

城乡交错区土壤中镉的赋存形态 及其生物有效性研究

杜富芝¹ 傅瓦利¹ 甄晓君¹ 段正锋¹ 王素芳²

(1. 西南大学 地理科学学院 土壤实验室, 重庆 400715; 2. 东营职业学院教育系, 山东 东营 257091)

摘要: 采用连续形态分析方法研究了重庆市城乡交错区土壤中 Cd 的形态分布及其与莴笋吸收 Cd 量的关系。结果表明, 研究区土壤和莴笋中 Cd 污染严重, 土壤各形态 Cd 总体分布特征为: 残渣态 Cd > 有机质结合态 Cd > 离子交换态 Cd > 碳酸盐结合态 Cd > 铁锰氧化物结合态 Cd > 水溶态 Cd, 其中活性较强的交换态 Cd (包括水溶态 Cd 和离子交换态 Cd) 比重较大。Cd 在土壤中的分布与土壤中的物理性粘粒及粉粒含量密切相关。而在土壤各形态 Cd 中, 离子交换态 Cd 具有较高的生物有效性。研究区土壤和蔬菜中 Cd 污染已经较严重, 建议加强城乡交错区的环境综合管理。

关键词: 城乡交错区; Cd 形态; 生物有效性; 莴笋

中图分类号: X171.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2009)06-1413-06

城乡交错区, 处在城市建成区与广大乡村地区相互衔接部位, 是中国城市化、工业化和农业集约化过程中最为激烈的特殊的地域实体^[1]。城乡交错区具有很强的开放性, 其主要功能是向城市提供鲜活的禽、蛋、鱼、肉、蔬菜、水果以及部分粮油作物等农副产品^[2]。目前, 由于市区的工业污染物质和生活废弃物向城乡交错区的大量输入, 城乡交错区环境质量受到了严重影响^[3], 城乡交错区环境质量的优劣, 尤其是区域土壤环境质量的好坏, 反过来又直接影响到向城市供应的各种农副产品的质量^[4,5]。

目前对城乡交错区蔬菜生产系统研究多以土壤和蔬菜中重金属的污染评价为主^[6], 而综合研究城乡交错区土壤蔬菜间重金属关系的较少。本文选择了重庆市典型的城乡交错区, 研究菜地土壤中 Cd 的赋存形态及其对蔬菜的影响, 对重庆市的环境污染防治和城市化发展具有理论和现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区是位于重庆市北碚区西南边缘的歇马镇, 属于北碚区与周围乡村的交错带, 规划城镇总面积 1.5 km², 人口 5.78 万, 为重庆市“发展乡镇明星企业 30 强”之一, 2003 年被纳入重庆市“百个经济强镇工程”, 2006 年有各类企业 323 个, 以中小企业居多, 形成了纺织、摩配、建材三大支柱产业。本区属于亚热带季风气候, 年降水量在 1000 mm 左右, 地形较平坦, 土壤类型单一, 为紫色土, 发育在紫色岩上。改革开放前, 该区为一蔬菜大队, 现农业土地利用仍以菜园地为主。

1.2 样品采集

采样时间为 2007 年 12 月, 在歇马镇建成区周围 2 km² 范围内布置了 6 个采样点, 尽量在研究区

收稿日期: 2009-03-09; 改回日期: 2009-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40701179)资助。

作者简介: 杜富芝, 男, 1982 年生, 硕士生, 主要从事土壤环境和水环境研究; E-mail: fzd@163.com。

通讯作者: 傅瓦利, 女, 1954 年生, 教授。

内均匀分布。选择成熟期的蔬菜(全部是莴笋)可食部分进行采集,在每个菜园地内采集5个点以上组成1件样品,采集量都在2 kg以上,用自来水冲洗3次,接着用去离子水洗3次,晾干后充分切碎混匀备用。采集蔬菜样品的同时采集其根系土壤样品,在每块菜地约2 m²范围内随机散点采集5处(0~20 cm)表层样,混匀后缩分至1 kg左右作为1个土壤样品。采集的土壤均为紫色土,土样经自然风干并除去草根、石块等杂物,用玛瑙研钵研磨,依次过1 mm、0.25 mm、0.149 mm和0.074 mm尼龙筛,装瓶备用。

1.3 分析方法

1.3.1 土壤中镉的测定

土壤中镉的赋存形态测定按照 Tessier 等^[7]根据其基体组成用连续提取法把包含于其中的金属分成下列不同的形态,即水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态、残渣态。实验步骤如下:

(1)水溶态:2.000 g 过 0.149 mm 土样加去离子水 20.00 mL,于(25±0.5)°C连续振荡 2 h,离心取上清液。

(2)离子交换态:残渣中加入 20.00 mL 1 mol/L CaCl₂ 溶液,于(25±0.5)°C连续振荡 2 h,离心取上清液。

(3)碳酸盐结合态:残渣中加入 20.00 mL 1 mol/L NaAc 溶液(HAc 调至 pH 为 5),置 8 h,再于(25±0.5)°C连续振荡 2 h,离心取上清液。

(4)Fe、Mn 氧化物结合态:残渣中加入 20.00 mL 0.25 mol/L NH₃HCl,于(50±0.5)°C,间歇振荡 3 h,冷却后离心取上清液。

(5)有机结合态:残渣中加入 6.00 mL HNO₃ (0.02 mol/L)和 30% H₂O₂ 15.00 mL(用 HNO₃ 调节 pH=2),在(85±0.5)°C烘箱中置 3 h,间歇摇动,取出

冷却后,室温下加入 10.00 mL 3mol/L NH₄Ac(20% HNO₃),定容至 40.00 mL,于(25±0.5)°C连续振荡 1 h,离心取上清液。

(6)残留态:用全量减去以上各形态含量所得。土壤中全量镉采用氢氟酸、硝酸和高氯酸消化处理,土壤中有效态镉采用中性 1 mol/L 的 NH₄Ac 提取。以上处理液中的镉含量用等离子发射光谱仪(ICP-AES)测定。

1.3.2 蔬菜中镉的测定

取 5.00g 的新鲜蔬菜样品,用高氯酸、硝酸混合酸(1+4)消解处理,镉含量用等离子发射光谱仪(ICP-AES)测定。

1.3.3 土壤基本理化性质测定

基本理化性质测定采用土壤农化常规分析方法测定^[8]。土壤容重采用环刀法;土壤 pH 以 1:2 的土水比浸提,电位法测定;有机质采用重铬酸钾容量法测定;阳离子代换量用中性醋酸氨法测定;机械组成采用比重计法测定;碳酸钙采用中和滴定法测定;游离氧化铁采用柠檬酸钠-连二亚硫酸钠法测定。土壤的基本性质见表 1。

2 结果与讨论

研究区土壤中 Cd 的形态分布状况及蔬菜(莴笋)中的 Cd 的含量见表 2。

2.1 土壤中各形态 Cd 的分布特征

由表 2 可以看出,研究区 Cd 全量的变化范围是 0.293~0.611 mg/kg,平均值为 0.440 mg/kg,根据土壤环境质量标准^[9]中的二级标准,Cd 全量大部分超标,平均超标率 46.7%,最高的超标率为 103.7%。研究区各形态 Cd 的总体分布特征为:残渣态 Cd > 有机质结合态 Cd > 离子交换态 Cd > 碳酸盐结合

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Some physical and chemical properties of sample soil

编号	土壤质地	容重(g/kg)	pH	CEC (cmol/kg)	有机质 (%)	碳酸钙 (%)	游离铁 (mg/kg)	各粒级组分含量(%)			物理性粘粒<0.01mm
								砂粒	粉粒	粘粒	
1	轻粘土	1.33	4.64	17.36	1.69	0.35	69.33	31.17	46.45	22.38	68.83
2	中粘土	1.29	4.53	19.08	1.02	0.98	64.98	18.97	66.12	14.90	81.03
3	中粘土	1.31	7.20	28.99	1.95	1.92	59.67	24.74	54.38	20.88	75.26
4	中粘土	1.15	4.55	20.08	2.97	0.75	72.81	21.94	58.65	19.41	78.06
5	轻粘土	1.10	4.90	27.06	1.72	0.69	60.61	33.45	51.59	14.95	66.55
6	重壤土	1.23	5.60	22.47	1.38	1.49	60.85	42.34	45.96	11.70	57.66

表 2 供试土壤中 Cd 形态分布及蔬菜中 Cd 含量
Table 2 Different Cd forms in the sample soil and contents of Cd in vegetables

土样 编号	水溶态		离子交换态		碳酸盐结合态		铁锰氧化物结合态		有机质结合态	
	(mg/kg)	%	(mg/kg)	%	(mg/kg)	%	(mg/kg)	%	(mg/kg)	%
1	0.000	0.10	0.065	18.14	0.016	4.56	0.009	2.39	0.045	12.62
2	0.006	1.01	0.084	13.83	0.025	4.13	0.013	2.21	0.336	55.02
3	0.009	1.87	0.055	11.70	0.039	8.35	0.002	0.46	0.278	59.75
4	0.005	0.80	0.088	14.51	0.047	7.75	0.007	1.07	0.071	11.67
5	0.000	0.00	0.031	10.16	0.009	3.07	0.024	7.84	0.034	11.25
6	0.008	2.57	0.063	21.66	0.036	12.45	0.002	0.84	0.037	12.54
平均	0.005	1.06	0.064	15.00	0.029	6.72	0.010	2.47	0.134	27.14

土样 编号	残渣态		全量 (mg/kg)	NH ₄ Ac-Cd		莴笋中		莴笋中的 富集系数
	(mg/kg)	%		(mg/kg)	%	(mg/kg)	超标率/%	
1	0.222	62.19	0.357	0.073	20.57	0.133	166.59	0.37
2	0.145	23.80	0.611	0.110	17.97	0.186	272.64	0.30
3	0.083	17.86	0.466	0.064	13.78	0.130	160.79	0.28
4	0.390	64.20	0.608	0.107	17.64	0.172	244.48	0.28
5	0.207	67.68	0.306	0.057	18.67	0.094	87.36	0.31
6	0.146	49.95	0.293	0.076	26.12	0.180	259.92	0.61
平均	0.199	47.61	0.440	0.081	19.12	0.149	198.63	0.34

态 Cd > 铁锰氧化物结合态 Cd > 水溶态 Cd, 以残渣态为主, 这与郦逸根等^[10]所得到的结果一致, 但是有两个样点以有机质结合态为主。其中易于被植物吸收的交换态 (包括水溶态和离子交换态) 占到 15.00%, 比重较大。根据杨忠芳等^[11]研究土壤 pH 对紫色土各形态 Cd 含量的影响, 表明可交换态 Cd 含量在碱性条件下, 随着土壤 pH 值增大而迅速下降, 土壤 pH 大于 6.5, Cd 对生态系统危害相应减少, 另据高山等^[12]、华珞等^[13]和余贵芬等^[14]研究发现向土壤中添加有机质, 可显著降低可交换态 Cd 含量。所以可以向土壤中加入熟石灰提高 pH 值或者添加有机质增加有机质含量来降低 Cd 的生态危害性。

2.2 蔬菜中 Cd 的含量

蔬菜 (莴笋) 中 Cd 含量结果见表 2。从表 2 可以看出, 莴笋中 Cd 含量的变化范围 0.094~0.186 mg/kg, 平均值 0.149 mg/kg。将莴笋中 Cd 的含量与 Cd 的食品卫生标准 (0.05 mg/kg) 进行对比, 发现 6 件莴笋样品全部超标, 平均超标率为 198.63%, 最高的超标率达到 272.64%, 因此研究区莴笋中 Cd 富集超标的问题非常严重, 应该加强重庆市城乡交错区的综合治理。

计算研究区莴笋中 Cd 元素的富集系数 (蔬菜中 Cd 的含量/土壤中的 Cd 全量)^[15], 结果发现平均富集系数达到 33.93%, 数值很大。这一方面与莴笋对于 Cd 元素来说属于一种积累植物有关; 另一方面可能与土壤 pH 值较低, 利于碳酸盐结合态 Cd、铁锰结合态 Cd 等易于转化为生物有效性较高的交换态 Cd 有关。

2.3 土壤中各形态 Cd 与土壤基本理化性质的相关性

土壤物理和化学性质直接影响重金属的存在形态。表 3 表明, 物理性粘粒、粉粒和砂粒与全量 Cd 的相关性均达到极显著水平 ($P < 0.01$), 碳酸钙与水溶态 Cd、游离铁与残渣态 Cd 达到显著水平 ($P < 0.05$)。物理性粘粒及粉粒对各形态 Cd 的影响, 均为正相关关系。

2.4 土壤中 Cd 的生物有效性

对莴笋中 Cd 与 NH₄Ac-Cd 进行相关性分析的结果表明, 两者之间相关性显著 ($r = 0.820, P < 0.05, n = 6$)。通常采用适当的提取剂来反映土壤重金属的有效性, 供试土壤采用中性 1 mol/L 的 NH₄Ac 提取的 Cd 与植物 Cd 呈显著正相关, 可见应用中性

1 mol/L 的 NH₄Ac 提取紫色土 Cd 量来衡量土壤 Cd 的生物有效性是可行的。

2.5 土壤中各形态 Cd 与 NH₄Ac-Cd 的相关分析

土壤中 Cd 形态与 NH₄Ac-Cd 的相关分析(表 4) 表明, NH₄Ac 提取的 Cd 与离子交换态 Cd 极显著正相关, 相关系数为 0.938, 其他形态 Cd 与 NH₄Ac 提取的 Cd 关系不显著。由此可见, 离子交换态 Cd 具有最高的活性, 因而具有最大的生物有效性。而其他形态 Cd 的生物有效性难以单相关分析反映。

2.6 土壤中各形态镉对植物吸收的贡献

不同形态的 Cd 与莴笋中 Cd 的相关关系见表 5。表 5 结果表明, 对莴笋中 Cd 含量影响最大的是离子交换态的 Cd, 呈显著的正相关; 其次是碳酸盐结合态的 Cd 和水溶态的 Cd。通过逐步回归分析^[10], 得

出莴笋 Cd 含量与土壤 6 种 Cd 形态含量的数学模型为: $Y=1.513X+0.052(R=0.872)$ 。

式中: Y、X 分别代表莴笋中 Cd 含量、土壤中离子交换态 Cd。

由逐步分析结果可知, 土壤中离子交换态 Cd 对莴笋可食部分 Cd 累积量贡献最大, 说明供试土壤中离子交换态 Cd 具有较高的生物有效性。

3 结 论

(1)研究区土壤中 Cd 污染程度高。土壤各形态 Cd 总体分布特征为: 残渣态 Cd > 有机质结合态 Cd > 离子交换态 Cd > 碳酸盐结合态 Cd > 铁锰氧化物结合态 Cd > 水溶态 Cd, 其中易于被植物吸收的交换态 Cd(包括水溶态 Cd 和离子交换态 Cd)比重较大, 占到 15.00%。

表 3 供试土壤中不同形态 Cd 与土壤基本理化性质的相关系数
Table 3 Correlation coefficient between the content of total and different forms of Cd and the properties of soil

各形态 Cd	容重	CEC	有机质	碳酸钙	游离铁	pH	砂粒	粉粒	粘粒	物理性粘粒
全量	0.132	-0.300	0.311	0.002	0.517	-0.191	-0.924**	0.898**	0.252	0.924**
水溶态	0.359	0.253	-0.052	0.879*	-0.305	0.625	-0.165	0.295	-0.204	0.165
离子交换态	0.326	-0.713	0.199	-0.099	0.696	-0.361	-0.543	0.543	0.121	0.543
碳酸盐结合态	0.089	0.027	0.533	0.544	0.228	0.354	-0.238	0.226	0.075	0.238
铁锰氧化物结合态	-0.569	0.090	-0.215	-0.563	-0.103	-0.514	-0.055	0.193	-0.244	0.055
有机质结合态	0.514	0.128	-0.334	0.470	-0.222	0.331	-0.704	0.744	0.080	0.704
残渣态	-0.527	-0.453	0.760	-0.644	0.841*	-0.645	-0.205	0.105	0.233	0.205
NH ₄ Ac-Cd	0.088	-0.666	0.142	-0.198	0.649	-0.524	-0.614	0.724	-0.068	0.614

注: * 表示显著水平达 0.01, * 表示显著水平达 0.05, 下表同。

表 4 NH₄Ac-Cd 与各形态 Cd 的相关矩阵
Table 4 Correlative matrix of Cd forms with NH₄Ac-Cd

各形态 Cd	水溶态	离子交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	有机结合态	残渣态	NH ₄ Ac-Cd
水溶态	1.000						
离子交换态	0.383	1.000					
碳酸盐结合态	0.779	0.596	1.000				
铁锰氧化物结合态	-0.715	-0.458	-0.784	1.000			
有机结合态	0.579	0.318	0.192	-0.130	1.000		
残渣态	-0.410	0.398	0.217	0.122	-0.516	1.000	
NH ₄ Ac-Cd	0.277	0.938**	0.458	-0.160	0.348	0.450	1.000

表 5 不同形态的 Cd 与莴笋中 Cd 的相关矩阵
Table 5 Correlation coefficient between the content of total and different forms of Cd and the contents of Cd in vegetables

各形态 Cd	水溶态	离子交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	有机结合态	残渣态	全量	莴笋
水溶态	1.000							
离子交换态	0.383	1.000						
碳酸盐结合态	0.779	0.596	1.000					
铁锰氧化物结合态	-0.715	-0.458	-0.784	1.000				
有机结合态	0.579	0.318	0.192	-0.130	1.000			
残渣态	-0.410	0.398	0.217	0.122	-0.516	1.000		
全量	0.363	0.779	0.502	-0.139	0.637	0.322	1.000	
莴笋	0.603	0.872*	0.617	-0.529	0.295	0.112	0.534	1.000

(2)Cd 在土壤中的形态分布与物理性粘粒及粉粒关系密切,且都为正相关。碳酸钙与水溶态 Cd、游离铁与残渣态 Cd 呈正相关趋势。

(3) 应用中性 1 mol/L 的 NH_4Ac 提取紫色土 Cd 量来衡量土壤 Cd 的生物有效性是可行的。而各形态 Cd 中离子交换态 Cd 与 $\text{NH}_4\text{Ac}-\text{Cd}$ 达极显著正相关,因而其具备较高的生物有效性。

(4)研究区蔬菜(莴笋)中的 Cd 含量超标严重。土壤中 Cd 污染已经对研究区蔬菜的安全生产造成较严重的影响。分析蔬菜中的 Cd 与土壤中各形态 Cd 的关系,得出蔬菜(莴笋)中 Cd 含量与土壤中的离子交换态 Cd 呈显著地正相关,这再次表明了离子交换态 Cd 具有较高的生物有效性。建议采取有效措施加强城乡交错区的综合管理,以降低土壤中 Cd 的生态危害性。

参考文献 (References):

- [1] 秦明周, 赵杰. 城乡结合部土壤质量变化特点与可持续利用对策——以开封市为例[J]. 地理学报, 2000, 55(5):545-554.
 Qin Mingzhou, Zhao Jie. Strategies for sustainable use and characteristics of soil quality changes in urban-rural marginal area: A case study of Kaifeng [J]. Journal of Geographical Sciences, 2000, 55(5):545-554(in Chinese with English abstract).
- [2] 阎伍玖. 芜湖市城市边缘区土壤重金属污染空间特征研究 [J]. 地理科学, 2008, 28(2):282-285.
 Yan Wujiu. Heavy metal pollution in soils of periurban zone of Wuhu City[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(2):282-285(in Chinese with English abstract).
- [3] 钟晓兰, 周生路, 赵其国. 长江三角洲地区土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价——以太仓市为例 [J]. 地理科学, 2007, 27(3):395-400.

- Zhong Xiaolan, Zhou Shenglu, Zhao Qiguo. Spatial characteristics and potential ecological risk of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta——A case study of Taicang City, Jiangsu Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27 (3):395-400(in Chinese with English abstract).
- [4] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. 地理科学, 2005, 25(1):108-112.
 Guo Ping, Xie Zhonglei, Li Jun, et al. Specificity of heavy metal pollution and the ecological hazard in urbna soils of Changchun City [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25 (1):108-112 (in Chinese with English abstract).
- [5] 徐友宁, 张江华, 刘瑞平, 等. 金矿区农田土壤重金属污染的环境效应分析[J]. 中国地质, 2007, 34(4):716-722.
 Xu Youning, Zhang Jianghua, Liu Ruiping, et al. Environmental effects of heavy metal pollution of farmland soils in gold mining areas[J]. Geology in China, 2007, 34(4): 716-722 (in Chinese with English abstract).
- [6] 徐勇贤, 黄标, 史学正, 等. 典型农业型城乡交错区小型蔬菜生产系统重金属平衡的研究[J]. 土壤, 2008, 40(2):249-256.
 Xu Yongxian, Huang Biao, Shi Xuezheng, et al. Budget of heavy metals in small-sized vegetable farming system in a typical peri-urban agricultural area [J]. Soils, 2008, 40 (2):249-256 (in Chinese with English abstract).
- [7] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Anal. Chem., 1979, 51(7):844-850.
- [8] 南京农业大学主编. 土壤农化分析(第二版)[M]. 南京: 农业出版社, 1981.
 Nanjing Agricultural University (ed.). Agricultural Soil Analysis (Second Edition)[M]. Nanjing: Agriculture Press, 1981(in Chinese).
- [9] 国家环境保护局. 土壤环境质量标准 (GB15618-1995)[S]. 1995: 3-4.
 State Environmental Protection Administration of China. Environmental Quality Standard for Soils[S]. 1995:3-4(in Chinese).
- [10] 郦逸根, 薛生国, 吴小勇. 重金属在土壤—水稻系统中的迁移转

- 化规律研究[J]. 中国地质, 2004, 31(增刊):87-92.
- Li Yigen, Xue Shengguo, Wu Xiaoyong. Transport and transformation of heavy metals in the soil-paddy plant system[J]. *Geology in China*, 2004, 31 (supp.):87-92 (in Chinese with English abstract).
- [11] 杨忠芳, 陈岳龙, 钱筑, 等. 土壤 pH 对镉存在形态影响的模拟实验研究 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(1):252-260.
- Yang Zhongfang, Chen Yue-long, Qian Xun, et al. A study of the effect of soil pH on chemical species of cadmium by simulated experiments [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12 (1):252-260(in Chinese with English abstract).
- [12] 高山, 陈建斌, 王果. 淹水条件下有机物料对潮土外源镉形态及化学性质的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1):102-105.
- Gao Shan, Chen Jianbin, Wang Guo. Effects of organic materials on forms and chemical properties of added exogenous cadmium in submerged fluvo-aquic soil [J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2003, 9(1):102-105(in Chinese with English abstract).
- [13] 华路, 白铃玉, 韦东普, 等. 有机肥-镉-锌交互作用对土壤镉锌形态和小麦生长的影响 [J]. *中国环境科学*, 2002, 22(4):346-350.
- Hua Luo, Bai Lingyu, Wei Dongpu, et al. Effects of interaction by organic manure-Cd-Zn on Cd, Zn formation in soil and wheat growth [J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(4):346-350(in Chinese with English abstract).
- [14] 余贵芬, 蒋新, 和文祥, 等. 腐殖酸对红壤中铅镉赋存形态及活性的影响 [J]. *环境科学学报*, 2002, 22(4):508-513.
- Yu Guifen, Jiang Xin, He Wenxiang, et al. Effect of humic acids on species and activity of cadmium and lead in red soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2002, 22 (4):508-513 (in Chinese with English abstract).
- [15] Salt E D, Blaylock M B, Kumar NPBA, et al. Phytore-mediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Biotechnology*, 1995, 13:468-74.
- [16] 曹会聪, 王金达, 张学林, 等. Cd、Pb 投加浓度对黑土中化学形态分布及油菜生长和吸收 Cd、Pb 的影响 [J]. *生态学杂志*, 2007, 26(7):1043-1084.
- Cao Huicong, Wang Jinda, Zhang Xuelin. Effects of added concentrations of Cd and Pb on the distribution of Cd and Pb forms in black soil of northeast China and on the Cd and Pb uptake by cole[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(7):1043-1084(in Chinese with English abstract).

Modes of occurrence and bioavailability of Cd in soils of the urban-rural integration area

DU Fu-zhi¹, FU Wa-li¹, ZHEN Xiao-jun¹, DUAN Zheng-feng¹, WANG Su-fang²

(1. Soil Laboratory, School of Geographic Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Dongying Vocational College, Dongying 257091, Shandong, China)

Abstract: Characteristics of chemical forms of Cd in soils of the Urban-Rural-Integration-Area (URIA) in Chongqing were studied by using the sequential extraction method. Relations between the forms of Cd and the extent of metal accumulation in the asparagus lettuce were analyzed. The results show that the soils and the asparagus lettuce in the study area have been heavily polluted, and that different forms of Cd in soils are distributed in order of RES > ORG > EXC > CAB > OXI > WS, with the active exchange state Cd accounting for a relatively large proportion. The major factors affecting the chemical forms of Cd in soils are physical clay and powder content. Regression analysis shows that Cd in the EXC form has relatively high bioavailability. The Cd pollution in soils and vegetables has become rather serious in the study area, and thus this paper suggests the strengthening of the environmental management in the URIA.

Key words: Urban-Rural-Integration-Area; cadmium form; bioavailability; asparagus lettuce

About the first author: DU Fu-zhi, male, born in 1982, master, engages in soil environmental and water environmental research; E-mail: fzdu@163.com.

About the corresponding author: FU Wa-li, female, born in 1954, professor.