

生物沥浸对牛粪沼液脱水性能的影响研究

周俊, 周立祥*, 刘奋武, 任云, 王电站

(南京农业大学资源与环境科学学院环境工程系, 南京 210095)

摘要: 采用嗜酸性硫杆菌, 通过摇瓶试验研究了不同硫杆菌及其复合生物沥浸对含固率为 3.4% 的沼液脱水性能的影响. 设置了如下 5 个处理: ①原始沼液(作对照); ② $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{Fe}^{2+}$ (不接菌); ③ $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{S}^0 + 25\text{ mL A. t.}$; ④ $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{Fe}^{2+} + 25\text{ mL A. f.}$; ⑤ $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{S}^0 + 4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{Fe}^{2+} + 12.5\text{ mL A. t.} + 12.5\text{ mL A. f.}$. 考察了不同的处理生物沥浸过程中的 pH、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、总 Fe、比阻、毛细吸水时间(CST)、沉降性能及沉降 12 h 后上清的浊度等的变化. 结果表明, 原始沼液 + Fe^{2+} 、原始沼液 + $\text{Fe}^{2+} + \text{A. f.}$ 和原始沼液 + $\text{Fe}^{2+} + \text{S}^0 + \text{A. f.} + \text{A. t.}$ 这 3 个处理沼液的比阻和 CST 都得到了不同程度的降低, 综合沼液的脱水性能、沉降性能以及沉降 12 h 后的上清液浊度, 结合经济成本分析, 建议选择原始沼液 + $\text{Fe}^{2+} + \text{A. f.}$ 作为沼液生物沥浸处理比较合理. 生物沥浸后沼饼中的有机质、N、P、K 的含量分别降低了 1.14%、0.09%、0.05%、0.1%, 不影响肥效, 对沼饼中的重金属 Cu、Zn 的去除率分别为 63.2% 和 91.3%, 同时对沼液中的总大肠杆菌的杀灭率超过了 99%. 可见, 生物沥浸技术为沼液的资源化利用提供了一个全新的途径.

关键词: 生物沥浸; 沼液; 硫杆菌; 脱水性能; 重金属

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2011)11-3400-05

Influence of Bioleaching on Dewaterability of Cattle Biogas Slurry

ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, LIU Fen-wu, REN Yun, WANG Dian-zhan

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

Abstract: The dewaterability of cattle biogas slurry facilitated by bioleaching was investigated through batch experiments with co-inoculation of different *Acidophilic thiobacilli* (*Acidithiobacillus thiooxidans* TS6 or *Acidithiobacillus ferrooxidans* LX5). The experiment was set the following 5 treatments: ①original biogas slurry (CK), ② $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{Fe}^{2+}$ (uninoculation), ③ $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{S}^0 + 25\text{ mL A. t.}$, ④ $4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{Fe}^{2+} + 25\text{ mL A. f.}$ and ⑤ $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{S}^0 + 4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\text{Fe}^{2+} + 12.5\text{ mL A. t.} + 12.5\text{ mL A. f.}$. During bioleaching, dynamic changes of pH, ORP, Fe^{2+} , Fe^{3+} , total Fe, the settleability, the turbidity of the supernatant after settling for 12 h, and the dewaterability (expressed as specific resistance to filtration γ or capillary suction time, CST) of biogas slurry were monitored. Results show that specific resistance γ and CST of bioleached biogas slurry are reduced drastically for the treatments of original biogas slurry spiked with only Fe^{2+} , the treatment of original biogas slurry co-spiked with Fe^{2+} and *Acidithiobacillus ferrooxidans* LX5, and the treatment of original biogas slurry co-spiked with Fe^{2+} , S^0 and two *Acidophilic thiobacilli*. Taking the dewaterability, settleability, the turbidity of the supernatant fluid after settle 12 h and economical cost into account, the treatment of original biogas slurry co-spiked with Fe^{2+} and *Acidithiobacillus ferrooxidans* LX5 is the most suitable pattern for cattle biogas slurry bioleaching. After bioleaching, 1.14% of organic matter, 0.09% of N, 0.05% of P, and 0.1% of K are lost in the bioleaching process, but it don't affect its fertilizer efficiency. Meanwhile, the 63.2% of Cu and 91.3% of Zn are removed from the biogas slurry, and elimination efficiencies of total coliforms in bioleached slurry exceed 99%. This study might provide a new approach for treatment and disposal of biogas slurry.

Key words: bioleaching; biogas slurry; *acidophilic thiobacilli*; dewaterability; heavy metals

近年来, 中国畜牧养殖业得到了快速的发展, 随之产生的畜禽粪便的量也巨大. 特别是由于中心城市规模的扩大和城镇化的建设, 大中型养殖场的环境污染问题尤为严重, 主要表现在畜禽粪便占地和污染农田生态环境、水体富营养化、空气污染、疾病的传播和重金属的污染等^[1~3]. 畜禽粪便通过沼气化工程处理可以大幅度地降低畜禽粪水中的 COD、BOD, 同时产生清洁的沼气, 因此具有巨大的环境效益和经济效益^[6~8]. 然而, 通过沼气化工程处理后仍然产生大量的厌氧发酵残余物(沼液和沼渣), 这些残余物含有大量的植物生长的养分如有机物、N、P、

K 和微量元素等, 同时也含有一定的病原菌、重金属、臭味等, 如此庞大的残余物若不能合理地处理仍然会对环境带来巨大的污染, 因此寻求解决如此庞大的畜禽粪便中恶臭、重金属、病原菌、高的有机物等对环境带来的污染并进行资源化利用问题已受到科研工作者越来越多的关注^[9~13].

收稿日期: 2010-12-14; 修订日期: 2011-03-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2009AA06Z317); 国家自然科学基金项目(20977048)

作者简介: 周俊(1983~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境微生物和固体废物处理与处置, E-mail: bionjau@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: lxzhou@njau.edu.cn

国内外研究发现利用嗜酸性硫杆菌的生物氧化作用和酸化作用发展起来的生物沥浸技术 (Bioleaching) 可有效去除污泥中重金属、消除恶臭和杀灭病原菌, 是一种污泥无害化新技术^[14-17]。不仅如此, 本课题组还发现, 在制革污泥、城市污泥、猪粪的生物沥浸处理中, 该方法还兼有促进污泥和猪粪的浓缩和改善脱水性能的明显功效, 可不加任何絮凝剂而机械脱水至污泥含水率 60% 以下^[18-20]。因此本研究探索利用生物沥浸的方法来处理牛粪厌氧发酵残余物沼液的可行性, 考察不同硫杆菌及其复合菌群对沼液生物沥浸的效果, 以期对沼液的处理提供一条全新的途径, 也为工程化应用提供参数。

1 材料与方法

1.1 供试沼液及接种物

供试的沼液: 来自南京某奶牛养殖场的沼液池。含固率为 3.4%; 比阻数量级达到 $10^{14} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$; pH 值为 7.70; 固体中的有机质、全 N、全 P 和全 K 分别占干物质的 58.1%、1.91%、1.30% 和 1.70%; 重金属含量比较低, 其中 Cu、Zn 含量 (以干物质计) 分别为 $207 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $814 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其它未检测出。离心后上清液中 COD、总 N 和总 P 浓度分别为 3 715、566 和 $14.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。外观为黑绿色流体, 具有微弱的臭味。

接种物的制备^[21]: 将本研究组以前分离的嗜酸性氧化硫硫杆菌 *Acidithiobacillus thiooxidans* TS6 (*A. t*) 和氧化亚铁硫杆菌 *Acidithiobacillus ferrooxidans* LX5 (*A. f*) 纯菌株分别接种到 150 mL 的 SM 液体培养基和改进型 9K 培养基中, 分别添加营养物质, 置于 28°C 往复摇床 ($180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 中扩大培养, 直至菌体细胞数量达约 $10^8 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$, 保存备用。

1.2 不同接种细菌生物沥浸试验

在一系列的 500 mL 三角瓶中, 分别加入含固 3.4% 新鲜沼液 275 mL, 然后设置如下 5 个处理: ①原始沼液 (作对照); ② $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}^{2+}$ (不接菌); ③ $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ S}^0 + 25 \text{ mL A. t}$; ④ $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}^{2+} + 25 \text{ mL A. f}$; ⑤ $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ S}^0 + 4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}^{2+} + 12.5 \text{ mL A. t} + 12.5 \text{ mL A. f}$ 。每个处理 3 个重复, 三角瓶置于 28°C 往复摇床 ($180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 中振荡培养。每 12 h 采取称重法补充蒸发的水分, 同时测定生物沥浸过程中沼液的 pH, 并每次取样 10 mL, 离心过滤后测定其中 Fe^{2+} 、总 Fe。生物沥浸结束后测试不同处理的脱水性能 (以比阻 γ , 和毛细吸水时间 CST 衡量)、沉降性能和不同处理沉降 12 h 后的上清液的浊度。

1.3 测定方法

用 pH S-3C 精密 pH 计 (上海雷磁厂) 测定沼液的 pH; 沥浸体系中的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、总 Fe 的测定按文献 [8] 进行, 即首先将待分析的污泥在 $12\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 15 min, $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤进行固液分离, 获取沥浸液样, 然后用邻菲罗啉分光光度法测定^[22]; 沼液的含固率采用 105°C 烘干法测定; 沼液的沉降性能的测定: 250 mL 沥浸后的沼液充分摇匀后, 倒入 250 mL 量筒中, 记录下 12 h 后上清液的体积, 并计算上清液体积占总体积的百分数即代表沼液的沉降性^[23]; 沼液比阻 γ 的测定采用布氏漏斗-真空抽滤法测定^[24]; 沼液生物沥浸后浊度的测定采用 SGZ1-A 型浊度仪; 有机质: 采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{CrO}_7$ 外加热法测定; 全 N: 硫酸-混合催化剂消化, 蒸馏定氮法测定; 全 P: $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消化, 钼蓝比色法测定; 全 K: $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消化, 火焰光度法测定; Cu、Zn: $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消化, ICP-AES, Optival 200, USA 测定, 沥浸液中的 Cu、Zn 测定首先将待分析的沼液在 $12\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 15 min, $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤进行固液分离, 获取沥浸液样, 然后采用 ICP-AES, Optival 200, USA 测定; TOC: TOC-5000 A, Shimadzu^[25]。

2 结果与讨论

2.1 不同细菌接种试验各处理 pH、 Fe^{2+} 、总 Fe、 Fe^{3+} 的变化趋势

图 1 和图 2 分别反映了生物沥浸过程中不同的处理 pH、 Fe^{2+} 、总 Fe 和 Fe^{3+} 的变化趋势。从图 1 可以看出, 处理①原始沼液的 pH 值先有一个缓慢的升高然后再缓慢降低的过程。处理③ $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ S}^0 + 25 \text{ mL A. t}$ 的 pH 值也有一个缓慢升高的过程, 可能是由于该体系的初始 pH 值较高, 不适合 *A. t* 的生长, 以致在体系的缓冲作用下升高。处理② $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}^{2+}$ (不接菌)、处理④ $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}^{2+} + 25 \text{ mL A. f}$; 处理⑤ $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ S}^0 + 4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}^{2+} + 12.5 \text{ mL A. t} + 12.5 \text{ mL A. f}$ 这 3 个处理体系的 pH 值都逐渐降低, 第 3 d 时 3 个处理的 pH 值分别降至 3.74、2.61、2.51, 可见 3 个处理中接菌的处理比不接菌的处理 pH 值低, 接复合菌的比接单一 *A. t* 的要低。处理④ $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}^{2+} + 25 \text{ mL A. f}$ 比处理② $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}^{2+}$ (不接菌) 的 pH 值降的低, 原因可能是前者 Fe^{2+} 的氧化率高。处理⑤ $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ S}^0 + 4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}^{2+} + 12.5 \text{ mL A. t} + 12.5 \text{ mL A. f}$ 比接单一菌的处理④ $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe}^{2+} + 25 \text{ mL A. f}$ 的 pH 值低, 可能是前者氧化了部

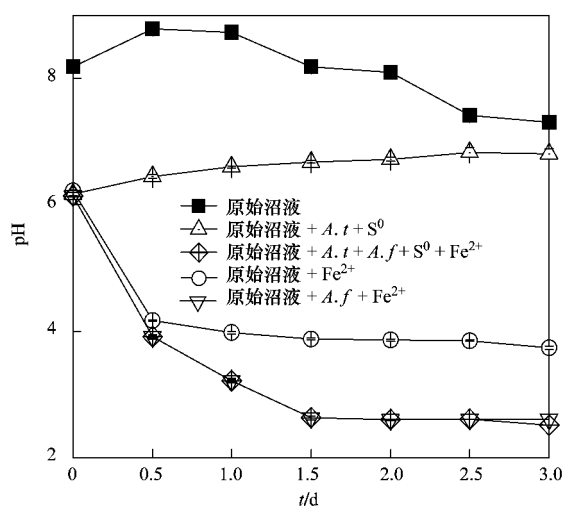
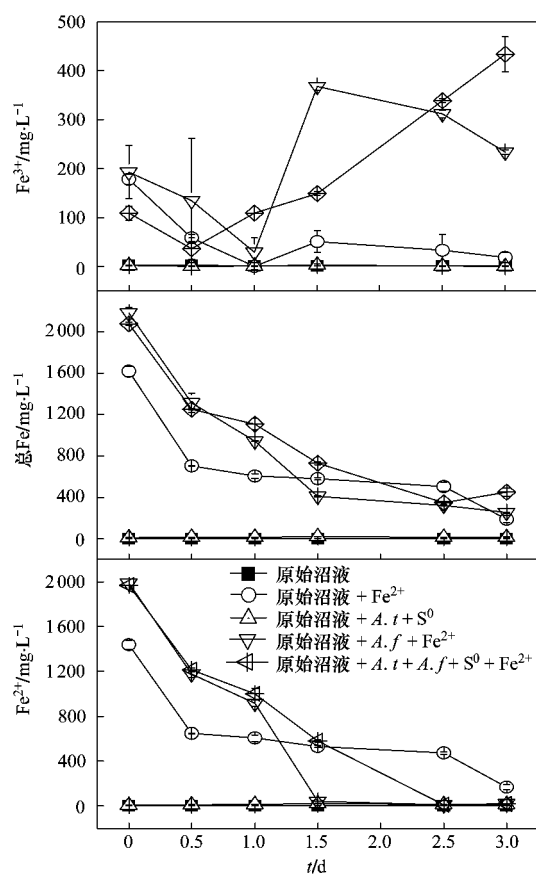


图1 不同的处理生物沥浸过程中 pH 的变化

Fig. 1 Variation of pH during the bioleaching of biogas slurry

图2 不同的处理生物沥浸过程中 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 和总 Fe 的变化Fig. 2 Variation of Fe^{2+} , Fe^{3+} and total Fe during the bioleaching of biogas slurry

分的 S^0 。从图 2 可以看出,处理①和处理③沥浸过程中由于体系中没有加入 Fe^{2+} ,因此整个过程中 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 和总 Fe 没有明显变化,含量都比较低,在

$2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。而在处理②、处理④、处理⑤中,生物沥浸过程中 Fe^{2+} 含量逐渐降低,在 2.5 d 时处理④、处理⑤中 Fe^{2+} 分别为 $11.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $9.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,基本氧化完全,氧化率分别达到了 99.4% 和 99.5%,而处理②中由于化学氧化作用 Fe^{2+} 也逐渐的降低,在第 2.5 d 的时候 Fe^{2+} 为 $472 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氧化率为 67.2%,这 3 个处理的总 Fe 的变化也是逐渐降低的,到第 3 d 的时候分别为 188、253、450 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。值得一提的是处理⑤的总 Fe 在后期有一个缓慢升高的过程,这种现象在城市污泥的生物沥浸过程中也有发现,原因可能是由于该处理后期由于体系 pH 值的进一步降低,使得体系中与有机物结合的 Fe^{3+} 溶出^[19]。

2.2 不同细菌接种试验各处理沉降、比阻及上清液浊度的变化

图 3 和图 4 分别反映了生物沥浸结束后各处理的比阻、CST、沉降比及沉降 12 h 后上清液的浊度。从图 3 可以看出生物沥浸后处理②、处理④、处理⑤的比阻大幅度降低,分别为 1.28×10^{12} 、 0.84×10^{12} 和 $1.43 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。处理③的比阻也有降低但是降低不大,在数量级上和原始沼液没有差别,从比阻上看处理④的比阻最低。从反映沼液脱水的另一个指标 CST(毛细吸水时间)上看,经过处理以后处理②、处理④、处理⑤的 CST 都大幅度降低,分别为 12.7、23.1 和 23.6 s。而处理①和处理③的 CST 分别为 98.8 s 和 148.9 s。图 4 反映了生物沥浸后的沉降比以及沉降后的上清浊度,沉降比的大小为处理① < 处理② < 处理③ < 处理⑤ < 处理④,可见其中处理④沉降性能最好,上清所占体积为 39.83%。而

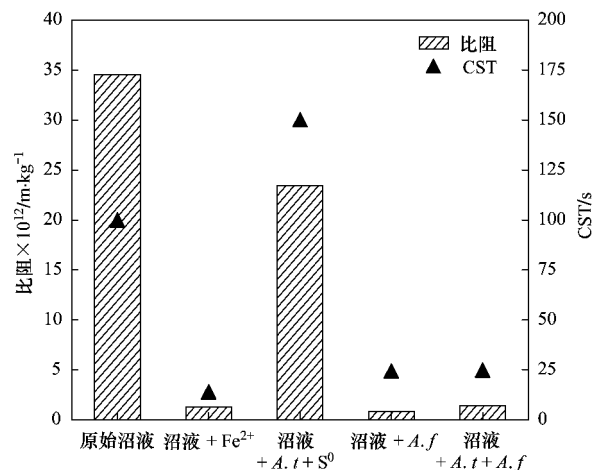


图3 不同的处理生物沥浸结束后的比阻和 CST 的变化趋势

Fig. 3 Comparison of specific resistance and CST of biogas slurry after bioleaching

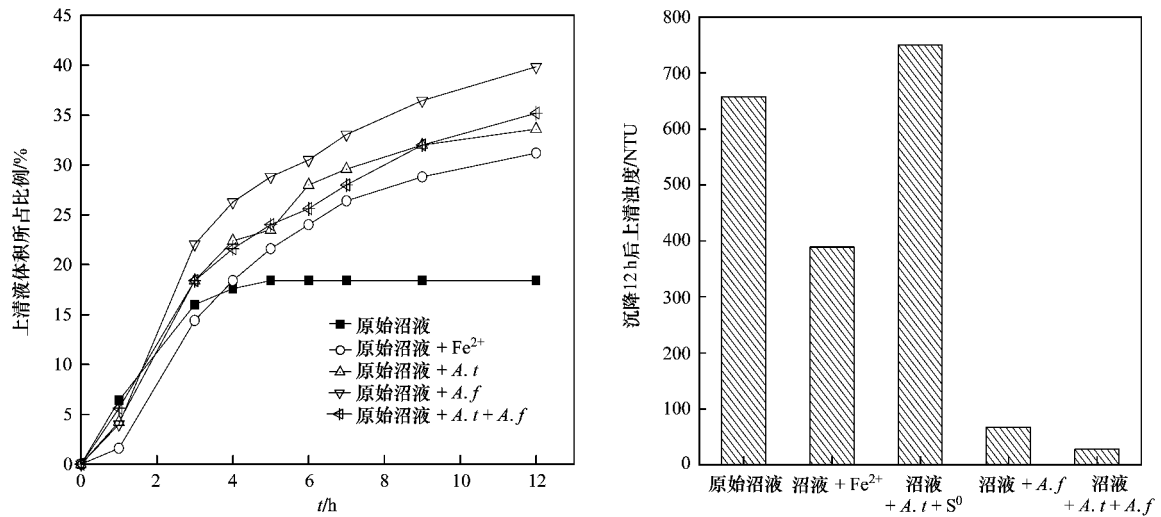


图 4 沼液不同处理生物沥浸后沉降 12 h 后上清所占总的比例及上清液的浊度
Fig. 4 Rate of supernatant fluid and its turbidity after 12 h settlement

上清液的浊度为处理⑤ < 处理④ < 处理② < 处理① < 处理③。因此综合沼液的比阻、CST、沉降性能以及沉降 12 h 后的上清液浊度,结合经济成本分析,建议选择处理④ 4 g·L⁻¹ Fe²⁺ + 25 mL A. f 作为沼液生物沥浸的工程化应用的处理。另外,通过比较处理②和处理④,发现处理②对沼液脱水也有一定的作用,可能是由于 Fe²⁺ 本身是一种絮凝剂,对沼液脱水有一定的改善作用,但处理④效果更好的原因,一方面是由于反应结束后处理②的 pH 为 3.74,比处理④的 2.61 要高,此时可能处理④的 Zeta 电位比

处理②更接近于 0,而所带电荷越接近于 0 脱水效果就越好,另一方面是笔者推测 A. f 产生的胞外多聚物可能对沼液的脱水也有一定的促进作用,具体的机制目前正在研究中^[24]。

2.3 沼液生物沥浸处理前后的相关性质比较研究

经过以上的研究可以看出添加 A. f 的处理脱水效果较好,因此有必要对生物沥浸前后沼液性质进行研究。对沼液脱水后的沼饼中的营养物质含量进行了研究,同时也研究了生物沥浸前后沼液中病原菌的含量。结果见表 1 和表 2。

表 1 沼液沥浸前后沼饼中(干物质计)有机质、N、P、K 及重金属 Cu、Zn 的含量

Table 1 Content of nitrogen, phosphorous, potassium, organic matter and Cu, Zn in the biogas slurry before and after bioleaching

沼饼	有机质/%	全 N/%	全 P/%	全 K/%	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹
沥浸前	58.05	1.91	1.30	1.70	207	814
沥浸后	56.91	1.80	1.25	1.60	76.1	70.2

表 2 沼液生物沥浸前后病原菌数量的变化

Table 2 Dynamics of TC and FC in biogas slurry before and after bioleaching

处理	总大肠杆菌			粪大肠杆菌		
	沥浸前/个·mL ⁻¹	沥浸后/个·mL ⁻¹	去除率/%	沥浸前/个·mL ⁻¹	沥浸后/个·mL ⁻¹	去除率/%
沼液(牛粪)对照	1.70 × 10 ⁷	1.70 × 10 ⁷	0	0	0	0
沼液(牛粪)处理	1.70 × 10 ⁷	2.00 × 10 ²	99.99	0	0	0

从表 1 中可以看生物沥浸后沼饼中的有机质、N、P、K 的含量都有所降低,但是降低的幅度不大,不影响农业价值。养分含量降低比较低的原因是生物沥浸主要依靠嗜酸性硫杆菌为主体的微生物群体,该菌为化能自养型,不能直接利用有机物。另外,生物沥浸时间短也是重要原因之一^[25]。同时,可以

看出沥浸后沼饼中的 Cu、Zn 的含量分别降低了 63.2% 和 91.3%。

从表 2 中可以看出沼液中总大肠杆菌的数量为 1.70 × 10⁷ 个·mL⁻¹,粪大肠杆菌的数量为 0,经过生物沥浸处理以后总大肠杆菌的数量变为 2.00 × 10² 个·mL⁻¹,去除率为 99.99%,而没有经过生物沥浸

的处理前后病原菌的数量没有发生变化.可见,生物沥浸能够有效的杀灭病原菌,杀灭的原因可能是由于生物沥浸过程中体系的 pH 值下降,低 pH 值下导致大肠杆菌的生长受到抑制或者被杀死,从而数量大幅度降低,这与生物沥浸对城市污泥、制革污泥体系中病原菌的杀灭效果一致^[13].

3 结论

(1) 研究接种不同的硫杆菌对牛粪沼液的处理效果,通过比较可以看出原始沼液加 Fe^{2+} 同时加 *A.f* 处理脱水效果明显,最后比阻为 $0.84 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,CST 为 23.1 s,沉降 12 h 时上清所占体积分数为 39.83%.

(2) 研究表明生物沥浸处理对脱水沼饼的营养物质损失较少,不影响肥效,对沼饼中的重金属 Cu、Zn 的去除率分别为 63.2% 和 91.3%. 对沼液中的总大肠杆菌的杀灭率达到了 99.99%.

参考文献:

- [1] 王方浩,马文奇,窦争霞,等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应 [J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614-617.
- [2] 叶小梅,常志州,陈欣,等. 畜禽养殖场排放物病原微生物危险性调查 [J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 66-70.
- [3] 郝秀珍,周东美. 畜禽粪中重金属环境行为研究进展 [J]. 土壤, 2007, 39(4): 509-513.
- [4] 董占荣,陈一定,林威永,等. 杭州市郊规模化养殖场猪粪的重金属含量及其形态 [J]. 浙江农业学报, 2008, 20(1): 35-39.
- [5] Xiong X, Li Y X, Li W, et al. Copper content in animal manures and potential risk of soil copper pollution with animal manure use in agriculture [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(11): 985-990.
- [6] 姚建军,崔强. 沼气技术对减少农村畜禽粪便污染的作用 [J]. 中国沼气, 2008, 26(5): 48-49.
- [7] 汪开英,陈小霞,赖发英. 规模畜禽场沼肥资源化利用技术综述与展望 [J]. 家畜生态学报, 2009, 30(3): 105-108.
- [8] Ferrer I, Gamiz M, Almedia M, et al. Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru) [J]. Waste Management, 2009, 29(1): 168-173.
- [9] 王远远,刘荣厚. 沼液综合利用研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(4): 1089-1091.
- [10] 朱磊,卢剑波. 沼气发酵产物的综合利用 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊): 176-180.
- [11] Campos E, Almirall M, Mtnéz-Almela J, et al. Feasibility study of the anaerobic digestion of dewatered pig slurry by means of polyacrylamide [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(2): 387-395.
- [12] Castrillon L, Fernandez-Nava Y, Maranon E, et al. Anoxic-aerobic treatment of the liquid fraction of cattle manure [J]. Waste Management, 2009, 29(2): 761-766.
- [13] 费辉盈. 禽畜粪便水分特征及生物脱水途径研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- [14] Zhou L X, Fang D, Wang S M, et al. Bioleaching of Cr from tannery sludge: the effects of initial acid addition and recycling of acidified bioleached sludge [J]. Environmental Technology, 2005, 26(3): 277-284.
- [15] 郑冠宇,王世梅,周立祥. 污泥生物沥浸处理对病原物的杀灭效果影响 [J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1539-1542.
- [16] Tyagi R D, Sreekrishnan T R, Blais J F, et al. Effect of dissolved oxygen on sludge acidification during the SSDML process [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1998, 102(1): 139-155.
- [17] Wang S M, Zheng G Y, Zhou L X. Heterotrophic microorganism *Rhodotorula mucilaginosa* R30 improves tannery sludge bioleaching through elevating dissolved CO_2 and extracellular polymeric substances levels in bioleaching solution as well as scavenging toxic DOM to *Acidithiobacillus* species [J]. Water Research, 2010, 44(18): 5423-5431.
- [18] 宋兴伟,周立祥. 生物沥浸处理对城市污泥脱水性能的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 2012-2017.
- [19] 刘奋武,周立祥. 不同能源物质配合及化学强化对生物沥浸法提高城市污泥脱水性能的效果 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(5): 974-979.
- [20] 周俊,王电站,刘奋武,等. 生物沥浸法去除猪粪中重金属和提高其脱水性能研究 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(2): 388-394.
- [21] 周立祥,方迪,周顺桂,等. 利用嗜酸性硫杆菌去除制革污泥中铬的研究 [J]. 环境科学, 2004, 25(1): 62-66.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 225-227, 392-394.
- [23] 周立祥,周顺桂,王世梅,等. 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, 2004, 24(6): 1014-1020.
- [24] 周立祥. 固体废物处理处置与资源化 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007. 120-178.
- [25] 李超,周立祥,王世梅. 复合硫杆菌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, 2008, 28(6): 1155-1160.
- [26] 宋兴伟. 生物沥浸处理提高城市污泥脱水性能和促进重金属 Cu 溶出的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2008.