

北京近郊耕作土壤重金属状况评价分析

邹建美¹ 孙江² 戴伟¹ 姚志斌¹ 杨添¹ 刘娜丽³

(1 北京林业大学水土保持学院 2 北京市农业环境监测站 3 河北省宣化县农牧局)

摘要:以北京市近郊昌平、通州、顺义、海淀和大兴5个区县耕作土壤为对象,在对74个样点土壤中Cr、Cu、Cd、Pb、As和Hg 6种重金属含量调查分析的基础上,利用GB 15618—1995《土壤环境质量标准》评价北京市近郊耕作土壤重金属污染现状,并参考北京市土壤重金属背景值,采用环境质量指数与Hakanson环境生态潜在风险指数相结合的方法,探讨土壤中6种重金属的累积污染现状及潜在生态风险。结果表明:土壤中6种重金属含量均低于GB 15618—1995中的二级标准,Cu、Cr、As、Cd、Pb和Hg的含量平均值分别为25.69、59.62、7.97、0.20、22.26和0.16 mg/kg;土壤中Pb、Cu和Cd 3种重金属有极大的同源可能性,但土壤Cr异源性明显;6种土壤重金属都表现出一定程度的累积效应,Cr的累积污染效应最大;土壤中Cd和Hg均处于较高的潜在风险等级,其中海淀部分样点土壤Hg含量已经达到极高潜在风险水平;17%左右的土壤样点已存在一定程度的潜在生态威胁。高累积污染和高风险潜在威胁区都集中在经济相对发达的海淀、通州、昌平。分析表明,近年来的人类生产活动已给北京市近郊耕作土壤的环境质量带来了负面影响,故应依照属地管理原则立即采取区域化重点监测管理措施。

关键词:北京市;耕作土壤;重金属;污染;风险评价

中图分类号:S606; X825 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2013)01-0132-07

ZOU Jian-mei¹; SUN Jiang²; DAI Wei¹; YAO Zhi-bin¹; YANG Tian¹; LIU Na-li³. **Evaluation and analysis of heavy metals in cultivated soils in the suburbs of Beijing.** *Journal of Beijing Forestry University* (2013) **35**(1) 132-138 [Ch., 43 ref.]

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

2 Beijing Municipal Station of Agro-Environment Monitoring, 100029, P. R. China;

3 Animal Husbandry Bureau of Xuanhua County, Hebei, 075100, P. R. China.

The cultivated soils in Changping, Tongzhou, Shunyi, Haidian and Daxing districts in the suburbs of Beijing were selected with 74 sampling points to assess the accumulation status and potential ecological risk of six heavy metals of As, Cd, Cr, Cu, Hg and Pb. The individual pollution index, synthetical pollution index and potential ecological risk index were calculated with *National Soil Heavy Metals Standards* (GB15618-1995 Grade II) and with the background level of heavy metals in Beijing as the assessment criteria to explore the accumulation degree and the pollution status of soil heavy metals. Results showed that heavy metal concentration in the cultivated soils did not exceed the national standards Grade II and could satisfy the safety qualification. Lead, Cu and Cd might have homology, but Cr had not similar source as the others. The six heavy metals in soils showed certain accumulation effects. Cadmium and Hg were in a higher potential risk grade, and especially Hg in Haidian District reached a very high potential risk level. About 17% of the soil samples had potential ecological threat to a certain degree. The high accumulation degree and potential ecological risk grade occurred in relatively developed districts like Haidian, Tongzhou and Changping. Analyses showed that human activities had influenced soil environmental quality in recent years. Therefore, we should take immediate regional monitoring management and related measures in accordance with the principles of territorial administration.

Key words Beijing; cultivated soils; heavy metals; pollution; risk assessment

收稿日期:2012-09-05 修回日期:2012-10-20

基金项目:“948”国家林业局引进项目(20120475)。

第一作者:邹建美。主要研究方向:土壤生态健康评价。Email: fujianmei@163.com 地址:100083 北京市清华东路35号北京林业大学水土保持学院。

责任作者:戴伟,副教授。主要研究方向:土壤生态。Email: daiwei163@163.com 地址:同上。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

土壤重金属因其具有隐蔽性、多元性、积蓄性、难以恢复性和污染后果的难治理性,所以被环境学界一直喻为“化学定时炸弹”^[1-2]。其不仅可以通过食物链的逐级富集直接对人类健康产生危害^[3-4],还会通过破坏水体质量间接地对生命环境造成威胁,如 20 世纪 50 年代日本的富山事件和水俣事件以及发生在我国湖南浏阳河的镉中毒事件和陕西凤翔的血铅超标事件^[5]等。城市近郊作为城市-乡村各种活动交互界面的边缘带,在为城市生活提供生产资料的同时,也为其输入了城市及工业“三废”等物质排放,因其地理位置的特殊性而受到国内外对该地段土壤污染的广泛关注^[6]。国外在土壤重金属的污染来源^[7-8]、空间分布^[9]以及评价方法等方面^[10-12]进行了大量研究。国内也从不同的角度对土壤重金属污染状况进行了研究,包括土壤重金属的空间形态分布特征^[13-14]与土壤重金属污染评价方法等。北京市耕地面积约 53 万 hm^2 ,作为重要的粮、菜基地,其土壤重金属状况一直备受关注。迄今,人们已从重金属的分布特征、含量特征和健康评价等多角度针对北京市农业土壤开展了较为广泛和深入的工作^[15-17]。近几年,北京城市近郊的城市化进程加快,作为城市生活与生产资料的来源地,在工业、农业、交通以及城市生活多重环境压力下,城市边缘带土壤健康质量明显下降;因此及时监测和掌控该区域土壤重金属的含量变化十分必要。为此,本文在对土壤中 Cr、Cu、Cd、Pb、As 和 Hg 6 种重金属含量调查分析的基础上,利用《土壤环境质量标准》^[18],对北京市近郊昌平、通州、顺义、海淀和大兴 5 个区县耕作土壤的重金属污染现状进行了评价,并进一步参考北京市土壤重金属背景值,通过环境质量指数与 Hakanson 环境生态潜在风险指数相结合的方法,系统分析了土壤中 6 种重金属的累积污染现状及潜在生态风险,以期对北京近郊耕作土壤环境保护方针的制订提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品采集时间为 2010 年 10 月 23 日至 11 月 26 日,根据北京近郊基本农田的分布情况,选取北京市近郊昌平、通州、顺义、海淀和大兴 5 区县为采样区域,同时结合土地利用类型和土壤类型的代表性,在 5 个采样区内共布设了 74 个调查采样点,基本覆盖了北京近郊平原地区耕作农业生产区。考虑不同土地利用类型的特点如菜地生产管理的差异较大,为充分反映菜地土壤重金属含量的特点,布置采样点数量相对密集;小麦、玉米田地块大,耕作、灌溉等管

理措施较一致,采样点布置相对稀疏;GPS 定位后,以各点为中心,划分 50 m × 50 m 的采样区,按 S 型取样法获取采样区 0 ~ 20 cm 表层土壤混合样品,现场混匀后从中选择 1.0 kg 的样品作为该采样点的分析样品。为防止样品污染,采样、样品保存和处理过程中均使用塑料制品;为确保样品的代表性,采样时间段保证了在连续 6 d 不降雨的条件下进行。

1.2 样品处理与分析

将土样在室温下风干,用木棍碾碎,过 20 目 (0.840 mm) 尼龙筛,用四分法分为 2 份,其中 1 份备用,另 1 份研磨至全部通过 100 目 (0.149 mm) 尼龙筛后,置于密封袋中保存待测。分析项目的测定均按《土壤环境质量标准》^[18]完成。土壤样品中重金属 As 和 Hg 采用硝酸-盐酸消解体系,原子荧光法 (AFS) 测定;Cr、Cu、Cd、Pb 测定采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解体系,Cr、Cu、Cd 含量采用等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定,Pb 含量采用原子吸收 (AAS) 法测定;分析过程中加入标准样品 ESS-1 进行质量监控。各元素分析误差均小于 $\pm 10\%$ 。土壤 pH 值采用 SJ-4A 型 pH 计测定,水土比为 2.5:1 (mL/g)。

1.3 数据处理

利用 SPSS Statistic 18.0 和 Excel 2007 进行相关分析和主成分分析^[19],作为判断污染源相同与否的重要依据,并进一步对 6 种重金属数据进行详细解释,如污染来源的确定以及自然和人为因素对土壤元素含量的贡献等^[20]。

1.4 评价标准与方法

1.4.1 评价标准

1) 以北京市土壤重金属含量背景值^[21]和《环境背景值数据手册》^[22](表 1)为评价标准来探究农业土壤重金属的累积状况,分析人类生产活动对土壤环境质量的影响程度。

表 1 北京市土壤重金属含量背景值

Tab. 1 Background concentration of soil

重金属	heavy metals in Beijing					mg·kg ⁻¹
	Cu	Cr	As	Cd	Pb	
背景值	18.70	29.80	7.09	0.12	24.60	0.08

2) 选取国家《土壤环境质量标准》^[18](表 2)为评价标准,分析目前土壤污染状况对环境造成的危害程度。

1.4.2 评价方法

1) 环境质量评价。

采用单项环境质量指数和综合环境质量指数^[23]相结合的方法。

表2 《土壤环境质量标准》二级标准含量限值

pH	Cu	Cr	As	Cd	Pb	Hg
<6.5	50	150	40	0.3	250	0.3
6.5~7.5	100	200	30	0.6	300	0.5
>7.5	100	250	25	1.0	350	1.0

单项环境质量指数按下式计算:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: P_i 为污染物*i*的环境质量指数; C_i 是实测值; S_i 是相应背景值。下同。

综合环境质量指数一般采用下式计算:

$$\text{内梅罗污染指数: } P = \sqrt{\frac{\bar{P}_i^2 + P_{i\max}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: \bar{P}_i 和 $P_{i\max}$ 分别是单项环境质量指数平均值和最大值。

有研究^[15,24]指出,内梅罗指数法的重点在于描述 $P_{i\max}$ 对环境质量的影响和作用,极易造成评价结果的片面性。为此,姚志麒通过将式(2)中的平均值赋予较大权系数 x/y (x 表示 $P_{i\max}$, y 表示 \bar{P}_i)的方法来克服此缺点^[24],将式(2)改进为

$$P = \sqrt{\frac{x^2 + (x/y)y^2}{1 + x/y}} = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum P_i\right) P_{i\max}} \quad (3)$$

本文运用改进后的式(3)进行分析和评价。

表3 北京近郊耕作土壤重金属统计性描述

Tab.3 Descriptive statistics of heavy metals in suburb soils of Beijing

种类	平均值/ (mg·kg ⁻¹)	最大值/ (mg·kg ⁻¹)	最小值/ (mg·kg ⁻¹)	标准差	变异系数	偏度值	峰值
Cu	25.69	97.20	11.90	14.55	1.77	3.69	15.70
Cr	59.62	104.20	36.30	12.71	4.69	0.92	1.55
As	7.97	12.80	3.50	1.91	4.16	-0.07	-0.26
Cd	0.20	1.01	0.07	0.16	1.23	3.46	13.83
Pb	22.26	60.80	4.80	7.92	2.81	1.96	7.43
Hg	0.16	0.83	0.01	0.18	0.88	1.98	3.60

以土壤重金属背景值为标准进行环境质量评价可以表明,人为活动等外界因素已给土壤环境带来了累积污染效应。图1表明,研究区土壤重金属的单项环境质量指数依次为 $Cr > Hg > Cd > Cu > As > Pb$ 。这与霍霄妮等^[27]的结果 $Cr > As > Cu > Cd > Hg > Pb$ 有一定差别,其原因可能与调查范围有关。霍霄妮等结论反映的是北京市整体农业土壤重金属累积污染状况,而本文则更具有局部意义上的代表性。

2.2 土壤重金属污染元素的同源性分析

地球化学条件的相似性会导致土壤中某些重金属元素间表现出一定的相关特点;因此,相关性分析是推测重金属来源相同与否的重要依据,高相关性

2)环境风险评价。

采用Hakanson潜在生态危害指数法^[25-26],公式如下:

$$E_i = T_i P_i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_i P_i \quad (5)$$

式中: E_i 为单污染物潜在生态风险参数; T_i 为单污染物的毒性响应参数,Cu、Cr、As、Cd、Hg和Pb的毒性响应参数分别为5、2、10、30、40和5^[26];RI为多因子综合潜在生态风险指数。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属污染现状

74个调查采样点土壤pH和重金属含量逐点分析的结果表明,各采样点土壤pH均高于7.5,土壤重金属含量的描述性统计见表3。在所有采样点中,除1个样点Cu的含量为97.20 mg/kg接近国家标准限值外(表2),其他各点土壤重金属含量均远低于目前国家颁布使用的《土壤环境质量标准》^[18]二级标准的规定要求,土壤处于清洁无污染状态;但其变异系数表明:6种重金属含量的变异特征不同,其中Cr和As的变异系数最大,分别达到4.69和4.16,而Cu、Cd、Pb和Hg的变异系数较小,为0.88~2.81。故初步判断土壤均可能受到一定的外源重金属污染。

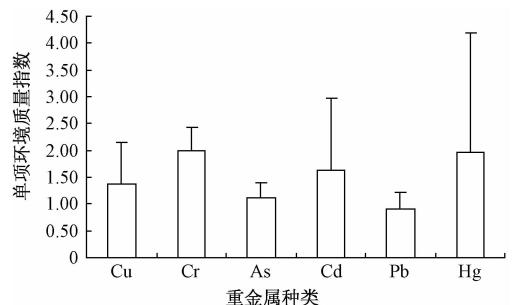


图1 土壤中重金属污染累积指数

Fig.1 Cumulative pollution index of heavy metals in soil

表明同源的可能性较大^[28]。

结果(表4)表明,6种重金属含量中,Cu、Cd和Pb间均呈极显著正相关;因此3种元素具有较大的

同源和复合污染隐患的可能性。Cu-As 和 Hg-As 间也具有较高的相关性,但 Cr 与其他元素均未达到显著水平。

表 4 土壤重金属含量相关性分析 (n = 74)

Tab.4 Correlation coefficients of heavy metal concentrations in soil (n = 74)

种类	Cu	Cr	As	Cd	Pb	Hg
Cu	1					
Cr	0.146	1				
As	0.275 *	0.063	1			
Cd	0.834 **	0.159	0.180	1		
Pb	0.531 **	0.123	0.206	0.466 **	1	
Hg	0.071	0.185	0.273 *	-0.027	0.056	1

注：* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

为了进一步揭示 6 种重金属含量间的相互关系,利用 SPSS 进行了主成分分析(PCA)。表 5、6 表

表 5 因子分析总方差解释

Tab.5 Total variance explanation of factor analysis

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	2.411	40.182	40.182	2.411	40.182	40.182
2	1.245	20.757	60.939	1.245	20.757	60.939
3	0.945	15.755	76.694	0.945	15.755	76.694
4	0.648	10.803	87.497			
5	0.596	9.941	97.437			
6	0.154	2.563	100.000			

表 6 方差最大正交旋转法得到的因子和全部解释变量

Tab.6 Factors obtained by variance orthogonal rotation and total explained variance

重金属	旋转前			旋转后		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Cu	0.908	-0.180	-0.028	0.918	0.112	0.054
Cr	0.298	0.405	0.815	0.127	0.064	0.947
As	0.441	0.513	-0.520	0.266	0.791	-0.178
Cd	0.863	-0.289	0.060	0.908	-0.033	0.080
Pb	0.724	-0.118	-0.038	0.724	0.118	0.040
Hg	0.182	0.829	-0.067	-0.095	0.786	0.314

明:第 1 主成分(F1)中 Cu、Pb 和 Cd 有较高的正荷载;第 2 主成分(F2)主要反映了 Hg 和 As 的富集信息;而第 3 主成分(F3)则反映出 Cr 的富集信息^[29-30]。

利用因子系列矩阵中各主成分所对应的特征向量分量,得到 6 种重金属的直观分类图(图 2),图中因子间距离反映元素含量间的相关性。Pb、Cu 和 Cd 之间距离较近,相关性较强,进一步反映了三者极有可能具有相同的来源。相关分析中,Cu-As 和 Hg-As 虽然也表现出较高的相关性,但主成分分析结果却仅将 Hg 和 As 归为一类,两者的载荷分别为 0.791 和 0.786,而 Cu 和 As 并未表现出明显的同源特征。此外,无论相关分析还是主成分分析,土壤 Cr 与其他 5 种元素关系不明显,显示出较强烈的异源特征。

和较高的正荷载,这与杨忠平等^[31]的研究结果一致,说明除土壤母质影响外,人类活动是其主要影响因素。朱先芳等^[32]研究得出,分别隶属于第一主成分的 Pb、Cd 和 Cu 在土壤中的变化主要受流域内酿造、制药、造纸、中小规模的采矿业以及工业和生活污水的直接排放等人为活动控制。路远发等^[33]对杭州市土壤 Pb 污染进行了 Pb 同位素示踪研究,得出结论:随着土壤受污染程度的增加,Pb 同位素组成逐渐向汽车尾气 Pb 漂移,表明汽车尾气排放的 Pb 为其主要污染源^[34];Nicholson 等^[7]对 England 和 Wales 地区农业土壤重金属污染源研究表明,Cu 有 40% 来自畜禽粪便,8% ~ 16% 来自污水灌溉,38% ~ 48% 来自大气沉降。郑袁明等^[35]认为,在北京市的具体条件下,在各种影响土壤环境 Cu 浓度的人类活动中,除了杀虫剂、除菌剂等农业要素的贡献外,城市化和工业化等非农业要素的贡献也很大。土壤 Cd 的来源包括地膜生产中加入了含 Cd 热稳定剂、农业灌溉、大气沉降、采矿活动及其他人类活动^[36-38]。近几年北京市近郊城乡交错地带的城市化进程正在加速,汽车销量逐年上升,农业用地数量在减少,产出需求在增加,所以相应地农业投入较大。由此可推测,近年来导致近郊耕作土壤 Cd 风

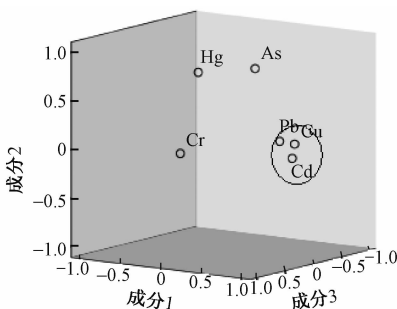


图 2 各指标主成分因子载荷散点图

Fig.2 Factor loading plots of indices

2.3 土壤重金属来源解析

本文得出 Pb-Cu-Cd、Hg-As 具有很强的相关性

险增加的主要原因应该是地膜的使用和农业灌溉,而迅猛发展的道路交通则成为土壤 Cu、Pb 风险增加的主要原因。Hg、As 这 2 种元素通常被视为燃煤和垃圾燃烧的标志元素^[39-40]。Nicholson 等^[34]研究也认为 85% 的 Hg 和 55% ~ 77% 的 As 来自于大气沉降。结合霍霄妮等^[37]通过建立多尺度空间结构模型分析重金属空间分布,认为造成北京市农业重金属 Hg、As 含量较高的原因首要为采矿和垃圾处理等,故可判断其二者污染源主要为燃煤等大气污染所致。

在 21 世纪初的研究表明,土壤 Cr 受人为活动控制程度较小,其变化主要受岩石风化和侵蚀的影响^[32,41];但近几年有学者也在提到除自然来源外,人为的输入也对 Cr 产生了一定影响^[35]。而霍霄妮等^[15]在对北京市农业土壤重金属状态评价中提到,

Cr 来自于化肥尤其是磷肥的施用和污水灌溉。本文与霍霄妮都一致得出土壤 Cr 污染程度为最高,故可推断本研究区 Cr 的复合污染是由人类的生活和农业活动造成的;所以城乡交错区土壤重金属污染的多源性值得注意^[42]。

2.4 土壤重金属环境质量评价分析

表 7 表明,6 种重金属元素中:Cr 的单项环境质量指数较差,达到中-重度累积污染水平的样点数占总数的 41.9%;Hg 状况次之,达到中-重度污染的样点数占 25.7%;虽然有 59.4% ~ 73.0% 样点中的 Cu、As 和 Cd 含量处于轻度累积污染状态,但还有 6.7% 和 14.9% 样点的 Cu、Cd 达到中-重度的污染水平;Pb 单项环境质量指数较好,清洁-尚清洁的样点数占 77.0%。6 种重金属综合环境质量指数在 1.65 ~ 3.95 之间,平均值为 2.69。

表 7 土壤中重金属累积污染等级的样品数量

Tab. 7 Sample number of heavy metal's cumulative pollution grade in soils

分级	环境质量指数	污染等级	每级样品个数					
			Cu	Cr	As	Cd	Pb	Hg
1	$P \leq 0.7$	清洁	2	0	4	2	16	19
2	$0.7 < P \leq 1.0$	尚清洁	14	0	16	17	41	15
3	$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染	53	43	54	44	16	21
4	$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染	2	28	0	5	1	5
5	$P > 3.0$	重度污染	3	3	0	6	0	14

注:污染等级划分标准对单项和综合环境质量指数都适用。

本文对 5 区重金属的累积情况做了进一步对比分析,以期达到对污染地区的重点区域化监管。其结果(图 3)表明:6 种重金属在 5 区都有一定的积累,其中 As、Cu、Cr、Hg 在海淀平均累积污染程度最高,达到 1.25、1.67、2.44、3.13;Cd 在昌平最高,为 2.33;5 区土壤 Pb 的平均含量几乎都接近于背景值,但在昌平地区,部分样点中的最大累积指数可达 2.00 以上;顺义的累积指数较其他地方相对较低,其中 As、Pb、Hg 均低于背景值。

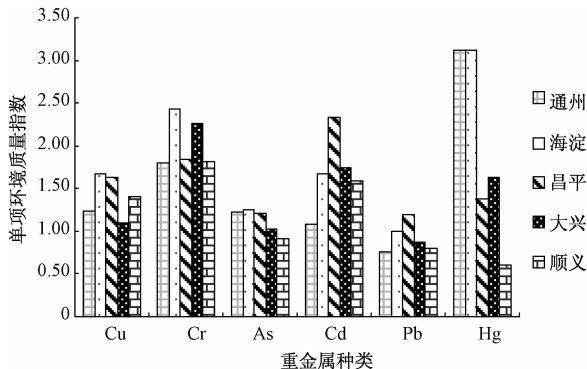


图 3 重金属在 5 区的累积污染程度

Fig. 3 Accumulative degree of soil heavy metals in five districts

2.5 土壤重金属潜在生态风险评价

表 8 表明,6 种重金属单污染物潜在生态风险

指数依次为: $Hg > Cd > As > Cu > Pb > Cr$, 其中 Cu、Cr、As、Pb 的风险指数最低,74 个样点中 4 种重金属含量均处于无潜在风险水平;土壤 Cd 含量潜在生态风险相对较大,32.43% 的样点处于一般潜在风险水平,10.81% 处于中等-较高等级水平;和其他 5 种土壤重金属相比,土壤 Hg 的潜在风险最高,处于中等-较高等级水平的样点占有率达到 22.97%,甚至有 2.70% 的样点处于极高潜在风险水平。

对综合潜在生态风险指数分析(表 9)表明,大部分采样点土壤处于无风险或一般风险状态,但也有 1/6 的样点达到中等潜在风险水平,这部分采样点的分布大都集中在海淀、通州、昌平 3 区,其顺序为海淀 > 通州 > 昌平 > 大兴 > 顺义。这与杨世琦等^[43]的研究结论相吻合,即最大贡献区段均出现在经济发达的城市郊区。

对 74 个样点逐点比较分析可以发现,土壤重金属的高累积污染和高风险潜在在威胁区都集中在经济相对发达的海淀、通州、大兴和昌平等城郊结合部,由于紧靠市区,城市化水平较高,区域内的人口和工业区密集,工厂三废、生活垃圾较多,同时受交通影响较大,从而导致上述 4 个地区耕作土壤中重金属累积污染程度较高,污染潜在威胁较大。而顺义人

口密度和工业相对较少,且企业多以电子和食品加工类为主,受交通影响也相对较小;因此无论是土壤重金属累积污染效应还是潜在污染威胁都相对较

低。故离城区较近的城乡结合区域要给以重点监测与治理。

表 8 土壤重金属单污染物潜在生态风险指数

Tab. 8 Potential ecological risk index of heavy metals

重金属种类	最低值	最高值	均值	样品频数分布				
				$E_i < 40$	$40 \leq E_i < 80$	$80 \leq E_i < 160$	$160 \leq E_i < 320$	$E_i \geq 320$
				无潜在风险	一般潜在风险	中等潜在风险	较高潜在风险	极高潜在风险
Cu	3.18	25.99	6.87	74	0	0	0	0
Cr	2.44	6.99	4.00	74	0	0	0	0
As	4.94	18.05	11.24	74	0	0	0	0
Cd	17.50	253.50	49.10	42	24	6	2	0
Pb	0.98	12.36	4.52	74	0	0	0	0
Hg	6.50	416.00	78.85	38	17	9	8	2

表 9 土壤重金属综合潜在生态风险指数

Tab. 9 Potential synthetic ecological risk index of heavy metals

潜在生态风险指数等级	$RI < 150$	$150 \leq RI < 300$	$300 \leq RI < 600$	$RI \geq 600$
程度	无风险	一般风险	中等风险	极高风险
点数	47	14	13	0
比例/%	63.51	18.92	17.56	0

3 结 论

1) 北京近郊耕作土壤中 Cu、Cr、As、Cd、Pb 和 Hg 的平均含量分别为 25.69、59.62、7.97、0.20、22.26 和 0.16 mg/kg。土壤中 6 种重金属含量均低于国家《土壤环境质量标准》二级标准,土壤环境质量良好,符合无公害农业生产标准;但土壤中 6 种重金属含量都存在相当程度的变异,Cr 和 As 的变异系数最大。

2) 土壤中 Pb-Cu-Cd、Hg-As 有极大的同源可能性,而土壤中 Cr 的异源性表现明显。土壤重金属的污染来源不仅来自耕作、管理措施、种植制度等农业活动,同时受到城市化进程的强烈影响,如汽车尾气、农业灌溉、地膜的使用、大气沉降、采矿活动及其他人类活动。

3) 通过环境质量评价分析,从单因子环境质量指数来看,6 种土壤重金属都表现出一定程度的累积效应。其中土壤 Cr 累积程度最大,近 42% 的土壤达到中-重度累积污染水平,但土壤 Pb 状况良好,77% 土壤仍处于清洁-尚清洁状态。

4) 土壤中 Cu、Cr、As 和 Pb 的含量均处于无潜在风险水平,但 Cd 和 Hg 的潜在风险较高。其中 Hg 在海淀区有样点含量处于极高潜在风险水平,17% 左右土壤样点的综合潜在生态风险指数已达到中等潜在风险水平。

5) 土壤重金属的高累积污染和高风险潜在威胁区都集中在经济相对发达的海淀、通州、昌平。应

提前采取规避风险措施,并给以重点监测与治理。

6) 本文和部分已有的相关研究^[15-16]分析表明,土壤中 Hg 的潜在生态危害程度最高。目前,针对北京市土壤 Hg 开展的风险评价主要依据是《环境背景值数据手册》,该手册是在 20 世纪 80 年代全国范围内开展的背景值调查研究的基础上颁布的。有学者^[21]认为,由于种种限制,该研究在北京市仅采集 40 个样品,过低的样品数会导致评价过程中很多问题出现。土壤中的 Hg 毒性较高,污染后产生的危害较大,是重点监测和掌控的重金属元素;因此为能够给今后科研和生产提供准确和可靠的信息,对北京地区土壤 Hg 背景值的进一步调查是十分必要的。

参 考 文 献

- [1] STAGLINI W, MDOELMAN P, SALOMONS W. Chemical time bombs: predicting the unpredictable[J]. Environment, 1991, 33: 4-30.
- [2] KONSTERN C J M. Summary of the workshop on delayed effects of chemical in soils and sediments (chemical time bombs) with emphasis the Scandinavian region [J]. Applied Geochemistry, 1993, 12: 295-299.
- [3] KAISER J. Toxicologists shed new light on old poisons [J]. Science, 1998, 279: 1850-1851.
- [4] MARKUS J A, MCBRANTHEY A B. A review of the contamination of soil with lead (II): Spatial distribution and risk assessment of soil lead[J]. Environment International, 2001, 27: 399-411.
- [5] 郑国璋. 泾河流域农业土壤重金属污染调查与评价[J]. 干旱区研究, 2008, 25(5): 626-630.
- [6] 孟飞, 张建, 单宝艳. 上海浦东新区农田土壤重金属空间结构及分布特征[J]. 自然资源学报, 2009, 24(2): 218-224.
- [7] NICHOLS F A, SMITH S R, ALLOWAY B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. The Science of the Total Environment, 2003, 311: 205-219.
- [8] COLGAN A, HANKARD P K, SPURGEON D J, et al. Closing

- the loop: A spatial analysis to link observed environmental damage to predicted heavy metal emissions[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, 22:970-976.
- [9] MARTIN J A R, ARIAS M L, CORBI J M G. Heavy metals contents in agricultural top soils in the Erbo Bsin (Spain): Application of the multivariate geostatistical methods to study spatial variations[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144:1001-1012.
- [10] SODERSTROM M. Modeling local heavy metal distribution: A study of chromium in soil and wheat at ferrochrome smelter in south western Sweden[J]. *Acta Agriculture Scandinavia*, 1998, 48:2-10.
- [11] GIL C, BOLUDA R, RAMOS J. Determination and evaluation of cadmium, lead and nickel in greenhouse soils of Almeria (Spain) [J]. *Chemosphere*, 2004, 55:1027-1034.
- [12] BRUS D J, GRUIJTER J J, WALVOORT D J J, et al. Mapping the probability of exceeding critical thresholds for cadmium concentrations in soil in the Netherlands [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 32:1875-1884.
- [13] ZHAO Y F, SHI X Z, HUANG B, et al. Spatial distribution of heavy metals in agricultural soils of an industry-based periurban area in Wuxi, China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17 (1):44-51.
- [14] HU K L, ZHANG F R, LI H, et al. Spatial patterns of soil heavy metals in urban-rural transition zone of Beijing[J]. *Pedosphere*, 2006, 16 (6):690-698.
- [15] 霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 等. 北京市农业土壤重金属状态评价[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28 (1):66-71.
- [16] 姜菲菲, 孙丹峰, 李红, 等. 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8):330-337.
- [17] 胡克林, 张凤荣, 吕贻忠, 等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(3): 463-468.
- [18] 夏家洪, 蔡道基, 夏增禄, 等. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京:中国标准出版社, 1995.
- [19] 石宁宁, 丁艳锋, 赵秀峰, 等. 某农药工业园区周边土壤重金属含量与风险评价[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1835-1843.
- [20] LOSKA L, WIECHULA D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metals contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir[J]. *Chemosphere*, 2003, 51:723-733.
- [21] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. *环境科学*, 2004, 25(1):117-122.
- [22] 李健, 郑春江. 环境背景值数据手册[S]. 北京:中国环境科学出版社, 1988:55.
- [23] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范[S]. 北京:中国环境出版社, 2004: 24-25.
- [24] 姚志麒. 关于采用环境质量指数的几个问题[J]. *环境科学*, 1979(2):37-45.
- [25] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2002, 15(5):33-37.
- [26] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2):112-115.
- [27] 霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 等. 北京耕作土壤重金属含量的空间自相关分析[J]. *环境科学学报*, 2009, 29 (6): 1339-1344.
- [28] 宁晓波, 项文化, 方晰, 等. 贵阳花溪区石灰土林地土壤重金属含量特征及其污染评价[J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 2169-2177.
- [29] 许中坚, 吴灿辉, 刘芬, 等. 典型铅锌冶炼厂周边土壤重金属复合污染特征研究[J]. *湖南科技大学学报:自然科学版*, 2007, 22(1):111-114.
- [30] 石宁宁, 丁艳锋, 赵秀峰, 等. 某农药工业园区周边土壤重金属含量与风险评价[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1835-1843.
- [31] 杨忠平, 卢文喜, 刘新荣, 等. 长春市城区表层土壤重金属污染来源解析[J]. *城市环境与城市生态*, 2009, 22(5): 29-33.
- [32] 朱先芳, 唐磊, 季宏兵, 等. 北京北部水系沉积物中重金属的研究[J]. *环境科学学报*, 2010, 30 (12):2553-2562.
- [33] 路远发, 杨红梅, 周国华, 等. 杭州市土壤铅污染的铅同位素示踪研究[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(3): 355-362.
- [34] 杨洁, 蔡休久, 汪群慧, 等. 直接与间接生物淋滤法去除城市生活垃圾焚烧飞灰中重金属的研究[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(增刊1):267-271.
- [35] 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 等. 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*, 2005, 20(5): 690-696.
- [36] 成世才, 士兵, 郭加朋, 等. 山东省鱼台水稻生产基地土壤镉分布现状及来源分析研究[J]. *科技情报开发与经济*, 2009, 19(31):130-133.
- [37] 霍霄妮, 李红, 孙丹峰, 等. 北京耕地土壤重金属空间自回归模型及影响因素[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 78-82.
- [38] 刘俊华. 北京市汞污染的特征初步研究[D]. 北京:中国科学院生态研究中心, 1997.
- [39] 方凤满, 王起超, 李东侠, 等. 长春市大气颗粒汞及其干沉降通量[J]. *环境科学*, 2001, 22(2): 60-63.
- [40] 方凤满, 王起超, 李东侠, 等. 长春市大气颗粒汞污染特征及影响因子分析[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(3): 368-372.
- [41] 葛晓立, 刘晓端, 潘晓川, 等. 密石水库水体的地球化学特征[J]. *岩矿测试*, 2003, 22 (1):44-48.
- [42] 赵彦锋, 史学正, 于东升, 等. 工业型城乡交错区农业土壤Cu、Zn、Pb和Cd的空间分布及影响因素研究[J]. *土壤学报*, 2007, 44(2): 227-234.
- [43] 杨世琦, 刘国强, 张爱平, 等. 典型区域果园表层土壤5种重金属累积特征[J]. *生态学报*, 2010, 30(22): 6201-6207.

(责任编辑 李 掣)