

北京市朝阳区(五环内)绿地土壤重金属 分布特征及其影响因素

李婧, 李素艳, 孙向阳, 呼诺, 杨少斌, 林茂, 傅振, 崔萌

(北京林业大学 林学院, 北京 100083)

摘要:为了研究和分析北京市朝阳区(五环内)土壤重金属的分布特征及影响因素,通过居住绿地、公园绿地、街旁绿地以及附属绿地(包括公共设施用地、对外交通用地和市政设施用地)4种土壤利用类型分别进行了土壤重金属铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)、铅(Pb)以及土壤pH值、有机质的测定。结果表明:表层土壤中的重金属平均含量,除Pb外,均高于中国土壤背景值,尤其是重金属Cd,已达到0.26 mg/kg,超过了国家土壤环境质量1级标准;从土壤利用类型上来看,Cu在附属绿地土壤含量最高,达到33.576 mg/kg,Zn在居住绿地土壤含量最高,达到80.636 mg/kg,Cd在街旁绿地土壤含量最高,达到0.296 mg/kg,Pb在公园绿地土壤含量最高,达到24.706 mg/kg;在空间分布上,重金属Cu和Zn空间分布格局相类似,整体呈由西北向东南递减趋势,而Cd高值区在中部,整体北部高于南部,重金属Pb整体上呈由西南向东北递减趋势;通过相关性分析可知,土壤pH值对土壤重金属含量没有明显的影响,而土壤有机质与重金属Zn,Cd和Pb的含量有明显的相关性;4种重金属呈显著正相关($p < 0.01$)。

关键词:城市土壤; 重金属分布特征; 土壤pH值; 土壤有机质

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)03-0311-07

Characteristics of Distribution of Soil Heavy Metals in Wuhuan, Chaoyang District, Beijing

LI Jing, LI Suyan, SUN Xiangyang, HU Nuo, YANG Shaobin, LIN Mao, FU Zhen, CUI Meng

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study and analyze the distribution characteristics and influencing factors of heavy metals in Chaoyang District, Beijing, through residential greenbelts, park greenbelts, street greenbelts, and affiliated greenbelts (including public facilities, external transport and municipal facilities), four kinds of soil use types were used to measure the soil heavy metals such as copper (Cu), zinc (Zn), cadmium (Cd), lead (Pb), and soil pH and organic matter. The results showed that the average content of heavy metals in surface soil, except for Pb, was higher than that of Chinese soil, especially heavy metal Cd, which had reached 0.26 mg/kg, and exceeded the standard of soil environmental quality grade 1; Cu content in the attached green space was the highest, reaching 33.576 mg/kg. Zn content in the soil of residential greenbelt was the highest, reaching 80.636 mg/kg. Cd content was the highest in the street green space, reaching 0.296 mg/kg. Pb content was the highest in the green space of the park, reaching 24.706 mg/kg; in the spatial distribution, spatial distribution pattern of heavy metal Cu and Zn was similar, and overall showed the decreasing trend from northwest to southeast, the content of Cd in the middle was higher, and was higher in north than the south. The heavy metal Pb decreased from southwest to northeast as a whole; according to the correlation analysis, the soil pH had no obvious effect on the heavy metal contents of the soil, while the soil organic matter was significantly related to the contents of heavy metals Zn, Cd, and Pb; the four heavy metals showed significantly positive correlation ($p < 0.01$).

收稿日期:2018-06-01

修回日期:2018-07-20

资助项目:市委、市政府重点工作及区县应急项目预启动,北京市绿地林地土壤质量提升关键技术与示范(Z161100001116061)

第一作者:李婧(1993—),女,河北省唐山市人,硕士研究生,主要从事土壤资源与环境的研究。E-mail:1263792807@qq.com

通信作者:李素艳(1968—)女,北京市人,博士,主要从事土壤修复与健康。E-mail:lisuyan@bjfu.edu.cn

Keywords: urban soil; heavy metal distribution; soil pH; soil organic matter

随着城市化进程的的发展以及城镇人口数量的增加,人类赖以生存的土壤重金属污染日益严重,成为亟待解决的生态问题。城市人口众多,交通发达,生产活动丰富,致使城市绿地土壤重金属污染尤其严重^[1-3]。重金属污染作为土壤环境质量因子之一,具有潜在危险性,很难清除,不仅会影响土壤的质量和植物的生长发育,还会危害人类健康。许多研究发现,土壤重金属的含量及分布特征与土壤理化性质、交通运输、人类生产生活等多方面息息相关^[4-5],相比于农业土壤,城市土壤重金属污染可通过扬尘直接对人体产生危害^[6]。因此,城市绿地土壤重金属污染受到了世界各国的密切关注^[7-10]。国外对城市绿地土壤重金属的研究报道开始较早:Mattia Biasioli 等人对意大利都灵(Torino)公园绿地土壤重金属(Cu, Zn, Cd, Pb 等)进行了研究,Davies 等和 Kelly 等人研究了英国主要城市绿地土壤重金属的含量及其土壤性质的关系^[11-15]。而国内近些年来逐渐开展城市土壤重金属(Cu, Zn, Cd, Pb)的含量分布特征及其影响因素的研究,但主要集中在东北、华南和西南地区的部分城市^[16-20],对于华北地区的北京市土壤重金属(Cu, Zn, Cd, Pb)的研究报道仍比较少,以往研究^[21-22]表明土壤 pH 值和有机质是控制土壤重金属化学行为的重要因素,因此,本文在调查北京市朝阳区(五环内)土壤 pH 值、有机质含量及 4 种重金属(Cu, Zn, Cd, Pb)含量的基础上,通过研究北京市朝阳区(五环内)土壤重金属的分布特征及影响因素,为北京市土壤重金属污染防治提供一定的理论依据。

1 研究区概况

朝阳区是北京市城近郊区面积最大的一个区,位于北京市主城区的东部,介于北纬 39°48′—40°09′,东经 116°21′—116°42′,属于暖温带半湿润季风型大陆性气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥;地貌类型复杂多样,地势从西北向东南缓缓倾斜,土壤质地大多为砂壤土、壤土,pH 值在 7.73~8.58,呈弱碱性,区域轮廓呈南北略长、东西稍窄的多边形;人口众多、增长快、交通发达,结构复杂。

2 材料与方法

2.1 样品采集与预处理

土壤采样按照分块随机的方法进行布点采样,系统随机采集具有代表性的表层(0—20 cm)土壤样品共 39 个,包括对朝阳区(五环内)的附属绿地样品 7

个,街旁绿地样品 14 个,公园绿地样品 10 个,居住绿地样品 8 个。样点布设考虑北京市朝阳区(五环内)土壤利用类型(图 1)。采集的样品要剔除石子,树叶,植物根系等杂质后带回实验室,在常温下风干后,用研钵进行研磨,装入密封袋中待测。

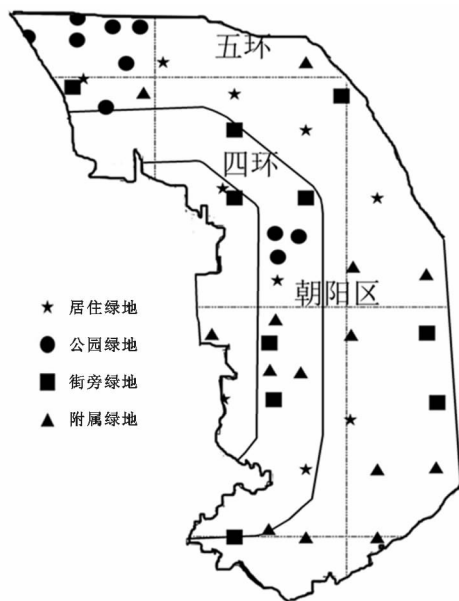


图 1 北京市朝阳区(五环内)绿地土壤各采样点位置分布

2.2 样品测定方法

土壤 pH 值采用水浸提电位法,土壤有机质采用重铬酸钾—稀释热法,土壤重金属(Cu, Zn, Cd 和 Pb)采用电感耦合等离子质谱法,具体方法参照《土壤农业化学分析方法》。

2.3 数据处理

试验数据采用 SPSS 17.0 统计软件做相关性分析;数据统计和重金属空间分布图采用 Microsoft Excel 2013 和 ArcGIS 10.1。

3 结果与分析

3.1 北京市朝阳区(五环内)土壤重金属的统计特征

从表 1 中可以看出:Cu 含量的平均值达到 29.36 mg/kg,超过了中国土壤背景值,最大值达到 67 mg/kg,超过了国家土壤环境质量一级标准,另外,在 4 种土壤利用类型中,Cu 在附属绿地中的含量要高于其他绿地类型,平均值达到 33.57 mg/kg,超过中国土壤背景值,说明土壤已经受到了重金属 Cu 的污染。从表 2 中可以看出:Cu 的变异系数为 27.13%。林俊杰等^[23]认为变异系数<10%为弱变异,10%~30%为中等变异,>30%为高度变异。由此分类法可以看出,Cu 为中等变异,在 4 种土壤利用类型上,Cu 在附属绿地上的变异程度最

大。土壤重金属所有样点含量情况如图 2 所示,所有样点的 Cu 含量均大于北京市土壤背景值,其中仅有 7.69% 的样品介于北京市土壤背景值和中国土壤背景值之间,有 79.48% 的样品介于中国土壤背景值和土壤环境质量 1 级标准之间,大于土壤环境质量 1 级标准的土壤样品有 12.82%,说明重金属 Cu 有一定的污染;从不同土地利用类型上来看,Cu 在附属绿地上的浓度相对较高,其次是居住绿地,居住绿地中有两个样品超过了土壤环境质量 1 级标准,街旁绿地和公园绿地土壤中的 Cu 的浓度相对较低,街旁绿地土壤中有一个样品超过了 1 级标准,但是有 3 个样品介于北京市土壤背景值和中国土壤背景值之间,所有样点的 Cu 含量在公园绿地中全部介于中国土壤北京值和土壤环境质量 1 级标准之间。

重金属 Zn 含量的平均值为 74.05 mg/kg,超过了中国土壤背景值,最大值达到 141 mg/kg,超过了国家土壤环境质量一级标准,在 4 种土壤利用类型中,Zn 在居住绿地中的含量要高于其他绿地类型,平均值达到 80.63 mg/kg,超过了中国土壤背景值(表 1)。Zn 的变异系数达到 25.75%,按照上述分类方法可以看出,重金属 Zn 为中等变异,在 4 种土壤利用类型上,Zn 在附属绿地上的变异程度最大(表 2)。图 2 可以看出:69.23% 的样品中 Zn 的含量介于北京市土壤背景值和中国土壤背景值之间,17.95% 的样品中 Zn 含量介于中国土壤背景值和土壤环境质量 1 级标准之间,整体与 Cu 的含量相比,相对较低一些;从不同土地利用类型上来看,Zn 在居住绿地的浓度较高一些,其次是附属绿地,街旁绿地和公园绿地。

重金属 Cd 含量的平均值为 0.26 mg/kg,已超过国家土壤环境质量一级标准,最大值达到 0.7 mg/kg,说明

重金属 Cd 污染较严重,在 4 种土壤利用类型中,Cd 在街旁绿地中的含量要高于其他绿地类型,平均值达到 0.29 mg/kg(表 1),说明重金属 Cd 可能受汽车尾气的原因使得含量较高。Cd 的变异系数为 35.12%,按照上述林俊杰的分类方法,Cd 为高度变异,在 4 种土壤利用类型上,Cd 在街旁绿地上的变异程度最大(表 2)。根据图 2 表示:所有样品土壤中 Cd 的含量均大于土壤环境质量 1 级标准,说明朝阳区(五环内)绿地土壤的 Cd 的污染最为严重;不同土地利用类型上来说,街旁绿地土壤中的 Cd 含量相对较高一些,其次分别为居住绿地,附属绿地和公园绿地。

重金属 Pb 含量的平均值为 22.41 mg/kg,是 4 种重金属中唯一一种低于北京市土壤背景值的重金属,最大值为 51 mg/kg,超过国家土壤环境质量一级标准,在 4 种土壤利用类型中,Pb 在公园绿地土壤中的含量要比高于其他绿地类型,平均值达到 24.70 mg/kg(表 1),甚至还要高于街旁绿地土壤,这与交通污染会导致靠近公路沿线重金属 Pb 含量较高的研究^[24-26]并不相符,这主要是因为我们国家在 20 世纪末就开始使用无铅汽油,而北京市朝阳区(五环内)的交通主干道在国家使用无铅汽油后才逐渐建成,因此,街旁绿地的含铅量并没有成为最高,这也说明国家使用无铅汽油确实能很大程度上降低靠近公路土壤 Pb 的含量。Pb 的变异系数为 28.48%,按照上述林俊杰分类方法,Pb 为中等变异,在公园绿地土壤变异程度较大(表 2)。图 2 可以看出:绝大多数土壤样品中的 Pb 含量低于中国土壤背景值,其中 74.36% 的土壤样品中的 Pb 含量低于北京市土壤背景值,整体状况良好,只需控制好重金属源头即可;不同绿地类型的 Pb 含量的变化差异并不是很大。

表 1 北京市朝阳区(五环内)不同类型绿地土壤重金属含量 mg/kg

重金属	附属 绿地	街旁 绿地	公园 绿地	居住 绿地	北京市朝阳区 (五环内)绿地	北京市土壤 背景值	中国土壤 背景值	国家土壤环境 质量一级标准
铜	33.57±15.46 (24~67)	28.5±5.93 (21~43)	26.6±3.84 (23~34)	30.63±4.84 (26~39)	29.36±7.97 (21~67)	18.7	22.6	35
锌	78.57±29.07 (57~141)	72.07±18.95 (42~119)	68.40±7.88 (61~88)	80.63±19.48 (59~110)	74.05±19.07 (42~141)	57.5	74.2	100
镉	0.24±0.05 (0.2~0.3)	0.29±0.13 (0.2~0.7)	0.22±0.04 (0.2~0.3)	0.26±0.05 (0.2~0.3)	0.26±0.09 (0.2~0.7)	0.119	0.097	0.2
铅	24.43±5.91 (16~34)	21.14±4.55 (10~26)	24.70±9.71 (19~51)	20.00±3.16 (16~25)	22.41±6.38 (10~51)	24.6	26	35

注:表中括号内位极小值到极大值。

3.2 北京市朝阳区(五环内)土壤重金属空间分布特征
利用 ArcMap 10.1 软件,通过普通克里金方法,对北京市朝阳区(五环内)绿地土壤重金属含量进行插值,得到土壤重金属的空间分布图(图 3)。从图 3

中可以看出:重金属 Cu 在朝阳区(五环内)中北部和中西部含量相对较高,整体大体呈现出由西北向东南递减的趋势;Zn 的空间分布格局与 Cu 的分布格局类似,但整体含量较 Cu 略低一些,说明自然或

人为活动可能对重金属 Zn 和 Cu 产生相同的影响; Cd 的高值区主要分布在朝阳区(五环内)的中部地区,该地区主要街旁绿地较多,说明交通可能对 Cd 的分布产生了一定的影响,整体分布北部含量略高于南部地区;Pb 的分布格局大体呈现由西南向东北逐渐递减的趋势,东北地区逐渐靠近五环外,居住人群相对较少一些,说明人类活动可能对 Pb 的分布产生一定的影响。

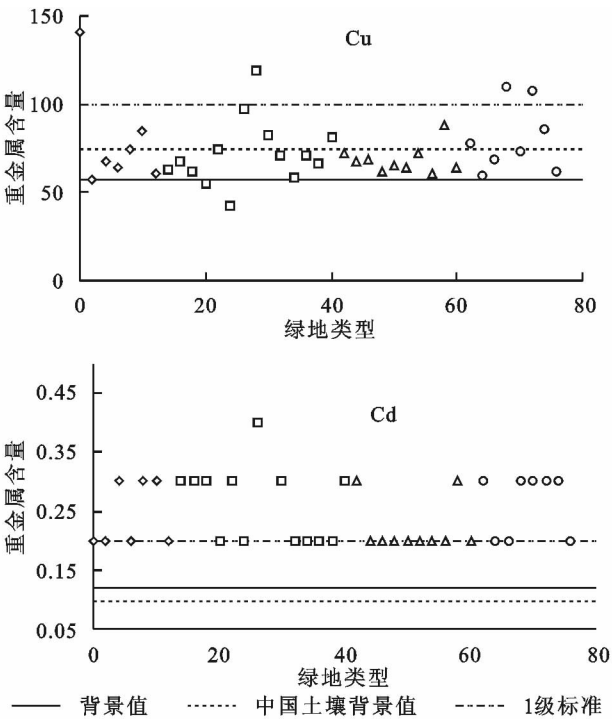


图 2 北京市朝阳区(五环内)不同类型绿地土壤重金属含量

3.3 北京市朝阳区(五环内)土壤重金属含量的影响因素

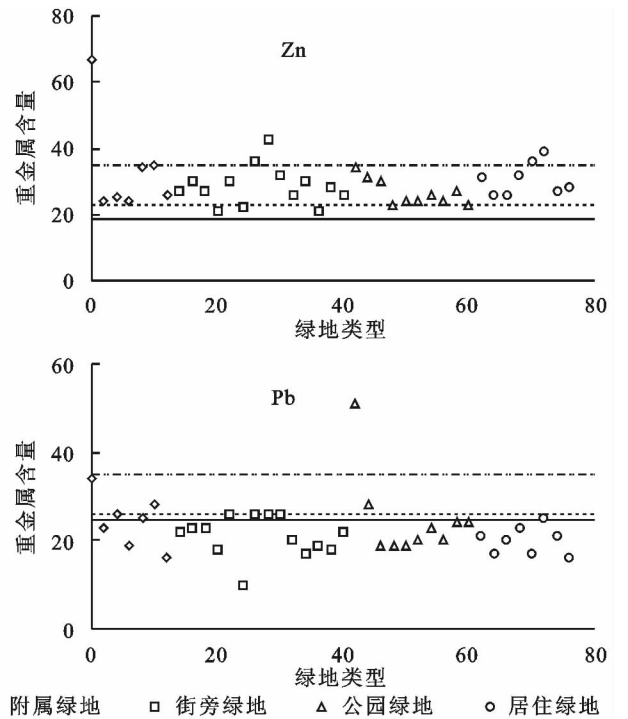
3.3.1 土壤 pH 值对重金属含量分布的影响 土壤 pH 值是影响土壤重金属形态的重要因素之一,进而影响重金属在土壤中的累积含量,从而产生严重的土壤污染风险。

从图 4 看出北京市朝阳区五环内 94.87% 土壤的 pH 值在 7.00~8.50,其中 pH 值在 7.00~7.50 的土壤占 33.33%,pH 值在 7.50~8.00 的弱碱性土壤占 48.72%,而 pH 值在 8.00~8.50 的碱性土壤仅占 1.82%。而 pH 值<7.00 的酸性土壤仅占 5.13%。说明该研究区域大多为微碱性土壤。

图 5 将 39 个样点归类成附属绿地、街旁绿地、公园绿地、居住绿地等 4 种土壤利用类型,取平均值进行比较研究,发现不同土壤利用类型的土壤 pH 值会有一些的差异。从图中可以看出,所有土壤利用类型的土壤 pH 值平均值均低于 8.0,其中分布在公园绿地的土壤 pH 值明显要低于其他 3 种土壤利用类型,平均值为 7.17,而居住绿地、街旁绿地和附属绿地的

表 2 北京市朝阳区(五环内)不同类型绿地土壤重金属变异系数 %

重金属	附属绿地	街旁绿地	公园绿地	居住绿地	北京市朝阳区(五环内)绿地
铜	46.05	20.82	14.42	15.80	27.13
锌	37.00	26.30	11.52	24.16	25.75
镉	22.01	45.35	19.17	19.72	35.12
铅	24.20	21.54	39.30	15.81	28.48



土壤 pH 值没有明显的差异性。

土壤 pH 值作为土壤重金属元素的影响因素之一,主要是通过影响重金属在土壤中的溶解度来影响重金属的化学行为。重金属 Cu,Zn,Cd 和 Pb 在中性、碱性条件下,会形成氢氧化物沉淀或磷酸盐、碳酸盐形式,溶解度很小,在酸性条件下,其溶解度增大,毒性增强。对土壤 pH 值和土壤重金属用 Spearman 法做相关性分析(表 3),结果表明:土壤 pH 值与土壤重金属之间没有明显的相关性。这可能是因为土壤成土母质以及其他成土条件相似,pH 值的变化程度较小,难以导致土壤元素的迁移和累积。

3.3.2 土壤有机质对重金属含量分布的影响 土壤有机质中的腐殖质物质含有多种功能基,这些功能基对土壤重金属离子有较强的络合能力和富集能力,因此土壤有机质对土壤重金属的迁移和固定有极其重要的影响,合理有效的控制土壤有机质的含量能有效地减缓或降低重金属污染,如图 6 所示:公园绿地土壤有机质含量明显比其他绿地类型的有机质含量要

高,达到 21.37 g/kg。这可能是因为表层土壤受枯叶落叶自然回归的影响,表层土壤有机质有了一定的积累,而公园绿地中含有灌木、乔木等较多,枯枝落叶

自然回归对有机质积累的影响相比于其他绿地类型要略大一些。而居住绿地、街旁绿地和附属绿地的土壤有机质含量没有明显的差异性。

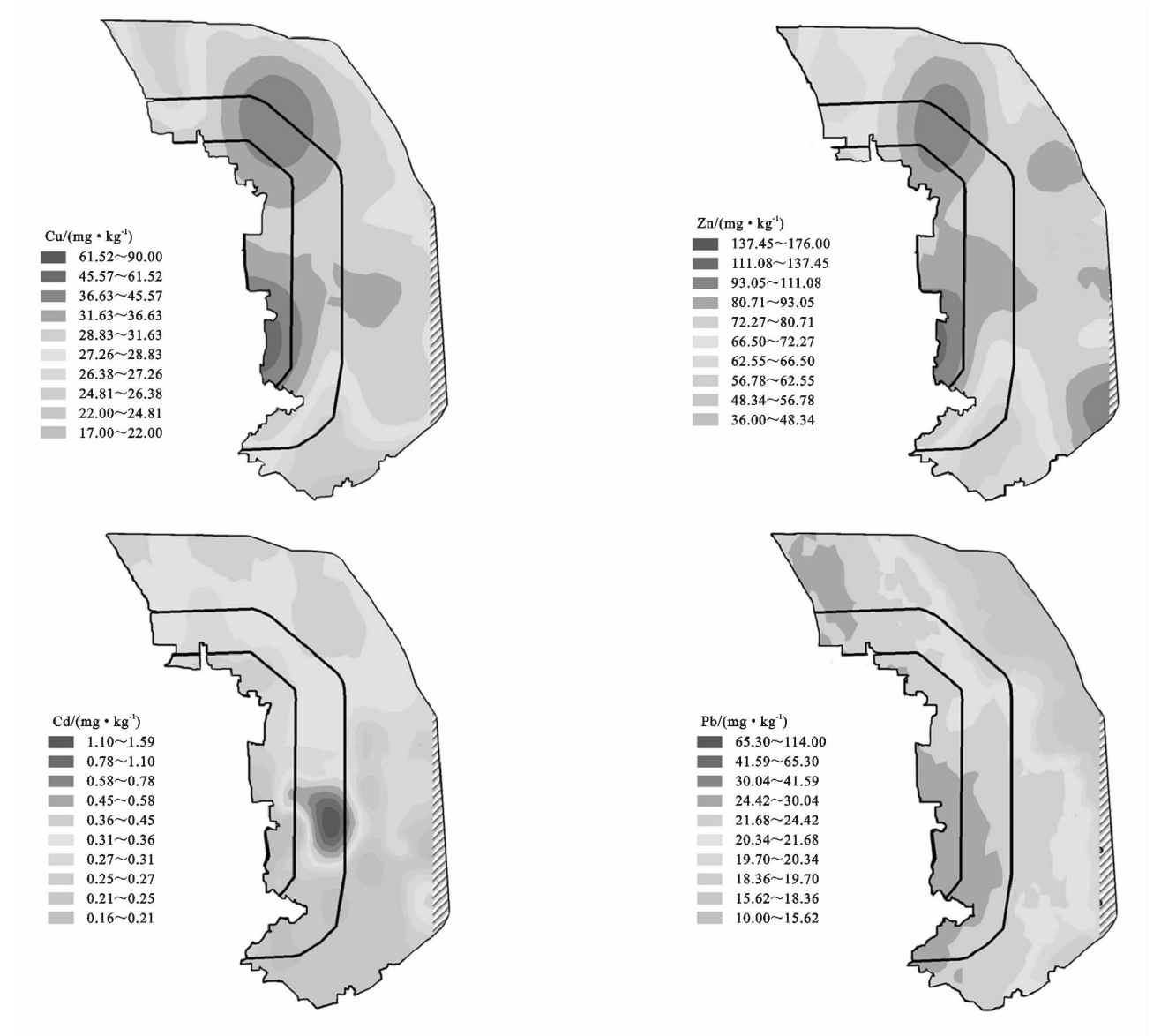


图 3 北京市朝阳区(五环内)绿地土壤 Cu,Zn,Cd 和 Pb 重金属含量空间分布

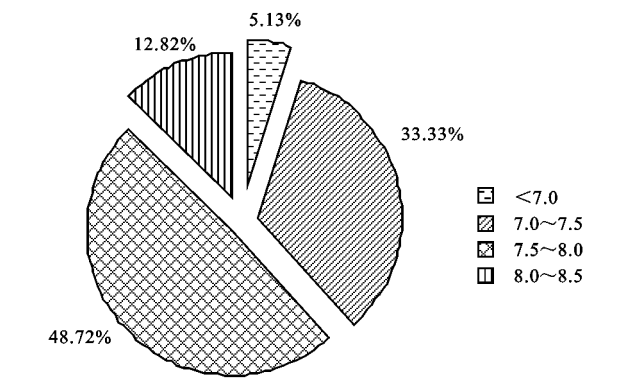


图 4 北京市朝阳区(五环内)绿地土壤 pH 值分布

对土壤有机质和重金属之间的相关性有着许多的报道,本研究有机质与重金属的相关系数如上述表 3 所示,有机质含量与重金属 Cu 无明显相关性,与重金

属 Zn 和 Cd 显著正相关,这与柴世伟的研究^[27]相一致,有机质与重金属 Pb 则极显著正相关。有机质与重金属离子形成络合物,导致重金属离子活性降低,从而致使重金属产生累积,造成污染。

表 3 土壤重金属与土壤理化性质之间的相关系数矩阵

成分	Cu	Zn	Cd	Pb	pH	有机质
Cu	1	0.696 **	0.621 **	0.528 **	0.266	0.142
Zn		1	0.650 **	0.639 **	0.014	0.351 *
Cd			1	0.575 **	0.051	0.325 *
Pb				1	-0.145	0.416 * *
pH					1	-0.529 * *
有机质						1

注: * * 表示相关水平为 0.01; * 表示相关水平为 0.05。

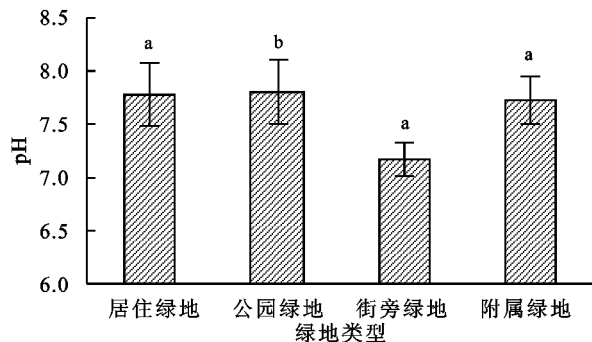


图5 北京市朝阳区(五环内)不同绿地类型土壤 pH 值

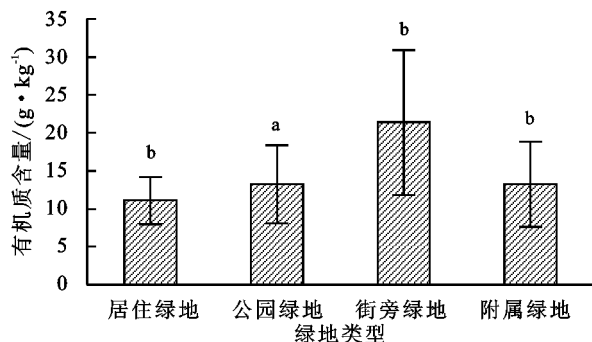


图6 北京市朝阳区(五环内)不同绿地类型土壤有机质

3.3.3 土壤重金属之间的影响 土壤重金属元素之间的相关性在一定程度上能反映出是否有相同的污染源。元素间的相关性能代表污染区出现重金属含量同时增加的现象,从而呈现出符合污染的趋势。

根据表3相关性分析表明:土壤重金属 Cu, Zn, Cd 以及 Pb 元素之间存在着极显著的相关性。说明北京市朝阳区(五环内)土壤重金属 Cu, Zn, Cd 以及 Pb 有着相似的污染源。这是因为一方面继承了土壤母质中元素的配比关系,而另一方面是可能同时受到各种成土过程和人为活动的影响。

4 结论

(1)北京市朝阳区(五环内)土壤重金属 Cd 的污染最为严重,其含量已经超过土壤环境质量1级标准。重金属 Cu, Zn 平均含量在中国土壤背景值与土壤环境质量1级标准之间,属于轻度污染,而重金属 Pb 平均含量低于中国土壤背景值,且大部分 Pb 含量低于北京市背景值,基本属于无污染。

(2)同一重金属在不同土壤利用类型上的含量也不尽相同, Cu 在附属绿地上的含量最高, Zn 在居住绿地上的含量最高, Cd 在街旁绿地上的含量最高, Pb 在公园绿地上的含量最高。

(3)从4种重金属的空间分布上来看,重金属 Cu 和 Zn 空间分布格局相似,整体呈由西北向东南递减趋势,而 Cd 高值区在中部,重金属 Pb 整体上呈由西南向东北递减趋势。

(4)土壤 pH 值对土壤重金属没有明显的影响,土壤有机质对重金属 Zn 和 Cd 有着显著的相关性,对 Pb 有着极显著的相关性,说明土壤有机质是土壤重金属的主要载体,而重金属全量之间具有明显的相关性,说明重金属之间可能具有相同的污染源。

参考文献:

- [1] Bilos C, Colombo J C, Skorupka C N, et al. Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina[J]. Environmental Pollution, 2001, 111(1): 149-158.
- [2] 王鹏, 贾学秀, 涂明, 等. 北京某道路外侧土壤重金属形态特征与污染评价[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(6): 165-172.
- [3] 韩玉丽, 邱尔发, 王亚飞, 等. 北京市土壤和 TSP 中重金属分布特征及相关性研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 146-155.
- [4] Wong J W C, Mak N K. Heavy metal pollution in children playgrounds in Hong Kong and its health implications[J]. Environmental Technology, 1997, 18(1): 109-115.
- [5] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 等. 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(1): 123-126.
- [6] Chen T B, Wong J W, Zhou H Y, et al. Assessment of trace metal distribution and contamination in surface soils of Hong Kong [J]. Environmental Pollution, 1997, 96(1): 61-68.
- [7] 杨元根, Paterson E, Campbell C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物效应[J]. 环境科学, 2001, 22(3): 44-48.
- [8] Linde M, Bengtsson H, Öborn I. Concentrations and pools of heavy metals in urban soils in Stockholm, Sweden[J]. Water, Air and Soil Pollution: Focus, 2001, 1(3/4): 83-101.
- [9] Li X, Poon C, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. Applied Geochemistry, 2001, 16(11): 1361-1368.
- [10] Manta D, Angelone M, Bellanca A, et al. Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo(Sicily), Italy[J]. the Science of the Total Environment, 2002, 300(1): 229-243.
- [11] Biasioli M, Ajmone-Marsan F. Organic and inorganic diffuse contamination in urban soils: the case of Torino (Italy) [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2007, 9(8): 862-868.
- [12] Chon H T, Kim K W, Kim J Y. Metal contamination of soils and dusts in Seoul metropolitan city, Korea [J]. Environmental Geochemistry and Health, 1995, 17(3): 139-146.

- [13] Markus J A, McBratney A B. An urban soil study: heavy metals in Glebe, Australia[J]. Soil Research, 1996,34(3):453-465.
- [14] Marr K, Fyles H, Hendershot W. Trace metals in Montreal urban soils and the leaves of *Taraxacum officinale*[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1999,79(2):385-387.
- [15] Sánka M, Strnad M, Vondra J, et al. Sources of soil and plant contamination in an urban environment and possible assessment methods[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1995,59:327-343.
- [16] 郭平,谢忠雷,李军,等.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,2005,25(1):108-112.
- [17] 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].西南农业学报:自然科学版,2006,28(2):227-230.
- [18] 邓秋静,宋春然,谢锋,等.贵阳市耕地土壤重金属分布特征及评价[J].土壤,2006,38(1):53-60.
- [19] 管东生,陈玉娟,阮国际.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):93-96.
- [20] 吴新民,李恋卿,潘根兴.南京市不同功能区土壤中重金属 Cu, Zn, Pb 和 Cd 污染特征[J].环境科学,2003,24(3):105-111.
- [21] 殷丽萍,张博,李昂,等.土壤酸碱度对重金属在土壤中行为的影响[J].辽宁化工,2014,43(7):865-867.
- [22] 孙花,谭长银,黄道友,等.土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J].湖南师范大学:自然科学版,2011,34(4):82-87.
- [23] 林俊杰,王云智,陈国祥,等.万州老城区楼顶菜地土壤重金属污染特征[J].环境科学研究,2011,24(6):679-683.
- [24] 李其林,刘光德,郭义.公路两侧土壤和蔬菜中重金属的含量特征[J].环境科学与技术,2004,27(6):35-36.
- [25] 曹立新,李惕川,刘莹,等.公路边土壤和水稻中铅的分布、累积及临界含量[J].环境科学,1995,16(6):66-68.
- [26] 林健,邱卿如,陈建安.公路旁土壤中重金属和类金属污染评价[J].环境与健康杂志,2000,17(5):284-286.
- [27] 柴世伟,温琰茂,张云霓,等.广州郊区农业土壤重金属含量与土壤性质的关系[J].农村生态环境,2004,20(2):55-58.

~~~~~

(上接第 310 页)

- [13] 李建军,苏志珠,王言荣.基于 GIS 的万荣县生态敏感性评价与区划[J].中国农业资源与区划,2014,35(5):48-54.
- [14] 贾良清,欧阳志云,赵同谦,等.安徽省生态功能区划研究[J].生态学报,2005,25(2):254-260.
- [15] 李月臣,刘春霞,闵婕,等.三峡库区生态系统服务功能重要性评价[J].生态学报,2013,33(1):168-178.
- [16] 凡非得,罗俊,王克林,等.桂西北喀斯特地区生态系统服务功能重要性评价与空间分析[J].生态学杂志,2011,30(4):804-809.
- [17] 杨伟州,邱硕,付喜厅,等.河北省生态功能区划研究[J].水土保持研究,2016,23(4):269-276.
- [18] 周锐,工新军,苏海龙,等.平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建[J].生态学报,2015,35(6):2003-2012.
- [19] 潘竟虎,刘晓.基于空间主成分和最小累积阻力模型的内陆河景观生态安全评价与格局优化:以张掖市甘州区为例[J].应用生态学报,2015,26(10):3126-3136.
- [20] 俞孔坚,王思思,李迪华,等.北京市生态安全格局及城市增长前景[J].生态学报,2009,29(3):1189-1204.
- [21] 彭建,赵会娟,刘众序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望[J].地理研究,2017,36(3):407-419.
- [22] 谢花林.土地利用生态安全格局研究进展[J].生态学报,2008,28(12):6305-6311.
- [23] 王旭熙,彭立,苏春江,等.基于景观生态安全格局的低丘缓坡土地资源开发利用:以四川省泸县为例[J].生态学报,2016,36(12):3646-3654.