

深圳市农林土壤重金属累积现状及风险评价研究

郑茂坤^{1,*}, 谢婧², 王仰麟^{1,2}, 吴健生^{1,2}, 李俊杰², 彭建¹

1. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871
2. 北京大学深圳研究院, 深圳 518055

摘要:为探讨深圳市农林土壤重金属的污染现状,系统采集了深圳市菜地、果园、林地和荒地 4 种土地利用的 52 个土壤样品,测定了 Cu、Pb、Cd、Zn、Cr、Ni 6 种重金属的全量,对深圳市农林土壤重金属 20 余年来的累积状况进行了分析并进行了初步的风险评价。结果发现,深圳农林土壤均存在不同程度的重金属累积,总体而言,Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 的累积较轻,Zn 的最大含量尚未超过其 80 年代末背景值的最大值;Cd 的累积最为严重,其最大含量已为背景最大值的 16 倍。以 GB15618-1995 为标准,对深圳农林土壤的重金属风险进行评价后发现,Cu 的污染最轻,仅 20% 的菜地土壤超过国家一级标准,Pb 50% 超过国家一级标准,但尚未超过二级标准;Zn、Cr 和 Ni 均有一定比例的样点超过二级标准,最少 4%,最高 50%,但未有超过三级标准的样点;Cd 的风险最大,不仅有大量超过一、二级标准的样点,而且超过三级标准的样点也占有一定的比例(菜地、果园、林地和荒地土壤中 Cd 含量超过三级标准的比例分别为 10%、23%、29% 和 50%)。深圳农林土壤中的 Cd 污染应该引起相关部门的重视。

关键词: 重金属;农业土壤;林业土壤;深圳市

文章编号: 1673-5897(2009)5-726-08 中图分类号: X53 文献标识码: A

Heavy Metal Accumulation Characters and Risk Assessment in the Soil of Agriculture and Forest of Shenzhen Area

ZHENG Mao-kun^{1,*}, XIE Jing², WANG Yang-lin^{1,2}, WU Jian-sheng^{1,2}, LI Jun-jie², PENG Jian¹

1. College of Urban and Environment Sciences, Peking University, Beijing 100871
2. Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055

Received 5 May 2009 accepted 26 June 2009

Abstract: In order to explore the pollution situation in Shenzhen agriculture and forest soils, fifty-two soil samples in vegetable land, fruit land, woodland and barren land in Shenzhen were collected and the concentrations of copper, lead, cadmium, zinc, chromium, and nickel were determined. Results showed that the six heavy metals have a degree of accumulation in vegetable land, fruit land, woodland, and barren land. In general, the accumulation of copper, lead, zinc, chromium, and nickel is relative light, and the accumulation of cadmium is relative serious. The maximum concentration of zinc is lower than the maximum of Shenzhen zinc background concentration of the late 1980s. The maximum of cadmium is 16 times of the maximum background concentration. Based on the soil environmental criterion of Chinese (GB15618-1995), we assessed the risk of the former six heavy metals in soil. Results showed that the accumulation of copper is lightest. In only 20% sample sites of vegetable soil, copper concentrations exceed the criterion I. In at least 50% sample sites of all the four soils, lead concentrations exceed the criterion I and no sample site exceeds the criterion II. There are different proportions of sample sites in which zinc, chromium, and nickel concentrations exceed criterion II and no sample site exceeds criterion III. The minimum and maximum sample proportion of surpass criterion II are 4% and 50%, respectively. The risk of cadmium is highest among the six heavy metals in Shenzhen soil. In 10%、23%、29% and 50% sample sites of vegetable land, fruit land, woodland and barren land, respectively, cadmium concentrations exceed the criterion III.

Keywords: heavy metal; agriculture soil; forest soil; Shenzhen

收稿日期: 2009-05-05 录用日期: 2009-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40635028)

作者简介: 郑茂坤 (1978—), 男, 博士后; * 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: mkzheng@pku.edu.cn

1 引言(Introduction)

土壤重金属污染是目前环境科学领域关注的热点问题之一(Christidis *et al.*, 2007; Garca-Sanchez *et al.*, 1999; Kumar Sharma *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2008; Mari and Morgan, 1999; Pérez-Sirvent *et al.*, 2007; Rule, 1999; Yong *et al.*, 2001; 王玲梅等, 2009; 刘禹等, 2009; 赵金璇等, 2009)。目前有关我国重点城市地区土壤重金属污染调查工作已全面展开。深圳是我国经济发展最快的地区之一, 随着工农业的快速发展, 深圳地区土壤重金属污染日益加剧(史正军等, 2006; 2007; 卢瑛等, 2009; 唐淑军等, 2007), 全面了解其土壤重金属污染现状具有重要的现实意义。目前该地区土壤重金属的研究工作已经展开, 但主要围绕水库周边(宁建凤等, 2007)、小片菜地(刘英对和王峰, 1999; 唐淑军等, 2007)、小面积地域(陈桂葵和陈桂珠, 2005; 史正军等, 2006; 2007; 卢瑛等, 2009)、红树林(郑文教等, 1996a; 1996b; 章金鸿等, 2000; 咎启杰等, 2002; 林初夏等, 2004)和垃圾填埋场(廖利等, 1999)等面积较小的区域展开, 尚未有对全市尺度的现状和风险开展研究。Tao (1990; 1995a; 1995b; 1998)曾对深圳市土壤重金属元素 Cu、Pb、Hg 等进行了测定、分析和表征, 但近 10 年来没有对深圳全市区域的土壤农业、林业及荒地土壤重金属进行研究, 亟需新的研究工作以确认近 20 年来深圳土壤重金属的变化及其风险情况。一般而言, 对土壤重金属的研究大都经历吸附-解吸规律研究(Garca-Sanchez *et al.*, 1999; Rule, 1999; Yong *et al.*, 2001)、污染状况调查(Kumar Sharma *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2008)、毒性测试试验(Mari *et al.*, 1999)及污染评估和污染场地的修复(Christidis *et al.*, 2007; Pérez-Sirvent *et al.*, 2007)等几个阶段。对深圳市土壤重金属的研究也应遵循面上调查评估、重点区加密采样确认风险区、高风险区的风险评估和修复等几个步骤。本文以深圳林地、菜地、果园和荒地 of 研究对象, 探讨了深圳土壤重金属的污染现状和积累规律, 并对土壤重金属累积的风险进行了初步评价, 以期对评估深圳土壤重金属对当地人体健康和生态的影响提供基础依据。

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 研究区概况

深圳市是中国南部的海滨城市, 毗邻香港。东经 $113^{\circ}46'$ 至 $114^{\circ}37'$, 北纬 $22^{\circ}27'$ 至 $22^{\circ}52'$ 。深圳市土地总面积为 1952.84km^2 , 其中经济特区 391.17km^2 , 市内河流纵横, 工业发达, 2008 年工业产值达 3618.32 亿元, 工业集中在工业园区内且同种工业多数集中在同一园区内, 污染物排放比较集中。深圳日排放污水 55 万吨, 虽然工业废水的排放达标率达 97.2%, 但每天仍然有 1.54 万吨未经处理的污水排入深圳的河网。深圳市地势东南高、西北低, 地貌类型多样, 其中丘陵面积最大, 平原次之。从上世纪 80 年代中期到本世纪中期 20 年左右的时间, 深圳迅速完成了从传统的农业地区向新兴的高度城市化地区的转化, 快速的工业化致使深圳农用地面积急剧减少, 农用地周边的化工厂、制药厂等排放的废液、废气分别通过灌溉和大气沉降等在土壤中积累。

2.2 样品采集

土壤样品于 2009 年 3 月采集。以 $8\text{km}\times 8\text{km}$ 的网格, 分菜地、果园、林地和荒地 4 种土地利用方式, 采集土壤样品 52 个, 如图 1 所示, 龙岗区 35 个, 宝安区 14 个, 南山区、福田区和罗湖区各 1 个; 菜地 12 个, 果园 23 个, 林地 15 个, 荒地 2 个。样品选取 $100\text{m}\times 100\text{m}$ 的正方形地块, 采用“之”字型采样法采集 5 个点, 每个点采集约 1kg 土壤, 然后混合成一个样品。每个采样点的经纬度均用 GPS 精确定位给出, 并详细记录样点周围的环境。采集的样品风干, 过 100 目土壤筛以备测量。

2.3 测定项目与方法

土壤重金属含量均在中国科学院南京土壤研究所土壤污染与修复重点实验室测定。Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 采用 $\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮, 原子吸收分光光度法测定; Cd 采用 $\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮, 石墨炉原子吸收分光光度法(Varian SpectrAA220FS)测定。为保证分析结果的可靠性, 分析过程中均以国家标准物质土壤标准参考样(GSS 系列)作内标。

2.4 风险评价方法

将土壤重金属含量与国家土壤环境质量标准

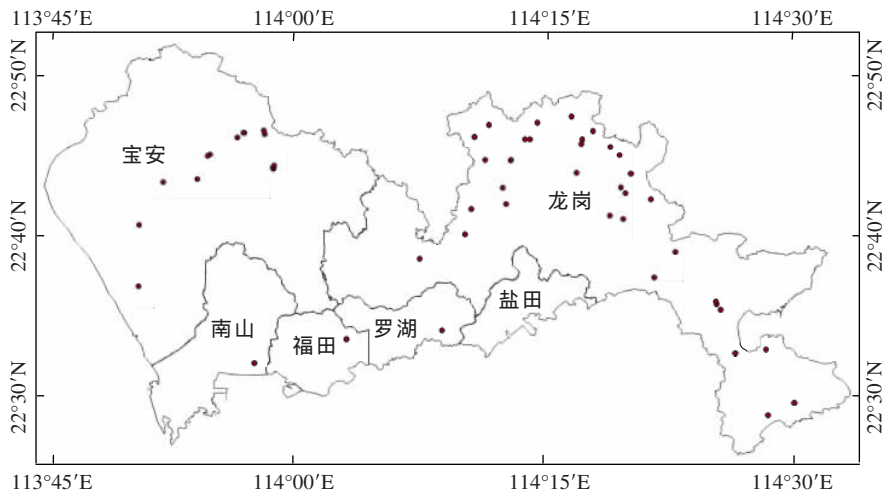


图 1 土壤样点分布
Fig.1 Map of soil sampling sites

(GB15618-1995)(国家环境保护局,1995)进行比较,以超过标准的样点数占总样点数的百分比作为风险评价指标,比例越高风险越大(洪春来等,2009;孙丽等,2008)。

2.5 统计方法

图件资料采用最新的深圳市行政区划图;图件在 ArcGIS 软件环境下矢量化;描述性统计分析和频率分布图分别采用 SPSS 13.0 软件的 Analyze 模块中 Descriptive Statistics 项中的 Descriptive 功能和 Frequencies 功能完成;空间三维分布图采用 S-PLUS 2000 的 Graph 模块中的 3D Plot 功能来实现。为了使表达效果更为清楚,在不破坏浓度高低顺序的情况下将过高含量适当减少,而将过低含量适当增加,将得到的含量称为相对含量,空间三维分布图采用相对含量进行表达。

3 结果与分析(Results and analysis)

3.1 深圳市农林土壤重金属含量的描述性统计

深圳市农林土壤重金属含量如表 1 所示。由表 1 可见,Cu、Pb、Cd、Zn、Cr 和 Ni 6 种重金属在深圳农林土壤中均有一定程度的累积。Cd 的累积最为严重,从平均值上看,与 80 年代末背景值(Tao, 1990)相比,Cd 含量已增加 31 倍;从最大值来看,Cd 含量已增加 16 倍;且 5%~95%的样点含量均高于相应的背景值,说明 Cd 在农林土壤中累积严重。史正军等(2007)研究表明,深圳绿地土壤中 Cd 的最高含量达到 1.81mg·kg⁻¹,为 80 年代末背景值最大含量的 5.04 倍,与本研究结果一致。

唐淑军等(2007)发现宝安区主要荔枝、龙眼生产基地土壤中 Cd 的最高含量为 0.16mg·kg⁻¹,低于该地区背景值的最大含量,而本次测量的宝安区荔科技园 Cd 最高含量为 0.24mg·kg⁻¹,亦低于背景值的最大含量,与文献中报道一致。

深圳农林土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 的平均含量分别为 21.64、60.66、78.54、58.45 和 15.72mg·kg⁻¹,分别为其背景值 10.80、38.90、59.00、27.80 和 10.60mg·kg⁻¹ 的 2 倍、1.56 倍、1.33 倍、2.10 倍和 1.48 倍,累积相对较轻,其中 Zn 的最大含量尚未超过其背景值的最大含量。表 1 的频度分析表明,90%的 Cu、Pb、Cd、Zn、Cr 和 Ni 在土壤中的含量分别集中在 5.04~34.91mg·kg⁻¹、16.38~96.81mg·kg⁻¹、0.000~2.512mg·kg⁻¹、11.27~135.7mg·kg⁻¹、1.15~128.0mg·kg⁻¹ 和 0.00~32.95mg·kg⁻¹,另外 10%的样品则分别集中在 34.91~67.79mg·kg⁻¹、96.81~206.3mg·kg⁻¹、2.512~6.025mg·kg⁻¹、135.7~313.2mg·kg⁻¹、128.0~181.5mg·kg⁻¹ 和 32.95~49.89mg·kg⁻¹,表明 6 种重金属在区域土壤中虽有一定的累积,但仅有少部分累积严重。

为了更为准确地探索深圳农林土壤中 6 种重金属的累积规律,采用 SPSS 软件,在重金属的全浓度范围内分 13 段做了频度分布柱状图并同时做了正态分布密度曲线,具体见图 2。图 2 中的 6 种重金属均表现为低浓度段频度高,高浓度区频度低的特点。Cu、Pb、Cd、Zn、Cr 和 Ni 浓度众数区分别集中在 9.87~14.70mg·kg⁻¹、45.60~60.21mg·kg⁻¹、0.000~0.463mg·kg⁻¹、1.15~15.02mg·kg⁻¹ 和 7.68~11.52mg·kg⁻¹,这进一步说明了在区域上 6 种重金

属有一定累积但累积严重处仅占少部分。

从表 1 的变异系数上分析 ,Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 等 5 种重金属的值均小于其对应的背景变异系数 ,而 Cd 不同 ,其变异系数(173%)明显大于对应背景值的变异系数值(106%) ,这可能与污染源处于背景值较低的位置有关 ,Cd 因产业结构等的原因 ,存在较多的污染源 ,因此变异系数较大. 图 2

的频度图及表 1 中的偏度系数和峰度系数表明 Cu、Pb 和 Zn 的土壤样点浓度分布符合正态曲线 ,而 Cd、Cr 和 Ni 的样点浓度分布属于偏态的正态分布 ,说明在区域尺度上前 3 种重金属总体受地质因素的影响较为明显受人为活动的影响较不强烈 ,而后 3 种重金属已有少部分区域受人类活动的影响强烈.

表 1 深圳农林土壤重金属浓度的描述性统计

Table 1 Description statistics of heavy metal concentration in Shenzhen agriculture and forest soils

重金属	平均值 ^{a)} /(mg·kg ⁻¹)	变异 系数	偏度 系数	峰度 系数	最小值	5%百分	10%百分	25%百分	50%百分	75%百分	90%百分	95%百分	最大值
						位数	位数	位数	位数	位数	位数	位数	
----- mg·kg ⁻¹ -----													
Cu	21.64	59	1.4	2.69	5.04	6.74	8	12.44	18.41	29.44	34.91	45.82	67.79
Cu ^{b)}	10.8	99	2.37	6.62	2.1	2.6	2.8	3.9	6.9	13.6	25.2	38.4	61.5
Pb	60.66	55	1.86	5.9	16.38	21.94	26.11	37.79	51.58	76.55	96.81	111.9	206.3
Pb ^{b)}	38.9	72	2.37	10.37	3.4	8.2	11.3	20.7	33.6	52.6	67.3	92.1	193
Cd	2.12	173	2.14	7.79	0	0	0.001	0.029	0.169	0.764	2.512	3.391	6.025
Cd ^{b)}	0.067	106	2.34	6.15	0.006	0.011	0.014	0.022	0.04	0.089	0.165	0.2	0.359
Zn	78.54	65	2.56	7.27	11.27	21.91	28.96	41.12	70.88	102.6	135.7	155	313.2
Zn ^{b)}	59	93	2.71	11.18	8.5	13	14.3	24	39.1	79	128.4	160.2	366
Cr	58.45	79	0.95	0.34	1.15	3.32	8.88	22.05	52.13	82.76	128	145.4	181.5
Cr ^{b)}	27.8	94	1.29	0.57	5	5.3	6.7	8.7	15.6	41.9	73	82.2	105.8
Ni	15.72	76	1.03	0.56	0	2.48	3.32	6.55	12.31	22.49	32.95	39.76	49.89
Ni ^{b)}	10.6	94	2.37	5.45	2.1	2.7	3.3	4.9	7.2	11.9	20.3	40.3	47.9

注 : a): 4 种土地利用平均值 b): 80 年代末的背景值(mg·kg⁻¹)(Tao, 1990)

3.2 深圳市农林土壤重金属浓度的空间分布表征

为了更为清晰地反映深圳土壤 6 种重金属的累积分布情况 ,对所获浓度结果用 S-PLUS 软件在空间上进行了表征(图 3). 图 3 显示 ,土壤 Cu 表现为中部高、四边低的趋势 ,与 Cu 的背景分布四边偏高而中部偏低趋势(Tao, 1995a)相反 ,表明 Cu 在深圳农林土壤中的含量已经受到人为活动的一定影响而出现了累积 ,累积主要集中在中部. Pb 的累积表现为局部异常累积的状况 ,东北角 Pb 呈高度累积的状态 ,这可能与近年来东北角的比亚迪电动汽车的含铅蓄电池的生产有关. Cd 和 Zn 在土壤中表现为四周高、中间低的趋势 ,累积主要集中在深圳四周龙岗、宝安地区 ,也与其相应的背景值分布差别较大(Tao, 1990) ,这可能与近年来当地产业结构的构成变化有关 ,人为活动的影响目前已大于地质因素的差异. Cr 和 Ni 在农林土壤中的分布与其背景分布(Tao, 1990)基本一致 ,表明人为活动的影响强度尚未从根本上改变土壤母

质等因素所造成的土壤微量元素的空间差异.

3.3 深圳土壤重金属累积的风险评价

为了更加深入地了解深圳土壤重金属的污染情况 ,对深圳土壤重金属的风险进行了初步评价. 本次评价采用 GB15618-1995 标准进行. 依照该标准 ,为保护区域自然生态 ,维持自然背景的土壤环境质量的限制值设为一级标准 ;保障农业生产 ,维护人体健康的土壤限制值设为二级标准 ;保障农林业生产和植物正常生长的土壤临界值为三级标准.

结果表明 ,Cu 在菜地土壤中有 20%的样点超过国家土壤环境质量标准的一级标准(农田 35mg·kg⁻¹) ,其他土地利用类型 Cu 含量均未超过一级标准 ,说明 Cu 在深圳土壤中已经形成了一定累积 ,但风险相对较低 ;Pb 在菜地、荒地、果园、林地中分别有 90%、50%、92%、50%的样点超过国家土壤环境质量一级标准 (农田 35mg·kg⁻¹) ,4 种土地利用类型中均未超过二级标准 ,表明 Pb 的风险也较低. Zn 在菜地土壤中的含量有 30%超过国家土壤环境

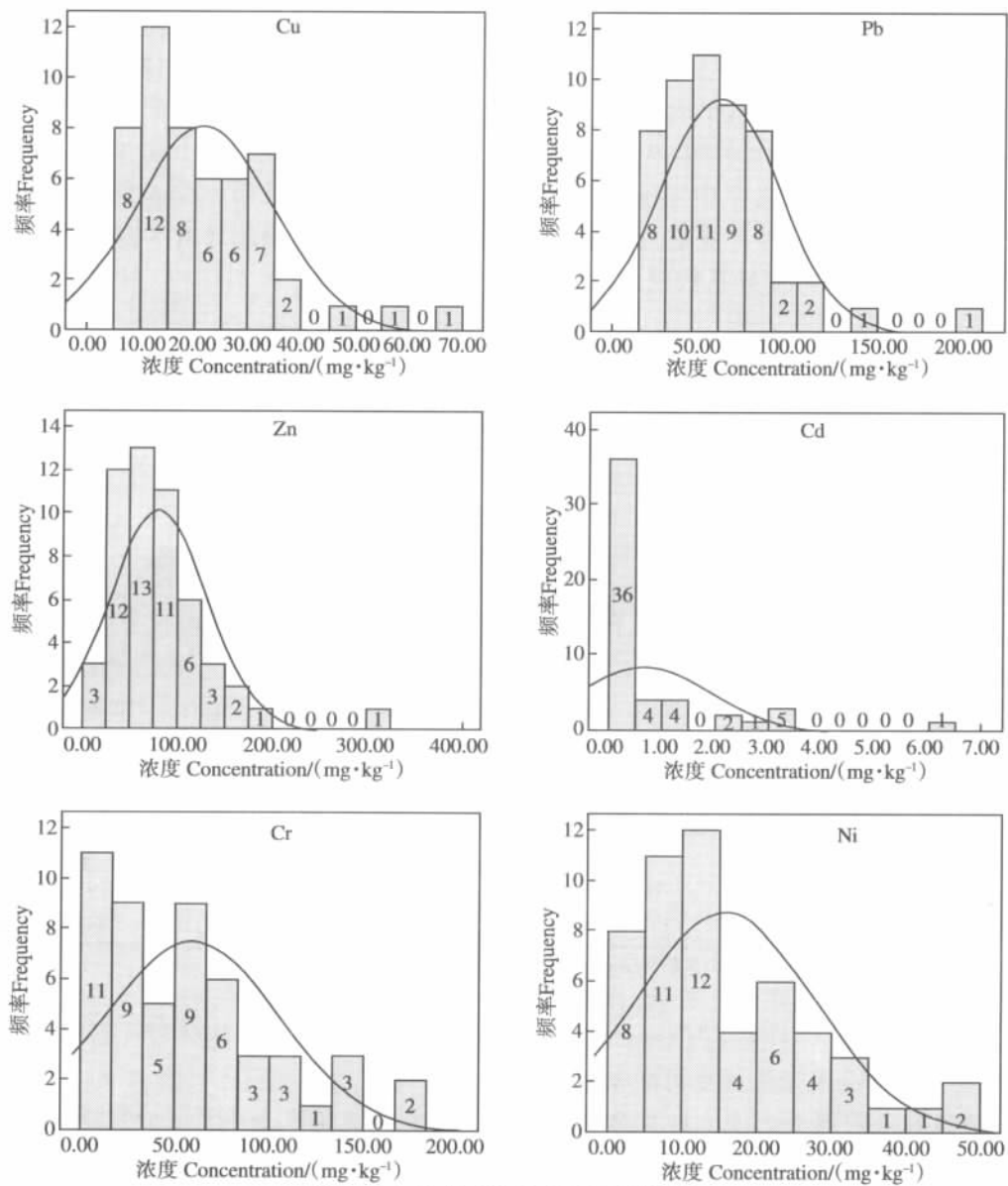


图 2 不同含量土壤重金属出现的频率
Fig.2 The frequency of soil heavy metals in different concentrations

一级标准($100\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),还有 10%的样品含量超过二级标准($200\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),荒地、果园、林地也有部分样点超过一级和二级标准,说明深圳部分农林土壤中 Zn 的含量已经影响到当地的农业生产甚或人体的健康,然而,对比表 1,Zn 的最大值尚未超过其背景值的最大值,说明当地 Zn 在土壤中的总体浓度尚未对当地的农业和人体形成风险. Cr、Ni 在菜地土壤中分别有 30%和 20%的样品超过国家土壤环境的一级标准($90\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $40\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),超过二级标准($250\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $40\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的样点数也分别占到总样点数的 10%和 20%,荒地、果园、林地也有相当部分样点超过一级、二级标准,说明这两种重金属在土壤均存在较大风险. 对比表 1 中

Cu、Pb、Cr 和 Ni 的背景值的最大值发现,土壤这 4 种重金属的最大值虽然已经超过背景值的最大值,但前者尚未超过后者的二倍,说明其虽然在土壤中形成累积但风险尚不大. Cd 在农林土壤中的累积最为严重,以菜地为例,虽然超过深圳市土壤环境质量背景值的样品量仅有 70%,但超过国家土壤环境质量二级标准($0.30\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的占到 40%,超过三级标准($1.0\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的也占到 10%,荒地、果园、林地也有相当部分样点超过二级、三级标准. 对比表 1,本次研究中 Pb 的最大值已经超过背景值 16 倍,因此,菜地土壤中 Cd 不仅对农业和人体健康可能存在较大风险,还可能对农林业生产和植物正常的生长产生较大风险.

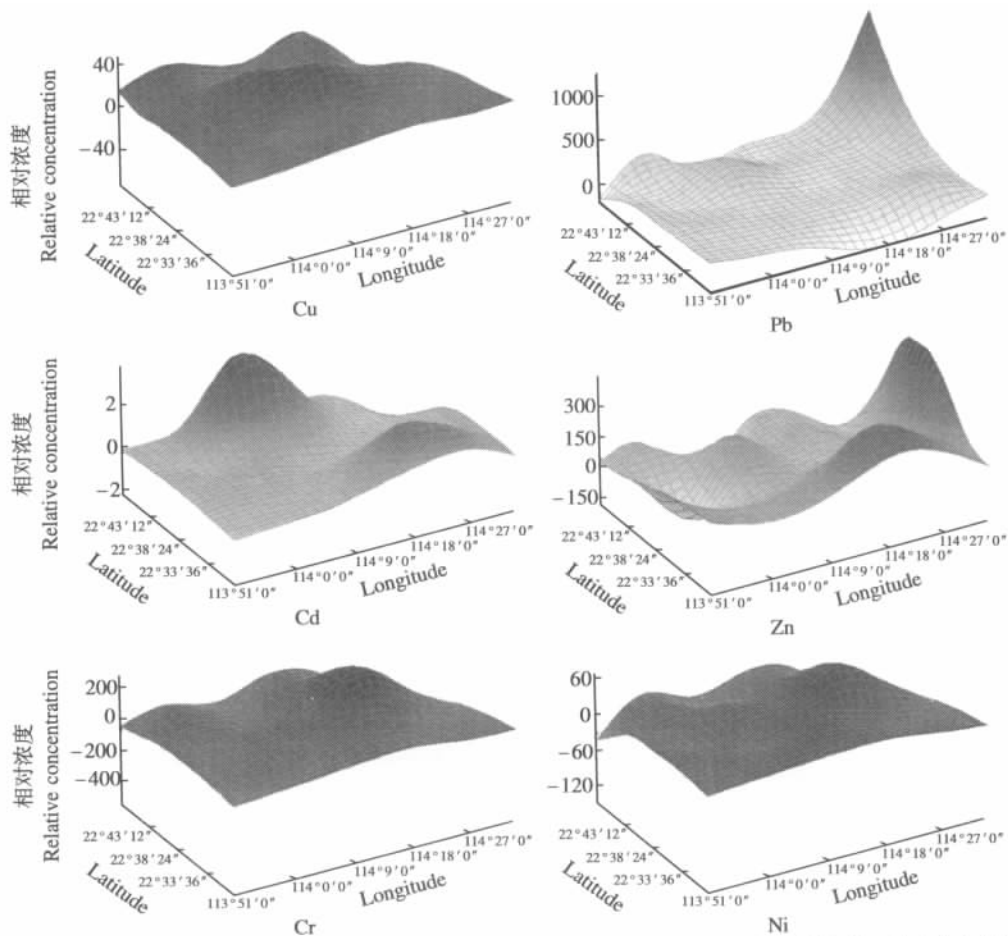


图 3 深圳农林土壤 Cu、Pb、Cd、Zn、Cr 和 Ni 的空间分布(图中的相对浓度仅代表浓度的相对高低并不代表其在土壤中实际浓度)

Fig.3 Spatial distribution of copper, lead, cadmium, zinc, chromium and nickel in Shenzhen agriculture and forest soils

(The relative concentrations in the figure are the relative conditions not the actual ones)

表 2 深圳市农林土壤重金属累积状况评价结果

Table 2 Assessment results of heavy metal accumulation in Shenzhen agriculture and forest soil

重金属	土地利用类型	超标样点比例/%			
		超过深圳市土壤背景值 ^{a)}	超过国家一级土壤环境质量标准(GB15618-1995)	超过国家土壤环境质量二级量标准(GB15618-1995)	超过国家土壤环境质量三级标准(GB15618-1995)
Cu	菜地	100	20	0	0
	荒地	50	0	0	0
	果园	85	0	0	0
	林地	43	0	0	0
Pb	菜地	80	90	0	0
	荒地	0	50	0	0
	果园	92	92	0	0
	林地	50	50	0	0
Zn	菜地	70	30	10	0
	荒地	0	0	0	0
	果园	73	27	4	0
	林地	36	21	0	0
Cd	菜地	70	50	40	10
	荒地	100	50	50	50
	果园	73	54	35	23
	林地	57	36	36	29
Cr	菜地	80	30	10	0
	荒地	50	50	0	0
	果园	58	15	4	0
	林地	71	14	0	0
Ni	菜地	80	20	20	0
	荒地	50	50	50	0
	果园	46	0	0	0
	林地	50	0	0	0

注 :a) :80 年代末背景值(Tao, 1990)

本文通过对深圳市农林土壤进行采样、分析后得到以下结论：

1) 深圳市农林土壤中 Cu、Pb、Cd、Zn、Cr 和 Ni 6 种重金属均出现了不同程度的积累, Cu 的累积集中在中部, Pb 的高浓度点主要集中在东北部, 而 Cd 和 Zn 的累积主要集中于深圳市的四周包括龙岗区、宝安区等地, 而 Cr 和 Ni 的空间分布与其背景空间分布基本一致。

2) 深圳市农林土壤中 Cu 的风险最低, Pb、Zn、Cr 和 Ni 风险也较低, Cd 的风险最高。

本研究仅从市域尺度上找出了深圳土壤重金属风险较高的区域, 在今后的研究中需对风险较高的土壤的风险面积及危害程度进行更为深入的研究, 另外, 本研究中荒地样点仅有 2 个, 可能在风险评价中存在较大误差, 需在今后的研究中加以改进。

致谢: 感谢中国科学院南京土壤研究所土壤与环境污染修复重点实验室在测量样品方面的帮助, 感谢中国科学院生态环境研究中心焦文涛博士在论文写作过程中给予的帮助。

通讯作者简介: 郑茂坤(1978—), 男, 北京大学城市与环境学院博士后, 主要从事土壤生态安全方面的研究。

References

- Chen G K, Chen G Z. 2005. Lead cycling in a simulated wastewater-affected mangrove (*Avicennia marina*) wetland system [J]. *Ecologic Science*, 24(1): 28–30 (in Chinese)
- Christidis K, Robertson P, Gow K, Pollard P. 2007. Voltammetric *in situ* measurements of heavy metals in soil using a portable electrochemical instrument [J]. *Measurement*, 40(9–10): 960–967
- Garca-Sanchez A, Alastuey A, Querol X. 1999. Heavy metal adsorption by different minerals: application to the remediation of polluted soils [J]. *The Science of The Total Environment*, 242(1–3): 179–188
- Hong C L, Huang J F, Ye Z Q, Jia Y B. 2009. Preliminary survey and analysis of heavy metal contents in vegetable soils in Jiaying City [J]. *Agro-Environment and Development*, 26(1): 76–79 (in Chinese)
- Kumar Sharma R, Agrawal M, Marshall F. 2007. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 66(2): 258–266
- Lee C S L, Li X D, Shi W Z, Cheung S C N, Thornton I. 2006. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics [J]. *The Science of The Total Environment*, 356(1–3): 45–61
- Li Y, Gou X, Wang G, Zhang Q, Su Q, Xiao G J. 2008. Heavy metal contamination and source in arid agricultural soil in central Gansu Province, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 20(5): 607–612
- Liao L, Quan H D, Wu X L, Liang R H, Li Q S, Zhang J F. 1999. Investigation of the soil pollution nearby the yantian waste landfill site of Shenzhen city [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 12(3): 51–53 (in Chinese)
- Lin C X, Chu C X, Lu W Z, Long J, Liu Y, Xu S J. 2004. Chemical characteristics of mangrove soils in the Futian Nature Reserve, Shenzhen [J]. *Ecologic Science*, 23(2): 118–123 (in Chinese)
- Liu Y, Wang W P, Bao T Y, Yang Z Y, Liu N. 2009. Content variations of heavy metals recorded by tree rings from a displaced steel works in the eastern Xi'an City [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 4(3): 382–391 (in Chinese)
- Liu Y D, Wang F. 1999. Lead content in soil and vegetable along the side of road in outskirts of main cities in the Pearl River Delta [J]. *Journal of Zhongkai Agrotechnical College*, 12(4): 51–54 (in Chinese)
- Lu Y, Gan H H, Zhang B S, Shi Z J. 2009. Concentration and chemical fractionation of heavy metals in soils of urban green space in Shenzhen City [J]. *Environmental Chemistry*, 28(2): 284–288 (in Chinese)
- Mari F, Morgan A J. 1999. The time-course of metal (Ca, Cd, Cu, Pb, Zn) accumulation from a contaminated soil by three populations of the earthworm, *Lumbricus rubellus* [J]. *Applied Soil Ecology*, 12(2): 169–177
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. 1995. GB15618-1995 Environmental Quality Standard for Soils [S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese)
- Ning J F, Zou X Z, Yang S H, Huang Q. 2007. Analysis on current status of soil environmental quality around the Shiyan Reservoir in Shenzhen City [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, (2): 82–85 (in Chinese)
- Pérez-Sirvent C, García-Lorenzo M L, Martínez-Sánchez M J, Navarro M C, Marimón J, Bech J. Metal-contaminated soil remediation by using sludges of the marble industry: Toxicological evaluation [J]. *Environment International*, 33(4): 502–504
- Rule J H. 1999. Trace Metal Cation Adsorption in Soils: Selective Chemical Extractions and Biological Availability [M]. Amsterdam: Elsevier, 319–349
- Shi Z J, Lu Y, Zhong X, Lu S Y, Liu Z L. 2006. Soil quality research in green land of Shenzhen City [J]. *Landscape Garden Science & Technology*, 99(1): 20–24 (in Chinese)
- 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)
- Sun H, Pu J, Zhu M, Tu X, S. Wang M, N. Zhang C, Duan Y H. 2008. Distribution and evaluation of heavy metal contents

- in the soil of Biluochun Tea plantations in Xishan, Taihu Lake [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 4 (2) :88-91 (in Chinese)
- Tang S J, Li X, Lai Y, Liu S Z. 2007. Investigation and assessment of soil heavy metal pollution of main productive bases of lichee and longan in Baoan District of Shenzhen City [J]. Auhui Agricultural Science Bulletin, (12) :54-55 (in Chinese)
- Tao S. 1990. Trace Element Contents in Soils from Shenzhen, Chinese [R]. NEPA Report 75-60-01-01-33
- Tao S. 1995a. Kriging and mapping of copper, lead, and mercury contents in surface soil in Shenzhen area [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 83(1-2) :161-172
- Tao S. 1995b. Spatial structures of copper, lead, and mercury contents in surface soil in the Shenzhen area [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 82(3-4) :583-591
- Tao S. 1998. Factor score mapping of soil trace element contents for the Shenzhen area [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 102 (3) :415-425
- Wang L M, Wei C Y, Yang L S. 2009. Using rice as bio-indicator for heavy metal contamination, a study in the Pb-Zn mining and smelting area at Shuikoushan, Hunan Province, China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 4 (3) :373-381 (in Chinese)
- Yong R N, Yaacob W Z W, Bentley S P, Harris C, Tan B K. 2001. Partitioning of heavy metals on soil samples from column tests [J]. Engineering Geology, 60(1) :307-322
- Zan Q J, Wang Y J, Wang B S. 2002. Accumulation and cycle of heavy metal in *Sonneratia apetala* and *S. caseolaris* mangrove community at Futian of Shenzhen, China [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 23(4) :81-88 (in Chinese)
- Zhang J H, Li Z, Pan N M. 2000. Absorption, accumulation and cycle of several heavy metals by mangrove [J]. Yunnan Environmental Science, 19(S1) :53-56 (in Chinese)
- Zheng W J, Lin P. 1996a. Accumulation and distribution of Cr, Ni and Mn in *Avicennia marina* mangrove community at Futian of Shenzhen [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 7(2) :139-144(in Chinese)
- Zheng W J, Lin P. 1996b. Accumulation and distribution of Cu, Pb, Zn and Cd in *Avicennia marina* mangrove community of Futian in Shenzhen [J]. Oceanologia and Limnologia Sinica, 27 (4) :386-393 (in Chinese)
- Zhao J X, Li Y F, Liang J, Wang X Y, Li B, Liu W, Dong Z Q, Qu L Y, Gao Y X, Chen C Y. 2009. Contents of heavy metals in some vegetables and their potential risks to human health in Guiyang and Wanshan areas [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 4(3) :392-398 (in Chinese)
- 中文参考文献
陈桂葵, 陈桂珠. 2005. 白骨壤模拟湿地系统中 Pb 的分布、迁移及其净化效应[J]. 生态科学, 24(1) :28-30
- 国家环境保护局. 1995. GB15618-1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社
- 洪春来, 黄锦法, 叶正钱, 贾彦博. 2009. 嘉兴市蔬菜土壤重金属含量的初步调查分析[J]. 农业环境与发展, 26(1) :76-79
- 廖利, 全宏东, 吴学龙, 梁荣华, 黎青松, 张进峰. 1999. 深圳盐田垃圾场对周围土壤污染状况分析[J]. 城市环境与城市生态, 12(3) :51-53
- 林初夏, 储诚兴, 卢文洲, 龙洁, 刘勇, 徐颂军. 2004. 深圳福田自然保护区红树林土壤的化学特征[J]. 生态科学, 23(2) :118-123
- 刘禹, 王伟平, 保庭毅, 杨增悦, 刘娜. 2009. 西安东郊某废弃钢铁厂油松年轮记录的重金属含量变化过程[J]. 生态毒理学报, 4(3) :382-391
- 刘英对, 王峰. 1999. 珠江三角洲主要城市郊区公路两侧土壤和蔬菜中铅含量初探[J]. 仲恺农业技术学院学报, 12(4) :51-54
- 卢瑛, 甘海华, 张波, 史正军. 2009. 深圳市城市绿地土壤中重金属的含量及化学形态分布[J]. 环境化学, 28(2) :284-288
- 宁建凤, 邹献中, 杨少海, 黄庆. 2007. 深圳石岩水库周边农田土壤环境质量状况分析[J]. 广东农业科学, (2) :82-85
- 史正军, 卢瑛, 钟晓, 陆少雁, 刘振良. 2006. 深圳城市绿地土壤质量状况研究[J]. 园林科技, 99(1) :20-24
- 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
- 孙丽, 濮励杰, 朱明, 涂小松, 王梅农, 张导, 段英华. 2008. 太湖西山碧螺春茶园重金属含量分布与评价[J]. 生态与农村环境学报, 24(2) :88-91
- 唐淑军, 梁幸, 赖勇, 刘士哲. 2007. 深圳市宝安区主要荔枝、龙眼生产基地土壤重金属污染调查及评价[J]. 安徽农学通报, (12) :54-55
- 王玲梅, 韦朝阳, 杨林生. 2009. 矿冶区周边水稻对不同来源重金属污染的指示作用[J]. 生态毒理学报, 4(3) :373-381
- 咎启杰, 王勇军, 王伯荪. 2002. 深圳福田红树林无瓣海桑与海桑群落的重金属累积和循环[J]. 环境科学, 23(4) :81-88
- 章金鸿, 李玖, 潘南明. 2000. 深圳福田红树林对重金属 Cu、Pb、Zn、Cd 的吸收、累积与循环[J]. 云南环境科学, 19(S1) :53-56
- 郑文教, 林鹏. 1996a. 深圳福田白骨壤群落 Cr、Ni、Mn 的累积及分布[J]. 应用生态学报, 7(2) :139-144
- 郑文教, 林鹏. 1996b. 深圳福田白骨壤红树林 Cu、Pb、Zn、Cd 的累积及分布[J]. 海洋与湖沼, 27(4) :386-393
- 赵金璇, 李玉峰, 梁佳, 王小燕, 李柏, 刘文, 董泽琴, 瞿丽雅, 高愈希, 陈春英. 2009. 贵阳和万山地区部分蔬菜中的重金属含量及其健康风险[J]. 生态毒理学报, 4(3) :392-398 ◆