

# 微生物强化 MBR 工艺剩余污泥的好氧消化过程

李再然<sup>1</sup> 宋英豪<sup>1</sup> 贾立敏<sup>1</sup> 王焕升<sup>1</sup> 刘茹<sup>2</sup> 熊娅<sup>3</sup> 苏本生<sup>1</sup>

(1. 北京化工大学高新技术研究院, 北京 100029; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042;

3. 中国地质大学环境科学与工程系, 北京 100083)

**摘要** 为了考察原位污泥减量技术产生的长污泥龄污泥好氧消化可能性,以某污水处理厂 MBR 工艺产生的剩余污泥为研究对象(污泥龄为 60 d)将实验筛选得到的强化效果最佳的 3 种菌种(分别为 B4、H4 和 N2)分别投加到 MBR 剩余污泥好氧消化反应器中。经过 58 d 的好氧消化后,投加 B4、H4 和 N2 的 3 个反应器 MLSS 消解率分别比污泥对照提高了 13.2%、11.7% 和 6.2%,其中投加 B4 菌种 MLSS 消化效率提高最多。MLVSS 消解率分别比污泥对照提高 18.8%、20.0% 和 11.0%。研究表明原位污泥减量技术产生的长污泥龄污泥具有污泥好氧消化的可能性,同时筛选出来的 3 种菌种在消化过程中有明显的强化效果。随着消化反应的进行到 52 d,反应器中出现大量的硝酸盐氮和总磷的积累。观察反应过程中氨氮、硝酸盐氮、pH 和总磷的变化,大量的硝酸盐存在时诱导以硝酸盐为电子受体的反硝化除磷的进行。在消化过程中,磷溶出情况取决于污泥的水解程度,投加菌种加速了总磷溶出和提高了污泥的水解程度。同时投加菌种强化好氧消化显著降低污泥的 SVI,投加菌种在强化好氧消化过程中能更多地消耗污泥中有机物,进而提高消化效率。

**关键词** 微生物强化 好氧消化 污泥减量 污泥沉降性能 MBR 剩余污泥

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2015)04-0989-06

## Improving efficiency of MBR sludge using microorganisms in aerobic digestion process

Li Zairan<sup>1</sup> Song Yinghao<sup>1</sup> Jia Limin<sup>1</sup> Wang Huansheng<sup>1</sup> Liu Ru<sup>2</sup> Xiong Ya<sup>3</sup> Su Bensheng<sup>1</sup>

(1. High and New Technology Research Institute, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Nanjing Environmental Science Research Institute of Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China;

3. Department of Environmental Science and Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract** In order to investigate the aerobic digestion ability of the long-age sludge, which was produced in the in-situ minimization process, MBR excess sludge aged sixty days was selected as the subject. There were three kinds of microorganisms with the maximum digestion which were named B4, H4 and N2, respectively. They were employed in the aerobic digestion. After 58 days, the mixed liquid suspended solids (MLSS) digestion efficiency of the three aerobic digestion reactors increased by 13.2%, 11.7% and 6.2% than the sludge control, respectively when B4, H4 and N2 were added respectively into the reactors. Dosing the bacteria B4 had the best digestion of MLSS. And the mixed liquid volatile suspended solids (MLVSS) digestion efficiency increased by 18.8%, 20.0% and 11.0%, respectively. The results indicated that the aerobic digestion ability of the long-age sludge produced by the in-situ minimization process was existed. A significant positive effect of microorganisms in the digestion process can be found. A lot of nitrate and total phosphorus was accumulating at the 52th day in the aerobic digestion reactors. The analysis of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  and pH indicated that the large number of nitrate induced the process of denitrifying phosphorus removal with the nitrate as the electron acceptor. The hydrolysis degree of sludge influenced the dissolution of total phosphorus. Dosing bacterial would accelerate dissolution of total phosphorus and enhance the hydrolysis of sludge. Moreover, the screened microorganisms can reduce the sludge volume index (SVI) of the sludge during the aerobic digestion, the bacteria consumed more organic matter to enhance efficiency of digestion.

**Key words** microorganism intensify; aerobic digestion; sludge reduction; sludge settling performance; MBR excess sludge

MBR 工艺是一种新型、高效的污水处理技术,在污水处理与回用中得到了广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。MBR 工艺的活性污泥具有污泥龄较长、生物相丰富(存

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划项目(2014BAC04B01)

收稿日期: 2014-03-03; 修订日期: 2014-04-14

作者简介: 李再然(1988—),女,硕士研究生,主要从事污泥处理的研究工作。E-mail: lizairan88@163.com

\* 通讯联系人 E-mail: 13501238620@139.com。

在世代时间较长的硝化菌)、污泥产率低、污泥粒径分布主要集中在小尺寸区域等特点<sup>[3]</sup>,是一种原位污泥减量技术<sup>[4]</sup>。理论上 MBR 工艺能实现污泥零排放,但在实际的运行过程中 MBR 工艺仍会产生一定量的污泥,而有关 MBR 工艺产生污泥的处理研究目前还很少。

常见的剩余污泥处理方法包括物理、化学和生物方法,生物消化方法是常见的剩余污泥处理方法。生物消化方法包括好氧消化和厌氧消化。好氧消化将污泥解体后利用污泥本身中的微生物以及产生的酶达到污泥减量的效果。污泥好氧消化具有稳定、灭菌、投资少、运行管理方便和基建费用低等优点<sup>[5]</sup>,但存在效率低和反应时间长等缺点。本研究利用好氧消化的方法考察 MBR 工艺剩余污泥的生物消化可能性,同时在过程中投加筛选获得的强化菌种提高好氧消化的效率。希望能够提供 MBR 污泥微生物强化好氧消化方面的数据,为后续的 MBR 剩余污泥处理提供一定的基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验所用污泥取自某污水处理厂的 MBR 工艺二沉池,MBR 工艺采用的膜为久保田的板式膜,污水厂剩余污泥的污泥龄为 60 d。

污泥取回后均放入 4℃ 的冰箱中,污泥使用前利用气泵闷爆 24 h(24 h 后污泥的厌氧臭味基本消失,颜色变黄),然后过 0.45 mm 筛去除污泥中的比较大的杂质。实验所用 MBR 污泥特性参数为:MLSS = 13.6222 g/L; MLVSS = 9.5644 g/L; pH = 7.05;  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  = 0.13 mg/L;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  = 14.156 mg/L; TP = 17.99 mg/L; SVI = 72.675。MBR 污泥的污泥龄为 60 d。

MBR 污泥 VSS/SS 为 0.702,表明 MBR 剩余污泥的活性较高。污泥的污泥龄较长为 60 d。污泥的 SVI 为 72.675 表明污泥的沉降性能较好。

### 1.2 筛选强化菌种

#### 1.2.1 强化菌种分离

强化菌种是通过混合菌剂和 MBR 污泥分离、纯化和筛选获得。混合菌剂来源于某处理畜禽废水的处理单元。在处理过程中,该处理项目在污泥浓度降低的情况下未出现出水水质恶化的情况,所以我们认为,此工艺的污泥中存在抑制或减少污泥产生的菌种。强化菌种分离和纯化具体方法如下:①利

用污泥作为底物对微生物进行驯化。将混合菌剂和 MBR 污泥分别取 1 mL 接种到牛肉膏蛋白胨培养液中,放于 33℃,140 r/min 的培养箱中富集培养 24 h。将培养好的复杂微生物用超纯水冲洗两遍后放入 30 mL 的污泥中(MLSS 约为 1 000 mg/L)。将锥形瓶密封好后放于 33℃,140 r/min 的培养箱中进行驯化。驯化过程分 4 个阶段,每个阶段为 7 d,每个阶段结束后取第 7 天的污泥 10 mL 放入未处理的 30 mL 污泥中进行处理,直到第 4 阶段结束;②到第 28 天驯化结束后,摇匀污泥取 1 mL 污泥用于分离纯化,将污泥样品利用灭菌水分别稀释到  $10^{-4}$ 、 $10^{-5}$  和  $10^{-6}$ ,然后分别取稀释后的样品 0.1 mL 涂布到牛肉膏蛋白胨的平板上,放于 33℃ 的培养箱中培养 1~2 d,在平板上观察菌种根据菌种不同的表观性状区分菌种,例如菌落是否光滑、是否有光泽、是否突起或隆起、菌落颜色等。将区分开的菌种分别命名并保存于牛肉膏蛋白胨的斜面上,放于 4℃ 的冰箱中,每 3 个月接种到新的斜面上。

通过分离和纯化一共获得 12 种表观性状不同的菌种。以上实验,除驯化操作外所有操作均在无菌条件下操作。

#### 1.2.2 强化菌种筛选

为了从获得的 12 种菌种中筛选出强化污泥好氧消化效果最好的 3 种菌种,将分离出来的 12 种菌种利用 100 mL 牛肉膏蛋白胨富集 24 h 后,纯水冲洗两遍,振荡使菌种混匀,把获得的菌种稀释成 8 mL,取 1 mL 测定菌种 OD。为了保证菌种的投加量一致,使每种菌种投加到污泥中的 OD 为 0.8。根据每种菌种测定的 OD 取相应体积的菌种投加到 30 mL 污泥中。将其置于 100 mL 锥形瓶中进行反应,以不加菌剂的污泥 30 mL 置于 100 mL 锥形瓶中作为对照。将所有锥形瓶放于 33℃,140 r/min 的摇床中进行反应,反应 10 d 后取出污泥测定各锥形瓶中污泥的 MLSS,通过比较各种菌剂的污泥 MLSS 消解率,确定 3 种 MLSS 消解率最高的菌种用于后面的菌种强化 MBR 剩余污泥好氧消化实验。

### 1.3 菌种强化 MBR 剩余污泥好氧消化实验

将上面筛选的 3 种菌种和 1 mL 污泥利用牛肉膏蛋白胨富集培养 48 h,菌液用纯水冲洗两遍震荡均匀后用于下面实验中。将污泥富集后得到的混合菌剂命名为污泥菌。

实验共设 5 组,分别为第 1 组不加任何菌剂的污泥对照、第 2 组加入污泥菌的对照、第 3 组污泥中

投加 B4 菌种、第 4 组污泥中投加 H4 菌种、第 5 组污泥中投加 N2 菌种。将预处理后的 1 000 mL 污泥放于反应桶中,利用电动搅拌器进行搅拌确保反应过程中均匀化,转速为 300 r/min,控制反应器中溶解氧溶度( $6 \pm 0.5$ ) mg/L。将 3 种菌种投入到污泥后进行反应。

参照《城镇污水处理厂污染物排放标准》中污泥稳定指标是污泥中的有机物降解效率要达到 40%<sup>[6]</sup>,所以此实验以污泥的好氧消解率达到 40% 停止。

#### 1.4 指标测定方法

实验过程中每 4 天取 20 mL 污泥样品在 9 000 r/min 转速下,离心分离 10 min 后测定上清中的 TP、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  等指标。以上分析均在取得污泥样品后 2 h 内完成。实验中 MLSS 和 MLVSS 测定采用重量法;TP 测定采用钼酸铵分光光度法; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  测定采用水杨酸法; $\text{NO}_3^- \text{-N}$  测定采用原子吸收方法。

## 2 结果与讨论

### 2.1 筛选强化菌种结果

经过菌种的分离与筛选,实验最终确定用于微生物强化 MBR 剩余污泥好氧消化过程的 3 种菌种分别为 B4、H4 和 N2。好氧消化 10 d 后,过程中投加 B4、H4 和 N2 菌种的污泥消解率分别为 17.35%、16.55% 和 15.27%,污泥对照的消解率为 12.29%。投加 B4、H4 和 N2 菌种的污泥消解率比污泥对照分别提高了 5.06%、4.26% 和 2.98%。筛选得到的 3 种菌种的性状可描述为: B4 为白色,透明,边缘不整齐、不均匀的菌种; H4 为淡黄色,圆形,突起,湿润,光滑的菌种; N2 为透明,白色,隆起,边缘整齐的菌种。

### 2.2 菌种强化 MBR 剩余污泥强化过程实验结果

#### 2.2.1 MLSS 和 MLVSS 消解率变化

通过 58 d 的好氧消化反应第 3 组(投加 B4 菌种)和第 4 组(投加 H4 菌种)污泥的 MLSS 消解率达到了 40%,所以 5 组反应在第 58 天停止。5 组反应剩余污泥的 MLSS 的消解率随时间变化如图 1 所示。由图 1 可知,好氧消化到 58 d 后,第 1 组污泥对照、第 2 组污泥菌对照、第 3 组投加菌种 B4、第 4 组投加菌种 H4 和第 5 组投加菌种 N2 的 MLSS 消解率分别为 32.5%、34.9%、45.7%、44.2% 和 38.7%。第 1 组实验表明,MBR 剩余污泥(即原位

污泥减量技术产生的长污泥龄污泥)具有可生化性,能够利用好氧消化的方法进行处理。第 2 组 MLSS 的消解率高于第 1 组可知投加污泥菌有利于污泥好氧消化提高。第 3 组、第 4 组和第 5 组 MLSS 消解率与第 1 组相比 MLSS 消解率分别提高 13.2%、11.7% 和 6.2%。实验过程中投加 3 种菌种提高了污泥好氧消化的效率。第 3 组投加 B4 菌种污泥好氧消化效率提高的最多效果最好,这表明投加不同菌种对污泥好氧消化效率影响不同。因此,投加适合的菌种有利于提高污泥好氧消化效率。

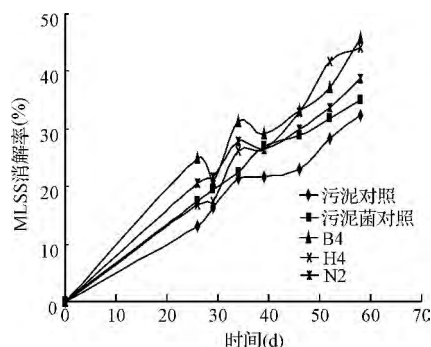


图 1 MLSS 消解率随时间变化情况

Fig. 1 Digestion efficiency of MLSS during aerobic digestion process

5 组反应剩余污泥的 MLSS 的消解率随时间变化如图 2 所示,反应进行到 58 d,5 组实验 MLVSS 消解率分别为 31.0%、38.5%、49.8%、51.0% 和 42.0%。其中 5 组实验的 MLVSS 消解率变化与 5 组实验的 MVSS 变化基本相同。

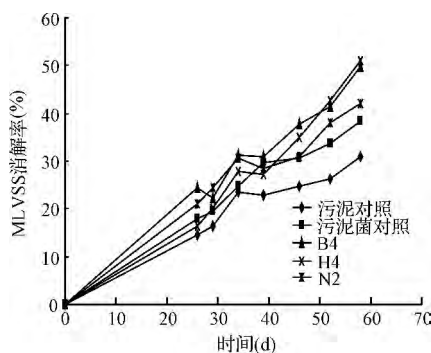


图 2 MLVSS 随时间变化情况

Fig. 2 Digestion efficiency of MLVSS during aerobic digestion process

在污泥好氧消化过程中,投加菌种能显著提高污泥好氧消化效率。这可能是由于投加菌种提高了反应过程中微生物活性和活性微生物的数量。在利

用微生物强化污泥处理研究中,许多研究证实,投加微生物能强化原位污泥减量<sup>[8-9]</sup>。这些研究表明,投加微生物调整了反应过程中的微生物种类和分布<sup>[8-9]</sup>。投加微生物到污泥好氧强化的研究很少,张忠智等<sup>[7]</sup>的研究表明,投加菌剂有利于污泥好氧消化效率的提高,与本实验结果一致。投加菌剂能够提高污泥好氧消化效率,可能是由于投加菌种使反应中的活化微生物数量增多、微生物活性增强和投加菌种改变了污泥中菌群的种类和分布。

本实验中,MBR里剩余污泥好氧消化进行了58 d,这可能是由于反应过程中使用的污泥是原位污泥减量技术产生的长污泥龄污泥,该污泥不易消化<sup>[10]</sup>。同时通过后面的分析可知,反应过程中pH的降低对污泥好氧消化也存在抑制作用。因此,本实验好氧消化结束时间比常规活性污泥法产生的剩余污泥消化时间长。

## 2.2.2 强化好氧消化反应过程中物质的溶出情况与分析

5组实验过程中pH、硝酸盐氮和氨氮的变化如图3~5所示。观察图3和图4可知,随着反应的进行硝酸盐和 $H^+$ 均不断积累。利用SPSS分别对每组pH与硝酸盐含量进行相关性分析,5组的相关系数分别为-0.918、-0.954、-0.973、-0.950和-0.943( $p \leq 0.01$ )。通过相关系数可知,实验过程中pH与硝酸盐含量呈明显的负相关关系,好氧消化反应过程中pH的下降主要是因为好氧消化过程中硝化反应引起的。氨氮的变化在15 d左右开始出现一定量的氨累积,到28 d左右出现了氨氮浓度高峰,之后就没有大量的氨氮积累。在整个过程中,氨氮积累量不大,硝酸盐从反应一开始就出现了积累,这主要是因为MBR污泥中有世代时间较长的硝化细菌。MBR剩余污泥中含氮物质的变化主要是由于氨化反应不断溶出、消解和硝化反应转化为硝酸盐。在MBR剩余污泥好氧消化过程中,硝化反应是主要反应之一,这与Khursheed A.等<sup>[11]</sup>的结论一致。反应过程中硝酸盐积累的氮来源于污泥的胞外聚合物和反应过程中消解的细胞。硝酸盐的积累说明反应过程中存在污泥的衰减。由图3可知,第3组和第4组pH降低幅度低于第1组,图4中第3组和第4组硝酸盐积累比第1组快。通过硝酸盐积累快慢可知投加菌种有利于污泥好氧消化。

随着好氧消化反应的进行,过程中产生的氢离子不利于反应的发生,污泥MLSS和MLVSS前30 d

的消解率明显高于后面28 d的消解率。

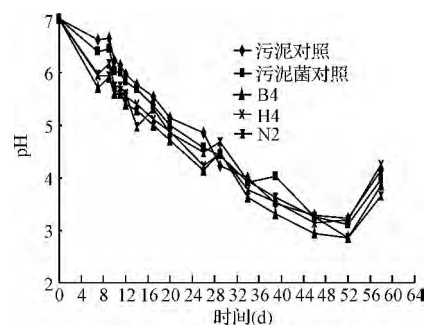


图3 pH随时间变化情况

Fig. 3 Change of pH in aerobic reactors

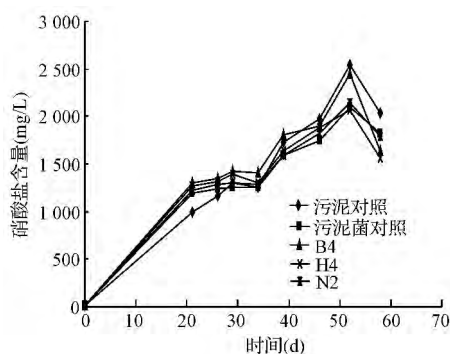


图4 反应过程中硝酸盐氮随时间变化情况

Fig. 4 Change of  $NO_3^-$ -N concentration in aerobic reactors

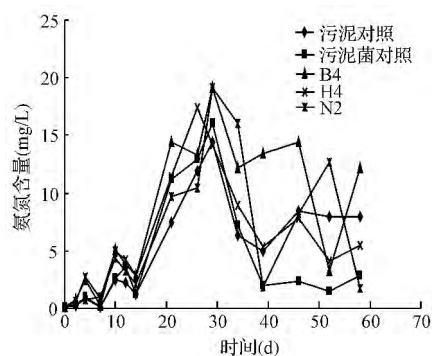


图5 反应过程中氨氮随时间变化情况

Fig. 5 Change of  $NH_4^+$ -N concentration in aerobic reactors

MBR工艺剩余污泥好氧消化反应过程伴随着磷的溶出,如图6所示。反应大约在20 d以后各条曲线才有上升趋势,这表明磷开始溶出需要时间较长,这主要因为MBR剩余污泥的泥龄较长比较顽固<sup>[12]</sup>。由图5可知,5组实验中总磷含量5条曲线趋势相似,这表明在好氧消化过程中投加菌种和没有投加菌种的实验组磷溶出的机制是相同的。第3

组曲线在整个反应过程中高于其他 4 条曲线,而且污泥对照基本上低于其他 4 条曲线。这表明在好氧消化过程中投加 B4 菌种的第 3 组实验总磷溶出最快,第 1 组总磷溶出最慢。投加 B4 菌种加速了好氧消化反应过程中总磷的溶出。Bi Dongsu 等<sup>[13]</sup>的研究表明,微生物的水解程度决定了污泥中磷释放的能力。通过比较可知投加 B4 的反应器中污泥水解程度最高,对照组的污泥水解程度最低。通过 Bi Dongsu 等<sup>[13]</sup>的研究表明,投加 B4 菌种促进了污泥水解,加速了总磷的溶出。投加菌种能够促进污泥的水解,进而提高污泥好氧消化效率。

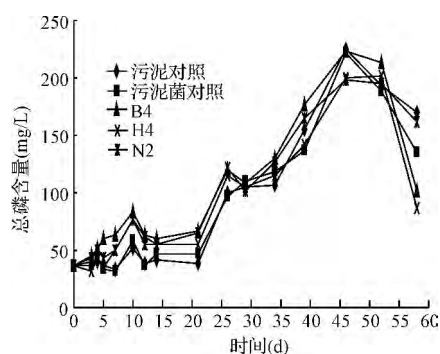


图 6 反应过程中总磷含量随时间变化情况

Fig. 6 Concentration of TP in solution during aerobic digestion

好氧消化反应在 52 d 时硝酸盐氮(图 4)和总磷含量(图 6)都出现了下降。硝酸盐氮和总磷同时降低可能是由于在好氧条件下出现了以硝酸盐为电子受体的反硝化除磷反应。Bi Dongsu 等<sup>[13]</sup>的研究表明,在大量硝酸盐和总磷下能够诱导以硝酸盐为电子受体的反硝化除磷反应。反硝化除磷使硝酸盐和总磷含量都有所下降。关于磷和硝酸盐氮之间的定量关系 Zou Hua 等<sup>[14]</sup>提出公式  $\Delta P = 1.51 \times \Delta N$ , 而 Bi Dongsu 等<sup>[13]</sup>提出公式  $\Delta P = 0.11 \times \Delta N$ 。实验中总磷和硝酸盐减量的量之间的比值系数( $\Delta P / \Delta N$ )在 0.11 ~ 1.51 之间,所以推断在反应过程中大量的硝酸盐和磷积累诱导和强化了反硝化除磷进行。好氧消化反应过程中如果存在大量硝酸盐,氮和总磷积累时会诱导反硝化除磷的进行。

### 2.2.3 好氧消化后污泥沉降性能的变化

MBR 剩余污泥的 SVI 数据如表 1 所示。其中污泥对照和污泥菌对照反应前后的 SVI 都介于 70 ~ 100 之间,而另外 3 组污泥的 SVI 均小于 70,其中投加 B4 和 H4 产生的污泥 SVI 为 31.102 和

32.653。SVI 是衡量活性污泥沉降性能的指标,良好的活性污泥 SVI 常在 50 ~ 120 之间,SVI 过低表明污泥活性不够。第 3 组和第 4 组反应中污泥的 SVI 较低(<50)表明经过投加菌种的好氧消化的污泥中有机物减少<sup>[15]</sup>,污泥活性降低出现了无机物的积累。投加 B4 和 H4 的 MBR 污泥好氧消化中大量消化的是污泥中的有机物,投加 B4 和 H4 有利于好氧消化过程中有机物的消耗。

表 1 反应前后 MBR 剩余污泥的 SVI 数据比较

Table 1 Comparison of MBR sludge SV<sub>30</sub> between initial sludge and sludge after aerobic digestion

	污泥对照	污泥菌对照	B4	H4	N2
开始	72.675	72.675	72.675	72.675	72.675
结束	90.217	99.228	31.102	32.653	61.058

## 3 结 论

(1) MBR 剩余污泥具有生物强化的可能性,能够利用好氧消化的方法进行处理。投加 3 种菌种有利于污泥好氧效率提高,消化 58 d 后 5 组实验 MLSS(污泥对照、污泥菌对照、B4、H4、N2)消化率分别为 32.5%、34.9%、45.7%、44.2% 和 38.7%。第 3 组、第 4 组和第 5 组 MLSS 消解率与第 1 组相比 MLSS 消解率分别提高 13.2%、11.7% 和 6.2%。其中投加 B4 菌种 MLSS 消化效率提高最多。消化 58 d 后 5 组实验(污泥对照、污泥菌对照、B4、H4 和 N2) MLVSS 消化率 31.0%、38.5%、49.8%、51.0% 和 42.0%。投加筛选出来的菌种能提高 MBR 工艺剩余污泥好氧消化效率,不同的菌种对好氧消化的影响不同。

投加菌剂能够提高污泥好氧消化效率可能是由于投加菌种使反应中的活化微生物数量增多,微生物活性增强,而且改变了污泥中菌群的种类和分布。

(2) 在 MBR 剩余污泥好氧消化过程中,硝化反应是主要反应之一。MBR 工艺剩余污泥好氧消化过程中积累了大量的硝酸盐和总磷,大量的硝酸盐存在时诱导以硝酸盐为电子受体的反硝化除磷的进行。在消化过程中,磷溶出情况取决于污泥的水解程度,投加菌种加速了总磷溶出和提高了污泥的水解程度。

(3) 强化过程中微生物能够显著降低污泥的 SVI,说明投加菌种在强化好氧消化过程中能更多地消耗污泥中有机物,进而提高好氧消化效率。

## 参考文献

- [1] 熊凯波.  $A^2/O + MBR$  工艺在城市污水处理工程中应用. 北京: 北京工业大学硕士学位论文, 2012  
Xiong Kaibo. Application of  $A^2/O + MBR$  process in municipal wastewater treatment engineering. Beijing: Master Dissertation of Beijing University of Technology, 2012 (in Chinese)
- [2] 张军, 吕伟娅, 聂梅生, 等. MBR 在污水处理与回用工艺中的应用. 环境工程, 2001, 19(5): 9-11  
Zhang Jun, Lv Weiya, Nie Meisheng, et al. Practical application of MBR in wastewater treatment and reuse. Environmental Engineering, 2001, 19(5): 9-11 (in Chinese)
- [3] 黄翠芳. MBR 与 CAS 的特性比较和 MBR-CAS 工艺的小试研究. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2007  
Huang Cuifang. Comparison of characteristics between MBR and CAS and a preliminary study of the MBR-CAS. Tianjin: Master Dissertation of Tianjin University, 2007 (in Chinese)
- [4] 刘琳, 宋碧玉. 污泥减量化技术新进展. 工业用水与废水, 2005, 36(3): 5-9  
Liu Lin, Song Biyu. A new progress of sludge reduction technology. Industrial Water and Wastewater, 2005, 36(3): 5-9 (in Chinese)
- [5] 丁瑾, 朱南文, 宋立杰. 电化学预处理提高剩余污泥好氧消化性能研究. 环境污染与防治, 2010, 32(5): 52-56  
Ding Jin, Zhu Nanwen, Song Lijie. Enhancement of waste activated sludge aerobic digestion by electrochemical pretreatment. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(5): 52-56 (in Chinese)
- [6] 丁文川, 龙腾锐, 曾晓岚, 等. 低强度超声场促进剩余污泥好氧消化. 给水排水, 2007, 33(5): 41-45  
Ding Wenchuan, Long Tengrui, Zeng Xiaolan, et al. Low intensity ultrasonic treatment to enhance aerobic digestion of excess sludge. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(5): 41-45 (in Chinese)
- [7] 张忠智, 钟为章, 穆红岩. 功能微生物对炼厂剩余污泥减量化效果的研究. 石油化工高等学校学报, 2010, 23(1): 23-26  
Zhang Zhongzhi, Zhong Weizhang, Mu Hongyan. Refinery residual sludge reduction technologies by using multi-function microbe. Journal of Petrochemical Universities, 2010, 23(1): 23-26 (in Chinese)
- [8] 黄川, 王里奥, 宋珍霞, 等. 有效微生物和多功能复合微生物制剂生物强化提高化粪池粪便污泥减量效率研究. 环境工程学报, 2010, 4(7): 1636-1642  
Huang Chuan, Wang Liao, Song Zhenxia, et al. Study on septic tank nightsoil sludge reduction by bioaugmentation of EM and MCMP. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(7): 1636-1642 (in Chinese)
- [9] 李俊, 朱臻, 朱国政, 等. 利用 MCMP 微生物制剂减少剩余污泥产量的研究. 环境工程学报, 2007, 1(12): 92-95  
Li Jun, Zhu Zhen, Zhu Guozheng, et al. Study on reducing of excess sludge production by MCMP inoculation. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, 1(12): 92-95 (in Chinese)
- [10] 苏剑波. 实现污泥减量化污水处理工艺的分析与研究. 广东化工, 2009, 36(6): 146-148  
Su Jianbo. The analysis and Research on sewage treatment process to attained the sludge reduction. Guangdong Chemical Industry, 2009, 36(6): 146-148 (in Chinese)
- [11] Khursheed A., Kazmi A. A. Retrospective of ecological approaches to excess sludge reduction. Water Research, 2011, 45(15): 4287-4310
- [12] 曹占平, 张景丽, 张宏伟. 污泥龄对 MBR 中微生物特性的影响. 环境工程学报, 2011, 5(4): 801-806  
Cao Zhanping, Zhang Jingli, Zhang Hongwei. Effects of sludge retention time on sludge characteristics in MBR. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(4): 801-806 (in Chinese)
- [13] Bi Dongsu, Guo Xiaopin, Chen Donghui. Phosphorus release mechanisms during digestion of EBPR sludge under anaerobic, anoxic and aerobic conditions. Water Science and Technology, 2013, 67(9): 1953-1959
- [14] Zou Hua, Du Guocheng, Ruan Wenquan, et al. Role of nitrate in biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2006, 22(7): 701-706
- [15] 黄翠芳, 孙宝盛, 张海丰. 污泥驯化阶段 MBR 与 CAS 工艺特性比较. 中国给水排水, 2007, 23(11): 56-59  
Huang Cuifang, Sun Baosheng, Zhang Haifeng. Comparison between membrane bioreactor and conventional activated sludge process during acclimation of activated sludge. China Water & Wastewater, 2007, 23(11): 56-59 (in Chinese)