网络首发时间：2026-06-26 10:21:34　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.1843.X.20260625.1709.005

第 XX 卷第 XX 期　环 境 科 学 学 报　Vol.XX,No.XX
XXXX 年 XX 月　Acta Scientiae Circumstantiae　XX, XXXX

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2026.0234
徐鑫,张峥,马子昂, 等.XXXX.城市尺度钢铁行业重金属气-土跨介质输送与潜在累积影响模拟——以河北省武安市为例[J].环境科学学报, XX(XX):1-9
XU Xin,ZHANG Zheng,MA Ziang,*et al*.XXXX.Urban-scale simulation of atmospheric-soil cross-media transport and potential cumulative impacts of heavy metals from the iron and steel industry: A case study of Wu'an City, Hebei Province, China[J].Acta Scientiae Circumstantiae,XX(XX):1-9

城市尺度钢铁行业重金属气-土跨介质输送与潜在累积影响模拟——以河北省武安市为例

徐鑫[1,2],张峥[1,2],马子昂[1,2],隋欣欣[1,2],赵梓萌[1,2],张英磊[1,2,*],伯鑫[1,2,*]

1. 北京化工大学环境科学与工程系,北京 100029
2. 北京化工大学北化中国工业碳中和研究院,北京 100029

摘要:在钢铁产业集聚背景下,重金属通过大气排放向环境迁移并在土壤中持续累积,其空间分布特征及长期影响对区域环境风险识别具有重要意义.本研究以河北省武安市典型钢铁城市为例,利用CALPUFF模型对钢铁产业集聚区重金属在城市尺度上的气-土跨介质输送、扩散与沉降进行系统模拟与分析,从而识别土壤重金属潜在相对累积沉降负荷空间分布格局及高值区域.结果表明,土壤重金属年均潜在沉降通量范围为3.1756×10^{-1}~4.4880×10^{2} ng·m^{-2}·s^{-1},年均潜在沉降通量高值区集中于企业周边并随距离衰减.考虑钢铁企业运营时间后,研究区域土壤重金属潜在相对累积沉降负荷的高值区仍主要分布于钢铁企业密集布局区域及邻近范围,其空间分布格局受风场主导方向与地形起伏特征的共同影响.研究结果明确了武安市土壤环境管理的优先防控关注区域,可为城市尺度下土壤重金属采样点位布设及监测方案优化提供技术支撑与决策参考.

关键词:钢铁行业;CALPUFF;重金属;跨介质;潜在相对累积沉降负荷

文章编号:0253-2468(XXXX)XX-0001-09　**中图分类号**:X51　**文献标识码**:A

Urban-scale simulation of atmospheric-soil cross-media transport and potential cumulative impacts of heavy metals from the iron and steel industry: A case study of Wu'an City, Hebei Province, China

XU Xin[1,2], ZHANG Zheng[1,2], MA Zi'ang[1,2], SUI Xinxin[1,2], ZHAO Zimeng[1,2], ZHANG Yinglei[1,2,*], BO Xin[1,2,*]

1. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029
2. BUCT Institute for Carbon-neutrality of Chinese Industries, Beijing 100029

Abstract: Under conditions of iron and steel industry clustering, heavy metals are released into the environment through atmospheric emissions and progressively accumulate in soils. Their spatial distribution characteristics and long-term effects are critically important for regional environmental risk assessment. In this study, Wu'an City, Hebei Province, a representative steel-producing city, was selected as a case study. The CALPUFF model was employed to comprehensively simulate and examine the atmospheric transport, dispersion, and deposition behavior of heavy metals across the air - soil interface at the urban scale, thereby revealing the spatial patterns and high-value zones of potential relative cumulative deposition loads of soil heavy metals. The results showed that the annual potential deposition flux of soil heavy metals ranged from 0.31756 to 448.80 ng·m^{-2}·s^{-1}, with high-value zones primarily located near industrial enterprises and gradually decreasing with increasing distance. When the operational duration of the iron and steel enterprises was considered, the high-value zones of potential relative cumulative deposition load remained mainly concentrated in areas with dense iron and steel enterprises and adjacent regions. The spatial distribution pattern was jointly influenced by the dominant wind direction and topographic variations. These results delineate priority regions for soil environmental management in Wu'an and provide technical support and decision-making guidance for improving soil heavy metal sampling design and monitoring strategies at the urban scale.

Keywords: iron and steel industry; CALPUFF; heavy metals; cross-media; potential relative cumulative deposition load

收稿日期:2026-04-02　**修回日期**:2026-05-24　**录用日期**:2026-05-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(No.72174125)
作者简介: 徐鑫(1998—),女, E-mail: xuxin04210202@163.com; * **责任作者**,E-mail: 2024320021@buct.edu.cn;boxin@buct.edu.cn

1 引言（Introduction）

钢铁行业作为资源和能源高密集型产业，是我国大气污染物和重金属排放的重点行业之一.其生产过程中排放的颗粒物及伴生重金属具有来源复杂、排放环节多、空间分布不均匀等特征（Zhang *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2025）.在区域尺度上，钢铁企业集聚分布往往叠加复杂地形和多变气象条件，使污染物的输送、扩散与沉降过程呈现显著的非稳态性和空间异质性（Xu *et al.*, 2025），进而对周边土壤环境和生态安全构成潜在威胁.

近年来，围绕钢铁行业大气污染物扩散、沉降及环境效应的研究已逐步开展，并在模型应用与污染影响识别方面取得了重要进展.已有研究主要聚焦于以下两个方面.其一，针对单一企业或典型工序开展污染扩散与沉降模拟.例如，孙博飞等（2017）基于河北省某钢铁企业烧结机头二噁英排放监测数据及周边土壤监测资料，构建了基于CALPUFF模式的二噁英类污染物扩散与沉降计算方法，并验证了模型在钢铁企业沉降影响研究中的适用性.其二，基于空气质量模型评估钢铁行业对区域空气质量的贡献.例如，伯鑫等（2017）基于京津冀钢铁行业高分辨率排放清单及淘汰产能设备信息，采用CAMx模型模拟分析了现状和化解产能情景下钢铁行业大气污染物对区域空气质量的贡献情况；陈雷等（2021）基于AERMOD模型评估了疫情管控与解封情景下某钢铁企业排放对周边空气质量的影响，并通过实测数据进行了验证；郑阿猛等（2024）以典型钢铁企业为对象，量化评估了烧结机及全流程超低排放改造对区域空气质量的改善效果.上述研究为钢铁行业污染排放特征及环境影响提供了重要基础，但针对钢铁产业高度集聚区的城市尺度研究仍存在进一步拓展空间.具体表现为：①研究尺度方面，已有研究多聚焦于单一企业或工序的模拟研究，对城市尺度下多企业集聚排放条件下的污染模拟研究不足；②研究内容方面，现有研究多侧重空气质量变化，对污染物由大气向土壤迁移的气-土跨介质过程及其长期累积影响考虑相对有限；③管理应用方面，现有成果多停留于浓度贡献识别或情景比较层面，缺乏服务于城市环境管理参考范围的空间化成果.

针对上述问题，本研究以河北省武安市这一典型钢铁产业聚集城市为研究对象，基于CALPUFF模型对钢铁产业集聚区多源排放条件下重金属在城市尺度上的输送、扩散与沉降进行模拟与分析，并进一步评估其潜在累积环境影响.在此基础上，构建土壤重金属潜在累积影响分布图，以期为钢铁城市环境管理范围划定及风险防控提供科学依据.本文的创新点与研究贡献主要体现在以下两个方面：①构建面向钢铁产业集聚区的城市尺度多企业重金属由大气向土壤迁移的气-土跨介质模拟框架，实现对多源叠加条件下气-土跨介质迁移及其潜在累积影响的表征；②构建城市尺度土壤重金属潜在相对累积沉降负荷分布图，可为土壤采样布点优化、优先防控区域识别及环境监管提供技术支撑.

2 材料与方法（Materials and methods）

2.1 研究区域

本研究选取河北省邯郸市武安市这一钢铁产业聚集城市作为典型研究案例.武安市地处河北省西南部，太行山东麓，地势以山地和丘陵为主，海拔多在1000 m以上（张赫等, 2021），地形起伏显著且结构复杂，四周群山环绕，中部局部形成武安盆地（张玉芳等, 2009），这种地形对区域气象条件及污染物输送与扩散过程具有显著调控作用，并在局地尺度上促进污染物的累积与滞留.产业结构方面，武安市以钢铁重工业为主导产业，钢铁企业高度集聚，产能规模大，工业排放强度高，是典型的钢铁产业集聚区.钢铁生产过程涉及高温冶炼、粉尘排放和伴生重金属释放，其排放源类型复杂，包括高烟囱排放、有组织工艺排放以及无组织散逸排放等.受地形、局地风场及气象条件影响，污染物在城市尺度上的输送和沉降呈现显著的非均匀性和空间异质性，易在盆地及低洼区域形成累积.与此同时，针对钢铁产业集聚区重金属在城市尺度上的累积环境影响，以及重金属沉降的空间分布格局及高影响区域的研究仍相对不足.因此，武安市不仅为分析钢铁产业聚集区重金属排放特征及累积环境影响提供了典型案例，也为明确钢铁城市环境风险防控的空间边界及重点管控区域提供了科学依据.

2.2　数据来源

本研究所采用的活动水平数据及企业空间位置信息主要来源于排污许可执行报告和环境影响评价报告等,研究对象涵盖武安市23家钢铁企业.为确保企业位置信息的准确性,本研究通过谷歌地球(Google Earth)位置识别以及人工目视检验,对企业经纬度信息进行逐个校核.

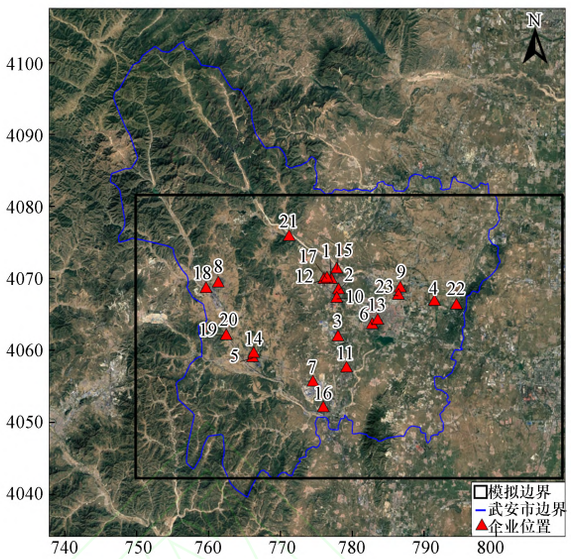


图1　模拟范围及企业分布示意图

Fig.1　Simulation domain and distribution of iron and steel enterprises

2.3　重金属替代参数设定

本研究中"总重金属"主要用于表征钢铁企业排放过程中随颗粒物释放的重金属总体潜在环境影响,并重点识别含重金属颗粒物的相对沉降潜势,从而刻画其在城市尺度上的相对空间分布格局及长期累积效应.经文献调研,由于不同重金属元素在粒径分布、化学形态、气粒分配及干湿沉降过程方面存在差异(倪刘建, 2006; 张国忠, 2015;郭忻跃, 2018; 李杰芹, 2024; 马文玉, 2024; 张瑞溪, 2024),在缺乏各元素环境行为参数的条件下,本研究采用颗粒物作为替代示踪物,用于表征含重金属从大气向土壤迁移的气-土跨介质过程与潜在沉降影响.该处理方法与已有研究中采用颗粒态污染物作为二噁英替代示踪物开展扩散模拟的思路相一致(史梦雪等, 2020).

在模型假设方面,本研究基于城市尺度模拟框架,假定钢铁行业排放的重金属主要赋存于颗粒物中,并随颗粒物经历大气扩散、输送及沉降过程,从而实现跨介质迁移模拟.在该假设下,颗粒物被作为重金属的统一替代载体,用于表征其空间迁移过程及相对沉降格局.已有研究表明,大气环境中工业源重金属普遍以颗粒态形式存在,并通过干湿沉降由大气向地表迁移(郭斌等, 2024);同时,大气沉降对土壤重金属输入的贡献比例可达58%~85%(Xia *et al.*, 2014;Peng *et al.*, 2019),表明其为重要外源输入途径.此外,约75%~90%的重金属富集于PM_{10}及更细粒径颗粒中,并随粒径减小呈增强趋势(Costa *et al.*, 1999; Xie *et al.*, 2002),进一步支持该假设的合理性.

基于上述认识,本研究采用颗粒物作为重金属替代示踪物,用于模拟其在城市尺度上的扩散与沉降过程,从而表征土壤重金属潜在相对累积沉降负荷.需要说明的是,该方法基于"颗粒态主导迁移"的关键假设,不同重金属元素在气粒分配比例、化学形态转化及沉降效率方面的差异未被明确刻画,因此在不同工序及不同元素之间仍存在一定不确定性与适用边界,该部分内容已在不确定性分析中进一步讨论.

2.4　排放量计算

本研究覆盖的生产工序包括焦化、烧结、球团、高炉、转炉、电炉及轧钢等环节,基于CEMS系统监测数据建立武安市钢铁企业2024年总重金属排放清单(Bo *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2025).具体而言,基于质控后的CEMS数据及各排污节点的浓度(式(1)),结合对应工序的理论烟气量,计算武安市各钢铁企业不同工序的年均排放因子(式(2)).进一步结合各工序产品产量等活动水平数据,采用自下而上的方法核算武安市钢铁企业总重金属排放量(式(3)).

$$C_{\mathrm{AVG},i,m} = \sum_{h} C_{i,m,h} / \sum_{h} O_{ph} \tag{1}$$

$$F_{i,m} = C_{\mathrm{AVG},i,m} \times V_i \times 10^{-6} \tag{2}$$

$$E = \sum_{i}\sum_{m} A_i \times F_{i,m} \times 10^{-3} \tag{3}$$

式中,C_{AVG}为排放浓度统计均值($mg \cdot m^{-3}$);$C_{i,m,h}$为第h个运行小时排口m的实测浓度($mg \cdot m^{-3}$);O_{ph}为纳入分析的监测小时数;F为排放因子($g \cdot kg^{-1}$);V_i为工序i的理论烟气量($m^3 \cdot t^{-1}$);E为排放量($t \cdot a^{-1}$);A_i为工序i的产品产

量(t·a^{-1});i为不同生产工序;m为不同排口;h为运行时间.

本研究无组织排放的总重金属的排放量依据《排污许可技术规范申请与核发技术规范(钢铁工业)》(HJ846-2017)进行核算.采用排污系数法开展核算,即基于不同无组织排放单元对应的单位产品排放系数,并结合实际产品产量,核算实际排放量.具体而言,首先计算各无组织排放单元总重金属排放量(式(4)),再汇总得到钢铁企业无组织排放的总重金属的排放量(式(5)).

$$W_j = R_j \times G_j \times 10 \tag{4}$$

$$E_{\text{unorganized}} = \sum_{j=1}^{n} W_j \tag{5}$$

式中,W_j为第j个无组织排放单元总重金属实际排放量(t);R_j为第j个无组织排放单元对应的实际产品产量(万t);G_j为第j个无组织排放单元排污系数(kg·t^{-1});$E_{\text{unorganized}}$为钢铁企业无组织排放的总重金属的实际排放总量(t);n为无组织排放单元数量.

2.5 模型构建

2.5.1 排放源参数化与模型输入构建 在模型构建中,有组织排放源依据企业主要生产工序对应的烟囱进行点源化处理;无组织排放源则依据各企业厂区空间范围进行面源分配与表征,以反映其在厂区尺度上的扩散特征与空间异质性.具体而言,有组织排放源采用点源形式输入模型,并结合排口实际位置的经纬度坐标、烟囱高度、高程信息、烟囱直径、出口温度和烟气流速等参数进行详细设定.无组织排放源则依据实际生产工艺特征与物料逸散方式,采用面源形式进行刻画.

2.5.2 CALPUFF模型参数设置 本研究选用CALPUFF扩散模式和WRF气象模式(ARW3.2.1版本).其中,CALPUFF模式系统是用于模拟污染物输送、转化的法规模式(伯鑫, 2016; Chen *et al.*, 2016; 伯鑫等, 2020),也是美国环保署与中国生态环境部推荐的广泛应用于研究城市乃至区域尺度上污染物扩散规律的法规模式之一(伯鑫等, 2015;阚慧等, 2019; 田飞等, 2019;崔建升等, 2020;张峥等, 2025).模式为非稳态三维拉格朗日烟团模式,结合时空变化的气象场条件,考虑了复杂地形动力学效应以及静风等非稳态条件.

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,WRF模拟采用的模拟参数如表1所示.气象背景场和初始条件来自NCEP提供的FNL(Final Operational Global Analysis)数据,数据水平分辨率为1°×1°,时间间隔为6 h,垂直方向1000~10 mb间有34个标准等压层,数据参数内容包括地面气压、海平面压力、位势高度、温度、土壤值、相对湿度、风场、涡度等(杨景朝等, 2018;王昭桐, 2025).区域地形数据精度为90 m,来自美国地质勘探局(United States Geological Survey);土地利用类型数据精度为30 m,来自于本团队先前的研究成果(王成鑫等, 2022).

表1 WRF模拟参数汇总表

Table 1 Summary of WRF simulation parameters

参数	设置
投影方式	Lambert投影
标准纬线	25°N和47°N
边界条件	FNL数据
微物理过程	WSM 3-class simple ice scheme
长波辐射方案	RRTM方案
短波辐射方案	Dudhia方案
地表物理方案	Monin-Obukhov方案
陆地表面物理方案	热量扩散方案
边界层物理方案	YSU方案

综合考虑研究区域尺度、污染源空间分布特征及计算资源约束,并参考环境影响评价相关研究与工程应用中的常用参数设置,最终确定采用500 m作为模拟网格分辨率(伯鑫, 2016).本研究模拟区域网格分辨率为500 m,网格设置为东西向120个格点,南北向80个格点(图1).在CALPUFF模式中,以颗粒物作为总重金属的替代示踪物,并考虑干沉降和湿沉降过程,其控制文件参数设置见表2.

2.6 土壤重金属潜在相对累积沉降负荷计算

由于研究区域历史时期相关排污许可执行报告、环境影响评价报告等基础资料难以系统获取,从而难以构建长期连续的企业级排放清单,本研究基于2024年企业级排放清单开展模拟研究,并将其模拟结果作为基准,结合各钢铁企业实际运营年限计算土壤重金属潜在相对累积沉降负荷.因此,该方法本质上是并非基于逐年真实排放与气象条件重建所得的绝对累积沉降结果,而是在数据可得性约束下,对土壤重金属潜在相对累积沉降负荷进行表征.然而,武安市钢铁企业在不同发展阶段,其企业数量、生产规模、工艺水平、

排放标准及超低排放改造进程等均发生显著变化.在此背景下,若采用恒定排放假设,即以2024年模拟结果与各钢铁企业实际运营年限进行线性推算,可能导致历史累积沉降结果产生一定程度的高估或低估.相关不确定分析详见3.4小节.

在计算方法上,以模型输出的土壤重金属单位面积年均潜在沉降通量为基础,结合企业运营年限,构建土壤重金属潜在相对累积沉降负荷指标.具体而言,研究区域内第p个网格单元在时期t的土壤重金属潜在相对累积沉降负荷计算公式见式(6).

表2　CALPUFF控制文件参数设置表

Table 2　Parameter settings for the CALPUFF control file

CALPUIFF运行选项	设置
基准时区	东八区(北京时间)
运行时间	2024年1月1日—2024年12月31日
化学转化方法	不考虑化学转化模块
沉降选项	干沉降和湿沉降
气象数据格式	CALMET二进制文件
计算X方向上网格点	(1,120)
计算Y方向上网格点	(1,80)
接受点	网格点
模型输出	污染物浓度、干沉降通量及湿沉降通量

$$L_{p,t} = \sum_{q=1}^{n} D_{p,q} \times Y_{q,t} \times T \times 10^{-6} \tag{6}$$

式中,$L_{p,t}$为第p个网格单元在时期t的土壤重金属潜在相对累积沉降负荷(mg·m^{-2});$D_{p,q}$为企业q对网格单元p的年均沉降通量(ng·m^{-2}·s^{-1});$Y_{q,,t}$为企业q在时期t内的累计运营年数(a);T为时间换算因子,表示一年对应的秒数(s·a^{-1});n为研究区域内纳入统计的企业总数.

研究区域内土壤重金属潜在相对累积沉降负荷的计算公式为式(7).

$$L_t^{\text{total}} = \sum_{p=1}^{z} L_{p,t} \times S_p \tag{7}$$

式中,L_t^{total}为研究区域在时期t的土壤重金属潜在相对累积沉降负荷(mg);S_p为第p个网格单元面积(m^2);z为网格总数.

3　结果与讨论 (Results and discussion)

3.1　土壤重金属年均潜在沉降通量空间分布特征

如图2所示,研究区域内土壤重金属年均潜在沉降通量范围为3.1756×10^{-1}~4.4880×10^2 ng·m^{-2}·s^{-1},整体呈现出显著的空间非均匀分布特征.从空间分布格局看,土壤重金属年均潜在沉降通量高值区主要集中分布于钢铁企业周边区域,且随着与排放源距离的增加,沉降通量呈现明显的衰减趋势.这一特征表明,在不考虑企业实际运营时间差异的情况下,重金属沉降过程仍以近源沉降为主,企业排放源对周边区域土壤环境的潜在影响最为显著.

此外,不同钢铁企业周边土壤重金属年均潜在沉降通量水平存在明显差异,反映了企业排放强度、排放源类型及局地扩散条件的综合作用(Xu *et al.*, 2025).受复杂地形与气象条件影响(图4和图5),部分沉降高值区在空间上呈现出一定程度的偏移,显示出污染物输送过程的非对称性.这一结果从区域尺度揭示了钢铁企业集聚排放条件下重金属沉降的基本空间格局,为后续土壤重金属潜在相对累积沉降负荷分析提供了基础参照.

3.2　考虑企业运营时间的土壤重金属潜在相对累积沉降特征

如图3所示,在土壤重金属单位面积年均潜在沉降通量的基础上,进一步引入企业实际运营时间,对土壤重金属潜在相对累积沉降负荷进行了分析.按照研究区域内钢铁企业最早投产时间(1972年)计算,截至2024年,研究区域重金属的累积沉降时间为52年.本研究基于CALPUFF模型对研究区域重金属沉降过程进行模拟,按每13年为一个时间阶段,分别构建1985年、1998年、2011年和2024年4个时期研究区域的土壤重金属潜在相对累积沉降负荷分布图(图3).结果表明,1985年研究区域土壤重金属潜在相对累积沉降负荷范围为2.3678×10^3~7.3685×10^3 mg·m^{-2},而到2024年,该范围增至1.8354×10^2~2.7576×10^5 mg·m^{-2}.总体来看,随着累积时间的延长,研究区域土壤重金属潜在相对累积负荷呈持续增加趋势,同时高值区范围显著扩大,表明其空间影响程度不断增强.

从空间格局上看,研究区域的土壤重金属潜在相对累积沉降负荷的高值区仍主要分布于钢铁企业密集

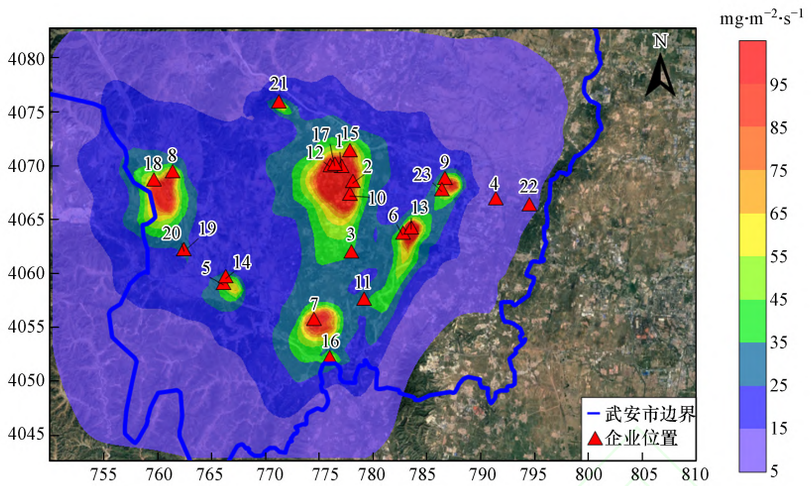


图 2 典型钢铁城市土壤重金属年均潜在沉降通量分布图

Fig.2 Spatial distribution of annual potential deposition flux of soil heavy metals in a typical steelmaking city

布局区域及周边范围，表明企业排放强度及空间集聚特征是影响累积沉降格局形成的关键因素．进一步分析发现，不同钢铁企业排放规模差异显著，区域排放总量呈现明显的不均衡分布特征．其中，序号为 12、7、13 和 18 的企业无组织排放量分别为 8707.15、4415.28、4282.05 和 4152.98 $t \cdot a^{-1}$，对应占比分别为 25.15%、12.76%、12.37% 和 12.00%，合计贡献了超过 60% 的无组织排放总量，是驱动局地土壤重金属潜在相对累积沉降负荷高值区形成的重要排放来源（图 3c）．就有组织排放而言，序号为 12、14 和 15 的有组织排放占比均超过 10%，是区域有组织排放的主要来源．此外，序号 4、6、20 和 23 企业有组织与无组织排放量均为 0，其原因为在统计期内处于停产状态或未开展实际生产活动；序号 19 企业仅存在有组织排放（0.27 $t \cdot a^{-1}$），无组织排放为 0，表明其无组织排放环节得到有效控制．除高排放企业的主导作用外，部分排放强度较低的企业同样分布于高值区范围内，表明局地沉降负荷的空间分布不仅受企业排放规模控制，还受到企业区位条件、邻近源叠加效应以及污染物输送与扩散过程等多重因素的共同影响．

上述结果说明，不同企业在生产运行状态、排放规模及排放类型构成方面存在显著差异，并在企业空间布局、排放叠加效应及地形与风场输送扩散等多重因素共同作用下，形成了研究区域土壤重金属潜在相对累积沉降负荷的空间分异特征．相较于仅基于年均潜在沉降通量的评估结果，纳入企业运营时间的土壤重金属潜在相对累积沉降负荷分析更能反映钢铁产业集聚区长期排放背景下的环境影响水平，可为后续土壤采样布点优化、优先防控区域识别及环境监管提供技术支撑．

3.3 模型验证

由于缺乏重金属沉降通量的长期监测数据及系统布设的土壤重金属监测点位数据，本研究主要通过相对空间分布格局一致性对模拟结果进行间接验证．选取距离研究区域最近的地面气象站（站号：53892）的 2014—2024 年逐年气象数据，利用 Origin2025 软件绘制风玫瑰图（图 4a）．结果表明研究区主导风向为北风，结合模拟得到的土壤重金属潜在累积沉降空间分布特征可知，高值区在主导风向下游方向呈现明显扩展趋势．此外，研究区整体地形呈西高东低格局，在地形高低转换的分界区域，受气流输运与地形抬升及汇聚作用影响，更易形成相对高值累积区（图 4b）．综合来看，风场结构与地形条件共同作用下形成的空间分布特征与模型模拟结果具有较好一致性，从而在一定程度上验证了模型的合理性．此外，本研究采用的 CALPUFF 模拟系统已在污染物扩散模拟相关的多个研究项目中得到应用与效果评估（孙博飞等，2017；伯鑫等，2018；田飞等，2019；史梦雪等，2020；张峥等，2025），并取得了较好的模拟结果，表明该系统能够较好地模拟污染物的迁移与沉积过程，具有良好的适用性和可靠性．

3.4 不确定性分析

本研究的不确定性主要体现在以下几个方面：首先，以颗粒物替代重金属作为示踪物所引入的元素环

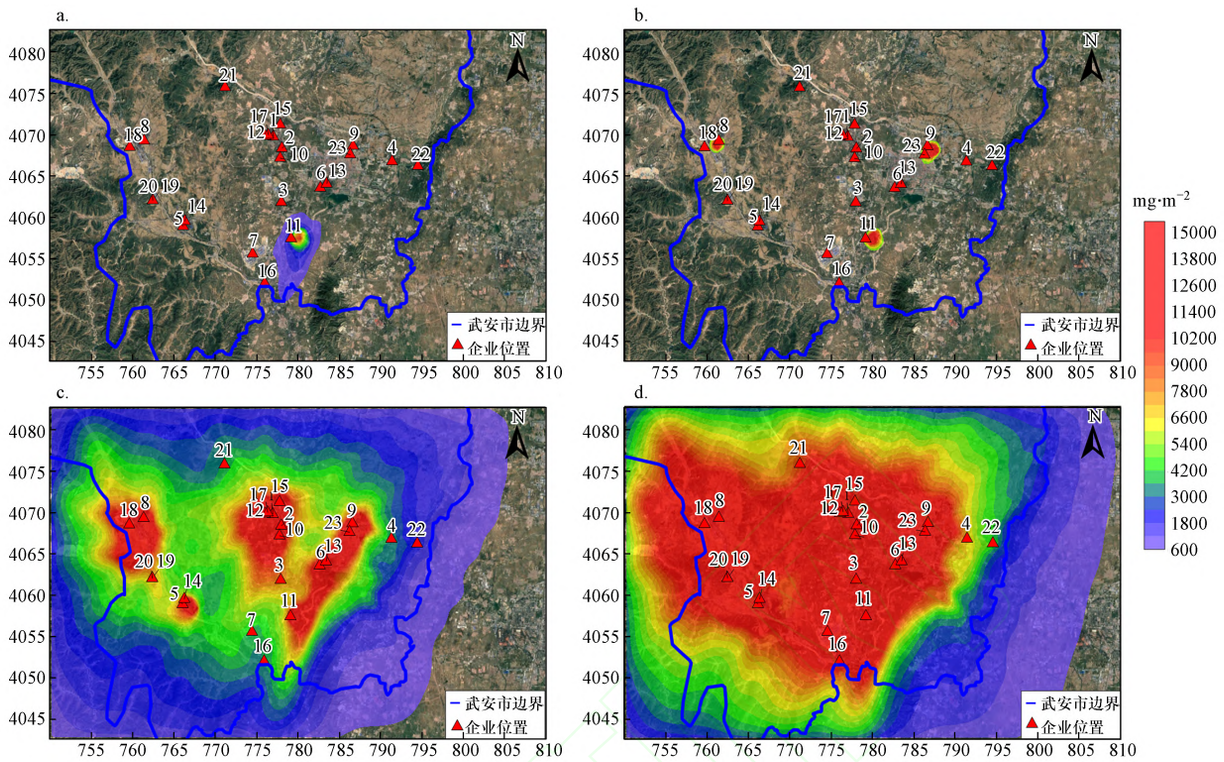


图 3　基于企业运营时间的典型钢铁城市土壤重金属潜在相对累积沉降负荷分布图(a.1985, b.1998, c.2011, d. 2024)

Fig.3　Spatial distribution of potential relative cumulative deposition load of soil heavy metals in a typical steelmaking city based on enterprise operating time (a.1985, b.1998, c.2011, d. 2024)

境行为差异被简化处理,同时模型参数也进行了简化设置,可能对模拟结果产生一定影响.其次,土壤重金属潜在相对累积沉降负荷的计算采用恒定排放假设,该方法未能充分刻画 1972—2024 年钢铁行业由粗放生产向清洁生产转型、由末端治理向全过程控制演进以及超低排放改造持续推进所带来的显著阶段性变化,也难以反映不同历史时期排放标准逐步收严及污染治理设施持续升级对排放强度与时空分布的动态影响,因此可能导致历史累积沉降结果存在一定程度的高估或低估,其结果更多表征长期潜在空间累积格局,而非逐年真实演化过程.此外,由于缺乏重金属沉降通量的长期监测数据及系统布设的土壤重金属监测点位数据,本研究主要基于相对空间分布格局一致性对模拟结果进行间接验证,因此验证结果仍具有一定局限性.未来研究可通过引入更多实测沉降通量与土壤重金属监测数据,并结合多时段动态排放信息对模型进行约束与校正,以进一步降低不确定性并提升研究结论的可靠性.

4　结论 (Conclusions)

1)研究区域内土壤重金属年均潜在沉降通量范围为 3.1756×10^{-1}~4.4880×10^{2} ng·m^{-2}·s^{-1}.土壤重金属年均潜在沉降通量高值区集中于企业周边并随距离衰减,反映出企业排放源对周边土壤重金属沉降水平具有显著影响,且其环境影响范围存在明显的空间梯度特征.

2)1985—2024 年,研究区域土壤重金属潜在相对累积沉降负荷由 2.3678~7.3685×10^{3} mg·m^{-2} 增加至 1.8354×10^{2}~2.7576×10^{5} mg·m^{-2}.土壤重金属潜在相对累积沉降负荷的高值区仍主要分布于钢铁企业密集布局区域及邻近地带,表明企业排放强度及空间集聚格局是塑造土壤重金属潜在相对累积沉降负荷分布特征的核心驱动因素.

3)综合风场主导方向与地形起伏特征分析结果表明,模拟得到的土壤重金属潜在相对累积沉降负荷空间分布与气象条件及地形控制下的扩散规律具有较好一致性,从而在一定程度上验证了模型结果的合理性.

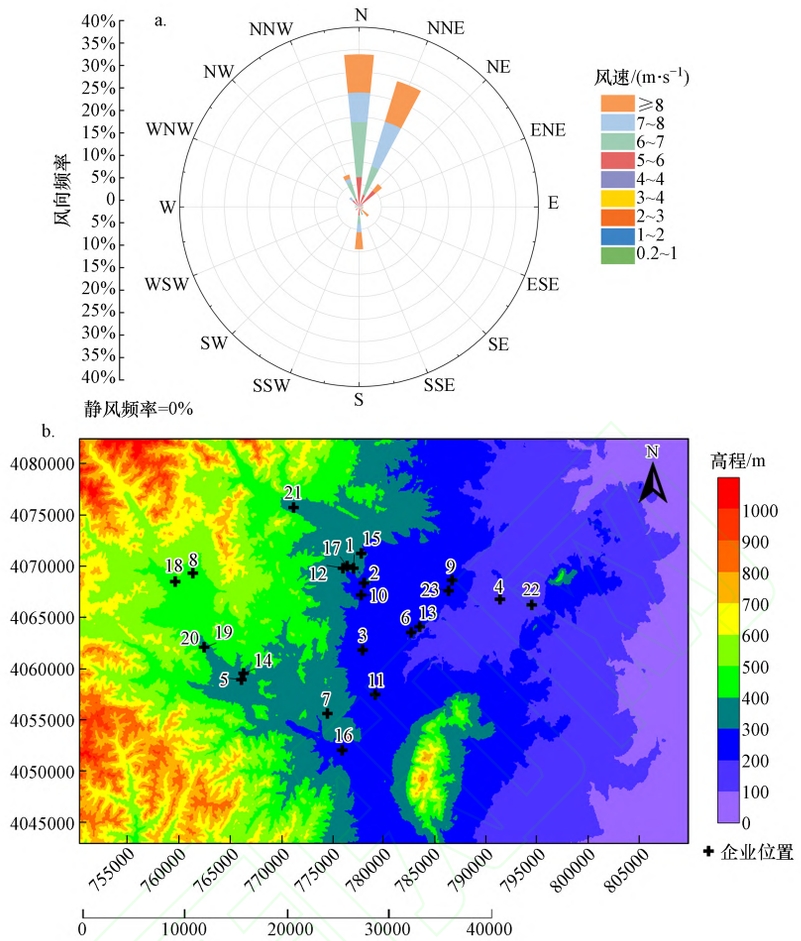


图 4 研究区域风玫瑰图(a)及模拟范围高程图(b)

Fig.4 Wind rose map of study area(a) and topographic map of the simulation domain elevation(b)

责任作者简介:张英磊,男,工学硕士,高级工程师,长期从事大气污染防治、环境大数据、智慧环保方面工作,累计发表科技论文20余篇,获授权发明专利6项,先后参与科技项目5项,包括国家重大研发计划,国家大气联合攻关、北京市科委重点研发计划等.伯鑫,男,博士,教授,博士生导师,研究领域为环境质量模拟,主持和参加科研项目等50余项,发表学术论文100多篇.

参考文献(References):

伯鑫. 2016. CALPUFF模型技术方法与应用[M]. 北京: 中国环境出版社

Bo X, Jia M, Xue X, *et al*. 2021. Effect of strengthened standards on Chinese ironmaking and steelmaking emissions[J]. Nature Sustainability, 4(9): 811-820

伯鑫, 屈加豹, 雷勋杰, 等. 2018. 唐山市重点行业的大气污染影响[C]//中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷). 中国环境科学学会, 2018:10

伯鑫, 王刚, 温柔, 等. 2015. 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

伯鑫, 徐峻, 杜晓惠, 等. 2017. 京津冀地区钢铁企业大气污染影响评估[J]. 中国环境科学, 37(5):1684-1692

伯鑫, 杨朝旭, 贾瑜玲, 等. 2020. 西南典型区域焚烧厂排放二噁英类污染物环境影响研究[M]. 北京: 中国环境出版社

崔建升, 雷团团, 伯鑫, 等. 2020. 海南省大气污染源排放清单及环境影响研究[J]. 环境污染与防治, 42(6):651

陈雷, 王鹏, 伯鑫, 等. 2021. 新冠期间河北省典型钢铁企业大气污染影响[J]. 中国环境科学, 41(8):3927-3933

Chen Y, Meng Y, Cao H. 2016. Simulation of Spatial Distributions of Atmospheric Heavy Metals in Xinzhuang and Assessment of Their Health Risks [C]//7th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC-2016). Atlantis Press, 464-469

Costa D L, Dreher K L. 1999. What do we need to know about airborne particles to make effective risk management decisions? A toxicology perspective[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 5(3):481-491

郭斌, 杨贵芳, 刘强. 2024. 南京沿江地区大气干湿沉降对农用地土壤重金属含量的影响[J]. 地质学刊, 48(1):85-91

郭忻跃. 2018. 北京大气干沉降及$PM_{2.5}$中重金属和有机物污染及来源研究[D]. 北京:北京科技大学

阚慧, 伯鑫, 屈加豹, 等. 2019. 2015年海南省火电行业大气环境影响研究[J]. 中国环境科学, 39(1):428

李杰芹. 2024. 典型矿区与工业园区周边大气沉降重金属时空分布特征及来源分析[D]. 重庆:西南大学

马文玉. 2024. 京津冀大气重金属沉降时空特征及风险分析[D]. 焦作:河南理工大学

倪刘建. 2006. 南京市不同功能区大气降尘性质及其对土壤影响的研究[D]. 南京:南京农业大学

Peng H, Chen Y, Weng L, *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

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

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

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

王成鑫, 楚英豪, 阮建辉, 等. 2022. AERMOD模型地表参数更新对模拟效果影响[J]. 中国环境科学, 42(5):2070

王昭桐. 2025. 臭氧和大气细颗粒物局地尺度模型应用研究[D]. 北京:北京化工大学

Xia X, Yang Z, Cui Y, *et al*. 2014. Soil heavy metal concentrations and their typical input and output fluxes on the southern Song-nen Plain, Heilongjiang Province, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 139:85-96

Xie H L, Zhang P, He H, *et al*. 2002. Distribution of heavy metal elements in the different diametral atmospheric particulate matters[J]. Environmental Engineering, 20(6):55-57

Xu X, Ma Z, Zhang Z, *et al*. 2025. Substantial emission reductions from Chinese iron-and steelmaking after the introduction of ultralow emission standards during the prepandemic and midpandemic periods[J]. ACS ES&T Air, 2(11):2550-2565

Xu X, Zhang Z, Wang P, *et al*. 2025. Integrated model for heavy metal source tracing and multi-factor quantification, with risk assessment: A case study of a typical mega iron and steel enterprise in China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 305:119180

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

Yang J, Tian H, Fu Z, *et al*. 2025. Historical inventories and future scenarios of multiple hazardous air pollutants (HAPs) emissions from the iron and steel production industry in China[J]. Science of the Total Environment, 958:178051

张国忠. 2015. 华北地区大气干湿沉降及其对农田土壤的影响研究[D]. 兰州:甘肃农业大学

张赫, 胡佳慧, 王睿, 等. 2021. 面向国土空间规划的县域规划建设低碳评价方法研究——以河北省武安市为例[J]. 西部人居环境学刊, 36(6):23-30

Zhang J, Shen H, Chen Y, *et al*. 2023. Iron and steel industry emissions: a global analysis of trends and drivers[J]. Environmental Science & Technology, 57(43):16477-16488

张瑞溪. 2024. 不同工业园区周边大气沉降重金属时空分布特征及来源解析[D]. 重庆:西南大学

张玉芳, 邢天河. 2009. 县域村庄空间布局优化的探索和实践——以河北省武安市域村庄空间布局规划为例[J]. 城市规划, 33(11):88-92

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

郑阿猛, 朱云, 张志诚, 等. 2024. 钢铁厂超低排放改造减污降碳及空气质量影响研究[J]. 环境科学学报, 44(4):263-276