

太原城区周边土壤重金属分布特征及生态风险评价

高 鹏, 刘 勇*, 苏 超

(山西大学黄土高原研究所, 太原 030006)

摘 要:以太原市城区周边土壤为研究对象,分析了土壤重金属 Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、Cd、Hg 和 As 的污染特征及其空间分布特征,并通过对研究区的污染源进行资料收集和实地调查,探究了污染源与土壤重金属污染间的关系。结果表明:研究区土壤重金属元素 Zn、Cr、Hg、Pb、Cd 的均值都超过了山西省土壤背景值,元素 Ni、Cu 和 As 与背景值相差不大;从 Hankson 生态风险评价来看,研究区的综合生态风险程度处于中等水平,Hg 和 Cd 的风险较为明显,其达到中等风险强度以上的样点分别有 74.1%和 30.8%;从空间分布来看,研究区的南部土壤重金属元素 Pb、Hg、Cd、Cu、Zn、Ni 和 Cr 的含量较高,As 含量较高的区域集中分布于东北部;化工类污染源和矿石类污染源是造成研究区重金属污染的两个主要污染源。

关键词:土壤重金属;空间分布;风险评价;污染源

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)05-0866-08 doi:10.11654/jaes.2015.05.008

Distribution and Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Area Surrounding Taiyuan City

GAO Peng, LIU Yong*, SU Chao

(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Using Taiyuan City as a study area, we measured the concentrations of soil heavy metals (Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, Cd, Hg, and As), mapped the spatial distribution of heavy metals based on Kriging interpolation, evaluated the ecological risks of heavy metals by Hankson index, and explored the relationships between soil heavy metal concentrations and pollution sources based on the pollution source investigation in Taiyuan. Results showed that: mean values of Zn, Cr, Pb, Cd and Hg were higher than the background values of Taiyuan City soils, while those of Ni, Cu and As were almost equal to their background values. According to the Hankson ecological risk assessment, the soils in the studied area were at medium risk level. Mercury and Cd were the main risk factors. The 74.1% and 30.8% of samples exceeded medium risk levels of Hg and Cd, respectively. The concentrations of Pb, Hg, Cd, Cu, Zn, Ni and Cr were high in the south part of the area, and As was high in the south and northeast areas. Chemical industries and mineral industries were two major sources of soil heavy metal pollution in Taiyuan City.

Keywords: soil heavy metals; spatial distribution; risk assessment; pollution source

不久前我国首次进行的全国土壤污染状况调查指出,我国土壤污染的超标点位达到了 16.1%,在全部超标点位中无机污染物占了 82.8%,土壤重金属在我国西南和东南地区污染较为严重,其中砷、汞、铅、

镉四种重金属污染物的含量由北向南呈现逐步升高的趋势^[1]。由此可以看出,我国整体土壤环境质量不容乐观并且部分地区土壤重金属污染较为严重。所以对土壤污染,尤其是对土壤重金属污染的研究应该引起国内学者的重视。太原是中国重要的能源、重工业基地之一,许多学者对太原市的土壤重金属污染问题一直比较关注^[2]。郭翠花等^[3]、张乃明等^[4]、刘勇等^[5]对太原市土壤重金属的含量、分布特征、潜在生态风险评价、污染原因等方面做过一系列的研究和分析。但以上这些研究的采样范围小、采样点少,缺乏对太原市

收稿日期:2014-11-12

基金项目:国家自然科学基金项目“基于支持向量机的土地生态风险评价研究”(41271513)

作者简介:高 鹏(1990—),男,山西太原人,硕士研究生,主要从事区域生态学、土壤重金属污染方面的研究。

E-mail: penggao1014@sina.com

* 通信作者:刘 勇 E-mail: liuyong@sxu.edu.cn

土壤重金属总体污染状况的分析评价以及潜在污染原因的探究。

本文选择太原市城区周边的土壤为研究区域,兼顾工农业以及交通的影响,对不同利用方式的土壤进行采样分析^[6]。在此基础上,首先对该地区土壤重金属的含量进行了统计分析,其次利用 GIS 技术和地统计分析方法研究了土壤重金属的空间分布特征,并采用 Hankson 生态风险评价法对土壤重金属污染进行评价^[7-10],最后探讨了研究区土壤重金属污染与周边污染源的关系,旨在对太原市土壤质量评价和环境污染防治提供科学指导^[11]。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

太原作为山西省的省会城市,地处山西省中部,其西、东、北三面环山,地形北高南低呈簸箕形。太原市城区由尖草坪区、万柏林区、杏花岭区、迎泽区、小店区和晋源区六个区组成。

太原市是我国重要的矿产、能源城市和重工业基地之一,矿产资源和煤炭资源储量丰富,分布有大量的工矿类、机械制造类、化工类等企业,这些企业在对经济发展起到巨大推动的同时也带来了交通拥堵、环境恶化、土壤污染等一系列的问题。此外,由于水资源匮乏,大部分农田采用污水灌溉,导致污水中的重金属等污染物在农田淤积,造成土壤污染^[7]。

1.2 样品采集

2013 年 4 月,对太原市城区周边农用地土壤进行了采样。样点布设如图 1 所示。在采样中根据土地利用类型不同,样点主要设置在农田、林地、草地和城市绿地中,并以农田土壤为主。从图 1 可看出,太原市中部为建城区,北部和南部分布有大量耕地,东西两边为陡峭山地,人类活动较少,因此采样点布设主要是在沿建城区周边进行采样,其中北部和南部样点较多,东西两边样点较少,避开了特殊污染或者特殊地形的部位。共采集土壤样品 140 个。

采样深度为土壤表层 0~20 cm,利用 GPS 确定好采样点后进行采样,每个土壤样品均由采样点附近 10 个点的土壤样品均匀混合而成。利用四分法制样,贴标签登记,将样品装入聚氯乙烯塑料袋密封后运回实验室。于实验室内自然风干后磨碎、过孔径 0.154 mm 筛、混匀、取样备存待分析检测^[12]。

1.3 分析测试方法

土壤样品采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 法消解后采用石

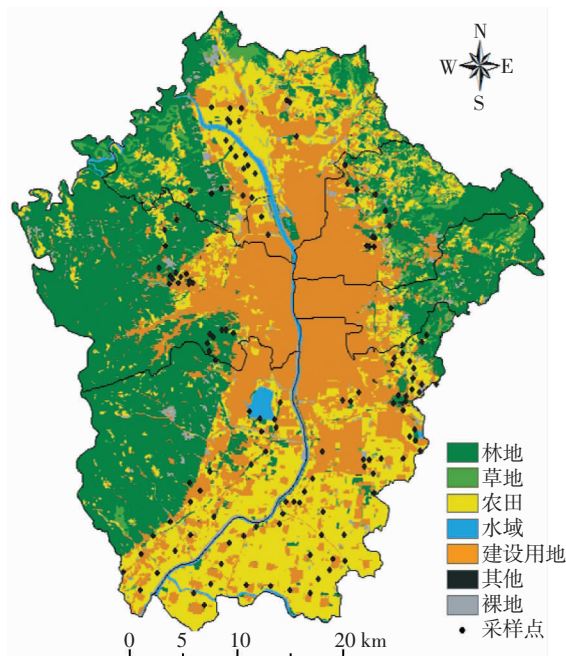


图 1 采样点设置图

Figure 1 Map of sampling points

墨炉原子吸收分光光度计测定 Cd 元素,采用原子荧光光度计测定 Hg 和 As 元素,采用原子吸收分光光度计测定 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 元素。土壤重金属的检测方法、来源和检出限见表 1。

分析质量控制措施采取空白样、平行样和标准物质控制法,在分析过程中加入国家土壤标准样品(GSS-10 和 GSS-15)进行分析质量控制。回收率和标准差见表 2。

1.4 生态风险评价方法

目前,评价土壤重金属污染的方法较多,如内梅罗指数法、单因子指数法、富集因子法等^[13]。考虑到各重金属的毒性不同和突出污染较严重的重金属的作用,本文采用瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态风险分级评价法(表 3)^[14]。其计算公式如下:

$$RI = \sum E_i = \sum T_i \times C_i^i / C_n^i \quad (1)$$

式中: C_i^i 为重金属 i 的实测含量; C_n^i 为计算所需的参比值,其中 Hg 选用几何均值乘以几何标准差作为参比值, Cd 采用算术均值加标准差作为参比值,其余元素均采用山西省的土壤背景值加标准差作为参比值^[15]; E_i^i 为土壤重金属元素 i 的潜在生态风险指数; T_i 为重金属 i 的毒性系数,其中 Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、Cd、Hg、As 的毒性系数分别为 5、1、5、2、5、30、40、10。 RI 为多种土壤重金属的综合生态风险指数值。

表 1 土壤重金属元素检测方法、来源和检出限

Table 1 Sources and detection limits of measurement methods for soil heavy metals

检测项目	单位	方法	来源	检出限
Cd	mg·kg ⁻¹	石墨炉原子吸收分光光度法	GB/T 17141—1997	0.09
Hg	mg·kg ⁻¹	原子荧光法	GB/T 22105.1—2008	0.002
As	mg·kg ⁻¹	原子荧光法	GB/T 22105.2—2008	0.008
Pb	mg·kg ⁻¹	火焰原子吸收分光光度法	GB/T 17140—1997	0.3
Cr	mg·kg ⁻¹	火焰原子吸收分光光度法	HJ 491—2009	5
Cu	mg·kg ⁻¹	火焰原子吸收分光光度法	GB/T 17138—1997	0.03
Zn	mg·kg ⁻¹	火焰原子吸收分光光度法	GB/T 17138—1997	0.06
Ni	mg·kg ⁻¹	火焰原子吸收分光光度法	GB/T 17139—1997	0.15

表 2 分析质量控制的回收率和标准差

Table 2 Recoveries and standard deviations of quality control

标土编号	项目	X	回收率	标准差
GSS-10	Cu/mg·kg ⁻¹	19	102%	0.059
	Zn/mg·kg ⁻¹	60	101%	0.043
	Pb/mg·kg ⁻¹	22	96%	0.064
	Ni/mg·kg ⁻¹	26	100%	0.053
	Cr/mg·kg ⁻¹	58	99%	0.028
	Cd/mg·kg ⁻¹	0.105	100%	0.101
GSS-15	Hg/mg·kg ⁻¹	0.094	99%	0.033
	As/mg·kg ⁻¹	21.7	99%	0.091

表 3 潜在生态风险分级

Table 3 Grades of potential ecological risks

单污染物潜在生态风险指数(E_i^p)	单一重金属的生态风险程度	综合生态风险指数(RI)	综合生态风险程度
$E_i^p < 40$	轻度	$RI < 150$	轻度
$40 \leq E_i^p < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_i^p < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_i^p < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
$E_i^p \geq 320$	极强		

1.5 数据处理

对重金属污染的统计分析包括描述统计分析、相关分析和方差分析,在 SPSS 13.0 中完成;对重金属污

染的空间分布特征采用 Kriging 插值法,在 ArcGIS10.0 的地统计分析模块中完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属元素描述统计分析

土壤重金属元素的描述统计特征见表 4。元素 Zn、Cr、Hg、Pb、Cd 的均值都超过了山西省土壤背景值,元素 Ni、Cu 和 As 与背景值相差不大,其中 Hg 和 Cd 的均值分别是背景值的 4.5 倍和 2.4 倍。研究区除 Hg、Cd 的变异系数较大外,其他元素的变异系数在 0.16~0.33 之间,表明 Hg 和 Cd 的空间差异相对较大。由表 4 中峰度和偏度值来看,Zn、Ni、As 三种重金属元素基本服从正态分布,Cu、Cr、Pb、Cd、Hg 五种重金属元素的原始数据经过对数变换后也服从正态分布。

为了进一步探究近年来太原市的土壤重金属含量变化情况,本文将近些年一些学者对太原市土壤重金属研究的结果进行了对比(表 5)。可以看出,从 1992 年到 2013 年,太原市土壤重金属含量在一定范围内波动,变化不大。2006 年前的各种元素含量与 2006 年后相比,土壤重金属 Zn、Ni、Pb、Hg 的含量变化不大,Cu、Cr、Cd 的含量略有提升但增长幅度较小。因为采样位置、个数、分析方法等都不尽相同,所以本

表 4 土壤重金属元素的描述统计特征

Table 4 Descriptive statistics of soil heavy metals

元素	均值/mg·kg ⁻¹	标准差	最大值/mg·kg ⁻¹	最小值/mg·kg ⁻¹	山西省背景值/mg·kg ⁻¹	变异系数	峰度	偏度	分布类型
Cu	29.53	9.74	74.8	15.30	22.90	0.33	2.81	1.45	对数正态
Zn	89.35	24.48	179.10	52.90	63.50	0.27	1.04	1.05	正态
Ni	29.86	4.63	47.40	16.80	29.90	0.16	2.14	0.90	正态
Cr	74.41	20.25	193.19	40.00	55.30	0.27	14.88	3.22	对数正态
Pb	27.31	8.47	68.40	16.60	14.70	0.31	5.25	2.02	对数正态
Cd	0.243	0.143	0.923	0.041	0.10	0.58	5.85	1.97	对数正态
Hg	0.092	0.091	0.712	0.013	0.02	1.00	18.20	3.79	对数正态
As	10.73	2.34	18.08	4.76	9.10	0.21	1.06	0.60	正态

表 5 不同年代太原市土壤重金属含量(mg·kg⁻¹)
Table 5 Content of soil heavy metals in different years(mg·kg⁻¹)

元素	1992 年	1995 年	1998 年	2006 年	2008 年	2013 年
Cu	—	25.25	—	28.87	33.30	29.53
Zn	—	91.50	—	86.08	99.04	89.35
Ni	—	—	—	29.76	38.12	29.86
Cr	63.3	52.69	—	73.69	85.03	74.41
Pb	23.9	—	27.24	26.29	27.53	27.31
Cd	0.191	—	0.202	0.212	0.232	0.243
Hg	—	—	0.122	0.121	0.072	0.091
As	—	—	—	10.96	14.46	10.73
参考文献	[4]	[3]	[4]	[5]	[2]	本文

文的结果也仅代表大致趋势。

2.2 土壤重金属元素的相关分析

相关分析(Correlation Analysis)是研究现象之间是否存在某种依存关系及其依存程度的一种统计方法。因为 Zn、Ni、As 3 种重金属元素的数据服从正态分布,Cu、Cr、Pb、Cd、Hg 5 种重金属元素的原始数据经过对数变换后也服从正态分布,所以运用Pearson 相关系数分析了 8 种土壤重金属元素之间的相关关系(表 6)。由表 6 可看出,大多数土壤重金属元素之间相关性显著。Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、Cd、Hg 7 种元素之间,除 Hg 与 Ni 元素之间相关不显著外($P>0.05$),其余均呈极显著的正相关($P<0.01$);研究也表明,As 元素与其他元素之间的相关性不同,As 与 Cu、Ni、Cr 有显著的相关性($P<0.01$),As 与 Zn 之间有正相关但不显著,而 As 与 Pb、Cd、Hg 之间有负相关但也不显著。

2.3 土壤重金属污染的空间分布分析

根据各个样点重金属的含量,利用 ArcGIS10.0 软件中的地统计模块,对服从正态分布的重金属 Zn、Ni、As 进行普通克里格插值,对重金属 Hg、Cr、Pb、Cd 和 Cu 的原始数据进行对数转换后进行普通克里格

表 6 土壤重金属元素间的相关分析结果
Table 6 Correlationship between soil heavy metal elements

指标	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd	Hg	As
Cu	1.00	0.835**	0.559**	0.590**	0.771**	0.682**	0.453**	0.233**
Zn		1.00	0.480**	0.616**	0.838**	0.769**	0.559**	0.158
Ni			1.00	0.691**	0.415**	0.318**	0.103	0.375**
Cr				1.00	0.536**	0.381**	0.290**	0.167**
Pb					1.00	0.775**	0.674**	-0.047
Cd						1.00	0.507**	-0.004
Hg							1.00	-0.061
As								1.00

Note:** $P<0.01$, * $P<0.05$

插值。分析结果见图 2。

由图 2 可以看出,重金属 Cu 含量较高的区域分布于研究区的南部,北部和东部含量较低;Zn 含量较高的区域分布于研究区的东南部,西南部和东部含量较低;Ni 含量较高的区域分布较广,在研究区的北部和南部都有涉及尤其以东南部污染较为严重;Cr 含量较高的区域分布于研究区的中部和南部,北部含量较低;Hg 含量较高的区域主要集中在研究区的中南部,含量较低的区域分布于北部;Cd 污染含量较高的区域主要位于研究区的东南部,东北部的含量较小;Pb 含量较高的区域主要分布于研究区的南部,北部含量较低;As 含量较高的区域主要集中在研究区的东北部,含量较低的区域位于西南部。

综上所述,在研究区的南部土壤重金属元素 Pb、Hg、Cd、Cu、Zn、Ni 和 Cr 的含量较高,As 含量较高的区域集中分布于东北部。

2.4 土壤潜在生态风险评价

按照 Hakanson 潜在风险评价法计算得到 8 种土壤重金属 Hg、Zn、Ni、Cr、Pb、Cd、Hg 和 As 的生态风险指数值及其对应的生态风险等级^[18-19],在表 7 中可以看出,8 种重金属的潜在生态风险指数 E_i^r 由强到弱为 $Hg>Cd>As>Pb>Cu>Ni>Cr>Zn$ 。从不同生态风险程度的样本数比例来看,对于 Zn、Ni、Cr、Pb、Cu 和 As 元素,所有土壤样点都属于轻度生态风险。而对 Cd 和 Hg 元素来看,大多数样点的生态风险程度达到中度以上:Cd 元素达到中度生态风险等级的样点有 30.7%,达到强度及强度以上生态风险的样点有 7.13%;对于 Hg 元素来说,有 16.4%样点达到了强度生态风险等级,有 4.34%样点的生态风险程度达到了很强,甚至有 2.1%的样点生态风险程度达到了极强。从单元素的生态风险来看,Cd 和 Hg 的生态风险水平较为严重,需要引起重视。

进一步分析太原市土壤重金属潜在生态风险的空间分布特征,对研究区土壤样点的综合生态风险评价价值(RI)进行普通克里格插值,结果见图 3。可以看出,研究区南部的土壤重金属潜在生态风险程度最高,西部生态风险程度次之,研究区北部和东部的生态风险程度相对较轻,通过计算得到研究区的综合生态风险指数 RI 的平均值为 293.55,表明研究区的土壤状况整体达到中等程度的生态风险。

2.5 土壤重金属污染与污染源的关系研究

通过对研究区的污染源进行实地调查,将可能和重金属污染相关的污染源分为 6 种类型,即化工业,

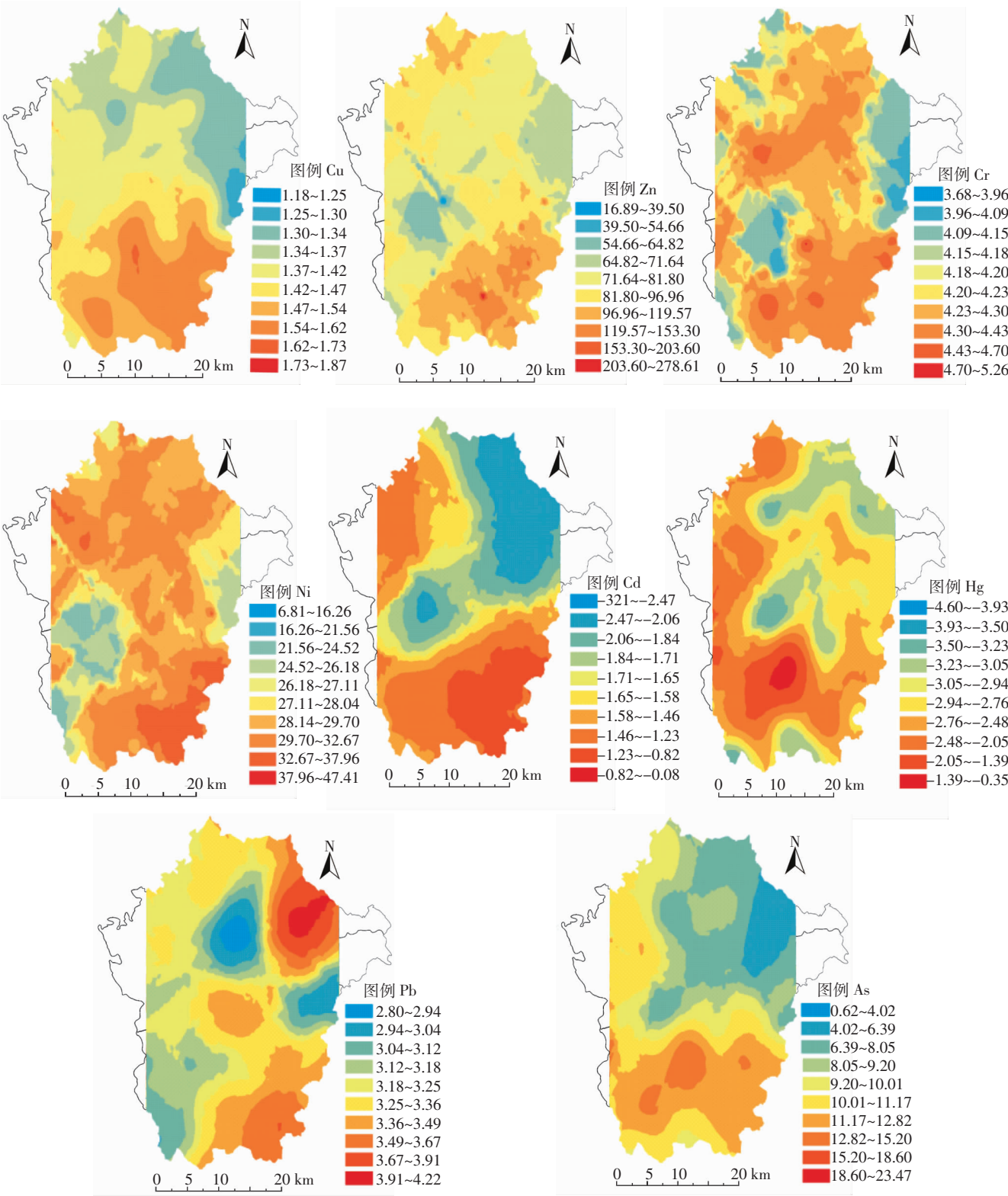


图 2 重金属元素的空间分布特征

Figure 2 Spatial variation of soil heavy metals

矿业、电镀业、机械制造业、造纸厂和电力。由图 4 可知,化工类的污染源分布较广主要分布在太原市的中东部和北部;矿石类的污染源大多分布在太原市的中

西部及南部地区,且主要分布在万柏林区和晋源区;电镀厂零星分布于万柏林区、小店区和尖草坪区;机械制造类的污染源最多,分布较广,在各个行政区都

表 7 研究区重金属潜在生态风险指数
Table 7 Index of heavy metal potential ecological risk in
soils of studied area

重金属	E_i^* 最低值	E_i^* 最高值	E_i^* 平均值	不同生态风险程度的样本数比例				
				轻度	中度	强	很强	极强
Cu	1.27	59.80	6.99	100%	0	0	0	0
Zn	0.27	4.39	1.43	100%	0	0	0	0
Ni	1.14	7.93	4.97	100%	0	0	0	0
Cr	0.53	6.99	2.68	100%	0	0	0	0
Pb	2.15	25.05	9.45	100%	0	0	0	0
Cd	6.63	152.49	40.54	62.1%	30.7%	7.13%	0	0
Hg	7.55	528.30	69.81	36.4%	40.7%	16.4%	4.34%	2.1%
As	5.23	19.87	11.75	100%	0	0	0	0

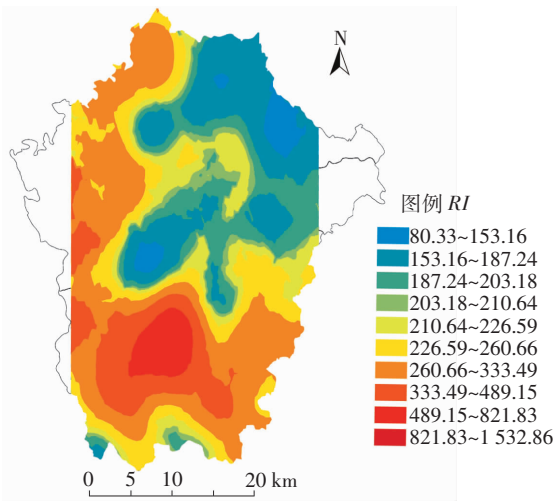


图 3 研究区土壤综合生态危害分布
Figure 3 Distribution of integrated ecological hazard in studied area

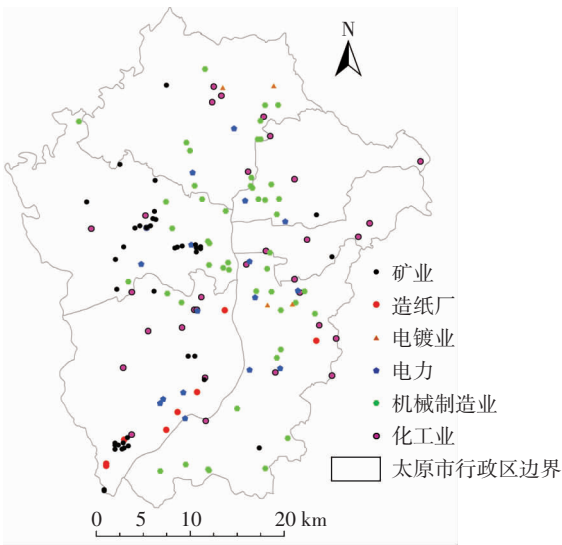


图 4 研究区污染源分布图
Figure 4 Distribution of pollution sources in studied area

有所分布,于中东部居多;造纸厂主要分布在太原市西南部,多在晋源区内;电力类的污染源大多分布于城市周边,除迎泽区外,各个行政区都有分布。

本文通过实地考察按照就近原则对 140 个样点进行了分类统计,有 20 个样点离化工类污染源最近,有 52 个样点离矿业污染源最近,有 47 个样点离机械制造业污染源最近,分别有 2、9、10 个样点离电镀业、造纸业和电力 3 个污染源最近。

为了研究污染源与周边土壤重金属污染的情况,本文采用单因素方差分析来检验由单一因素(即污染源类别)影响的土壤重金属含量在各因素水平分组下均值之间的差异是否具有统计意义。其中,污染源各因素水平分组为 6 个类别(即化工业、矿业、电镀业、机械制造业、造纸厂和电力),因变量为土壤重金属含量(即 Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、Cd、Hg、As)。

在给定显著性水平为 0.05 的前提下,方差分析结果表明,污染源类别对土壤重金属 Zn、Pb、Cd、Hg 的含量影响有显著差异,对应的 F 值分别为 3.312、3.269、3.925 和 3.933,相应的概率 P 值为 0.007、0.008、0.002 和 0.043。由于这些概率 P 值小于显著性水平值,认为各类污染源对土壤重金属 Zn、Pb、Cd、Hg 的污染有显著影响;而对于土壤中重金属 Cu、Ni、Cr、As 的含量,由于这些元素的概率 P 值大于显著性水平值,认为各类污染源对土壤重金属 Cu、Ni、Cr、As 的污染没有显著差异。

为了进一步探讨哪类污染源对土壤 Zn、Pb、Cd、Hg 的污染有显著影响,采用 Bonferroni 检验法进行多重比较。结果如表 8 所示。

重金属 Zn 的 Bonferroni 检验结果表明,化工类污染源和矿石类污染源之间、化工类污染源和机械制造业污染源之间有显著差异,结合各样点重金属元素 Zn 的含量值分析,大多矿石类污染源和机械制造业污染源附近的土壤含锌量并不是很高,而大多化工类污染源附近土壤的含锌量较高。这与太原市以铁矿著称有较密切的关系,机械制造业企业也以铁、钢为主,同时与化工类企业排放硫酸锌也密不可分。这也从另一个侧面说明太原市的土壤重金属 Zn 污染在很大程度上可能是由化工类企业造成的。

重金属 Pb 的 Bonferroni 检验结果表明,化工类和矿石类、化工类和机械制造业的污染源之间有显著差异,结合各样点重金属元素 Pb 的含量值分析,土壤含铅量较高的几个样点都分布在化工厂附近。这说明太原市的化工类污染源对土壤铅污染的影响较大,而

表8 Bonferroni 检验结果
Table 8 Results of Bonferroni test

企业类型	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	Cd	Hg	As
化工	37.33	114.08a	31.9	79.77	34.48a	0.38a	0.12	10.9
采矿	35.55	84.45b	28.96	73.84	27.34b	0.52	0.10a	11.39
电镀	23.30	76.06	27.69	65.44	21.65	0.11b	0.05	10.09
机械制造	30.15	85.12b	29.54	70.89	24.85b	0.23	0.06b	10.11
造纸	31.85	97.79	30.63	85.51	28.54	0.29	0.82	10.25
电力	30.11	92.22	29.29	70.91	30.86	0.28	0.12	9.31
sig.(ANOVA)	0.917	0.007**	0.381	0.413	0.008**	0.002**	0.043*	0.712

注:** Sig.<0.01(双尾检验),* Sig.<0.05(双尾检验);(a,b)代表 Bonferroni 检验的结果,两字母相同则表示无显著差异,不同则表示有显著差异。

Note:** Significant < 0.01 (two-tailed), * Significant<0.05 (two-tailed). Letters(a,b) indicate the results of Bonferroni test; the same letter shows no significant difference while different letters indicate significant difference.

矿石类污染源的铅污染并不那么严重。

重金属 Cd 的 Bonferroni 检验结果表明,化工类企业和电镀类企业之间有较显著的差异。结合各样点重金属元素 Cd 的含量分析,电镀厂附近的土壤含 Cd 量均不高,土壤含 Cd 量较高的几个样点都分布在化工类企业附近,说明化工类企业也是土壤镉的一个主要排放源。

重金属 Hg 的 Bonferroni 检验结果表明,矿石类污染源和机械制造类污染源之间的差异较显著。结合所有土壤样点的含汞量分析,矿石类污染源附近的土壤的含汞量明显超出机械制造类企业附近的。这也说明矿石类污染源是土壤重金属汞的一类主要污染源。

综上所述,对于研究区而言,化工类企业、矿石类企业是需要重点加强治理的两类污染源,它们对土壤重金属污染具有显著的影响,尤其是化工类企业,是多种土壤重金属的主要排放源,对人类健康和生态环境有着极大的危害。

3 结论

(1)研究区土壤重金属元素 Zn、Cr、Pb、Cd 的均值都超过了山西省土壤背景值,元素 Ni、Hg、Cu 和 As 与背景值相差不大。研究区除 Cd、Hg 的变异系数较大外,其他元素的变异系数在 0.16~0.33 之间,属于中等强度变异。

(2)空间分布分析表明研究区南部地区受重金属污染的程度要大于北方地区,尤其以东南部地区最为严重。生态风险评价结果显示,研究区土壤整体达到中度生态风险。从单元素的生态风险来看 Cd 和 Hg 的生态风险水平较为严重,需要引起重视。

(3)对于研究区而言,化工类企业、矿石类企业是需要重点加强治理的两类污染源,它们对土壤重金属

污染具有显著的影响,尤其是化工类企业,是多种土壤重金属的主要排放源。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2014: 1-5.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Report on the national general survey on soil contamination[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2014: 1-5.
- [2] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平, 等. 太原市污灌区土壤重金属污染现状评价[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1553-1560.
XIE Wen-yan, FAN Gui-sheng, ZHOU Huai-ping, et al. Access of heavy metals pollution of the sewage irrigation region in Taiyuan, China [J]. *Journal of Agro-Environment*, 2011, 30(8): 1553-1560.
- [3] 郭翠花, 黄淑萍, 原洪波, 等. 太原市地表土中五种重金属元素的污染监测及评价[J]. 山西大学学报(自然科学版), 1995, 18(2): 222-226.
GUO Cui-hua, HUANG Shu-ping, YUAN Hong-bo, et al. Monitoring and evaluation of heavy-metal pollution state in surface-layer soil of Taiyuan City[J]. *Journal of Shanxi University(Natural Science Edition)*, 1995, 18(2): 222-226.
- [4] 张乃明. 太原污灌区土壤重金属污染研究[J]. 农业环境保护, 1996, 15(1): 21-23.
ZHANG Nai-ming. Present situation evaluation of the heavy metal pollution in sewage irrigation area of Taiyuan[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(1): 21-23.
- [5] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1285-1293.
LIU Yong, YUE Ling-ling, LI Jin-chang. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(6): 1285-1293.
- [6] 姚娜, 彭昆国, 刘足根, 等. 石家庄北郊土壤重金属分布特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(2): 313-321.
YAO Na, PENG Kun-guo, LIU Zu-gen, et al. Distribution and risk as-

- assessment of soil heavy metals in the north suburb of Shijiazhuang City[J]. *Journal of Agro-Environment*, 2014, 33(2):313-321.
- [7] 段惠慈, 张乃明, 许桂兰. 太原市污灌区重金属污染现状评价[J]. 山西师大学报(自然科学版), 1997, 11(1):60-63.
- DUAN Yong-hui, ZHANG Nai-ming, XU Gui-lan. Present situation evaluation of the heavy metal pollution in sewage irrigation area of Taiyuan[J]. *Journal of Shanxi Teacher's University Natural Science Edition*, 1997, 11(1):60-63.
- [8] 孙亚乔, 段磊, 徐中华, 等. 农灌区土壤重金属形态分布及潜在生态风险[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(86):17578-17580.
- SUN Ya-qiao, Duan Lei, XU Zhong-hua, et al. Speciation characteristics and potential ecological risk of heavy metals in soil in irrigation district[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2012, 40(86):17578-17580.
- [9] 郑海龙, 陈杰, 邓文靖, 等. 城市边缘带土壤重金属空间变异及其污染评价[J]. 土壤学报, 2006, 43(1):40-45.
- ZHENG Hai-long, CHEN Jie, DENG Wen-jing, et al. Spatial analysis and pollution assessment of soil heavy metals in the steel industry areas of Nanjing periurban zone[J]. *Acta Penologica Sinica*, 2006, 43(1):40-45.
- [10] 李晋昌, 张红, 石伟. 汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布[J]. 环境科学学报, 2013, 34(1):116-120.
- LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei. Pollution assessment and spatial distribution of soil Hg and Cr in the Taiyuan area of the Fenhe river[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 34(1):116-120.
- [11] 卓文珊, 唐建锋, 管东生. 广州市城区土壤重金属空间分布特征及其污染评价[J]. 中山大学学报, 2009, 48(4):47-51.
- ZHUO Wen-shan, TANG Jian-fen, GUAN Dong-shen. The distributive character and pollution assessment of heavy metals in urban soil of Guangzhou[J]. *Acta Scientiarum Natuealium Universitatis Sunyatseni*, 2009, 48(4):47-51.
- [12] 陈江, 张海燕, 何小峰, 等. 湖州市土壤重金属元素分布及潜在生态风险评价[J]. 土壤, 2010, 42(4):595-599.
- CHEN Jiang, ZHANG Hai-yan, HE Xiao-feng, et al. Distribution and evaluation on potential ecological risk of heavy metals in soils of Huzhou[J]. *Soils*, 2010, 42(4):595-599.
- [13] 高瑞英. 土壤重金属污染环境风险评价方法研究进展[J]. 科技管理研究, 2012(8):45-50.
- GAO Rui-ying. Progress of environment risk assessment method on heavy metal contamination in soil[J]. *Science and Technology Management Research*, 2012(8):45-50.
- [14] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [15] 史崇文, 赵玲芝, 郭新波, 等. 山西省土壤元素背景值的分布规律及其影响因素[J]. 农业环境保护, 1996, 15(1):24-28.
- SHI Chong-wen, ZHAO Ling-zhi, GUO Xin-bo, et al. The distributive character and influential factor of background values of soil elements in Shanxi[J]. *Agro-environmental Protection*, 1996, 15(1):24-28.
- [16] 王济, 张浩, 曾希柏, 等. 贵阳市城区土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 土壤, 2010, 42(6):928-934.
- WANG Ji, ZHANG Hao, ZENG Xi-bai, et al. Distribution and pollution assessment on heavy metals in urban soils of Guiyang[J]. *Soils*, 2010, 42(6):928-934.
- [17] 何玉生. 海口城市土壤重金属污染特征与生态风险评估[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2):421-428.
- HE Yu-sheng. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Haikou urban soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(2):421-428.
- [18] 徐清, 张立新, 刘素红, 等. 表层土壤重金属污染及潜在生态风险评价:包头市不同功能区案例研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6):6-12.
- XU Qing, ZHANG Li-xin, LIU Su-hong, et al. Heavy metal pollution of surface soil and its evaluation of potential ecological risk: A case study of different functional areas in Baotou City[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2008, 17(6):6-12.
- [19] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hongkong[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(11/12):1361-1368.