

倪晓坤, 封雪, 于勇, 等. 典型固废处理处置场周边土壤重金属污染特征和成因分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2146–2156.

NI Xiao-kun, FENG Xue, YU Yong, et al. Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in soils surrounding a typical solid waste disposal plant[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9): 2146–2156.

典型固废处理处置场周边土壤 重金属污染特征和成因分析

倪晓坤^{1,2}, 封雪², 于勇², 姜晓旭², 李宗超², 李好¹, 夏新^{1,2*}

(1. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国环境监测总站, 北京 100012)

摘要:为探讨典型固废处理处置场周边表层土壤重金属污染特征和污染源,以浙江两家典型危废处理处置场和一家生活垃圾处理处置场周边作为研究区域,采集并测定表层土壤样品中5种重金属(Cd、Hg、As、Pb、Cr)的含量。运用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态风险指数法对重金属的污染特征进行评价;采用多元统计法分析重金属来源。结果表明:研究区土壤中Cd为首要污染物,三家固废处理处置场分别有56.25%、50.00%和58.82%的点位达轻度污染等级及以上;多元统计分析表明,不同处理处置场周边重金属来源不同,其中危废处理处置场周边Cd、Hg、As和Pb主要受处置危废种类、处置模式等因素影响,Cr主要受自然因子和历史原因影响。研究区土壤Cd潜在生态风险程度最高,三场地潜在生态风险指数分别为604.26、1473.08和165.13,其次为Hg,三场地分别为202.99、441.83和139.64。研究表明,危废处理处置场周边土壤污染比生活垃圾处理处置场周边严重,为重度污染,主要污染物为Cd、As和Cr。危废处理处置场周边土壤潜在生态风险程度较生活垃圾处理处置场高,且分布较不均匀,应引起警惕,予以重视。

关键词:危废处理处置场;生活垃圾处理处置场;重金属;污染特征;潜在生态风险

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2019)09-2146-11 **doi:**10.11654/jaes.2019-0504

Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in soils surrounding a typical solid waste disposal plant

NI Xiao-kun^{1,2}, FENG Xue², YU Yong², JIANG Xiao-xu², LI Zong-chao², LI Yu¹, XIA Xin^{1,2*}

(1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China)

Abstract: In this study, we explored heavy metal pollution characteristics and sources in surface soils surrounding the typical solid waste disposal plant. Two hazardous waste disposal plants and one municipal solid waste plant were selected in this study, and five types of heavy metals (Cd, Hg, As, Pb, Cr) were determined in the soil surrounding them. Single factor pollution index, Nemerow comprehensive pollution index and potential ecological risk index were used to investigate the pollution characteristics. Multivariate statistical analysis was used to investigate the pollution sources in the study area. The results showed that Cd was the primary pollutant in the soil, with 56.25%, 50.00%, and 58.82% of total pollutants for each of the plants. The soil pollution around the hazardous waste disposal plant was more serious than that in the municipal solid waste plant, with Cd, As, and Cr being the obvious pollutants. The results of the multivariate statistical analysis indicated that the sources of heavy metals in different solid waste disposal was plants were different. Cd, Hg, As, and Pb pollutants originated from hazardous waste and disposal, while Cr primarily originated from natural sources. The potential ecological risk assessment showed

收稿日期: 2019-05-07 录用日期: 2019-07-29

作者简介: 倪晓坤(1993—), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 从事土壤环境研究。E-mail: 18810373063@163.com

*通信作者: 夏新 E-mail: 1354062546@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1800306)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2018YFC1800306)

that risks Cd and Hg were high around the study area, and the contribution of Cd to risk was the highest among the five heavy metals. The E_i^* of Cd and Hg were 604.26, 1 473.08, 165.13 and 202.99, 441.83, 139.64, of three plants respectively. The hazardous waste disposal plant had high levels of potential ecological risk; therefore, methods to control the effects of hazardous waste disposal plant pollution must be developed.

Keywords: hazardous waste disposal plant; municipal solid waste plant; heavy metal; pollution characteristic; potential ecological risk

随着经济的发展,在工业生产过程中大量产生危险废物,城镇生活水平的提高也伴随大量生活垃圾的产生。我国主要的危废和生活垃圾处理处置方式有焚烧、卫生填埋和堆肥3种,在处置过程中部分污染物随大气、水等介质传输进入土壤^[1-5],对其周边土壤环境造成威胁,因此越来越多学者对危废和生活垃圾处理处置场周边的土壤环境质量开展研究。

在对危废和生活垃圾处理处置场周边土壤环境质量评价的研究中,主要有两种观点,一种认为其周边土壤重金属污染与垃圾处置方式十分相关,且垃圾焚烧是污染的主要来源^[6-8],另一种观点认为其周边的重金属污染与垃圾处置方式相关性不大,主要受外部污染源影响^[9-11],且不同固废处理处置场周边土壤重金属主要来源不同。

从研究对象来看,研究主要集中在生活垃圾处理处置场,而危废处理处置场研究较少;在对处置方式影响的研究中,更多研究集中在焚烧等单一处置方式的影响^[12-15],多种方式复合影响评估研究较少。而实际情况是,我国危废或生活垃圾在处置时,选用多种方式处置。本研究选用浙江地区的2家危废处理处置场和1家生活垃圾处理处置场周边表层土壤进行评价,考虑焚烧、填埋多种处置方式和焚烧单一处置方式的影响,分析各类处理处置场污染特征和污染成因,多种方法综合评估土壤环境质量和风险,以期为危废和生活垃圾处理处置场污染风险管控提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和样品采集

选取浙江地区的2家危废处理处置场(命名为A1、A2)和1家生活垃圾处理处置场(命名为B1)周边

为研究区域,分别以3家处理处置场为中心,在其周边1000 m范围内依据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004),并结合《土壤环境监测技术要点分析》^[16]进行布点,其中在主导风向的下风向布设6~8个点,在废水排放主方向布设3~5个点,其他方向布设2~4个点,人类活动区依据实际情况适当加密,共布设点位49个(图1)。每个采样点用对角线法采集1份土壤表层混合样并记录样品相关信息。

研究区地处浙江省,属于亚热带湿润季风气候,年平均气温16~19℃,主要土壤类型为棕壤、黄壤、水稻土等,主要种植水稻等农作物。土壤pH 4.13~8.53,有机质含量1.74~33.20 g·kg⁻¹。研究区基本情况见表1。

1.2 实验方法

土壤pH采用玻璃电极测定,仪器型号为S220-K-CN;Hg和As用王水水浴消解,采用原子荧光法测定(GB/T 22105—2008),仪器型号为AFS-830;Cd、Cr和Pb 3种重金属使用酸消解至完全消解,Cd和Pb采用石墨炉原子吸收分光光度法测定(GB/T 17141—1997),Cr采用火焰原子吸收分光光度法测定(HJ 491—2009),仪器型号为AA7000;同时用相同方法测定空白样品,每个样品测定3次,误差在±5%之内。每批样品均使用重金属标准溶液,金属回收率均在90%~110%范围内。

1.3 土壤环境质量评价方法

1.3.1 单因子污染指数法

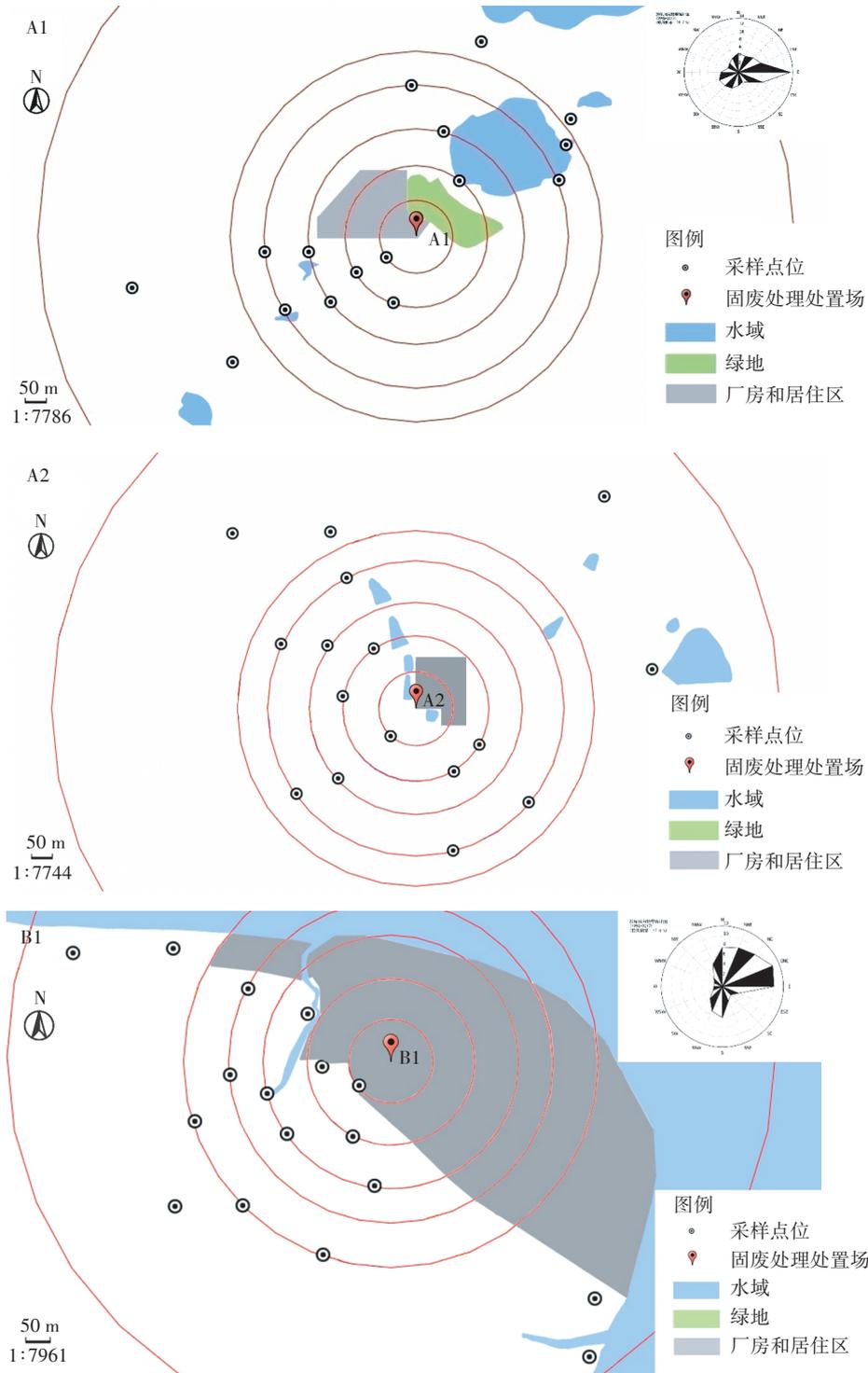
单因子污染指数法^[17]是利用实测数据和标准数据进行比值,对研究区土壤中单一重金属的污染程度进行评价,其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

表1 研究区基本情况

Table 1 The profile of study area general situation

研究区 Study area	建成时间 Completion time	处置场类型 Disposal plant type	处置方式及占比 Disposal mode and proportion	年处理量及类型占比/万t Annual throughput and type proportion	点位数量 Number of points
A1	2008	危废	焚烧(66.7%)和填埋(33.3%)	2.8(工业100%)	16
A2	2011	危废	焚烧	1.4(工业:50% 医疗:50%)	16
B1	2011	生活垃圾	焚烧发电	37.8	17



图中6个圆分别代表距离中心源100、200、300、400、500、1000 m; A2处理处置场未获取风玫瑰图, 西北风和东南风为主导风向
 The six circles represent the distance from the center source 100, 200, 300, 400, 500 and 1000 m. Northwest wind and the southeast wind dominated the wind direction of A2

图1 研究区点位及污染等级分布示意图

Figure 1 Distribution of soil sampling sites and pollution level in the study area

式中: P_i 为土壤中重金属 i 的单因子指数; C_i 为重金属 i 的实测浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; S_i 为评价标准中重金属 i 的浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 由于研究区为污染场地周边, 且主要为

农田和荒地, 因此 S_i 选取《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中土地利用类型为“其他”的风险筛选值作为标准值(表2)。

表2 农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618—2018)

Table 2 Risk screening values for soil contamination of agricultural land(GB 15618—2018)

元素 Element	pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5
Cd	0.3	0.3	0.3	0.6
Hg	1.3	1.8	2.4	3.4
As	40	40	30	25
Pb	70	90	120	170
Cr	150	150	200	250

1.3.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法^[18]可以全面评价土壤中各污染物的综合平均污染水平,综合单因子污染指数平均值和最高值,突出较重污染重金属的环境影响,其计算公式为:

$$P_N = \sqrt{\frac{\bar{P}_i^2 + P_{i\max}^2}{2}}$$

$$\bar{P}_i = \frac{1}{n} \sum P_i$$

式中: P_N 为内梅罗综合污染指数; $P_{i\max}$ 为*i*采样点中重金属单因子指数的最大值; \bar{P}_i 为*i*采样点中重金属单因子指数的算术平均值; P_i 为土壤中重金属*i*的单因子指数。

单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法的分级标准具体见表3。

1.3.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法^[19]是一种用定量的方法对重金属的潜在风险程度进行划分,快速且准确反映多种重金属污染综合影响的方法^[20-23]。其计算公式为:

$$C_j^i = \frac{C_i}{C_n^i}$$

$$E_i^i = T_i^i C_j^i$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_i^i$$

式中: C_j^i 为单项重金属的污染系数; C_i 为重金属*i*的实

表3 单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法分级标准

Table 3 Classification criterion of single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index

环境质量 Environmental quality	P_i	P_N	污染等级 Pollution level
1	$P_i \leq 0.7$	$P_N \leq 0.7$	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_N \leq 1.0$	预警
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染
5	$P_i > 3.0$	$P_N > 3.0$	重度污染

测含量; C_n^i 为重金属*i*的参比值,本研究以浙江省土壤背景值的算术平均值为参比值; E_i^i 为重金属*i*的单因子潜在生态风险指数; T_i^i 为重金属*i*的毒性系数,Cr、Cd、Pb、As和Hg的毒性响应系数分别为2、30、5、10和40,本研究检出的5种重金属中,Hg的*T_{iⁱ}*值最大(40),因此应用原分级标准^[2]; RI 为研究区多种重金属的综合潜在生态风险指数。具体分级标准见表4。

表4 重金属污染潜在生态风险指数法分级标准

Table 4 Classification criterion and potential ecological risk index of heavy metals

E_i^i	RI	危害程度 Risk level
$E_i^i < 40$	$RI < 150$	轻微生态风险
$40 \leq E_i^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中度生态风险
$80 \leq E_i^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强生态风险
$160 \leq E_i^i < 320$	$RI \geq 600$	很强生态风险
$E_i^i \geq 320$		极强生态风险

1.4 数据处理

使用ArcGIS 10.2进行土壤重金属含量空间插值制图,使用SPSS 19.0进行数据统计分析、Pearson相关性分析和主成分分析,分辨不同重金属的来源^[24-25]。使用Excel 2010进行数据记录。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属元素含量特征

以浙江省土壤环境背景值^[26]为参照(表5),3家固废处理处置场周边表层土壤中5种重金属元素均存在不同程度的积累,Cd积累明显,A1、A2和B1周边分别为背景值的20.14、49.10、5.53倍。A1和A2周边土壤元素含量较不均匀^[27],A1周边Cd、Hg和Cr的变异系数远超其他元素,分别为117.55%、107.15%、182.73%;A2周边5种元素的变异系数均较高。根据偏度和峰度情况判断,A1周边除Cr外,其他4种元素均近似正态分布,A2周边5种元素均符合对数正态分布。B1周边土壤5种重金属元素含量分布较均匀,变异系数均明显小于A1和A2,Hg、Pb和Cr近似正态分布。

2.2 土壤重金属污染程度与空间分布分析

2.2.1 土壤重金属污染程度分析

单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法评价结果(表6)表明,3家固废处理处置场周边首要污染物均为Cd。综合分析发现,两家危废处理处置场周边土壤污染较重, P_N 分别为2.15和6.68, $P_{i\max}$ 分别为7.32和55.32,均达重度污染。A1和A2周边,50%以

表5 研究区表层土壤中重金属元素的描述性统计

Table 5 Descriptive statistics for heavy metals in soil in the study area

研究区 Study area	元素 Element	含量范围 Content range/ mg·kg ⁻¹	平均值±标准差 Mean-standard±Deviation/ mg·kg ⁻¹	变异系数 Coefficient of variation/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	浙江省背景值 ^a Background values/ mg·kg ⁻¹	比值 ^b Proportion
A1 N=16	Cd	0.042~6.000	1.410±1.660	117.55	1.59	2.71	0.07	20.14
	Hg	0.018~1.550	0.436±0.470	107.15	1.29	0.77	0.086	5.08
	As	3.40~58.70	19.48±15.33	78.69	1.18	1.25	9.2	2.12
	Pb	18.9~56.6	34.4±10.1	29.31	0.75	0.46	23.7	1.45
	Cr	16.8~1 186.0	151.7±277.1	182.73	3.93	15.63	52.9	2.87
A2 N=16	Cd	0.055~42.300	3.437±10.460	304.21	3.89	15.32	0.07	49.10
	Hg	0.026~12.800	0.950±3.170	333.32	3.97	15.85	0.086	11.05
	As	10.20~1 512.00	136.10±371.53	272.98	3.84	15.05	9.2	14.79
	Pb	41.4~5 856.0	754.0±1 726.4	228.95	2.61	5.83	23.7	31.82
	Cr	27.8~1 837.0	185.4±440.9	237.78	3.99	15.92	52.9	3.51
B1 N=17	Cd	0.210~1.120	0.385±0.210	55.22	2.86	9.52	0.07	5.53
	Hg	0.120~0.800	0.300±0.170	54.95	1.77	4.08	0.086	3.59
	As	4.08~14.70	6.40±2.33	36.38	3.07	11.18	9.2	0.71
	Pb	52.3~119.0	83.2±17.5	21.03	0.50	0.25	23.7	3.51
	Cr	28.6~80.2	44.0±16.5	37.54	1.08	0.29	52.9	0.85

注:a.取浙江省背景值的算术平均值;b.比值=土壤中某重金属含量实测值/浙江省某重金属含量背景值;c.N为采样点位数量。

Notes:a.The arithmetic mean of the background value of Zhejiang Province;b.Proportion=Measured value / The background value of Zhejiang Province;c.N means the number of sampling points.

上点位轻度及以上污染,且都存在Cd、As和Cr污染现象;生活垃圾处理处置场 P_N 为1.08,为轻度污染,41.18%的点位出现轻度及以上污染,污染主要由Cd和Pd造成。

结合研究区基本情况进一步对污染特征进行分析发现,对于危废处理处置场周边,A2的污染程度较A1明显,但运行时间短,年处理量少(表1),可见投产时间、年处理量不是影响土壤污染程度的直接原因。从危废类型来看,A2有一半的医疗危废,而A1仅处理工业危废,因此医疗危废对处理处置场周边表层土壤重金属的影响可能大于工业危废。从焚烧处理量来看,A1与A2接近,但A2污染更加严重,因此危废种类对土壤重金属强富集的影响较处置方式更大。

2.2.2 土壤重金属污染空间分布

采用普通克里金法,分别对3家固废处理处置场周边5种重金属元素含量空间分布进行插值(图2)。A1周边Cd、Hg、As和Pb含量呈岛状和带状相结合分布特点,在主导风向的下风向(WS和W)含量较高,这可能与A1进行危废焚烧处理有关^[8]。同时Cd、Hg和Pb在E、SE和N方向存在高浓度分布,根据现场调查发现,在NE方向存在水域,由于填埋过程产生的渗滤液含有大量重金属^[28],该区域疑似受到渗滤液影

响。Cr的空间分布与其他4种有明显区别,整体基本一致且含量较高。

A2周边Cd、Hg、As和Pb均呈现明显的风向特征,在主导风向的下风向(NW和SE)含量较高。Cr呈现岛状分布,在S方向呈高浓度分布。

B1周边Cd、Cr和As均在NW方向存在高浓度区,整体呈从NW到SE递减的变化趋势。Hg和Pb在主导风向的下风向(SE)含量较高。此外,Pb在WS方向也存在高含量区域。

2.3 土壤重金属污染成因分析

2.3.1 相关性分析

相关性分析发现(表7),A1和A2周边Cd、Hg、As和Pb呈显著正相关,具同源性,而Cr与Cd、Hg、As均不具有显著相关性。

B1周边As和Cr、Cd均呈极显著相关,Hg和Pb与其他3种元素均无显著相关性,说明生活垃圾处理处置场周边Hg、Pb与As、Cd、Cr来源不同。

2.3.2 主成分分析

3家固废处理处置场周边KMO效度检验值均在0.5以上,Bartlett球度检验 P 值均小于显著性水平0.05,因此对数据进行主成分分析,见表8。

A1和A2均可提取两个主成分(特征值大于1),

累积方差贡献率分别为86.62%和99.96%,基本反映全部数据的主要信息。在第一主成分中,Cd、Hg、As和Pb有较高的正载荷,这种组合特征说明主要为人为污染源,这与已有研究结果一致^[29-30],且验证了相关性分析中的结论。尹伊梦等^[31]认为Pb和Hg的主要来源是垃圾处置,结合空间分布特征,可得第一主成分主要反映焚烧和填埋处置过程的影响,为人为因子。

第二主成分为Cr,A1周边Cr载荷为0.958,结合单因子评价结果,A1周边Cr元素有93.75%的点位为清洁状态,部分点位重度污染,可能存在高背景点位。A2周边Cr载荷为0.976,其实测含量与浙江省背景值差别不大,表明Cr主要受自然地球化学作用的影响。张一修等^[32]对贵阳市土壤重金属元素含量进行评价,认为Cr主要受成土母质影响,因此A1周边第二主成分认为是自然源因子和历史因子共同作用,A2周边第二主成分认为是自然源因子。

生活垃圾处理处置场(B1)根据特征值大于1提取出两个主要成分,累积方差贡献率为75.73%,第二

主成分为Hg和Pb,两者之间无显著相关性,只提取两个主成分不能完全代表全部数据的主要信息,因此根据特征值大于0.6,提取第3个主要成分,此时累积方差贡献率为89.31%,可以基本反映主要信息。第一主成分包括Cd、As和Cr,由于As和Cr的变异系数较小,含量分别为浙江省背景值的71%和85%,推断As和Cr受人为影响较少,主要是来自成土母质^[33]。而Cd可能与工业活动或交通运输过程相关^[30],B1周边有高速公路和其他工业企业,因此第一主成分是自然过程和周边人为活动的共同作用。第二主成分为Hg,根据Hg的空间分布特征认为垃圾焚烧是主要来源。第三主成分为Pb,结合Pb的空间分布特征可得B1周边Pb是垃圾焚烧处置和其他工业源共同作用的结果。

2.4 潜在生态风险评价

3家处理处置场周边表层土壤中Cd的潜在生态危害最大,Hg次之(表9)。其中,A1周边Cd处于“极强”风险等级, E_i 为604.26,Hg处于“很强”风险等级, E_i 为202.99。A2周边Cd和Hg均处于“极强”风险等

表6 研究区土壤重金属的单因子污染指数和内梅罗综合污染指数评价特征值统计表

Table 6 Eigenvalue statistics of single factor pollution index and Nemerow pollution index of heavy metals in the study area

研究区 Study area	元素 Element	\bar{P}_i	$P_{i\min} \sim P_{i\max}$	点位总 污染率 Pollution rate/%	不同等级污染点位比例 Proportion of pollution levels/%				
					清洁 ($P \leq 0.7$)	预警 ($0.7 < P \leq 1$)	轻度污染 ($1 < P \leq 2$)	中度污染 ($2 < P \leq 3$)	重度污染 ($P > 3$)
					Clean	Warning	Low pollution	Moderate pollution	Heavy pollution
A1 N=16	Cd	2.63	0.14~10.00	56.25	43.75	0	12.50	6.25	37.50
	Hg	0.14	0.01~0.45	0	100	0	0	0	0
	As	0.75	0.09~2.35	37.50	56.25	6.25	31.25	6.25	0
	Pb	0.23	0.11~0.33	0	100	0	0	0	0
	Cr	0.64	0.07~4.74	6.25	93.75	0	0	0	6.25
	P_N	2.15	0.22~7.32	56.25	43.75	0	12.50	12.50	31.25
A2 N=16	Cd	7.05	0.18~70.50	50.00	37.50	12.50	18.75	0	31.25
	Hg	0.32	0.01~3.77	0	100	0	0	0	0
	As	5.04	0.26~60.48	25.00	56.25	18.75	6.25	0	18.75
	Pb	5.75	0.39~36.39	50.00	31.25	18.75	12.50	12.50	25.00
	Cr	1.00	0.14~9.19	6.25	87.50	6.25	0	0	6.25
	P_N	6.68	0.44~55.32	50.00	31.25	18.75	6.25	25.00	18.75
B1 N=17	Cd	1.25	0.53~3.73	58.82	17.65	23.53	52.94	0	5.88
	Hg	0.20	0.06~0.44	0	100	0	0	0	0
	As	0.17	0.10~0.37	0	100	0	0	0	0
	Pb	1.05	0.52~1.70	58.82	17.65	23.53	58.82	0	0
	Cr	0.29	0.16~0.54	0	100	0	0	0	0
	P_N	1.08	0.44~2.76	41.18	11.76	47.06	35.29	5.88	0

注:点位总污染率=污染达轻度污染等级及以上的样本数/总样本数。

Note: Pollution rate = Samples up to low pollution / Total samples.

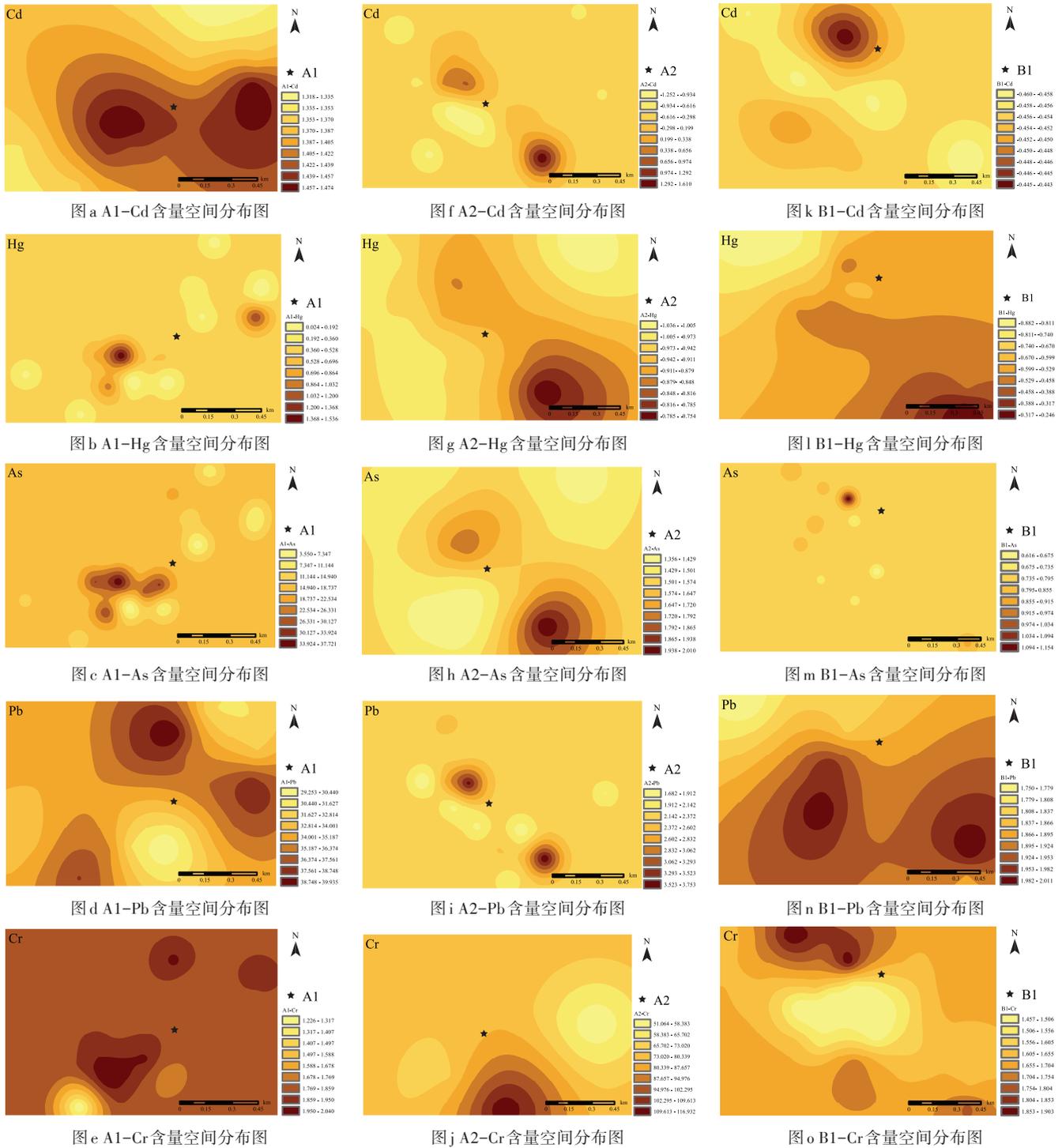


图2 研究区重金属含量空间分布

Figure 2 Spatial distribution of heavy metals in soils in the study area

级, E_i^j 分别为 1 473.08 和 441.83。B1 周边 Cd 和 Hg 均在“中度”及以上等级中分布, E_i^j 分别为 165.13 和 139.64。

3 家处理处置场的综合潜在生态风险主要来自于 Cd 和 Hg 两种元素, 且主要受 Cd 元素的影响。A1

周边 Cd 和 Hg 对 RI 的贡献率为 95.94% (图 3), 仅 Cd 的贡献率就达 71.86%。A2 周边 Cd 和 Hg 对 RI 的贡献率达到 85.91%。B1 周边 Cd 和 Hg 的贡献率高达 92.09%, 两元素对综合生态风险的贡献程度一致。

危废处理处置场周边表层土壤中各采样点 RI 差

别较大,局部地区风险极强,可能存在集中处置区域导致局部地区污染过重情况(表10)。生活垃圾处理处置场周边各采样点的潜在生态风险差别较小,整体比较均匀,58.82%的点位处于“中度”风险,这与郭彦

表7 表层土壤重金属皮尔逊相关分析

Table 7 Pearson correlation analysis for heavy metals in topsoil

研究区 Study area	元素 Element	Cd	Hg	As	Pb	Cr
A1 N=16	Cd	1.000				
	Hg	0.901**	1.000			
	As	0.975**	0.895**	1.000		
	Pb	0.585*	0.477	0.570*	1.000	
	Cr	-0.041	-0.099	-0.200	0.121	1.000
A2 N=16	Cd	1.000				
	Hg	0.994**	1.000			
	As	0.999**	0.991**	1.000		
	Pb	0.854**	0.798**	0.867**	1.000	
	Cr	0.054	-0.047	0.079	0.563*	1.000
B1 N=17	Cd	1.000				
	Hg	0.256	1.000			
	As	0.819**	0.438	1.000		
	Pb	-0.307	-0.074	-0.417	1.000	
	Cr	0.524*	0.103	0.657**	-0.491*	1.000

注:**表示在0.01水平上显著相关;*表示在0.05水平上显著相关。

Note:** and * indicate significant differences at the 0.01 level and 0.05 level, respectively.

表8 研究区表层土壤重金属元素主成分分析结果

Table 8 Principal component analysis for heavy metals in surface soils from the study area

研究区 Study area	元素 Element	PC1	PC2	PC3
A1 N=16	Cd	0.975	0.025	—
	Hg	0.928	-0.063	—
	As	0.975	-0.125	—
	Pb	0.691	0.375	—
	Cr	-0.108	0.958	—
	特征值	3.252	1.079	—
	方差贡献率/%	65.046	21.577	—
	累计贡献率/%	65.046	86.623	—
A2 N=16	Cd	0.986	-0.165	—
	Hg	0.964	-0.264	—
	As	0.990	-0.141	—
	Pb	0.929	0.370	—
	Cr	0.218	0.976	—
	特征值	3.792	1.206	—
	方差贡献率/%	75.842	24.117	—
	累计贡献率/%	75.842	99.959	—
B1 N=17	Cd	0.840	0.096	0.399
	Hg	0.427	0.799	-0.402
	As	0.936	0.152	0.143
	Pb	-0.607	0.491	0.577
	Cr	0.793	-0.335	0.067
	特征值	2.761	1.025	0.679
	方差贡献率/%	55.229	20.497	13.585
	累计贡献率/%	55.229	75.726	89.312

表9 研究区土壤重金属潜在生态危害评价特征值

Table 9 Eigenvalue statistics of potential ecological risk of heavy metals in the study area

研究区 Study area	元素 Element	平均值 Mean	变化范围 Variation range	不同等级生态风险等级比例 Proportion of risk levels/%				
				轻度($E_i^i < 40$) Low risk	中度($40 \leq E_i^i < 80$) Moderate risk	强($80 \leq E_i^i < 160$) Considerable risk	很强($160 \leq E_i^i < 320$) High risk	极强($E_i^i > 320$) Significantly very high risk
A1 N=16	Cd	604.26	18.00~2 571.43	6.25	25.00	6.25	18.75	43.75
	Hg	202.99	8.37~720.93	25.00	18.75	12.50	18.75	25.00
	As	21.17	3.70~63.80	87.50	12.50	0	0	0
	Pb	7.25	3.99~11.94	100	0	0	0	0
	Cr	5.73	0.64~44.84	93.75	6.25	0	0	0
A2 N=16	Cd	1 473.08	23.57~18 128.57	18.75	6.25	31.25	12.50	31.25
	Hg	441.83	12.09~5 953.49	50.00	18.75	12.50	6.25	12.50
	As	147.93	11.09~1 643.48	68.75	12.50	6.25	6.25	6.25
	Pb	159.08	8.73~1 235.44	62.50	18.75	6.25	0	12.50
	Cr	7.01	1.05~69.45	93.75	6.25	0	0	0
B1 N=17	Cd	165.13	90.00~480.00	0	0	64.71	29.41	5.88
	Hg	139.64	55.81~367.44	0	23.53	52.94	17.65	5.88
	As	6.96	4.43~15.98	100	0	0	0	0
	Pb	17.56	11.03~25.11	100	0	0	0	0
	Cr	1.66	1.08~3.03	100	0	0	0	0

表10 研究区土壤重金属综合潜在生态危害评价特征值

Table 10 Eigenvalue statistics of comprehensive potential ecological risk of heavy metals in the study area

研究区 Study area	平均值 Mean	变化范围 Variation range	不同等级生态风险等级比例 Proportion of risk levels/%			
			轻度 ($RI < 150$) Low risk	中度 ($150 \leq RI < 300$) Moderate risk	强 ($300 \leq RI < 600$) Strong risk	很强 ($RI \geq 600$) Very strong risk
A1	841.41	38.58~3 222.75	25	18.75	12.50	43.75
A2	2 228.93	71.04~26 964.40	31.50	18.75	18.75	25
B1	330.95	182.42~753.67	0	58.82	35.29	5.88

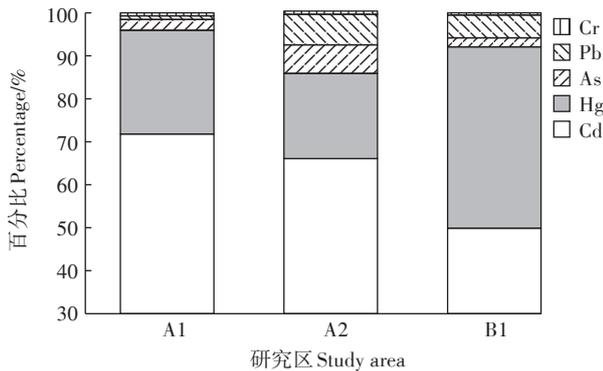


图3 研究区土壤重金属元素对潜在生态危害贡献率示意图
Figure 3 Contribution characteristic of heavy metals to potential ecological risk in the study area

海等^[2]的研究结果一致。

3 结论

(1) 危废处理处置场周边表层土壤重金属的污染等级和综合潜在生态风险均大于生活垃圾处理处置场,且生活垃圾处理处置场周边土壤潜在生态风险分布较均匀,危废处理处置场存在局部风险过重的情况。

(2) 危废处理处置场周边Cd、Hg、As和Pb主要受危废处理处置场的影响,该过程各因素的影响程度为处置的危废种类>处置模式>处置量>投产年限。

(3) 3家固废处理处置场的潜在生态风险主要来自Cd和Hg,主要受Cd的影响。Hg的污染程度未达重度级别,但潜在生态风险等级很高,原因是Hg的毒性系数较大,导致在轻微富集情况下即达强潜在生态风险等级。

(4) 不同固废处理处置场周边重金属污染空间分布和主要来源不同,填埋和焚烧结合处理处置场(A1)Cd、Hg、As和Pb主要受危废焚烧和填埋共同作用,Cr受自然因素和历史因子共同作用。危废焚烧处理处置场(A2)Cd、Hg、As和Pb主要受焚烧影响,Cr主要来源成土母质。生活垃圾焚烧处理处置场(B1)

Cd、As和Cr受自然因子、工业活动和交通运输的共同作用,Hg主要受垃圾焚烧影响,Pb是垃圾焚烧和其他工业源共同作用的结果。

参考文献:

- [1] Zhang H, He P J, Shao L M. Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration in Shanghai[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 156(1/2/3):365-373.
- [2] 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 等. 上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2017, 38(12):5262-5271.
- [3] GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, et al. Pollution characteristics, source analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils surrounding a municipal solid waste incineration plant in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12):5262-5271.
- [4] Wang J J, Zhao H W, Zhong X P, et al. Concentration levels and spatial distribution of heavy metals in soil surrounding a municipal solid waste incineration plant(Shenzhen)[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1):298-304.
- [5] Israel D, David E, Gustav G, et al. Spatial distribution, accumulation and human health risk assessment of heavy metals in soil and groundwater of the Tano Basin, Ghana[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 165:540-546.
- [6] Silva V, Loredó J, Fernández-Martínez R, et al. Arsenic partitioning among particle-size fractions of mine wastes and stream sediments from cinnabar mining districts[J]. *Environ Geochem Health*, 2014, 36:831-843.
- [7] 解惠婷, 张承中, 徐峰, 等. 生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2014, 35(4):1523-1530.
- [8] XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, et al. Distribution and assessment of mercury in the ambient soil of a municipal solid waste incinerator[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(4):1523-1530.
- [9] 吕占禄, 张金良, 陆少游, 等. 某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2019, 40(5):2483-2492.
- [10] LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, et al. Pollution characteristics and evaluation of heavy metal pollution in surface soil around a municipal solid waste incineration power plant[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5):2483-2492.

- [8] 钟山, 高慧, 张漓衫, 等. 平原典型垃圾焚烧场周边土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1):164-169.
ZHONG Shan, GAO Hui, ZHANG Li-shan, et al. Spatial distribution and pollution evaluation of heavy metal in soils surrounding a typical municipal solid waste incineration plant[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(1):164-169.
- [9] Nadal M, Bocio A, Schuhmacher M, et al. Trends in the levels of metals in soils and vegetation samples collected near a hazardous waste incinerator[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, 49(3):290-298.
- [10] Rimmer D L, Vizard C G, Pless-mulloli T, et al. Metal contamination of urban soils in the vicinity of a municipal waste incinerator: One source among many[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 356(1/2/3):207-216.
- [11] 冯经昆, 钟山, 孙立文, 等. 重庆某垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染分布特征及来源解析[J]. 环境化学, 2014, 33(6):969-975.
FENG Jing-kun, ZHONG Shan, SUN Li-wen, et al. Spatial distribution and source analysis of heavy metal contamination in soil surrounding a municipal solid waste incineration plant in Chongqing[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(6):969-975.
- [12] 银燕春, 刘育辰, 王莉淋, 等. 成都城镇生活垃圾特性及处理方案[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10):5964-5970.
YIN Yan-chun, LIU Yu-chen, WANG Li-lin, et al. Characteristics and treating method of municipal solid waste in Chengdu, China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(10):5964-5970.
- [13] Bretzel F, Calderisi M. Contribution of a municipal solid waste incinerator to the trace metals in the surrounding soil[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 182(1):523-533.
- [14] Morselli L, Bartoli M, Brusori B, et al. Application of an integrated environmental monitoring system to an incineration plant[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 289:177-188.
- [15] 赵曦, 黄艺, 李娟, 等. 大型垃圾焚烧厂周边土壤重金属含量水平、空间分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6):1013-1021.
ZHAO Xi, HUANG Yi, LI Juan, et al. Environmental levels, spatial distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in soils surrounding a large solid waste incinerator[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(6):1013-1021.
- [16] 中国环境监测总站. 土壤环境监测技术要点分析[M]. 北京: 中国环境出版社, 2017:3-14.
China National Environmental Monitoring Centre. Analysis for the soil environmental monitoring technology[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017:3-14.
- [17] 杨杉, 汪军, 李洪刚, 等. 重庆市绿地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. 土壤通报, 2018, 49(4):966-972.
YANG Shan, WANG Jun, LI Hong-gang, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in green space of Chongqing City[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(4):966-972.
- [18] 杨潞, 张玉, 张智, 等. 规模化猪场灌区土壤重金属污染特征及风险评价:以重庆市某种猪场为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10):2166-2174.
YANG Lu, ZHANG Yu, ZHANG Zhi, et al. Characteristics and risk of heavy metals pollution in soils of the irrigation area of a large-scale pig farm: A case study of a pig farm in Chongqing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10):2166-2174.
- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sediment logical approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [20] 周永超, 孙慧兰, 陈学刚, 等. 绿洲城市伊宁市表层土壤重金属污染特征及其生态风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2):127-133.
ZHOU Yong-chao, SUN Hui-lan, CHEN Xue-gang, et al. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in surface soil of Yining in oasis city[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(2):127-133.
- [21] 刘芳枝, 胡俊良, 刘劲松, 等. 南岭泡金山矿产集采区土壤重金属空间分布及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1):86-95.
LIU Fang-zhi, HU Jun-liang, LIU Jin-song, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soil in the metal mining area of Paojinshan, Hunan, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1):86-95.
- [22] 王历, 周忠发, 李丹丹, 等. 基于PPC模型与RI指数法的茶产地土壤重金属污染评价[J]. 土壤, 2017, 49(6):1203-1209.
WANG Li, ZHOU Zhong-fa, LI Dan-dan, et al. Assessment of heavy metal pollution in tea-planting soils based on PPC model and RI index method[J]. *Soil*, 2017, 49(6):1203-1209.
- [23] 张怀志, 冀宏杰, 徐爱国, 等. 潍坊市菜地重金属调查与环境风险评价研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12):2154-2160.
ZHANG Huai-zhi, JI Hong-jie, XU Ai-guo, et al. Investigation and environmental risk assessment of heavy metal elements in vegetable farmland of Weifang City[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(12):2154-2160.
- [24] 张家泉, 田倩, 许大毛, 等. 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(6):2355-2363.
ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, et al. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in water and sediment from Daye Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(6):2355-2363.
- [25] 齐鹏, 余树全, 张超, 等. 城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例[J]. 环境科学, 2015, 36(12):4486-4493.
QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in urban surface water sediments from Yongkang[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12):4486-4493.
- [26] 国家环境保护局, 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, 1990:330-380.
State Environmental Protection Administration, China National Environmental Monitoring Centre. Chinese soil element background value[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:330-380.
- [27] 汪东华. 多元统计分析与SPSS应用[M]. 上海: 华东理工大学出版

- 社, 2010:216-237.
- WANG Dong-hua. Multivariate statistical analysis and SPSS application[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2010:216-237.
- [28] 包丹丹, 李恋卿, 潘根兴, 等. 垃圾堆放场周边土壤重金属含量的分析及污染评价[J]. 土壤通报, 2011, 42(1):185-189.
- BAO Dan-dan, LI Lian-qing, PAN Gen-xing, et al. Analysis and pollution evaluation of farmland heavy metal content around the dump[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1):185-189.
- [29] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(2):507-515.
- DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, et al. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, eastern China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2):507-515.
- [30] 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]. *Soil*, 2010, 42(6):928-934.
- [31] 尹伊梦, 赵委托, 黄庭, 等. 电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(2):916-926.
- YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a soil-rice system in an E-waste dismantling area[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(2):916-926.
- [32] 张一修, 王济, 秦樊鑫, 等. 贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1):204-212.
- ZHANG Yi-xiu, WANG Ji, QIN Fan-xin, et al. Comparison of sources of metals in road-dust and soil in Guiyang[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(1):204-212.
- [33] 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 等. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2016, 37(6):2322-2328.
- LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, et al. Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different functional areas in Luoyang[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(6):2322-2328.