

北京顺义区土壤重金属分布与环境质量评价

韩平^{1,2}, 王纪华^{1,2*}, 陆安祥^{1,2}, 马智宏^{1,2}, 潘立刚^{1,2}

(1.北京农产品质量检测与农田环境监测技术研究中心, 北京 100097; 2.国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要:在北京顺义区采集了 412 份土壤表层样品,分析了其中 7 种重金属元素(Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As 和 Hg)的全量,采用单因子指数和内梅罗指数对土壤环境质量进行评价。结果表明,土样中 As、Cd、Cr、Hg、Cu、Pb 和 Zn 含量平均值分别为 7.85、0.136、61.47、0.073、22.43、20.38 mg·kg⁻¹ 和 69.75 mg·kg⁻¹, As、Cd、Cr、Cu 和 Zn 含量平均值超过了北京地区环境背景值,但所有元素含量的平均值均未超出土壤环境质量一级标准。土壤中各重金属元素含量 Shapiro-Wilk 检验和相关性检验结果表明,研究区土壤中重金属 Cr 呈正态分布,Cd、Cr、Cu、Pb 元素与 As 元素相关性显著。土壤各元素单因子污染指数排序为 Zn>Cr>Cd>Cu>Pb>As>Hg,内梅罗综合污染指数平均值为 0.745,达到了土壤环境质量评价分级标准 II 级,污染等级为“警戒线”级;菜地、果园、荒地、林地、苗圃、设施农业用地和水浇地的土壤内梅罗指数分别为 0.809、0.765、0.720、0.669、0.781、0.786 和 0.729,表现为菜地>设施农业>苗圃>果园>水浇地>荒地>林地。土壤环境质量总体安全,部分地区土壤重金属污染处于警戒水平。

关键词:北京顺义;土壤;重金属;分布;环境质量评价

中图分类号:X825 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)01-0106-07

Distribution and Environment Quality Evaluation of Heavy Metals in Soil in Shunyi of Beijing, China

HAN Ping^{1,2}, WANG Ji-hua^{1,2*}, LU An-xiang^{1,2}, MA Zhi-hong^{1,2}, PAN Li-gang^{1,2}

(1.Beijing Research Center for Agrifood Testing and Farmland Monitoring, Beijing 100097, China; 2.National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Concentration of 7 heavy metals in 412 topsoil samples collected from Shunyi district of Beijing were determined, and the data were analyzed for the soil environment quality assessment by the single factor index and the Nemerow index. The results showed that average concentration of As, Cd, Cr, Hg, Cu, Pb and Zn were 7.85 mg·kg⁻¹, 0.136 mg·kg⁻¹, 61.47 mg·kg⁻¹, 0.073 mg·kg⁻¹, 22.43 mg·kg⁻¹, 20.38 mg·kg⁻¹ and 69.75 mg·kg⁻¹, respectively. Average concentration of As, Cd, Cr, Cu and Zn exceeded background value of Beijing area. At the same time, all heavy metals concentration were modestly below soil environmental quality standard class I. A Shapiro-Wilk test was employed for the distribution test of soil heavy metals. It was found that Cr concentrations were in normal distribution. Relationship between soil heavy metal concentrations were analyzed. Cd, Cr, Cu and Pb were significantly correlated with As. The soil environment quality was assessed by single factor pollution index and Nemerow indices of heavy metals. The order of single factor index was Zn, Cr, Cd, Cu, Pb, As, Hg in decreasing. Average Nemerow index of soil was 0.745. This value was reached to the II grade standard of soil environmental quality assessment classification. The Nemerow indices of soil in vegetable field, fruit field, bare land, woodland, tree nursery, greenhouse and irrigable land were 0.809, 0.765, 0.720, 0.669, 0.781, 0.786 and 0.729, respectively. Most of the soil environment quality was at safe level and the pollution of heavy metal for some areas was at the alert level.

Keywords: Shunyi of Beijing; soil; heavy metal; distribution; environment quality assessment

土壤是一种形态和演化过程都十分复杂的历史

自然综合体。土壤属性的空间分布特征是土壤污染治理、土地管理和现代农业的重要依据之一^[1]。在自然情况下,土壤中重金属主要来源于母岩和残落的生物物质^[2]。随着城市化进程及工业的迅速发展,矿山开采、工业生产、交通运输、污水灌溉、有机肥、化肥和农药施用等人类活动,均能直接或间接造成重金属在农田土壤中的累积^[3-7]。土壤中重金属的富集可以形成环境

收稿日期:2011-05-18

基金项目:农业部引进国际先进农业科学技术重点项目(2011-G5-8);
国家科技支撑计划项目(2011BAD04004)

作者简介:韩平(1981—),男,陕西蒲城人,助理研究员,主要从事农产品质量检测与农田环境监测技术研究。

E-mail: hanp@nercita.org.cn

* 通讯作者:王纪华 E-mail: wangjh@nercita.org.cn

污染,对动植物生长安全以及人体健康等构成直接危害^[8]。随着人们对农产品质量安全的关注,产地环境主要污染因子的筛查与评价已成为关注和研究的热点。陈同斌等^[9]对北京市土壤重金属含量背景值进行了系统研究,分析统计后提出了北京市土壤重金属砷、镉、铬、铜、镍、铅和锌的背景值,以此作为指导土壤重金属污染监测、评价与治理工作的基础^[10]。北京地区表层土壤重金属的多元地理统计分析已有相关报道^[11]。李晓秀等^[12]选取北京郊县有代表性的 45 处基本农田进行取样,分析了土壤中主要重金属和农药残留,对北京地区基本农田土壤环境质量进行分析与评价。区域尺度上,胡克林等^[13]在北京大兴区布设 70 个样点,测定了土壤中 10 种重金属含量并采用地统计学方法分析了土壤重金属含量的空间分布特征;付华等^[14]对北京南部地区包括通州、大兴、丰台和房山 4 区的农业土壤开展了重金属分布特征与评价的研究。

目前,关于北京顺义区土壤中重金属分析与评价还鲜有报道。本研究以北京顺义区为研究对象,对土壤中砷、汞、镉、铬、铜、铅和锌重金属元素含量进行测定,并进行重金属分布特征分析,进而按照国家相关标准对土壤环境质量进行评价。对于掌握该地区土壤重金属含量和污染状况,制定合理的重金属控制标准,适时调整农业种植结构具有重要指导作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

顺义位于北京东北部,城区距市中心 30 km,东西长 45 km,南北宽 30 km,总面积 1 021 km²。地处燕山南麓,华北平原北端,属潮白河冲积扇下段。平原面积占 95.7%。地势北高南低,北部山地最高点海拔 637 m,平均海拔 35 m。境内有大小河流 20 余条,分属北运河、潮白河、蓟运河 3 个水系,河道总长 232 km。气候属暖温带半湿润大陆性季风性气候,年平均气温为 11.5 ℃,年日照 2 750 h,无霜期 195 d 左右。年均相对湿度 50%,年均降雨量约 625 mm,为华北地区降水量较均衡的地区之一,全年降水的 75%集中在夏季。2004 年统计数据显示农业人口 36.4 万人,全区农业用地面积 6.36 万 hm²,其中耕地 3.35 万 hm²,园地 0.8 万 hm²,林地 1.1 万 hm²,其他农用地 1.03 万 hm²。

1.2 样品采集与分析

土壤样品于 2009 年 10 月采集。本次取样采用 GPS 精确定位,样点的布局和采样点数根据田块的利用方式和面积进行确定,全区共布设了 412 个采样点(图 1)。采样点主要分布于水浇地(小麦、玉米)、果园、苗圃、菜地、设施农业用地、林地以及荒地等田块。

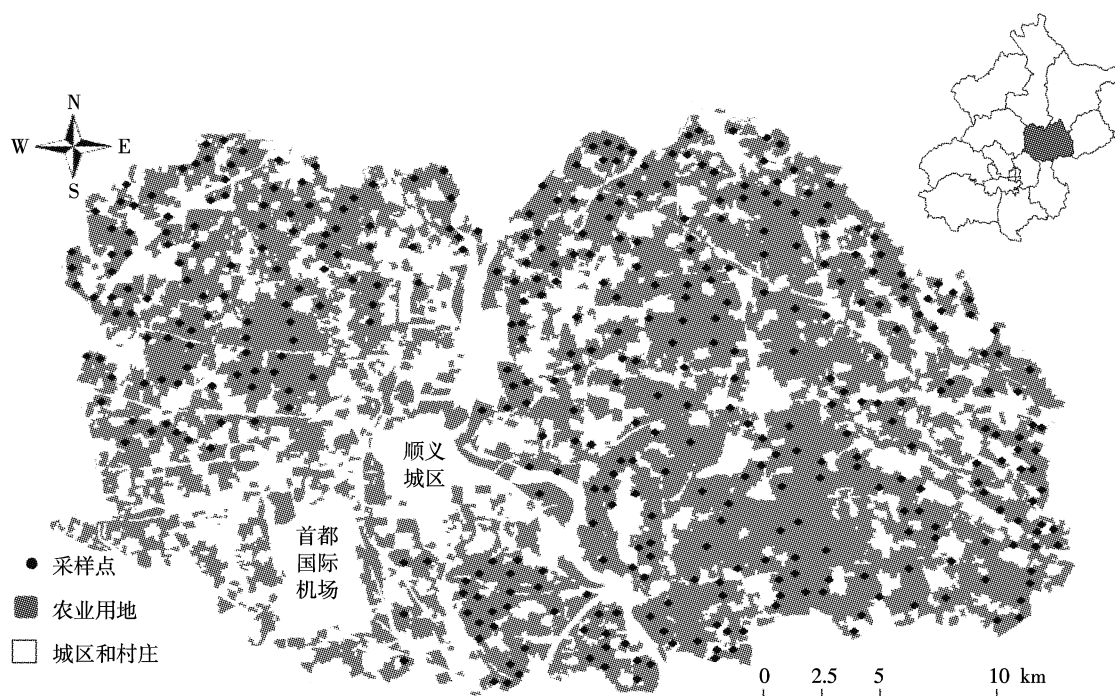


图 1 研究区采样点分布

Figure 1 Distribution of samples sites on study area

每个样点在直径 10 m 范围内选择 3~5 个 0~20 cm 耕层土壤混合,按四分法取分析样品 1.0 kg。土壤在室内风干,磨碎,过 100 目尼龙网筛用来测定各重金属元素(Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As、Hg)。样品的混合、装袋、研磨等前处理都采用木材、陶瓷或玛瑙用具。土壤样品土壤重金属各项的分析测定按照国家标准方法执行。样品测定采用 20%样品平行样,并加入国家标准土壤样品(GSS-1)作为质量控制样品,质控样品相对误差小于 10%。

1.3 土壤环境质量评价

根据相关国家标准和行业标准,选取重金属 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As 和 Hg 作为土壤环境质量评价指标。使用国家土壤环境质量标准来评价研究区域的土壤环境质量。

单因子评价采用如下公式^[15]:

$$p_i = \begin{cases} C_i/C1 & 0 < C_i \leq C1 \\ 1 + (C_i - C1)/(C2 - C1) & C1 < C_i \leq C2 \\ 2 + (C_i - C2)/(C3 - C2) & C2 < C_i \leq C3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_i 为第*i*种污染物的单因子指数; C_i 为第*i*种污染物的测定值; $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$ 分别为国家土壤环境质量标准的一级、二级和三级标准值。

综合土壤环境质量评价采用内梅罗综合指数法^[15]:

$$p = \sqrt{\frac{(p_i)^2 + (p_{i\max})^2}{2}} \quad (2)$$

式中: p 为环境质量综合评价指数; P_i 为第*i*种污染物的单因子指数; $p_{i\max}$ 为最严重污染物的单因子指数。

这种方法的计算结果不仅考虑各种污染物的平均污染水平,也反映了污染最严重的污染物给环境造

成的危害^[16]。土壤环境质量评价分级标准见表 1。

表 1 土壤环境质量评价分级标准

Table 1 Classification standards of soil environmental quality			
等级划分	p	污染等级	污染水平
I	$p \leq 0.7$	安全	非污染,清洁
II	$0.7 < p \leq 1$	警戒线	非污染,尚清洁
III	$1 < p \leq 2$	轻污染	土壤轻污染,作物已受污染
IV	$2 < p \leq 3$	中度污染	土壤、作物均受中度污染
V	$p > 3$	重度污染	土壤、作物均受重度污染

1.4 数据处理

所有数据的统计分析采用 SPSS 18.0 和 Excel 2003 进行,土壤环境质量等级分布图的制作通过 ArcGIS 9.2 完成。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤重金属分布特征

研究区土壤重金属基本参数统计描述如表 2 所示。结果表明,土壤样本中 As、Cd、Cr、Hg、Cu、Pb 和 Zn 含量平均值分别为 7.85、0.136、61.47、0.073、22.43、20.38 mg·kg⁻¹和 69.75 mg·kg⁻¹,As、Cd、Cr、Cu 和 Zn 含量平均值超过了北京地区环境背景值,但所有元素含量的平均值均未超出土壤环境质量一级标准。全区 412 份土壤样品中,各重金属元素含量超出土壤环境质量一级标准的比例为 0.24%~10.19%,其中 Cr 和 Pb 超标率最低,Cd 超标率最高。各重金属元素含量最大值分别是最小值的 2.88~122.5 倍,Hg 元素含量最大值与最小值差距最大,Cr 元素含量最大值与最小值差距最小。研究区 7 种重金属的变异系数

表 2 顺义区土壤重金属基本参数统计描述

Table 2 Descriptive statistics parameters of soil heavy metals in Shunyi($n=412$)

项目	As	Cd	Cr	Hg	Cu	Pb	Zn
平均值/mg·kg ⁻¹	7.85	0.136	61.47	0.073	22.43	20.38	69.75
95%置信区间/mg·kg ⁻¹	7.64~8.06	0.130~0.142	60.57~62.37	0.068~0.077	21.82~23.04	19.88~20.89	68.15~71.36
北京地区背景值/mg·kg ⁻¹	7.81	0.119	29.80	0.080	18.70	24.60	57.50
土壤环境一级标准/mg·kg ⁻¹	15	0.20	90	0.15	35	35	100
超出土壤环境一级标准比例/%	0.73	10.19	0.24	5.58	3.64	0.24	3.88
标准偏差/mg·kg ⁻¹	2.13	0.061	9.32	0.049	6.31	5.20	16.57
变异系数	0.27	0.449	0.15	0.674	0.28	0.26	0.24
最小值/mg·kg ⁻¹	3.37	0.015	32.86	0.004	11.80	10.33	20.02
最大值/mg·kg ⁻¹	17.34	0.469	94.67	0.490	72.48	37.48	136.68
峰度	1.111	2.000	0.144	3.033	2.477	0.183	0.644
偏度	2.309	6.360	0.123	19.061	12.323	-0.479	2.309
S-W 检验 P 值	0	0	0.056	0	0	0.002	0

在 0.150~0.674 范围内,变异程度属于中等。Cr 元素变异程度最小,表明在整个研究区域其含量相对比较均一。土壤样品中 Hg 元素变异程度最大,表明其受外界因子干扰尤其是人为活动影响最大。

As 含量在 5~10 mg·kg⁻¹ 浓度范围土壤样本占到总体样本的 89.0%;Cd 含量在 0.05~0.20 mg·kg⁻¹ 浓度范围土壤样本占到总体样本的 87.6%;Cr 含量在 50~75 mg·kg⁻¹ 浓度范围土壤样本占到总体样本的 81.1%;Hg 含量在 0.02~0.10 mg·kg⁻¹ 浓度范围土壤样本占到总体样本的 75.5%;Cu 含量在 15~30 mg·kg⁻¹ 浓度范围土壤样本占到总体样本的 85.7%;Pb 含量在 15~30 mg·kg⁻¹ 浓度范围土壤样本占到总体样本的 81.6%;Zn 含量在 50~80 mg·kg⁻¹ 浓度范围土壤样本占到总体样本的 75.0%。

Shapiro-Wilk 非参数检验($P<0.05$)表明,只有 Cr 元素呈正态分布,其他元素均不服从正态分布而呈正偏态分布,表明这些元素均出现升高值,这些含量值的升高来自自然富集积累或者来自人为活动。

对各重金属元素之间的线性关系进行了相关性检验。在 0.05 和 0.01 显著性水平,所有变量间皮尔逊相关系数如表 3 所示。As 与 Cd、Cr、Cu、Pb 之间存在显著正相关性,表明 As 和 Cd、Cr、Cu、Pb 之间紧密相关;Zn 与 Cd、Cr、Cu 之间存在显著正相关性;Hg 与 Cd、Cu 之间存在显著正相关性。

2.2 研究区土壤环境质量评价

研究区土壤重金属单因子污染指数与内梅罗综合污染指数如表 4 所示。研究结果表明,研究区土壤中重金属 As、Cd、Cr、Hg、Cu、Pb 和 Zn 单因子污染指数的平均值分别为 0.524、0.662、0.683、0.468、0.636、0.582 和 0.694。按照土壤环境质量评价分级标准均属于“安全”等级。重金属元素 Cd 和 Hg 单因子污染指数达到轻度污染水平的分别占总采样点个数的 10.19%和 5.58%;重金属元素 Cr 和 Pb 单因子污染指

表 3 土壤重金属皮尔逊相关系数
Table 3 Pearson correlation coefficients of soil heavy metals($n=412$)

	As	Cd	Cr	Hg	Cu	Pb	Zn
As	1						
Cd	0.256**	1					
Cr	0.169**	0.137**	1				
Hg	0.017	0.149**	-0.015	1			
Cu	0.200**	0.290**	0.027	0.150**	1		
Pb	0.200**	0.033	0.037	0.075	0.134**	1	
Zn	0.052	0.125*	0.150**	0.039	0.467**	0.085	1

注:**0.01 水平相关显著性(双尾);*0.05 水平相关显著性(双尾)
数达到轻度污染水平的占 0.24%。按照单因子污染指数超出Ⅱ级水平的比例,研究区土壤重金属由高到低排序为: Cd>Hg>Zn>Cu>As>Cr>Pb; 处于Ⅰ级水平比例由高到低排序为: As>Hg>Pb>Cu>Cd>Zn>Cr。内梅罗综合污染指数考虑最大值对土壤环境质量的影响。研究区土壤环境内梅罗综合污染指数达到了 0.745, 达到土壤环境质量评价分级标准中的Ⅱ级水平(“警戒线”级)。412 份土壤样品中内梅罗综合污染指数处于Ⅰ级水平的占总采样点个数的 43.45%, 处于Ⅱ级水平的占 51.70%, 处于Ⅲ级水平的受到轻度污染的占 4.85%。

依据土壤重金属内梅罗综合污染指数,采用软件 ArcGIS 中反距离方法,对研究区域进行插值,得到土壤环境质量等级空间分布如图 2 所示, 图中颜色越浅, 土壤综合污染指数越小, 土壤环境质量越好,反之,颜色越深,土壤环境质量相对越差。研究区土壤环境质量共分为Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级。其中Ⅰ级和Ⅱ级土壤占主导,Ⅲ级土壤有零星分布。结果表明,研究区土壤环境质量虽有一定程度的轻度污染,但总体质量安全。应严格控制人为因素引进重金属污染土壤,特别是 Cd 和 Hg 元素。

2.3 研究区不同土地利用类型土壤环境质量评价

研究区不同土地利用类型土壤重金属单因子指

表 4 研究区土壤重金属单因子指数与内梅罗指数($n=412$)
Table 4 Single factor index and Nemerow index of heavy metals in soil of study area($n=412$)

项目	单因子指数(p_i)							内梅罗指数(p)
	As	Cd	Cr	Hg	Cu	Pb	Zn	
平均值	0.524	0.662	0.683	0.468	0.636	0.582	0.694	0.745
变异系数	0.275	0.374	0.151	0.549	0.251	0.254	0.225	0.181
范围	0.224~1.234	0.077~1.672	0.365~1.029	0.024~1.400	0.337~1.577	0.295~1.008	0.200~1.183	0.478~1.337
所属环境质量等级比例/%	Ⅰ	90.77	66.27	55.10	81.56	76.21	77.43	55.83
	Ⅱ	8.50	23.54	44.66	12.86	20.15	22.33	40.29
	Ⅲ	0.73	10.19	0.24	5.58	3.64	0.24	3.88

数与内梅罗指数如表 5 所示。结果表明,菜地、果园、荒地、林地、苗圃、设施农业和水浇地的内梅罗指数分别为 0.809、0.765、0.720、0.669、0.781、0.786 和 0.729,表现为菜地>设施农业>苗圃>果园>水浇地>荒地>林地。其中,菜地土壤内梅罗指数最大,与其他土地利用类型相比,其土壤环境质量较差,达到了土壤环境质量评价分级标准Ⅱ级,污染等级为“警戒线”级;林地土壤内梅罗指数最小,其土壤环境质量较好,处于土壤环境质量评价分级标准Ⅰ级,污染等级为“安全”

级。菜地土壤内梅罗指数变异系数最大,达到了0.207,变异程度属中等。菜地土壤中 Zn、Cd、Cu 和 Cr 单因子指数较高;果园土壤中 Zn 和 Cr 单因子指数较高;设施农业土壤中 Zn 和 Cu 单因子指数较高;其他土地利用类型土壤重金属单因子指数平均值均小于 0.7。苗圃土壤中 Cd 元素单因子指数变异系数最高,达到了中等变异水平;除苗圃土壤外,菜地、果园、荒地、林地和设施农业用地土壤中 Hg 元素单因子指数变异系数最高,达到了中等变异水平。

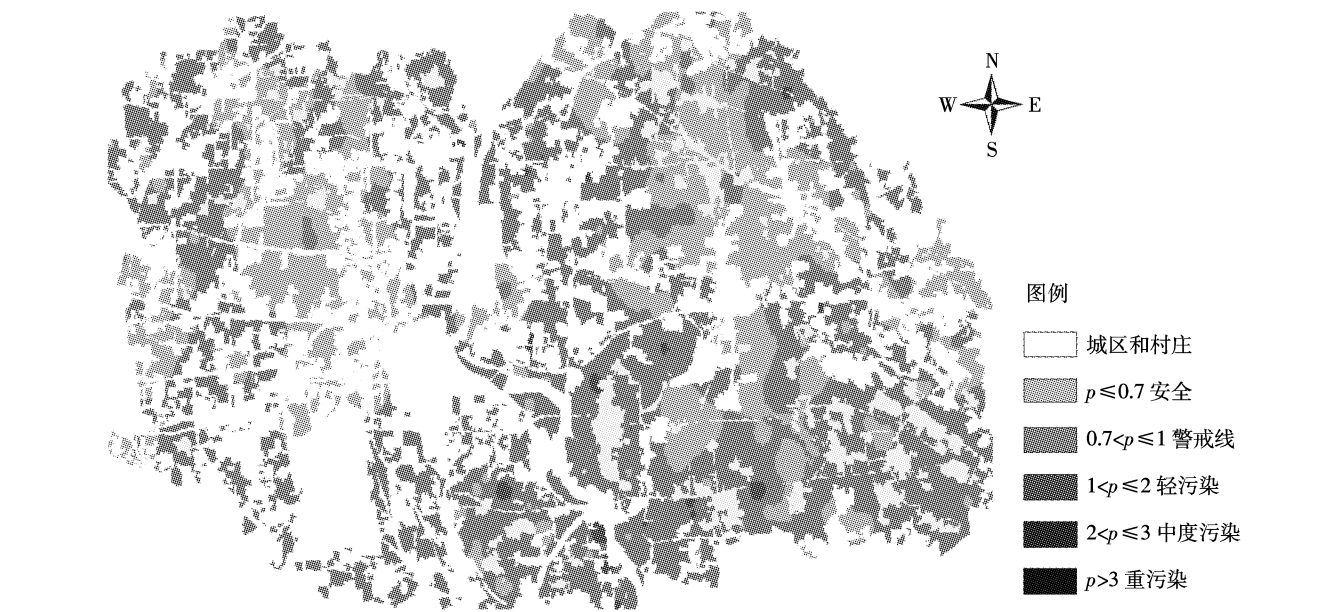


图 2 研究区土壤环境质量等级分布

Figure 2 Distribution of soil environment quality grades of study area

表 5 不同土地利用类型土壤重金属单因子指数与内梅罗指数

Table 5 Single factor index and Nemerow index of heavy metals of different land use types

土地利用类型		单因子指数(p_i)							内梅罗指数 (p)
		As	Hg	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	
菜地($n=41$)	平均值	0.494	0.591	0.721	0.778	0.558	0.702	0.754	0.809
	变异系数	0.277	0.410	0.255	0.233	0.253	0.159	0.398	0.207
果园($n=61$)	平均值	0.529	0.419	0.682	0.730	0.596	0.708	0.618	0.765
	变异系数	0.266	0.618	0.335	0.222	0.233	0.157	0.355	0.165
荒地($n=13$)	平均值	0.554	0.540	0.625	0.659	0.565	0.694	0.642	0.720
	变异系数	0.142	0.509	0.313	0.169	0.367	0.132	0.258	0.161
林地($n=17$)	平均值	0.459	0.391	0.606	0.647	0.567	0.645	0.543	0.669
	变异系数	0.212	0.411	0.294	0.243	0.193	0.157	0.347	0.161
苗圃($n=30$)	平均值	0.567	0.565	0.660	0.681	0.595	0.671	0.667	0.781
	变异系数	0.360	0.366	0.205	0.251	0.250	0.144	0.464	0.197
设施农业($n=13$)	平均值	0.432	0.476	0.729	0.739	0.677	0.692	0.677	0.786
	变异系数	0.224	0.515	0.301	0.236	0.243	0.160	0.412	0.196
水浇地($n=237$)	平均值	0.530	0.449	0.604	0.675	0.578	0.676	0.665	0.729
	变异系数	0.268	0.584	0.190	0.212	0.257	0.148	0.360	0.172

3 讨论

Zheng Y M 等^[11]在整个北京地区采集土壤样本 700 余份,对土壤重金属元素进行了分析测定,本研究结果中除 Cr 元素外,其他元素平均值与其没有明显差异。本研究中 Cr 元素含量平均值为 $61.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与文献 [17] 报道的 Cr 含量平均值 $68.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相近,远高于陈同斌等^[9]的研究结果($29.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。这可能与采样点位置有一定关系,陈同斌等主要是针对土壤重金属背景值的研究,采样点主要分布在林地与荒地等受人为因素干扰较小地区。另外,研究区 Cr 元素变异程度最小,在整个区域其含量相对比较均一,统计检验显示呈正态分布,表明受人为干扰或自然累积而导致 Cr 元素含量升高的可能性较小。基于以上分析,作者认为对于北京地区 Cr 背景值需要进一步探讨。

土壤中 Cd 和 Hg 元素单因子指数达到“轻度污染级”的比例最大,表明 Cd 和 Hg 在该地区表现出明显的污染特征。土壤中 Hg 来源主要包括 4 个途径:母岩;大气 Hg 的干湿沉降;污水灌溉和污泥利用;农药和化肥中的 Hg^[18]。Chen 等^[19]研究了北京市土壤中的 Hg 含量,认为大气扩散是北京周边土壤中 Hg 的主要来源。Nicholson 等^[20]通过收集重金属在土壤中的累积和工农业重金属的排放信息,调查分析了英格兰和威尔士的农田土壤中重金属来源,Cd 更多的来源于无机肥料。据估计,在人类活动对土壤 Cd 的贡献中,磷肥施用占 54%~58%^[21]。

研究区不同农业利用方式条件下土壤重金属内梅罗指数表现为菜地>设施农业>苗圃>果园>水浇地>荒地>林地。以上结果与白玲玉等^[22]对吉林省四平市部分区域不同农业利用方式条件下土壤重金属累积的研究结果相似。土地利用方式对土壤中重金属累积具有明显影响,不同重金属在不同种植方式下累积效应不尽相同。北京地区土壤中 Cd 平均含量由高到低依次为:菜地>稻田>果园>自然土壤>麦地>绿化地^[23];Pb 为:绿化地>果园>菜地>稻田>自然土壤>麦地^[24];As 为:稻田>绿化地>菜地>果园>麦地>自然土壤^[25]。沈根祥等^[26]以 20 世纪 80 年代初普查的上海市农田土壤重金属背景值为依据,分析了 20 年来上海菜地土壤中重金属污染累积状况,表明 Cd、Hg 和 Zn 在上海菜地土壤中累积效应显著。研究区水浇地和荒地相对受人为干扰因素影响较小,土壤重金属污染较小;菜地和设施农业用地作为集约化程度高,农业投入品较多,

人为影响较大的农业利用方式,外源重金属污染物累积的风险较大。对于农业用地中受重金属污染的地区要根据污染程度,适当调整种植结构,避免危害人类健康。另外,农业生产过程中应当避免施用重金属含量较高的化肥、有机肥和农药,而施用重金属含量低的优质农用物资,以减少重金属在土壤中的累积,最大限度地延长集约化利用土地的健康使用年限。

4 结论

对北京市顺义区土壤进行区域布点采样,共采集土壤表层样本 412 份。对土壤中重金属元素 Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、As、Hg 进行分析,其中 As、Cd、Cr、Cu 和 Zn 含量平均值超过了北京地区环境背景值,但所有元素含量的平均值均未超出土壤环境质量一级标准。研究区土壤中 Cr 元素含量呈正态分布,其他元素呈正偏态分布。土壤各元素单因子污染指数表现为 $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Hg}$; 内梅罗综合污染指数平均值为 0.745,达到了土壤环境质量评价分级标准 II 级,污染等级为“警戒线”级;土壤样品中内梅罗综合污染指数处于 I 级水平的占总采样点个数的 43.45%,处于 II 级水平的占 51.70%,处于 III 级水平的受到轻度污染的占 4.85%。菜地、果园、荒地、林地、苗圃、设施农业和水浇地的内梅罗指数分别为 0.809、0.765、0.720、0.669、0.781、0.786 和 0.729,表现为菜地>设施农业>苗圃>果园>水浇地>荒地>林地。研究区土壤环境质量总体安全,部分地区土壤重金属污染处于警戒水平。

参考文献:

- [1] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: State of the art and perspectives[J]. *Geoderma*, 1999, 89(1-2): 1-45.
- [2] 关 卉, 万洪富, 王洗民, 等. 雷州半岛土壤重金属分布特征及其污染评价[J]. *环境污染与防治*, 2006, 28(10): 757-760, 771.
GUAN Hui, WAN Hong-fu, WANG Xian-min, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in soil samples of Leizhou Peninsula[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2006, 28(10): 757-760, 771.
- [3] Yang Q W, Shu W S, Qiu J W, et al. Lead in paddy soils and rice plants and its potential health risk around Lechang Lead/Zinc Mine, Guangdong, China[J]. *Environment International*, 2004, 30(7): 883-889.
- [4] Voutsas D, Grimanis A, Samara C. Trace elements in vegetables grown in an industrial area in relation to soil and air particulate matter [J]. *Environmental Pollution*, 1996, 94(3): 325-335.
- [5] 李 波, 林玉锁, 张孝飞, 等. 宁连高速公路两侧土壤和农产品中重

- 金属污染的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):266-269.
- LI Bo, LIN Yu-suo, ZHANG Xiao-fei, et al. Pollution of heavy metals in soil and agricultural products on sides of Ning-Lian superhighway[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):266-269.
- [6] 杨 军, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市凉风灌区小麦重金属含量的动态变化及健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2005, 25(12):1661-1668.
- YANG Jun, CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, et al. Dynamic of heavy metals in wheat grains collected from the Liangfeng irrigated area, Beijing and a discussion of availability and human health risks [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(12):1661-1668.
- [7] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 311(1-3):205-219.
- [8] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients food issues[J]. *Field Crop Research*, 1999, 60:143-163.
- [9] 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.
- CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1):117-122.
- [10] 夏增禄, 李森照, 李延芳, 等. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京:气象出版社, 1987.
- XIA Zeng-lu, LI Sen-zhao, LI Yan-fang, et al. Background value of soil elements and research methods[M]. Beijing:China Meteorological Press, 1987.
- [11] Zheng Y M, Chen T B, He J Z. Multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoil from Beijing, China[J]. *Journal Soil Sediments*, 2008, 8(1):51-58.
- [12] 李晓秀, 陆安祥, 王纪华, 等. 北京地区基本农田土壤环境质量分析与评价[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2):60-63.
- LI Xiao-xiu, LU An-xiang, WANG Ji-hua, et al. Analysis and assessment of soil environmental quality of some farmlands in Beijing [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2):60-63.
- [13] 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.
- HU Ke-lin, ZHANG Feng-rong, LÜ Yi-zhong, et al. Spatial distribution of concentrations of soil heavy metals in Daxing county, Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(3):463-468.
- [14] 付 华, 吴雁华, 魏立华. 北京南部地区农业土壤重金属分布特征与评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1):182-185.
- FU Hua, WU Yan-hua, WEI Li-hua. Distribution and evaluation of heavy metals in agricultural soil in southern area of Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(1):182-185.
- [15] 李祚泳, 丁 晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- LI Zuo-yong, DING Jing, PENG Li-hong. Environment quality evaluation principle and methods[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2004.
- [16] 林成谷. 土壤污染与防治 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996:127-136.
- LIN Cheng-gu. Soil pollution and control[M]. Beijing:China Agriculture Press, 1996:127-136.
- [17] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990:330-382.
- China National Environmental Monitoring Centre. Soil element background values in China[M]. Beijing:China Environmental Science Press, 1990:330-382.
- [18] 王 新, 周启星. 土壤 Hg 污染及修复技术研究[J]. 生态学杂志, 2002, 21(3):43-46.
- WANG Xin, ZHOU Qi-xing. Soil mercury pollution and remediation technique[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(3):43-46.
- [19] Chen X, Xia X, Wu S, et al. Mercury in urban soils with various types of land use in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158:48-54.
- [20] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 311:205-219.
- [21] 何振立. 污染及有益元素的土壤化学平衡[J]. 北京:中国环境科学出版社, 1998:129-130.
- HE Zheng-li. Soil chemical balance of pollution and beneficial elements[J]. Beijing:Chinese Environmental Science Press, 1998:129-130.
- [22] 白玲玉, 曾希柏, 李莲芳, 等. 不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1):96-104.
- BAI Ling-yu, ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, et al. Effects of land use on heavy metal accumulation in soils and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(1):96-104.
- [23] 郑袁明, 罗金发, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用类型的土壤镉含量特征[J]. 地理研究, 2005, 24(4):542-548.
- ZHENG Yuan-ming, LUO Jin-fa, CHEN Tong-bin, et al. Cadmium accumulation in soil for different land uses in Beijing[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(4):542-548.
- [24] 郑袁明, 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.
- ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, CHEN Huang, et al. Lead accumulation in soils for different land use types in Beijing city[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(5):791-797.
- [25] 陈同斌, 郑袁明, 陈 煌, 等. 北京市不同土地利用类型的土壤砷含量特征[J]. 地理研究, 2005, 24(2):229-235.
- CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Arsenic accumulation in soils for different land use types in Beijing [J]. *Geographical Research*, 2005, 24(2):229-235.
- [26] 沈根祥, 谢 争, 钱晓雍, 等. 上海市蔬菜农田土壤重金属污染物累积调查分析[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊):37-40.
- SHEN Gen-xiang, XIE Zheng, QIAN Xiao-yong, et al. Investigation and analysis of heavy metal accumulation in the soil of vegetable cropland in Shanghai[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl):37-40.