DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2025.0223
张峥,王昭桐,孙东越, 等.2025.冶炼厂周边土壤重金属铅监测布点方法及健康评估研究[J].环境科学学报,45(12):360-368
ZHANG Zheng, WANG Zhaotong, SUN Dongyue, *et al*.2025.Research on the method and health assessment of monitoring points for heavy metal lead in soil surrounding smelters[J].Acta Scientiae Circumstantiae, 45(12):360-368

冶炼厂周边土壤重金属铅监测布点方法及健康评估研究

张峥[1,2],王昭桐[1],孙东越[2],马子昂[1],徐鑫[1],封雪[2,*],伯鑫[1,*]

1. 北京化工大学环境科学与工程系,北京 100029
2. 中国环境监测总站,北京 100012

摘要:为准确识别铅锌冶炼企业周边土壤重金属Pb污染状况,采用数值模型CALPUFF预测某铅锌冶炼企业周边土壤中重金属污染物Pb的沉降范围,根据地形、沉降高值区等有选择性地布设土壤监测点位,并通过土壤监测数据进行模型分析验证.结果显示,研究区土壤Pb沉降通量为9.26×10^{-4}~1.69 ng·m^{-2}·s^{-1},区域地形较为平坦,在气象的作用下,铅锌冶炼企业排放的Pb在土壤中的沉降趋势与主导风向一致,污染主要集中在厂区内及四周,厂区内沉降通量为0.12~1.69 ng·m^{-2}·s^{-1},厂区外沉降通量为9.26×10^{-4}~0.61 ng·m^{-2}·s^{-1}.模型模拟的土壤重金属Pb沉降值与监测值的相关性r为0.45,平均绝对误差(MAE)为0.22,说明模型具有一定的可信度.经过健康风险计算,该企业周边土壤Pb的总非致癌健康风险为0.02~0.68,在可接受范围内,但部分点位经口摄入的致癌风险超过限值.研究结果可为铅锌冶炼区土壤重金属Pb污染监测布点及健康管理提供技术支持.

关键词:铅污染;CALPUFF;致癌风险;铅锌冶炼企业;环境健康

文章编号:0253-2468(2025)12-0360-09　　**中图分类号**:X833,X820.4　　**文献标识码**:A

Research on the method and health assessment of monitoring points for heavy metal lead in soil surrounding smelters

ZHANG Zheng[1,2], WANG Zhaotong[1], SUN Dongyue[2], MA Zi′ang[1], XU Xin[1], FENG Xue[2,*], BO Xin[1,*]

1. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029
2. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012

Abstract: To accurately assess the pollution status of heavy metal Pb in the vicinity of lead-zinc smelting enterprises, the CALPUFF numerical model was employed to predict the deposition range of Pb in soil. Soil monitoring sites were strategically selected based on factors such as topography and high predicted deposition zones. Model predictions were evaluated and validated using soil monitoring data. The results indicated that the soil Pb deposition flux in the study area ranged from 9.26×10^{-4} to 1.69 ng·m^{-2}·s^{-1}, with the terrain being relatively flat. Meteorological conditions influenced the deposition pattern, which aligned with the dominant wind direction. Pb pollution was primarily concentrated within and around the plant area, with deposition fluxes ranging from 0.12 to 1.69 ng·m^{-2}·s^{-1} inside the plant and 9.26×10^{-4} to 0.61 ng·m^{-2}·s^{-1} outside the plant. The correlation coefficient (r) between simulated and observed soil Pb deposition values was 0.45, with a MAE of 0.22, indicating moderate model reliability. Health risk assessment revealed that the total non-carcinogenic risk of Pb in soil surrounding the enterprise ranged from 0.02 to 0.68, remaining within acceptable range. However, the carcinogenic risk from oral ingestion at certain locations exceeded recommended thresholds. These findings offer technical support for monitoring and managing soil Pb pollution and associated health risks in lead-zinc smelting areas.

Keywords: lead pollution; CALPUFF; cancer risk; lead-zinc smelting enterprises; environmental health

1　引言(Introduction)

我国土壤重金属污染形势严峻(陈雅丽等, 2019),超过19.1%的农田受到不同程度的重金属污染,其中重金属Pb为主要污染物(Tang *et al.*, 2021). 2008—2018年大气沉降造成的土壤Pb输入占全国人为土壤Pb输入的93%(Shen *et al.*, 2017; Peng *et al.*, 2019),冶炼活动为大气中重金属Pb的主要来源之一.研究表明,铅锌冶炼企业排放的Pb很容易通过沉降造成土壤Pb污染(Jin *et al.*, 2005; 徐庆利等, 2022).因此,为准确

收稿日期:2025-05-22　　**修回日期**:2025-06-30　　**录用日期**:2025-07-01
基金项目:国家自然科学基金(No.42077001,72174125)
作者简介:张峥(2001—),男,E-mail:2023210153@buct.edu.cn; * **责任作者**,E-mail:fengxue@cnemc.cn;boxin@buct.edu.cn

中国知网　https://www.cnki.net

识别铅锌冶炼企业周边土壤重金属Pb污染状况,开展铅锌冶炼企业周边土壤重金属Pb监测布点研究具有重要意义.

国内外一些学者利用不同的监测布点方法针对铅锌冶炼企业周边土壤进行了布点取样.例如,曾嘉庆等(2023)采用40 m×40 m的网格布点法采集了中国南部某工业城市铅锌冶炼场地不同层次的土壤样品;陈科等(2023)采用扇形布点法采集了雅西某铅锌冶炼企业的表层土壤样品;韩科等(2023)采用分区布点法对河南省某市铅锌冶炼场地周边土壤进行采样;Jin等(2024)采用分区布点法对中国南方废弃铅锌冶炼厂进行采样;Dileepa等(2023)对南澳大利亚州皮里港铅锌冶炼厂进行取样.但铅锌冶炼企业周边土壤重金属Pb含量主要受大气沉降(Peng *et al.*, 2019)、土地利用类型(王海根等, 2024)、风向(周小勇等,2013)、地形(张传华等, 2024)等复杂因素影响, 而传统的监测布点方法往往不能准确识别污染高值区, 且上述研究均未采用数值模型等方法开展土壤高污染区的预测.

土壤高污染区研究方面, 田飞等(2019)通过数值模型CALPUFF进行模拟预测, 确定了垃圾焚烧项目排放二噁英的沉降高值区,并设置了土壤监测点,结果表明数值模型能为垃圾焚烧土壤污染监测布点提供技术支持;同样的,孙博飞等(2017)基于数值模型CALPUFF预测了钢铁厂烧结机二噁英排放的土壤污染物沉降量, 发现模拟结果与监测数据趋势一致; Qu等(2024)利用数值模型AERMOD模拟了江西省贵溪市某平原的土壤重金属污染物沉降过程,发现土地利用类型对土壤中As、Cu、Pb和Zn的影响显著,农用地重金属含量高于非农用地.上述研究表明数值模型能够很好地找出重金属污染物的沉降高值区.而铅锌冶炼企业排放的含重金属废气会随大气沉降至土壤表层,因此,基于数值模型的铅锌冶炼企业周围土壤重金属铅高污染区监测布点及健康评估研究具有重要的科学意义.

本研究基于我国南方地区一家运行多年的铅锌冶炼企业,采用数值模型CALPUFF定量预测重金属Pb的沉降区域分布,根据预测的Pb沉降分布结果设置土壤监测点,并通过预测值与监测值之间的相关性分析,探究基于数值模拟的铅锌冶炼企业土壤监测布点的可行性,之后根据土壤中Pb的监测值开展环境健康分析,旨在为铅锌冶炼场地周边土壤重金属Pb污染预警提供参考.

2　材料与方法(Materials and methods)

2.1　研究区域与对象

本研究区域位于我国南部某省,周边地势东南高西北低,地势较为平缓,海拔110 m,南部分列着散列小山脉,预测范围为5 km×5 km,主导风向为西北风,该范围内建有铅锌冶炼企业.该企业回转窑建于2004年,目前次氧化锌总生产能力为21000 $t\cdot a^{-1}$,企业占地面积26000 m^2.厂区东侧、南侧均有成片农田,属于土壤环境敏感区域.根据现场踏勘,该企业废气经50 m烟囱排放,无组织废气主要以粉尘形式排放.

2.2　模型构建

数值模型CALPUFF为非稳态三维拉格朗日烟团模式,是《环境影响评价技术导则 大气环境》(HJ 22-2018)推荐的模型(单皖粤等, 2024),能够模拟大气污染物的沉降过程, 并且考虑了小时的气象和温度场、静小风及地形等非稳态情况(伯鑫等, 2009; Scire *et al.*, 2000; Yim *et al.*, 2010;伯鑫等, 2015).在CALPUFF烟羽扩散模型中,单个烟团在某个接受点的基本浓度方程分别见式(1)~(2).

$$C=\frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y}g\exp[-d_a^2/(2\sigma_x^2)]\mathrm{Exp}[-d_c^2/(2\sigma_y^2)] \tag{1}$$

$$g=\frac{2}{\sigma_z\sqrt{2\pi}}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\exp[-(H_e+2nh)^2/(2\sigma_z^2)] \tag{2}$$

式中,C为地面浓度($g\cdot m^{-2}$);Q为源强;σ_x、σ_y、σ_z为扩散系数;d_a为顺风距离;d_c为横向距离;H_e为有效高度;h为混合层高度;g为高斯方程垂直项,用于解决混合层和地面之间多次反射的问题.

本研究采用中尺度数据大气模式WRF模拟的三维气象场数据作为气象数据(杨景朝等,2018;2023),WRF模式的初始场数据来源于美国环境预报中心的全球再分析资料;地形数据为美国地质勘探局(United States Geological Survey)精度为90 m数据;地表参数数据精度为30 m(伯鑫等, 2015; 伯鑫等, 2018 ;Scire *et*

中国知网　https://www.cnki.net

al., 2000). 模型模拟范围为 5 km×5 km, 源强输入数据包括排放坐标及排放高度、排放温度和重金属污染源 Pb 排放量等, 其中, Pb 的排放参数及干湿沉降参数分别见表 1 和表 2, 设置网格分辨率为 50 m, 东西向 100 个格点, 南北向 100 个格点.

本研究模拟了铅锌冶炼企业排放 Pb 污染物的沉降范围, 包括 Pb 的沉降通量($ng·m^{-2}·s^{-1}$), 模拟 Pb 以粉尘的方式扩散, 不考虑 Pb 的化学转化, 分析污染场地空间分布范围.

表 1 干湿沉降参数设置

Table1 Parameter settings for dry and wet sedimentation

物种沉积特性	设置
几何质量平均直径	0.48 μm
几何标准差	2.00 μm
清除系数液体沉淀	0.0004 s^{-1}
清除系数冻结降水	0.00005 s^{-1}
X 方向上网格点	100 m
Y 方向上网格点	100 m
接受点	网格点

表 2 Pb 排放参数设置

Table2 Pb emission parameter setting

源名称	排口中心坐标 *X*/m	排口中心坐标 *Y*/m	排放高度/m	排放温度/℃	排放量/($t·a^{-1}$)
回转窑烟囱	678862	3074219	50	80	0.2230
收尘室	678850	3074240	15	20	0.8996
配料车间	678852	3074226	15	20	0.0325

2.3 土壤布点及监测方法

本研究采用 CALPUFF 模式预测土壤中 Pb 的干、湿沉降范围, 并结合地形、土地利用与气象等资料, 选择性地布设土壤监测点位(封雪等, 2025). 由于该铅锌冶炼企业重金属 Pb 排放以无组织粉尘为主, 沉降高值区集中在厂界附近, 因此, 根据 CALPUFF 预测结果在厂界外四周设置土壤监测点位, 并沿着 Pb 沉降的主要方向和下风向布设土壤监测点位, 最后考虑到土壤背景值在上风向的低值区布设土壤监测点位, 共布设 14 个监测点(图 1 中的 1~14 点位). 采样频次参考《土壤污染重点监管单位周边土壤环境监测技术指南(试行)》.

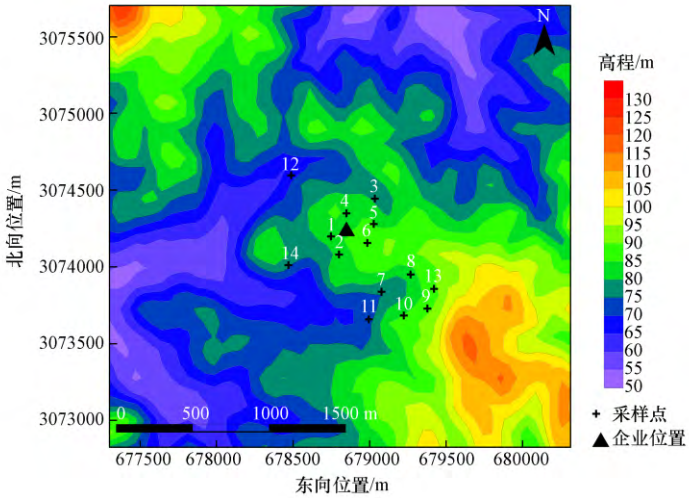


图 1 企业周边土壤监测布点

Fig.1 Distribution of soil monitoring points around the enterprise

为了提高样品代表性, 采用五点法采集土壤样品, 采样深度为 0~20 cm(陆泗进等, 2015). 土壤中重金属 Pb 的检测分析采用国家标准《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)、《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018), 将土壤样品风干, 拣出杂质并用四分法分取压碎样, 过 100 目(孔径 0.149 mm)尼龙筛用于土壤 Pb 元素总量测定, 分析仪器选取原子吸收分光光度计(Ice3500 HD-YQ-020). 测试过程中加入标准土壤 GSS-5 作为质控样, 并且土壤样品分析时, 进行平行双样分析. 在每批次分析样品中, 随机抽取 5% 的样品进行平行双样分析, 仪器回收率为 90%~105%.

中国知网 https://www.cnki.net

2.4　模型验证方法

空气质量数值模型的验证主要采用模型验证案例法和模型比较法等.本研究使用模型验证案例法开展验证(Wu *et al.*, 2024;史梦雪等, 2025),以模型模拟值与土壤监测值的相关性系数r作为模型验证的统计指标,公式见式(3).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i - \bar{C})\sum_{i=1}^{n}(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(C_i - \bar{C})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(M_i - \bar{M})^2}} \tag{3}$$

式中,C为土壤实际监测值;$\bar{C}$为土壤实际监测平均值;M为模型模拟的沉降通量;$\bar{M}$为模型模拟的沉降通量平均值;i为第i个监测点位;n为采样点数量.

此外,为进一步评估模型的系统性误差,本研究使用平均绝对误差(Mean Absolute Erro, MAE)作为评价指标(Huang *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2024),评估模型的预测性能,公式见式(4). MAE值越小,表示模型的性能越好,绝对值防止误差抵消可以更好地反映误差的实际情况.

$$\mathrm{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^{n}|C_i - M_i|}{n} \tag{4}$$

2.5　健康风险计算

本研究采用EPA的环境健康评价模型,对研究区土壤重金属污染物开展健康风险评价.土壤中的重金属污染物通常通过3种途径进入人体:皮肤接触、经口摄入和呼吸吸入(曾蛟等, 2024; 罗旭等, 2024).此外,由于年龄的差异导致重金属污染物对人体健康影响的程度不同,本研究将受到土壤中重金属影响的人群分为儿童和成人两类.ADI_{ing}、ADI_{inh}和ADI_{der}分别表示土壤经口摄入、呼吸摄入和皮肤接触土壤颗粒的重金属暴露水平,具体公式分别见式(5)~(7).

$$ADI_{ing} = \frac{C \times IR_s \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \tag{5}$$

$$ADI_{der} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \tag{6}$$

$$ADI_{inh} = \frac{C \times IR_i \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \tag{7}$$

式中,C为铅锌冶炼企业周边土壤监测点位中重金属Pb含量(mg·kg^{-1});IR_s为重金属摄入因子;EF为暴露频率;ED为暴露周期;BW为平均体重;AT为平均暴露时间;SA为暴露皮肤面积;AF为皮肤粘附因子;ABS为皮肤吸收因子;IR_i为重金属吸入因子;PEF为颗粒物逸度系数;各参数具体取值见表3.

暴露风险结果表征中,HI表示人体非致癌风险总和,当HQ或HI小于1时,表示对人体的非致癌风险可以忽略不计,当HQ>1或HI>1时,说明存在非致癌风险(金丹, 2016).相关计算公式见式(8)~(9).

$$HI = \sum HQ_i = \sum \frac{ADI_i}{RfD_i} \tag{8}$$

$$TCR = \sum CR_i = \sum ADI_i \times SF_i \tag{9}$$

式中,RfD_i为非致癌参考剂量;SF_i为致癌斜率因子,参考其他研究取0.0085(杨春等, 2016;Wang *et al.*, 2020; 许青阳等, 2024).

表3　土壤重金属铅暴露参数取值

Table3　Values of Soil Heavy Metal Lead Exposure Parameters

参数	单位	儿童取值	成人取值
IR_s	mg·d^{-1}	200	100
EF	d·a^{-1}	350	350
ED	a	6	30
BW	kg	15.9	56.8
AT	d	致癌风险为70×365,非致癌风险为ED×365	
SA	cm^2	2448	5075
AF	mg·m^{-2}·d	0.2	0.07
ABS	–	0.001	0.001
IR_i	m^3·d^{-1}	7.5	14.5
PEF	m^3·kg^{-1}	1.36×10^9	1.36×10^9

3　结果与讨论(Results and discussion)

3.1　重金属Pb土壤沉降分析

研究区域重金属Pb大气污染排放主要来源于铅锌冶炼企业,以有组织和无组织两种形式排放.其中,有组织排放源为回转窑烟囱,高50 m, Pb排放量为0.223 t·a^{-1};无组织排放源为原料库、收尘室及成品仓库,

中国知网　https://www.cnki.net

Pb排放量为0.932 t·a^{-1}.本研究通过CALPUFF模式预测Pb在周围土壤的沉降累积(图2).

根据预测,研究区域土壤Pb的沉降通量为9.26×10^{-4}~1.69 ng·m^{-2}·s^{-1}.铅锌冶炼的无组织排放量为有组织的4.18倍,Pb的扩散距离较近,高值区主要集中在厂区内及四周,其中,厂区内的Pb沉降通量为0.12~1.69 ng·m^{-2}·s^{-1},厂区外的Pb沉降通量为9.26×10^{-4}~0.61 ng·m^{-2}·s^{-1}.企业周边土壤Pb最大沉降通量出现在南厂界上,为0.61 ng·m^{-2}·s^{-1},污染区域主要在厂区南部.本研究采用WRF模拟提供的研究区三维气象场数据,使用Origin2022软件绘制出全年的风玫瑰图(图3),发现研究区的主导风向为西北风,NNW-NNE频率为48.03%.由于研究区地势较为平坦,大气湍流活动不明显,Pb烟尘在大气中的扩散方向主要受主导风向影响(王霄雯,2019).铅锌冶炼企业排放的重金属Pb在主导风向的作用下向南扩散,沉降通量从北向南快速降低,说明污染源排放集中,土壤Pb沉降通量(图2)分布趋势与全年主导风向(图3)基本一致.

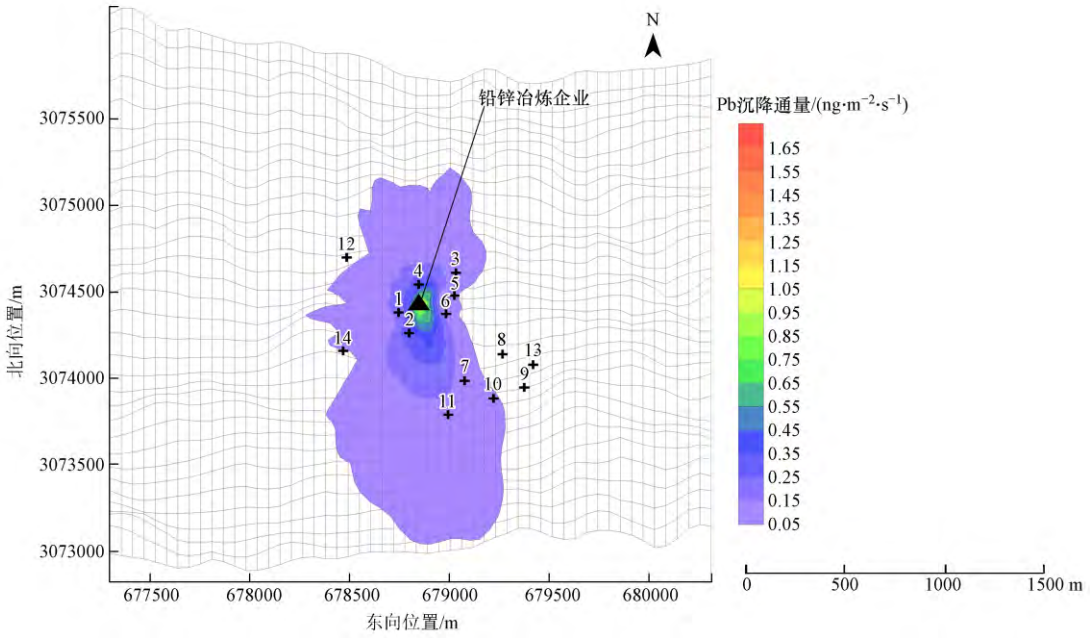


图2 Pb沉降量分布预测及监测布点

Fig.2 Prediction of Pb deposition distribution and monitoring point map

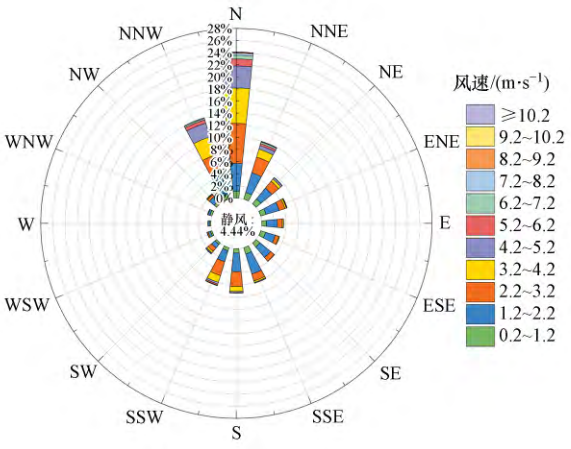


图3 研究区域风玫瑰

Fig.3 Wind rose map of study area

中国知网 https://www.cnki.net

3.2　模型验证

根据重金属Pb沉降预测数据与对应监测点值,预测沉降通量为0.014~0.342 ng·m^{-2}·s^{-1},土壤中重金属Pb含量范围为34.6~196.0 mg·kg^{-1}. 根据《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)和《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)划分土壤点位不同污染程度,14个土壤采样点位中,6个点位的重金属Pb含量超过风险筛选值(表4).其中,1、2和4号点位重金属Pb的监测值较大,均超过风险筛选值,位于厂区周边,与模型预测的污染高值区基本重叠.经过相关性分析计算,研究区域土壤重金属Pb的模拟值与监测值的相关性为0.45(p<0.05),说明模型的预测能力较好.田飞等(2019)的研究表明,当数值模型CALPUFF模拟沉降量与土壤监测值的相关性为0.29~0.85时,模型模拟结果具有一定可信度.MAE为0.22,表明模型预测性能处于可接受水平(Li *et al.*, 2021; 杨馨等, 2025).

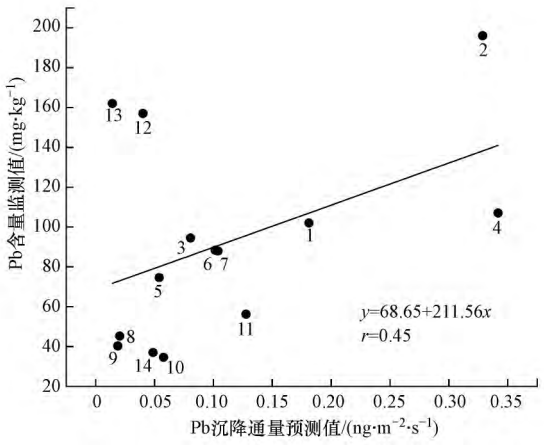


图4　土壤中Pb监测值与对应监测点预测数据分布情况

Fig.4　Distribution of Pb monitoring values in soil and corresponding monitoring point prediction data

表4　采样点位重金属Pb含量及评价

Table 4　Content and evaluation of heavy metal Pb at sampling points

点位	监测值/(mg·kg^{-1})	pH	土地利用类型	风险筛选值/(mg·kg^{-1})	点位	监测值/(mg·kg^{-1})	pH	土地利用类型	风险筛选值/(mg·kg^{-1})
1	102.0	5.82	耕地-水田	100	8	45.2	6.09	耕地-水田	100
2	196.0	5.80	耕地-旱地	90	9	40.3	5.85	耕地-旱地	100
3	94.5	5.56	耕地-水田	100	10	34.6	6.12	耕地-旱地	90
4	107.0	5.34	耕地-旱地	70	11	56.2	7.15	耕地-水田	140
5	74.6	5.90	耕地-水田	80	12	157.0	6.56	耕地-水田	140
6	88.3	6.33	耕地-水田	100	13	162.0	6.33	耕地-旱地	120
7	87.9	5.25	耕地-水田	80	14	37.0	5.32	耕地-旱地	70

基于CALPUFF模型的布点方法,根据铅锌冶炼企业的污染物排放清单,结合地形、土地利用与气象等数据进行重金属沉降预测,能更全面地反映重金属污染物扩散规律,使监测点布局更合理.该模型能够为铅锌冶炼企业的土壤监测布点及环境影响分析提供技术支持,此外,由于重金属大多以粉尘形式排放,因此CALPUFF也适用于其他重金属的沉降预测.

3.3　健康风险分析

如图5所示,整体上研究区内的非致癌风险程度为经口摄入>皮肤接触>呼吸摄入,在非致癌风险中儿童的经口摄入风险和皮肤接触风险高于成人.土壤重金属Pb的HI值均低于美国环保署(USEPA)的安全限值1,总非致癌健康风险值为0.02~0.68,表明其非致癌健康风险在可接受范围内,但儿童经口摄入风险接近安全限值.研究显示,儿童群体的HI值显著高于成人群体,这与儿童的呼吸频率高、手口接触行为频繁以及消化道对某些有毒元素的吸收率较高有关(Ma *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2021).

中国知网　https://www.cnki.net

在致癌风险方面,重金属Pb对儿童和成人的总致癌风险水平相近,通过呼吸和皮肤接触途径摄入Pb的致癌风险均处于或低于可接受水平($CR<1.00\times10^{-6}$).然而,点位2、12和13的经口摄入途径的致癌风险值均超过了可接受水平,表明存在一定的致癌风险,需引起重视.

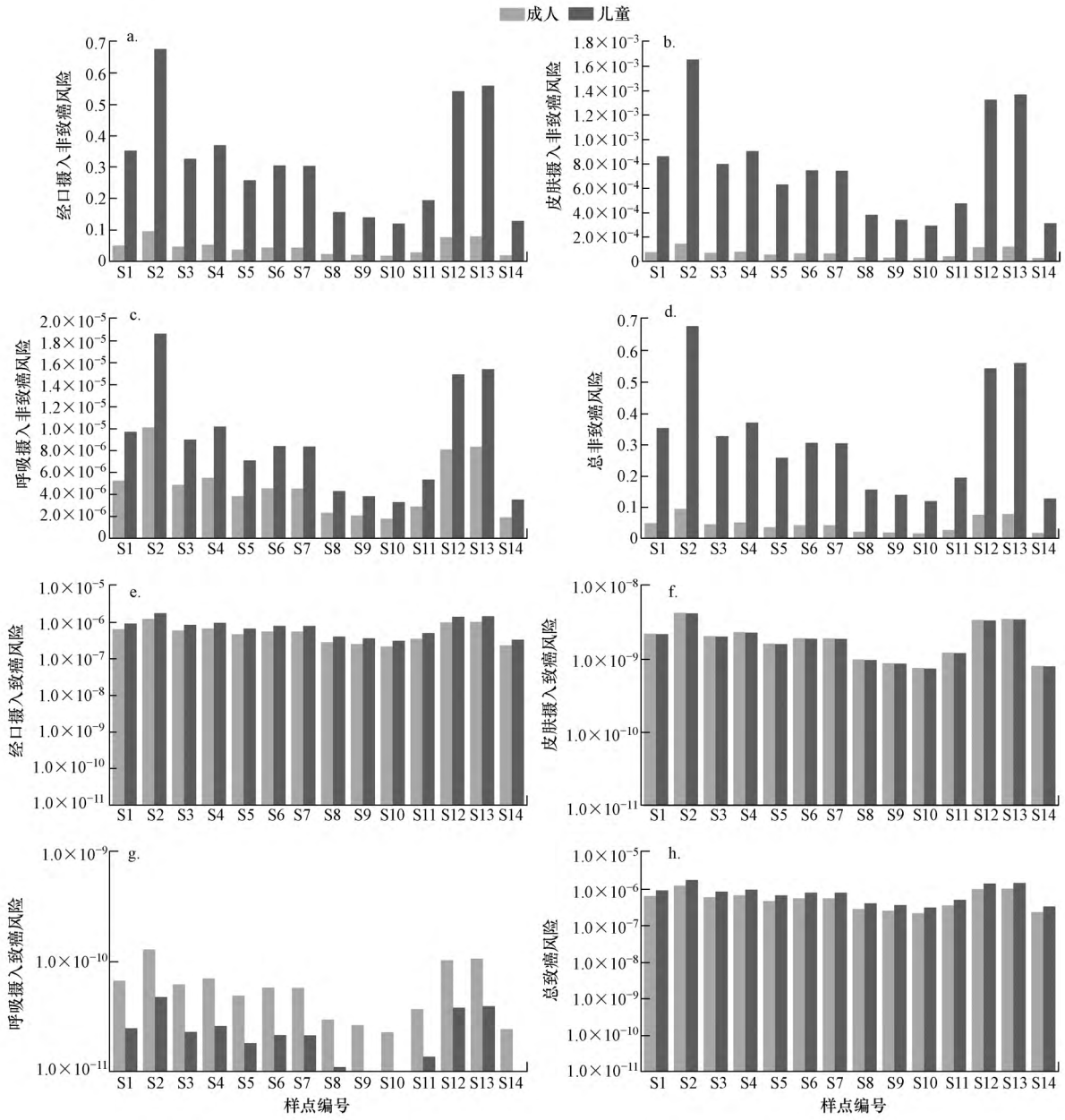


图5 研究区土壤重金属Pb非致癌和致癌健康风险

Fig.5 Non carcinogenic and carcinogenic health risks of heavy metal Pb in the soil of the research area

3.4 不确定性分析

数值模型CALPUFF输入的Pb污染排放源强为年排放总量,企业在生产过程中存在波动性,导致模型预测结果与实际排放情况存在偏差;模型预测企业排放Pb的沉降过程中,Pb的化学反应与迁移转化等未被考虑在内,导致模型预测结果具有不确定性;美国EPA没有正式发布Pb的致癌斜率因子,本文引用其他研究的致癌斜率因子,存在不确定性;由于土壤监测点未覆盖厂区内污染物沉降的高值区域,模型验证仅限于厂区外中低沉降水平区域,因此,可能导致对高暴露区域的健康风险低估,具有一定的不确定性,高污染区预测能力需进一步验证.

中国知网 https://www.cnki.net

4　结论(Conclusions)

1)CALPUFF模拟Pb以烟尘的形式扩散,在地形和气象的共同作用下,铅锌冶炼企业排放的Pb在土壤中的沉降趋势与全年主导风向一致,沉降高值区主要集中在厂区内及四周,Pb的沉降范围呈南北分布.

2)研究对比模拟值与监测值相关性为0.45,表明基于数值模型CALPUFF模拟的土壤Pb干湿沉降布点方法对于铅锌冶炼企业初步可行.

3)对土壤监测点的Pb进行健康风险分析,结果表明,儿童和成人的人体非致癌风险总和HI均在美国环保署的安全限值范围内,该企业周边土壤Pb的非致癌健康风险可接受,但经口摄入的致癌风险超过了可接受水平.

参考文献(References):

伯鑫, 丁峰, 徐鹤, 等. 2009. 大气扩散CALPUFF模型技术综述[J]. 环境监测管理与技术, 21(3):9-13+47

伯鑫, 梁鹏, 李时蓓, 等. 2018. 基于高分辨率土地利用数据的AERSURFACE集成系统[P]. 北京市:CN201510612622.4

伯鑫, 王刚, 温柔, 等. 2015a. 京津冀地区火电企业的大气污染影响[J]. 中国环境科学, 35(2):364-373

伯鑫, 王刚, 田军, 等. 2015b. AERMOD模型地表参数标准化集成系统研究[J]. 中国环境科学, 35(9):2570-2575

陈科, 宋娇, 徐德江, 等. 2023. 雅西某铅锌冶炼企业周边土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 山东化工, 52(3):226-229

陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 2019. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 38(10):2219-2238

Dileepa A, Albert L J. 2023. Contributions of contamination sources to soil lead concentrations of a smelter-affected community in South Australia, Australia[J]. Environmental Advances, 13:100434

封雪, 张峥, 孙东越, 等. 2025. 冶炼厂周边土壤重金属监测布点以及健康评估方法和系统[P]. 北京市:CN202411650813.5

韩科, 李亚轲, 翟丽, 等. 2023. 铅锌冶炼场地不同功能区土壤重金属污染及迁移特征[J]. 有色金属(冶炼部分), (1):57-64

Huang J, Wu Y, Sun J, *et al*. 2021a. Health risk assessment of heavy metal (loid) s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with Positive matrix factorization model[J]. Journal of Hazardous Materials, 415:125629

Huang L, Liu S, Yang Z Y, *et al*. 2021b. Exploring deep learning for air pollutant emission estimation [J]. Geoscientific Model Development, 14:4641-4654

Jin C W, Zheng S J, He Y F, *et al*. 2005. Lead contamination in tea garden soils and factors affecting its bioavailability[J]. Chemosphere, 59(8):1151-1159

金丹. 2016. 沈阳市室内灰尘重金属暴露的人体健康风险评价[D]. 沈阳:沈阳大学

Jin H, Chu X L, Xing Y T, *et al*. 2024. Driving factors for distribution and transformation of heavy metals speciation in a zinc smelting site[J]. Journal of Hazardous Materials, 471:134413

Li Y T, Huang X H, Zhao G Y. 2021. Joint local and global information learning with single apex frame detection for micro-expression recognition[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 30:249-263

Liu J, Yang L, Li H, *et al*. 2024. Retrieval-augmented diffusion models for time series forecasting[J]. Computer Science, DOI: 10.48550/arXiv.2410.18712

陆泗进, 王业耀, 何立环. 2015. 湖南省某冶炼厂周边农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 中国环境监测, 31(3):77-83

罗旭, 杨林, 申小歌, 等. 2024. 重庆市铜梁区菜地土壤重金属污染现状、源解析及健康风险评估[J]. 环境科学, 1-13, DOI: 10.13227/j.hjkx.202407282

Ma W, Tai L, Qiao Z, *et al*. 2018. Contamination source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil around municipal solid waste incinerator: A case study in North China[J]. Science of the Total Environment, 631:348-357

Peng H, Chen Y L, Weng L P, *et al*. 2019. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: A review[J]. Science of the Total Environment, 660:776-786

Qu M K, Guang X, Wu S J, *et al*. 2024. Determining the net input fluxes of pollutants based on the spatial source apportionment receptor model for early warning of regional soil pollution[J]. Journal of Hazardous Materials, 471:134409

Scire J S, Robe F, Fernau M, *et al*. 2000a. A user's guide for the CALMET meteorological model(Version 5)[Z]. Concord, MA: Earth Tech Inc. 37

Scire J S, Strimaitis D G, Yamartino R J. 2000b. A user's guide for the CALMET dispersion model (Version 5)[Z]. Concord, MA: Earth Tech. 1-332

单皖粤, 梁玉函, 王刚, 等. 2024. 核泄漏大气扩散与环境风险模拟:以山东半岛为例[J]. 环境科学学报, 44(6): 292-299

Shen F, Liao R, Ali A, *et al*. 2017. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soil near a Pb/Zn smelter in Feng County, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 139:254-262

史梦雪, 伯鑫, 田飞, 等. 2020. 基于不同空气质量模型的二噁英沉降效果研究[J]. 中国环境科学, 40(1):24-30

中国知网　https://www.cnki.net

孙博飞, 伯鑫, 张尚宣, 等. 2017. 钢厂烧结机烟气排放对土壤二噁英浓度的影响[J]. 中国环境科学, 37(11):4222-4229

Tang Q Q, Liu Y G, Cheng Y, *et al*. 2021. Areview: Researchpro-gress on microplastic pollutants in aquatic environments[J]. Science of the Total Environment, 766:142572

田飞, 伯鑫, 薛晓达, 等. 2019. 基于复杂地形-气象场的二噁英污染物沉降研究[J]. 中国环境科学, 39(4):1678-1686

Wang F F, Guan Q Y, Tian J, *et al*. 2020. Contamination characteristics, source apportionment, and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil in the Hexi Corridor[J]. CATENA, 191:104573

王海根, 王庆同, 杨鹏, 等. 2024. 莱州湾南岸不同土地利用类型土壤重金属分布特征、污染评价和源解析[J]. 环境科学, 45(12):7196-7208

王霄雯. 2019. 沈阳经济区典型城市街道灰尘重金属形态分析及污染特征研究[D]. 抚顺:辽宁石油化工大学

Wu T, Gao X, An F, *et al*. 2024. Predicting multiple observations in complex systems through low-dimensional embeddings[J]. Nature Communications, 15:2242

徐庆利, 肖晨威, 李跃, 等. 2022. 典型金属冶炼城市降尘中重金属污染特征及风险评价[J]. 中国环境监测, 38(6):133-143

许青阳, 肖凯琦, 张俊, 等. 2024. 土壤-猕猴桃系统重金属污染研究及猕猴桃健康风险评估[J]. 环境化学, 43(12):4157-4166

杨春, 侯艳军, 等. 2016. 新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价[J]. 环境科学, 37(7):2453-2461

杨景朝, 伯鑫, 田军, 等. 2018. WRF四维同化数据在空气质量法规模型CALPUFF的应用研究[J]. 环境工程, 36(7):165-169

杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 等. 2023. WRF模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用[J]. 环境科学, 44(1):104-117

Yim S H L, Fung J C H, Lau A K H. 2010. Use of high-resolution MM5/CALMET/CALPUFF system: SO_2 apportionment to air quality in Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 44:4850-4858

杨馨, 张坤明, 陈涛. 2025. 基于机器学习预测膨润土中阳离子的分配系数[J]. 核技术, 48(6):167-175

曾蛟, 孔令号, 刘淑亮, 等. 2024. 山东省某典型工业城镇土壤重金属污染特征及风险评估[J]. 物探与化探, (4):1-19

曾嘉庆. 2023. 铅锌冶炼场地污染精细刻画与阻控分析[D]. 长沙: 中南大学

张传华, 张凤太, 刘力, 等. 2024. 地质高背景区耕地土壤污染风险综合评价及安全分区[J]. 中国土壤与肥料, (10):52-59

周小勇, 雷梅, 杨军, 等. 2013. 某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响[J]. 环境科学, 34(9):3675-3678

中国知网 https://www.cnki.net