

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.17.018

接种菌丝球对污泥团聚性和微生物群落结构的影响

耿明月¹, 郭海娟², 马放¹, 肖霄¹, 辛俊杰¹, 隋然¹

(1. 哈尔滨工业大学环境学院 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 辽宁大学 环境学院, 辽宁 沈阳 110036)

摘要: 通过对比未接种菌丝球(空白组)和接种菌丝球(试验组)的间歇式反应器(SBR)中的污泥表面特性、微生物群体感应和微生物群落结构,全面深入地考察了接种菌丝球对污泥团聚性能的影响。结果表明,接种菌丝球增加了污泥疏水性(40%~67%)、Zeta电位(-15~-8 mV)、微生物附着性(0.5~1.7)和官能团强度,有效减小了微生物细胞之间的排斥力,有助于微生物相互聚集。此外,接种菌丝球还增强了酰基高丝氨酸内酯(AHLs)介导的微生物群体感应系统。其中,试验组的AHLs含量为101.1 ng/gMLSS,高于空白组的74.3 ng/gMLSS。微生物群落结构分析结果表明,接种菌丝球增加了反应器中微生物的多样性和丰富度,富集了具有黏附能力的功能菌及AHLs产生菌。污泥表面特性的强化、微生物群体感应的增强和功能菌的富集三者共同作用,促进了微生物之间相互团聚,形成聚集体,同时改善了SBR中的污泥沉降性能和生物质保留量。

关键词: 菌丝球; 污泥团聚性; 污泥表面特性; 微生物群体感应; 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(2022)17-0104-08

Effect of Inoculating Fungal Pellets on Sludge Agglomeration and Microbial Community

GENG Ming-yue¹, GUO Hai-juan², MA Fang¹, XIAO Xiao¹, XIN Jun-jie¹, SUI Ran¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resources and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. School of Environment, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: The surface characteristics, quorum sensing and microbial community of sludge from sequencing batch reactors (SBR) inoculated with and without fungal pellets (experimental group and blank group) were compared to comprehensively investigate the effect of inoculating fungal pellets on sludge agglomeration. The fungal pellets increased the sludge hydrophobicity (40%~67%), Zeta potential (-15 mV to -8 mV), microbial attachment (0.5~1.7) and functional group intensity in the reactor, effectively reduced the repelling force between microbial cells, and contributed to the mutual agglomeration of microorganisms. In addition, the fungal pellets enhanced the microbial quorum sensing system mediated by acyl-homoserine lactone (AHLs), and the content of AHLs in experimental group was 101.1 ng/gMLSS, which was higher than that in blank group (74.3 ng/gMLSS). Analysis of the microbial community showed that inoculating fungal pellets increased the diversity and richness of microorganisms in the reactor, and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878237); 黑龙江省“头雁”团队项目

通信作者: 马放 E-mail: mafang@hit.edu.cn

enriched the functional bacteria with adhesion and AHLs producing abilities. The improvement of sludge surface characteristics, enhancement of microbial quorum sensing and enrichment of functional bacteria promoted the agglomeration of microorganisms and formation of aggregates, and improved sludge settling performance and biomass retention in the SBR.

Key words: fungal pellet; sludge agglomeration; sludge surface characteristic; microbial quorum sensing; microbial community

菌丝球是丝状真菌萌发的菌丝相互缠绕形成的真菌颗粒,呈球状,具有多孔结构,体现了良好的载体特性,如比表面积较大、沉降性能良好、机械强度较强等。并且,菌丝球培养条件宽泛、营养需求简单、生产成本较低^[1]。更重要的是,相比化学合成材料,菌丝球绿色、环保、无二次污染,是一种环境友好型的生物载体^[2-3]。近年来,菌丝球以其独特的优势被广泛应用于生物强化领域。在生物强化过程中,直接投加游离的功能菌易随出水流失,系统稳定性差。使用菌丝球对功能菌进行固定,可克服游离功能菌易流失的问题。孙移鹿^[4]使用菌丝球固定好氧反硝化菌T13,有效强化了T13在系统中的保留量。王可^[5]研究了游离脱酚菌和固定于菌丝球上的脱酚菌在连续流反应器中的脱酚效果,发现固定后的脱酚菌具有更强的脱酚效能。然而,菌丝球载体在生物强化领域的研究多集中在固定一种或两种特定功能菌,而将菌丝球直接应用于活性污泥系统、强化混合微生物的研究鲜有报道。

将菌丝球接种在间歇式活性污泥反应器(SBR)中发现^[6-7],接种菌丝球有效增强了系统中的污泥沉降性能,强化了反应器的生物固相能力,克服了SBR在较短沉降时间条件下生物固相大量流失的问题。一般来讲,微生物相互团聚形成聚集体在污泥沉降和生物固相保留方面起着积极作用。而污泥的团聚过程十分复杂,与污泥本身的特性密切相关。其中,微生物形成聚集体最重要的是需要克服微生物细胞之间的排斥力,并发生接触或碰撞。因此,污泥疏水性、Zeta电位、微生物附着性、表面化学官能团等特性在团聚过程中起着至关重要的作用。另外,微生物的高效聚集离不开细菌之间的生态调控作用。群体感应是微生物之间主要的交流方式,其中,以酰基高丝氨酸内酯(AHLs)信号分子介导的群体感应在生物聚集体形成过程中起着重要的调控作用^[8-10]。研究表明^[11],微生物能够根据周边环

境分泌信号分子物质,通过扩散及转运蛋白质协助等作用进入细胞,并结合特异性受体蛋白质,通过调控功能基因的表达,来实现微生物相互聚集。除了污泥表面特性和微生物群体感应,微生物群落的组成在聚集过程中也发挥着重要影响。

笔者通过分析未接种菌丝球(空白组)和接种菌丝球(试验组)的SBR反应器在运行过程中的污泥形态、表面特性(疏水性、Zeta电位、化学官能团、微生物附着性)、微生物群体感应和群落结构,考察了菌丝球对污泥团聚性能的影响,以期为菌丝球在活性污泥改性与强化等领域的应用奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 菌丝球的制备

制备菌丝球所用的丝状真菌是课题组前期分离获得的黑曲霉Y3。按照文献[2]的方法制备菌丝球。首先,将黑曲霉Y3接种在固体培养基中,在30℃下培养,直至产生孢子。采用灭菌的接种环将孢子轻轻刮入无菌水中振荡混匀,制成孢子悬液。取一定量的孢子悬液加入液体培养基中并放置在摇床上,在30℃、140 r/min下培养3~5 d即可获得菌丝球。孢子固体培养基成分如下:蔗糖30 g/L,琼脂20 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g/L, NaNO_3 1 g/L, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 1 g/L, KCl 0.5 g/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g/L。菌丝球的液体培养基成分如下:葡萄糖10 g/L, NH_4Cl 1 g/L, $\text{KH}_2\text{PO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 1 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g/L。

1.1.2 接种污泥和进水水质

接种污泥取自宜兴市城镇污水处理厂的二沉池。试验进水采用人工配水, CH_3COONa 为碳源, NH_4Cl 为氮源, KH_2PO_4 和 K_2HPO_4 为磷源。其中,进水COD为600 mg/L、 NH_4^+-N 为60 mg/L、TP为10 mg/L。除了C、N、P外,还添加了0.02 g/L的 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 以及1 mL/L的微量元素溶液。其中,微量元素溶液组成如下:EDTA 30 g/L, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.05 g/L,

$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.05 g/L, AlCl_3 0.05 g/L, KI 0.03 g/L, ZnCl_2 0.06 g/L, CuCl_2 0.03 g/L, $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g/L, H_3BO_3 0.05 g/L, NiCl_2 0.03 g/L。

1.2 反应器的运行方式

试验采用圆柱形间歇式活性污泥反应器,有效高度为60 cm,内径为5 cm,有效容积为1.2 L。共运行两组反应器,分别为空白组和试验组,运行时间为40 d。其中,空白组接种3 g/L的活性污泥,试验组接种3 g/L的活性污泥和0.3 g/L的菌丝球。反应器运行周期为4 h,包括10 min静态进水、40 min缺/厌氧、170~182 min曝气、3~15 min沉降、5 min排水。曝气量为1~1.5 L/min,排水体积比为50%,相应的水力停留时间(HRT)为8 h。试验过程中的进水、曝气、排水等阶段由控制系统自动调节。

1.3 检测项目及方法

根据文献[12]中的方法检测污泥的疏水性(RH),采用Zeta电位仪检测Zeta电位,采用傅里叶红外光谱仪分析污泥样品的主要官能团,根据文献[13]中的方法检测微生物的附着性,污泥的MLSS和SVI均参照《水和废水监测分析方法》(第4版)进行检测。根据文献[9]和[14]中的检测方法对污泥中的AHLs类信号分子进行检测分析。

采用高通量测序技术对接种污泥(S0)、第40天空白组(S1)和试验组(S2)的污泥样品进行微生物群落结构分析。主要操作步骤如下:将污泥混合液在4 000 r/min、4℃条件下离心10 min;使用DNA试剂盒提取沉淀污泥的DNA;之后采用338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')引物对V3-V4可变区进行PCR扩增;最后,在Illumina MiSeq PE300平台上进行高通量测序。

2 结果与分析

2.1 接种菌丝球对污泥表面特性的影响

2.1.1 对污泥疏水性的影响

图1为空白组和试验组在运行过程中的污泥疏水性。可知,反应器运行过程中,空白组和试验组中的污泥疏水性均呈上升趋势。污泥疏水性的增加意味着微生物细胞之间的斥力势能减弱,细胞的吉布斯表面自由能减小,有助于微生物之间相互聚集^[15]。该结果表明,随着反应器的运行,空白组和试验组中的污泥团聚性能均不断增强。另外,空白

组中的污泥疏水性从32%增加至55%,而试验组从40%增加至67%。由此可见,试验组中的污泥疏水性高于空白组。以上结果表明,接种菌丝球能够有效增加反应器中的污泥疏水性。据报道,真菌微生物能够分泌疏水蛋白质,该类蛋白质是含有8个半胱氨酸残基的两亲表面活性蛋白质^[16]。因此,作为丝状真菌,接种菌丝球能够增加系统中的污泥疏水性,从而强化污泥的团聚性能。

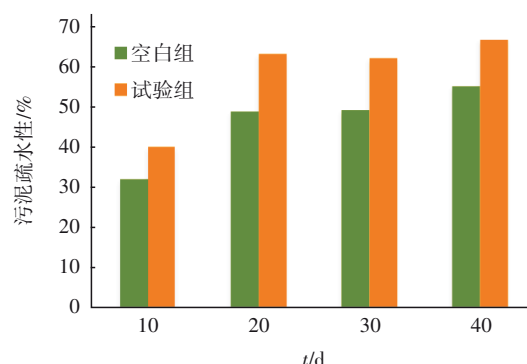


图1 空白组和试验组的污泥疏水性

Fig.1 Sludge hydrophobicity in blank and experimental reactors

2.1.2 对污泥Zeta电位的影响

图2为反应器运行过程中Zeta电位的变化。可知,随着反应器的运行,两组反应器中的污泥Zeta电位绝对值均逐渐降低。Zeta电位绝对值的降低意味着微生物细胞之间的静电斥力减小,有助于微生物相互凝聚,形成团簇^[15,17]。空白组中的Zeta电位为-23~-14 mV,而试验组为-15~-8 mV。由此可知,试验组中的Zeta电位较高,表明接种菌丝球有效增加了污泥的Zeta电位,减弱了微生物细胞之间的静电斥力,有助于污泥团聚。

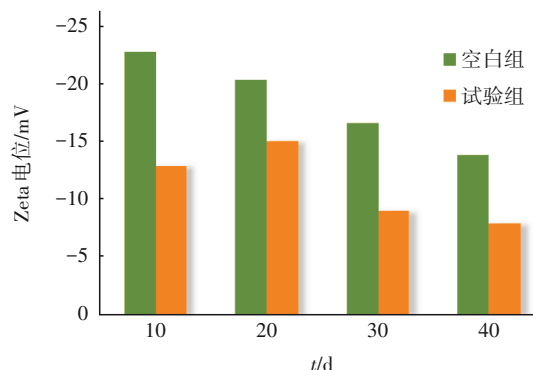


图2 空白组和试验组的Zeta电位

Fig.2 Zeta potential in blank and experimental reactors

2.1.3 对污泥官能团的影响

图3为菌丝球和接种污泥的红外光谱结果。其中,600~900 cm^{-1} 是指纹区域,由于指纹区的吸收峰干扰因素较多,可靠性相对较低,因此不作考虑。由图3可知,菌丝球和接种污泥在400~4 000 cm^{-1} 波数范围内均有明显的吸收峰,且位置相似,表明二者的主要官能团种类没有明显的差异。值得注意的是,菌丝球样品在波数为1 080、1 153、1 746 cm^{-1} 附近均出现吸收峰,而在接种污泥中未观察到这些峰。其中,位于1 080 cm^{-1} 处的峰是真菌物质中与磷酸盐有关的官能团,如 $\text{P}=\text{O}$ 、 $\text{P}-\text{O}$ ^[18];1 746 cm^{-1} 附近的峰是由羰基的伸缩振动引起的吸收峰^[19]。因此,与接种污泥相比,菌丝球的化学官能团种类更丰富。

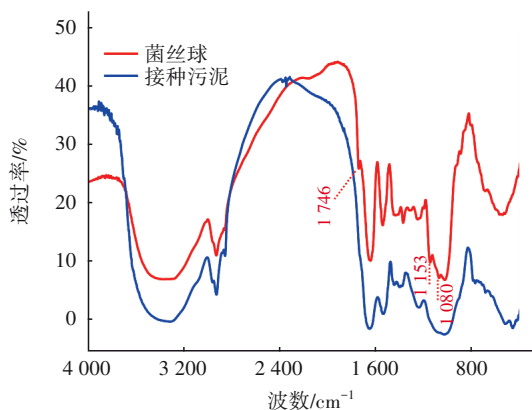


图3 菌丝球和接种污泥的红外光谱结果

Fig.3 Infrared spectroscopy of fungal pellets and seed sludge

另外,为了考察接种菌丝球对系统中污泥官能团的影响,对空白组和试验组第40天的污泥进行红外光谱分析,结果如图4所示。可以看出,二者的吸收峰位置相似,没有明显的差别,表明接种菌丝球未对系统中污泥的主要官能团种类产生明显影响。值得注意的是,试验组中污泥样品在1 035和1 652 cm^{-1} 处的吸收峰强度高于空白组。1 035 cm^{-1} 附近的吸收峰是 $\text{C}-\text{N}$ 伸缩振动峰,该峰的强化可能与菌丝球分泌胞外蛋白质有关;1 652 cm^{-1} 处的吸收峰为蛋白质一级结构中的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动峰,该峰被认为与生物团聚性能有关^[20]。以上结果表明,接种菌丝球虽然不会改变系统中主要官能团的种类,但增加了某些官能团的强度,包括与生物团聚有关的官能团。

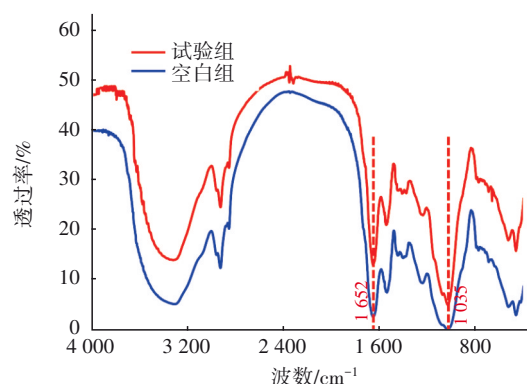


图4 空白组和试验组第40天污泥的红外光谱结果

Fig.4 Infrared spectroscopy of sludge in blank and experimental reactors on day 40

2.1.4 对微生物附着性的影响

图5为空白组和试验组中微生物的附着性。可知,随着反应器的运行,空白组和试验组中的微生物附着性逐渐升高。其中,空白组的微生物附着性为0.2~1.2,低于试验组的0.5~1.7。该结果表明,接种菌丝球有效强化了反应器中的微生物附着性,增加了微生物细胞之间的黏附性,有助于污泥相互聚集。据报道,微生物的附着通常发生在具有低自由能的疏水表面^[21]。该结果与试验组较高的污泥疏水性结果相吻合。另外,接种菌丝球能够有效刺激反应器中的微生物分泌更多的胞外聚合物(EPS),特别是胞外蛋白质组分^[6]。据报道,微生物附着性与胞外蛋白质含量呈正相关^[22]。因此,菌丝球的接种能够有效增强系统中的微生物附着性,有助于污泥相互团聚。

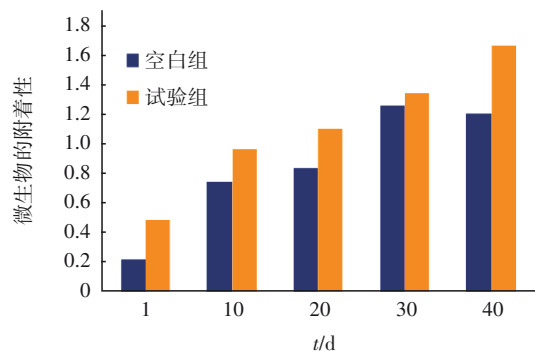


图5 空白组和试验组中微生物的附着性

Fig.5 Microbial attachment in blank and experimental reactors

2.2 接种菌丝球对微生物群体感应的影响

图6为空白组和试验组中微生物群体感应原位检测结果。可知,空白组和试验组中的原位生物检

测结果均显色,证实两个反应器中均存在 AHLs 信号分子。另外,对比空白组,试验组中的平板显色明显,蓝色更深,表明试验组中的微生物群体感应更强。因此,菌丝球的接种调控并增强了反应器中的微生物群体感应。

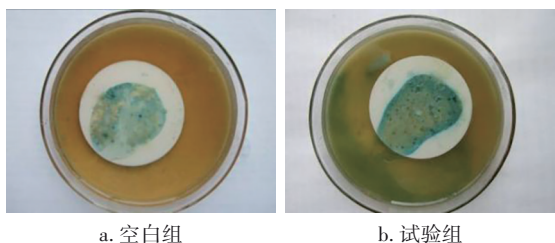


图6 空白组和试验组中微生物群体感应原位检测结果

Fig.6 *In situ* detection results of microbial quorum sensing in blank and experimental reactors

在两组反应器中共检测出 5 种 AHLs 信号分子,分别是 C4-HSL、C6-HSL、C8-HSL、C12-HSL 以及 C14-HSL。其中,空白组中的 AHLs 信号分子总量为 74.3 ng/gMLSS,而试验组中的 AHLs 信号分子总量为 101.1 ng/gMLSS。该结果表明,相比空白组,试验组具有较高的 AHLs 信号分子含量。因此,接种菌丝球有效强化了系统中 AHLs 信号分子的产生,说明试验组中 AHLs 介导的群体感应系统的强度较高。信号分子是由密度依赖型的基因表达产生的,即微生物群体感应只有在细菌密度达到一定阈值之后才会产生。在 SBR 系统中,菌丝球的接种为微生物的附着提供了空间和结合位点,避免生物质在较短的沉降时间下流失,有助于微生物的积累。随着微生物的增加,细菌密度逐渐增大,从而有效增强了系统中的微生物群体感应。群体感应是一种通过感知细菌密度、控制基因表达的细胞间交流方式。其中,革兰氏阴性菌产生的 AHLs 类信号分子是微生物群体感应系统中重要的一类信号分子,能调控微生物多种生理功能,如细胞运动、细胞分化等^[23]。O'Loughlin 等^[24]利用间溴硫代内酯成功抑制了铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)群体感应受体蛋白 LasR 和 RhIR 的活性,有效减少了生物膜的形成。此外,微生物群体感应能够促进三磷酸腺苷的合成,从而强化微生物的合成并分泌 EPS,这有助于微生物细胞相互聚集^[25-26]。Wu 等^[27]通过向硝化颗粒污泥系统中投加含 AHLs 的萃取液,有效促进了胞外蛋白质的积累和微生物的聚集。由此可以认为,试验组中较强的微生物群体感

应系统有助于污泥相互团聚。另外,空白组和试验组中的 C8-HSL 含量最高,分别为 59.3 和 83.6 ng/gMLSS; C14-HSL 含量最低,均为 0.1 ng/gMLSS。空白组和试验组中 C4-HSL、C6-HSL、C12-HSL 分别为 12.9 和 14.6 ng/gMLSS、0.8 和 1.8 ng/gMLSS、1.3 和 1.0 ng/gMLSS。与空白组相比,试验组中 C4-HSL、C6-HSL、C8-HSL 分别增加了 13.2%、125%、41.0%, C12-HSL 降低了 23.1%, C14-HSL 未发生明显的变化。以上结果表明,菌丝球的接种主要促进的是以 C4-HSL、C6-HSL、C8-HSL 介导的微生物群体感应系统,并且以 C8-HSL 介导的微生物群体感应系统占主导地位。

2.3 接种菌丝球对系统中微生物群落结构的影响

2.3.1 微生物 α 多样性分析

表 1 为微生物多样性及丰富度指数。其中, Shannon 指数和 Simpson 指数可表征系统中的微生物多样性,而 Ace 指数和 Chao 指数则可衡量微生物的丰富度。可以看出, S1 和 S2 的 Shannon 指数均低于 S0。并且, S1 和 S2 的 Simpson 指数均高于 S0。另外, S1 和 S2 的 Ace 指数和 Chao 指数均低于 S0。以上结果表明,随着反应器的运行,系统中微生物的多样性和丰富度逐渐减小。这是因为在反应器运行过程中,较短的沉降时间对系统中的污泥进行了筛选,使微生物群落结构发生了演替,适应环境且沉降性能良好的微生物能够存活并保留在反应器中成为优势菌群,而沉降性能差的微生物逐渐被洗出反应器并淘汰,从而造成系统中微生物的多样性和丰富度降低。尽管如此,试验组中的微生物多样性和丰富度高于空白组,可能是由于大量的微生物附着在菌丝球上避免被洗出,进而增加了系统中微生物的多样性和丰富度。

表 1 微生物多样性及丰富度指数

Tab.1 Bacterial diversity and richness indexes

样品	Shannon 指数	Simpson 指数	Ace 指数	Chao 指数	Coverage 指数
S0	5.37	0.011 1	759.7	778.6	0.997
S1	3.77	0.061 3	497.4	522.3	0.997
S2	3.90	0.059 4	530.5	545.0	0.997

图 7 为 Shannon 指数和 Simpson 指数稀释曲线。可以看出,随着序列数的增加,样品的 Shannon 指数和 Simpson 指数稀释曲线趋于水平,表明所测的微生物数与实际数相近,所选测序数据量合理。另

外,Coverage 指数均大于 0.99,表明测序结果具有良好的代表性,能够充分反映样品的真实情况^[9]。

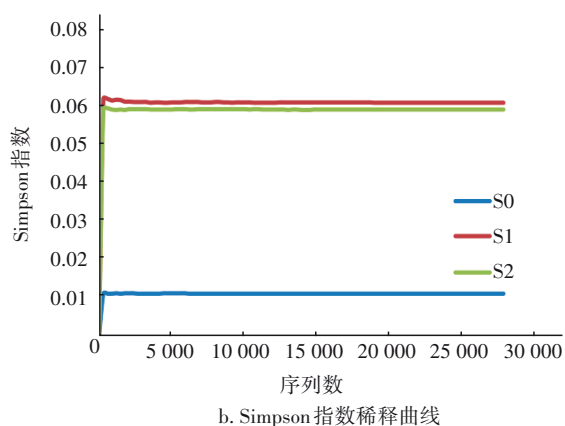
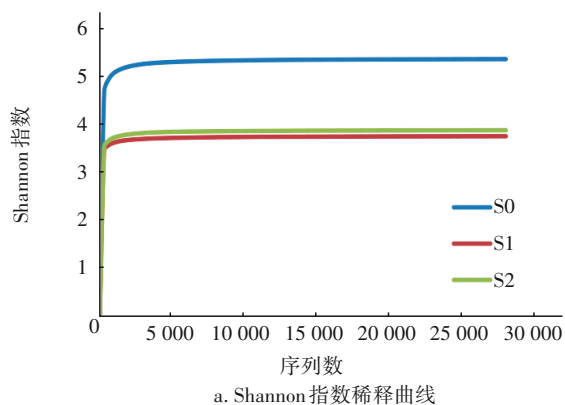


图 7 Shannon 指数和 Simpson 指数稀释曲线

Fig.7 Dilution curves of Shannon and Simpson index

2.3.2 微生物群落组成分析

图 8 为微生物在科分类水平上的分布。空白组和试验组中的优势菌主要集中在 *Rhodocyclaceae*、*Hyphomicrobiaceae* 和 *Rhodobacteraceae*,表明该 3 种微生物较易保留下来,并成为优势菌群。据报道,*Hyphomicrobiaceae* 拥有一个或多个黏性柱状体,能够介导微生物相互黏附,在微生物聚集过程中起着重要作用^[28]。另外,*Rhodobacteraceae* 具有分泌 AHLs 和 EPS 的功能^[29]。由此可知,具有黏附能力的细菌或 EPS/AHLs 产生菌能够避免在较短沉降时间条件下被洗出,从而保留在反应器中。其中,S1 中 *Hyphomicrobiaceae* 和 *Rhodobacteraceae* 的相对丰度分别为 9.71% 和 5.29%,低于 S2 中的 16.4% 和 7.01%。以上结果表明接种菌丝球有效促进了系统中 *Hyphomicrobiaceae* 和 *Rhodobacteraceae* 相对丰度的增加。该结果与试验组中较高的 AHLs 含量结果相吻合。因此,菌丝球通过改变微生物群落的组

成,增加了 *Hyphomicrobiaceae* 和 *Rhodobacteraceae* 的相对丰度,有助于污泥的团聚。

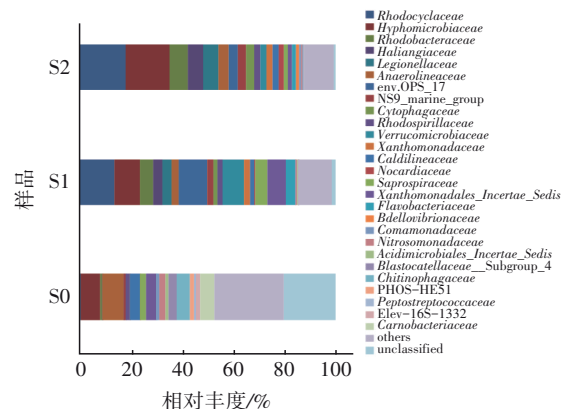


图 8 微生物在科分类水平上的分布

Fig.8 Bacterial community at family level in S0, S1 and S2

2.4 接种菌丝球对污泥团聚性能的影响

图 9 展现了空白组和试验组第 20 天的污泥形态特征。

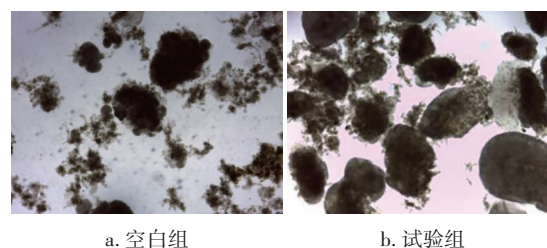


图 9 空白组和试验组第 20 天的微生物团聚现象

Fig.9 Sludge aggregation in blank and experimental reactors on day 20

由图 9 可知,两组反应器在第 20 天均出现了不同程度的团聚现象。然而,相比空白组,试验组中的微生物聚集体较多、尺寸较大、污泥团聚现象较明显。因此,接种菌丝球有效强化了污泥团聚性能。出现该结果的主要原因是:接种菌丝球后,提高了反应器中污泥的疏水性、Zeta 电位、微生物附着性和官能团强度,强化了 AHLs 介导的微生物群体感应系统,富集了具有黏附能力的功能菌和 AHLs/EPS 产生菌。一般来讲,微生物相互团聚形成聚集体在污泥沉降和生物质保留方面起着积极的作用。空白组第 20 天和第 40 天的 SVI₅ 值分别为 120 和 68 mL/g,均高于试验组中的 80 和 59 mL/g。由此可知,试验组的污泥沉降性能优于空白组。分析原因,主要是因为试验组中的污泥团聚程度较高,个数较多、尺寸较大的微生物聚集体有助于污泥的沉降。相应地,良好的沉降性能有助于污泥保留在反应器

中,避免被洗出。因此,相比空白组,试验组中的生物物质保留能力较强。空白组在第20天和第40天的MLSS分别为2.0和3.1 g/L,均小于试验组的3.1和3.9 g/L。以上结果表明,接种菌丝球有效促进了微生物相互聚集,形成团簇,从而改善了污泥沉降性能,使得大量污泥在较短的沉降时间下保留在反应器中,有助于生物质的保留。

3 结论

菌丝球的接种改善了系统中污泥的疏水性(40%~67%)、Zeta电位(-15~-8 mV)、微生物附着性(0.5~1.7)及官能团强度,有效减弱了微生物细胞之间的排斥力。菌丝球的接种有效增强了AHLs介导的微生物群体感应系统,特别是C8-HSL介导的微生物群体感应系统。接种菌丝球大幅度增加了系统中微生物的多样性和丰富度,有效富集了具有黏附性能的功能菌和AHLs/EPS产生菌。污泥表面特性的提高、微生物群体感应的增强、功能菌的富集,三者共同作用促进了微生物相互团聚,形成聚集体,从而改善了SBR中的污泥沉降性能和生物物质保留量。

参考文献:

- [1] 张斯. 菌丝球生物载体的构建及其强化废水处理效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
ZHANG Si. Research on Construction and Enhanced Wastewater Treatment Efficiency of Mycelial Pellet as a Biomass Carrier [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011(in Chinese).
- [2] ZHANG S, LI A, CUI D, *et al.* Performance of enhanced biological SBR process for aniline treatment by mycelial pellet as biomass carrier [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(6): 4360-4365.
- [3] WANG L, YU T M, MA F, *et al.* Novel self-immobilized biomass mixture based on mycelium pellets for wastewater treatment: a review [J]. *Water Environment Research*, 2019, 91(2): 93-100.
- [4] 孙移鹿. 好氧反硝化菌的固定化应用及效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
SUN Yilu. Immobilization and Performance of Aerobic Denitrification Bacterium [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013(in Chinese).
- [5] 王可. 以菌丝球为载体强化去除含酚废水效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG Ke. Research on Enhanced Phenol Distribution Treatment by Mycelium Pellet as Carrier [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017(in Chinese).
- [6] GENG M Y, MA F, GUO H J, *et al.* Enhanced aerobic sludge granulation in a sequencing batch reactor (SBR) by applying mycelial pellets [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274: 123037.
- [7] GENG M Y, YOU S J, GUO H J, *et al.* Impact of fungal pellets dosage on long-term stability of aerobic granular sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 332: 125106.
- [8] ZHANG Z M, CAO R J, JIN L N, *et al.* The regulation of *N*-acyl-homoserine lactones (AHLs)-based quorum sensing on EPS secretion via ATP synthetic for the stability of aerobic granular sludge [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 83-91.
- [9] CHEN H, LI A, CUI C W, *et al.* AHL-mediated quorum sensing regulates the variations of microbial community and sludge properties of aerobic granular sludge under low organic loading [J]. *Environment International*, 2019, 130: 104946.
- [10] 李莹, 刘强, 陈卫, 等. 胞外聚合物与膜污染的相关关系研究进展[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(12): 25-30.
LI Ying, LIU Qiang, CHEN Wei, *et al.* Advances of correlation between extracellular polymers and membrane fouling [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(12): 25-30(in Chinese).
- [11] PAPENFORT K, BASSLER B L. Quorum sensing signal-response systems in Gram-negative bacteria [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2016, 14(9): 576-588.
- [12] 王硕. 低温好氧颗粒污泥形成过程及其特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
WANG Shuo. The Study of Aerobic Granular Sludge on Formation Process and Characteristics at Low Temperature [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).
- [13] 吕春娇. 菌丝球构建好氧颗粒污泥系统及其流态模拟初探[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
LÜ Chunjiao. Aerobic Granular Sludge System Constructed by Mycelial Balls and Its Flow Simulation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).
- [14] 肖霄. 添加填料对减缓MBR膜污染的影响及作用机制[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2018.
XIAO Xiao. Effect and Mechanism of Adding Fillers on MBR Membrane Fouling [D]. Shenyang: Liaoning

- University, 2018 (in Chinese).
- [15] WANG S, MA X X, WANG Y Y, *et al.* Piggery wastewater treatment by aerobic granular sludge: granulation process and antibiotics and antibiotic-resistant bacteria removal and transport [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 273: 350–357.
- [16] 黄勋娟,刁宁宁,张建国. 黑曲霉菌丝球的形成及应用研究综述[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(11): 171–176.
- HUANG Xunjuan, DIAO Ningning, ZHANG Jianguo. Review on the formation of *Aspergillus niger* pellets and its application [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2014, 40(11): 171–176 (in Chinese).
- [17] TU X, ZHANG S, XU L R, *et al.* Performance and fouling characteristics in a membrane sequence batch reactor (MSBR) system coupled with aerobic granular sludge[J]. *Desalination*, 2010, 261(1/2): 191–196.
- [18] VALE M D S, NASCIMENTO R F D, LEITÃO R C, *et al.* Cr and Zn biosorption by *Aspergillus niger* [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 462.
- [19] BADIREDDY A R, CHELLAM S, GASSMAN P L, *et al.* Role of extracellular polymeric substances in bioflocculation of activated sludge microorganisms under glucose-controlled conditions [J]. *Water Research*, 2010, 44(15): 4505–4516.
- [20] DONG J J, ZHANG Z M, YU Z D, *et al.* Evolution and functional analysis of extracellular polymeric substances during the granulation of aerobic sludge used to treat *p*-chloroaniline wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 330: 596–604.
- [21] TAN C H, KOH K S, XIE C, *et al.* The role of quorum sensing signalling in EPS production and the assembly of a sludge community into aerobic granules[J]. *The ISME Journal*, 2014, 8(6): 1186–1197.
- [22] ZHANG B, LENS P N, SHI W X, *et al.* The attachment potential and *N*-acyl-homoserine lactone-based quorum sensing in aerobic granular sludge and algal-bacterial granular sludge [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102: 5343–5353.
- [23] 支丽玲, 马鑫欣, 刘奇欣, 等. 好氧颗粒污泥形成过程中群感效应的作用研究[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(5): 2148–2156.
- ZHI Liling, MA Xinxin, LIU Qixin, *et al.* Effect of quorum sensing in the formation of aerobic granular sludge [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(5): 2148–2156 (in Chinese).
- [24] O' LOUGHLIN C T, MILLER L C, SIRYAPORN A, *et al.* A quorum-sensing inhibitor blocks *Pseudomonas aeruginosa* virulence and biofilm formation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(44): 17981–17986.
- [25] WANG M Z, ZHENG X, HE H Z, *et al.* Ecological roles and release patterns of acylated homoserine lactones in *Pseudomonas* sp. HF-1 and their implications in bacterial bioaugmentation [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 125: 119–126.
- [26] LI A J, HOU B L, LI M X. Cell adhesion, ammonia removal and granulation of autotrophic nitrifying sludge facilitated by *N*-acyl-homoserine lactones [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 196: 550–558.
- [27] WU L J, LI A J, HOU B L, *et al.* Exogenous addition of cellular extract *N*-acyl-homoserine-lactones accelerated the granulation of autotrophic nitrifying sludge [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 118: 119–125.
- [28] ZHANG B, JI M, QIU Z Q, *et al.* Microbial population dynamics during sludge granulation in an anaerobic-aerobic biological phosphorus removal system [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 2474–2480.
- [29] ZHANG Z M, YU Z D, WANG Z H, *et al.* Understanding of aerobic sludge granulation enhanced by sludge retention time in the aspect of quorum sensing [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 272: 226–234.

作者简介:耿明月(1990–),女,河北沧州人,博士研究生,主要研究方向为好氧颗粒污泥技术的开发与应用。

E-mail:mygeng@163.com

收稿日期:2021-10-28

修回日期:2021-11-30

(编辑:任莹莹)