

# 南京市不同功能城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征

吴新民<sup>1,2</sup>, 李恋卿<sup>1</sup>, 潘根兴<sup>1\*</sup>, 居玉芬<sup>1</sup>, 姜海洋<sup>1</sup> (1. 南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095; 2. 池州师范专科学校, 安徽 池州 247100)

**摘要:** 将南京城市建成区分为冶炼区、开发区、商业区、城市广场、风景区、老居民区等 6 大功能区, 选择采集土壤样本 56 个, 用原子吸收光谱仪选择分析了土壤中重金属元素的全量和活性形态含量。结果表明, 南京城市土壤中 Pb、Cu、Zn 和 Cd 的总量分别为:  $117.1 \pm 103.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $39.86 \pm 39.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $273.3 \pm 131.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $1.13 \pm 0.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。冶炼区、老居民区、商业区、新开发区、城市广场和风景区的内梅罗重金属综合污染指数分别为: 5.4、4.9、3.4、1.6、2.4 和 2.3。冶炼区以 Pb、Cd 的强度积累为特征, 但活性形态的比重较小。而城市中心的居民区和商业区 Zn 的积累最显著, 并且所测定的重金属的醋酸盐浸提态含量明显较高。除了风景区和城市市民广场外, 城市中心区的重金属均表现出较明显的表聚性。城市活动区土壤 Pb、Cd 的强烈积累可能已经对人类健康构成了威胁。

**关键词:** 城市土壤; 城市功能区; 重金属污染; 环境效应

中图分类号: X531 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)03-07-0105

## Soil Pollution of Cu, Zn, Pb and Cd in Different City Zones of Nanjing

Wu Xinmin<sup>1,2</sup>, Li Lianqing<sup>1</sup>, Pan Genxing<sup>1\*</sup>, Ju Yufen<sup>1</sup>, Jiang Haiyang<sup>1</sup> (1. Institute of Resources, Ecosystem & Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Chizhou Junior Teachers College, Anhui Chizhou 247100, China)

**Abstract:** The Nanjing city was divided into six zones as smelter industry, inner commercial, inner residence, newly developed, urban greenland and preserved scenic. In each zone, soil samples were randomly collected by triple subsampling technique. Total 56 soil samples were digested by mixed solution of nitric, chloridic and sulphatic acids and by sequential extractants respectively according to the standard methods. The total and fractional heavy metals were determined by AAS. The mean total content of Pb, Cu, Zn and Cd of the soils from smelter industry, inner commercial, inner residence, newly developed, urban greenland and preserved scenic zone was  $117.1 \pm 103.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $39.86 \pm 39.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $273.3 \pm 131.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $1.13 \pm 0.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , with the overall pollution index being 5.4, 4.9, 3.4, 1.6, 2.4 and 2.3 respectively. The pollution in the smelter industrial zone was characterized by high concentration but low chemical mobility of Pb and Cd, while that in inner cities by high concentration of lead and zinc with quite larger acetic acid extractable pool. Except for the soils from newly developed and preserved zones, the heavy metals were more or less superficial in respect to their depth distribution in the urban soils. The dramatic soil pollution of Pb and Cd in the urban area might cause any health risks for children, whose activities are believed to happen in a relative limited area. The future research on urban soil pollution should pursue the effect of soil pollution on human environment in the urban area.

**Keywords:** urban soil; functional zones; heavy metal pollution; environmental effect

城市土壤是城市环境的重要组成部分, 对其的研究已成为国际土壤学的新兴热点领域<sup>[1]</sup>。对于城市土壤的重金属污染已有大量的研究<sup>[2~3]</sup>。例如, 城市土壤中 Pb 污染十分普遍和严重<sup>[4,5]</sup>, 影响活动于城区的青少年和儿童的血 Pb 水平, 还可能关系到城市中青少年犯罪等社会问题<sup>[6]</sup>。文献<sup>[7~9]</sup>报道了开封市、广州市

和南京市城区土壤重金属的污染状况, 都表明城市土壤因不同的土地利用而存在不同程度的重金属污染。但对于城市土壤的重金属污染在

基金项目: 教育部重点科研项目(2002012)

作者简介: 吴新民(1965~), 男, 副教授, 主要从事化学与环境的教学和研究。

收稿日期: 2002-12-11; 修订日期: 2003-01-03

\* 通讯联系人

不同城市活动功能区间的差异特点尚未有充分的研究资料.本文以南京市为例,对城市土壤按不同的生产、生活和商业的土地利用特点进行分区采样分析,试图为了解不同的城市活动对城市土壤重金属污染的影响,为城市的环境规划和保护提供科学依据.

## 1 采样

### 1.1 功能区选择

城市的中心活动是大规模的工业产业和人类的聚居与密集的商业活动.风景区、城市广场作为城市的建成区,是城市功能的延伸,但前者基本保持了自然的土壤和生态环境特点,后者是人工改造下的城市绿地,在土壤污染上当有不同表现.故将南京市城市土壤按城市的不同功能区划分为矿冶工业区、中心商业区、老居民区、新开发区、城市广场和风景区 6 个功能区进行布点和采样.

### 1.2 样本采集与处理

每一功能区内样点随机布设;土壤采样按多点混合法(同一地点采 3~5 个样品,就地混合为一个样品),并考虑到城市土壤的混杂性<sup>[1]</sup>,采用深度间隔采样法分别采取 0~5cm、5~20cm 和 50~60cm 的土壤,土壤剖面记录及分析样本采集按规程进行<sup>[10]</sup>,采样点共 25 个,土壤样本共 56 个.土壤风干后磨碎,分别过 10 目和 20 目塑料土筛保存备用.用四分法取部分土样进一步用玛瑙研钵研磨,过 100 目塑料筛,备用.

### 1.3 分析方法

(1)土壤基本性质测定<sup>[10]</sup> 土壤颗粒组成按比重计法, $pH$  值按 1:1 水提法;有机碳按外加加热法.

(2)土壤重金属元素浸提 选择测定 Pb、Cu、Zn、Cd 4 个重金属元素.全量浸提采用三酸消化法制样<sup>[10]</sup>,活性形态测定采用修改的 Tessier 连续浸提法<sup>[11]</sup>.

(3)重金属含量测定 待测液中重金属元素含量用原子吸收分光光谱仪(TAS-986,北京普析公司,2001)测定,其中 Cd 测定采用石墨炉火焰法.

(4)分析质量控制 用国家地球化学标准样 GBW07603(GSV-2)内插法.

## 2 实验结果

### 2.1 土壤基本特性

供试土壤的颗粒组成和基本性质列于表 1.城市土壤的基本物质来源比较复杂,土壤剖面结构发育较差,厚度差异较大,基本性质差异也明显.城市中心区(城市广场、商业区和居民区)的土壤厚度在 20~50cm 间,物质组成上人为侵入体(如生活废弃物、建筑废弃物等)较多,并表现为物质组成在剖面上不连续.受建筑活动的影响,城市土壤的  $pH$  均在 7~8,在颗粒组成上粗粒化明显.城区土壤的有机质含量在土壤样品间有较大的差异,老居民区土壤有机质较为丰富.这可能是因为存在不同程度的生活废弃物和污染物侵入的缘故.而城市的风景区土壤保留了较多的黄棕壤微酸性、粘质的特性.

表 1 供试土壤颗粒组成与基本性质/ $g \cdot kg^{-1}$

Table 1 Granular composition of the studied urban soils and the basic properties /  $g \cdot kg^{-1}$

功能区	2~0.2mm	0.2~0.002mm	<0.002mm	SOC	pH(H <sub>2</sub> O)	侵入体
矿冶区	345.4±58.5	417.7±107.6	237.0±101.0	20.5±17.4	7.87±0.21	少量矿渣等
商业区	351.6±137.8	495.9±183.5	152.5±93.1	17.3±12.2	7.68±0.54	建筑碎屑、塑料、金属碎片
老居民区	473.0±126.5	324.2±105.3	202.8±49.3	29.5±13.7	7.77±0.16	建筑碎屑、电池、塑料等
城市广场	384.5±91.2	391.2±83.3	224.3±48.5	20.3±10.5	7.94±0.19	建筑碎屑等
风景区	319.5±83.3	339.7±71.7	340.8±76.0	25.3±8.7	5.90±0.97	少
新开发区	515.6±130.0	258.1±88.9	226.2±48.7	36.9±16.2	7.77±0.26	少

## 2.2 不同功能区土壤重金属的分布

鉴于城市土壤的混杂性,不同层次样本都作为单独样本进行统计.按不同城市功能区土壤的重金属含量全量的统计结果列于表 2.可见,6 个功能区在土壤重金属全量上存在显著性差异.以 Pb、Cd 来说,矿冶区中含量最高,而 Cu、Zn 以老居民区、商业区和城市广场含量较高.新街口地区土壤重金属污染十分严重,土壤表层的 Cu、Zn、Pb、Cd 全量分别高达 157.3, 565.8, 345.3 和 3.18 mg/kg.用内梅罗计算式评价不同功能区的重金属污染强度:

$$P_{ij} = [ [ ( \text{Max } c_i / S_{ij} )^2 + (1/n \sum c_i / S_{ij})^2 ] \times 0.5 ]^{0.5}$$

式中,  $j$  为城市功能区编号,  $i$  为重金属元素种类,  $c_i$  为  $i$  重金属元素的实测浓度,  $S_{ij}$  为参考的土壤环境背景值,  $n$  为重金属种类总数 ( $n=4$ ). 计算的不同功能区土壤重金属综合污染指数 ( $P_{ij}$ ) 见表 2. 表明城市土壤重金属污染指数以下序递降: 矿冶区 > 老居民区 > 商业区 > 市民广场  $\approx$  风景区 > 新开发区. 因此, 在城市中, 重金属环境质量以新开发区和风景区为佳, 市民

表 2 南京市不同功能区土壤重金属元素全量比较<sup>1)</sup>/ mg·kg<sup>-1</sup>

Table 2 Mean values of heavy metal concentrations in different zones of Nanjing city / mg·kg<sup>-1</sup>

功能区	样本数	Pb	Cd	Cu	Zn	综合污染指数( $P_{ij}$ )
矿冶区	8	283.8 ± 72.1A	2.4 ± 0.7A	48.9 ± 9.6A	218.3 ± 76.6A	5.4
老居民区	8	141.6 ± 67.2B	1.65 ± 0.7A	80.8 ± 45.9B	382.6 ± 104.5B	4.9
商业区	10	119.8 ± 110.2B	0.8 ± 0.6B	58.2 ± 48.9B	334.0 ± 145.6B	3.4
新开发区	7	24.4 ± 5.2D	0.89 ± 0.5B	16.3 ± 7.7A	164.7 ± 41.2D	1.6
市民广场	13	54.5 ± 29.8C	0.8 ± 0.5B	32.2 ± 27.3C	280.2 ± 170.6C	2.4
风景区	10	66.1 ± 33.7C	0.99 ± 0.7B	30.3 ± 41.2C	202.4 ± 18.5A	2.3
平均值	56	117.1 ± 103.7	1.13 ± 0.7	39.86 ± 39.9	273.3 ± 131.6	3.3
背景值 <sup>[12,13]</sup>		24.8	0.19	20.0	76.8	

1) 同一列中相同字母表示差异不显著, 不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

广场也较好, 其他区污染相当严重.

对所测的城市土壤重金属 Pb、Zn、Cu、Cd 含量资料进行两两对比, 得到图 1. 很明显, 矿冶区土壤的重金属分布以 Pb、Cd 强污染为特征, 而商业区和老居民区的重金属污染表现为较高的 Zn 积累, 而风景区和高新区各重金属元素的含量低, 变异小, 说明相对污染负荷较轻. 这反映出城市社会活动对土壤重金属污染的影响. 不同的元素组合特征还说明不同功能区的污染因子的不同. 除工业区外, Pb、Zn 间存在较好的相关关系, 说明含铅锌的装饰材料、管材和电池等是都市中心 Pb、Zn 污染的主要原因, 尽管已认识到交通极可能是 Pb 污染的主要途径<sup>[14]</sup>. Cu、Zn 在所有功能区样本中均存在依存关系, 说明它们的污染途径是相似的, 但 Pb、Cd 的关系在不同区比较复杂, 说明不但是不同区, 而且是不同的地点的 Pb、Cd 污染的途径是

不同的. 事实上, 在车辆修理厂附近采得的土壤表层和亚表层的 Pb 含量高达 700 mg/kg 以上. 交通车辆是影响城市土壤 Pb 水平的主要因素<sup>[14,15]</sup>. 但垃圾中日用品废弃物也可能是污染的原因<sup>[5]</sup>.

## 2.3 不同功能区土壤重金属活性的分异

对供试土壤样本进行的连续浸提分析结果表明, 土壤中重金属主要以残渣态存在, 其次为氧化物结合态和有机结合态. 连续浸提的各形态中, 一般认为水浸提态、氯化物浸提态和醋酸盐浸提态是环境中容易在土壤-水和土壤-植物间移动迁移的活性形态. 对供试 6 个功能区土壤的 Pb、Cd 的 3 种形态分析结果示于表 3. 可见, 重金属元素的形态分布在不同功能区间的变异性十分明显, 当然, 水溶性重金属含量均较低. 总地说来, 无论是 Pb 还是 Cd, 3 种浸提态的总和占全量的百分比以污染较严重的工业区

和老居民区为低,而在相对污染程度较低的风景区、新开发区等较高.尽管土壤中 Pb 显得以氧化物结合态和残渣态占优势<sup>[16]</sup>,但水溶性 Pb 和交换性 Pb 在污染较严重的老居民区和商业区较多,而新开发区等干扰较轻的土壤中较少.不过, NH<sub>4</sub>OAc 浸提态 Pb、Cd 含量在老居民区、商业区和市民广场中较高,这可能是这些地带

人为建筑活动影响较为强烈,填埋和掺杂水泥、石灰等碱性建筑残遗物的缘故.在这些部位, NH<sub>4</sub>OAc 浸提态 Cu、Zn 含量也明显较高. Cd 是环境中分散元素,其 3 种浸提态占全量的百分比高于 Pb.基本上保持自然土壤属性的风景区土壤中, NH<sub>4</sub>OAc 浸提态 Cd 含量显著低于其他城市功能区土壤.这说明人为活动改变了城

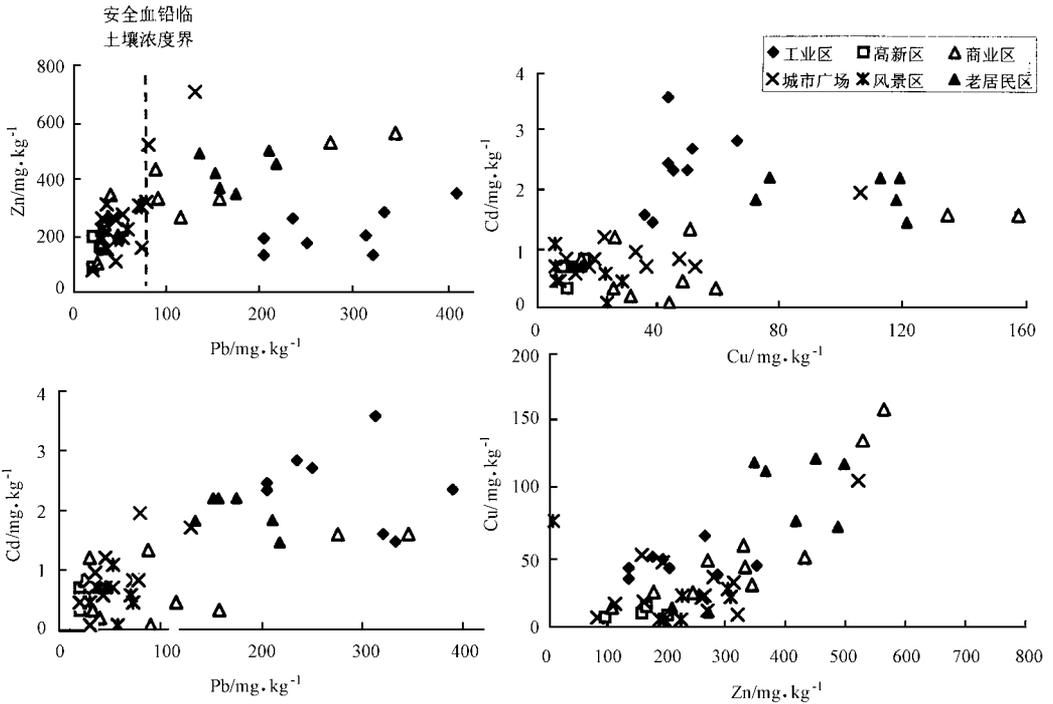


图 1 不同功能区土壤污染重金属元素间的关系

Fig. 1 Correlation of the measured heavy metal contents for different functional zones

表 3 城市不同功能区土壤中活性形态重金属含量的分异

Table 3 The content and ratio to total contents of different speciation of heavy metals in urban soils

元素	浸提剂	工业区	老居民区	商业区	市民广场	新开发区	风景区
Pb / mg·kg <sup>-1</sup>	H <sub>2</sub> O	0.52 ± 0.26	0.66 ± 0.36	0.72 ± 0.51	0.68 ± 0.41	0.28 ± 0.22	0.28 ± 0.12
	MgCl <sub>2</sub>	3.97 ± 0.47	5.22 ± 0.41	5.05 ± 1.17	4.24 ± 1.61	3.08 ± 0.63	4.81 ± 0.43
	NH <sub>4</sub> OAc	4.42 ± 0.89	8.05 ± 2.81	6.19 ± 2.75	6.43 ± 1.58	5.30 ± 0.49	5.04 ± 1.05
	占全量 <sup>1)</sup> / %	3.19 ± 0.45	12.04 ± 5.75	17.34 ± 1.72	25.40 ± 10.72	36.20 ± 6.02	17.93 ± 8.40
Cd / μg·kg <sup>-1</sup>	H <sub>2</sub> O	9.2 ± 4.2	35.0 ± 13.9	38.5 ± 8.1	35.8 ± 7.9	26.4 ± 14.1	41.9 ± 11.4
	MgCl <sub>2</sub>	124.0 ± 24.6	199.0 ± 24.6	202.0 ± 14.1	184.0 ± 62.3	162.0 ± 33.6	202.0 ± 41.9
	NH <sub>4</sub> OAc	29.6 ± 20.0	45.4 ± 34.5	20.2 ± 19.8	15.5 ± 24.2	25.4 ± 18.0	1.70 ± 5.0
	占全量 / %	7.86 ± 2.77	20.84 ± 12.17	44.43 ± 25.82	30.98 ± 14.90	31.55 ± 23.74	38.04 ± 22.73

1) 为 3 级浸提总和除以重金属元素的全量

市土壤的基本性质,从而改变了土壤中重金属元素的形态分布.

### 2.4 土壤重金属含量的深度分布

将所采样本按不同深度进行土壤重金属全量的归纳比较,结果列于图 2.城市土壤的混杂性使得重金属全量在土壤剖面深度分布的变异加剧,样本的标准差加大.不过,在不同功能区中,Pb、Cd 的深度分布趋势一致,而 Cu、Zn 也表现出相似的不同区间的变异格式.在城市中心

区(老居民区和商业区)的土壤中,Cd、Cu、Zn 的表层积累现象较明显,而风景区土壤中,Cd、Cu、Zn 往往表现出在亚表层积聚的现象,在新开发区的土壤中 Cu 和 Cd 也有表聚趋势,说明在污染较轻而土壤干扰较少的情况下,土壤重金属存在向下迁移现象,这与这些土壤中仍然保持土壤水的剖面下渗有关,而城区土壤往往因人为活动或踩踏,土壤水下渗困难.市民广场土壤的深度分布趋势不明显,是因为这些土壤

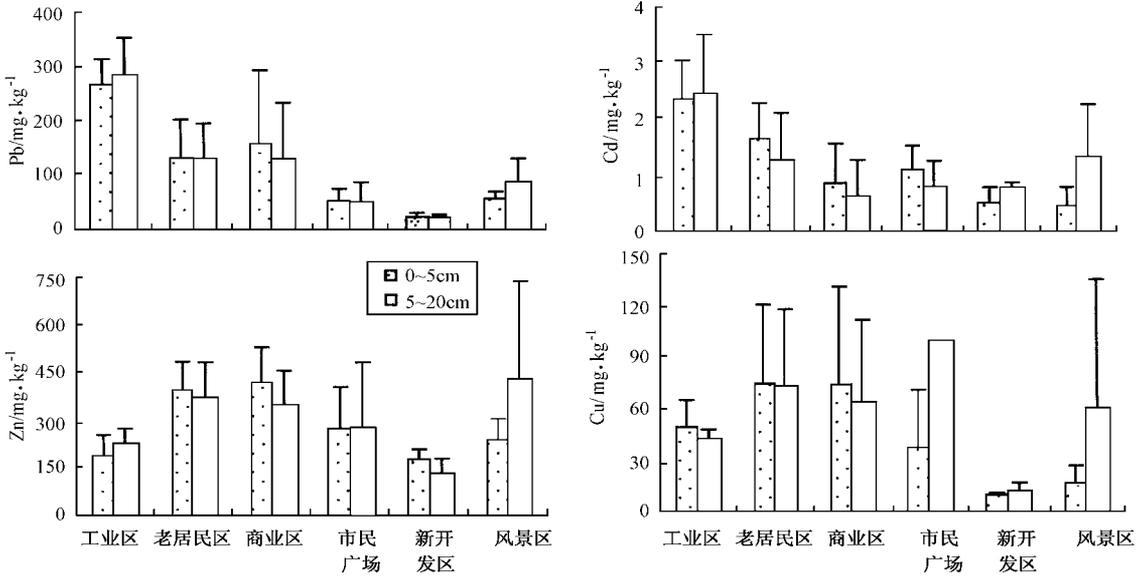


图 2 不同城市功能区土壤重金属全量的深度分布比较

Fig.2 Comparison of total contents of heavy metals determined by soil depth in different functional zones

多为人为搬运而堆叠,层次混乱.

## 3 讨论

### 3.1 城市区域土壤重金属污染

虽然城市土壤的背景值很难确定,但污染积累十分突出.本省工业化程度较高的太湖地区农业土壤中, Cd < 0.1 mg/kg; Pb < 40 mg/kg; Zn < 70 mg/kg; Cu < 40 mg/kg<sup>[17]</sup>.世界卫生组织污泥农用的土壤安全标准是 Cd 4 mg/kg, Pb 84 mg/kg<sup>[18]</sup>.本研究中大多数工业区和城市中心土壤的 4 个重金属元素的浓度甚至超过荷兰制定的污泥农用的限制标准 (Cd 1.25 mg/kg, Cu 75 mg/kg, Zn 300 mg/kg, Pb 225 mg/kg)<sup>[18]</sup>.也就是说,这些城市土壤的污

染程度已接近污泥的水平.工业区、老居民区和部分商业区样本甚至超过我国土壤环境质量标准三级(用于林地和自然植被)标准 (Cd 1 mg/kg, Cu 75 mg/kg, Zn 300 mg/kg 和 Pb 225 mg/kg)<sup>[19]</sup>.因此,矿冶工业区、城市中心区的重金属污染已经远远超出了农业土壤的污染水平,而且城市主要社会活动区的污染最为严重.

### 3.2 城市土壤重金属污染的潜在危害

城市土壤污染对人类健康的危害与农业土壤截然不同.在城市中,土壤污染主要通过扬尘及呼吸道摄取.儿童吮舔(pica behavior)的直接摄取危害居民健康<sup>[20]</sup>.因此,周围土壤的污染物浓度将对长期居住和活动于城区的较固定的

人群(如儿童)产生较大的危害.据美国学者统计表明,城市儿童血 Pb 与城市土壤 Pb 含量呈显著的指数关系( $Pb_{\text{血}} = 18.5 + 7.2 \times Pb_{\text{土}}^{0.4}$ ), Mielke 等(1999)提出了对应城市儿童临界血铅浓度的土壤 Pb 总量为  $80 \text{ mg/kg}^{[21]}$ . 尽管我国目前还没有制定针对城市居民健康的土壤环境标准,但应用 Mielke 的儿童健康标准的土壤 Pb 全量指标,则工业区土壤 Pb 含量全部超标,而老居民区和商业区超标 75% 以上(见图 1). 个别地点(如加油站附近,汽车修理站附近)测到的土壤 Pb 全量竟达到  $700 \text{ mg/kg}$  以上,这些地点对儿童的长期活动是十分危险的.据抽样调查表明(扬子晚报 2002 年 8 月 9 日 B22 版),我国儿童血铅超过国家标准( $100 \mu\text{g/L}$ )者达 3 成,大城市超标率达 60% 以上,而市区普遍高于郊区;上海市城区超标率达 85% 以上.因而,我国城市土壤铅污染可能已经带来严重的儿童健康问题,这必须予以密切注意.

### 3.3 城市土壤污染研究的新问题

城市土壤与农地土壤截然不同,农地土壤重金属污染的主要危害是通过作物对污染物的吸收而对人类的食物安全构成威胁<sup>[22]</sup>. 因此,农地土壤中易水溶解而迁移的形态是重要的环境指标<sup>[23]</sup>. 而本研究中,城市土壤重金属元素污染积累严重,但有效态含量并没有明显地升高,因而基于化学浸提的有效性并不能说明土壤的重金属污染的特征及其环境意义.事实上,除了少量的蔬菜栽培以外,城市土壤重金属的健康危害可能主要通过颗粒态迁移产生<sup>[24]</sup>. 城市的观赏花卉上的重金属尘埃,运动的少年儿童对细微土壤颗粒的粘附以及空气气溶胶吸入一起构成城市居民对污染的土壤重金属的主要接触途径.众多的研究已表明,城市土壤是降尘和空气气溶胶的主要来源之一<sup>[25,26]</sup>,城市蔬菜和花卉中重金属积累也大部分是空气颗粒物沉降的结果<sup>[26]</sup>. Calabresse 等已证明, $< 0.25 \mu\text{m}$  土壤颗粒是城市人群最易接触重金属的土壤颗粒源<sup>[27]</sup>. 对太湖地区水稻土的研究已揭示重金属元素在不同粒径的颗粒中含量明显不同<sup>[28]</sup>. 因此,尽管城市污染区土壤重金属的活性形态

含量较低,但仍可以严重危害人类健康.今后城市土壤的重金属污染研究应该深入到土壤与空气质量(气溶胶,尘埃和降尘)、青少年运动的颗粒接触以及人居环境中呼吸吸入等方面,以揭示城市不同功能活动区土壤重金属的颗粒分布与人类健康的关系,为合理制定城市土壤重金属质量标准,改善和控制城市环境质量提供科学依据.

### 4 结论

南京市城市土壤重金属污染较为严重,但不同功能城区间存在明显差别.污染强度以矿冶工业区最高,其次是城市中心的商业区和老居民区,风景区和新开发区污染较轻,近年新建的市民广场重金属污染不明显.矿冶工业区以高含量、低化学有效性的 Pb、Cd 的同时积累为特征,城市中心区(商业区和老居民区)以 Zn、Pb 的高积累和较多的醋酸盐浸提比例为特征.城市土壤中较强的 Pb 污染可能是儿童血铅超标的主要原因.对于不同区土壤重金属污染与城市人居环境质量的关系有待更深入的工作.

### 参考文献:

- 1 张甘霖. 城市土壤研究的深化和发展——简评首届“城市、工业、交通和矿区土壤”国际会议. 土壤, 2001, (2): 111~112.
- 2 De Kimpe C R, Morel Jean-Louis. Urban soil management: a growing concern. Soil Science, 2001, 65(1): 31~40.
- 3 Markus J A, Mcbratney A B. An urban soil study: Heavy metals in Globe. Australian Journal of Soil Science, 1996, 34:453~465.
- 4 Lottermoser B G. Natural enrichment of top soils with chromium and other heavy metals, Port M Acquire, New South Wales, Australia. Australian Journal of Soil Research, 1997, 35:1165~1176.
- 5 Mielke H W. Lead in the inner cities. American scientist, 1999, 87:62~73.
- 6 Nevin R. How lead exposure relates to temporal changes in IQ, violent violence, and unwed pregnancy. Environment Res. Section A, 2000, 83:1~22.
- 7 马建华,张丽,李亚丽. 开封市城区土壤性质与污染的初步研究. 土壤通报, 1999, 30(2): 93~96.
- 8 管东生,陈玉娟,阮国标. 广州城市及近郊土壤重金属含量特征及人类活动的影响. 中山大学学报(自然科学版), 2001, 40(4): 93~96.

- 9 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤 Pb 的含量及其化学形态. 环境科学学报, 2002, 22(2): 156 ~ 160.
- 10 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 147 ~ 211.
- 11 蒋延惠, 胡霭堂, 秦怀英. 土壤锌、铜、铁、锰形态区分方法的选择. 环境科学学报, 1990, 10(3): 280 ~ 286.
- 12 中国科学院土壤背景协作组. 北京、南京地区土壤中若干元素的自然背景值. 土壤学报, 1979, 16(4): 319 ~ 328.
- 13 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 2 ~ 3.
- 14 陈同斌, 黄敏洪, 黄焕忠等. 香港土壤中重金属含量及其污染现状. 地理学报, 1997, 52(3): 228 ~ 236.
- 15 王耘, 边红枫, 刘静玲. 长春市土壤 Pb 污染及其对策. 中国环境管理, 2000, 3: 32.
- 16 Janssen R P T, Posthuma L, Baerselman R et al. Equilibrium partitioning of heavy metals in Dutch field soils. I. Relationship between metal partition coefficients and soil characteristics. Environmental Toxicology and Chemistry, 1997, 16(12): 2479 ~ 2488.
- 17 李恋卿, 潘根兴, 陈杰民等. 估计太湖地区水稻土表层土壤 10 年尺度的重金属元素积累速率. 环境科学, 2002, 23(3): 119 ~ 123.
- 18 Chang A C, Pan G, Page A L et al. Developing Human Health-related Chemical Guidelines for Reclaimed Water and Sewage Sludge Applications in Agriculture. Division of Water Quality and Sanitary, World Health Organization, Geneva, Switzerland: 2002: 5 ~ 30.
- 19 夏家祺. 中华人民共和国土壤质量标准技术文集. 北京: 环境科学出版社, 1996. 1 ~ 86.
- 20 U. S. Environmental Protection Agency. Drinking Water Standards and Health Advisories. EPA 822-B-00-001, Summer 2000. (<http://www.epa.gov/OST>).
- 21 Mielke H W, Gonzales C R, Smith M K et al. The urban environment and children's Health: Soils as an integrator of lead, zinc, and cadmium in New Orleans, Louisiana, USA. Environmental Research Section A, 1999, 81: 117 ~ 119.
- 22 潘根兴, Chang A C, Page A L. 土壤作物系统污染物迁移分配与食物安全的评价模型及其应用. 应用生态学报, 2002, 13(7): 854 ~ 858.
- 23 Peijnenburg W, Baerselman R, de Groot A et al. Quantification of metal bioavailability for Lettuce (*Lactuca sativa* L.) in field soils. Environment Contamination and Toxicology, 2001, 35: 1463 ~ 1488.
- 24 孙炳彦. 都市土壤中重金属含量对城市大气污染水平的依赖性. 环境科学动态, 1999, 28: 29 ~ 30.
- 25 Sworth S M, Lees J A. The distribution of heavy metals in deposited dusts and sediments from Coventry, England. Environmental geochemistry and health, 1999, 21(2): 97 ~ 115.
- 26 Vousta D, Grimanis A, Samara C. Trace elements in vegetables grown in an industrial area in relation to soil and air particulate matter. Environmental Pollution, 1996, 94(3): 325 ~ 335.
- 27 Calabrese E J, Stanek E J, Barnes R. Methodology to estimate the amount and particle size of soil ingested by children: Implications for exposure assessment at waste sites. Regulatory Toxicology And Pharmacology, 1997, 25(1): 87 ~ 87.
- 28 李恋卿, 潘根兴, 张平究等. 太湖地区水稻土颗粒中重金属元素的分布及其对环境变化的响应. 环境科学学报, 2001, 21(5): 607 ~ 612.