

# 某废弃铅冶炼企业周边土壤和蔬菜的铅含量及分布特征

邹天森, 潘立波, 王慢想, 刘 凯, 钟部卿, 张金良\*

(中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

**摘 要:** 为了解并掌握废弃铅冶炼企业对周边环境的影响程度及范围, 在湖北某废弃铅冶炼企业周边按照扇形布点法采集表层土壤样品 102 个、蔬菜样品 69 个, 分别采用石墨炉原子吸收分光光度法和电感耦合等离子体原子发射光谱法检测样品铅含量, 分析土壤环境和蔬菜样品铅含量的空间分布。结果表明, 废弃铅冶炼企业周边土壤铅含量的几何均数为  $39.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 高于湖北省土壤背景值 ( $26.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。土壤铅的地质累积指数平均值为 0.09, 其中, 36.4% 的土壤采样点地质累积指数大于 0。距离废弃铅冶炼企业 500、1 000 m 和 1 500 m 采样点的地质累积指数平均值分别为 2.11、0.61 和 0.33, 而 2 000 m 及其以外土壤铅的地质累积指数平均值均小于 0。白菜、萝卜和葱铅含量的超标率分别为 24.0%、36.0% 和 6.3%, 其内梅罗综合指数分别为 8.12、4.38 和 1.26。废弃铅冶炼企业周边土壤和蔬菜在 500 m 范围内污染最为严重, 土壤在 500~2 000 m 之间呈轻度或中度污染; 白菜、萝卜和葱受到铅污染的最大影响距离分别在 500~1 000、1 000~1 500 m 和 500~1 000 m 之间, 其分别呈现重度、重度和轻度污染, 且在企业周边呈现明显的污染和富集特征。

**关键词:** 废弃铅冶炼企业; 土壤环境; 蔬菜; 铅污染; 空间分布

中图分类号: X820.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819 (2016)04-0376-08

doi: 10.13254/j.jare.2016.0065

引用格式:

邹天森, 潘立波, 王慢想, 等. 某废弃铅冶炼企业周边土壤和蔬菜的铅含量及分布特征[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 376-383.

ZOU Tian-sen, PAN Li-bo, WANG Man-xiang, et al. Lead Contents and Distribution Characteristics of Soils and Vegetables Around an Abandoned Lead Smeltery[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(4): 376-383.

## Lead Contents and Distribution Characteristics of Soils and Vegetables Around an Abandoned Lead Smeltery

ZOU Tian-sen, PAN Li-bo, WANG Man-xiang, LIU Kai, ZHONG Bu-qing, ZHANG Jin-liang\*

(State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In order to disclose the degree and scope of lead pollution of the abandoned lead smeltery, 102 surface soil samples and 69 vegetables samples were collected by using the method of fan-shaped sampling points around an abandoned lead smeltery in Hubei Province. The lead contents of soils and vegetables were detected by graphite furnace atomic absorption spectrometry and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, respectively, and the lead spatial distribution was analyzed. The results showed that the geometric mean of lead contents in soils around the abandoned lead smeltery was  $39.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and exceeded the soil background value of Hubei Province ( $26.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). The mean value of geo-accumulation indexes of lead contents in soil was 0.09, and 36.4% of them exceeded zero. The geo-accumulation indexes of sampling distance of 500, 1 000 m and 1 500 m from the smeltery were 2.11, 0.61 and 0.33, respectively, while the values of sampling distances of more than 2 000 m were all less than zero. 24.0%, 36.0% and 6.3% of the lead contents exceeded the standard value of limited standards of contaminants in vegetables for cabbage, radish and green onion samples, respectively. The soils and vegetables around the abandoned lead smeltery within 500 m were contaminated seriously. The degree of lead pollution in soils was mild or moderate within 500 m to 2 000 m, and the maximum scope in cabbage, radish and green onion was polluted within 500~1 000, 1 000~1 500 m and 500~1 000 m, respectively. Lead pollution in vegetables around the abandoned lead smeltery presented obvious characteristics of high pollution and enrichment.

**Keywords:** abandoned lead smeltery; soil environment; vegetable; lead pollution; spatial distribution

收稿日期: 2015-12-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2012CB525005)

作者简介: 邹天森 (1989—), 男, 硕士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为环境污染评价。E-mail: zoutiansen626@163.com

\* 通信作者: 张金良 E-mail: jinliangzhg@263.net

铅已被我国列入《重金属污染综合防治十二五规划》中的优先控制污染物清单。环境中的铅主要来自于交通废气、燃煤以及涉铅企业铅排放<sup>[1-3]</sup>。铅冶炼企业作为我国环保部门列为重点整治的行业之一,是环境中铅的主要来源<sup>[4]</sup>。近年来,针对我国铅冶炼企业环境铅污染的研究较多<sup>[5-7]</sup>,但研究描述铅冶炼企业对周边环境影响范围的报道相对较少,周小勇等<sup>[4]</sup>报道了某铅冶炼企业对周边环境的实际污染距离远大于该企业环境影响评价报告中建议的卫生防护距离,但其并未对企业周边不同距离环境铅污染状况作出进一步的研究。同时,我国在废弃铅冶炼企业对周边环境影响上的研究更为缺乏,国外关于废弃冶炼企业对环境的影响范围和人群健康暴露上研究较多<sup>[8-10]</sup>。鉴于此,本研究以某废弃的铅冶炼企业为研究对象,采集企业周边不同方位和不同距离的土壤和蔬菜样品,并分析样品的铅含量水平,以期为我国涉铅企业卫生防护距离的设定提供参考数据,并为铅冶炼企业周边环境铅污染的防治以及企业自身生产管理提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区及企业概况

选择湖北省某铅冶炼厂废弃的厂区为研究对象,该企业地处湖北省西北部某县的城区,建于1985年,企业占地10.7 hm<sup>2</sup>,2011年底停产,至采样时已经停产23个月。该企业生产时年耗能1万t标准煤以上,每年再生资源40余万t、处理废旧铅酸蓄电池20万t以及再生铅和铅合金25t。企业所在地属北亚热带季风气候区,雨量充沛,四季分明,根据气象部门的资料,常年主导风向为东南风,次主导风向为西风。

### 1.2 采样点位的布设及样品的采集

以废弃铅冶炼企业的烟囱为中心,采用扇形布点法在常年主导风向上风向、常年主导风向下风向及其右侧45°夹角、常年次主导风向上风向及其下风向5个方位布点,分别在距离企业500、1000、1500、2000、2500、3500、4500 m和6000 m的地方设置采样点,见图1。于2013年11月按照点位的布设原则采集环境样品171个。其中,土壤采样点34个,每个采样点采集3个样品,共102个样品;蔬菜采样点26个,分别采集白菜、萝卜和葱样品26、26个和17个。经现场调查发现,在主导风向下风向3500 m采样点周边有一彩砖厂,为保证数据质量的准确性,该采样点土壤和蔬菜铅含量不作为评价使用。

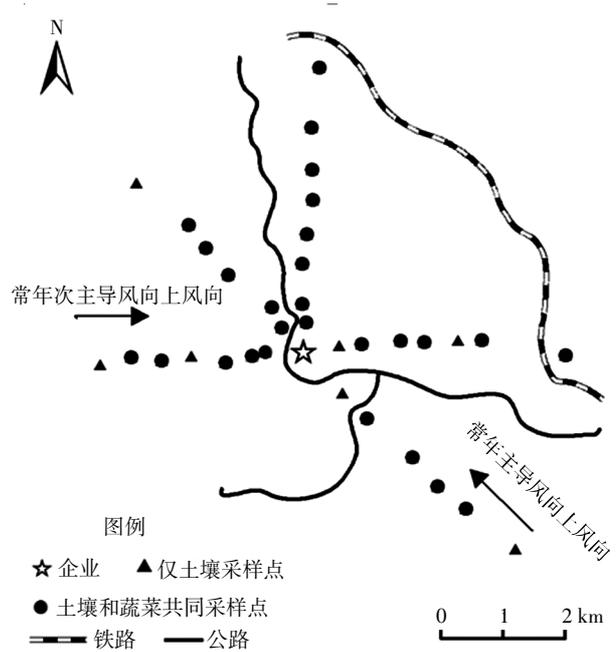


图1 采样点位分布图

Figure 1 Distribution of sampling sites

使用手持GPS进行采样点定位,利用四分法在每个土壤采样点使用塑料铲和木铲平行采取表层土壤(0~20 cm)样品3份,放入牛皮纸袋中贴标签避光保存;同时采用点对点法采集蔬菜样品,若该采样点无所需的蔬菜样品则不采集。将所采集的蔬菜样品除杂后用密封袋封装,装入牛皮纸袋贴标签保鲜储存。现场测量记录采样点位的经度、纬度、气温、天气状况和样品外观。

### 1.3 样品的前处理及检测方法

土壤样品自然风干后过100目尼龙筛,装在玻璃瓶中备用,蔬菜样品洗净取可食部分在捣碎机中匀浆,经冷冻干燥后保存在玻璃瓶容器中。土壤和蔬菜样品分别采用HCl-HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>和HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>消化法消解,土壤和蔬菜样品铅含量的测定分别采用石墨炉原子吸收分光光度法(GFAAS)和电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)。蔬菜铅含量的检测结果以样品鲜重表示。采用标准质控样品进行质控,土壤和蔬菜的标准质控样品分别为GSS5和GBW10015,检测偏差分别为0.31%~6.4%和-2.4%~9.7%。本研究样品的预处理及检测委托清华大学环境质量检测中心完成。

### 1.4 统计分析方法

#### 1.4.1 描述性统计分析

土壤和蔬菜样品铅含量数据均呈现对数正态分

布,因此采用几何均数来表示其铅含量的整体水平。有研究表明<sup>[11-12]</sup>,植物中含水量占植物鲜重的 90%,为了方便与 GB 2762—2012 中蔬菜铅含量限量标准比较,本研究将以蔬菜干重计的蔬菜铅含量换算为以鲜重计。

#### 1.4.2 土壤环境铅污染的评价方法

地质累积指数法(Geo-accumulation index,  $I_{geo}$ )作为评价土壤重金属污染程度的主要方法,能充分考虑到人为活动对重金属污染的影响<sup>[13-14]</sup>,计算方法见公式 1:

$$I_{geo} = \log_2 [CI / (k \times B)] \quad (1)$$

式中,  $C$  为土壤中重金属的实测值,  $k$  为修正指数,通常用来表征沉积特征、岩石地质及其他影响,本研究中取  $k=1.5$ ;  $B$  为重金属的背景值。根据  $I_{geo}$  数值的大小,将重金属污染程度分为 7 个等级,即:0~6 级。其中,0 级:  $I_{geo} \leq 0$ , 无污染;1 级:  $0 < I_{geo} \leq 1$ , 轻度污染;2 级:  $1 < I_{geo} \leq 2$ , 偏中度污染;3 级:  $2 < I_{geo} \leq 3$ , 中度污染;4 级:  $3 < I_{geo} \leq 4$ , 偏重污染;5 级:  $4 < I_{geo} \leq 5$ , 重度污染;6 级:  $5 < I_{geo} \leq 10$ , 严重污染。本研究使用的湖北省土壤铅背景值 ( $26.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 来源于《中华人民共和国土壤环境背景值图集》。

#### 1.4.3 蔬菜铅污染的评价方法

蔬菜单因子污染指数( $P$ )和内梅罗综合指数( $P_{综}$ )的计算方法分别见公式 2 和公式 3:

$$P = C/S \quad (2)$$

$$P_{综} = \sqrt{\frac{P_{max}^2 + (\bar{P})^2}{2}} \quad (3)$$

式中,  $P$  为环境中重金属的单因子污染指数;  $C$  为环境中重金属的实测浓度;  $S$  为国家规定的环境中重金属的标准限值。  $P_{综}$  是环境重金属污染的综合污染指数;  $P_{max}$  为环境重金属单因子指数中的最大值;  $\bar{P}$  为单因子指数平均值。当  $P \leq 1$  时,表示环境未受污染;当  $1 < P \leq 2$  时,表示环境受轻度污染;当  $2 < P \leq 3$  时,表示环境受中度污染;当  $P > 3$  时,表示环境受重度污染。评价结果以  $P_{综}$  的大小划分污染水平等级,共分为 5 个等级,1 级:  $P_{综} \leq 0.7$ , 未污染;2 级:  $0.7 < P_{综} \leq 1.0$ , 污

染警戒线,环境尚清洁;3 级:  $1.0 < P_{综} \leq 2.0$ , 轻度污染,环境开始污染;4 级:  $2.0 < P_{综} \leq 3.0$ , 中度污染,环境明显污染;5 级:  $P_{综} > 3$ , 重度污染,环境污染严重。本研究中白菜和葱属于叶菜类,而萝卜属于芸薹类蔬菜,因此选择《食品中污染物限量标准》(GB 2762—2012)中新鲜叶菜类和芸薹类蔬菜铅含量标准( $0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )作为评价标准。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤铅含量及结果评价

土壤铅含量的几何均数为  $39.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 见表 1。66.7% 的样品铅含量值超过湖北省土壤铅背景值,表现出明显的铅富集特征。最高值出现在次主导风向下风向 500 m 处,为  $554 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 是背景值的 20.7 倍。33 个土壤采样点地质累积指数平均值为 0.09, 属于轻度污染。其中,36.4% 的采样点地质累积指数大于 0, 平均值为 1.16, 轻度污染、偏中度污染、中度污染和偏重污染的采样点个数分别有 7、3、1 个和 1 个。除主导风向上风向,距离企业 500、1 000 m 和 1 500 m 采样点的地质累积指数平均值均大于 0(表 2), 2 000 m 及其以外距离采样点的地质累积指数平均值均小于 0, 说明企业周边土壤铅污染的最大距离为 2 000 m。同时,距离企业 500 m 与其他采样距离的采样点之间的铅含量差异较大,提示企业周边 500 m 范围内污染最为严重。

### 2.2 蔬菜铅含量及结果评价

白菜铅含量的几何均值为  $0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 最大值出现在主导风向下风向 500 m 处,为  $3.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 是标准限值的 11.43 倍(表 3)。24.0% 的采样点白菜铅含量超过限量标准,25 个采样点的单因子指数平均值为 1.15。其中,轻度污染、中度污染和重度污染分别占 16.0%、0.0% 和 8.0%;  $P_{综}$  为 8.12, 属重度污染,表明企业周边白菜铅污染十分严重。就不同的采样方向和距离来说,主导风向下风向和企业周边 500 m 铅污染情况最为严重,几何均值分别是限量标准的 4.14 倍和 6.20 倍,且分别与其他采样方位和采样距离差

表 1 土壤和蔬菜铅含量的描述性统计( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Table1 Descriptive statistics of soils and vegetables lead contents( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

项目	样品数	数据分布	几何均数	算术平均值	标准差	最小值	最大值	第 25 百分数	第 50 百分数	第 75 百分数
土壤	101	对数正态	39.8	62.0	108	12.4	554	24.2	34.1	52.2
白菜	25	对数正态	0.15	0.35	0.72	0.03	3.43	0.06	0.12	0.29
萝卜	25	对数正态	0.21	0.32	0.39	0.03	1.83	0.11	0.19	0.44
葱	16	对数正态	0.09	0.12	0.11	0.04	0.52	0.06	0.10	0.12

表2 各采样点土壤铅含量( $C, \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和地质累积指数( $I_{\text{geo}}$ )

Table 2 Lead contents( $C, \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and geo-accumulation index( $I_{\text{geo}}$ ) of soils in different sampling sites

采样点 距离 铅企业/m	主导风向 上风向		主导风向 下风向		次主导风向 上风向		次主导风向 下风向		主导风向 下风向右45°风向		均数	
	$C$	$I_{\text{geo}}$	$C$	$I_{\text{geo}}$	$C$	$I_{\text{geo}}$	$C$	$I_{\text{geo}}$	$C$	$I_{\text{geo}}$	$C$	$I_{\text{geo}}$
500	—	—	76.0	0.92	210	2.39	554	3.79	101	1.33	235	2.11
1 000	24.0	-0.74	60.2	0.59	81.0	1.02	123	1.62	59.6	0.57	70.0	0.61
1 500	39.9	-0.01	—	—	—	—	56.9	0.51	55.7	0.48	50.8	0.33
2 000	—	—	—	—	27.0	-0.57	—	—	35.3	-0.18	31.2	-0.38
2 500	22.1	-0.86	29.7	-0.43	41.0	0.03	59.4	0.57	32.3	-0.31	36.9	-0.20
3 500	21.3	-0.91	40.8	0.03	24.1	-0.73	32.4	-0.31	20.8	-0.95	24.7	-0.69
4 500	21.5	-0.90	32.9	-0.28	37.6	-0.09	33.7	-0.25	20.3	-0.98	29.2	-0.50
6 000	26.6	-0.59	22.1	-0.86	25.2	-0.67	31.9	-0.33	17.7	-1.18	24.7	-0.72
均数	25.9	-0.67	44.2	-0.01	63.7	0.20	127	0.80	42.8	-0.15	62.8	0.09

注:“—”表示周边无土壤样品。下同。

Note:“—” Indicates no soil samples. The same below.

表3 各采样点白菜铅含量( $C, \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和单因子指数( $P$ )

Table 3 Lead contents( $C, \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and single factor indexes of cabbage in different sampling sites

采样点 距离 铅企业/m	主导风向 上风向		主导风向 下风向		次主导风向 上风向		次主导风向 下风向		主导风向 下风向右45°风向		均数	
	$C$	$P$	$C$	$P$	$C$	$P$	$C$	$P$	$C$	$P$	$C$	$P$
500	—	—	3.43	11.43	1.64	5.47	—	—	0.50	1.67	1.86	6.20
1 000	—	—	0.23	0.77	0.34	1.13	0.06	0.20	0.14	0.47	0.19	0.63
1 500	0.26	0.87	—	—	—	—	0.34	1.13	0.05	0.17	0.22	0.73
2 000	—	—	—	—	0.07	0.23	—	—	0.12	0.40	0.10	0.33
2 500	0.26	0.87	—	—	—	—	0.06	0.20	0.05	0.17	0.12	0.40
3 500	0.32	1.07	1.39	4.63	0.06	0.20	—	—	0.09	0.30	0.16	0.53
4 500	0.10	0.33	0.07	0.23	0.06	0.20	0.16	0.53	0.06	0.20	0.09	0.30
6 000	—	—	—	—	—	—	0.14	0.47	0.03	0.10	0.09	0.30
均数	0.24	0.79	1.24	4.14	0.43	1.44	0.15	0.51	0.13	0.43		

异较大。

萝卜铅含量的几何均值为  $0.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 最大值出现在主导风向下风向 500 m 处, 为  $1.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 是标准限值的 6.10 倍(表 4)。36% 的采样点萝卜铅含量超过限量标准。25 个采样点萝卜铅含量的单因子指数平均值为 1.08。其中, 轻度污染、中度污染和重度污染分别占 24.0%、4.0% 和 8.0%。 $P_{\text{综}}$  为 4.38, 属重度污染, 表明企业周边萝卜铅污染十分严重。就不同的采样方向和距离来说, 主导风向下风向和企业周边 500 m 铅污染最为严重, 几何均值分别是标准限值的 3.17 倍和 3.10 倍, 且分别与其他采样方位和采样距离差异较大。

葱中铅含量的几何均值为  $0.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 最大值出现在主导风向下风向 500 m 处, 为  $0.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 是标准限值的 1.73 倍(表 5)。16 个采样点单因子指数

平均值为 0.40。其中, 仅有 1 个采样点(占 6.3%)的铅含量超过限量标准。 $P_{\text{综}}$  为 1.26, 属轻度污染, 表明企业周边葱存在铅污染。就不同的采样方向和距离来说, 主导风向下风向和企业周边 500 m 铅污染最为严重, 几何均值分别是限量标准的 1.12 倍和 1.10 倍, 且分别与其他采样方位和采样距离差异较大。

### 2.3 土壤和蔬菜铅污染的空间分布特征

利用 ArcGIS 10.1 中的克里金插值法对采样区域铅污染程度进行最优内插估计(见图 2)。结果显示环境铅污染在企业周边 500 m 范围内污染十分严重, 铅含量的空间分布呈现出明显的富集特征, 主要表现为以企业为中心, 由中心向四周逐渐减轻的趋势。其中, 土壤在次主导风向下风向方向呈严重的面状污染, 呈现出明显的高富集、高污染特征。白菜和萝卜的铅污染分布不平衡, 空间差异较大。其中, 白菜主要在常年

表 4 各采样点萝卜铅含量( $C, \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和单因子指数( $P$ )Table 4 Lead contents( $C, \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and single factor indexes of radish in different sampling sites

采样点 距离 铅企业/m	主导风向 上风向		主导风向 下风向		次主导风向 上风向		次主导风向 下风向		主导风向 下风向右 45°风向		均数	
	$C$	$P$	$C$	$P$	$C$	$P$	$C$	$P$	$C$	$P$	$C$	$P$
500	—	—	1.83	6.10	—	—	—	—	0.03	0.10	0.93	3.10
1 000	—	—	0.34	1.13	0.45	1.50	0.48	1.60	0.17	0.57	0.36	1.20
1 500	0.31	1.03	—	—	—	—	0.25	0.83	0.13	0.43	0.23	0.77
2 000	—	—	—	—	0.20	0.67	—	—	0.49	1.63	0.35	1.17
2 500	0.20	0.67	0.61	2.03	—	—	0.14	0.47	0.07	0.23	0.26	0.87
3 500	0.42	1.40	1.18	3.93	0.07	0.23	0.12	0.40	0.09	0.30	0.17	0.57
4 500	0.10	0.33	1.04	3.47	0.11	0.37	—	—	0.10	0.33	0.34	1.13
6 000	—	—	—	—	—	—	0.19	0.63	0.15	0.50	0.17	0.57
均数	0.26	0.87	0.95	3.17	0.21	0.70	0.24	0.80	0.15	0.50		

表 5 各采样点葱铅含量( $C, \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和单因子指数( $P$ )Table 5 Lead contents( $C, \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and single factor indexes of onion in different sampling sites

采样点 距离 铅企业/m	主导风向 上风向		主导风向 下风向		次主导风向 上风向		次主导风向 下风向		主导风向 下风向右 45°风向		均数	
	$C$	$P$	$C$	$P$	$C$	$P$	$C$	$P$	$C$	$P$	$C$	$P$
500	—	—	0.52	1.73	—	—	—	—	0.14	0.47	0.33	1.10
1 000	—	—	0.12	0.40	0.09	0.30	0.18	0.60	—	—	0.13	0.43
1 500	0.11	0.37	—	—	—	—	0.12	0.40	0.05	0.17	0.09	0.30
2 000	—	—	—	—	0.08	0.27	—	—	0.07	0.23	0.07	0.23
2 500	—	—	—	—	—	—	0.04	0.12	—	—	0.04	0.13
3 500	0.11	0.37	0.60	2.00	—	—	—	—	—	—	0.11	0.37
4 500	—	—	0.10	0.33	—	—	0.04	0.13	—	—	0.07	0.23
6 000	—	—	—	—	—	—	0.12	0.40	0.04	0.13	0.08	0.27
均数	0.11	0.36	0.34	1.12	0.09	0.30	0.10	0.33	0.08	0.25		

主导风向上风向以及次主导风向下风向(企业东部和东南部)污染严重,呈面状污染和点状污染。萝卜铅污染呈连续的面状污染,主要集中在常年主导风向下风向及其左侧 90°夹角方向(企业西部)。葱铅污染的整体分布比较均衡,空间差异较小,分布主要集中在常年主导风向上风向(企业东南部),与白菜铅污染的空间分布基本一致,但污染程度较轻,呈现出明显的面源污染空间分布特征。企业周边土壤铅含量的差异与距离企业的远近关系密切,白菜与萝卜、葱铅污染在空间分布存在一定的差异,这可能与蔬菜本身性质以及其对铅富集能力的不同有关<sup>[5]</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 铅冶炼企业对周边环境的影响范围

根据地质累积指数的评价结果,该企业对周边土壤环境不同方向上的污染范围不同,在常年主导风向

的上风向未发现土壤环境存在污染现象;其他各风向均在 500 m 处的采样点污染最重;常年主导风向下风向、次主导风向上风向和次主导风向下风向及主导风向下风向右 45°方向最远的污染点位分别为 2 500、2 000、3 500 m 和 2 000 m。我们注意到最大污染范围在常年次主导向下风向,根据现场调查发现,该企业东部(即常年次主导风向下风向)有 3 条县城的主要交通运输公路,并在距离企业 1 500 m 处有 1 个机械厂和 1 个变电厂,在距企业 2 500 m 以外还有多家机械和加工企业,该方向较其他方向污染范围大且严重可能是受到交通道路、机械和加工企业的影响。

企业周边蔬菜铅含量的分布与土壤环境铅污染范围存在较大差异。在采样区域内 3 种蔬菜铅含量的污染范围均小于土壤环境的污染范围,而且污染最严重的方位也不一致,详见图 2。在常年主导风向下

风向右 45°方向(北侧)和次主导风向下风向(东侧)6 000 m处萝卜和葱中的铅含量较高。现场调查显示在铅冶炼厂的东北方向有 1 条铁路运输线,且与上述 2 个采样点距离较近,对 2 个采样点较高的铅含量可能存在较大影响。研究还发现,在不同方位 3 种蔬菜铅含量的分布不同,白菜和葱在企业东南方位污染严重,萝卜在企业西部污染严重。综上,该企业对周边

土壤环境和蔬菜的影响范围存在较大差异,可能与企业周边土壤环境铅的来源、形态和生物利用度有关<sup>[6]</sup>。提示在进行涉铅企业污染调查的时候应考虑铅的形态和生物利用度,同时,在进行企业对周边环境铅污染监测时,仅考虑土壤环境的铅总量是不够的。

### 3.2 防护距离的考虑

目前,我国并没有出台针对铅冶炼企业卫生防护

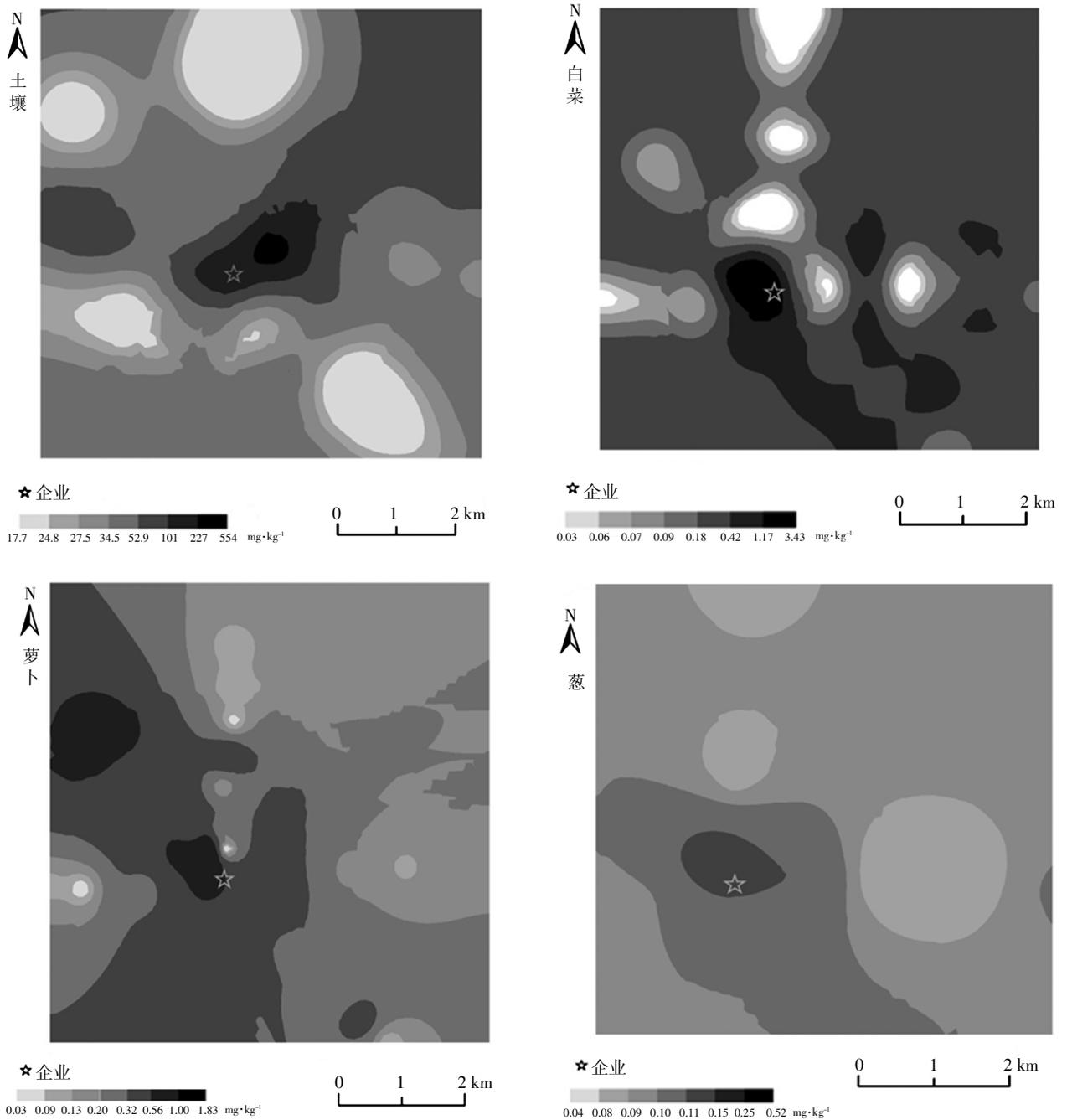


图 2 企业周边环境铅污染的空间分布图

Figure 2 Spatial distribution maps of lead pollution around the lead smeltery

距离的相关标准或政策<sup>[17]</sup>。有研究根据土壤铅含量采用高斯扩散模型模拟提出的铅冶炼企业卫生防护距离在1 000 m之内<sup>[18-20]</sup>。本研究所选铅冶炼企业的环境影响评价报告中建议的卫生防护距离为800 m,实地采样调查表明土壤和萝卜受到铅污染影响的实际范围都超过了800 m,而白菜和葱铅污染的距离大于500 m、小于1 000 m。其中,根据 $I_{geo}$ 计算得出,距企业500~2 000 m的土壤环境均受到不同程度的污染,采用插值法模拟得出企业周边土壤的污染范围为2 500 m。白菜、萝卜和葱3种蔬菜受到铅污染的最大影响距离分别在500~1 000、1 000~1 500 m和500~1 000 m之间。结果表明铅冶炼企业对周边环境的影响大于企业所设置的卫生防护距离,提示在设置涉铅企业防护距离时需要在综合考虑对环境介质影响的基础之上,还要结合企业规模和产品工艺等设置修正系数,并定期在规模发展的基础上做出修订。

#### 4 结论

(1)废弃铅冶炼企业周边土壤铅含量的平均水平高于湖北省背景值,存在不同程度的铅累积;萝卜、白菜和葱铅含量的平均水平均低于GB 2762—2012中的限量标准,不存在铅污染现象。

(2)废弃铅冶炼企业周边不同采样点的土壤和蔬菜存在铅污染和超标现象。其中,土壤和葱均呈轻度污染,而白菜和萝卜均呈重度污染;36.4%的土壤采样点存在轻度或中度铅污染,白菜、萝卜和葱铅含量的超标率分别为24.0%、36.0%和6.3%。

(3)废弃铅冶炼企业周边500 m范围内铅污染最为严重。土壤在距离企业2 000 m范围内存在不同程度的铅污染,白菜、葱和萝卜分别在1 000、1 000 m和1 500 m范围内存在污染,呈现明显的高污染、高富集特征。

**致谢:** 感谢中国科学院高能物理研究所的刘俐媛博士、山西医科大学的杨钊同学和清华大学环境检测中心的辛月调查员在样品采集过程中的帮助和支持。

#### 参考文献:

- [1] Morrison D, Lin Q, Wiehe S, et al. Spatial relationships between lead sources and children's blood lead levels in the urban center of Indianapolis (USA)[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, 35 (2): 171-183.
- [2] Kinnaird J A, Ixer R A, Barreiro B, et al. Contrasting sources for lead in Cu-polymetallic and Zn-Pb mineralisation in Ireland: constraints from lead isotopes[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37 (5): 495-511.
- [3] 王春梅, 欧阳华, 王金达, 等. 沈阳市环境铅污染对儿童健康的影响[J]. *环境科学*, 2003, 24 (5): 17-22.  
WANG Chun-mei, OUYANG Hua, WANG Jin-da, et al. Impact of lead pollution in environment on childrens health in Shenyang city[J]. *Environmental Science*, 2003, 24 (5): 17-22. (in Chinese)
- [4] 周小勇, 雷梅, 杨军, 等. 某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34 (9): 3675-3678.  
ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, et al. Effect of lead on soil quality and human health around a lead smeltery[J]. *Environmental Science*, 2013, 34 (9): 3675-3678. (in Chinese)
- [5] 严连香, 黄标, 邵学新, 等. 不同工业企业周围土壤-作物系统重金属Pb、Cd的空间变异及其迁移规律[J]. *土壤学报*, 2009, 46(1): 52-62.  
YAN Lian-xiang, HUANG Biao, SHAO Xue-xin, et al. Spatial variability and transfer of Pb and Cd in soil-crop system around different types of factories[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 52-62. (in Chinese)
- [6] 黄维, 连兵, 常沁春, 等. 某铅冶炼厂周围环境铅污染调查[J]. *环境与健康杂志*, 2007, 24 (4): 234-237.  
HUANG Wei, LIAN Bing, CHANG Qin-chun, et al. Environment lead pollution investigation of a lead smelter[J]. *Journal of Environment and Health*, 2007, 24 (4): 234-237. (in Chinese)
- [7] 李锐, 宗良纲, 丁园, 等. 冶炼企业影响的土壤-水稻系统中重金属分布特性及污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(3): 490-495.  
LI Rui, ZONG Liang-gang, DING Yuan, et al. Pollution assessment and distribution characteristic of heavy metals in rice paddy systems around metal smeltery area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28 (3): 490-495. (in Chinese)
- [8] Spurgeon D J, Lawlor A, Hooper H L, et al. Outdoor and indoor cadmium distributions near an abandoned smelting works and their relations to human exposure[J]. *Environ Pollut*, 2011, 159 (12): 3425-3432.
- [9] Caruso T, Migliorini M, Bucci C, et al. Spatial patterns and autocorrelation in the response of microarthropods to soil pollutants: The example of oribatid mites in an abandoned mining and smelting area[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157 (11): 2939-2948.
- [10] Neuberger J S, Hollowell J G. Lung cancer excess in an abandoned lead-zinc mining and smelting area[J]. *Science of the Total Environment*, 1982, 25 (3): 287-294.
- [11] 谢华, 廖晓勇, 陈同斌, 等. 污染农田中植物的砷含量及其健康风险评估——以湖南郴州邓家塘为例[J]. *地理研究*, 2005, 24 (1): 151-159.  
XIE Hua, LIAO Xiao-yong, CHEN Tong-bin, et al. Arsenic in plants of farmland and its healthy risk: A case study in an As-contaminated site in Dengjiatang, Chenzhou City, Hunan Province[J]. *Geographical Research*, 2005, 24 (1): 151-159. (in Chinese)
- [12] 冯锐, 刘九庆. 利用微波法测量植物叶片含水量[J]. *林业机械与木工设备*, 2009, 37 (12): 47-48.  
FENG Rui, LIU Jiu-qing. Measurement of leaf water content using microwave[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2009,

- 37(12): 47-48. (in Chinese)
- [13] Martínez L L G, Poleto C. Assessment of diffuse pollution associated with metals in urban sediments using the geoaccumulation index ( $I_{geo}$ ) [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14 (7): 1251-1257.
- [14] Zahra A, Hashmi M Z, Malik R N, et al. Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah: Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan[J]. *Sci Total Environ*, 2014, 470-471: 925-933.
- [15] 赵小蓉, 杨 谢, 陈光辉, 等. 成都平原区不同蔬菜品种对重金属富集能力研究[J]. 西南农业学报, 2010, 23 (4): 1142-1146.  
ZHAO Xiao-rong, YANG Xie, CHEN Guang-hui, et al. Assessment of heavy metal enrichment in vegetables of Chengdu plain [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 23 (4): 1142-1146. (in Chinese)
- [16] 王 玮, 袁大伟, 汪雅各. 土壤重金属的形态特征及其对蔬菜重金属含量的影响[J]. 上海农业学报, 1991(4):54-60.  
WANG Wei, YUAN Da-wei, WANG Ya-ge. Characteritics of heavy metal forms in soil and their effect on heavy metal content in vegetable[J]. *Acta of Agriculturae Shanghai*, 1991(4): 54-60. (in Chinese)
- [17] 许 宁, 闫 旭, 胥占忠, 等. 铅冶炼业卫生防护距离标准探讨[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29 (5): 464-465.
- [18] 王 静, 王栋成, 张爱英, 等. 确定工业企业卫生防护距离技术方法研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30 (9): 75-77.  
WANG Jing, WANG Dong-cheng, ZHANG Ai-ying, et al. Technical method on determination of health protection zone for industrial enterprise[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30 (9): 75-77. (in Chinese)
- [19] 薛 诚, 毕 俊. 某铅冶炼厂卫生防护距离的估算[J]. 中国预防医学杂志, 2010, 11 (2): 159-161.  
XUE Cheng, BI Jun. Study on the minimum health safety zone for a lead smelting plant[J]. *Chinese Preventive Medicine*, 2010, 11(2): 159-161. (in Chinese)
- [20] 周祖延, 张秀珍, 吴才刚, 等. 村镇铅冶炼厂卫生防护距离的研究[J]. 中国公共卫生, 1991, 7 (7): 299-302.