

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019090601

吕占禄, 张金良, 张晗, 等. 生物质能电厂周边土壤中重金属元素污染特征及评价[J]. 环境化学, 2020, 39(12): 3480-3494.

LV Zhanlu, ZHANG Jinliang, ZHANG Han, et al. Pollution characteristics and evaluation of heavy metal pollution in surface soil around the Biomass Power Plant[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(12): 3480-3494.

生物质能电厂周边土壤中重金属元素污染特征及评价

吕占禄 张金良* 张晗 邹天森 刘凯 王慢想

(环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室,
中国环境科学研究院, 环境健康风险评估与研究中心, 北京, 100012)

摘要 生物质能是我国和世界各国开发和利用的重要可再生能源, 然而生物质能电厂对周边环境的污染和安全评价尚处于空白。为了解与评价生物质能电厂周边土壤重金属元素的污染状况, 按照点源扇形布点原则, 在生物质能电厂周边四个方位不同距离布点采样, 以远离电厂区域为对照点, 共采集 26 个土壤样品, 分析检测了 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Se、Ag、Cd、Sb、Hg 和 Pb 等 12 种重金属元素的含量。分析结果显示, Cr、Ni、Cu、As、Se、Ag 和 Cd 等 7 种重金属元素平均含量高于安徽省土壤平均背景值, 土壤中 Cr 污染最明显, 平均浓度为 $246.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($48.9\text{--}1267.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 平均超《土壤环境质量》(GB 15618—2018) ($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$) 中土壤污染风险筛选值的 3.4 倍 (1.1—6.3 倍), 最大超标点位于主导风下风向 1000 m, 在常年主导风下风向土壤中 Cr、Cd 和 Sb 的含量高于对照点, 差异具有统计学意义 ($P=0.03$); 与国内外对其他燃煤电厂周边土壤的研究报道相比, 生物质能电厂周边土壤中 Cr 的含量水平远高于文献报道。单因子污染指数法分析显示, Cr 的污染最严重, 其次是 Se, 危险等级为重污染, Cd 为中度污染, 污染点位分布在常年主导风下风向和次主导风下风向。内梅罗综合指数法分析显示, 电厂周边土壤普遍受到了重金属元素污染, 在常年主导风下风向和次主导风下风向分别为 5.2 和 4.1, 属重度污染, 其他方向和对照区内内梅罗综合指数为 2.7 和 1.6, 属中度和轻度污染。综合潜在生态风险分析显示, Cd、Hg、Cr 和 As 对综合潜在生态风险贡献较大。基于主成分分析的结果, 综合考虑生物质能电厂周边土壤中各重金属元素的含量和空间分布特征以及相关性分析和聚类分析结果, 将 12 种重金属元素分为 4 类: ①Mn、Ni、Zn、As、Se、Ag、Sb 和 Pb, ②Cr 和 Cd, ③Hg, ④Cu, 其中第 1 类和第 3 类来源主要受土壤母质影响, 第 2 类中 Cd 和第 4 类 Cu 来源主要受农业活动, Cr 则很可能源于生物质焚烧烟气的扩散沉降及其在土壤中的累积, 在生物质能电厂周边的土壤重金属元素污染调查中 Cr 污染应受到重点关注。

关键词 生物质能电厂, 表层土壤, 重金属元素, 污染特征, 潜在生态风险评价, 铬。

Pollution characteristics and evaluation of heavy metal pollution in surface soil around the Biomass Power Plant

LV Zhanlu ZHANG Jinliang* ZHANG Han ZOU Tiansen
LIU Kai WANG Manxiang

(State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effect and Risk Assessment of Chemicals,
State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences,
Environmental Health Risk Assessment and Research Center, Beijing, 100012, China)

Abstract: Biomass energy was an important renewable energy source developed and utilized by China and the rest of the world. However, it was still in a blank in the polluted evaluation of biomass power plants and the safety assessment of the surrounding environment. In order to investigate and evaluate the pollution levels of heavy metals in the soil around biomass power plants, according to

2019年9月6日收稿(Received: September 6, 2019).

* 通讯联系人, E-mail: jinliangzhg@263.net

Corresponding author, E-mail: jinliangzhg@263.net

the principle of point source sector layout, a total of 26 soil samples were collected at four different distances around the biomass power plant, and away from the power plant area. According to the 《Technical Specifications for Soil Environmental Testing》(HJ/T 166—2004), the contents of 12 heavy metals such as Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Se, Ag, Cd, Sb, Hg and Pb were analyzed. The results showed that the average content of seven heavy metals such as Cr, Ni, Cu, As, Se, Ag and Cd were higher than the average background value of Anhui Province, and the content of Cr, Cd and Sb in its perennial dominant wind downwind direction were higher than that of the control Point, the difference was statistically significant ($P=0.03$). The Cr pollution in the soil was the most obvious, with an average concentration of $246.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($48.9\text{—}1267.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), which was 3.4 times (1.1—6.3 times) higher than the second-level limit of the National Soil Environmental Quality Standard. The maximum over-standard point was 1000 m of the perennial dominant wind downwind direction. Compared with domestic and foreign research reports on soils around other coal-fired power plants, the levels of Cr in soils around biomass power plants were much higher than those reported in the literature. The single factor pollution index method analysis showed that Cr had the most serious pollution, followed by Se, the hazard level was heavy pollution, Cd was moderate pollution, and the pollution point was distributed in the perennial dominant wind downwind direction and sub-dominant wind downwind direction. The Nemeru comprehensive index method analysis showed that the soil around biomass power plants were generally polluted by heavy metals. The perennial dominant wind downwind direction and sub-dominant wind downwind direction were 5.2 and 4.1 respectively, which were heavy pollution, and the Mero comprehensive index in other directions and control areas for 2.7 and 1.6, it was moderately and slightly polluted. The comprehensive potential ecological risk analysis showed that Cd, Hg, Cr and As contributed a lot to the comprehensive potential ecological risk. In summary, the soil around the biomass power plant was polluted by different levels of heavy metals. The unique pollution characteristics of Cr deserve serious attention in pollution monitoring in soils surrounding the biomass power plants, and the pollution was mainly concentrated in the perennial dominant wind downwind direction, sub-dominant wind downwind direction, dominant wind downwind direction 45 degrees angle, the distance was 500 and 1000 m. Based on the results of principal component analysis, considering the content and spatial distribution characteristics of heavy metals in the soil around the biomass power plant, as well as correlation analysis and cluster analysis results, 12 heavy metal elements were divided into 4 categories: ①Mn, Ni, Zn., As, Se, Ag, Sb and Pb; ②Cr and Cd; ③Hg; ④Cu. Among them, the first and third sources were mainly affected by soil parent material; the second type of Cd and the fourth type of Cu source were mainly affected by agricultural activities; Cr was likely to be derived from the diffusion sedimentation of biomass incineration flue gas and its in soil. Accumulation, Cr pollution should be paid attention to in the investigation of soil heavy metal element pollution around biomass power plants.

Keywords: biomass power plant, surface soil, heavy metal, pollution characteristics, potential ecological risk, chromium.

生物质能是我国开发和利用的重要可再生能源.2015 年底,我国生物质能发电装机规模达到 1300 万 kW,发电累计核准装机容量达 1708 万 kW,其中累计并网装机容量约为 1171 万 kW,预计到 2020 年全国生物质发电装机容量将达到 3000 万 kW^[1].我国生物质能资源非常丰富,发展生物质发电产业前景广阔.各种农作物每年产生秸秆约 7 亿 t,相当于 3.5 亿 t 标准煤,现有森林面积约 1.95 亿 hm^2 ,每年可获得生物质资源量约 8 亿 t 至 10 亿 t^[2].与传统化石燃料相比,发展生物质发电,可显著减少 CO_2 和 SO_2 排放,产生巨大的环境效益,预计到 2020 年,西方发达国家 15% 的电力将来自生物质发电^[3-4].有关研究显示,农林业废弃物在燃烧过程中将吸附于植物根茎中的多种重金属元素通过干湿沉降造成土壤

污染^[4-5]。张媛等^[6]研究发现太原市秋冬季生物质燃烧大气 PM_{2.5} 质量浓度的变化趋势与 PM_{2.5} 中 Zn、Pb、As、Cd、Ni 等重金属元素缓慢累积的变化规律相一致;顾庆平等^[7]研究发现生物质燃烧是农村地区室内空气污染的最重要来源,对江苏农村室内 PM_{2.5} 浓度及气象因素分析表明燃烧水稻秸秆、木材时室内 PM_{2.5} 平均浓度分别为 114.3 μg·m⁻³ 和 87.5 μg·m⁻³,明显高于未燃烧生物质燃料时的平均浓度水平(37.2 μg·m⁻³);张金良等^[8]研究发现,生物燃料燃烧是中国农村室内空气颗粒物污染的主要来源。目前,国内外大量的研究报道均关注燃煤电厂引起周边土壤重金属元素的污染^[9-15],而对类似于生物质能电厂这种大型生物质燃烧对空气和周边土壤的污染和安全评价尚处于空白。

为了解与评价某生物质能电厂周边土壤中重金属元素的污染状况,本研究以投产运行 7 年的生物质能发电厂作为研究对象,按照点源扇形布点原则,在电厂周边和远离电厂区域采集土壤样品,测定土壤中 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Se、Ag、Cd、Sb、Hg 和 Pb 等 12 种重金属元素的含量,采用单因子污染指数法、内梅罗污染指数法和潜在生态危害指数法等评价方法,对研究区域内土壤的环境质量、造成污染的程度以及潜在生态风险进行综合分析和评价,旨在为类似点源污染对土壤造成的环境污染监管提供参考依据。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 电厂及周边环境

该电厂位于安徽省某区,烟囱所在地理位置东经 117.018°,北纬 33.630°,于 2008 年投产发电,装机容量为 2 台 12.5 MW 秸秆发电机组,燃料主要为农作物秸秆(小麦、玉米、棉花)和农林废弃物,设计年利用农林废弃物 35 万 t,每年向空气中排放烟尘 15724 t,2018 年因债务等问题申请破产处理。电厂周边 4 km 范围内历史或现今均无其他污染源存在。电厂所在地区为平原,地势平坦,地势由西北向东南倾斜。属暖温带半湿润季风性气候区,冬夏季风进退,常年主导风向为东北风,次主导风向为东风,年平均风速为 2.2 m·s⁻¹。

1.2 点位布点与样品采集

2015 年 6 月份在电厂常年主导风上风向(东北)、主导风下风向(西南)、次主导风下风向(正西)和主导风下风向 45° 夹角方向(正南),每个方向在距污染源 500、1000、1500、2000 m 采集 4 个样品,在主导风下风向延伸到 2800 m,共采集 17 个土壤样品,其中西南方向 500 m 和正西 1000 m 处土壤类型为林地,其余点位土壤类型均为农田土壤。选择远离该生物质能电厂 10 km 以上、周边无其他污染源和地质相似的区域作为对照区,采集 8 个对照样品,土壤利用类型为农业用地、质地为棕壤土(图 1)。在每个采样点采用 50 m×50 m 内梅花布点,采集 0—20 cm 的表层混合土样,经四分法缩分后取 1 kg 样品装入聚乙烯袋中带回实验室,并做好采样记录^[16]。

1.3 样品实验分析及质量控制

土壤样品前处理参照《土壤环境检测技术规范》(HJ/T 166—2004)进行处理^[17],经定容、过滤后,采用 ICP-MS(Waters alliance E2695)测定。土壤样品中 12 种重金属元素的加标回收率在 91.2%—103.8%之间,重复测量的偏差范围为 0.1%—9.7%。

1.4 评价方法

1.4.1 统计分析

采用 SPSS 18.0 软件进行相关性分析、聚类分析和主成分分析。相关性分析采用 Pearson 相关系数分析土壤各类重金属元素含量之间的相关性,分析前对数据进行取对数处理,使其呈正态分布;聚类分析采用分层聚类法的 R 型聚类进行分析。主成分分析采用因子分析,经 KMO 检验和 Bartlett 球度检验后分析重金属元素成分载荷。

1.4.2 单因子污染指数法

单因子污染指数法是针对土壤中的某一种物质的污染程度进行评价,可以全面反映出土壤中各种重金属元素的平均污染水平^[18]。计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中, P_i 代表土壤中某物质 i 的污染指数; C_i 代表某物质 i 的实测值; S_i 代表某物质 i 的安徽省土壤背景值,其分级标准如表 1 所示。

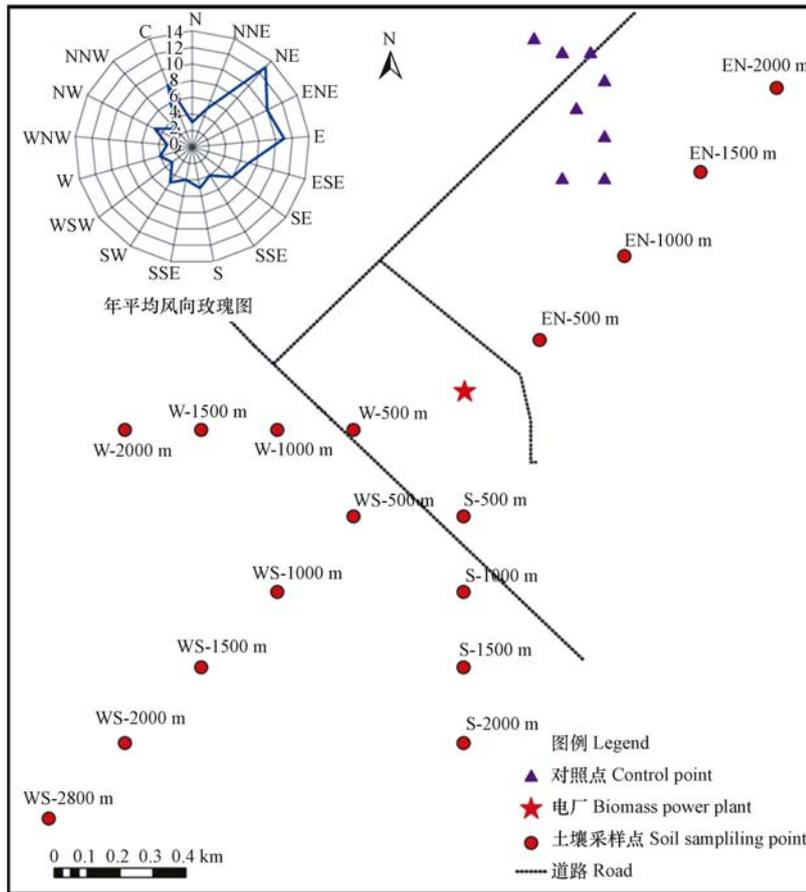


图 1 生物质能电厂周边及对照点土壤样品采样示意图

Fig.1 Sampling sites in soil around the biomass power plant and control point

表 1 土壤重金属元素污染物评价及生态风险分级

Table 1 Soil environment quality classification

分级 Grade	单因子污染指数法 Single factor pollution index method(P_i)	内梅罗污染指数法 Nemero pollution index method(PI)	潜在生态危害指数法 Potential ecological hazard index	
			单一潜在生态危害系数 Single potential ecological hazard coefficient(E_i^i)	综合潜在生态危害系数 Comprehensive potential ecological hazard coefficient (RI)
1	无污染($P_i \leq 1$)	清洁/安全($PI \leq 0.7$)	轻微生态危害($E_i^i < 40$)	轻微生态危害($RI < 112$)
2	轻度污染($1 < P_i \leq 2$)	尚清洁/警戒线($0.7 < PI \leq 1.0$)	中等生态危害($40 \leq E_i^i < 80$)	中等生态危害($112 \leq RI < 224$)
3	轻度污染($2 < P_i \leq 3$)	轻度污染($1.0 < PI \leq 2.0$)	强生态危害($80 \leq E_i^i < 160$)	强生态危害($224 \leq RI < 448$)
4	中度污染($3 < P_i \leq 5$)	中度污染($2.0 < PI \leq 3.0$)	很强生态危害($160 \leq E_i^i < 320$)	很强生态危害($RI \geq 448$)
5	重度污染($P_i > 5$)	重度污染($PI > 3.0$)	极强生态危害($E_i^i \geq 320$)	—

1.4.3 内梅罗污染指数法

内梅罗污染指数法是兼顾最大值的一种多因子环境质量指数法,反映土壤中各种重金属元素对其的综合污染情况^[19],公式:

$$PI = \sqrt{\frac{(P_{max})^2 - (P_{ave})^2}{2}}$$

式中,PI 为土壤内梅罗污染指数; P_{max} 为土壤各元素单因子指数中的最大值, P_{ave} 为土壤中各元素单因子指数的平均值,其分级标准如表 1 所示.

1.4.4 潜在生态危害指数法

根据瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法,该方法能综合反映重金属元素对生态环境影响潜力的指标^[20].其计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (1)$$

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_f^i \quad (2)$$

式中,RI 为土壤或沉积物中多种重金属元素潜在生态危害指数; $C_f^i = C^i/C_n^i$ 为重金属元素的富集系数, C^i 为实测值, C_n^i 为物质 i 的安徽省土壤背景值; T_r^i 为第 i 种重金属元素的毒性系数,反映其毒性水平和环境对其污染敏感程度,各重金属元素毒性系数, $Mn=1 < Cr=2 < Cu=Ni=Pb=5 < As=10 < Cd=30 < Hg=40$ ^[16,20-21]; E_r^i 为第 i 种重金属元素的潜在生态危害系数;Se、Ag 和 Sb 暂无毒性系数,故不评价其潜在生态危害。

RI 的调整规则^[22] 分级标准进行如下调整:先根据 Hakanson 的第一级分级值 150 除以 8 种污染物 (Hakanson 研究沉积物中 PCB、Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr 和 Zn) 的毒性系数总值 133,得到单位毒性系数的 RI 分级 1.13;然后将单位毒性系数的 RI 分级值 1.13 乘以本研究 9 种重金属元素的毒性系数总值 99,并取十位整数得到 RI 第一级界限值 112,余下各级界限值可由上一级界限值乘以 2 得到^[16] (Se、Ag 和 Sb 无毒性参数,暂不计算其潜在生态风险指数),RI 分级标准见表 1。

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 重金属元素含量特征

土壤样品 pH 值为 6.94 (6.62—7.28)。Cr、Ni、Cu、As、Se、Ag 和 Cd 等 7 种重金属元素的平均含量高于安徽省土壤平均背景值^[23],Cr 是背景值的 2.9 倍 (0.74—19.06),Cd 是背景值的 1.6 倍 (1.0—2.8)。土壤样品中 Cr 的平均浓度为 246.5 mg·kg⁻¹ (48.9—1267.4 mg·kg⁻¹),其中 4 个样品超过国家土壤环境质量《农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618—2018) 中 (6.5 < pH ≤ 7.5) 风险筛选值 (200.0 mg·kg⁻¹),平均超标倍数为 3.4 倍 (1.1—6.3),超标样品位于常年主导风下风向 500 m 和 1000 m,次主导风下风向和主导风下风向 45° 夹角 500 m,最大超标倍数的点位于主导风下风向 1000 m 处。在常年主导风下风向土壤中 Cr、Cd 和 Sb 含量高于对照点,且差异有统计学意义 ($P=0.03$)。详见表 2。与国内外对其他燃煤电厂周边土壤的研究报道以及该区域内另外一家投产运行 10 年的燃煤电厂对比 (表 3),生物质能电厂周边土壤中 Cr 的含量水平远高于的文献报道和该区域内的燃煤电厂周边土壤以及对照点;Cu、Zn、As 和 Hg 的含量水平均低于所有燃煤电厂周边土壤和对照点;Cd 和 Pb 的含量水平高于对照点而低于燃煤电厂周边土壤;Ni 的含量水平高于该区域内的燃煤电厂周边土壤和对照点而低于文献报道。

Cr 来源于冶金、电镀、皮革、油漆、涂料、颜料、造纸、印染、制药、照相制版等行业,未经处理或处理不达标的工业污水灌溉是土壤中铬的主要来源;其次,铬的采矿和加工业及含铬废物的堆积也是土壤中铬的来源之一^[29-30]。在本生物质能电厂周边 4 km 范围内历史或现今均无上述污染源的存在,其周边土壤中 Cr 在常年主导风下风向 500 m 和 1000 m 存在超标,且在 1000 m 土壤中含量最高,之后随着距电厂的距离增大而逐渐下降,最后趋于或低于对照点的水平,符合点源污染物的分布特点。前期在该区县开展的工业污染源调查发现该区县存在多家皮革鞣制加工、化学农药制造、化学药品原料药制造、机制纸及纸板制造等企业;以及在区县自产的蔬菜、薯类和水果中也发现 Cr 的含量超过了我国《食品卫生标准限值 (0.5 mg·kg⁻¹)》(GB2762—2005)。

同时国内外研究人员发现农作物对土壤中重金属元素具有较高的吸附。农作物中 Cd 的富集和污染程度最高,平均 Cd 含量 (干重) 高达 11.5 mg·kg⁻¹,部分农作物 Cr 超标,存在一定风险^[31];南宁市郊周边农田水稻和玉米根系中 Cr 的含量分别为 62.69 mg·kg⁻¹ 和 53.4 mg·kg⁻¹,是南宁市土壤背景值的 1.1 倍和 0.91 倍^[32];研究区稻米、玉米和小麦均存在重金属超标现象,重金属污染程度为小麦最重,稻米和玉米的污染程度相当,稻米和玉米污染等级均为安全,小麦处于警戒线^[33];玉米各部位铅镉吸收量从大到小依次为根、茎、叶和籽粒^[34];生物质能电厂在利用稻壳、秸秆、废木材等生物质燃料发电时,可能将吸附在生物质内的 Cr、Cd、Pb 和 Ni 等多种重金属随飞灰或尾气排放到环境中,经干湿沉降造成土壤重金属污染。

表 2 生物质能电厂周边土壤中重金属元素的含量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 2 The concentration of the heavy metals in soils around the biomass power plant ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目 Item	主导风向下风向 Dominant downwind direction			次主导风向下风向 Sub-dominant downwind direction			主导风向下风向 45° 夹角 Dominant downwind direction 45° angle			主导风向上风向 Dominant upwind direction			对照点 Control point			土壤环境质量 The national soil environmental quality standard		安徽省土壤背景值 The background value of Anhui Province	
	几何均值 Geometric mean	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum	几何均值 Geometric mean	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum	几何均值 Geometric mean	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum	几何均值 Geometric mean	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum	几何均值 Geometric mean	标准差 Standard deviation	最大值 Maximum	GB 15618—2018 6.5 < pH ≤ 7.5	几何均值 Geometric mean	标准差 Standard deviation	
Cr*	300.5	537.9	1267.4	180.7	326.1	766.8	1139	59.9	209.2	79.9	10.4	92.2	65.5	7.57	80.3	200.0	62.6		
Mn	481.3	78.3	602.3	348.3	260.8	749.4	265.1	322.1	818.6	494.0	64.2	566.1	589.2	125.2	942.2	—	452.0		
Ni	32.8	5.01	38.8	29.1	6.71	34.3	29.2	4.53	35.7	29.9	3.04	34.0	30.2	4.48	38.2	100.0	28.1		
Cu	23.2	3.76	28.1	21.6	2.49	23.8	24.0	5.68	32.1	23.2	2.64	27.1	24.3	4.30	33.8	100.0	19.3		
Zn	63.1	28.5	109.1	52.6	7.74	59.7	44.8	7.02	51.1	54.5	4.13	60.2	52.9	5.53	61.3	250.0	58.6		
As	11.4	2.81	14.4	9.15	5.68	16.2	9.27	1.86	11.1	11.7	1.31	13.1	11.5	2.24	15.0	30.0	8.4		
Se	0.453	0.280	0.854	0.394	0.620	1.515	0.401	0.429	1.129	0.670	0.171	0.816	0.562	0.326	1.27	—	0.2		
Ag	0.246	0.057	0.326	0.265	0.030	0.292	0.249	0.051	0.290	0.291	0.087	0.426	0.279	0.0309	0.326	—	0.2		
Cd*	0.186	0.083	0.275	0.132	0.024	0.169	0.153	0.011	0.169	0.150	0.042	0.188	0.135	0.016	0.160	0.3	0.1		
Sb*	1.22	0.16	1.39	1.02	0.20	1.22	1.11	0.13	1.29	1.12	0.08	1.22	1.09	0.10	1.23	—	1.3		
Hg	0.0126	0.00145	0.0143	0.0177	0.0051	0.0221	0.0133	0.0019	0.0156	0.0184	0.0189	0.0509	0.0148	0.0068	0.0330	2.4	0.03		
Pb	18.8	4.81	26.3	17.8	2.86	22.0	18.5	1.32	19.8	20.1	5.00	27.6	17.7	1.41	21.2	120.0	26.0		

注: N; 26; * 均值的显著水平为 0.05; Note: N; 26; * Significant level of mean difference was 0.05.

表3 生物质能电厂周边土壤中重金属元素含量与其他文献案例对比($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
 Table 3 Comparison the heavy metal concentrations in soils around the biomass power plant and with the other coal-fired power plant and control point ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目 Item	Cr		Ni		Cu		Zn		As		Cd		Hg		Pb	
	均值 Mean	最大值 Maximum														
马莲台电厂 ^[24]	106.6	129.6	—	—	41.4	64.7	75.9	99.3	—	—	—	—	—	—	38.2	53.8
喀斯特山区电厂 ^[25]	61.0	—	109.6	—	72.5	—	118.5	—	10.70	—	0.23	—	0.55	—	63.70	—
大武口电厂 ^[26]	191.5	257.0	—	—	45.3	71.9	65.6	145.0	—	—	—	—	—	—	60.3	130.2
毕节金沙电厂 ^[22]	52.6	101.2	—	—	35.5	86.6	156.6	738.5	26.4	104.3	0.61	5.37	0.7	2.49	44.83	108.0
宝鸡二电厂 ^[27]	94.0	143.9	38.0	40.3	30.4	32.2	80.1	97.6	—	—	—	—	—	—	27.9	31.2
Turke ^[9]	62.4	100.2	89.8	203.0	29.9	36.8	89.2	209.2	—	—	6.3	7.2	—	—	26.7	78.4
Jimsha ^[28]	52.6	101.2	—	—	35.5	86.8	—	—	26.4	104.3	0.62	5.37	0.70	5.37	46.0	108.0
Greece ^[4]	77.5	241.0	161.3	525.0	21.3	46.7	47.1	119.0	—	—	—	—	—	—	14.8	52.0
生物质能电厂	246.5	1267.4	30.6	38.8	23.2	32.1	54.9	109.1	10.4	16.15	0.160	0.275	0.017	0.051	19.04	27.55
燃煤电厂*	66.7	87.2	30.0	36.6	26.5	57.5	64.8	105.6	11.3	14.8	0.20	0.47	0.015	0.029	23.34	63.54
对照点	62.08	80.30	27.01	38.18	29.97	33.78	58.98	61.25	11.69	15.03	0.13	0.16	0.03	0.03	16.68	21.20

* 研究区域内的燃煤电厂,数据暂未发表; * Data for coal-fired power plants in the study area were unpublished.

2.2 重金属元素空间分布特征

生物质能电厂周边土壤中重金属元素空间分布如图2所示。Cr、Cd、Zn和Sb等4种重金属元素存在明显空间分布差异,符合点源污染物的分布特点,其它重金属元素呈现较好的均匀性、差异不明显。Cr和Zn在常年主导风下风向1000 m土壤中含量最高,之后随着距电厂的距离增大而逐渐下降,最后趋于或低于对照点的水平;Cd在常年主导风下风向500 m含量最高,Sb在常年主导风下风向1500 m含量最高,之后随着距电厂的距离增大而逐渐下降,最后低于对照点的水平。表明研究区域表层土壤中的Cr、Cd、Zn和Sb可能与生物质能电厂的排放存在较大的关联,其中Cr的联系较为紧密。

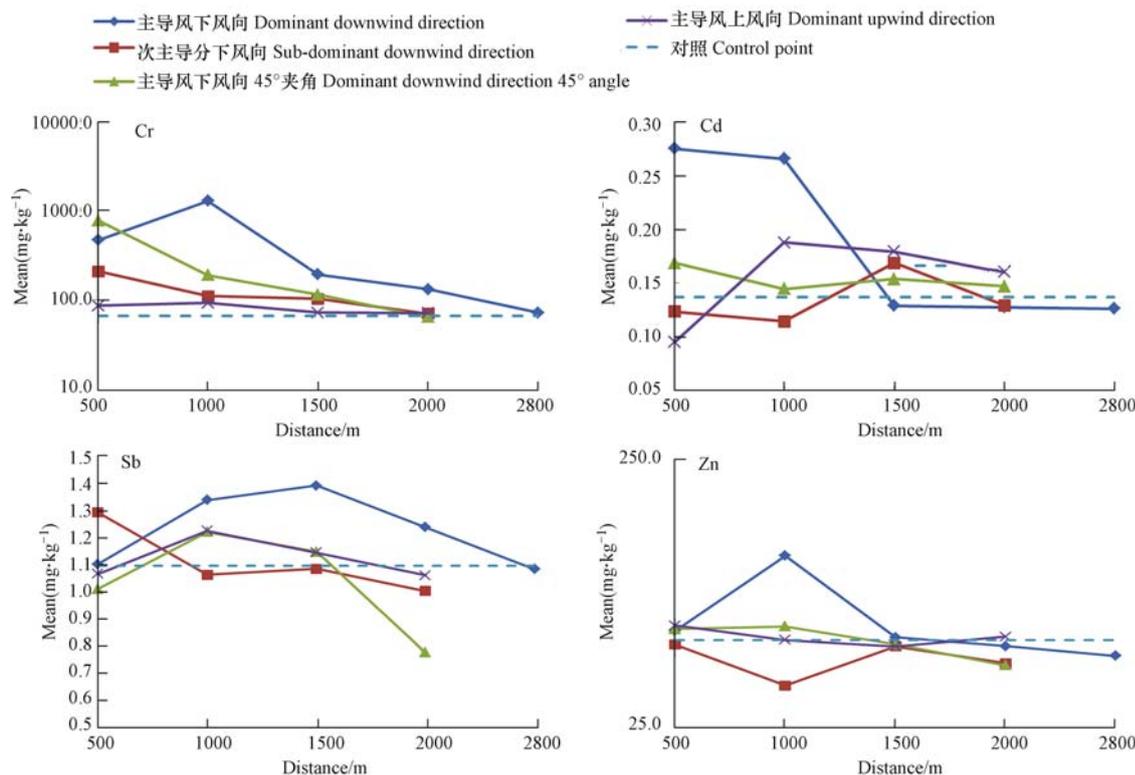


图2 生物质能电厂周边不同距离土壤中重金属元素的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of heavy metal elements in soils at different distances around the biomass power plant

2.3 单因子污染指数和内梅罗污染指数评价

生物质能电厂周边土壤普遍受到了重金属元素污染,污染程度为重度或中度污染(表4)。从 P_i 看,在生物质能电厂周边土壤中各重金属元素的 P_i 为0.3—20.2,对照点的 P_i 为0.5—2.0。其中Cr在常年主导风下风向500 m和1000 m以及次主导风下风向500 m的 P_i 分别为7.4、20.2和12.2,属重度污染,对照点为无污染(1.0);Se在次主导风下风向1000 m和主导风下风向45°夹角500 m的 P_i 为5.8和7.8,属于重度污染,对照点为轻微污染(2.0);Cd在常年主导风下风向500 m和1000 m的 P_i 为3.8和3.7,属中度污染,对照点为轻微污染(1.6);其它9种重金属元素在各个点位上属无污染或轻度污染(0.4—2.3),对照点属无污染或轻微污染(0.5—1.5)。从PI看,土壤中各重金属元素的PI为2.7—5.2,属于重度或中度污染,对照点的PI为1.6,属于轻度污染。其中在常年主导风下风向和次主导风下风向属重度污染(PI为5.2和4.1),主导风下风向45°夹角和常年主导风上风向方向属中度污染(PI为2.7和2.8)。

2.4 潜在生态风险评价

生物质能电厂周边土壤中重金属元素的潜在生态风险为中等或轻微(表5)。从 E_r^i 看,Cd在常年主导风向下风向500 m和1000 m的 E_r^i 为113.8和110.0,达到强生态危害,对照点为中度生态危害(48.0);Hg在常年主导风向上风向1000 m的 E_r^i 为73.7,达到中等生态危害,对照点为轻微生态危害(20.0);Cr在常年主导风向下风向1000 m的 E_r^i 为40.5,达到中等生态危害,对照点为轻微生态危害(2.0);其它6种重金属元素为轻微生态危害(0.3—17.1)。

表 4 生物质能电厂周边土壤单因子和内梅罗综合指数分级结果
 Table 4 Classification results of single factor and Nemerow comprehensive index method in soil around the biomass power plant

项目 Item	主导风向下风向 Dominant downwind direction												次主导风向下风向 Sub-dominant downwind direction												主导风向上风向 Dominant upwind direction						对照 Control point		
	500 m				1000 m				1500 m				2000 m				500 m				1000 m				1500 m				2000 m				
	500 m	1000 m	1500 m	2000 m	500 m	1000 m	1500 m	2000 m	500 m	1000 m	1500 m	2000 m	500 m	1000 m	1500 m	2000 m	500 m	1000 m	1500 m	2000 m	500 m	1000 m	1500 m	2000 m	500 m	1000 m	1500 m	2000 m					
Cr	7.4	20.2	3.1	2.1	1.2	1.2	1.2	1.0	3.3	1.8	1.6	1.1	1.4	1.5	1.1	1.1	1.4	1.5	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0				
Mn	1.3	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	0.3	0.3	1.8	0.3	0.7	0.3	0.9	1.3	1.1	1.1	0.9	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.3				
Ni	1.2	1.4	0.9	1.1	1.2	1.2	1.1	0.7	1.3	0.9	1.0	1.0	1.1	1.2	1.0	0.9	1.1	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1				
Cu	1.5	1.2	1.0	1.1	1.2	1.2	1.1	1.0	1.2	1.0	1.2	1.0	1.1	1.4	1.2	1.1	1.1	1.4	1.4	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.3				
Zn	1.0	1.9	0.9	0.9	0.8	1.0	0.9	0.7	0.9	0.6	0.9	0.7	1.0	0.9	0.9	0.7	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9				
As	1.4	1.7	1.5	1.2	0.9	1.0	1.7	0.5	1.3	0.9	1.3	1.0	1.6	1.4	1.4	1.4	1.6	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.4	1.4				
Se	1.2	4.4	3.2	2.5	1.8	1.4	5.8	2.4	7.8	2.2	2.5	0.4	4.0	2.3	3.8	4.2	4.0	2.3	3.8	3.8	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	2.0	2.0				
Ag	1.1	1.8	1.4	1.3	1.2	1.6	1.6	1.4	1.6	1.5	1.5	1.2	1.3	2.3	1.3	1.6	1.3	2.3	2.3	1.3	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5				
Cd	3.8	3.7	1.5	1.5	1.5	2.3	2.0	1.8	1.7	1.6	2.0	1.5	1.3	2.6	2.1	1.9	1.3	2.6	2.6	2.1	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.6	1.6	1.6				
Sb	0.8	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.9	0.6	1.0	0.8	0.8	0.7	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8				
Hg	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.8	0.7	0.8	0.4	0.4	1.8	0.5	0.5	0.4	1.8	1.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5				
Pb	0.6	1.0	0.7	0.7	0.6	0.8	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.7	0.6	1.1	0.8	0.7	0.6	1.1	1.1	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7				
P_i	5.2												4.1												2.8						1.6		
PI	重度污染												重度污染												中度污染						轻度污染		

1) P_i 表示单因子指数, PI 表示内梅罗综合指数, 两者分级说明见表 1. P_i represents the single factor index and PI represents the Nemerow composite index. See Table 1 for the classification description of the two.

表 5 生物质能电厂周围土壤中重金属元素的潜在生态风险指数
Table 5 Potential risk index of heavy metals in soils around the biomass power plant

项目 Item	主导风下风向 Dominant downwind direction						次主导风下风向 Sub-dominant downwind direction						主导风上风向 Dominant upwind direction						对照 Control point
	500 m		1000 m		2000 m		500 m		1000 m		2000 m		500 m		1000 m		2000 m		
	2800 m	2000 m	1500 m	1000 m	500 m	2000 m	1500 m	1000 m	500 m	2000 m	1500 m	1000 m	500 m	2000 m	1500 m	1000 m	500 m	2000 m	
Cr	14.8	40.5	6.1	4.2	2.3	2.3	24.5	6.0	3.7	2.1	6.7	3.5	3.3	2.2	2.7	2.9	2.3	2.3	2.0
Mn	1.3	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	0.6	1.0	1.7	0.3	1.8	0.3	0.7	0.3	0.9	1.3	1.1	1.1	1.3
Ni	6.0	6.9	4.7	5.3	5.9	3.5	5.8	6.1	5.7	3.5	6.3	4.4	5.2	5.1	5.3	6.1	5.2	4.7	5.5
Cu	7.3	6.1	4.9	5.5	6.0	4.8	6.2	6.1	5.4	4.8	6.1	4.8	6.1	8.3	5.5	7.0	5.9	5.6	6.5
Zn	1.0	1.9	0.9	0.9	0.8	0.7	1.0	1.0	0.9	0.7	0.9	0.6	0.9	0.7	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
As	14.2	17.1	15.0	12.1	9.2	4.5	9.6	16.9	19.2	4.5	13.0	8.9	13.2	9.7	15.6	14.1	14.4	11.9	14.0
Cd	113.8	110.0	46.2	45.7	45.2	52.6	69.7	59.7	55.1	52.6	50.9	47.1	60.4	46.3	39.2	77.7	64.3	57.5	48.0
Hg	16.3	20.7	19.5	18.2	16.8	16.4	18.5	20.5	22.6	16.4	30.4	28.4	32.0	15.9	17.8	73.7	19.5	19.9	20.0
Pb	3.1	5.1	3.4	3.3	3.2	2.9	4.2	3.3	3.3	2.9	3.7	3.5	3.8	3.3	3.0	5.3	3.8	3.7	3.5
E_i^+	135.1																		
RI	116.6																		
风险等级	中等生态危害						中等生态危害						中等生态危害						101.7
	中等生态危害						轻微生态危害						中等生态危害						轻微生态危害

1) E_i^+ 单项潜在风险评价指数, RI 综合潜在风险评价指数, 两者分级说明见表 1; 1) E_i^+ single submergred wind grade evaluation index and RI comprehensive potential risk evaluation index. See Table 1 for the classification description of the two.

从 RI 看,生物质能电厂周边土壤中重金属元素的 RI 在 101.7—135.1 之间,其中在常年主导风下风向、次主导风下风向和主导风上风向 RI 分别为 135.1、116.6 和 126.3,达到中等生态危害;在主导风下风向 45°夹角和对照点 RI 为 109.7 和 101.7,达到轻微生态危害.Cd、Hg、Cr 和 As 对 RI 的贡献率较大,其中在常年主导风下风向 Cd 和 Hg 的贡献达 67.0%,Cr 的贡献达 10.1%,As 的贡献达 10.0%,其它 5 种重金属元素仅占 12.9%;在其它方向和对照点中 Cr 的贡献为 2.0%—7.8%.

2.5 重金属元素来源探析

2.5.1 相关性分析

相关性分析广泛应用于土壤中重金属元素的来源辨识.本研究的 Pearson 相关性分析结果见表 6.Cr 与 Ni、Zn、Cd 和 Pb, Mn 与 Ni、As、Se 和 Pb 等 10 种重金属元素之间存在着 19 组显著的正相关关系,其中 Cr 与 Cd 和 Zn、Mn 与 As、Ni 与 Sb、As 与 Sb、Ag 与 Hg 和 Pb、Hg 与 Pb 之间存在着极显著的正相关关系($P < 0.01$),说明 Cr、Cd 和 Zn、Mn 和 Ni、Hg 和 Pb 可能具有相同的迁移途径,或是有相同的污染源,或呈现出复合污染的趋势^[25,35].此外 Ni 与 Zn 和 As、Pb、Cr 与 Pb、Zn 与 As 和 Cd,以及 Mn 与 Se 之间也都具有一定的同源性.

表 6 周边表层土壤重金属元素之间的相关系数

Table 6 Correlation coefficients of heavy metals in surface soils

Heavy metals	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sb	Hg	Pb
Cr		0.895	0.024	0.681	0.000	0.405	0.771	0.372	0.005	0.232	0.581	0.035
Mn	0.036		0.014	0.883	0.401	0.004	0.015	0.302	0.381	0.014	0.377	0.512
Ni	0.561 *	0.599 *		0.076	0.010	0.012	0.110	0.076	0.079	0.010	0.434	0.044
Cu	0.111	0.040	0.456		0.770	0.787	0.415	0.651	0.177	0.927	0.483	0.410
Zn	0.856 **	0.226	0.622 **	0.079		0.041	0.228	0.198	0.011	0.052	0.804	0.028
As	0.224	0.675 **	0.609 *	0.074	0.515 *		0.061	0.186	0.290	0.001	0.630	0.349
Se	0.079	0.596 *	0.415	-0.219	0.320	0.479		0.199	0.631	0.013	0.820	0.564
Ag	0.239	0.276	0.456	0.122	0.340	0.348	0.339		0.558	0.035	0.000	0.000
Cd	0.667 **	0.235	0.452	0.356	0.617 *	0.282	-0.130	0.158		0.457	0.769	0.067
Sb	0.317	0.601 *	0.623 **	0.025	0.494	0.729 **	0.604 *	0.531 *	0.200		0.312	0.082
Hg	-0.149	0.237	0.211	0.189	-0.067	0.131	0.062	0.816 **	0.080	0.270		0.004
Pb	0.529 *	0.177	0.509 *	0.221	0.548 *	0.251	0.156	0.871 **	0.469	0.448	0.673 **	

1): N=17; 表格左下方为相关系数,右上方为显著性水平 P 值; * *: P 值极显著 ($P < 0.01$); * : P 值显著 ($P < 0.05$); 1): N=17; the lower left of the table was the correlation coefficient, and the upper right was the significance level P value; * *: the P value was extremely significant ($P < 0.01$); * : the P value was significant ($P < 0.05$)

2.5.2 聚类分析

采用组间类平均法进行变量标准化,距离测量采用平方欧氏距离,对 12 种重金属元素进行聚类分析(图 3):在生物质能电厂周边土壤中 Ni、Cu、Zn、As、Se、Ag、Cd、Sb、Hg 和 Pb 等 10 种聚为一类,Cr 和 Mn 各自成一类;对照点土壤中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Se、Ag、Cd、Sb、Hg 和 Pb 等 11 种聚为一类,Mn 自成一类.Mn 通常作为土壤自然源标识元素,其受外界干扰影响较小,主要受成土过程和土壤流失影响^[15].再次提示生物质能电厂周边土壤环境中 Cr 含量受到人为因素的严重影响.

2.5.3 主成分分析

经 KMO 检验和 Bartlett 球度检验 ($P < 0.001$),主成分分析结果具有统计学意义.特征值大于 1 的原则所提取的 4 个主成分方差累计贡献率达 85.61% (表 7),表明该结果在一定程度上能够真实地反映出生物质能电厂周边土壤中重金属元素来源情况.

主成分 1(PC1)的方差贡献率为 42.54%,Mn、Ni、Zn、As、Se、Ag、Sb 和 Pb 都具有较大的正载荷.Mn 通常作为土壤自然源标识元素,其受外界干扰影响较小,主要受成土过程和土壤流失影响^[16, 36].Ni 是我国城市土壤污染程度最低的重金属元素之一^[36].结合生物质电厂周边土壤重金属元素含量、空间特性以及相关性和聚类分析结果,可判断 PC1 主要来源于土壤母质背景.主成分 2(PC2)的方差贡献率为

17.44%, Cr 和 Cd 具有较大正载荷. 据调查我国农田土壤中 43% 的 Cr 来自于大气沉降^[37], 主要来自于生物质、煤和石油燃烧, 冶炼工业、采矿、化工厂和水泥厂等烟尘沉降^[38-39]; Jiao 等^[40] 和 Wei 等^[41] 研究表明, 农田中 Cd 常来自于磷肥施用. 磷矿作为磷肥的主要原料, 其本身含有大量的有害元素, 但加工过程中未被完全去除. 在我国, 磷肥中 Cd 的含量为 1.2 mg kg^{-1} ^[39]; 据调查 2014 年该区域磷肥使用量每亩 8.2 kg, 高于世界平均水平, 长期过量的磷肥施用必然会导致这些重金属大量进入农田, 通过植物吸收而影响动物或人体健康. 可推断 PC2 可能受到人为污染影响. 主成分 3 (PC3) 的方差贡献率为 15.90%, Hg 具有较大正载荷. 相关性分析也表明 Hg 与其他金属的相关性比较低, Hg 主要来自于母质风化. 成分 4 (PC4) 的方差贡献率为 9.73%, Cu 具有较大正载荷. Cu 可能来自农业活动, 例如在种植过程中施用了含 Cu 农药 (乐果等), 使周边土壤中 Cu 的含量偏高, 其污染应当主要来自于农业.

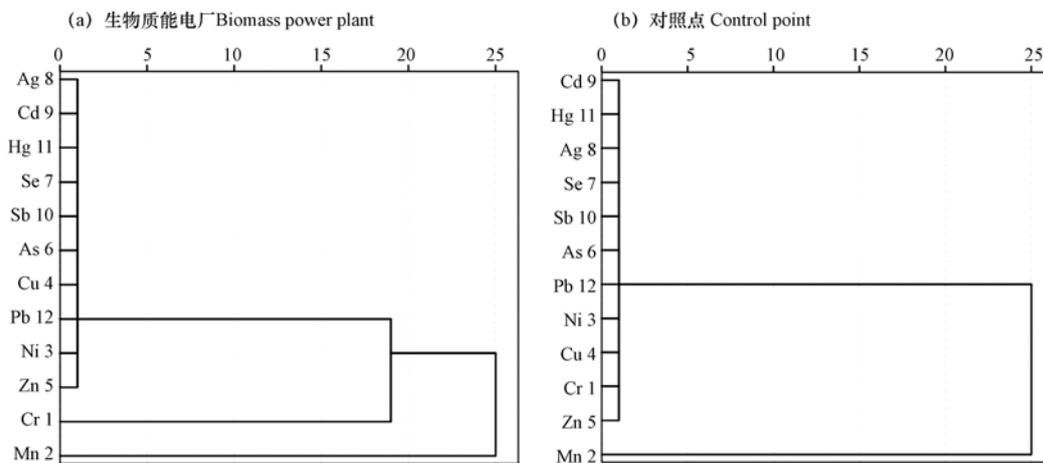


图 3 生物质能电厂周边和对照点土壤中重金属元素的 R 型聚类

Fig.3 R-type cluster analysis dendrogram in soil around the biomass power plant and control point

表 7 生物质能电厂周边土壤中重金属元素主成分载荷

Table 7 Rotated component matrix for metals in soils of the surrounding of the biomass power plant

重金属元素 Heavy metal elements	主成分 Principal component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Cr	0.612	0.648 ^a	-0.239	-0.303
Mn	0.619 ^a	-0.487	-0.263	0.331
Ni	0.852 ^a	0.073	-0.134	0.301
Cu	0.252	0.371	0.275	0.762
Zn	0.759 ^a	0.410	-0.316	-0.281
As	0.720 ^a	-0.295	-0.338	0.184
Se	0.510 ^a	-0.596	-0.342	-0.194
Ag	0.714 ^a	-0.204	0.599	-0.230
Cd	0.559	0.634 ^a	-0.058	0.157
Sb	0.793	-0.348	-0.167	-0.044
Hg	0.416	-0.288	0.827 ^a	0.033
Pb	0.760 ^a	0.186	0.533	-0.252
特征值	5.105	2.092	1.908	1.168
方差贡献率/%	42.541	17.436	15.898	9.730
累计贡献率/%	42.541	59.978	75.876	85.606

注: 1) 因子提取方法为主成分分析 (PCA); 旋转方法为正交转轴法 (varimax with kaiser normalization), a 表示载荷 > 0.4; 1) The factor extraction method was principal component analysis (PCA); the rotation method was the orthogonal rotation method (varimax with kaiser normalization), and a indicates that the load was > 0.4.

3 结论(Conclusion)

(1)生物质能电厂周边土壤中重金属元素污染严重,Cr 存在超标.与安徽省土壤背景值相比,Cr、Ni、Cu、As、Se、Ag 和 Cd 等 7 种重金属元素平均含量高于安徽省土壤平均背景值;Cr 超过国家土壤环境质量《农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$)风险筛选值,最大超标倍数的点位于主导风下风向 1000 m 处.在常年主导风下风向土壤中 Cr、Cd 和 Sb 含量高于对照点,且差异有统计学意义($P=0.03$).

(2)生物质能电厂周边土壤中 Cr 在空间分布与当地主导风向密切相关,符合点源污染物的分布特点.在常年主导风下风向 1000 m 土壤中含量最高,之后随着距电厂的距离增大而逐渐下降,最后趋于对照点的水平.

(3)生物质能电厂周边土壤中在重金属元素的污染程度为重度或中度污染,其生态风险为中等或轻微.Cd、Hg、Cr 和 As 的贡献率较大对综合潜在生态危险指数(RI)的贡献率较大;对照点为轻微生态危害.

(4)基于主成分分析的结果,综合考虑生物质能电厂周边土壤中各重金属元素的含量和空间分布特征以及相关性分析和聚类分析结果,将 12 种重金属元素分为 4 类:①Mn、Ni、Zn、As、Se、Ag、Sb 和 Pb,②Cr 和 Cd,③Hg,④Cu,其中第 1 类和第 3 类来源主要受土壤母质影响,第 2 类中 Cd 和第 4 类 Cu 来源主要受农业活动,Cr 则很可能源于生物质焚烧烟气的扩散沉降及其在土壤中的累积,在生物质能电厂周边的土壤重金属元素污染调查中 Cr 污染应受到重点关注.

参考文献(References)

- [1] 舒珺. 生物质能发电技术应用现状及发展前景[J]. 山东工业技术, 2017, 11(22): 174-174.
SHU J. Application status and development prospect of biomass power generation technology[J]. Shandong Industrial Technology, 2017, 11(22): 174-174(in Chinese).
- [2] 章继华. 秸秆发电技术前景宽广[J]. 苏南科技开发, 2006, 1(1): 23-24.
ZHANG J H. Generating electricity with stalks has bright future [J]. Sunan Technology Development, 2006, 1(1): 23-24(in Chinese).
- [3] 翟明岭, 张旭, 程飞, 等. 农户秸秆处置及供生物质能电厂成本分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(3): 440-445.
ZHAI M L, ZHANG X, CHENG F, et al. Analyses of farmers straw-disposal condition and biomass supply cost for power[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2016, 44(3): 440-445(in Chinese).
- [4] STALIKAS C D, CHAIDOU C I, PILIDIS G A, et al. Enrichment of PAHs and heavy metals in soils in the vicinity of the lignite-fired power plants of West Macedonia (Greece) [J]. Science of the Total Environment, 1997, 204(2): 135-146.
- [5] 陆晓华, ALI A, 刘汉珍, 等. 燃煤电厂排放颗粒物中重金属形态的研究[J]. 环境化学, 1996, 15(4): 337-342.
LU X H, ALI A, LIU H Z, et al. Studies on the speciation distribution of heavy metals in particulates released from coal combustion[J]. Environmental Chemistry, 1996, 15(4): 337-342(in Chinese).
- [6] 张媛, 耿红, 张东鹏, 等. 生物质燃烧和采暖燃煤对太原市大气 PM_{2.5} 的影响[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(5): 109-112.
ZHANG Y, GENG H, ZHANG D, et al. Influences of biomass and coal burning on ambient fine particulate matter over Taiyuan City[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences A, 2016, 44(5): 109-112(in Chinese).
- [7] 顾庆平, 高翔, 陈洋, 等. 江苏农村地区室内 PM_{2.5} 浓度特征分析[J]. 复旦学报:自然科学版, 2009, 48(5): 593-597.
GU Q P, GAO X, CHEN Y, et al. The mass concentration characters of indoor PM_{2.5} in rural areas in Jiangsu Province [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2009, 48(5): 593-597(in Chinese).
- [8] 张金良, 帕拉沙提, 刘玲, 等. 中国农村室内空气污染及其对健康的危害[J]. 环境与职业医学, 2007, 24(4): 412-416.
ZHANG J L, PARASAT, LIU L, et al. Indoor air quality and its adverse health effects in rural area of China [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2007, 24(4): 412-416(in Chinese).
- [9] ÇAYIR A, KILIC Ö, COKUN M, et al. Heavy metal and radionuclide levels in soil around Afsin-Elbistan coal-fired thermal power plants, Turkey[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 67(4): 1183-1190.
- [10] AGRAWAL P, MITTAL A, PRAKASH R, et al. Assessment of contamination of soil due to heavy metals around coal fired thermal power plants at Singrauli Region of India[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2010, 85(2): 219-223.
- [11] JUNIOR A M D, OLIVEIRA P L D, PERRY C T, et al. Using wild plant species as indicators for the accumulation of emissions from a thermal power plant, Candiota, South Brazil[J]. Ecological Indicators 2009, 9(6): 1156-1162.
- [12] 王凌青, 卢新卫, 戴丽君, 等. 燃煤电厂周围土壤中 Hg 的空间分析和风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 629-633.

- WANG L Q, LU X W, DAI L J, et al. Spatial analysis and risk assessment of Hg in soils around a coal-fired power plant[J]. *Journal of Afro-Environment Science*, 2007, 26(2): 629-633 (in Chinese).
- [13] 方凤满, 杨丁, 汪琳琳, 等. 芜湖燃煤电厂周边土壤中砷汞的分布特征研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 109-113.
FANG F M, YANG D, WANG L L, et al. Distribution of arsenic and mercury in soil around coal-fired power plant in Wuhu[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 109-113 (in Chinese).
- [14] 郎春燕, 王登菊, 黄军, 等. 成都燃煤电厂周围土壤中砷、锑、铅、锌分布特征及污染评价[J]. *环境化学*, 2011, 30(8): 1439-1444.
LANG C Y, WANG D J, HUANG J. Distribution characteristics and pollution evaluation of As, Sb, Pb and Zn in soil around the coal-fired power plant in Chengdu[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(8): 1439-1444 (in Chinese).
- [15] BENTURN J K, ANANG M, BOADU K O, et al. Assessment of heavy metals pollution of sediments from fosulagoon in Ghana[J]. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 2011, 25(2): 191-196.
- [16] 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): 487-496.
LV Z L, ZHANG J L, LU S Y, 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): 487-496 (in Chinese).
- [17] HJ/T 166-2004 土壤环境监测技术规范[S].
- [18] BRADY J P, AYOKO G A, MARTENS W N, et al. Development of a hybrid pollution index for heavy metals in marine and estuarine sediments[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2015, 187(5): 4563-4568.
- [19] OLUSEYE O C, FATOBA P O. Pollution loads and the ecological risk assessment of soil heavy metals around a mega cement factory in southwest Nigeria[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2013, 22(2): 487-493.
- [20] HANKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [21] 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元素毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112-115.
XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112-115 (in Chinese).
- [22] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 典型山区燃煤型电厂周边土壤重金属形态特征及污染评价[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(8): 2425-2436.
FAN M Y, YANG H, HUANG X F, et al. Chemical forms and risk assessment of heavy metals in soils around a typical coal-fired power plant located in the mountainous area[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(8): 2425-2436 (in Chinese).
- [23] 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: 330-501.
China National Environmental Monitoring Centre. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 330-501 (in Chinese).
- [24] 付亚宁, 范秀华, 邹璐, 等. 马莲台电厂周围土壤重金属污染风险评价研究[J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(23): 5827-5830.
FU Y N, FAN X H, ZOU L, et al. Pollution evaluation of heavy metals in soils around Maliantai thermal power plant[J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(23): 5827-5830 (in Chinese).
- [25] 杨皓, 范明毅, 黄先飞, 等. 喀斯特山区燃煤型电厂周边农业土壤中重金属的污染特征及评价[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(5): 893-902.
YANG H, FAN M Y, HUANG X F, et al. Pollution characteristics and evaluation for agriculture soils around the coal-fired power plant located in Karst Mountainous area [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(5): 893-902 (in Chinese).
- [26] 付亚宁, 范秀华, 邹璐, 等. 电厂周围土壤重金属空间分布与风险评价研究[J]. *中国环境监测*, 2011, 27(6): 5-8.
FU Y N, FAN X H, ZOU L, et al. Research on spatial distribution and pollution evaluation of heavy metals in soils around a thermal power plant[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2011, 27(6): 5-8 (in Chinese).
- [27] 李晓雪, 卢新卫, 任春辉, 等. 宝鸡二电厂周边农田土壤重金属污染特征及评价[J]. *干旱地区农业研究* 2012, 30(2): 220-224.
LI X X, LU X W, REN C H, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in soil of farmland around Baoji second power plant[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(2): 220-224 (in Chinese).
- [28] ZHONG B, TAO L, WANG L, et al. Applications of stochastic models and geostatistical analyses to study sources and spatial patterns of soil heavy metals in a metal liferous industrial district of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 490(28): 422-434.
- [29] YANG D, ZHU S, WANG F, et al. In study on the source of Cr in Jiaozhou Bay[J]. *Advanced Research & Technology in Industry Applications*, 2014, 12(2): 256-262.
- [30] SATAPATHY S, PANDA C R. Source identification, environmental risk assessment and human health risks associated with toxic elements present in a coastal industrial environment, India [J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2018, 26(2): 1-15.
- [31] 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 等. 西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 387-394.
LIU Y Z, XIAO T, XIONG Y, et al. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical

- background of cadmium, southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 387-394(in Chinese).
- [32] 李杰, 朱立新, 康志强, 等. 南宁市郊周边农田土壤-农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 43-52.
- LI J, ZHU L X, KANG Z Q, et al. Characteristics of transfer and their influencing factors of heavy metals in soil-crop system of peri-urban agricultural soils of Nanning, South China[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 43-52(in Chinese).
- [33] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. *环境科学*, 2017, 38(10): 4360-4369.
- CHEN F, DONG Z Q, WANG C C, et al. Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(10): 4360-4369(in Chinese).
- [34] 杨惟薇, 刘敏, 曹美珠, 等. 不同玉米品种对重金属铅镉的富集和转运能力[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(6): 774-779.
- YANG W W, LIU M, CAO M Z, et al. Accumulation and transfer of lead (Pb) and cadmium (Cd) on different species of maize [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, 30(6): 774-779(in Chinese).
- [35] IZQUIERDO C, USERO J, GRACIA I, et al. Speciation of heavy metals in sediments from salt marshes on the southern Atlantic coast of Spain[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1997, 34(2): 123-128.
- [36] LV J, LIU Y, ZHANG Z, et al. Multivariate geostatistical analyses of heavy metals in soils: Spatial multi-scale variations in Wulian, Eastern China [J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2014, 107(9): 140-147.
- [37] HUANG S S, LIAO Q L, HUAN M, et al. Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong district, Jiangsu Province, China [J]. *Chemosphere*, 2007, 67(11): 2148-2155.
- [38] AL-KHASHMAN O A, SHASWABKEH R. A. Metals distribution in soils around the cement factory in southern Jordan [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 140(3): 387-394.
- [39] 周玲莉, 薛南冬, 杨兵, 等. 黄淮平原农田土壤中重金属的分布和来源[J]. *环境化学*, 2013, 32(9): 1706-1713.
- ZHOU L L, XUE N D, YANG B. Distribution and source of heavy metals in agricultural soils from Huang-Huai Plain[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(9): 1706-1713(in Chinese).
- [40] JIAO W, CHEN W, CHANG A C et al. Environmental risks of trace elements associated with long-term phosphate fertilizers applications: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 168(1): 44-53.
- [41] WEI B, YANG L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. *Microchemical Journal*, 2010, 94(2): 99-107.