

· 调查报告与分析 ·

天津市某地铁站台 PM_{2.5} 污染特征及人群健康风险评估

赵岩¹, 陈阳², 王玉雯¹, 商博东³, 杜宇欣¹

1. 天津市疾病预防控制中心环境健康与公共卫生所 环境与健康监测评价科, 天津 300011;
2. 天津市红桥区疾病预防控制中心环境卫生与食品安全科, 天津 300122;
3. 天津市疾病预防控制中心卫生检验检测所环境理化科, 天津 300011

通信作者: 赵岩, E-mail: zhaoyan6@tj.gov.cn

【摘要】目的 比较天津市地铁站台和外环境空气 PM_{2.5} 中金属类金属元素的污染特征差异, 并进行人群健康风险评估。 **方法** 2023 年 11—12 月对天津市建成 ≥ 10 年的某地铁线路, 随机选取某站点作为采样地点, 进行空气 PM_{2.5} 采样, 计算 PM_{2.5} 质量浓度, 并对 21 种金属类金属元素进行成分含量测定, 采用美国国家环境保护局 (USEPA) 推荐的健康风险评估模型对金属类金属元素经呼吸途径引发的健康风险进行评价。 **结果** 地铁站台冬季 PM_{2.5} 平均质量浓度为 (246.71 ± 85.55) μg/m³, 明显高于同期外环境水平 [(112.64 ± 26.26) μg/m³] ($t = 5.61, P < 0.001$), 地铁站台空气 PM_{2.5} 中的 Sb、Mn、V、Cu、Co、Al、Cr、Pb、Ni、Fe、Na、Mg、Ga 和 Zn 均明显高于室外环境 ($P < 0.05$)。9 种元素的综合非致癌危险度水平高于 1, 表明暴露人群可能存在一定的非致癌健康危害, 非致癌危害最高的为 Mn (HQ = 0.8), 其次为 Sb (HQ = 0.1)。致癌元素对人群致癌危险度最高为 Cr, 危险度水平为 6.05×10^{-5} 。 **结论** 天津市某地铁站台空气 PM_{2.5} 中金属类金属元素的污染状况较为严重, 多种非致癌金属元素联合作用可能会对人群产生一定非致癌风险, As、Ni、Pb 和 Cd 的对人群的致癌危险度较低, Cr 的致癌危险度尚在可接受水平。

【关键词】 地铁站台; 细颗粒物; 金属类金属元素; 健康风险评估; 天津市

Concentrations and associated health risks of indoor/outdoor PM_{2.5}-bound metallic elements at a subway station in Tianjin city during winter

ZHAO Yan¹, CHEN Yang², WANG Yuwen¹, SHANG Bodong³, DU Yuxin¹ (1. Department of Environmental and Health Monitoring and Evaluation, Institute of Environmental Health and Public Health, Tianjin Center for Disease Control and Prevention, Tianjin 300011, China; 2. Department of Environmental Hygiene and Food Safety, Hongqiao Center for Disease Control and Prevention, Tianjin 300122, China; 3. Department of Environmental Physical and Chemical, Institute of Hygienic Inspection, Tianjin Center for Disease Control and Prevention, Tianjin 300011, China)

Corresponding author: ZHAO Yan, E-mail: zhaoyan6@tj.gov.cn

【Abstract】 Objective To compare the concentrations and to assess the chronic health risks of particulate matter less than 2.5 microns in aerodynamic diameter (PM_{2.5})-bound metal elements on the platform and in the ambient air of a subway station in Tianjin city during winter. **Methods** Seven-day continuous PM_{2.5} air sampling was conducted in November and December 2023 simultaneously on the platform near the tracks and outside of a subway station that had been in operation for more than 10 years in Tianjin city. The mass concentrations of PM_{2.5} in the samples were calculated, and the contents of 21 metallic elements in the PM_{2.5} samples were determined. The health risk assessment model recommended by the United States Environmental Protection Agency (USEPA) was used to assess the health risks of the metallic elements via the respiratory route. **Results** The mean mass concentration of PM_{2.5} on the platforms in winter was 246.71 ± 85.55 μg/m³, which was significantly higher than that (112.64 ± 26.26 μg/m³) outside the station during the same period ($t = 5.61, P < 0.001$). The contents of antimony, manganese, alum, copper, cobalt, aluminum, chromium, lead, nickel, iron, sodium, magnesium, calcium, and zinc in PM_{2.5} samples collected on the subway platform were all significantly higher than those in PM_{2.5} samples collected outside the station (all $P < 0.05$). The combined non-carcinogenic hazard index (HI) of the nine metal elements was greater than 1, indicating that the exposed population may have some non-carcinogenic health risks. Manganese was found to have the highest non-carcinogenic risk (hazard quotient [HQ] = 0.8), followed by antimony (HQ = 0.1). Chromium posed the highest carcinogenic risk (6.05×10^{-5}) to the exposed population. **Conclusions** The level of metallic element pollution in PM_{2.5} on a subway platform in Tianjin city is relatively high. The combined effects of several non-carcinogenic metallic elements may pose certain non-carcinogenic risks to the exposed population. The carcinogenic risks of arsenic, nickel, lead, and cadmium to the exposed population are low, and the carcinogenic risk of chromium is still within acceptable limits.

【Keywords】 subway platform; fine particulate matter; metallic elements; health risk assessment; Tianjin city



伴随我国城市化进程的加快,地铁因其快速、准时、运量大和环保等优势,已成为居民出行的首选。据资料统计,我国地下轨道交通的年客运量和线路总长度均位居世界首位^[1]。但由于地铁处于地下,空间相对封闭,空气内的有害物质容易堆积,会对人群健康产生不利影响^[2-3]。地铁空气污染的来源包括:室外污染源,如汽车尾气;隧道内污染源,如车轮、轨道之间摩擦产生的颗粒物等^[4]。本研究对天津市某地铁站台和外环境 PM_{2.5}(particulate matter less than 2.5 microns in aerodynamic diameter)进行采样并进行成分分析,进而探讨其污染特征和人群健康风险,为改善地铁空气质量提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集 选择天津市建成 ≥ 10 年的某地铁线路,随机选取某站点作为采样地点,分别在该站点临近轨道站台和站点外大气环境中进行细颗粒物 PM_{2.5} 采样,采样时间段为 2023 年 11 月 10—16 日和 12 月 10—16 日,共 14 d。本研究使用大气中流量采样器(武汉天虹环保产业股份有限公司,TH-150F)进行采样,外环境采样高度为 10~15 m,2 台采样器同时采样,进气口间距 ≥ 2 m;地铁站台内采样器高度设置为距地面 1.5~1.8 m,亦使用 2 台采样器同时采样,进气口间距 ≥ 2 m。采样滤膜均使用石英滤膜(Whatman, 90 mm, CAT No.1851-090),采样前、后滤膜均平衡 24 h 后再进行称重,称重完成后置于 -15℃ 冰箱,避光保存至分析,平衡条件温度(25±1)℃,湿度(50±5)%RH,采样流量均为 100 L/min,每天 24 h 连续采样。

1.2 分析方法

1.2.1 金属类金属元素浓度测定 采用在线内标方式使用电感耦合等离子体质谱仪(美国安捷伦公司,7500cx ICP-MS)分别对采集的样品中 21 种金属类金属元素进行测定,方法参照美国国家环境保护局(The United States Environmental Protection Agency, USEPA)的《环境空气中无机化合物测定方法简编 IO-3.5:电感耦合等离子体/质谱法测定环境颗粒物中的金属》^[5]。

1.2.2 金属和类金属元素人群健康风险评价 根据美国环保总局的综合风险信息系统(Integrated Risk Information System, IRIS)和国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)的相关研究表明,污染物分为致癌物和非致癌物^[6]。本研究中 PM_{2.5} 中的金属类金属元素中 Sb、Hg、Mn、V、Cu、Zn、Co、Se、Al、Na、Fe、Mg、Ga、K 和 Tl 元素为非致癌物,As、Cd、Cr、Ni 和

Pb 元素为致癌物^[7-8]。由于空气中 PM_{2.5} 主要通过呼吸途径进入人体,进而引发人体的健康风险,故本研究采用(USEPA)的风险评估指南(Risk Assessment Guidance for Superfund, RAGS)^[6]和 WS/T 777—2021《化学物质环境健康风险评估技术指南》^[9]对 PM_{2.5} 中的金属类金属元素进行以呼吸为暴露途径的人群健康风险评估,其中,非致癌金属类金属元素的健康风险评估模型计算公式^[6,10]为:

$$HQ = \frac{C \times ET \times EF \times ED}{AT_{nc}} / RfC$$

致癌金属类金属元素的健康风险评估模型计算公式^[6,10]为:

$$CR = \frac{C \times ET \times EF \times ED}{AT_{ca}} \times IUR \times 10^3$$

两式中, HQ(hazard quotient)为人群的非致癌危险度系数,无量纲; CR(carcinogenic risk)为人群致癌危险度,无量纲; C 为 PM_{2.5} 中金属类金属成分浓度, mg/m³; EF 为暴露频率, 天/年(本研究以冬季 92 天为暴露期); ED 为暴露持续时间, 年(本研究以 30 年为暴露持续时间); ET 为暴露时间, 小时/天(本研究以每天 12 小时为暴露时间, 亦为站台工作人员的最长暴露时间); AT_{nc} 为非致癌金属类金属元素的总平均接触时间, 天(30 年 × 365 天 × 24 小时); AT_{ca} 为致癌金属类金属元素的总平均接触时间, 天(70 年 × 365 天 × 24 小时); RfC 为经呼吸暴露的参考剂量, mg/m³; IUR 为经呼吸暴露的致癌吸入单位风险, [μg/m³]⁻¹。

当非致癌污染物的健康风险评估结果 HQ < 1, 表明该成分的暴露低于会产生不良反应的阈值, 不会对人群造成明显的非致癌健康危害, 若 HQ > 1, 则表明该成分的暴露会对人群造成明显的非致癌健康损害^[11]。当致癌污染物的健康风险评估结果 CR < 10⁻⁶, 则表明该污染物基本不存在致癌风险, 若 CR 在 10⁻⁶~10⁻⁴, 则表明该污染物的致癌危险度尚在可接受水平, 若 CR > 10⁻⁴, 则表明该污染物的致癌危险度超过了可接受的水平, 可能存在一定的致癌风险^[12]。

参考美国环保总局的综合风险信息系统和美国毒物和疾病登记署(Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR)及相关资料^[7,13-14], 可知非致癌金属类金属元素经呼吸暴露的参考剂量(reference concentration, RfC)[mg/m³] 分别为: 锑: 3.0 × 10⁻⁴、汞: 3.0 × 10⁻⁴、锰: 5.0 × 10⁻⁵、钒: 7.0 × 10⁻³、铜: 4.2 × 10⁻²、锌: 3.01 × 10⁻¹、钴: 6.0 × 10⁻⁶、硒: 2.0 × 10⁻²、铝: 5.0 × 10⁻³。本研究中进行成分分析的钠、铁、镁、钙、钾和铊元素, 尚未发现有相关研究提供其经呼吸暴露的参考剂量^[8,15-16]。

致癌金属类金属元素经呼吸暴露的致癌吸入单位风险 (inhalation unit risk, *IUR*) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] $^{-1}$ 分别为^[7-8, 17]: 砷: 4.3×10^{-3} 、镉: 1.8×10^{-3} 、铬: 1.2×10^{-2} 、镍: 2.4×10^{-4} 、铅: 8.0×10^{-5} 。

1.3 质量控制 采样后滤膜样品放置于专用保存盒中, 运输过程滤膜保存盒置于密闭袋中避光运输, 切勿沾湿滤膜。每次采样前均须清洁采样头, 累计采样 7 d, 需检查一次采样流量(应不超过设定流量的 $\pm 2\%$, 否则需校准后再进行采样)。将密封保存的空白滤膜带到现场, 按照采样程序进行安装并取下滤膜, 但不采样, 采样完成后随样品运回实验室, 按与样品相同的操作步骤进行处理和测定, 用于检查从样品采集到分析全过程滤膜是否受到污染, 同时每 7 d 采集 1 张平行样品。

1.4 统计分析 采用 WPS Office 录入数据, 建立数据库, $\text{PM}_{2.5}$ 中金属类金属元素人群健康风险采用均值浓度 *C* 和 95% 置信区间上限浓度 95%*UCL* 分别计算, 利用 SPSS 24.0 软件进行数据分析, 对金属类金属元素浓度中符合正态分布的数据进行 *t* 检验, 不符合正态分布的数据进行秩和检验, 均以 $P < 0.05$ 作为两组数据差异具有统计学意义。

2 结 果

2.1 某地铁站台与外环境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属和类金属元素质量浓度特征(表 1) 某地铁站台空气 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度为(246.71 ± 85.55) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 地铁站室外环

境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度为(112.64 ± 26.26) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 地铁站台空气 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度明显高于地铁站室外环境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度, 两者比较差异具有统计学意义($t = 5.61, P < 0.001$)。

对采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 中的金属和类金属元素进行分析, 发现地铁站台和地铁站室外环境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 中本次检测的 21 种金属元素除 Be 未检出外, 其余 20 种金属和类金属元素均有检出。对检测结果进行统计分析, 对浓度数据不符合正态分布的 Mg、Ga、Fe、Cu、As、Se、Cd、Hg 进行非参数秩和检验, 其他元素数据进行 *t* 检验, 发现某地铁站台空气 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 Sb、Mn、V、Cu、Co、Al、Cr、Pb、Ni、Fe、Na、Mg、Ga 和 Zn 均明显高于室外环境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 中相应金属和类金属元素的浓度, 差异均存在统计学意义($t_{\text{Sb}} = 15.33, P_{\text{Sb}} < 0.001; t_{\text{Mn}} = 12.37, P_{\text{Mn}} < 0.001; t_{\text{V}} = 9.56, P_{\text{V}} < 0.001; Z_{\text{Cu}} = 4.50, P_{\text{Cu}} < 0.001; t_{\text{Co}} = 5.60, P_{\text{Co}} < 0.001; t_{\text{Al}} = 6.29, P_{\text{Al}} < 0.001; t_{\text{Cr}} = 12.49, P_{\text{Cr}} < 0.001; t_{\text{Pb}} = 16.21, P_{\text{Pb}} < 0.001; t_{\text{Ni}} = 10.62, P_{\text{Ni}} < 0.001; Z_{\text{Fe}} = 2.85, P_{\text{Fe}} = 0.004; t_{\text{Na}} = 3.76, P_{\text{Na}} = 0.001, Z_{\text{Mg}} = 4.18, P_{\text{Mg}} < 0.001; Z_{\text{Ga}} = 4.50, P_{\text{Ga}} < 0.001; t_{\text{Zn}} = 3.41, P_{\text{Zn}} = 0.002$)。其他元素两采样点间比较差异无统计学意义($Z_{\text{As}} = 0.08, P_{\text{As}} = 0.940; Z_{\text{Cd}} = 0.911, P_{\text{Cd}} = 0.362; Z_{\text{Hg}} = 0.51, P_{\text{Hg}} = 0.608; Z_{\text{Se}} = 0.04, P_{\text{Se}} = 0.970, t_{\text{Ti}} = 0.30, P_{\text{Ti}} = 0.768, t_{\text{K}} = 1.21, P_{\text{K}} = 0.236$)。

表 1 天津市 2023 年 11 — 12 月某地铁站台与外环境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属类金属元素质量浓度比较(中位数 *M*)
Table 1 Mean (standard deviation) and median of the mass concentration of twenty $\text{PM}_{2.5}$ -bound metal elements on the platform and in the ambient air of a subway station in Tianjin city from November to December 2023

元素	地铁站台(ng/m^3)		外环境(ng/m^3)		元素	地铁站台(ng/m^3)		外环境(ng/m^3)	
	$\bar{x} \pm s$	<i>M</i>	$\bar{x} \pm s$	<i>M</i>		$\bar{x} \pm s$	<i>M</i>	$\bar{x} \pm s$	<i>M</i>
锑(Sb)	295.66 ± 71.89^a	299.81	1.08 ± 0.37	0.89	砷(As)	5.10 ± 0.07	5.08	5.14 ± 0.16	5.08
镉(Cd)	0.48 ± 0.24	0.35	0.41 ± 0.11	0.35	汞(Hg)	0.24 ± 0.14	0.20	0.21 ± 0.01	0.20
锰(Mn)	317.47 ± 92.31^a	317.29	12.39 ± 1.00	12.00	钠(Na)	259.29 ± 206.15^a	235.00	52.14 ± 5.79	50.00
钒(V)	27.19 ± 7.97^a	27.25	6.02 ± 2.26	6.08	铁(Fe)	3.94 ± 4.06	2.26 ^a	1.33 ± 0.58	1.47
铜(Cu)	296.07 ± 169.81	205.00 ^a	86.55 ± 12.44	89.30	锌(Zn)	28.32 ± 30.08^a	20.80	0.88 ± 0.16	0.91
镁(Mg)	130.59 ± 71.16	54.55 ^a	6.81 ± 2.49	6.95	钙(Ga)	706.08 ± 45.77	469.00 ^a	6.36 ± 2.85	5.84
钴(Co)	3.17 ± 2.03^a	2.64	0.13 ± 0.09	0.11	硒(Se)	2.61 ± 0.09	2.58	2.62 ± 0.10	2.58
铝(Al)	463.36 ± 116.04^a	452.43	202.43 ± 103.15	172.00	铬(Cr)	93.27 ± 26.64^a	95.05	3.98 ± 2.28	3.25
铅(Pb)	149.04 ± 31.55^a	144.26	12.31 ± 0.40	12.20	镍(Ni)	13.24 ± 4.16^a	14.00	1.43 ± 0.04	1.42
铊(Tl)	0.10 ± 0.07	0.08	0.10 ± 0.06	0.08	钾(K)	112.14 ± 91.67	95.00	81.43 ± 23.81	75.00

注: a 为 $P < 0.05$ 。

2.2 某地铁站台与外环境空气 $\text{PM}_{2.5}$ 中金属和类金属元素健康风险评价(表 2、3) 地铁站台 $\text{PM}_{2.5}$ 中每种非致癌金属类金属元素均值浓度和 95%*UCL* 浓度评估的人群非致癌危险度水平均低于 1, 说明单一元素暴露不会对人体产生不良影响, 但统计各元素综合危险度后, 显示两者的人群非致癌

危险度均高于 1, 表明地铁站台 $\text{PM}_{2.5}$ 中非致癌金属类金属元素综合暴露可能会对人群, 尤其是地铁工作人员造成一定的非致癌健康危害。而外环境 $\text{PM}_{2.5}$ 中每种元素均值浓度和 95%*UCL* 评估的人群非致癌危险度和综合危险度均低于 1, 说明不会对人群产生非致癌健康危害。9 种元素中对

人群非致癌危害最高的为 Mn，其次为 Sb，非致癌危险度分别为 0.8 和 0.1，除 Se 外的各种元素均呈现非致癌危险度地铁站台高于外环境的特征。

站台 PM_{2.5} 中 5 种致癌元素对人群的致癌危险度最高的为 Cr，数值为 6.05×10^{-5} (95%UCL 对应危险度为 7.04×10^{-5})，属于 10^{-5} 水平，表明 Cr 的致癌危险度尚在可接受水平。As、Ni、Pb 和 Cd

的危险度均在 10^{-8} 至 10^{-6} 之间，可认为 4 种金属的致癌危险度较低，尚不能对暴露人群造成致癌风险。致癌元素的综合致癌危险度亦在 10^{-5} 水平，表明综合暴露对人群的致癌风险也尚在可接受水平。外环境 5 种致癌元素独立和综合暴露对人群的致癌危险度均在 10^{-6} 水平及以下，表明外环境空气暴露对人群造成的致癌风险较低。

表 2 某地铁站台与外环境空气 PM_{2.5} 中金属类金属元素非致癌危险度
Table 2 Hazard quotients (HQs) and their upper confidence limits of nine PM_{2.5}-bound metal elements on the platform and in the ambient air of a subway station in Tianjin city from November to December 2023

元素	某地铁站台		外环境	
	C ^a	95%UCL ^b	C ^a	95%UCL ^b
锑(Sb)	1.24×10^{-1}	1.42×10^{-1}	4.54×10^{-4}	5.42×10^{-4}
锰(Mn)	8.00×10^{-1}	9.35×10^{-1}	3.12×10^{-2}	3.27×10^{-2}
钒(V)	4.90×10^{-4}	5.72×10^{-4}	1.08×10^{-4}	1.32×10^{-4}
汞(Hg)	1.01×10^{-4}	1.34×10^{-4}	8.82×10^{-5}	8.82×10^{-5}
铜(Cu)	8.88×10^{-4}	1.18×10^{-3}	2.60×10^{-4}	2.81×10^{-4}
锌(Zn)	1.19×10^{-5}	1.91×10^{-5}	3.68×10^{-7}	4.06×10^{-7}
钴(Co)	6.66×10^{-2}	9.12×10^{-2}	2.73×10^{-3}	3.78×10^{-3}
硒(Se)	1.64×10^{-5}	1.68×10^{-5}	1.65×10^{-5}	1.68×10^{-5}
铝(Al)	1.17×10^{-2}	1.34×10^{-2}	5.10×10^{-3}	6.60×10^{-3}
合计	1.00	1.18	4.00×10^{-2}	4.41×10^{-2}

注: a 使用平均浓度计算HQ, b 使用污染物浓度95%置信上限计算HQ。

表 3 某地铁站台与外环境空气 PM_{2.5} 中金属类金属元素致癌危险度
Table 3 Carcinogenic risks and their upper confidence limits of five PM_{2.5}-bound metal elements on the platform and in the ambient air of a subway station in Tianjin city from November to December 2023

元素	某地铁站台		外环境	
	C ^a	95%UCL ^b	C ^a	95%UCL ^b
砷(As)	1.18×10^{-6}	1.19×10^{-6}	1.19×10^{-6}	1.21×10^{-6}
镉(Cd)	4.67×10^{-8}	6.03×10^{-8}	3.99×10^{-8}	4.57×10^{-8}
铬(Cr)	6.05×10^{-5}	7.04×10^{-5}	2.58×10^{-6}	3.43×10^{-6}
镍(Ni)	1.72×10^{-7}	2.03×10^{-7}	1.85×10^{-8}	1.88×10^{-8}
铅(Pb)	6.44×10^{-7}	7.23×10^{-7}	5.32×10^{-8}	5.42×10^{-8}
合计	6.25×10^{-5}	7.26×10^{-5}	3.88×10^{-6}	4.76×10^{-6}

注: a 使用平均浓度计算CR, b 使用污染物浓度95%置信上限计算CR。

3 讨 论

本研究发现天津市冬季某地铁站台 PM_{2.5} 浓度明显高于其站点所在地外环境 PM_{2.5} 浓度，达到 2.2 倍水平，与法国巴黎^[18] 等城市的研究结果一致，且地铁站台和外环境的日均 PM_{2.5} 浓度均高于我国 GB 3095 — 2012《环境空气质量标准》^[19] 中二级浓度标准。对某地铁站台和外环境空气 PM_{2.5} 中金属类金属元素成分进行比较，结果显示某地铁站台中 Sb、Mn、V、Cu、Co、Al、Cr、Pb、Ni、Fe 等元素的浓度显著高于室外，这应该与列车运行过程中车轮与轨道摩擦，进而产生含有 Fe、Mn、Cr、Cu、Ni、Pb、Sb 等金属的颗粒物有关^[20-21]。有研

究发现，由于刹车片、车轮、轨道间摩擦产生的 Fe、Sb 和 Mn 的氧化物能够占地铁内空气中细颗粒物浓度的 40%~73%^[22]。此外，Co 元素由于被应广泛用于制造磁性、耐磨和高强度合金以及一些高速钢^[23]，因此在站台内空气 PM_{2.5} 中的浓度也较高。本研究中某地铁站台 Ga、Al、Na、Mg 成分含量偏高，主要由于这些元素广泛存在于地壳中，其中 Al 为常用参比元素，Ga、Na、Mg 多来源于道路扬尘，说明地铁站台中该类细颗粒的来源主要源自室外^[24]。Pb 通常作为机动车尾气的特征标识元素，Sb 则为石油、天然气等燃烧产生的特征标识元素^[25-26]，地铁站台内该 2 种成分浓度偏高，而外环境浓度较低，可能与地铁站台内

相对密闭,空气调节主要依赖于集中空调风系统,不利于污染物的稀释和排出,容易造成污染成分蓄积有关^[27]。

由于地铁站台空气 $PM_{2.5}$ 中的多种金属类金属元素均存在毒性,因此,地铁乘车人员,尤其是长时间停留在站台内的工作人员,可能存在健康损伤^[28]。有文献报道,通过比较人群乘坐各类交通工具,发现地铁是人群接触 Fe、Mn、Cr 最多的交通工具^[29]。本研究通过人群健康风险评估,发现站台空气 $PM_{2.5}$ 中的 Mn 和 Sb 的人群非致癌风险较高,有研究者在对地铁乘车人员和工作人员细颗粒物中金属成分暴露的健康影响研究中发现,高浓度 Mn 会对暴露人群产生细胞毒性和炎症潜能,且会导致暴露人群 DNA 蛋白交联水平升高,进而影响 DNA 复制及其修复过程,另外,长期暴露在 Mn 含量较高的环境中还会影响神经系统锥体外束,出现震颤麻痹综合征^[30-31]。 $PM_{2.5}$ 中的 Sb 成分与肝细胞脂质积累指标含量呈正相关,是诱导肝细胞脂质沉积的关键因素^[32]。Co 和 Al 的人群非致癌风险虽然相对较低,但与 Mn 和 Sb 共同作用也会提高人群整体的非致癌风险,中国香港的研究学者发现, $PM_{2.5}$ 中的 Co 与 Mn、Zn 等联合作用会导致细胞活性氧(reactive oxygen species, ROS)含量增加,产生一定的细胞毒性,触发细胞凋亡^[33]。也有研究显示,地铁工作人员尿液中的 8-OHdG_{urine} 浓度与 $PM_{2.5}$ 中的 Al 成分浓度呈负相关^[34]。

在致癌危险度风险评估中发现,站台空气中 Cr 的致癌危险度相对较高,达到 10^{-5} 水平,与空气污染较重时期的外环境 Cr 危险度水平相当^[35],说明 Cr 暴露可能存在潜在的健康危害,但仍处于可接受的癌症风险水平,其次为 As,处于 10^{-6} 水平,且二者的质量浓度水平均高于我国《环境空气质量标准》中二级浓度标准。在墨西哥城、德黑兰、布拉格、多伦多和北京等地的研究发现,Cr 是当地地铁站台内 $PM_{2.5}$ 中总成分致癌危险度的主要贡献元素^[36-37]。另外,As 与 Cr 联合作用可通过氧化应激和活性氧等方式损伤 DNA,产生基因毒性,诱导肺癌和鼻咽癌的发展进程,抑制肝细胞增殖^[38-39]。

人群健康风险评价过程中产生的不确定性是由于风险评估参数和暴露量数据存在客观局限性造成的,不可避免。本研究对地铁站台和外环境空气 $PM_{2.5}$ 中金属类金属元素进行了致癌和非致癌人群健康风险评估,可能存在以下几点不确定性:(1)人群健康风险评估模型中的 RfC 、 IUR 和人群暴露参数等均引自 USEPA 的风险评估指南和综合风险信息数据库等,因此评估参数的选

择会对评价结果产生不确定性影响;(2)本项目仅采集了冬季的空气样本,由于冬季空气污染相对较重,因此会造成风险评估结果高于实际风险水平的情况;(3)地铁空气 $PM_{2.5}$ 的暴露人群包括乘车人群和地铁工作人员,本研究选择工作人员的最长暴露时间进行风险评估,会对结果产生一定偏差;(4)地铁空气和外环境 $PM_{2.5}$ 采样过程中会受到环境气流的影响,仪器采集样本的精确度也是风险评估不确定性的来源之一。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告 [EB/OL]. (2024-03-29)[2024-05-21]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/14894>.
- [2] 巫丰宏, 池艳. 地铁车站空气中可吸入颗粒物污染状况及对人群健康影响的研究进展 [J]. 当代医学, 2022, 28(13): 181-185.
- [3] Chang L, Chong WT, Yau YH, et al. An investigation of the $PM_{2.5}$ concentrations and cumulative inhaled dose during subway commutes in Changchun, China[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2024, 21(1): 733-746.
- [4] Park JH, Son YS, Kim KH. A review of traditional and advanced technologies for the removal of particulate matter in subway systems[J]. Indoor Air, 2019, 29(2): 177-191.
- [5] USEPA. Compendium method IO-3.5: determination of metals in ambient particulate matter using inductively coupled plasma/mass spectrometry (ICP/MS)[R]. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency, 1999.
- [6] USEPA. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual (Part F, supplemental guidance for inhalation risk assessment)[R]. Washington, DC: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation Environmental Protection Agency, 2009.
- [7] USEPA. Integrated risk information system[EB/OL]. [2024-05-05]. <https://www.epa.gov/iris>.
- [8] Zhou XL, Xie MM, Zhao MX, et al. Pollution characteristics and human health risks of $PM_{2.5}$ -bound heavy metals: a 3-year observation in Suzhou, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2023, 45(7): 5145-5162.
- [9] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. WS/T 777—2021 化学物质环境健康风险评估技术指南 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [10] 段小丽. 暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评估中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [11] Mohmand J, Eqani SAMAS, Fasola M, et al. Human exposure to toxic metals via contaminated dust: bio-accumulation trends and their potential risk estimation[J]. Chemosphere, 2015, 132: 142-151.
- [12] Hou SN, Zheng N, Tang L, et al. Pollution characteristics, sources, and health risk assessment of human exposure to Cu, Zn, Cd and Pb pollution in urban street dust across China between 2009 and 2018[J]. Environment International, 2019, 128: 430-437.
- [13] Yousefi H, Lak E, Mohammadi MJ, et al. Carcinogenic risk assessment among children and adult due to exposure to toxic air pollutants[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(16): 23015-23025.
- [14] Mbazima SJ. Health risk assessment of indoor and outdoor $PM_{2.5}$ -bound metal(loid)s in three residential areas downwind of an active ferromanganese smelter[J]. Air Quality, Atmosphere and Health, 2023, 16(11): 2309-2323.

- [15] Martínez Morales S, Cerón Bretón JG, Carbajal N, et al. PM_{2.5}-bound trace metals in an urban area of Northern Mexico during the COVID-19 pandemic: characterization, sources, and health risk[J]. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2023, 16(9): 1789 – 1808.
- [16] Juda-Rezler K, Zajusz-Zubek E, Reizer M, et al. Bioavailability of elements in atmospheric PM_{2.5} during winter episodes at Central Eastern European urban background site[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 245: 117993.
- [17] Aendo P, Netvichian R, Thiendedsakul P, et al. Carcinogenic risk of Pb, Cd, Ni, and Cr and critical ecological risk of Cd and Cu in soil and groundwater around the municipal solid waste open dump in central Thailand[J]. *Journal of Environmental and Public Health*, 2022, 2022: 3062215.
- [18] Raut JC, Chazette P, Fortain A. Link between aerosol optical, microphysical and chemical measurements in an underground railway station in Paris[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(4): 860 – 868.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 3095 — 2012 环境空气质量标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [20] Lu SL, Liu DY, Zhang WC, et al. Physico-chemical characterization of PM_{2.5} in the microenvironment of Shanghai subway[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 153: 543 – 552.
- [21] Cusack M, Talbot N, Ondráček J, et al. Variability of aerosols and chemical composition of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ on a platform of the Prague underground metro[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 118: 176 – 183.
- [22] 南春子, 何冠鸿, 麦婵妹. 地铁颗粒物污染现状和排除技术研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2020, 42(12): 1569 – 1574.
- [23] Ji WJ, Zhao KJ, Liu CH, et al. Spatial characteristics of fine particulate matter in subway stations: source apportionment and health risks[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 305: 119279.
- [24] 王莉, 于芹生, 黄久红, 等. 2022 年泰州市某区 PM_{2.5} 中金属元素含量测定及健康风险评价 [J]. 江苏预防医学, 2024, 35(2): 219 – 222.
- [25] 曾晨, 黄珊, 吴代赦, 等. 南昌地铁细颗粒物金属元素特征及其来源解析 [J]. 南昌大学学报 (理科版), 2021, 45(2): 168 – 175.
- [26] 杨凌霄. 济南市大气 PM_{2.5} 污染特征、来源解析及其对能见度的影响 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [27] 王凯, 张霞, 张琳, 等. 某市地铁车站 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的时空分布特征 [J]. 环境与职业医学, 2020, 37(9): 853 – 857.
- [28] 黄宇, 李荣, 崔龙, 等. 轨道交通列车内空气质量研究现状与展望 [J]. 地球环境学报, 2020, 11(4): 345 – 363.
- [29] Chillrud SN, Grass D, Ross JM, et al. Steel dust in the New York City subway system as a source of manganese, chromium, and iron exposures for transit workers[J]. *Journal of Urban Health*, 2005, 82(1): 33 – 42.
- [30] Hurley JF, Cherrie JW, Donaldson K, et al. Assessment of health effects of long-term occupational exposure to tunnel dust in the London underground[R]. Riccarton: Institute of Occupational Medicine, 2003.
- [31] Grass DS, Ross JM, Family F, et al. Airborne particulate metals in the New York City subway: a pilot study to assess the potential for health impacts[J]. *Environmental Research*, 2010, 110(1): 1 – 11.
- [32] 闫志鹏, 李舒月, 南楠, 等. PM_{2.5} 诱导肝脏脂肪变性的体外研究及其关键组分初探 [J]. 环境科学学报, 2023, 43(6): 494 – 502.
- [33] Chen XC, Cao JJ, Ward TJ, et al. Characteristics and toxicological effects of commuter exposure to black carbon and metal components of fine particles (PM_{2.5}) in Hong Kong[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 742: 140501.
- [34] Sauvain JJ, Hemmendinger M, Charreau T, et al. Metal and oxidative potential exposure through particle inhalation and oxidative stress biomarkers: a 2-week pilot prospective study among Parisian subway workers[J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 2024, 97(4): 387 – 400.
- [35] 单慧, 欧阳钊, 柯鸿阳, 等. 西北地区典型城市 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价 [J]. 中国公共卫生, 2022, 38(4): 476 – 480.
- [36] Roy D, Lyou ES, Kim J, et al. Commuters health risk associated with particulate matter exposures in subway system – globally[J]. *Building and Environment*, 2022, 216: 109036.
- [37] Zhang MY, Shao LY, Jones T, et al. Atmospheric iron particles in PM_{2.5} from a subway station, Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2022, 283: 119175.
- [38] 王星. 社区居民重金属暴露与肝脏损伤指标的关联及潜在中介效应研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [39] Lee JC, Son YO, Pratheeshkumar P, et al. Oxidative stress and metal carcinogenesis[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2012, 53(4): 742 – 757.