

长江下游富镉土壤元素分布特征 及其污染修复试验

廖启林¹ 黄顺生¹ 林仁漳² 范迪富¹ 金 洋¹ 朱伯万¹

(1. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018; 2. 南京大学环境科学系, 江苏 南京 210093)

摘要:在江苏长江沿岸一带新发现了大片富镉土壤,局部地段已经出现了蔬菜样品镉含量超标的重金属污染现象。笔者通过对江苏沿江富镉土壤元素地球化学特征的初步分析,探讨了引起局部土壤 Cd 污染的主要原因与特点,系统介绍了在南京八卦洲受 Cd 污染的蔬菜地开展现场重金属污染土壤修复与调控试验的主要研究资料与结果,发现施用适量的钙镁磷肥、石灰等固定剂对于降低蔬菜中的 Cd 含量有明显成效,为长江下游富 Cd 土壤区蔬菜安全生产提供了新的思路。

关键词:富镉土壤;元素分布;污染修复;试验;长江下游

中图分类号:S151.9⁺3;P595

文献标志码:A

文章编号:1000-3657(2008)03-0514-10

生态环境问题在当代地质调查与研究中所占比重正日益增加,传统地质领域从事地表物质组成与演化、元素迁移与富集之生态效应、环境治理等基础性应用性研究的成果正越来越丰富,近年来国内有关生态环境方面的研究论文逐渐增多^[1-8]。江苏地处长江下游,拥有国土面积 10.26 万 km²,第四系覆盖区所占比例位居全国各省(区)之冠,生态地质环境领域的研究起步较早,开展生态地球化学调查的条件得天独厚,已经于 2007 年 1 月率先在全国完成了其全部陆域国土的 1:25 万多目标区域地球化学调查,该项调查的一些成果信息笔者曾从不同层面作过多次报道^[9-15]。江苏省 1:25 万多目标区域地球化学调查资料发现,在长江沿岸一带冲积土壤中 Cd 相对富集趋势显著,深层土壤与表层土壤中 Cd 含量都普遍相对偏高,江苏与长江中上游各地沿江土壤中 Cd 相对高含量区一道构成了中国长江流域的大范围 Cd 区域地球化学巨型异常,这一全长江流

域性的 Cd 异常带已经引起社会各界的高度重视,中国地质调查局还针对长江流域的生态地球化学环境评价进行了立项,对长江下游沿江土壤中出现 Cd 等重金属相对富集现象,前人已做过一些初步研究^[16-18]。Cd 是毒害重金属元素,是环境中的持久性污染物之一^[19-20],在自然地质作用过程中 Cd 又属于分散微量元素,主要与闪锌矿等硫化物共生而局部富集于多金属矿床中^[21],从成矿活动中的珍贵稀散资源变成地表环境的重要污染因子,Cd 的地球化学行为及其有关生态环境效应一直是包括地球化学在内的各相关学科持续关注的学术热点^[22-25]。笔者通过对长江下游沿江富镉土壤基本地球化学特征的初步研究,解析了局部 Cd 污染土壤分布区的基本特点,并结合南京八卦洲地区部分受到 Cd 污染蔬菜地进行了实地修复与调控试验研究,现将有关资料整理发表,期望能为重金属污染土壤的修复治理提供一些经验。

收稿日期:2008-02-18;改回日期:2008-03-28

基金项目:江苏省科技厅项目(BS2006066)和中国地质调查局与江苏省人民政府合作项目(20031230008)联合资助。

作者简介:廖启林,男,1964 年生,博士,高级工程师,从事地球化学与矿床学专业;E-mail:liaoqilin64@jssmail.com.cn。

1 江苏沿江富镉土壤基本元素地球化学特征

江苏全省表层土壤 Cd 含量范围为 0.033~22.8 mg/kg, 其平均含量为 0.15 mg/kg、变异系数为 1.20,呈显著不均匀性分布。长江沿岸冲积层是全省相对最富镉的土壤分布区之一,苏州、无锡、常州、镇江、南京、扬州等沿江一带土壤呈现了清晰的相对富镉特征,大部分沿江冲积土壤 Cd 含量都在 0.20 mg/kg 以上(图 1),在自然环境与人为活动环境下、江苏沿江土壤的相对富镉特征都非常明显。其沿江富镉土壤在北岸分布范围要稍广于南岸,但南岸土壤的 Cd 含量总体要略高于北岸。对比全省 1:25 万多目标区域地球化学调查资料,发现江苏沿江富镉土壤元素含量分布有以下特点:

(1)相对富镉土壤主要沿长江两岸冲积层分布,大部分地区 Cd 含量一般为 0.2~0.4 mg/kg, 其元素组合以相对富 Cd、Pb、Zn、Cu、Mo、Cr、Ni、Co、Be、

Ba、B、Ag、Au、Al、F、K、Mg、Nb、Ti、TOC, 贫 Br、I、Si、U、Zr 等为特征,酸碱度明显偏碱性。

(2)典型土壤沉积柱元素含量垂向变化对比显示,沿江富镉土壤区不同沉积深度 Cd 含量较稳定,没有出现自然环境与人为活动环境之间的显著含量拐点,这与有机碳含量(TOC)变化有明显区别,Hg、Pb 等重金属在局部也出现了人为活动环境含量明显高于自然环境的现象,说明沿江土壤相对富镉主要来自上游沉积物的自然输送。这一现象在江苏扬中地区(长江中心第二大岛)的 2 个土壤沉积剖面中表现得尤为明显(图 2)。

(3)越靠近下游,沿江土壤中 Cd 含量总体呈降低趋势,长江入海口一带冲积土壤 Cd 含量基本接近当地土壤 Cd 背景含量。

(4)元素含量形态研究资料显示,沿江富镉土壤中,其土壤中 Cd 有效态含量明显高于其他重金属^①,指示当地土壤中 Cd 污染风险相对最高。

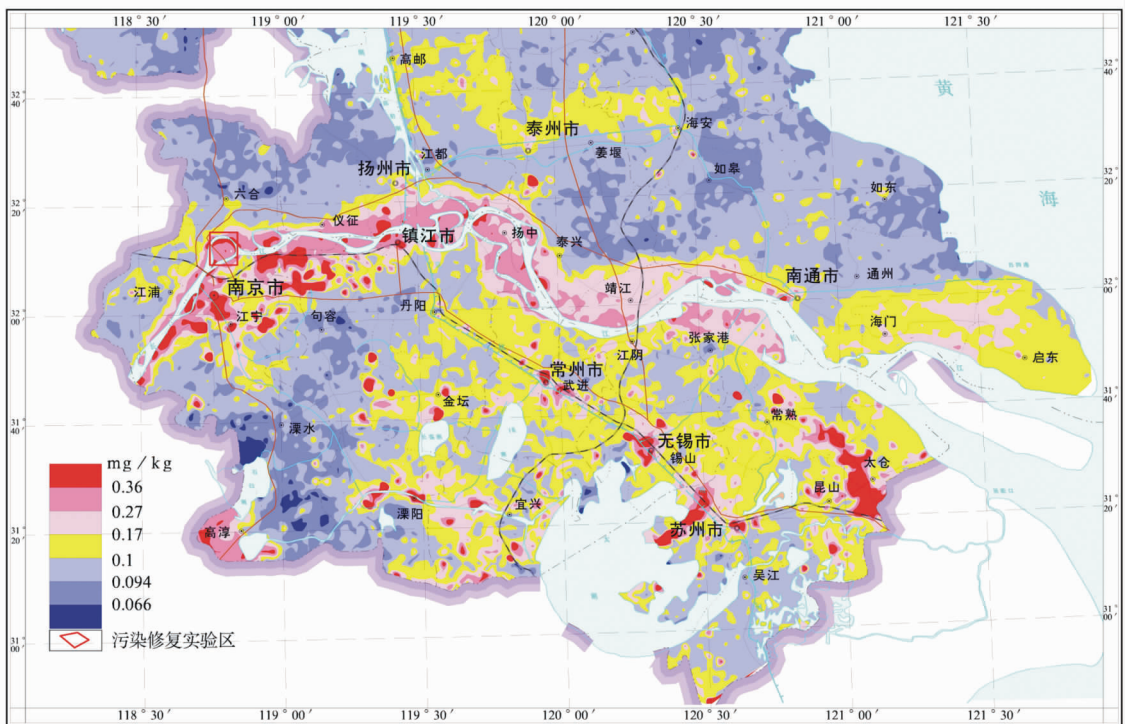


图 1 江苏长江沿岸表层土 Cd 元素地球化学

Fig.1 Cd geochemical map of topsoils along the banks of the lower reaches of the Yangtze River, Jiangsu

①夏学齐,陈骏,季峻峰. 苏南沿江地区镉生态地球化学特征及其反射光谱研究. 南京大学博士研究生毕业论文, 2007.

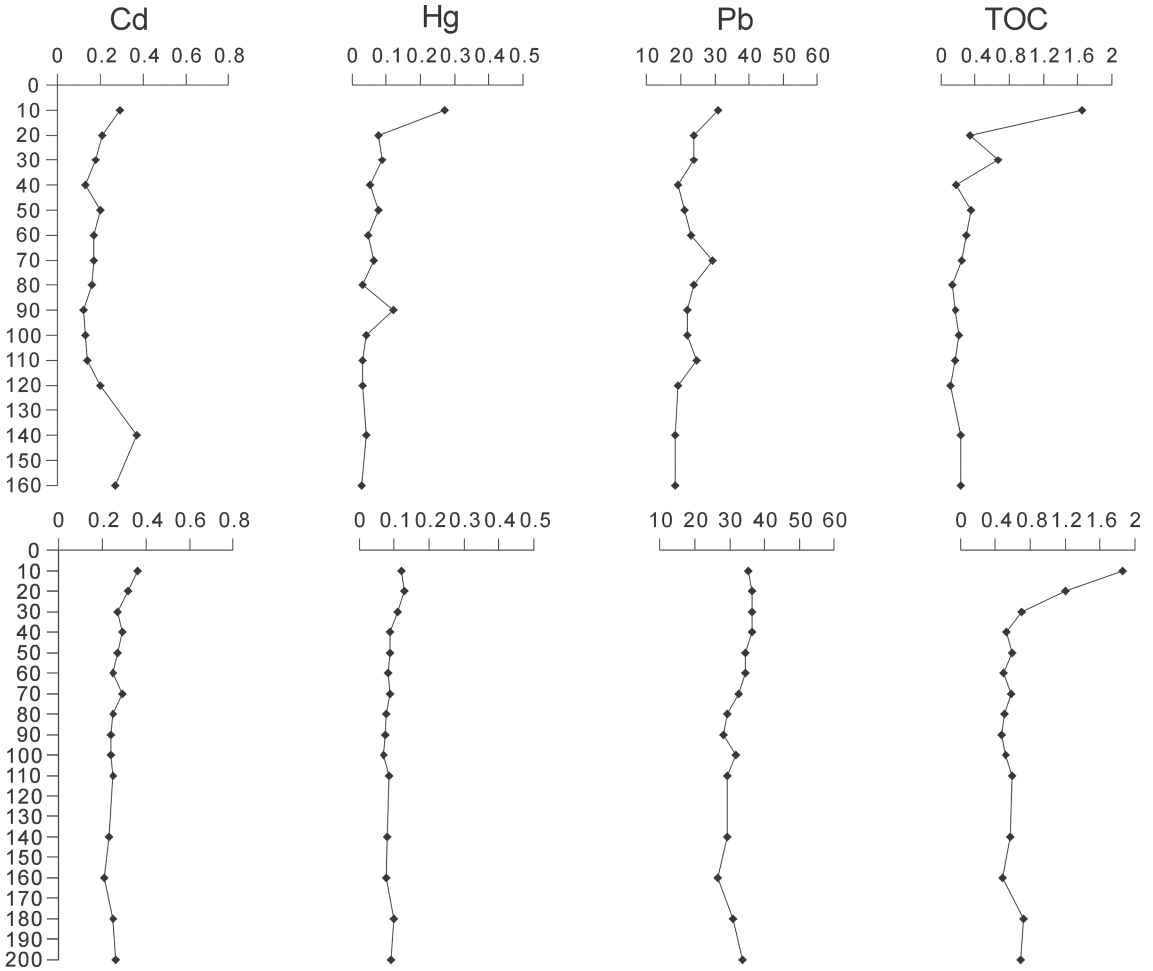


图 2 扬中地区典型土壤柱元素含量垂向变化(上图为江滩沉积柱,下图为沿江农田土壤)

Fig.2 Vertical change in element contents along the typical soil vertical sections in the Yangzhong area, Jiangsu

2 典型镉污染土壤区生态效应

针对江苏沿江土壤相对富镉的现状,选择重点地段进行了Cd高含量土壤的生态效应评价。在南京八卦洲蔬菜产地,发现当地品牌蔬菜——芦蒿样品中的确存在Cd含量超标(>0.05 mg/kg)现象(表1),从表1可以看出当地蔬菜根系土的Cd含量与沿江富镉土壤完全一致,蔬菜(芦蒿)样品中Cd含量超标比较普遍,Cd含量超标蔬菜样品与根系土酸碱度关系密切,根系土pH值低于7.0的样品,其蔬菜中Cd含量明显偏高,芦蒿中Cd含量>0.05 mg/kg的超标样品主要分布在pH值相对偏低的根系土中。而且还

发现,在当地蔬菜根系土中,pH值相对偏低的样品,其土壤的有机碳含量占总碳的比例(TOC/C)也很高,都在90%以上,最高可达99%,说明当地相对偏酸性土壤中所含的碳基本都是有机碳,天然肥力相对更优越,想通过调节当地土壤中有机质含量来达到吸附固定毒害重金属Cd将相当困难。

对八卦洲蔬菜产地芦蒿样品Cd含量与根系土酸碱度(pH值)进行相关性统计分析后,发现芦蒿样品中Cd含量与其根系土pH值呈显著负相关(图3),说明在当地根系土Cd含量相对稳定的情况下,芦蒿的Cd含量明显受当地土壤酸碱度的控制,土壤酸性越强(pH值越低),芦蒿Cd含量相对越高、

表 1 八卦洲地区蔬菜(芦蒿)与根系土样品元素含量
Table 1 Elements contents in vegetable and rhizosphere soil samples in the Baguazhou areas

样点编号	蔬菜(芦蒿)样 (mg/kg)		土壤 (mg/kg)					
	Cd	Pb	Cd	Pb	Cr	TOC/%	TOC/C	pH
BG001	0.21	0.045	0.32	45.4	125	1.29	0.992	6.11
BG003	0.12	0.046	0.35	40.1	109	1.17	0.9	7.88
BG004	0.058	0.071	0.36	40.1	103	1.07	0.669	8.0
BG013	0.061	0.054	0.26	35.7	97.1	1.08	0.831	7.96
BG014	0.046	0.046	0.32	38.4	97.4	1.08	0.831	8.01
BG005	0.048	0.021	0.42	38.4	114	1.11	0.653	7.76
BG022	0.067	0.056	0.26	34	87.8	1.09	0.838	7.93
BG015	0.064	0.029	0.27	34	82.6	1.08	0.831	8.22
BG012	0.053	0.18	0.16	90.6	123	0.94	0.637	8.13
BG009	0.035	0.056	0.4	34.9	81	0.91	0.607	7.81
BG035	0.13	0.09	0.3	41.5	96.3	1.29	0.992	7.88
BG026	0.38	0.1	0.36	41	110	1.29	0.992	5.42
BG034	0.18	0.23	0.31	44.5	109	1.29	0.992	5.5
BG036	0.2	0.94	0.3	43.7	112	1.29	0.992	5.3
BG030	0.14	0.16	0.4	27.9	71.4	0.68	0.425	8.34
BG029	0.05	0.06	0.35	38.4	99	1.18	0.694	7.92
BG028	0.11	0.08	0.34	37.5	99.1	1.1	0.579	8.15
BG031	0.1	0.19	0.32	31.4	89.5	1.18	0.694	7.92
BG027	0.2	0.21	0.29	41	107	1.29	0.992	4.95
BG033	0.11	0.27	0.28	36.6	79.6	1.07	0.563	7.95
BG037	0.28	0.2	0.73	45.4	109	1.38	0.92	5.71
BG023	0.12	0.23	0.41	26.1	56.8	0.94	0.627	7.7
BG024	0.09	0.22	0.31	36.6	100	1.09	0.838	7.94
BG025	0.25	0.21	0.29	40.1	105	1.29	0.992	6.07

越容易超标。这也为进行 Cd 污染土壤的修复与调控试验提供了具体依据,通过调节土壤的酸碱度,达到阻止富集在土壤中的重金属向植物转移,以前有关研究结果也完全支持这一观点^[16,18-19,26]。

为了进一步证实当地土壤中相对富集的 Cd 是否影响植物品质,又在一些根系土 Cd 高含量点附近采集了部分土壤溶液与地表水(主要为当地蔬菜灌溉水)对比样,分析其中 Cd 等重金属元素含量,发现所采 4 个土壤溶液样品中 Cd、Cu 等重金属元素含量都明显高于其对应部位的地表水(图 4),证明当地土壤中富集的 Cd 已经向土壤溶液转移,土壤中的 Cd 是导致其部分蔬菜样品 Cd 含量超标的直接因素,开展当地蔬菜生产环境下的 Cd 污染土壤修复具有现实意义。

对南京八卦洲地区沿江富镉土壤生态效应的初步评价认为:

(1)八卦洲表层土壤中所相对富集的 Cd 已经影响到当地部分蔬菜的品质,当地芦蒿中存在部分 Cd 含量超标的样品,表明蔬菜地已经出现 Cd 污染。蔬菜样品中 Cd 含量超标受当地根系土的酸碱度控制,在当地根系土中 Cd 含量基本稳定的背景下,越偏酸性的土壤越容易出现蔬菜 Cd 含量超标。

(2)当地偏酸性土壤的有机碳含量占其总碳的 90%以上,天然肥力相对丰富。土壤溶液中的 Cd 含量远高于其地表灌溉水样品,证实土壤中富集的 Cd 已经开始向土壤溶液转移。

(3)选择八卦洲受到 Cd 污染的蔬菜地进行修复与调控试验,具有重要现实意义,通过人为调节当地土壤的酸碱度可能是阻止污染土壤中 Cd 向植物转移的有效途径。综合长江下游 Cd 污染土壤的各方面情况,最后选择在南京八卦洲芦蒿等蔬菜产地开展了其 Cd 污染土壤的修复与调控试验研究。

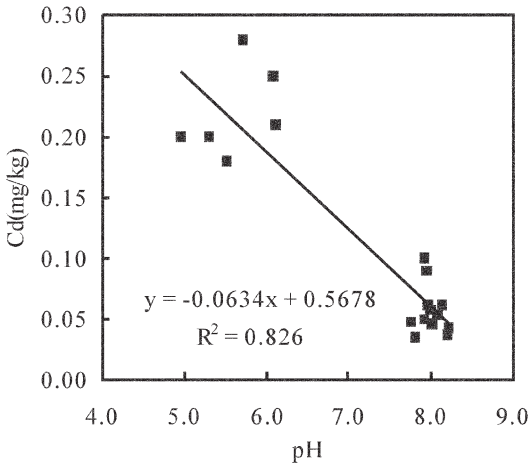


图3 八卦洲地区蔬菜样品 Cd 含量与其根系土 pH 值相关性

Fig.3 Correlation between the Cd contents in vegetable samples and pH in rhizosphere soils in the Baguazhou area, Nanjing

3 原位化学固定修复试验及其效果

原位化学固定修复是消除土壤重金属污染影响、确保污染区农产品质量的常用技术,视所施用固定剂的差异,又可分为不同的修复手段,但其本质都属于化学修复方法^[27-29]。本次在八卦洲芦蒿等蔬菜产地针对受到 Cd 污染的土壤进行了为期 2 年多的实地修复试验研究工作,主要是通过向当地土壤添加不同种类、不同剂量的化学固定剂,观察不同化学固定剂对当地芦蒿安全种植的影响效果。修复试验

点位于南京市八卦洲镇新河路旁的芦蒿种植基地,当地表层土壤以灰、灰黄色亚砂、亚砂土为主,偶含少量灰、灰黄色亚粘土、亚砂土,粘粒含量约为 27%,主要矿物以石英、水云母为主,含少量蒙脱石、高岭土等粘土矿物及晶质硅、铝、铁的水合氧化物,对应土壤类型为油泥土,属于典型的第四纪长江冲积沙洲。实地修复与调控试验时间为 2005—2007 年(周期近 3 年)。

具体修复试验流程:选择一 300 m² 的长方形地块,平整后用 PVC 隔板隔为若干 1×2 m² 的长方形小区,隔板埋深 25 cm。每 3 个相邻的小区为 1 组平行试验单元,不同处理之间间隔 1m 隔离带,固定剂的添加水平分别按小区耕作层土壤重量的 0.05%、0.1%、0.5% 计算(耕作层厚度按 20 cm 计算)。试验时先挖出土壤,风干(晒干)后,将大块土粒打细,均匀撒上固定剂,充分混匀后平整土地,即可进行耕作,试验期间按照当地习惯进行田间管理(试验田块仍由其主人继续按照本次确定的试验方案正常种植芦蒿)。实地修复所用化学固定剂及其施用量如表 2 所示。最后采集修复前后同一田块所种植的芦蒿样品,分析测试其 Cd 含量,考察所用各固定剂的修复与调控效果。

本次共使用了石灰、钙镁磷肥、硅肥、骨炭粉、高炉渣、钢渣等 6 种材料(固定剂)做现场对比试验,取得的研究数据表明:

(1) 上述所选用固定剂均为碱性物质,能够不同程度地提高土壤 pH,增加土壤颗粒对 Cd 的吸附固定作用,促进土壤 Cd 从生物可利用性高的形态向

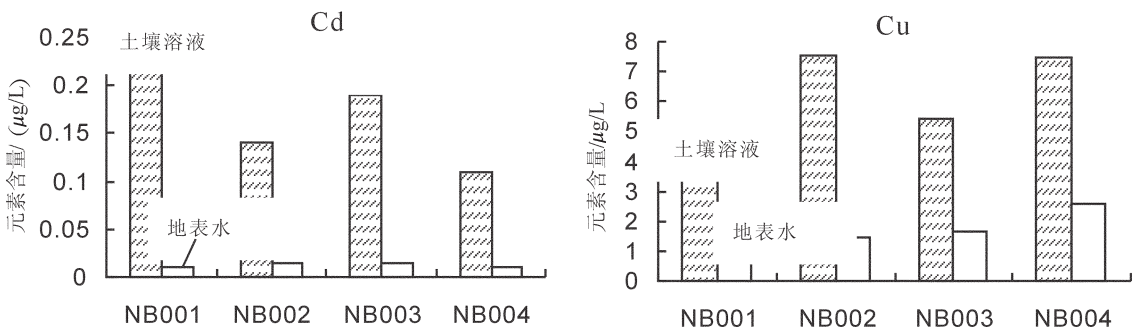


图4 八卦洲地区土壤溶液、地表灌溉水中 Cd 与 Cu 含量对比(花纹示土壤溶液,空白方块示灌溉水)

Fig.4 Comparison between Cd and Cu concentrations in soil solutions and those in irrigating water at the surface at 4 sampling sites in the Baguazhou area (pattern denote soil solutions and open while square denote irrigating water)

表 2 实地修复试验所用试剂及其配方
Table 2 Reagents for on-the-spot remediation test and their proportions in the field

编号	说明	编号	说明
CK	对照	D ₁	0.05%骨炭粉
A ₁	0.05%石灰	D ₂	0.1%骨炭粉
A ₂	0.1%石灰	D ₃	0.5%骨炭粉
A ₃	0.5%石灰	E ₁	0.05%钢渣
B ₁	0.05%硅肥	E ₂	0.1%钢渣
B ₂	0.1%硅肥	E ₃	0.5%钢渣
B ₃	0.5%硅肥	F ₁	0.05%高炉渣
C ₁	0.05%钙镁磷肥	F ₂	0.1%高炉渣
C ₂	0.1%钙镁磷肥	F ₃	0.5%高炉渣
C ₃	0.5%钙镁磷肥		

迟效态转化。在修复区的土壤环境条件下,为了达到农产品安全目的,钙镁磷肥、石灰、硅肥等的施用量必须大于 0.5%(按田块耕层土壤重量计,余同),其他几种固定剂则需更高的施用量。固定剂本身所含重金属含量均在农用标准范围内,施用不会引起土壤二次污染,由于在达到修复目标时的施用量相对较少,因此一方面可以降低修复成本,另一方面调节土壤 pH 在中性范围,不会因 pH 过高而导致其他微量元素缺乏或产生其他不利影响,最大限度地减少了对土壤微生态环境的干扰,因此更易被接受。

(2)6 种固定剂总体上均不同程度降低了植物

对 Cd 的吸收,但固定效果存在差异,其中钙镁磷肥和石灰的控制效果最好,在 0.5%的施用量下,这 2 种固定剂可以使第一茬芦蒿及随后种植的空心菜可食部位 Cd 含量控制在安全范围左右。综合比较,各种固定剂抑制植物吸收 Cd 的效果从大到小排序依次为:钙镁磷肥>石灰≥硅肥>骨炭粉≈高炉渣≥钢渣。前人^[2]曾用石灰修复受重金属污染的土壤,取得了较好效果,本次新发现了钙镁磷肥是阻止土壤中富集的 Cd 进入蔬菜的最好固定剂,在不同批次所采集芦蒿样品中,只有使用了 0.5%钙镁磷肥做固定剂的田块,其芦蒿样品的 Cd 含量达到了蔬菜食品安全限制要求(Cd 含量≤0.05 mg/kg)。在施用量为 0.5%时,钙镁磷肥使芦蒿根系 Cd 含量比对照下降 49.7%、茎 Cd 下降 59.2%、叶 Cd 下降 50.4%,均低于食品安全限量值;其次是石灰和硅肥,0.5%施用量时,使芦蒿可食部位 Cd 含量降低到限量标准附近。

(3)施用固定剂后,不同时间段生长的蔬菜(芦蒿等)Cd 含量有一定差别,一般以第一茬芦蒿的调控效果最好。第一茬芦蒿根系的 Cd 含量在 0.023~0.059 mg/kg,茎 Cd 含量在 0.038~0.107 mg/kg(图 5),叶 Cd 含量在 0.033~0.113 mg/kg,根、茎、叶 Cd 含量的变化趋势基本上一致,它们之间的相关系数在 0.628~0.737,呈极显著相关(P<0.01)。与第一茬相比,第二茬芦蒿茎 Cd 含量略有升高,含量范围为 0.049~0.130 mg/kg,但 0.5%的钙镁磷肥和石灰处理仍然使芦蒿茎 Cd 含量维持在食品安全限量值附

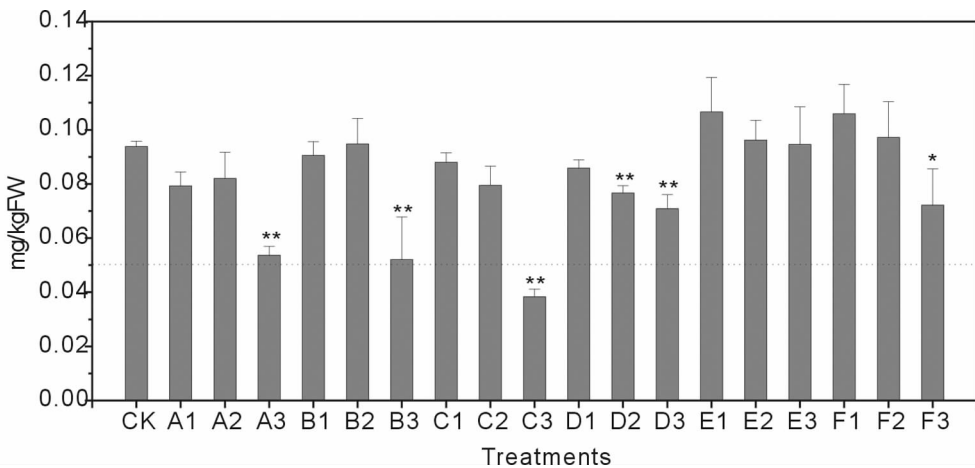


图 5 第一茬芦蒿茎 Cd 含量(使用固定剂后)

Fig.5 Cd concentrations in samples of *Artemisia selengensis* Turoz after using different fixation agents)

近,说明这两种固定剂在降低土壤 Cd 生物可利用性方面具有一定的特效性。第二茬芦蒿茎的 Cd 含量总体上比第一茬的有所升高,说明固定剂的作用效果有一定的时效性,随着时间延长,其抑制植物吸收 Cd 的效果会下降,这可能与土壤 Cd 的重新活化有关。

(4)对于硅肥、骨炭粉、高炉渣、钢渣等修复与调控效果未达到理想效果的固定剂,进一步增加施用量后,能否使当地蔬菜样品中重金属 Cd 含量达到标准限值,还有待进一步研究。对于在早期能产生显著效果的 0.5%钙镁磷肥和石灰等固定剂,其最长久的固定时效也还需要进一步探索与研究。

4 结论与讨论

本项目在研究上述八卦洲地区 Cd 等重金属污染土壤的生态修复技术时,也曾开展过添加江苏盱眙产的凹凸棒石粘土的对比研究,初步发现在实地耕种过程中添加一定量的凹凸棒石粘土也能有效降低蔬菜中 Cd 含量^[30],添加凹凸棒石粘土的调控效果基本与施用钙镁磷肥相当,该项研究还正在深入进行之中,说明选择修复长江下游受 Cd 等重金属污染土壤的理想材料还有较大探索空间。

土壤中重金属元素的含量变化及其生态效应已经成为全球科学家共同关注的环境问题,这方面的研究成果与新认识也越来越丰富^[2,4,7,16,18-20,24,26,29,31-33]。长江下游沿江一带分布有大面积的相对富 Cd 土壤,这些富 Cd 土壤局部地段已经出现 Cd 等重金属污染,江苏沿江局部地段蔬菜产地的 Cd 污染是其中的代表之一。长江下游沿江富 Cd 土壤的物质来源有相当一部分来自长江上游,这些主要由长江冲积物长期淤积而成的沙粘土,因为种种原因很容易被当地规划为蔬菜种植基地,客观地讲,若这套土壤中不是含有相对偏高的重金属镉含量,作为蔬菜生产基地的其他自然条件都还是比较好的。这就提出了如何调控、阻止沿江富镉土壤中的毒害重金属 Cd 尽量不向植物转移或迁移的问题,修复局部被 Cd 污染的土地、确保其农作物生产环境的安全也显得格外有现实意义。本次通过对江苏境内沿江富镉土壤的元素地球化学特征研究,因地制宜地开展了南京八卦洲受 Cd 污染蔬菜地的修复与调控试验,丰富了前人进行土壤重金属污染修复的有关成果,取得初步结论如下:

(1)分布于江苏沿江冲积层一带的相对富 Cd 土壤,其 Cd 含量一般比较稳定,在没有特殊人为污染因素的影响下,其土壤 Cd 含量多为 0.2~0.4 mg/kg,从地表到 200 cm 沉积深度内基本都是如此,除相对富 Cd 外,这套土壤还以富 Pb、Zn、Cu、Mo、Cr、Ni、Be、Ba、K、Mg 等元素、贫 Br、I、Si、U、Zr 等为特征,正常情况下偏碱性、pH 值多大于 7.5。该套土壤有机质含量相对偏高,天然肥力比较丰富。局部酸化是导致当地土壤中 Cd 向植物转移的重要诱因,在大片土壤的 Cd 含量相对稳定的背景下,pH 值偏低部位的土壤所产蔬菜 Cd 含量超标比例明显偏高。同时,pH 值偏低部位的土壤中有有机碳占总碳的比例也很高,当地土壤中的碳基本都属于有机碳,这又为放弃或修复这些被 Cd 污染的土地增加了难度。

(2)针对南京八卦洲地区在芦蒿种植过程中所遇到的蔬菜 Cd 含量超标问题,进行了将近 3 年的实地修复与调控研究,研究开发了以石灰、硅肥、钙镁磷肥为主要土壤添加剂的 Cd 污染土壤的化学固定修复技术,认为施用固定剂处理可促进土壤中 Cd 从生物可利用性高的形态向低的形态转化,从而抑制植物吸收 Cd。其中,钙镁磷肥、石灰的抑制效果最好,在 0.5%的施用量下,这 2 种固定剂可使芦蒿和第二茬空心菜的可食部位 Cd 含量控制在安全标准值附近。化学修复添加固定剂的办法有一定的时效性,为了获得持续的修复效果,可以采取不断追施固定剂的策略以达到农产品安全生产的目的,但应尽量避免一次性施用量过大。

(3)施用固定剂修复被重金属污染的土壤,并没有从根本上降低土壤中镉(Cd)的含量,但改变了土壤中的 Cd 进入植物的速度与路径。土壤中镉一般分为可给态、代换态和不溶态,其中可给态、代换态镉都可以为植物通过不同途径所吸收,只有不溶态镉一般不能为植物吸收^[24,26,29]。施用不同的固定剂都可以在一定程度上发挥阻止土壤中镉进入植物的作用,将施用钙镁磷肥、石灰等化学固定剂的修复效果与实地添加凹凸棒石粘土的效果做一初步对比,发现凹凸棒石粘土因为具有较大的比表面积和很强的吸附性能,天然呈弱碱性,也可以有效降低当地芦蒿中镉的含量,最大降幅近 50%,1 m² 土地添加 2000 g 凹凸棒石粘土即能收到显著效果^[30],施用适量凹凸棒石粘土的修复调控效果基本可与钙镁磷肥等化学固定剂相当。因为凹凸棒石粘土是天然的非金属矿

物资源,在江苏储藏量十分丰富,从这个角度而言其用于生态修复的潜力相对更大。

(4)长江下游沿江一带受到 Cd 污染的蔬菜地不只一处,开展这一带重金属污染土壤的修复与调控试验研究具有广阔的前景。钙镁磷肥、凹凸棒石粘土等相对廉价材料,可在当地受到 Cd 等重金属污染的土地修复中发挥重要作用,值得有关方面重视。

致谢:该项目的研究得到了江苏省地质调查研究院及江苏省国土资源厅科技处有关领导的大力支持与帮助,参加或协助该项研究的还有吴新民、华明、颜朝阳、翁志华、毕葵森、陈宝、潘永敏、仇慎平等同志,样品分析由江苏省地质调查研究院测试分析研究所完成,具体研究中得到了南京大学环境科学系王晓蓉教授、郭红岩博士、顾雪元博士的指导与帮助,在此一并诚致谢忱!

参考文献 (References):

- [1] 蔡清海,杜琦,钱小明,等.福建三沙湾海洋沉积物中重金属和过渡元素来源分析[J].地质学报,2007,81(10):1444-1448.
Cai Qinghai, Du Qi, Qian Xiaoming, et al. Analysis on source of heavy metals and transitional element in marine sediment in the Sansha Bay of Fujian[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(10):1444-1448 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李航,叶霖,肖唐付,等.云南金顶超大型铅锌矿区镉的地球化学特征及其环境效应[J].矿物学报,2007,27(2):225-232.
Li Hang, Ye Lin, Xiao Tangfu, et al. Geochemistry and environmental effect of cadmium in Jinding Pb-Zn deposit of Yunnan [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 27 (2):225-232 (in Chinese with English abstract).
- [3] 孟伟,赫英臣.废物处置场地地质屏障的环境安全评价 [J]. 中国地质,2007,34(1):166-172.
Meng Wei, He Yingchen. Environmental safety assessment of geological barriers for the solid waste disposal site [J]. Geology in China, 2007, 34(1):166-172(in Chinese with English abstract).
- [4] 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).
- [5] 黄润秋,徐则民.西南典型城市环境地质问题与城市规划 [J]. 中国地质,2007,34(5):894-906.
Huang Runqiu, Xu Zemin. Environmental geological issues of typical cities in southwest China and city planning [J]. Geology in China, 2007, 34(5):894-906.(in Chinese with English abstract).
- [6] 唐文春,张秀芝,何玉生,等.成都盆地平原区浅层土壤 Cd、Pb、Zn 分布特征及其成因初探[J].地球化学,2007,36(1):89-97.
Tang Wenchun, Zhang Xiuzhi, He Yusheng, et al. Distribution and origin of Cd, Pb and Zn in topsoils of plain region of Chengdu Basin [J]. Geochimica, 2007, 36(1):89-97(in Chinese with English abstract).
- [7] 张久潮,曹淑萍.天津城郊污染区土壤 Cd 的赋存形态及其对蔬菜的影响[J].地质通报,2007,26(11):1494-1498.
Zhang Jiuchao, Cao Shuping. Speciations of Cd in soils in a polluted area in the suburbs of Tianjin Municipality, China [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(11):1494-1498(in Chinese with English abstract).
- [8] 牟永明,陈明,冯流,等.土壤 Cd 污染对甘蓝光学显微成像特征的影响[J].地质通报,2007,26(11):1503-1508.
Mu Yongming, Chen Ming, Feng Liu, et al. Effects of Cd pollutions in soils on the characteristics of optical microscopic imaging of cabbage [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(11):1503-1508(in Chinese with English abstract).
- [9] 廖启林,吴新民,翁志华,等.南京地区多目标地球化学调查基本成果及其相关问题初探[J].中国地质,2004,31(1):70-77.
Liao Qilin, Wu Xinmin, Weng Zhihua, et al. Basic results of multi-target geochemical survey of the Nanjing area and its relevant problems[J]. Geology in China, 2004, 31(1):70-77.
- [10] 廖启林,金洋,吴新民,等.南京地区土壤元素的人为活动环境富集系数研究[J].中国地质,2005,32(1):141-147.
Liao Qilin, Jin Yang, Wu Xinmin, et al. The artificial environmental concentration coefficient of elements from topsoil in Nanjing areas [J]. Geology in China, 2005, 32 (1):141-147 (in Chinese with English abstract).
- [11] 廖启林,黄顺生,范迪富,等.微量元素在湖积物、土壤的垂向分布与稻谷中的分配[J].第四纪研究,2005,25(3):331-339.
Liao Qilin, Huang Shunsheng, Fan Difu, et al. Vertical distribution in lake sediments and soils and partition within paddy for relevant trace elements:preliminary testing part results from eco-geochemical survey in Jiangsu [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25 (3):331-339(in Chinese with English abstract).
- [12] 廖启林,范迪富,金洋,等.江苏农田土壤生态环境调查与评价[J].江苏地质,2006,30(1):32-40.
Liao Qilin, Fan Difu, Jin Yang, et al. On investigation and appraisal of ecological environment of farmland soil in Jiangsu [J]. Jiangsu Geology, 2006, 30(1):32-40(in Chinese with English abstract).
- [13] 廖启林,金洋,黄顺生,等.江苏省耕作层土壤磷素分布特征初步研究[J].中国地质,2006,33(6):215-221.
Liao Qilin, Jin Yang, Huang Shunsheng, et al. Distribution characteristics of phosphorus in topsoil of Jiangsu [J]. Geology in China, 2006, 33(6):215-221(in Chinese with English abstract).
- [14] 廖启林,华明,冯金顺,等.苏南局部富硒土壤及其天然富硒茶叶初步研究[J].中国地质,2007,34(2):347-353.
Liao Qilin, Hua Ming, Feng Jinshun, et al. Natural Se-rich tea in local soils in southern Jiangsu [J]. Geology in China, 2007, 34(2):347-353(in Chinese with English abstract).
- [15] Liao Qilin, Les J. Evans, Xueyuan Gu, et al. A regional geochemical survey of soils in Jiangsu Province, China: Preliminary

- assessment of soil fertility and soil contamination [J]. *Geoderma*, 2007, 142:18-28.
- [16] 潘根兴, 成杰民, 高建琴, 等. 江苏吴县土壤环境中某些重金属元素的变化[J]. *长江流域资源与环境*, 2000, 9(1):51-55.
Pan Genxing, Cheng Jiemin, Gao Jianqin, et al. On the change of status of some heavy metal elements in soil environment under intensive economical development [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2000, 9(1):51-55.
- [17] 成杭新, 杨忠芳, 奚小环, 等. 长江流域沿江镉异常示踪与追源的战略与战术[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(3):285-291.
Cheng Hangxin, Yang Zhongfang, Xi Xiaohuan, et al. Strategy and tactics for tracing and source tracking of Cd anomalies along the Changjiang River basin [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(3):285-291 (in Chinese with English abstract).
- [18] Huang S S, Liao Q L, Hua M, et al. Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong district, Jiangsu Province, China[J]. *Chemosphere*, 2007, 67:2148-2155.
- [19] Obata H, Umabayashi M. Effect of cadmium on mineral nutrient concentration in plant differing in tolerance for cadmium[J]. *Journal Plant Nutri*, 1997, 20:97-105.
- [20] Millis P R, Ramsey M H, Jone E A. Heterogeneity of cadmium concentration in soils as a source of uncertainty in plant uptake and its implications for human health risk assessment [J]. *Science of Total Environment*, 2004, 326(1-2-3):49-53.
- [21] Jiang S Y, Liao Q L, Zhao K D, et al. Mineral chemistry of Cd-rich sphalerite from the giant Jinding Pb-Zn deposit, Yunnan, China[J]. *Lithos*, 2004, 73(1-2):52-52.
- [22] Xian X. Chemical partitioning of cadmium, zinc, and lead in soils near smelts[J]. *Environ. Sci. Health A*, 1987, 6:527-541.
- [23] Yusuf A A, Arowolo T A, Bamgbose O. Cadmium, copper and nickel levels from industrial and residential areas of Lagos City, Nigeria[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2003, 41(3):375-378.
- [24] 李非里, 刘丛强, 杨元根, 等. 贵阳市郊菜园土—辣椒体系中重金属的迁移特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(4):52-56.
Li Feili, Liu Congqiang, Yang Yuangen, et al. Characteristics of heavy metal transportation in vegetables soil and Capsicum (*Capsicum frutescens* L.Var.Longum Bailey) System in Guiyang, Southwest China [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(4):52-56(in Chinese with English abstract).
- [25] 李航, 双燕, 朱长生, 等. 金顶铅锌矿区铅锌氧化矿石中镉的风化淋滤实验[J]. *生态环境*, 2007, 16(4):1121-1124.
Li Hang, Shuang Yan, Zhu Changsheng, et al. Leaching experiments on Cadmium release from Cd-rich oxidized rocks at Jinding Pb-Zn Deposit[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(4):1121-1124(in Chinese with English abstract).
- [26] 雷鸣, 廖柏寒, 秦普丰. 土壤重金属化学形态的生物可利用性评价[J]. *生态环境*, 2007, 16(5):1551-1556.
Lei Ming, Liao Bohan, Qin Pufeng. Assessment of bioavailability of heavy metal in contaminated soils with chemical fractionation [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16 (5):1551-1556 (in Chinese with English abstract).
- [27] Calace N, Campisi T, Iacondini A, et al. Metal-contaminated soil remediation by means of paper mill sludge addition:chemical and ecotoxicological evaluation[J]. *Environ. Pollut*, 2005, 136:485-492.
- [28] Mulligan C N, Yong R N, Gibbs B F. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater:a review [J]. *Engine Geology*, 2001, 60:193-207.
- [29] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. 施用石灰对 Pb、Cd、Zn 在土壤中的形态及大白菜中累积的影响[J]. *生态环境*, 2007, 16(6):1710-1713.
Du Caiyan, Zu Yanqun, Li Yuan. Effect of liming and pig manure application on fractions of Cd, Pb and Zn in soil and their accumulation in Chinese cabbage [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6):1710-1713(in Chinese with English abstract).
- [30] 范迪富, 黄顺生, 廖启林, 等. 不同量剂凹凸棒石粘土对镉污染菜地的修复实验[J]. *江苏地质*, 2007, 31(4):323-328.
Fan Difufu, Huang Shunsheng, Liao Qilin, et al. Restoring experiment on cadmium polluted vegetable lands with attapulgite of varied dose [J]. *Jiangsu Geology*, 2007, 31(4):323-328(in Chinese with English abstract).
- [31] 张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤环境质量演变及其生态环境效应[J]. *生态学报*, 2003, 23(3):539-546.
Zhang Ganlin, Zhu Yongguan, Fu Bojie. Quality changes of soils in urban and suburban areas and its eco-environmental impacts—A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3):539-546(in Chinese with English abstract).
- [32] 郑冬梅, 王起超, 张仲胜, 等. 葫芦岛市五里河土壤—植物系统中汞的迁移[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(5):676-680.
Zheng Dongmei, Wang Qichao, Zhang Zhongsheng, et al. Transfer of mercury in soil-plant system of Wuli River, Huludao City [J]. *China Environmental Sciences*, 2007, 27 (5):676-680(in Chinese with English abstract).
- [33] Jung M C, Thornton I. Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine in Korea [J]. *Appl. Geochem*, 1996, 11:53-59.

Element distribution characteristics of Cd-rich soils and their pollution remediation test in the lower reaches of the Yangtze River

LIAO Qi-lin¹, HUANG Shun-sheng¹, LIN Ren-zhang²,
FAN Di-fu¹, JIN Yang¹, ZHU Bai-wan¹

(1. *Jiangsu Institute of Geological Survey, Nanjing 210018, Jiangsu, China;*

2. *Department of Environment Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China*)

Abstract: A large tract of Cd-rich soils is found along the lower reaches of the Yangtze River in Jiangsu and the Cd content in vegetable samples is found to be in excess of standards in some areas. Based on a preliminary analysis of the element geochemical characteristics of Cd-rich soils in the study area, the authors discuss the main cause for the local Cd pollution in soils and systematically introduce the main research data and results of heavy metal-polluted soil remediation and control tests performed in vegetable lands polluted by Cd in Baguazhou, Nanjing. It is found that the Cd concentration within vegetable can be significantly reduced by applying an appropriate quantity of fixation agents such as calcium-magnesium phosphate [(Ca, Mg)₃(PO₄)₂] fertilizers. This study provides a new idea for safe vegetable production in areas of relatively Cd-rich soils in the lower reaches of the Yangtze River.

Key words: Cd-rich soil; element distribution; pollution remediation; test; lower reaches of the Yangtze River

About the first author: LIAO Qi-lin, male, born in 1964, doctor and senior engineering, engages in the study of geochemistry and mineral deposit geology; E-mail: liaoqilin64@jsoil.com.cn.