2023-10-31; 录用日期: 2024-01-17

基金项目: 农村生活污水精准化治理及信息化监管技术研究与科技示范 (BE2021619)(重点项目)

第一作者: 张恒熙 (1999—), 男, 硕士研究生, 648262737@qq.com; ✉通信作者: 李先宁 (1964—), 男, 博士, 教授, lxn@seu.edu.cn

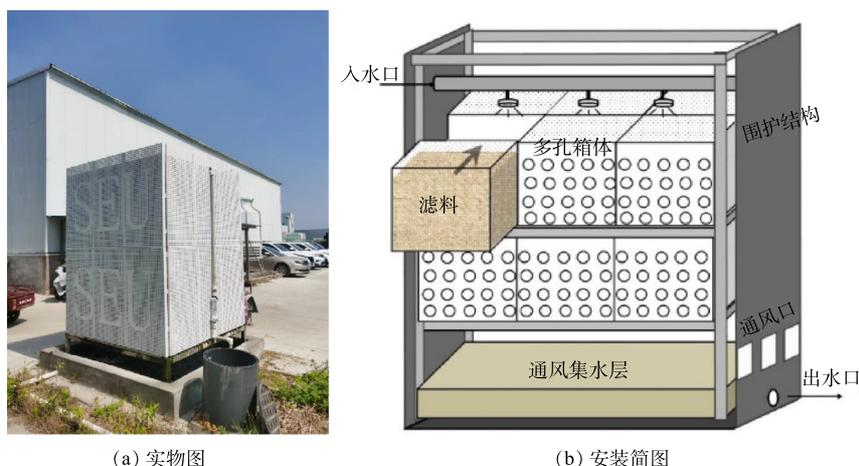


图1 模块化生物滤池实物图和安装简图

Fig. 1 Physical diagram and installation diagram of modular biofilter

1 m<sup>3</sup> 的小脱氮池串联而成，小脱氮池材质为聚丙烯。仓内填充悬浮球填料用以富集微生物，填料球直径为 80 mm。

模块化生物滤池主体如图 1 所示，整体尺寸 1.5 m×1.5 m×1.75 m。采用 63 个标准化多孔箱体叠层拼装构成 (3 个×3 个×7 个)，每个多孔箱体尺寸 0.5 m×0.5 m×0.25 m，采用聚丙烯。为保证过水通畅、供氧充足以及布水均匀，将多孔箱体的底部和四周打若干 10 mm 小孔。多孔箱体内使用粒径 10~15 mm 的陶粒作为滤料。在滤池顶部配有穿孔布水管，将污水从脱氮池均匀的分布在滤池上部，并且布水管上加配时间控制开关对布水时间进行调控。

潜流人工湿地规格长×宽×深=6.0 m×2.0 m×1.0 m，水力停留时间为 24 h，水力负荷 0.42 m<sup>3</sup>·(m<sup>2</sup>·d)<sup>-1</sup>。湿地内从上往下依次填充砾石、珍珠岩、陶粒等填料，并增设导流折板，保证水流在湿地内往复流动，增加与植物根系及填料的接触时间，选取脱除氮素和有机物能力强<sup>[10]</sup> 的花叶芦竹 (*Arundo donax var. versicolor*) 和可以越冬并且根系发达、耐污染物能力强<sup>[11]</sup> 的鸢尾科马蔺 (*Iris lactea* Pall.)、鸢尾 (*Iris tectorum* Maxim.) 等植物种在湿地表面，整体实验流程如图 2 所示。



图2 实验流程图

Fig. 2 Experimental flowchart

### 1.2 测定项目与方法

1) 水体物质测定。对滤池进出水水质进行化学需氧量 (COD)、氨氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 等指标的测定，其测定方法根据国家标准方法<sup>[12]</sup> 进行测试 (表 1)，溶解氧 (DO) 用便携式溶解氧测定仪

表 1 水质测定项目及方法

Table 1 Water quality measurement items and methods

测定项目	测定方法	测定仪器
DO	便携式溶解氧测定仪	JPB-607A, 上海雷磁
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ636-2012)	立式压力蒸汽灭菌锅, YXQ-LS-50S II, 上海博讯实业医疗设备厂
TP	钼酸铵分光光度法(GB11893-89)	HACH Company DR-6000
氨氮	纳氏试剂分光光度法(HJ535-2009)	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	紫外分光光度法(HJ/T346-2007)	HACH Company DR-6000
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	分光光度法(GB7493-87)	
COD	快速消解分光光度法(HJ/T 399-2007)	HACH Company DRB-200

测定。

为了探究模块化生物滤池-潜流式人工湿地组合工艺的运行最佳工况,使组合工艺出水满足国家标准《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(GB/T51347-2019)一级 A 标准。因此,在模块化生物滤池不同回流比、不同布水时间下分别进行 10 d 的实验,经过 10 d 运行,污染物去除率发生明显变化,每 2 d 检测 1 次进出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP。

2) 微生物学分析方法。从距滤池顶部 50、100、150 cm 处分别取出陶粒滤料,将陶粒上附着的生物膜刮下送样检测。使用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的提取质量,使用 NanoDrop2000 测定 DNA 质量浓度和纯度;使用 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCT AAT-3') 对 16S rRNA 基因 V3~V4 可变区进行 PCR 扩增,利用 Illumina 公司的 Miseq PE300/NovaSeq PE250 平台进行测序。本研究中的微生物群落多样性检测包括样品的 DNA 提取以及 PCR 扩增等过程均由上海美吉生物医药科技有限公司完成。

### 1.3 实验水质

实验原水取自厂内宿舍区生活污水,宿舍区常住人口约 15 户,因工人作息工作时间不规律,导致水质波动变化较大,且存在低碳氮比的问题。实验期间的进水水质如下,DO、PH、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 质量浓度分别为 0~2.31、6.83~7.92、37.55~401.14、17.16~95.48、22.57~104.83、1.15~5.39  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 模块化生物滤池对有机物的去除效果

不同回流比下 COD 的去除情况如图 3 所示。当回流比由 100% 增加到 300% 时,COD 去除率不断增加,由 36.12% 增加到 76.31%;而当回流比继续增加到 400% 时,模块化生物滤池对于有机物的去除效果并没有持续提升,平均去除率反而降低到 68.19%。模块化生物滤池对于有机物具有较为优异的去除效果,这可能是由于填料表面及内部生长着大量异养微生物,对有机物的降解发挥着至关重要的作用<sup>[13]</sup>。当回流比由 100% 增大到 300% 时,COD 的去除率不断增加,回流比的增大增加了污水在系统内的接触反应概率,提高了附着在填料上生物膜对有机物的利用率<sup>[13]</sup>;同时,在滤池之前的厌氧脱氮池中,反硝化细菌以回流液中的硝酸盐和亚硝酸盐为电子受体,利用水中的有机物作为碳源,进行反硝化作用<sup>[14]</sup>,回流比不断增大使得反硝化细菌可用的碳源量也增大,从而 COD 的去除率不断增加。当回流比由 300% 增大到 400% 时,生物滤池的水力负荷不断增大,污水的停留时间随着水力负荷增大而缩短,并且回流比过高,进入滤池的污水质量浓度被稀释过多,不利于生物膜中微生物生长,导致 COD 的去除率降低<sup>[15]</sup>。此外,生物膜表面的剪切力会随水力负荷增大而增大,滤料上的微生物无法适应高水力负荷环境,导致生物膜脱落过多<sup>[16]</sup>,不利于有机物的去除。

不同布水时间条件下 COD 的去除结果如图 4 所示。在回流比为 300%、布水时间与布水间歇的比值为 1:4 的情况下,当布水时间由 0.5 min 延长

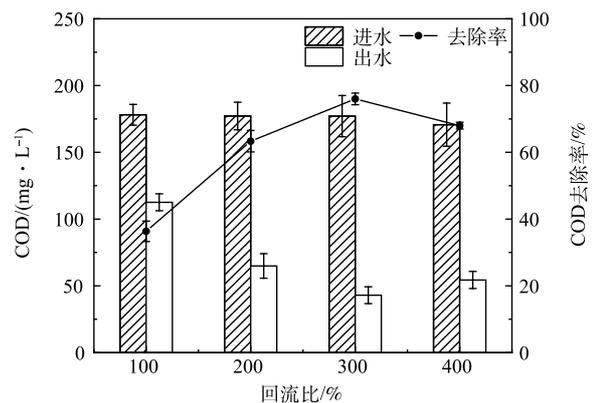


图 3 不同回流比下的进出水 COD 值及其去除率  
Fig. 3 Inlet and outlet COD and its removal rate at different reflux ratios

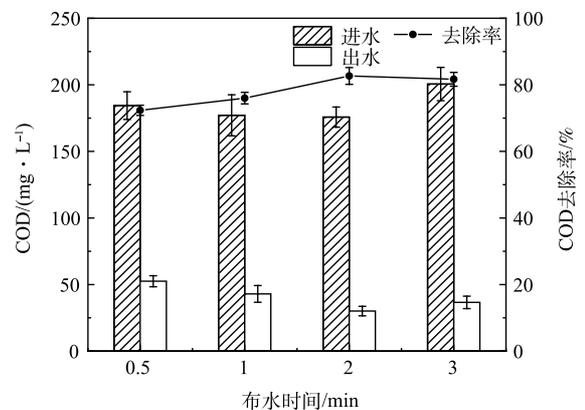


图 4 不同布水时间下的进出水 COD 值及其去除率  
Fig. 4 Inlet and outlet COD and its removal rate at different water distribution time

到 2 min 时, COD 去除率逐渐升高并趋于平稳, 平均出水值由  $52.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  降低到  $30.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 回流比固定, 滤池水力负荷恒定, 随着布水时间和布水间歇时间的延长, 单位时间内进入滤池的水量减少, 滤料上生物膜受到水流冲刷作用减弱, 微生物更容易附着生长<sup>[17]</sup>; 同时由于模块化生物滤池主体由多孔箱体堆叠组装而成, 层与层之间有良好的通风布水效果, 布水间歇的延长也有助于滤池内部的空气流通。如图 5 所示, 滤池出水溶解氧浓度随着布水间歇的延长不断提高<sup>[18]</sup>。这可能会使异养菌在更充足的溶解氧下降解有机物反应更加高效, COD 的去除效果得到提升。

因此, 当回流比为 300%, 布水时间与布水间歇比在 2 min:8 min 和 3 min:12 min 时, 模块化生物滤池对 COD 有较好的去除效果。COD 的平均值均符合《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》一级 A 排放限值要求 ( $\leq 60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。

## 2.2 模块化生物滤池对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

如图 6 所示,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率随着回流比的增加先升高后下降, 当回流比为 300% 时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率达到最大, 为 69%。其平均出水质量浓度为  $17.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在好氧生物滤池内硝化作用是氨氮减少的主要原因, 硝化细菌是严格好氧菌, 世代周期长, 增长速度慢, 并且在水中与碳化异养菌竞争 DO 和生存空间<sup>[19]</sup>。当回流比由 100% 提升到 300% 时, 滤池进水 C/N 比逐渐降低, 有机物负荷不断减小, 附着在滤料生物膜上的硝化菌种逐渐成为优势菌种, 使得硝化作用逐渐增强<sup>[20]</sup>, 这与微生物群落分析所得的具有硝化功能微生物的富集这一结果一致。当回流比由 300% 增加到 400% 时, 虽然较高的回流比会带来相对较高的溶解氧浓度, 有利于促进硝化反应(图 7)。但与此相对的是, 滤池的水力负荷不断提高, 并且污水在滤池内的停留时间逐渐减少, 可能会导致污水与生物膜接触时间不足, 硝化作用减弱。因此, 综合考虑, 回流比为 300% 时可以取得最大的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率。

在回流比为 300%、布水时间与布水间歇比为 1:4 的情况下,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在不同布水时间下的去除效果如图 8 所示。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除主要是依靠滤池填料上的生物膜中的硝化细菌和亚硝化细菌去除<sup>[21]</sup>。当布水时间在 0.5 min 时, 氨氮的出水平均质量浓度为  $17.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率仅有 62.67%。滤池内单位时间内的污染物负荷较大, 有机物负荷亦然, 此时生物膜上的异养细菌将会增殖从而抑制硝化细菌的增殖<sup>[22]</sup>; 并且类似于不同的布水时间对 COD 去除的影响, 过短的布水间歇会使滤池内部的充氧效果减弱, 直接抑制了硝化作用。当布水时间在 2 和 3 min 时, 氨

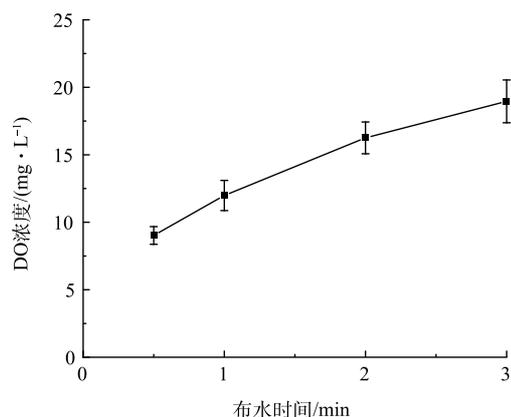


图 5 不同布水时间下的出水 DO 值

Fig. 5 Outlet DO at different water distribution time

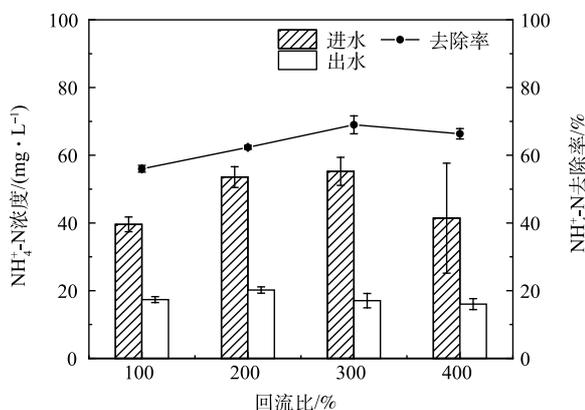


图 6 不同回流比下的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  进出水值及其去除率

Fig. 6 Inlet and outlet  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and its removal rate at different reflux ratios

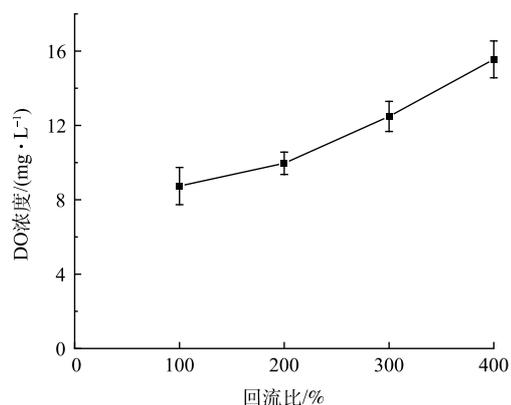


图 7 不同回流比下出水 DO 质量浓度

Fig. 7 Outlet DO at different reflux ratios

氮的出水平均质量浓度可以达到  $3.56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，去除率高达 92%。此时滤池进水的污染物负荷较低，有利于硝化细菌的增殖<sup>[23]</sup>；并且如上文所述，较长的布水间歇可能有助于滤池内充分充氧。较高质量浓度的溶解氧有利于硝化细菌和其他微生物对水中的污染物进行利用降解。有研究<sup>[24]</sup>表明，生物滤池中充分的溶解氧和良好的复氧效果有利于降解有机物和氨氮。当回流比 300%，布水时间在 2 min 和 3 min 时，模块化生物滤池对氨氮有较好的去除效果。出水氨氮的平均质量浓度均符合《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》一级 A 排放限值要求 ( $\leq 8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。

### 2.3 模块化生物滤池对 TN 的去除效果

在农村生活污水中，氨氮在总氮中的含量较高<sup>[25]</sup>，根据上述对于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除效果的研究，模块化生物滤池可对污水中的氨氮实现高效去除，但是在生物滤池的好氧环境中，反硝化作用较弱<sup>[26]</sup>，所以总氮的去除主要依靠生物滤池前置的厌氧脱氮池。

在模块化生物滤池回流比分别为 100%、200%、300%、400% 的条件下，装置对于 TN 的去除如图 9 所示。回流比由 100% 增大到 400% 时，TN 去除率呈现先增后降的趋势，最高可达 60.67%，此时的 TN 平均出水质量浓度为  $22.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。当回流比为 100% 时，回流至脱氮池的硝化液较少，导致脱氮池中反硝化作用缺少电子受体，反硝化作用不明显<sup>[27]</sup>；同时较少的回流液对进水氨氮的稀释效果较弱，有较高质量浓度的氨氮存在，因此，TN 去除率较低。随着回流比增大至 300%，根据上述研究结果，氨氮的去除率得到了一定的提升；并且回流到脱氮池中的硝化液增多，脱氮池中的反硝化细菌在缺氧条件下能够将更多的  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  被还原成氮气或一氧化二氮，部分微生物也可以通过同化作用将  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  合成细胞物质<sup>[28]</sup>，脱氮池部分的反硝化效果增强，因此，硝化效果和反硝化效果的增强使系统对 TN 的去除性能有所提升。如图 8 所示，随着回流比进一步增大至 400%，回流硝化液把较高质量浓度的溶解氧带入脱氮池。高质量浓度溶解氧回流水与缺氧污水混合后，破坏了脱氮池中的缺氧环境，抑制了反硝化反应的进行<sup>[29]</sup>，TN 的平均去除率下降。故回流比为 300% 时，模块化生物滤池系统的硝化能力和反硝化能力最佳，对 TN 有最佳去除效果。

在回流比固定为 300%、布水时间与布水间歇比固定为 1:4 的情况下，TN 在不同布水时间条件下的去除效果如图 10 所示。布水时间从 0.5 min 增大到 3 min 时，TN 去除率呈现先增后降的趋

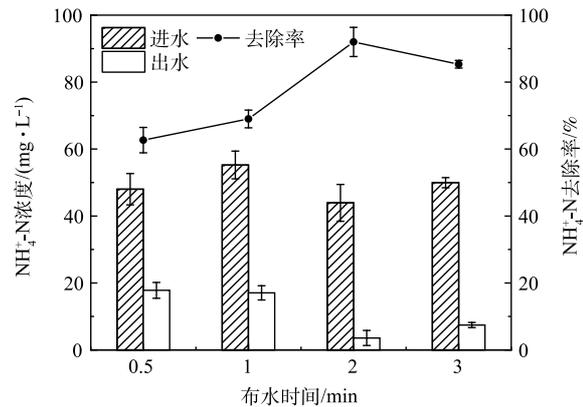


图 8 不同布水时间下的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  进出水值及其去除率

Fig. 8 Inlet and outlet  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and its removal rate at different water distribution time

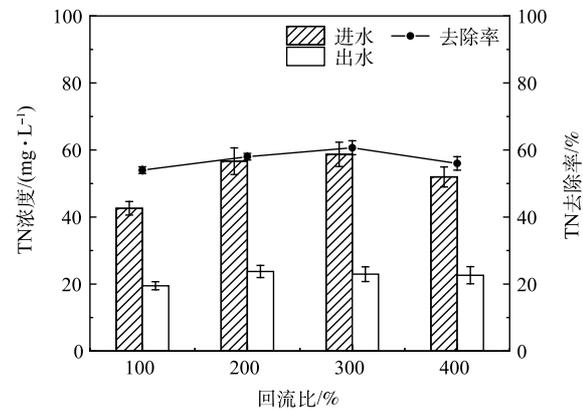


图 9 不同回流比下的 TN 进出水值及其去除率

Fig. 9 Inlet and outlet TN and its removal rate at different reflux ratios

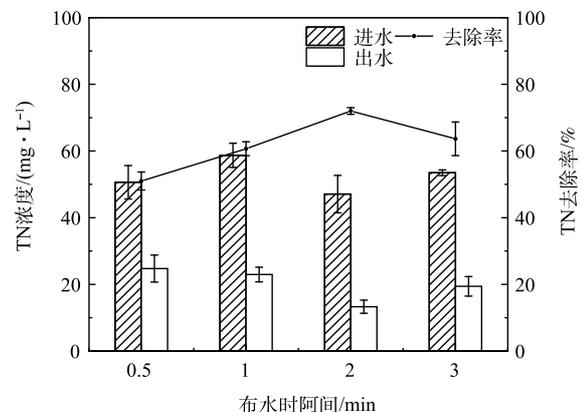


图 10 不同布水时间下的 TN 进出水值及其去除率

Fig. 10 Inlet and outlet TN and its removal rate at different water distribution time

势,最高可达72%,此时的TN平均出水质量浓度为 $13.29\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。当布水时间与布水间歇比在 $0.5\text{ min}:2\text{ min}$ 时,如前文所述,氨氮的降解效率低,从而导致总氮的去除效率也不理想。当布水时间逐渐延长,滤池内部充氧效果不断增强,氨氮的降解效率不断提高<sup>[30]</sup>,总氮的去除率也随之提升。但当间歇时间过长,布水时间由 $2\text{ min}$ 延长到 $3\text{ min}$ 时,由于生物滤池闲置时间过久,并在一直溅水通风的情况下,使生物滴滤池内部溶解氧质量浓度过高,回流水中含有较高质量浓度的溶解氧,而高质量浓度的溶解氧会对脱氮池中反硝化效果有一定的抑制作用。所以当布水时间与布水间歇比在 $2\text{ min}:8\text{ min}$ 时,模块化生物滤池对TN有最佳去除效果。

综上所述,当回流比300%,布水时间与布水间歇比在 $2\text{ min}:8\text{ min}$ 时,模块化生物滤池对TN有最佳去除效果。TN的平均出水质量浓度均符合《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》一级A排放限值要求( $\leq 20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。

#### 2.4 组合工艺对于污染物的去除效果

由图11(a)所示,组合工艺中COD的去除主要发生在模块化生物滤池中。在1个月的监测期间内平均水温 $22.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均进水COD值为 $156.08\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,模块化生物滤池平均出水COD值为 $37.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,去除率高达76.24%。同时人工湿地也对滤池出水进行深度净化,COD去除率可达38.54%,出水COD值 $22.78\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

在模块化生物滤池中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果也十分显著。实验期间内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均进水质量浓度为 $38.61\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,生物滤池平均出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度为 $2.54\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,去除率高达93.42%。符合《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》一级A排放限值要求( $\leq 8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )

组合工艺对于TN的去除如图11(b)所示。实验期间内TN平均进水质量浓度为 $41.99\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,模块化

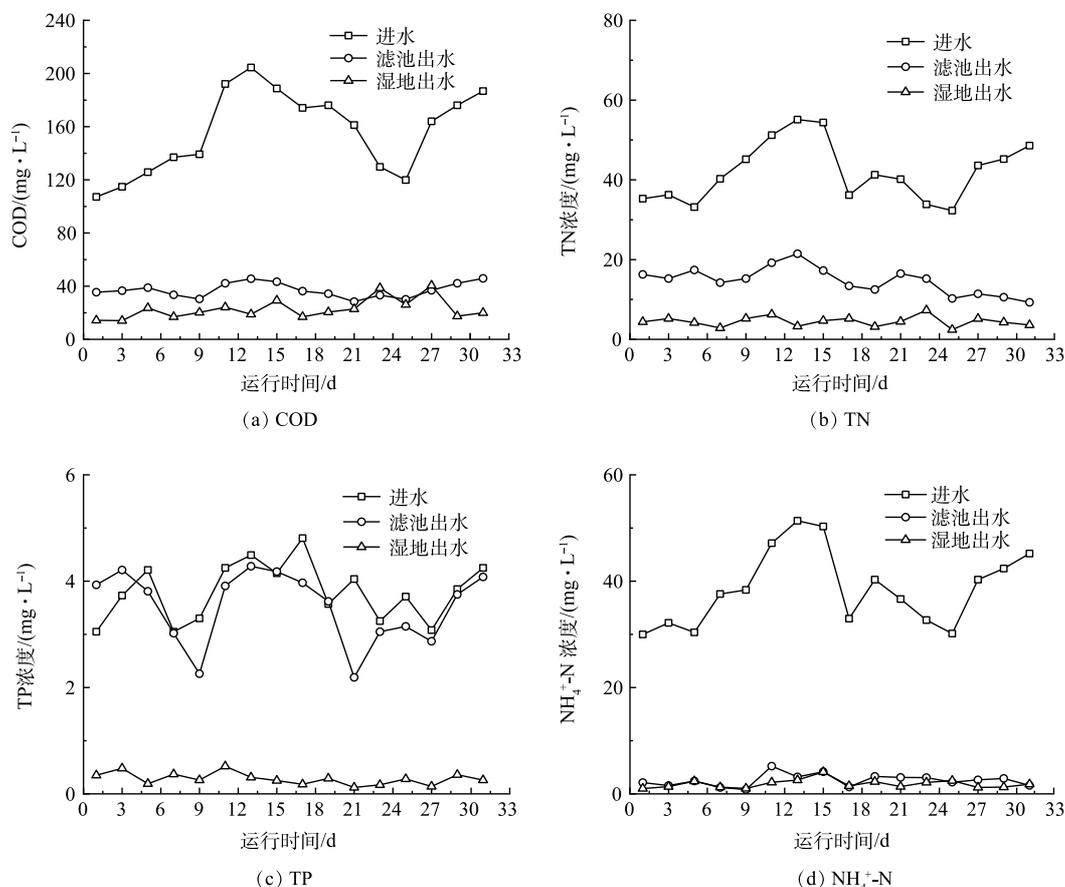


图11 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP在组合工艺中的进出水值

Fig. 11 Inlet and outlet COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN, and TP in the combined process

生物滤池平均出水 TN 质量浓度为  $14.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率 64.97%; 人工湿地平均出水 TN 质量浓度为  $4.48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率 69.54%; 组合工艺整体 TN 去除率为 89.33%, TN 的出水质量浓度均满足《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》一级 A 排放限值要求 ( $\leq 20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。潜流人工湿地主要通过植物根系及其附近区域交替形成的好氧、厌氧和缺氧区, 完成对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的硝化以及  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  的反硝化作用进行脱氮<sup>[31]</sup>, 以及植物根茎也可以对污水中的氮元素进行一定的吸收, 从而完成对 TN 的深度去除。

在组合工艺中, TP 主要依靠潜流人工湿地去除。人工湿地对磷的去除主要通过基质填料吸附和拦截, 还有一定的植物吸收以及微生物降解完成<sup>[32]</sup>。如图 11(c) 所示, 实验期间内 TP 平均进水质量浓度为  $3.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 模块化生物滤池出水 TP 质量浓度为  $3.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率仅为 9.74%。而潜流人工湿地 TP 出水平均质量浓度为  $0.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率高达 92.04%, 符合《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》一级 A 排放限值要求 ( $\leq 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )。

## 2.5 微生物群落结构分析

1) 微生物群落多样性分析。对模块化生物滤池不同高度的生物滤料进行取样分析, 距滤池顶部 50、100、150 cm 的样本记为  $D_{50}$ 、 $D_{100}$ 、 $D_{150}$ 。采集的 3 个样品进行高通量测序, 经过质量分析和序列筛选后获得有效序列, 对其进行去杂优化, 维恩图、序列信息及多样性指数如图 12 和表 2 所示。用维恩图可以比较直观的表现 3 个生物滤池样品的 OTU 数目组成相似性及重叠情况。2 个样本之间共有的 OTU 指数越大, 说明样本之间的微生物组成的相似度越大<sup>[33]</sup>。如图 12 所示, 样本  $D_{50}$ ( $D$  表示距滤池顶部的距离) 的 OTU 为 1749, 样本  $D_{100}$  的 OTU 为 1686, 样本  $D_{150}$  的 OTU 为 1796, 距滤池顶部不同高度下的生物膜样本共有的 OTU 指数大于各自特有的 OTU 指数, 这说明滤池内部整体微生物群落组成大致相同。

Alpha 多样性是分析单独每个样本中的物种多样性, 主要包括了微生物丰富度和群落多样性。Ace 和 Chao1 指数可反应群落分布丰富度, 其值越大群落丰富度越高<sup>[34]</sup>。如表 2 可知, 从滤池顶端向下, Ace 和 Chao1 指数逐渐减小。在距离滤池顶端 50 cm 处, Ace、Chao1 分别为 2 056.50 和 2 031.94, 高于 100 cm 处的 2 029.34 和 1 993.73, 而在 150 cm 处这 2 个指数最低, 分别为 2 018.49 和 1 967.52。Shannon 和 Simpson 指数可反应微生物群落多样性<sup>[34]</sup>, 从滤池顶部向下, Shannon 指数和 Simpson 指数从 50 cm 处的 4.23 和 0.04 变化到 100 cm 处的 3.23 和 0.11, 在 150 cm 处为 3.13 和 0.09。这些指数的变化都表明从滤池顶部沿程向下, 微生物的丰富度和群落多样性都逐渐降低, 但是变化幅度并不大<sup>[35]</sup>。这可能是由于滤池顶部进水时, 各种污染物质量浓度都偏高, 各类微生物可以利用污水中不同的有机营养物质进行生长繁殖。随着污染物在滤池当中不断被降解, 滤池中下层的微生物生长繁殖所依赖的有机营养物质质量浓度降低, 所以微生物生长受到了一定的抑制, 从而微生物的丰富度和群落多样性都逐渐降低。

2) 门水平上微生物群落组成分析。模块化生物滤池沿程距离滤池顶部不同高度下在门水平上的组成和丰度如图 13 所示。在距滤池顶部 150、100、50 cm 处滤料上的优势门分别是变形菌门 (*Proteobacteria*) (35.38%、51.90% 和 41.96%)、厚壁菌门 (*Firmicutes*) (24.81%、16.01% 和 13.08%)、拟杆菌门 (*Bacteroidota*) (7.84%、6.18% 和 5.53%)、绿弯菌门 (*Chloroflexi*) (9.07%、6.08% 和 16.97%)。

沿程不同高度微生物群落中的优势门都是变形菌门, 这与大多数生物滤池处理农村生活污水当中的群落分析结果一致<sup>[36]</sup>, 也与上述对于模块化生物滤池处理氨氮的分析效果一致。变形菌门中有很多固氮的细

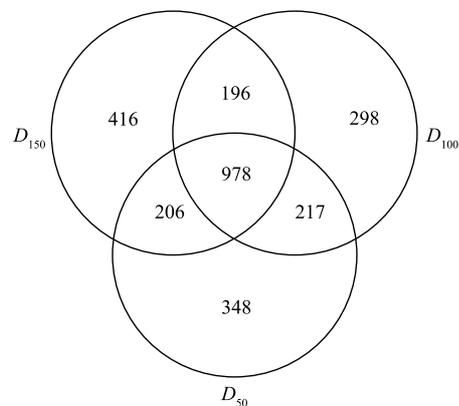


图 12 不同高度下微生物 OTU 维恩图

Fig. 12 Microbial OTU Venn diagram at different heights

表 2 微生物多样性及丰富度指数统计

Table 2 Microbial diversity and the statistics of abundance index

样本名称	OTU	Ace	Chao1	Shannon	Simpson
$D_{50}$	1 749	2 056.50	2 031.94	4.23	0.04
$D_{100}$	1 686	2 029.34	1 993.73	3.23	0.11
$D_{150}$	1 796	2 018.49	1 967.52	3.13	0.09

菌，在降解有机物的同时对氨氮有一定程度的去除<sup>[37]</sup>，所以其分布和污水中氨氮质量浓度有关。硝化细菌部分属于拟杆菌门，在滤池中主要负责氨氮的去除<sup>[38]</sup>。除了变形菌门之外，占比最多的门是厚壁菌门，厚壁菌门在系统中的功能主要是将有机物降解为甲酸、乳酸、丁酸等，并且也参与一定的硝化作用<sup>[39]</sup>。以上3种菌门在分布上均呈现上层较少，中下层较多的情况，说明在有机物和氨氮质量浓度较高的滤池上部，硝化细菌增殖受到抑制<sup>[28]</sup>，因此，具备硝化能力的细菌菌门在滤池上部分布较少，随着水中有机物沿程被降解，在滤池中下部硝化细菌处于优势，各类具有氨氧化能力和硝化能力的菌门在滤池中多分布于中下部，所以大部分氨氮在滤池的中下部被氧化去除。硝化细菌部分也属于绿弯菌门<sup>[40]</sup>，但绿弯菌门分布呈现中上部分多，中下部分少的趋势。这可能是由于在模块化生物滤池中，池体下部充氧效果强于上部，高质量浓度的溶解氧可能会抑制绿弯菌门当中的部分厌氧细菌的生长<sup>[41]</sup>。尽管如此，在滤池中绿弯菌门整体占比相对较高，而绿弯菌门细菌的反硝化作用较强<sup>[42]</sup>，也可以在一定程度上表明模块化生物滤池的硝化作用强。

3) 属水平上微生物群落组成分析。在距滤池顶部150、100、50 cm处滤料上的优势属水平微生物分布情况如图14所示。在150 cm处，不动杆菌(*Acinetobacter*)的相对丰度相比于50 cm和100 cm处分别提高了18.85%和11.56%，不动杆菌作为典型的异养硝化菌属，可以在较高溶解氧的条件下有效降低水中的COD、TN、氨氮<sup>[43]</sup>。在100 cm处的优势菌属为黄杆菌属(*Flavobacterium*)、食酸菌属(*Acidovorax*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)和动胶杆菌属(*Zoogloea*)。黄杆菌属在距离滤池顶端100 cm处的相对丰度分别是50 cm和150 cm处的2.75倍和5.11倍，黄杆菌属是活性污泥工艺中的优势菌属，可以参与水处理反应器当中的脱氮过程，完成对氨氮的硝化反应，且该菌属与其他菌属有一定的互补能力，保证系统的稳定性<sup>[44-45]</sup>。假单胞菌属在距离滤池顶端100 cm处的相对丰度分别比50 cm和150 cm处高18.01%和16.03%。假单胞菌属是异养硝化-好氧反硝化菌属，有研究表明，其不仅能够实现对氨氮的硝化，也能还原 $\text{NO}_2^-$ 为 $\text{N}_2$ <sup>[46]</sup>。食酸菌属在100 cm处的相对丰度分别是50 cm和150 cm处的3.10倍和3.00倍，食酸菌属作为氨氧化菌属，可以同时进行硝化和反硝化，也可以产生胞外聚合物EPS<sup>[47]</sup>。生物膜中EPS有利于细胞膜的稳定，利于微生物不同环境下生存，可以促进微生物聚集以及吸附一定颗粒态物质，有利于富集周围菌种降解污染物<sup>[48-49]</sup>，并且动胶杆菌属、黄杆菌属也可以产生一定的EPS<sup>[50]</sup>。各类硝化菌以及一些可以产生EPS的菌属集中于模块化生物滤池中下部，进一步说明在模块化生物滤池中下部硝化菌属更加集中，完成对大部分氨氮、COD的去除。

采用冗余性分析对属水平上微生物相对丰度受水质指标的影响进行了分析。细菌中选取了上文分析过的5种优势菌属；水质参数包括COD和氨氮含量。结果见图15。4种菌属(*Acinetobacter*、*Pseudomonas*、*Zoogloea*和*Flavobacterium*)与水中COD和氨氮含量呈显著负相关，也进一步说明这4种菌属可以在消耗有机物的情况下对水中氨氮进行降解<sup>[51]</sup>。并且由图15中可以看出，5种菌属相对丰度均在100 cm和150 cm处较高。这也说明在模块化生物滤池中下部硝化细菌为优势菌属，主要在滤池下半部分完成对氨氮和COD的降解。

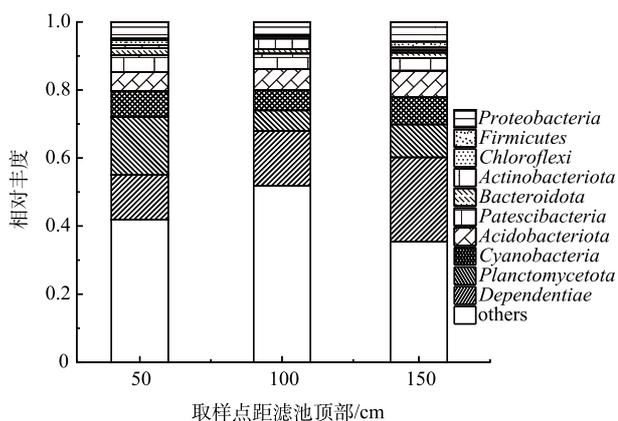


图13 门水平上的微生物相对丰度变化

Fig. 13 Relative abundance of microorganisms at phylum

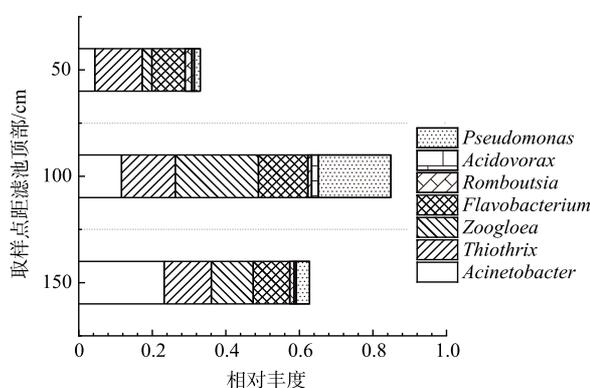


图14 属水平上的微生物相对丰度变化

Fig. 14 Relative abundance of microorganisms at genus level

总的来说,在模块化生物滤池当中变形菌门物种丰度明显高于其他菌门,如上文所述,变形菌门在降解有机物的同时大量去除水中的氨氮。属水平上的诸多优势菌属如黄杆菌属在缺氧条件下可以进行无氧呼吸,除氮的同时吸收有机物<sup>[52]</sup>;如不动杆菌属可以在好氧情况下有效降低水中的有机物和氨氮等。这些微生物群落分析表明模块化生物滤池当中存在较为完整的硝化-反硝化脱氮微生物体系,且富集于生物滤池中下部。这些优势微生物的存在,使得滤池中生物膜结构稳固,并具有良好的抗冲击负荷能力。

### 3 结论

1) 模块化生物滤池采用自然通风供氧的生物过滤技术,无需曝气,全部动力设备只有一台水泵,主体采用可拼装嵌入箱体叠加而成,运行成本低。整套工艺可以现场安装,施工简便,拆卸容易,适合农村地区使用。并且可根据不同的处理规模和处理要求自由增加或减少箱体数量,满足不同地区的处理需求。

2) 模块化生物滤池在回流比 300%、布水 2 min、布水间歇 8 min 时取得最佳处理效果。

3) 模块化生物滤池-潜流人工湿地组合系统对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 的平均去除率分别为 85.4%、95.16%、89.33%、92.63%,平均出水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 的质量浓度为 22.78、1.87、4.48、0.28  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,均达到《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB32/3462-2020)一级 A 标准。

4) 从滤池顶部沿程向下,微生物群落多样性逐渐降低,*Proteobacteria*、*Firmicutes* 菌门主要分布在滤池中下部分,属水平上微生物群落分析和冗余性分析进一步证实模块化生物滤池中下部硝化细菌更加集中,完成对大部分氨氮、COD 的去除。

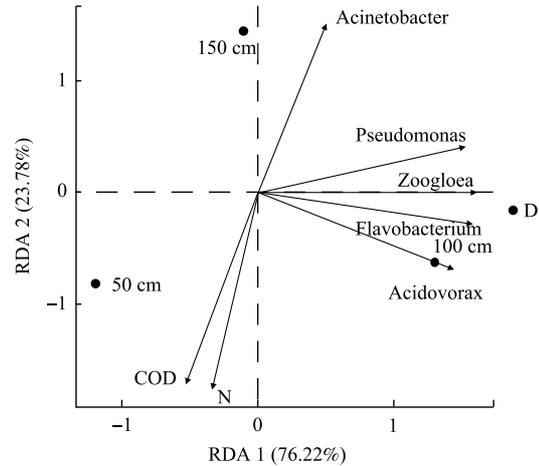


图 15 属水平微生物相对丰度与水质指标间的冗余性分析

Fig. 15 Redundancy analysis diagram between relative abundance of microorganisms at genus level and water quality indicators

### 参考文献

- [1] 袁鹰,程勋.农村生活污水治理现状与技术研究综述[J].安徽化工,2023,49(1):35-38.
- [2] 缪静,姬超,高琳琳,等.我国农村居民生活污水量总变化系数的估算及其意义[J].环境工程学报,2020,14(9):2326-2330.
- [3] 张阿娜.农村生活污水治理现状及对策分析[J].资源节约与环保,2021(5):90-91.
- [4] 孔德,张晓岚.农村污水处理运行模式的国际经验及对我国的启示[J].环境保护,2019,47(19):61-64.
- [5] 李响婷,石玉敏,王俭.农村生活污水一体化处理技术研究进展[J].环境工程技术学报,2021,11(3):499-506.
- [6] 成先雄,严群.农村生活污水土地处理技术[J].四川环境,2005,24(2):39-43.
- [7] 陈尧,胡润夏,倪金雷,等.厌氧-人工湿地组合工艺在农村生活污水应用研究[J].中国新技术新产品,2023(8):130-133.
- [8] 金秋,黄涛,李先宁,等.脉冲双层生物滤池与人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J].环境科技,2016,29(2):21-24.
- [9] 苏功平,张小凤,陈文清.复合生物滤池+潜流人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J].环境工程学报,2016,10(2):775-780.
- [10] 谢龙,汪德耀.花叶芦竹水平潜流人工湿地脱氮性能研究[J].环境工程学报,2009,3(10):1759-1762.
- [11] 巫小云,谢翼飞,李旭东,等.人工湿地处理川西北散户农村生活污水的应用研究[J].四川环境,2023,42(5):31-38.
- [12] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第四版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [13] 亢瑜.改良型 ABR-生物滴滤池一体化系统处理分散式农村生活污水[D].兰州:兰州交通大学,2020.
- [14] 蒋彬,吕锡武.生物脱氮除磷机理及技术进展[J].安全与环境工程,2005(3):74-77.
- [15] 刘文潇.改进生物滤池处理农村生活污水实验研究[D].石家庄:河北农业大学,2019.
- [16] 张国珍,亢瑜,武福平,等.一体化 ABR-生物滴滤池系统处理农村生活污水[J].水处理技术,2020,46(11):108-112.
- [17] 陈一辉,伍培,张勤,等.塔式生物滤池研究现状及应用前景分析[J].科学咨询(科技管理),2010(6):67-68+79.
- [18] 吴磊,吕锡武,吴浩汀,等.水解/脉冲滴滤池/人工湿地工艺处理农村生活污水[J].东南大学学报(自然科学版),2007(5):878-882.
- [19] 李洋.磁絮凝分离-生物滴滤池组合工艺处理小城镇污水研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [20] 殷峻,徐恒娟.生物膜内自养硝化菌与异养菌竞争关系的研究进展[J].科技通报,2013,29(5):181-185.
- [21] 徐亚明,蒋彬.曝气生物滤池的原理及工艺[J].工业水处理,2002,22(6):1-5.
- [22] 李世忠.废水生物脱氮技术的发展现状及展望[J].节能,2019,38(6):117-8.
- [23] 刘学红.水解-脉冲活性生物滤池处理农村生活污水技术研究[D].南京:东南大学,2006.
- [24] 刘世杰,赵凯杰,李宏群.农村生活污水处理的脉冲生物滤池工艺改良与调试[J].净水技术,2023,42(2):93-102.
- [25] 孙瑞敏.我国农村生活污水排水现状分析[J].能源与环境,2010,102(5):33-34.
- [26] 王建龙.生物脱氮新工艺及其技术原理[J].中国给水排水,2000,16(2):25-28.

- [27] 潘碌亭, 谢玖珏, 王九成, 等. 脱氮除磷生物滤池填料制备及其对农村生活污水的处理效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 230-236.
- [28] 王白杨. 废水生物处理脱氮原理与新工艺[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2006(4): 399-403.
- [29] 黄涛. 脉冲双层滤料生物滤池与人工湿地组合工艺处理农村生活污水应用技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
- [30] 李先宁, 李孝安, 蒋彬, 等. 溅水充氧生物滤池处理农村生活污水的优化研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(23): 15-18.
- [31] 潘福霞, 来晓双, 王树志, 等. 曝气条件下进水 C/N 对水平潜流型人工湿地脱氮效果和氮转化功能微生物丰度的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1386-1394.
- [32] 曾馨蓉, 赵茜茜, 颜海宁, 等. 人工湿地脱氮除磷机理及其影响因素研究综述[J]. 云南化工, 2022, 49(7): 6-8.
- [33] 陈月芳, 冯惠敏, 张宇琪, 等. 4 级串联式斜板生物滤池对农村生活污水的处理[J]. 环境工程学报, 2021, 15(1): 193-202.
- [34] 李理, 陈才, 金泽坤, 等. 生物滴滤池的微生物多样性分析及 VOC 降解菌的筛选[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(11): 57-68.
- [35] 付少彬, 黄瑞敏, 俞舒迈. 曝气生物滤池沿程脱氮性能及其微生物特性研究[J]. 工业水处理, 2014(11): 51-54.
- [36] LIU J, LU Z, ZHANG J, et al. Phylogenetic characterization of microbial communities in a full-scale vermifilter treating rural domestic sewage[J]. Ecological Engineering 2013, 61, 100-109.
- [37] 邢金良, 张岩, 陈昌明, 等. CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1342-1349.
- [38] 蓝江林, 王洁, 刘波. 异养硝化细菌的研究与应用[J]. 福建农业学报, 2014(8): 815-819.
- [39] CHO S L, NAM S W, YOON J H, et al. *Lactococcus chungangensis* sp. nov., a lactic acid bacterium isolated from activated sludge foam [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2008, 58, 1844-1849.
- [40] DAIMS H, LUECKER S, WAGNER M. A New perspective on microbes formerly known as nitrite-oxidizing bacteria[J]. Trends in Microbiology 2016, 24 (9), 699-712.
- [41] HIDALGO K J, SAITO T, SILVA R S, et al. Microbiome taxonomic and functional profiles of two domestic sewage treatment systems[J]. Biodegradation 2021, 32 (1), 17-36.
- [42] SOROKIN D Y, LÜCKER S, VEJMEJKOVA D, et al. Nitrification expanded: Discovery, physiology and genomics of a nitrite oxidizing bacterium from the Phylum chloroflexi[J]. The ISME Journal, 2012, 6(12): 2245-2256.
- [43] CHEN S, HE S, WU C, DU D. Characteristics of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification bacterium *Acinetobacter* sp. T1 and its application for pig farm wastewater treatment[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering 2019, 127 (2), 201-205.
- [44] ZOU S, YAO S, NI J. High-efficient nitrogen removal by coupling enriched autotrophic nitrification and aerobic-denitrification consortiums at cold temperature[J]. Bioresource Technology 2014, 161, 288-296.
- [45] 王海蓉, 曾庆鹏, 王雯婧, 等. 异养异养硝化菌硝化特征与人工强化互补性研究[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(5): 9-13.
- [46] ZHANG M, LI A, YAO Q, et al. Nitrogen removal characteristics of a versatile heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacterium, *Pseudomonas bauzanensis* DN13-1, isolated from deep-sea sediment[J]. Bioresource Technology 2020, 305, 122626.
- [47] GUO X, MIAO Y, WU B, et al. Correlation between microbial community structure and biofouling as determined by analysis of microbial community dynamics[J]. Bioresource Technology 2015, 197, 99-105.
- [48] 宋成康, 王亚宜, 韩海成, 等. 温度降低对厌氧氨氧化脱氮效能及污泥胞外聚合物的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 2006-2013.
- [49] 杨敏, 胡学伟, 宁平, 等. 废水生物处理中胞外聚合物 (EPS) 的研究进展[J]. 工业水处理, 2011, 31(7): 7-12.
- [50] WU H, ZHANG Q, CHEN X, et al. The influence mechanism of DO on the microbial community and carbon source metabolism in two solid carbon source systems[J]. Environmental Research 2022, 206, 112410.
- [51] 窦娜莎. 曝气生物滤池处理城市污水的效能与微生物特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [52] 胡高宇, 张翔, 陈琛, 等. 海水养殖尾水处理系统中微生物群落对水处理阶段的响应[J]. 水生生物学报, 2021, 45(1): 161-171.

(责任编辑: 曲娜)

## Treatment of rural domestic wastewater by modular biological filter and constructed wetland

ZHANG Hengxi<sup>1</sup>, NIE Zhengxin<sup>2</sup>, LIU Yanqing<sup>1</sup>, YANG Ke<sup>1</sup>, LI Xianning<sup>1,\*</sup>

1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Environmental Protection Industry Technology Research Institute Co.Ltd., Nanjing 210096, China

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

**Abstract** The commonly used rural sewage treatment process of Anaerobic Tank+Aerobic Biological Filter was taken as the research object, the aerobic biological filter was designed modularly and combined with constructed wetlands. The filter effluent flowed into the subsurface flow constructed wetland. The removal effect of COD<sub>Cr</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN and TP was investigated through the operation parameters regulation, which made it a new combined treatment device for rural domestic sewage. The experimental results show that when the reflux ratio of aerobic biofilter was 300% and the interval of water distribution was 2 min: 8 min, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TN, COD and TP in the effluent of the combined process met the water quality requirements in the first-class A standard of Discharge Standard of Water Pollutants for Rural Domestic Sewage Treatment Facilities (DB32/3462-2020). Microbial community analysis at different heights from the top of filter bed reveals a diverse microbial composition within the filter, which was primarily dominated by the *Proteobacteria* and *Firmicutes* phyla. Microbial analysis and redundancy analysis at the genus level suggests that nitrogen removal primarily occurred in middle and lower part of the filter bed.

**Keywords** rural domestic sewage; modular biofilter; biological nitrogen removal; microbial community