

改良 AAOAO 工艺生物池微生物固定化填料脱氮特性研究

杨森¹, 牛咏晴², 刘冰岩¹, 张薛龙¹, 王金辉³, 谷济宇², 彭赵旭²

(1.北京恩菲环保股份有限公司,北京 100038;2.郑州大学 水利与交通学院,郑州 450001;

3.温县中投水务有限公司,河南 焦作 454850)

摘要:在改良 AAOAO 工艺污水处理厂生物池各区域通过挂膜法固定微生物,结合生物池沿程水质分布,对挂膜后填料脱氮性能及微生物群落结构进行研究.结果表明,厌氧区对于 NH_4^+-N 去除的贡献率达到整个系统的 18.66%.好氧区积累的 NO_2^--N 质量浓度最高达到 0.15 mg/L,通过内回流进入厌氧区,为厌氧氨氧化现象产生提供了必要条件.好氧区第二廊道挂膜填料的比硝化速率和比反硝化速率均为沿程最高,分别达到 0.71、0.51 mg/(g·d).在此区域精准投加填料,将会对改良 AAOAO 生物池脱氮性能有极大提升.能够降解污水中多种复杂有机物的细菌属 *Bacteroidetes_vadinHA17* 在填料样本中大量聚集(19.40%),为反硝化过程提供了更多可利用的碳源.为强化现有改良 AAOAO 工艺的处理效果提供理论支持和技术参考.

关键词:污水处理厂;填料;脱氮性能;微生物群落

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2025)02-0139-09

人类生产生活过程中产生的工业废水和生活污水通过污水处理厂可以有效地去除其中的大部分污染物,但污水处理厂尾水中残留的氮元素仍然会破坏自然的氮循环,导致了诸如水体富营养化等问题^[1].

目前,许多污水处理厂在原有氧化沟、 A^2/O 工艺的基础上进行创新,通过调整操作周期中的好氧、缺氧时间及回流方式^[2-3],或采用微生物固定化技术,对脱氮过程进行优化. AAOAO 工艺因其高效的脱氮除磷能力而被广泛应用于污水处理厂,通过多段缺氧区和好氧区的设置,可以更有效地进行反硝化和硝化反应,从而提高脱氮效率^[4].李宏斌等^[5]采取严格控制好氧段溶解氧和内回流比等措施,实现了在 AAOAO 工艺生物池完成脱氮除磷并节省碳源投加量的效果. PEARSON 等^[6]所在的 AAOAO 工艺污水处理厂投入使用 5 年来,不但能满足出水水质要求,还能在不添加碳源的情况下实现出水总氮(total nitrogen, TN)低于 5.0 mg/L.

基于微生物固定化技术对传统活性污泥工艺的升级改造中,填料的投加对于维持微生物的生长繁殖至关重要,特别是对于一些低生长速率微生物^[7]. WANG 等^[8]在 A^2/O 好氧池中投加无机流化填料,在填充率为 30%时,出水 TN 平均保持在 (9.46 ± 1.14) mg/L,而没有投加填料的出水 TN 平均值为 (15.17 ± 2.00) mg/L.有研究在 AAO 工艺中沿程投加醛化纤维填料富集微生物,结果发现厌氧区和缺氧区系统生物多样性增加^[9].然而,传统无机载体使用寿命有限,不易降解,可能对环境造成二次污染.因此,以海藻酸钠(sodium alginate, SA)、聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)为骨架结构的新型凝胶填料被广泛使用,该填料作为一种生物基材料,在特定条件下具有可降解的特性,且其填料结构中有较大的孔隙,适宜微生物生长附着^[10].

收稿日期:2024-03-18; **修回日期:**2024-04-28.

基金项目:国家自然科学基金(42107427);河南省教育厅科学技术研究重点项目(2221023226).

作者简介:杨森(1984—),男,辽宁锦州人,北京恩菲环保股份有限公司高级工程师,研究方向为环境工程, E-mail: yansensys@163.com.

通信作者:彭赵旭(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,郑州大学副教授,研究方向为污水脱氮除磷技术, E-mail: pzx@zzu.edu.cn.

引用本文:杨森,牛咏晴,刘冰岩,等.改良 AAOAO 工艺生物池微生物固定化填料脱氮特性研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(2):139-147.(Yang Sen, Niu Yongqing, Liu Bingyan, et al. Study on the nitrogen removal performance of microbial immobilized carrier in the improved AAOAO process biological tank[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2025, 53(2): 139-147. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.03.18.0002.)

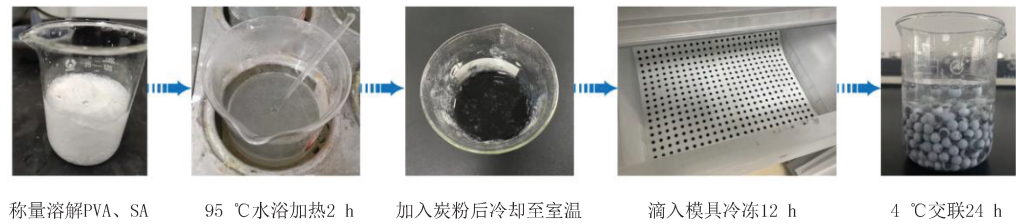
余泽海等^[11]以 PVA、SA、水性聚氨酯作为基础材料包埋微生物,该填料处理模拟污水的 NH_4^+-N 去除率能达到 94%,且在重复使用 20 d 后, NH_4^+-N 去除率仍维持在 90%左右.JIN 等^[12]采用碳酸氢钠改性 PVA / SA 凝胶填料,固定化好氧反硝化菌,经过 5 次重复利用后, NO_3^--N 和 TN 去除率分别保持在 99%和 93%.现有微生物固定化技术具有良好的脱氮效果,但在实际应用中往往采用大范围粗放式投加,漂浮的填料容易对原有处理工艺造成干扰,且难以定期清理和更新.因此需要在污水处理厂生物池精准投放填料,从而发挥更好的处理效果.

为了确定改良 AAOAO 工艺中填料投加的最佳区域,必须深入研究各区域填料挂膜后的脱氮特性.本研究通过挂膜法固定化改良 AAOAO 工艺污水处理厂生物池各区域微生物.研究挂膜后填料脱氮活性,对比活性污泥与填料微生物群落结构.旨在为现有改良 AAOAO 工艺的处理效果提标升级提供理论支持和技术参考.

1 材料与方法

1.1 活性炭复合填料的制备及性能参数

活性炭复合填料制备步骤如图 1 所示,用 100 mL 去离子水浸泡一定质量分数的聚乙烯醇(PVA)、海藻酸钠(SA)和粉末活性炭(powder activated carbon,PAC),置于水浴锅中 95 ℃加热 2 h,使其形成均匀的凝胶质地,冷却后备用.(PVA 质量分数:12%;SA 质量分数:0.5%;PAC 质量分数:4%).制备 5%无水氯化钙饱和硼酸溶液作为交联剂,称取 6 g 硼酸(25 ℃下溶解度 5.74 g)于 100 mL 去离子水中,加热至全部溶解,再加入 5 g 的无水氯化钙.使用注射器将凝胶溶液注入 3 mm 球形模具,放入冰箱-20 ℃冷冻 12 h,在冰箱内脱模,将凝胶小球加入到交联剂中,在室温搅拌 10 min,置于冰箱 4 ℃冷藏固化 24 h.用去离子水洗涤 2~3 次,于 4℃条件下保存备用.



称量溶解PVA、SA 95 ℃水浴加热2 h 加入炭粉后冷却至室温 滴入模具冷冻12 h 4 ℃交联24 h

图1 活性炭复合填料制备步骤

Fig.1 Activated carbon composite fillers preparation steps

使用该方法制得的填料粒径大小均匀,平均直径约为 5.36 mm,质量 10.32 mg/(100 颗).根据已知的研究方法^[13-14],测定填料物理参数和传质性能.本研究制备的活性炭复合填料机械稳定性高,在转速 1 200 r/min 下振荡 48 h 后填料完整率为 100%.填料纵向变形为 50%时抗压强度达到 2.74 MPa.根据填料在去离子水中浸泡 24 h 前后固液混合体积的变化,得出填料膨胀度为 27.98%.采用亚甲基蓝溶液作为模拟污染物时,填料短时间内传质效率能达到较高水平.

1.2 生物池填料挂膜及污水取样点位

本研究于 W 县某污水处理厂进行,其设计规模为 30 000 m³/d,主要污水来源为 W 县产业聚集区工业污水及生活污水.处理工艺采用“预处理+曝气沉砂池+改良 AAOAO 工艺+高密沉淀池+精密过滤器+接触消毒池”.出水水质标准按照《河南省黄河流域水污染排放标准》(DB 41/2087-2021)的一级标准达标排放.

在改良 AAOAO 工艺生物池预缺氧区、厌氧区、缺氧区、好氧区、后缺氧区及后曝气区沿程投放活性炭复合填料.通过绳索将填料框固定在池体的边缘,并在绳索下端悬挂铁块保持其位置.在填料布置完毕后,每隔一周取出观察生物膜的生长情况.经过 3 月的培养期,填料表面形成了均匀且密集的生物膜.随后开始取样检测填料脱氮活性,并通过 3 次重复试验来降低偶然误差的可能性.与此同时检测生物池沿程水质、pH、溶解氧(dissolved oxygen, DO),最后检测填料微生物群落结构.预缺氧区(YQ)、厌氧区(YY)、缺氧区 1(Q1)、缺氧区 2(Q2)、缺氧区 3(Q3)、好氧区始端(H0)、好氧区第一廊道(H1)、好氧区第二廊道(H2)、好氧区第三廊道(H3)、后缺氧区(HQ)及后曝气区(HB)填料的取样点位如图 2 所示.

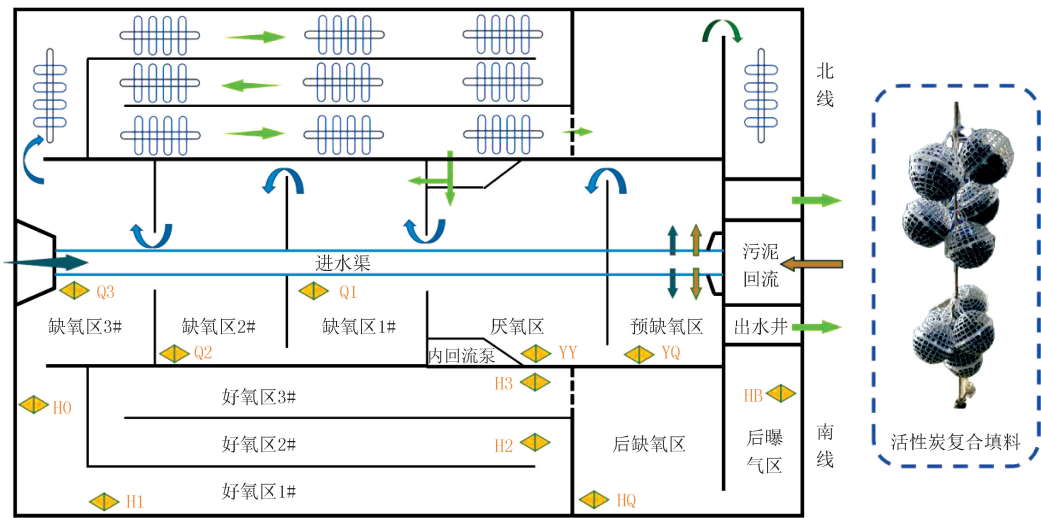


图2 试验取样点位示意图
Fig.2 Schematic diagram of sampling location

1.3 分析方法

水样用 0.45 μm 膜过滤后进行检测。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的测定采用纳氏试剂分光光度法； $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的测定采用 $N\text{-(1-萘基)-乙二胺}$ 光度法； $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的测定采用麝香草酚法；化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 的测定采用重铬酸钾法^[15]。pH 和 DO 采用 WTW Multi 340i 仪测量。DNA 提取、聚合酶链反应扩增和高通量测序均委托北京奥维森基因科技有限公司进行。微生物样品取自污水处理厂生物池 H2 区域活性污泥，以及 H2 区域挂膜 3 月后的填料。

1.4 填料脱氮性能表征参数

取 40 g 填料样品，用去离子水轻轻洗去表面杂质，然后分别置于两个 250 mL 的锥形瓶 A、B 中。锥形瓶 A 中加入 150 mL 的 NH_4Cl 和 NaHCO_3 混合溶液，使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 NaHCO_3 的质量浓度分别为 20 mg/L 和 375 mg/L。试验过程中向锥形瓶 A 中曝气，使 DO 始终保持在 6 mg/L 以上。在锥形瓶 B 中加入 CH_3COONa 和 KNO_3 混合溶液 150 mL 后，使 COD 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量浓度分别为 200 mg/L 和 20 mg/L。向锥形瓶 B 中通入 N_2 ，形成缺氧环境，5 min 后用塞子密封。将各锥形瓶置于摇床充分振荡，分别在 0、4、8、24 和 48 h 时测定锥形瓶 A 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和锥形瓶 B 中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量浓度。最后，将溶液过滤后置于干燥箱烘干 6 h，测定混合物的生物量。采用米氏方程计算比硝化速率和比反硝化速率^[16]。

2 结果与讨论

2.1 污水处理厂生物池沿程水质参数分析

DO 浓度的控制对污染物去除起决定性作用，一般 AAO 工艺要求缺氧段和厌氧段 DO 质量浓度分别控制在 0.5 和 0.2 mg/L 以下^[17]。如图 3 所示，该污水处理厂生物池预缺氧区、各缺氧区及后缺氧区 DO 质量浓度均控制在 0.5 mg/L 以下，厌氧区 DO 质量浓度为 0.06 mg/L，符合工艺要求。好氧区 DO 质量浓度维持在 2 mg/L 以下，既可使硝化反应充分进行，又有效节省了曝气量。各工艺段 DO 控制均满足处理要求且控制在较低水平，这不仅有利于污染物去除，对控制污水处理厂碳排放也至关重要。生物池沿程混合液悬浮固体 (mixed liquor suspended solids, MLSS) 质量浓度整体呈浮动趋势，平均值为 5 032 mg/L，上下浮动不超过 10%。其中，好氧区第一廊道 MLSS 最高，达到 5 441 mg/L。MLSS 也为填料挂膜效果的影响因素之一，这为后续填料投加区域的选择提供了参考条件。结合图 3 与图 4 可知，生物池 YQ 区域 TN 质量浓度为 18.00 mg/L，其中主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式存在 (17.28 mg/L)。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度为 0.63 mg/L，这主要是外回流带来的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 进入 YQ 区域所致。在 YY 区域， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度出现了下降现象，从 YQ 区域的 17.28 mg/L 减少到 YY 区域的 14.39 mg/L，厌氧区对于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的贡献率达到整个系统的 18.66%。其原因可能是厌氧

区的低 DO 环境使得厌氧氨氧化现象产生.有学者在氧化沟工艺污水处理厂生物池厌氧区也发现了 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除的现象,其 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率为 14.47%^[18].同时,YY 区域 COD 较 YQ 区域变化显著,从 124.50 mg/L 下降至 49.40 mg/L,这主要是由于大部分有机物在厌氧段被聚磷菌转化为聚- β -羟丁酸储存在细胞中^[19].Q1 区域比 YY 区域 TN 质量浓度明显下降,从 15.02 mg/L 下降至 8.21 mg/L,这主要是由于内回流的稀释以及反硝化作用.同时,内回流使该 Q1 区域的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度上升至 0.97 mg/L.H0~H3 区域为好氧区, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 质量浓度在硝化作用下由 H0 区域的 5.58 mg/L 下降到 H3 的 2.42 mg/L,COD 沿程也逐渐下降.在 H0~H3 区域, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 逐渐积累,H2 区域 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度最高,达到 0.15 mg/L.由于好氧区内存在部分曝气不充分区域,形成好氧/缺氧交替环境,且氨氧化菌(ammonia oxidizing bacteria,AOB)相比亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidizing bacteria,NOB)对氧的亲和力更强,因此在好氧/缺氧交替条件下,AOB 可以优先利用溶解氧,从而限制 NOB 的生长和活动,使得 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 积累^[20].在后缺氧区,大部分 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在此区域被去除, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度从 H3 区域的 2.93 mg/L 下降到 0.61 mg/L.在 HB 区域,TN 质量浓度较 HQ 区域无明显下降,说明在改良 AAOAO 工艺流程中,后缺氧区对脱氮的作用效果较弱.

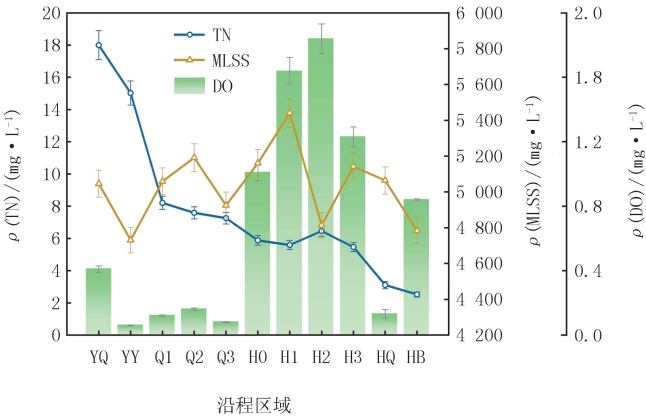


图3 生物池沿程TN、MLSS及DO分布

Fig.3 TN,MLSS and DO distribution along the biological tank

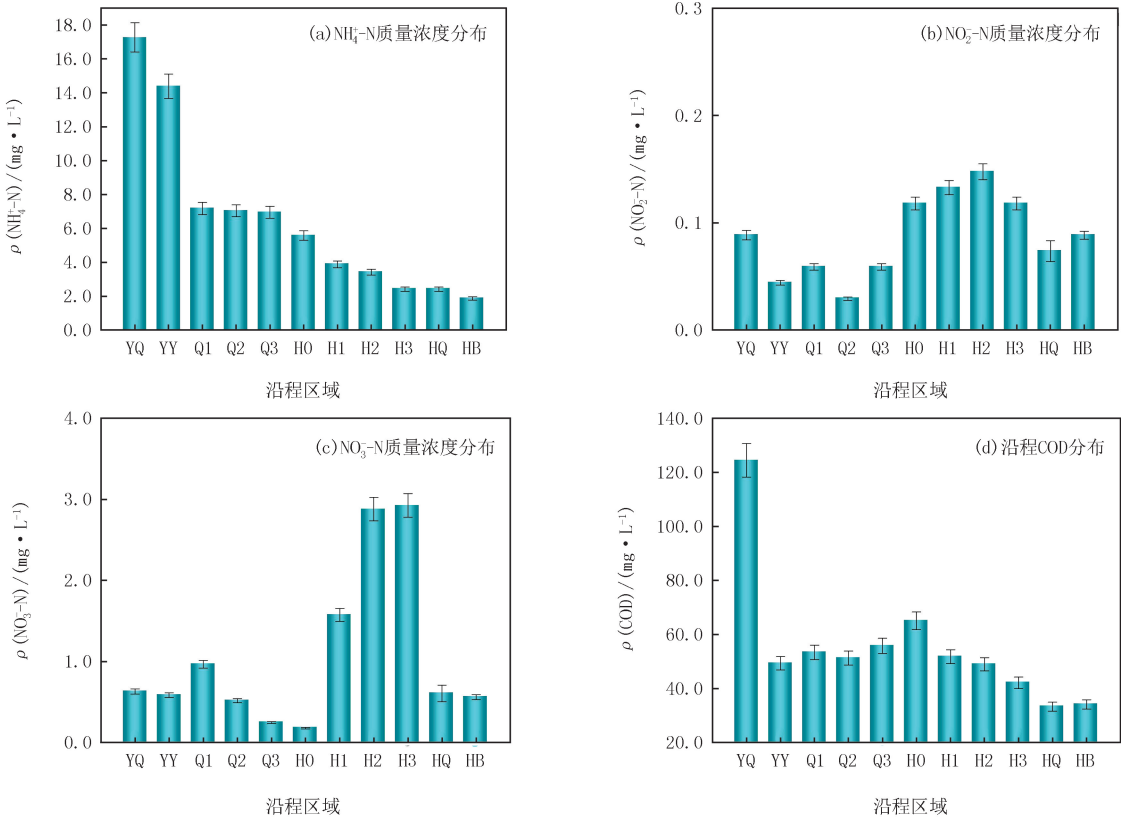


图4 生物池沿程氮元素及COD分布

Fig.4 Nitrogen and COD distribution along the biological tank

2.2 挂膜固定化微生物填料脱氮性能

本研究取污水处理厂生物池各区域挂膜填料,按照 1.4 节中所述方法进行试验并计算各区域填料比硝化速率,试验结果如图 5(a)所示.预缺氧区、厌氧区、缺氧区以及后缺氧区填料的比硝化速率大多低于 0.37 mg/(g·d),这是由于污水中 DO 质量浓度较低,使得这些区域填料上硝化细菌没有良好的生存环境.但 Q2 区域填料比硝化速率却达到了 0.52 mg/(g·d),其原因与 2.1 节分析中 Q2 区域 MLSS 以及 DO 质量浓度略高于 Q1、Q3 区域有关.MLSS 质量浓度越高微生物在填料上的附着效果越好.好氧区 H0 区域填料比硝化速率为 0.23 mg/(g·d),为沿程最低值.这是由于该区域处于缺氧区与好氧区的交界处,DO 水平较低,且该区域水力剪切力较大,不利于微生物在填料上的附着.H2 区域即好氧区第二廊道挂膜填料比硝化速率为沿程最高,达到 0.71 mg/(g·d).此处位于好氧区中段,水质环境最适宜硝化细菌生长繁殖.H3 区域填料比硝化速率为 0.69 mg/(g·d),较 H2 区域有所下降,这是由此区域 DO 质量浓度降低和水力剪切力增大所致.在 HQ 区域,缺氧环境使得填料生物膜比硝化速率下降至 0.34 mg/(g·d),随后在后曝气区,挂膜填料比硝化速率又上升至 0.69 mg/(g·d).

生物池沿程各区域填料挂膜固定化微生物后的比反硝化速率如图 5(b)所示.YQ 区域挂膜填料反比硝化速率为 0.46 mg/(g·d),相对沿程其他区域较高,结合 2.1 节 COD 沿程分布分析原因,预缺氧区是生物池进水区,污水中碳源充足,为反硝化细菌提供了良好的生存条件.在缺氧区,填料的比反硝化速率由 Q1 区域的 0.25 mg/(g·d)上升到 Q3 区域的 0.33 mg/(g·d).谭阳等^[21]发现在缺氧条件下利用挂膜填料处理低 NO₃⁻-N 负荷的污水时,可以表现出更好的反硝化能力.这与图 4(c)所述 NO₃⁻-N 质量浓度从 Q1 到 Q3 逐渐降低这一结果恰好吻合.好氧区填料比反硝化速率从 H0 区域的 0.36 mg/(g·d)逐渐提升至 H2

区域的 0.51 mg/(g·d).产生这一现象是由于活性炭复合填料的特殊结构,其内部存在厌/缺氧区,使得填料在好氧条件下产生同步硝化反硝化(simultaneous nitrification and denitrification, SND)现象,反硝化细菌在填料内部聚集^[22],生物池沿程挂膜填料比反硝化速率在 H2 区域达到最高.邓旭等^[23]研究表明,水力剪切力过大会严重影响微生物在载体上的生长附着.H3 区域位于内回流处,水力扰动产生较大的剪切力,使得微生物固定化效果差,故填料比反硝化速率下降.HQ 区域挂膜填料反比硝化速率降低至 0.26 mg/(g·d),是因为该区域内可利用的碳源不足导致.在 HB 区域,挂膜填料比反硝化速率又上升至 0.37 mg/(g·d),其原因同上所述,也是由于 SND 反应发生.

2.3 活性污泥与挂膜填料微生物群落结构

通过对挂膜填料的脱氮活性研究可以得出, H2 区域挂膜填料各项脱氮指标在沿程挂膜填料中均为最优,故对 H2 区域活性污泥及挂膜填料进行高通量检测.结果表明,初始挂膜填料的微生物多样性指数为 5.81,低于 H2 区域污泥的微生物多样性指数 7.90,活性污泥中微生物种类更丰富.在门水平上, H2 区域活性污泥样本中的主要微生物门分别为 Proteobacteria (33.91%)、Bacteroidota (19.54%)、Chloroflexi (10.47%)、Patescibacteria(8.92%),如图 6(a)所示. Proteobacteria 门是革兰氏阴性菌的一个主要门.其中含有的多种细

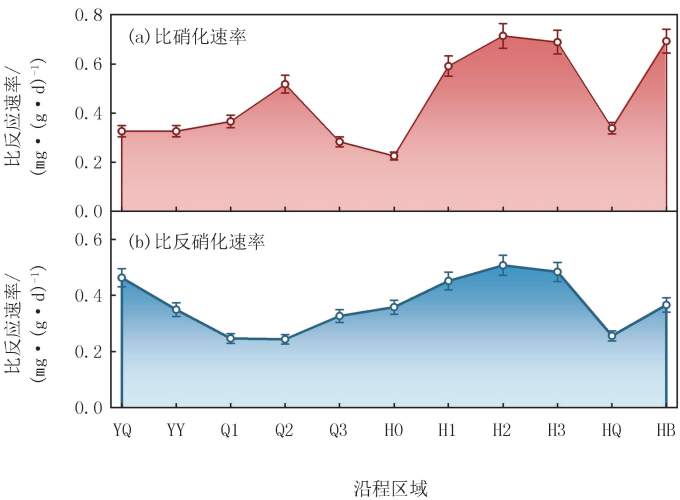


图5 生物池各区域微生物固定化后填料比硝化速率(a)与比反硝化速率(b)

Fig.5 Specific nitrification rates(a) and specific denitrification rates(b) of fillers after the microorganisms in each area of the biological tank fixed

菌,可以在降解氮的同时去除有机碳,Bacteroidota 门中普遍含有反硝化细菌对蛋白质和糖类的降解起着重要的作用,缺氧环境中能够参与自养反硝化^[24].Chloroflexi 门中包含了多种反硝化细菌,因此该污水处理厂活性污泥的反硝化效果好.Patescibacteria 门是 2018 年来提议组建的超级类群,常与反硝化菌共存,能够提高碳源利用效率,强化污泥的脱氮能力,对脱氮过程起着重要的作用^[25].对比其他关于污水处理厂主要门水平微生物研究结果,Patescibacteria 门并未作为主要微生物门出现^[26].而在本研究中污水处理厂作为主要微生物门,可以推断该污水处理厂在污水处理过程中碳源利用效率较高.如图 6(b)所示,在初始挂膜填料样本中,主要微生物门 Proteobacteria、Bacteroidota、Chloroflexi 的相对丰度分别为 27.47%、25.43%、10.40%,如上所述,这些微生物门中存在大量的脱氮相关细菌,使得填料具有良好的脱氮性能.此外,填料样本中 Firmicutes 门相对丰度为 10.66%,高于污泥样本(5.43%).Firmicutes 属于革兰氏阳性细菌,在缺氧条件下能够以 NO₃⁻-N 为电子受体进行脱氮反应.该微生物门在填料样本中富集,说明活性炭复合填料内部的缺氧环境能够为好氧区污泥中的 Firmicutes 门微生物提供适宜生存的环境,使填料具有良好的 NO₃⁻-N 去除能力.

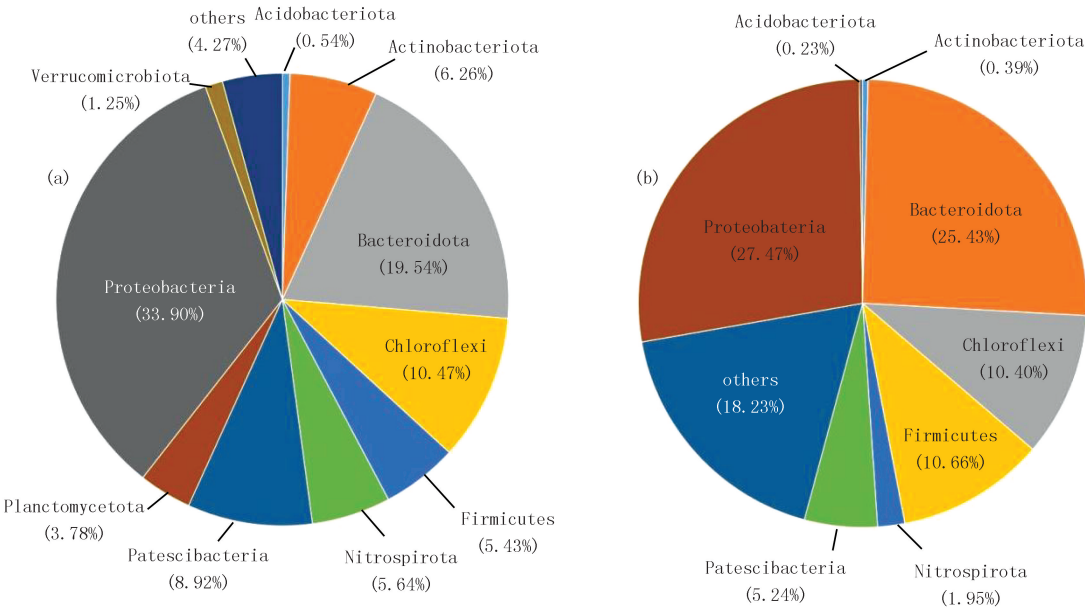


图6 生物池H2区域污泥(a)和填料(b)门水平微生物相对丰度
Fig.6 Relative abundance of bacterial community at phylum level of sludge(a) and fillers(b) in H2 of the biological tank

如图 7 所示,H2 区域污泥样本在属水平上的硝化菌主要为氨氧化菌 *Nitrosomonas* 和亚硝酸氧化菌 *Nitrospira*.这一结果与 PENG 等^[27]对污水处理厂生物池各区域污泥微生物菌属分析结果一致.其中 *Nitrospira* 的相对丰度为 5.64%,远高于 *Nitrosomonas*(1.99%),可见活性污泥的硝化效果主要由 *Nitrospira* 作为全程硝化细菌所提供^[28].H2 区域污泥样本中的反硝化菌主要为自养反硝化菌 *Dechloromonas*(1.28%)、*Accumulibacter*(0.36%)和异养反硝化菌 *Rhodobacter*(0.33%)、*Thauera*(0.09%)反硝化菌属总体相对丰度较低,这是由于 H2 区域位于生物池好氧区中段,该区域污泥反硝化效果相对较弱.同时,H2 区域初始挂膜填料样本中检测出的各个硝化菌属和反硝化菌属的相对丰度均在 0.07%以下,低于活性污泥样本.说明活性炭复合填料在污水处理厂生物池中短期内挂膜效果未达到理想水平,微生物群落在填料上未能大量富集,这主要是由于生物池中污水不断流动,对填料水力冲击较大,使得微生物不易在填料上附着.此外,在填料样本中发现 *Bacteroidetes_vadinHA17* 大量聚集,其相对丰度达到 19.40%.该细菌通过降解污水中的多种复杂有机物,为反硝化过程提供充足的碳源^[29].

3 结 论

本研究在改良 AAOAO 工艺污水处理厂生物池各区域通过挂膜法固定化微生物,结合生物池沿程水质分布,对挂膜后填料脱氮活性进行分析,并对比污泥与填料的微生物群落结构.结果表明,厌氧区对于 NH_4^+-N 去除的贡献率达到整个系统的 18.66%,而好氧区积累的 NO_2^--N 质量浓度最高达到 0.15 mg/L,通过内回流进入厌氧区也为厌氧氨氧化现象产生提供了必要条件.好氧区第二廊道挂膜填料的比硝化速率和比反硝化速率均为沿程最高,分别达到 0.71 和 0.51 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{d})$,在此区域精准投加填料对改良 AAOAO 生物池脱氮性能的提升效果最佳.好氧区第二廊道活性污泥及挂膜填料微生物群落结构显示,填料样本中 Firmicutes 门相对丰度为 10.66%,高于污泥样本(5.43%),使填料具有良好的 NO_3^--N 去除能力.能够降解污水中多种复杂有机物的细菌属 *Bacteroidetes_vadinHA17* 在填料样本中大量聚集(19.40%),为反硝化过程提供更多可利用的碳源.本研究为强化现有改良 AAOAO 工艺的处理效果提供理论支持和技术参考.

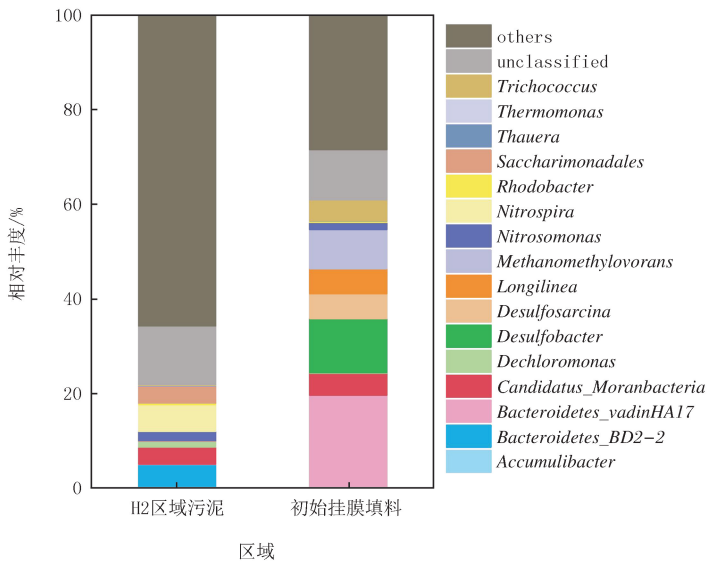


图7 生物池H2区域污泥和填料属水平脱氮微生物相对丰度
Fig.7 Relative abundance of bacterial community at genus level of sludge and fillers in H2 of the biological tank

参 考 文 献

[1] MENCIO A, MADAULA E, MEREDITH W, et al. Nitrogen in surface aquifer-coastal lagoons systems; analyzing the origin of eutrophication processes[J]. The Science of the Total Environment, 2023, 871: 161947.

[2] 王启镡, 李浩, 董旭, 等. 改良型 A^2/O 污水处理厂的工艺优化调控方案及其对同步脱氮除磷效率的提升[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 659-665.

WANG Q B, LI H, DONG X, et al. Process optimization regulation scheme of a full-scale modified A^2/O wastewater treatment plant and its improvement of simultaneous nitrogen and phosphorus removal efficiency[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(2): 659-665.

[3] 马九利, 王伟, 黄继会, 等. 城镇污水处理厂可调节式 AAO 工艺优化运行实践[J]. 中国给水排水, 2023, 39(17): 70-73.

MA J L, WANG W, HUANG J H, et al. Optimized operation of adjustable AAO process in urban sewage treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(17): 70-73.

[4] 刘强, 刘永代. 五段式生物池在提标改造工程中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(5): 170-173.

LIU Q, LIU Y D. Research on application of five-stage biological pool in upgrading project[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(5): 170-173.

[5] 李宏斌, 刘保成, 李昌兵, 等. 杭州某城镇污水处理厂五段式 Bardenpho 工艺调试运行[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 150-154.

LI H B, LIU B C, LI C B, et al. Commissioning and operation of five-stage bardenpho process in a municipal sewage treatment plant in Hangzhou[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 150-154.

[6] PEARSON J R, FORMICA M T, CHELTON D J, et al. Jewett City's five-stage Bardenpho WPCP achieves low nutrient levels with minimal chemicals-A5-year study[J]. The NEWEA journal: Journal of the New England Water Environment Association, 2011, 45(2): 23-29.

[7] SAINI S, TEWARI S, DWIVEDI J, et al. Biofilm-mediated wastewater treatment: a comprehensive review[J]. Materials Advances, 2023, 4(6): 1415-1443.

[8] WANG C, LIU Y, LV W Z, et al. Enhancement of nitrogen removal by supplementing fluidized-carriers into the aerobic tank in a full-scale

- A²/O system[J].Science of the Total Environment,2019,660:817-825.
- [9] LOU T Y,PENG Z X,JIANG K,et al.Nitrogen removal characteristics of biofilms in each area of a full-scale AAO oxidation ditch process[J].Chemosphere,2022,302:134871.
- [10] 徐梦洁,张秀梅,胡银春,等.双交联聚乙醇醇/海藻酸钠水凝胶的制备与表征[J].高分子材料科学与工程,2020,36(4):55-60.
XU M J,ZHANG X M,HU Y C,et al.Preparation and characterization of double crosslinked polyvinyl alcohol/sodium alginate hydrogels [J].Polymer Materials Science & Engineering,2020,36(4):55-60.
- [11] 余泽海,胡云霜,张晏崧,等.聚乙醇醇/海藻酸钠/水性聚氨酯复合载体制备及固定化硝化菌降解氨氮废水的研究[J].水处理技术,2022,48(11):94-97.
YU Z H,HU Y S,ZHANG Y S,et al.Preparation of polyvinyl alcohol/sodium alginate/waterborne polyurethane composite carrier and degradation of ammonia nitrogen wastewater by immobilization of nitrifying bacteria[J].Technology of Water Treatment,2022,48(11):94-97.
- [12] JIN Y,LIU D,XIONG W,et al.Enhancing nitrogen removal performance using immobilized aerobic denitrifying bacteria by modified polyvinyl alcohol/sodium alginate(PVA/SA)[J].Chemosphere,2024,357:141954.
- [13] 杨南阳.微生物包埋固定化技术在废气生物过滤工艺中的应用研究[D].天津:天津大学,2019.
YANG N Y.Application of microbial embedding and immobilization technology in biofiltration of waste gas[D].Tianjin:Tianjin University,2019.
- [14] 慕浩.固定化好氧反硝化菌群强化生物海绵铁体系同步硝化反硝化脱氮研究[D].兰州:兰州交通大学,2023.
MU H.Study on immobilized aerobic denitrifying bacteria enhancing simultaneous nitrification and denitrification of biological sponge iron system[D].Lanzhou:Lanzhou Jiaotong University,2023.
- [15] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会编.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.
- [16] NAQUI A,CHANCE B.A semi-integrated method for the determination of enzyme kinetic parameters and graphical representation of the Michaelis-Menten equation[J].Analytical Biochemistry,1984,141(1):179-183.
- [17] 周政,李怀波,王燕,等.低碳氮比进水 AAO 污水处理厂低碳运行[J].中国环境科学,2022,42(11):5088-5099.
ZHOU Z,LI H B,WANG Y,et al.Research on low-carbon operation mode in AAO-based wastewater treatment plants with low C/N influent[J].China Environmental Science,2022,42(11):5088-5099.
- [18] 娄天宇.AAO 氧化沟各区域悬浮污泥和生物膜脱氮特性研究[D].郑州:郑州大学,2022.
LOU T Y.Study on nitrogen removal characteristics of suspended sludge and biofilm in AAO oxidation ditch[D].Zhengzhou:Zhengzhou University,2022.
- [19] 谢禹,陈仁杰,陶正凯,等.生活污水强化除磷技术研究进展[J].应用化工,2021,50(3):821-824.
XIE Y,CHEN R J,TAO Z K,et al.Progress in enhanced phosphorus removal from sanitary sewage[J].Applied Chemical Industry,2021,50(3):821-824.
- [20] GU X D,HUANG W H,XIE Y Y,et al.Simulation and experimental verification of nitrite-oxidizing bacteria inhibition by alternating aerobic/anoxic strategy[J].Bioresource Technology,2022,358:127441.
- [21] 谭阳,王硕,徐巧,等.不同挂膜方式填料成膜过程及其强化反硝化效能[J].中国给水排水,2016,32(7):30-35.
TAN Y,WANG S,XU Q,et al.Biofilm formation process and enhanced denitrification characteristics of suspended carriers under different cultivation strategies[J].China Water & Wastewater,2016,32(7):30-35.
- [22] SRIWIRIYARAT T,JANGKORN S,CHAROENPANICH J,et al.Occurrence of aerobic denitrifying bacteria in integrated fixed film activated sludge system[J].Chemosphere,2021,285:131504.
- [23] 邓旭,董晨阳.基于生物膜的微生物固定化研究进展[J].生物技术,2023,33(6):798-804.
DENG X,DONG C Y.Review on microbial immobilization based on biofilm[J].Biotechnology,2023,33(6):798-804.
- [24] 张衡,王婧,王斌,等.不同环境因素对厌氧甲烷氧化型自养反硝化系统脱氮性能的影响及其微生物群落分析[J].环境工程学报,2021,15(11):3707-3717.
ZHANG H,WANG J,WANG B,et al.Effects of different environmental factors on the denitrification performance and microbial community of an autotrophic denitrification system based on anaerobic methane oxidation[J].Chinese Journal of Environmental Engineering,2021,15(11):3707-3717.
- [25] LAZAR C S,LEHMANN R,STOLL W,et al.The endolithic bacterial diversity of shallow bedrock ecosystems[J].Science of the Total Environment,2019,679:35-44.
- [26] 贺赞,李魁晓,王佳伟,等.不同季节城市污水处理厂微生物群落特性[J].环境科学,2021,42(3):1488-1495.
HE Y,LI K X,WANG J W,et al.Microbial community structure of waste water treatment plants in different seasons[J].Environmental Science,2021,42(3):1488-1495.
- [27] PENG Z X,ZHANG W C,LOU T Y,et al.The nitrogen removal characteristics of sludge floc and biofilm along the anaerobic anoxic oxic process[J].Journal of Water Process Engineering,2024,59:105069.

[28] DAIMS H,LEBEDEVA E V,PJEVAC P,et al.Complete nitrification by Nitrospira bacteria[J].Nature,2015,528(7583):504-509.
[29] ZHOU H X,XU G R.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,2020,708:134422.

Study on the nitrogen removal performance of microbial immobilized carrier in the improved AAOAO process biological tank

Yang Sen¹, Niu Yongqing², Liu Bingyan¹, Zhang Xuelong¹, Wang Jinhui³, Gu Jiyu², Peng Zhaoxu²

(1. Beijing Enfield Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100038, China; 2. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Wen County Zhongtong Water Service Co., Ltd., Jiaozuo 454850, China)

Abstract: Microorganisms were immobilized in various areas of the biological tank of the improved AAOAO process wastewater treatment plant through the film-laying method. Combined with the water quality distribution along the biological tank, the nitrogen removal performance and microbial community structure of carriers after film-laying were studied. The results showed that the contribution of the anaerobic zone to NH_4^+ -N removal reached 18.66% of the entire system. The highest concentration of NO_2^- -N accumulated in the aerobic zone reached 0.15 mg/L and entered the anaerobic zone through internal reflux, which provided a necessary condition for the occurrence of anaerobic ammoxidation. The specific nitrification rate and specific denitrification rate of the carriers in the second corridor of the aerobic zone were the highest, reaching 0.71 and 0.51 mg/(g · d), respectively. The precise addition of carriers in this area will greatly improve the nitrogen removal performance of the improved AAOAO biological tank. Bacteria that can degrade a variety of complex organic compounds in sewage belong to *Bacteroidetes_vadinHA17*. It accumulated in a large number of carrier samples(19.40%), providing more available carbon sources for denitrification. This study provides theoretical support and technical reference for enhancing the treatment effect of the existing improved AAOAO process.

Keywords: wastewater treatment plant; carrier; nitrogen removal performance; microbial community

[责任编辑 赵晓华 刘洋]