

聚环氧琥珀酸对污泥中铅的萃取研究

张丽华^{1,2}, 朱志良^{1*}, 张华¹, 仇雁翎¹, 赵建夫¹

(1. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 三明学院化学与生物工程系, 福建三明 365004)

摘要:以上海市桃浦污水厂污泥为对象,研究了易生物降解的聚环氧琥珀酸(PESA)对污泥中重金属 Pb 的萃取作用,重点考察了萃取体系的 pH 值和萃取剂 PESA 的用量对重金属 Pb 萃取的影响.研究发现,PESA 对污泥中的重金属 Pb 具有较好的萃取效果,形态分析结果表明,被 PESA 萃取的锌主要来自水溶态、酸溶态、可还原态和可氧化态 4 种形态.当萃取体系的 pH = 4 且 PESA 与污泥中重金属总量的摩尔比为 4:1 时,Pb 的萃取效率可达 73%.实验结果还表明,萃取体系的 pH 值和 PESA 用量是影响污泥中 Pb 萃取的重要因素.随着萃取体系 pH 值的降低,Pb 的萃取效率总体呈现逐渐下降的趋势;随着 PESA 用量的增加,Pb 的萃取效率逐渐提高,且对体系 pH 值的依赖性减小.

关键词:聚环氧琥珀酸;铅;生物降解;萃取;污泥

中图分类号:X705 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2008)01-0158-06

Extraction of Pb from Sewage Sludge with PESA

ZHANG Li-hua^{1,2}, ZHU Zhi-liang¹, ZHANG Hua¹, QIU Yan-ling¹, ZHAO Jian-fu¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Chemistry and Biology Engineering, Sanming College, Fujian Sanming 365004, China)

Abstract: Poly-epoxy-succinic acid (PESA), as a novel biodegradable chelant, was used to remove the heavy metals from the sewage sludge based on chemical extraction technology. For the sewage sludge from Shanghai Taopu Municipal Wastewater Plant, the influence factors including pH and the concentration of PESA on the extraction efficiency was investigated. It is found that PESA had a higher efficiency for the extraction of Pb from sludge than that of other heavy metals. The analysis of species distribution shows that the extracted Pb mainly comes from the following states: water soluble, acid soluble, reducible and oxidizable fractions. The extraction efficiency of Pb reached 73% when the molar ratio of PESA to total heavy metals was 4:1 and system pH was 4. The concentration of PESA and system pH have a significant effect on the extraction efficiency of Pb. The extraction efficiency of Pb decreases gradually with pH increasing, and the dependence of the extraction efficiency on pH decreases with the molar ratio increasing.

Key words: PESA; lead; biodegradable; extraction; sewage sludge

污泥、土壤及沉积物的重金属污染问题是全球关注的环境问题^[1~6]. 重金属铅作为一种环境优先污染物,其在受污染介质中的迁移转化、去除、生态富集响等的相关研究引起了国内外的广泛关注^[7~11]. 污泥中重金属的处理方法有电动法、生物法、化学方法等^[12]. 重金属污染的化学萃取处理效率高,效果稳定,且容易实现工程化,被认为是较为适宜的永久去除重金属的技术之一^[13]. 螯合萃取剂与重金属离子之间具有良好的配位作用而逐步受到关注^[14~23],Sun 等^[14]认为 EDTA 对重金属具有良好的萃取效果,Philippe 等^[3]研究了 EDDS 对重金属的萃取作用,认为 EDDS 在偏碱性条件下对重金属具有良好的萃取作用.但由于萃取过程中部分萃取剂将滞留在污泥中,萃取剂带来的二次污染问题必须考虑,因此,萃取剂的可生物降解性显得尤为重要^[1,3,17,19]. 聚环氧琥珀酸 (poly-epoxy-succinic acid, PESA) 不含氮、磷,不会引起水体的富营养化,是一种环境友好的水溶性聚合物,且具有螯合多价金属

阳离子的性能和良好的可生物降解性^[24],在国内外已经成为新的研究热点,但目前国内外关于 PESA 的研究目前主要集中在制备方法、阻垢性能、缓蚀作用等方面^[25~29],尚未见应用于土壤或污泥中重金属分离的报道. PESA 合成方法成熟、价格较便宜且易生物降解,而且笔者的前期研究发现 PESA 对重金属 Pb 具有较好的萃取效果,这为 PESA 成为环境友好的替代萃取剂提供了一种可能.

本研究以上海市桃浦工业污水处理厂的污泥为对象,以 PESA 为螯合萃取剂,在实验室考察了 PESA 对污泥中重金属 Pb 的萃取行为,以期对受重金属 Pb 污染的污泥、土壤及沉积物的绿色治理技术提供新的思路和技术支持.

收稿日期:2007-04-05; 修订日期:2007-08-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z384);福建省教育厅 A 类科技项目(2006JA06046)

作者简介:张丽华(1973~),女,讲师,博士研究生,主要研究方向为环境污染治理, E-mail: 0510050014@smail.tongji.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zzl@mail.tongji.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验材料

(1)供试污泥 供试污泥样品取自上海市桃浦工业污水处理厂,污泥经自然风干、研磨、过 100 目筛备用.污泥的含水率为 8.23%,总有机碳(TOC)含量为 27.97%.

(2)实验试剂 实验所用萃取剂 PESA 购自上海市美净环保有限公司,固体含量 $\geq 38\%$,密度 $(20^{\circ}\text{C})\geq 1.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,平均分子量 1 500,其结构见图 1.其它实验试剂均为分析纯,国药集团化学试剂公司(中国上海)产品.

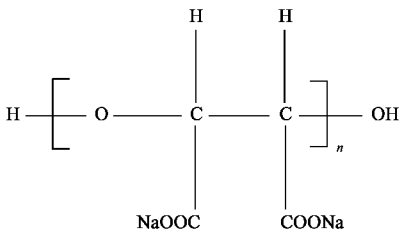


图 1 PESA 的结构
Fig.1 Scheme of PESA

1.2 实验方法

萃取实验在离心萃取管中进行,分调节悬浊液 pH 值和不调 pH 值 2 组进行.污泥中 6 种重金属 Zn、Pb、Cd、Cr、Ni 和 Cu 的总量为 $255.4\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,萃取剂采用不同浓度,萃取剂的平均分子量以 1 500 计算,使 PESA 与污泥中重金属总量的摩尔比为 1:1 ~ 10:1.

称取制备好的污泥样品于塑料离心管中,加入不同浓度的 PESA 溶液(固液比控制在 1:50),用 HNO_3 和 NaOH 调节悬浮液的 pH 值.快速振荡几次混匀,形成悬浮液,置于台式恒温振荡器上,室温下以 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡 24 h,然后以 $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 20 min.离心液全部过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 膜,装入玻璃瓶中,并加入几滴稀 HNO_3 , 4°C 下保存备测.

污泥中重金属的含量采用 HF-HCl-HNO_3 微波消解仪辅助消解.PESA 萃取前后污泥中铅的形态分析参照改进的 BCR 提取法^[30~32]进行.用于测定重金属的污泥消解液和形态提取液全部过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜,装入玻璃瓶中, 4°C 下保存备测.

1.3 分析测定与数据处理

供试污泥 TOC 用 SSM-5000A 型固相总有机碳分析仪(日本 Shimadzu)测定,污泥重金属全量用

ETHOS E 型微波消解仪(意大利 Mile Stone s.r.l.)消解,污泥消解液、形态提取液和萃取液的重金属浓度均用 Optima 2100 DV 型电感耦合等离子体原子发射光谱仪(美国 Perkin Elmer)测定.pH 值采用 PP-15 型专业酸度计(德国 Sartorius)测定.

所有实验样品均重复 3 次,数据取 3 次的平均值.

2 结果与讨论

2.1 实验污泥的重金属含量

污泥中重金属的全量微波消解结果表明,实验污泥含有 Zn、Pb、Cd、Cr、Ni 和 Cu 等重金属.6 种重金属的总量为 $255.4\text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中污泥中 Pb 的含量为 $883.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (见表 1),超过了土壤环境质量标准(三级)Pb 的限值($500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和污泥农用(酸性土壤)时 Pb 的标准限值($300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).因此,要实现该污泥的安全农林利用,必须进行重金属 Pb 的先期分离.

表 1 污泥中 Pb 的含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 1 Content of Pb in tested sewage sludge / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

污泥中含量	污泥农用标准 ¹⁾		土壤环境质量 三级标准 ²⁾
	酸性土壤	碱性土壤	
883.3	300	1 000	500

1)摘自中华人民共和国国家标准 GB 18918-2002:城镇污水处理厂污染物排放标准; 2)摘自中华人民共和国国家标准 GB 15618-1995:土壤环境质量标准

2.2 萃取体系 pH 值对 PESA 萃取污泥中 Pb 的影响

萃取体系的 pH 值是影响重金属萃取效果的重要因素^[3],实验设计了 pH 2 ~ 10 范围共 16 个不同 pH 值,以考察萃取体系的 pH 值对污泥中 Pb 萃取效果的影响,结果如图 2 所示.从中可以看出,萃取体系 pH 值对 Pb 的萃取效率有显著影响,在较低 pH 值下,Pb 有较高的萃取效率,总体萃取效率随着萃取体系 pH 值的增大而降低.

不加 PESA 时(用 HNO_3 调 pH),污泥中 Pb 的萃取效率随 pH 值的增大而迅速降低,当 $\text{pH} > 3.0$ 后,Pb 的萃取效率低于 1%.加入 PESA 后,污泥中 Pb 的萃取效率在 pH 2 ~ 10 的范围内明显提高,总体萃取效率随着萃取体系 pH 值的增大而逐渐降低,且随着 PESA 用量的变化而呈现不同的趋势.

PESA 用量较低时,污泥中 Pb 的萃取效率受萃取体系 pH 值的影响比较明显.对比空白,加入 PESA 能明显提高 Pb 的萃取效率;随着 pH 值的增大,Pb

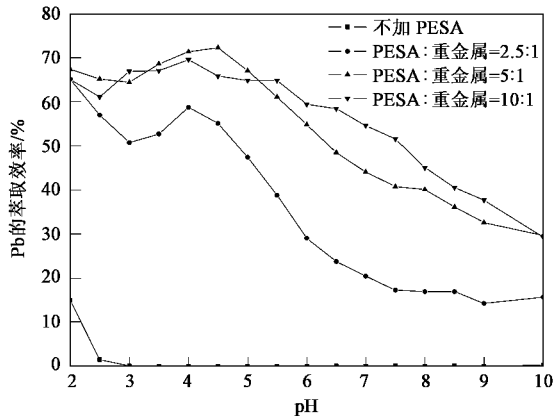


图 2 pH 值对 Pb 萃取的影响

Fig.2 Effect of system pH on the extraction efficiency of Pb

的萃取效率呈现逐渐下降的总体趋势. PESA 用量较高时, 污泥中 Pb 的萃取效率受萃取体系 pH 值和 PESA 用量的双重影响. 污泥中 Pb 的萃取效率对萃取体系 pH 值的依赖性较小, 在实验范围内, PESA 对 Pb 均保持较高的萃取效率. 在 pH 1~7 的较宽范围内, 对 Pb 的萃取效率均保持在 60% 以上(摩尔比为 10:1). 从图 2 还可以看出, 在 pH 3~5 范围内, Pb 有较好的萃取效率, pH=4.0 时出现 1 个峰值.

2.3 萃取剂 PESA 浓度对污泥中 Pb 萃取的影响

为考察萃取剂 PESA 相对浓度对 Pb 萃取的影响, 实验还研究了不调节萃取体系 pH 值(pH=12)以及调节萃取体系 pH=4 和 pH=7 情况下, PESA 浓度变化对污泥中 Pb 萃取效率的影响.

2.3.1 不调节萃取体系 pH 值条件下 PESA 浓度对 Pb 萃取的影响

不调节萃取体系 pH 值(pH=12)的情况下, PESA 用量(指 PESA 与污泥中重金属总量的摩尔比, 下同)对污泥中 Pb 萃取效率的影响如图 3 所示. 从中可以看出, 在不调节 pH 值的情况下, 污泥中 Pb 的萃取效率随着 PESA 用量的增加呈现先逐渐升高后基本保持不变的总体趋势. 当 PESA 与污泥中重金属总量的摩尔比为 7:1 时达到峰值, Pb 的最大萃取效率为 40%. 在摩尔比为 6:1~10:1 范围内, Pb 的萃取效率均保持在 40% 左右. 由于实际的污泥体系非常复杂, 污泥中除了含有研究的目标重金属外, 还含有大量的 Ca、Fe 等其它金属, 在萃取过程中与目标金属发生竞争作用, 使得实际萃取时螯合剂用量大大超过理论计量比; 同时, 不同污泥中重金属的存在形态不同是决定其被萃取难易程度的重要因素, 该实验污泥中 Pb 的形态分析结果表明, 污泥中的 Pb 主要以可还原态和残渣态为主, 不稳定形态占其

总量的比例相对较低, 所以使得整体萃取难度增加. 因此, 在不调节 pH 值条件下, 实验中当 PESA 与污泥中重金属总量的摩尔比 > 6:1 时才达到较高萃取效率(40% 左右).

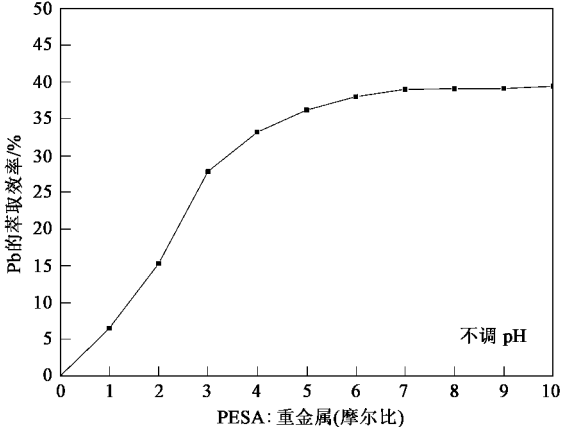


图 3 PESA 用量对 Pb 萃取的影响

Fig.3 Effect of the molar ratio of PESA to heavy metals on the extraction efficiency of Pb

2.3.2 调节萃取体系 pH 值条件下 PESA 浓度对 Pb 萃取的影响

调节萃取体系 pH 值的情况下, PESA 用量对污泥中 Pb 萃取效率的影响如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 在实验范围内, 2 种不同 pH 值条件下, Pb 的萃取效率开始随着 PESA 剂量的增加而迅速增加, 然后维持在较高的萃取效率, 此后再增加 PESA 用量萃取效率不再有明显提高. 在酸性条件(pH=4)下, 在摩尔比为 4:1~10:1 范围内, Pb 的萃取效率均大于 70%; 中性(pH=7)条件下, 在摩尔比为 5:1~10:1 范围内, Pb 的萃取效率均保持在 45% 以上.

比较图 3 和图 4, 可以看出, 在不调节 pH 的情况下, Pb 的最大萃取效率为 40%(摩尔比为 7:1), 而 pH=4 时, Pb 的最大萃取效率比不调 pH 有较大提高, 且达最大萃取效率 73% 所需 PESA 用量减小(摩尔比为 4:1); pH=7 时, Pb 的萃取效率比不调 pH 有一定提高, 当 PESA 与污泥中重金属总量的摩尔比为 5:1 时, 萃取效率可达 45%.

萃取体系的 pH 值和萃取剂用量是影响重金属萃取效果的重要因素^[3]. 综合萃取体系 pH 值和萃取剂 PESA 用量和对污泥中 Pb 的萃取效果, 可以看出, 当萃取体系 pH=4 且 PESA 与污泥中重金属总量的摩尔比为 4:1 时, PESA 对污泥中的 Pb 具有较好的萃取作用, 此时的萃取效率可达 73%.

2.4 污泥中重金属的形态分布与 PESA 萃取 Pb 之

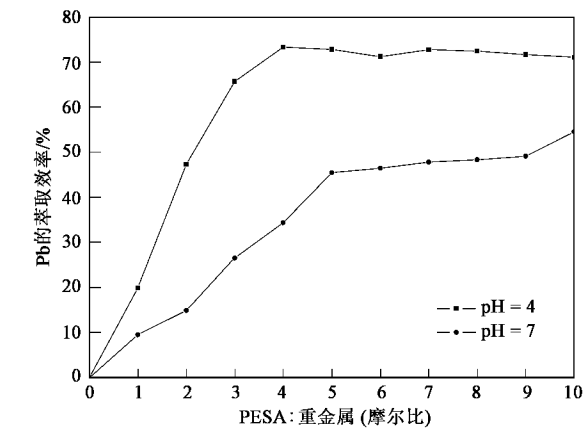


图 4 PESA 用量对 Pb 萃取的影响

Fig.4 Effect of the molar ratio of PESA to heavy metals on the extraction efficiency of Pb

间的关系

污泥中铅的萃取除了受萃取体系的 pH 值、萃取剂的相对浓度的影响外,还与铅在污泥中的存在形态密切相关.由欧共体标准物质局(European Community Bureau of Reference)提出的 BCR 法^[30~32],将土壤、污泥、沉积物中的金属元素分为易交换和弱酸溶解态、可还原态、可氧化态 3 种,改进的 BCR 法增加了水溶态和残渣态 2 种形态的提取.由于 BCR 提取法稳定性及重现性好,提取精度较高,不同研究结果具有可比性^[32],本研究中采用改进的 BCR 法,对 PESA 萃取前后的污泥中 Pb 的分布形态进行了分析.

PESA 萃取之前污泥中 Pb 的形态分布情况如图 5 所示.由图 5 可见,原污泥中的 Pb 主要以可还原态形式存在,质量分数约占 48%,残渣态、可氧化态及酸溶态分别约占 22%、20%和 10%,水溶态不足 1%.在确定的萃取实验条件(萃取体系 pH = 4.0, PESA 与污泥中重金属总量的摩尔比为 4:1)下, PESA 萃取之后污泥中 Pb 的形态分布情况如图 6 所示.由图 6 可见, PESA 萃取后污泥中 Pb 以残渣态为主,水溶态、酸溶态、可还原态及可氧化态的 Pb 大大减少.所以 PESA 萃取污泥中的重金属 Pb 主要是从水溶态、弱酸溶解态、可还原态和可氧化态 4 种形态中提取.萃取前污泥中 Pb 的水溶态、弱酸溶解态、可还原态及可氧化态质量分数总计约占 78%,而实验中 PESA 对 Pb 的萃取效率可达 73%,说明两者具有很好的相关性.萃取体系 pH 的升高将减少酸溶态 Pb 的萃取,因此, pH 上升总体对于 PESA 萃取污泥中的 Pb 是不利的.而 PESA 相对浓度的增大则促进

了 PESA 与 Pb 离子的配位反应向形成配合物方向移动,从而提高了对污泥中 Pb 的萃取效率.

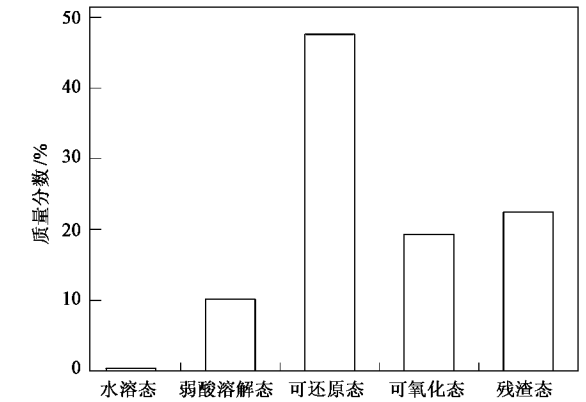


图 5 PESA 萃取前污泥中重金属铅的形态分布
Fig.5 Species distribution of Pb in sewage sludge before the extraction with PESA

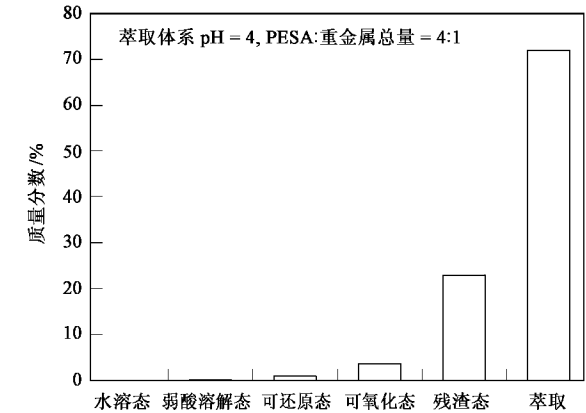


图 6 PESA 萃取后污泥中重金属铅的形态分布
Fig.6 Species distribution of Pb in sewage sludge after the extraction with PESA

2.5 PESA 与其它萃取剂对 Pb 萃取的比较

根据现有报道,目前研究较多且对 Pb 萃取效果较好的螯合剂主要是 EDTA(乙二胺四乙酸)和 EDDS(乙二胺二琥珀酸)^[1,3,4,15]. EDTA、EDDS 与 PESA 对 Pb 的萃取效率比较见表 2.由表 2 可见, EDTA 对土壤、污泥或沉积物中 Pb 的萃取效率约为 29% ~ 95%, EDDS 对土壤、污泥或沉积物中 Pb 的萃取效率约为 16% ~ 90%.在 pH = 4 且 PESA 与污泥中重金属总量的摩尔比为 4:1 时, PESA 对 Pb 萃取效率达 73%,可与 EDTA 和 EDDS 相当.由于 EDTA 难生物降解, EDDS 有引起水体富营养化的潜在威胁且价格较昂贵,一定程度上限制了它们的应用.随着环保意识的增强,环境法规的要求越来越严格,环境友好、

易生物降解、对重金属螯合性能高的 PESA 有可能是一种很有发展前途的环境友好替代萃取剂。

表 2 PESA 对 Pb 的萃取效率与其它文献的比较

Table 2 Comparison of Pb extraction efficiency obtained in this study with other published data

螯合剂	受污染 介质	萃取剂:重金属 (摩尔比)	接触时 间/d	pH	萃取效 率/%	文献
EDTA	土壤	1:1	1	7	29	[1]
EDTA	土壤	10:1	1	7	95	[1]
EDTA	沉积物	4:1	1	8	60	[3]
EDTA	污泥	4:1	3	8	80	[3]
EDDS	土壤	1:1	1	7	16	[1]
EDDS	土壤	10:1	1	7	67	[1]
EDDS	土壤	4:1	1	7	50	[3]
EDDS	沉积物	4:1	3	7	75~85	[3]
EDDS	污泥	4:1	3	7	75~90	[3]
PESA	污泥	4:1	1	4	73	本研究
PESA	污泥	5:1	1	7	45	本研究
PESA	污泥	7:1	1	12	40	本研究

3 结论

(1)PESA 对污泥中的重金属 Pb 具有很好的萃取效果,被 PESA 萃取的 Pb 主要来自水溶态、酸溶态、可还原态和可氧化态 4 种形态.当萃取体系的 pH=4 且 PESA:重金属=4:1 时,Pb 的萃取效率可达 73%.中性(pH=7)条件下,PESA:重金属=5:1 时亦有不错的萃取效果,Pb 萃取效率为 45%.不调 pH(碱性),PESA:重金属=7:1 时 Pb 萃取效率可达 40%.

(2)萃取体系 pH 值和 PESA 用量是影响污泥中 Pb 萃取的重要因素.随着萃取体系 pH 值的增大,Pb 的萃取效率总体呈现逐渐下降的趋势;且随着 PESA 用量的增加,Pb 的萃取效率对萃取体系 pH 值的依赖性减小.Pb 的萃取效率开始随着 PESA 剂量的增加而迅速增加,然后维持在较高的萃取效率,此后再增加 PESA 用量萃取效率不再有明显提高.

参考文献:

[1] Susan T, Karin B, Roland M, *et al.* Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents [J]. Environ Sci Technol, 2004, **38**(3):937-944.

[2] Babel S, Dacera D D. Heavy metal removal from contaminated sludge for land application: A review [J]. Waste Management, 2006, **26**(9): 998-1004.

[3] Philippe V, Frederik H, Willy V, *et al.* Metal decontamination of soil, sediment, and sewage sludge by means of transition metal chelant [S, S]-EDDS [J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, **127**(9):802-811.

[4] Shiro Y, Tahei T. Principle and process of heavy metal removal from sewage sludge [J]. Environ Sci Technol, 2000, **34**(8): 1572-1575.

[5] Veeken A H M, Hamelers H V. Removal of heavy metals from sewage sludge by extraction with organic acid [J]. Wat Sci Tech, 1999, **40**(1):129-136.

[6] 弓晓峰,陈春丽,周文斌,等.鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J].环境科学,2006,**27**(4):732-736.

[7] Silva J E, Paiva A P, Soares D, *et al.* Solvent extraction applied to the recovery of heavy metals from galvanic sludge [J]. Journal of Hazardous Materials B, 2005, **120**(1-3): 113-118.

[8] 朱志良,梁栋,张荣华,等.污泥堆肥土地利用中重金属在几种观赏植物中富集作用的研究[J].农业环境科学学报,2006,**25**(3):690-693.

[9] Si J T, Yu G F, Wu H T, *et al.* Assessing availability, phytotoxicity and bioaccumulation of lead to ryegrass and millet based on the 0.1 mol/L Ca(NO₃)₂ extraction [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006,**5**:958-963.

[10] 曹红英,梁涛,王立军,等.近海潮间带水体及沉积物中重金属的含量及分布特征[J].环境科学,2006, **27**(1):126-131.

[11] Dai J Y, Chen L, Zhao J F, *et al.* Characteristics of sewage sludge and distribution of heavy metal in plant with amendment of sewage sludge [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, **6**: 1094-1100.

[12] Tyagi R D, Couillard D, Tran F T. Heavy metals removal from anaerobically digested sludge by chemical and microbiological methods [J]. Environmental Pollution, 1988, **50**: 295-316.

[13] Van Benschoten J E, Matsumoto M R, Young W H. Evaluation and analysis of soil washing for seven lead-contaminated soils [J]. Journal of Environmental Engineering,1997,**123**(3):217-224.

[14] Sun B, Zhao F J, Lombi E, *et al.* Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA [J]. Environmental Pollution, 2001, **113**:111-120.

[15] Theodoratos P, Papassiopi N, Georgoudis T, *et al.* Selective removal of lead from calcareous polluted soils using the Ca-EDTA salt [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2000, **122**:351-368.

[16] Barona A, Aranguiz I, Elias A. Metal associations in soils before and after EDTA extractive decontamination: implications for the effectiveness of further clean-up procedures [J]. Environmental Pollution, 2001, **113**:79-85.

[17] Susan T, Rainer S, Bernd N. The influence of EDDS on the uptake of heavy metals in hydroponically grown sunflowers [J]. Chemosphere,2006, **62**:1454-1463.

[18] Paul W J, David R W. Chemical speciation used to assess [S, S]-ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) as a readily-biodegradable replacement for EDTA in radiochemical decontamination formulations [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2001, **54**:587-593.

[19] Susan T, Adrian A, Rainer S, *et al.* Biodegradation and speciation of residual SS-ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) in soil solution left after soil washing [J]. Environmental Pollution, 2005, **1056**:1-9.

[20]

曾敏, 廖柏寒, 曾清如, 等. 3 种萃取剂对土壤重金属的去除及其对重金属有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 979-982.

[21]

曾清如, 廖柏寒, 杨仁斌, 等. EDTA 溶液萃取污染土壤中的重金属及其回收技术[J]. 中国环境科学, 2003, 23(6): 597-601.

[22]

钱猛, 沈振国, 魏岚. 螯合剂 EDDS 和 EDTA 诱导海州香薷积累土壤重金属的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 113-118.

[23]

王显海, 刘云国, 曾光明, 等. EDTA 溶液修复重金属污染土壤的效果及金属的形态变化特征[J]. 环境科学, 2006, 27(5): 1008-1012.

[24]

魏刚, 许亚男, 熊蓉春. 阻垢剂的可生物降解性研究[J]. 北京化工大学学报, 2001, 28(1): 59-62.

[25]

Rodney D B, Stephen W H. Ether hydroxylpolycarboxylate detergency builders [P]. US 4654159, 1987.

[26]

Fuknmoto Y, Tangiuchi T. Water treating agents for prevention of metal corrosion and scale generation [P]. JP 04166298, 1991.

[27]

Carter C G, Fan L G, Fan J C. Method of inhibiting corrosion of metals using polytartaric acid [P]. EP 0609590, 1994.

[28]

熊蓉春, 魏刚, 周娣, 等. 绿色阻垢剂聚环氧琥珀酸钠的合成[J]. 工业水处理, 1999, 19(3): 11-13.

[29]

张冰如, 李辉, 李风亭, 等. 聚环氧琥珀酸对碳钢的缓蚀协同效应的研究[J]. 工业水处理, 2006, 26(2): 53-56.

[30]

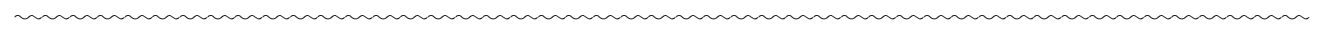
Ure A M, Quevauviller P H, Muntau H, et al. Three-stage sequential extraction procedure for the determination of metals in river sediments [J]. Int J Environ Anal Chem, 1993, 51(135): 423-429.

[31]

Davidson C M, Duncan A L, Littlejohn D, et al. Acritical evaluation of the three-stage BCR sequential extraction procedure to assess the potential mobility and toxicity of heavy metals in industrially contaminated land [J]. Anal Chim Acta, 1998, 363: 45-55.

[32]

Quevauviller P H, Rauret G, Lopez-Sanchez J F, et al. Certification of trace metal extractable contents in a sediment reference material (CRM601) following a three-step sequential extraction procedure [J]. Sci Total Environ, 1997, 205: 223-234.



《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址: <http://www.hjcx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjcx@rcees.ac.cn

网 址: www.hjcx.ac.cn

《环境科学》编辑部