

# 厦门西海域拟疏浚物中重金属含量及其赋存形态与去除重金属污染技术

林金盾, 甄青, 景有海, 欧阳通

(厦门大学环境科学研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 着重研究了厦门西海域拟疏浚物中重金属的含量和赋存形态, 探讨了化学试剂浸提和曝气法去除重金属的可行性, 为建立后续的去污染方案提供科学依据。厦门西海域拟疏浚物枯洪两季沉积物中重金属含量变化不大, 枯季稍高于洪季。从经济角度考虑, 选用  $C_2H_2O_4$ 、 $(NH_4)_2C_2O_4$ 、EDTA 作为浸提剂结合曝气和 TCLP 翻转实验对厦门西海域代表性拟疏浚物样品 (X5 站位) 进行了重金属去除试验。结果表明, 几种溶剂中,  $C_2H_2O_4$  的效果最好; 在相同溶剂条件下, 对多数重金属元素, 曝气处理可以有效地提高去除率。

**关键词:** 拟疏浚物; 重金属含量; 赋存形态; 浸提效果

**中图分类号:** X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-6336 (2009) 01-0052-05

## Content and partitioning and study on removal technology of heavy metals in tentative dredged sediments of Xiamen western harbor

LIN J in-dun, ZHEN Q ing, JING You-hai, OYANG Tong

(Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Total content and partition of heavy metals in the tentative dredged sediments of Xiamen western harbor were studied with the aim to development of conventional decontamination technology. The chemical extraction repair heavy metals polluted soil used the chemical medicament to exchange hydronium, dissolve (in acid or alkali) and complexation. The variety of content of heavy metals in Xiamen western harbor is not evident between dry season and rain season, content of heavy metals in dry season is comparatively higher. This experiment consider from economical, choose ammonium oxalate, oxalic acid and EDTA as the chemical medicament, combining aeration and TCLP upturning, carry though attempt on removing the heavy metals of X5 sample station of Xiamen western harbor. The results showed that the effect of oxalic acid is the best of several chemical medicaments. Using the same chemical medicament, remove the heavy metals much more effective with aeration for most heavy metals.

**Key words:** dredged sediments; content of heavy metals; partition; chemical extraction efficiency

为了使传统的抛泥方式对周围环境不产生负面影响并使之变废为宝, 尽管疏浚物处理与利用的研究费用相当昂贵, 世界上许多国家和国际组织还是开展了这方面的研究。当前疏浚物常使用的处理污染疏浚物的方法有高温清除、固化、分离和生物法<sup>[1]</sup>。在处理过程中, 往往是多种方法联合使用。

国际上, 荷兰在 20 世纪 80 年代起开始研究疏浚物处理技术, 目前主要致力于低成本技术; 德国哥德堡的 MEHTA 公司在 20 世纪 90 年代一直致力于完善分离技术、提高生产率的研究, 目前正进行泥浆砖的试生产<sup>[1]</sup>。

陈松, 廖文卓等在上世纪 80 年代曾对厦门筓筓港的污染疏浚物做了污染溶出实验<sup>[2]</sup>; 洪华生, 刘琼玉等在上世纪 90 年代对厦门西海域表层沉积物的重金属含量的分布特征及来源进行过探讨<sup>[3]</sup>, 但尚未见有去除重金属污染技术的报道。

厦门西海域是一个半封闭的海湾, 由于近年来人类活动的增加, 加上周边地区工业发展, 向海湾里排入含有重金属的工业废水, 海底中重金属沉积较多。目前厦门西港海域平均每年整治疏浚的量约为  $1500 \times 10^4 m^3$ , 可见疏浚物的量是很大的。

\* 收稿日期: 2007-07-12, 修订日期: 2007-09-12

作者简介: 林金盾 (1984-), 男, 福建省石狮市人, 助理工程师, 从事海洋环境治理方面的研究。

本研究的重点是厦门西海域拟疏浚物中重金属的去污染方法比较。首先采集厦门西海域具有代表性的 9 个站位的拟疏浚物,对重金属分布情况及总量进行测定,采用 Kersten 和 Foerstner 于 1986 年提出的连续提取法<sup>[4]</sup>,对各站位的重金属进行赋存形态分析,尝试采用化学萃取以及曝气法去除厦门西海域拟疏浚物中的重金属,使处理后的疏浚物中重金属含量达到环境安全标准,并综合利用该疏浚物。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样站位及样品采集

采样站位共设置 10 个,如图 1。其中:筓筓湖内外湖各 1 个(Y1、Y2),马銮湾 2 个(M1、M2),厦门西港 6 个(X1~X6)。由于筓筓湖外湖在采样的不久前进行清淤工作,故 Y1 站位未采到泥样。



图 1 采样站位

Fig 1 Sampling station for dredged sediments

课题组分别在丰水期和枯水期采集厦门西海域拟疏浚物,时间为 2004 年 11 月 30 日至 12 月 1 日,2005 年 7 月 12 日至 7 月 13 日。沉积物样品的采集方式采用不锈钢抓斗采样器采样。采集后的样品装入 500 mL 透明大口玻璃瓶密封带回实验室,玻璃瓶在使用前用 1:3 HNO<sub>3</sub> 浸泡过夜,洗净。

### 1.2 主要仪器与试剂

电感耦合等离子体质谱仪 ICPMS (型号: Agilent 7500i), milli-pore 超纯水装置, TCLP 装置 (3740-8-BRE 型),电热板。

HNO<sub>3</sub>、HCl、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、CH<sub>3</sub>COOH、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>、CH<sub>3</sub>COONa、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、EDTA、盐酸羟铵等,用于痕量金属分析试剂均为优级纯或以上,溶液配置使用 milli-pore 超纯水,所用器皿在使用前均用 1:3 HNO<sub>3</sub> 浸泡过夜,洗净备用。

### 1.3 实验及分析方法

#### 1.3.1 TCLP 翻滚浸提实验

TCLP 为固体废物毒性浸出方法 (toxicity characteristic leaching procedure) 的简称。具体的实验方法如下:

取 5 g 泥样置于聚乙烯瓶中,选用不同类型的试剂,配以一定的浓度,以 1:50 的固液比加入溶液,采用 TCLP 装置 (3740-8-BRE 型) 翻转 16 h,静置后采用真空抽滤法取得滤液。

#### 1.3.2 曝气浸提实验

取 5 g 泥样置于 1 L 的量杯中,由 TCLP 浸提翻转实验优选出有效去除重金属的试剂,以相同浓度、固液比、pH 值、反应时间等条件,进行对比实验,曝气量为 2.5 L/min,曝气 16 h 结束静置后,采用真空抽滤法取得滤液。

#### 1.3.3 重金属含量分析方法

本实验采用 EPA 3050B 消解法来进行拟疏浚物中重金属含量的分析。在玻璃研钵中将风干后的沉积物进行充分研磨,用 80 目尼龙筛进行筛分,筛分后放置于干燥器中待用。消解后用 ICPMS 进行重金属测定。

#### 1.3.4 连续提取法

Koersten 和 Foerstner 根据其生物有效性的不同,将疏浚物中的重金属划分为六个形态<sup>[4]</sup>: 分别为离子态 (EXC)、碳酸盐态 (CARB)、锰氧化态 (ERO)、不定形铁氧化态 (MRO)、有机物及硫化物结合态 (OSM)、残渣态 (RES) 及存在于岩石和粘土矿物晶格中的金属元素。

## 2 结果与讨论

### 2.1 枯洪两季厦门西海域拟疏浚沉积物中重金属的含量比较及总量水平

两次采样后测定的重金属含量见表 1。枯季各站位沉积物中 Zn、Ni、Cr、Hg 四种重金属含量稍高于洪季。其中枯季各站位沉积物中 Zn 含量平均高于洪季时含量的 30% 左右,少部分站位沉积物中 Cu、Pb 枯季时的含量略低于洪季时的含量。Cd 较特殊,X4、M1、M2、Y2 站位枯季时的含量明显高于夏季。但总的来看,枯洪两季沉积物中重金属含量变化不大,枯季稍高于洪季。这可能是由于温度升高有利于沉积物中重金属的释放,亦即,在夏季,沉积物、悬浮物将向水体释放出更多的重金属。

厦门西海域拟疏浚物的重金属平均含量与若干参照值见表 2。本次调查结果与胡忠等人 2003 年测定的厦门西海域表层沉积物中重金属总量<sup>[5]</sup>相比较,Cu、Zn 含量有所下降。Hg 和 Ni 含量与陈松等人 (1987、1992) 测定的结果<sup>[2、6]</sup>相似,两元素含量近年变化不大。表 2 还列出了国内外一些港口和内湾地区重金属的含量。与国内胶州湾<sup>[7]</sup>相比,Cu 和 Pb 含量水平较高;与珠江口<sup>[8]</sup>、深圳湾<sup>[9]</sup>相比,各重金属含量水平相当。陈静生等<sup>[10]</sup>曾对中国东部主要海域进行过研究,指出南方海域沉积物中重金属元素较北方含量高,是由该地区的地质环境 (广泛存在的有色金属矿) 和南方的亚热带气候下的更多变的天气状况引起的较强风化作用所致。与国外一些著名港口美国的 Newyork 港<sup>[11]</sup>、Boston 港<sup>[12]</sup>、德国 Bremen 港<sup>[13]</sup>以

及土耳其 Izmir 港<sup>[14]</sup>相比,厦门西海域疏浚物重金属含量水平明显偏低,其总体沉积物污染程度较低。其原因可能是国外上述各大港口均有 200 多年的使用历史,污染物

积累较多,而厦门港只有数十年的使用经历,相对污染物积累较轻。

表 1 枯季、洪季厦门西海域拟疏浚沉积物中重金属含量

Tab 1 Content of heavy metals in tentatively dredged sediments of Xiamen western harbor (dry season and rain season, respectively)

采样时间	站位	w / ×10 <sup>6</sup>						
		Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	Ni
枯季	X1	29.88	57.63	154.22	0.169	68.51	0.089	33.73
	X2	31.97	57.44	152.02	0.152	77.34	0.095	37.04
	X3	43.88	52.17	148.48	0.148	69.59	0.086	34.47
	X4	38.35	56.69	152.62	0.809	73.20	0.072	36.91
	X5	71.71	44.90	166.48	0.115	134.34	0.074	62.03
	X6	36.91	57.96	154.73	0.129	73.94	0.094	37.57
洪季	M1	29.64	48.09	149.44	0.660	36.65	0.179	40.27
	M2	33.07	53.49	173.90	1.007	73.34	0.222	59.80
	Y2	61.93	53.75	223.11	0.646	63.72	0.221	30.15
	X1	32.265	55.51	108.65	0.19	40.71	0.049	28.215
	X2	29.345	54.68	103.1	0.1835	48.745	0.049	28.06
	X3	55.045	53.215	109.3	0.19	48.36	0.057	31.305
	X4	44.7	52.896	108.35	0.182	49.85	0.0485	30.8
	X5	78.85	52.175	128.7	0.19	121.6	0.045	64.76
	X6	18.47	51.445	65.15	0.1125	38.58	0.0255	24.775
	M1	34.47	58.15	102.71	0.1378	18.365	0.076	36.065
M2	24.485	52.865	98.65	0.433	14.555	0.0755	30.895	
Y2	97.185	59.825	198.8	0.512	54.925	0.1145	27.165	

表 2 本研究各元素含量的平均值及若干参照值比较

Tab 2 Comparison of means of heavy metal concentrations in sediments

区域	w / ×10 <sup>6</sup>							文献
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	Ni	
厦门西海域	42.12	54.47	154.76	0.254	82.82	0.085	40.29	本文
	24.8	64.1	618	-	-	-	44.9	[5]
	30.0	75.6	215	0.196	-	0.091	-	[6]
	30.2	77.2	144.2	0.7	-	-	-	[7]
珠江口	39.02	59.43	110.85	0.344	56.40	1.4	-	[8]
深圳湾	48.8	46.0	134.5	-	-	-	29.85	[9]
胶州湾	27.26	30.87	-	0.147	-	0.08	-	[10]
New York 港(美)	105~131	109~136	188~244	1~2	175	2~3	33~40	[11]
Bremen 港(德)	87	122	790	6	131	0.3	60	[13]
Izmir 港(土)	182.4	97.2	181.6	6.2	107.6	-	222	[14]
Boston(美)	67	86	118	-	131	-	-	[12]

注:“-”示数据空缺

## 2.2 重金属的赋存形态及化学浸提效果

通过前期的 TCLP 翻滚浸提实验,选出 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>和 EDTA 三种有效去除重金属的试剂。图 2、图 3 和图 4 分别表述了选用 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>和 EDTA 试剂进行 TCLP 翻滚浸提(无曝气)和曝气浸提的重金属浸出率与实验前后拟疏浚物试样(洪季 X5 站位沉积物)中重金属元素 Pb、Cd、Cu、Zn、Ni 和 Cr 赋存形态分布变化的关系,其中 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>的浓度为 0.2 mol/L, EDTA 的浓度为 0.025 mol/L,三种试剂的固液比均为 1:50。

### 2.1.1 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>浸出效果

采用 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>对除 Pb 外的其他 5 元素均有较高的浸出率(Extra),曝气处理明显提高了浸出效果(如图 2)。

在曝气条件下 Cu 浸出率为 93.08% 和 93.82%; Pb 浸出率仅 3.35%; 对 Zn、Cd、Cr、Ni 的浸出率分别为 89.36%、78.95%、44.93% 和 65.66%。相对于实验前样品(图中表示为参照)无曝气浸提和曝气浸提后各元素在拟疏浚物中的形态分布变化很大。以 Cu 为例,无曝气浸提后,随着一部分固相中结合的 Cu 被浸提到液相,原试样中主要存在形态如碳酸盐结合态(CARB)、铁锰氧化物结合态(ERO 和 MRO)和有机物硫化物结合态(OSM)均大幅度减少或完全消失,而属于潜在释放倾向低的残渣态(RES)则基本不发生变化;而加入曝气条件后,Cu 浸提效果进一步提高,固相中残渣态以外的形态基本消失,残渣态所占的百分率也减少了将近一半说明这部分 Cu 也被 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>浸提出来。

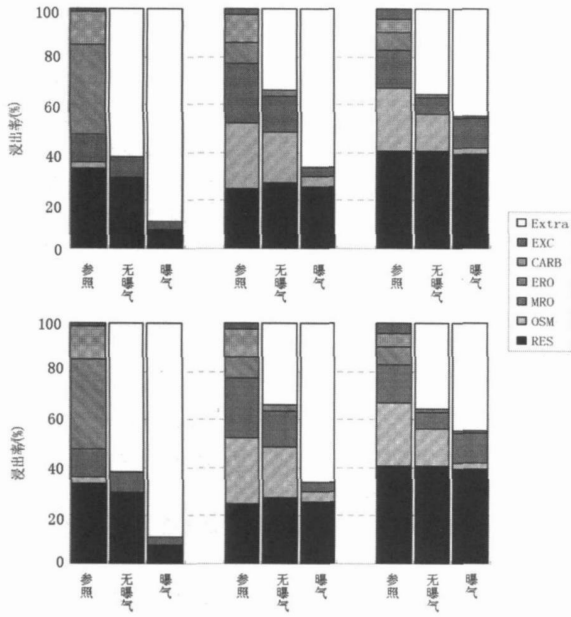


图 2 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>浸提效果与重金属赋存形态

Fig 2 Extraction effects of oxalic acid and partitioning of heavy metals

Zn, Cd, Ni和 Cr的结果(图 2)同 Cu相似,主要是碳酸盐结合态(CARB),铁锰氧化物结合态(ERO和 MRO)和有机物 硫化物结合态(OSM)被 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>浸提出来。

Pb的分析结果比较特殊,其 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>浸出率很低(仅约 3%),但浸提前后固相中的赋存形态仍然发生了很大改变,主要表现为碳酸盐结合态(CARB)几乎消失而铁锰氧化物结合态相应增加, Ouyang 等人的研究中也发现过相似现象<sup>[15]</sup>。C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>可能同 Pb具有特殊反应,造成 Pb在 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>介质中不能稳定存在。

2.2.2 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>浸出效果

采用 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>代替 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>作为浸提剂可以在曝气条件下大幅度提高对 Pb的浸出(如图 3)。

(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>介质可能有利于增强 Pb在液态中的存在稳定性。在无曝气条件下,同浸提前(图中参照)相比,主要是固相中的铁氧化物结合态(MRO)的减少而使约 5%的 Pb被浸出。(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>在连续提取法的第四步是作为铁氧化态的提取剂,主要同非结晶态 FeOOH反应将难溶性 Fe<sup>3+</sup>还原为易溶性 Fe<sup>2+</sup>,使一部分 FeOOH溶解<sup>[16, 17]</sup>,从而将结合在其中的 Pb等重金属释放出来。在曝气条件下,有机物 硫化物结合态(OSM)Pb被大量释放出来,这同浸出率的大幅度提高具有很好的对应性。

Cu的 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>浸出效果明显好于其他元素,在无曝气条件下主要是铁锰氧化物结合态(MRO)Cu被浸出,曝气处理又促成了绝大部分有机物 硫化物结合态(OSM)Cu被释放出来(图 3)。同 Pb等相比,曝气处理后铁氧化物结合态(MRO)Cu并未增加,这可能是由于 Cu同草酸根等有机物的络合反应性更强,在液态中可以稳定存在的结果<sup>[17]</sup>。Zn的 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>浸出效果低于 Cu

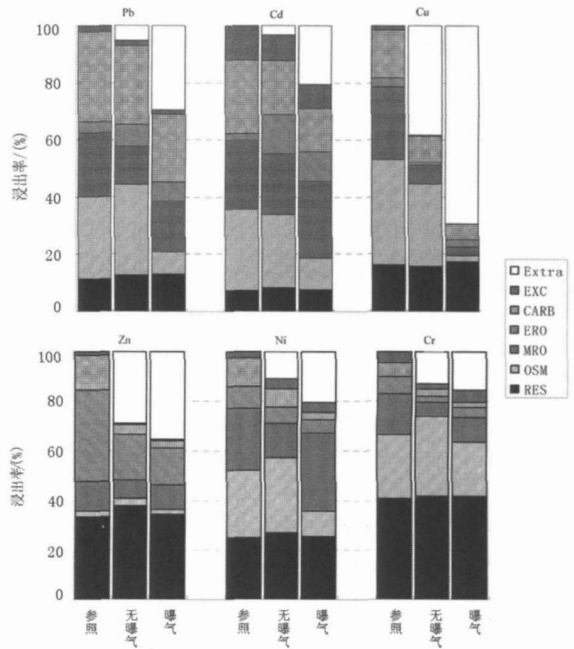


图 3 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>浸提效果与重金属赋存形态

Fig 3 Extraction effects of ammonium oxalate and partitioning of heavy metals

Cr的浸出效果同 Ni相似。

2.2.3 EDTA浸出效果

采用 EDTA作为浸提剂对 Pb显示出很好的浸出率(约 50%),曝气处理可进一步提高处理效果(如图 4)。

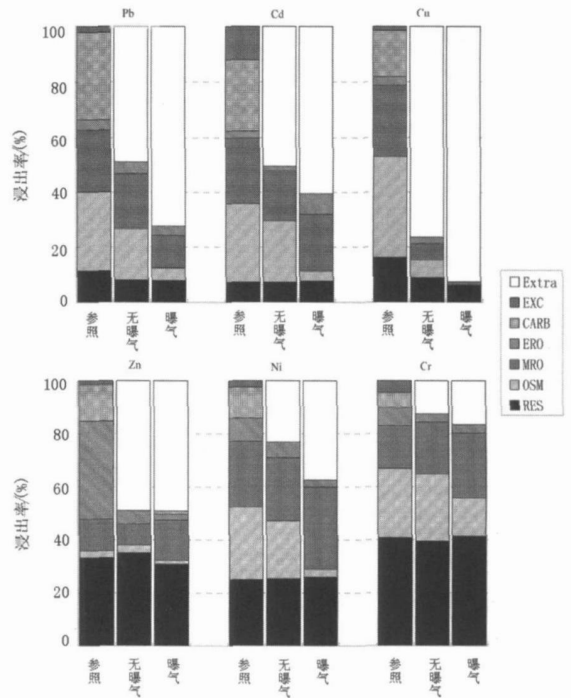


图 4 EDTA浸提效果与重金属赋存形态

Fig 4 Extraction effects of EDTA and partitioning of heavy metals

无曝气条件下,固相中碳酸盐结合态(CARB)的全部

和一部分有机物 硫化物结合态 Pb(O<sub>2</sub>S)被浸出,曝气处理进一步浸出绝大部分有机物 硫化物结合态和近 50% 的铁氧化物结合态。

EDTA是一种强有力的金属离子络合剂,Pb等金属离子一旦被浸出,就容易同 EDTA 结合成稳定态络合物而残留在液相。因而 EDTA 可以将除残渣态以外的大部分固相 Pb浸提到液相,曝气处理促成还原态有机物 硫化物的氧化分解,进而使这部分结合态 Pb等溶出。基于同样机理,Cd的浸提效果和赋存形态的变化同 Pb基本相似(图 4)。Cu的浸出效果比 Pb更为彻底,在曝气条件下的浸出率达 93.8% (图 4),EDTA 也可使一部分残渣态 (RES) Cu释放出来。Ni和 Cr的浸出效果相对较差,但曝气处理使有机物 硫化物结合态浸出从而一定程度上提高了各自浸出率(图 4),但曝气后铁氧化态所占比例增大,对浸出有一定限制作用,其原因可能由于溶出的 Ni和 Cr同 EDTA 的结合不如 Pb和 Cu稳定,容易新生成 FeOOH所结合。Zn的浸出效果和 Pb相当(约 50%),但由于试样本身所含的有机物 硫化物结合态 Zn很少,同其它元素的情况相比导致曝气处理对 Zn溶出的贡献效果难以显示(图 4)。

### 3 结 论

(1)厦门西海域拟疏浚物枯洪两季重金属含量变化不大,枯季稍高于洪季,这可能是夏季温度高,有利于疏浚物中重金属的释放。与南方珠江口、深圳湾接近,高于北方胶州湾。与国外一些主要港口的疏浚物相比,厦门西海域拟疏浚物的重金属含量明显较低。

(2)采用 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>作为浸提剂时,对除了 Pb以外的其它五种重金属元素各种赋存形态都有比较好的去除效果,对于 Pb去除效果虽然不好,但能很大程度地改变其赋存形态;采用 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>作为浸提剂时,可以大幅度提高 Pb的浸出效果。采用 EDTA 作为浸提剂对 Pb显示出更好的浸出率(约 50%)。

(3)在相同溶剂条件下,对多数重金属元素,曝气处理可以有效地提高去除率。在曝气量为 2.5 L/min 的条件下,0.2 mol/L 的 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>以 1:50 的固液比反应效果最好,对 Cu、Zn、Cd、Cr和 Ni均有较高的浸出率,浸出率分别为 93.08%、89.36%、78.95%、44.93%和 65.66%。

(4)采用化学试剂溶出和曝气处理法对于拟疏浚物中重金属元素的去除(溶出)效果同固相中各元素的赋存状态密切相关,了解拟疏浚物中各元素的具体赋存状态有利于选择应采用的浸提试剂和浸提方法,同时也应考虑到方案的经济性和可行性。本实验在去污染处理过程中所观察到的赋存形态的变化形式于浸出量之间的关系可以作为讨论处理其他污染程度的拟疏浚物的依据。

### 参考文献:

- [1] 李幼萌. 国外疏浚物的处理与利用 [J]. 水道港口, 2001, 22 (3): 146-148.
- [2] 陈松,许爱玉,骆炳坤,等. 厦门港湾表层沉积物中重金属的富集和来源探讨 [J]. 台湾海峡, 1987, 6 (2): 139-145.
- [3] 刘琼玉,洪华生,洪丽玉. 厦门西海域表层沉积物重金属的分布特征及来源探讨 [J]. 海洋通报, 1995, 14 (6): 46-52.
- [4] KERSTON M, FORSTNER U. Chemical fractionation of heavy metals in anoxic estuarine and coastal sediments [J]. Water Sci Technol, 1986, 18: 121-130.
- [5] 胡忠,谢晴宜,曹晓星. 厦门西海域综合整治后表层沉积物污染状况 [J]. 海洋环境科学, 2006, 25 (4): 4-6.
- [6] 陈松,廖文卓,许爱玉,等. 厦门西港表面沉积物的化学特征 [J]. 台湾海峡, 1992, 11 (2): 131-137.
- [7] 徐晓达,林振宏,李绍全,等. 胶州湾的重金属污染研究 [J]. 海洋科学, 2005, 29 (1): 48-53.
- [8] 刘芳文,颜文,王文质,等. 珠江口沉积物重金属污染及其潜在生态危害评价 [J]. 海洋环境科学, 2002, 21 (3): 34-38.
- [9] 黄小平,李向东,岳维忠,等. 深圳湾沉积物中重金属污染累积过程 [J]. 环境科学, 2003, 24 (4): 144-49.
- [10] CHEN J, WANG F Y, LI X D, et al. Geographical variation of trace elements in sediments of the major rivers in eastern China [J]. Environmental Geology, 2000, 39 (12): 1334-1340.
- [11] United State Environment Protection Agency. Fast Track Dredged Material Decontamination Demonstration for the Port of New York and New Jersey [R]. Washington DC: USEPA, 1999.
- [12] BOTHNER M H, BUCHHOLTZ TEN BRINK M, MANHEM F T. Metal concentrations in surface sediments of Boston Harbor changes with time [J]. Marine Environmental Research, 1998, 45: 127-155.
- [13] HAMER K, KARLUS V. Brick production with dredged harbour sediments [J]. An industrial-scale experiment [J]. Waste Management, 2002, 22: 521-530.
- [14] FLABELIA, YILMAZ R. Dredged material of Izmir Harbor: its behavior and pollution potential [J]. Water Science Technology, 1995, 32 (2): 105-113.
- [15] OUYANG T, TORIGA IM, SAKAIR, et al. A study on the potential release of hazardous elements from municipal solid waste - An evaluation of leaching test results using sequential extraction [J]. Waste Solid Management, 1999, 10 (3): 142-151.
- [16] KERSTON M, FOERSTNER U. Chemical fractionation of heavy metals in anoxic estuarine and coastal sediments [J]. Water Science and Technology, 1986, 18: 121-130.
- [17] FOERSTNER U, CALMONO W. Bindungsformen von Schwermetallen in Bagger-schlaemen [J]. Vom Wasser, 1982, 59: 83-92.