

# 长江三角洲典型地区工业企业的分布 对土壤重金属污染的影响\*

邵学新<sup>1,3</sup> 黄标<sup>1†</sup> 孙维侠<sup>1</sup> 顾志权<sup>2</sup> 钱卫飞<sup>2</sup> 邓西海<sup>1</sup> 骆永明<sup>1</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 江苏省张家港市土壤肥料技术指导站, 江苏张家港 215600)

(3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 以长江三角洲地区近年来经济发展较快的张家港市为例, 在密集的大田采样和大田与企业周围采样结合的基础上, 评价了该市土壤 Cd、Hg、Pb 污染状况; 讨论了两种不同采样方式对土壤污染状况评价的影响; 用土壤表层与底层重金属含量的比值(后简称元素比值)为指标讨论了不同类型企业对周围土壤重金属积累的影响。总的来看, 张家港市土壤重金属整体平均值与环境背景值接近, 明显低于国家环境质量(GB 15618-1995)二级标准和中国绿色食品生产基地环境土壤污染限值(NY/T 391-2000)。但存在少数样点超标和超限现象, 空间上有小面积高含量土壤分布, 且主要局限于企业周围的小范围内。采样方式对土壤污染的评价有明显的影响, 对 Cd 和 Pb 而言, 大田采样方式下他们的含量要明显低于两种方式结合的情况下( $p < 0.05$ ), 而 Hg 元素则相反, 当大田采样与企业周围采样相结合可使得土壤中 Hg 元素高含量的分布面积明显增大。绝大部分企业周围土壤样品的元素比值要明显高于大田采集的土壤。除冶金类企业有着明显的 Pb 单一聚集外, 化工、电子类企业往往导致了多个元素的积累, 企业对周围土壤存在复合污染的可能性。这些结果为该市或类似地区的环境质量调查和评价、环境治理提供了重要的基础资料和决策依据。

**关键词** 土壤; 重金属积累; 评价; 企业类型; 长江三角洲

中图分类号 S159 文献标识码 A

随着全球经济的快速发展, 工业化过程加快。工矿企业的废渣、废气中的重金属可以对周围土壤产生影响, 使得它们周围的土壤容易富集高含量的有毒重金属<sup>[1, 2]</sup>。同时, 近代农业生产, 如含重金属的化肥、城市废弃物和农药的不合理施用, 养殖业的发展, 也给土壤带来一些重金属等污染物的富集<sup>[3]</sup>。土壤中重金属的富集可能会对动植物以及人体健康产生影响<sup>[4]</sup>。所以, 近年来人们越来越重视土壤环境质量的变化<sup>[5]</sup>, 在全国很多地方都开展了针对环境质量的土壤调查和评价, 取得了不少的基础资料<sup>[6, 7]</sup>。然而, 目前的大部分土壤调查基本都是沿用全国第二次土壤普查的采样方法, 在采样布点时较多考虑土壤类型、地形等自然因素的分布, 或者采用网格布点<sup>[8, 9]</sup>, 而对工矿企业的分布考虑不多; 同时, 大多数研究采集的样点较少<sup>[10, 11]</sup>。布点方法和

采样密度的不同可能导致调查和评价结果的差异。因而, 有必要选择一些典型地区进行较为深入地研究, 使得我们对经济发达地区土壤环境状况有一个比较准确的估计。

江苏省张家港市地处长江三角洲地区, 改革开放以来, 该地的经济得到了飞速的发展, 工业的类型较多, 农业中的养殖业也较发达。目前虽然对该市的土壤污染状况有了一个大概的了解, 如中国科学院南京土壤研究所在该市进行的 973 项目(G1999011810)研究等, 但采样点较少, 所以对该市目前土壤的污染状况了解并不全面。鉴于此, 对该市土壤重金属的环境质量开展了专门的研究, 其目的包括: (1) 通过密集的大田土壤采样结合代表性企业周围土壤采样了解张家港市土壤不同重金属元素的含量及分布状况; (2) 比较大田土壤采样和大田与

\* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB410810)资助

† 通讯作者, E-mail: bhuang@issas.ac.cn

作者简介: 邵学新(1980~), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤地球化学、环境地球化学研究

收稿日期: 2005-03-18; 收到修改稿日期: 2005-08-03

企业周围相结合采样这两种采样方式下所得到的土壤重金属污染空间分布图的异同;(3)元素的空间分布受土壤环境背景值等的影响。考虑到重金属元素在土壤中迁移相当有限<sup>[12,13]</sup>,所以,以耕作层之下 20~40cm 的底层土壤作为背景,用耕作层(0~15 cm)与底层重金属含量的比值为指标来评价不同的工业类型对土壤重金属含量的影响。考虑到不同元素的来源,选取以工业为主要来源的重金属 Cd、Pb 和以工业和农业为主要来源的元素 Hg<sup>[3]</sup>为例进行研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

张家港地处长江三角洲冲积平原(图 1),地势

平坦,属北亚热带季风气候,年均气温 15.2℃,年均降雨量 1 039 mm。全市总面积 999 km<sup>2</sup>,其中陆地面积 799 km<sup>2</sup>,人口 85 万人。该市的土壤类型主要有潮湿锥形土和水耕人为土两个亚纲<sup>(1)[14]</sup>,前者主要分布于北部的沿江圩田地区,为长江冲击物母质发育而成,土壤一般呈碱性,质地为中、轻壤质,绝大部分为水耕暗色潮湿锥形土亚类,少部分普通暗色潮湿锥形土亚类。后者主要分布于南部的平田地区,由泻湖相沉积母质发育而成,土壤呈中至微酸性,质地较粘,为重壤和轻粘土,绝大部分为普通铁聚水耕人为土,少量漂白铁渗水耕人为土、铁渗潜育水耕人为土(图 1)。近年来,全市经济快速发展,2003 年工业经济占其经济总量的 60% 以上。化工、冶金、电镀、印染造纸、养殖、建材等均较发达,是长江三角洲地区经济发展最快的县级市之一。

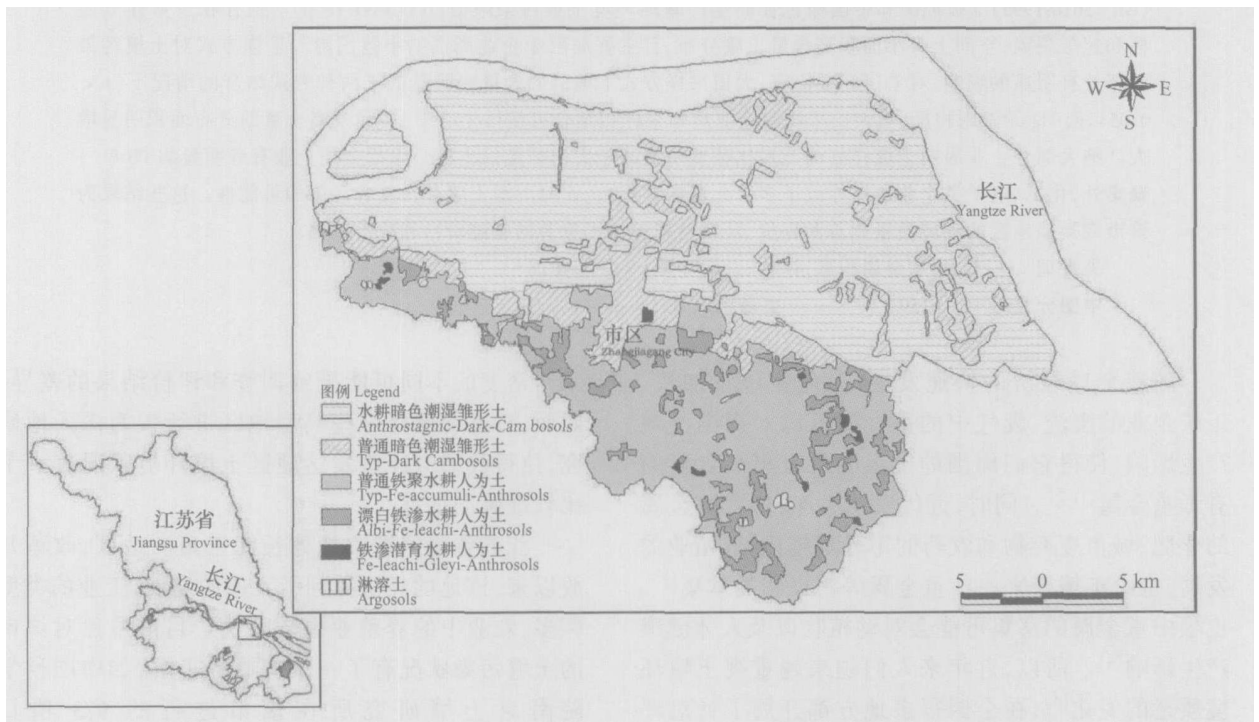


图 1 张家港市土壤类型分布图及地理位置

Fig. 1 The soil and location map of Zhangjiagang City

### 1.2 采样

采样工作主要分成两部分:

第一部分为大田土壤采样。布点时主要考虑全市的土壤类型、土地利用状况、区域之间样点分布的均匀性等因素,全市共确定了采样点 386 个。采样时,一般每个采样点在 600 m<sup>2</sup> 范围内,采集 6~8 处

耕层土壤,混合均匀后,缩分至 1~2 kg 装袋。

第二部分为代表性企业周围采样。先从环保部门收集了整个张家港市排污企业的信息(约 500 多个企业),然后从中随机选取 161 个企业,并分成化工、电子、冶金、电镀、造纸、纺织印染、养殖等七类,在其周围采样。采样时,主要考虑企业的排污方式。

(1) 沙洲县土壤普查办公室,苏州市农业局,江苏省土壤普查办公室. 江苏省沙洲县土壤志. 1984

若为水排污,则在离排污口 50~100 m 处,300 m<sup>2</sup> 范围内采集 6~8 处耕作层(0~15 cm)和底层(20~40 cm)土壤样品,分别混合均匀,缩分至 1~2 kg 装袋。若为大气排放,则在离排污口的顺风方向 50~100 m 处采样。若为固体堆放,则在离堆放场地 50~100 m 处采样。在大田采样过程中选取了 27 个大田采样点在采集土壤耕作层的同时也采集了底层土壤样品以便对照。采样时均用 GPS 记录每个采样点的经纬度,并详细记载样点周围环境的信息。

### 1.3 样品分析

土样经室温风干后,磨碎至 100 目,供元素全量分析之用。Cd 和 Pb 全量的测定采用反王水法消化<sup>[15]</sup>,具体步骤为:称取 0.5~1.0 g 土壤样品放入聚四氟乙烯坩埚中,加 6~12 ml 反王水(硝酸/盐酸=3/1),摇匀并放置过夜。次日,将消化坩埚放置烘箱内,在 100~170 范围内消化 4~5 h。然后在电热板上加热(不要沸腾)至约残留 1 ml 消化液。待冷却至室温后,用 1% 的硝酸溶解残留物,并过滤移至 25 ml 容量瓶中,定容至刻度。Cd 用石墨炉原子吸收法测定(3510,安捷伦-上海分析仪器有限公司),Pb 用火焰原子吸收法测定。Hg 元素分析采用硝酸-硫酸-五氧化二钒消解,原子荧光光谱仪测定(AF-160A,北京瑞利分析仪器有限公司)<sup>[16]</sup>。为确保分析结果的可靠性和准确性,每批样品各有两个空白样品和土壤标准物质与土壤样品同步分析。采用的标准物质为 GSS-1 (GBW 07401) 和 GSS-3 (GBW 07403)。

### 1.4 数据统计及空间插值

采用 SAS(8.0) 软件进行方差分析,比较不同元素和不同企业类型之间土壤元素含量表层底层比值的差异显著性。借助 Arcview GIS(3.2) 软件,采用逆距离加权法对表层土壤三种元素的含量进行空间插值,根据插值结果制作元素含量的空间分布图,并用软件估计三种元素不同含量范围的土壤面积<sup>[17]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属在土壤中的含量及其空间分布

对所有采样点进行采样方式和土壤类型影响的差异性分析,两个因素对土壤中 Cd、Pb 和 Hg 元素含量均有明显的影响( $p < 0.05$ ),且采样方式与土壤类型对元素 Cd 存在交互作用( $p < 0.05$ )。所以,表 1 列出了不同土壤类型内、不同采样方式下各元素在土壤中的含量。

表 1 不同土壤类型内不同采样方式下表层土壤 Cd、Pb、Hg 元素含量

Table 1 Cd, Pb, and Hg contents in surface soils sampled with different methods (mg kg<sup>-1</sup>)

土壤类型 Soil orders	采样方式 Sampling methods	Cd	Pb	Hg
雏形土	大田采样 Sampling in large fields (267) <sup>1)</sup>	0.20b <sup>2)</sup>	30.6b	0.13a
Cambosols	企业周围采样 Sampling in the fields near factories (86)	0.25a	33.8a	0.10b
人为土	大田采样 Sampling in large fields (119)	0.11a	27.4b	0.18a
Anthrosols	企业周围采样 Sampling in the fields near factories (75)	0.12a	30.3a	0.16a

1) 括号内为样品数 The number within parenthesis is number of samples; 2) 同一列内平均值后字母不同表示在  $p < 0.05$  水平上差异显著 Different letters following the data in the same column denote a significant difference at  $p < 0.05$  level

对照《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)和《绿色食品产地环境技术条件(NY/T391-2000)》。Cd、Pb、Hg 三种元素的平均含量均未超过前者的一级标准和后者的土壤污染限值,但有一些样点超过国家二级标准。Cd 和 Hg 元素分别有 4 个和 7 个(其中 1 个样点 Cd 和 Hg 均超标)超标样点,超标率分别为 0.73% 和 1.3%,Pb 元素未出现超标点。4 个 Cd 的超标样点、1 个 Hg 的超标样点和 1 个 Pb 高异常点出现于企业周围采样方式下,而 6 个 Hg 超标样点出现于大田采样方式下。与绿色食品生产基地环境土壤污染限值相比,超限点明显增多,其中 Cd 元素超限 9 个,Hg 元素 26 个,Pb 元素 6 个。其中,Cd 元素超限点大都出现在雏形土区(9 个中的 7 个),而 Hg 元素超限点大多出现在人为土区(26 个中的 20 个)。

由表 1 可见,雏形土 Cd 元素含量明显高于人为土。Cd 元素在北部雏形土区含量普遍较高,一半面积的土壤 Cd 含量在 0.20~0.30 mg kg<sup>-1</sup> 之间,而南部人为土分布区绝大部分土壤 Cd 的含量小于 0.20 mg kg<sup>-1</sup>(图 2)。由于雏形土的 pH 值较高,Cd 的环境质量二级标准临界值达 0.60 mg kg<sup>-1</sup>,按此标准该地区被镉严重污染的土壤面积约为 0.76 km<sup>2</sup>,主要在化工厂周围局部分布。对照绿色食品生产基地环境土壤污染限值(0.40 mg kg<sup>-1</sup>),超限面积也比较有限,约为 3.41 km<sup>2</sup>。尽管人为土区土壤 pH 较低,相应环境质量二级标准提高(0.30 mg kg<sup>-1</sup>),但是超过临界值的土壤面积仍然相当有限,仅为 0.16 km<sup>2</sup>(表 2)。

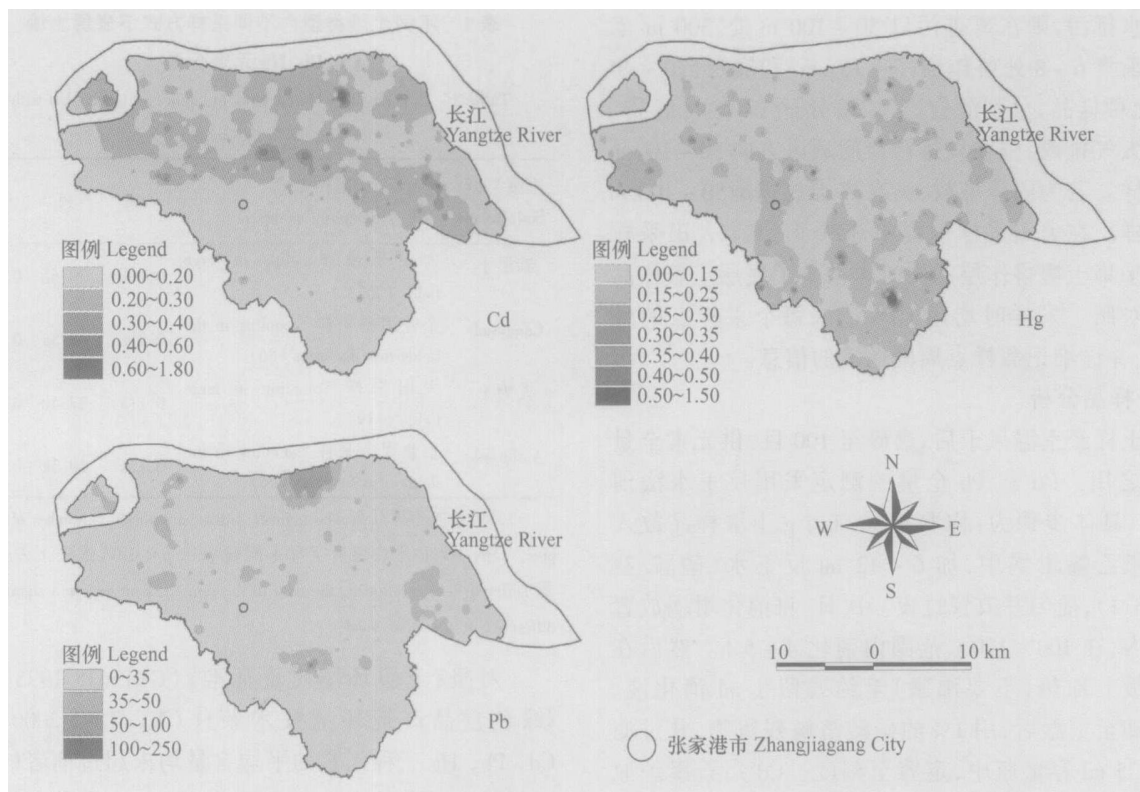


图2 张家港市土壤中 Cd、Hg 和 Pb 含量分布图

Fig. 2 Distribution patterns of Cd, Hg and Pb contents ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) in the soils of Zhangjiagang City

表2 大田采样(A)和大田采样与企业周围采样结合(B)采样方式下重金属不同含量范围分布面积统计

Table 2 Distribution area of each grade of soil heavy metal contents under the samplings in large fields (A) and in combination of large fields and fields near factories (B) ( $\text{km}^2$ )

元素 Elements	含量等级 Contents ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	雏形土 Cambosols				人为土 Anthrosols			
		A	%	B	%	A	%	B	%
Cd	0.00 ~ 0.20	301	57.1	243	46.0	268	99.2	267	98.76
	0.20 ~ 0.30	205	38.8	262	49.6	2.25	0.83	3.2	1.18
	0.30 ~ 0.40	19.8	3.70	19.6	3.70	0	0	0.16	0.06
	0.40 ~ 0.60	2.0	0.37	2.65	0.50	0	0	0	0.00
	0.60 ~ 1.80	0	0	0.76	0.14	0	0	0	0.00
Hg	0.00 ~ 0.15	353	66.89	411	77.8	77.2	28.55	112	41.44
	0.15 ~ 0.25	163	30.94	110	20.9	182	67.16	147	54.32
	0.25 ~ 0.30	8.76	1.66	5.1	0.96	9.6	3.55	7.35	2.72
	0.30 ~ 0.35	1.79	0.34	1.2	0.23	1.43	0.53	2.18	0.81
	0.35 ~ 0.40	0.61	0.12	0.35	0.07	0.46	0.17	0.75	0.28
	0.40 ~ 0.50	0.31	0.06	0.15	0.03	0.12	0.04	0.45	0.17
Pb	0.50 ~ 1.50	0.01	0.00	0.01	0.00	0	0.00	0.72	0.27
	0 ~ 35	476	90.2	464	87.9	270	99.9	257	95.0
	35 ~ 50	48.8	9.25	53.6	10.2	0.37	0.1	12.6	4.67
	50 ~ 100	2.88	0.55	10.3	2.0	0	0	0.8	0.3
	100 ~ 250	0	0	0.02	0	0	0	0.08	0.03

雏形土 Hg 元素要明显低于人为土,导致其空间分布与 Cd 完全不同,北部的雏形土区 Hg 含量普遍低于南部的人为土区,绝大部分土壤的 Hg 含量

小于土壤环境质量标准的一级上限值 ( $0.15 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (图2),面积达  $411 \text{ km}^2$ ,占整个雏形土区面积的 77.8%。超过绿色食品产地环境土壤 Hg 限值

( $0.35 \text{ mg kg}^{-1}$ ) 的土壤面积相当小,仅为  $0.51 \text{ km}^2$  (表 2)。在南部的人为土区,土壤 Hg 含量小于  $0.15 \text{ mg kg}^{-1}$  的面积较小 ( $112 \text{ km}^2$ ),一半以上面积的土壤 Hg 含量在  $0.15 \sim 0.30 \text{ mg kg}^{-1}$  之间,超过  $0.25 \text{ mg kg}^{-1}$  的面积也达  $11.5 \text{ km}^2$ ,土壤 pH 值的测定表明,在人为土中有不少土壤的 pH 值小于 6.5,也就是说,Hg 含量在  $0.25 \sim 0.30 \text{ mg kg}^{-1}$  之间的土壤有不少超过了绿色食品产地环境土壤 Hg 限值 ( $0.25 \text{ mg kg}^{-1}$ )。但这种低 pH 土壤上,高含量 ( $> 0.30 \text{ mg kg}^{-1}$ ) Hg 元素的分布面积仍然有限,呈点状分布 (图 2,表 2)。

Pb 元素与 Cd 元素一样,锥形土中 Pb 含量高于人为土 (表 1),但在整个区域含量均不高 (图 2),90%左右的土壤均在  $35 \text{ mg kg}^{-1}$  以下,超过绿色食品产地环境土壤 Pb 限值  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  的土壤主要局限在局部地区,锥形土分布区面积 ( $10.32 \text{ km}^2$ ) 相对要大于人为土地区 ( $0.88 \text{ km}^2$ ),高异常含量的区域更加有限,分布于一些企业周围的小范围内。

## 2.2 采样方式对重金属污染评价结果的影响

采样方式对土壤元素的平均含量在锥形土区表现最为明显,Cd 和 Pb 元素在企业周围采集的土壤样品,其平均含量明显高于大田采集的土壤样品 ( $p < 0.05$ ) (表 1),而元素 Hg 在大田土壤中含量要高于企业周围土壤样品 ( $p < 0.05$ )。在人为土区这种影响表现并不明显,仅见元素 Pb 在企业周围土壤中含量高于大田所采土壤样品 ( $p < 0.05$ )。尽管元素 Cd 和 Hg 也有上述变化趋势,但均未达到显著性差异 ( $p > 0.05$ )。

采样方式对元素的空间分布也有着明显的影响 (表 2)。对 Cd 和 Pb 而言,当企业周围采样与大田采样结合时,与大田采样方式相比,高含量的土壤面积增大,而低含量的面积减小 (表 2)。如锥形土区 Cd 元素含量大于  $0.20 \text{ mg kg}^{-1}$  的面积在前者的情况下,增加了约整个锥形土区面积的 11%。而 Hg 元素情况有些不同,当考虑企业周围采样时,中等含量的土壤面积减少,低含量和高含量的土壤面积增加 (表 2)。如人为土区 Hg 含量在  $0.15 \sim 0.30 \text{ mg kg}^{-1}$  范围内的面积在前者的情况下,减少了约  $36.9 \text{ km}^2$ 。小于  $0.15 \text{ mg kg}^{-1}$  的面积则增加了  $37.25 \text{ km}^2$ ,大于  $0.30 \text{ mg kg}^{-1}$  的面积增加了约  $2.1 \text{ km}^2$ 。

采样方式对这些重金属空间分布评价结果的影响,可能与这些元素的扩散范围有关,而元素的扩散决定于企业的规模、元素的排污方式和来源等,从我们调查的结果看,在 Cd 元素高含量点,企业的规模

均较小,主要为一些小规模的化工厂、造纸厂等,排出的污染物有限,同时,Cd 污染物主要通过废水排放,而水中 Cd 很容易被悬浮物吸附,因而水中 Cd 的迁移距离较短,随着距排污口距离的增加而含量迅速下降,污染的范围较小<sup>[18]</sup>。所以在大田采样情况下,不易出现 Cd 的高含量点。

Hg 元素的情况要复杂一些,有可能来源于各种化工、电子、造纸类等企业,也有可能来源于农业生产活动,如一些含 Hg 的农药和除草剂<sup>[3]</sup>,此外,Hg 元素的排污方式也明显不同于 Cd,大部分是通过大气排放,其中,燃煤设备是大气中汞最重要的人为污染源,进入大气中的汞可进行长距离的传输<sup>[19]</sup>,这样就使得两种采样方式下均有较多的 Hg 高含量点,超标或超限的土壤面积明显要大。至于为何企业周围土壤中 Hg 含量低于大田土壤,可能与企业周围土壤目前管理较为粗放,Hg 的农业来源较少有关。

Pb 元素的异常也明显受点源污染影响,但由于 Pb 元素排污企业的规模明显要大,如大型的冶金类、电子类企业,排污量较大,同时,Pb 元素除了通过污水来排出外,还可以通过铅烟、铅尘等向大气排放,尽管 Pb 通过水迁移的距离不长,但大气排放影响范围较广,所以 Pb 在污染点周围的影响面积较大,如图 2 中两个 Pb 异常点周围的影响面积,要明显大于 Cd 元素异常点周围的影响面积。但不管如何,其影响面积仍然是较小的。

正是由于这些因素的存在,当将结果进行外推时,可能产生较大出入。如在较小比例尺土壤环境调查时,当采样点正好落在企业周围,则获得的土壤元素含量较高,其外推所估计的面积也要明显大于实际代表的面积。

## 2.3 不同企业类型对周围土壤重金属积累的影响

土壤元素含量异常可以有多种成因,包括自然和人为因素及两者的共同作用。某一地区(点)土壤元素的原始背景含量是评价该地区(点)污染与否和污染程度的真正参照值<sup>[20]</sup>。从不同土壤元素含量的结果看,本区土壤元素背景含量存在明显差异 (表 1)。所以研究土壤人为作用影响时,应将土壤原始背景含量的差异消除,才能客观反映该地区污染物累积的程度。已有的研究表明,重金属元素较难向下迁移,主要积累在土壤的表层<sup>[12,13]</sup>。我们的分析结果也验证了这一结论,当表层元素含量异常时,往往底层元素含量很快降至平均值左右,如 3 个元素的高含量点表层土壤 Cd、Hg、Pb 含量分别

为 1.79、1.51、213.4 mg kg<sup>-1</sup>,而底层土壤含量则已接近平均值分别为 0.13、0.38、28.2 mg kg<sup>-1</sup>。因此,我们以受人为活动影响相对较小的底层土壤作为研究土壤环境的参照体系,以表层与底层重金属含量的比值(后称元素比值)为指标来评价不同工矿企业类型对周围土壤中重金属积累的影响。

表 3 不同工业污染源类型土壤重金属含量表层与底层的比值

Table 3 Ratios of the heavy metal contents in top-soil and sub-soil of fields under different types of industrial pollution

企业类型 Industrial types	样品数 Sampling No.	Cd	Hg	Pb
化工类 Chemical	66	1.55abA <sup>1)</sup>	1.32abA	1.18bB
电子类 Electrical	5	1.40abA	1.34abA	1.74aA
冶金类 Metallurgical	13	1.12cdB	1.18bAB	1.76aA
电镀类 Electroplate	14	0.98eB	1.20abA	1.13bcA
造纸类 Paper-making	4	1.95aA	1.57aAB	1.22abB
纺织印染类 Textile, printing & dyeing	20	1.18cdA	1.27abA	1.13bcA
养殖类 Breeding	38	1.33bcA	1.33abA	1.08cB
大田 Large field	27	1.18cdA	1.15bA	1.05cB

1) 同一列内平均值后小写字母相同表示在  $p < 0.1$  水平上差异不显著,同一行内平均值后大写字母相同表示在  $p < 0.1$  水平上差异不显著。The same lowercase letters following the values in the same column denote a significant difference at  $p < 0.1$  level, the uppercase letters in the same line denote a significant difference at  $p < 0.1$  level

将企业周围采样点三种元素的比值进行了统计分析,考虑到影响土壤中重金属含量因素的复杂性,在进行不同类型企业间土壤元素比值的方差分析时,以  $p$  值为 0.1 作为差异显著性的标准进行讨论(表 3)<sup>[21]</sup>。总的来看,企业对土壤中重金属积累的影响是明显的,大多企业周围土壤元素比值平均值要高于大田土壤(表 3),表明工业和养殖业的活动有导致某些重金属在其周围积聚的趋势。对同一元素在不同类型企业周围土壤元素比值进行比较后发现,Cd 元素在造纸类企业周围有明显高的比值,其次是化工类和电子类,电镀企业周围该比值最小。对土壤 Hg 元素比值而言,造纸类企业周围比值最高,其次是电子类、化工类、电镀类、纺织印染类等企业,冶金类和大田土壤比值最低。Pb 元素在电子类和冶金类企业周围土壤中积聚程度要明显高于其他企业周围的土壤( $p < 0.1$ ),化工类和造纸类企业的 Pb 元素比值也要明显高于养殖类企业和大田土壤( $p < 0.1$ )。

同一类型企业周围土壤元素比值的分析结果表

明,化工类企业周围 Cd 和 Hg 元素比值高于 Pb 元素的比值( $p < 0.05$ ),造纸类、养殖类企业周围土壤中比值较高的也是 Cd 和 Hg,冶金类企业周围土壤则以 Pb 的积累最大。电子类和纺织印染类企业周围各元素比值间无明显差异。企业周围土壤多个元素的积累表明其对周围土壤存在复合污染的可能性,对这些土壤进行治理和利用时也应考虑这一因素。但同时需要指出的是,有些企业导致某些元素在其周围土壤的积聚是有限的,如 Cd 一般认为会导致电镀类企业周围土壤 Cd 的积聚<sup>[3]</sup>,然而我们的结果并未出现这种情况,显然,这些小型的电镀企业对周围土壤的影响范围并未达到我们采样的范围 50~100 m。究竟企业对周围土壤的影响范围有多大,规律性如何,这将是未来值得研究的课题。

### 3 结 论

张家港市耕地面积约 423 km<sup>2</sup>,我们的土壤采样密度已超过每平方公里 1 个样,在如此密集采样分析的基础上获得的结果表明,经济的高速发展,工业和农业等人为活动对该市土壤已造成了一定影响。但是,这种影响是局部的,在空间上主要分布在企业周边的小范围内。同时,由于企业产品的多样性和复杂性,企业对周围土壤存在复合污染的可能性,这些都应在土壤污染治理和修复利用时加以注意。

尽管目前土壤重金属污染出现在局部地区,但应该看到,该区的经济仍然在蓬勃的发展,如果不切实采取措施控制企业污染物排放,任其发展下去,就有可能导致严重的后果。如对 Pb 元素,在张家港的北部地区,由于土壤的碱性较强,所以对 Pb 元素的环境容量较大,出现超标和超限的点数和面积并不大,但必须看到,由于工业的高速发展,表层土壤与底层土壤 Pb 元素含量的比值最高已达 7.6,如果不加以控制,很快就将超标,导致土壤严重污染。

土壤污染的空间分布受元素种类、企业规模、排污方式等因素影响。这种点源污染的空间化规律,由于影响因素的复杂性,目前了解还不够,还有待进行深入地研究和探讨。如果了解了这些规律,并根据这些规律采取合理的采样方法和采样密度,就可以客观地评价一个地区的污染状况。

值得指出的是,本研究仅分析了土壤中污染物全量的分布情况以及工业企业对元素积累的影响,但是影响作物中污染物含量的并非土壤全量,而是土壤中对生物有效的部分,元素的有效性除受控于

土壤全量外,还受控于土壤的物理化学性质、重金属的来源、土壤管理等因素,所以,要想真正了解一个地区重金属污染状况,还应加强土壤中元素生物有效性的研究。

致谢 本项目在采样方案的设计与确定和野外采样过程中,曾得到 973 项目第 10 课题(2002CB410810)和苏州市农业局土肥站王梅农站长的大力支持和帮助,特此致谢。

## 参考文献

- [ 1 ] Fakoyade S O, Onianwa P C. Heavy metal contamination of soil and bioaccumulation in Guinea grass (*Panicum acium*) around Ikeja Industrial Estate, Lagos, Nigeria. *Environmental Geology*, 2002, 43: 145 ~ 150
- [ 2 ] Krishna A K, Govil P K. Heavy metal contamination of soil around Pali Industrial Area, Rajasthan, India. *Environmental Geology*, 2004, 47: 38 ~ 44
- [ 3 ] 陈怀满著. 土壤—植物系统中的重金属污染. 北京: 科学出版社, 1996. Chen H M. Heavy Metal Pollution in Soil-Plant System (In Chinese). Beijing: Science Press, 1996
- [ 4 ] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients—food safety issues. *Field Crop Research*, 1999, 60: 143 ~ 163
- [ 5 ] Wong S C, Li X D, Zhang G, *et al.* Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China. *Environmental Pollution*, 2002, 119: 33 ~ 44
- [ 6 ] Chen T B, Wong J W C, Zhou H Y, *et al.* Assessment of trace metal distribution and contamination in surface soils of Hong Kong. *Environmental Pollution* 1997, 96(1): 61 ~ 68
- [ 7 ] 刘红樱, 谢志仁, 陈德友, 等. 成都地区土壤环境质量初步评价. *环境科学学报*, 2004, 24(2): 297 ~ 303. Liu H Y, Xie Z R, Chen D Y, *et al.* Primary assessment of environmental quality of soils in Chengdu Area (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(2): 297 ~ 303
- [ 8 ] 钱建平, 张力, 刘辉利, 等. 桂林市及近郊土壤汞的分布和污染研究. *地球化学*, 2000, 29(1): 94 ~ 99. Qian J P, Zhang L, Liu H L, *et al.* Soil mercury distribution and pollution in urban and suburbs of Guilin (In Chinese). *Geochimica*, 2000, 29(1): 94 ~ 99
- [ 9 ] 汪景宽, 赵永存, 张旭东, 等. 海伦县土壤重金属含量的空间变异性研究. *土壤学报*, 2003, 34(5): 398 ~ 403. Wang J K, Zhao Y C, Zhang X D, *et al.* Studies on the spatial variability of heavy metal contents in black soils in central areas of Hailun (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 34(5): 398 ~ 403
- [ 10 ] 刘付程, 史学正, 王洪杰, 等. 苏南典型地区土壤锌的空间分布特征及其与土壤颗粒组成的关系. *土壤*, 2003, 35(4): 330 ~ 333. Liu F C, Shi X Z, Wang H J, *et al.* Spatial distribution of soil Zn and relationship between soil Zn and soil particle composition in typical area of southern Jiangsu Province (In Chinese). *Soils*, 2003, 35(4): 330 ~ 333
- [ 11 ] 胡克林, 张凤荣, 吕贻忠, 等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征. *环境科学学报*, 2004, 24(3): 463 ~ 468. Hu K L, Zhang F R, Lü Y Z, *et al.* Spatial distribution of concentrations of soil heavy metals in Daxing country, Beijing (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(3): 463 ~ 468
- [ 12 ] 夏增禄, 李森照, 穆从如. 北京地区重金属在土壤中的纵向分布和迁移. *环境科学学报*. 1985, 5(1): 105 ~ 112. Xia Z L, Li S Z, Mu C R. The vertical distribution and transference of heavy metals in soils of Beijing (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1985, 5(1): 105 ~ 112
- [ 13 ] 张民, 龚子同. 我国菜园土壤中某些重金属元素的含量与分布. *土壤学报*, 1996, 33(1): 85 ~ 93. Zhang M, Gong Z T. Contents and distribution of some heavy metal elements in the vegetable cultivated soils in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(1): 85 ~ 93
- [ 14 ] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Academia Sinica, Cooperative research group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to Chinese Soil Taxonomy. 3<sup>rd</sup> Edition. (In Chinese). Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001
- [ 15 ] Burt R, Wilson M A, Mays M D, *et al.* Major and trace elements of selected pedons in the USA. *J. Environ. Qual.*, 2003, 32: 2109 ~ 2121
- [ 16 ] 中国环境监测总站编. 土壤元素的近代分析方法. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. China National Environmental Monitoring Centre. ed. Recent Analytical Methods of Soil Elements (In Chinese). Beijing: China Environment Science Press, 1992
- [ 17 ] Xu F L, Tao S, Dawson R W, *et al.* A GIS-based method of lake eutrophication assessment. *Ecological Modelling*, 2001, 144: 231 ~ 244
- [ 18 ] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展. *土壤通报*, 2004, 35(3): 366 ~ 370. Cui D J, Zhang Y L. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 366 ~ 370
- [ 19 ] Lin C J, Pehkonen S O. The chemistry of atmospheric mercury: A review. *Atmospheric Environment*, 1999, 33: 2067 ~ 2079
- [ 20 ] 周国华, 刘占元. 区域土壤环境地球化学研究——异常成因判别. *环境质量 污染程度评价的思路与方法*. 物探与化探, 2003, 27(3): 223 ~ 226. Zhou G H, Liu Z Y. The methods for soil geochemical quality assessment—The application of soil regional geochemical mapping data (In Chinese). *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2003, 27(3): 223 ~ 226
- [ 21 ] Zhang T Q, Mackenzie A F. Changes of soil phosphorous fractions under long-term corn monoculture. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 485 ~ 493

## EFFECT OF INDUSTRIAL DISTRIBUTION ON SOIL HEAVY METAL ACCUMULATION IN A TYPICAL AREA OF THE YANGTZE RIVER DELTA

Shao Xuexin<sup>1,3</sup> Huang Biao<sup>1†</sup> Sun Weixia<sup>1</sup> Gu Zhiqian<sup>2</sup> Qian Weifei<sup>2</sup> Deng Xihai<sup>1</sup> Luo Yongming<sup>1</sup>

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *Station of Soil and Fertilizer Technology in Zhangjiagang City, Zhangjiagang, Jiangsu 215600, China*)

(3 *The Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract** Situated at Yangtze Rive Delta (YRD), Zhangjiagang City has been undergoing a very rapid economic development since the adoption of the reform and opening policy in the 1980s. Based on intensive soil sampling from large fields and fields near the factories, ( ) status of soil heavy metal (Cd, Hg, and Pb) pollution, ( ) effect of sampling methods, i. e. sampling in large fields (A) and in combination of large fields and fields near factories (B) on the assessment of soil heavy metal pollution, and ( ) effect of industrial types on soil heavy metal accumulation with the aid of ratios of soil heavy metal content in top-soil and sub-soil (element ratio) were discussed in the paper. In general, the soil heavy metal pollution in Zhangjiagang City were not serious with the average content of the elements close to their respective background value or lower than criteria of the second grade of the national standard for soil environmental quality (GB15618-1995) and the limitation values for soil environment pollution of green-food production bases (NY/ T391-2000). However, heavy metal contents in some samples were over the standard, resulting in a distribution of small area of soils with high element contents. The sampling methods had a significant effect on assessment of soil pollution. For Cd and Pb, the soils had a lower contents of the elements ( $p < 0.05$ ) from method A than B. However, it is contrary for Hg. The area of soils with high element content was larger for three metals from methods B than A. Most of the samples from the soils near factories were higher in element ratio than those from large fields. Metallurgical industry caused a significant accumulation of Pb, whereas the chemical industry and electrical industry could cause accumulation of more metals. All these results provide valuable basic data and a decision-making basis for planning of investigation, assessment and management of soil environmental quality in Zhangjiagang City or other similar regions in China.

**Key words** Soil; Heavy metal accumulation; Assessment; Type of industries; Yangtze River Delta