

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 C, Zhou L X, Wang S M. 2008. Bioleaching of heavy metals from municipal sludge by the co-inoculation of two acidophilic Thiobacillus [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,28(6):1155~1160

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

李超,周立祥*,王世梅

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:2007-05-09 录用日期:2008-04-03

摘要:利用复合嗜酸性硫杆菌(氧化硫硫杆菌和氧化亚铁硫杆菌)在不同接种量下(5%,10%,20%)对城市污泥进行生物沥浸,探讨了沥浸过程中不同重金属的浸出效果及其与 pH 值和氧化还原电位(ORP)的相关关系。结果表明,该方法能有效地浸出污泥中的重金属,生物沥浸处理 10d 后,污泥中 Cu、Zn 和 Ni 的浸出率可分别达到 98%、99% 和 90%,硫杆菌接种量越大,沥浸反应速率越快,20% 接种处理 > 10% 接种处理 > 5% 接种处理 > 未接种处理。污泥生物沥浸过程中 pH 的下降和 ORP 的上升,是促进污泥重金属溶出的主要驱动力,但其中 Cu 的浸出同时受 pH 下降和 ORP 上升的双重影响,而 Zn 和 Ni 的浸出则主要受 pH 影响。污泥中 Cu、Zn 和 Ni 开始大幅度浸出的 pH 阈值大约为 4.5 和 5 左右。研究还发现,生物沥浸处理虽可使污泥中有机质、全氮、全磷和全钾含量有所下降,但并不影响其农业利用价值。

关键词:城市污泥;生物沥浸;嗜酸性硫杆菌;重金属

文章编号:0253-2468(2008)06-1155-06 中图分类号:X703 文献标识码:A

Bioleaching of heavy metals from municipal sludge by the co-inoculation of two acidophilic Thiobacillus

LI Chao, ZHOU Lixiang*, WANG Shimei

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

Received 9 May 2007; accepted 3 April 2008

Abstract: The effect of the co-inoculation of two acidophilic Thiobacillus (*Acidithiobacillus ferrooxidans* LX5 and *Acidithiobacillus thiooxidans* TS6) on the solubilization efficiency of sludge-born heavy metals by bioleaching was studied in batch experiments. The correlation between sludge-born metal solubilization and pH and/or oxidation-reduction potential (ORP) arising from bioleaching is also discussed. The results show that bioleaching with the two acidophilic Thiobacillus greatly improved the heavy metal solubilization efficiency from a sludge matrix. Removal efficiencies of 98% for Cu, 99% for Zn, and 90% for Ni were obtained after 10 days of bioleaching. The greater the inoculum percentage, the shorter the bioleaching time. For example, the bioleaching reaction time for different inoculum treatments were in the order 20% inoculum < 10% < 5% < 0% (control). The decrease of pH and the increase of ORP from bioleaching were two important factors resulting in metal solubilization, especially for sludge-born Cu. However, the solubilization of Zn and Ni derived from sludge was attributed to the pH decrease only. The effect of ORP on Zn and Ni solubilization was not observed. It was found that the threshold values of pH for metal solubilization were about pH 4 for Cu, pH 5 for Zn, and pH 5 for Ni. In addition, the contents of organic matter, nitrogen, phosphorus, and potassium in bioleached sludge were, to a certain extent, decreased due to bioleaching treatment, but this did not affect the application of bioleached sludge to farmland.

Keywords: municipal sludge; bioleaching; acidophilic Thiobacilli; heavy metal

1 引言(Introduction)

城市污泥是指污水处理厂在净化污水过程中

产生的沉淀物。它虽然含有大量的有机质及氮、磷等植物养分,但也富集了污水中 50%~80% 的重金属(Brown and Lester, 1979; Lester *et al.*, 1983)。据

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(No.2006AA06Z314);教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-04-0505)

Supported by the Hi-tech Research and Development Program of China (No. 2006AA06Z314) and the New Century Excellent Talent Program (No. NCET-04-0505)

作者简介:李超(1982—),男; * 通讯作者(责任作者),E-mail: lxzhou@njau.edu.cn,025-84395160

Biography: LI Chao (1982—), male; * Corresponding author, E-mail: lxzhou@njau.edu.cn, 025-84395160

报道,我国多数城市污泥中重金属含量可达数百至数千 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,常见的超标重金属有 Cu、Zn、Ni、Cd 等(周立祥等,1999;陈同斌等,2003).特别是在一些收集有工业园区污水的污水处理厂,其产生的污泥中重金属超标更为显著,这不仅给污泥的处理和处置增加了难度和费用,也给污泥的土地利用带来很大限制.生物沥浸技术(Bioleaching,以前也称为生物淋滤或生物沥滤)是一种非常有前景的净化污泥的新技术,该技术具有操作简单、无二次污染、重金属去除效率高、可消除污泥恶臭和杀灭病原物、并能促进污泥高效浓缩和改善污泥脱水性能等优点,具有极其广阔的应用前景(Tyagi, 1988;周顺桂等,2002;周立祥等,2004a).其基本原理是通过嗜酸性硫杆菌的生物氧化作用及其产生的低 pH 环境使污泥颗粒中重金属浸出进入水相,可通过固液分离而去除(或进一步回收).同时,经生物沥浸处理后改变了污泥颗粒表面电化学性质,有效促进了污泥的高效浓缩和脱水,而且微生物促进下的氧化条件和酸性环境则有利于氧化分解污泥中的恶臭物质(如 H_2S 和腐胺类物质)和杀灭病原物(郑冠宇等,2007).

虽然有关污泥生物沥浸处理的研究正在逐渐增多,但主要仍集中在利用以单一硫杆菌为优势菌(如嗜酸性氧化亚铁硫杆菌或氧化硫硫杆菌)来展开各项研究,包括环境因素的影响研究、污泥种类与性质、营养物质浓度的影响等(Tyagi *et al.*, 1993; Tyagi *et al.*, 1997),对于复合硫杆菌生物沥浸效果

的报道不多.另外,重金属生物浸出动态与介质 pH 和氧化还原电位(ORP)的依赖关系虽有报道,但不同种类重金属的生物沥浸效果不同,在何种 pH 下才开始溶出的阈值分布也很不清楚,而这对指导工程实践却有很大影响.此外,有关生物沥浸处理对污泥重金属去除的研究相对较多,而对污泥中有益成分的影响报道相对较少.为此,本研究观察了不同接种量条件下的高效复合硫杆菌(氧化硫硫杆菌和氧化亚铁硫杆菌)对污泥生物沥浸效果,包括城市污泥中重金属的去除情况及其与 pH、ORP 等指标的相关性分析、不同重金属溶出的 pH 阈值以及对污泥中有机质和养分变化的影响,以期为生物沥浸工艺的应用提供技术支撑.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 供试污泥和硫杆菌菌株

城市污泥取自苏州某污水处理厂的污泥浓缩池,该厂采用三槽式氧化沟工艺处理城市污水,其中工业废水约占 50%,污泥中重金属 Cu 严重超标,其基本性质见表 1. 污泥采回后,除少部分污泥冰冻干燥以测定污泥有关成分外,其余的污泥用于生物沥浸处理.

用于污泥重金属生物沥浸的嗜酸性化能自养型硫杆菌菌株,为本实验室分离出的氧化硫硫杆菌 TS6 和氧化亚铁硫杆菌 LX5(周立祥等,2004b),现被国家专利局指定的微生物保存中心保藏.

表 1 供试城市污泥基本性质(干物质计)

Table 1 The primary physicochemical properties of the selected municipal sewage sludge

pH	含固率	全氮	全磷	全钾	有机质	总 Cu /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总 Zn /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总 Ni /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总 Cr /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
6.56	2.93%	3.52%	1.51%	0.94%	47.8%	12750	994	376	105

2.2 复合硫杆菌的加富、驯化及接种物制备

将本实验室从污泥中分离的嗜酸性氧化硫硫杆菌 TS6 和氧化亚铁硫杆菌 LX5 纯菌株分别接种到 100mL 改进型 SM 液体培养基和 9K 培养基中,预先将培养基 pH 调至 4,于 28℃ 往复式摇床中 180r·min⁻¹振荡培养,每天监测 pH 变化.待培养基 pH 降到 2 以下,再分别从 2 个培养基中吸取 1mL 到 100mL 新鲜的改进的 SM 和 9K 培养基中,相同条件下培养,直至培养基 pH 降到 2 为止,从而获得加富和扩大培养的菌种.分别吸取 15mL 两种经加富培养后的菌液于 120mL 的供试污泥中,按 4g·L⁻¹

和 6g·L⁻¹ 分别添加能源物 S 粉和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$,在 28℃ 下振荡培养,直至 pH 降到 2 以下.按上面操作再继续培养一次.当 pH 降到 2 以下时停止振荡,所得的酸化污泥即为经过驯化后的用于生物沥浸实验的接种物.

2.3 污泥重金属生物沥浸处理试验

取 200mL 供试污泥于 500mL 三角瓶中,采用复合硫杆菌接种液分别为 5%、10%、20% (体积比) 的接种量进行沥浸处理,并设不接种的对照.在上述污泥中按 4g·L⁻¹ 加入专用能源物.每个处理 3 个重复,三角瓶用 8 层纱布封口,置于 28℃ 往复式摇床

中 $180\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡培养, 培养期间采用称量法补充蒸发的水分.

2.4 采样分析

在培养过程中, 每 2d 取样, 测定其 pH 和氧化还原电位 (ORP). 随后在 $12000\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心 15 min, $0.45\mu\text{m}$ 滤膜过滤进行固液分离. 原子吸收分光光度法测上清液中 Cu、Zn、Ni 浓度 (供试污泥中含量最高的重金属), 以浸出的重金属量与处理前污泥中重金属量的百分比作为污泥重金属的浸出率. 此外, 测定试验前后污泥固相中有机质及氮磷钾含量变化, 以计算生物沥浸处理对污泥有机质及氮磷损失的影响大小. 污泥有机质采用重铬酸钾—浓硫酸氧化法测定, 污泥中氮、磷、钾分别采用半微量凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰分光光度法测定 (鲍士旦, 2000).

3 结果 (Results)

3.1 污泥生物沥浸过程中 pH 和 ORP 的变化

生物沥浸过程启动后, 随着时间的延长, 嗜酸性硫杆菌的数量越多, pH 降低越快. 图 1 反映了生物沥浸过程中污泥体系 pH 变化, 可以看出, 接种量越大, 污泥介质 pH 降低速度越快. 生物沥浸第 2d, 20% 接种量的污泥样品 pH 值即从初始的 6.6 降至 3 左右, 而 10% 和 5% 接种量的 pH 仍在 4.0 和 5.0 左右, 随后 20% 接种量的 pH 快于 10% 和 5% 接种量的, 至第 10d 3 种接种量的污泥 pH 都降至 1.6 ~ 1.9. 未接种处理的 pH 值也有所下降但明显慢于接种处理, 至第 10d 时, pH 仍在 3 以上. 这是由于污泥本身存在有内源嗜酸性硫杆菌, 加入了能源物, 并经过较长时间的好氧反应会诱导内源嗜酸性硫杆菌的增殖, 从而使 pH 逐渐降低, 但反应速率明显慢于接种处理.

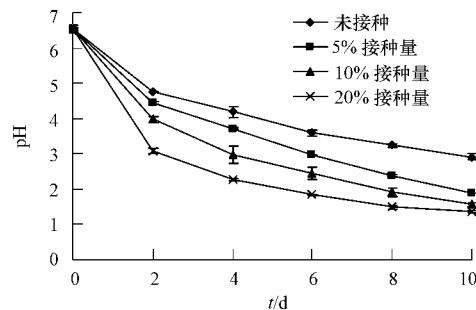


图 1 不同接种量对污泥生物沥浸过程中 pH 的影响

Fig. 1 Effect of inoculum amount on sludge pH during bioleaching

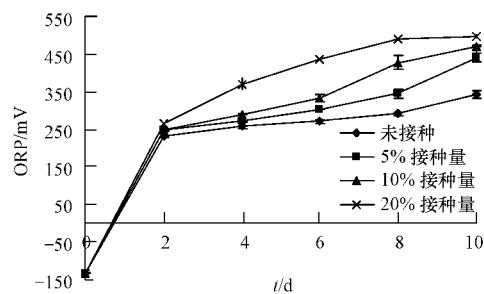


图 2 不同接种量对污泥生物沥浸过程中 ORP 的影响

Fig. 2 Effect of inoculum amount on sludge ORP during bioleaching

与 pH 下降相对应的体系 ORP 上升是生物沥浸中嗜酸性细菌大量繁殖的又一标志. ORP 的上升主要是由于在嗜酸性硫杆菌催化氧化作用下将还原态硫氧化成硫酸以及将污泥内源 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 所致. 由图 2 可见, 0 ~ 2d, 不同接种量的 4 个处理 ORP 变化动态基本相同, 都很快从开始的 -132mV 上升到 250mV 左右. 4d 后 20% 接种量的 ORP 上升快于其它处理, 而 3 个接种硫杆菌的处理其 ORP 在生物沥浸过程中高于对照处理, 主要是由于嗜酸性硫杆菌大量增殖, 硫被氧化成硫酸所造成. 其中 ORP 上升幅度, 依次为 20% 接种处理 > 10% 接种处理 > 5% 接种处理 > 未接种处理.

对照图 1 和图 2, 菌液接种量大的处理(在第 0 ~ 2d), pH 下降也越大, 直至试验结束. 而在反应的第 0 ~ 2d 内, 各处理污泥 ORP 几乎相同, 2d 后菌液接种量大的处理, ORP 上升也越大, 不同处理间差异也越明显. 由于污泥有一定缓冲性, 经测定不同接种量处理的污泥起始 pH 差异并不太明显, 但由于接种菌液 pH 为酸性, 接种量越大的处理, 外源酸的加入越多, 也会导致污泥的酸度降低. 接种量越大的处理介质 pH 也越低的现象, 仍不能排除因外源加入的酸不一致会有影响, 特别是第 0 ~ 2d. 这与 ORP 在第 0 ~ 2d 内, 各处理几乎相同的现象相吻合. 在第 0 ~ 2d 内, pH 变化可能主要是微生物氧化能源物质产酸以及起始外源酸度不同的共同影响所致, 而在 2d 后, 则主要是微生物的影响. 因为这从 ORP 变化在 2d 后差异愈加明显可以佐证.

3.2 污泥生物沥浸过程中重金属的去除

重金属种类不同, 其浸出动态也有明显差异. 由图 3 可知, 在第 2d 时, 除 20% 接种量的污泥中 (此时 pH 为 3.10) Cu 浸出率达到 14.4 % 外, 其它处理 Cu 浸出率(对应的介质 pH > 4) 几乎为 0. 在第

4d时,20%接种量处理污泥Cu浸出率可达76%,而此时其它3种处理的浸出率均低于40%,随后几天低接种量的污泥样品中Cu的浸出逐渐增加。总体来说,高接种量处理的Cu的浸出明显快于低接种量。3种接种量处理的Cu的浸出率于第10d都接近于98%左右,高于未接种的56%。这充分说明嗜酸性硫杆菌的作用推动了Cu的大量浸出。

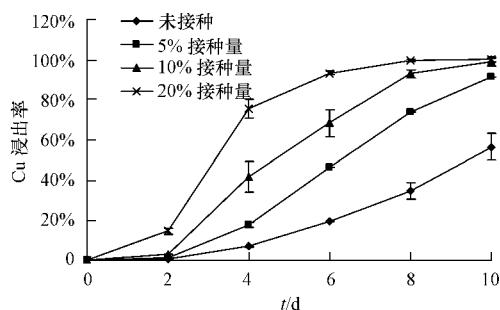


图3 不同接种量处理对污泥生物沥浸过程中Cu的浸出率的影响动态

Fig. 3 Kinetics of solubilization of sludge-born Cu during bioleaching with different inoculum quantities

值得注意的是,在相同条件下,污泥中Zn,Ni比Cu更容易浸出(见图4和图5)。沥浸反应开始后的第2d,20%接种量的污泥中Zn的浸出率就达47%,而5%和10%接种量的处理也分别达到15%和24%。随着反应的进行,各处理污泥中Zn的浸出率几乎直线上升,6d时,20%接种量的处理Zn的浸出率达到最高(99%),并一直稳定维持到试验结束。而10%接种量和5%接种量的处理则分别在第8d和第10d才达到99%的浸出率水平。Ni的浸出动态与Zn相似,但在前2d,Ni的浸出率比Zn高,2d后浸出率提高的速率低于Zn的浸出率提高的速率。

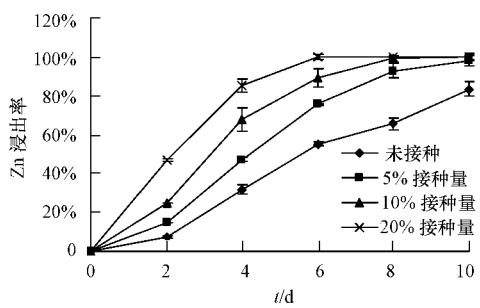


图4 不同接种量处理对污泥生物沥浸过程中Zn浸出率的影响动态

Fig. 4 Dynamics of solubilization of sludge-born Zn during bioleaching with different inoculum quantities

但Ni的浸出率一直稳步上升到试验结束时的第10d,此时,3个接种处理Ni的浸出率达到90%左右,高于未接种处理的59%。至于为什么Ni的浸出率提高幅度在2d后慢于Zn,其原因还有待探悉。

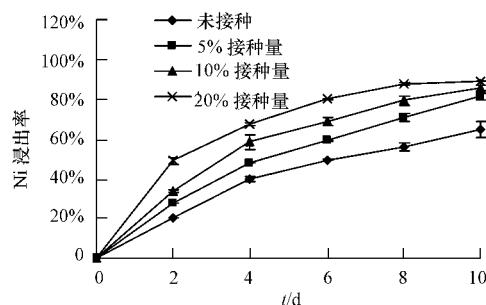


图5 不同接种量处理对污泥生物沥浸过程中Ni浸出率的影响动态

Fig. 5 Dynamics of solubilization of sludge-born Ni during bioleaching with different inoculum quantities

从图3~5还可以看出,无论是何种金属(Cu、Zn、Ni),重金属浸出率在开始的几天内,都表现出接种量越大污泥重金属浸出率越高的趋势。但生物沥浸达到一定反应时间后(如本试验的10d),不同接种量的处理重金属浸出率逐渐达到相同水平。这说明,随着时间的进程,微生物增殖将达到相似水平,微生物作用导致金属的浸出也达到一致水平。

不同重金属浸出动态的明显不同与不同金属对污泥pH和ORP的响应不同密切相关。根据统计学原理,当因变量同时受几个自变量的影响时,这种影响关系可用多元逐步回归方程描述。偏回归平方和越大的自变量对因变量的影响力也越大,该自变量的影响力相对大小可用该自变量的偏回归平方和占总的偏回归平方和的百分数表示。如自变量对因变量无影响,则方差分析检验呈现不显著。利用SPSS统计分析软件对重金属浸出率与pH、ORP进行相关性分析,建立回归方程。表2表明,Cu的浸出率与pH和ORP呈显著相关,可用二元回归方程表示。这说明Cu的浸出同时受pH和ORP的双重影响,pH下降和ORP的上升将明显促进Cu的浸出,其中pH对Cu的浸出的贡献率达54.5%,而ORP的贡献率为45.5%。因此,提高Cu浸出的策略是不但要使pH下降,而且必须尽量提高介质的ORP。而Zn和Ni的浸出率只和pH呈显著相关,与ORP不相关,说明对Zn和Ni的浸出起主要作用的是pH的影响,而ORP的影响相对较小,因此,只要降低污泥的pH到一定水平,就可以较好地浸出Zn

和 Ni. 这种差异, 可能与污泥中 Cu 部分以溶解性很低的硫化物形式存在有关, CuS 的溶度积 K_{sp} 远低于 ZnS 和 NiS(陈怀满, 1996). 因此, 仅对介质酸化不足以将 Cu 完全溶解出来, 而氧化环境则有利于重金属的形态转化, 如 CuS 在嗜酸性硫杆菌的作用下氧化而变成溶解性硫酸盐(Chen et al., 2005). 显然

对污泥中 Cu 而言, 只有同时在高氧化还原电位和低 pH 时, 才可能被大量沥浸出来. 蔡全英等(1999)的研究也表明, 仅仅采用无机酸来降低污泥 pH, 不利于金属硫化物迅速向可溶态离子形式转化, 但若加入 H_2O_2 等化学氧化剂提高污泥的 ORP, 则可大大提高重金属去除效果, 对 Cu 尤其明显.

表 2 生物沥浸过程中 pH 和 ORP 对重金属浸出率的影响分析

Table 2 Statistical analysis of solubilization efficiency of heavy metals in sludge and pH and/or ORP during bioleaching

回归方程	n	R^2	方差分析及显著性检验		相对影响力	
			F	p	pH	ORP
Cu 浸出率 = 0.357 - 0.182pH + 0.002ORP	24	0.951	164.0	< 0.05	54.5%	45.5%
Zn 浸出率 = 1.477 - 0.272pH	24	0.870	120.2	< 0.05	100%	0
Ni 浸出率 = 1.143 - 0.185pH	24	0.935	257.1	< 0.05	100%	0

pH 下降虽然是重金属浸出的最大驱动力, 但不同重金属开始大幅度浸出时的起始 pH 值却不同. 每个重金属的溶出都有一个起始 pH 阈值, 当介质 pH 低于该阈值时, 重金属才能大量浸出. 从图 6 中可以初步观测到, Cu 浸出的 pH 阈值大约为 4 左右, 而 Zn 和 Ni 浸出的阈值相近, 约为 5 左右. 我们以前的大量研究发现, Cr 的浸出的 pH 阈值约为 2 (周立祥等, 2004b; Zhou et al., 2005). 显然, 随着 pH 下降, 重金属开始浸出的时间顺序或难易程度(从易到难排序)是: Ni ≈ Zn > Cu > Cr. 该研究结果对指导污泥生物沥浸处理有重要意义.

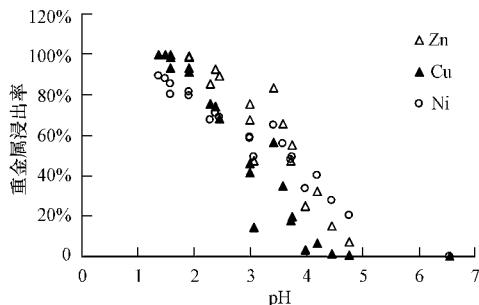


图 6 污泥生物沥浸过程中 Cu、Zn、Ni 的浸出率与 pH 值的关系

Fig. 6 Correlation between solubilization efficiency of Cu, Zn and Ni derived from sludge and sludge pH during bioleaching

当污泥生物沥浸处理试验结束时, 按浸出率计算, 污泥固相中的 Cu、Zn 和 Ni 可由原来的 $12750 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $994 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $376 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $255 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右. 根据本课题组 2 年来的工程示范试验结果, 处理后污泥可不加絮凝剂直接压滤脱水至含水率 55% 左右(结果未发表). 因此, 考虑泥饼中仍残留有含重金属的浸出

液, 可估算出实际运行时残留在脱水污泥泥饼中的重金属 Cu、Zn、Ni 的含量大约为 $716 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 重金属 Cu、Zn 和 Ni 实际去除率(指通过生物沥浸和随后的脱水处理后, 污泥固相中重金属损失量与处理前污泥中重金属量的百分比)分别为 94.4%、95.4% 和 85.3%. 污泥中重金属含量低于污泥农用时污染物控制标准限值(GB4284-84), 能够较安全地进行污泥的资源化利用.

3.3 生物沥浸对污泥有机质和其它养分的影响

生物沥浸处理对污泥的有机质、全氮、全磷和全钾含量有一定影响(见表 3), 10d 的处理时间可使污泥中有机质、全氮、全磷和全钾的含量下降 14%、28%、36% 和 31%, 这是由于污泥生物沥浸实际上兼具了污泥好氧消化的功效(Benmoussa et al., 1997). 生物沥浸处理后, 污泥有机质减少不多, 这与通常城市污泥厌氧消化(或好氧消化)不同, 后者污泥有机质的降解率一般要大于 40% (GB18918-2002). 这可能是因为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. 虽然生物沥浸处理使污泥中氮、磷、钾含量有所降低, 但从农用角度看沥浸处理后的污泥养分含量依然不影响其利用价值. 至于沥

表 3 在生物沥浸处理前后污泥有机质和其它养分的变化

Table 3 The content of nitrogen, phosphorous, potassium, and organic matter in the sludge before and after bioleaching

样品	有机质	全氮	全磷	全钾
沥浸前污泥	47.81%	3.52%	1.51%	0.94%
沥浸后污泥	41.12%	2.53%	0.97%	0.65%

浸后污泥低的 pH，则可在污泥利用前采用石灰等中和调节处理。

4 结论(Conclusions)

1) 在供试城市污泥中接种复合嗜酸性硫杆菌进行生物沥浸处理，可明显促进污泥中重金属的浸出。20% 接种量处理的 pH 降低速率快于 10% 和 5% 接种量的，至第 10d 3 种接种量的污泥 pH 都降至 1.6~1.9。污泥中 Cu、Zn 和 Ni 的浸出率可分别达到 98%、99% 和 90%。

2) 污泥生物沥浸过程中 pH 的下降和 ORP 的上升，在很大程度上促进了重金属的溶出。其中 Cu 的浸出同时受 pH 下降和 ORP 上升的双重影响，而 Zn 和 Ni 的浸出则主要受 pH 下降的驱动，ORP 的影响相对较小。污泥中 Cu、Zn 和 Ni 开始大幅度浸出的 pH 阈值大约为 4.5 和 5 左右。

3) 10d 的生物沥浸处理可使污泥中有机质、全氮、全磷和全钾含量下降 14%、28%、36% 和 31%，但从农用角度看沥浸处理后的污泥养分含量依然较高，不影响其利用价值。

责任作者简介：周立祥(1965—)，教授，博士生导师。主要从事废弃物处理处置与资源化、环境微生物、环境化学等方面的研究。

References:

- Bao S D. 2000. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 33—76 (in Chinese)
- Benmoussa H, Tyagi R D, Campbell P G C. 1997. Simultaneous sewage sludge and metal leaching using an internal loop reactor [J]. Water Research, 31:2638—2654
- Brown M J, Lester J W. 1979. Metal removal in activated sludge: The role of bacterial extracellular polymers [J]. Wat Res, 13:817—837
- Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, et al. 1999. Research advances of chemical method for heavy metal removal from municipal sludge[J]. Soil and Environmental Sciences, 8(4):309—313 (in Chinese)
- Chen H M. 1996. Heavy metal pollution in soil-plant system [M]. Beijing: Science Press, 176 (in Chinese)
- Chen T B, Huang Q F, Gao D, et al. 2003. Heavy metal concentrations and their decreasing trends in sewage sludges of China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 23(5): 561—569 (in Chinese)
- Chen Y X, Hua Y M, Zhang S H, et al. 2005. Transformation of heavy metal forms during sewage sludge bioleaching [J]. Journal of Hazardous Materials, B123:196—202
- Lester J N, Sterrett R M, and Kirk P W W. 1983. Significance and behaviour of heavy metals in wastewater treatment processes II Sludge treatment and disposal [J]. Sci Total Environ, 30:45—83
- Tyagi R D, Blais J F, Auclair J C, et al. 1993. Bacterial leaching of toxic metals from municipal sludge: Influence of sludge characteristics [J]. Water Environ Res, 65(3):196—204
- Tyagi R D, Couillard D, Tran F. 1988. Heavy metals removal from anaerobically digested sludge by chemical and microbiological methods[J]. Environmental Pollution, 50:295—316
- Tyagi T D, Blais J F, Meunier N, et al. 1997. Simultaneous sewage sludge digestion and metal leaching-Effect of sludge solid concentration[J]. Water Res, 31(1):105—118
- Zheng G Y, Wang S M, Zhou L X. 2007. Elimination of pathogens in municipal sludge and tannery sludge by bioleaching approach[J]. Environmental Science, 28(7): 1539—1542 (in Chinese)
- Zhou L X, Fang D, Wang S M, et al. 2005. Bioleaching of Cr from tannery sludge: The effects of initial acid addition and recycling of acidified bioleached sludge [J]. Environ Technol, 26:277—284
- Zhou L X, Zhou S G, Wang S M, et al. 2004a. Cr removal and improving the settling and dehydrating capability from tannery sludge simultaneously through bioleaching approach [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 24(6):1014—1020 (in Chinese)
- Zhou L X, Fang D, Zhou X G, et al. 2004b. Removal of Cr from tannery sludge by acidophilic thiobacilli [J]. Environmental Science, 25(1):62—66 (in Chinese)
- Zhou L X, Hu A T, Ge N F, et al. 1999. Study on utilization of municipal sewage sludge in farm land and forest land [J]. Acta Ecologica Sinica, 19(2):185—193 (in Chinese)
- Zhou S G, Zhou L X, Huang H Z. 2002. Removal of heavy metals from sewage sludge by bioleaching [J]. Acta Ecologica Sinica, 22(1): 167—176 (in Chinese)

中文参考文献：

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析, 第 3 版 [M]. 北京: 中国农业出版社, 30—76
- 蔡全英, 莫测辉, 吴启堂, 等. 1999. 化学方法降低城市污泥的重金属及其前景分析 [J]. 土壤与环境, 8(4):309—313
- 陈怀满. 1996. 土壤-植物系统中的重金属污染 [M]. 北京: 科学出版社, 176
- 陈同斌, 黄启飞, 高定, 等. 2003. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势 [J]. 环境科学学报, 23(5):561—569
- 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):
- 周立祥, 周顺桂, 王世梅, 等. 2004a. 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, 方迪, 周顺桂, 等. 2004b. 利用嗜酸性硫杆菌去除制革污泥中铬的研究 [J]. 环境科学, 25(1):62—66
- 周立祥, 胡靄堂, 戈乃玢, 等. 1999. 城市污泥土地利用研究 [J]. 生态学报, 19(2):185—193
- 周顺桂, 周立祥, 黄焕忠. 2002. 生物淋滤技术在去除污泥中重金属上的应用 [J]. 生态学报, 22(1):167—176