

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0624

霍敏波, 郑冠宇, 梁剑茹, 等. 2014. 生物沥浸处理中微生物菌群和胞外聚合物对城市污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学学报, 34(9): 2199-2204
Huo M B, Zheng G Y, Liang J R, et al. 2014. Influence of microbial flora and extracellular polymeric substances on municipal sewage sludge dewaterability enhanced by bioleaching process[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(9): 2199-2204

生物沥浸处理中微生物菌群和胞外聚合物对城市污泥脱水性能的影响

霍敏波, 郑冠宇, 梁剑茹, 周立祥*

南京农业大学资源与环境科学学院环境工程系, 南京 210095

收稿日期: 2013-12-01 修回日期: 2014-02-19 录用日期: 2014-02-19

摘要: 探讨城市污泥生物沥浸过程中微生物菌群和胞外聚合物(EPS)变化对污泥脱水性能的影响, 对进一步揭示生物沥浸法提高污泥脱水性能机理具有重要意义. 本研究通过摇瓶试验探讨了硫杆菌和异养微生物菌群数量的变化及 EPS 在生物沥浸法提高城市污泥脱水性能中的作用. 试验结果表明, 在生物沥浸处理的前 2 d 内, 由于硫杆菌 *A. ferrooxidans* LX5 和 *A. thiooxidans* TS6 的大量生长, 导致生物沥浸污泥的 pH 从初始的 4.62 显著下降至 2.47, 进而导致污泥中异养菌数量从初始的 2.65×10^8 CFU·mL⁻¹ 下降至 8.20×10^6 CFU·mL⁻¹, 污泥中 EPS 含量从初始的 $28.18 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (以 VSS 计, 下同) 显著下降为 $13.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. *A. ferrooxidans* LX5 和 *A. thiooxidans* TS6 的大量生长、异养微生物细胞的死亡破裂及 EPS 含量的下降共同促使污泥的结合水含量从初始的 37.28% 下降至 21.10%, 最终导致污泥比阻从初始的 $5.14 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 显著下降至 $6.92 \times 10^{11} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. 通过验证试验发现, 原始污泥在剥离 EPS 后其比阻仅为原来的 11.23%, 其脱水性能与生物沥浸 2 d 后的污泥在 0.05 水平上没有显著性差异. 因此, 污泥中 *A. ferrooxidans* LX5、*A. thiooxidans* TS6 和异养微生物菌群数量的改变及 EPS 含量的减少是生物沥浸法提高污泥脱水性能的两个重要因素.

关键词: 污泥; 生物沥浸; 微生物菌群; 胞外聚合物; 结合水; 脱水性能

文章编号: 0253-2468(2014)09-2199-06 中图分类号: X703 文献标识码: A

Influence of microbial flora and extracellular polymeric substances on municipal sewage sludge dewaterability enhanced by bioleaching process

HUO Minbo, ZHENG Guanyu, LIANG Jianru, ZHOU Lixiang*

Department of Environmental Engineering, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095

Received 1 December 2013; received in revised form 19 February 2014; accepted 19 February 2014

Abstract: To study the effects of microbial count variation and extracellular polymeric substances (EPS) content change on sludge dewaterability is very significant for further revealing mechanisms responsible for the dewaterability enhancement of municipal sewage sludge by bioleaching treatment. In this study, the effect of variation of *Acidithiobacillus* species count, total heterotrophic bacteria count and EPS content on the dewaterability of sludge during bioleaching was investigated in details through batch experiments. Results showed that after 2 days bioleaching the pH value of sludge significantly decreased from initial 4.62 to 2.47, which is resulted from the rapid growth of *A. ferrooxidans* LX5 and *A. thiooxidans* TS6, while the count of total heterotrophic bacteria in sludge significantly decreased from initial 2.65×10^8 CFU·mL⁻¹ to 8.20×10^6 CFU·mL⁻¹. Meanwhile, EPS content in sludge remarkably decreased from initial $28.18 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ to $13.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Thus, during the bioleaching treatment the growth of *A. ferrooxidans* LX5 and *A. thiooxidans* TS6, the death and lysis of heterotrophic microbial cells and the decrease of sludge EPS content were helpful to reduce the bound water content in bioleached sludge from initial 37.28% to 21.10%. As a result, the specific resistance to filtration (SRF) of bioleached sludge significantly decreased from initial $5.14 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $6.92 \times 10^{11} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. Furthermore, SRF of original sludge without EPS was only 11.23% of original sludge, which has no significant difference ($p > 0.05$) compared to the sludge being bioleached for 2 days. Therefore, the variation of microbial counts of *A. ferrooxidans* LX5, *A. thiooxidans* TS6 and heterotrophic bacteria in sludge and the content decrease of sludge EPS were two important factors in enhancing the dewaterability of bioleached sludge.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.21177060, 21307059); 国家高技术研究发展计划项目 (No.2012AA063501)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.21177060, 21307059) and the National High-tech R&D Program of China (No. 2012AA063501)

作者简介: 霍敏波 (1988—), 男, E-mail: 2011103082@njau.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: lxzhou@njau.edu.cn

Biography: HUO Minbo (1988—), male, E-mail: 2011103082@njau.edu.cn; * **Corresponding author**, E-mail: lxzhou@njau.edu.cn

Keywords: sludge; bioleaching; microbial flora; extracellular polymeric substances; bound water; dewaterability

1 引言 (Introduction)

截至 2014 年 3 月底,全国累计建成城镇污水处理厂 3622 座,污水处理能力达到 1.53 亿 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,其中,含水率 80%污泥的年产生量近 4000 万 t.与传统污泥调理方式相比,生物沥浸不仅能去除污泥中的重金属(周立祥等,2004;李超等,2008)、病原菌(郑冠宇等,2007)和恶臭(刘奋武等,2011),而且不需额外添加絮凝剂就能使污泥机械脱水后的含水量降至 60% 以下(Liu *et al.*, 2012b;宋永伟等,2012). 2010 年以来,生物沥浸技术逐渐走向工程化应用(周立祥,2012;胡金财等,2013),但目前关于生物沥浸提高污泥脱水性能的机制尚不十分清楚.近年来,人们对生物沥浸提高污泥脱水性能的研究主要集中在 pH 下降导致的酸化效应(Chen *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2012b)、 Fe^{3+} 的絮凝作用(Park *et al.*, 2006;Li *et al.*, 2012)上,但其仍不足以完全阐明生物沥浸提高污泥脱水性能的机理.因为在没有生物沥浸微生物参与时,通过化学方法调节相同的酸度和 Fe^{3+} 浓度,且其他条件完全一致的情况下,污泥脱水性能远没有生物沥浸处理的效果好(Liu *et al.*, 2012a).

污泥中结合水含量是表征污泥可脱水程度的重要指标,其相对自由水而言需要消耗较多的能量才能去除,因此,结合水是限制污泥脱水的直接因素(Vaxelaire *et al.*, 2004;Lee *et al.*, 2006).但污泥中的结合水主要来源于胞外聚合物(EPS)束缚的结合水和微生物细胞束缚的细胞内结合水(Neyens *et al.*, 2003),因此,我们推测微生物菌群和 EPS 对污泥的脱水起着关键作用.虽然有不少学者对 EPS 在污泥脱水和絮凝沉降方面做了大量研究,但这些研究结果往往是矛盾的.例如,Chen 等(2001)和 Neyens 等(2004)研究发现,污泥中过多的 EPS 是不利于污泥脱水的,但 Mikkelsen 等(2002)和 Jin 等(2004)却都发现 EPS 有利于污泥脱水.同时,在污泥生物沥浸过程中,化能自养的硫杆菌和异养微生物菌群的数量变化,以及 EPS 的变化及其与污泥脱水性能的相互关系至今仍鲜见报道.为此,本研究试图从微生物菌群数量变化及胞外聚合物(EPS)角度揭示生物沥浸提高污泥脱水性能的深层机理,同时,通过考察剥离 EPS 后对污泥脱水性能的影响来进一步验证 EPS 在生物沥浸促进污泥脱水中的

作用.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 供试污泥

供试污泥为取自无锡太湖新城污水处理厂的浓缩池污泥,采集后立刻测定污泥 pH、含固率、有机质含量和污泥比阻,其基本理化性质如下: pH = 7.36,含固率为 3.42%,有机质含量为 51.87%,污泥比阻为 $9.67 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$.采集的污泥保存于 4 °C 冰箱中,待用.

2.2 污泥生物沥浸酸化接种液的制备

接种物的制备:按参考文献(周立祥等,2004)方法进行,将本课题组以前分离的嗜酸性氧化亚铁硫杆菌 *Acidithiobacillus ferrooxidans* LX5 (*A. ferrooxidans* LX5) 和氧化硫硫杆菌 *Acidithiobacillus thiooxidans* TS6 (*A. thiooxidans* TS6) 纯菌株分别接种到 150 mL 的 SM 液体培养基(Tichý *et al.*, 1994)和改进型 9K 液体培养基(Blais *et al.*, 1992)中,置于 28 °C 往复式摇床(180 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)中扩大培养,直至菌体细胞数量达约 $10^8 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$,保存备用.然后在 500 mL 的三角瓶中加入 75 mL *A. ferrooxidans* LX5、75 mL *A. thiooxidans* TS6 和 150 mL 原始污泥,置于 28 °C 往复式摇床(180 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)中驯化培养,直至 pH 降到 2.00,重复 2 次,得到的酸化污泥即为经过驯化后的用于生物沥浸试验的接种液.

2.3 城市污泥生物沥浸试验

在一系列含有 270 mL 原始污泥的 500 mL 三角瓶中,根据供试污泥体积量按 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 添加微生物复合营养剂(主要含 N、P、Ca、Mg、S、Fe、Si、有机酸、维生素等),并接种 30 mL 上述酸化接种液作为生物沥浸处理,微生物复合营养剂的配置参考文献(宋永伟等,2012);以只加入 30 mL 与酸化接种液同 pH 的污泥作为对照处理(Liu *et al.*, 2012b).每种处理均设置 3 个重复,置于 28 °C、180 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 往复式摇床中培养,分别在第 0、1、2、3、4、5、6 d 时取样测定污泥 pH、异养菌数量、*A. ferrooxidans* LX5 数量、*A. thiooxidans* TS6 数量、胞外聚合物(EPS)、结合水和比阻(SRF)的变化.

2.4 剥离污泥 EPS 后对污泥脱水性能的影响

取原始污泥采用高速离心法剥离其中的 EPS 后,离心泥饼采用去离子水重新悬浮至原体积,混

合均匀后测定去除 EPS 污泥的脱水性能 (T4). 同时,为了评估高速离心本身对污泥脱水性能的影响,使经过离心后的污泥饼和含有 EPS 的离心上清液重新混合均匀后测定污泥的脱水性能 (T3). 最后同原始污泥 (T1) 和生物沥浸 2 d 后的污泥 (T2) 进行脱水性能比较,以此来验证 EPS 含量减少是否为生物沥浸提高脱水性能的一个重要因素.

2.5 测定方法

采用 pHS-3C 型精密 pH 计测定溶液 pH 值;污泥 EPS 采用高速离心法 (14000 g, 4 °C, 20 min) 提取与剥离,离心上清液采用 3500 Pa 的半透膜透析 3 d (换 5 次去离子水) 以去掉杂质和小分子物质,采用 TOC 测定仪 (TOC-5000) 测定 EPS 的含量 (Bala Subramanian *et al.*, 2010);污泥结合水采用膨胀计法测定 (Vaxelaire *et al.*, 2004),膨胀指示剂为二甲苯,膨胀温度为 -20 °C;污泥比阻采用布氏漏斗法测定 (Lu *et al.*, 2003);菌密度采用平板培养法测定,其中,污泥中异养菌数量采用牛肉膏蛋白胨培养基平板在 28 °C 培养 2 d 后计数, *A. ferrooxidans* LX5 和 *A. thiooxidans* TS6 数量采用双层平板法计数 (王世梅等, 2005).

2.6 统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 软件进行数据整理,并用 SAS 9.2 软件对整理的数据进行统计分析.在方差分析后采用 Student-Newman-Keuls (SNK) 方法进行多重比较,标有相同字母的表示在 0.05 水平下没有显著性差异.

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 生物沥浸中硫杆菌的大量生长对污泥中异养菌和 EPS 的影响

生物沥浸中使用的嗜酸性氧化亚铁硫杆菌 (*A. ferrooxidans* LX5) 和嗜酸性氧化硫硫杆菌 (*A. thiooxidans* TS6) 均是化能自养微生物 (周立祥等, 2004), 其在生物沥浸污泥中的变化如图 1a 所示. *A. ferrooxidans* LX5 数量在生物沥浸处理的前 2 d 由初始的 2.21×10^6 CFU·mL⁻¹ 显著增加到 4.78×10^8 CFU·mL⁻¹, 其后基本保持稳定; 而 *A. thiooxidans* TS6 数量在生物沥浸处理 1 d 后开始显著增加, 由第 1 d 的 2.56×10^6 CFU·mL⁻¹ 显著增加到第 6 d 的 7.22×10^8 CFU·mL⁻¹. 这可能是由于 *A. thiooxidans* TS6 在氧化营养剂中的硫单质前要先降低硫单质的疏水性, 这就导致了其数量的增长滞后于 *A. ferrooxidans*

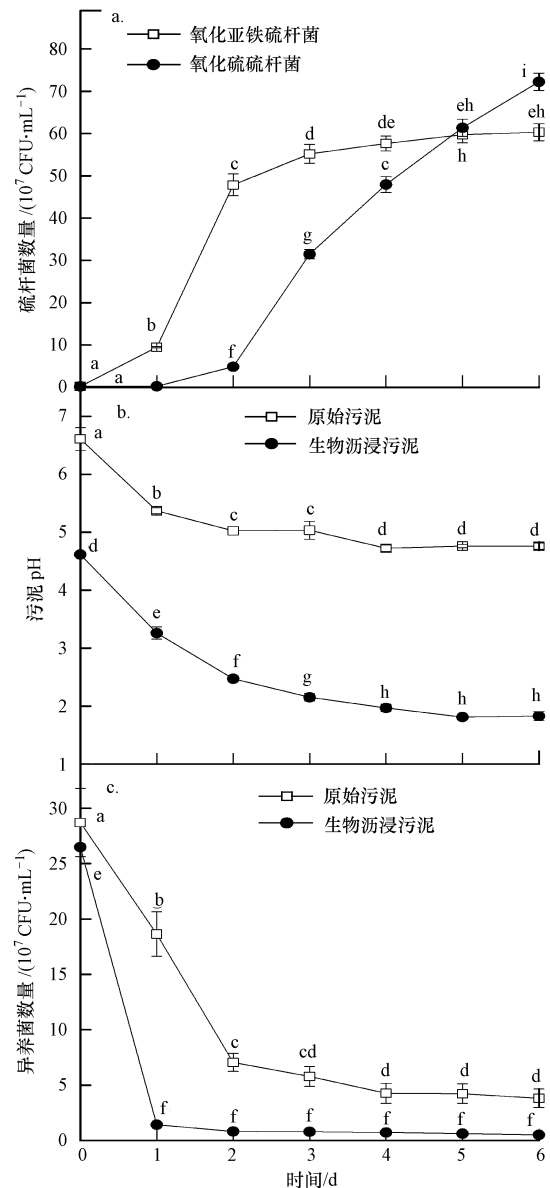


图 1 生物沥浸处理中污泥中氧化亚铁硫杆菌和氧化硫硫杆菌数量 (a)、污泥 pH (b) 及污泥中异养菌数量 (c) 随反应时间的变化

Fig.1 Change of *A. ferrooxidans* LX5 and *A. thiooxidans* TS6 counts in bioleaching sludge (a), Variation of sludge pH with reaction time (b), Change of sludge heterotrophic bacteria count (c) with reaction time

LX5 数量的增长 (Zhou *et al.*, 2013). *A. ferrooxidans* LX5 和 *A. thiooxidans* TS6 通过利用介质营养物大量增殖使污泥的 pH 显著下降 (Zheng *et al.*, 2009), 生物沥浸污泥 pH 从第 0 d 的 4.62 显著下降至第 4 d 的 1.97, 其后基本稳定在 2 左右, 而原始污泥 pH 下降较为缓慢, 仅由第 0 d 的 6.61 下降至第 2 d 的 5.02, 其后基本稳定在 5 左右 (图 1b). 外界 pH 的变

化会导致污泥中固有异养微生物数量的变化 (Cabiscol *et al.*, 2010), 如图 1c 所示, 原始污泥中的异养菌数量由初始的 2.87×10^8 CFU·mL⁻¹ 显著下降至第 2 d 的 7.06×10^7 CFU·mL⁻¹, 其后基本保持稳定. 而生物沥浸处理中, 异养菌数量的下降尤为剧烈, 从初始的 2.65×10^8 CFU·mL⁻¹ 显著下降至第 2 d 的 8.20×10^6 CFU·mL⁻¹, 其后基本保持稳定. 可见, 生物沥浸处理后污泥中的微生物菌群数量发生了显著的变化, 具体表现为 *A. ferrooxidans* LX5 和 *A. thiooxidans* TS6 数量显著增加和异养微生物数量显著减少.

污泥中胞外聚合物 (EPS) 主要来源于微生物细胞的分泌和破裂释放的内含物 (Neyens *et al.*, 2004). 而在生物沥浸过程中由于 pH 的剧烈变化, 导致了生物沥浸污泥中微生物菌群的剧烈变化, 这就使得生物沥浸污泥中的 EPS 含量从初始的 28.18 mg·g⁻¹ (以 VSS 计, 下同) 显著下降至第 2 d 的 13.53 mg·g⁻¹, 然而过长时间的生物沥浸处理使得污泥 EPS 的含量随后显著增加至第 6 d 的 51.22 mg·g⁻¹; 原始污泥中 EPS 含量变化较为平缓, 仅由初始的 30.40 mg·g⁻¹ 下降至第 2 d 的 25.05 mg·g⁻¹, 随后基本保持稳定 (图 2). 在生物沥浸的前 2 d 内, 污泥中 EPS 含量显著下降可能是由于在酸化作用下大量的 EPS 从污泥颗粒表面脱落和分解 (Chen *et al.*, 2001). 再者, 自养型硫杆菌本身分泌的 EPS 就比污泥中异养菌少得多 (周立祥, 2012), 当硫杆菌逐渐占优势时, 表现出污泥 EPS 就会明显减少. 但过长时间的生物沥浸处理会使得污泥 pH 值长期处于 2 以

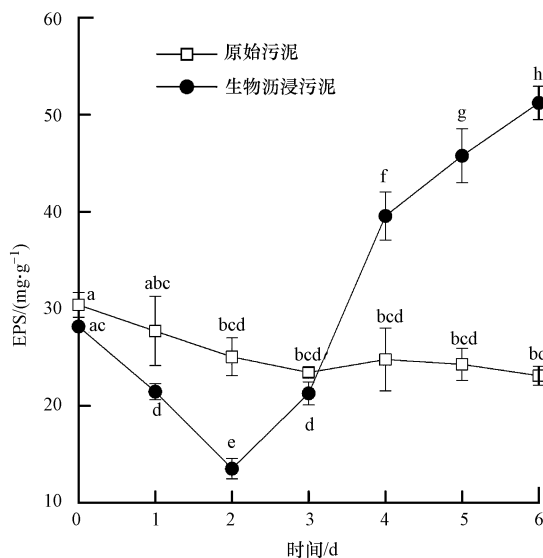


图 2 污泥中 EPS 含量随反应时间的变化

Fig.2 Change of sludge EPS content with reaction time

下, 此时会导致污泥中存活的微生物 (主要为硫杆菌) 分泌大量的 EPS 以保护自身细胞免受伤害 (Cabiscol *et al.*, 2010), 导致生物沥浸后期污泥 EPS 含量的显著增加.

3.2 污泥中微生物菌群数量和 EPS 的变化对污泥脱水性能的影响

污泥中的水分分布对污泥脱水性能具有直接的影响 (Wu *et al.*, 1998), 而其中结合水含量是影响污泥脱水性能的决定性因素 (Vaxelaire *et al.*, 2004), 这主要是由于相对自由水而言结合水的去除需要消耗较多的能量 (Vaxelaire *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2006). 因此, 测定污泥中结合水含量可以直接反映污泥的脱水性能. 如图 3 所示, 在生物沥浸处理中, 污泥结合水含量从初始的 37.28% 显著下降至第 2 d 的 21.20%, 然而长时间的生物沥浸反而使污泥结合水含量增加至第 6 d 的 33.57%; 而对照原始污泥在 5 d 的处理时间内其结合水含量均是显著高于生物沥浸污泥中的结合水含量.

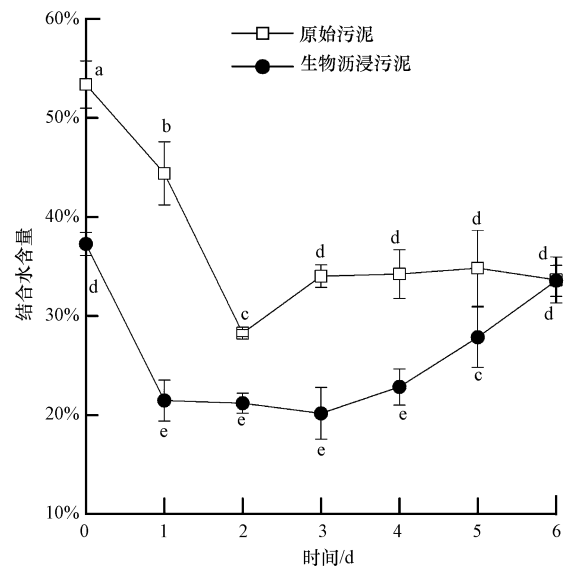


图 3 污泥中结合水含量随反应时间的变化

Fig.3 Change of sludge bound water content with reaction time

污泥比阻可以较好地反映污泥的脱水性能 (Liu *et al.*, 2012a). 如图 4 所示, 原始污泥的比阻从初始的 9.62×10^{12} m·kg⁻¹ 下降至第 2 d 的 2.33×10^{12} m·kg⁻¹, 其后基本保持稳定; 而生物沥浸污泥的比阻从初始的 5.14×10^{12} m·kg⁻¹ 显著下降至第 2 d 的 6.92×10^{11} m·kg⁻¹, 随后却显著上升至第 6 d 的 6.65×10^{12} m·kg⁻¹. 可见污泥经过 2 d 生物沥浸后其脱水性能能达到最佳, 而过长时间的生物沥浸却是不利于再次提高污泥的脱水性能的.

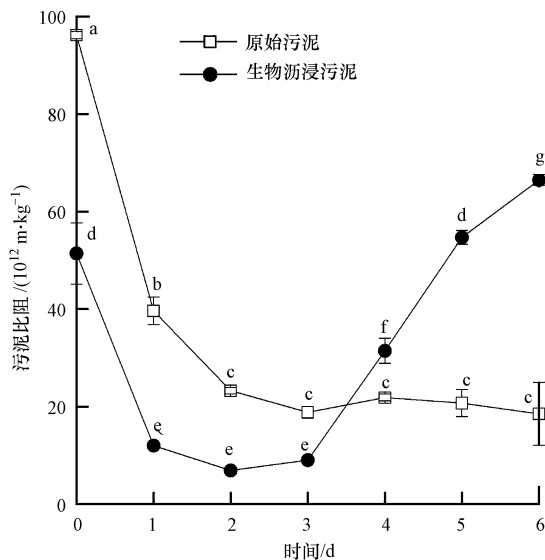


图4 污泥比阻随反应时间的变化

Fig.4 Variation of sludge specific resistance to filtration with reaction time

这可能是由于污泥中的 EPS 具有高度的亲水性,且污泥中的结合水主要来源于 EPS 束缚的结合水和微生物细胞束缚的细胞内结合水 (Neyens *et al.*, 2004), 而生物沥浸污泥中异养微生物细胞数量和 EPS 含量在生物沥浸的前 2 d 内是显著下降的 (图 1c、图 2), 这就导致原本被 EPS 束缚的一部分结合水变成自由水 (Neyens *et al.*, 2004); 同时, EPS 含量下降使得污泥颗粒表面的负电荷减少, 并使污泥颗粒间的排斥力减弱, 进而导致污泥颗粒易于成团聚沉 (Sanin *et al.*, 1994); 此外, 由于生物沥浸前期 pH 的剧烈下降使得大量的异养微生物细胞死亡破裂, 进而释放出细胞内束缚的结合水, 而以两类硫杆菌为主的自养菌的大量生长可能会进一步破坏污泥原有的异养菌菌胶团结构, 使其中的一部分结合水释放出来 (Barjenbruch *et al.*, 2000), 最终使得生物沥浸污泥的脱水性能显著提高. 而过长时间的生物沥浸处理使得污泥的 pH 低于 2, 长期过酸的外界环境使得污泥中存活的一部分微生物大量分泌 EPS (Cabiscol *et al.*, 2010), 这就导致了被 EPS 束缚的结合水含量显著上升, 最终导致污泥脱水性能恶化. 因此, 污泥中 *A. ferrooxidans* LX5、*A. thiooxidans* TS6 和异养微生物菌群数量的改变及 EPS 含量的减少是生物沥浸提高污泥脱水性能的两个重要因素.

3.3 剥离污泥中 EPS 后对污泥脱水性能的影响

为了进一步验证 EPS 在生物沥浸过程中的关键作用, 分别对比了原始污泥 (T1)、生物沥浸 2 d 后

污泥 (T2)、剥离 EPS 的原始污泥 (T4) 的脱水性能; 同时, 为了评估高速离心剥离 EPS 时对污泥脱水性能的影响, 将污泥经过高速离心后的污泥饼与含有 EPS 的上清液重新混合均匀, 其污泥 (T3) 比阻为 $9.25 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与原始污泥 ($9.62 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$) 相比, 两者在统计学上是没有显著性差异. 因此, 高速离心本身对污泥脱水性能的影响是可以忽略的; 而原始污泥去除 EPS 后的比阻为 $1.08 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$, 仅为原始污泥比阻的 11.23%; 无 EPS 污泥的比阻是生物沥浸 2 d 后污泥的 1.56 倍, 但两者在统计学上没有显著性差异. 这进一步验证了 EPS 含量的减少是生物沥浸提高污泥脱水性能的一个重要因素.

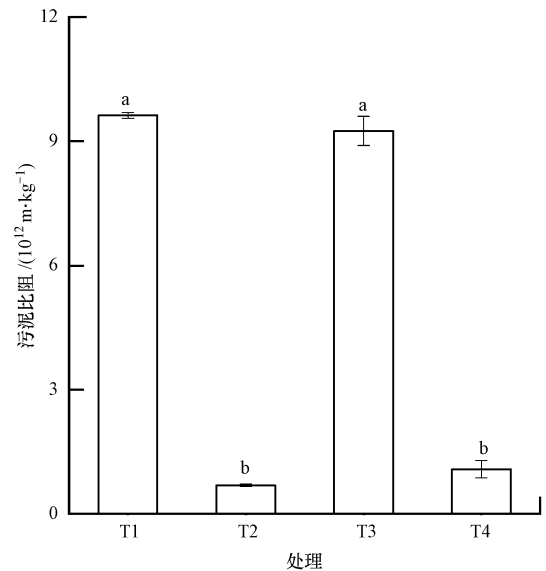


图5 不同处理下污泥比阻的变化

Fig.5 Variation of sludge specific resistance to filtration under different treatment

4 结论 (Conclusions)

1) 在污泥生物沥浸过程中, 由于 *A. ferrooxidans* LX5 和 *A. thiooxidans* TS6 的大量生长, 导致生物沥浸污泥 pH 在处理第 2 d 下降至 2.47, 使得污泥中异养微生物数量下降了两个数量级. 污泥中 *A. ferrooxidans* LX5、*A. thiooxidans* TS6 和异养微生物菌群数量的改变及 pH 的下降共同使得生物沥浸污泥的胞外聚合物 (EPS) 含量在此时达到最低的 $13.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

2) 污泥经过生物沥浸处理 2 d 后, 污泥中微生物菌群数量的改变和 EPS 含量的减少均有助于污泥中结合水含量减少至最低的 21.20%, 此时污泥的

比阻达到最低的 $6.92 \times 10^{11} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. 因此, 污泥中 *A. ferrooxidans* LX5、*A. thiooxidans* TS6 和异养微生物菌群数量的改变及 EPS 含量的减少是生物沥浸提高污泥脱水性能的两个重要因素.

责任作者简介:周立祥(1965—), 教授, 博士生导师, 主要从事固体废物处理处置与资源化、环境微生物、环境化学及矿物等方面研究. E-mail: lxzhou@njau.edu.cn.

参考文献 (References):

- Bala Subramanian S, Yan S, Tyagi R D, *et al.* 2010. Extracellular polymeric substances (EPS) producing bacterial strains of municipal wastewater sludge: Isolation, molecular identification, EPS characterization and performance for sludge settling and dewatering[J]. *Water Research*, 44(7): 2253-2266
- Barjenbruch M, Hoffmann H, Kopplow O, *et al.* 2000. Minimizing of foaming in digesters by pre-treatment of the surplus-sludge [J]. *Water Science and Technology*, 42(9): 235-241
- Blais J F, Auclair J C, Tyagi R D. 1992. Cooperation between two *Thiobacillus* strains for heavy-metal removal from municipal sludge [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 38(3): 181-187
- Cabiscol E, Tamarit J, Ros J. 2010. Oxidative stress in bacteria and protein damage by reactive oxygen species [J]. *International Microbiology*, 3(1): 3-8
- Chen Y G, Yang H Z, Gu G W. 2001. Effect of acid and surfactant treatment on activated sludge dewatering and settling [J]. *Water Research*, 35(11): 2615-2620
- 胡金财, 谈振姣, 张轶, 等. 2013. 污泥生物沥浸法深度脱水工程及其运行效果分析[J]. *给水排水*, 39(7): 48-52
- Jin B, Wilén B M, Lant P. 2004. Impacts of morphological, physical and chemical properties of sludge flocs on dewaterability of activated sludge[J]. *Chemical Engineering Journal*, 98(1/2): 115-126
- Lee D J, Lai J Y, Mujumdar A S. 2006. Moisture distribution and dewatering efficiency for wet materials[J]. *Drying Technology*, 24(10): 1201-1208
- 李超, 周立祥, 王世梅. 2008. 复合硫杆菌生物浸出污泥中重金属的效果及与 pH 和 ORP 的关系[J]. *环境科学学报*, 28(6): 1155-1160
- Li H S, Wen Y, Cao A, *et al.* 2012. The influence of additives (Ca^{2+} , Al^{3+} , and Fe^{3+}) on the interaction energy and loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) of activated sludge and their flocculation mechanisms [J]. *Bioresource Technology*, 114: 188-194
- Liu F, Zhou L, Zhou J, *et al.* 2012a. Improvement of sludge dewaterability and removal of sludge-borne metals by bioleaching at optimum pH [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 221-222: 170-177
- Liu F, Zhou J, Wang D Z, *et al.* 2012b. Enhancing sewage sludge dewaterability by bioleaching approach with comparison to other physical and chemical conditioning methods [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 24(8): 1403-1410
- 刘奋武, 周立祥, 周俊, 等. 2011. 生物沥浸处理提高城市污泥脱水性能的中试研究: 批式运行模式 [J]. *环境科学*, 32(7): 2023-2029
- Lu M C, Lin C J, Liao C H, *et al.* 2003. Dewatering of activated sludge by Fenton's reagent [J]. *Advances in Environmental Research*, 7(3): 667-670
- Mikkelsen L H, Keiding K. 2002. Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to dewatering [J]. *Water Research*, 36(10): 2451-2462
- Neyens E, Baeyens J. 2003. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 98(1/3): 51-67
- Neyens E, Baeyens J, Dewil R. 2004. Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substances to improve activated sludge dewatering [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 106(2): 83-92
- Park C, Muller C D, Abu-Orf M M, *et al.* 2006. The effect of wastewater cations on activated sludge characteristics: effects of aluminum and iron in floc [J]. *Water Environment Research*, 78(1): 31-40
- Sanin F, Vesilind P. 1994. Effect of centrifugation on the removal of extracellular polymers and physical properties of activated sludge [J]. *Water Science and Technology*, 30(8): 117-127
- 宋永伟, 刘奋武, 周立祥. 2012. 微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响 [J]. *环境科学*, 33(8): 2786-2792
- Tichý R, Janssen A, Grotenhuis J, *et al.* 1994. Possibilities for using biologically-produced sulphur for cultivation of *Thiobacilli* with respect to bioleaching processes [J]. *Bioresource Technology*, 48(3): 221-227
- Vaxelaire J, Cézac P. 2004. Moisture distribution in activated sludges: a review [J]. *Water Research*, 38(9): 2215-2230
- 王世梅, 周立祥. 2005. 提高氧化亚铁硫杆菌和氧化硫硫杆菌平板检出率的方法: 双层平板法 [J]. *环境科学学报*, 25(10): 1418-1420
- Wu C C, Huang C, Lee D J. 1998. Bound water content and water binding strength on sludge flocs [J]. *Water Research*, 32(3): 900-904
- Zheng G Y, Zhou L X, Wang S M. 2009. An acid-tolerant heterotrophic microorganism role in improving tannery sludge bioleaching conducted in successive multibatch reaction systems [J]. *Environmental Science and Technology*, 43(11): 4151-4156
- 郑冠宇, 王世梅, 周立祥. 2007. 污泥生物沥浸处理对病原物的杀灭效果影响 [J]. *环境科学*, 28(7): 1539-1542
- Zhou J, Zheng G, Wong J W, *et al.* 2013. Degradation of inhibitory substances in sludge by *Galactomyces* sp. Z3 and the role of its extracellular polymeric substances in improving bioleaching [J]. *Bioresource Technology*, 132: 217-223
- 周立祥, 周顺桂, 王世梅, 等. 2004. 制革污泥中铬的生物脱除及其对污泥的调理作用 [J]. *环境科学学报*, 24(6): 1014-1020
- 周立祥. 2012. 污泥生物沥浸处理技术及其工程应用 [J]. *南京农业大学学报*, 35(5): 154-166