

# 河北主要土壤中 Cd 和 Pb 的形态分布及其影响因素

刘霞<sup>1</sup> 刘树庆<sup>2</sup> 王胜爱<sup>3</sup>

(1 河北农业大学生命学院, 河北保定 071001)

(2 河北农业大学资源与环境学院, 河北保定 071001)

(3 保定市农业局, 河北保定 071000)

**摘要** 采用网室盆栽试验和大田取样, 运用连续提取方法, 研究了河北平原潮土和潮褐土两种土壤中 Cd、Pb 的化学形态特征及其与影响因素的关系。结果表明: 随着 Cd、Pb 污染程度的增加, 其交换态有增加趋势。当高浓度重金属污染土壤时, Cd (潮土 > 1 mg kg<sup>-1</sup>、潮褐土 > 5 mg kg<sup>-1</sup>) 主要以交换态存在, 并表现为: 交换态 > 碳酸盐结合态 > 铁锰氧化物结合态 > 有机结合态 > 残留态; Pb 主要以碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态存在。在低浓度重金属污染的土壤中, Cd (潮土 < 1 mg kg<sup>-1</sup>、潮褐土 < 5 mg kg<sup>-1</sup>) 的残留态、有机结合态成倍增加, 甚至超过交换态, 表现为: 残留态 > 碳酸盐结合态 > 有机结合态 > 交换态 > 铁锰氧化物结合态; Pb 主要以铁锰氧化物结合态和残留态存在。Cd、Pb 在土壤中的分布与土壤的 pH 值, 有机质含量密切相关。

**关键词** 潮土, 潮褐土, 镉, 铅, 形态, 分布特征  
**中图分类号** S152

当今, 随着现代工农业的迅速发展, “三废”排放量的日益增加, 重金属已成为对生态系统产生影响的重要污染物类型。目前最引人关注的是 Hg、Cd、Pb 三大元素。从 70 年代开始, 环境科学家就认识到重金属的生物毒性不仅与其总量有关, 更大程度上取决于它们的化学形态<sup>[1-3]</sup>。重金属在土壤中的存在形态是以其与土壤的不同组分相结合的方式划分的, 从而决定了重金属的移动性和生物利用率。因此, 不同的化学形态有可能表现出不同的活性和生物毒性<sup>[4,5]</sup>。故研究重金属在土壤中的化学形态有助于了解重金属在土壤中的分散富集过程, 迁移转化规律及其在植物营养和土壤环境上的意义, 对预测农业或污染土壤中重金属的临界含量、生物有效性、生物毒性及其动态转化将提供更准确的科学依据并具有重要的意义。本文通过盆栽试验和大田取样, 研究了河北主要土壤中的 Cd、Pb 形态分布特征及其影响因素。

## 1 材料与与方法

### 1.1 试验设计

本试验采用网室盆栽试验和大田取样分析相结合的方法。

(1) 盆栽试验。选择河北冲积平原的主要土壤质潮土和山麓平原的潮褐土为盆栽试验供试土样, 潮土取自安新, 潮褐土取自河北农业大学标本园。盆栽土样的基本性质见表 1。试验布置为 5 个处理, 3 个重复。Pb 的处理浓度为 0, 100, 300, 500, 1 000 mg kg<sup>-1</sup>; Cd 的处理浓度为 0, 1, 5, 10, 50 mg kg<sup>-1</sup>。在 20 × 20 cm 塑料桶中装入过 3 mm 筛的风干土 5 kg。重金属 Cd、Pb 以 Cd(AC)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, Pb(AC)<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O 固体形式施入土壤, 混匀。供试作物为“华王”一代交配油菜。一周后播种, 出苗后定株为 10 株/盆, 50 d 后收获。土壤风干后, 分别制取过 1 mm 和 0.25 mm 尼龙筛的土样, 测定每盆土壤中 Cd、Pb 的总量及其各个形态的含量。(2) 大田土壤取样。潮土土样分别采自保定远郊区污灌区小麦田, 并以清灌区小麦田为对照。潮褐土土样分别采自保定近郊污灌区小麦田, 并以清灌区小麦田为对照, 其基本性质见表 2。

表 1 盆栽试验供试土壤的基本性质

Table 1 Some physical and chemical properties of soils for test in pot experiment

土壤类型 Soil type	质地 Texture	有机质 O. M (g kg <sup>-1</sup> )	全 氮 Total N (g kg <sup>-1</sup> )	碱 解 氮 Available N (mg kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	pH <sup>1)</sup>	CaCO <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	CEC (cmol kg <sup>-1</sup> )	重 金 属 含 量 Contents of heavy metal (mg kg <sup>-1</sup> )	
									Pb	Cd
潮 土	中壤	11.1	0.35	51.06	2.67	8.30	34.2	20.69	30.54	0.839
潮褐土	中壤	10.9	0.60	68.04	1.40	8.18	56.0	24.18	33.59	0.692

## 机 械 组 成

## Mechanical composition(%)

土 壤 类 型 Soil type	机 械 组 成 Mechanical composition(%)						
	> 0.25 mm	0.25~ 0.05 mm	0.05~ 0.01 mm	0.01~ 0.005 mm	0.005~ 0.001 mm	< 0.001 mm	
潮 土	0.49	15.89	51.58	6.27	7.10	18.67	
潮褐土	0.85	16.24	44.07	9.79	8.57	20.48	

1) pH的水土 = 2.5:1

表 2 大田土样的基本性质

Table 2 Some physical and chemical properties of soils for test in the field

编 号 No.	取 土 位 置 (0~ 20 cm) Location	灌 溉 类 型 Irrigation type	pH	有机质	全 N	碱解 N	全 P
				O. M (g kg <sup>-1</sup> )	Total N (g kg <sup>-1</sup> )	Available N (mg kg <sup>-1</sup> )	Total P (g kg <sup>-1</sup> )
1	清苑公路北, 麦田	清灌	8.36	12.4	0.69	51.2	1.5
2	安新公路北, 麦田	清灌	8.40	12.1	0.68	52.9	1.37
3	清苑公路南, 麦田	污灌	8.17	16.0	0.95	70.6	1.99
4	望亭西路北, 麦田	清灌	8.39	11.8	0.76	64.3	1.38
5	望亭西路南, 麦田	污灌	8.45	15.3	0.84	45.1	1.88
6	安新公路南, 麦田	污灌	8.20	14.7	0.88	84.8	1.47
7	安新公路南, 麦田	污灌	8.22	12.8	0.75	52.9	1.33
8	焦庄东南, 园林东	清灌	8.40	14.2	0.77	45.5	1.55
9	焦庄东南, 园林东	清灌	8.36	12.5	0.93	31.6	1.86
10	焦庄西南, 公路西	污灌	8.30	25.1	1.09	60.5	2.78
11	焦庄东北, 污渠南	污灌	8.10	16.3	1.06	46.4	2.18
12	鲁岗辛西北	清灌	8.32	17.7	0.75	52.8	1.56
13	鲁岗辛西北	污灌	8.15	36.6	1.47	93.1	1.61
14	鲁岗污水处理厂东	污灌	7.86	42.4	1.37	121.1	1.92
15	鲁岗污水处理厂北	污灌	7.76	37.0	0.99	84.7	1.76

续表

编号 No.	速效 P	CEC ( $\text{cmol kg}^{-1}$ )	$\text{CaCO}_3$ ( $\text{g kg}^{-1}$ )	< 0.01 mm 物理性粘粒 Physical clay (%)	重金属含量	
	Available P ( $\text{mg kg}^{-1}$ )				Content of heavy metal ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) Pb Cd	
1	2.80	20.56	14.8	35.83	27.48	0.530
2	13.4	23.18	29.6	34.10	24.97	0.700
3	72.6	21.23	14.4	30.45	33.25	0.858
4	30.7	25.61	40.2	49.65	30.28	0.990
5	13.4	26.73	42.0	34.56	36.91	1.009
6	22.4	23.24	14.6	36.33	40.50	1.047
7	10.4	21.76	26.4	37.75	38.37	1.050
8	22.4	20.71	32.8	25.79	32.02	0.798
9	62.4	22.38	36.0	25.79	41.48	0.680
10	93.5	24.27	36.4	34.56	36.94	0.840
11	72.0	19.51	39.0	27.01	45.26	0.912
12	10.1	20.26	53.2	32.52	37.35	0.970
13	16.8	25.69	28.4	32.11	62.17	0.944
14	75.5	23.91	74.3	31.09	53.34	1.020
15	57.6	24.39	33.0	28.85	57.61	1.050

注: 1~7 潮土; 8~15 潮褐土

## 1.2 测定方法

常规分析项目均按土壤农化常规分析方法测定<sup>[6]</sup>。土壤中重金属的形态分级采用朱婉1989年修改后的 Tessier 连续提取法<sup>[7]</sup>。交换态用  $\text{MgCl}_2$  提取, 碳酸盐结合态用  $\text{NaAc}$  溶液提取, 铁锰氧化物结合态用  $\text{HOAc}$  溶液提取, 有机结合态用  $\text{HNO}_3$  和  $\text{H}_2\text{O}_2$  提取, 残留态用差减法计算。

## 2 分析与讨论

### 2.1 Cd、Pb 在土壤中的形态分布特征

**2.1.1 Cd 在土壤中的形态分布特征** (1) 盆栽土壤。由表 3、表 4 可知, 在潮土和潮褐土中, 各形态 Cd 含量均随添加量的增加而增加, 且交换态、碳酸盐结合态含量增幅较大, 有机结合态含量的变化很小。由各形态 Cd 占全量的百分比分析, Cd 在盆栽土壤中的形态分布特征为: 交换态、碳酸盐结合、铁锰氧化物结合态随添加量的增加而增加, 有机结合态、残留态随添加量的增加而减少, 且残留态呈锐减趋势。当潮土中 Cd 的添加量  $< 1 \text{ mg kg}^{-1}$ , 潮褐土中  $< 5 \text{ mg kg}^{-1}$  时, 残留态  $>$  碳酸盐结合态  $>$  有机结合态  $>$  交换态  $>$  铁锰氧化物结合态, 其中残留态在潮土中占到 55% ~ 75%, 在潮褐土中占到 35% ~ 75%。当潮土中 Cd 的添加量  $> 1 \text{ mg kg}^{-1}$ , 潮褐土中  $> 5 \text{ mg kg}^{-1}$  时, 交换态  $>$  碳酸盐结合态  $>$  铁锰氧化物结合态  $>$  有机结合态  $>$  残留态。这与 Chlopecka<sup>[8]</sup> 研究结果基本一致, 即随污染程度的增加, 残留态急剧减少, 交换态剧增, 碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态成倍增加, 而有机质对镉的各形态分布影响不大。

(2) 大田土壤。由表 5、表 6 可知, 由于大田土壤条件复杂不一, 重金属形态分布特征不完全同于盆栽试验。在两种土壤中, 随污染程度的增加, 交换态有增加趋势。潮褐土上, 碳酸盐结合态、残留态有减少趋势, 这可能是由于随污染水平的增加 pH 减小的原因。铁锰氧化物结合态、有机态相差不大。当总量  $< 1.0 \text{ mg kg}^{-1}$  时, 残留态  $>$  碳酸盐结合态  $>$  有机结合态  $>$  交换态  $>$  铁锰氧化物结合态, 与盆栽试验形态分布一致。潮褐土中 Cd  $> 1.0 \text{ mg kg}^{-1}$  时, 交换态 Cd 占了主导地位, 其次是有机结合态。

**2.1.2 Pb 在土壤中的形态分布** (1) 盆栽土壤。由表 3、表 4 可知, 在两种土壤中, 各形态 Pb 的含量均随添加浓度的增加而升高, 碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态 Pb 增幅较大, 交换态 Pb 浓度很低。而

表3 盆栽潮褐土镉、铅形态分布

Table 3 Distribution of Cd and Pb forms in meadow cinnamon soils for pot experiment

重金属 Heavy metal	添加浓度 Added (mg kg <sup>-1</sup> )	交换态 Exchangeable (%)		碳酸盐结合态 Carbonate combined (%)		铁锰氧化物结合态 Fe-Mn oxide combined (%)		有机结合态 Organic combined (%)		残留态 Residual (%)	
Pb	0	—	—	2.06±0.31	7.96	9.02±0.28	34.89	3.89±0.53	15.02	10.90	42.11
	100	0.26±0.01	0.22	35.06±4.77	29.64	55.30±4.63	46.47	7.12±0.50	6.02	20.56	17.38
	300	1.18±0.01	0.38	100.90±9.07	32.81	127.52±2.79	41.48	8.54±1.07	2.78	59.39	19.31
	500	3.12±0.34	0.62	236.70±4.95	46.45	206.11±7.86	40.44	13.14±0.01	2.58	50.50	9.91
	1000	12.84±2.21	1.27	477.48±3.30	47.36	342.44±21.32	33.97	49.03±3.56	4.86	126.39	12.54
Cd	0	—	—	0.06±0.05	7.60	—	—	0.16±0.05	19.17	0.62	73.23
	1	0.12±0.02	9.15	0.25±0.07	18.19	0.05±0.04	3.32	0.26±0.05	19.33	0.68	50.02
	5	1.11±0.30	19.77	1.32±0.27	23.61	0.83±0.19	14.87	0.34±0.04	6.05	2.00	35.69
	10	3.59±0.90	34.04	3.58±0.46	33.96	2.03±0.07	19.27	0.44±0.01	4.17	1.34	12.72
	50	17.83±0.14	35.39	14.52±1.67	28.83	10.65±0.37	21.14	0.74±0.01	1.48	6.64	3.17

表4 盆栽潮土镉、铅形态分布

Table 4 Distribution of Cd and Pb forms in alluvial meadow soils for pot experiment

重金属 Heavy metal	添加浓度 Added (mg kg <sup>-1</sup> )	交换态 Exchangeable (%)		碳酸盐结合态 Carbonate combined (%)		铁锰氧化物结合态 Fe-Mn oxide combined (%)		有机结合态 Organic combined (%)		残留态 Residual (%)	
Pb	0	0.22±0.01	1.01	1.98±0.06	9.14	6.27±0.31	28.84	5.44±0.33	24.99	7.84	36.01
	100	1.50±0.02	1.34	34.63±4.79	30.95	53.84±1.89	48.13	9.26±0.47	8.27	12.65	11.31
	300	4.62±1.23	1.46	122.80±19.20	38.79	143.21±9.41	45.23	22.76±2.47	7.19	23.20	7.30
	500	6.63±1.32	1.28	241.00±4.70	46.48	195.00±25.46	37.61	34.32±2.17	6.62	41.58	8.02
	1000	36.89±7.68	3.62	513.20±19.44	50.32	272.78±0.08	26.75	54.95±1.89	5.32	141.17	13.84
Cd	0	0.02±0.01	2.52	0.06±0.02	8.24	—	—	0.14±0.01	17.54	0.56	71.70
	1	0.19±0.12	13.24	0.22±0.08	15.44	0.02±0.01	1.54	0.21±0.01	14.81	0.79	54.98
	5	1.89±0.08	35.66	1.20±0.26	22.71	0.76±0.27	14.30	0.29±0.02	5.43	1.16	21.90
	10	4.51±0.30	42.71	3.00±0.27	28.38	1.89±0.09	17.88	0.36±0.01	3.45	0.80	7.59
	50	23.69±2.23	47.05	13.80±0.01	27.42	9.01±0.38	17.89	0.71±0.03	1.40	3.15	6.25

随 Pb 添加量的增加,交换态、碳酸盐结合态在土壤中所占百分比增加,其余三态却有减少趋势。其中碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态占绝对优势,两者之和达到 40%~80%,其次为残留态,交换态几乎没有。当 Pb 添加浓度 < 300 mg kg<sup>-1</sup> 时,铁锰氧化物结合态 > 碳酸盐结合态; > 300 mg kg<sup>-1</sup> 时,碳酸盐结合态 > 铁锰氧化物结合态。

(2) 大田土壤。由表 5、表 6 可知,在大田土壤中,随污染程度的增加 Pb 主要以铁锰氧化物结合态和残留态存在,两者之和在潮褐土中达 65% 以上,在潮土中达 75% 以上,交换态 Pb 增加不多。五种形态 Pb 的顺序为:残留态 > 铁锰氧化物结合态 > 有机结合态 > 碳酸盐结合态 > 交换态,这与盆栽试验 Pb 添加浓度 < 100 mg kg<sup>-1</sup> 时的形态分布结果一致。

表 5 大田潮土镉、铅的形态分布

Table 5 Distribution of Cd and Pb forms in field alluvial meadow soils

重金属 Heavy metal	编号 No.	交 换 态		碳酸盐结合态		铁锰氧化物结合态		有机结合态		残 留 态	
		Exchangeable (mg kg <sup>-1</sup> )	(%)	Carbonate combined (mg kg <sup>-1</sup> )	(%)	Fe-Mn oxide combined (mg kg <sup>-1</sup> )	(%)	Organic combined (mg kg <sup>-1</sup> )	(%)	Residual (mg kg <sup>-1</sup> )	(%)
Pb	1	0.46	1.66	2.90	10.56	9.28	33.76	3.43	12.47	11.48	41.55
	2	—	—	1.89	11.57	8.29	33.20	3.02	12.12	10.76	43.11
	3	1.09	3.27	2.49	8.23	7.30	21.96	4.34	13.06	18.03	54.21
	4	—	—	3.25	10.73	10.26	33.89	3.41	10.26	13.36	44.11
	5	—	—	3.89	10.55	12.57	34.04	4.67	12.66	15.78	42.75
	6	1.26	3.12	3.54	8.75	7.30	18.03	4.01	9.91	24.20	59.76
	7	1.16	3.02	3.72	10.15	9.61	25.03	3.68	9.60	20.23	52.20
Cd	1	0.06	10.39	0.12	23.26	0.03	4.96	0.11	19.89	0.22	41.41
	2	—	—	0.22	31.48	—	—	0.11	15.00	0.38	53.52
	3	0.18	20.86	0.17	20.85	0.03	3.04	0.21	24.07	0.27	31.32
	4	0.04	4.35	0.21	20.87	0.01	1.24	0.10	10.43	0.61	61.92
	5	—	—	0.29	28.66	0.08	7.86	0.23	23.03	0.41	40.62
	6	0.14	13.15	0.19	18.41	—	—	0.19	17.67	0.53	50.77
	7	0.21	19.67	0.23	22.29	0.01	1.23	0.18	17.55	0.41	39.26

表 6 大田潮褐土镉、铅的形态分布

Table 6 Distribution of Cd and Pb forms in field meadow cinnamon soils

重金属 Heavy metal	编号 No.	交 换 态		碳酸盐结合态		铁锰氧化物结合态		有机结合态		残 留 态	
		Exchangeable (mg kg <sup>-1</sup> )	(%)	Carbonate combined (mg kg <sup>-1</sup> )	(%)	Fe-Mn oxide combined (mg kg <sup>-1</sup> )	(%)	Organic combined (mg kg <sup>-1</sup> )	(%)	Residual (mg kg <sup>-1</sup> )	(%)
Pb	8	—	—	3.37	10.51	14.54	45.39	5.66	17.66	8.47	26.44
	9	1.40	3.38	3.02	7.27	16.51	39.81	4.34	10.47	16.20	39.06
	11	2.28	5.04	3.72	8.22	15.20	33.58	5.00	11.05	19.06	42.12
	12	1.05	2.82	3.19	8.55	12.57	33.64	4.67	12.51	15.87	42.48
	13	2.81	4.52	3.37	5.42	15.86	25.50	5.33	8.57	34.81	55.99
	14	3.68	6.91	3.09	5.79	17.17	32.19	11.58	21.71	17.82	33.40
	15	6.32	10.96	2.21	3.84	20.46	35.52	8.61	14.94	20.02	34.74
Cd	8	0.09	10.70	0.24	30.66	0.09	10.70	0.17	20.73	0.22	27.21
	9	0.08	11.51	0.12	17.15	0.06	8.66	0.14	20.40	0.29	42.28
	10	0.16	18.63	0.22	25.74	0.06	6.67	0.14	16.51	0.27	32.45
	11	0.23	25.41	0.16	7.47	0.11	12.29	0.19	21.06	0.22	23.77
	13	0.23	24.01	0.17	18.38	0.06	6.22	0.25	26.00	0.24	25.40
	14	0.30	29.28	0.15	14.23	0.14	13.60	0.27	26.67	0.17	16.23
	15	0.37	35.23	0.13	2.46	0.12	10.97	0.22	20.83	0.22	20.53

**2.1.3 Cd、Pb 在不同类型土壤中形态分布的差异** 盆栽土壤中,无论是绝对含量还是所占百分比,交换态 Cd、Pb 潮土高于潮褐土,铁锰氧化物结合态 Cd、Pb 潮土稍低于潮褐土。前者是因为潮褐土CaCO<sub>3</sub>含量高于潮土,质地较潮土偏粘,因此 Cd、Pb 在潮褐土中形成的难溶性化合物较多,被土壤吸附的量也大于潮土,交换态 Cd、Pb 相对就少于潮土;后者是因为 0~ 20 cm 土层潮褐土的物理性粘粒含量较大,且硅铁铝率(2.5~ 3.0)低于潮土(3.0)的缘故。潮土有机结合态 Pb 稍高于潮褐土,可能是由于潮土有机质高于潮褐土,而有机质对铅的各形态分布有很大改变<sup>[8]</sup>。大田土壤中,交换态 Cd、Pb 潮土低于潮褐土,这是因为潮褐土的 pH 小于潮土,因而重金属在潮褐土上的溶解度较大。但更主要的原因是潮土为远郊区,距污染源远污染轻,而潮褐土为近郊区,距污染源近且污染较重所致。

## 2.2 Cd、Pb 在土壤中的形态分布与其主要影响因素的关系

将大田土壤中各形态 Cd、Pb 占全量的百分比例与土壤的 pH 值、有机质含量、代换量、< 0.01 mm 物理性粘粒百分含量进行回归分析。由表 7 可知,在潮土和潮褐土土壤中交换态 Cd、Pb 都随 pH 的升高而减少,且呈极显著负相关。这是因为在碱性条件下,Cd、Pb 与碳酸盐、磷酸盐等形成了难溶化合物,从而降低了 Cd、Pb 的有效性。除潮土中碳酸盐结合态 Cd 外,碳酸盐结合态 Cd、Pb 与 pH 均呈显著正相关,铁

表 7 大田土壤中重金属各形态含量与主要影响因素的相关关系

Table 7 Relationship between content of heavy metal of various forms in field soils and its effect factors

土壤类型 Soil type	重金属 Heavy metal	形态序号 Form number	pH	有机质 O. M.	代换量 CEC	物理性粘粒 Physical clay
潮土	Pb	I	- 0.9610**	0.4373	- 0.6938	- 0.3975
		II	0.8484*	- 0.7565*	0.3370	0.3574
		III	0.9340**	- 0.6238	0.3898	0.3282
		IV	0.3002	0.3743	- 0.0939	- 0.2627
		V	- 0.9065**	0.5207	- 0.4771	- 0.2328
	Cd	I	- 0.9292**	0.3284	- 0.7146	- 0.2682
		II	0.7134	- 0.1858	0.3365	- 0.2880
		III	0.4321	0.3888	0.2429	- 0.2607
		IV	- 0.2693	0.8137*	- 0.2606	- 0.8302*
		V	0.2915	- 0.6445	0.4954	0.7517
潮褐土	Pb	I	- 0.9414**	0.7151	0.5407	0.2505
		II	0.8135*	- 0.8175*	- 0.8289*	- 0.4088
		III	0.4431	- 0.6339	- 0.5152	- 0.7909*
		IV	0.3790	0.3502	- 0.2947	- 0.0085
		V	0.0440	0.1842	0.3353	0.5410
	Cd	I	- 0.9656**	0.7903*	0.3837	0.3456
		II	0.7922*	- 0.5453	- 0.3102	- 0.0217
		III	- 0.4995	0.0861	- 0.5144	- 0.4429
		IV	- 0.4537	0.6038	0.2281	0.0491
		V	- 0.7777*	- 0.7058	- 0.1968	- 0.2265

注:  $n=7$ ,  $r_{0.05}=0.754$ ,  $r_{0.01}=0.874$ ; I - 交换态, II - 碳酸盐结合态, III - 铁锰氧化物结合态, IV - 有机结合态, V - 残留态

锰氧化物结合态 Cd、Pb 也与 pH 呈正相关。说明由于发生沉淀反应且金属羟基复合物比游离的金属离子更易被土壤吸附以及铁锰氧化物对 Cd、Pb 的专性吸附<sup>[9]</sup>, 随 pH 的升高土壤对 Cd、Pb 的吸附量也升高。因此要防止碱性土壤中碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态 Cd、Pb 直接向给形态转化。

碳酸盐结合态 Pb 与有机质含量呈显著负相关, 碳酸盐结合态 Cd 也与有机质含量呈负相关, 但相关性不显著。交换态、有机结合态 Cd、Pb 均与有机质含量呈正相关, 有的甚至达到显著水平。这与有机质对铅的强吸附作用和对镉的络合作用有关<sup>[9]</sup>。增加有机质可使碳酸盐结合态向有机结合态转化, 而有机质络合的金属在较强的氧化条件下可随有机物质的降解而释放到土壤溶液中, 说明有机结合态重金属是交换态重金属的潜在来源。

CEC 除与潮褐土中碳酸盐结合态 Pb 显著负相关, 物理性粘粒含量与潮土中有机结合态 Cd、潮褐土中铁锰氧化物结合态 Pb 显著负相关外, 对 Cd、Pb 的其它各态影响均不大。

### 3 结 论

1. Cd、Pb 在潮土和潮褐土上随着污染程度的增加, 其交换态重金属有增加趋势; 而随其添加浓度增加, 其交换态、碳酸盐结合态增加, 而有机结合态、残留态减少。潮土中交换态、铁锰氧化物结合态 Cd、Pb 含量及其所占比例都低于潮褐土, 而残留态高于潮褐土。

2. Cd、Pb 在土壤中的形态分布主要与土壤的 pH 值和有机质密切相关。潮土和潮褐土中交换态 Cd、Pb 均随 pH 的升高而减少并呈极显著负相关, 交换态和有机结合态 Cd、Pb 则与有机质含量呈正相关趋势。碳酸盐结合态与有机质含量呈显著负相关。

### 参考文献

1. 刘清, 王子健, 等. 重金属形态与生物毒性及生物有效性关系的研究进展. 环境科学, 1996, 17(1): 89- 91
2. Sauerbeck D R. The nickel uptake from different soils and its prediction by chemical extractants. Water, Air and Soil Pollution, 1991, 57/ 58( 1/4): 861~ 871
3. Xian X. Effect of chemical forms of cadmium, zinc, and lead in polluted soils on their uptake by cabbage plants. Plant and Soil, 1989, 113( 92): 257~ 264
4. 李宗利, 薛澄泽. 污灌土壤中 Pb、Cd 形态的研究. 农业环境保护, 1994, 13( 4 ): 152~ 157
5. Stumm W, *et al.* Chemical speciation. In: Riley J P, Skirrow G. ed. Chemical Oceanography Ch. 3. New York: Academic Press, 1975. 173~ 279
6. 李酉开主编. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983
7. 朱 婉, 沈壬水, 钱钦文等. 土壤中重金属元素的五个组分的连续提取法. 土壤, 1989, 21( 3): 163~ 166
8. Chiopecka A, *et al.* Forms of cadmium, lead and zinc in contaminated soils from Southwest Poland. J. Environ. Qual., 1996, 25: 69~ 79
9. 符建荣. 土壤中铅的积累及污染的农业防治. 农业环境保护, 1993, 12( 5 ): 223~ 226, 232

## DISTRIBUTION OF CADMIUM AND LEAD FORMS AND ITS AFFECTING FACTORS IN SOILS OF HEBEI PROVINCE

Liu Xia<sup>1</sup> Liu Shu-qing<sup>2</sup> Wang Sheng-ai<sup>3</sup>

(1 College of Life Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China)

(2 College of Resource and Environment, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China)

(3 Agricultural Bureau of Baoding, Baoding, Hebei 071000, China)

### Summary

Successive extraction method was adopted to study the characteristics of chemical forms of Cd and Pb in alluvial meadow soil and meadow cinnamon soil in the plain of Hebei, and the relationship between the forms of Cd, Pb and factors affecting it by pot experiment and field sampling. The results showed that Cd, Pb contents of exchangeable form increased and those of carbonate combined and residual forms decreased with the increase of pollution extent in field soils. Cd, Pb contents of exchangeable and carbonate combined forms increased and those of organic and residual forms decreased with the increase of Cd, Pb added concentration in pot soils. Most of Cd was present in the exchangeable form (the order is: EXC > CAB > OXI > ORG > RES), and the most amount of Pb was associated with the carbonate and Fe-Mn oxide combined forms in heavy metal highly polluted soils. In lowly polluted soils, the residual and organic forms of Cd increased significantly (the order is: RES > CAB > ORG > EXC > OXI), and most of Pb was present in Fe-Mn oxide combined and residual forms. The concentration and proportion of the exchangeable and Fe-Mn oxide combined forms in alluvial meadow soil were lower than in meadow cinnamon soil. The major factor which effect on the chemical forms of Cd, Pb in soils were pH and the organic content.

**Key words** Alluvial meadow soil, Cinnamon soil, Cadmium, Lead, Forms