



文章栏目：环境生物技术

DOI 10.12030/j.cjee.202108139 中图分类号 X703.1 文献标识码 A

孙文卓, 樊桢汇, 齐鲁, 等. 矿物棉填料孔隙率对生物滴滤池水处理效果的影响[J]. 环境工程学报, 2022, 16(1): 292-300. [SUN Wenzhuo, FAN Zhenhui, QI Lu, et al. Effect of the porosity of mineral wool on the performance of biotrickling filter[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(1): 292-300.]

矿物棉填料孔隙率对生物滴滤池水处理效果的影响

孙文卓, 樊桢汇, 齐鲁[✉], 邵宇婷, 刘国华, 王洪臣

中国人民大学环境学院低碳水环境技术研究中心, 北京 100872

摘 要 针对生物滴滤池因接触时间短而导致出水不达标的问题, 采用 3 种容重 (80、100、120 kg·m⁻³) 的矿物棉作为滤池填料, 考察了填料孔隙率对保水性的影响, 分析了不同容重填料的生物滴滤池去除污染物的效能, 探究了填料孔隙率对微生物群落特征的影响。结果表明, 矿物棉载体的吸水、保水性能随其孔隙率增加呈现先增加后减小的趋势; 孔隙率较小的矿物棉载体在稳定运行后对 COD、NH₄⁺-N 有更好的去除效果, 平均去除率分别可达 99% 和 72%, 且具有一定的抗冲击负荷能力。高通量测序结果显示, 随着矿物棉载体孔隙率的减小, 微生物群落物种丰富度增加, 而其多样性减少。比较而言, 当容重为 100 kg·m⁻³ 时, 矿物棉的吸、保水性高, 微生物种群结构适宜, 出水水质可达一级 A 标准, 且具有一定的抗冲击负荷能力。

关键词 多孔填料; 孔隙率; 生物滴滤池; 运行效能; 微生物群落

生物滴滤池是利用生物膜的过滤、絮凝及生物氧化作用去除污染物的一种污水处理工艺^[1]。与其他二级废水处理系统相比, 生物滴滤池具有占地小、耐冲击负荷能力强、运行简单、易于维护且所需动力消耗较低等优点^[2-3], 故十分适宜用于农村地区的生活污水处理。有调查显示, 生物滴滤池的运行维护费用可比活性污泥系统低 30%^[4], 但因其存在顶部滤料易堵塞、处理负荷较低、易招蚊虫等缺点, 其实际应用受到一定限制^[5]。

填料作为生物滴滤池的关键组成部分, 不仅为微生物提供栖息繁殖的场所, 还起到截留悬浮物的作用^[6], 故直接影响滴滤池的运行效能和技术经济可行性。常规生物滴滤池填料可分为如陶粒、页岩、火山岩、焦炭等的无机填料与包括聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等在内的有机高分子填料^[7-8]。有研究^[9]表明, 微生物在填料表面的附着与固定受填料特性、微生物特性和环境条件等影响。对于滴滤池而言, 良好的填料应具有比表面积大、高孔隙率和高保水性等性质^[10-11]。其中, 较大的比表面积有助于微生物群落的生长和传质, 高孔隙率可以缓解高压降。同时, 由于微生物需要足够的水分来维持其代谢活性, 故填料的含保水性对生物滴滤池的性能也有着重要的影响^[12]。

目前, 影响生物滴滤池效能提升的一大问题在于填料与污染物接触时间较短, 填料无法充分发挥去除污染物的效能。现有研究大多集中于优化系统工艺流程、运行参数、提升填料挂膜性能

收稿日期: 2021-08-23; 录用日期: 2021-11-29

第一作者: 孙文卓 (1997 —), 女, 硕士研究生, sunwenzhuo@ruc.edu.cn; [✉]通信作者: 齐鲁 (1982 —), 男, 副教授, qilu@ruc.edu.cn

等，对于填料性质对接触时间的影响则研究较少。事实上，载体内适当的孔隙不仅可以为生物膜附着和生长提供足够的空间，而且可促进系统内的物质扩散和氧传递^[13]。SHAERRFDEEN 等^[14]认为，填料孔隙大小及分布决定了生物膜生长速率、污染物扩散速率、液体分布平均程度、滤池压降大小等功能。胡小兵等^[15]就载体孔径对于废水处理效果的影响进行了研究，发现在挂膜增殖前中期小孔径载体拥有更为优异的废水处理效果。

矿物棉是以硅酸盐类物质为原料，高温熔融后经喷吹制备而成的纤维棉状制品^[16]，这种多孔的纤维结构使得矿物棉拥有极强的吸水、保水潜力。同时，由于机械强度较高，其吸收水分之后仍旧可以保持原有形状^[17]，从而为微生物提供了有效附着点。已有研究表明，矿物棉容重越大时，其保水能力越强^[18]，但此时其内部空隙率随之降低，微生物的附着空间亦随之减少^[19]。可见，填料的容重过大或过小均不利于提高生物滴滤池的运行效果。因此，本研究以 3 种不同容重的矿物棉作为研究对象，考察了填料孔隙率对保水性的影响，分析了不同容重填料的生物滴滤池去除污染物的效能，探究了填料孔隙率对微生物群落特征的影响，以期为提升生物滴滤池的实际应用处理效能提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验载体

实验载体为自制的 3 种容重 (80、100、120 kg·m⁻³) 矿物棉，切割成约 20 mm×20 mm×20 mm 的立方体小块并分别记为小容重矿物棉载体 K₁(80 kg·m⁻³)、中容重矿物棉载体 K₂(100 kg·m⁻³)、大容重矿物棉载体 K₃(120 kg·m⁻³)，用蒸馏水清洗浮渣后，烘干待用。

1.2 实验装置及运行参数

实验装置如图 1 所示。主要包括滴滤池、调节池和出水池 3 部分。其中，滴滤池主体规格为 200 mm×200 mm×800 mm，填料填充高度为 600 mm，下设调节池有效容积为 14 L、出水池有效容积为 4 L。水力负荷为 1 m³·(m²·d)⁻¹。挂膜阶段采用连续布水方式自然挂膜，实验运行过程中则调整为向调节池连续进水，向滴滤池间歇布水。每 15 min 布水 5 min，1 个运行周期内布水量与进水量之比为 5:1。实验用水来自中国人民大学总排水口所排的生活污水，进入滤池前取样，所得水质指标如表 1 所示。

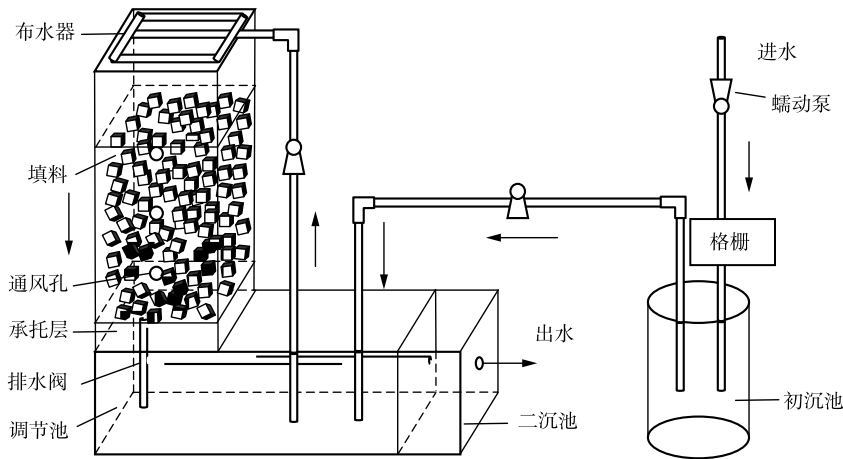


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Diagram of pilot-scale plant and reactors

表1 进水水质

Table 1 Characteristics of influent wastewater

检测值	COD/(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	水温/℃
范围	85~230	25~50	59~75	2~4	12~16
均值	141.71	41.63	67.73	3.09	13.74

1.3 分析方法

1) 材料及生物膜表征。比表面积由比表面积测试仪 (Autosorb-iQ, 美国) 测定; 孔隙率为材料内部孔隙体积占其总体积的百分率, 由压汞仪 (AutoPore V 9600, 美国) 测定; 接触角由接触角测量仪 (DCAT21, 德国) 测定; 以体积吸水率表征载体的吸水性, 以体积吸水率随时间变化趋势表征矿物棉的保水性, 体积吸水率根据文献中方法测定^[20]; 将未挂膜的矿物棉载体进行纯水浸泡、烘干, 并对挂膜后的矿物棉载体进行冻干处理后, 使用扫描电镜 (SEM, JSM-6700F, 日本) 观察生物膜微观结构与形貌特征。

2) 水质分析。本研究测试的水质指标为 COD、NH₄⁺-N、TN 等, 均按照《水和废水监测分析方法 (第4版)》中的标准方法进行分析。其中, COD 采用快速消解法测定; NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法测定; TN 采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定; NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法测定。

3) 微生物群落特征分析。本研究微生物群落特征分析采用高通量测序。系统运行稳定后, 分别取滤池上中下3部分的填料, 超声离心后获得生物膜样品。测序具体步骤为: 采用 CTAB 法提取 DNA, 之后利用琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的纯度和浓度, 并使用无菌水将样本稀释至 1 ng·L⁻¹ 使用通用引物 515F(GTGYCAGCMGCCGCGGTA) 和 806R(GGACTACHVGGGTWTCTAAT)^[21] 对 16SrDNA 进行 PCR 扩增。PCR 产物的电泳检测使用 2% 的琼脂糖凝胶, 产物用 qiagen 公司提供的胶回收试剂盒回收, 之后使用 NovaSeq6000 进行上机测序工作。

2 结果与讨论

2.1 不同容重矿物棉的性质

1) 不同容重矿物棉理化性质。由表2可知, 随矿物棉载体容重增加, 其体积比表面积相应增加而孔隙率相应下降。因此, 在单位体积下, 容重大的矿物棉由于内部包含纤维多且排列致密, 会使其比表面积大而孔隙率小。在本研究中, 由于填料内部形成毛细作用, 因此, 虽然矿物棉填料整体呈现疏水性, 却有着极高的体积吸水率。3种填料的体积吸水率由大到小排序依次为中容重矿物棉 (94.8%)>小容重矿物棉 (92.1%)>大容重矿物棉 (88.6%)。这是因为填料内部随着矿物棉容重的增大及微孔体积的减小, 其毛细作用相应增强; 在容重达到一定程度后, 若容重继续增大则会使微孔数量减少, 单个填料的可吸持水的总量下降^[19]。因此, 在3种矿物棉中, 中等容重矿物棉的吸水性能最强。

2) 不同容重矿物棉的保水性能。根据计算, 3种矿物棉的干燥速率约为 1.2%·h⁻¹, 且整体趋于线性关系。这是由于矿物棉具有一定的水分输移能力, 水分从矿物棉表面蒸发后内部水分能迅速

表2 不同矿物棉载体性能参数

Table 2 Performance parameters of different mineral wool carriers

矿物棉	容重/(kg·m ⁻³)	体积比表面积/(m ² ·m ⁻³)	孔隙率/%	接触角/(°)	体积吸水率/%
K ₁	80	1963	88.55	125	92.1
K ₂	100	3172	87.61	116	94.8
K ₃	120	4887	86.93	108	88.6

补给到表面,使得矿物棉块内外水分含量保持相当。因此,当单位时间内水分流失量近乎为定值时,则矿物棉的水分流失呈现近似线性的关系。由图2可知,小容重矿物棉的体积吸水率下降速度略大于中容重矿物棉和大容重矿物棉。这是由于随矿物棉容重增加,纤维数量越多,则孔隙率相应越低,水分从载体内部逃脱需要挣脱更多纤维的束缚,因而不易脱离^[20]。

3) 不同容重矿物棉的 SEM 结果分析。利用扫描电镜表征了矿物棉填料的微观结构,结果见图3。挂膜前(图3(a)~(c)),3种填料包含大量的纤维丝及空隙,孔径分布均匀、立体多层,这可为微生物的提供丰富的附着点,也可为水分和氧气的输移提供有利条件;同时,也能为内部生物膜提供良好的生存环境,从而减少水力剪切力对生物膜的冲刷。同时,可观察到随容重增大填料孔隙率有所降低,相应的孔径减小,这与孔隙率的表征结果相互印证。3种矿物棉的单丝纤维均表现相对光滑,无明显沟槽的表面特征,这也是其亲水性较小的原因之一。

通常,不同载体上微生物黏附后所形成的生物膜形貌不同,这是由于载体与载体、载体与水流之间存在摩擦、剪切作用。在本研究中,矿物棉填料在在滤池中的堆砌形态不受水流影响,因此,不存在载体间的摩擦、剪切作用。造成不同填料上的生物膜形貌不同的原因主要在于:当载体容重较小时,填料内部的孔隙率更大,使得载体受到的水力剪切力较大,进而生物膜形态较为疏松。在挂膜后,3种矿物棉载体的生物膜微观结构表征结果如图3(d)、图3(e)、图3(f)所示。小容重矿物棉载体上生长的生物膜(图3(d))结构松散,可明显观察到原始的纤维结构;中容重矿物棉载体上生长的生物膜同时具有多孔性和致密性的特征(图3(e)),可观察到载体与微生物间形成

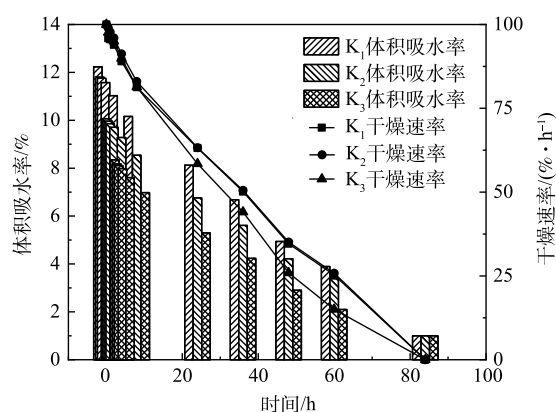


图2 3种矿物棉载体体积吸水率及干燥速率随时间变化情况

Fig. 2 Variation of water holdup and drying rate of three mineral wool carriers with time

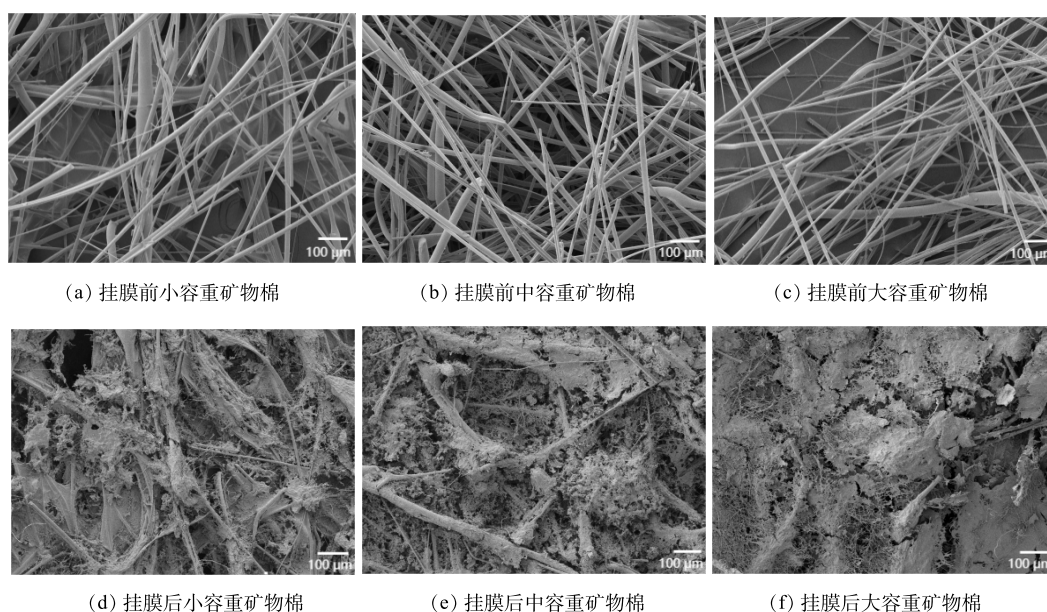


图3 3种矿物棉载体的扫描电镜图

Fig. 3 Scanning electron microscopy images of three mineral wool carriers

了较致密且均匀的结构；大、中、小容重矿物棉载体表面被微生物及其分泌物所包裹，形成了极为致密的生物膜结构，几乎看不到矿物棉的原始表面。

2.2 水质分析结果

1) COD 去除效果。实验期间 COD 的进出水情况如图 4(a) 所示。挂膜初期的 COD 去除率较高，3 种矿物棉填料对 COD 去除率分别在 50%、35%、30% 左右。初步认为，此时的 COD 去除效果主要是由于填料对有机物的截留作用。生物滴滤池运行至第 20 天后，COD 去除效率在波动中呈稳步上升趋势，说明微生物适应状况良好。3 个反应器 COD 去除率的变化趋势大致相同，但大、中容重矿物棉的去除效果总体优于小容重矿物棉。大、中容重矿物棉在连续流挂膜的第 30 天基本达到稳定，且稳定时的 COD 去除率保持在 80% 左右，出水 COD 分别稳定在 25~40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；而小容重矿物棉稳定时的 COD 去除率保持在 72% 左右，出水 COD 基本稳定在 52 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右，无法达到一级 A 排放标准。此外，值得注意的是，在第 30~40 天，进水 COD 在 125~225 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 大幅波动，而大、中容重矿物棉所在反应器仍能保持很好的出水水质，表明这 2 个反应器具备一定的抗冲击负荷能力。

2) $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果。实验期间 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的进出水情况如图 4(b) 所示。在连续流挂膜启动的初期，3 种填料对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率均较低，而且有一定的波动性。但随着挂膜时间的推移， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率整体呈现上升趋势，且逐渐趋于稳定。挂膜期间，大、中容重矿物棉对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率在连续流挂膜的第 25 天基本达到稳定。稳定时大、中容重矿物棉对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率保持在 95% 以

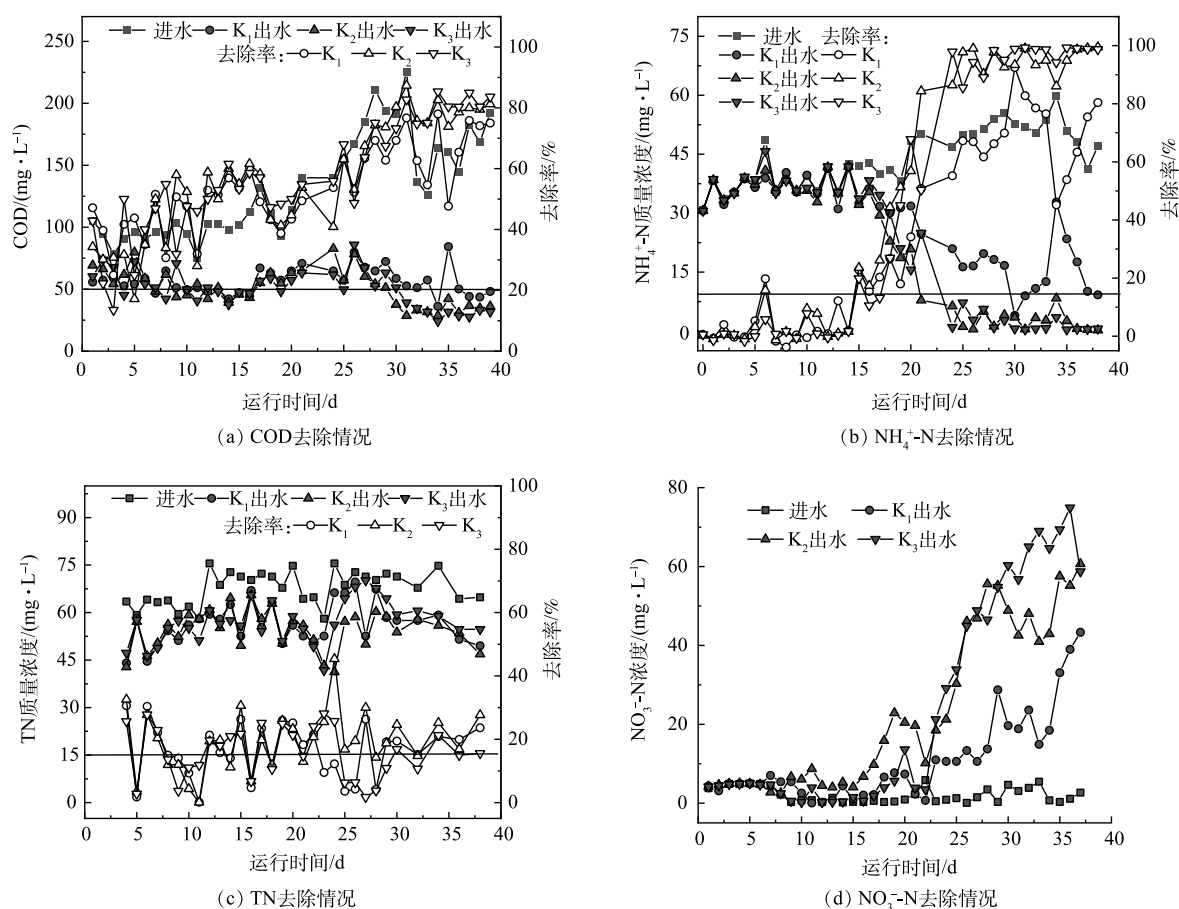


图 4 3 种矿物棉反应器进出水水质及去除率

Fig. 4 Influent/effluent quality and removal efficiency of biotrickling filters with three mineral wool carriers

上，其中，大容重矿物棉可达 99%。出水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 平均质量浓度分别为 $0.86\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.47\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右，满足一级 A 排放标准。初步分析，这是因为大、中容重矿物棉的毛细作用强，挂膜较快，为生长较慢的硝化细菌在生物膜上生长繁殖创造了有利条件。同时，去除氨氮的微生物需要有较长的停留时间，且此类微生物多数生长在膜的内层，而矿物棉的优良的保水及水分传质性能可使微生物与污染物更有效地接触，因而进一步强化了系统的硝化性能^[22]。系统在第 30~40 天，进水浓度的波动并未影响到大、中容重矿物棉的污染物去除性能，体现了其对于氨氮的去除同样具备较强的耐冲击负荷能力。而小容重矿物棉对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率在连续流挂膜的第 30 天左右达到稳定，并且水质较差，无法达到一级 A 排放标准。

3) TN 去除效果。实验期间 TN 的进出水情况如图 4(c) 所示。从出水来看，3 种矿物棉对于 TN 的去除效果均较差，出水 TN 均无法达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 的排放标准 ($\text{TN}<15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，实验期间的出水 TN 普遍超过 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。结合图 4(d)，初步认为，出水 TN 偏高、去除率偏低的原因在于反硝化效果较差。这主要由于矿物棉载体在吸收水分后仍能保持原有形状，保留了良好的内部空隙，为装置内的空气流通提供了优良的条件，使得滤池内缺氧环境较差，不利于反硝化反应的进行。

2.3 微生物群落结构分析

1) 菌群多样性分析。对 3 种矿物棉载体上生物膜样品有效序列信息以 97% 的相似性进行 OTU 聚类后，生成的维恩图如图 5 所示。3 种矿物棉载体上生物膜样品聚类得到的 OTU 总数目分别为 926、901 和 635 个，其中小容重矿物棉载体上物种种数最多。通常，2 个样本间共同拥有的 OTU 个数越多时，其细菌组成的相似度越大^[23]。由图 5 可知，3 种矿物棉载体间共有的 OTU 数高达 468，远高于他们各自所特有的 OTU 数目。这说明各反应器在细菌组成上较为相似，在一定程度上表明各反应器间的作用方式大体相同。三者之中，中容重矿物棉载体与小容重矿物棉载体的细菌组成更为相近。

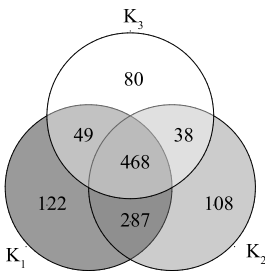


图 5 生物膜样品维恩图
Fig. 5 Venn diagram of biofilm sample

Alpha 多样性包括 Shannon 指数、Simpson 指数、Chao1 指数、ACE 指数及覆盖率。其中，多样性随 Shannon 指数增加而增加，随 Simpson 指数增加而降低^[24-25]。Chao1 指数和 ACE 指数则可反应群落分布丰富度，其数值越大，表示群落丰富度越高。由表 3 可以看出，3 种矿物棉载体上生物膜样品微生物群落丰富度依次为大容重>中容重>小容重矿物棉载体，而多样性则由大到小顺序排列为小容重>中容重>大容重矿物棉载体。其中，大、中矿物棉载体所在反应器中微生物群落丰富度较高而微生物多样性较差的原因可能是：因为其毛细作用强，使得水分在载体上的停留时间长，从而为微生物提供了更好的附着条件。但此时载体上形成的生物膜更为致密，因此，传质效率

表 3 生物膜样品测序信息及细菌的多样性指数
Table 3 Sequencing information of biofilm samples and bacterial diversity index

样本	OTUs	Shannon	Simpson	Chao1	ACE	覆盖率/%
K ₁	926	6.138	0.978	967.110	975.576	99.8
K ₂	901	6.522	0.962	968.319	960.354	99.7
K ₃	635	7.092	0.960	654.905	665.861	99.9

差, 从而致使其物种多样性降低^[26]。

2) 门水平下 3 种矿物棉载体生物膜上的主要微生物分析。门水平下 3 种矿物棉载体生物膜上的主要微生物分析如图 6 所示, 3 种矿物棉载体上生物膜菌群分别由 36、31、26 个门组成, 微生物丰度较大。其中包括变形菌门 (*Proteobacteria*)、厚壁菌门 (*Firmicutes*)、拟杆菌门 (*Bacteroidetes*)、未分类菌门、硝化螺旋菌门 (*Nitrospirae*)、*Desulfobacterota* 门、放线菌门 (*Actinobacteriota*) 和疣微菌门 (*Verrucomicrobiota*) 等。3 种矿物棉载体的优势门类相同, 均为变形菌门 (*Proteobacteria*)、厚壁菌门 (*Firmicutes*)、拟杆菌门 (*Bacteroidetes*) 和硝化螺旋菌门

(*Nitrospirae*)。虽然, 3 种矿物棉填料附着相上的细菌门类差别不显著, 但其丰度却有所差距。变形菌门、厚壁菌门、拟杆菌门和硝化螺旋菌门在 3 种矿物棉载体上的占比依次为小容重矿物棉载体 49.24%、27.90%、11.19% 和 1.42%, 中容重矿物棉 41.5%、23.21%、18.36% 和 2.45%, 大容重对 47.75%、20.99%、19.68% 和 1.12%。根据前人的研究结果, 变形菌门是生物处理反应器中较常见的菌群, 包括多种与含氮化合物转化相关的亚硝化菌属和反硝化菌属, 具有同时去除有机物和脱氮除磷的功能^[27]。厚壁菌门能够有效降解大分子有机物, 而拟杆菌不仅可以除磷, 还可以有效降解蛋白质^[28], 硝化螺旋菌门是一类革兰氏阴性细菌。其中的硝化螺旋菌属 (*Nitrospira*) 作为硝化细菌, 可将亚硝酸盐氧化成硝酸盐。因此, 这些菌门的相对丰度会直接影响到污水生物处理中污染物的去除效果。

3) 属水平下 3 种矿物棉生物膜上的主要微生物分析。属水平下 3 种矿物棉载体生物膜上的主要微生物分析如图 7 所示。3 个反应器中在属水平上的优势种群相差不大, 但各自种群的丰度差别较大。作为生物脱氮过程中关键的功能性细菌, 氨氧化菌 (ammonia oxidizing bacteria, AOB) 和亚硝酸盐氧化菌 (nitrite-oxidizing bacteria, NOB) 可协同发挥硝化作用^[29]。其中, AOB 比较容易流失, 且世代时间长、生长缓慢^[30], 所以 AOB 更易吸附固定在亲水性高的载体表面, 且 AOB 的数量提高有助于增强系统的抗冲击负荷能力。如图 7 所示, 亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*) 为本研究中 AOB 的优势菌属, 在 3 个反应器中的丰度排序为小容重矿物棉载体 (5.46%)>中容重矿物棉载体 (4.15%)>大容重矿物棉载体 (2.11%)。此外, 3 个反应器中检测出的 NOB 菌种主要为硝化螺旋菌,

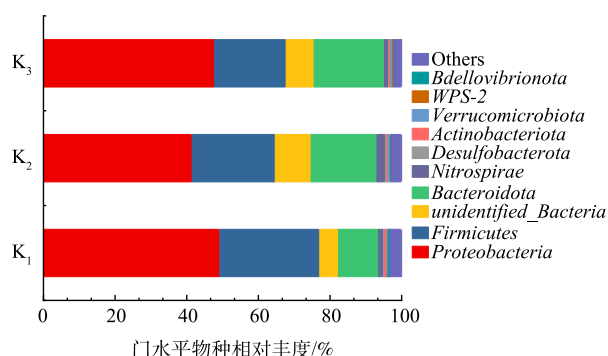


图 6 门水平下 3 种矿物棉载体附着生物膜的微生物群落对比

Fig. 6 Comparison of microbial communities of the biofilms on three mineral wool carriers at phylum level

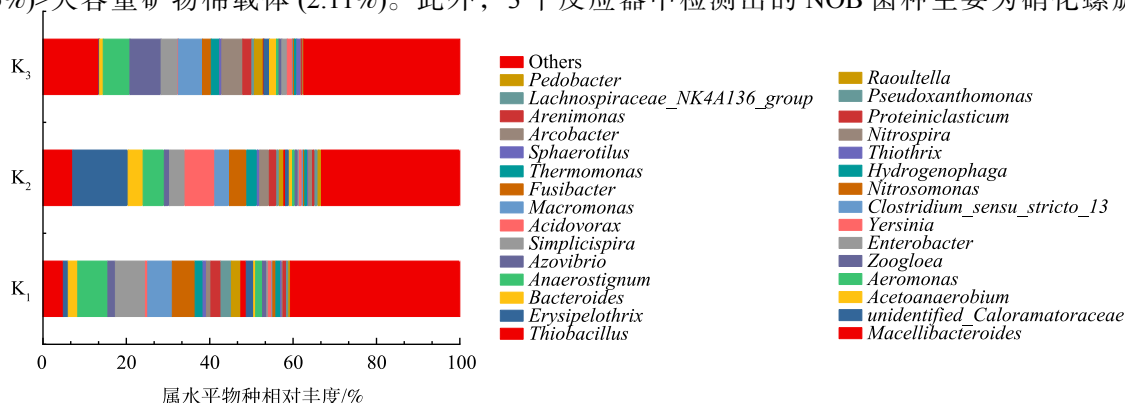


图 7 属水平下 3 种矿物棉载体附着生物膜的微生物群落对比

Fig. 7 Comparison of microbial communities of the biofilms on three mineral wool carriers at genus level

其丰度排序为大容重矿物棉载体 (5.06%)>中容重矿物棉载体 (2.33%)>小容重矿物棉载体 (1.07%)。与水质指标相对应, 大、中容重矿物棉载体的反应器对氨氮的去除效果优于小容重矿物棉载体。

3 结论

1) 矿物棉载体的吸水、保水性能随其容重增加呈现先增加后减小的趋势。其中, 容重较大的载体生物膜较为致密, 孔隙率降低, 水分流失相对困难。

2) 3种矿物棉载体对COD、氨氮均有一定的去除效果。其中, 大、中容重的矿物棉载体在稳定运行后COD、氨氮的出水能稳定达到一级A排放标准, 且具有一定的抗冲击负荷能力。但由于系统反硝化效果较差, 导致3种矿物棉载体对于TN的去除率均值均在30%以下。

3) 高通量检测结果表明, 大容重矿物棉载体微生物群落丰富度最高, 而小容重矿物棉载体微生物多样性最高。此外, 高通量属水平分析结果表明, 系统中AOB和NOB细菌的优势种属分别为*Nitrosomonas*属和*Nitrospira*属, 且AOB主要富集在亲水性较好的大、中容重矿物棉载体上, NOB主要富集在传导性好的小容重矿物棉载体上。

4) 比较而言, $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 是矿物棉作为微生物载体的容重最优选。此时矿物棉的孔隙率适中, 吸、保水性高, 微生物种群结构适宜, 出水水质可稳定达到一级A标准, 且具有一定的抗冲击负荷能力。

参考文献

- [1] BIESTERFELD S, FARMER G, FIGUEROA L, et al. Quantification of denitrification potential in carbonaceous trickling filters[J]. *Water Research*, 2003, 37(16): 4011-4017.
- [2] ALI I, KHAN Z M, PENG C S, et al. Identification and elucidation of the designing and operational issues of trickling filter systems for wastewater treatment[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017, 26(6): 2431-2444.
- [3] DABROWSKI W, KAROLINCZAK B. Application of trickling filter and vertical flow constructed wetland bed to treat sewage from craft brewery[J]. *Journal of Ecological Engineering*, 2019, 20: 211-217.
- [4] ZAHID W M. Costanalysis of trickling-filtration and activated-sludge plants for the treatment of municipal wastewater[C]//King Saud University. Proceedings of the Seventh Saudi Engineering Conference. Riyadh, 2007:1-15.
- [5] 窦娜莎, 王琳. 不同温度下曝气生物滤池运行效能与微生物群落结构[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(6): 2800-2806.
- [6] MARTINS V F, SILVA G, BORGES A C. Effects of packing media and the insertion of vegetation on the performance of biological trickling filters[J]. *Water*, 2021, 13(13): 1735.
- [7] HUAN C C, LYU Q Y, TONG X Y, et al. Analyses of deodorization performance of mixotrophic biotrickling filter reactor using different industrial and agricultural wastes as packing material[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 420: 126608.
- [8] 田飞, 王文刚, 韩爱秋, 等. 基于生物滴滤池不同滤料的挂膜试验研究[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会2019年科学技术年会: 环境工程技术创新与应用分论坛论文集(四). 西安, 2019:167-169.
- [9] 胡小兵, 王振振, 林睿, 等. 生物载体内孔径对生物膜微型动物多样性与稳定性影响[J/OL]. *中国环境科学*:1-12[2021-08-23]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210508.002>.
- [10] HASSARD F, BIDDLE J, CARTMELL E, et al. Rotating biological contactors for wastewater treatment: A review[J]. *Process Safety and Environmental Protection, Part B*, 2015, 94(3): 285-306.
- [11] 方芳, 龙腾锐, 郭劲松, 等. 多孔填料表面物理特性对生物膜附着的影响[J]. *工业用水与废水*, 2004, 35(6): 1-4.
- [12] BU H, CARVALHO G, YUAN Z, et al. Biotrickling filter for the removal of volatile sulfur compounds from sewers: A review[J]. *Chemosphere*, 2021, 277(10): 130333.
- [13] ZHANG Y, LIU J, LI J, et al. Effects of filler voidage on pressure drop and microbial community evolution in fungal bio-trickling filters[J]. *Chemosphere*, 2021, 273: 129710.
- [14] SHAREEFDEEN Z, SINGH A. Biotechnology for odor and air pollution control [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [15] 胡小兵, 林睿, 张琳, 等. 载体内微孔孔径对生物膜特性及废水处理效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(12): 91-100.
- [16] VACEK P, STRUHALA K, MATEJKA L. Life-cycle study on semi intensive green roofs[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 154(1): 203-213.
- [17] HAO W T, XU J, LI R, et al. Developing superhydrophobic rock wool for high-viscosity oil/water separation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 368: 837-846.
- [18] JAROSLAV P, MILENA P, JAROMIR Ž, et al. Moisture transport properties of hydrophilic mineral wool[J]. *Advanced Materials*

- Research, 2014, 982(6): 6-10.
- [19] ANDREASEN R R, NICOLAI R E, POULSEN T G. Pressure drop in biofilters as related to dust and biomass accumulation[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2012, 87(6): 806-816.
- [20] 张标富. 透水型岩棉制品透水及保水性能研究[J]. 砖瓦, 2018(8): 23-26.
- [21] YANG Y C, LI M, LI H, et al. Specific and effective detection of anammox bacteria using PCR primers targeting the 16S rRNA gene and functional genes[J]. Science of the Total Environment, 2020, 734: 139387.
- [22] 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.
- [23] WELANDER U, HENRYSSON T, WELANDER T. Biological nitrogen removal from municipal landfill leachate in a pilot scale suspended carrier biofilm process[J]. Water Research, 1998, 32(5): 1564-1570.
- [24] WANG Y, SHENG H F, HE Y, et al. Comparison of the levels of bacterial diversity in freshwater, intertidal wetland, and marine sediments by using millions of illumina tags[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(23): 8264-8271.
- [25] 杨雅琼, 徐相龙, 韦琦, 等. 3种固定式填料在中试IFAS系统中的性能比较及菌群结构解析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(6): 1338-1349.
- [26] 顾佳艳, 何国富, 林楠. 固定膜-活性污泥系统细菌多样性及脱氮关键菌研究[J]. 环境工程, 2016, 34(8): 36-39.
- [27] 王海燕, 周岳溪, 蒋进元. 强化生物除磷系统的微生物种群及其表征技术[J]. 微生物学通报, 2005, 32(1): 118-122.
- [28] SLY L I, TAGHAVI M, FEGAN M. Phylogenetic heterogeneity within the genus *herpetosiphon*: transfer of the marine species *herpetosiphon cohaerens*, *herpetosiphon nigricans* and *herpetosiphon persicus* to the genus *lewinella* gen. nov. in the *flexibacter-bacteroides-cytophaga* phylum[J]. International Journal of Systematic Bacteriology, 1998, 48(3): 731-737.
- [29] MERBT S N, AUGUET J C, BLES A, et al. Wastewater treatment plant effluents change abundance and composition of ammonia-oxidizing microorganisms in mediterranean urban stream biofilms[J]. Microbial Ecology, 2015, 69(1): 66-74.
- [30] KINH C T, AHN J, SUENAGA T, et al. Free nitrous acid and pH determine the predominant ammonia-oxidizing bacteria and amount of N₂O in a partial nitrifying reactor[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, 101(4): 1673-1683.
- (责任编辑: 曲娜)

Effect of the porosity of mineral wool on the performance of biotrickling filter

SUN Wenzhuo, FAN Zhenhui, QI Lu*, SHAO Yuting, LIU Guohua, WANG Hongchen

Research Center for Low Carbon Technology of Water Environment, School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China

*Corresponding author, E-mail: qilu@ruc.edu.cn

Abstract In respond to the problem that the biotrickling filter does not meet the standard due to its short contact time, three kinds of mineral wool with volume weights of 80, 100, and 120 kg·m⁻³ were used as filter packing to study the influence of filler porosity on water holding capacity. The effectiveness of biotrickling filters with different volume weights in removing pollutants and the influence of filler porosity on the characteristics of microbial community were analyzed. The results showed that the water absorption and water retention performance of the mineral wool carrier increased first and then decreased with its volume weight increased; the mineral wool carrier with lower porosity had better removal effects on COD and NH₄⁺-N after stable operation, their corresponding average removal rates were 99% and 72%, respectively, and had a certain impact load resistance. According to the high-throughput sequencing results, with the increase of the volume weight of the mineral wool carrier, the species abundance of the microbial community increased while the diversity decreased. Comparatively, when the volume weight of mineral wool was 100 kg·m⁻³, its water absorption and water retention were high, the microbial community had a suitable structure, and the effluent quality could meet the Class 1A level, and it had a certain impact load resistance.

Keywords porous packing; bulk density; biotrickling filter; operational performance; microbial community