

## 淋洗过程预分离细颗粒悬液重金属去除的研究<sup>①</sup>

宋永伟, 王果\*, 胡欣欣, 王振达

(福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

**摘要:** 研究了 4 种絮凝剂对在土壤淋洗过程中预分离出来的细颗粒悬液中的 Cd、Pb、Zn 的去除效果以筛选最佳絮凝剂及其用量。结果表明, 随着硫酸铝添加量的增加, 悬液中 Cd、Pb、Zn 浓度呈先逐渐降低后上升的趋势; 3 种元素浓度均随着聚合氯化铝 (PAC) 和 CaO 添加量的增加而迅速降低; 随着硫酸亚铁添加量的增加, 悬液中 Pb、Zn 浓度逐渐降低, 而 Cd 浓度先迅速降低后逐渐回升。综合悬液中 Cd、Pb、Zn 的去除效果, 选择硫酸铝、PAC、硫酸亚铁和 CaO 的最佳添加量分别为: 0.25、0.04、1.0、0.3 g/L, 此时 3 种元素浓度均达到农田灌溉水质标准。在最佳添加量下按每万吨悬液处理量换算, 4 种絮凝剂絮凝成本依次为: 硫酸亚铁 (4500 元) > 硫酸铝 (1900 元) > PAC (1000 元) > CaO (900 元)。因此, 选择 CaO 作为最佳絮凝剂, 相应最佳絮凝 pH 范围为 10~11。

**关键词:** 土壤淋洗; 细颗粒悬液; 重金属; 最佳絮凝剂; CaO

**中图分类号:** X53

土壤重金属污染具有隐蔽性、长期性、不可逆性的特点, 因此重金属污染土壤的修复一直是国际上的难点和热点问题。在各种重金属污染土壤修复方法之中, 淋洗法是若干种可以去除污染土壤中重金属的方法之一, 应用前景较广泛。在国内, 土壤淋洗还处在实验室研究阶段, 研究的重点通常是筛选适合于某种重金属元素的淋洗剂、淋洗机理及淋洗条件<sup>[1-6]</sup>, 要实现其广泛的工程应用, 还有一系列的技术问题需要解决。土壤细颗粒是重金属富集量最高的颗粒<sup>[7-11]</sup>, 且其对重金属的吸持紧密, 较难洗脱。因此在淋洗过程中, 将重金属含量高的细颗粒部分分离出来、对土壤的其他部分进行淋洗, 以提高土壤的淋洗效率, 是普遍被采用的方法。国外实地修复中对重金属细土壤颗粒的分选一般采用机械筛选、水力分选、重力分选、浮选、磁力分离等方法。水力分选主要借助于水力旋流器的离心作用及螺旋分级器的机械分离作用<sup>[12]</sup>。重力分选受颗粒密度、大小、形状和重量的影响, 对于颗粒粒径范围广、密度范围窄的土壤, 用重力分选处理的效果很不明显, Mercier 等<sup>[13]</sup>研究表明, 要使颗粒充分分离, 颗粒密度的差异必须大于  $1\text{ g/cm}^3$ 。浮选法通常与水力分级和重力富集相结合使用。磁力分离能够去除土壤中的重金属是因为重金属污染物与铁磁物质紧密联系在一起。Rikers 等人<sup>[14]</sup>研究表明高强度的磁场适

合某些土壤中 Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的去除。静电分离是利用电晕放电现象, 因此必须防止空气被击穿而产生火花放电, 因为火花放电破坏分离过程的正常进行。由于多种原因, 静电分离在土壤修复中的使用受到限制。

分离出来的土壤细颗粒悬液的重金属含量较高, 必须处理后才能排放。由于悬液中的重金属主要结合在细颗粒上, 细颗粒以悬浮态存在, 采用絮凝的方法促进细颗粒的沉淀, 就有可能同时去除悬液中的重金属, 从而使悬液重金属浓度符合农田灌溉水的要求。细颗粒的絮凝和它的矿物组成、浓度及粒径有关, 还受到悬浮体系的温度、盐度、pH 值以及水流紊动强度等因素的制约, 是一个复杂的物理化学过程<sup>[15]</sup>。细颗粒间的自然絮凝沉降通常需要较长时间, 添加絮凝剂可以缩短沉降周期, 提高絮凝效率。絮凝能有效去除 80%~95% 的悬浮物和 65%~95% 的胶体物质<sup>[16]</sup>。目前应用的絮凝剂可分为无机絮凝剂、有机高分子絮凝剂和微生物絮凝剂 3 类<sup>[17-18]</sup>。其中无机絮凝剂具有成本低、沉降速度快、颗粒密实、pH 适用范围宽等特点。本研究选择硫酸铝、聚合氯化铝、硫酸亚铁等作为悬浮液中细颗粒的絮凝剂。CaO 对水体中胶体颗粒具有助凝作用, 同时能去除酸性悬液中的重金属离子, 因此本研究也将 CaO 作为供试絮凝剂。本研究的目的是

①基金项目: 中央环保专项基金(财建[2007]661号)资助。

\* 通讯作者 (gwang572003@yahoo.com.cn)

作者简介: 宋永伟 (1984—), 男, 安徽绩溪人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境化学和污染生态研究。E-mail: syw1984888@sina.com

筛选适合于酸性土壤细颗粒悬液的絮凝剂及相关条件,为酸性重金属污染土壤的淋洗修复提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

供试土壤:采自福建省龙岩市新罗区特钢厂附近的污染土壤。从表 1 可见,供试土壤中 Cd、Pb、Zn

含量已严重超出我国土壤环境质量二级标准 (GB15168-1995)。

化学药剂:硫酸铝、聚合氯化铝 (PAC)、硫酸亚铁、CaO。

主要仪器:火焰原子吸收分光光度计 (WFX-130 型,北京瑞利分析仪器公司);石墨原子吸收分光光度计 (GTA120/AA240Z, Varian); J6-IA 型搅拌器。

表 1 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

总 Cd (mg/kg)	总 Pb (mg/kg)	总 Zn (mg/kg)	pH	CEC (cmol/kg)	有机质 (g/kg)	机械组成 (g/kg)		
						<0.002 mm	0.002 ~ 0.02 mm	0.02 ~ 2 mm
4.17	570	727	5.03	5.38	36.62	19.87	22.39	57.74

### 1.2 方 法

根据司笃克斯沉降原理<sup>[9]</sup>将供试土壤分离得到 < 0.005 mm 细颗粒悬液 (表 2, 其中的 Cd、Pb、Zn 浓度均超过了农田灌溉水质标准: GB5084-2005)。分别取上述悬浮液 1 000 ml 置于 1 L 烧杯中,按絮凝剂的投加量和投加顺序,加入不同浓度梯度的不同絮凝剂。各絮凝剂均以固态形式添加。其中,硫酸铝添加量分别为: 0、0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35、0.40 g/L; PAC 添加量分别为: 0、0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06、0.07、0.08 g/L; 硫酸亚铁添加量分别为: 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6 g/L; CaO 添加量分别为: 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 g/L。用 J6-IA 型搅拌器进行絮凝实验,操作参数如下:快搅 120 r/min, 2 min;慢搅 40 r/min, 10 min。静置 30 min 后,取上清液进行消解,测定 Cd、Pb、Zn 含量。每个处理设置重复试验,确定最佳絮凝剂及 pH 值。

表 2 悬浮液理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of suspension

Cd ( $\mu\text{g/L}$ )	Pb ( $\mu\text{g/L}$ )	Zn ( $\mu\text{g/L}$ )	pH
21.22	4 166	6 099	7.30

水样消解方法:取 100 ml 水样放入 200 ml 烧杯中,加入硝酸 5 ml,在电热板上加热消解 (勿沸腾),蒸至 10 ml 左右,加入 5 ml 硝酸和 2 ml 高氯酸,继续消解。直至 1 ml 左右,如果消解不完全,再加入硝酸 5 ml 和高氯酸 2 ml,再次蒸至 1 ml 左右,取下冷却,加水溶解残渣,然后全量转移至 100 ml 容量瓶中,冷却后定容至标线,摇匀,同步做空白。用火焰原子吸收分

光光度计测定 Pb、Zn 含量;用石墨原子吸收分光光度计测定 Cd 含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硫酸铝对悬浮液中 Cd、Pb、Zn 的去除效率

硫酸铝絮凝沉降的原理是,当硫酸铝添加到水中,生成白色的絮状沉淀氢氧化铝。氢氧化铝是一种带有正电荷的胶体粒子,当碰到带负电的土壤胶粒时,二者就中和而聚沉。从表 3 可以看出,与对照相比,当硫酸铝添加量为 0.05 g/L 时,悬液中 Cd、Pb、Zn 的浓度就开始下降,pH 值也开始减小。硫酸铝添加量从 0 增加到 0.25 g/L 时,悬液中 Pb 浓度逐渐降低,而后随硫酸铝添加量的增加,悬液中 Pb 浓度基本不变,甚至略有升高。硫酸铝添加量从 0 增加到 0.2 g/L 时,悬液中 Cd 浓度降到最低值 4.65  $\mu\text{g/L}$ ,去除率达到 78.08%。而后随硫酸铝添加量的升高,悬液中 Cd 的浓度反而逐渐升高。硫酸铝添加量从 0 增加 0.25 g/L 时,悬液中 Zn 浓度逐渐降低,而后随硫酸铝添加量的增加,悬液中 Zn 浓度略有升高。可见,就去除重金属而言,存在一个硫酸铝的最佳用量。低于最佳用量时,重金属去除效果随硫酸铝用量的增加而增强;高于最佳用量时,重金属去除效果不再增强甚至反而减弱;其原因在于絮凝剂用量不足时,固悬物颗粒不能完全形成大颗粒沉降;絮凝剂过量时,固悬物颗粒量相对不足,也不能形成大絮团沉降。当硫酸铝添加量为 0.25 g/L 时,悬液中 Pb 浓度为 111  $\mu\text{g/L}$ ,Cd 浓度为 9.45  $\mu\text{g/L}$ ,Zn 浓度为 686  $\mu\text{g/L}$ ,悬液 pH 值为 4.93,均符合农田灌溉水质标准。所以建议硫酸铝最佳添加量为 0.25 g/L。

表3 硫酸铝对悬液中 Cd、Pb、Zn 含量及 pH 的影响

Table 3 Effects of aluminum sulfate on pH, Cd, Pb and Zn contents in suspension

添加量 (g/L)	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
pH	7.30	6.72	6.33	5.40	5.28	4.93	4.46	4.08	4.04
Cd ( $\mu\text{g/L}$ )	21.22	12.69	9.64	7.29	4.65	9.45	12.60	13.72	16.11
Pb ( $\mu\text{g/L}$ )	4 166	3 063	2 015	1 007	367	111	127	174	197
Zn ( $\mu\text{g/L}$ )	6 100	5 373	3 867	2 273	859	686	771	802	886

注：表中各数据为平均值，下同。

## 2.2 聚合氯化铝对悬浮液中 Cd、Pb、Zn 的去除效率

聚合氯化铝 (PAC) 在水中形成氢氧化铝凝胶，将水中悬浮物及可溶解杂质通过吸附桥架作用形成大的不溶物集团，从而达到沉降的目的<sup>[20]</sup>。当 pH > 8.5 时， $\text{Al}(\text{OH})_3$  离解成为带负电的铝酸盐；当 pH < 5 时，因吸附了水中  $\text{SO}_4^{2-}$  而带负电。因此，为获得良好的絮凝效果，其 pH 值应控制在 5.5 ~ 8.5<sup>[21]</sup>。由表 4 可知，随着 PAC 添加量的增加，悬液中 Cd、Pb、Zn 浓度均逐渐减少，而悬液 pH 值变化较小，始终维持在 7.1 ~ 7.3 之间。当 PAC 添加量为 0.01 g/L 时，Cd、Zn、Pb 浓度均开始降低。当 PAC 添加量为 0.03 g/L 时，Cd、Pb、Zn 浓度分别减少到

3.22、496、861  $\mu\text{g/L}$ ，去除率分别为 84.83%、88.07% 和 87.93%，其中 Cd、Zn 浓度均达到农田灌溉水质标准，而 Pb 仍超标。在添加量为 0.04 g/L 时，Pb 浓度减少到 157  $\mu\text{g/L}$ ，达到排放标准。考虑到 PAC 添加量对悬液 pH 的变化影响不大，选择其添加量为 0.04 g/L。范玉华<sup>[21]</sup>的 PAC 絮凝效果实验及分析表明 PAC 的最佳添加量也为 0.04 g/L。而楚文海等<sup>[22]</sup>研究含 Pb 废水表明 PAC 的添加量为 10 mg/L 时，Pb 的去除效果就能够达到最好水平，这可能跟悬液的性质或 Pb 的初始浓度有关。李日强等<sup>[23]</sup>比较了几种混凝剂去除煤矿矿井水浊度色度，其中 PAC 效果最好，最佳添加量为 0.02 g/L。

表4 PAC对悬液中 Cd、Pb、Zn 含量及 pH 的影响

Table 4 Effects of PAC on pH, Cd, Pb and Zn contents in suspension

添加量 (g/L)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08
pH	7.30	7.28	7.25	7.28	7.25	7.22	7.20	7.19	7.14
Cd ( $\mu\text{g/L}$ )	21.22	15.69	8.60	3.22	1.08	1.06	0.67	0.64	0.92
Pb ( $\mu\text{g/L}$ )	4 166	3 372	1 787	496	157	46.3	27.3	20.9	23.2
Zn ( $\mu\text{g/L}$ )	6 100	4 289	2 662	861	165	43.4	26.0	46.9	24.3

## 2.3 硫酸亚铁对悬浮液中 Cd、Pb、Zn 的去除效率

硫酸亚铁可以作为絮凝剂去除污水中的 COD 和总磷<sup>[24]</sup>。硫酸亚铁与水结合时，生成的氢氧化铁是胶体，能吸附水中悬浮的杂质，并加速悬浮物沉淀。加入一定量硫酸亚铁可以调节碱性水中的 pH 值。从表 5 可以看出，当加入少量的硫酸亚铁时，悬液中 Cd、Pb、Zn 浓度就迅速减少，在添加量为 0.2 g/L 时，悬液中 Cd、Pb、Zn 浓度分别降至 5.34、1 190、1 861  $\mu\text{g/L}$ ，各元素的去除率分别为 79.36%、79.24% 和 69.48%。pH 值从 7.24 下降到 6.05，悬液中 Cd、Zn 浓度均达到农田灌溉水质标准。随着硫酸亚铁添加量的增加，各元素浓度降低的幅度不大，Cd 浓度反而开始升高，这可能由于硫酸亚铁水解致 pH 下降而不利于沉淀。当硫酸亚铁添加量为 1.0 g/L 时，Pb 浓度下降至 212  $\mu\text{g/L}$ ，

去除率为 96.29%，基本达到排放标准。考虑到硫酸亚铁对 Cd、Pb、Zn 去除效果的差异性，在实际过程中，视悬液中各元素浓度的不同，选择不同的添加量。虽然当硫酸亚铁添加量 > 0.2 g/L 时，Cd 浓度反而上升，但仍在排放标准范围内，因此硫酸亚铁添加量 1.0 g/L 较适宜。徐玲娥等<sup>[25]</sup>研究了硫酸亚铁、PAC、硫酸铝等对制革废水的絮凝沉淀效果，表明以硫酸亚铁为佳，且最佳添加量为 0.5 g/L。

## 2.4 氧化钙对悬浮液中 Cd、Pb、Zn 的去除效率

氧化钙 (CaO) 可作为强碱性药剂中和酸性废水或者重金属废水，使酸性废水成为中性。CaO 投入水中形成氢氧化钙，使多种重金属离子形成氢氧化物沉淀，与某些硫酸根、碳酸根等离子形成钙盐沉淀，同时对废水中胶体微粒能起助凝作用，并作为颗粒核增

表 5 硫酸亚铁对悬液中 Cd、Pb、Zn 含量及 pH 的影响

Table 5 Effects of ferrous sulfate on pH, Cd, Pb and Zn contents in suspension

添加量 (g/L)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
pH	7.30	6.05	5.85	5.74	5.73	5.70	5.69	5.61	5.54
Cd ( $\mu\text{g/L}$ )	21.22	5.34	5.86	8.03	8.78	9.01	8.65	9.50	10.77
Pb ( $\mu\text{g/L}$ )	4 166	1 190	628	322	320	212	187	152	114
Zn ( $\mu\text{g/L}$ )	6 100	1 861	1 332	1 189	822	676	708	699	763

重剂, 加速不溶物的分离。从表 6 可以看出, CaO 对含重金属悬液处理效果较好。各元素的含量都随着 CaO 添加量的增加而迅速减小。当添加量为 0.1 g/L 时, 悬液中 Cd、Pb、Zn 含量分别减小为 4.57、851 和 1 542  $\mu\text{g/L}$ , 去除率分别达到 82.32%、85.15% 和 74.73%, 其中 Cd、Zn 含量均达到农田灌溉水质标准, 悬液 pH 值为 10.1, 这与刘素萍等<sup>[26]</sup>提到的石灰法处理含 Zn

废水的最佳 pH 值 9.8 相近; 同时蒋剑虹等<sup>[27]</sup>证明石灰乳调节 pH 至 10 以上时 Cd、Zn 浓度均可达标。当 CaO 添加量为 0.3 g/L 时, 悬液中 Pb 含量减小到 153  $\mu\text{g/L}$ , 去除率达到 97.32%, 符合排放标准, 此时 pH 值为 11.3。由于 Pb 的特殊性, 而其他元素含量随着添加量的增加能继续减少, 在 0.3 g/L 时都能去除 90% 以上, 故选择 CaO 的投加量为 0.3 g/L。

表 6 CaO 对悬液中 Cd、Pb、Zn 含量及 pH 的影响

Table 6 Effects of calcium oxide on pH, Cd, Pb and Zn contents in suspension

添加量 (g/L)	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
pH	7.30	10.1	10.9	11.3	11.4	11.6	11.6	11.7	11.8
Cd ( $\mu\text{g/L}$ )	21.22	4.57	1.88	0.20	0.56	0.44	0.35	0.34	0.29
Pb ( $\mu\text{g/L}$ )	4 166	851	410	153	117	113	114	124	135
Zn ( $\mu\text{g/L}$ )	6 100	1 542	931	184	119	93	91	97	75

## 2.5 4 种絮凝剂对悬浮液中 Cd、Pb、Zn 的去除成本比较

4 种絮凝剂细颗粒悬液絮凝沉降的最佳投加量分别为: 硫酸铝 0.25 g/L, PAC 0.04 g/L, 硫酸亚铁 1.0 g/L, CaO 0.3 g/L。絮凝成本依次为硫酸亚铁 > 硫酸铝 > PAC > CaO (表 7)。CaO 可以调节废水 pH 值, 使多种重金属离子形成氢氧化物沉淀, 并加速沉淀物的固液分离。因此, 选择 CaO 作为最佳絮凝剂。pH 值对重金属离子的去除有着重要的影响。一般来讲 pH 值越高, 重金属离子浓度越低, 但对 Pb、Zn 等两性金属而言, pH 过高会形成络合离子而使沉淀物发生反溶, 致使废水中的重金属离子浓度增加。张亚男<sup>[28]</sup>研究了石灰对含重金属离子废水的絮凝效果, 发现对废液中 Cd、Pb、Zn 的最佳去除效果的 pH 范围分别为: 8.5~11、8.5~11 和 9~10。王绍文和齐龙武<sup>[29]</sup>在文献中提到用石灰中和法处理含 Cd 废水, 其 pH 值应在 11 左右才能使其浓度最小。李东伟等<sup>[30]</sup>研究认为 Cd、Pb、Zn 的综合最佳 pH 值为 9.2。谢红斌<sup>[31]</sup>用石灰中和法处理重金属废水, 研究表明 pH 在 8~9 范围内, Cu、Pb、Zn 可以得到较好的处理效果。本研究

中, 从 CaO 对悬液中 Cd、Pb、Zn 的去除效果来看, 悬液中 Cd、Zn 浓度在 pH 值为 10.1 时就达到了农田灌溉水质标准, Pb 浓度在 pH 值为 11.3 才能达标排放, 因此选择最佳 pH 值范围为 10~11, 这与部分学者研究的结果相似。在实际操作中可根据悬液的中各元素的污染程度选择适当的 pH 值。

表 7 4 种絮凝剂成本比较

Table 7 Cost comparison between four flocculants

试剂	价格 (元/t)	絮凝成本 (元/万 t)
硫酸铝	760	1 900
PAC	2 500	1 000
硫酸亚铁	450	4 500
CaO	300	900

注: 表中试剂价格按本研究中各化学试剂购买价格换算。

## 3 结论

本研究结果表明, 在颗粒分选阶段采用价格低廉的絮凝剂对含重金属细颗粒悬液进行絮凝沉降能有效的将重金属颗粒分离, 相对国外采用水力旋流器及螺旋分级器而言降低了分选成本。主要结果如下:

(1) 悬液中 Cd、Pb、Zn 浓度随着硫酸铝添加量的增加呈先逐渐降低后上升的趋势, 其中 Cd 变化趋势最明显; 3 种元素随着 PAC 和 CaO 添加量增加而迅速降低; 随着硫酸亚铁添加量的增加, 上清液明显逐渐变黄, 其中 Pb、Zn 浓度逐渐降低, 而 Cd 浓度先迅速降低后逐渐回升。

(2) 综合悬液中 Cd、Pb、Zn 的去除效果, 确定硫酸铝、PAC、硫酸亚铁和 CaO 的最佳添加量分别为: 0.25、0.04、1.0、0.3 g/L, 此时 3 种元素浓度均达到农田灌溉水质标准。

(3) 4 种絮凝剂的絮凝成本依次为: 硫酸亚铁 > 硫酸铝 > PAC > CaO。因此, 选择 CaO 作为含细颗粒悬液的最佳絮凝剂, 相应的最佳絮凝 pH 范围为 10 ~ 11。

#### 参考文献:

- [1] 林珍珠, 杜葱远, 王果, 李英曲, 林晓丹. 三种淋洗剂对污染土壤中 Cd、Pb、Zn 去除效果的研究. *安全与环境学报*, 2009, 9(2): 44-48
- [2] 曾敏, 廖柏寒, 曾如清, 张永, 欧阳彬. 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. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4): 979-982
- [3] Assink JW, Rulkens WH. Cleaning soils contaminated with heavy metals. *Proceedings of the 2nd European Conference on Environmental Technology*, Amsterdam, The Netherlands, 1987: 502-512
- [4] Reed BE, Carriere PC, Moore R. Flushing of Pb(II) contaminated soil using HCl, EDTA, and CaCl<sub>2</sub>. *J. Environ. Eng.*, 1996, 122(1): 48-50
- [5] Finzgar N, Lestan D. Multi-step leaching of Pb and Zn contaminated soils with EDTA. *Chemosphere*, 2007, 66(5): 824-832
- [6] Lim TT, Tay JH, Wang JY. Chelating-agent-enhanced heavy metal extraction from a contaminated acidic soil. *Journal of Environment Engineering*, 2004, 130(1): 59-66
- [7] Acosta JA, Faz Cano A, Arocena JM, Debela F, Martinez-Martinez S. Distribution of metals in soil particle size fractions and its implication to risk assessment of playgrounds in Murcia City (Spain). *Geoderma*, 2009, 149: 101-109
- [8] Karin Ljung, Olle Selinus, Erasmus Otabbong, Marika Berglund. Metal and arsenic distribution in soil particle sizes relevant to soil ingestion by children. *Applied Geochemistry*, 2006, 21: 1 613-1 624
- [9] Ajmone-Marsan F, Biasioli M, Kralj T, Grcman H, Davidson CM, Hursthouse AS, Madrid L, Rodrigues S. Metals in particle-size fractions of the soils of five European cities. *Environmental Pollution*, 2008, 152: 73-81
- [10] 张慧敏, 王丽平, 章明奎. 城市土壤不同颗粒中重金属的分布及其对人体吸入重金属的影响. *广东微量元素科学*, 2007, 14(7): 14-19
- [11] 李恋卿, 潘根兴, 张平究, 龚伟. 太湖地区水稻土颗粒中重金属元素的分布及其对环境变化的响应. *环境科学学报*, 2001, 21(5): 607-612
- [12] Luttrell GH, Westerfield TC, Kohmuench JN, Mankosa MJ, Mikkola KA, Oswald G. Development of high-efficiency hydraulic separators. *Min. Metallur. Process.* 2006, 23(1): 33-39
- [13] Mercier G, Duchesne J, Blackburn D. Prediction of the efficiency of physical methods to remove metals from contaminated soils. *J. Environ. Eng.*, 2001, 127 (4): 348-358
- [14] Vanthuyne MA, Maes, Cauwenberg P. The use of flotation techniques in the remediation of heavy metal contaminated sediments and soils: An overview of controlling factors. *Miner. Eng.* 2003, 16(11): 1 131-1 141
- [15] 洪国军, 杨铁笙. 黏性细颗粒泥沙絮凝及沉降三维模型. *水利学报*, 2006, 37(2): 172-177
- [16] 郝文奇, 周美华. 絮凝剂的研究现状及发展前景. *内蒙古环境保护*, 2004, 16(1): 12-15
- [17] 刘耕耘, 李亚威, 赛音. 淀粉废水的絮凝沉淀及生物处理. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2002, 33(2): 230-235
- [18] 王猛, 施宪法, 柴晓利. 微生物絮凝剂的研究与应用. *化工环保*, 2001, 21(6): 328-332
- [19] 鲁如坤主编. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [20] 隋永强, 梁成浩, 姜毅. 絮凝剂的研究现状及发展趋势. *石油化工腐蚀与防护*, 2003, 20(6): 14-17
- [21] 范玉华. PAC 絮凝效果实验及分析. *内蒙古石油化工*, 2009(21): 48-49
- [22] 楚文海, 高乃云, 姚娟娟, 尚亚波, 秦祖群. 重金属 Pb 污染原水的应急处理工艺研究. *环境科学*, 2008, 29(10): 2 841-2 845
- [23] 毕翀宇, 李日强, 刘娜, 王爱英. 煤矿矿井水的混凝处理. *安全与环境学报*, 2009, 9(1): 27-29
- [24] 孙力平, 张炎, 刘文亚, 李殿海, 姜威, 宁皓, 翟继广. 天津纪庄子再生水厂混凝沉淀工艺技术研究. *工业水处理*, 2007(9): 60-65
- [25] 徐娥玲, 郭永福, 赵宏. 絮凝沉淀法处理制革废水的研究. *苏州科技学院学报*, 2005, 18(4): 8-10
- [26] 刘素萍, 罗斌, 唐锦涛. 石灰法处理重金属废水. *工程设计与研究*, 1999, 104: 55-59

- [27] 蒋剑虹, 曾光明, 张盼月, 张西林. 锌冶炼厂重金属废水处理试验研究. *工业水处理*, 2005, 25(11): 44-46
- [28] 张亚男. 以石灰作絮凝沉淀剂处理含重金属离子废水. *辽宁城乡环境科技*, 16(4): 45-46.
- [29] 王绍文, 齐龙武. 硫化物沉淀法处理重金属废水的实践与发展. *城市环境与城市生态*, 1993, 6(3): 41-44
- [30] 李东伟, 袁雪, 王克浩, 杨建, 李斗. 化学沉淀-铁氧体法处理重金属废水实验研究. *重庆建筑大学学报*, 2007, 29(2): 90-91
- [31] 谢红斌. 分段中和法处理重金属废水的研究及应用. *湖南有色金属*, 2003, 19(4): 35-37

## Effects of Removing Heavy Metals from Suspensions Separated by Soil Washing with Four Flocculants

SONG Yong-wei, WANG Guo, HU Xin-xin, WANG Zhen-da

(College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** In order to determine the optimal flocculants and the corresponding dosage, the effects of four flocculants (including aluminum sulfate, polyaluminium chloride, ferrous sulfate and calcium oxide) were studied for removing cadmium, lead, zinc from the suspension containing fine soil particles separated by soil washing process. The concentrations of cadmium, lead and zinc in the suspension were decreased firstly and then increased with the increasing dosage of aluminum sulfate. The concentrations of these three heavy metals were rapidly decreased with the increasing dosage of polyaluminium chloride and calcium oxide. However, when the dosage of ferrous sulfate increased, the concentrations of lead and zinc were decreased, and the concentrations of cadmium rapidly were decreased and then slightly increased. By comparison, the best flocculation dosage of these four flocculants for the flocculation and precipitation of the particles in the suspension were 0.25, 0.04, 1.0 and 0.3 g/L, respectively. When the suspensions treated with the optimal dosage of each flocculants, the concentrations of these three heavy metals were all below the irrigation water quality standards of China. Using the optimal dosage, the cost of flocculant for treating the same volume of suspensions were ferrous sulfate > aluminum sulfate > polyaluminium chloride > calcium oxide. In conclusion, calcium oxide was the optimal flocculants for treating the suspension containing fine particles, and the corresponding optimal pH range was 10 to 11.

**Key words:** Soil washing, Suspensions, Heavy metals, Optimal flocculants, Calcium oxide