

皖北某市环境空气颗粒物中重金属元素分布特征及风险评价

卢家帅, 闵 宁*, 李俊豪, 李 恒

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2026年5月26日; 录用日期: 2026年6月23日; 发布日期: 2026年7月16日

摘 要

为探究皖北某市空气颗粒物中重金属的分布特征及潜在健康风险, 本研究以皖北某市城区和郊区为研究对象, 于2025年秋采集大气颗粒物样品, 经研磨、消解、定容后, 用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定V、Mn、Ni、Cu、As、Pb等重金属元素含量。分析结果表明: 大气颗粒物中重金属含量均低于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)限值, 空间分布上呈现郊区Mn、Pb、含量高于城区, 城区Cu含量高于郊区的特征; 健康风险评估显示, 致癌重金属As、Ni的致癌风险值(R)均低于 10^{-6} , 非致癌重金属Pb、Mn、Cu的风险(HQ)均低于1, 均处于可接受健康风险范围。本研究可为研究地大气重金属污染防控提供科学依据, 也可同类区域相关研究提供参考。

关键词

大气颗粒物, 重金属, 分布特征, 健康风险评估

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Elements in Particulate Matter in Ambient Air of a City in Northern Anhui Province

Jiashuai Lu, Ning Min*, Junhao Li, Heng Li

School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: May 26, 2026; accepted: June 23, 2026; published: July 16, 2026

*通讯作者。

文章引用: 卢家帅, 闵宁, 李俊豪, 李恒. 皖北某市环境空气颗粒物中重金属元素分布特征及风险评价[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(7): 1192-1200. DOI: 10.12677/aep.2026.167121

Abstract

To investigate the distribution characteristics and potential health risks of heavy metals in air particulate matter in a city in northern Anhui. This study selected urban and suburban areas of the city as the study sites. Atmospheric particulate matter samples were collected in the autumn of 2025. After grinding, digestion, and constant-volume preparation, the concentrations of heavy metal elements including V, Mn, Ni, Cu, As, and Pb were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The results indicated that: the concentrations of heavy metals in atmospheric particulate matter were all below the limits specified in the Ambient Air Quality Standard (GB 3095-2012). In terms of spatial distribution, the concentrations of Mn and Pb in suburban areas were higher than those in urban areas, while the Cu concentration in urban areas was higher than that in suburban areas. The health risk assessment showed that the carcinogenic risk values (R) for the carcinogenic metals As and Ni were all below 10^{-6} , and the hazard quotients (HQ) for the non-carcinogenic metals Pb, Mn, and Cu were all below 1, indicating that all risks were within the acceptable range. This study can provide a scientific basis for the prevention and control of atmospheric heavy metal pollution in the study area, and also serve as a reference for related research in similar regions.

Keywords

Atmospheric Particulate Matter, Heavy Metals, Distribution Characteristics, Health Risk Assessment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

重金属颗粒可通过呼吸作用和皮肤毛孔直接进入人体，也可通过食物链传递并在人体内富集。大气中重金属含量超标会引发一些呼吸道疾病，增加患病几率。国内经济飞速发展阶段，工业生产废气、机动车行驶尾气排放规模不断攀升。2000 至 2013 年间，大气污染物逐年堆积，区域空气污染问题在 2013 年集中显现。此后我国正式推进碳达峰、碳中和相关减排治理工作，2013 到 2024 年十余年间，全国细颗粒物年均浓度降幅超五成，空气质量达标城市占比也从原先 21.6% 稳步提升至 65.5% [1]，大气环境改善成效显著。

学者对空气重金属分布特征和对人体健康的影响进行研究认为，环境颗粒物含量在时间和空间呈现规律。在时间上，一般为冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季；在空间上，一般为城市工业区 > 城市市区 > 农村地区[2]。在非工业区，重金属的主要来源为人为污染；在工业区，重金属的主要来源为工业污染、人为污染。雷利民对兰州市于不同暴露情景空气中重金属致癌的风险进行评价，表明重金属浓度在 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 时存在一定的致癌风险[3]。MohseniBandpi 等对伊朗德黑兰地区环境空气中重金属进行风险评价[4]，得出当地城区 As 的致癌风险高于 Cd 和 Cr；Satsangi 等研究了印度地区室内空气中 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 中的重金属浓度，并对其健康风险进行了评价，得出 Ni 和 Cd 在室内的致癌风险最高[5]。王永晓等对北京市大气中 PM₁₀ 的 Cd、Co 等重金属元素的致癌和非致癌进行了风险评估，得出短期处于可接受范围影响较小，长期则对影响暴露人群健康影响较大[6]。

研究人员针对发达区域的空气重金属展开研究，但关于皖北某市的环境研究却屈指可数。本研究以皖北某市为研究区域，采集城区和郊区重金属沉降物，并进行数据处理，将所得数据与国标(GB 3095-2012)进行对比[7]，找出含量相对较高和超标的元素，确定其来源。本论文为相关防治措施提供科学依据，同时也可与其他城市的重金属研究提供参考。

2. 研究区概况和研究方法

2.1. 皖北某市地理概况

皖北某市属暖温带半湿润季风气候，多年平均气温 14.3℃~15.6℃，年降水量 850~950 mm 且集中于 6~8 月，主导风向为东北风，冬季静风频率较高不利于污染物扩散；皖北某市 2019 到 2023 年间大气颗粒物整体呈逐年向好态势，区域内 PM_{2.5} 年均浓度区间维持在 40~50 μg/m³，PM₁₀ 年均浓度则处于 75~84 μg/m³ 范围(本实验采用皖北某市气象局发布的平均值 42.9 μg/m³ [8])。研究区各采样点分布如图 1 所示。本实验采集区域分为城区和郊区，城区采样点为唐园北区、国能某市热电有限公司、苏宁广场；郊区采样点为某学院、六合新村。

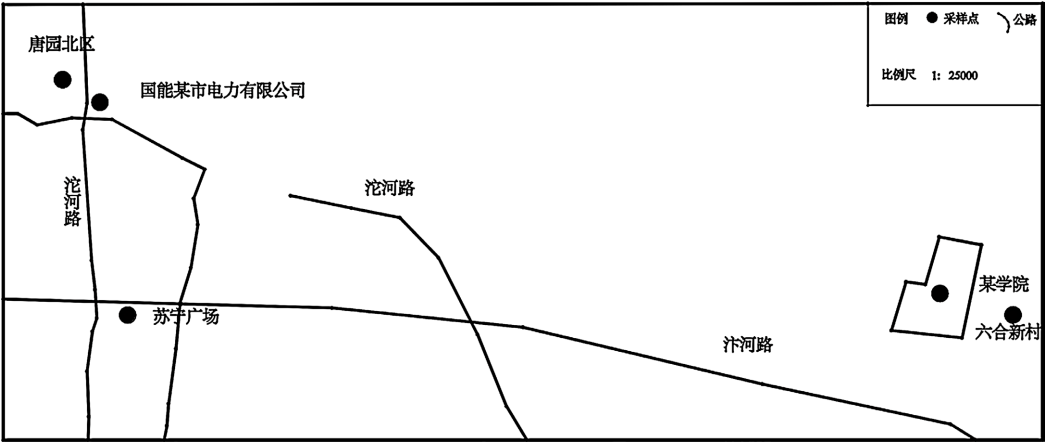


Figure 1. Sampling site for atmospheric particulate matter in a city in northern Anhui
图 1. 皖北某市大气颗粒物样品采集点

2.2. 研究方法

样品处理与样品分析

于 2025 年秋开展采集工作，在长时间未降雨的情况下采集空气中的重金属沉降物。使用玛瑙研钵将样品研磨至 100 目。称取 0.05 g 样品放入坩埚中，加入 3 ml HNO₃ 和 5 ml HF，于通风橱中由 130℃ 低温渐渐至高温 200℃ 加热消解，待冒出大量白色烟雾，继续加热至不再冒白烟为止，蒸至近干。视坩埚内残渣情况，可继续加 3 ml HNO₃ 和 5 ml HF，重复以上消解过程，直至样品完全消解。定容后的样品采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定重金属元素含量，涵盖 Cu、Pb、Mn、V、As、Ni。实验过程中通过空白对照、平行样测试以及标准物质验证，确保分析结果的准确度在 10% 以内。

3. 结果与分析

3.1. 重金属颗粒空间分布特征及来源解析

采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定样品中各重金属元素含量，结果如表 1 所示。

Table 1. Raw data on heavy metal content in air in a city in northern Anhui (unit: $\mu\text{g/g}$)**表 1.** 皖北某市空气重金属含量原始数据(单位: $\mu\text{g/g}$)

重金属 (ng/m^3)	V		Mn		Ni		Cu		As		Pb	
	城区	郊区	城区	郊区	城区	郊区	城区	郊区	城区	郊区	城区	郊区
最大值	85.4	77.9	788	743	118	123	295	99.8	15.4	14.8	143	135
最小值	50.9	62.5	410	484	39.1	53.4	35.1	54.0	7.50	9.40	51.1	69.4
中值	60.7	66.6	542	586	62.5	69.2	94.0	73.0	10.4	11.6	75.3	93.7

本文采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定的重金属沉降物的单位为 $\mu\text{g/g}$, 将其转化成所研究元素在空气中的浓度(ng/mg), 以上数据取中值, 采用以下公式转化为重金属在空气中的浓度:

$$C_{\text{air}} = C_{\text{particle}} \times C_{\text{pm}} \quad (1)$$

C_{air} : 空气中重金属浓度, 单位 ng/m^3

C_{particle} : 颗粒物中重金属的浓度质量, 单位 ng/mg

C_{pm} : C_{pm} 采用皖北某市颗粒物浓度[8], 单位 $\mu\text{g/m}^3$

基于公式(1), 对表 1 中原始检测数据进行运算处理, 完成样品检测值至大气重金属环境浓度的标准化转换, 最终得到空气介质中各重金属元素的浓度含量如表 2 所示。

Table 2. Heavy metal concentration in air in a city in northern Anhui (unit: ng/m^3)**表 2.** 皖北某市空气重金属浓度(单位: ng/m^3)

重金属 (ng/m^3)	V		Mn		Ni		Cu		As		Pb	
	城区	郊区	城区	郊区	城区	郊区	城区	郊区	城区	郊区	城区	郊区
最大值	3.67	3.34	33.8	31.9	5.05	5.29	12.7	4.28	0.66	0.64	6.11	5.78
最小值	2.19	2.68	17.6	20.7	1.68	2.29	1.51	2.31	0.32	0.40	2.19	2.98
中值	2.61	2.86	23.3	25.1	2.68	2.97	4.03	3.13	0.45	0.50	3.23	4.02
变异系数	0.14	0.07	0.15	0.14	0.25	0.31	0.49	0.17	0.19	0.14	0.31	0.24

注: 变异系数无量纲。

由表 2 可知, V 元素浓度整体偏低, 且城郊浓度差异极小、空间分布均匀, 无明显局部富集现象。数据显示: 城区 V 中值为 2.61 ng/m^3 , 郊区中值为 2.86 ng/m^3 , 城郊数值基本持平; 城区、郊区变异系数分别仅为 0.14、0.07, 离散程度较低, 表明 V 在研究区内浓度较稳定, 受局部污染源、矿区活动或城市人为活动扰动较少。结合区域污染特征分析, V 多以天然土壤本底释放为主, 无明显人为输入信号, 对研究区大气重金属污染分层、空间差异及源解析特征无指示意义。相较于 Mn、Cu、Pb 等存在显著城郊差异、受矿区或人为活动控制的重金属, V 元素无法体现宿州市煤炭开采、城市交通、农业活动等典型区域污染规律。因此, 本文不对 V 元素进行重点讨论与单独分析。

表层土壤里, Cu 平均含量是 18.29 mg/kg , Pb 是 20.84 mg/kg , As 是 10.29 mg/kg , V 是 82.27 mg/kg [9]; 朱仙庄煤矿中主要富集 Mn, 在淋滤作用下从煤矿中迁移至周围土壤, 导致周围土壤中 Mn 含量相对较高[10]。城区空气元素含量大小顺序: $\text{Mn} (23.3 \text{ ng/m}^3) > \text{Cu} (4.03 \text{ ng/m}^3) > \text{Pb} (3.23 \text{ ng/m}^3) > \text{Ni} (2.68 \text{ ng/m}^3) > \text{V} (2.61 \text{ ng/m}^3) > \text{As} (0.45 \text{ ng/m}^3)$; 郊区大气元素含量排序为: $\text{Mn} (25.1 \text{ ng/m}^3) > \text{Pb} (4.02 \text{ ng/m}^3) >$

Ni (2.97 ng/m³) > V (2.86 ng/m³) > Cu (3.13 ng/m³) > As (0.50 ng/m³)。对比城郊监测数据可知, Mn、Cu、Pb 三种重金属存在明显的城郊空间浓度差异, 且三者浓度显著高于研究区内其余重金属元素, 存在人体健康暴露隐患。监测数据显示, Mn 元素呈现郊区浓度高于城区的空间分布特征。其中城区 Mn 中值为 23.3 ng/m³, 郊区中值为 25.1 ng/m³; 城区浓度最大值 33.8 ng/m³, 郊区最大值 31.9 ng/m³。Mn 城区变异系数为 0.15, 郊区变异系数为 0.14, 两项数值均处于较低位, 反映出研究区 Mn 浓度在各采样点位之间数值偏差小, 空间离散程度较低。本次郊区采样点位邻近煤炭集中分布区域, 区域煤系地层天然 Mn 元素本底含量较高, 地层长期风化、雨水淋滤促使 Mn 在表层土壤富集, 同时煤炭开采、物料转运过程产生的无组织扬尘会进一步向大气输入 Mn 污染物[10], 直接造成郊区 Mn 浓度高于城区。结合区域土壤监测数据可知, 大气 Mn 空间分布规律与土壤 Mn 空间分布特征基本一致, 污染贡献以土壤扬尘、矿区原生粉尘为主, 人为外源叠加污染的贡献占比有限。Cu 元素呈现显著的城区富集、郊区偏低的空间分异特征。本次监测结果表明, 城区 Cu 浓度最大值为 12.7 ng/m³, 中值为 4.03 ng/m³; 郊区 Cu 最大值为 4.28 ng/m³, 中值为 3.13 ng/m³。城区 Cu 变异系数达 0.49, 离散程度较高, 说明城区不同采样点位 Cu 浓度数值差距较大, 空间分布不均匀, 受局部人为排放活动影响显著。已有研究证实, 大气环境中的 Cu 主要来源于机动车刹车片、制动盘、发动机金属构件的机械磨损碎屑[11]。宿州市城区道路路网密集, 机动车通行频次高, 且城区路面全部为硬化铺装, 颗粒物自然沉降与扩散条件受限, 机动车磨损产生的 Cu 金属微粒易在近地面大气持续累积, 最终形成城区 Cu 浓度显著高于郊区的分布规律。Pb 元素表现为郊区浓度高于城区的分布特征, 本次监测城区 Pb 中值为 3.23 ng/m³, 郊区中值为 4.02 ng/m³; 城区浓度最大值 6.11 ng/m³, 郊区最大值 5.78 ng/m³, 城郊浓度分层特征明显。大气 Pb 为多源叠加型污染物, 来源构成较为复杂。区域表层土壤留存有过往含铅汽油残留的 Pb 组分, 可通过风蚀作用以扬尘形式进入大气; 同时机动车金属部件磨损、农业磷肥施用过程也会持续向大气释放微量 Pb 污染物[11]。宿州市郊区土地利用类型以农田为主, 农业施肥活动持续开展, 长期农耕作业使土壤 Pb 不断累积, 土壤风蚀扬尘进一步抬升郊区大气 Pb 浓度。结合土壤监测数据可证实, 大气 Pb 浓度变化与土壤 Pb 空间分布具有显著关联性, 受土壤本底释放、农业生产活动、交通排放多重来源共同控制。

3.2. 与皖北周边城市对比及异常分析

3.2.1. 各重金属浓度对比

皖北某市与周边城市空气重金属组成对比如表 3 所示。

Table 3. Heavy metal concentration in air in a city in northern Anhui and surrounding cities (Unit: ng/m³)

表 3. 皖北某市及周边城市空气重金属浓度对比表(单位: ng/m³)

元素	皖北某市城区	皖北某市郊区	淮北	淮南	蚌埠
Mn	23.3	25.1	18.2~21.5	16.8~20.1	15.3~19.2
Cu	4.03	3.13	2.8~3.5	2.5~3.3	2.6~3.4
Pb	3.23	4.02	4.1~4.8	3.0~3.8	2.9~3.7

为探究皖北某市大气 PM_{2.5} 中 Mn、Cu、Pb 三类典型重金属的空间分布与区域富集规律, 本研究将该市城区、郊区大气重金属实测含量, 与淮北、淮南、蚌埠三座皖北毗邻城市的同期监测数据开展横向对比分析, 明确该市重金属污染的区域差异化特征。

研究结果表明, Mn、Pb 两种重金属均表现为郊区含量高于城区的空间分布特征, 呈现出郊区富集的规律。其中 Mn 元素区域富集优势显著, 该市城区、郊区 Mn 含量分别为 23.3 ng/m³、25.1 ng/m³, 均明显

高于淮北(18.2~21.5 ng/m³)、淮南(16.8~20.1 ng/m³)、蚌埠(15.3~19.2 ng/m³)的区间范围,在皖北区域整体处于较高水平,区域污染特征差异化显著。Pb 元素呈现郊区略高的分布特点,郊区、城区含量分别为 4.03 ng/m³、3.23 ng/m³,但该市 Pb 整体浓度低于淮北市,与淮南、蚌埠两市水平基本持平,未表现出区域富集现象,符合皖北地区 Pb 元素常规分布背景。

与上述两种元素分布规律不同,Cu 元素表现为城区富集特征,城区浓度 4.03 ng/m³ 高于郊区 3.13 ng/m³。区域横向对比显示,该市城区与郊区 Cu 含量均高于淮北(2.8~3.5 ng/m³)、淮南(2.5~3.3 ng/m³)、蚌埠(2.6~3.4 ng/m³)三市监测区间,说明相较于皖北其他城市,该市城区工业活动、交通往来及城市建设等人为活动对大气 Cu 的输入贡献稍高。

3.2.2. 元素的相关性分析

研究数据显示,Mn 和 Pb 元素之间存在明显的正向关联,相关性水平较高,能够说明两种污染物的主要来源趋于一致。区域内 Mn 的自然来源以煤系地层风化、地表土壤扬尘为主,Pb 则受土壤本底值和工农业生产活动的共同影响。两种元素在郊区区域的浓度均明显上升,由此可以判断,矿区扬尘扩散、地表土壤风蚀作用是该区域 Mn、Pb 的共性污染源。

空间分布特征层面,Mn 与 Pb 的浓度变化规律基本同步,整体呈现出郊区浓度高于城区的特点。农业生产作业、矿区开发及粉尘排放等人类活动,均会对区域内 Mn、Pb 的浓度积累产生直接影响,是两类重金属污染物的重要人为来源。

不同于上述两种元素,Cu 与 Mn、Pb 的关联性极差,仅表现为微弱相关或无相关特征,充分体现出 Cu 的污染来源具有明显的独立性,与 Mn、Pb 的溯源体系相互分离。监测结果表明,Cu 在城区范围内浓度显著更高,结合区域污染特征分析,其主要来源于机动车行驶过程中刹车磨损、轮胎摩擦及车辆零部件损耗,几乎不受土壤基底、煤矿开发活动的影响,是典型的交通源大气重金属污染物。

综合各项元素的相关性与空间分布规律可得出最终溯源结论:皖北某市大气环境中的 Mn、Pb 重金属,由土壤扬尘等自然来源和煤炭开发、农业生产等人为来源共同构成;Cu 污染物来源单一且独立,核心来源为城市交通排放。整体来看,该区域大气重金属污染并非单纯来自自然土壤环境,交通通行、农业生产、煤炭产业等各类人为活动,是造成重金属污染的主导因素。

4. 健康风险评估

为定量评估空气中重金属对人体的潜在危害,本研究运用美国环境保护署(USEPA)推荐的暴露模型[12],依据有害物质进入人体的过程展开估算,并将暴露量与有害重金属颗粒的致癌性和非致癌性相结合,进行健康风险评估。

本研究采用美国 EPA 综合危险度信息数据库、国际癌症研究机构的研究成果及相关资料,把污染物划分为致癌物质和非致癌物质。本研究致癌物质是:As、Ni;非致癌物质是:Pb、Cu、Mn。

$$HQ = ADD/Rfd = [(C \times IR \times EF \times ED)/(BW \times AT)]/Rfd \quad (2)$$

$$P = LADD \times SF \quad (3)$$

HQ: 非致癌物的人群终生超额危险度;ADD(LADD): 经呼吸暴露途径对某种重金属的日均暴露剂量,mg/(kg·d);Rfd: 参考剂量,mg/(kg·d);C: 环境空气中该化合物的质量浓度,(mg/m³);IR: 呼吸速率,(m³/d);EF: 暴露频率,(d/年);ED: 持续暴露时间;BW: 单位体重,(kg);AT: 平均暴露时间,终身致癌暴露时间设为 70a;非致癌暴露时间成人为 30a,儿童为 10a;P: 在 LADD 剂量暴露条件下的人群终生患癌超额危险度;SF 为致癌化学物的致癌强度系数[kg·d/mg][13]。重金属呼吸暴露评估所用相关参数取值如表 4 所示。

Table 4. Respiratory exposure parameters
表 4. 呼吸暴露参数

参数	含义	成年女性	成年男性	儿童
IR (m ³ /d)	呼吸速率	11.2	15.2	8
EF (d/年)	暴露频率	121	121	121
ED (年)	暴露年限	30	30	10
BW (kg)	平均体重	60	70	30
AT 致癌(d)	平均暴露时间	70 × 121	70 × 121	70 × 121
AT 非致癌(d)	平均暴露时间	30 × 121	30 × 121	10 × 121

重金属元素的 SF 与 RfD 取值如表 5 所示。

Table 5. Toxicological parameters
表 5. 毒理学参数

元素	As	Ni	Pb	Mn	Cu
SF	20.07	0.84	-	-	-
RfD	-	-	4.3×10^{-4}	3.0×10^{-4}	2.5×10^{-3}

采用 EPA 推荐的健康风险分级(表 6): 若 $R < 10^{-6}$ 时, 则认为其终生致癌风险较低, 若 R 介于 $10^{-4} \sim 10^{-6}$, 则认为有引起癌症的风险, 若 $R > 10^{-4}$, 则认为引起癌症的风险较高; 非致癌方面(表 7), 若 $HQ \leq 1$, 表示暴露值低于产生不良反应的标准值, 则基本不会产生不良反应, 若 $HQ > 1$, 表示暴露值高于标准值, 可能对人体的健康产生影响[14]。

Table 6. Lifetime incremental cancer risk of heavy metals (R)
表 6. 重金属的终身增量致癌风险(R)

重金属	区域	暴露类型	暴露剂量(mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)		
			成年女性	成年男性	儿童
As	城区	致癌(LADD)	$1.21 \times 10^{-7} \sim 2.49 \times 10^{-7}$	$1.31 \times 10^{-7} \sim 2.69 \times 10^{-7}$	$5.74 \times 10^{-8} \sim 1.19 \times 10^{-7}$
	郊区	致癌(LADD)	$1.51 \times 10^{-7} \sim 2.41 \times 10^{-7}$	$1.64 \times 10^{-7} \sim 2.61 \times 10^{-7}$	$7.16 \times 10^{-8} \sim 1.15 \times 10^{-7}$
Ni	城区	致癌(LADD)	$2.65 \times 10^{-8} \sim 7.99 \times 10^{-8}$	$2.87 \times 10^{-8} \sim 8.65 \times 10^{-8}$	$1.26 \times 10^{-8} \sim 3.81 \times 10^{-8}$
	郊区	致癌(LADD)	$4.31 \times 10^{-8} \sim 9.96 \times 10^{-8}$	$4.67 \times 10^{-8} \sim 1.08 \times 10^{-7}$	$2.05 \times 10^{-8} \sim 4.75 \times 10^{-8}$

注: LADD 为日均暴露剂量。

Table 7. Non-carcinogenic risk (HQ) of heavy metals
表 7. 重金属的非致癌风险(HQ)

重金属	区域	暴露类型	暴露剂量(mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)		
			成年女性	成年男性	儿童
Pb	城区	非致癌(ADD)	$6.33 \times 10^{-6} \sim 1.77 \times 10^{-5}$	$6.84 \times 10^{-6} \sim 1.91 \times 10^{-5}$	$3.00 \times 10^{-6} \sim 8.37 \times 10^{-6}$
	郊区	非致癌(ADD)	$8.60 \times 10^{-6} \sim 1.67 \times 10^{-5}$	$9.30 \times 10^{-6} \sim 1.81 \times 10^{-5}$	$4.09 \times 10^{-6} \sim 7.93 \times 10^{-6}$

续表

Mn	城区	非致癌(ADD)	$7.27 \times 10^{-5} \sim 1.39 \times 10^{-4}$	$7.87 \times 10^{-5} \sim 1.51 \times 10^{-4}$	$3.43 \times 10^{-5} \sim 6.63 \times 10^{-5}$
	郊区	非致癌(ADD)	$8.57 \times 10^{-5} \sim 1.31 \times 10^{-4}$	$9.27 \times 10^{-5} \sim 1.42 \times 10^{-4}$	$4.07 \times 10^{-5} \sim 6.23 \times 10^{-5}$
Cu	城区	非致癌(ADD)	$7.48 \times 10^{-7} \sim 6.28 \times 10^{-6}$	$8.08 \times 10^{-7} \sim 6.80 \times 10^{-6}$	$3.55 \times 10^{-7} \sim 2.98 \times 10^{-6}$
	郊区	非致癌(ADD)	$1.14 \times 10^{-6} \sim 2.12 \times 10^{-6}$	$1.24 \times 10^{-6} \sim 2.29 \times 10^{-6}$	$5.44 \times 10^{-7} \sim 1.00 \times 10^{-6}$

注：ADD 为日均暴露剂量。

根据公式(2)、(3)和表 4、表 5 将空气中重金属含量转换为重金属的致癌风险与非致癌风险并进行健康风险评估。

从本次风险计算结果可以看出，致癌重金属 As 和 Ni 在城区和郊区不同人群中的终身致癌风险值都低于 10^{-6} ，按照 EPA 的评价标准[12]，都属于可接受水平，说明当地居民通过呼吸途径接触这两种重金属而患上癌症的可能性非常小，整体安全可靠。从人群差异来看，成年男性的风险略高于成年女性，儿童最低，这主要是呼吸速率、体重等参数不同造成的，并不存在某一类人群面临明显偏高风险的情况。

非致癌重金属 Pb、Mn、Cu 的风险商全都远小于 1 [12]，说明在当前浓度条件下，这几种重金属不会对人体的呼吸、神经、消化等系统造成明显不良影响。综合来看，皖北某市大气颗粒物中重金属整体污染程度较轻，健康风险处于可控范围，暂时不会对当地居民构成明显危害。

但考虑到皖北某市煤炭产业、交通排放和农业活动长期存在，重金属在环境中具有累积性，长期低剂量暴露仍可能带来潜在慢性健康影响，因此仍需要持续开展环境监测，加强污染源管控，尽可能降低重金属排放，保障居民长期健康安全。

5. 结论

本研究以皖北某市城区与郊区为研究区域，基于 2025 年秋季大气颗粒物数据，分析了区域大气重金属的空间分布特征，并开展呼吸暴露健康风险评价，主要研究结论如下：

- 1、监测时段内，研究区 V、Mn、Ni、Cu、As、Pb 六种大气重金属浓度均符合《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)限值要求，无超标情况，各重金属污染负荷整体偏低，未出现明显富集现象。
- 2、研究区大气重金属存在明显城郊空间分异特征。基于实测中值，城区元素浓度排序为 Mn (23.3 ng/m^3) > Cu (4.03 ng/m^3) > Pb (3.23 ng/m^3) > Ni (2.68 ng/m^3) > V (2.61 ng/m^3) > As (0.45 ng/m^3)；郊区排序为 Mn (25.1 ng/m^3) > Pb (4.02 ng/m^3) > Ni (2.97 ng/m^3) > V (2.86 ng/m^3) > Cu (3.13 ng/m^3) > As (0.50 ng/m^3)。Mn、Pb 在郊区浓度更高，主要受煤系地层本底、矿区扬尘、煤矸石风化及郊区农业污染、土壤风蚀影响；Cu 集中富集于城区，源于城区高密度机动车金属磨损排放，叠加城区颗粒物扩散条件较差的因素。V 城郊浓度基本一致，空间分布均匀，未受明显人为污染扰动。
- 3、本次健康风险评价结果表明，研究区 As、Ni 致癌风险值均低于 10^{-6} 安全阈值，Pb、Mn、Cu、V 非致癌风险商均小于 1。在本次监测时段内，区域大气重金属经呼吸途径造成的致癌、非致癌风险均未超出安全限值，无显著人体健康暴露危害。

本研究完善了皖北煤炭型城市秋冬季大气重金属的基础研究数据，弥补了区域相关研究短板，可为当地大气重金属污染防控与环境精细化管理提供数据支撑与理论参考。本研究仅覆盖秋季节样本，存在一定局限性。后续可补充春、夏和秋季监测数据，完善全年污染时空演变规律；同时增加皮肤接触、饮食摄入等暴露途径评估，结合源解析技术明确污染源贡献，为同类资源型城市大气治理与健康防护提供

更全面的科学依据。

基金项目

本研究来源于以下项目, 1) 安徽省大学生创新训练项目, “宿州市环境空气颗粒物中重金属元素分布特征及风险评价”, 项目编号: S202510379080。2) 安徽省高等学校省级质量工程项目, “工程教育认证背景下基于 OBE 理念的《地球化学》课程建设”, 项目编号: 2024jyxm0436; 3) 校级教学研究项目, “《地球化学》课程思政建设”, 项目编号: szxy2026jyjf38。。

参考文献

- [1] 生态环境部发布《2024 中国生态环境状况公报》[EB/OL].
https://www.mee.gov.cn/ywgz/sthjcg/hjzljcypj/202506/t20250605_1120773.shtml, 2025-06-05.
- [2] 邓珊钊, 蔡自刚. 某市工业区和市区环境空气颗粒物中重金属污染特征[J]. 环境监测, 2024, 30(2): 33-36+46+9.
- [3] 雷利民. 兰州市不同暴露情景空气中重金属致癌风险评价[J]. 环境与职业医学, 2017, 34(2): 145-149.
- [4] MohseniBandpi, A., Eslami, A., Shahsavani, A., Khodaghali, F. and Alinejad, A. (2017) Physicochemical Characterization of Ambient PM_{2.5} in Tehran Air and Its Potential Cytotoxicity in Human Lung Epithelial Cells (a549). *Science of the Total Environment*, **593**, 182-190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.150>
- [5] Satsangi, A., Agarwal, A. and Mangal, A. (2014) Health Risk Assessment of Metals in Indoor PM₁₀ and PM_{2.5} in India. *Atmospheric Research*, **149**, 102-110.
- [6] 王永晓, 曹红英, 邓雅佳, 等. 大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3575-3584.
- [7] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 3095-2012 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [8] 关于印发《宿州市环境空气质量达标规划》的通知[EB/OL].
<https://sthjj.ahsz.gov.cn/public/127101925/196203691.html>, 2025-12-30.
- [9] 辛雪华, 许继影, 李佳伟, 等. 宿州市城区环城河两侧土壤重金属含量及空间分布特征[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(19): 143-145.
- [10] 檀丽娟, 冯松宝, 程琛, 等. 淋滤作用下朱仙庄煤矸石中重金属的迁移研究[J]. 广州化工, 2019, 47(15): 131-133.
- [11] 杜汇玉, 汪玲. 皖北某市道路土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 国土资源信息化, 2023(4): 612-620.
- [12] USEPA (1989) Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I. Office of Emergency and Remedial Response.
- [13] Chen, P.F., Bi, X.H., Zhang, J.Q., et al. (2015) Heavy Metal Pollution and Health Risk in Tianjin. *Particuology*, **20**, 112-120.
- [14] 邱慧娟, 雷鹏, 徐玲, 等. 自感健康研究进展[J]. 中国健康教育, 2010, 26(7): 533-536.