

# 剩余活性污泥完全资源化利用微生物集成技术

李强<sup>1</sup> 李保宾<sup>1</sup> 孙村民<sup>1,2</sup> 王聪<sup>1,2</sup> 邓飞<sup>1,2</sup> 曾猛<sup>2</sup> 王淑芳<sup>2</sup> 杨超<sup>1</sup> 宋存江<sup>1,2\*</sup>

(1. 南开大学 分子微生物与技术教育部重点实验室 天津 300071)

(2. 南开大学 生物活性材料教育部重点实验室 天津 300071)

**摘要:** 剩余活性污泥完全资源化利用微生物集成技术包括: 使用土著 PHA 合成菌回注法驯化并发酵活性污泥, 生产生物降解材料聚羟基脂肪酸酯(PHA); 采用土著嗜酸性氧化亚铁硫杆菌和氧化硫硫杆菌进行生物淋滤, 去除重金属; 以解磷菌和解钾菌为菌种, 进行固态发酵, 生产生物菌肥。结果表明, 500 L 中试 PHA 占挥发性悬浮固体的 20%以上; 重金属含量达到国家排放要求; 生物菌肥中活菌数大于  $1 \times 10^8$  个/g 以上。实现了剩余活性污泥的近零排放。

**关键词:** 剩余活性污泥, PHA 合成菌, 生物淋滤, 重金属去除, 生物菌肥

## Microbiological technology for the comprehensive utilization of excess activated sludge

LI Qiang<sup>1</sup> LI Bao-Bin<sup>1</sup> SUN Cun-Min<sup>1,2</sup> WANG Cong<sup>1,2</sup> DENG Fei<sup>1,2</sup>  
ZENG Meng<sup>2</sup> WANG Shu-Fang<sup>2</sup> YANG Chao<sup>1</sup> SONG Cun-Jiang<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Molecular Microbiology and Technology, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300071, China)

(2. Key Laboratory of Bioactive Materials, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** Microbial technology for the comprehensive utilization of excess activated sludge, i.e. production of PHA by adding native PHA synthesis-bacteria during domestication and fermentation for activated sludge; bioleaching activated sludge to remove heavy metals by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans*; production of biological fertilization by using solid state fermentation for P-solubilizing bacteria and K-releasing bacteria. Results showed that the ratio of PHA in VSS was above 20% under the 500 L pilot scale; the contents of heavy metals in activated sludge accorded with the National Discharge Standard; the number functional bacteria for microbial fertilizer was above one hundred million.

**Keywords:** Excess activated sludge, PHA-synthesis-bacteria, Bioleaching, Removing heavy metals, Microbial fertilizer

基金项目: 国家 863 计划项目(No. 2007AA06Z323); 天津市科技攻关专项项目(No. 05YFSZSF02200)

\* 通讯作者: Tel: 86-22-23503866; 信箱: songcj@nankai.edu.cn

收稿日期: 2011-01-05; 接受日期: 2011-02-16

© 中国科学院微生物研究所期刊联合编辑部 <http://journals.im.ac.cn>

活性污泥是生物法废水处理系统中自然形成的微生物与有机物的聚集体。目前,我国大多数污水处理厂都采用生物法处理污水。活性污泥中微生物在净化污水的同时自身也在繁殖增长,必须定期少量排出,以维持污水处理系统中氧的供给。排出的这些剩余活性污泥必须加以治理。目前的处理方法无法满足环保和连续处理的需要,剩余活性污泥的资源化利用势在必行<sup>[1-4]</sup>。

1974年,Wallen首先从活性污泥中获得了聚羟基脂肪酸酯(Polyhydroxyalkanoate, PHA),为利用活性污泥生产PHA奠定了基础<sup>[5]</sup>。PHA是许多微生物在不平衡生长环境条件下(如氮、磷等缺乏时)合成的胞内碳源或能源储存物质,具有良好的生物降解性、生物相容性等,可广泛应用于包装、药物缓释、组织工程材料等领域。

活性污泥生产PHA包括3个步骤,即驯化、发酵和产物抽提。驯化是对活性污泥中PHA合成菌选择性的富集阶段,使用营养过剩与饥饿(Feast/Famine)交替进行的驯化方式,其选择压力来自于微生物对饥饿的耐受程度。经过一定时间的驯化之后,便以活性污泥作为混合发酵菌种进行PHA的发酵。发酵结束,进行产物抽提以获得PHA。PHA的抽提方法主要包括两类:有机溶剂直接溶出PHA,化学药剂溶解菌体非PHA部分以得到PHA<sup>[6]</sup>。

另一方面,生产PHA后的污泥必须妥善处理。目前,多采用土地利用的处置方法。污泥中高含量的有机物能够为农作物提供营养<sup>[7]</sup>。然而,污泥中高含量的有毒重金属大大限制了剩余污泥的土地应用<sup>[8-10]</sup>。去除剩余活性污泥中的重金属已成为污泥处置技术中的瓶颈问题<sup>[10]</sup>。

目前,通常使用化学法去除污泥中的重金属,如氯化、离子交换、络合和酸化等。但是化学法具有成本高、操作困难、耗能量高等缺点<sup>[11]</sup>。相比之下,生物淋滤法具有低成本、操作简单、耗能低、金属去除率高且副产物无毒等优点<sup>[12]</sup>。

生物淋滤法(Bioleaching)是指利用自然界中一些微生物的直接作用或其代谢产物的间接作用,氧化、还原、络合、吸附或溶解,将固相中某些不溶

性成分(如重金属、硫及其它金属)分离浸提出来的技术<sup>[13]</sup>。

在生物淋滤中,嗜酸性氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. f.*)和嗜酸性氧化硫硫杆菌(*Acidithiobacillus thiooxidans*, *A. t.*)被用作有效的淋滤载体<sup>[14]</sup>。这2种嗜酸性的化能自养型细菌以大气中的CO<sub>2</sub>为碳源,以无机物铁或硫为能源来维持生长。另外,由于pH值很低,抑制了其它细菌的生长,所以在实际的操作过程中不需要严格的无菌条件,适宜于污水处理厂的开放处理系统。

生物淋滤后的活性污泥中含有较丰富的氮、磷、钾等多种微量元素和有机质,适宜农田施放。但以植酸态等有机形式存在的磷元素和以硅酸盐矿物存在的钾元素都不能直接被植物吸收利用<sup>[15]</sup>。因此,需要细菌的解磷解钾作用。

解磷菌在生长繁殖过程中可以产生一些有机酸和酶类,促进难溶性磷酸盐降解,常见属种为芽孢杆菌属(*Bacillus* spp.)、假单胞菌属(*Pseudomonas* spp.)、节杆菌属(*Arthrobacter* spp.)等<sup>[16]</sup>。解钾菌主要为胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)和环状芽孢杆菌(*Bacillus circulans*),能分解硅酸盐类矿物并释放出可溶性钾等元素<sup>[17]</sup>。

综合以上理论,笔者设计了一套剩余活性污泥完全资源化利用的方案,首先针对取自天津2个污水处理厂反应池中的活性污泥,使用厌氧-好氧和好氧-沉淀驯化方式生产PHA,研究了土著PHA合成菌回注法对PHA产量的影响。然后使用生产PHA所剩余的污泥进行生物淋滤以去除污泥中重金属,并对淋滤后污泥的致病性进行了检测。最后利用解磷菌和解钾菌以混菌方式对污泥进行固态发酵生产生物菌肥。

## 1 材料与装置

### 1.1 实验材料

采用了3种剩余活性污泥样品:样品A取自天津泰达污水处理厂好氧池污泥,样品B取自天津东丽区污水处理厂二沉池污泥,样品C取自天津大港污水处理厂厌氧消解后剩余污泥。

## 1.2 实验菌株

土著 PHA 合成菌为本实验室采用尼尔红荧光染色法从污泥样品中分离得到的 NK-T1、NK-J1 和 NK-D1。

生物淋滤所用菌株为本实验室从污泥样品中富集并分离得到的嗜酸性氧化亚铁硫杆菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. f*) NK-16 和嗜酸性氧化硫硫杆菌 (*Acidithiobacillus thiooxidans*, *A. t*) NK-06。

固态发酵生产生物菌肥所用菌株为本实验室从农田土壤中富集并分离得到的具有解磷作用的枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) XF-8 和具有解钾作用的胶质芽孢杆菌 (*Bacillus mucilaginosus*) NK102 (中国典型培养物保藏中心编号分别为 CCTCC M2010182 和 CCTCC M2010268)。

## 1.3 实验装置

活性污泥驯化装置采用有效体积为 1 000 L 的 SBR 反应装置<sup>[18]</sup>。

## 2 实验方法

### 2.1 土著 PHA 合成菌回注法生产 PHA 的 500 L 中试

**2.1.1 厌氧-好氧驯化及发酵试验:** 驯化液<sup>[19]</sup>成分 (g/L): 葡萄糖 0.263, MgSO<sub>4</sub> 0.089, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.072, CaCl<sub>2</sub> 0.017, KCl 0.070, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.060, 蛋白胨 0.100, 酵母 0.033, pH 7.0, 不灭菌直接使用。在 500 L 驯化液中加入离心湿泥 25 g/L, 进行厌氧-好氧驯化。控制方式为: 厌氧 2 h, 好氧 4 h, 沉淀 1.5 h, 排出 50% 体积上清和加入等量驯化液 0.5 h。每个循环 8 h, 驯化 10 d, 好氧阶段通气量 1.5 L/min。驯化结束后, 加入发酵培养液进行好氧发酵 48 h。发酵培养液成分 (g/L): 葡萄糖 8.33, MgSO<sub>4</sub> 0.20, CaCl<sub>2</sub> 0.04, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.06, 微量元素 1.0 mL/L, 不灭菌直接使用。8 000×g 离心收集固形物, 进行 PHA 的提取。

**2.1.2 好氧-沉淀驯化及发酵试验:** 驯化液<sup>[20]</sup>成分 (g/L): CH<sub>3</sub>COONa 4.00, MgSO<sub>4</sub> 0.600, NH<sub>4</sub>Cl 0.160, EDTA 0.100, CaCl<sub>2</sub> 0.053, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.121, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.045, 不灭菌直接使用。在 500 L 驯化液中加入离心湿泥 25 g/L, 进行好氧-沉淀驯化。控制方式为:

好氧 10.5 h, 沉淀 1 h, 排出 50% 体积上清和加入等量体积驯化液 0.5 h, 每个循环 12 h, 驯化 10 d, 好氧阶段通气量 1.5 L/min。驯化结束后, 加入发酵培养基进行好氧发酵, 16 h。发酵培养基成分 (g/L): CH<sub>3</sub>COONa 8.00, MgSO<sub>4</sub> 0.600, NH<sub>4</sub>Cl 0.113, EDTA 0.100, CaCl<sub>2</sub> 0.053, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.121, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.045, 微量元素 1.0 mL/L, 不灭菌直接使用。8 000×g 离心收集固形物, 进行 PHA 的提取。

**2.1.3 土著 PHA 合成菌回注进行驯化及发酵实验:** 将-70 °C 保藏的土著 PHA 合成菌在 LB 固体平板上活化培养, 单菌落接种于含 LB 液体培养基的锥形瓶中, 150 r/min 振荡培养 12 h, 离心收集菌体。按 0.10-0.25 g/L 湿菌体于驯化开始前加入至相应的污泥驯化装置中, 进行上述的驯化、发酵和 PHA 抽提。

**2.1.4 PHA 的提取:** 发酵液 8 000×g 离心 15 min, 收集沉淀, 干燥, 加至 350 mL 氯仿中, 室温搅拌 48 h, 过滤, 浓缩, 加入 40 倍体积的甲醇中, 所得白色沉淀即为 PHA。收集 PHA, 以甲醇冲洗, 重溶于氯仿中, 重复上述操作。最后真空干燥至恒重, 所得 PHA 重量与挥发性悬浮固体量 (VSS) 之比即为 PHA 的产率。

**2.1.5 分析方法:** 对驯化液进行梯度稀释, 采用培养皿菌落计数法进行总菌数计数<sup>[21]</sup>; 采用 Nile-Red 荧光染色法计数 PHA 合成菌<sup>[22]</sup>; 按照标准检测方法 (APHA, 2001) 检测驯化液总悬浮固体量 (TSS) 和挥发性悬浮固体量 (VSS)<sup>[23]</sup>; 采用核磁共振 (<sup>1</sup>H NMR 和 <sup>13</sup>C NMR) 及傅里叶红外光谱 (FT-IR) 对 PHA 成分与结构进行检测分析。

### 2.2 生物淋滤

**2.2.1 淋滤过程:** 500 mL 三角瓶中含有 200 mL 淋滤初始液, 其成分为 (g/L): (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3.0, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.5, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 2.5, KCl 0.1, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.006, S 10.0, FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 44.0。另外, *A. f* 和 *A. t* 混合菌液按 5%+5% (V/V) 接种于含有 5% (W/V) 脱水污泥的 200 mL 淋滤液中。对照组中不加菌液, 只含有 5% (W/V) 脱水污泥和 200 mL 蒸馏水。3 个试验组和 1 个对照组各重复 3 次。30 °C、150 r/min 进行 6 d。

**2.2.2 分析方法:** 重金属含量测定采用原子吸收分光光度法 (AAS)。重金属去除率计算公式: 重金属去

除率=(淋滤前重金属含量-淋滤后重金属含量)/淋滤前重金属含量。

资源化处理后污泥的安全性分析,参照《城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)》中稳定化处理后的指标,对蠕虫卵死亡率和粪大肠菌群菌值进行了检测。

### 2.3 生物菌肥的固态发酵

解磷菌 XF-8 接种于 LB 培养基,解钾菌 NK102 接种于活化培养基解磷菌,30 °C、150 r/min 培养 24-48 h。活化培养基成分(g/L):蔗糖 10.0, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 2.0, NaCl 0.2, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.5, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1.0, 酵母粉 1.0, FeCl<sub>3</sub> 0.005, CaCO<sub>3</sub> 0.1, pH 7.0-7.5。

取本实验室以生物淋滤去除重金属的活性污泥,8 000 r/min 离心 10 min,去上清,取 1 000 g 污泥,1×10<sup>5</sup> Pa 灭菌 20 min。加入 30%的麦麸,混匀,分别接入 5%枯草芽孢杆菌 XF-8 和 5%的胶质芽孢杆菌 NK102,30 °C 发酵 3 d。

发酵过程中,定时补充水分,既保持其水分,又不影响其透气性。每隔一段时间取 1 g 发酵物,置于 9 mL 无菌水中,振荡均匀,稀释合适梯度,涂布平板计数。

## 3 结果与讨论

### 3.1 PHA 的合成

#### 3.1.1 土著 PHA 合成菌回注法的 500 L 中试结果:

经过 10 d 的驯化,活性污泥已适合 PHA 的发酵生产。发酵结束后经过产物抽提,2 种污泥样品的 PHA 产量如表 1 所示。2 种驯化方法得到的 PHA 产率分别为 17.56%和 20.31%,好氧-沉淀工艺明显优于厌氧-好氧工艺,是更适合剩余活性污泥生产 PHA 的工艺。同时,中试的回注试验结果基本达到之前本实验室进行的实验室规模回注试验的水平<sup>[24]</sup>,且比对照组提高了 25.6%和 30.2%<sup>[24]</sup>。

回注组产率大于非回注组,表明回注少量土著 PHA 合成菌,能加强污泥中的 PHA 合成菌群,使它们争夺到更多底物;在提高底物利用率的同时,也使其它非 PHA 合成菌更快地被选择压力所淘汰。如图 1 所示,污泥 A 和 B 中的总菌数维持在稳定的水平,而 PHA 合成菌随着驯化的进行而增多,结束驯化时 PHA 合成菌分别增多了 11.22%和 6.95%。

**3.1.2 活性污泥合成的 PHA 的结构分析:**综合分析 FT-IR、<sup>1</sup>H-NMR 和 <sup>13</sup>C-NMR 的结果,推断此 PHA 的主要成分为 3-羟基丁酸-co-3-羟基戊酸共聚物[Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate), P(3HB-co-3HV)],其结构见图 2。但还有少量的其它类型 PHA 存在,因为活性污泥为一个混合的 PHA 合成菌群,其中还有一些合成其它类型 PHA 的合成菌,但由于数量较少,合成产物含量较低,因此未形成明显的特征峰,图谱中几个较小的杂峰可能是由此产生的。

表 1 2 种剩余活性污泥的各组发酵实验结果  
Table 1 Results of PHA fermentation experiments for excess activated sludge

|                        |   | 污泥 A 厌氧-好氧回注试验<br>Sludge A anaerobic-aerobic test | 污泥 B 好氧-沉淀回注试验<br>Sludge B aerobic-settling test |
|------------------------|---|---|--|
| 接种污泥<br>Sludge samples | 接种污泥湿重<br>Wet weight (g/L)                          | 25  | 25   |
|                        | 接种污泥含水率<br>Wet content (%)                          | 87.15   | 88.06  |
|                        | 接种污泥干重<br>Dry weight (g)                            | 1 606.3   | 1 492.5  |
| PHA 产物<br>PHA products | 发酵后污泥干重<br>Dry weight after fermentation (g)        | 1 681.6   | 1 663.3  |
|                        | 发酵后污泥 VSS 量<br>VSS of sludge after fermentation (g) | 1 155.5   | 1 399.8  |
|                        | PHA 重量<br>PHA weight (g)                            | 203.3   | 283.3  |
|                        | PHA 产率<br>PHA yield (%)                             | 17.56   | 20.31  |

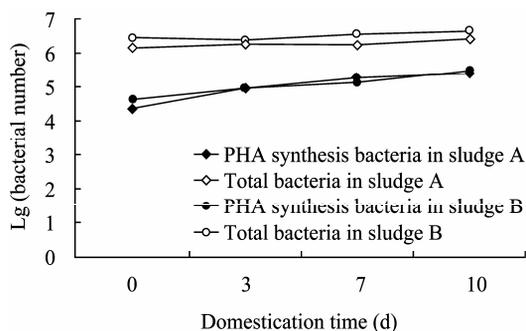


图1 驯化过程中污泥中 PHA 合成菌和总菌数的变化  
Fig. 1 Changes of numbers for PHA accumulation bacteria and total bacteria in activated sludge under domestication

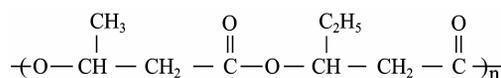


图2 P(3HB-co-3HV)结构图  
Fig. 2 The structure of P(3HB-co-3HV)

### 3.2 生物淋滤

3.2.1 生物淋滤过程中各种重金属去除率变化: 3种剩余活性污泥经过 6 d 的生物淋滤, 各种重金属的去除效果见表 2。污泥中 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni 和 As 都有较高的去除率, 且淋滤后污泥中重金属含量均符合国家《食用农产品土壤环境质量评价标准(2006)》, 适合土地施放。

3.2.2 PHA 发酵和生物淋滤前后污泥致病性检测: 资源化处理后污泥的安全性分析, 参照国标《城镇

污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)》中稳定化处理后的指标, 对蠕虫卵死亡率和粪大肠菌群菌值进行了检测。其蠕虫卵死亡率和粪大肠菌群菌值达到国家城镇污水处理厂污染物排放标准。

### 3.3 生物菌肥的固态发酵

接种去除重金属的活性污泥后, 置于 30 °C 固态发酵。每隔一段时间取样, 通过稀释梯度平板法计算活菌和芽孢的数量。由图 3 可以看出, 当发酵达到 72 h 时, 细胞数和芽孢的数量均达到最大, 细胞数最大可以达到  $9.9 \times 10^9$  个/g, 芽孢数达到  $0.38 \times 10^8$  个/g。符合《复合微生物肥料(NY/T 798-2004)》规定的标准, 适合农田施放。

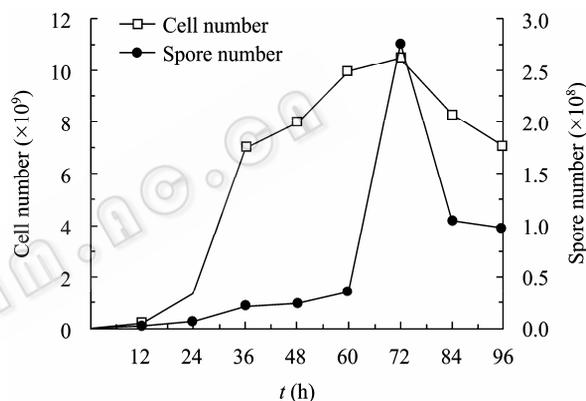


图3 固态发酵的生物菌肥中活菌和芽孢的计数  
Fig. 3 The cell number and spore number of the microbial fertilizer

表2 3种剩余活性污泥的生物淋滤结果  
Table 2 Results of bioleaching for three kinds of excess activated sludge

|    | 污泥 A<br>Sludge A                     |                                     |                               | 污泥 B<br>Sludge B                     |                                     |                               | 污泥 C<br>Sludge C                     |                                     |                               | 国标<br>GB |
|----|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------|
|    | 淋滤前<br>Before<br>bioleaching<br>(ng) | 淋滤后<br>After<br>bioleaching<br>(ng) | 去除率<br>Removal<br>rate<br>(%) | 淋滤前<br>Before<br>bioleaching<br>(ng) | 淋滤后<br>After<br>bioleaching<br>(ng) | 去除率<br>Removal<br>rate<br>(%) | 淋滤前<br>Before<br>bioleaching<br>(ng) | 淋滤后<br>After<br>bioleaching<br>(ng) | 去除率<br>Removal<br>rate<br>(%) |          |
| Cu | 172.0                                | 2.4                                 | 98.6                          | 342.0                                | 7.5                                 | 97.8                          | 111.7                                | 12.5                                | 88.8                          | 50       |
| Zn | 669.0                                | 7.3                                 | 98.9                          | 750.0                                | 10.8                                | 98.6                          | 546.0                                | 37.8                                | 93.1                          | 200      |
| Pb | 40.3                                 | 2.7                                 | 93.2                          | 76.8                                 | 5.9                                 | 92.3                          | 68.7                                 | 41.3                                | 39.9                          | 80       |
| Cd | 10.8                                 | 1.6                                 | 85.1                          | 7.8                                  | 1.0                                 | 87.2                          | 1.5                                  | 0                                   | 100                           | 5        |
| Cr | 413.0                                | 8.5                                 | 97.9                          | 164.0                                | 9.9                                 | 94.0                          | ND                                   | ND                                  | ND                            | 150      |
| Ni | 198.0                                | 5.4                                 | 97.3                          | 223.0                                | 8.1                                 | 96.5                          | 29.2                                 | 8.5                                 | 70.9                          | 40       |
| As | 33.1                                 | 0.5                                 | 98.5                          | 13.6                                 | 1.2                                 | 91.3                          | 13.6                                 | 0.3                                 | 98.0                          | 40       |

## 4 结论

利用活性污泥进行 PHA 的生产, 经短期驯化, 两种剩余活性污泥样品 500 L 的中试结果为, PHA 的产率基本达到本实验室之前小试的水平, 且回注组高于对照组, 好氧-沉淀的驯化方式优于厌氧-好氧方式。

经过 *A. f* 和 *A. t* 混合菌群的生物淋滤, 3 种污泥样品中 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni 和 As 等重金属都得到了很好的去除。另外, 经过 PHA 发酵和生物淋滤处理后的污泥, 其蠕虫卵死亡率和粪大肠菌群菌值达到国家城镇污水处理厂污染物排放标准。

对淋滤后的污泥, 辅以具有解磷能力的枯草芽孢杆菌 XF-8 和具有解钾能力的胶质芽孢杆菌 NK102 以混菌方式进行固态发酵生产生物菌肥。细胞数最大可以达到  $9.9 \times 10^9$  个/g, 芽孢数达到  $0.38 \times 10^8$  个/g, 符合微生物肥料标准。

综上所述, 利用剩余活性污泥, 使用土著 PHA 合成菌回注法生产 PHA, 再使用生物淋滤法去除污泥中重金属和降低污泥致病性, 使污泥适合农田施放, 从而实现了剩余活性污泥的完全资源化利用, 避免了二次污染, 具有广阔的发展前景。

## 参 考 文 献

[1] 张光明, 张信芳, 张盼月. 城市污泥资源化技术进展 [M]. 第 4 版. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[2] 蒋小龙, 叶芬霞. 化学解偶联剂对污泥产率的比较研究 [J]. 环境科学研究, 2006, 19(4): 115-118.

[3] 李帅, 边炳鑫, 周正. 磁场对活性污泥脱水性能的影响 [J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 119-123.

[4] 林山杉, 付丽丽, 金玉花, 等. 序批式接触氧化反应器中细菌多样性及其功能 [J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 111-119.

[5] Wallen I, Rohwo WK. Polyhydroxyalkanoate from activated sludge [J]. Environmental Science and Technology, 1974, 20(8): 576-579.

[6] Yu J, Li L, Chen XL. Cost-effective recovery and purification of polyhydroxyalkanoates by selective dissolution of cell mass [J]. Biotechnology Progress, 2006, 22(2): 547-553.

[7] 周立祥, 胡霭堂, 戈乃玢, 等. 城市污泥土地利用研究 [J]. 生态学报, 1999, 19(2): 185-193.

[8] Tyagi RD, Couillard D. Bacterial leaching of metal from

sewage sludge. Process Biochemistry, 1987, 22(4): 114-117.

- [9] Bruce AM, Davis RD. Sewage sludge disposal: current and future options [J]. Water Science and Technology, 1989, 21(10/11): 1113-1128.
- [10] Burton FL. Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse [M]. 3rd edn. Singapore: McGraw-Hill, 1991.
- [11] McGhee TJ. Water supply and sewage [M]. 6th edn. Singapore: McGraw-Hill, 1991.
- [12] Mercier G, Chartier M, Couillard D. Strategies to maximize the microbial leaching of lead from metal-contaminated aquatic sediments [J]. Water Research, 1996, 30(10): 2452-2464.
- [13] 王聪, 李强, 李保宾, 等. 生物淋滤法去除污泥中的重金属 [J]. 微生物学通报, 2010, 37(4): 615-621.
- [14] Solisio C, Lodi A, Veglio F. Bioleaching of zinc and aluminum from industrial waste sludges by means of *Thiobacillus ferrooxidans* [J]. Waste Management, 2002, 22(6): 667-675.
- [15] 黄雅曦, 李季, 李国学. 污泥处理与资源化利用现状分析 [J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 765-768.
- [16] 王莉晶, 高晓蓉, 孙嘉怡, 等. 土壤解磷微生物作用机理及解磷菌肥对作物生长的影响 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(14): 5948-5950.
- [17] 饶正华, 林启美, 孙焱鑫, 等. 解钾菌与解磷菌及固氮菌的相互作用 [J]. 生态学杂志, 2002, 21(2): 71-73.
- [18] 邓飞. 剩余活性污泥驯化发酵合成聚羟基脂肪酸酯 (PHA) 的研究 [D]. 天津: 南开大学硕士学位论文, 2008.
- [19] Satoh H, Iwamoto Y, Mino T, et al. Activated sludge as a possible source of biodegradable plastic [J]. Water Science and Technology, 1998, 38(2): 103-108.
- [20] Serafim LS, Lemos PC, Oliveira R, et al. Optimization of polyhydroxybutyrate production by mixed cultures submitted to aerobic dynamic feeding conditions [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2004, 87(2): 145-160.
- [21] Spiekermann P, Rehm BHA, Kalscheuer R, et al. A sensitive, viable-colon staining method using Nile red for direct screening of bacteria that accumulate polyhydroxyalkanoic acid and ether lipid storage compounds [J]. Arch Microbiol, 1999, 171(2): 73-80.
- [22] 范秀荣, 李广武, 沈萍. 微生物学实验 [M]. 第 5 版. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [23] American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater [S]. twentieth ed. APHA, Washington DC, USA, 2001.
- [24] 邓飞, 曾猛, 刘娜, 等. 土著 PHA 合成菌回注法提高活性污泥积累聚羟基脂肪酸酯能力 [J]. 环境科学研究, 2008, 21(4): 14-19.