

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.05.015

RBC-O/A-MBR处理晚期垃圾渗滤液中试研究

郭罗秀¹, 李明刚¹, 钟文杰², 袁浩田², 张立秋², 储昭瑞²,
贾宏林¹, 许刘成¹, 付朝绮¹

(1. 深圳市钰华朗环境科技有限公司, 广东 深圳 518100; 2. 广州大学 土木工程学院,
广东 广州 510006)

摘要: 采用基于短程硝化反硝化(PND)的生物转盘(RBC)-O/A-MBR组合工艺处理晚期垃圾渗滤液,分析运行过程中各工艺单元对污染物的去除效果及微生物群落结构的变化。结果表明,通过控制DO在0.3~0.7 mg/L成功启动了短程硝化。在RBC充分利用原水BOD₅的前提下按C/N=1.6向A池投加甲醇,总无机氮去除率(TINRE)可达99.02%。16S rRNA高通量测序结果表明,第121天活性污泥和RBC生物膜中的优势菌属为甲醇反硝化菌 *Hyphomicrobium* (39.06%、16.96%),且 *norank_f__Anaerolineaceae* (9.11%、5.48%)可能是系统中的优势氨氧化菌(AOB)。

关键词: 晚期垃圾渗滤液; 短程硝化反硝化; 生物转盘; 微生物群落结构

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)05-0108-07

Treatment of Aged Landfill Leachate Using Pilot-scale RBC-O/A-MBR

GUO Luo-xiu¹, LI Ming-gang¹, ZHONG Wen-jie², YUAN Hao-tian², ZHANG Li-qiu²,
CHU Zhao-rui², JIA Hong-lin¹, XU Liu-cheng¹, FU Zhao-qi¹

(1. Shenzhen Yuhualang Environmental Technology Co. Ltd., Shenzhen 518100, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The integrated process consisting of rotating biological contactor (RBC), O/A and MBR based on partial nitrification and denitrification (PND) was employed to treat aged landfill leachate. The pollutant removal efficiency and change in microbial community composition within each process unit during operation were evaluated. Partial nitrification was effectively initiated by maintaining DO within the range of 0.3 mg/L to 0.7 mg/L. The total inorganic nitrogen removal efficiency (TINRE) achieved 99.02% when methanol was added to anoxic tank at C/N of 1.6, under the condition that BOD₅ in the influent was fully utilized by the RBC. The 16S rRNA high-throughput sequencing results indicated that one of the predominant bacterial genera in both the activated sludge and the RBC biofilm was the methanol-denitrifying bacteria *Hyphomicrobium* on the 121st day, accounting for 39.06% and 16.96%, respectively. Additionally, *norank_f__Anaerolineaceae* (9.11% in activated sludge and 5.48% in RBC biofilm) might potentially represent the dominant ammonia-oxidizing bacteria (AOB) in the system.

Key words: aged landfill leachate; partial nitrification and denitrification; rotating biological contactor; microbial community composition

基金项目: 广东省普通高校特色创新项目(2020KTSCX096); 广州市科技计划项目(202102010396)

通信作者: 张立秋 E-mail: zlqiu@gzhu.edu.cn

垃圾渗滤液是一种高氨氮废水,同时含有大量的难降解有机物(如腐殖酸及芳香族化合物)和重金属等。晚期垃圾渗滤液的填埋时间在10年以上,具有高氨氮、可生化性差的特点^[1]。传统全程硝化反硝化工艺在处理晚期垃圾渗滤液时需要高强度曝气和额外添加大量碳源,这不仅增加了动力和药剂成本,也导致剩余污泥量的增加。

近年来,厌氧氨氧化、短程硝化反硝化(PND)等新型生物处理工艺为晚期垃圾渗滤液的高效处理提供了替代方案。其中PND已经成为最适合从城市污水及工业废水中脱氮的工艺之一,可节省25%的曝气能耗及40%的外加碳源^[1]。目前已有的关于短程硝化的研究大多是在序批式反应器(SBR)中进行的,关于在连续流系统中利用PND处理晚期垃圾渗滤液的研究非常有限。此外,连续流系统通常采用高回流比以充分利用原水中的BOD₅,但总氮去除率较低,因此采用易于操作的方法在连续流系统中实现短程硝化高效脱氮具有重要意义。生物转盘(RBC)通过旋转盘片与空气和混合液交替接触去除污水中的污染物,是一种低成本、操作简单且可实现同步短程硝化反硝化(SPND)的生物反应器。将RBC置于工艺前端有利于充分利用晚期垃圾渗滤液中的BOD₅实现SPND,无需高回流比从而降低了运行成本。笔者采用中试规模的基于PND的RBC-O/A-MBR组合工艺处理晚期垃圾渗滤液,分析了脱氮途径及微生物群落结构,以评估采用该组合工艺处理晚期垃圾渗滤液的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验装置

RBC-O/A-MBR工艺流程如图1所示。

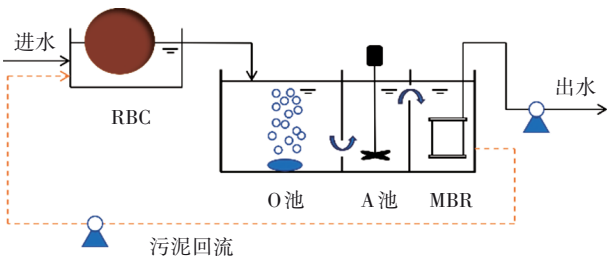


图1 RBC-O/A-MBR工艺流程
Fig.1 Flow chart of RBC-O/A-MBR process

试验装置由RBC、O/A池、MBR串联而成,装置总有效容积为1.5 m³,RBC、O池、A池、MBR的容积比为1:2:1:1。生物转盘浸没率为40%,转速为4 r/min,

O池底部设置微孔曝气盘进行曝气,A池采用搅拌机搅拌,MBR膜丝材料采用PVDF膜,截留孔径为0.03 μm。通过计量泵连续向RBC/A池投加甲醇以满足反硝化碳源需求,污泥通过回流泵从MBR回流至RBC。

1.2 接种污泥与组合工艺进水

试验进水取自广东省某垃圾填埋场渗滤液处理站调节池,COD为1 153~3 358 mg/L,BOD₅为520~630 mg/L,氨氮为1 044~1 582 mg/L,电导率为10~16 mS/cm。填埋时间超过20年,渗滤液可生化性差。接种污泥取自处理站MBR回流污泥,污泥浓度为12 158 mg/L。组合工艺起始污泥浓度为6 828 mg/L。

1.3 试验方法

试验分为4个阶段,见表1。阶段I为短程硝化启动阶段,阶段II将甲醇投加点调至RBC并将甲醇投加量提升至C/N=5,阶段III在阶段II的基础上降低甲醇投加量,阶段IV再次调整甲醇投加点至A池,进一步降低甲醇投加量至C/N=1.6。此外,为提高系统的脱氮性能,阶段III、IV通过降低水力停留时间(HRT)来增加总无机氮负荷(TINLR)。采样点为组合工艺进水、RBC出水、O/A池混合液、MBR出水,RBC进水的NH₄⁺-N和NO_x⁻-N根据回流比、进水及MBR中NH₄⁺-N与NO_x⁻-N计算^[2]。

表1 各阶段运行工况
Tab.1 Operational conditions at each stage

阶段	时间/d	C/N	甲醇投加点	TINLR/(kg·m ⁻³ ·d ⁻¹)	HRT/d	回流比/%
I	1~51	4	A池	0.06	25	200~300
II	52~73	5	RBC	0.06	25	300~400
III	74~94	5/4/3	RBC	0.10	15	300~400
IV	95~121	1.6	A池	0.15~0.17	10	200~300

1.4 分析项目及方法

COD、氨氮、硝态氮及亚硝态氮均采用国家标准方法测定;溶解氧及温度采用哈希HQ40d便携式溶解氧仪测定;pH采用便携式pH计测定。

三维荧光分析:取垃圾渗滤液原液、RBC与O/A池上清液、MBR出水各50 mL,在2 000 r/min下离心2 min,取上清液经过0.45 μm滤膜过滤后稀释至TOC<10 mg/L。使用蒸馏水作为空白对样品进行分析,设置λ_{Ex}为200~450 nm、λ_{Em}为250~550 nm、扫描间隔为5 nm、扫描速度为2 000 nm/min。

微生物群落结构分析:样品分别取自接种污泥(记为S0)、第48和121天活性污泥(记为S48、S121)及第48和121天RBC生物膜(记为B48、B121)。将取得的污泥样品离心脱水预处理后放置于 -20°C 环境下保存,送至上海美吉生物医药科技有限公司进行16S rRNA高通量测序,引物序列为338F(ACTCC-TACGGGAGGCAGCAG)和806R(GGACTACHVGG-GTWTCTAAT)。使用DADA2序列降噪优化数据,获得ASVs特征序列和相对丰度信息,利用美吉云平台进行微生物群落结构分析。

2 结果与讨论

2.1 短程硝化的启动与系统脱氮性能

由于平均进水 BOD_5/TIN 仅为0.43,故按 $\text{C}/\text{N}=4$ 向缺氧池投加甲醇。不同运行工况下的脱氮性能如图2所示。

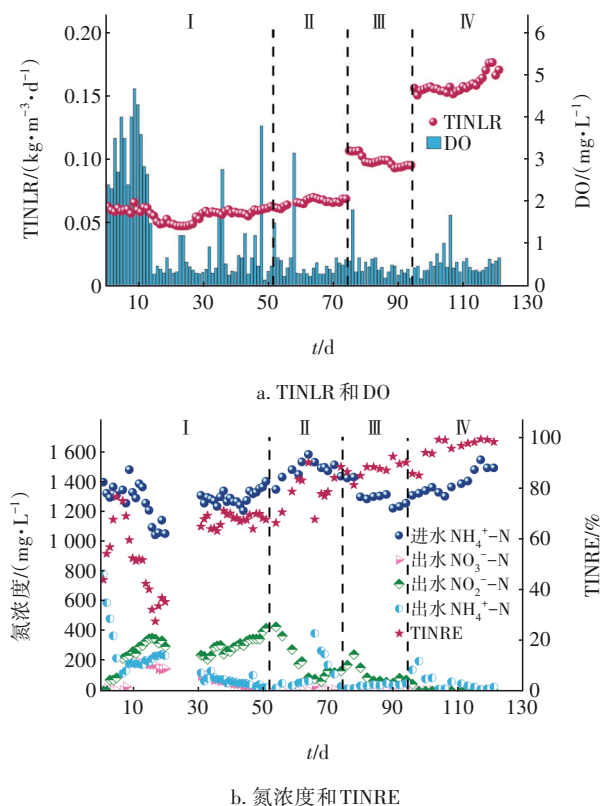


图2 不同运行工况下的脱氮性能

Fig.2 Nitrogen removal performance in different operational conditions

从图2(a)可以看出,0~14 d好氧池DO维持在1~5 mg/L 以恢复AOB(氨氧化菌)活性。启动后出水氨氮迅速降低后再升高,同时亚硝态氮与硝态氮先后逐渐升高。第14天后出水氨氮为203.1 mg/L ,

亚硝态氮与硝态氮分别为331.63、191.95 mg/L 。在饥饿环境下AOB比NOB(亚硝态氮氧化菌)具有更强的抵抗与恢复能力,从而能实现短程硝化。然而这种短程硝化现象在AOB恢复活性后只能短暂持续几天,这解释了启动前14 d出水亚硝态氮先升高而硝态氮后升高的原因。由于AOB的亲氧性强于NOB,在低溶解氧环境下更容易实现短程硝化,第15天起调整O池溶解氧至0.3~0.7 mg/L 。第15~20天,观察到出水亚硝态氮与硝态氮逐渐降低而氨氮逐渐升高,这可能是因为系统内AOB相对丰度较低,在低溶解氧环境下氨氧化速率慢。第21~30天系统停止进出水进行闷曝以富集AOB。第31天恢复进出水后,出水亚硝态氮逐渐升高,出水氨氮与硝态氮则呈现相反的趋势。第51天出水氨氮、亚硝态氮、硝态氮分别为22.8、419.13、14.67 mg/L ,亚硝态氮积累率为97.44%,这表明NOB活性被抑制,组合工艺短程硝化启动成功。

阶段I按 $\text{C}/\text{N}=4$ 向A池投加甲醇,总无机氮去除率(TINRE)最后维持在68%~71%。出现TINRE低的情况主要是由于系统反硝化效果差,出水亚硝态氮浓度高。生物膜具有天然的氧化还原环境,相比絮状污泥更容易富集反硝化菌群从而强化系统脱氮,故阶段II(第52~73天)按 $\text{C}/\text{N}=5$ 向RBC投加甲醇。从图2(b)可以看出,出水亚硝态氮迅速降低。第64天,出水氨氮、亚硝态氮、硝态氮分别为65.46、90.29、4.99 mg/L ,TINRE升高至89.84%。第66天由于液位计故障导致进水过量,出水氨氮升高至384 mg/L 。第74天出水氨氮、亚硝态氮、硝态氮分别为30.36、134.19、5.13 mg/L ,TINRE恢复至88.19%,这表明系统具有一定的抗冲击负荷能力。阶段III分两次(第75、83天)按 C/N 为4、3逐渐减少甲醇投加量,同时TINLR提升至0.10 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,此阶段出水氨氮维持在50 mg/L 以下。 C/N 从5降至4时出水亚硝态氮先升高至244.96 mg/L ,随后降低至89.16 mg/L ,亚硝态氮升高可能与阶段II的氨氮冲击有关。当 C/N 从4降至3时,出水亚硝态氮无明显变化。TINRE维持在88%左右,这是因为碳源投加在组合工艺前端RBC,后端A池反硝化效率低,导致出水亚硝态氮仍然有53.81~73.45 mg/L 。

为了提高系统脱氮性能,阶段IV重新将甲醇投加点调至组合工艺A池,同时进一步按 $\text{C}/\text{N}=1.6$ 降低甲醇投加量,提升TINLR至0.15~0.17 $\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$ 。

随着 TINLR 的升高,第 98 天出水氨氮浓度升高至 197.10 mg/L,但第 104 天又降低至 11.94 mg/L。当甲醇投加点重新调整至 A 池后,出水亚硝态氮迅速降低,第 98 天开始维持在 2 mg/L 以下。第 104~121 天, TINRE 为 95.42%~99.02%,实现了高效脱氮。研究表明^[3],使用甲醇作为以硝态氮为基质的反硝化碳源,理论 C/N 为 3.4~5.2,而以亚硝态氮作为基质时,理论 C/N 为 1.71。本研究中,在后端 A 池仅按 C/N=1.6 投加甲醇, TINRE 最高为 99.02%,这是因为前端 RBC 利用了渗滤液中的 BOD₅ 去除了部分 TIN。此外,阶段 II~IV,除个别天数外 DO 均维持在 0.3~0.7 mg/L,出水硝态氮均低于 10 mg/L,这说明组合工艺通过控制低溶解氧实现了稳定高效的短程硝化反硝化脱氮。

2.2 各阶段 RBC 与 O/A 池的脱氮性能

测定不同阶段 RBC 及 O/A 池进出水氨氮浓度,计算 RBC 和 O/A 池的氨氮去除率 (ARE) 和 TINRE,结果如图 3 所示。可知,启动阶段对氨氮的去除主要发生在 RBC,第 9 和 45 天 ARE 分别为 74.84%、72.66%。这两天 RBC 和 O/A 池的 TINRE 分别为 31.49%、33.62% 及 30.05%、40.29%,而甲醇投加点均为 A 池,说明 RBC 通过反硝化脱氮的效率高于 A 池。阶段 II 甲醇投加点为 RBC,第 62 天 RBC 去除了大部分的氨氮和总无机氮,ARE 及 TINRE 分别为 67.24%、82.38%,这说明通过向 RBC 投加甲醇,可以实现以 SPND 为主的高效脱氮反应。在相同负荷下,ARE 从第 45 天的 72.66% 降低至第 62 天的 67.24%,这可能是因为 RBC 的外碳源使 AOB 在与异养菌竞争 DO 中处于劣势。

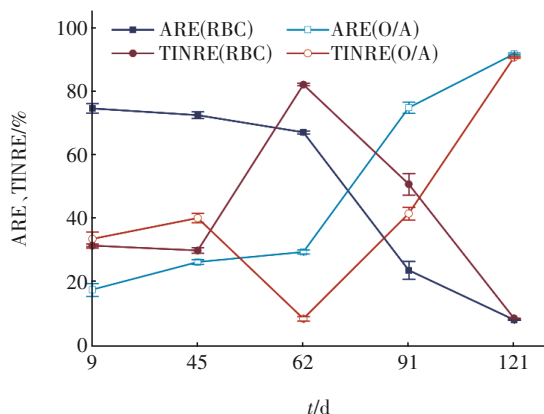


图3 RBC及O/A池ARE和TINRE的变化

Fig.3 Change in ARE and TINRE in RBC and O/A tank

在阶段 III, RBC 的 ARE 显著降低至 23.75%,

TINRE 也随之降低至 50.89%。分析原因:①负荷的增加(HRT降低)限制了 AOB 的硝化能力;②外碳源的投加继续使 AOB 与异养菌在竞争 DO 中处于劣势。与 RBC 相反,增加负荷使 O/A 池氨氧化效率更高,与阶段 II 第 62 天相比,ARE 从 29.31% 升高至 72.42%。TINRE 也从 8.51% 升高至 41.65%,这可能是因为 RBC 中一些有机物被转化为内碳源用于反硝化。当阶段 IV 进一步提升 TINLR 并按 C/N=1.6 向 A 池投加甲醇时,尽管 RBC 的脱氮效率降低,ARE 与 TINRE 分别为 8.07%、8.57%,但 O/A 池去除了剩余的大部分氮,ARE 与 TINRE 分别为 90.78%、89.92%。综上所述,生物膜具有比 O/A 池活性污泥更好的反硝化效果,通过中间阶段将甲醇投加点调整至 RBC 可实现组合工艺高效脱氮。

2.3 FA 与 FNA 对系统脱氮的影响

研究表明^[4],游离氨(FA)对 AOB 和 NOB 的抑制范围分别为 10~150 和 0.1~1.0 mg/L,而游离亚硝酸(FNA)对 AOB 和 NOB 的抑制范围分别为 0.42~1.72 和 0.026~0.22 mg/L。O/A 池 FA、FNA 及 pH 的变化如图 4 所示。可以看出,FA 从 164.60 mg/L 降低至 1.97 mg/L,随后维持在 0~6 mg/L, FNA 则从第 7 天开始维持在 0.2~2.8 mg/L。因此,启动过程中 O/A 池中的 AOB 受到了 FNA 的抑制,NOB 受到了 FA 和 FNA 的联合抑制,这解释了短程硝化启动成功而 O/A 池氨氧化效率低的原因。阶段 II~IV 中, FNA 虽然低于 NOB 活性抑制阈值,但 FA 始终在抑制 NOB 的范围内,这也解释了组合工艺实现稳定短程硝化反硝化的原因。

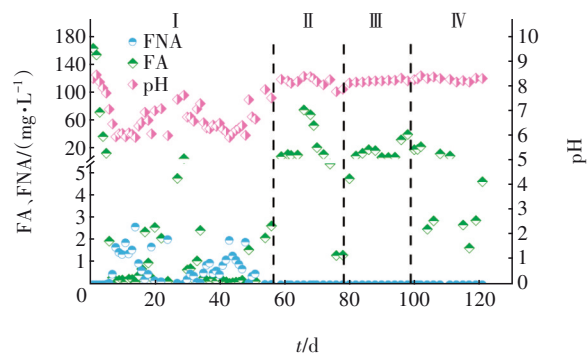


图4 O/A池FA、FNA及pH的变化

Fig.4 Change in FA, FNA and pH in O/A tank

另一方面, FNA 高于 0.18 mg/L 时将严重抑制以亚硝态氮为电子受体的反硝化^[5]。阶段 I 从第 7 天开始 FNA 始终高于 0.18 mg/L, A 池反硝化受到抑

制。当甲醇投加点由A池调整至RBC后,FNA始终低于0.01 mg/L,反硝化不再受到FNA抑制,这与阶段Ⅱ~Ⅳ中O/A池TINRE提升的结果一致。

2.4 组合工艺对有机物的去除性能

图5为系统中COD的变化。可以看出,进水COD为1 153.70~3 358.36 mg/L,出水COD为723.49~2 216.91 mg/L,COD去除率为8.63%~63.76%,COD平均去除率为36.07%。本试验中,进水平均BOD₅/COD(B/C)为0.27,而COD平均去除率为36.07%,这表明进水有机物中可生物降解部分基本被去除。MBR中超滤膜对大分子有机物有很好的截留效果,Elfilali等^[6]发现,MBR超滤膜对中期垃圾渗滤液中COD的截留率达到76%。组合工艺中各单元本底COD浓度较高,RBC、O/A池与MBR出水COD平均浓度分别为3 260.57、3 523.73、1 421.95 mg/L。对COD的去除主要发生在MBR中,其对COD的截留率为60%。对晚期垃圾渗滤液的截留率比中期垃圾渗滤液的低,这是因为晚期垃圾渗滤液的B/C较低,而蛋白质和碳水化合物浓度较高。

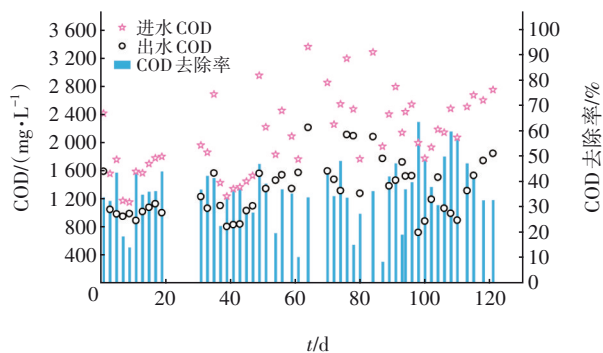


图5 COD的变化

Fig.5 Change in COD

晚期垃圾渗滤液中溶解性有机物(DOM)占有有机物总量的85%以上,DOM在特定波长激发光照射下,浓度较低时发光物质与荧光强度成正比。对组合工艺DOM变化进行三维荧光分析,结果如图6所示。根据相关分类方法^[7],观察到3种DOM荧光特征峰,分别为类色氨酸物质(A峰)、可溶性微生物副产物物质(B峰)、类腐殖酸物质(C峰),其中类腐殖酸物质是大分子难降解有机物。渗滤液原液经过RBC与O/A池处理后,只有A峰荧光强度逐渐变小。研究表明^[7],缺氧条件下大量类色氨酸物质降解为小分子物质,可以为反硝化提供所需碳源。A峰荧光强度减小证明了RBC可利用原水BOD₅进行脱

氮。经过MBR过滤后,C峰几乎消失而A、B峰荧光强度也明显变小,说明大量类腐殖酸物质及部分类色氨酸物质被MBR截留。

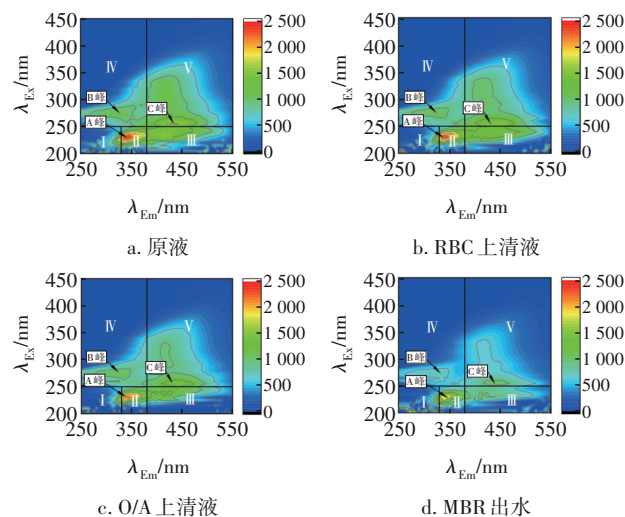


图6 DOM的三维荧光光谱

Fig.6 EEM spectra of DOM

2.5 微生物群落结构分析

2.5.1 微生物多样性分析

表2对比了不同样品微生物群落的丰富度与多样性。可以看出,经过降噪后的序列数在31 608~49 606之间,得到了300~378个ASVs。所有样品的覆盖度均在99%以上,说明采集的样品具有足够的测样深度。相比于S0、S48、S121、B48三个样品的Ace、Chao、Simpson指数降低而Shannon指数升高,说明这三个样品的群落丰富度降低,但均匀度上升。相对于S0、B121的Ace、Chao、Shannon指数升高而Simpson指数降低,说明B121丰富度与均匀度均上升,物种多样性较高。在本研究中,RBC生物膜的微生物多样性高于活性污泥。

表2 微生物群落的丰富度和多样性

Tab.2 Abundance and diversity of microbial community

样品	序列数	ASVs	Ace	Chao	Shannon	Simpson
S0	34 554	358	358.208	358.000	2.904	0.256
S48	40 218	334	334.877	334.429	3.535	0.091
S121	49 606	325	326.992	326.750	3.253	0.160
B48	31 608	300	300.000	300.000	3.613	0.096
B121	37 455	378	377.414	377.091	4.618	0.035

图7为ASVs的Venn图。可知,5个样品共有的ASVs为49个,而S0、S48、S121、B48、B121单独所有

的ASVs分别为59、19、19、19、36个,说明接种污泥后,功能菌群被筛选和淘洗,且RBC生物膜与活性污泥微生物群落结构有一定差异。

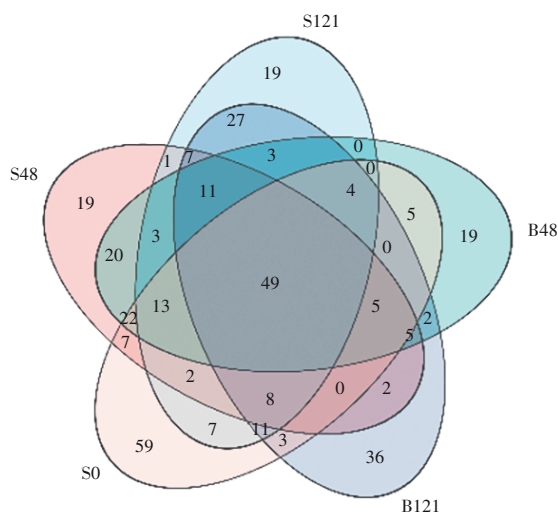


图7 ASVs的Venn图

Fig.7 Venn diagram of ASVs

2.5.2 门水平微生物菌群的变化

门水平上的微生物群落分布如图8所示。可以看出,S0的优势菌门为 *Bacteroidota* (53.63%),而S48、S121、B48、B121的优势菌门均为 *Proteobacteria* (56.90%、54.62%、49.92%、59.11%)。 *Proteobacteria* 与短程硝化密切相关,优势菌门的变化保证了短程硝化的稳定运行。5个样品中, *Bacteroidota* 的相对丰度由53.63%(S0)分别降至17.65%、33.29%(S48、B48)和1.40%、1.25%(S121、B121),而 *Firmicutes* 的相对丰度明显升高,由不到1%升高至11.52%、4.39%(S121、B121)。有研究表明, *Bacteroidota* 对高盐度环境的适应性有限^[8],并且在低C/N条件下 *Firmicutes* 与 *Bacteroidota* 存在竞争关系^[9]。

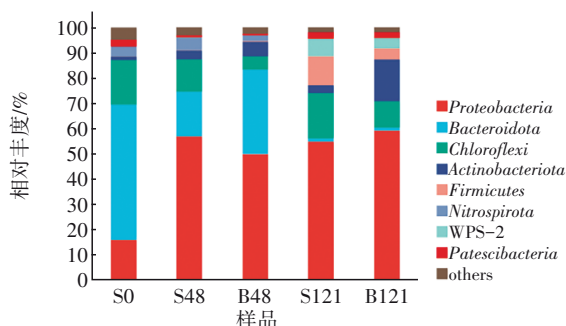


图8 门水平上的微生物群落分布

Fig.8 Microbial community at phylum level

2.5.3 属水平微生物菌群的变化

为了进一步了解系统微生物群落的组成和演

化,对微生物群落在属水平上的分布进行分析,结果见图9(丰度由大到小排序后前30属),S0的优势菌属为 *norank_f_norank_o_norank_c_SJA-28*,与 *Hyphomicrobium*(甲醇反硝化菌)、MM2及 *Moheibacter* 均为反硝化菌^[10-11]。其中 *norank_f_norank_o_norank_c_SJA-28* 在有限BOD₅环境下适应性差^[10],该菌属的相对丰度由50.96%(S0)显著降低至1%以下(S48、S121、B48、B121)。MM2和 *Moheibacter* 在S48中的相对丰度分别为36.71%、11.40%,在B48中为34.51%、27.74%,在S0、S121、B121中这两种菌属的相对丰度均小于1%。 *Hyphomicrobium* 的相对丰度由4.24%(S0)升高至8.92%、8.45%(S48、B48)及39.06%、16.96%(S121、B121)。优势反硝化菌属的变化说明在第48天短程硝化启动成功时外加甲醇没有被有效利用,而通过在RBC投加甲醇后系统成功富集了 *Hyphomicrobium*,这一结果与图2(b)一致。

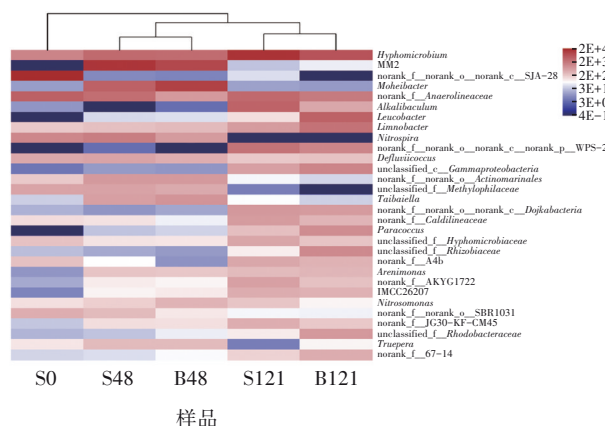


图9 属水平丰度热图

Fig.9 Heatmap of genus-level abundance

norank_f_Anaerolineaceae 以往通常被认为是一种厌氧功能菌^[12],但在最近的研究中,该菌属被认为是一种AOB,且在高氨氮环境下可能成为系统中主要的AOB^[13]。 *norank_f_Anaerolineaceae* 在S0、S48、B48、S121、B121中的相对丰度分别为11.81%、8.09%、2.28%、9.11%、5.48%,AOB菌属 *Nitrosomonas* 相对丰度均低于1%,说明 *norank_f_Anaerolineaceae* 可能是系统中主要AOB。此外,NOB菌属 *Nitrospira* 在S0、S48、B48中的相对丰度分别为3.85%、5.00%、2.26%,而在S121、B121中相对丰度均低于0.1%,这说明第121天NOB已经被完全淘洗出系统。

3 结论

利用RBC-O/A-MBR组合工艺处理晚期垃圾渗

滤液,通过控制溶解氧在0.3~0.7 mg/L及FA、FNA对NOB的联合抑制成功启动短程硝化。启动阶段较高的FNA对以亚硝态氮为基质的反硝化存在抑制作用,将甲醇投加点调至RBC以后,系统反硝化效率得到了提升。最后在A池按C/N=1.6投加甲醇,组合工艺实现了高效脱氮,TINRE为95.42%~99.02%。组合工艺的COD平均去除率为36.07%,对COD的去除主要依靠MBR超滤膜的截留作用,COD截留率为60%。高通量测序结果表明,第121天NOB被淘汰出系统,norank_f__Anaerolineaceae可能是系统中的优势AOB。此外,通过在RBC投加甲醇成功富集了甲醇反硝化菌*Hyphomicrobium*。

参考文献:

- [1] CAPODICI M, CORSINO S F, DI TRAPANI D, *et al.* Achievement of partial nitrification under different carbon-to-nitrogen ratio and ammonia loading rate for the co-treatment of landfill leachate with municipal wastewater [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2019, 149: 107229.
- [2] 孙洪伟,王淑莹,张树军,等. 高氮渗滤液短程深度脱氮及反硝化动力学[J]. *环境科学*, 2010, 31(1): 129-133.
- SUN Hongwei, WANG Shuying, ZHANG Shujun, *et al.* Advanced nitrogen removal via nitrite from landfill leachate with high nitrogen concentration and kinetics of denitrification[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(1): 129-133(in Chinese).
- [3] CHANG M D, LIANG B R, ZHANG K, *et al.* Simultaneous shortcut nitrification and denitrification in a hybrid membrane aerated biofilms reactor (H-MBfR) for nitrogen removal from low COD/N wastewater [J]. *Water Research*, 2022, 211: 118027.
- [4] HU X L, SONG J Y, JI Y T, *et al.* Stable partial nitrification of mature landfill leachate in a continuous flow bioreactor: long-term performance, microbial community evolution, and mechanisms[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2023, 34(11): 108284.
- [5] LOU J Q, YANG D Y, SUN P D. Effect of free nitrous acid as inhibitor on denitrification process [J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2015, 14(2): 235-242.
- [6] ELFILALI N, ESSAFI N, ZAIT M, *et al.* Effectiveness of membrane bioreactor/reverse osmosis hybrid process for advanced purification of landfill leachate [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2021, 240: 24-32.
- [7] LIU J B, ZHANG P Y, TIAN Z T, *et al.* Pollutant removal from landfill leachate via two-stage anoxic/oxic combined membrane bioreactor: insight in organic characteristics and predictive function analysis of nitrogen-removal bacteria [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 317: 124037.
- [8] XU A, YU D S, QIU Y L, *et al.* A novel process of salt tolerance partial denitrification and anammox (ST-PDA) for treating saline wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 345: 126472.
- [9] WANG J, WANG H, ZHANG R N, *et al.* Variations of nitrogen-metabolizing enzyme activity and microbial community under typical loading conditions in full-scale leachate anoxic/aerobic system [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 351: 126946.
- [10] HE X J, SHI S H, CAO M, *et al.* Achieving intensified nitrogen removal and vivianite recovery from sludge digester liquor in two-stage partial nitrification-electrolysis anammox system [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 474: 145841.
- [11] LI Y C, MA J, YONG X Y, *et al.* Effect of biochar combined with a biotrickling filter on deodorization, nitrogen retention, and microbial community succession during chicken manure composting [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 343: 126137.
- [12] ZHU P, WANG Y P, SHI T T, *et al.* Intertidal zonation affects diversity and functional potentials of bacteria in surface sediments: a case study of the Golden Bay mangrove, China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 130: 159-168.
- [13] ZHAO J, DONG X, SU H, *et al.* Rapid start-up of PN/A process and efficient enrichment of functional bacteria: a novel aerobic-biofilm/anaerobic-granular nitrogen removal system (OANRS) [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 380: 128944.

作者简介:郭罗秀(1991-),男,广东肇庆人,大学本科,助理工程师,主要研究方向为污水生物处理技术。

E-mail:1277838588@qq.com

收稿日期:2024-01-04

修回日期:2024-01-25

(编辑:任莹莹)