

宜兴地区水稻土 Pb Cd Cu Zn 污染及垂直分布特性研究

刘卫星, 宗良纲, 肖 峻, 沈莉萍, 蒋 培

(南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

摘 要:通过测定宜兴地区 34 个采样点水稻糙米和不同土层(0~20、20~40、40~60 和 60~80 cm)中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 含量,利用单项污染指数法和内梅罗污染指数法对土壤表层和糙米重金属含量进行评价,同时分析 4 种重金属在土壤剖面中的分布规律以及在糙米中的富集特性。结果表明,水稻土表层 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的平均含量都处于未污染水平,综合评价结果属于清洁(安全)等级;糙米 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的平均含量也都处在未污染水平,综合评价结果也属清洁(安全)等级。水稻土 Pb 和 Cd 的剖面分布属于表层富集型,表层主要受人类活动的影响,而下层跟母质有关;Cu 和 Zn 的剖面分布同属均匀分布型,表层含量略高与人为因素有关,20~40 cm 和 40~60 cm 含量略低,可能是因为水稻的吸收作用,60~80 cm 含量比上层都稍高,主要是受成土母质的影响。糙米中 4 种元素的富集能力存在极显著差异,其大小顺序为 $Zn(0.282) > Cd(0.234) > Cu(0.198) > Pb(0.014)$;糙米 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的含量与土壤表层相应元素的全量具有极显著的正相关关系,相关系数分别达到 0.905、0.925、0.939 和 0.957;糙米中 Cd 与 Cd/Zn 比具有极显著的正相关关系(0.837),糙米 Cd/Zn 比为 0.002,远低于临界值 0.015。

关键词:重金属;污染评价;垂直分布;食品安全

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)08-1567-06

Pollution and Vertical Distribution of Pb, Cd, Cu & Zn in Paddy Soils in Yixing

LIU Wei-xing, ZONG Liang-gang, XIAO Jun, SHEN Li-ping, JIANG Pei

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The contents of Pb, Cd, Cu and Zn in different layers of paddy soil (0~20, 20~40, 40~60 & 60~80 cm) and in brown rice from 34 sampling sites in Yixing were measured and then assessed by the single pollution index and Nemerow pollution index. Four elements' distribution in soil profiles and accumulation in brown rice were also analyzed. Results showed that none of the four elements reached pollution level in the surface soil, and the Nemerow pollution index indicated that the paddy soils in Yixing were clean (safe). The four metals in the brown rice were all below the standard and their assessment showed that the brown rice in Yixing was clean (safe) too. The distribution of Pb and Cd in the soil profiles showed the surface layer accumulation, which was caused by anthropogenic activities. Both Cu and Zn distributed uniformly in the four layers. The contents of these two elements in surface soil were slightly higher, which was mainly related to human factors. Their contents in 20~40 and 40~60 cm were slightly lower; maybe a result of the uptake by rice. Due to the effect of parent material, Cu and Zn were slightly higher in 60~80 cm than other layers. The bioconcentration factors of the four metals differed significantly and were in the following order: $Zn(0.282) > Cd(0.234) > Cu(0.198) > Pb(0.014)$. There were highly significant correlations between the contents of Pb, Cd, Cu and Zn in brown rice and in surface paddy soils, and the coefficients of correlation (r) were 0.905, 0.925, 0.939 and 0.957, respectively. The correlation between the Cd content and the ratio of Cd/Zn in brown rice was also highly significant ($r=0.837$). The ratio of Cd/Zn in brown rice was 0.002, which was far lower than the critical value of 0.015.

Keywords: heavy metals; pollution assessment; vertical distribution; food safety

收稿日期: 2008-12-03

基金项目: 江苏省自然科学基金重点项目(BK2006711-1); 江苏省社会发展项目(BS2003029)

作者简介: 刘卫星(1984—), 男, 江苏连云港人, 硕士, 主要从事环境质量与食品安全研究。E-mail: weixing0518@163.com

通讯作者: 宗良纲 E-mail: zonglg@njau.edu.cn

随着工业化的发展,我国的环境污染问题日趋严重,特别是重金属污染,其在土壤中的积累及其对农产品安全性的影响一直是社会各界关注的热点问题^[1-2]。土壤重金属污染一般具有表聚性的特点,但近年来由于土地利用的多样性和投入物资的多变性,土壤中重金属在耕作和淋溶作用下会向下迁移,从而使土壤剖面中元素的分布规律不明显^[3-5]。重金属在土壤-作物-食物间的迁移分配是其影响人类健康的主要途径。研究重金属在土壤-水稻系统中的迁移规律是研究土壤重金属垂直分布特性的重要扩展^[6-7]。以往的研究通常只重视重金属在土层中的分异,而没有同时关注其在土壤-作物间的迁移特性;同时,前人的研究也存在采样点数目偏少的问题,一般都没有超过 10 个^[2-4]。

本文选择经济发达的宜兴市作为研究区域,测定了 34 个代表性样点水稻糙米和不同土层 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的含量,并对土壤表层和糙米中重金属污染进行评价,同时探讨了这些重金属在土层中的垂直分布特性以及水稻籽粒对重金属的富集规律,旨在为该地区农田土壤的合理利用以及开展污染土壤的修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宜兴市地处经济发达的长三角地区,位于太湖西岸和苏、浙、皖三省的交界处,总面积 2 038.7 km² (其中太湖 208.7 km²),目前总人口为 106.05 万。宜兴属亚热带海洋性季风气候,温和湿润,四季分明,常年主导风向为东南风,地势南高北低,西南部为低山丘陵,北部为平原区,东部为太湖滨湖区,西部为低洼圩区。宜兴市在快速的经济发展过程中,逐步形成了以环保、陶瓷、精细化工、新型建材和电线电缆等五大类产业为支柱的产业结构。

1.2 样品采集

根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166—2004)和宜兴最新的行政区划,本课题组于 2007 年 10 月下旬在宜兴选取了范围覆盖 15 个镇(街道)的水稻田,分别按 0~20、20~40、40~60 和 60~80 cm 采集土壤样品,同时对应采集水稻籽粒样品。每个镇(街道)一般设 2 个采样点,个别镇(街道)根据其面积大小酌情增减,最终共确定了 34 个具有代表性的采样点。为便于后续研究,采样时进行 GPS 定位。采样点分布如图 1 所示。



图 1 宜兴地区水稻土重金属污染研究采样点位置示意图

Figure 1 Sampling sites of heavy metals pollution research in paddy soil of Yixing

1.3 样品处理与测定

土壤样品经自然风干后研磨分别过 20 目和 100 目筛^[8]。水稻籽粒样品在 70 °C 条件下烘干,脱壳后磨碎过 60 目筛^[9]。

土壤 pH 采用土水比为 1:2.5, pH 计测定;土壤重金属全量,采用 HNO₃-HClO₄-HF 消煮, Pb、Cu 和 Zn 用火焰-原子吸收分光光度计 (Varian 220 Spectr AA) 测定, Cd 用石墨炉-原子吸收分光光度计 (Varian 220 Spectr GAT) 测定;糙米重金属含量采用 HNO₃-HClO₄ (4:1) 消煮, Pb 和 Cd 用石墨炉-原子吸收分光光度计测定, Cu 和 Zn 用火焰-原子吸收分光光度计测定。

样品采用平行双样进行测定,测定时严格按照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166—2004)中的相关要求进行操作,所有测定结果都控制在允许的误差范围之内。

1.4 污染评价

水稻土表层和糙米 Pb、Cd、Cu 和 Zn 污染采用单项污染指数 (P_i) 和内梅罗污染指数 (P_N) 进行评价。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

$$P_N = \sqrt{\frac{(P_{i\text{average}})^2 + (P_{i\text{max}})^2}{2}}$$

式中 C_i 表示第 i 种污染物的实测浓度, S_i 为评价标准。 $P_{i\text{average}}$ 为各单项污染指数的平均值, $P_{i\text{max}}$ 为最大的单项污染指数。水稻土表层重金属参照《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ332—2006)^[10] 中的限量值进行评价, Pb、Cd、Cu 和 Zn 的限值分别为 80、0.3、50 和 200 mg·kg⁻¹ (土壤 pH<6.5); 糙米重金属参照《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等 8 种元素限量》(NY 861—2004)^[11] 来

评价,Pb、Cd、Cu 和 Zn 的限值分别为0.4、0.2、10 和 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。一般 $P_i \leq 1$ 为未污染, $P_i > 1$ 为已污染, $1 < P_i \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_i \leq 3$ 为中度污染, $P_i > 3$ 为重度污染, P_i 越大表示受到的污染越严重。内梅罗污染指数的分级标准共有五级^[12],分别为: $P_N \leq 0.7$, I 级,清洁(安全); $0.7 < P_N \leq 1.0$, II 级,尚清洁(警戒限); $1.0 < P_N \leq 2.0$, III 级,(轻度污染); $2.0 < P_N \leq 3.0$, IV 级,(中度污染); $P_N > 3.0$, V 级,(重污染)。

1.5 数据处理

糙米中重金属的富集系数 BCF(Bioconcentration Factor)指糙米中重金属含量与水稻土表层(本研究中即 0~20 cm)重金属全量的比值;所测数据利用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 水稻土表层及糙米重金属污染评价

Pb 和 Cd 是有害的重金属元素。Cu 和 Zn 虽然是作物生长的必需元素,但含量过高也会影响作物生长及其产品品质的安全性。由表 1 可以看出,土壤表层 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的单项污染指数 P_i 都小于 1,处于未污染水平,内梅罗污染指数 P_N 小于 0.7,综合评价结果处于清洁(安全)等级。4 个单项污染指数中 $P_{i_{\text{Cu}}}$ 最大,达 0.55; $P_{i_{\text{Pb}}}$ 最小,为 0.31。4 种元素的平均含量都处在污染临界水平以下,但最大值均超过标准的限值;从变异系数(CV)上看,Cu 的变异系数(CV)最小,为 22.52%,表明 Cu 在水平方向分布的变异性较小。Pb、Cd 和 Zn 的变异系数分别达到了 49.40%、

52.03%和 72.00%,说明这 3 种重金属在水平方向上存在较大的变异性,在实际生产中应注意局部地区的土壤污染。

表 2 为糙米重金属含量及评价结果,从表中可以看出,糙米 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的单项污染指数均小于 1,处于未污染水平,其中 $P_{i'_{\text{Pb}}}$ 最大,达 0.84, $P_{i'_{\text{Cd}}}$ 最小,仅为 0.17。内梅罗污染指数为 0.69,小于 0.7,表明区域糙米中重金属含量总体上是清洁(安全)的。4 种重金属的平均含量都没有超过限值。糙米 Pb 含量处在 0.20~0.87 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,同时糙米中 Pb 的单项污染指数在 4 种元素中最大,表明该区域水稻糙米存在较大的 Pb 污染隐患;而 Cd 含量处在 0.01~0.09 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,都没有超标;Cu 和 Zn 的平均含量都低于标准限值,但最大值均超标。

2.2 水稻土 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的纵向分布特征

元素在土壤剖面中的分布由于受到多种因素的影响而表现出多种分布类型,一般有均匀分布型、表层富集型、某一层位富集型、底层富集型和不规则分布型^[13]。

Pb 进入土壤多以卤化物的形式存在,在土壤后会转化为难溶化合物,从而使 Pb 的移动性大大降低^[3]。由表 3 可见,水稻土表层 Pb 含量显著高于下层土壤,20~40 cm、40~60 cm 和 60~80 cm 土层 Pb 含量没有显著差异,Pb 的剖面分布属于表层富集型。太湖流域农业土壤 Pb 的背景值为 20.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[14],研究区表层 Pb 含量明显高于该值,主要是受农用物资的投入和工业化的影响,而下层土壤 Pb 主要来源于母

表 1 水稻土表层重金属含量及评价结果($n=34$)

Table 1 Contents and assessment results of heavy metals in surface paddy soil

	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	CV/%	P_i	污染水平	P_N	污染水平
Pb	24.50	12.10	12.57	81.21	49.40	0.31	未污染	0.50	清洁(安全)
Cd	0.14	0.08	0.07	0.47	52.03	0.48	未污染		
Cu	27.47	6.19	18.60	52.41	22.52	0.55	未污染		
Zn	81.42	58.63	46.23	347.37	72.00	0.41	未污染		

注:宜兴地区水稻土表层平均 pH 为 6.06; n 表示样本数。下同。

Note: The pH of surface paddy soil in Yixing is 6.06; n stands for the number of sample. The same below.

表 2 糙米中重金属含量及评价结果($n=34$)

Table 2 Contents and assessment results of heavy metals in brown rice

	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	CV/%	P_i'	污染水平	P_N'	污染水平
Pb	0.34	0.12	0.20	0.87	35.37	0.84	未污染	0.69	清洁(安全)
Cd	0.03	0.02	0.01	0.09	50.95	0.17	未污染		
Cu	5.46	1.35	3.11	10.53	24.66	0.55	未污染		
Zn	22.76	16.55	11.53	98.33	72.71	0.46	未污染		

表 3 水稻土不同土层重金属全量分布($n=34$)
Table 3 Contents of heavy metals in different layers of paddy soil

元素	土壤深度/ cm	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	CV/ %
Pb	0~20	24.50 b	12.10	12.57	81.21	49.40
	20~40	18.82 a	10.54	9.90	66.80	56.01
	40~60	16.17 a	9.84	4.50	51.83	60.83
	60~80	15.74 a	10.73	2.75	62.05	68.14
Cu	0~20	27.47 a	6.19	18.60	52.41	22.52
	20~40	25.53 a	5.70	15.35	43.74	22.33
	40~60	25.45 a	7.15	14.85	45.82	28.09
	60~80	27.75 a	12.14	14.37	74.23	43.76
Cd	0~20	0.14 b	0.08	0.07	0.47	52.03
	20~40	0.08 a	0.04	0.02	0.24	45.74
	40~60	0.08 a	0.05	0.02	0.20	56.50
	60~80	0.07 a	0.04	0.00	0.17	59.39
Zn	0~20	81.42 a	58.63	46.23	347.37	72.00
	20~40	73.37 a	61.99	37.22	327.66	84.49
	40~60	81.05 a	82.04	32.68	391.15	101.22
	60~80	82.69 a	77.72	41.06	367.94	93.99

注:表中同一列不同小写字母表示在 $P=0.05$ 水平上差异显著。
Note:The different small letters in the same column show significant differences at the level of 0.05.

质,这跟Odor等的研究结果相吻合^[5]。剖面土壤 Cd 与 Pb 的规律非常相似,具有较强的表聚性,同属于表层富集型,这跟李亮亮和马智宏等的研究具有相似的结果^[3-4]。研究区水稻土表层 Cd 含量也超过了背景值($0.116\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[14],主要是因为人类活动的影响,下层土壤 Cd 主要跟成土母质有关。

Cu 含量在 4 个土层中没有显著的差异,其剖面分布基本属于均匀分布型。太湖流域农业土壤 Cu 的背景值为 $22.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[14],各土层 Cu 含量都超过该值,表明研究区存在外源 Cu 的输入。宜兴地区电线电缆业比较发达,存在相当数量的铜冶炼厂,很有可能造成表层土壤 Cu 的富集。20~40 cm 和 40~60 cm 土层 Cu 含量比表层略低,可能是由于水稻的吸收所致。而 60~80 cm 土层 Cu 含量比上层都略高,主要是受成土母质的影响。Zn 在垂直方向上的分布特点跟 Cu 相似,基本上也属于均匀分布型。本区 Zn 的背景值为 $73.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[14],土壤各层 Zn 含量均超过该值。另外,跟 Cu 一样,Zn 也是在 20~40 cm 和 40~60 cm 的含量略低,在表层和 60~80 cm 的含量略高,原因可能跟 Cu 一样。土壤中 Cu 和 Zn 的纵向分布特征非常相似,可能跟 Cu、Zn 的很多特性相似有关^[8],这与曹淑萍的研究结果相一致^[15]。

2.3 糙米 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的累积

糙米中 4 种重金属的富集系数存在极显著的差异(表 4),其中 Pb 的富集系数最小,跟水稻富集 Pb 的能力以及 Pb 在土壤中的活性都比较弱有关^[3];Zn 的富集系数最大,一方面是因为 Zn 在土壤中的含量最大,导致糙米中有更多 Zn 的积累(图 5),同时也跟 Zn 是水稻吸收的必需元素有关;糙米中 Cd 的富集系数较小,跟研究区糙米 Cd/Zn 值特别低有关(具体见下文分析);水稻对 Cu 的富集能力处于中间水平。4 种重金属富集系数对应的变异系数(CV)都比较小,说明调查区域土壤性质相近而使水稻对重金属的富集特性趋于一致。其中 BCF-Cu 的变异系数(CV)最小,BCF-Zn 的变异系数(CV)最大,这跟水稻土 Cu 和 Zn 含量的变异系数(CV)分别是最小和最大相一致。从图 2~图 5 可以看出,糙米 Pb、Cd、Cu 和 Zn 含量和水稻土表层相应元素的全量呈极显著的正相关关系,相关系数 r 分别为 0.905、0.925、0.939 和 0.957。

表 4 糙米重金属富集系数
Table 4 Bioconcentration factors of heavy metals in brown rice

	平均值	标准差	最小值	最大值	CV/%
BCF-Pb	0.014 a A	0.003	0.011	0.019	19.63
BCF-Cd	0.234 e C	0.041	0.169	0.298	17.57
BCF-Cu	0.198 b B	0.018	0.154	0.234	8.92
BCF-Zn	0.282 d D	0.070	0.193	0.422	24.78

注:表中同一列不同小写字母表示在 $P=0.05$ 水平上差异显著;
表中同一列不同大写字母表示在 $P=0.01$ 水平上差异显著。
Note:The different small letters in the same column show significant differences at the level of 0.05;The different capital letters in the same column show significant differences at the level of 0.01.

水稻籽粒中积累的重金属和土壤重金属含量存在极显著相关,这与土壤性质也有着密切的关系。土壤酸化是影响重金属活性的重要因子,重金属在土壤中以不同形态存在,就其有效性来说,土壤 pH 越低,重金属活性越强,被作物吸收的重金属就越多;反之,pH 越高,重金属活性越弱,从而能被作物吸收的重金属也就越少^[16]。苏北丰县水稻土的 pH 为 8.40,其糙米中 Cd、Cu 和 Zn 的富集系数分别为 0.06 ± 0.03 、 0.09 ± 0.04 和 0.15 ± 0.10 ^[17],比宜兴(pH6.06)对应元素的富集系数要低得多。

近 10 年来,国际上越来越重视 Cd 与其他元素的拮抗作用^[7]。Simmons 等研究结果显示,在 Cd、Zn 复合污染的污水灌溉条件下,水稻籽粒积累 Cd 的同时排斥 Zn 的吸收^[20]。同样,水稻在缺 Zn 的同时促进了

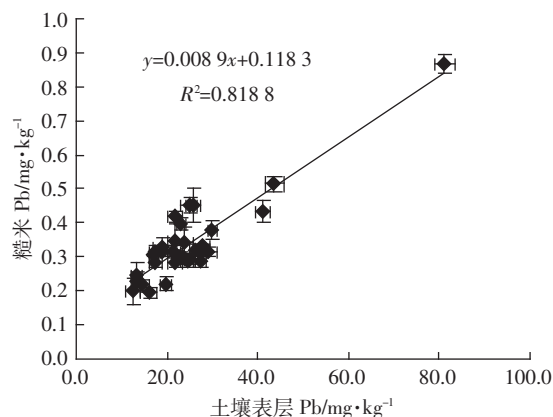


图2 糙米 Pb 和土壤表层 Pb 相关性

Figure 2 Correlation of Pb in brown rice and surface soil

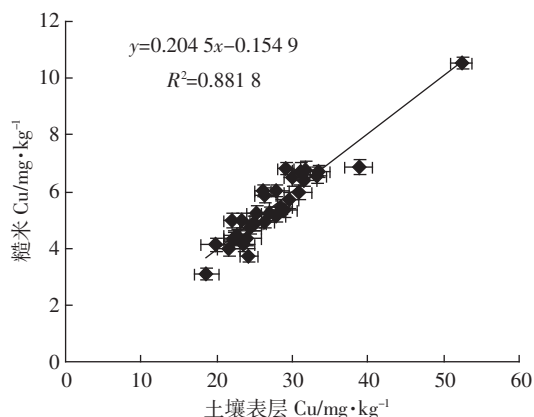


图4 糙米 Cu 和土壤表层 Cu 相关性

Figure 4 Correlation of Cu in brown rice and surface soil

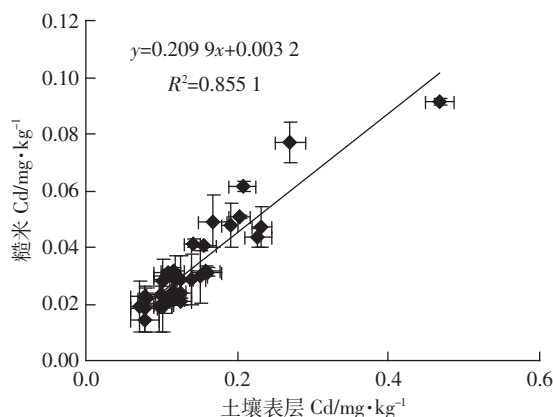


图3 糙米 Cd 和土壤表层 Cd 相关性

Figure 3 Correlation of Cd in brown rice and surface soil

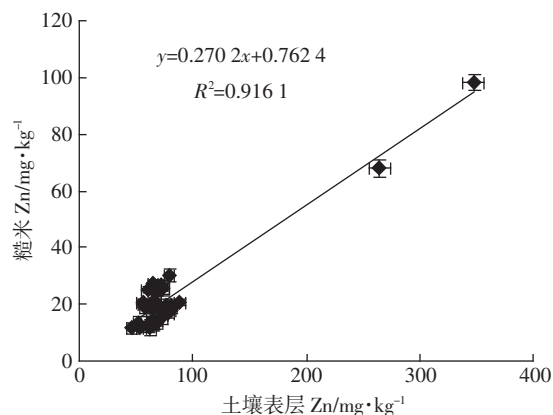


图5 糙米 Zn 和土壤表层 Zn 相关性

Figure 5 Correlation of Zn in brown rice and surface soil

水稻对 Cd 的吸收。另外,一些研究者的试验表明,锌肥能起到缓解 Cd 对水稻的危害作用^[18]。目前已认识到,人体内 Cd/Zn 比的升高是高 Cd 导致肾衰竭的病因之一^[19],Simmons 等也提出食物的临界 Cd/Zn 比为 0.015^[20]。研究区糙米 Cd 与 Cd/Zn 比之间呈极显著的正相关关系,相关系数为 0.837(图 6),糙米 Cd/Zn 比为 0.002,远低于临界值 0.015,这对减少 Cd 在糙米中的积累非常有利。

3 结论

宜兴地区水稻土表层 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的平均含量都处于未污染水平,综合评价的结果属于清洁(安全)等级;糙米 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的平均含量也都处在未污染水平,综合评价的结果也属清洁(安全)等级。但个别采样点存在超标现象应引起注意。

水稻土重金属的垂直分布呈不同类型,Pb 和 Cd 属于表层富集型,Cu 和 Zn 大致属于均匀分布型。水

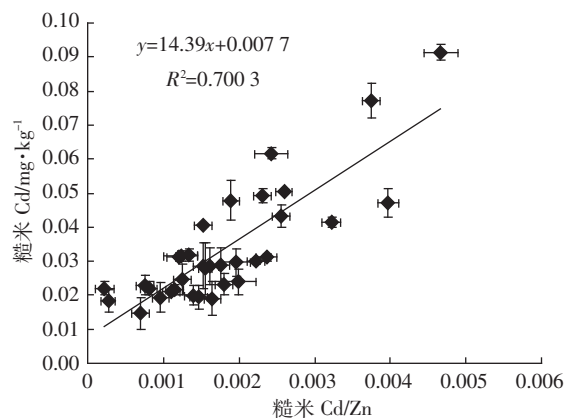


图6 糙米中 Cd 与 Cd/Zn 比相关性

Figure 6 Correlation of Cd and ratio of Cd/Zn in brown rice

稻土表层重金属主要受人为活动的影响,而下层主要跟母质有关。

糙米中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 4 种重金属的富集系数存在极显著差异,其大小受到土壤性质、土壤重金属含量及其相互作用等多种因素的影响。

参考文献:

- [1] 赵其国. 民以食为天, 食以净为本——论江苏省农产品清洁生产创新研究[J]. 土壤, 2005, 37(1): 1-7.
ZHAO Qi-guo. Agricultural cleaner production in Jiangsu[J]. *Soils*, 2005, 37(1): 1-7.
- [2] 刘洪莲, 李恋卿, 潘根兴. 苏南某些水稻土中 Cu Pb Hg As 的剖面分布及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1221-1227.
LIU Hong-lian, LI Lian-qing, PAN Gen-xing. Profile distribution of total Cu, Pb, Hg, As in some paddy soils from the southern Jiangsu, China and the influencing factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1221-1227.
- [3] 李亮亮, 张大庚, 依艳丽, 等. 葫芦岛市连山区·龙港区土壤重金属垂直分布与迁移特征[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(13): 3916-3918, 3978.
LI Liang-liang, ZHANG Da-geng, YI Yan-li, et al. Vertical distribution and immigrant character of heavy metals in soil in Lianshan and Long-gang districts of Huludao City[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(13): 3916-3918, 3978.
- [4] 马智宏, 王纪华, 陆安祥, 等. 京郊不同剖面土壤重金属的分布与迁移[J]. 河北农业大学学报, 2007, 30(6): 11-15.
MA Zhi-hong, WANG Ji-hua, LV An-xiang, et al. Distribution and transfer of main heavy metals in different soil section in Beijing suburb[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2007, 30(6): 11-15.
- [5] Odor L, Wanty R B, Horvath I, et al. Mobilization and attenuation of metals downstream from a base-metal mining site in the Matra Mountains, northeastern Hungary[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1998, 65(1): 47-60.
- [6] CHANG A C, HYUN H, PAGE A L. Cadmium uptake for swiss chard grown on composed sewage sludge-treated field plots: Plateau or a time bomb[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 26: 11-19.
- [7] 龚伟群, 潘根兴. 中国水稻生产中 Cd 吸收及其健康风险的有关问题[J]. 科技导报, 2006, 24(5): 43-48.
GONG Wei-qun, PAN Gen-xing. Issues of grain Cd uptake and the potential health risk of rice production sector of China[J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(5): 43-48.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版, 北京: 中国农业出版社, 2000: 20-22, 129.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000: 20-22, 129.
- [9] 杨春刚, 廖西元, 章秀福, 等. 不同基因型水稻籽粒对镉积累的差异[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(6): 660-662.
YANG Chun-gang, LIAO Xi-yuan, ZHANG Xiu-fu, et al. Genotypic difference in cadmium accumulation in brown rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(6): 660-662.
- [10] HJ332—2006, 食用农产品产地环境质量评价标准[S].
HJ332—2006, Farmland environmental quality evaluation standards for edible agricultural products[S].
- [11] NY 861—2004, 粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量[S].
NY 861—2004, Limits of eight elements in cereals, legume, tubers and its products[S].
- [12] HJ/T 166—2004, 土壤环境监测技术规范[S].
HJ/T 166—2004, The technical specification for soil environmental monitoring[S].
- [13] 杜俊平, 廖超英, 田联会, 等. 太白山自然保护区土壤重金属含量及其分布特征研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 84-87.
DU Jun-ping, LIAO Chao-ying, TIAN Lian-hui, et al. Distribution and contents of heavy metals in soils of Taibaishan nature reserve[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(3): 84-87.
- [14] 李健, 郑春江. 环境背景值数据手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 164.
LI Jian, ZHENG Chun-jiang. Handbook of environmental background values[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1988: 164.
- [15] 曹淑萍. 重金属污染元素在天津土壤剖面中的纵向分布特征[J]. 地质找矿论丛, 2004, 19(4): 270-274.
CAO Shu-ping. Vertical distribution of heavy metal pollutant in soil profile of Tianjin[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2004, 19(4): 270-274.
- [16] 杨远, 邓良基. 四川省水稻土中主要重金属对水稻籽粒的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 174-177.
YANG Yuan, DENG Liang-ji. Effects of heavy metals in the paddy soil in Sichuan Province on rice grain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(supplement): 174-177.
- [17] 金亮, 李恋卿, 潘根兴, 等. 苏北地区土壤-水稻系统重金属分布及其食物安全风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(1): 33-39.
JIN Liang, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Distribution of heavy metals in the soil-rice system and food exposure risk assessment of north Jiangsu, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(1): 33-39.
- [18] 周启星. 复合污染生态学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 5-6.
ZHOU Qi-xing. Joint pollutants ecology[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1995: 5-6.
- [19] CHANEY R L, REEVES P G, RYAN J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *Biometals*, 2004, 17: 549-553.
- [20] Simmons R W, Pongsakul P, Chaney R L, et al. The relative exclusion of zinc and iron from rice grain in relation to rice grain cadmium as compared to soybean: Implications for human health[J]. *Plant and Soil*, 2003, 257: 163-170.

致谢: 感谢曹乃恒师傅在采样期间给予的诸多帮助。