

超声预处理污泥发酵液作为反硝化聚磷补充碳源研究

李健弟¹, 张伟², 张小玲¹, 苗欣欣¹, 张帆¹

(1. 长安大学 旱区地下水与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 中交上海航道勘察设计院有限公司, 上海 200120)

摘要: 剩余污泥含有丰富的有机物和氮、磷等营养物质, 对其进行超声预处理及水解酸化可回收溶解性的有机物及水解产物作为生物脱氮除磷工艺的补充碳源。以增加水解酸化后污泥上清液中的挥发性脂肪酸(VFA)为目的, 研究了超声声能密度及超声时间对污泥水解酸化释放 SCOD 和 VFA 的影响以及污泥水解酸化产物作为反硝化聚磷工艺补充碳源的可行性。结果表明, 超声预处理可以有效促进污泥的水解酸化, 在一定的范围内增加超声时间和声能密度可以提高水解酸化过程中产生的 SCOD 和 VFA 浓度; 有利于水解产酸的超声预处理条件是声能密度为 1.5 W/mL、超声时间为 10 min。在实际污水中投加污泥发酵液作为补充碳源可以提高反硝化聚磷系统对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率, 且发酵液/实际污水体积比为 1/35 时去除率最高; 长期以污泥发酵液作为补充碳源, 随着运行时间的增加, 系统对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率不断提高, 运行 20 d 以后去除率达到了 100%。

关键词: 剩余污泥; 超声预处理; 水解酸化; 碳源; 反硝化聚磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)09-0009-07

Additional Carbon Source for Denitrifying Phosphorus Removal Based on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Ultrasound

LI Jian-di¹, ZHANG Wei², ZHANG Xiao-ling¹, MIAO Xin-xin¹, ZHANG Fan¹

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region <Ministry of Education>, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co. Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: The sewage sludge contains rich organic matters and nutrients such as nitrogen, phosphorus. Ultrasonic pretreatment and hydrolysis acidification of sewage sludge can recover the dissolved organic matters and hydrolysis products which can be used as carbon sources of biological nitrogen and phosphorus removal. In order to increase the VFA in the sludge supernatant after hydrolysis acidification, the effects of energy density and duration of ultrasonic pretreatment on the hydrolysis acidification of the sewage sludge and the feasibility of anaerobic fermentation production as the carbon sources of denitrifying phosphorus removal were investigated. The experimental results showed that ultrasonic pretreatment could promote the hydrolysis acidification degree of sludge, the concentrations of SCOD and VFA during hydrolysis increased with the increases of energy density and duration in a certain

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408041)

通信作者: 张小玲 E-mail: zhangxiaoling101@126.com

range. The optimum energy density and duration was determined to 1.5 W/mL and 10 min, respectively. Addition of fermentation liquid improved the removal rate of phosphate effectively and the removal rate of phosphate was the highest when the adding ratio of fermentation liquid was 1/35 of the wastewater. The system kept operating stably and the removal rate of phosphate had been increasing when using fermentation liquid as the carbon sources of denitrifying phosphorus removal for a long time, and the removal rate of phosphate reached 100% after the system operated for 20 days.

Key words: sewage sludge; ultrasonic pretreatment; hydrolysis acidification; carbon source; denitrifying phosphorus removal

我国污水厂普遍存在碳源不足,往往需要外加碳源。而将剩余污泥水解酸化制备高含碳上清液并投放到脱氮除磷污水处理系统中,可以达到解决污水处理碳源不足和实现剩余污泥资源化利用的目的^[1]。但污泥水解过程较为缓慢,是复杂有机物降解的限速阶段,因此需要对污泥进行预处理,从而加快水解反应、提高有机物的生物降解性能、促进后续的发酵产酸反应和污泥利用。关于促进剩余污泥水解酸化的预处理方式研究很多,近年来超声波技术由于其无二次污染、分解速度快、设备简单等特点而引起了广泛的关注。污泥水解酸化产生的VFA以C2~C6的短链脂肪酸为主^[2],由于富含乙酸和丙酸等生物除磷和反硝化的良好底物,易被反硝化除磷微生物利用。在厌氧条件下,聚磷菌利用VFA合成贮能物质PHA,并进行释磷;在缺氧条件下,反硝化细菌可以利用VFA作为电子供体进行反硝化^[3]。对于利用剩余污泥发酵液作为脱氮除磷碳源的可行性,学者们做了很多研究,发现当以污泥发酵液为碳源时,虽然系统的氮和磷负荷增加,但对其去除率仍提高了^[4-6]。

很多研究表明^[7-8],低强度超声具有促进酶活性、细胞生长和细胞膜通透性的作用,所以能够提高污泥的生物活性。生活污水及污泥处理的本质是酶促反应。脱氢反应是生化反应的关键途径,因此脱氢酶(DHA)可以很好地反映厌氧污泥的活性成分。Xie等^[9]研究表明,厌氧污泥的DHA数量随着超声强度的增加而增加,DHA数量在0.2 W/cm²的超声强度时达到最大值,当超声强度达到0.6 W/cm²时厌氧污泥活性受到抑制,其DHA数量比对照组污泥还要低。

闫怡新等^[10]认为低强度超声有利于提高微生物活性的机理主要有两个方面:①当超声波的声强较低时,产生的空化泡的大小变化是有规律且和缓

的,并以非线性的方式在媒质中振荡若干个声周期,使其周围的酶或细胞颗粒受到微声流切应力的作用,这种空化即为稳态空化。稳态空化作用对细胞产生的破坏很小,并能有效促进可逆渗透,从而加强细胞内外物质运输,减少次生代谢产物的积累对微生物代谢的抑制作用,促进代谢产物的合成。稳态空化正是以这种特殊的能量形式来增强微生物的活性、加快生化反应速率。②发酵过程中DCO₂(溶解性CO₂)的浓度过高,会对细胞生长产生抑制作用,而通过低强度超声波辐照可以有效降低DCO₂的溶解度,从而促进细胞生长。

研究还表明,在一定功率的超声波下,酶分子和微生物细胞的酶活力及细胞存活力不会受到损坏,若超过这一功率,将使酶活力和细胞的存活力下降,这一特定功率下的声强称为“临界失活声强”。适当强度的超声波可以有效改善生物活性,而强度过大则对生物活性的提高不起作用甚至导致生物活性的降低。不同的生物反应都存在一个最佳的超声波功率,在污水生物处理过程中需要通过试验来进行优化选择。

笔者研究了超声声能密度和超声时间对剩余污泥水解酸化的影响以及超声预处理污泥酸化产物作为反硝化聚磷工艺补充碳源的可行性,以期对剩余污泥的资源化处理及缓解污水处理过程中碳源不足的问题提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

1.1.1 超声装置

超声装置为探头式超声波反应器,主要由超声波换能器、超声探头及反应容器组成。超声发生频率为20 kHz,电功率为30~600 W,探头直径为15 mm。试验时取100 mL污泥置于200 mL的玻璃烧杯中,将探头放在液面以下1.5 cm处进行超声破解

处理。

1.1.2 水解酸化反应装置

水解酸化分为静态试验和连续运行试验,其中静态试验是在水浴振荡器中完成的,连续运行装置是有效容积为5 L的反应器,通过水封装置保证密

封性良好。

1.2 污泥来源及性质

污泥取自西安市邓家村污水处理厂多级A/O系统的回流污泥,取回后于4℃冰箱中保存。分两次取样,其性质见表1。

表1 污泥性质

Tab.1 Characteristics of the activated sludge

项目	pH 值	含水率/%	TSS/ (g · L ⁻¹)	VSS/ (g · L ⁻¹)	SCOD/ (mg · L ⁻¹)	TCOD/ (mg · L ⁻¹)	VFA/ (mg · L ⁻¹)
1 [#]	6.90 ± 0.04	98.89 ± 0.38	10.35 ± 0.31	7.84 ± 0.15	55.38 ± 3.67	9 260.42 ± 21.35	26.23 ± 2.31
2 [#]	7.04 ± 0.05	98.80 ± 0.42	12.69 ± 0.28	7.93 ± 0.13	73.42 ± 4.12	12 316.92 ± 117.45	31.54 ± 2.31

1.3 试验方法

1.3.1 超声预处理对水解酸化的影响

对原泥和经声能密度为0.9~1.5 W/mL超声处理10 min的污泥进行5 d的水解酸化,通过每天测定SCOD和VFA浓度,研究声能密度对水解酸化的影响;控制声能密度为1.5 W/mL,分别超声预处理7、10、13 min,然后进行5 d的水解酸化,研究超声时间对水解酸化的影响。

试验在水浴摇床中完成,每个污泥均设置两个平行样,将150 mL的污泥装在250 mL的具塞锥形瓶内,置于摇床中进行水解酸化反应。反应过程中将摇床转速设为120 r/min,温度设为25℃。每次取两个污泥样,用离心机进行离心后得到污泥离心液,用于测试相关指标。

1.3.2 发酵液作为反硝化聚磷补充碳源的效果

以某污水处理厂初沉池出水作为实际污水,COD为200 mg/L左右,PO₄³⁻-P为5~6 mg/L。将实验室培养的反硝化聚磷污泥分成4份,1份加实际污水,另3份加发酵液与实际污水的混合液(体积比分别为1/70、1/35和1/24),在整个过程中取样分析NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、PO₄³⁻-P以及COD的变化,考察污泥发酵液作为外加碳源对于长期运行的反硝化除磷工艺的影响。反应器运行模式为厌氧/缺氧/好氧(2、2.5、0.5 h),NO₃⁻-N投加量为15 mg/L(折算到反应器内的浓度)。

1.4 主要指标的测定及计算方法

pH值:pHS10酸度计,COD:COD快速测定仪,PO₄³⁻-P:钼锑抗分光光度法,NO₃⁻-N:紫外分光光度法,NO₂⁻-N:N-(1-萘基)-乙二胺光度法,VFA:蒸馏法,VSS及TSS:重量法。

SCOD释放率(DD)的计算方法见式(1)。

$$DD = \frac{SCOD - SCOD_0}{TCOD - SCOD_0} \quad (1)$$

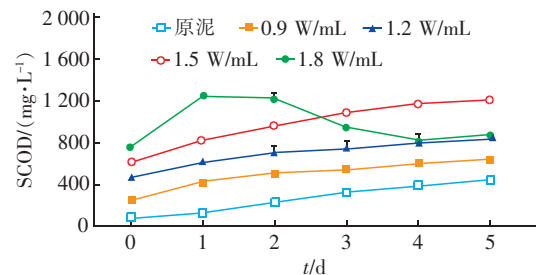
式中:SCOD为经超声预处理后上清液中溶解性COD的含量,TCOD为剩余污泥中总COD含量,SCOD₀为剩余污泥初始上清液溶解性COD含量。

2 结果与讨论

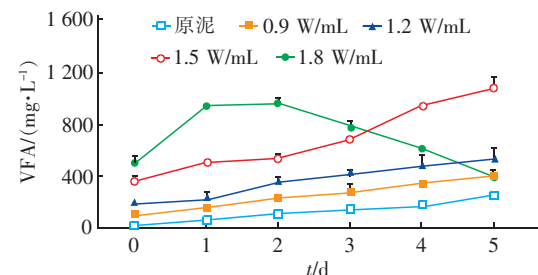
2.1 超声预处理对污泥水解酸化的影响

2.1.1 声能密度对SCOD及VFA的影响

经不同声能密度的超声波预处理后的1[#]污泥在水解酸化过程中SCOD及VFA的释放情况如图1所示。



a. SCOD的变化



b. VFA的变化

图1 水解酸化过程中SCOD及VFA的变化

Fig.1 Variations of SCOD and VFA during hydrolysis acidification

图1(a)表明,原泥和经声能密度为0.9~1.5 W/mL的超声预处理的污泥在5 d的水解酸化过程

中 SCOD 一直在增加,原泥 SCOD 从 55.38 mg/L 增加到了 451.23 mg/L, SCOD 释放率为 4.30%; 经 0.9、1.2 及 1.5 W/mL 超声预处理的污泥在水解酸化结束时 SCOD 释放率分别为 6.33%、8.32% 和 12.47%。经 1.8 W/mL 超声预处理的污泥在第 1 天的 SCOD 释放率为 12.81%,但在 2 d 后 SCOD 开始下降,至第 5 天时 SCOD 释放率下降到 8.71%。孙庆瑶等^[11]报道超声预处理对污泥有破解作用,但对微生物活性也有影响。本试验表明当声能密度在 0.9~1.5 W/mL 时,声能密度越大则对污泥的破解效果越好,获得的 SCOD 越多;但经 1.8 W/mL 预处理的污泥由于声能密度太高破坏了微生物的活性,影响水解酸化作用释放有机质,并且受损的微生物需要消耗大量的营养物质才能完成增殖代谢过程,因此经过 1.8 W/mL 超声预处理的污泥的 SCOD 从第 2 天开始降低。

由图 1(b)可知,原泥和经声能密度为 0.9~1.5 W/mL 超声预处理的污泥在水解酸化过程中 VFA 一直在增加,原泥的 VFA 由 26.23 mg/L 增加到 250.99 mg/L,经 0.9、1.2 及 1.5 W/mL 超声预处理污泥的 VFA 浓度在水解酸化结束时分别达到了 402.29、526.04 和 1 080.26 mg/L;经 1.8 W/mL 预处理的污泥在水解酸化 1 d 时 VFA 由 500.30 mg/L 增加到了 939.35 mg/L,在第 1~2 天则基本上没有变化,从第 3 天开始呈直线下降,到水解酸化结束时降为了 403.92 mg/L。试验结果表明超声预处理可以有效提高污泥水解酸化的 VFA 产量,并且随着声能密度的提高则这种促进作用增强,但是声能密度过高时在水解酸化的后期会影响 VFA 的产生。在污泥水解酸化过程中,一方面超声破解后大量难降解的聚合物解体,增加了溶液中水解酶的含量,促进了多糖、蛋白质等的溶出,增加了产酸所需的底物浓度;另一方面超声破解会影响发酵产酸菌的活性^[11]。显然,经 0.9、1.2 及 1.5 W/mL 预处理的污泥在水解酸化过程中水解酸化菌发挥了积极作用,随着水解酸化的进行 VFA 的浓度一直在增加。而经 1.8 W/mL 预处理污泥虽然在水解酸化开始前破坏了大分子有机物,增加了 VFA 的含量,但同时也破坏了发酵产酸菌等微生物的活性,因此自第 3 天开始 VFA 的浓度反而下降。

2.1.2 超声时间对水解酸化的影响

经不同超声时间预处理的 2[#]污泥在水解酸化

过程中 SCOD 和 VFA 的变化如图 2 所示。由图 2(a)可知,经 1.5 W/mL 超声预处理 7 min 和 10 min 的污泥在水解酸化过程中 SCOD 一直在增加,其中处理 7 min 污泥的 SCOD 由 502.36 mg/L 增加到 940.15 mg/L, SCOD 释放率从 3.50% 增加到了 7.08%;处理 10 min 的污泥 SCOD 由 658.50 mg/L 增加到 1 158.5 mg/L, SCOD 释放率从 4.78% 增加到了 8.86%;处理 13 min 的污泥 SCOD 在前 3 d 随着水解酸化时间的增加而增加,但在第 4 天和第 5 天有所波动,且低于超声预处理 10 min 的污泥在同期的 SCOD 产量。

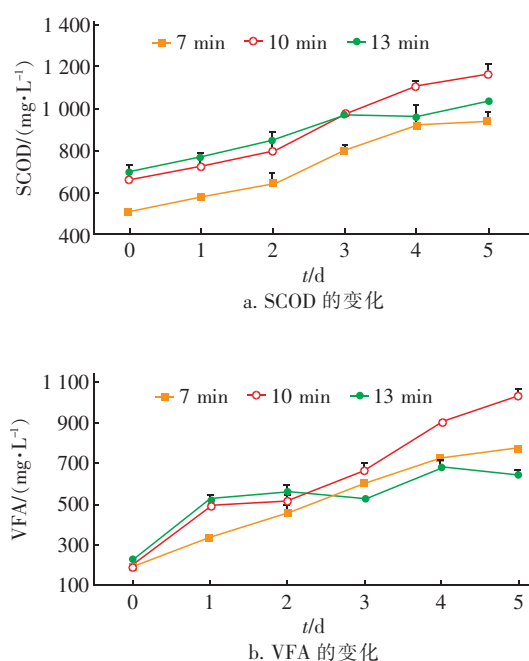


图2 水解酸化过程中 SCOD 及 VFA 的变化

Fig.2 Variations of SCOD and VFA during hydrolysis acidification

图 2(b)表明,超声处理 7 min 和 10 min 的污泥在水解酸化过程中 VFA 的增长趋势非常明显,在第 5 天 VFA 分别达到了 770.27 和 1 032.78 mg/L;经超声处理 13 min 的污泥在水解酸化的前 2 d, VFA 随着水解酸化时间的增加呈增长的趋势,在第 3 天 VFA 浓度有所下降,第 4 天又有了较大幅度的增加,达到了 681.03 mg/L,到第 5 天时又突然降低。说明在声能密度为 1.5 W/mL 的条件下,超声处理时间过长不但无助于水解酸化产生 VFA,还会多耗费能量。

在超声声能密度为 1.5 W/mL、超声时间为 10 min 的条件下,原泥、超声预处理污泥及水解酸化 5

d 的污泥上清液中 SCOD、VFA、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 及 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的情况如表 2 所示。可知,污泥经超声预

处理及水解酸化后不仅释放出大量的碳源,还释放出大量的氮和磷。

表 2 最佳超声条件下不同污泥中碳、氮及磷指标的对比

Tab. 2 Comparison of COD, nitrogen and phosphorus among different sludges under optimal ultrasound conditions

项 目	SCOD	VFA	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	TP
原泥	55.38	26.23	3.00	5.33	26.12	26.88
超声后	654.68	360.80	22.73	33.48	60.11	60.87
水解酸化	1 203.15	1 080.26	100.43	137.63	92.87	100.41

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

2.2 污泥发酵液作为反硝化聚磷碳源的效果

2.2.1 发酵液投加比例对反硝化聚磷效果的影响

在实际污水中添加不同比例的污泥发酵液后反硝化聚磷系统中一个典型周期内 COD、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的变化见图 3。由图 3(a)可知,发酵液的投加比例越大,SBR 反应器内初始 COD 浓度就越高,分别为 206.78、253.17、310.35、361.37 mg/L 。在厌氧阶段,各系统的 COD 都是随着反应时间先迅速减少再缓慢降低,进水中添加了发酵液的 COD 下降速度比实际污水的快,添加比例为 1/24 和 1/35 的又快于 1/70 的,说明污泥发酵液中富含乙酸和丙酸等短链脂肪酸,这些溶解性的有机物是生物除磷和反硝化的良好底物,因此添加的发酵液越多越容易被除磷微生物所利用^[4,8]。实际污水和添加发酵液比例为 1/35、1/70 的 COD 在厌氧结束时已经达到了最低值,而添加比例为 1/24 的在厌氧结束时还有未反应完的 COD,但在缺氧阶段开始后的 30 min 内其也降到了最低值。

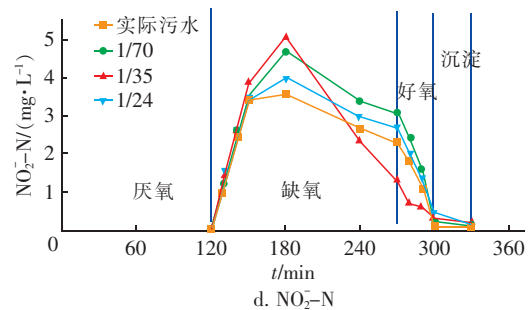
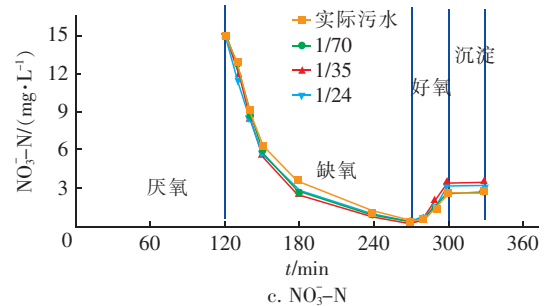
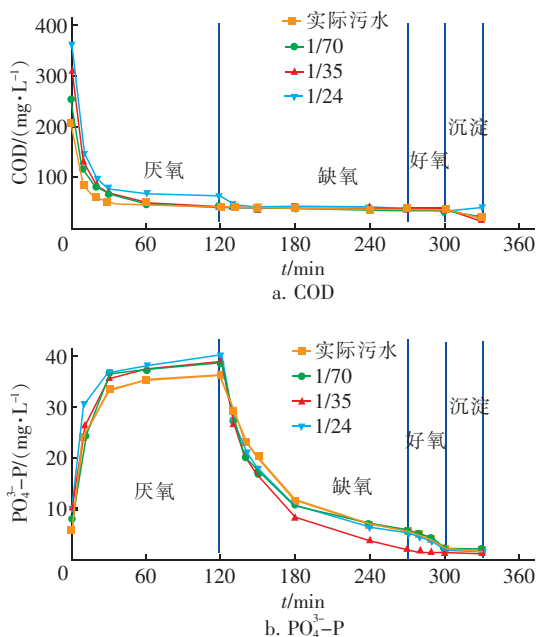


图 3 SBR 典型周期内 COD、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 和 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 浓度的变化情况

Fig. 3 Variation of COD, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ and $\text{NO}_x^- - \text{N}$ concentration in a typical SBR cycle

图 3(b) 显示,生活污水及添加发酵液比例为 1/70、1/35、1/24 的进水中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度分别为 5.65、7.57、8.07 和 10.09 mg/L ,由于污泥发酵液中含有一定量的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$,故添加的发酵液比例越大,初始的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度就越高。在厌氧段结束时投加了发酵液的系统中 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度略高于没有投加发酵液的。在缺氧阶段微生物利用 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 进行吸磷,缺氧吸磷效率为 $1/35 > 1/70 > 1/24 >$ 实际污水。在厌氧阶段利用有机物合成的 PHB 越多,在缺氧阶段氧化 PHB 获取的能量也越多,就能吸收更多的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$,因此添加了发酵液的聚磷速率和除磷效果都比实际污水高。但添加 1/24 发酵液的聚磷速率和除磷效果比添加 1/35 和 1/70 发酵液的

低,一方面可能是因为添加 1/24 发酵液的系统在厌氧结束时还有 COD 未反应完,在缺氧阶段反硝化菌先利用这部分 COD 进行反硝化,等这部分 COD 消耗完了才开始进行反硝化聚磷反应^[12];另一方面可能是因为添加的发酵液比例越大,随着发酵液进入系统的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 越多,也会影响 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除。由此可见,为了提高发酵液的投加量,在投加之前需进行氮、磷去除试验。

由图 3(c)和(d)可知,在缺氧段伴随硝态氮浓度的逐渐降低有亚硝态氮的产生和消耗过程,这是因为在缺氧反硝化阶段一部分硝态氮转化为亚硝态氮再转化为氮气,完成脱氮过程。反硝化速率排序为 $1/24 > 1/35 > 1/70 > \text{实际污水}$,这也是由于添加发酵液后在厌氧阶段微生物可利用的溶解性有机物增多,合成了更多的 PHB,使得在缺氧阶段反硝化速率加快。

2.2.2 发酵液对反硝化除磷工艺的长期影响

反硝化聚磷工艺在发酵液添加比例为 1/35 的条件下运行 29 d,考察了对 COD、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除情况。在进水 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度维持在 7~8 mg/L 时,厌氧释磷量除了个别时间点有所波动外,均基本稳定在 30 mg/L 左右;缺氧段结束时的磷浓度则是随着时间的增加而慢慢下降,从刚开始的 15.58 mg/L 下降到第 29 天时的 6.66 mg/L,说明随着培养时间的增加,缺氧段通过反硝化聚磷去除的磷越来越多。出水磷浓度除了刚开始几天的适应阶段和中间有两天大于 1 mg/L 外,其他时间都小于 1 mg/L,去除率基本都在 90% 以上,在系统运行 20 d 以后出水磷浓度基本上为零(见图 4)。

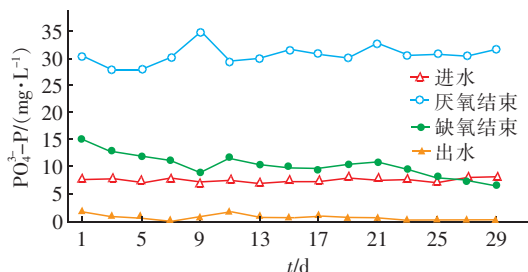


图4 添加发酵液长期运行时 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度的变化

Fig.4 Variation of $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ concentration during long-term operation with fermentation liquid addition

当进水 COD 浓度维持在 300 mg/L 左右时,在厌氧段结束时 COD 基本上已经降解完,低于 50 mg/

L;缺氧段结束和出水的 COD 浓度相对于厌氧段结束时的 COD 浓度略有下降,但幅度很小。在缺氧段一次性投加 15 mg/L 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,缺氧段结束时 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 也基本上反应完, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度基本上低于 2 mg/L, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度基本上低于 1 mg/L。说明添加发酵液后不仅增加了碳源,而且由于发酵液中含有足量的 VFA,丰富了进水的底物环境,使得微生物在厌氧段充分地利用发酵液中的碳源,以多种途径合成 PHB 供微生物进行反硝化除磷,进而提高了反硝化除磷的效果,保证了工艺的稳定运行^[9]。

3 结论

① 当超声声能密度为 0.9 和 1.5 W/mL 时,超声预处理的污泥在水解酸化过程中水解酸化菌发挥了积极作用,随着水解酸化的进行,发酵液中的 SCOD 及 VFA 浓度增加;而经 1.8 W/mL 预处理的污泥虽然在水解酸化开始前破坏了大分子有机物,增加了 VFA 的含量,但同时也破坏了发酵产酸菌等微生物的活性,使得发酵液中的 SCOD 及 VFA 在水解酸化后期呈下降趋势。

② 当超声时间由 7 min 增加到 10 min 时,发酵液中的 SCOD 及 VFA 随超声时间的增加而增加,但超声 13 min 时 SCOD 及 VFA 值反而有所降低。

③ 在实际污水中投加污泥发酵液作为补充碳源可以提高反硝化聚磷系统的 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 去除率,且发酵液投加比例为 1/35 时对磷酸盐的去除率最高;长期以污泥发酵液作为补充碳源,系统对 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的去除率一直在增加,运行 20 d 以后去除率可以达到 100%。

参考文献:

- [1] 王建龙,彭永臻,刘莹,等. 水解酸化/AAO 工艺的同时脱氮除磷及污泥减量研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(23): 1-5.
Wang Jianlong, Peng Yongzhen, Liu Ying, et al. Hydrolysis acidification/AAO process for simultaneous nitrogen and phosphorus removal and excess activated sludge reduction[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(23): 1-5 (in Chinese).
- [2] 金宝丹,王淑莹,邢立群,等. 不同发酵方式对污泥厌氧发酵性能的影响及其发酵液利用[J]. 中国环境科学, 2016, 36(7): 2079-2089.
Jin Baodan, Wang Shuying, Xing Liqun, et al. The effect

- of different fermentation methods on the sludge anaerobic fermentation performance and the utilization of fermentation liquor [J]. China Environmental Science, 2016, 36(7): 2079–2089 (in Chinese).
- [3] 何腾,熊家晴,王晓昌,等. 厨余发酵液作为SBR碳源的脱氮除磷特性[J]. 中国给水排水, 2016, 32(13): 26–30.
- He Teng, Xiong Jiaqing, Wang Xiaochang, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus removal in SBR process with fermentation liquid of food waste as external carbon source [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(13): 26–30 (in Chinese).
- [4] 高永青,彭永臻,王淑莹,等. 污泥水解酸化液用作 A^2/O 系统脱氮除磷碳源的研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(17): 24–26.
- Gao Yongqing, Peng Yongzhen, Wang Shuying, *et al.* Using sludge hydrolysis acidification liquor as carbon source for nitrogen and phosphorus removal in A^2/O system [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(17): 24–26 (in Chinese).
- [5] Zheng X, Chen Y G, Liu C C. Waste activated sludge alkaline fermentation liquid as carbon source for biological nutrients removal in anaerobic followed by alternating aerobic-anoxic sequencing batch reactors [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(3): 478–485.
- [6] Gao Y Q, Peng Y Z, Zhang J Y, *et al.* Biological sludge reduction and enhanced nutrient removal in a pilot-scale system with 2-step sludge alkaline fermentation and A^2/O process [J]. Bioresour Technol, 2011, 102(5): 4091–4097.
- [7] 李欢,金宜英,聂永丰. 污泥的超声破解及其对微生物活性的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(9): 2674–2677.
- Li Huan, Jin Yiyang, Nie Yongfeng. Ultrasonic sludge disintegration and its influence on sludge microbial activity [J]. Environmental Science, 2009, 30(9): 2674–2677 (in Chinese).
- [8] Zheng M, Liu Y C, Xin J, *et al.* Ultrasonic treatment enhanced ammonia-oxidizing bacterial (AOB) activity for nitrification process [J]. Environ Sci Technol, 2015, 50(2): 864–871.
- [9] Xie B Z, Liu H, Yan Y X. Improvement of the activity of anaerobic sludge by low-intensity ultrasound [J]. J Environ Manage, 2009, 90(1): 260–264.
- [10] 闫怡新,刘红. 低强度超声波强化污水生物处理技术[J]. 中国给水排水, 2004, 20(8): 31–33.
- Yan Yixin, Liu Hong. Low-energy ultrasound enhanced biological technology for wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(8): 31–33 (in Chinese).
- [11] 孙庆瑶,梅翔,蔡威,等. 剩余污泥超声预处理后水解酸化特性[J]. 环境工程学报, 2010, 4(10): 2359–2366.
- Sun Qingyao, Mei Xiang, Cai Wei, *et al.* Hydrolysis and acidification characteristics of excess sludge after ultrasonic pretreatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(10): 2359–2366 (in Chinese).
- [12] 吕鑑,赵永志,王佳伟,等. 初沉污泥水解酸化对 A^2/O 工艺强化除磷影响[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(9): 981–984.
- Lü Jian, Zhao Yongzhi, Wang Jiawei, *et al.* Effects of primary sludge hydrolysis on enhanced biological phosphorous removal in A^2/O process [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(9): 981–984 (in Chinese).



作者简介:李健弟(1992–),女,甘肃静宁人,硕士研究生,从事污水脱氮除磷技术研究。

E-mail: 2577284527@qq.com

收稿日期: 2019-01-15