

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.07.015

低溶解氧下腐殖土生化系统处理农村污水的效能

都正良¹, 钟 娅², 张 辉², 赵 旭², 王杰康², 王国鹏²,
余 登², 付 鹏², 欧阳奎², 赵风斌¹, 柴晓利¹

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 云南省城乡建设投资有限公司,
云南 昆明 650500)

摘要: 针对传统 AO_N 工艺曝气量大、能耗高等问题,开发出腐殖土生化系统(HSBS)并处理模拟农村污水,考察了HSBS与 AO_N 工艺在污染物去除效能、污泥特征及微生物群落方面的差异。结果表明,HSBS在低溶解氧(DO为0.3~0.7 mg/L)条件下对污水中COD、 NH_4^+-N 和TN的去除率分别为97.1%、91.2%、84.4%,相应出水浓度分别为11.0、3.5和6.3 mg/L,其中对TN的去除率较 AO_N 工艺提升了12.6%,表现出良好的处理效果。高通量测序结果显示,与 AO_N 工艺相比,HSBS具有更高的微生物群落丰富度和多样性,并且该系统中存在 *Proteobacteria*、*Patescibacteria*、*Chloroflexi* 和 *Bacteroidota* 等多种优势菌门,在生化脱氮过程中发挥着重要作用,增强了HSBS对污染物的去除效能。可见,HSBS可替代 AO_N 处理农村污水,为农村污水高效低耗处理提供了技术和理论参考。

关键词: 农村污水; 脱氮; 腐殖土生化系统; 低溶解氧; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)07-0102-08

Performance of Humus Soil Biochemical System in Treating Rural Wastewater under Low Dissolved Oxygen Conditions

DU Zheng-liang¹, ZHONG Ya², ZHANG Hui², ZHAO Xu², WANG Jie-kang²,
WANG Guo-peng², YU Deng², FU Peng², OUYANG Kui², ZHAO Feng-bin¹,
CHAI Xiao-li¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Yunnan Urban & Rural Construction Investment Co. Ltd., Kunming 650500, China)

Abstract: To address the issues of high aeration requirements and energy consumption associated with the traditional anoxic-oxic (AO_N) process, a humus soil biochemical system (HSBS) was developed for the treatment of simulated rural wastewater. This study investigated the differences between HSBS and the AO_N process in terms of pollutant removal efficiency, sludge characteristics, and microbial community. Under low dissolved oxygen conditions (0.3 mg/L to 0.7 mg/L), the HSBS achieved removal efficiencies of 97.1%, 91.2%, and 84.4% for COD, NH_4^+-N , and TN in wastewater, respectively, with corresponding effluent concentrations of 11.0 mg/L, 3.5 mg/L, and 6.3 mg/L. Compared to the AO_N process, the TN removal efficiency was enhanced by 12.6%, demonstrating superior treatment performance. The results of high-throughput sequencing revealed that the HSBS exhibited greater microbial community richness and

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(51978495); 云南省城乡建设投资有限公司委托项目(04002531490)

通信作者: 柴晓利 E-mail: xlchai@tongji.edu.cn

diversity in comparison to the AO_N process. Notably, several dominant bacterial phyla were identified, including *Proteobacteria*, *Patascibacteria*, *Chloroflexi*, and *Bacteroidota*. These microorganisms played a crucial role in biochemical nitrogen removal, thereby enhancing the pollutant removal efficiency of the HSBS. The HSBS has the potential to replace AO_N , offering a technical and theoretical reference for the efficient and low-consumption treatment of rural wastewater.

Key words: rural wastewater; nitrogen removal; humus soil biochemical system; low dissolved oxygen; microbial community

我国农村污水具有水量大、排放分散等特点,且污水收集处理设施不完善,导致我国农村污水处理率不足35%,其余大量污水被直接排入周边环境,造成地方生态环境污染严重,危及农村居民生产和生活用水安全^[1]。传统的农村污水处理方法包括化粪池、人工湿地和稳定塘等,但是这些技术存在占地面积大、处理效率低等问题,限制了其应用^[2]。为了提高农村污水的处理效率,引进了AAO、 AO_N 、SBR等先进的生物处理技术。其中, AO_N 工艺具有流程简单、基建费用低、除氮效率高等优势,但 AO_N 通常需要较高的溶解氧浓度(DO为2~5 mg/L)来维持好氧区的生化降解反应,导致工艺运行能耗较高,因此不适用于经济相对落后的农村地区。

腐殖土生物功能材料是一种利用天然腐殖土壤制成的生物材料,通常被添加到活性污泥工艺回流阶段的活化槽中,在低DO(0.3~0.5 mg/L)条件下进行培养和活化,改变污泥性质和微生物群落,达到提高系统脱氮除磷性能并降低污泥产率的目的^[3]。因此,如果直接在反应器内接种和培养腐殖土中特殊兼性土壤菌种以替代传统活性污泥处理农村污水,可能会降低系统的DO浓度,减少曝气能耗和成本。但是,当前关于腐殖土自身携带功能细菌的脱氮效能及机制鲜有报道。

基于此,结合中试案例开发了腐殖土生化系统(HSBS),其采用腐殖土生物功能材料作为接种物,通过调控反应器内DO浓度来培养、驯化、富集腐殖土中具有特定代谢功能的活性微生物,从而实现对污染物的高效降解。笔者以模拟农村污水为处理对象,考察HSBS对污水中污染物的去除效能,并与传统 AO_N 工艺进行比较;在HSBS稳定运行以后,解析HSBS的污泥特性;最后,探究HSBS和 AO_N 体系微生物群落的差异性,揭示HSBS工艺的高效脱氮机制。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置设计为一体式的HSBS和传统 AO_N 反应器,均以有机玻璃制成,具体如图1所示。

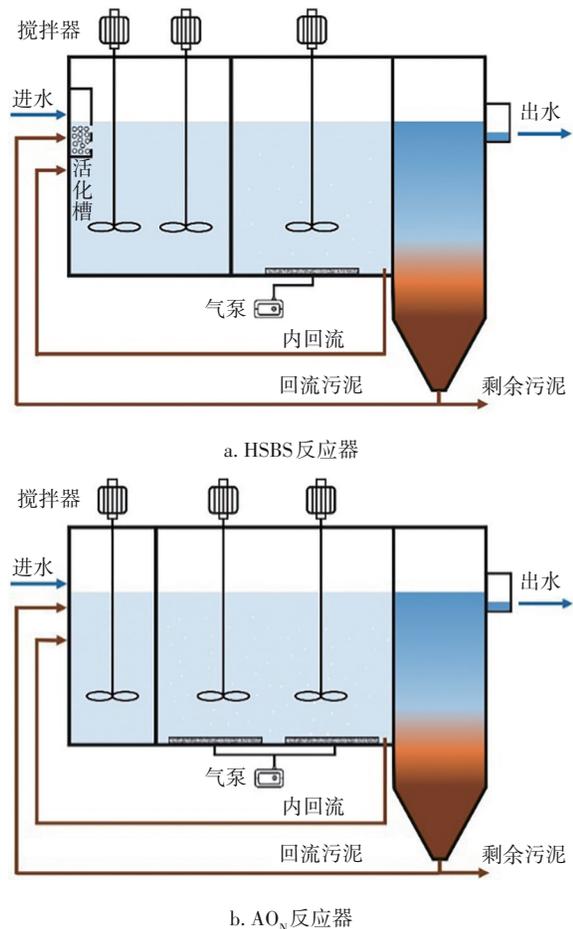


图1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

HSBS和 AO_N 反应器的外形和大小基本相同,生化池总有效容积均为12.3 L,但是生化池的结构存在差异。HSBS缺氧区和曝气区的有效体积比为1:1,而传统 AO_N 反应器缺氧区和曝气区的有效体积比为1:2.76。此外,HSBS的缺氧区内置了一个长×

宽×高=4 cm×4 cm×15 cm的活化槽,用于腐殖土壤菌群的活化富集。二沉池采用竖流式沉淀池,底部泥斗呈方锥形,设计池容为3.8 L。缺氧区和曝气区均设置搅拌器,以确保系统污泥处于均匀悬浮状态;曝气区布设微孔曝气盘,采用气泵为生化反应提供氧气。

1.2 实验材料

HSBS工艺所用腐殖土生物功能材料呈灰褐色,圆柱状,平均直径为30 mm,长为55 mm,质量平均为45 g/个左右,属于富含土壤微生物和腐殖质的载体。所用轻石呈淡黄色,不规则块状,含有多种微生物生长不可缺少的微量元素,其疏松多孔性结构可为微生物的增殖提供栖息空间。对腐殖土生物功能材料和轻石进行破碎处理,其中部分破碎样品过50目筛后备用。接种于传统AO_N反应器的活性污泥为上海市某污水厂二沉池回流污泥,该污水厂运行情况良好。取回活性污泥后,过40目筛去除大颗粒杂质,加入少许营养物质闷曝3 d后,再接种于AO_N反应器中进行培养和驯化,作为对照组。

1.3 实验方法

HSBS在运行之前不用接种活性污泥,而是以1:1的质量比投加腐殖土生物功能材料和轻石作为接种物,具体步骤如下:在生化池投加72 g腐殖土生物功能材料和72 g轻石碎块,同时向活化槽内投加12 g腐殖土生物功能材料和12 g轻石碎块,注入约6 L的脱氯自来水后,以3 L/min通气量曝气预处理3 d以活化土壤微生物。3 d后,通过蠕动泵向两个反应器中同时进水,以调试反应器和驯化活性微生物。此外,为提升腐殖土功能材料中土壤微生物的接种率,分别在进水后第7、15天投加30 g腐殖土功能材料和30 g轻石粉末,促进土壤微生物生长富集的同时抑制其他微生物生长。传统AO_N反应器直接接种1.2节中已处理的活性污泥,污泥浓度控制在3 200 mg/L左右。两组反应器采用同一水箱进水,平行运行。

两组反应器的设计处理量为20 L/d,水力停留时间为14.7 h,控制内回流比为300%、外回流比为75%,HSBS反应器的外回流污泥最终汇于内置活化槽中。值得注意的是,在系统正式运行前,需对反应器进行调试。在调试期,反应器进水量分为7.5和15 L/d两个阶段,每个阶段运行7~10 d。调试结束后,反应器开始满负荷运行,每天监测并调控曝

气池DO浓度。其中,传统AO_N反应器曝气池DO浓度控制为3.0~5.5 mg/L;HSBS曝气池DO浓度在调试期控制为1~2 mg/L,满负荷运行后控制为0.3~0.7 mg/L。两组反应器缺氧池的DO浓度均小于0.2 mg/L。反应器满负荷运行期间,每2 d检测一次出水水质指标,包括COD、NH₄⁺-N、TN、pH;满负荷运行40 d后,分析两组系统污泥的微生物群落情况。

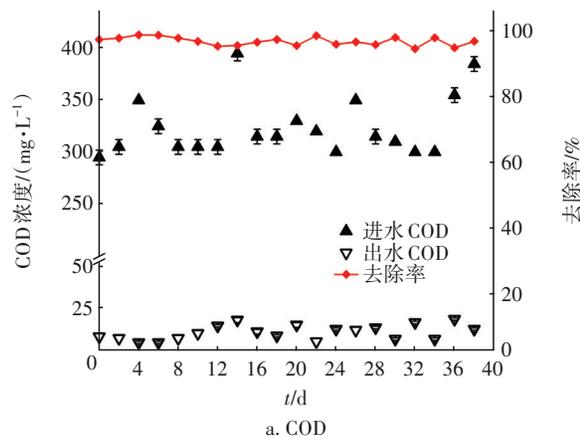
1.4 分析项目和方法

COD采用M型COD检测盒快速消解分光光度法测定,NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法测定,TN采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定,DO采用便携式溶解氧仪测定,pH采用pH计测定,污泥絮体粒径采用激光粒度仪测定。污泥样品经冷冻干燥后,利用扫描电子显微镜(SEM)观察泥样形貌特征;将干泥与KBr以2:100的质量比混合研磨压片后,利用傅里叶红外光谱(FTIR)仪分析泥样表面官能团。依托上海美吉生物医药科技有限公司对稳定运行阶段的生化污泥开展基于Illumina MiSeq的细菌16S rRNA高通量测序分析,PCR扩增引物包括上游引物338F(ACTCCTACGGGAGGCAGCAG)和下游引物806R(GGACTACHVGGGTWTCTAAT)。

2 结果与分析

2.1 对污染物的去除效果

传统AO_N工艺对模拟农村污水中污染物的去除效果见图2。从图2(a)可知,传统AO_N工艺对COD的去除率基本稳定在95%以上,出水COD浓度低于20 mg/L,这可能是因为采用了生化性较好的葡萄糖作为碳源,提高了污水的可生化性。但是在运行初期对NH₄⁺-N和TN的去除效果较差,并未达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放标准,见图2(b)、(c)。



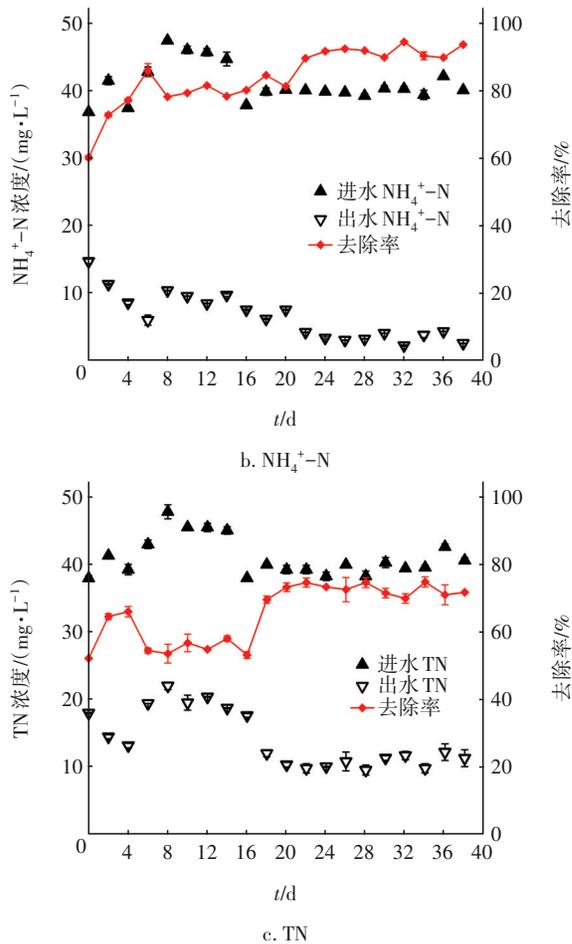


图2 传统 AO_N 工艺对模拟农村污水中污染物的去除效果
Fig.2 Removal performance of traditional AO_N process on pollutants in simulated rural wastewater

同时从图2还可以发现,随着 AO_N 反应器的持续运行,活性污泥中硝化/反硝化细菌生长增殖,系统脱氮效果逐渐提高。38 d后, AO_N 工艺对模拟农村污水中 NH_4^+-N 和TN的去除率分别为 $(93.7 \pm 0.06)\%$ 和 $(71.8 \pm 0.24)\%$,相应出水浓度分别为 (2.5 ± 0.03) 和 (11.4 ± 1.24) mg/L 。

在DO为0.3~0.7 mg/L 的条件下,HSBS反应器的运行效果如图3所示。HSBS反应器由于在运行初期缺少充足的活性微生物,因此对污水中COD、 NH_4^+-N 和TN的去除效果较差。0~10 d,HSBS对COD、 NH_4^+-N 和TN的平均去除率仅分别为 $(91.0 \pm 4.00)\%$ 、 $(29.4 \pm 5.54)\%$ 和 $(27.3 \pm 1.63)\%$,相应的出水浓度分别为 (29.2 ± 11.57) 、 (28.9 ± 1.24) 和 (30.0 ± 2.91) mg/L 。随着反应器的持续运行,腐殖土中兼性功能微生物得以驯化和富集,HSBS对污染物的去除效果快速提高。38 d后,HSBS对污水中COD、 NH_4^+-N 和TN的去除率分别达到 $(97.1 \pm$

$0.03)\%$ 、 $(91.2 \pm 0.19)\%$ 和 $(84.4 \pm 3.33)\%$,相应出水浓度分别为 (11.0 ± 0.14) 、 (3.5 ± 0.07) 和 (6.3 ± 0.28) mg/L 。相比传统 AO_N 工艺,HSBS在稳定运行阶段的去除效果明显提升,尤其是对TN的去除率提升了12.6%。

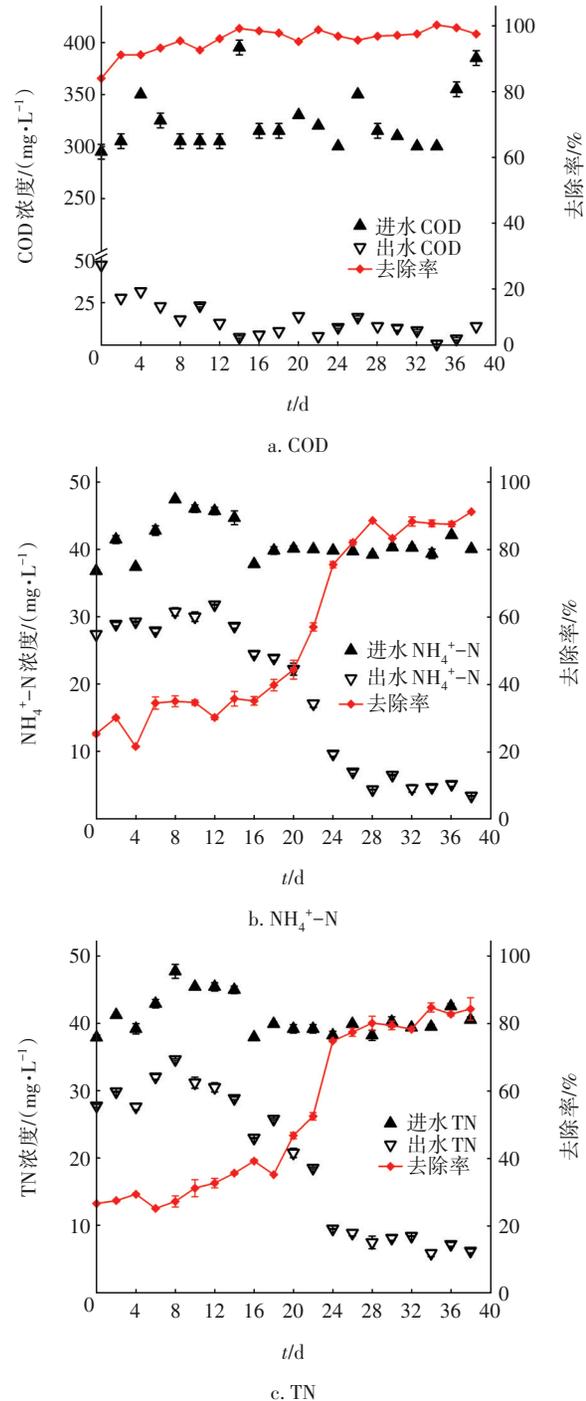


图3 HSBS对模拟农村污水中污染物的去除效果
Fig.3 Removal performance of HSBS on pollutants in simulated rural wastewater

总之,在低DO条件下,HSBS工艺对农村污水

的净化效能优于传统 AO_N 工艺,表现出良好的应用潜力。因此,HSBS有可能替代传统 AO_N 处理农村污水,可降低工艺曝气所需的能耗和成本。

2.2 活性污泥特征

2.2.1 污泥形态特征

HSBS 和 AO_N 体系污泥的形态特征如图 4 所示。图 4(a)为 HSBS 接种腐殖土生物功能材料和轻石经 3 d 曝气处理后的悬浮颗粒形态,可以发现接种材料表面粗糙、多孔,结构疏松,为不规则形状颗粒,这些结构能够为 HSBS 体系中微生物的生长和繁殖提供合适的栖息空间。两组反应器正常运行 38 d 后,HSBS 和 AO_N 体系中污泥絮体的 SEM 结果分别如图 4(b)、(c)所示,相比 AO_N 体系污泥的片状絮体结构,从 HSBS 污泥絮体中可以观察到大量的球菌和丝状菌,彼此缠绕交织,有利于提高污泥的反应活性,同时也增大了污泥絮体的粒径。从图 4(d)可以看出,HSBS 污泥絮体的平均粒径为 $186 \mu\text{m}$,远大于 AO_N 体系的污泥粒径,这有利于改善污泥的沉降性能^[4]。上述结果表明,接种的腐殖土生物功能材料和轻石有利于系统形成微生物活性和沉降性能良好的污泥絮体,提升 HSBS 工艺的处理效能。

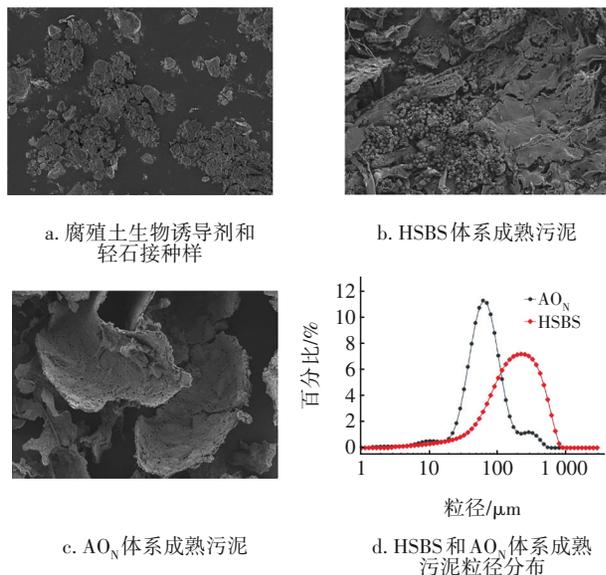


图 4 HSBS 和 AO_N 体系污泥的形态特征
Fig.4 Morphological characteristics of sludge from HSBS and AO_N systems

2.2.2 污泥表面官能团分析

HSBS 和 AO_N 反应器稳定运行阶段污泥的 FTIR 图谱如图 5 所示。可知,HSBS 和 AO_N 体系污泥表面特征峰的趋势基本一致,表明两组反应器的污泥含

有相似的官能团。

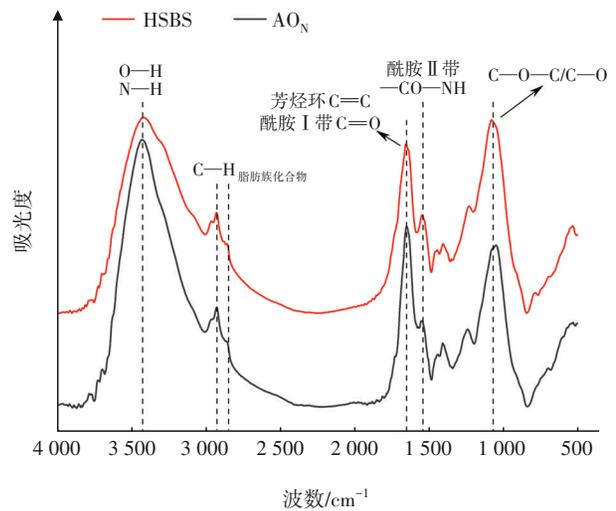


图 5 HSBS 和 AO_N 体系污泥的 FTIR 图谱

Fig.5 FTIR spectrum of sludge from HSBS and AO_N systems

在波数为 3420 、 1650 (酰胺 I 带) 和 1538 (酰胺 II 带) cm^{-1} 处均存在显著的酰胺型特征峰,这主要与污泥中蛋白质类和氨基酸类物质有关^[5]。此外, 3420 cm^{-1} 处的吸收峰还可能是由于多糖和醇类物质的 O—H 键伸缩振动引起的。在波数为 2927 和 2849 cm^{-1} 处的特征峰可能产生于脂肪族化合物亚甲基的 C—H 键伸缩振动^[5]; 1650 cm^{-1} 处的吸收峰与芳烃环中 C=C 键和酰胺 I 带中 C=O 键的拉伸振动有关^[5-6]; 位于 1066 cm^{-1} 附近的吸收峰归因于多糖类物质中 C—O 键和 C—O—C 键的伸缩振动^[5]。相比而言,两个体系污泥 FTIR 吸收峰的峰型相似,但是 HSBS 污泥的特征峰强度整体弱于 AO_N 的,暗示 HSBS 污泥中的有机质含量低于 AO_N 污泥,这有利于减少剩余污泥产量,降低污泥处理处置成本。

2.3 微生物群落结构

2.3.1 微生物多样性分析

图 6 展示了 HSBS 和 AO_N 体系微生物扩增子序列变体数 (ASV) 分布的 Venn 图。可以看出,HSBS 和 AO_N 体系中的 ASV 分别为 904 和 858,共享 ASV 为 96,表明 HSBS 和 AO_N 体系的 ASV 存在较大的差异性。其中,HSBS 体系的 ASV 高于 AO_N 体系,表明腐殖土生物功能材料作为接种物可以增加处理系统的 ASV,提高微生物的多样性。

通过 Alpha 多样性来进一步分析 HSBS 与 AO_N 体系微生物群落丰富度和多样性的差异,结果见表

1。两种体系污泥样品的覆盖率均高于99%,表明所获得的序列能够覆盖大部分微生物,测序结果可以代表样本中微生物的真实情况^[2]。Shannon指数和Simpson指数均可以反映群落的多样性,Shannon指数越大表明微生物群落多样性越高,而Simpson指数越大表明微生物群落多样性越低^[7]。由表1可知,HSBS体系污泥微生物的多样性高于AO_N体系。此外,HSBS体系污泥的Ace指数和Chao指数均大于AO_N体系,表明HSBS体系污泥的微生物更加丰富,这与上述ASV的结果一致。因此,利用腐殖土生物功能材料作为接种物培养污泥系统可以提高微生物的多样性和丰富度,提高污泥系统活性。

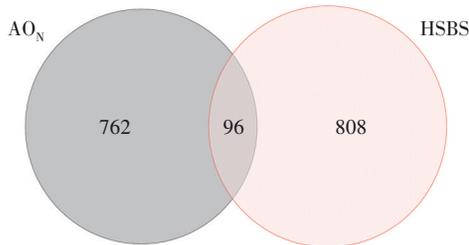


图6 HSBS和AO_N体系微生物ASV分布的Venn图

Fig.6 Venn diagram for ASV distribution of microorganisms in HSBS and AO_N systems

表1 污泥的Alpha多样性指数

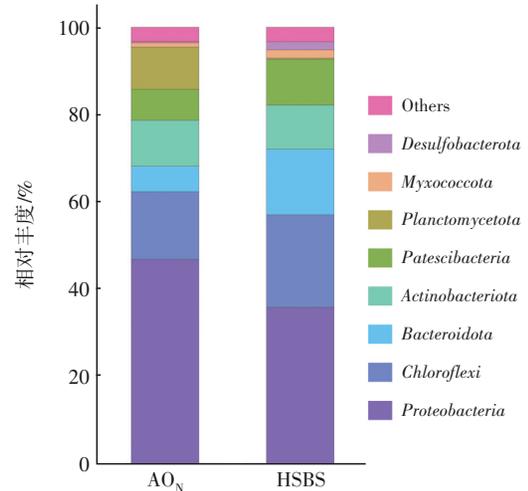
Tab.1 Alpha diversity index for sludge

项目	Ace指数	Chao指数	Shannon指数	Simpson指数
AO _N	901.68	880.15	4.89	0.021
HSBS	919.38	907.84	5.04	0.019

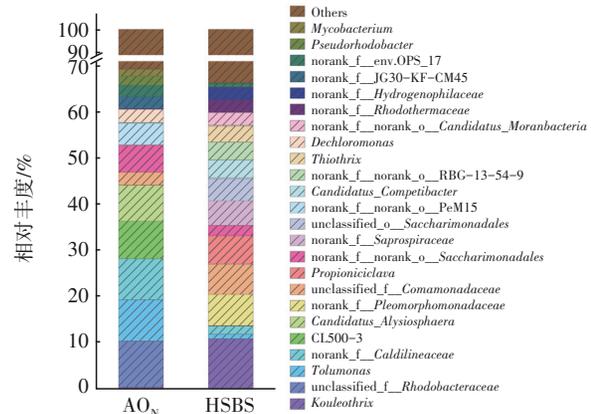
2.3.2 微生物群落组成分析

HSBS和AO_N体系污泥在微生物群落门水平上的分布结果如图7(a)所示。可以看出,两种体系的微生物群落结构存在明显差异。其中,AO_N体系的优势菌门主要为变形菌门(*Proteobacteria*)、绿弯菌门(*Chloroflexi*)、放线菌门(*Actinobacteriota*)和浮霉菌门(*Planctomycetota*),相对丰度之和超过80%,是活性污泥系统中的常见菌门^[2,8]。据报道,变形菌门和绿弯菌门中含有多种反硝化细菌,可参与脱氮生化过程^[2,8-9]。HSBS体系中的高丰度菌门主要包括变形菌门、绿弯菌门、拟杆菌门(*Bacteroidota*)、放线菌门和鬍骨菌门(*Patescibacteria*)。除了变形菌门和绿弯菌门以外,鬍骨菌门和拟杆菌门中很多细菌在反应器中会起到反硝化作用^[10],这表明HSBS体系

中含有较高丰度的脱氮细菌,有利于提高HSBS工艺的脱氮效能。此外,绿弯菌门还会参与有机物的降解,其丝状结构有助于污泥絮体的形成^[8-9],这与SEM的结果相符合。放线菌门的生长可能与污泥的沉降性能有关^[10],其在HSBS体系中相对丰度较低,有利于提升污泥的沉降性能。



a. 门水平



b. 属水平

图7 反应器中污泥的微生物群落结构

Fig.7 Microbial community structure of sludge in reactors

HSBS和AO_N体系污泥在微生物群落属水平上的组成见图7(b)。可知,两种体系的群落组成和丰富度存在较大差异。其中,在AO_N体系中存在的优势菌属主要包括 unclassified_f_Rhodobacteraceae、*Tolumonas*、norank_f_Caldilineaceae、CL500-3、*Candidatus_Alysiosphaera*和norank_f_norank_o_Saccharimonadales,其相对丰度分别为9.9%、9.0%、8.8%、8.2%、7.8%、5.8%。*Tolumonas*属于变形菌门,其对脱氮过程具有重要的作用^[11];norank_f_Caldilineaceae属于绿弯菌门,其被发现存在于多种

反应器中,可以参与反硝化反应^[12]。此外,norank_f_Caldilineaceae和Candidatus_Alysiosphaera作为丝状菌,可能会对污泥膨胀和沉降性产生影响^[13-14]。HSBS的优势菌属主要包括Kouleothrix、norank_f_Pleomorphomonadaceae、unclassified_f_Comamonadaceae、Propioniciclava和norank_f_Saprosiraceae,其相对丰度分别为10.9%、6.8%、6.5%、6.1%、5.3%。Kouleothrix属于绿弯菌门,为污水处理系统中常见的丝状菌,尽管该菌属与污泥膨胀有关,但是对污水中蛋白质、糖类、细胞壁碎片等有机物的降解具有重要作用^[15];unclassified_f_Comamonadaceae属于变形菌门,可在好氧条件下将 NH_4^+-N 氧化为 NO_2^--N ^[16];兼性厌氧菌Propioniciclava可以将糖类物质转化为小分子乙酸和丙酸,为反硝化反应提供优质碳源^[17];norank_f_Saprosiraceae属于拟杆菌门,能通过胞外酶分解蛋白质实现对胞外聚合物的降解^[18],这与FTIR的结果相一致。此外,HSBS体系中还含有Candidatus_Competibacter、Thiothrix等多种反硝化细菌^[19]。因此,HSBS工艺表现出优于传统 AO_N 工艺的脱氮效果。

3 结论

① 以腐殖土生物功能材料和轻石为接种物开发的HSBS工艺在低DO(0.3~0.7 mg/L)条件下对污水中COD、 NH_4^+-N 和TN的去除率分别为97.1%、91.2%和84.4%,相应出水浓度分别为11.0、3.5和6.3 mg/L,表现出良好的处理效果,特别是对TN的去除率较传统 AO_N 工艺提升了12.6%。

② 相比传统 AO_N 污泥,HSBS污泥表面官能团种类无明显改变,但其污泥絮体结构复杂,粒径较 AO_N 污泥增加,有利于提升污泥活性和沉降性。

③ HSBS中微生物的丰富度和多样性均高于 AO_N 工艺,展现了HSBS微生物群落结构的特异性,其存在具有特殊功能的优势菌属,可提高微生物群落的丰富度和多样性。HSBS中存在Proteobacteria、Patescibacteria、Chloroflexi和Bacteroidota等多种优势菌门,在生化脱氮过程中发挥着重要作用,增强了系统对污水中污染物的去除效能。

参考文献:

[1] JIANG W Q, MA Y G, NIE Z B, et al. Improving nitrogen and phosphorus removal and sludge reduction in new integrated sewage treatment facility by adjusting

biomass concentration [J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 50: 103203.

[2] 赵婷婷,陈旺,杨晨曦,等.低溶解氧条件下泥藻共生SBR对农村污水处理效果与微生物特性[J].环境工程学报,2023,17(2):655-665.

ZHAO Tingting, CHEN Wang, YANG Chenxi, et al. Performance and microbial characteristics of co-culture of activated sludge and algae in SBR for rural sewage treatment under low dissolved oxygen conditions [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(2): 655-665(in Chinese).

[3] YAN X, LI B Q, LEI F, et al. Enhanced deodorization and sludge reduction in situ by a humus soil cooperated anaerobic/anoxic/oxic (A^2O) wastewater treatment system [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(16): 15963-15969.

[4] 刁思圆,宫徽,况前,等.铝盐混凝剂强化絮状厌氧氨氧化污泥颗粒化研究[J].水处理技术,2023,49(6):79-83.

DIAO Siyuan, GONG Hui, KUANG Qian, et al. Aluminum salt coagulant improves granular of anammox sludge [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(6): 79-83 (in Chinese).

[5] 王朝朝,朱书浩,武新娟,等.SNAD-MBR工艺启动过程中颗粒污泥特性变化及其对膜污染的影响[J].环境工程学报,2022,16(12):3945-3955.

WANG Zhaozhao, ZHU Shuhao, WU Xinjuan, et al. Changes in granular sludge characteristics and their effects on membrane fouling during start-up of SNAD-MBR process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(12): 3945-3955(in Chinese).

[6] 赫俊国,曾忆雯,刘新平,等.NZVI/AC基好氧颗粒污泥快速培养及污水处理效能[J].中国给水排水,2023,39(7):8-16.

HE Junguo, ZENG Yiwen, LIU Xinping, et al. Rapid cultivation of NZVI/AC-based aerobic granular sludge and its wastewater treatment performance [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(7): 8-16(in Chinese).

[7] 梁一帆,潘增锐,喻盛华,等.MBBR污水生化处理系统中泥膜的生物群落分析[J].中国给水排水,2023,39(23):15-22.

LIANG Yifan, PAN Zengrui, YU Shenghua, et al. Microbial community of sludge and biofilm in a moving bed biofilm reactor [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(23): 15-22(in Chinese).

[8] 李啸川,闫昊,苑泉,等.城市污水双泥龄复合脱氮

- 工艺的脱氮机理分析[J]. 中国给水排水, 2023, 39(9): 10-17.
- LI Xiaochuan, YAN Hao, YUAN Quan, *et al.* Analysis on denitrification mechanism of double-SRT hybrid denitrification process for municipal wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(9): 10-17 (in Chinese).
- [9] BOVIO-WINKLER P, GUERRERO L D, ERIJMAN L, *et al.* Genome-centric metagenomic insights into the role of *Chloroflexi* in anammox, activated sludge and methanogenic reactors [J]. *BMC Microbiology*, 2023. DOI:10.1186/s12866-023-02765-5.
- [10] 王金鑫, 魏强, 王玥, 等. 复合填料强化SBR脱氮效能及微生物群落结构研究[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(10): 86-92.
- WANG Jinxin, WEI Qiang, WANG Yue, *et al.* Study on nitrogen removal efficiency and microbial community structure of SBR enhanced by composite filler [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(10): 86-92(in Chinese).
- [11] QU W L, SUO L T, LIU R N, *et al.* Influence of temperature on denitrification and microbial community structure and diversity: a laboratory study on nitrate removal from groundwater [J]. *Water*, 2022. DOI: 10.3390/w14030436.
- [12] TIAN T, ZHOU K, XUAN L, *et al.* Exclusive microbially driven autotrophic iron-dependent denitrification in a reactor inoculated with activated sludge[J]. *Water Research*, 2020, 170:115300.
- [13] LI T, LI Y, LI M, *et al.* Effects of sulfamethoxazole on nitrogen transformation and antibiotic resistance genes in short-cut nitrification and denitrification process treating mariculture wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 454:140517.
- [14] 陈希, 胡彬, 张瑞峰, 等. 表观气速对除磷污泥颗粒化性能及代谢特征的影响[J]. 中国环境科学, 2024, 44(2):686-698.
- CHEN Xi, HU Bin, ZHANG Ruifeng, *et al.* Effect of superficial gas velocity on the granulation and metabolic characteristics of phosphorus removal sludge [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44 (2) : 686-698 (in Chinese).
- [15] CORREA-GALEOTE D, ROIBAS-ROZAS A, MOSQUERA-CORRAL A, *et al.* Revealing the dissimilar structure of microbial communities in different WWTPs that treat fish-canning wastewater with different NaCl content[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 44:102328.
- [16] LIANG Y F, PAN Z R, FENG H B, *et al.* Biofilm coupled micro-electrolysis of waste iron shavings enhanced iron and hydrogen autotrophic denitrification and phosphate accumulation for wastewater treatment [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(6):108959.
- [17] PAN W L, OUYANG H L, TAN X Q, *et al.* Anaerobic dynamic membrane bioreactors for synthetic blackwater treatment under room temperature and mesophilic conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 355: 127295.
- [18] HE J G, XU J, YU H R. Performance and bacterial community dynamics of aerobic granular sludge working at low temperature enhanced by melamine framework embedding [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(2):105156.
- [19] MA J W, JI Y N, FU Z D, *et al.* Performance of anaerobic/oxic/anoxic simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal system overwhelmingly dominated by *Candidatus_Cometibacter*: effect of aeration time [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 384:129312.

作者简介:都正良(1995-),男,湖北襄阳人,博士研究生,主要研究方向为有机固废处理及农村污水生化处理。

E-mail:Duzl@tongji.edu.cn

收稿日期:2024-01-14

修回日期:2024-03-18

(编辑:任莹莹)