



污泥重金属提取剂浸提效率及经济性比较

王硕^{1,2}, 杨倩倩¹, 赵庆良³, 李激^{1,2}

(¹江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; ²江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;

³哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 污泥中重金属的潜在危害严重影响其处理处置效果, 因此本文研究了各种提取剂对污泥重金属的浸提效果, 并依据经济可提取指数与浸提效果进行了经济性分析。结果表明, 无机酸提取剂对污泥重金属的浸提效果随其 pH 值升高而降低, H⁺浓度是影响其浸提率的主要因素。低分子量有机酸提取剂对污泥中重金属的浸提效率随其浓度增加而增大, 其对 3 种重金属的提取效率顺序为 Zn>Cr>Cu。Zn 是最易被提取的重金属, 草酸对污泥重金属的浸提效果优于柠檬酸。污泥重金属浸提率与高分子量有机酸提取剂浓度呈正相关, 其对 3 种重金属的提取效率顺序为 Zn>Cu>Cr。污泥重金属的浸提一般应优先选用有机酸提取剂, 对污泥重金属 Zn 的提取宜选用柠檬酸和草酸, 对污泥重金属 Cr 和 Cu 的提取一般应选用柠檬酸和乙二胺四乙酸。

关键词: 污泥; 重金属; 提取剂; 有效态; 经济可提取指数

中图分类号: TU 991

文献标志码: A

文章编号: 1000-6613(2015)11-4079-06

DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2015.11.041

Comparative study on the extraction efficiency and economic performance by different agents in the extraction process of heavy metals in sewage sludge

WANG Shuo^{1,2}, YANG Qianqian¹, ZHAO Qingliang³, LI Ji^{1,2}

(¹School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; ²Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; ³State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: The potential risk of heavy metals in sewage sludge will seriously influence sludge treatment and disposal process, therefore, the extraction of heavy metal by different agents was investigated, and the extraction rate and economical extractable index (EEI) were then studied. The results showed that the extraction efficiency of heavy metal would decrease with the increase of pH of inorganic acid. H⁺ concentration is a significant factor during the extraction process. The extraction rate of heavy metal advanced when the concentrations of low molecular weight (LMW) organic acids rose. Zn was favorable to be extracted than Cr and Cu. In addition, the extraction efficiency of oxalic acid is better than that of citric acid. However, Zn and Cu were preferentially to be extracted than Cr in the extraction process by high molecular weight (HMW) organic acids. There is a positive correlation between the extraction efficiency and HMW organic acid concentrations. Organic acids were suitable in the heavy metal extraction. Furthermore, citric acid and oxalic acid have good performances in Zn

收稿日期: 2015-05-12; 修改稿日期: 2015-06-27。

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07315-003) 及江苏省政策引导类计划 (产学研合作) 前瞻性联合研究项目 (BY2015019-27)。

第一作者: 王硕 (1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事污泥处理处置研究。E-mail: shuowang@jiangnan.edu.cn。联系人: 赵庆良, 博士, 教授, 主要从事污泥资源化处理技术研究。E-mail: qlzhao@hit.edu.cn。

extraction while citric acid and EDTA should be utilized in priority in Cr and Cu extraction, respectively.

Key words: sewage sludge; heavy metal; extraction agents; effective state; economical extractable index (EEI)

随着城市化进程的加快和污水处理率的提高, 污泥产量和处理处置要求也越来越高, 按照预测, 到 2020 年我国污泥产量将突破 6000t/a^[1-2]。我国作为一个农业大国, 从长远利益出发应将污泥制成高附加值肥料或污泥生物复合肥料, 以农田林地利用作为主要的利用途径^[3]。但是我国污泥有机质含量较低, 含砂量较大, 特别是污泥中存在较高浓度的重金属, 大大限制了污泥土地利用的发展^[4]。因此, 解决污泥土地利用问题的关键是控制其中重金属的含量。

污泥中重金属的处理方法主要有生物处理和非生物处理两种方法, 前者成本较低, 效果明显, 但所用时间长、占地面积大、操作相对繁琐; 后者最常用的是化学方法, 去除率高, 见效快, 但成本较高^[5-6]。研究认为, 衡量重金属污染最重要的指标是重金属的生物有效性, 而非其总量^[7]。Tessier 等^[8]将重金属形态分为五类, 即可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残留态, 其中可交换态和碳酸盐结合态属于不稳定形态, 也可认为是“酸提取态”, 因此一般选用“酸提取态”作为评价污染的强度指标, 可以更好地反映重金属的生物有效性^[9]。

无机酸具有较好的重金属提取效果, 可在 pH 值层面对重金属提取效率产生影响; 有机酸和螯合剂由于与重金属离子之间具有良好的配位作用, 早在 20 世纪 80 年代即成为研究热点^[10]。近年来, 考察不同酸提取剂对污泥重金属进行提取的研究较多^[11-13], 虽然采用单一试剂提高重金属提取率的研究取得一定进展, 但普遍存在的问题是提取剂用量较大, 且不能反映出各类提取剂的相对提取性能和经济可提取性能的优劣。

本文采用无机酸、低分子量和高分子量有机酸提取剂对污泥重金属进行浸提, 考察 pH 值提取剂浓度对污泥重金属浸提率的影响。在固液比 1g : 50mL 和提取时间 24h 条件下, 通过污泥重金属浸提量与所用试剂价格比, 即经济可提取指数 (EEI), 进一步说明各类提取剂的技术可行性和经济可行性, 为污泥重金属的经济分离提供理论指导和技术借鉴。

1 材料与 方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验污泥

试验污泥取自某污水处理厂脱水车间 (污泥含水率 78%~80%), 污泥经自然干化后研磨过 200 目筛, 在室温条件下储存于聚乙烯瓶中备用。污泥 pH 值为 6.9, 有机质含量为 40.6%, 总氮含量约占 3.12%, 总磷含量为 9391mg/kg。

1.1.2 试验试剂

所选用的提取剂分为三大类, 即无机酸、低分子量有机酸和高分子量有机酸。无机酸类选用 HCl 和 HNO₃, 均为化学纯。低分子量有机酸选用柠檬酸和草酸; 高分子量有机酸选用乙二胺四乙酸 (EDTA) 和 *N*-羟乙基乙二胺三乙酸 (HEDTA), 均为分析纯。污泥重金属提取剂性质如表 1 所示。

表 1 污泥重金属提取剂性质

试剂名称	相对分子质量	质量分数 /%	规格	价格 /元	单价 /元·mol ⁻¹
HCl	36.5	36~38	500mL	7.23	1.23
HNO ₃	63.0	65~68	500mL	10.2	1.34
柠檬酸	210.1	99.5	500g	11.05	4.67
草酸	126.1	99.5	500g	12.75	3.23
EDTA	292.3	99.5	250g	16.17	19.00
HEDTA	277.3	99.8	100g	70	194.50

1.2 试验方法

1.2.1 污泥重金属浸提试验

在 150mL 的磨口锥形瓶中, 分别加入 1g 研磨过筛后的污泥样品和 50mL 提取剂溶液, 无机酸 pH 值设置为 0、1、2、3、4 和 5 (相对应 H⁺浓度分别为 1000mmol/L、100mmol/L、10mmol/L、1mmol/L、0.1mmol/L 和 0.01mmol/L); 低分子量有机酸和高分子量有机酸浓度均设置为 2mmol/L、10mmol/L、20mmol/L、30mmol/L 和 40mmol/L; 盖紧瓶塞, 在室温和 250r/min 条件下, 振荡 24h 后将溶液转入到 50mL 心管中, 在 4000r/min 下离心 10min, 取上清

液过 0.45 μm 滤膜, 4 $^{\circ}\text{C}$ 贮存待测。用电感耦合等离子体发光光谱 (ICP-AES) 分别测定滤液中 Cu、Cr 和 Zn 浓度。

1.2.2 污泥重金属形态分布试验

污泥中重金属的总量不能科学地反映其危害程度, 从而更加全面地评估污泥的后续利用其中重金属的生物有效性。因此, 采用 Tessier 等^[8]分步提取法, 将污泥中重金属的形态分为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态和残渣态 5 种形态, 选用有效态 (可交换态和碳酸盐结合态) 作为评价污染强度的指标, 更好地反映污泥重金属的生物有效性。试验污泥重金属形态分布如表 2 所示。

表 2 原污泥重金属形态分布

重金属	浓度	有效态	铁锰氧化态	有机结合态	残渣态
	/mg·kg ⁻¹	/%	/%	/%	/%
Cu	104	8.42	1.28	80.26	10.04
Cr	59	2.43	8.56	84.09	4.92
Zn	449	78.25	6.44	12.58	2.73

1.3 分析方法

1.3.1 污泥重金属含量测定

取 1.0 g 研磨过筛后的污泥样品置于 50mL 烧杯中, 加入 3mL 高氯酸和 9mL 浓硝酸在电热板上加热消解, 之后用去离子水定容至 25mL。采用原子吸收分光光度计 (WFX2 120A) 测定重金属浓度, Cu、Cr 和 Zn 的测定波长分别为 324.7nm、228.8nm 和 213.9nm。

1.3.2 提取剂中重金属浓度测定

将离心过滤后的析出液用电感耦合等离子体发光光谱 (ICP-AES) 分别测定滤液中 Cu、Cr 和 Zn 浓度, 重金属浸提率见式 (1)。

$$\text{重金属浸提率} = \frac{\text{提取剂中重金属含量}}{\text{污泥中重金属含量}} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.3 经济可提取指数计算

为考察提取剂的经济性, 定义经济可提取指数 (EEI) 为在选用化学试剂浸提污泥重金属时, 污泥重金属浸提量 (mg) 与所消耗化学试剂价格 (千元) 比值, 即在一定浓度条件下单位价格药剂所达到的污泥重金属浸提率, 该指数可直观表达各类提取剂的相对经济可提取性。

2 结果与讨论

2.1 无机提取剂对污泥重金属的浸提

由图 1 中可知, 振荡反应 24h 后, 两种无机酸盐酸和硝酸对 Cu、Zn、Cr 的提取率均呈现随 pH 值的升高而降低的趋势, 盐酸对 3 类重金属的提取效能要优于硝酸。在提取剂为强酸性 (pH<1) 时, 盐酸对 Cu、Zn 和 Cr 的浸提率均可达到 80% 以上。当 pH>1 时, 盐酸和硝酸对污泥重金属的提取能力显著下降, 两种提取剂对污泥重金属的浸提率均低于 20%, 这主要是因为随着 H⁺ 浓度的降低, 其与污泥中重金属离子的交换能力下降, 无法使污泥中重金属化学键断裂, 因此其溶出效果受到影响^[14-15]。同时, H⁺ 浓度的降低增强了重金属离子的水解作用, 使水解产物-羟基金属离子浓度增加, 重金属离子在氧化物表面的专性吸附变强, 从而抑制了污泥中重金属的溶出^[16]。提取剂 pH 值对重金属的浸提率有显著影响, 并因重金属的不同而存在较大差异, 当 H⁺ 与重金属离子对无机提取剂的竞争而引起络合平衡的改变时, 其对污泥中有机及无机组分与污泥重金属离子的吸附-脱附平衡 (金属氢氧化物的共沉淀、生物表面吸附) 有较大影响, 进而通过上述两种途径改变污泥重金属形态^[17]。

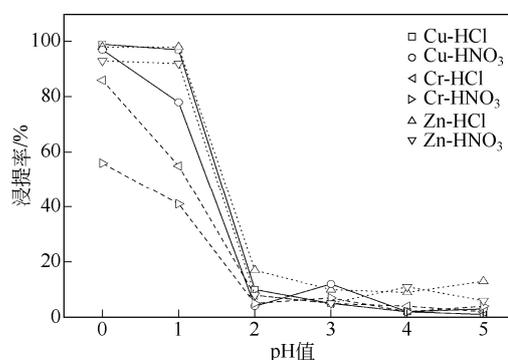


图 1 pH 值对污泥重金属浸提率的影响

2.2 有机提取剂对污泥重金属的浸提

2.2.1 低分子量有机酸提取剂对污泥重金属的浸提

柠檬酸、草酸是自然界中常见的两种低分子量 (LMW) 有机酸, 如图 2 所示, 两种 LMW 有机酸对污泥中重金属的浸提效率随着其浓度增加而增大, 而且对不同重金属的提取能力存在差异。当其浓度达到 40mmol/L 时, 各种重金属的浸提率达到最大并趋于稳定。柠檬酸对 Cu、Cr 和 Zn 的浸提率最高分别为 7.2%、22.3% 和 85.6%, 相应草酸对 3

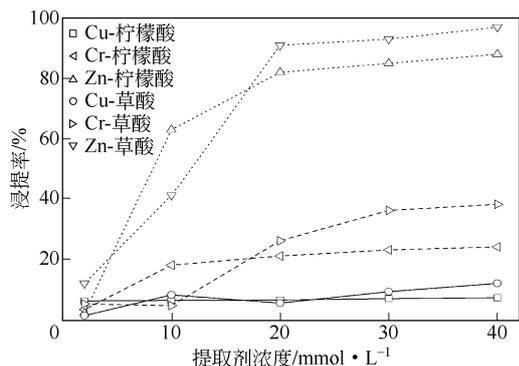


图 2 低分子有机提取剂对污泥重金属的浸提

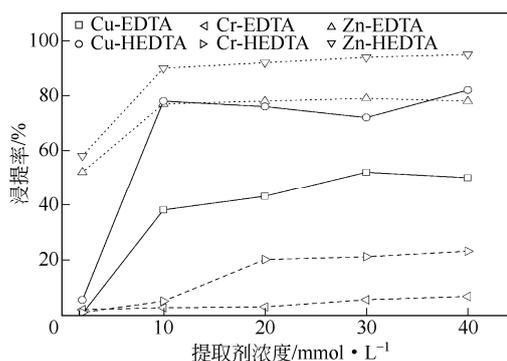


图 3 高分子有机提取剂对污泥重金属的浸提

种重金属的浸提率分别为 9.8%、35.1%和 96.3%。LMW 有机酸对 3 种重金属的提取效率顺序为 Zn>Cr>Cu, Zn 是最易被提取的重金属, 这和无机酸的浸提效果取得一致。草酸对污泥重金属的浸提效果优于柠檬酸, 由于所选用的 LMW 有机酸均为低浓度有机酸, 因此推断低浓度 LMW 有机酸提取剂对重金属的作用机制与高浓度条件下重金属的萃取主要取决于羧酸根离子浓度的特性有所不同^[18]。由于浸提率不同是由重金属的形态差异引起的^[8], 因此可推断 Zn 可能是以离子交换态的形式存在, 这与利用无机提取剂对污泥重金属的浸提结果一致, 柠檬酸和草酸对有效态 Zn 的浸提结果较好, 当柠檬酸和草酸为 20mmol/L 时, 其对 Zn 的提取率分别为 81.8%、95.3%。20mmol/L 柠檬酸和草酸对 Cr 和 Cu 的浸提率分别为 19.4%、24.5%和 7.2%、7.4%, 可见 LMW 有机酸提取剂对重金属的浸提机理并不是酸度浸提, 其对污泥重金属的活化能力与无机提取剂较为接近。同时, 在所选提取剂浓度范围内, 其对 Cu 的浸提效果均较差, 这可能是因为有机酸相对酸性较弱, 因此可考虑调节 pH 值等方法将 Cu 在污泥中相对稳定的形态(铁锰氧化物结合态和有机结合态)活化成 LMW 有机酸提取剂易于浸提的可交换态和碳酸盐结合态^[9]。

2.2.2 高分子量有机酸提取剂对污泥重金属的浸提

EDTA 和 HEDTA 均为高效金属螯合剂, 同时也是高分子量 (HMW) 有机酸, 图 3 显示了其对污泥重金属的浸提效果。污泥重金属浸提率及其趋势与 HMW 有机酸浓度呈正相关, 其对不同重金属的浸提率能力与 LMW 有机酸浸提效果不同, Zn 依然是最易被提取的重金属, 而其对 Cu 的浸提能力高于 Cr, 因此可以推断 Zn 的生物有效态比例较高, 要提高控制 Zn 污染风险的意识。HEDTA 对 Zn、Cu 和 Cr 的浸提效果更好, 最高浸提率分别为

93.2%、80.2%和 20.1%, 可见 HEDTA 更容易与重金属形成稳定的可溶态化合物。HMW 有机酸对 Cu 的提取能力明显得到改善, 在 20mmol/L 的条件下, EDTA 和 HEDTA 对 Cu 的提取率分别为 42.3%和 77.4%, 远大于相同浓度条件下无机酸提取剂和 LMW 有机酸对 Cu 的浸提能力, 表明 HMW 有机酸对相对稳定态的 Cu 有较强的活化作用。EDTA 和 HEDTA 对 Cr 的最高提取率分别仅为 8.0%和 20.2%, 与 LMW 有机酸的浸提效果较为接近, EDTA 和 HEDTA 对 Cr 的浸提机制与 LMW 有机酸对 Cr 的活化机制是相似的。

2.3 污泥重金属形态分布

由表 2 和图 4 可知污泥重金属提取剂的浸提使污泥重金属形态分布发生变化, 有效态 Cu、Cr 和 Zn 的比例明显升高。盐酸、硝酸、草酸、柠檬酸、EDTA 和 HEDTA 共 6 种提取剂对污泥重金属有效态 Cu 和 Cr 的转化率分别提高 108%和 230%, 79.6%和 167%, 93.8%和 249%, 67.2%和 213%, 243%和 320%, 313%和 422%, 转化效果均较为显著。处于铁锰氧化态和有机结合态的 Cu 和 Cr 被转化为有效态(可交换态和碳酸盐结合态), 这可能是由于添加酸提取剂使浸提体系 pH 值降低, 抑制了铁锰氧

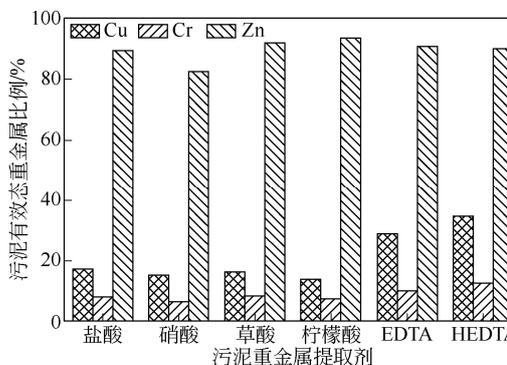


图 4 提取剂对污泥有效态重金属浸提效果

化物形成,同时,酸效应也会导致污泥有机物浓度降低,吸附在有机物上的重金属发生了解吸附作用^[8, 16],使被解离的重金属转化为有效态。此外,6种提取剂对 Zn 的提取效果也具有一定促进作用,但由于原污泥中有效态 Zn 含量较高,使其浸提效果的显著性略低于 Cu 和 Cr;原污泥中较高浓度有效态 Zn 的存在,使 6 种提取剂对 Zn 的浸提均具有良好的效果(图 1~图 3)。采用酸提取剂可以有效促进污泥重金属向有效态形态转变,使该方法具有较强适用性。

2.4 污泥重金属提取剂经济性比较

经测定,原污泥中重金属 Cu、Cr 和 Zn 含量分别为 104mg/kg、59mg/kg 和 449mg/kg。依据图 5 的结果,研究发现在同一浓度条件下,Zn 是最容易被浸提的污泥重金属,LMW 有机酸浸提 Zn 的 EEI 指数较高,表明其具有较好的经济性,盐酸和 EDTA 对 Zn 也具有较好的浸提效果,硝酸和 HEDTA 对 Zn 的浸提效果较差,对污泥重金属 Zn 的提取可优先选用柠檬酸和草酸。当提取剂浓度为 10mmol/L 时,6 种提取剂对 Cr 的提取浓度均较差(图 1~图 3)。这主要是因为提取剂浓度相对较低,对重金属离子水解的促进作用影响较小,不能满足控制污泥重金属 Cr 毒害作用的要求,因此对污泥中 Cr 的浸提一般应选用高浓度提取剂,但这会使其 EEI 指数降低,此时应针对污泥特性及浸提要求考虑选用提取剂柠檬酸。对于污泥重金属 Cu 的浸提,盐酸和 EDTA 的 EEI 指数较高,HEDTA 虽然对 Cu 具有较好的浸提效果(图 3),但是其 EEI 较低,浸提成本相对较高,只有在资金允许的条件下才可以考虑利用 HEDTA。

3 结 论

(1) 无机酸提取剂对污泥重金属的浸提效果

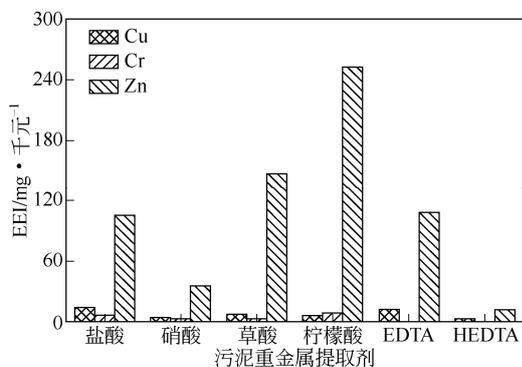


图 5 10 mmol/L 提取剂浸提污泥重金属 EEI 值

随其 pH 值升高而降低, H⁺浓度是影响其浸提率的主要因素,阴离子种类及浓度对浸提率影响很小。盐酸对 3 种重金属的浸提效能优于硝酸,在提取剂为强酸性 (pH<1) 时,盐酸对 Cu、Zn 和 Cr 的浸提率均可达到 80% 以上。

(2) LMW 有机酸对污泥中重金属的浸提效率随着其浓度增加而增大,而且对不同重金属的提取能力存在差异。LMW 有机酸对 3 种重金属的提取效率顺序为 Zn>Cr>Cu,Zn 是最易被提取的重金属,草酸对污泥重金属的浸提效果优于柠檬酸。

(3) 污泥重金属浸提率及其趋势与 HMW 有机酸浓度呈正相关, HMW 有机酸对 3 种重金属的提取效率顺序为 Zn>Cu>Cr, HMW 有机酸对相对稳定态的 Cu 具有较强的活化作用使其对 Cu 的提取能力得到改善。HEDTA 对 Zn、Cu 和 Cr 的浸提效果更好,最高浸提率分别为 93.2%、80.2% 和 20.1%。

(4) 污泥重金属提取剂的浸提使污泥重金属形态分布发生变化,有效态 Cu、Cr 和 Zn 的比例明显升高,提取剂对污泥重金属有效态 Cu 和 Cr 的转化率较为明显,原污泥中较高浓度有效态 Zn 的存在,使提取剂对 Zn 的浸提均具有良好的效果。

(5) 结合经济可提取指数与浸提效果,针对污泥特性及浸提要求,对污泥重金属的浸提一般应优先选用有机酸提取剂。对污泥重金属 Zn 的提取宜选用柠檬酸和草酸,对污泥重金属 Cr 和 Cu 的提取一般应选用柠檬酸和 EDTA。

参 考 文 献

- [1] 戴晓虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考[J]. 给水排水, 2012, 38 (2): 1-5.
- [2] 郝晓地, 蔡正清, 甘一萍. 剩余污泥预处理技术概览[J]. 环境科学学报, 2011, 31 (1): 1-12.
- [3] 郭广慧, 陈同斌, 杨军, 等. 中国城市污泥重金属区域分布特征及变化趋势[J]. 环境科学学报, 2014, 34 (10): 2455-2461.
- [4] 杨军, 郭广慧, 陈同斌, 等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. 中国给水排水, 2009, 25 (13): 122-124.
- [5] Rastegar S O, Mousavi S M, Shojaosadati S A. Cr and Ni recovery during bioleaching of dewatered metal-plating sludge using *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 167: 61-68.
- [6] Leng L J, Yuan X Z, Huang H J, et al. The migration and transformation behavior of heavy metals during the liquefaction process of sewage sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 167: 144-150.
- [7] Salomons W, Forstner U, Mader P. Heavy Metals: Problems and Solutions[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 165-191.

(下转第 4088 页)

0.3~1.25 倍) 可使处理后 TAg<0.5mg/L。其原因是氯化银、碘化银的溶解度小于氯化汞、碘化汞。

去除汞的较佳范围为: 废液 A、B 体积比为 1.11~1.25 倍。

由于汞、银沉淀范围不同, 废液 A、B 体积比为 0.05~0.2 时可获得含银量较高的污泥。

(4) 常规工艺处理 1L 废液 A 加硫酸亚铁 3.0g/L、硫化钠 2.4 g/L, 按硫酸亚铁 1.2 元/kg、硫化钠 3.0 元/kg 计算, 硫酸亚铁和硫化钠的费用 10.8 元/m³废液 (用过期废碱调 pH 值), 干污泥量为 3.28g; 处理 1L 测 NH₃-N 废液, 干污泥量为 1.59g。

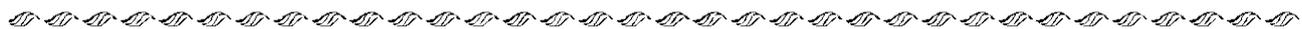
使用本工艺同时处理 1L 废液 A、0.86L 废液 B, 加硫酸亚铁 410mg/L, 硫化钠 390mg/L, 硫酸亚铁和硫化钠的费用 1.66 元/m³废液, 干污泥量为 3.38g。

本工艺具有下列优势: 控制混合阶段直接回收汞盐、银盐等贵金属盐, 这一步骤未加入处理药剂, 沉淀纯度较高。同时削减汞、银离子, 其中银离子直接达到排放标准, 汞离子去除率达 97%以上, 大大减轻后续处理负担。但沉淀颗粒较小, 不易完全沉降, 采用过滤分离。

控制混合工艺大幅减少加药量, 污泥量少于常规工艺, 充分利用了废水自身特性。另外, 废液 A 呈强酸性, 废液 B 呈碱性, 两者反应又可减少中和药量。本工艺处理 1L 监测 COD 废液的同时, 还可减少约 0.86L 的监测 NH₃-N 废液, 并使废液本身含有的 I⁻、Cl⁻等成为重金属沉淀剂。

参 考 文 献

- [1] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [2] 环境保护部科技标准司. HJ 535—2009. 水质-氨氮的测定. 纳氏试剂分光光度法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [3] 梅光泉. 重金属废水的危害及治理[J]. 微量元素与健康研究, 2004, 21 (4): 54-56.
- [4] 许振良, 张永锋. 络合-超滤-电解集成技术处理重金属废水的研究进展[J]. 膜科学与技术, 2003 (4): 141-144.
- [5] 张凯, 唐红军, 余全智, 等. 环境监测实验室废液管理和防治措施初探[J]. 环境科学导刊, 2014 (6): 100-103.
- [6] 戴东情, 李健, 陈新. 实验室废液中重金属离子去除方法研究[J]. 理化检验 (化学分册), 2014 (5): 630-633.
- [7] 王宗舞, 李孝坤. 浅析环境检测类实验室废液的处理技术[J]. 资源节约与环保, 2013 (9): 108, 120.
- [8] 徐锦昌, 蔡裕丰. 环境监测站实验室的废液管理[J]. 污染防治技术, 2009 (1): 101-102.
- [9] 张显球, 杜明霞, 吴薇. 实验室废液污染控制[J]. 实验技术与管理, 2007 (2): 154-156.
- [10] 张欣, 梁贤军, 张丽. 基于淤泥综合作用处理实验室 Cr(VI)废水[J]. 化工进展, 2010, 29 (5): 944-947, 962.
- [11] 宋盼盼, 邵玲, 周金平. 环境监测实验室废水的处理及污染防治[J]. 化学分析计量, 2014 (3): 93-95.
- [12] 李增新, 薛淑云, 王国明, 等. 开设实验室废液处理综合设计实验[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27 (7): 105-106, 156.
- [13] 李宝磊, 朱天菊, 刘光全, 等. 实验室重金属废水处理研究[J]. 环境科学与管理, 2014 (1): 75-77.
- [14] 国家环境保护局. GB8978—1996. 污水综合排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [15] Speight James G. Lange's Handbook of Chemistry[M]. 16th ed. New York: McGRAW-Hill, 2005.



(上接第 4083 页)

- [8] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51 (7): 844-851.
- [9] 钟晓兰, 周生路, 赵其国, 等. 长三角典型区土壤重金属有效态的协同区域化分析、空间相关分析与空间主成分分析[J]. 环境科学, 2007, 28 (12): 2758-2765.
- [10] Fristoe B R, Nelson P O. Equilibrium chemical modelling of heavy metals in activated sludge[J]. *Water Research*, 1983, 17(7): 771-778.
- [11] 陈曦, 王玉军. 化学淋滤法去除污泥中 Cr、Cu 的研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34 (6): 61-64.
- [12] 涂剑成, 赵庆良, 杨倩倩. 东北地区城市污水处理厂污泥中重金属的形态分布及其潜在的生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2012, 32 (3): 689-695.
- [13] Zhang L H, Zhu Z L, Zhang R H, et al. Extraction of copper from sewage sludge using biodegradable chelant EDDS[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20 (8): 970-974.
- [14] Tu J C, Zhao Q L, Yang Q Q. Comparative study of Cu, Zn, Cr, Al extraction from sewage sludge with six kinds of acids at low concentration[C]//International Symposium on Water Resource and Environment Protection, Xi'an, 2011: 1195-1198.
- [15] Naoum C, Fatta D, Haralambous KJ, et al. Removal of heavy metals from sewage sludge by acid treatment[J]. *Journal of Environmental Science Health*, 2001, 36 (5): 873-881.
- [16] 涂剑成. 污水厂污泥中重金属脱除技术及污泥特性变化的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [17] 刘清, 王子健, 汤鸿霄. 重金属形态与生物毒性及其生物有效性关系的研究进展[J]. 环境科学, 1996, 17 (1): 89-92.
- [18] 黄亮, 周启星, 张倩茹. 柠檬酸、草酸和乙酸对污泥中镉、铅、铜和锌的去除效果[J]. 应用生态学报, 2008, 19 (3): 641-646.