

城市垃圾焚烧发电项目烟气中重金属干沉降对土壤的影响

付 鹏¹, 莫欣岳², 舒 璐², 吕 伟¹

1. 北京中环博宏环境资源科技有限公司, 北京 100107

2. 兰州大学 大气科学学院 / 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

摘 要: 焚烧炉烟气中重金属沉降造成的土壤污染是城市垃圾焚烧发电项目环境影响评价及环境保护管理工作关注的重点。以某城市垃圾焚烧发电项目为例, 在确定焚烧炉排放源强及气象数据等资料的基础上, 采用 AERMOD 模型预测焚烧烟气中 Pb、Hg、Cd 的沉降特征和对项目所在区域土壤环境质量的影响。结果表明: 土壤中污染物浓度随离源距离的增加均呈现出先上升后下降的趋势, 其中 Hg 的占标率最大为 27.2%, 其次 Cd 为 21.8%, Pb 的占标率最小为 4.7%, 预测的重金属浓度均满足《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 二级标准限值要求; 污染物分布与风密切相关, 利用污染系数衡量风对污染物扩散传输的影响, 可知污染扩散距离北向大于南向、东向大于西向, 南北向大于东西向, 污染系数与污染物沉降量分布一致。研究可为气体涉重金属污染物扩散沉降对土壤环境影响相关领域的科研、应用工作提供参考和借鉴。

关键词: 城市垃圾焚烧; 重金属; 干沉降; 土壤; 大气预测

Influence of heavy metal dry deposition on soil in flue gas of municipal solid waste incineration power generation project

FU Peng¹, MO Xinyue², SHU Lu², LÜ Wei¹

1. Beijing Central Bohong Environmental Resources Technology Co. Ltd., Beijing 100107, China

2. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: *Background, aim, and scope* Soil pollution caused by heavy metal deposition in flue gas of incinerator from municipal solid waste incineration power generation project is the focus of environmental impact assessment and environmental protection management. *Materials and methods* A municipal solid waste incineration project was selected as an example. Based on determining the incinerator emission intensity and meteorological data, the AERMOD was used to predict the settlement characteristics of Pb, Hg and Cd in incineration flue gas and the

收稿日期: 2018-04-06; 录用日期: 2018-07-08

Received Date: 2018-04-06; Accepted Date: 2018-07-08

基金项目: 国家自然科学基金 (41475008); 中央高校基本科研业务费专项资金 (lzujbky-2016-k06)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41475008); Fundamental Research Funds for the Central Universities (lzujbky-2016-k06)

通信作者: 莫欣岳, E-mail: 545965475@qq.com

Corresponding Author: MO Xinyue, E-mail: 545965475@qq.com

引用格式: 付 鹏, 莫欣岳, 舒 璐, 等. 2018. 城市垃圾焚烧发电项目烟气中重金属干沉降对土壤的影响 [J]. 地球环境学报, 9(4): 356–362.

Citation: Fu P, Mo X Y, Shu L, et al. 2018. Influence of heavy metal dry deposition on soil in flue gas of municipal solid waste incineration power generation project [J]. *Journal of Earth Environment*, 9(4): 356–362.

influence on the soil environmental quality in the area of the project. **Results** The cumulative concentrations of Pb, Hg, Cd were $16.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.2720 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $0.1310 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the corresponding concentration standard rates were 4.7%, 27.2%, 21.8% respectively. The annual settlement of Pb, Hg, Cd in the downwind direction all increased first and then decreased with the distance from the source and the corresponding peaks were $8.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ($d=400 \text{ m}$), $0.13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ($d=400 \text{ m}$), $0.04 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ ($d=300-500 \text{ m}$). The pollution coefficient which was related to wind direction, wind frequency, wind speed was used to measure the influence of wind on the diffusion of pollutants, and the larger pollution coefficient meant the farther distance of corresponding equal settlement. Pollution coefficient was greater in the south than in the north, the west was greater than the east and the north-south was greater than the east-west. **Discussion** Although the cumulative concentrations of Pb, Hg, Cd all met the secondary standard limits of Soil Environmental Quality Standard for Soils (GB 15618—1995), it should be paid attention to in view of its harmfulness. The settlement of pollutants increased first and then decreased with distance from the source. The distribution of pollutants had a good consistency with the pollution coefficient. The pollution diffusion distance of the north was greater than that of the south, the east was greater than the west and the north-south was greater than the east-west. **Conclusions** Heavy metal in incineration flue gas from municipal solid waste incineration power generation project would enter the soil with atmospheric deposition. Therefore, predictions on the impact of heavy metal deposition on the soil environment was necessary when carrying out environmental impact assessment of such projects. In this research, the relevant departments should pay attention to the emission of pollutants from waste incineration especially Hg and Cd, although the sedimentation of heavy metal pollutants in incineration flue gas had not exceeded the standard. **Recommendations and perspectives** This research would provide reference for the research and application work related to effects of gas with heavy metal pollutants on soil environment.

Key words: municipal waste incineration; heavy metals; dry deposition; soil; atmospheric prediction

近年来,随着城市化进程的加快和人口数量的增多,居民生活垃圾的产生量与日俱增。传统的生活垃圾处置方式为填埋,但因填埋场占地面积大,对选址、恶臭、渗滤液的环保要求较高等,焚烧作为一种减量化、无害化、资源化的处理方式在众多城市所接受(李薇等,2010;杨玉华,2010;欧阳晓光和郭芬,2012)。由于生活垃圾来源多样,成分复杂,其焚烧烟气中的特征污染物,如二噁英、重金属会随大气扩散、迁移,并通过大气的沉降作用进入土壤,造成土壤污染。

土壤重金属污染现已成为人类必须面临的环境问题之一(郭笑笑等,2011)。2016年1月,原环保部召开了全国环境保护工作会议,时任部长陈吉宁总结了“十二五”期间的环保工作,分析了“十三五”环境保护面临的新形势、新任务,提出“十三五”环境保护总体思路——以改善环境质量为核心,将严格控制土壤污染尤其是重金属污染作为工作重点。2016年5月28日,国务院印发了《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”),将土壤污染治理尤其是重金属污染的预防和治理提到了新的高度。

本文以某市生活垃圾焚烧发电项目为例,对生活垃圾焚烧产生的烟气中的重金属干沉降对土壤环境的影响进行研究,为气体涉重金属污染物扩散沉降对土壤环境影响相关领域的科研、应用工作提供参考和借鉴。

1 项目介绍

某城市垃圾焚烧发电项目日处理量为生活垃圾 2000 t、干污泥 400 t,同时设置 $800 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$ 循环流化床锅炉 3 台,额定 $23.5 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 蒸汽余热锅炉 2 台及 N40MW 凝汽式汽轮发电机组 2 台,年发电量为 $6.32 \times 10^8 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

生活垃圾焚烧烟气中的污染物分为颗粒物(粉尘)、酸性气体(HCl、HF、 SO_2 、 NO_x 等)、重金属(Hg、Pb、Cr等)和有机剧毒性污染物(二噁英、呋喃等)四大类。每套焚烧装置配备一套烟气净化设施,由 SNCR 脱硝设施、脱硫装置及烟道系统、袋式除尘器系统、活性炭喷射系统、灰循环系统、吸收剂存储输送系统、灰输送及储存系统组成。处理工艺为“炉内脱硫+SNCR 脱硝工艺+半干法脱硫装置+活性炭吸附+布袋除尘器”,处理后烟气

通过高 80 m 的四钢内筒集束烟囱排放。

2 预测模式及参数选取

采用《环境影响评价技术导则：大气环境》(HJ 2.2—2008) (环境保护部, 2009) 推荐的进一步预测模型 AERMOD 模型。AERMOD 模型为稳态烟羽扩散模型, 可基于大气边界层参数模拟多种污染源排放, 同时适用于村庄和城市, 对复杂或简单地形条件且预测范围在 50 km 范围内的大气影响预测有很好的适用性 (Seinfeld and Pandis, 1998; 回蕴珉, 2011; 王小燕, 2013; 付鹏等, 2016)。

模式计算方法:

$$V_{dp} = f_p V_{dpf} + (1 - f_p) V_{dpc} \quad (1)$$

$$V_{dpf} = 1 / (R_a + R_p) \quad (2)$$

$$V_{dpc} = 1 / (R_a + R_p + 0.002 R_a R_p) + 0.002 \quad (3)$$

式中: V_{dp} 是所有颗粒物的沉降速率, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; f_p 是细颗粒物 (直径大于 $2.5 \mu\text{m}$ 且小于 $10 \mu\text{m}$) 的百分比; V_{dpf} 是细颗粒物的沉降速率, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; V_{dpc} 是粗颗粒物的沉降速率; R_a 是空气动力学阻力系数, $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$; R_p 是准层流层阻力系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.1 模型参数的选取

2.1.1 地面气象常规数据

本次模拟采用项目所在区域气象观测站的实测数据。该气象观测站位于 114.96°E 、 38.18°N , 东 8 区, 站台编号为 53699。距离拟建项目中心直线距离为 5.97 km, 站点与评价范围地理特征基本一致。本次收集了研究区域 2016 年逐日逐次的气象数据, 地面气象数据包括风向、风速、总云量、低云量、干球温度, 其中风向、风速、干球温度每日 24 次观测数据, 总云量、低云量每日 8 次观测数据。在数据处理过程中对观测数据次数不足 24 小时的进行差值处理 (付鹏等, 2015)。通过对地面气象数据分析可知, 该地区全年主导风向为南风, 平均风速为 $1.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 风频为 17.16%, 风玫瑰图见图 1。

2.1.2 高空气象数据

拟建项目周围 50 km 范围内无高空气象探空站点, 本次预测采用 WRF 模式两层嵌套进行模拟。第一层网格中心为北纬 35° , 东经 113° , 格点为 65×68 , 分辨率为 $81 \text{ km} \times 81 \text{ km}$; 第二层网格格点为 112×151 , 分辨率为 $27 \text{ km} \times 27 \text{ km}$, 覆盖我国大

部分地区, WRF 模式模拟探空数据点的坐标为北纬 38.19° , 东经 114.89° , 距离本案例 10.08 km, 符合 HJ 2.2—2008 要求。资料包含时间、探空数据层数、气压、高度、干球温度、露点、温度、风速、风向等 (马岩等, 2014)。

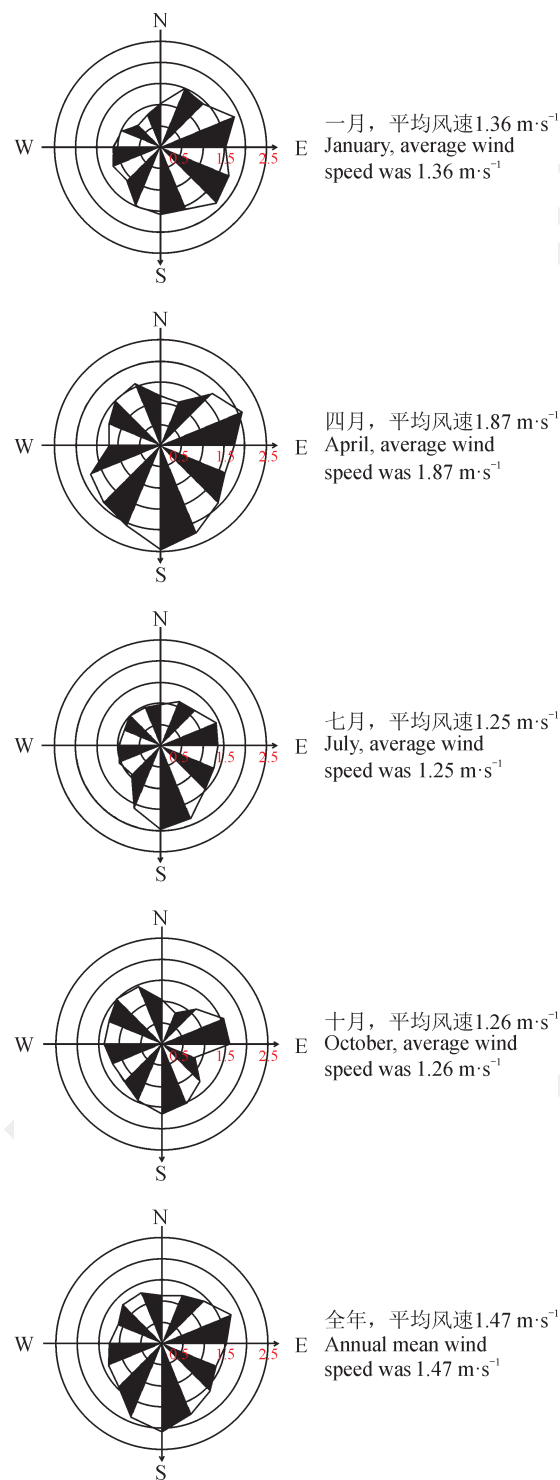


图 1 风玫瑰图
Fig.1 Wind rose map

2.1.3 地形数据

地形数据源采用 csi.cgiar.org 提供的 srtm 数据, 地形精度为 3 秒 (90 m)。

本研究模拟的区域范围为 6 km×6 km, 网格间距为 100 m, 依据获取的地形数据, 模拟范围内海拔最高点为 49 m。案例最高排气筒高度为 80 m, 排气筒基底高为 44 m, 可确定项目所在区域为简单地形, 地形数据见图 2。

2.1.4 污染源及沉降参数

根据项目工程分析数据, 确定焚烧烟气中重金属铅、汞、镉的排放源强如表 1 所示, 重金属干沉降参数参照美国环保局 (EPA) 网站上的有关沉降数据 ([https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-](https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models#aermod/)

[models#aermod/](https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models#aermod/)) , 见表 2。

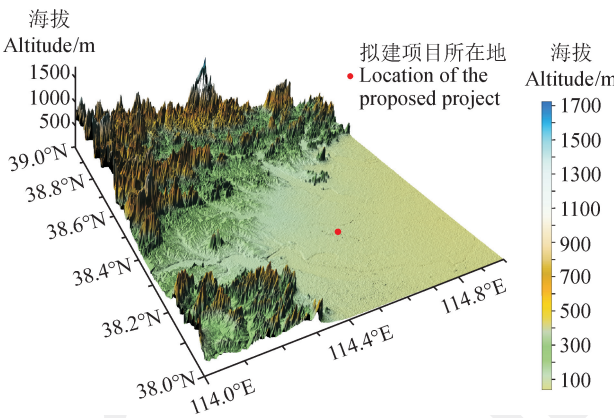


图 2 地形数据 (90 m×90 m)

Fig.2 Terrain data (90 m×90 m)

表 1 焚烧烟气重金属污染物排放源强
Tab.1 Emission source intensity of heavy metals from the flue gas of incinerator

排放速率 Emission rate/(kg·h ⁻¹)			排放工况 Working condition of discharge	排放高度 Emission height /m	温度 Temperature /K	排气量 Gas displacement /(m ³ ·h ⁻¹)	内径 Inner diameter /m
Cd	Hg	Pb					
0.002	0.006	0.371	连续 Consecutive	80	284.25	569976	5.6

表 2 干沉降参数
Tab.2 Dry deposition parameters

污染物 Pollutant	25 μm 以下质量百分比 Mass percent below 25 μm/%	中位粒径 Median size/μm
Cd	70	0.6
Pb	75	0.5
Hg	80	0.4

2.2 预测方案

预测区域为以排放源 (焚烧炉排气筒) 所在点位基准点, 面积 6 km×6 km 的矩形, 预测各重金属因子年均最大干沉降量, 并叠加区域现状监测浓度后评价重金属累积浓度是否满足《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 中二级标准限值要求。

3 模拟结果对比分析

通过采用 AERMOD 模式中干沉降预测模块, 输入沉降参数进行预测, 得到 Pb、Hg、Cd 的干沉降预测结果, 具体预测结果见图 3。Pb、Hg、Cd 的年最大沉降量分别为 8950 μg·m⁻²、

140 μg·m⁻²、50 μg·m⁻²。项目按照运行 20 年计算, 通过以 Pb、Hg、Cd 的年最大沉降量来计算分析对所在区域土壤环境造成的影响, 则每平方米土壤中累积的 Pb、Hg、Cd 分别为 179 mg、2.8 mg、1.0 mg。通过实地调查, 项目所在区域土壤容重约 1.8 g·cm⁻³, 土层厚度约 40 cm, 单位面积 (1 m²) 的土壤重量为 720 kg。则项目在运行期间土壤中 Pb、Hg、Cd 的贡献浓度 0.25 mg·kg⁻¹、0.0039 mg·kg⁻¹、0.0014 mg·kg⁻¹。Pb、Hg、Cd 的背景沉降值分别为 16.10 mg·kg⁻¹, 0.2681 mg·kg⁻¹, 0.1296 mg·kg⁻¹; 叠加背景值后 Pb、Hg、Cd 的累积浓度分别为 16.35 mg·kg⁻¹、0.2720 mg·kg⁻¹、0.1310 mg·kg⁻¹。Pb、Hg、Cd 累积浓度均满足《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 二级标准限值 (Pb: 350 mg·kg⁻¹、Hg: 1.0 mg·kg⁻¹、Cd: 0.6 mg·kg⁻¹) 的要求, 占标率分别为 4.7%、27.2%、21.8%, 虽未超标, 但鉴于其危害性应引起重视。

研究区域主导风向的下风向为污染源的 N 方位, 下风向 Pb、Hg、Cd 年均干沉降量随离源距离的变化见图 4。

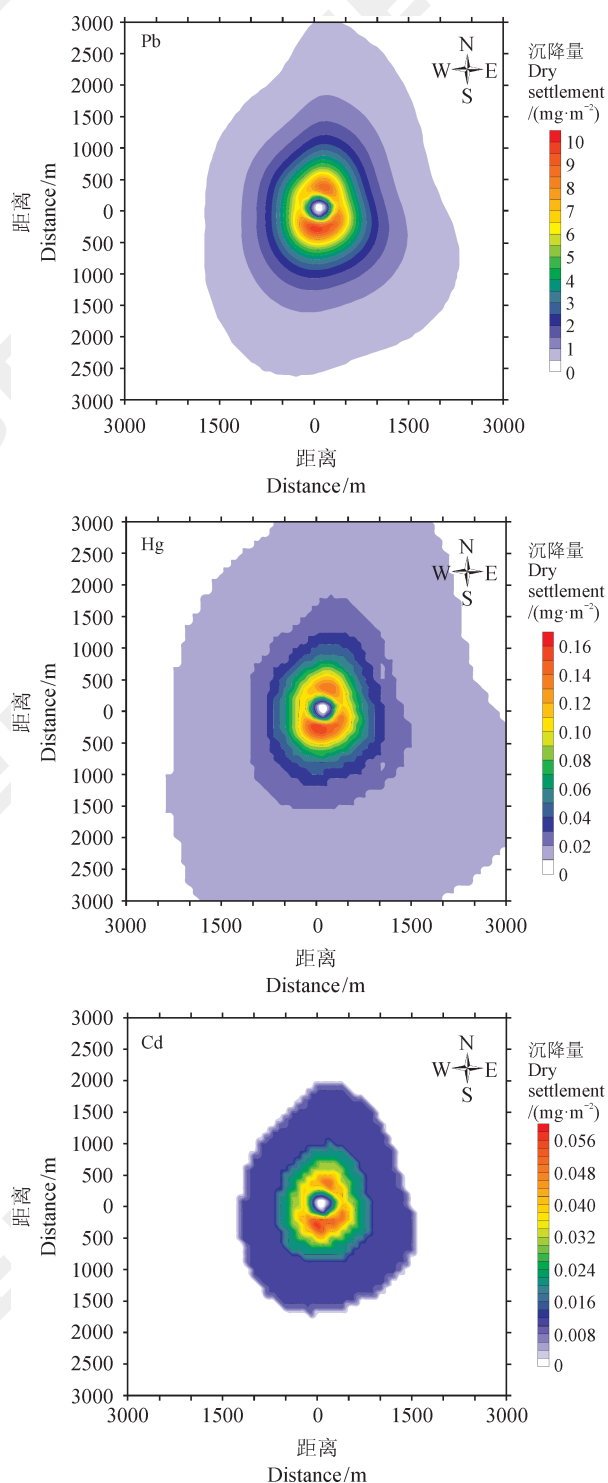


图3 3种重金属年均干沉降量分布图

Fig.3 Annual dry settlement distributions of the 3 kinds of heavy metals

据图4, Pb在0—400 m沉降量呈现快速上升, 最快时每100 m上升 $3.50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 在400 m达到最大值 $8.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 500—800 m呈每100 m下降约 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的趋势, 之后随着离源距离的增加,

下降趋势逐渐变缓; Hg在0—400 m沉降量也呈现快速上升, 在400 m达到最大值, 为 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 400—700 m呈每100 m下降 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的趋势, 之后随着离源距离的增加, 下降趋势逐渐变缓, 2000 m以后保持 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 不变; Cd的沉降量较小, 0—300 m也呈现明显的上升趋势, 300—500 m为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 后呈现稳步下降的趋势, 1000—1900 m保持 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 不变, 2000 m后值小于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ (模式输出的最小精度为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 小于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的值输出为0)。

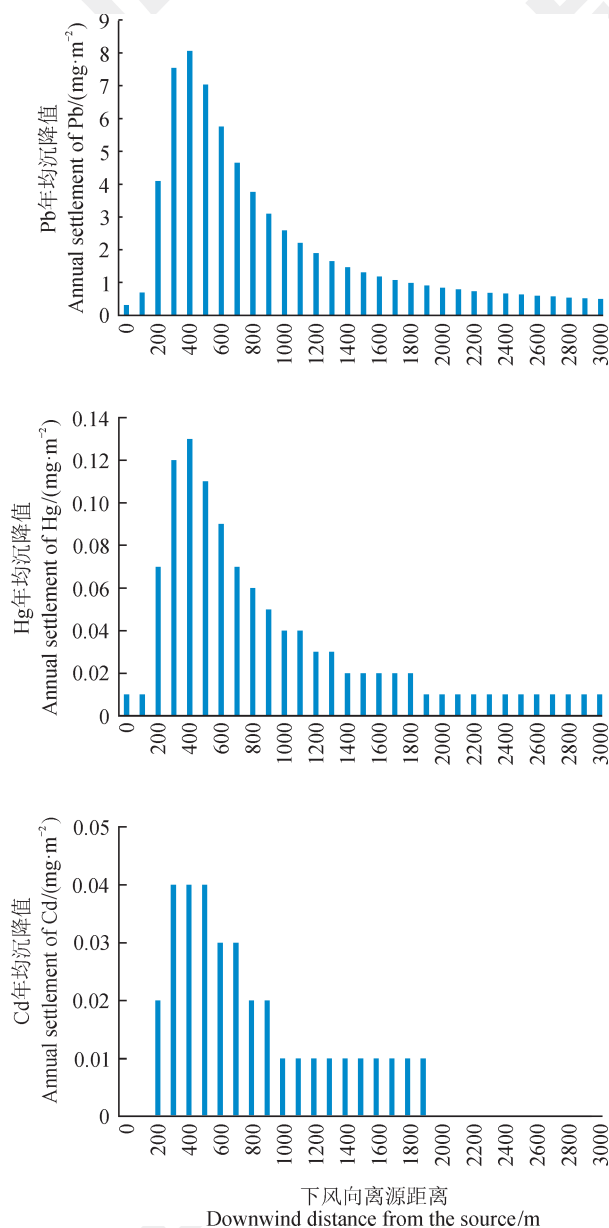


图4 各污染物沉降量随距离变化 (下风向)
Fig.4 Settlement of pollutants varies with distance (downwind)

引入污染系数衡量风对污染物的扩散传输作用: 污染系数 = 风向频率 / 该风向平均风速。研究区域内的年平均污染系数结果见图5。以铅的年均沉降量 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、汞的年均沉降量 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、镉的年均沉降量 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 为等值线计算对应等浓度线的离源距离(表3)。两者相结合说明污染物浓度与污染系数(风向、风频和风速)的关系。

对比图3与图5可以看出, 污染物沉降量分布与污染系数具有较好的一致性, 污染系数越大, 等沉降量分布的距离越远。结合图5和表3可知, 污染系数在风向为S、N、NNE和SSW上数值较大, 说明污染物扩散传输在南北向扩散距离较东西向更远。S风向的污染系数大于N风向, 对应的沉降量扩散距离北向较南向更远, W风向的污

染系数大于E风向, 对应的东向的污染物较西向传输扩散略远。N、S风向污染系数较E、W方向的大, 南北方向污染物扩散距离大于东西方向。

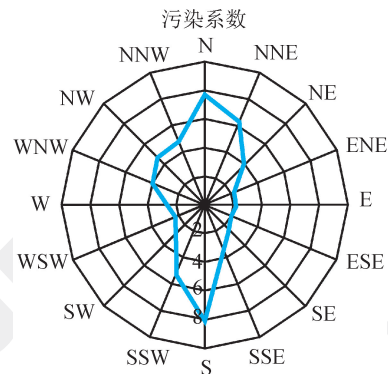


图5 年均污染系数玫瑰图

Fig.5 Annual average pollution coefficient rose diagram

表3 年平均污染系数与年均浓度离源距离关系表

Tab.3 Relationship between annual average pollution coefficient and annual average concentration distance from source

风向 Wind direction	污染系数 Pollution coefficient	对应污染物扩散方向 Corresponding pollutant diffusion direction	Pb 离源最远距离 (年均沉降量 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)	Hg 离源最远距离 (年均沉降量 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)	Cd 离源最远距离 (年均沉降量 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)
			Farthest distance of Pb from the source/m (Annual settlement= $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)	Farthest distance of Hg from the source/m (Annual settlement= $0.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)	Farthest distance of Cd from the source/m (Annual settlement= $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)
N	7.10	S	1611	1600	1600
E	2.07	W	1153	1100	1200
S	8.16	N	1778	1800	1900
W	2.66	E	1417	1400	1400

4 结论

城市垃圾焚烧发电项目焚烧烟气中重金属会随着大气沉降进入土壤, 因此在开展此类项目环境影响评价等工作时必须要进行重金属沉降对土壤环境的影响预测。本文以某城市垃圾焚烧发电项目为例, 采用AERMOD模式对焚烧炉烟气中重金属Pb、Hg、Cd进行干沉降预测: 结合项目所在区域土壤重金属背景值, 得到Pb、Hg、Cd的累积浓度分别为 $16.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.272 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.131 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占标率分别为4.7%、27.2%、21.8%; 3项污染物的年均沉降量均随离源距离呈现先上升后下降的趋势; 污染物沉降量分布与污染系数具有较好的一致性, 污染物扩散传输距离在南北方向大于东西方向。焚烧烟气中重金属

污染物沉降虽满足《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 二级标准限值, 但应引起有关部门对垃圾焚烧污染物排放的重视, 特别是Hg和Cd。

参考文献

- 付 鹏, 潘 峰, 莫欣岳, 等. 2015. 不同地形数据下炼油污水处理装置卫生防护距离问题探讨[J]. 环境影响评价, 37(6): 52–56. [Fu P, Pan F, Mo X Y, et al. 2015. Discussion of the health protection distance of refinery sewage treatment plant under different terrain [J]. *Environment Impact Assessment*, 37(6): 52–56.]
- 付 鹏, 全纪龙, 潘 峰, 等. 2016. 不同地形数据对大气预测结果的影响性分析[J]. 环境工程, 34(3): 170–173. [Fu P, Tong J L, Pan F, et al. 2016. Influence analysis of different terrain data on the results of atmosphere

- forecasting [J]. *Environmental Engineering*, 34(3): 170–173.
- 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 2011. 土壤重金属污染评价方法 [J]. *生态学杂志*, 30(5): 889–896. [Guo X X, Liu C Q, Zhu Z Z, et al. 2011. Evaluation methods for soil heavy metals contamination: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 30(5): 889–896.]
- 环境保护部. 2009. HJ 2.2—2008 环境影响评价技术导则: 大气环境 [S]. 北京: 中国环境科学出版社. [Ministry of Environmental Protection. 2009. Guidelines for environmental impact assessment: atmospheric environment [S]. Beijing: China Environmental Science Press.]
- 回蕴珉. 2011. AERMOD 模式在大气环境影响评价中的应用 [D]. 天津: 天津大学. [Hui Y M. 2011. Application of AERMOD model in atmospheric environmental impact Assessment [D]. Tianjin: Tianjin University.]
- 李薇, 张聚兴, 葛大陆. 2010. 生活垃圾焚烧发电项目对大气环境的影响及对策分析 [J]. *华东电力*, 38(1): 129–132. [Li W, Zhang J X, Ge D L. 2010. Power generation of municipal solid waste incineration influence on atmospheric environment and countermeasure analysis [J]. *East China Electric Power*, 38(1): 129–132.]
- 马岩, 全纪龙, 潘峰, 等. 2014. 焦化项目大气污染特征及环境影响评价 [J]. *化工环保*, 34(4): 366–370. [Ma Y, Tong J L, Pan F, et al. 2014. Characteristics and environmental impact assessment of atmospheric pollution from coking project [J]. *and Environmental protection of chemical industry*, 34(4): 366–370.]
- 欧阳晓光, 郭芬. 2012. 城市垃圾焚烧烟气中重金属的源项解析和干沉降影响研究 [J]. *环境科学与管理*, 37(12): 64–67. [Ouyang X G, Guo F. 2012. Study on source apportionment and dry deposition of heavy metals in flue gas from municipal solid waste incineration [J]. *Environmental Science and Management*, 37(12): 64–67.]
- 王小燕. 2013. AERMOD在区域大气环评中的应用研究 [D]. 兰州: 兰州大学. [Wang X Y. 2013. Application of AERMOD in regional planning atmospheric environmental impact Assessment [D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 杨玉华. 2010. 西安市垃圾填埋场及大气沉降物污染的评价 [D]. 西安: 陕西师范大学. [Yang Y H. 2010. Evaluation of pollution of landfill and atmospheric fallout in Xi'an city [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University.]
- Seinfeld J H, Pandis S N. 1998. Atmospheric chemistry and physics [M]. New York: John Wiley & Sons Inc: 76–80.