

# 土壤环境中重金属元素的相互作用 及其对吸持特性的影响\*

余国营\*\* 吴燕玉

(中国科学院沈阳应用生态所, 沈阳, 110015)

## 摘 要

本文用正交试验法研究了 Cd, Pb, Cu, Zn, As 五种元素复合作用时土壤颗粒的吸附解吸特性. 结果表明: 供试元素的吸附过程均符合 Langmuir 方程, 其吸持能力依次为  $Pb > As > Cu > Zn > Cd$ , 而最大吸附量顺序正好相反. Cd, As 为复合污染的主要因子, 同时还显著地影响其它元素的吸附解吸过程. 土壤对重金属元素的吸附和解吸量不仅与平衡溶液中元素浓度有关, 而且还明显地受共存元素及其交互作用的影响, 交互作用的结果与元素间的相对浓度及其比例有关.  $AsO_4^{3-}$  的存在使 Cd, Pb, Cu, Zn 的吸附解吸过程变得极为复杂, 这可能与产生重金属盐沉淀和次级吸附和解吸有关.

关键词: 复合作用, 正交试验, 吸附, 解吸, 生态风险.

重金属元素进入土壤环境, 不管从植物营养方面还是环境污染方面, 起作用的往往不是重金属的总量, 而是其中具有活性的一小部分, 吸附-解吸过程被认为是控制重金属离子溶解度的最主要的化学反应过程之一<sup>[1]</sup>, 本文以沈阳张士灌区重金属污染为背景, 采用正交试验设计, 研究 Zn, Cd, Cu, Pb, As 五种元素复合污染条件下在土壤中的吸附-解吸行为, 旨在揭示重金属元素在土壤环境中的相互作用规律和复合作用机理, 为制定土壤环境标准和进行环境质量评价、确定土壤环境容量、保护土壤生态环境提供科学依据.

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试土壤为草甸棕壤, 取自中国科学院沈阳生态试验站, 其理化性质和元素背景值见表 1. 化学试剂分别为 Pb:  $Pb(CH_3COO)_2$ , Cd:  $CdCl_2 \cdot 2H_2O$ , Cu:  $CuCl_2 \cdot 6H_2O$ , Zn:  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  和 As:  $Na_2HAsO_4 \cdot 3H_2O$ .

### 1.2 试验设计

因供试元素 Pb, Cd, Cu, Zn 为阳离子, As 为阴离子, 为了避免阴阳离子化学应对吸附解吸的影响, 所以本试验在以  $L_{16}(2^{13})$  正交表进行五种元素试验的同时, 还以  $L_8(2^7)$  正交试验研究 Cd, Pb, Cu, Zn 四种元素间的交互作用. 其处理因子和水平见表 2.

\* 国家自然科学基金资助课题. \*\* 现在中国科学院水生生物研究所从事博士后研究.

表 1 供试土壤的基本性质和元素背景值

Table 1 The properties and the elements background of tested soil

| 基本性质                          |      | 机械组成/% |      | 元素背景值/mg · kg <sup>-1</sup> |      |    |      |
|-------------------------------|------|--------|------|-----------------------------|------|----|------|
| pH                            | 6.7  | 沙粒     | 23.5 | Cd                          | 0.13 | Zn | 69.8 |
| 有机质/%                         | 1.5  | 粉粒     | 44.3 | Pb                          | 25.7 | As | 10.4 |
| CEC/me · 100g <sup>-1</sup> 土 | 24.2 | 粘粒     | 32.2 | Cu                          | 19.1 |    |      |

表 2 处理元素和水平 (mg · l<sup>-1</sup>)Table 2 The factors and their level of the experiment (mg · l<sup>-1</sup>)

| 正交设计                                    | 水平 | Zn    | Cd    | Zn-Cd | Cu    | Zn-Cu | Pb | Zn-Pb |
|---|----|-------|-------|-------|-------|-------|----|-------|
| (I) L <sub>8</sub> (2 <sup>7</sup> )    | 1  | 20    | 1     |       | 5     |       | 5  |       |
|   | 2  | 100   | 10    |       | 40    |       | 50 |       |
| (II) L <sub>16</sub> (2 <sup>13</sup> ) | 1  | 20    | 1     |       | 5     |       | 5  |       |
|   | 2  | 100   | 10    |       | 40    |       | 50 |       |
| 正交设计                                    | 水平 | Cd-Pb | Cu-As | Cd-As | Zn-As | As    |    |       |
| (I) L <sub>16</sub> (2 <sup>13</sup> )  | 1  |       |       |       |       | 5     |    |       |
|   | 2  |       |       |       |       | 50    |    |       |

### 1.3 试验方法

称取过 20 目筛的土壤样品 2g, 加相应处理浓度重金属溶液 20ml (液:土=10:1), 以 0.1mol · l<sup>-1</sup> NaNO<sub>3</sub> 作支持电解质, 在 25±1℃ 条件下振荡 12h (不含 As 时为 2h), 离心 (3000r · min<sup>-1</sup>), 取上清液 I, 剩余样品用少量去离子水清洗, 烘干后加 1mol · l<sup>-1</sup> CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> 溶液 20ml, 同样温度下振荡 2h, 放置 60h (不含 As 时为 12h), 离心, 取上清液 II. 然后测定上清液 I 和 II 中 Cd, Pb, Cu, Zn, As 的浓度, 并由上清液 I 与处理溶液元素浓度求得土壤吸附量、上清液 II 元素浓度求得土壤重金属元素解吸量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属复合作用与土壤吸附

#### 2.1.1 Cd, Pb, Cu, Zn, As 在棕壤中的吸附特征

在实验条件下, 供试土壤对重金属的吸附数据均可用 Langmiur 方程进行拟合:

$$\frac{C}{X/m} = \frac{1}{Kb} + \frac{C}{b}$$

式中, C: 溶液平衡时重金属元素的浓度 (μg · ml<sup>-1</sup>), X/m: 单位重量土壤的吸附值 (μg · mg<sup>-1</sup>), K: Langmiur 结合系数 (ml · μg<sup>-1</sup>), b: 最大吸附值 (μg · mg<sup>-1</sup>). 重金属吸附数据均以很高的回归系数与 Langmiur 方程吻合 (表 3). 结合系数 K 和吸附最大值 b 对五种重金属元素差别很大. 这些差别明显地反映出土壤胶体及有机物对每种元素的作用. 供试土壤对五种元素吸附量的大小顺序为: Cd>Zn>Cu>As>Pb, 而吸附能力的大小则依次为: Pb>As>Cu>Zn>Cd.

表 3 供试元素的 Langmiur 方程参数

Table 3 Parameters of Langmiur equation for tested elements

| 元素       | Cd     | Pb     | Cu     | Zn     | As     |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <i>R</i> | 0.9993 | 0.9998 | 0.9978 | 0.9976 | 0.9983 |
| <i>b</i> | 7.22   | 0.54   | 6.43   | 6.77   | 3.53   |
| <i>K</i> | 0.107  | 0.439  | 0.143  | 0.114  | 0.184  |

## 2.1.2 共存元素及其交互作用对土壤吸附的影响

对 Zn, Cd, Cu, Pb, As 的吸附量进行方差分析, 结果表明, 共存元素及其交互作用对土壤的吸附值均具有显著的影响 (表 4), 各因子对不同元素吸附影响的顺序如下:

Zn: Zn\*\* > Cu-As\*\* > As\*\* > Cu\*\* > As-Pb\* > Zn-Cd\*  
 Cd: Cd\*\* > Cd-As\*\* > Zn-Cd\*\* > As\* > Cd-Pb\*  
 Cu: Cu\*\* > Zn\*\* > Zn-Cu\*\*  
 Pb: Pb\*\* > Cd-Pb\*\* > Zn-Pb\*\* > Zn-As\*\* > Zn\* > Cu\*  
 As: As\*\* > Cd-As\*\* > Zn-As\*\* > Cd\*\* > Zn-Cd\*

表 4 土壤重金属吸附解吸量方差分析 (F 值)

Table 4 Variance analysis (F value) of heavy metals sorption and desorption in tested soil

| 因素    | Zn       |         | Cd      |         | Cu       |         | Pb      |         | As      |         |
|-------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       | 吸附       | 解吸      | 吸附      | 解吸      | 吸附       | 解吸      | 吸附      | 解吸      | 吸附      | 解吸      |
| Zn    | 127.71** | 41.04** | 1.46    | 0.46    | 44.13**  | 0.11    | 8.6*    | 9.23*   | 2.02    | 2.43    |
| Cd    | 3.1      | 7.21    | 59.38** | 48.73** | 2.79     | 11.44** | 2.1     | 5.32    | 3.46    | 10.91** |
| Zn-Cd | 7.74*    | 10.78** | 17.44** | 12.54** | 3.65     | 9.48*   | 2.23    | 10.87** | 1.84    | 8.12*   |
| Cu    | 11.24**  | 10.68*  | 2.48    | 1.12    | 123.09** | 35.74** | 8.61*   | 12.18** | 1.21    | 0.52    |
| Zn-Cu | 5.81     | 10.91** | 1.97    | 0.78    | 10.03*   | 0.14    | 2.48    | 3.61    | 2.67    | 3.88    |
| As-Pb | 8.14*    | 6.41    | 1.69    | 0.31    | 0.52     | 0.69    | 4.44    | 0.97    | 0.94    | 2.11    |
| Pb    | 3.4      | 9.43*   | 4.3     | 2.22    | 2.28     | 0.08    | 255.2** | 41.92** | 4.11    | 3.34    |
| Zn-Pb | 0.84     | 2.14    | 1.41    | 0.64    | 1.84     | 1.23    | 21.28** | 10.21*  | 1.43    | 3.86    |
| Cd-Pb | 2.21     | 0.12    | 8.88*   | 0.48    | 0.28     | 0.23    | 22.11** | 14.84** | 1.42    | 2.22    |
| Cu-As | 22.34**  | 6.14    | 4.77    | 0.51    | 0.84     | 0.47    | 2.32    | 4.34    | 0.88    | 1.39    |
| Cd-As | 3.87     | 1.21    | 23.23** | 15.54** | 1.68     | 1.21    | 6.61    | 12.17** | 11.14** | 14.38** |
| Zn-As | 3.43     | 1.33    | 6.4     | 10.81** | 3.1      | 0.68    | 11.69** | 2.71    | 13.71** | 11.13** |
| As    | 12.4**   | 6.44    | 8.91*   | 3.39    | 4.74     | 6.84    | 1.25    | 13.41** | 27.56** | 34.36** |

注: \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ .

土壤对 Zn 的吸附首先决定于平衡溶液中 Zn 的浓度, 然后依次受 As, Cu, Pb, Cd 的影响, Zn 吸附值与溶液 Zn 浓度呈正比, 高浓度的 Cd, Cu, As, Pb 对土壤 Zn 具有抑制作用, 而以 Cu, As 的影响更明显. 土壤对 Cd 的吸附值随土壤溶液浓度的增大而增大, 高浓度的 Pb, As 则对土壤 Cd 具有抑制作用, Zn, Cu 的这种影响较轻. 对土壤 Cu 吸附的影响, Cu 的浓度居首位, 与浓度呈正比, 其次为 Zn 的影响, 可能存在着某种竞争吸附机制<sup>[2]</sup>, Cd 和 As 的影响类似于 Zn, 程度较轻, Pb 对 Cu 的影响不明显. 土壤 Pb 吸

附量首先决定于平衡溶液的浓度, 与其呈正相关, Cd, As 的影响最明显. 土壤 As 吸附量也与平衡溶液 As 浓度呈显著正相关, 低浓度 Zn, Cd, Cu, Pb 均能增加土壤 As 吸附量, 而高浓度的 Zn, Cd, Pb 具有明显的抑制作用, Cu 的影响较小. 土壤对各元素的吸附量与共存元素均具有较好的相关关系, 见表 5.

表 5 共存元素对土壤吸附解吸值的影响 ( $n=48$ )

Table 5 Effects of heavy metals on the sorption and desorption of the elements in tested soil

| 指标 | 影响顺序              | 回归方程   | 相关系数   |
|----|-------------------|--|--------|
| Zn | 吸附 Zn>As>Cu>Pb>Cd | $y=1165.2Zn+58.2Cd-180.7Cu+74.5Pb-191.4As-549.7$ | 0.9913 |
|    | 解吸 Zn>Cu>Pb>As>Cd | $y=278.1Zn+4.08Cd+38.97Cu+35.7Pb-24.8As-346.7$   | 0.9879 |
| Cd | 吸附 Cd>As>Pb>Cu>Zn | $y=5.7Zn+119.8Cd+8.47Cu-12.5Pb-21.8As-73.9$      | 0.9924 |
|    | 解吸 Cd>As>Cu>Pb>Zn | $y=3.9Zn+100.5Cd+11.45Cu-11.5Pb-16.8As-69.6$     | 0.9911 |
| Cu | 吸附 Cu>Zn>As>Cd>Pb | $y=-155.6Zn+18.3Cd+387.2Cu+12.8Pb-26.1As-88.6$   | 0.9796 |
|    | 解吸 Cu>Cd>As>Zn>Pb | $y=2.3Zn+46.7Cd+137.3Cu-2Pb-14.7As-139.8$        | 0.9923 |
| Pb | 吸附 Pb>Zn>Cu>As>Cd | $y=60.7Zn-36.4Cd+59.6Cu+809.2Pb-57.1As-770.2$    | 0.9959 |
|    | 解吸 Pb>Cu>As>Zn>Cd | $y=45.8Zn+36.2Cd+115.8Cu+122.6Pb-62.5As+268$     | 0.9894 |
| As | 吸附 As>Cd>Pb>Zn>Cu | $y=-31.4Zn-63.2Cd-25.9Cu+57.9Pb+223.6As-41.4$    | 0.9978 |
|    | 解吸 As>Cd>Pb>Zn>Cu | $y=-15.7Zn-44.8Cd-2.6Cu+16.1Pb+120.7As+2.6$      | 0.9689 |

比较五元素组与四元素组<sup>[3]</sup>的试验结果, 不难发现五元素组的吸附量明显高于四元素组, 其一是可能存在着次级吸附, 即在土壤颗粒与离子之间交换性吸附或专性吸附外, 因  $AsO_4^{3-}$  的存在, 形成二级吸附, 其二可能与阳离子和  $AsO_4^{3-}$  产生化学沉淀有关.

土壤对重金属元素的吸附不仅受土壤溶液该元素浓度和共存元素的影响, 而且还与元素间的交互作用有关 (图 1). 据计算,  $Zn_1Cd_1$  处理 Zn 的吸附量为  $129.5\mu g \cdot g^{-1}$ ,  $Zn_2Cd_1$  为  $680.6\mu g \cdot g^{-1}$ ,  $Zn_1Cd_2$  为  $127\mu g \cdot g^{-1}$ ,  $Zn_2Cd_2$  为  $741.4\mu g \cdot g^{-1}$ ; 而 Cd 的吸附量, 在  $Zn_1Cd_1$  时为  $8.1\mu g \cdot g^{-1}$ ,  $Zn_2Cd_1$  为  $8\mu g \cdot g^{-1}$ ,  $Zn_1Cd_2$  为  $65\mu g \cdot g^{-1}$ ,  $Zn_2Cd_2$  为  $70.8\mu g \cdot g^{-1}$ . 即当 Zn/Cd 为 10 时, 高 Cd, Zn 浓度交互作用的结果均有利于土壤 Cd, Zn 的吸附. Zn-Pb 交互作用主要是对 Pb, Zn, As 的影响, 对 Cd, Cu 的影响较小, 较大的 Zn/Pb 比对土壤 Pb 的吸附具有抑制作用. Zn/Pb 交互作用对 As 的影响与 Zn/Pb 有关, Zn/Pb 愈小, 愈对 As 吸附有促进作用, 高 Zn/Pb 比对 As 吸附具有抑制作用.

在供试的五种元素中, As 是以  $AsO_4^{3-}$  存在, As 与金属离子的交互作用更为显著 (图 2). 对 Zn 吸附的影响, As-Pb, Cu-As, Cd-As, Zn-As 均有较显著的作用, 在 Cd-As 中, Cd 和 As 的浓度愈大且 As/Cd 也愈大, 就愈有利于 Zn 的吸附; 在 Cu-As 中, As/Cu 愈小, Zn 吸附量愈大; Pb-As 交互作用的结果正与 Cd-As 相反, 即 Pb 和 As 浓度愈低且 As/Pb 也低时, 愈有利于 Zn 的吸附. 对土壤 Cd 吸附的影响主要是 Cd-As 和 Zn-As, Cu-As 和 Pb-As 的影响较小, 经计算  $As_1Cd_1$  为  $45\mu g \cdot g^{-1}$ ,  $As_2Cd_1$  为  $32\mu g \cdot g^{-1}$ ,  $As_1Cd_2$  为  $41\mu g \cdot g^{-1}$ ,  $As_2Cd_2$  为  $44\mu g \cdot g^{-1}$ , 较高的 As/Cd 能减少土壤 Cd 的吸附. 土壤 Cd 吸附量也与 As/Zn 比显著相关, 随之增大而减小. 交互作用对 Cu 吸附的影响只有 Zn-As 较显著, 低 As/Zn 比, Zn-As 可促进土壤 Cu 吸附, 高 As/Zn 比, Zn-As 可减弱

土壤对Cu的吸附,如As<sub>1</sub>Zn<sub>2</sub>的Cu吸附值为239μg·g<sup>-1</sup>,As<sub>2</sub>Zn<sub>1</sub>则为33μg·g<sup>-1</sup>.交互作用对土壤Pb吸附的影响主要有Pb-As,Cd-As,和Zn-As,只有Cu-As的交互作用不明显.

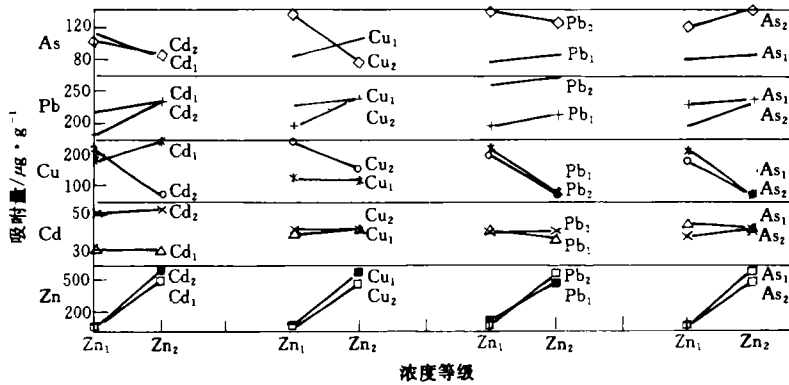


图1 Zn与Cd,Cu,Pb,As的交互作用对土壤吸附的影响

Fig. 1 Effects of interaction between Zn and Cd, Cu, Pb, As on the sorption of the elements in soil

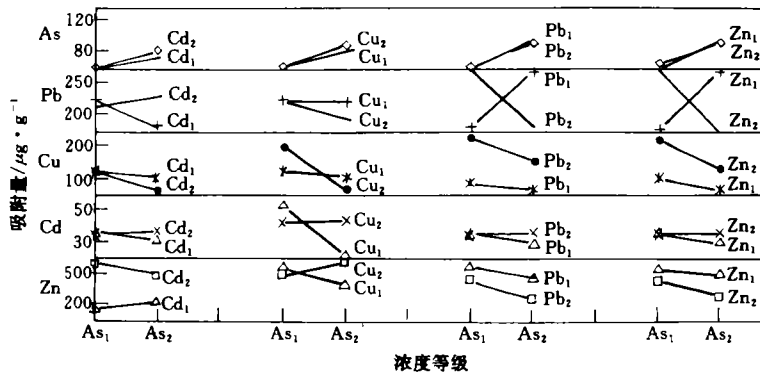


图2 As与Cd,Cu,Pb,Zn的交互作用对土壤吸附的影响

Fig. 2 Effects of interaction between As and Cd, Cu, Pb, Zn on the sorption of the elements in soil

### 2.2 Cd, Pb, Cu, Zn, As 及其交互作用与土壤解吸

表5还列出了不同处理下土壤对Zn,Cd,Cu,Pb,As解吸值的方差分析结果,表明共存元素及其交互作用对土壤离子解吸均具有明显的影响,其影响因子顺序为:

- Zn: Zn<sup>\*\*</sup>>Zn-Cu<sup>\*\*</sup>>Zn-Cd<sup>\*\*</sup>>Cu<sup>\*</sup>
- Cd: Cd<sup>\*\*</sup>>Cd-As<sup>\*\*</sup>>Cu<sup>\*\*</sup>>Zn-As<sup>\*\*</sup>
- Cu: Cu<sup>\*\*</sup>>Cd<sup>\*\*</sup>>Zn-Cd<sup>\*</sup>
- Pb: Pb<sup>\*\*</sup>>Cd-Pb<sup>\*\*</sup>>As<sup>\*\*</sup>>Zn-Cu<sup>\*\*</sup>=Cd-As<sup>\*\*</sup>>Zn-Cd<sup>\*\*</sup>>Zn-Pb<sup>\*</sup>
- As: As<sup>\*\*</sup>>Cd-As<sup>\*\*</sup>>Zn-As<sup>\*\*</sup>>Cd<sup>\*\*</sup>>Cu<sup>\*</sup>

共存元素对Zn,Cd解吸的影响类同于共存元素对Zn,Cd吸附的影响,而对Cu,Pb,As解吸的影响则不同.Zn,Cd,Pb浓度的增加能够增加Zn的解吸量,Zn,Cd,Cu浓度的增大则有利于土壤Cd的解吸.对土壤Cu解吸影响的顺序为Cu>Cd>As>Zn>Pb,其

中 Zn, Cd, Cu 有利于 Cu 的解吸, 而 Pb, As 浓度的增大则减轻了土壤 Cu 的解吸. 对土壤 Pb 解吸影响的顺序依次为  $Pb > Cu > As > Zn > Cd$ , 只有元素 As 抑制 Pb 的解吸释放, Pb, Cu, Zn, Cd 的存在均有利于土壤 Pb 的解吸. 土壤 As 解吸量与平衡溶液 As 浓度呈正相关, 而与 Pb, Zn, Cd, Cu 的贮量成反比例, 其交互作用表现极为复杂.

### 2.3 土壤重金属离子吸附与解吸的相关性

对不同元素的吸附量和解吸量进行回归分析, 结果表明它们具有显著的相关性, 其回归方程和相关系数如下 ( $y$  为解吸量,  $x$  为吸附量):

|     |                        |                               |
|-----|------------------------|-------------------------------|
| Zn: | $y = -15.17 + 0.2167x$ | $r = 0.9163$ ( $n = 48$ , 下同) |
| Cd: | $y = -0.29 + 0.84x$    | $r = 0.9968$                  |
| Cu: | $y = -102.75 + 35.73x$ | $r = 0.8229$                  |
| Pb: | $y = -121.69 + 37.1x$  | $r = 0.8572$                  |
| As: | $y = 7.35 + 0.492x$    | $r = 0.9643$                  |

重金属离子进入土壤环境, 其吸附有四种形式, 即 (1) 与土壤胶体吸附, (2) 与腐殖质发生离子交换, (3) 与腐殖酸或富里酸等结合或螯合, (4) 发生化学反应产生沉淀. 前三种为物理或物化吸附, 这种吸附通常能被中性盐、缓冲液或稀酸等所解吸<sup>[4]</sup>. 比较本试验的吸附和解吸量, 可以看出, 土壤所吸附的 Cd, 约 70% 以上是物理吸附, 易被解吸, 因此, Cd 进入土壤后, 生态风险较大, 易发生迁移. 土壤所吸附的 Cu 约有 40% 为物理或物化吸附, 故土壤 Cu 的环境容量较大. 而土壤中的 Zn 和 Pb, 多为化学吸附, 易被解吸出来的 Zn, Pb 仅占 30% 以下, 比例较小, 迁移能力较弱, 尤以 Pb 的惰性为突出. 土壤中 As 的易解吸比例占 50%, 活性大于 Zn, Cu 和 Pb, 故易发生土壤 As 的污染.

土壤中存在阴离子  $AsO_4^{3-}$  以后, 其吸附解吸过程变得复杂的多, 这不仅与阴离子发生化学反应生成难溶化合物有关, 也与土壤胶体产生的次级吸附和解吸过程有关. 在供试的五种元素中, 能够生成化合物的溶度积常数分别为  $Cd_3(AsO_4)_2: K_{sp} = 2.2 \times 10^{-33}$ ,  $Cu_3(AsO_4)_2: 7.6 \times 10^{-36}$ ,  $Pb_3(AsO_4)_2: 8.0 \times 10^{-43}$ ,  $Zn_3(AsO_4)_2: 1.1 \times 10^{-27}$ . 相对来说,  $Zn_3(AsO_4)_2$  和  $Cd_3(AsO_4)_2$  较易溶解, 而  $Cu_3(AsO_4)_2$  和  $Pb_3(AsO_4)_2$  溶解度较低, 故解吸量也较低, 解吸过程较复杂, 出现曲线回归, 相关系数也较低. 同时也可能与次级吸附和解吸有关, 董厚庭(1992)报道<sup>[3]</sup>, 土壤 Zn, Cd 的吸附解吸中, 随着磷酸含量的增加, 土壤中交换吸附和专性吸附(包括化学沉淀)均增加, 交换解吸量下降, 存在着次级吸附和解吸机制. 由于  $PO_4^{3-}$  和  $AsO_4^{3-}$  具有相似的化学性质, 故认为也可能与这种机制有关.

综上所述, 我们可以得出如下结论:

(1) 供试元素 Cd, Pb, Cu, Zn, As 的吸附过程均可用 Langmuir 方程进行拟合, 不同的元素其最大吸附量和吸附系数是不同的. 吸附量的大小顺序为  $Cd > Zn > Cu > As > Pb$ , 而吸持能力为  $Pb > As > Cu > Zn > Cd$ , 正相反.

(2) 土壤发生 Cd, Pb, Cu, Zn, As 复合污染时, Cd 和 As 为主要污染因子, 这不仅与其毒性有关, 而且它们活性较大, 易从土壤颗粒解吸出来进入土壤溶液被植物吸收, 并经食物链威胁人类健康. 另外, Cd, As 对各元素的吸附解吸的影响也最显著.

(3) 土壤对重金属元素的吸附和解吸量不仅与平衡溶液中元素浓度有关, 而且明显地

受共存元素及其相互作用的影响,且相互作用的结果与元素的相对浓度及其比例有关。

(4) 土壤环境中出现了  $\text{AsO}_4^{3-}$  以后,使 Cd, Pb, Cu, Zn 的吸附解吸过程变得复杂的多,这可能与  $\text{AsO}_4^{3-}$  反应产生重金属盐沉淀和次级吸附和解吸有关。

(5) 在供试元素中,Cd 的迁移性最强,土壤所吸附的 Cd 有 70% 以上可被解吸下来,进入土壤溶液,为植物所吸收,其次是 As,约 50% 左右可以离解,然后依次为 Cu (40% 以上),Zn (30%),Pb 的迁移性最弱,只有 20% 左右。

#### 参 考 文 献

- [1] 陈怀满, 镉的土壤化学. 土壤学进展, 1983, (5) : 12—20  
 [2] Davis J A et al., Model for Trace Metals Sorption Processes at Calcite Surface; Adsorption of Cd and Subsequent Solid Solution Formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1987, 51 : 1477—1490  
 [3] 董厚庭,  $\text{PO}_4^{3-}$  对 Cd, Zn, Cu 吸附特性的影响. 华中农业大学学报, 1992, 28 (2) : 26—31  
 [4] 杨崇洁, 几种重金属元素进入土壤后的迁移转化规律及吸附机理的研究. 环境科学, 1989, 10 (3) : 2—8

1995 年 12 月 22 日收到。

## EFFECTS OF HEAVY METALS JOINT ACTION ON THEIR CHARACTERISTIC OF SORPTION AND DESORPTION IN BROWN SOIL

Yu Guoying      Wu Yanyu

(Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110015)

#### ABSTRACT

The effects of heavy metals joint action on the characteristic of the elements sorption and desorption in soil was studied with orthogonal experimental method. The results show that the sorptions of the tested elements obey the Langmiur equation  $C/(X/m) = 1/Kb + C/b$ . The order of the sorption potentials of the elements on soil is  $\text{Pb} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cd}$ , but that of the sorption maximum is reverse. Cd, Pb, Cu, Zn, As, which depend not only on their toxicity, but also on their activity and desorptivity, further they effect strongly the sorption and desorption of other elements. The amounts of elements sorption and desorption are relative to the coexistant elements and their interaction besides the concentrations of elements in the equilibrium, and the results of the interaction depend on their relative contents and ratios of coexistant elements. The sorption and desorption become more complicated in the pressence of  $\text{AsO}_4^{3-}$ , the mechanism may be the sediment of heavy metal salt and the secondary sorption and desorption.

**Keywords:** heavy metals, joint action, sorption, desorption, orthogonal experimental method, ecological risk.