

· 专论与综述 ·

城市土壤重金属污染及其生态环境效应

张浩¹, 王济^{1,2*}, 曾希柏², 白玲玉²

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001;

2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要: 对城市土壤中重金属的来源、空间分布特征、化学形态、在不同介质间的迁移转化及其污染的生态环境效应等近年来的研究进展进行了回顾, 指出今后的研究重点是建立城市土壤重金属污染风险评价和标准体系, 并应对重金属在城市环境中的迁移转化机制及城市土壤质量演变与郊区之间的关系开展研究。

关键词: 城市土壤; 重金属污染; 生态环境效应

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-2009(2010)02-0011-08

Heavy Metal Pollution in Urban Soil and Eco-environmental Effect

ZHANG Hao¹, WANG Ji^{1,2*}, ZENG Xi-bai², BA Ling-yu²

(1. School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The research development in recent years was reviewed at source, characteristic of spatial distribution, chemical form, in different mediums of transformation and eco-environmental effect of heavy metal pollution in urban soil. The research work in future should focus on risk evaluation and environmental quality standard system for heavy metal pollution in urban soil. It was necessary to study transformation mechanism of heavy metals in urban environment and relationship between quality change of soil in urban and suburban areas.

Key words: Urban soil; Heavy metals pollution; Eco-environmental effect

城市土壤不是一个分类学上的术语,而是出现在城市和城郊地区,受人为活动强烈影响,原有继承特性得到强烈改变的土壤总称^[1],其广泛分布于公园、道路、体育场、城市河道、城郊、垃圾填埋场、废弃工厂、矿山周围,或者简单地成为建筑、街道、铁路等城市和工业设施的“基础”而处于埋藏状态^[2-3]。作为城市生态系统的重要组成部分,城市土壤是城市绿色植物生长介质和养分的供应者,是土壤微生物的栖息地和能量来源,是城市污染物重要的源和汇,直接影响到城市生态环境质量^[4]。近年来,随着我国工业化的不断发展和城市化进程的加快,工业、商业、交通等各种各样的人类活动将大量重金属污染物带入城市土壤,而其作为一种持久性有毒物质,进入土壤环境后难以被微生物降解,却可以在生物体内不断富集,并能通过大气、水

体、食物链等直接或间接地威胁人类的生命健康^[5-6]。长期以来,土壤学的研究重点放在如何维护和提高农田土壤的生产力及如何改善农业生态环境上,对城市土壤污染问题关注较少。为了合理规划和利用城市土地,预防和治理城市土壤重金属污染,充分发挥其生态和环境功能,客观上需要对城市土壤重金属的空间分布特征、来源途径、化学

收稿日期: 2009-07-09; 修订日期: 2010-01-28

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划基金资助项目(2006BAD05B01和 2007BAD89B03); 贵州省科技基金资助项目(黔科合 J 字[2007]2165号); 贵州省教育厅自然科学基金资助项目(黔教科[2008013]); 贵州师范大学学生科研基金资助项目(Na 研[2008])

作者简介: 张浩(1985—),男,河南驻马店人,在读研究生,从事城市土壤重金属污染研究。

*通讯作者: 王济, E-mail: wangji@gznu.edu.cn

— 11 —

形态及其生态环境效应等进行深入研究。

1 城市土壤重金属的空间分布特征及来源

1.1 城市土壤重金属的空间分布特征

从空间上看,城市土壤中重金属含量明显高于郊区及远离城市的农田土壤,城市是郊区土壤重金属污染源^[7]。对纽约“市区—郊区—农区”土壤重金属的研究发现,重金属离子总量、多样性等随着距市中心距离的增加而降低,且城区土壤中 Cu、Ni、Pb 的含量分别是农田土壤的 4 倍、2 倍、2 倍^[8]。太原市区土壤中 Cu、Cd、Cr、Zn、Mn 等元素的含量均高于郊区^[9]。很多研究表明城市土壤已不同程度上受到重金属污染,且大部分重金属含量高于郊区土壤^[10-13]。

土地利用方式对土壤重金属含量有显著影响。在城市不同的功能区,重金属分布呈现出一定的规律性。一般来说,工业区和商业区重金属污染最严重,其次为居民区,风景娱乐区和新开发区重金属含量一般较低,污染也相对较轻^[14];工矿区以 Pb、Cd 的积累为特征,而居民区和商业区则以 Cu、Zn 的积累为特征^[11,15-16]。重金属在各功能区土壤中的分布状况因城市不同而略有差异。南京市不同功能区土壤重金属污染指数表现为矿冶区 > 老居民区 > 商业区 > 城市绿地(风景区) > 新开发区^[15];兰州市土壤中 Pb、Zn、Cu、Cd、Hg 的含量明显高于兰州市土壤背景值,不同功能区污染程度表现为工业园区 > 道路两侧 > 农业区 > 居民区 > 公园^[17];重庆市不同功能区污染程度依次为:居民区 > 商业区 > 工业区 > 旅游区 > 交通区 > 文教区,居民区、商业区和工业区均达到很强生态危害水平,旅游区达到强度生态危害水平^[18]。

城市土壤重金属污染的另一特征是沿交通干道两侧呈现出较严重的带状污染^[13,19-21],一般以 Pb、Cd、Cu、Zn 为主,强度因距离公路、铁路、城市的远近及交通量大小有明显差异。尼日利亚车流密度大的路侧土壤中 Pb、Cd、Cu、Ni、Zn 的含量高于车流密度小的路侧土壤,且随着距公路距离的增大,重金属含量快速降低,到距公路约 50 m 处,基本降至背景值水平,Zn 在距公路 30 m 处趋于背景值水平^[22]。德国多特蒙德公路(车流量为 3 200 辆/d)两侧土壤中 Cd、Ni、Pb、V、Zn 的含量随距公路距离增加呈指数下降,且在距公路 10 m 处达到背景值水平^[23]。土耳其锡瓦斯省首府路侧土壤中

的 Pb 主要集中于距公路 15 m 范围内,在距公路 30 m 时含量趋于稳定,并接近背景值水平^[24]。王斌等^[25]认为路侧土壤中 Pb 的含量与距公路的距离符合高斯衰减分布模型,路侧土壤中铅的 99% 以上累积量分布在 50 m 范围内。Blok^[26]则用指数模型来描述路侧土壤中 Zn 含量随距公路距离增加而递减的规律。

城市土壤重金属污染还表现出个别区域某些重金属元素严重富集(加油站、冶炼厂附近、垃圾堆积处等),如南京市个别区域土壤中 Pb 含量超过 700 mg/kg^[15];南京某铬厂周边土壤中 Cr 污染叠加量达背景值的 4.4 倍,污染以车间烟囱为中心,形成直径达 1.5 km 的污染斑块^[27]。

城市土壤受人为扰动较大^[28],挖掘、搬运、堆积、混合和大量的废弃物填充,使自然土壤发生层被破坏,土壤结构与剖面发育层次十分混乱,土壤剖面上下土层无发生学上的联系,致使重金属的土壤剖面特征不同于自然土壤或表层耕作的农业土壤,在剖面上无明显的分布规律,国内外很多城市的研究结果都证实了这一点^[10,29-33]。

近年来,随着人们对城市生态环境的重视和国家实施的“退二进三”政策,部分企业向城郊搬迁,加之小型乡镇企业及个体作坊数量剧增,整个置换过程势必会对郊区的生态环境造成一定影响,使重金属污染出现郊区化趋势^[34-36]。

1.2 城市土壤重金属来源分析

1.2.1 成土母质

成土母质是城市土壤重金属的重要来源,是决定城市土壤中重金属含量与分布特征的重要因素之一^[37]。如北京市目前土壤中 Cr、Ni 的含量主要受成土母质影响,只在个别地区存在明显的 Cr、Ni 含量严重偏高的现象^[38];南京城市土壤中 Fe、Ni、Co、V 等元素主要来源于土壤母质^[39]。

1.2.2 工业活动

矿产冶炼、电镀、塑料、电池、化工等行业是排放重金属的主要工业源,所排放的重金属一方面呈气态或气溶胶态,进入大气后经干、湿沉降进入土壤;另一方面,工业活动所产生的废渣是重金属的重要载体,尤其是一些金属冶炼厂,废渣中的重金属含量极高^[40],无处理堆弃或直接混入土壤,也会造成土壤重金属富集。因此,在城市土壤中,工矿业周围土壤重金属污染一般较为显著。沈阳冶炼厂厂区及周围土壤中 Cd、Pb、Cu、Zn 的平均含量分

别为沈阳市土壤背景值的 36.85 倍、30.68 倍、16.58 倍、13.36 倍,属于重金属严重污染区^[41]。南京市典型工业区土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni、Hg、As 的平均值分别为 127 mg/kg、400 mg/kg、74.7 mg/kg、0.428 mg/kg、73.0 mg/kg、31.4 mg/kg、85.3 mg/kg,显著高于南京市土壤背景值^[20]。

1.2.3 交通运输

城市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、轮胎及车辆镀金部分磨损或润滑油燃烧都会释放出大量含 Pb、Cd、Cu、Zn 的有害气体和粉尘,通过大气干、湿沉降影响路侧土壤中重金属含量^[42],多项研究^[22,43-45]都证明了这一点。随着中国经济的不断腾飞,城市基础设施的不断完善,汽车保有量将不断增加,势必进一步增加城市环境压力。

1.2.4 煤炭燃烧

煤炭中含有多种微量元素,尤其是一些潜在毒害元素,如 Hg、Se、Pb、Cd、As、Zn、Sb、Ti 等。研究表明^[46],这些元素在高温条件下具有挥发性和半挥发性,即在煤炭燃烧过程中,呈气态或吸附在烟气中的细小颗粒物上呈气溶胶态,并能通过各种烟气污染控制设施而释放到大气环境中。尽管煤中这些元素的含量很低,但由于大量煤炭的燃烧,燃煤已成为大气环境中这类潜在毒害元素的主要污染源。据报道,煤中的 Hg 在燃烧过程中有 75% 释放到大气中,经估算中国燃煤每年向大气排 Hg 约 200 t 以上,全球质量平衡估算表明,由人为源释放到大气中的 Hg 有 1/3 来自煤炭燃烧^[47]。雒昆利等^[48]研究表明,燃烧 1 t 含 Pb 约 30 g 的煤,排放到大气中的 Pb 为 20 g 左右,燃煤中 Pb 的排放率约为 66%。经煤炭燃烧进入大气的重金属随着大气干、湿沉降不断富集到土壤中,如不加以控制,会对城市生态系统及人体健康产生长期危害效应。为此,应积极推广使用煤气、液化气和电热等清洁能源;加强对机动车尾气污染的监督管理,逐步将公交车(含所属出租车)(燃)油改(燃)气;实施“退二进三”政策,将部分能耗高、污染重、占地广的企业向异地搬迁,减少由工业活动、交通运输、燃煤等带来的城市土壤重金属污染。

1.2.5 废弃物堆积

含重金属废弃物未经处理随意堆积也会造成城市土壤重金属污染,而且不同种类废弃物的危害方式和污染程度均不同,污染范围一般以废弃堆为

中心向四周扩散。据报道,武汉市垃圾堆放场^[49]、西班牙某 Zn 矿冶炼厂废弃物堆积区^[50]、南京市生活垃圾场^[51]、哈尔滨市韩洼子垃圾堆放场附近土壤中的重金属含量均高于当地土壤背景值或对照区,特别是哈尔滨市韩洼子垃圾堆放场周围 1-130 m 以内的土壤受重金属明显污染,土壤中的 Hg 高达 0.26 mg/kg,比无堆放地的正常土壤高 8.5 倍^[52]。此外,重金属在土壤中的含量受其从垃圾中释放率的影响,且随着距离增加而降低。据 A. A 别乌斯调查^[53],垃圾堆放场周围土壤中某些化学元素的含量比远离堆放场高得多,如距堆放场 50 m、100 m、250 m 土壤中的 Cu 分别为 300 mg/kg、100 mg/kg、40 mg/kg, Pb、Zn、Cr、Ni 也是距垃圾场越近,含量越高。相关研究^[51,54]还表明,堆放的垃圾在雨水淋洗下会向土壤中释放有毒元素,释放到土壤中的主要是其有效态部分,且表生条件下以有效态形式存在的金属元素几乎不可能再转变成残渣态^[55],这会导致重金属在土壤中的迁移能力增加,污染地下水。

1.2.6 大气沉降

目前国内学者对大气汞沉降研究较多^[56-57],对其他重金属的干、湿沉降研究较少。近年来,研究发现焦作市大气沉降对土壤 Hg、Cd、Pb 的年输入量分别为 4.43 g/(hm²·a)、5.70 g/(hm²·a)、394.6 g/(hm²·a)^[58];太原市大气沉降对土壤 Pb、As、Cd、Hg 年输入量分别为 309.7 g/(hm²·a)、55.4 g/(hm²·a)、4.33 g/(hm²·a)、0.48 g/(hm²·a)^[59];北京市大气沉降对土壤 Cd、Hg、Pb、As 的年沉降通量分别为 2.36 g/(hm²·a)、0.24 g/(hm²·a)、219.95 g/(hm²·a)、29.00 g/(hm²·a)^[60]。由此可知,大气沉降已成为城市土壤重金属污染的重要来源途径,为从源头上控制城市土壤重金属污染,今后应加强这方面的研究。

如何识别城市土壤中重金属的来源,是城市环境地球化学研究的重要内容^[61],也是土壤重金属源头阻控技术研究的关键。目前,GIS 技术结合多元统计方法及富集系数法,是区分人为或自然来源重金属的常用方法,可以较有效地进行城市土壤重金属的判源分析。另外,同位素地球化学示踪技术也可以有效追踪城市环境污染物的来源,特别是铅同位素示踪在研究城市土壤重金属来源中起到了独特的作用^[62]。

2 城市土壤重金属的化学形态分析

土壤重金属污染的严重性及其在土壤中的环境行为不完全取决于总量,还取决于其化学形态,不同形态的重金属,其生理活性和毒性均有差异。目前,大多数研究工作者认为土壤环境中重金属的赋存形态可分为水溶态、可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态。由于水溶态一般含量较低,又不易与交换态区分,常将水溶态合并到可交换态中。可交换态的重金属在土壤环境中最为活跃,活性大,毒性强,易被植物吸收,也容易被吸附、淋失或发生反应转为其他形态。残渣态的重金属与土壤固相结合得最牢固,用普通的浸提方法不能从土壤中提取出来,活性最小,几乎不能被植物吸收,毒性也最小。铁锰氧化物结合态在还原条件下易溶解释放,有机结合态在氧化状态下易分解释放,这两种形态的重金属活性、毒性居中。碳酸盐结合态的重金属对土壤 pH 值最敏感,当 pH 值下降时易重新释放而进入环境中,相反,pH 值升高有利于碳酸盐的生成。概而言之,由于城市土壤的高 pH 值(偏碱性),土壤中的重金属元素均表现出较低的生物有效性^[63],其形态以稳定的残渣态为主,可交换态比例较小,但不同元素之间、不同功能区之间各种形态所占的比例有很大差异^[30,39,64-68]。在人类强烈活动的影响下,城市土壤重金属不断富集,其形态组成会发生相应变化,其中酸可提取态的重金属比例有上升趋势,而残渣态的重金属比例呈下降趋势^[69-71]。例如,中国香港土壤中的 Cr 表现出较高的可交换性^[7];上海市土壤中的 Cu 以有机结合态为主^[72];北京市土壤中 Pb 的可交换态含量较高^[73];与非城区自然土壤相比,南京市土壤中的 Mn、Cu、Zn、Pb 主要来源于人为输入,其残渣态所占比例低,活性态比例大,对环境的危险性增大^[65]。

总之,由于土壤组成的复杂性,土壤利用方式及土壤 pH 值、Eh 值、土壤无机和有机胶体含量等因素的差异,以及重金属的复杂性质和多重价态,造成重金属在土壤中有多种赋存形态和复杂的变化。此外,有些城市受到酸雨等因素的影响,城市土壤 pH 值偏高的现象有所转变。虽然目前的研究表明^[52,74],酸雨尚未造成城市土壤中重金属的明显释放,但由于城市土壤重金属相对环境容量的有限性,不排除酸雨影响会打破这种人为地球化学的屏障。

3 城市中重金属在不同介质间的迁移转化

人类活动将大量的重金属污染物排入城市大气、水体和土壤等环境因子中,在自然因素和人为因素的作用下又可以相互转化。城市灰尘中的重金属(尤其是细粒子),一方面在风力、交通流和人流的作用下被扬起,从而进入大气成为大气颗粒物;另一方面也可以进入水体成为水体悬浮物,最终由于重力沉降成为水体沉积物,同时还可以成为土壤的一部分。另外,重金属污染物还可吸附在颗粒物表面,随着重力作用和降水,一部分转变为城市灰尘,另一部分进入水体和土壤。土壤中的重金属则由于降水和渗漏等作用进入水体,同时水体中的重金属也可通过灌溉重新回到土壤中。在气候干旱的条件下,风力、交通流和人流又可将土壤颗粒转变成城市灰尘或大气颗粒物。

城市土壤重金属可以通过渗滤进入水体,引起了人们对地下水中重金属含量的关注。目前的研究^[39]表明,城市地下水中的重金属浓度与相应土壤中的重金属含量无明显相关性。城市土壤 pH 值偏碱性^[2,75],且土壤压实、板结现象严重,孔隙度降低,含水量减少,从而降低了土壤中重金属的移动性,减弱了城市土壤中重金属淋洗至地下水中的可能性^[76]。城市土壤的化学组成与地面大气污染水平具有一定的依赖性。相关研究^[1,77-79]表明,城市空气中重金属的多年平均含量,与城市土壤表层中大量可交换的以水溶解等形式存在的一些重金属(如 Cu、Pb、Mn 等)含量之间呈可靠的相互依赖关系。乌克兰 23 个城市土壤中酸溶解性 Mn、Zn、Cu、Pb 的含量与其在气溶胶中的多年平均含量有明显的依赖关系^[80]。波兰上西里斯克工业区每昼夜间的降尘量高达 3 000 mg/m³,导致土壤性质发生改变,大量 Pb、Zn、Cu 等在土壤中累积^[52]。

总之,城市土壤是重金属的载体,它既是空气中可悬浮颗粒、浮尘、扬尘、沙尘、烟尘的归宿地,又是水体污染物通过灌溉、渗漏、循环而最终积淀的场所^[81]。

4 城市土壤重金属污染的生态环境效应

4.1 城市土壤重金属污染对人体健康的影响

城市土壤重金属污染会产生一系列生态和环境效应,除了影响土壤的生态功能外,还可能对生物产生危害,主要体现在对人体健康的影响方面,对城区园林绿化植被的影响研究尚不多见。城市

土壤重金属污染对人体产生危害主要有两个途径:

城郊土壤—蔬菜、水果系统中重金属的积累与食物链传递;对土壤或尘土的直接吸入。

国内外许多研究表明,城市(郊)蔬菜是城市居民污染暴露的主要途径之一。秦文淑等^[82]采用 THQ^[83](Target Hazard Quotients)靶标危害系数方法,评估了人体通过食物摄取产生的重金属风险,THQ 方法公式表达如下:

$$\text{THQ} = \frac{E_F E_D F_R C}{R_{FD} W_{AB} T_A} \times 10^{-3}$$

式中, E_F 为接触频率 (d/a); E_D 为平均人寿命 (70 a); F_R 为消化食物的比率 [g/(person·d)]; C 为食物中重金属质量比 (mg/kg); R_{FD} 为参比剂量 (mg/kg·person); W_{AB} 为人体平均质量 (成人为 55.9 kg, 儿童为 32.7 kg); T_A 为平均接触时间 (d/a)。若 THQ 值 < 1, 则认为人体负荷的重金属对健康造成的影响不明显。评估结果表明,广州市民经蔬菜途径摄入人体的 Pb、Cd、Zn、Cu、Cr 暴露接触的 THQ 值分别为 0.447、0.105、0.033、0.059、0.0002, 说明经蔬菜途径摄入的重金属对市民的健康风险较低;较其他几种元素, Pb 的 THQ 值较大,是具有潜在暴露接触健康风险的重金属。

城市土壤中的重金属通过扬尘进入大气,并最终通过呼吸作用进入人体,从而直接影响人体健康。采用核探针研究大气颗粒物的指纹特征,结果表明,上海市大气颗粒物中约有 31% 来自土壤扬尘^[84]。污染的城市土壤扬尘是影响人体健康的重要因素,特别是 Pb 在细颗粒中相对富集,可能是儿童血 Pb 含量升高的重要原因^[85],因为细颗粒土壤更容易成为扬尘被呼吸摄入^[86-87]。

以城市土壤为切入点,系统研究基于人体健康风险的城市土壤重金属污染评价体系是国内外研究的前沿。美国、荷兰、澳大利亚等国建立了环境风险评价和健康风险评价准则^[88]。我国在这方面的研究相对滞后,制定城市土壤重金属污染健康风险评价体系已迫在眉睫。

4.2 城市土壤重金属污染对土壤微生物的影响

城市土壤重金属污染会导致土壤中的微生物特性发生显著变化,低浓度重金属能刺激微生物生长,增加微生物生物量碳,而高浓度重金属则导致其明显下降^[89]。相对于农村土壤,城市土壤中微生物群落结构上产生了明显的差异,微生物基底呼吸作用明显增强,生物量却显著降低,生理生态

参数 C_{mic}/C_{org} 、 qCO_2 值明显升高。Biolog 数据显示,城市土壤微生物对能源碳的消耗量和速度明显提高,主成分分析显示土壤中的重金属积累,特别是有效态 Pb 的积累是导致这种差异的主要原因^[90]。刘乃瑜等^[91]对长春市的研究也表明,城市土壤重金属积累导致土壤微生物代谢活动明显增强,微生物生物量显著降低。此外,重金属污染对不同质地土壤微生物生物量的影响不同,对砂质、砂壤质土壤微生物生物量的抑制作用比壤质、粘质土壤大得多。高 Cu 污染土壤中的微生物群落比 Zn、Ni 污染土壤少,重金属严重污染会降低微生物对单一碳底物的利用能力,减少土壤微生物群落的多样性^[92-93]。

4.3 城市土壤重金属污染对土壤酶的影响

相关研究^[94-96]表明,重金属污染与土壤酶活性呈显著或极显著的相关性,且影响多表现为抑制作用。和文祥等^[97]研究发现,当加入土壤中的 Hg 为 30 mg/kg 时,脲酶的活性降至原来的 29%~47%,且受 Hg 的抑制作用最敏感。杨志新等^[98]研究证实,脲酶受重金属的抑制作用最为敏感;转化酶和碱性磷酸酶的活性影响则随着 Cd 浓度的增加而显著降低;在不同 pH 值下, Hg、Cd 对脲酶活性的抑制作用有明显差别,当 pH 值 = 6.0 时,抑制幅度最大, pH 值 = 7.5 时则相反^[99]。

重金属对土壤酶活性的影响,一方面是重金属对土壤酶活性产生直接作用,使酶类活性基团空间结构受到破坏,从而降低其活性;另一方面,重金属能抑制土壤微生物的生长繁殖,减少微生物体内酶的合成和分解量,使其活性降低。土壤酶活性可以作为重金属污染程度的主要预警指标,但土壤酶活性极易受酶环境因素及其他非生物因素的影响,比较不同土壤在不同时间的酶活性存在一定困难。此外,土壤酶具有底物专一性和功能单一性,使用单一酶活性表征土壤重金属污染不太合适,是否可用多种酶共同作为指标还有待进一步研究。

5 研究展望

随着城市化和工业化进程的加快,城市土壤作为人类赖以生存的自然环境系统之一,污染现象日趋突出,尤以重金属污染为主。目前对城市土壤重金属的研究主要集中在含量、空间分布及评价等方面,对重金属在城市生态系统中的迁移转化机制、重金属对城市居民身体健康和园林绿化植被的影

响、重金属溯源及其污染预警等方面的研究相对比较薄弱。此外,目前通用的土壤环境质量标准仅局限于农业用地,尚未建立适用于城市土壤环境的质量标准。因此,今后应针对这些薄弱环节开展研究,特别是城市土壤质量演变与郊区之间的相互关系、城市土壤重金属污染生态风险评价和人体健康风险评估等方面的研究,尽快建立基于城市居民健康风险评估的城市土壤质量标准。

土壤重金属污染治理有物理方法、化学方法及生物措施,但多停留于试验阶段,尚未开展大范围的应用,而且由于周期长、成本高等原因,也不适宜大范围推广,尤其是在城区范围内。因此,防治城市土壤重金属污染的最根本途径是发展循环经济,采用清洁生产工艺,严格控制含有重金属的工业“三废”排放,实现废弃物的资源化。在从源头上治理污染的同时,还应加快研究生态影响小、费用和市场风险低、技术简单、易于推广、应用范围广泛的城市土壤重金属阻控与消减技术。

城市是高素质人口的集中地,在我国城市生态建设中,公众参与意识不强,对城市土壤的重要性缺乏认知。因此,应尽快通过各种形式和渠道,向公众特别是土壤(土地)使用者和城市管理者宣传有关土壤的知识,提高公众的环境保护意识和“土地认知”水平,同时政府还可通过制定相关的经济与激励政策,强化公众的参与意识。

[参考文献]

- [1] 张甘霖,朱永官,傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 539 - 546.
- [2] 卢瑛,龚子同,张甘霖. 南京城市土壤特性及其分类的初步研究[J]. 土壤, 2001, 33(1): 47 - 51.
- [3] 卢瑛,龚子同,张甘霖. 城市土壤磷素特征及其与地下水磷浓度的关系[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 735 - 738.
- [4] DE KMPE C R, MOREL J L. Urban soil management: a growing concern[J]. Soil Science, 2001(165): 31 - 40.
- [5] 韩爱民,蔡继红,屠锦河,等. 水稻重金属含量与土壤质量的关系[J]. 环境监测管理与技术, 2002, 14(5): 27 - 28.
- [6] SHOMAR B H, MÜLLER G, YAHYA A. Geochemical features of topsoils in the Gaza Strip: Natural occurrence and anthropogenic inputs[J]. Environmental Research, 2005(98): 372 - 382.
- [7] LIX D, FON C S, LIU P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. Applied Geochemistry, 2001, 16(11 - 12): 1361 - 1368.
- [8] POUYAT R V, MCDONNELL M J. Heavy metal accumulations in forest soils along an urban-rural gradient in southeastern New York, USA[J]. Water Air and Soil Pollution, 1991(57 - 58): 797 - 807.
- [9] 郭翠花,黄淑萍,原洪波. 太原市地表土中五种重金属元素的污染检测及评价[J]. 山西大学学报(自然科学版), 1995, 18(2): 222 - 226.
- [10] 卢瑛,龚子同,张甘霖. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 123 - 126.
- [11] 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[J]. 土壤通报, 1999, 30(2): 93 - 96.
- [12] 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[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2001, 40(4): 94 - 101.
- [13] 郑表明,陈同斌,陈煌,等. 北京市不同土地利用方式下土壤铅的积累[J]. 地理学报, 2005, 60(5): 791 - 797.
- [14] 史贵涛,陈振楼,李海雯,等. 城市土壤重金属污染研究现状与趋势[J]. 环境监测管理与技术, 2006, 18(6): 9 - 12.
- [15] 吴新民,李恋卿,潘根兴,等. 南京市不同功能区土壤中重金属 Cu、Pb、Zn、Cd 的污染特征[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 105 - 110.
- [16] L NDEM, BENGSSON H, ÖBORN I. Concentrations and pools of heavy metals in urban soils in Stockholm, Sweden[J]. Water Air and Soil Pollution: Focus, 2001(1): 83 - 101.
- [17] 康玲芬,李锋瑞,化伟,等. 不同土地利用方式对城市土壤质量的影响[J]. 生态科学, 2006, 25(1): 59 - 63.
- [18] 李章平,陈玉成,杨学春,等. 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(自然科学版), 2006, 1(28): 227 - 230, 251.
- [19] 郭平. 长春市土壤重金属污染机理与防治对策研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [20] 张孝飞,林玉锁,俞飞,等. 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, 2005, 14(4): 512 - 515.
- [21] 兰天水,林健,陈建安,等. 公路旁土壤中重金属污染分布及潜在生态危害的研究[J]. 海峡预防医学杂志, 2003, 9(1): 4 - 6.
- [22] FAKAYODE S O, OLU-OWOLABI I. Heavy metal contamination of roadside topsoil in Osagbo, Nigeria: its relationship to traffic density and proximity to highways[J]. Environmental Geology, 2003, 44: 150 - 157.
- [23] MUNCH D. Concentration profiles of arsenic, cadmium, chromium, copper, lead, nickel, zinc, vanadium and polynuclear aromatic hydrocarbons (PAH) in forest soil beside an urban road[J]. The Science of the Total Environment, 1993(218): 161 - 174.
- [24] ÖZKAN M H, GÜRKAN R, ÖZKAN A, et al. Determination of manganese and lead in roadside soil samples by FAAS with ultrasound assisted leaching[J]. Journal of Analytical Chemistry, 2005(60): 469 - 474.
- [25] 王斌,丁桑岚. 公路两侧土壤中铅的分布规律研究[J]. 重庆环境科学, 1998, 20(4): 53 - 55.
- [26] BLOK J. Environmental exposure of road borders to zinc[J].

- The Science of the Total Environment, 2005, 348 (1 - 3): 173 - 190.
- [27] 张辉, 马东升. 南京某合金厂土壤铬污染研究 [J]. 中国环境科学, 1997, 17 (1): 80 - 83.
- [28] 李敏, 林玉锁. 城市环境铅污染及其对人体健康的影响 [J]. 环境监测管理与技术, 2006, 18 (5): 6 - 10.
- [29] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京市城市土壤 Pb 的含量及其化学形态 [J]. 环境科学学报, 2002, 22 (2): 156 - 160.
- [30] 章明奎, 王美青. 杭州市城市土壤重金属的潜在可淋洗性研究 [J]. 土壤学报, 2003, 40 (6): 915 - 919.
- [31] 符娟林, 章明奎, 厉仁安. 杭州市居民区土壤重金属形态和酸可溶性研究 [J]. 科技通报, 2004, 20 (1): 6 - 10.
- [32] JM C Y. Soil characteristics and management in an urban park in Hong Kong [J]. Environmental Management, 1998, 22 (5): 683 - 695.
- [33] 杨凤根, 张甘霖, 龚子同, 等. 南京市历史文化层中土壤重金属元素的分布规律初探 [J]. 第四纪研究, 2004, 24 (2): 203 - 212.
- [34] 施泽明, 倪师军, 张成江, 等. 成都市城市土壤中重金属的现状评价 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2005, 32 (4): 391 - 395.
- [35] 阎伍玖, 吕成文, 陈飞星. 芜湖城市郊区土壤重金属污染危害及其对策研究 [J]. 土壤学报, 2000, 37 (1): 136 - 141.
- [36] 赵传冬, 成航新, 庄广民, 等. 中国北方某城市近郊土壤中重金属污染现状及潜在危害 [J]. 物探与化探, 2006, 30 (4): 344 - 353.
- [37] 陶澍, 曹军, 李本纲, 等. 深圳市土壤微量元素含量成因分析 [J]. 土壤学报, 2001, 38 (2): 248 - 255.
- [38] 郑表明, 陈煌, 陈同斌, 等. 北京市土壤中 Cr, Ni 含量的空间结构与分布特征 [J]. 第四纪研究, 2003, 23 (4): 436 - 445.
- [39] 张甘霖, 卢瑛, 龚子同, 等. 南京城市土壤某些元素的富集特征及其对浅层地下水的影响 [J]. 第四纪研究, 2003, 23 (4): 446 - 454.
- [40] 徐东慧, 陈志宾, 蔡固平. 硫酸锰废渣特性及综合利用研究 [J]. 湖南有色金属, 2005, 21 (1): 32 - 35.
- [41] 马溪平, 李法云, 肖鹏飞, 等. 典型工业区周围土壤重金属污染评价及空间分布 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39 (2): 326 - 329.
- [42] FALAH FARDAKANI A. Contamination of environment with heavy metals emitted from automobiles [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1984 (8): 152 - 161.
- [43] 菲尔汉·汉杰尔, 潘丽英, 陈勇, 等. 汽车废气中的铅对城市土壤污染状况调查 [J]. 干旱环境检测, 2002, 16 (3): 154 - 161.
- [44] 李波, 林玉锁, 张孝飞, 等. 沪宁高速公路两侧土壤和小麦重金属污染状况 [J]. 农村生态环境, 2005, 21 (3): 50 - 53, 70.
- [45] 郭广慧, 雷梅, 陈同斌, 等. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响 [J]. 环境科学学报, 2008, 28 (10): 1937 - 1945.
- [46] NRIAGU J O, BLANKSON M L, Ocran K. Childhood lead poisoning in Africa: a growing public health problem [J]. The Science of the Total Environment, 1996 (181): 93 - 100.
- [47] 王起超, 沈文国, 麻壮伟. 中国燃煤汞排放量估算 [J]. 中国环境科学, 1999, 19 (4): 318 - 321.
- [48] 雒昆利, 王斗虎, 谭见安, 等. 西安市燃煤中铅的排放量及其环境效应 [J]. 环境科学, 2002, 23 (1): 123 - 125.
- [49] 方满, 刘洪海. 武汉市垃圾堆放场重金属污染调查及控制途径 [J]. 中国环境科学, 1998, 8 (4): 54 - 59.
- [50] GALLEGO J L R, ORDONEZ A, LOREDO J. Investigation of trace element sources from all industrialized area (Aviles, Northern Spain) using multivariate statistical methods [J]. Environment International, 2002, 27 (7): 589 - 596.
- [51] 张辉, 马东升. 城市生活垃圾向土壤释放重金属研究 [J]. 环境化学, 2001, 20 (1): 43 - 47.
- [52] 廖金凤. 城市化对土壤环境的影响 [J]. 生态科学, 2001, 20 (12): 91 - 94.
- [53] A. A 别乌斯. 环境地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1982: 213 - 217.
- [54] CHICHARRO-MARTIN A, CALA-R VERO V, LARREA-MARRIN M T. Contamination by heavy metals in soils in the neighbourhood of a scrapyard of discarded vehicles [J]. The Science of the Total Environment, 1998, 212 (2 - 3): 145 - 152.
- [55] URE A M, QUEVAUILLER P, MUNTAU H, et al. Speciation of heavy metals in soils and sediments: an account of the improvement and harmonization of extraction techniques undertaken under the auspices of the BCR of the Commission of the European Communities [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1993 (51): 135 - 151.
- [56] 刘俊华, 陈乐恬, 王文华, 等. 北京市区及郊区大气中的汞沉降的估算 [J]. 环境科学学报, 2001, 21 (5): 643 - 645.
- [57] 方凤满, 王起超, 李东侠, 等. 长春大气颗粒物及其干沉降通量 [J]. 环境科学, 2001, 22 (2): 60 - 63.
- [58] 邹海明, 李粉茹, 官楠, 等. 大气中 TSP 和降尘对土壤重金属累积的影响 [J]. 中国农学通报, 2006, 22 (5): 393 - 395.
- [59] 赖木收, 杨忠芳, 王洪翠, 等. 武太原盆地农田区大气降尘对土壤重金属元素累积的影响及其来源探讨 [J]. 地质通报, 2008, 27 (2): 240 - 245.
- [60] 丛源, 陈岳龙, 杨忠芳, 等. 北京平原区元素的大气干湿沉降通量 [J]. 地质通报, 2008, 27 (2): 257 - 264.
- [61] 滕彦国, 倪师军, 林学钰, 等. 城市环境地球化学研究综述 [J]. 地质论评, 2005, 51 (1): 64 - 76.
- [62] 常向阳, 朱炳泉, 陈毓蔚, 等. 元素 - 同位素示踪在环境科学研究中的应用 [J]. 广州大学学报 (自然科学版), 2002, 1 (3): 67 - 70.
- [63] W LCKE W, L L IENFEN J, LMA S D C, et al. Contamination of highly weathered urban soils in Uberlandia, Brazil [J]. Journal Plant Nutrition and Soil Science, 1999 (162): 539 - 548.
- [64] 吴新民, 潘根兴, 姜海洋, 等. 南京城市土壤的特性与重金属污染的研究 [J]. 生态环境, 2003, 12 (1): 19 - 23.
- [65] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤中重金属的化学形态分布 [J]. 环境化学, 2003, 22 (3): 131 - 136.

- [66] 王美青,章明奎. 杭州市城郊土壤重金属含量和形态的研究 [J]. 环境科学学报, 2002, 22 (5): 603 - 608.
- [67] 宋明义,刘军保,周涛发,等. 杭州城市土壤重金属的化学形态及环境效应 [J]. 生态环境, 2008, 17 (2): 666 - 670.
- [68] 刘玉燕,刘敏,刘浩峰. 乌鲁木齐城市土壤中重金属分布 [J]. 干旱区地理, 2006, 29 (1): 120 - 123.
- [69] 李佑国,房世波,潘剑君,等. 城市化进程中的南京市土壤重金属污染调查 [J]. 四川师范大学学报 (自然科学版), 2004, 27 (1): 93 - 96.
- [70] RASMUSSEN P E, SUBRAMANIAN K S, JESSMAN B J. A multi-element profile of house dust in relation to exterior dust and soils in the city of Ottawa, Canada [J]. The Science of the Total Environment, 2001 (267): 125 - 140.
- [71] KASHEM M A, SINGH B R. Metal availability in contaminated soils. I Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, PH and solubility of Cd, Ni, and Zn [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001 (61): 247 - 255.
- [72] 刘玉燕,刘敏. 上海城市土壤中重金属含量及赋存形态 [J]. 城市环境与城市生态, 2008, 21 (2): 34 - 37.
- [73] 弓成,王海燕,黄丽君. 北京市土壤重金属形态分析 [J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19 (5): 38 - 40.
- [74] 郭朝晖,黄昌勇,廖柏寒. 模拟酸雨下污染土壤中 Cd, Cu, Zn 释放及其形态转化的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, 14 (9): 1547 - 1550.
- [75] STROGANOVA M N, MYAGKOVA A D, PR IKOFIEVA T V, et al Soils of moscow and urban environment [M]. Moscow: Russian Federation, 1998: 1 - 120.
- [76] SCHLEUSS U, WU Q L, BLUME H P. Some aspects of urban soils derived from anthropogenic substrata [C] // IUSS Proceedings of 16th World Congress of Soil Science: Symposium 28. Montpellier. IUS, 1998: 1 - 7.
- [77] 庄树宏,王克明. 城市大气重金属 (Pb, Cr, Cu, Zn) 污染及其在植物中的富积 [J]. 烟台大学学报 (自然科学与工程版), 2000, 13 (1): 31 - 37.
- [78] 沈轶,陈立民,孙久宽,等. 上海市大气 PM_{2.5} 中 Cu, Zn, Pb, As 等元素的浓度特征 [J]. 复旦学报 (自然科学版), 2002, 41 (2): 404 - 408.
- [79] TYUTYUNIK Y G. Dependence of the content of heavy metals in urban soils on atmospheric pollution [J]. Eurasian Soil Science, 1993, 25 (4): 18 - 21.
- [80] 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 [J]. 环境科学动态, 1999 (2): 29 - 30.
- [81] 何乱水,马炳祥,杜文奎,等. 西北黄土高原干旱半干旱条件下城市污染特点——以西北某城市为例 [J]. 中国地质, 2003, 30 (4): 442 - 448.
- [82] 秦文淑,邹晓锦,仇荣亮. 广州市蔬菜重金属污染现状及对人体健康风险分析 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (4): 1638 - 1642.
- [83] USEPA 2000. Risk-based concentration table [R]. Philadelphia PA: United States Environmental Protection Agency, Washington DC, 2000.
- [84] 李晓林,朱节清,郭盘林,等. 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, 2004, 27 (1): 27 - 34.
- [85] CALABRESE E J, STANEK E J, JAMES R C, et al Soil ingestion: A concern for acute toxicity in children [J]. Environmental Health Perspectives, 1997, 105 (12): 1354 - 1358.
- [86] WANG H H, LIL Q, WU X M, et al Distribution of Cu and Pb in particle size fractions of urban soils from different city zones of Nanjing, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18 (3): 482 - 487.
- [87] 常静,刘敏,李先华,等. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评价 [J]. 中国环境科学, 2009, 29 (5): 548 - 554.
- [88] MARKUS J, MCBRATNEY A B. A review of the contamination of soil with lead. Spatial distribution and risk assessment of soil lead [J]. Environment International, 2001, 27 (5): 399 - 411.
- [89] FLIEBACH A, MARTENS R, REBER H H. Soil microbial biomass and microbial activity in soils treated with heavy metal contaminated sewage sludge [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994 (26): 1201 - 1205.
- [90] 杨元根, PATERSON E, CAMPBELL C. 用微生物对单一碳源利用方法探讨重金属在城市土壤中积累的环境效应 [J]. 地球化学, 2001, 30 (5): 459 - 464.
- [91] 刘乃瑜,马小凡,谢迅雷,等. 长春市城市土壤中重金属元素的积累及其微生物特性研究 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2004 (34): 134 - 138.
- [92] BAATH E. Effects of heavy metals in soils on microbial processes and populations (a review) [J]. Water Air and Soil Pollution, 1989 (47): 335 - 379.
- [93] BAATH E, DIAZ-RAVANA M, FROSTEGARD A, et al Campbell Effect of metal-rich sludge amendments on the soil microbial community [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64 (1): 238 - 245.
- [94] COTRUFO M F, DE SANTO A V, ALFANIA, et al Effects of urban heavy metal pollution on organic matter decomposition in Quercus ilex L. Woods [J]. Environmental Pollution, 1995 (89): 81 - 87.
- [95] 罗虹,刘鹏,宋小敏. 重金属镉、铜、镍复合污染对土壤酶活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2006, 20 (2): 94 - 96.
- [96] 潘勇军,陈步峰,肖以华,等. 广州市城市森林土壤重金属污染状况及其评价 [J]. 生态环境, 2008, 17 (1): 210 - 215.
- [97] 和文祥,黄英锋,朱铭毅,等. 汞和 Cd 对土壤脲酶活性影响 [J]. 土壤学报, 2002, 39 (3): 412 - 416.
- [98] 杨志新,刘树庆. 重金属 Cd, Zn, Pb 复合污染对土壤酶活性的影响 [J]. 环境科学学报, 2001, 21 (1): 60 - 63.
- [99] TARAFDAR J C. Visual demonstration of in vivo acid phosphatase activity of VA mycorrhizal fungi [J]. Current Science, 1995 (69): 541 - 543.

本栏目责任编辑 姚朝英