

论述与研究

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.11.001

碳源类型对活性污泥合成PHA和微生物群落的影响

刘展华¹, 宋秀兰¹, 刘耀辉²

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 香港高等教育科技学院
科技学院, 香港 999077)

摘要: 为探究过硫酸氢钾复合盐(PMS)耦合剩余污泥碱性发酵获取碳源合成聚羟基脂肪酸酯(PHA)的可行性,分别采用剩余污泥碱性(pH=10)发酵液(简称“pH10发酵液”)、PMS耦合剩余污泥碱性(pH=10)发酵液(简称“pH10+PMS发酵液”)作为碳源,研究活性污泥混合菌群在富集和合成阶段产PHA的情况以及微生物群落结构的变化。结果表明,当分别以pH10发酵液、pH10+PMS发酵液作为碳源时,富集阶段PHA的最大合成量分别为10.61%和12.22%,合成阶段PHA的累积合成量分别为42.84%和52.53%;采用不同碳源时富集产PHA的微生物群落结构存在差异性,与pH10发酵液碳源组相比,pH10+PMS发酵液碳源组中与PHA合成相关的功能菌群即副球菌属、陶厄氏菌属和甲基杆菌属的含量更高,更有利于PHA的合成,因此pH10+PMS发酵液为更适宜的碳源。

关键词: 活性污泥; 聚羟基脂肪酸酯(PHA); 短链脂肪酸; 碳源; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)11-0001-07

Effect of Different Kinds of Carbon Source on PHA Synthesis and Microbial Community of Activated Sludge

LIU Zhan-hua¹, SONG Xiu-lan¹, LIU Yao-hui²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Faculty of Science and Technology, Technological and Higher Education Institute of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: To explore the feasibility of synthesizing polyhydroxyalkanoate (PHA) using carbon source from alkaline fermentation of excess sludge coupled with potassium perbisulfate compound salts (PMS), the simulated excess sludge alkaline (pH=10) fermentation solution (pH10 fermentation solution) and simulated PMS coupled with excess sludge alkaline (pH=10) fermentation solution (pH10+PMS fermentation solution) were used as carbon sources respectively to investigate the PHA production of mixed bacteria in activated sludge and the change of microbial community composition in the enrichment and synthesis stages. When the two kinds of fermentation solutions were used as carbon sources, the maximum PHA yields in the enrichment stage were 10.61% and 12.22%, and the cumulative PHA yields in the synthesis stage were 42.84% and 52.53%, respectively. The microbial community composition in enrichment stage was different when different carbon sources were used for PHA production. Compared

基金项目: 香港RGC项目(UGC/FDS25/E16/17); 山西省国际科技合作计划项目(201803D421098)

通信作者: 宋秀兰 E-mail: songxiulan@tyut.edu.cn

with pH10 fermentation solution as carbon source, the content of functional bacterial group (such as *Paracoccus*, *Thauera* and *Meganema*) related to PHA synthesis was higher when the carbon source was pH10+PMS fermentation solution, which was more conducive to PHA synthesis. Therefore, the pH10+PMS fermentation solution was a more suitable carbon source.

Key words: activated sludge; polyhydroxyalkanoate (PHA); short chain fatty acid; carbon source; microbial community

聚羟基脂肪酸酯(PHA)是一类具有结构多样性的高分子生物聚酯,具有生物可降解性和生物相容性等诸多优点,普遍存在于微生物体内,是一种环境友好型的“绿色材料”。但相对较高的原料成本、消毒成本及微生物分离纯化费用限制了PHA的商业化应用^[1]。

活性污泥法合成PHA的工艺一般采用三段式:底物准备阶段、产PHA混合菌群富集阶段、PHA合成阶段。在活性污泥法合成PHA工艺中,成本主要来源于碳源的制备,占到PHA合成成本的50%。如何获得廉价的碳源是合成PHA的关键问题。研究表明,污泥厌氧发酵产生的短链脂肪酸(SCFAs)在合成PHA方面具有巨大的潜能^[2]。因此,利用剩余污泥厌氧消化过程产酸阶段获得SCFAs来合成PHA并加以回收利用,符合可持续发展战略。

污泥厌氧消化一般分为溶解、水解、产酸及产甲烷等4个阶段,其中颗粒有机物的溶解是主要的限速步骤。为加速污泥的溶解和水解过程,许多预处理方法如超声波、臭氧、碱和热处理等被采用^[3]。研究者发现,通过对污泥进行碱性预处理($\text{pH}>9$),可以将厌氧消化控制在水解酸化阶段,从而提高污泥中溶解性有机物的浓度^[4]。这是由于碱性条件可以促进污泥溶胞现象,即促进细胞中的有机物大量溶出,从而为产酸菌提供底物来产生SCFAs,并且可在一定程度上使产甲烷菌活性受到抑制^[5]。过硫酸氢钾复合盐(PMS)一般以 $2\text{KHSO}_5 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{KHSO}_4$ 混合盐的形式存在,其有效成分为 KHSO_5 ,含量为47%。PMS是一种集安全、环保和高效于一体的新型活性氧消毒剂,可以促进污泥颗粒破碎,提高产酸量,利于污泥减量化^[6]。毕培等^[7]研究发现,PMS耦合剩余污泥碱性发酵可以提高SCFAs生成量。万芳^[8]采用污泥碱性发酵水解液成功驯化出产PHA的活性污泥混合菌群,以发酵液为进水时PHA最大合成量可达到420.5 mg/g。目前以PMS耦合剩余污

泥碱性发酵液为碳源合成PHA的研究尚未见报道。而不同的污泥预处理方式,会导致发酵液中SCFAs的组分发生变化,进而影响PHA合成量。

为探究PMS耦合剩余污泥碱性发酵水解液合成PHA的可行性,笔者分别以剩余污泥碱性发酵液、PMS耦合剩余污泥碱性发酵液作为碳源,研究活性污泥混合菌群在PHA富集和合成阶段生产PHA的效果,以及微生物群落结构的变化情况。

1 材料与方法

1.1 污泥厌氧发酵液中SCFAs的组分

根据张雨青^[9]的研究,在温度为30℃、进料污泥浓度为18 g/L(以TS计,下同)条件下,当PMS投加量为0.11 g/g(以TS计,下同)、发酵5 d时污泥产酸量最大。故本实验中PMS投加量采用0.11 g/g,发酵时间设为5 d。

实验用污泥为太原市杨家堡污水处理厂二沉池污泥,污泥取回后在4℃冰箱中沉淀浓缩24 h,将污泥浓度配制成18 g/L。取2个体积为500 mL的血清瓶,每个血清瓶中加入450 mL一定浓度的剩余污泥。其中一个血清瓶中加入0.11 g/g的PMS,另一个作为空白对照,然后分别调节pH至10,第1天调节3次,第2天和第3天各调节2次。将两个血清瓶用氮气吹扫5 min,然后用橡皮塞密封后放置在恒温空气摇床中,温度设置为 (30 ± 1) ℃,转速设置为200 r/min。发酵5 d后取样,经0.45 μm滤膜过滤,取上清液测定SCFAs。在pH=10条件下投加PMS处理污泥得到的发酵液,简称“pH10+PMS发酵液”,其组分如下:乙酸为40.52%、丙酸为14.62%、丁酸为21.27%、戊酸为23.59%;在pH=10条件下处理污泥得到的发酵液,简称“pH10发酵液”,其组分如下:乙酸为30.20%、丙酸为18.58%、丁酸为23.93%、戊酸为27.29%。

1.2 富集实验装置及运行方式

富集阶段采用好氧瞬时补料工艺(ADF),选用

序批式反应器(SBR),由有机玻璃制成,有效容积为7.2 L,如图1所示。反应温度控制在 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$,进水pH用NaOH溶液调控在 7 ± 0.2 ,反应过程中不再调控;曝气量经空气流量计控制在 $0.19\sim 0.26\text{ m}^3/\text{h}$ 范围内,搅拌转速控制在 200 r/min 。运行周期为8 h,包括进水0.5 h、反应6 h(反应末期排泥3 min)、沉淀1 h、排水0.5 h;水力停留时间(HRT)为1 d,污泥停留时间(SRT)为10 d。

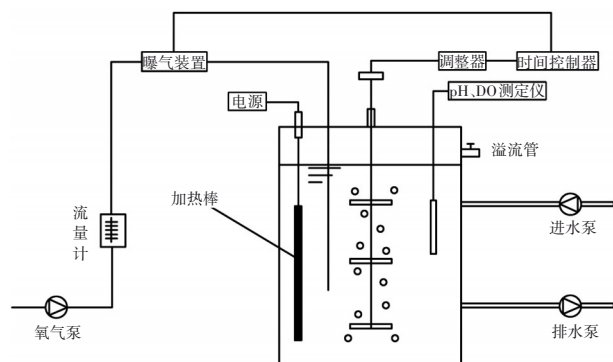


图1 富集实验装置示意

Fig.1 Schematics of the enrichment test device

SBR接种污泥为太原市杨家堡污水处理厂二沉池污泥,初始污泥浓度为 $7\ 600\text{ mg/L}$ 。实验进水采用人工配水,主要包括碳源、营养盐和微量元素。反应器开始启动时采用葡萄糖作为碳源,进水COD浓度为 $1\ 000\text{ mg/L}$,配水中加入 191.07 mg/L 的 NH_4Cl 和 43.87 mg/L 的 KH_2PO_4 ,控制C:N:P=100:5:1(质量比),同时添加 0.04 g/L 硫脲抑制硝化作用以及 0.5 mL/L 微量元素、 0.25 g/L 硫酸镁和 0.051 g/L 无水氯化钙。微量元素组成为: $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.12 g/L 、 $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.15 g/L 、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.06 g/L 、 KI 1.18 g/L 、 $\text{MnCl}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.12 g/L 、 $\text{FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1.5 g/L 、 H_3BO_4 0.15 g/L 、 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g/L 。反应器运行稳定后,进水碳源分别采用pH发酵液和pH+PMS发酵液,由乙酸、丙酸、丁酸和戊酸组成,它们转化为COD的当量系数分别为 0.780 、 1.167 、 1.730 和 $1.902^{[10]}$ 。进水碳源浓度和其他实验条件与葡萄糖做碳源时相同。

1.3 合成阶段实验设计

批次实验采用 0.5 L 烧杯作为反应器,开始前对富集反应器的排泥进行预曝气处理1 h及以上,以消耗掉混合液中剩余的氮、磷等营养物质,之后再用自来水淘洗两遍以进一步去除混合液中的氨氮等物质。实验设5个批次,每批次反应1.5 h、静

置沉淀0.5 h,排出 0.2 L 上清液后,补加 0.2 L 碳源进行下一批次实验,批次实验的碳源浓度一般为富集碳源浓度的2~4倍,在本实验中选择COD浓度为 $3\ 000\text{ mg/L}$,不外加营养盐。整个过程通过四联磁力搅拌器及曝气装置实现周期运行,设溶氧仪和pH计监测反应过程的数据变化,烧杯内的曝气量用空气流量计控制在 1.6 L/min 。反应过程中不控制pH,温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 。

1.4 检测项目与方法

实验中的常规指标如SV、SVI、pH、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等均采用国家标准方法测定;富集和合成阶段的污泥浓度(MLSS)采用冷冻差重法测定;SCFAs采用SP2100型气相色谱仪测定,检测器为FID,载气为氮气,进样器温度为 250°C ,检测器温度为 280°C ,柱箱温度为 170°C ;污泥的PHA含量采用Agilent-7890B气相色谱仪测定,检测器为FID,色谱柱为HP-5弹性石英毛细管柱,进样口温度为 250°C ,分流比为10:1,流量为 72 mL/min ,压力为 25 psi ($1\text{ psi}=6.89\text{ kPa}$),采用程序升温,初始温度为 70°C ,保持2 min后以 25°C/min 程序升温至 150°C 。当分别以pH10发酵液和PMS+pH10发酵液为碳源时,对富集阶段SBR反应器典型周期内的污泥取样进行微生物群落结构分析,污泥样品经DNA提取后,进行PCR扩增,引物选取MiSeq测序平台V3-V4区域的通用引物341F和805R,之后采用Illumina测序平台进行高通量测序(上海生工)。

1.5 评价指标

实验中活性污泥的产PHA能力采用PHA合成量、PHA比合成速率、PHA产率等指标来衡量,计算方法如下所示:

$$\text{PHA合成量} = \text{PHA}/\text{VSS} \times 100\% \quad (1)$$

$$q\text{PHA} = \Delta\text{PHA}/(X \times T) \quad (2)$$

$$\text{ProPHA} = \text{PHA}/X_{a0} \quad (3)$$

$$\text{Re}\Delta X = X/X_{a0} \quad (4)$$

式中:PHA为以干污泥计的PHA产量, g/L ;VSS为污泥中的可挥发性悬浮物含量, g/L ; ΔPHA 为单位时间内的PHA增量, g/L ;X为细胞生物量, g/L ;qPHA为PHA比合成速率,以细胞生物量计, $\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$;T为时间,h; X_{a0} 为初始细胞生物量, g/L ;ProPHA为PHA产率,以初始细胞生物量计, g/g ;Re ΔX 为生物相对增长量, g/g 。

2 结果与讨论

2.1 富集阶段典型周期内各参数的变化

在富集阶段,当反应器运行稳定后,典型周期内碳源COD浓度、氨氮、溶解氧以及PHA含量等指标的变化如图2所示。

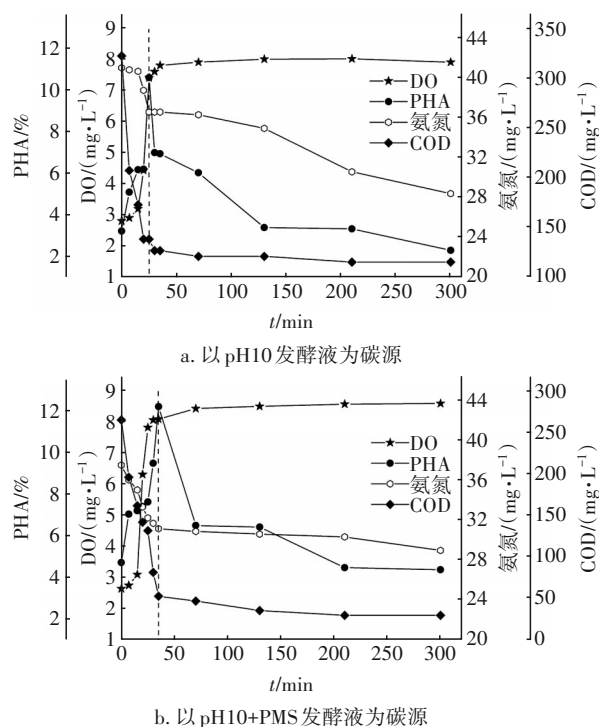


图2 不同碳源条件下SBR典型周期内的相关参数变化
Fig.2 Change of relevant parameters in typical cycle of SBR with different carbon sources

由图2可知,在两种碳源条件下,SBR反应周期内的活性污泥均有明显的底物充盈-匮乏阶段分界(以竖直虚线为分界线)。由图2(a)可知,当以pH10发酵液为碳源时,0~25 min为充盈阶段,25~300 min为匮乏阶段。由图2(b)可知,当以pH10+PMS发酵液为碳源时,0~35 min为充盈阶段,35~300 min为匮乏阶段。当以pH10发酵液为碳源时,充盈期比以pH10+PMS发酵液为碳源时要短。以pH10发酵液和pH10+PMS发酵液为碳源时,PHA合成量均在突跃点达到最大值,分别为10.61%和12.22%。在富集阶段,以pH10+PMS发酵液为碳源时的PHA产量稍高于以pH10发酵液为碳源时的。在两种碳源条件下,SBR中的DO浓度均表现为充盈期快速上升,达到突跃点后,在匮乏期基本保持稳定;COD和氨氮浓度均表现为先快速下降,在突跃点后下降变缓并逐渐趋于稳定。以pH10发酵液为碳源时,SBR中

的COD浓度从321.96 mg/L逐渐降低并最终稳定在114.99 mg/L;以pH10+PMS发酵液为碳源时,COD浓度从264.47 mg/L逐渐降低并最终稳定在28.75 mg/L。可以看出,以PMS+pH10发酵液为碳源时,SBR对碳源的消耗更多,而碳源的消耗主要用于微生物自身的生长及合成PHA,故以pH10+PMS发酵液为碳源时PHA合成量更高。

2.2 不同底物补料模式下PHA合成情况

在两种碳源条件下,对合成阶段每个补料周期的首末分别取样测定PHA含量,结果如图3所示。可以看出,两种碳源条件下的PHA含量整体都随反应时间的增加而增加,但由于每个批次之间设有静沉阶段,所以这之间有少量的PHA消耗。

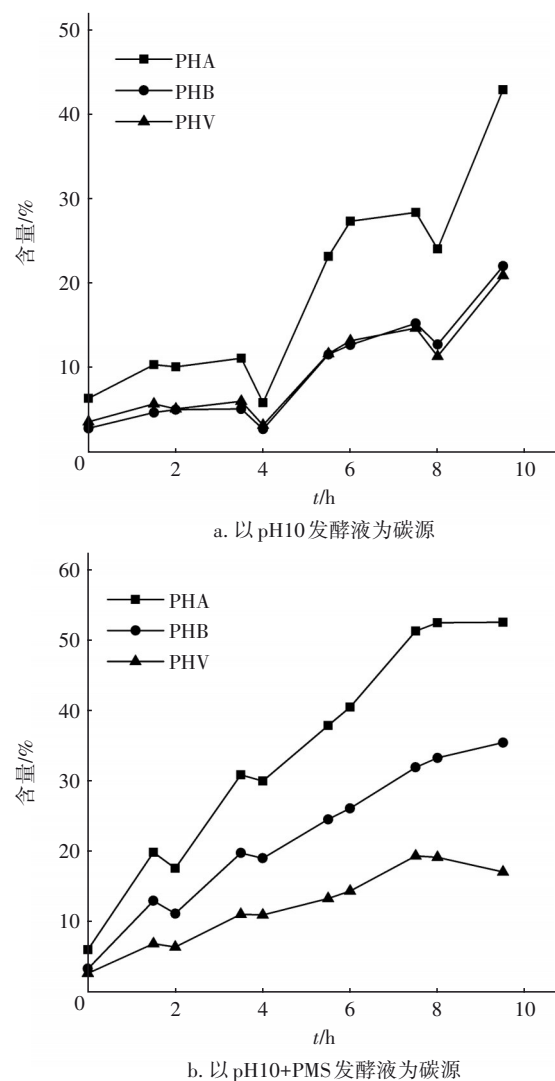


图3 不同碳源条件下的PHA合成效果

Fig.3 PHA synthesis effect with different carbon sources

由图3(a)可知,以pH10发酵液为碳源时,混合

菌群在第2次补料之后便一直以较高的速率进行PHA的合成,在第5次补料结束时PHA累积合成量达到最大值即42.84%。由图3(b)可知,以pH10+PMS发酵液为碳源时,混合菌群在第1次补料之后也以较高的速率进行PHA的合成,在第4次补料结束后PHA累积合成量增幅明显变缓,这说明微生物细胞消耗底物合成PHA的代谢能力已接近饱和,在第5次补料结束时PHA累积合成量达到最大值即52.53%。以pH10+PMS发酵液为碳源时的PHA累积合成量高于以pH10发酵液为碳源时的,并且在两种碳源条件下合成阶段的PHA产量均较富集阶段有了大幅度的提升。

不同碳源条件下的PHB和PHV合成量变化趋势和PHA相同。以pH10发酵液为碳源时,在第5次补料结束时PHV和PHB累积合成量均达到最高,分别为20.87%和21.97%,分别占PHA累积合成量的48.72%和51.28%,PHB:PHV为1.05:1。以pH10+PMS发酵液为碳源时,在第5次补料结束时PHV和PHB累积合成量均达到最高,分别为17.07%和35.45%,分别占PHA累积合成量的32.50%和67.48%,PHB:PHV为2.08:1。发酵液碳源中的SCFAs组成会影响PHA的组成,偶数型碳SCFAs会先转化为乙酰辅酶A,再转化成PHB单体,奇数型碳SCFAs会转化成丙酰辅酶A,再转化成PHV。pH10+PMS发酵液中偶数型碳SCFAs的比例为61.79%,高于pH10发酵液中偶数型碳SCFAs的比例(54.13%),故以pH10+PMS发酵液为碳源时PHB的合成量高于以pH10发酵液为碳源时的。

在第5批次实验结束时,pH10+PMS发酵液组的PHA比合成速率为 $0.0317\text{ g}/(\text{g}\cdot\text{h})$,大于pH10发酵液组的PHA比合成速率 $[0.02\text{ g}/(\text{g}\cdot\text{h})]$,表明pH10+PMS发酵液组合成PHA的效率快;pH10发酵液组和pH10+PMS发酵液组的PHA产率分别为 0.3650 、 0.5912 g/g ,pH10+PMS发酵液组的PHA产率更大,说明pH10+PMS发酵液组的PHA累积综合能力更强。另外,pH10发酵液组和pH10+PMS发酵液组的生物相对增长量分别为 0.65 、 0.53 g/g 。当底物中含有氮、磷等营养物质时,微生物可利用其进行生长代谢和自身的细胞修复,但当缺少氮、磷等营养物质时,微生物便不能合成用于自身生长的蛋白质,导致生物量增长值较小,说明生物量将大部分碳源转移到PHA的积累中,而不是生物量的增

长,所以生物相对增长量越低代表PHA积累能力越强。综合PHA在合成阶段的动力学参数来看,以pH10+PMS发酵液为碳源的SBR产PHA性能更优。

2.3 微生物群落结构解析

富集阶段SBR反应器内PHA的合成情况与微生物的种类及丰度有密不可分的关系。两种碳源条件下富集阶段SBR反应器中功能菌群在门、纲和属水平上的相对丰度见图4。

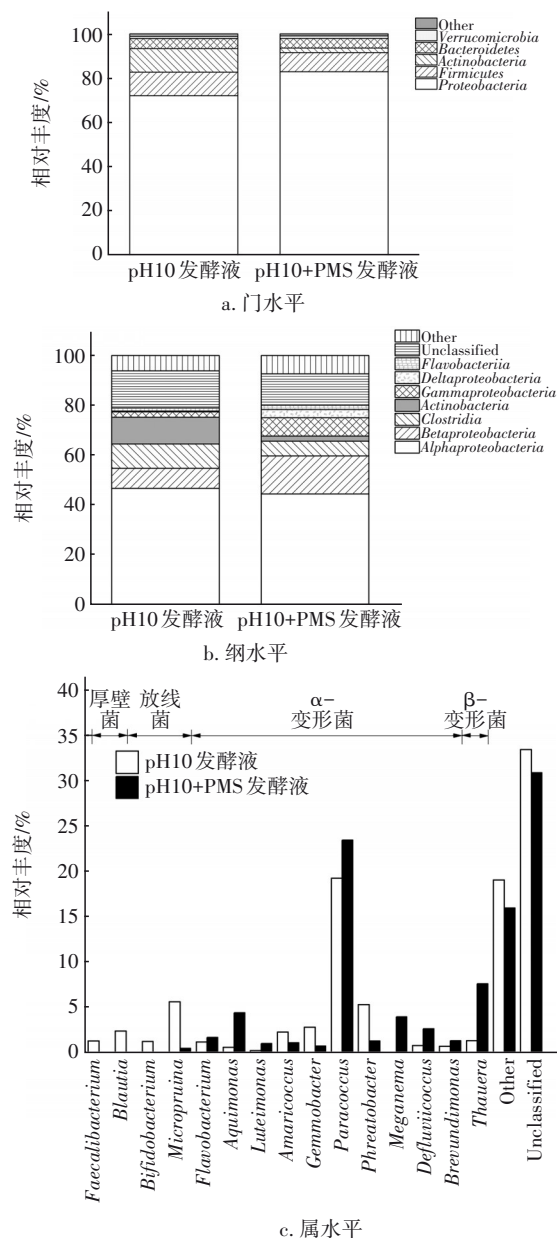


图4 不同碳源条件下微生物在门、纲、属水平的相对丰度

Fig.4 Relative abundance of microorganisms at phylum, class, genus levels under different carbon sources

在门水平上,两种碳源条件下的微生物主要分

布在4个门:变形菌门(*Proteobacteria*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)、放线菌门(*Actinobacteria*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)。其中,变形菌门均占比最多,在pH10发酵液组中占72.09%,在pH10+PMS发酵液组中占82.93%,变形菌门的增加有利于SCFAs的消耗,促进微生物进行自身的生长代谢和PHA的合成^[11],这与pH10+PMS发酵液组的PHA合成效果好相吻合。与pH10发酵液组相比,pH10+PMS发酵液组的厚壁菌门和放线菌门占比较少。

在纲水平上,pH10发酵液组的优势菌为 α -变形菌纲(*Alphaproteobacteria*, 46.72%)、放线菌纲(*Actinobacteria*, 10.69%)、梭状芽孢杆菌纲(*Clostridia*, 9.76%)、 β -变形菌纲(*Betaproteobacteria*, 8.06%)、 γ -变形菌纲(*Gammaproteobacteria*, 2.16%)和黄杆菌纲(*Flavobacteriia*, 1.29%)。pH10+PMS发酵液组的优势菌为 α -变形菌纲(44.50%)、梭状芽孢杆菌纲(5.93%)、 β -变形菌纲(15.24%)、 γ -变形菌纲(7.30%)、 δ -变形菌纲(*Deltaproteobacteria*, 3.35%)和黄杆菌纲(1.75%)。pH10+PMS发酵液组中 α -变形菌纲、 β -变形菌纲、 γ -变形菌纲和 δ -变形菌纲的占比总和高于pH10发酵液组,这与pH10+PMS发酵液组的变形菌门占比更高一致,因此,pH10+PMS发酵液组具有更高的PHA合成能力。

在属水平上,pH10发酵液组的优势菌为副球菌属(*Paracoccus*, 19.25%)、潜水杆菌属(*Phreatobacter*, 5.33%)、微小菌属(*Micropuina*, 5.64%)。在pH10+PMS发酵液组,粪杆菌属(*Faecalibacterium*)、双歧杆菌属(*Bifidobacterium*)、微小菌属的占比相较于pH10发酵液组大幅减少,布劳特氏菌属(*Blautia*)消失不见,说明碳源组分的改变不利于这些菌属的生存。pH10+PMS发酵液组的优势菌属为副球菌属(23.45%)、陶厄氏菌属(*Thauera*, 7.62%)、水单胞菌属(*Aquimonas*, 4.42%)和甲基杆菌属(*Meganema*, 3.98%)。副球菌属是具有脱氮功能的微生物,可合成胞内PHA^[12];陶厄氏菌属属于变形菌纲,被认为是合成PHA的优良菌属^[13];甲基杆菌属是丝状菌,也具有合成PHA的能力^[14]。pH10+PMS发酵液组中的副球菌属、陶厄氏菌属和甲基杆菌属占比均高于pH10发酵液组,说明pH10+PMS发酵液组的底物中乙酸组分的增加有利于PHA产生菌属富集,使得活性污泥混合菌群合成PHA的能力提高。

3 结论

① 以pH10发酵液、pH10+PMS发酵液为碳源时,富集阶段最大PHA合成量分别为10.61%、12.22%;两组碳源条件下DO和PHA均表现为在充盈期快速上升、达到突跃点后在匮乏期基本保持稳定,COD、氨氮浓度均表现为在充盈期快速下降、达到突跃点后下降速率变缓并逐渐稳定。

② 分别以pH10发酵液、pH10+PMS发酵液为碳源时,合成阶段的PHA累积合成量分别为42.84%、52.53%,且pH10+PMS发酵液组的PHB:PHV=2.08:1。pH10+PMS发酵液组的PHA比合成速率、PHA产率均大于pH10发酵液组,分别为0.0317 g/(g·h)和0.5912 g/g。pH10+PMS发酵液组的PHA合成能力大于pH10发酵液组,因此pH10+PMS发酵液为更适宜的碳源。

③ 采用不同碳源时富集产PHA的微生物群落结构有差异性。相比pH10发酵液组,pH10+PMS发酵液组中与PHA合成相关的功能菌群含量更高,其中副球菌属、陶厄氏菌属、甲基杆菌属占比分别为23.45%、7.62%、3.98%。在pH10+PMS发酵液组中,与PHA合成有关的菌群得到了富集,并相应地降低了其他菌群的比例,有利于PHA的合成。

参考文献:

- [1] SALEHIZADEH H, VAN LOOSDRECHT M C M. Production of polyhydroxyalkanoates by mixed culture: recent trends and biotechnological importance [J]. *Biotechnology Advances*, 2004, 22(3): 261-279.
- [2] ZHANG C, CHEN Y G. Simultaneous nitrogen and phosphorus recovery from sludge-fermentation liquid mixture and application of the fermentation liquid to enhance municipal wastewater biological nutrient removal [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(16): 6164-6170.
- [3] LUO K, PANG Y, YANG Q, et al. A critical review of volatile fatty acids produced from waste activated sludge: enhanced strategies and its applications [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(14): 13984-13998.
- [4] BUDDE C F. Production of Polyhydroxyalkanoate Copolymers from Plant Oil [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [5] PHILIP S, KESHAVERZ T, ROY I.

- Polyhydroxyalkanoates: biodegradable polymers with a range of applications [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2007, 82(3): 233-247.
- [6] 金宝丹,王淑莹,邢立群,等. 单过硫酸氢钾复合盐对剩余污泥厌氧发酵的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(2): 434-443.
- JIN Baodan, WANG Shuying, XING Liqun, *et al.* Effect of potassium peroxydisulfate on waste activated sludge anaerobic fermentation [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(2): 434-443 (in Chinese).
- [7] 毕培,宋秀兰,刘美琴,等. 过硫酸钾对剩余污泥厌氧发酵过程的影响[J]. *工业水处理*, 2018, 38(10): 58-62.
- BI Pei, SONG Xiulan, LIU Meiqin, *et al.* Influences of $K_2S_2O_8$ on the process of excess sludge anaerobic fermentation [J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, 38(10): 58-62 (in Chinese).
- [8] 万芳. 剩余污泥快速碱处理发酵液的资源化利用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- WAN Fang. Resource Recovery from Quickly Alkaline Fermentation Liquid by Activated Wasted Sludge [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese).
- [9] 张雨青. 三氯生对过一硫酸氢盐耦合污泥碱性发酵体系产酸的影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- ZHANG Yuqing. Effect of Triclosan on Short-chain Fatty Acid Production in Peroxymonosulfate Combined with Alkaline Fermentation System of Sludge [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [10] 赵丽智. 活性污泥混合菌群利用污泥水解液合成PHA的性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- ZHAO Lizhi. Research on Polyhydroxyalkanoate Production Performance by Mixed Cultures from Activated Sludge [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).
- [11] WONG M T, ZHANG D, LI J, *et al.* Towards a metagenomic understanding on enhanced biomethane production from waste activated sludge after pH 10 pretreatment [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2013, 6: 38.
- [12] KIM B K, YOON S C, NAM J D, *et al.* Effect of C/N ratio on the production of poly(3-hydroxyalkanoates) by the methylotroph *Paracoccus denitrificans* [J]. *Microbiology and Biotechnology*, 1997, 7(6): 391-396.
- [13] 毛跃建. 废水处理系统中重要功能类群 *Thauera* 属种群结构与功能的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- MAO Yuejian. Structural and Functional Analysis of *Thauera* Genus in Wastewater Treatment Plants [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009 (in Chinese).
- [14] DIONISI D, BECCARI M, DI GREGORIO S, *et al.* Storage of biodegradable polymers by an enriched microbial community in a sequencing batch reactor operated at high organic load rate [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2005, 80(11): 1306-1318.

作者简介:刘展华(1994-),男,山西太原人,硕士研究生,研究方向为污泥资源化技术。

E-mail:772804084@qq.com

收稿日期:2021-04-15

修回日期:2021-05-09

(编辑:刘贵春)