

李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 2010. 不同土地利用方式下北京城区土壤的重金属累积特征[J]. 环境科学学报, 30(11): 2285 - 2293
Li X Y, Chen T B, Lei M, et al. 2010. Accumulation of heavy metals in urban soils under different land uses in Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 30(11): 2285 - 2293

不同土地利用方式下北京城区土壤的重金属累积特征

李晓燕^{1,2}, 陈同斌^{1,*}, 雷梅¹, 郭庆军¹, 宋波¹, 周广东¹, 谢云峰¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101
2. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001

收稿日期: 2010-04-02 修回日期: 2010-05-29 录用日期: 2010-07-13

摘要: 对不同土地利用方式下城市土壤的采样调查表明, 北京市城市土壤 Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量显著高于其相应的土壤背景值, As、Ni 与背景值无显著差异. 在工业、住宅、商贸、交通边缘带(道路)、公园、城市广场和校园 7 种土地利用方式下, 工业区土壤 Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量均居首位, 且 Cu、Pb 和 Zn 含量达到污染等级; 公园土壤的 As 水平最高, 但仍处于清洁水平. As、Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 综合累积程度由高到低的顺序为工业区 > 公园 > 商贸区 ≈ 校园 > 住宅区 ≈ 城市广场 > 交通边缘带. 工业区土壤总体表现为重金属轻度污染; 公园、商贸区、校园和住宅区土壤重金属处于尚清洁水平; 城市广场和交通边缘带土壤重金属处于清洁水平. 不同土地利用方式对城市土壤的重金属含量有一定影响.

关键词: 重金属; 土地利用方式; 城市土壤; 北京市

文章编号: 0253-2468(2010)11-2285-09 中图分类号: X53 文献标识码: A

Accumulation of heavy metals in urban soils under different land uses in Beijing

LI Xiaoyan^{1,2}, CHEN Tongbin^{1,*}, LEI Mei¹, GUO Qingjun¹, SONG Bo¹, ZHOU Guangdong¹, XIE Yunfeng¹

1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101
2. School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001

Received 2 April 2010; received in revised form 29 May 2010; accepted 13 July 2010

Abstract: Soil samples in industrial areas, residential areas, commercial areas, traffic greenbelts, parks, squares and campuses of Beijing were collected to assess the accumulation of heavy metals. The concentration ranges of heavy metals in urban soils were As: 2.98 ~ 28.0; Cd: 0.115 ~ 0.649; Cu: 13.7 ~ 741; Ni: 15.4 ~ 214; Pb: 15.0 ~ 429, and Zn 34.8 ~ 891 mg·kg⁻¹. There were no significant differences in As and Ni concentrations between urban soils and the background in Beijing, while Cd, Cu, Pb, and Zn were higher than the background concentrations in Beijing. The level of heavy metals in soils was affected partly by the usage of soils. The soils in industrial areas had the highest concentrations of Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn, and the pollution indexes of Cu, Pb, and Zn were higher than 1. Soil concentration of As is the highest in parks, while the pollution index of As was lower than 1. The survey revealed that soils in industrial areas were polluted lightly with the composite pollution indexes in the order of industrialized areas > parks > areas > campus > residential areas > squares > traffic greenbelts. The level of heavy metal accumulation in urban soil was relatively light compared with some other cities in China.

Keywords: heavy metal; usage of soil; urban soil; Beijing

1 引言(Introduction)

城市土壤是构成城市生态系统的重要组成部分. 城市化过程中, 现代工业、商业、交通等频繁的人类活动通常会加剧城市土壤中重金属的累积. 城

市土壤中的重金属一般不直接进入食物链, 但是可以通过扬尘和直接接触等途径影响人体健康. 有研究表明上海市大气颗粒物中大约有 31% 来自土壤扬尘(李晓林等, 2004); 长春大气颗粒物中来自土壤的成分占 36.7% (杨郁枝等, 1995). 因此周围土

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(No. KZCX1-YW-06); 中国科学院知识创新工程项目(No. KZCX2-YW-Q02-02); 中国博士后科学基金(No. 20080440212)

Supported by the Knowledge Innovation Project of The Chinese Academy of Sciences(No. KZCX1-YW-06), the Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-Q02-02) and the China Postdoctoral Science Foundation(No. 20080440212)

作者简介: 李晓燕(1966—), 女, E-mail: lxyan21@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: chentb@igsrr.ac.cn

Biography: LI Xiaoyan(1966—), female, E-mail: lxyan21@163.com; * Corresponding author, E-mail: chentb@igsrr.ac.cn

壤中的重金属对长期居住和活动于城市中的居民具有潜在的健康风险(张磊等 2004)。

与农业土壤单纯的种植利用不同,城市土壤因城市的需要,存在诸多的被利用方式,因而土壤物质组成存在较大的时间和空间上的变异性(康玲芬等 2006; 章家恩等,1997)。近年来国内外学者针对城市土壤重金属含量及其分布状况进行了大量的研究(Imperato *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2006; Mielke *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2006; 郭平等, 2005; 陈同斌等,1997),结果表明不同城市不同功能区土壤重金属水平差异各有特点。北京市城市土壤重金属分布状况也有一些研究,公园土壤 Cu、Pb 积累显著(Chen *et al.*, 2005),公路两侧土壤 Pb 受交通污染影响明显(郑袁明等 2005a),但针对北京市整个城区土壤重金属整体水平及不同土地利用方式下城市土壤的重金属累积状况的研究还略显薄弱。北京市城区商业区密集,交通流量大,人口密度高,据统计 2007 年城市公共交通运营车辆 2.05 万辆,出租车运营车辆 6.66 万辆,年末全市民用汽

车保有量达到 277.8 万辆; 2007 年末全市常住人口 1633 万人,每平方公里人口密度为 995 人(<http://www.beijing.gov.cn/default.htm>),而且随着城市建设的发展,虽然不少工矿企业已经外迁,但过去的工业活动留下的场地污染问题,还将在很长一段时间内影响周围的土壤及相关环境介质。因此,为确保北京市城市环境质量,保障人群健康安全,应进一步加大北京市城市土壤重金属累积状况的研究力度,详细研究不同土地利用方式下土壤重金属的累积特征,为城市土壤环境管理和重金属污染防治提供参考依据。

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 样品采集与处理

2008 年 4 月到 6 月,按照工业、住宅、商贸、交通边缘带(道路)、公园、城市广场和校园等土地利用方式对北京市城区土壤进行分类采样和分析。采样范围覆盖北京市 8 大城区,采集土壤为原生土壤或覆盖 2 年以上的客土(图 1)。

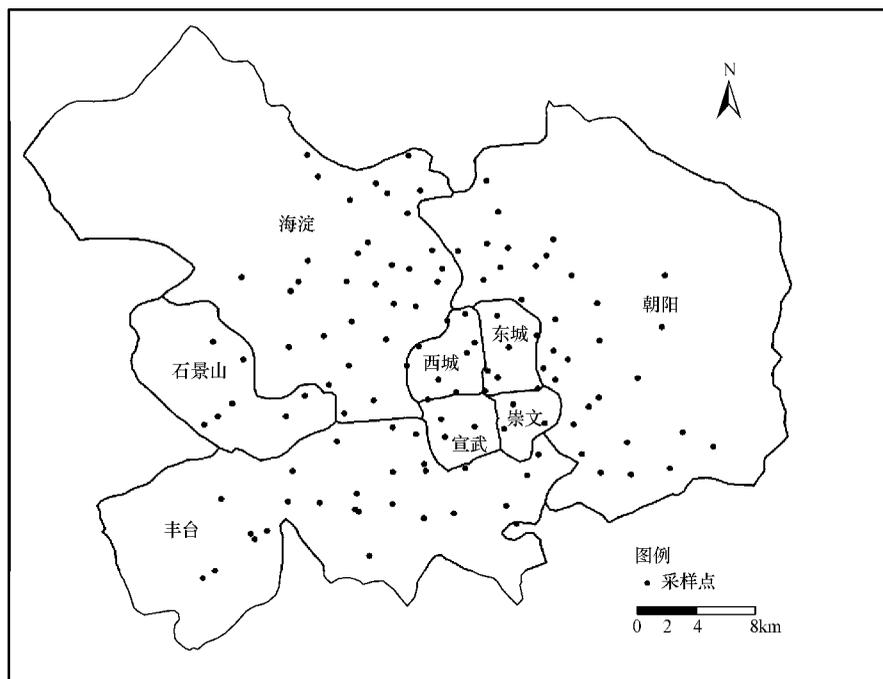


图 1 北京市土壤采样图

Fig. 1 Soil sample sites in Beijing

样品由采样点 5 m × 5 m 的正方形 4 个顶点和中心点共 5 个分点的土壤混合而成,对于某些狭长的地点(如商贸区绿化带)则每隔 5 m 采一个土样,共采集 5 个分样混合而成。采样深度一般为 0 ~ 5 cm,样品重量 1 kg; 土壤样品在室内风干,过 1 mm

尼龙筛,用四分法取部分样品,经玛瑙研磨机处理后过 100 目尼龙筛,备用。

2.2 重金属分析与质量控制

样品先采用三步微波消解(MARS 5,CEM),然后分别使用原子吸收光谱法(Analytic Jena, Vario

6.0) 测定 Cu、Pb、Zn、Ni 浓度; 使用氢化物发生-原子荧光光谱法(北京海光仪器公司, AFS2202) 测定 As 浓度; 使用 ICP-MS (Perkin Elmer SCIEX ELAN DRC-e) 测定 Cd 浓度. 分析过程中插入国家土壤标准参比物质(GSS-4) 进行分析质量控制.

2.3 数据统计分析及计算

数据正态检验采用 SPSS 中 K-S 检验法, 若 $p_{K-S} > 0.05$ 表示样本呈正态分布. 差异显著性分析与相关分析均采用 SPSS 中的参数方法. 统计分析前, 分别对 As、Cd 利用对数转换, 对 Cu、Ni、Pb 和 Zn 进行 Box-Cox 转换, 以确保数据符合正态分布. 用 Minitab 进行数据的 Box-Cox 转换. 土壤重金属 Box-Cox 平均值由 Box-Cox 转换的逆运算而得, 即:

$$Z = \sqrt[\lambda]{y \cdot \lambda + 1} \quad (1)$$

式中, Z 为 Box-Cox 平均值, y 为 Box-Cox 转换后的平均值, λ 为最优转换系数.

符合不同分布形式的重金属含量数据样本, 分别采用不同的均值表征方法. 对于符合正态分布的重金属元素, 采用算术均值表示; 对于符合对数正态分布的重金属元素, 其均值采用几何均值表示; 对于经 Box-Cox 转换后符合正态分布的重金属元素, 则采用 Box-Cox 平均值表征.

为评价土壤重金属污染现状, 以北京市土壤重金属基线值(郑袁明等, 2005b) 为基准, 按下式计算

单项污染指数:

$$P_i = \frac{C_i}{C_j} \quad (2)$$

式中 P_i 为元素单项污染指数, C_i 为不同功能区某元素符合正态分布的平均浓度, C_j 为对应元素北京市土壤基线值. i 表示 6 种重金属(As、Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn) 元素. $P_i > 1$ 表示土壤受到重金属污染.

综合污染指数采用内梅罗指数评价:

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{i\text{平均}}^2 + P_{i\text{最大}}^2}{2}}$$

式中 $P_{i\text{平均}}$ 和 $P_{i\text{最大}}$ 分别是平均单项污染指数和最大单项污染指数. $P_N > 0.7$ 、 $0.7 < P_N < 1$ 和 $P_N > 1$ 分别表示土壤处于清洁、尚清洁和轻度污染状态.

3 结果(Results)

3.1 北京市城市土壤重金属含量

北京市城市土壤 As、Cd 呈对数正态分布, Cu、Ni、Pb 和 Zn 变异较大, 经 Box-Cox 转换后呈正态分布. 与北京市土壤重金属的相关背景值比较, As ($p = 0.288$)、Ni ($p = 0.418$) 与背景值无显著差异; Cd、Cu、Pb 和 Zn 显著高于背景值 ($p = 0.000$), 超过背景值的样本比率分别为 53.6%、86.2%、64.2% 和 85.4% (表 1). 说明北京市城市土壤 Cd、Cu、Pb 和 Zn 存在一定程度的积累.

表 1 不同土地利用方式下北京市城区土壤的重金属分布

Table 1 Heavy metal concentrations of city soil in Beijing

重金属	重金属统计量/(mg·kg ⁻¹)				超过背景值的样本比例
	范围	中值	均值	北京市背景值 (陈同斌等 2004)	
As	2.98 ~ 28.0	7.23	7.25 ^a	7.09	51.2%
Cd	0.115 ~ 0.649	0.206	0.215 ^a	0.199	53.6%
Cu	13.7 ~ 741	24.3	25.1 ^b	18.7	86.2%
Ni	17.7 ~ 297	25.9	25.8 ^b	26.8	42.3%
Pb	15.0 ~ 429	27.5	28.2 ^b	24.6	64.2%
Zn	34.8 ~ 891	74.2	77.2 ^b	57.5	85.4%

注: a. 几何均值; b. 经过 Box-Cox 正态转换后的均值.

3.2 不同土地利用方式下土壤的重金属含量

北京市城市住宅区土壤的 Cu 含量, 工业区土壤的 Cu、Ni 含量, 公园土壤的 As、Pb 含量呈对数正态分布, 其它重金属元素的含量数据符合正态分布.

公园土壤 As 含量最高, 住宅区土壤 As 含量最低, 其中, 公园、校园、商贸区的土壤砷显著高于住宅区; 工业区土壤 Ni 含量最高, 城市广场的土壤 Ni 含量最低, 其中交通边缘带和校园土壤的 Ni 显著高于商贸区、住宅区和城市广场; 公园土壤 Ni 含量显

著高于城市广场; 工业区土壤 Ni 分布离散度较大, 虽然其平均值最高, 但是整体上与其它功能区无显著差异; 对于 Cd、Cu、Pb 和 Zn 4 种金属, 工业区土壤含量最高, 交通边缘带土壤含量最低, 而且工业区土壤 Cd、Cu、Pb 和 Zn 均显著高于商贸区、住宅区和交通边缘带; 另外其它不同功能区之间 Cd、Cu、Pb 和 Zn 部分也存在显著差异(图 2).

总的看来, 在 7 种不同土地利用方式下, 工业区土壤的重金属均值最高, Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 平均含

量均居首位,其超过背景值的样本比率分别为 67%、100%、60%、80% 和 100%。公园土壤仅次于工业区土壤,其中公园土壤 As 含量居 7 种功能区之首,其超过背景值的样本比率为 72%。住宅区、交通

边缘带(道路)、城市广场的土壤重金属含量较低,其中住宅区土壤的 As、Cd、Cu 和 Zn 超过背景值的比例均为最低。

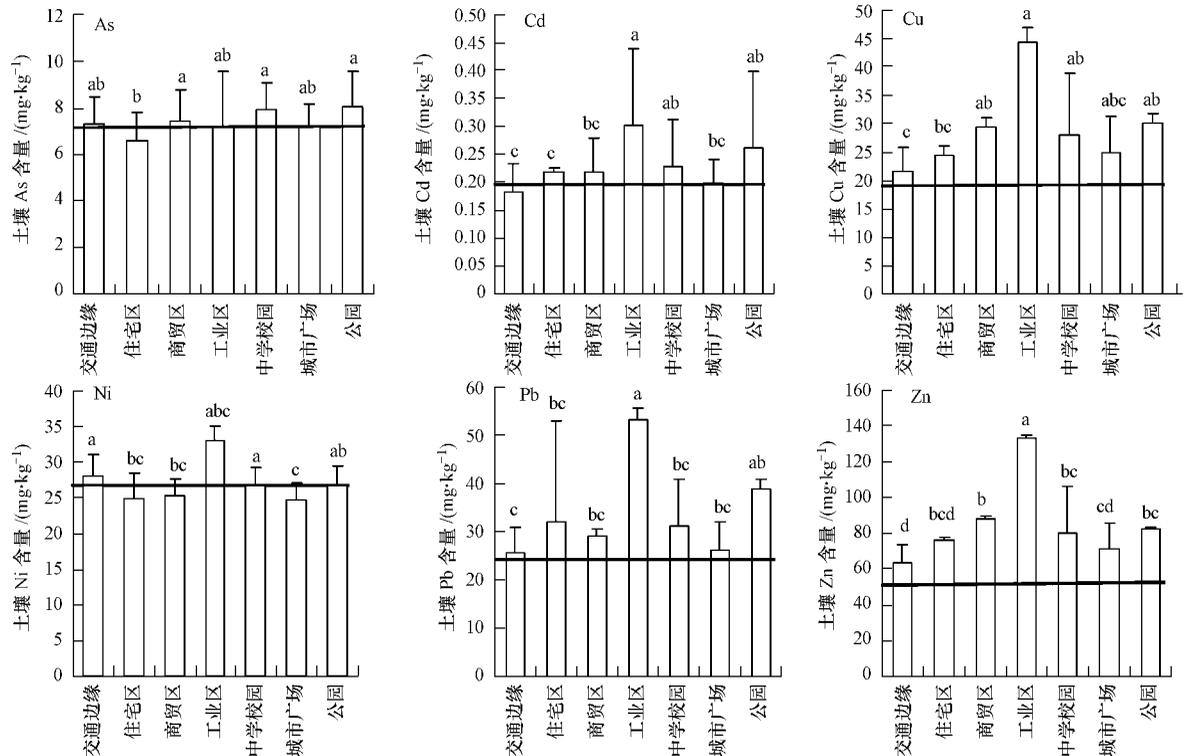


图 2 不同土地利用方式下北京市城市的土壤重金属分布 (注: 未含相同字母表示差异显著; —— 背景值)

Fig. 2 The heavy metal level in different soil types in Beijing

3.3 不同土地利用方式下土壤重金属的累积

总体来看,北京市城区土壤 As、Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 的单项污染指数均小于 1,说明北京市城区土壤的 6 种重金属含量总体处于清洁状态。

不同土地利用方式下,土壤各元素的单项污染

指数显示,工业区 P_{Cu} 、 P_{Pb} 和 P_{Zn} 大于 1,说明工业区土壤 Cu、Pb 和 Zn 已达到污染程度。工业区 As、Cd 和 Ni 以及其它 6 种土地利用方式下土壤中 As、Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的污染指数均小 1(表 2),表明其并未受到明显污染,至今仍属于清洁范围。

表 2 不同土地利用方式下北京市城区土壤的重金属污染指数
Table 2 The pollution index of heavy metal in different soil types in Beijing

土地利用方式	单项污染指数(P_i)						内梅罗指数(P_N)	累积水平
	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn		
交通边缘带	0.51	0.47	0.58	0.59	0.63	0.65	0.63	清洁
住宅区	0.46	0.52	0.66	0.52	0.80	0.78	0.75	尚清洁
商贸区	0.52	0.56	0.79	0.53	0.72	0.91	0.87	尚清洁
工业区	0.50	0.77	1.19	0.69	1.32	1.37	1.62	轻度污染
校园	0.55	0.58	0.75	0.56	0.79	0.79	0.81	尚清洁
城市广场	0.50	0.50	0.67	0.52	0.65	0.74	0.69	清洁
公园	0.56	0.61	0.81	0.56	0.96	0.89	0.95	尚清洁

从采用内梅罗综合累积指数(P_N)评价不同土地利用方式下土壤重金属综合污染状况来看,城区土壤6种重金属的内梅罗指数为0.71,处于尚清洁水平.不同土地利用方式下土壤As、Cd、Cu、Ni、Pb、Zn的内梅罗指数由高到低的顺序为:工业区>公园>商贸区>校园>住宅区>城市广场>交通边缘带,其中工业区土壤显著高于商贸区、校园、住宅区、城市广场和交通边缘带;公园和校园土壤显著高于交通边缘带土壤;商贸区土壤显著高于城市广场和交通边缘带土壤.

4 讨论(Discussion)

4.1 不同土地利用方式对城市土壤重金属含量的影响

国内外针对城市土壤中重金属的累积已经开展了一些工作.研究显示,意大利那不勒斯市城区的大多数表层土壤Cu、Pb和Zn均超过意大利环境部针对公众区、住宅等区域规定的重金属含量限值(Imperato *et al.*, 2003);相对于郊区土壤,苏格兰市亚伯丁城区土壤Cu、Pb、Zn和Ni较为富集,特别是Pb富集明显(Yang *et al.*, 2006);江苏南京市矿冶区Pb、Cd积累严重(吴新民等, 2003);长春市城市土壤Cu、Pb污染,公园土壤列居首位(郭平等, 2005).这些研究在一定程度上显示,在某些城市的确存在土壤重金属累积和污染问题,同时也显示不同土地利用方式下土壤重金属含量存在差异(和莉莉等, 2008; 张孝飞, 2005).

本研究对北京市城市土壤重金属的调查显示,不同土地利用方式下城市土壤重金属累积水平存在较大差异.根据单项累积指数分析,工业活动下土壤中Cu、Pb、Zn存在一定程度的积累,而其它利用类型下土壤重金属水平均处在清洁状态.另外,公园土壤中Cu、Pb、Zn及商贸区Zn的污染指数虽然没有达到污染评判阈值,但都相对较高,特别是公园土壤 P_{pb} 已高达0.96,说明公园和商贸区土壤重金属累积明显.根据内梅罗综合指数,工业区土壤重金属的累积程度最重($P_N > 1$),已达到轻度污染水平;其次为公园土壤($P_N = 0.95$),接近轻度污染警戒线.商贸区、校园及住宅区土壤,尚处于清洁状态;城市广场和交通边缘带土壤属于清洁水平.从6种重金属来看,工业活动对土壤中重金属的累积作用最大,其次是公园和商贸活动.

4.2 不同土地利用方式下土壤重金属分布差异分析

城市土壤的重金属来源是一个较复杂的过程.一些研究对城市土壤重金属来源问题进行了相关探讨:美国新奥尔良含Pb油漆和含Pb汽油的使用,是城市土壤Pb的主要来源(Mielke *et al.*, 1999);我国香港城区土壤Pb平均值超过荷兰土壤标准限值(Lee *et al.*, 2006),其中工业区土壤重金属污染相对较重,汽油燃烧和农业化学物质的投入是香港土壤中Pb污染的重要来源(陈同斌等, 1997).

北京市工业区土壤重金属累积最明显.工业区土壤样点包括首都钢铁集团、新型工业开发区和工厂搬迁遗弃地,工业活动类型主要为金属冶炼与加工.工业废弃物的排放与沉降直接进入土壤,造成土壤重金属累积(和莉莉等, 2008).工业区土壤Cu、Pb、Zn的高值点集中出现在2个机械设备厂的废弃地土壤上.工业区土壤Cu、Pb、Zn的最高值与最小值的比值分别为37.8、13和14,可见工业废弃地土壤重金属污染不容忽视;特别是随着城市发展的需要,大批工矿企业搬离城区,原有场地转为其它建设用途,在开发前应高度关注场地土壤的重金属污染风险和治理修复问题.

7种土地利用方式下,公园土壤As水平最高,超过土壤As背景值的样本达76%,但As与Cd、Cu、Pb和Zn相比,单因子污染指数仍处于较低水平(表2).公园土壤的Cd、Cu、Pb累积程度仅次于工业区土壤.为探究公园土壤重金属来源,本研究对北京城区某大型古老公园的建筑材料(油漆末,瓦片及砖块)的重金属进行了检测.结果发现,油漆中As、Cu和Pb含量很高(表3),最高值分别为北京市土壤背景值的660、164和3743倍,琉璃瓦的Pb含量最高值达到土壤背景值的198倍.因此,公园建筑材料中含有大量重金属可能是导致土壤重金属升高的原因之一.

表3 北京市古老公园中建筑材料的重金属含量

Table 3 The heavy metal levels in building materials of an ancient park of Beijing

材料	重金属含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)		
	As	Cu	Pb
砖块	5.06~6.21	20.8~23.7	17.8~19.8
瓦片	6.04~16.5	36.9~53.7	42.4~4888.0
油漆	23.5~4790	23.5~3069	1540~92087

交通运输是城市土壤重金属的另一个重要来源. 汽车尾气排放、轮胎添加剂中的重金属元素均可影响土壤中 Pb、Zn、Cu 的含量(黄勇等 2005). 本研究组对北京市不同土地利用方式下土壤重金属的前期研究发现, 城区外围公路附近绿化地土壤的 Pb 含量达 $34.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于北京市土壤 Pb 背景值 ($p < 0.05$) (郑表明等 2005a). 但本次调查显示, 交通边缘绿化带重金属水平相对较低, Pb 的几何均值仅 $25.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这可能与本次研究的采样点有关. 本次交通边缘带土壤取自八达岭高速和四环线两旁绿化地. 近年来, 随着城市建设的发展, 城市道路两旁绿化覆盖率明显好转, 树木和草坪对来自机动车排放和大气沉降的重金属进入土壤有一定的阻隔和过滤作用(王济等 2009). 另外, 近年来无 Pb 汽油的使用以及绿化带土壤相对较高频率的扰动也可能是交通边缘带重金属含量偏低的原因之一.

4.3 不同城市城区土壤重金属累积程度比较

比较不同城市土壤重金属数据, 有助于评价城市的土壤重金属水平. 一些研究(Manta *et al.*, 2002; 和莉莉等 2008; 陈华英, 2008) 就不同城市的土壤重金属含量均值及偏差进行比较, 说明部分

城市的土壤重金属研究现状及土壤重金属水平. 城市土壤重金属含量均值比较, 没有考虑城市的土壤元素背景值的差异, 只能单纯反映不同城市土壤重金属含量现状, 不能说明城市土壤元素的累积程度. 由于地质背景、水文、气候等自然环境与城市发展史的不同, 各城市各种化学物质在自然环境中的背景含量存在较大差异(1990), 因此, 通过分析城市土壤元素的累积系数(实测值与背景值的比值)的差异来说明不同城市的土壤重金属水平更为合理.

表4列出了我国部分城市表层土壤重金属相对于当地土壤重金属背景值的累积系数. 各城市间 As 的累积系数相差不大; 北京城区土壤 Cd、Pb 累积系数均低于其它城市; Ni 累积系数高于重庆、广州和福州, 低于长春. 北京市城市土壤 6 种重金属累积系数中, Cu、Zn 的累积系数明显高于其它 4 种重金属. 这说明, 北京市城市土壤 Cu、Zn 的累积程度明显高于其它重金属. 但与其它城市相比, 北京市城市土壤 Cu、Zn 累积系数除略高于重庆外, 均低于其它城市. 总的来说, 北京市城市土壤重金属累积程度在各城市中处于较低水平.

表4 不同城市土壤重金属累积程度比较

Table 4 Comparison of the accumulation of heavy metals in different cities

城市	土层/cm	样本数	土地利用方式	累积系数(实测均值/背景值)						文献
				As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	
长春	0~20	28	开发、工业、耕地、住宅、公园			2.1	3	2.4	1.7	郭平等, 2005
西安	0~15	48	交通道路边缘带、工业、生活、文教	0.95		1.36		2.28	2.29	阴雷鹏等 2006
重庆		48	工业、商业、交通、文教、居民、旅游	1.15	7.00	1.08	0.69	1.39	1.24	李章平等 2006
广州 ^a	0~20	17	路边、公园(校园)			10.6	0.69	2.05	1.39	管东生等, 2001
福州	1~20	163~169		1.12	1.19	1.50	0.67	1.21	1.15	陈华英, 2008
乌鲁木齐		35	公园、工业区、交通密集区、商业区、文教居民区			1.83		3.91	2.63	刘玉燕等, 2006
香港	0~5	10	城区	1.65	1.18	1.61		1.8	1.18	Chen <i>et al.</i> , 1997
北京	0~5	123	工业、住宅、商贸、交通边缘带、公园、广场、校园	1.02	1.08	1.34	0.96	1.15	1.34	本研究

注: 除长春外, 其余数据均为作者根据原文数据计算而得. a. 以文献中林地土壤含量作为背景值计算.

4.4 不同城市相似土地利用方式下土壤重金属累积程度比较

北京市工业区与我国其它城市的工业区相比, 土壤重金属累积程度 As、Cd、Ni 都处于低积累状态; Pb 累积程度大于香港和重庆, 低于长春、西安和乌鲁木齐; Zn 累积程度高于香港、重庆和长春, 低于西安和乌鲁木齐; Cu 的累积程度仅低于香港, 高于表中其它 4 个城市, 虽然土壤 Cu 的绝对含量低于

南京、西安、杭州和乌鲁木齐(表5).

公园土壤是城市土壤重金属研究的热点之一. 上海市对 44 个公园土壤重金属含量调查表明大部分公园土壤存在重金属轻度污染, 7 个公园达到土壤重金属重度污染(史贵涛等, 2006), 深圳市公园土壤 Cd 积累较重, 样本超标率近 30% (史正军等, 2007). 与表 5 中所列的 5 个城市相比, 北京市公园土壤重金属的平均累积程度并不高, Cu 累积仅高于

广州,与上海相当; Pb 和 Zn 均处于最低水平. 与 2001 年对北京市公园土壤的重金属研究结果相比, 本研究中公园土壤的 Zn 和 Ni 没有显著差异, 但 Cu

和 Pb 明显较低(Chen *et al.*, 2005). 与其它城市相比, 北京市城市住宅区的土壤 Cd、Ni 较低, 但是 Cu、Pb 和 Zn 高于乌鲁木齐和西安, 处于中等水平.

表 5 不同城市主要功能区土壤重金属含量的对比

Table 5 Comparison of accumulation of heavy metals in different soil types of different cities

功能区	城市	分析土层 /cm	样本数	累积系数(实测均值/背景值)						文献
				As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	
工矿区	长春	0~20	5			1.71	3.09	2.55	1.45	郭平等, 2005
	西安	0~15	12	0.97		1.96		3.84	4.31	阴雷鹏等, 2006
	重庆			1.25	8.21	1.00	0.70	1.57	1.49	李章平等, 2006
	乌鲁木齐	0~10	9			2.04		4.38	2.76	刘玉燕等, 2006
	香港	0~5		1.83	1.64	2.61		1.75	1.26	Chen <i>et al.</i> , 1997
	北京	0~5	15	1.02	1.52	2.37	1.12	2.16	2.31	本研究
公园	长春	0~20	7			2.84	3.21	3.18	2.15	郭平等, 2005
	广州	0~20	8			1.30	1.00	1.64	2.92	管东生等, 2001
	上海	0~5	44			1.57		2.17	2.30	史贵涛等, 2006
	乌鲁木齐	0~2	6			1.74		2.46	2.27	刘玉燕等, 2006
	深圳	0~20	25		7.42	0.94		1.64	0.90	史正军等, 2007
	北京	0~5	30			3.20	0.83	2.30	1.43	Chen <i>et al.</i> , 2005
	北京	0~5	18	1.10	1.31	1.6	0.92	1.60	1.40	本研究
	住宅区	长春	0~20	7			1.82	2.40	1.95	2.26
西安	0~15	12	0.89		1.12		1.32	1.25	阴雷鹏等, 2006	
重庆			1.38	8.57	1.70	0.90	1.67	1.45	李章平等, 2006	
杭州	0~10	50		21.17	1.71	1.02	1.59	1.97	章明奎等, 2005	
乌鲁木齐		8			1.00		1.05	0.73	刘玉燕等, 2006	
北京	0~5	21	0.93	1.10	1.31	0.84	1.31	1.32	本研究	

住宅区土壤重金属水平的高低直接影响到人群健康. 北京市城区住宅区土壤重金属含量与其它城市相比, As、Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 都处于较低水平.

5 结论(Conclusions)

北京市城市土壤 As、Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量范围在 2.98~28.0、0.115~0.649、13.7~741、15.4~214、15.0~429、34.8~891 mg·kg⁻¹. 北京市城区土壤的 Cd、Cu、Pb 和 Zn 显著高于北京市土壤背景值, 但 As、Ni 与背景值无显著差异. 工业区土壤重金属含量相对较高, Cu、Pb、Zn 已达到污染等级, 总体表现为轻度污染; 公园、商贸区、校园和住宅区土壤重金属处于尚清洁水平; 公园土壤 As 含量最高, 但仍处于清洁水平; 城市广场和交通边缘带土壤重金属处于清洁水平. 过去使用含大量重金属的建筑材料, 可能是导致公园土壤重金属含量升高的原因之一.

责任作者简介: 陈同斌(1963—), 男, 研究员、博士生导师, 主要从事区域土壤环境质量、土壤环境修复和废弃物资源化工程研究.

参考文献(References):

- 陈华英. 2008. 福州城市土壤中铜等 13 种元素的分布特征 [J]. 福建地质 27(2): 211—218
- Chen H Y. 2008. The distributional characteristics of Cu and else 13 kinds of elements in city soil of Fuzhou [J]. Geology of Fujian, 27(2): 211—218 (in Chinese)
- Chen T B, Wong J W C, Zhou H Y, *et al.* 1997. Assessment of trace metal distribution and contamination in surface soils of Hong Kong [J]. Environmental Pollution, 96(1): 61—68
- 陈同斌, 黄铭洪, 黄焕忠, 等. 1997. 香港土壤中的重金属含量及其污染现状 [J]. 地理学报, 52(3): 228—236
- Chen T B, Wong M H, Wong J W C, *et al.* 1997. A study on heavy metal pollution in soils in Hong Kong [J]. Acta Geographica Sinica, 52(3): 228—236 (in Chinese)
- 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 2004. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究 [J]. 环境科学 25(1): 117—122
- Chen T B, Zheng Y M, Chen H, *et al.* 2004. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing [J]. Environmental Science 25(1):

- 117—122(in Chinese)
- Chen T B ,Zheng Y M ,Lei M , *et al.* 2005. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing , China [J]. *Chemosphere* 60(4) : 542—551
- 管东生,陈玉娟,阮国标. 2001. 广州城市及近郊土壤重金属含量特征及人类活动的影响 [J]. *中山大学学报(自然科学版)* ,(4) : 93—97; 101
- Guan D S , Chen Y J , Ruan G B. 2001. Study on heavy metal concentrations and the impact of human activity on them in urban and suburb soils of Guangzhou [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* ,(4) : 93—97; 101(in Chinese)
- 郭平,谢忠雷,李军,等. 2005. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价 [J]. *地理科学* ,25(1) : 108—112
- Guo P ,Xie Z L ,Li J , *et al.* 2005. Specificity of heavy metal pollution and the ecological hazard in urban soils of Changchun City [J]. *Scientia Geographica Sinica* ,25(1) : 108—112(in Chinese)
- 国家环境保护局. 1990. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社. 329—482
- The National Environmental Protection Agency. 1990. Background Value of Soil Elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 329—482(in Chinese)
- 和莉莉,李冬梅,吴钢. 2008. 我国城市土壤重金属污染研究现状和展望 [J]. *土壤通报* 39(5) : 1210—1216
- He L L ,Li D M ,Wu G. 2008. Heavy metal contamination of urban soils in China: State and prospect [J]. *Chinese Journal of Soil Science* ,39(5) : 1210—1216(in Chinese)
- 黄勇,郭庆荣,任海,等. 2005. 城市土壤重金属污染研究综述 [J]. *热带地理* ,25(1) : 14—18
- Huang Y ,Guo Q R ,Ren H , *et al.* 2005. A review of the study on heavy metal pollution in urban soils [J]. *Tropical Geography* ,25(1) : 14—18(in Chinese)
- Imperato M , Adamo P , Naimo D , *et al.* 2003. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy) [J]. *Environmental Pollution* ,124(2) : 247—256
- Kang L F ,Li F R ,Hua W , *et al.* 2006. The effects of different land-use types on quality of urban soils [J]. *Ecologic Science* 25(1) : 59—63(in Chinese)
- Lee Celine S L ,Li X D ,Shi W Z , *et al.* 2006. Metal contamination in urban , suburban , and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics [J]. *Science of The Total Environment* ,356(1-3) : 45—61
- 李晓林,朱节清,郭盘林,等. 2004. 基于扫描核探针技术的大气气溶胶单颗粒物源识别与解析方法研究与应用 [J]. *核技术* ,27(1) : 27—34
- Li X L ,Zhu J Q ,Guo P L , *et al.* 2004. The source identification and apportionment of aerosol particles in the atmosphere by scanning nuclear microprobes [J]. *Nuclear Techniques* ,27(1) : 27—34(in Chinese)
- 李章平,陈玉成,杨学春,等. 2006. 重庆市主城区土壤重金属的潜在生态危害评价 [J]. *西南农业大学学报* ,28(2) : 227—230; 251
- Li Z P ,Chen Y C ,Yang X C , *et al.* 2006. Assessment of potential ecological hazard of heavy metals in urban soils in Chongqing City [J]. *Journal of Southwest Agricultural University(Natural Science)* ,28(2) : 227—230; 251(in Chinese)
- 刘玉燕,刘敏,刘浩峰. 2006. 乌鲁木齐城市土壤中重金属分布 [J]. *干旱区地理* ,29(1) : 120—123
- Liu Y Y ,Liu M ,Liu H F. 2006. Distribution of heavy metal in urban soil of Urumqi City [J]. *Arid Land Geography* ,29(1) : 120—123(in Chinese)
- Mielke H W , Gonzales C R , Smith M K , *et al.* 1999. The urban environment and children's health: soils as an integrator of lead , zinc , and cadmium in New Orleans , Louisiana , U. S. A [J]. *Environmental Research* ,81(2) : 117—129
- Mielke H W ,Wang G D ,Gonzales C R , *et al.* 2004. PAHs and metals in the soils of inner-city and suburban New Orleans , Louisiana , USA [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology Risk Assessment of Chemical Mixtures* ,ICCM-2002 Symposium ,18(3) : 243—247
- Salvagio D M , Angelone M , Bellanca A , *et al.* 2002. Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Palermo (Sicily) , Italy [J]. *The Science of The Total Environment* ,300(1-3) : 229—243
- 史贵涛,陈振楼,许世远,等. 2006. 上海市区公园土壤重金属含量及其污染评价 [J]. *土壤通报* 37(3) : 490—494
- Shi G T ,Chen Z L ,Xu S Y , *et al.* 2006. Heavy metal concentrations of soils in Shanghai urban parks and their assessment [J]. *Chinese Journal of Soil Science* ,37(3) : 490—494(in Chinese)
- 史正军,吴冲,卢瑛. 2007. 深圳市主要公园及道路绿地土壤重金属含量状况比较研究 [J]. *土壤通报* ,38(1) : 133—136
- Shi Z J ,Wu C ,Lu Y. 2007. Comparative study on soil heavy metal content of urban green ground near parks and roads in Shenzhen City [J]. *Chinese Journal of Soil Science* ,38(1) : 133—136(in Chinese)
- 王济,张浩,曾希柏,等. 2009. 贵阳市城区路侧土壤重金属分布特征及污染评价 [J]. *环境科学研究* ,22(8) : 950—955
- Wang J ,Zhang H ,Zeng X B , *et al.* 2009. Distribution and pollution assessment of heavy metals in roadside soils of Guiyang City , China [J]. *Research of Environmental Sciences* ,22(8) : 950—955(in Chinese)
- 吴新民,李恋卿,潘根兴,等. 2003. 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 [J]. *环境科学* ,24(3) : 105—111
- Wu X M ,Li L Q ,Pan G X , *et al.* 2003. Soil pollution of Cu ,Zn ,Pb and Cd in different city zones of Nanjing [J]. *Environmental Science* ,24(3) : 105—111(in Chinese)
- Yang Y G ,Campbell C D ,Clark L , *et al.* 2006. Microbial indicators of heavy metal contamination in urban and rural soils [J]. *Chemosphere* ,63(11) : 1942—1952
- 杨郁枝,李琳. 1995. 长春大气颗粒物污染来源的鉴别 [J]. *中国环境监测* ,11(2) : 36—38
- Yang Y Z ,Li L. 1995. Distinction of the source of grains polluted in air of Changchun city [J]. *Environmental Monitoring in China* ,11(2) : 36—38(in Chinese)
- 阴雷鹏,赵景波. 2006. 西安市主要功能区表层土壤重金属污染现状评价 [J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)* ,34(3) : 109—112
- Yin L P ,Zhao J B. 2006. Study on survey and evaluation of heavy metal

- pollution of surface soil in main suburbs of Xi'an City[J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science Edition) ,34(3) : 109—112(in Chinese)
- 章家恩,徐琪. 1997. 城市土壤的形成特征及其保护 [J]. 土壤, 29(4) : 189—193
- Zhang J E, Xu Q. 1997. The characteristics and its protections of the urban soils[J]. Soils, 29(4) : 189—193(in Chinese)
- 张磊,宋凤斌,王晓波. 2004. 中国城市土壤重金属污染研究现状及对策 [J]. 生态环境 13(2) : 258—260
- Zhang L, Song F B, Wang X B. 2004. Heavy metal contamination of urban soils in China: status and countermeasures [J]. Ecology and Environment, 13(2) : 258—260(in Chinese)
- 章明奎,符娟林,黄昌勇. 2005. 杭州市居民区土壤重金属的化学特性及其与酸缓冲性的关系 [J]. 土壤学报, 42(1) : 44—51
- Zhang M K, Fu J L, Huang C Y. 2005. Chemical characteristics of heavy metals and their relationships with acid buffer capacity of soils in residential sites In Hangzhou City, Zhejiang Province [J]. Acta Pedologica Sinica Cchemical Charac, 42(1) : 44—51(in Chinese)
- 张孝飞,林玉锁,俞飞,等. 2005. 城市典型工业区土壤重金属污染状况研究 [J]. 长江流域资源与环境, 14(4) : 512—515
- Zhang X F, Lin Y S, Yu F *et al.* 2005. Pollution of heavy metals in urban soils of typical industrial and surrounding residential area in Nanjing City [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 14(4) : 512—515(in Chinese)
- 郑袁明,陈同斌,陈煌,等. 2005a. 北京市不同土地利用方式下土壤铅的积累 [J]. 地理学报, 60(5) : 791—797
- Zheng Y M, Chen T B, Chen H, *et al.* 2005a. Lead accumulation in soils under different land use types in Beijing City [J]. Acta Geographica Sinica, 60(5) : 791—797(in Chinese)
- 郑袁明,陈同斌,郑国砥,等. 2005b. 不同土地利用方式对土壤铜积累的影响——以北京市为例 [J]. 自然资源学报 20(5) : 690—696
- Zheng Y M, Chen T B, Zheng G D, *et al.* 2005. Soil copper accumulation under different land use types—the case of Beijing [J]. Journal of Natural Resources, 20(5) : 690—696(in Chinese)