

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2022021101

张月, 孙雷, 朱传勇, 等. 济南市不同行业人群 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平及金属元素健康风险评估[J]. 环境化学, 2022, 41(9): 2962-2973.

ZHANG Yue, SUN Lei, ZHU Chuanyong, et al. Personal PM<sub>2.5</sub> exposure and the health risk assessment of metal elements in different occupational populations of Jinan[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (9): 2962-2973.

## 济南市不同行业人群 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平及金属元素 健康风险评估\*

张月 孙雷\*\* 朱传勇 张怡青 贾青青 李志胜 范润凝 吕翔宇

(齐鲁工业大学(山东省科学院)环境科学与工程学院, 济南, 250353)

**摘要** 为研究济南市不同行业人群的颗粒物暴露水平以及评估通过吸入颗粒物而受到的金属元素的健康风险, 本研究利用手持式气溶胶检测仪与 PM<sub>2.5</sub> 中流量采样器, 于 2021 年春季和夏季对济南市 6 类不同行业人群开展 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平研究, 分析不同微环境(学生宿舍、工厂车间、城市街道、学校大门以及住宅客厅) PM<sub>2.5</sub> 金属元素的污染特征及健康风险. 6 类人群包括大学生、铸造厂工人、餐厅员工、公交车司机、环卫工人、学校保安. 结果表明, 6 类人群的颗粒物暴露水平, 日变化均呈现明显的行业特点, 公交车司机与环卫工人的 PM<sub>2.5</sub> 平均暴露浓度达到 87.7 μg·m<sup>-3</sup> 和 79.5 μg·m<sup>-3</sup>. PM<sub>2.5</sub> 浓度在某一时段均会出现瞬时峰值的现象. 人群 PM<sub>2.5</sub> 小时暴露水平总体高于当地空气质量监测站公布数据, 车间工人与保安则高出 1 倍以上. 不同微环境下 PM<sub>2.5</sub> 中 15 种金属元素浓度与元素成分占比均略有不同. 除 Ca、Al、Mg 和 Fe 等 4 类常量元素之外, Zn、Mn、Cu 等元素占比相对较高. 部分金属如 Cd 超过我国空气质量标准浓度限值. 富集因子分析表明, Cd、Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、Sn、Sb 等元素主要受到人为源的影响, As、Mg、Ca、Mn 元素则同时受到人为源与自然源的影响. 健康风险评估表明, Cr 元素的非致癌风险和致癌风险在所有元素中最高. 环卫工人的非致癌风险与学生和保安群体的致癌风险需要引起足够重视. 本研究为科学评估不同人群的颗粒物暴露水平及重金属健康风险具有一定的指导意义, 并为科学防控颗粒物污染提供一定的理论依据.

**关键词** PM<sub>2.5</sub>, 暴露水平, 金属元素, 健康风险评估, 济南市.

## Personal PM<sub>2.5</sub> exposure and the health risk assessment of metal elements in different occupational populations of Jinan

ZHANG Yue SUN Lei\*\* ZHU Chuanyong ZHANG Yiqing JIA Qingqing  
LI Zhisheng FAN Running LYU Xiangyu

(School of Environmental Science and Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan, 250353, China)

**Abstract** Personal exposure to PM<sub>2.5</sub> and health risk assessment of metal elements in different occupational populations were investigated in the spring and summer in Jinan by using a portable monitor and a PM<sub>2.5</sub> sampler. The undergraduate student, foundryman, restaurant chefs are represented as indoor workers. Bus driver, sanitation worker and school security staff are represented as outdoor workers. We found that the exposure levels of particulate matters showed different

2022年2月11日收稿(Received: February 11, 2022).

\* 国家自然科学基金(42105104)和山东省自然科学基金(ZR2020QD060)资助.

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China(42105104) and Shandong Provincial Natural Science Foundation(ZR2020QD060).

\*\* 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: sunlei@qlu.edu.cn

occupational characteristics. The averaged PM<sub>2.5</sub> exposure concentrations of bus drivers and sanitation workers reached 87.7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and 79.5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . The PM<sub>2.5</sub> concentration showed an instantaneous peak in different microenvironments. The PM<sub>2.5</sub> exposure concentration is generally higher than the data released from air quality monitoring stations. The concentration and proportion of 15 elements of PM<sub>2.5</sub> in different microenvironments showed slightly different characteristics. In addition to the four types of constant elements (Ca, Al, Mg and Fe), trace elements of Zn, Mn, Cu account for a relatively high proportion. The concentration of Cd exceeded the standard limits in GB 3095—2012 Ambient Air Quality Standard. The enrichment factor analysis showed that Cd, Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, Sn and Sb of different microenvironment mainly came from natural sources. However As, Mg, Ca and Mn were affected by both anthropogenic and natural sources. The health risks assessment showed that the non-carcinogenic risk of Cr is the highest among all elements. We should pay more attention on the non-carcinogenic risk of sanitation workers and the carcinogenic risks of students and security staff. This study is helpful for scientific assessment of particulate matter exposure levels and heavy metal health risks in different occupational populations, and provides certain theoretical basis for scientific prevention and particulate matter pollution control.

**Keywords** PM<sub>2.5</sub>, personal exposure levels, metal elements, health risks assessment, Jinan.

近年来,随着一系列大气污染防治措施的实施,我国空气质量得到明显改善,颗粒物污染控制成效显著<sup>[1]</sup>.与此同时,由于人民环保意识的增强,对于自身受到的污染物影响愈发关心.细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)由于可以随呼吸进入人体肺部,甚至可以通过血液循环而在人体内长期聚集,从而严重影响人体健康,因此受到人们的广泛关注<sup>[2-3]</sup>.

目前,我国已在城市地区建立了相对完善的空气质量监测网络,但由于空气质量监测站只能固定监测某一地区大气环境中的污染物浓度,不能针对个体进行监测,因此,当关注单一个体或某一群体受到 PM<sub>2.5</sub> 污染的影响时,空气质量监测网络作用则不太明显.研究表明,不同室内环境中颗粒物浓度不同,并且室内室外不同环境颗粒物浓度也具有显著差别,从而导致在不同环境工作、生活的人群受到的颗粒物污染的影响不同<sup>[4-7]</sup>.因此,为更好地评估不同行业人群受到颗粒物污染的影响,需要开展更具针对性的研究.国内外针对颗粒物的个体暴露水平的研究工作主要利用手持式仪器进行个人实时测量或在特定微环境下观测颗粒物浓度<sup>[8-11]</sup>.如针对城市街道、公交车站、地铁站等不同室内外环境下特定人群的受到的颗粒物污染的暴露情况,或是针对不同年龄段人群,如儿童、成年人、老年人等展开研究<sup>[12-15]</sup>.这些研究在一定程度上增强了人们对于颗粒物暴露水平的理解,但是由于研究地域的不同以及生活习惯的差异,不同地区不同行业人群的颗粒物暴露水平仍然需要大量的研究.

PM<sub>2.5</sub> 组分复杂,其中由于某些重金属元素会影响人体中枢神经系统和免疫系统,对人体有较强的毒害作用,严重危害人体健康<sup>[2-3]</sup>.近年来,我国针对 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的污染特征、来源及健康风险等进行了大量研究<sup>[16-19]</sup>.研究表明,我国城市地区 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素总体浓度高于国外城市,部分元素超过国家空气质量标准(GB 3095—2012)二级标准和 WHO 指导值.一些重金属元素存在一定的致癌和非致癌风险,对人体健康存在着一定的危害<sup>[20-21]</sup>.目前针对不同人群的颗粒物暴露水平及其组分健康风险的评估逐渐引起重视,研究结果表明不同地区,不同人群受到的影响差异明显<sup>[22-23]</sup>.因此,准确评估不同行业人群受到的 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的健康影响,需要针对不同地区、不同人群开展更精细化的研究工作.

济南市作为华北地区中部的典型城市,其 PM<sub>2.5</sub> 污染较重.以往对济南市大气颗粒物污染水平的相关研究大多集中在污染特征、污染物组成成分及来源解析上<sup>[24-28]</sup>,对济南市不同行业人群细颗粒物暴露水平相关的研究较少,无法科学评估济南市不同人群的 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平及健康风险.因此,本研究选择济南市室内室外工作环境的人群作为研究对象,于 2021 年春季和夏季开展了济南市不同行业人群 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露水平的研究,并针对各类人群主要的生活与工作场所进行 PM<sub>2.5</sub> 中 15 种金属元素的分析,进而评估金属元素的污染特征、来源以及健康风险.以期科学防控不同人群受到的颗粒物污染提供理论依据,同时对于了解济南市不同行业人群受到的颗粒物重金属污染及其健康风险具有一定

的科学指导意义。

## 1 材料与方法(Materials and methods)

### 1.1 研究对象与采样

本研究根据不同人群的特点,选取了6组人员作为研究对象,进行单人逐日跟踪,记录不同人群所处微环境下颗粒物暴露水平。研究对象主要来自济南市城区,其中室内环境居多的有在校大学生、铸造厂车间工人和餐厅员工;室外环境为主的有学校保安、环卫工人和公交车司机。6组人员分别代表了6类群体:大学生群体、工人群体、餐饮服务业群体、普通室外工作人员、环卫工人群体、公交车司机群体等。6类群体涵盖了室内室外人群,并且与普通人群息息相关。在校大学生、餐厅工作人员及学校保安来自济南市长清区,环卫工人与公交车司机活动范围主要集中在济南市城区,工厂工人选择在济南市周边地区郊区工厂。采样方式选择单人实时跟踪采样,总采样时段为2021年春季(2021年4月20日至5月20日)和夏季(2021年7月5日至8月15日)。采样时间根据各群体特点选择,其中学生和铸造厂工人选择24 h采样。餐厅工人根据餐饮时间选择6:00—19:00进行采样,保安根据上下班时间选择8:00—21:00,公交车司机根据公交车运营时间进行采样,时间为13:00—20:00。采样期间同时收集济南市环境空气质量监测网络固定站点数据(<http://fb.sdem.org.cn:8801/AirDeploy.Web/AirQuality/MapMain.aspx>)。针对不同行业人群,选择距离最近的监测站点监测数据进行对比分析。人体颗粒物暴露浓度采用山东诺方电子科技有限公司研发的手持式气溶胶测量仪SDL511获取,该仪器基于激光检测原理开发,可实时测量PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>并将数据上传到云端。测量数据进行在线校准,颗粒物浓度分辨率0.1 μg·m<sup>-3</sup>,PM<sub>2.5</sub>测量量程为0.0—1999.9 μg·m<sup>-3</sup>,PM<sub>10</sub>测量量程为0.0—2999.9 μg·m<sup>-3</sup>。该仪器具有重量轻、测量快速、灵敏度高等优点。实验中,采样点高度尽量保持与人体头部平齐,连续采样。每天在相同时间段内进行采样,最后将数据进行多人多日合并处理。

为进一步研究不同人群所处微环境下颗粒物中重金属元素的浓度水平及其暴露风险,本研究在不同环境中放置PM<sub>2.5</sub>中流量采样器(青岛金仕达KC-120F型智能)进行PM<sub>2.5</sub>样品的采集。采样流量设为100 L·min<sup>-1</sup>,采样膜选用高纯石英滤膜(90 mm)。采样点高度距地1.5 m左右,采样地点分别选择在学生宿舍、工厂、城市街道、学校大门以及居民区住宅室内等5个微环境。采样期间各类人群活动不受影响,各微环境下共获得37个PM<sub>2.5</sub>膜样品。

### 1.2 样品处理与分析

采样前石英滤膜在马弗炉中高温煅烧(500 °C)4 h,恒温恒湿24 h后(温度20—25 °C,相对湿度40%—50%)称重,从而确定PM<sub>2.5</sub>质量。恒重后的滤膜利用5 mL HNO<sub>3</sub>和2 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,在微波消解罐中进行消解。消解后的样品经过滤定容20 mL至棕色玻璃瓶中,4 °C低温保存待测。本研究选用ICP-MS进行PM<sub>2.5</sub>中金属元素进行测定。选用仪器为Agilent 7500电感耦合等离子体质谱仪(美国安捷伦公司)。以氩气为载气,流速为1.04 L·min<sup>-1</sup>;使用内标法来消除干扰,所用内标元素包括SC、In、Ge和Bi。本次实验元素测定所选用的样品数量为37个。拟测定PM<sub>2.5</sub>中金属元素为:Fe、Al、Ca、Mg、Cu、Zn、Pb、Mn、Cr、Ni、Sn、Sb、Cd、As、Co共15种。

### 1.3 数据分析方法

#### 1.3.1 富集因子

本研究采用富集因子法判断PM<sub>2.5</sub>中金属元素的富集程度,识别元素的人为和自然来源,由于该方法简洁实用,已在大量研究中采用<sup>[18,23,29]</sup>。富集因子的计算公式如式(1):

$$EF_i = \frac{C_i/C_r}{B_i/B_r} \quad (1)$$

式中,EF<sub>*i*</sub>为待测元素*i*的富集因子,C<sub>*i*</sub>和C<sub>*r*</sub>分别为颗粒物中待测元素和参比元素的含量,单位为ng·kg<sup>-1</sup>;B<sub>*i*</sub>和B<sub>*r*</sub>分别为参比系统中待测元素和参比元素的含量。本研究参比系统选择山东省A层土壤,参比元素选择Al。一般认为,当EF<sub>*i*</sub><1时,待测元素*i*相对于参比系统未被富集,主要来源于自然来源,由土壤或岩石风化之后扬起的尘埃粒子;当EF<sub>*i*</sub>>10,表明该元素富集程度较高,主要来源于人为来

源; 当  $1 < EF \leq 10$  时, 表明该元素为重度富集元素, 既有自然来源又有人为来源<sup>[18]</sup>.

### 1.3.2 重金属健康风险评估

本研究根据美国环保署(EPA)推荐的环境健康风险评估模型对 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素通过呼吸途径引起的人体健康风险进行评估<sup>[30]</sup>.

#### (1) 暴露剂量计算

非致癌物质的日均暴露剂量用 ADD 表示, 致癌物质的终身日均暴露剂量用 LADD 表示, 二者单位均为  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ . 通过呼吸摄入的日均暴露剂量计算公式采用公式(2)估算. 综合《中国人群暴露参数手册(成人卷)》及国内外相关研究成果, 结合当地实际情况, 确定暴露参数<sup>[19,23,31-33]</sup>, 见表 1.

$$\text{ADD(LADD)} = \frac{C \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

式中,  $C$  为空气中污染物的浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $\text{IR}$  为呼吸速率 ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ), 成年男性  $15.2 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , 成年女性  $11.3 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , 儿童  $8.7 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $\text{EF}$  为暴露频率 ( $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ );  $\text{ED}$  为暴露持续时间(a);  $\text{BW}$  为体重(kg);  $\text{AT}$  为平均暴露时间(d). 为便于对比, 除学生宿舍以外, 其余群体均按照工作环境与家庭环境分别 12 h 计, 即计算时考虑个人活动情况, 以两个环境重金属浓度平均值作为污染物浓度计算. 学生在大学四年中, 宿舍每年以 265 d 计, 另外 100 d 以家庭环境计, 另外加 26 年家庭环境作为学生群体暴露水平进行评估.

表 1 暴露量公式计算参数

Table 1 Parameter of personal exposure formula

人群/微环境 Population/ microenvironment	暴露频率/( $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ ) Exposure factors	暴露年限/a Exposure duration	体重/kg Body weight Male/Female	平均暴露时间/d Average exposure time	
				致癌 Carcinogenic	非致癌 Non-carcinogenic
				学生	265
铸造厂工人	365	30	69/57	70×365	30×365
环卫工人	365	30	69/57	70×365	30×365
保安	365	30	69/57	70×365	30×365
客厅	365	30	69/57	70×365	30×365

#### (2) 非致癌和致癌风险计算

金属元素暴露的非致癌风险和致癌风险见公式(3)和(4):

$$\text{HQ} = \text{ADD}/\text{RfD} \quad (3)$$

$$\text{ILCR} = \text{LADD} \times \text{SF} \quad (4)$$

式中,  $\text{HQ}$  为单一元素的非致癌风险, 当  $\text{HQ} < 1.0$  时, 表示非致癌风险较低, 可以忽略不计; 当  $\text{HQ} > 1.0$  时, 认为存在健康风险, 需要引起重视.  $\text{RfD}$  为最大参考剂量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ .  $\text{ILCR}$  为单一元素终身增量致癌风险, 表示人群癌症发生概率.  $\text{ILCR}$  介于  $10^{-6}$ — $10^{-4}$  之间时, 认为其存在一定致癌风险;  $\text{ILCR} > 10^{-4}$  时, 认为其引起癌症的风险较高.  $\text{SF}$  (Slope factor) 为致癌斜率因子,  $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$ .  $\text{SF}$  及  $\text{RfD}$  的参数取值参考美国 EPA 及国内不同研究结果<sup>[30-33]</sup>, 见表 2.

表 2 金属元素 SF 和 RfD 取值

Table 2 SF and RfD values of selected metal elements

元素Element	性质Characteristic	斜率因子/( $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$ )Slope factor	最大参考剂量/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )Reference dose
Cu	非致癌		$4.02 \times 10^{-3}$
Zn	非致癌		$3.00 \times 10^{-1}$
Pb	非致癌		$3.50 \times 10^{-3}$
Mn	非致癌		$1.4 \times 10^{-5}$
Cr	致癌	42	$3.00 \times 10^{-5}$
Ni	致癌	1.19	$5.00 \times 10^{-2}$
Cd	致癌	8.4	$1.00 \times 10^{-4}$
As	致癌	15.1	$3.00 \times 10^{-4}$
Co	致癌	32	$3.00 \times 10^{-4}$



## 2 结果与讨论 (Results and discussion)

### 2.1 不同行业人群颗粒物暴露浓度水平

#### 2.1.1 $PM_{2.5}$ 与 $PM_{10}$ 暴露浓度特征

由于我国目前尚未针对室内空气中  $PM_{2.5}$  浓度设置相关标准,因此,本文参考《环境空气质量标准》(GB3095—2012)中  $PM_{2.5}$  的 24 h 平均浓度二级标准值  $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .  $PM_{10}$  则参考《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)中日平均值  $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

不同行业人群  $PM_{2.5}$  暴露水平如表 3 所示,采样期间,学生、餐厅工作人员、铸造厂工人及学校保安  $PM_{2.5}$  暴露浓度分别为 46.6、42.0、51.2、45.7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,均未超过国家二级标准浓度限值.公交车司机与环卫工人  $PM_{2.5}$  暴露浓度分别达到 87.7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和 79.5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,均超过了国家二级标准浓度限值.不同人群  $PM_{2.5}$  平均暴露浓度顺序是公交车司机>环卫工人>铸造厂工人>学生>保安>餐厅员工.不同行业人群  $PM_{10}$  暴露水平与  $PM_{2.5}$  暴露水平不同,仅公交车司机超过了国家空气质量二级标准浓度限值,达到 217.4  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其余行业人群浓度均未超标,其暴露浓度顺序为保安(135.0  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )>餐厅员工(131.3  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )>环卫工人(128.8  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )>学生(108.6  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )>铸造厂工人(95.9  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).可见,不同行业颗粒物暴露水平差异明显,其中公交车司机所受到的  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  污染最重,而学生、保安及餐厅员工群体所受到的  $PM_{2.5}$  污染较轻,铸造厂工人与学生受到的  $PM_{10}$  污染较轻.就公交车司机受到的颗粒物暴露水平而言,本研究结果与广东佛山接近,高于北京、南充、伦敦等地<sup>[11,34-36]</sup>.本研究不同室内环境颗粒物暴露水平差异较小,与上海某图书馆、北京某候诊大厅观测结果相近,低于郑德生等在北京观测的学校、室内公共场所等地<sup>[37-39]</sup>.不同地区颗粒物暴露水平较大的差异反映了评估不同人群颗粒物暴露水平的重要性.只有针对特定地方特定人群开展颗粒物暴露水平,才能更科学的掌握颗粒物对人体健康的影响.

表 3 不同行业人群  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  暴露质量浓度 ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )

Table 3 Personal exposure of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  concentrations in different occupational populations ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )

监测人群 Population	$PM_{2.5}$				$PM_{10}$			
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	中位值 Median	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	中位值 Median	平均值 Mean
学生	22.0	139.3	39.0	46.6	46.1	886.1	73.9	108.6
铸造厂工人	30.6	155.8	52.0	51.2	61.5	352.5	88.7	95.9
餐厅员工	36.3	176.7	51.6	42.0	71.7	579.1	118.0	131.3
保安	32.4	158.1	41.2	45.7	96.5	507.8	121.2	135.0
环卫工人	17.6	165.5	67.2	79.5	31.0	358.7	147.1	128.8
公交车司机	33.6	527.8	87.1	87.7	59.1	600.6	209.1	217.4

#### 2.1.2 颗粒物暴露浓度时间变化特征

采样期间不同行业人群颗粒物暴露浓度的日变化特征见图 1.大学生 24 h 内的  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  暴露浓度变化显著,其中白天时段明显高于夜间.在早餐、午餐与晚餐时段,暴露浓度明显升高,晚餐时段  $PM_{10}$  瞬时浓度甚至高达 886  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .此外,学生在教室上课(8:30—10:00)受到的颗粒物暴露水平( $PM_{2.5}$  62.7  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $PM_{10}$  148.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )明显高于在无人上课的教室自习(10:10—12:00)受到的颗粒物暴露值( $PM_{2.5}$  39.5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $PM_{10}$  64.9  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),说明人群密集度对人体颗粒物暴露量有一定影响.下午时段主要模拟了学生在校外商业活动区的暴露情况,因其人群流动性大且附近污染源较多,污染物浓度一直处在较高水平且呈现不规则变化,其中  $PM_{2.5}$  最低浓度为 54  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,最高可达到 137  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $PM_{10}$  最低浓度为 134  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,最高浓度达到了 326.2  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .由于大学生因上课时间不固定,故活动较分散,活动场所一般在宿舍、食堂、校园、教室和商业街等地.总体而言,学生在学校食堂及商业街活动时,其所受到的颗粒物暴露浓度较高.

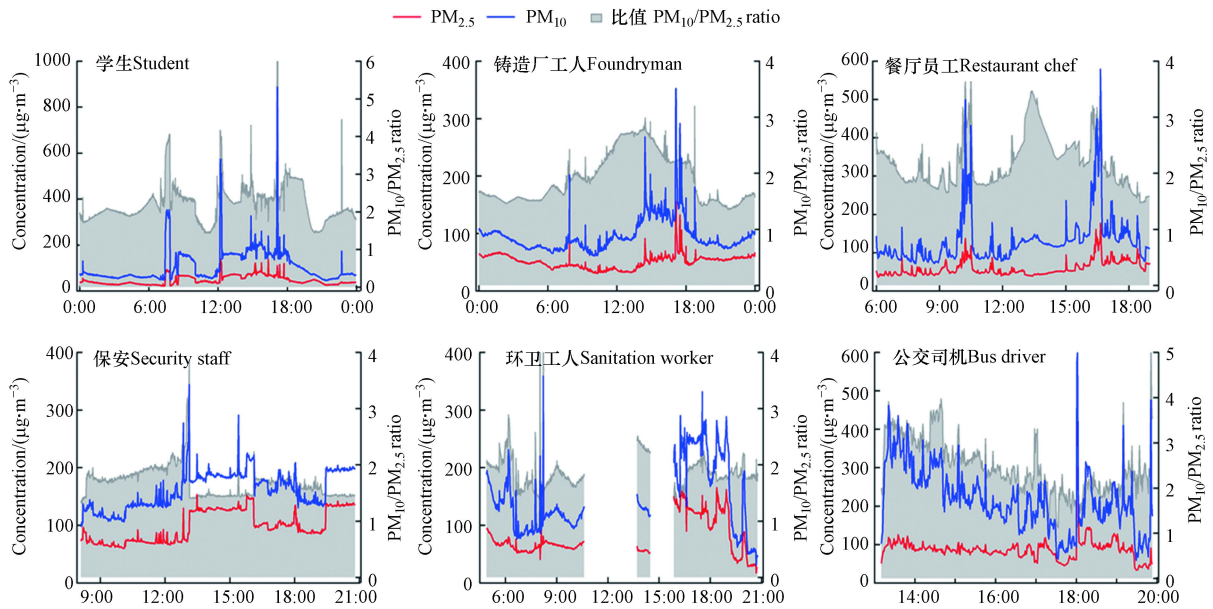


图 1 不同行业人群  $PM_{2.5}$  暴露水平日变化特征

Fig.1 Diurnal variations of personal  $PM_{2.5}$  exposure levels in different occupational populations

铸造厂工人和餐厅员工的颗粒物暴露水平均在工作强度相对较大时出现明显升高,其中铸造厂由于生产工艺的原因,下午时段工人的颗粒物暴露水平相对上午较高, $PM_{2.5}$ 与 $PM_{10}$ 浓度均出现短时间峰值, $PM_{2.5}$ 瞬时浓度达到了 $155 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $PM_{10}$ 浓度达到了 $352 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。餐厅员工的暴露水平峰值主要出现在午餐与晚餐前的集中做饭期间,主要是由于午餐和晚餐炊事油烟所致。

保安、环卫工人与公交车司机代表了3类不同的室外工作人群,3类人群颗粒物暴露水平呈现明显的行业特点。保安在工作全时段均会出现短时间峰值现象,主要是由于车辆进出时汽车尾气的影响。环卫工人在早高峰和晚高峰的工作时段,会受到持续性高浓度颗粒物的影响。中午时段车流量较大,环卫工人在此时段未进行作业,因此,中午时段未进行颗粒物浓度的测定。公交车司机受到的 $PM_{2.5}$ 暴露水平较高,但变化幅度较小,而受到的 $PM_{10}$ 暴露水平则明显较高,可见公交车司机受到的 $PM_{10}$ 影响更大。

对比 $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ 比值可见,6类人群 $PM_{10}$ 暴露浓度是 $PM_{2.5}$ 暴露浓度的2.0倍左右,短时间的波动主要是由于行业特点所致。其中学生和铸造厂工作人员在休息时段比值总体维持在一个相对较低的水平,随着学生活动和工人工作的开展,比值会出现一段时间的升高。公交车司机明显会受到汽车尾气与街道扬尘的影响,在工作时段受 $PM_{10}$ 的暴露浓度时 $PM_{2.5}$ 暴露浓度的2.5倍。由于 $PM_{2.5}$ 可以被人体吸入肺部从而影响健康,因此, $PM_{2.5}$ 暴露水平较高时段,人群需要注意个体防护。

### 2.1.3 颗粒物暴露水平与监测站数据对比

研究时段内,不同行业人群对应的附近空气质量监测站点的颗粒物浓度数据见图2。 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 变化特征与图1展示的不同人群颗粒物暴露浓度特点显著不同。以学生为例,附近监测站点的日均 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 分别为 $40.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $96.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,均略低于学生群体的个体暴露浓度。但日变化特征二者差异显著,学生群体在白天,尤其是下午时段由于活动区域的原因,其 $PM_{2.5}$ 与 $PM_{10}$ 暴露浓度显著升高,12:00—18:00时段,学生 $PM_{2.5}$ 与 $PM_{10}$ 平均暴露浓度分别为 $70.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $183.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,远高于监测站同时段的 $PM_{2.5}$ 浓度( $47.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )和 $PM_{10}$ 浓度( $100.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );而在夜间休息时,颗粒物暴露总体维持在较低浓度水平,0:00—6:00时段内,学生 $PM_{2.5}$ 暴露浓度为 $33.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $PM_{10}$ 暴露浓度为 $65.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,明显低于监测站同时段内的颗粒物浓度( $PM_{2.5}$   $39.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $PM_{10}$   $92.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。 $PM_{10}/PM_{2.5}$ 比值的变化特征也表现出显著不同。

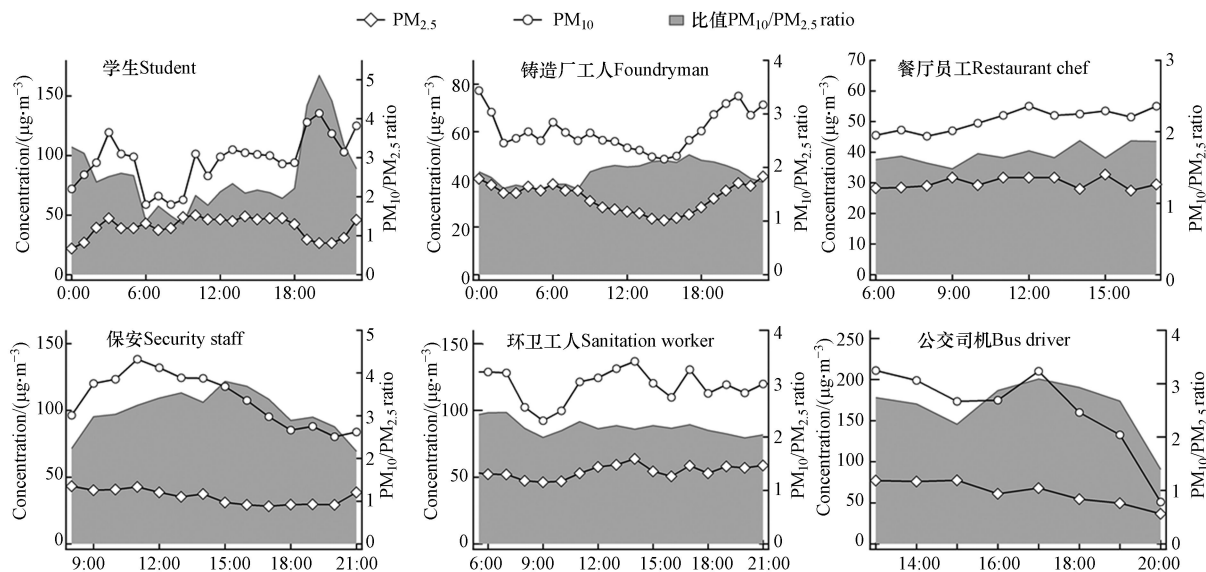


图2 不同行业人群活动场所附近空气质量监测站  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  以及  $PM_{10}/PM_{2.5}$  比值日变化特征  
**Fig.2** Diurnal variations of  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  and the ratio of  $PM_{10}/PM_{2.5}$  at air quality monitoring stations near the microenvironment of different occupational populations

通过对比图1和图2中不同行业人群颗粒物暴露水平及附近空气质量监测站监测结果,发现不同人群的颗粒物暴露水平呈现明显的行业特点. 总体而言,6类人群平均  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  暴露水平大于附近空气质量监测站相应颗粒物浓度值,其中铸造厂车间工人在工作时间(9:00—17:30)内的  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  暴露水平分别是室外空气质量监测站的1.7倍和2.1倍,是6类人群中最高的一类. 图3表明,采样时段内,绝大部分时段  $PM_{2.5}$  的个体暴露水平要高于室外监测站浓度. 车间工人、保安等群体甚至出现个体暴露水平是监测站浓度的2倍以上情况,而学生在休息时段个体暴露水平明显低于监测站浓度. 对于  $PM_{10}$  而言,车间工人和餐厅员工的个体暴露水平多次出现高于监测站浓度2倍的情况,这与其行业特点有关,车间工人生产过程中会有颗粒物的产生,而炊事油烟则会提供大量颗粒物,相反,学生在休息时段的  $PM_{10}$  暴露水平远低于监测站浓度,甚至出现环境浓度1/2的情况.

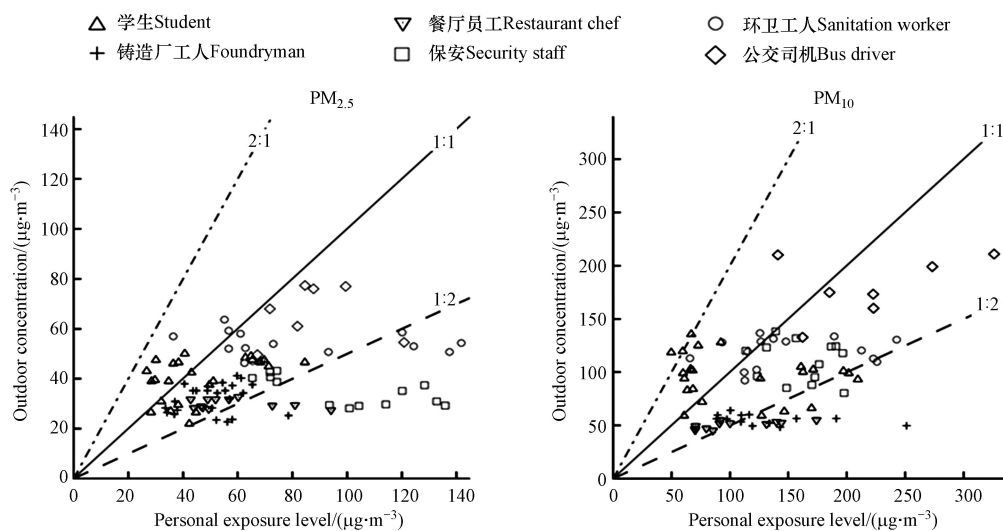


图3 不同群体颗粒物暴露水平与对应附近监测站室外颗粒物浓度对比  
 图中3条斜线分别表示监测站浓度与个体暴露水平比值为2、1、0.5时的理论分割线

**Fig.3** comparison of particulate matter concentrations between different groups and the nearby monitoring stations  
 The three slanted lines in the figures represent the theoretical dividing lines when the ratios of the particulate matter concentration of monitoring stations to the individual exposure levels reach to 2, 1 and 0.5

上述分析表明, 目前我国的空气质量监测网络虽然能够准确的反映环境空气质量情况, 但是针对不同人群, 甚至单一个体的污染物暴露浓度, 尚无法准确衡量. 因此, 在讨论空气污染物对人体健康的危害时, 不能仅通过空气质量监测网络的环境空气质量浓度来反映, 更应该进行精细化监测, 针对多种人群, 甚至个体开展全方位的污染物暴露水平的监测.

## 2.2 不同行业人群 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素分析

为进一步研究不同行业人群的颗粒物暴露水平, 本研究针对不同行业人群所处微环境开展了膜样品的采集, 并利用 ICP-MS 进行了 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的分析. 本研究选择学生宿舍、工厂车间、城市街道、学校大门作为采样地点, 分别代表学生、车间工人、环卫工人、学校保安 4 类人群的主要微环境. 厨房后厨与公交车司机由于工作性质特殊, 本研究没有进行膜样品的采集. 此外, 本研究还在居民住宅的客厅进行了样品采集, 可以代表不同行业人群非工作时间的颗粒物样品.

表 4 列出采样期间不同微环境下 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素的质量浓度. 由表 4 可知, 总体而言, 15 种金属元素在 5 类微环境下的平均浓度差别不大, 其中 Ca、Al、Mg、Fe 的 4 种金属元素占比较高, 占总测定元素的 98.3%, 并且占比均为 Ca>Al>Mg>Fe. 其余金属元素浓度占比较低, 且在不同微环境下表现出一定的差异. 以学生宿舍为例, 11 种痕量金属元素占比大小顺序依次 Zn>Cu>Cr>Ni>Mn>Pb>Sn>As>Cd>Sb>Co, 而铸造厂车间痕量元素大小顺序则为 Zn>Mn>Cr>Pb>Ni>Cu>Sb>Sn>As>Cd>Co. 11 种痕量元素中, 学生宿舍中 Zn 元素占比达到 47%; 铸造厂车间中, Zn 元素和 Mn 元素占比分别为 38% 和 28%. 不同微环境下, 元素浓度存在一定差异. 由于城市街道机动车来往较多, 其金属元素浓度相对较高. 与国内其他城市研究相比, 本研究中金属元素浓度与同处华北地区的北京、天津街道金属元素浓度接近<sup>[18,31,40]</sup>. 总体而言, 不同微环境下的金属元素浓度水平与国内室外环境浓度接近, 但部分元素超过我国空气质量标准(GB3095—2012)及 WHO 规定的浓度限值. 如 Cd 元素在宿舍, 铸造厂车间, 街道, 学校大门以及住宅客厅的测得的平均浓度分别为 1.9、1.0、0.6、1.1、0.9 ng·m<sup>-3</sup>, 均高于 GB3095—2012 浓度限值(5 ng·m<sup>-3</sup>). 而 Cr、Mn 和 Pb 元素浓度均较低, 未超过 WHO 规定的浓度限值<sup>[41]</sup>.

表 4 不同行业人群工作环境 PM<sub>2.5</sub> 中重金属组分浓度(平均值±标准差; ng·m<sup>-3</sup>)

Table 4 Concentrations of metal element components of PM<sub>2.5</sub> in different microenvironment of different occupational populations (mean±standard deviation; ng·m<sup>-3</sup>)

元素Element	学生宿舍Student dormitory	铸造厂Foundry	城市街道Urban street	学校大门School gate	住宅客厅Living room
Fe	1293±563	2968±2389	5361±5105	3553±3491	1876±2060
Al	3864±1207	2839±1434	11119±8720	6666±5344	4773±2959
Ca	8507±2818	6131±2330	19557±13789	11632±7256	10019±5337
Mg	4119±1225	2784±855	8377±5944	4137±2111	4578±1682
Cu	56.9±105	12.4±6.6	19.2±12.5	15.7±8.4	11.1±6.7
Zn	195±239	120±61.9	179±116	141±34.9	118±40.3
Pb	22.0±23.5	27.6±17.2	31.5±24.4	26.3±7.6	20.6±9.2
Mn	34.8±7.4	88.8±55.2	141±116	100±83.4	55.7±49.4
Cr	51.5±4.1	29.3±9.4	186±175	38.4±13.0	61.3±19.3
Ni	44.0±37.0	21.1±15.9	37.6±36.2	21.7±10.8	22.9±12.9
Sn	4.4±0.8	4.2±1.9	7.2±5.4	4.8±2.0	4.6±0.8
Sb	1.6±0.4	5.6±0.9	3.0±1.8	2.4±1.1	1.8±0.8
Cd	1.9±1.1	1.0±0.7	0.6±0.7	1.1±0.4	0.9±0.8
As	2.7±0.7	3.8±2.4	5.4±2.9	4.8±1.9	3.8±1.1
Co	0.7±0.3	0.6±0.4	2.1±2.0	1.5±1.4	0.7±0.8

为对比不同微环境下各种金属元素的来源差异, 本研究利用富集因子法对金属元素来源进行判断, 如图 4 所示. 根据 EF 判别标准, Cd 元素的 EF>100, 为重度富集元素, 其在水生宿舍和工厂车间中



富集因子最高,其主要受人为来源的影响. Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、Sn、Sb 等元素富集能力小于 Cd,但其 EF 仍然大于 10,也认为是主要受人为来源的影响. As、Mg、Ca、Mn 元素属于中度富集元素,既受到人为来源的影响又受到自然源的影响. 而 Co 元素以及学生宿舍中的 Fe 元素 EF<1,说明其主要受到自然源的影响.不同微环境下,同一元素的富集因子也略有差异.其中 Mg、Ca、Cu、Ni、Zn 和 Cd 元素在学生宿舍中的富集程度要高于其他微环境,这一现象表明,虽然学生宿舍是学生生活的主要场所之一,但由于空间较小且相对封闭,另外不同学生的生活习惯各异,会引入多种危害的金属元素,因此,学生宿舍的重金属富集程度相对较高.工厂车间中的 Fe、Mn、Pb 和 Sn 元素富集程度相对其他微环境较高,表明工厂车间生产过程中会有相应的金属元素进入室内空气环境之中,存在一定的潜在风险.

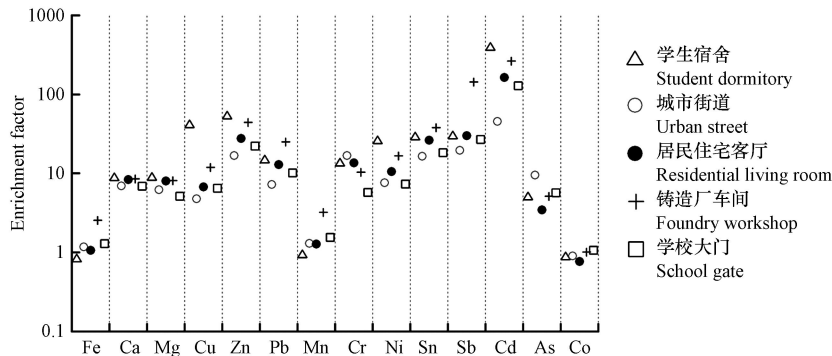


图 4 不同微环境下 PM<sub>2.5</sub> 金属元素富集因子(EFs)值

Fig.4 Enrichment factors (Efs) of PM<sub>2.5</sub> metal elements in different microenvironments

### 2.3 不同人群健康风险评估

应用美国 EPA 推荐的健康风险评估模型,并结合当地人群特点,对不同人群工作与生活环境的 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素的健康风险进行评价.本研究仅针对成年男性和成年女性通过呼吸吸入的重金属进行健康评价.此外,为便于比较,除学生群体外,不同行业人群均将工作环境与居住环境时间比为 1:1 处理,学生群体在校期间以 24 h 宿舍环境,不在校期间以 24 h 居住环境处理.不同行业人群的非致癌风险与致癌风险如表 5 所示.

表 5 有毒金属对不同行业人群的非致癌风险与致癌风险

Table 5 Non-carcinogenic risks and carcinogenic risks of toxic metal elements to people in different occupational populations

健康风险 Health risks	元素 Element	男性 Male				女性 Female			
		铸造工人 Foundryman	环卫工人 Sanitation worker	保安 Security staff	学生 Student	铸造工人 Foundryman	环卫工人 Sanitation worker	保安 Security staff	学生 Student
非致癌风险 Non-carcinogenic risks	Cu	$6.3 \times 10^{-4}$	$8.1 \times 10^{-4}$	$7.2 \times 10^{-4}$	$8.2 \times 10^{-4}$	$5.6 \times 10^{-4}$	$7.3 \times 10^{-4}$	$6.4 \times 10^{-4}$	$7.3 \times 10^{-4}$
	Zn	$4.8 \times 10^{-5}$	$7.0 \times 10^{-5}$	$5.6 \times 10^{-5}$	$8.9 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-5}$	$6.3 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-5}$	$8.0 \times 10^{-5}$
	Pb	$1.2 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$
	Mn	$3.6 \times 10^{-2}$	$5.5 \times 10^{-2}$	$4.1 \times 10^{-2}$	$3.7 \times 10^{-2}$	$3.3 \times 10^{-2}$	$5.0 \times 10^{-2}$	$3.7 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^{-2}$
	Cr	0.15	0.72	0.18	0.42	0.13	0.65	0.16	0.37
	Ni	$6.9 \times 10^{-5}$	$10.6 \times 10^{-5}$	$7.1 \times 10^{-5}$	$9.8 \times 10^{-5}$	$6.2 \times 10^{-5}$	$9.5 \times 10^{-5}$	$6.4 \times 10^{-5}$	$8.8 \times 10^{-5}$
	Cd	$1.3 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-2}$	$0.3 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$1.9 \times 10^{-2}$
	As	$5.2 \times 10^{-3}$	$5.8 \times 10^{-3}$	$5.6 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-3}$	$4.7 \times 10^{-3}$	$5.2 \times 10^{-3}$	$5.1 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-3}$
Co	$4.0 \times 10^{-3}$	$4.6 \times 10^{-3}$	$4.4 \times 10^{-3}$	$0.5 \times 10^{-3}$	$3.6 \times 10^{-3}$	$4.1 \times 10^{-3}$	$3.9 \times 10^{-3}$	$0.5 \times 10^{-3}$	
致癌风险 carcinogenic risks	Cr	$2.0 \times 10^{-5}$	$8.3 \times 10^{-6}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-5}$	$7.5 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-4}$
	Ni	$4.9 \times 10^{-7}$	$8.1 \times 10^{-8}$	$1.9 \times 10^{-6}$	$2.5 \times 10^{-6}$	$4.3 \times 10^{-7}$	$7.3 \times 10^{-8}$	$1.7 \times 10^{-6}$	$2.2 \times 10^{-6}$
	Cd	$1.5 \times 10^{-7}$	$2.6 \times 10^{-8}$	$6.2 \times 10^{-7}$	$7.9 \times 10^{-7}$	$1.3 \times 10^{-7}$	$2.3 \times 10^{-8}$	$5.6 \times 10^{-7}$	$7.1 \times 10^{-7}$
	As	$3.7 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-7}$	$4.7 \times 10^{-6}$	$5.3 \times 10^{-6}$	$3.4 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$4.2 \times 10^{-6}$	$4.7 \times 10^{-6}$
	Co	$2.1 \times 10^{-7}$	$7.7 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-6}$	$2.1 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$6.9 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-6}$	$1.9 \times 10^{-6}$

分析结果显示,不同行业人群所计算重金属非致癌风险 HQ 值均小于 1,表明其非致癌风险可忽略。在所有元素中,Cr 的非致癌风险数值接近于 1,是所有测试元素中最高的,表明其非致癌风险最高,需要引起足够重视。在 4 类人群中,环卫工人受到的非致癌风险最高,Pb、Mn、Cr、Ni、As 以及 Co 的非致癌风险均高于其他人群,而学生群体中 Cu、Zn 和 Pb 元素的非致癌风险最高。4 类人群男性群体受到的健康影响均高于女性。对于致癌的几种重金属,Cr 的对于保安和学生致癌风险数值均大于  $1 \times 10^{-4}$ ,致癌风险较大。对于车间工人和环卫工人也具有一定的致癌风险。Ni、As 和 Co 元素均对保安和学生具有一定的致癌风险,而对于车间工人和环卫工人不具备致癌风险。综上所述,4 类人群中,学生在 4 类人群中所受到的致癌风险最高,可见,学生宿舍和家庭环境的致癌性重金属需要引起足够重视。相比于北京城区不同人群健康风险,本研究显示的重金属风险更高<sup>[23]</sup>。需要注意的是,本研究仅采用了 2021 年春季和夏季的不同微环境下 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素浓度进行健康风险的评估,具有较大的不确定性。其不确定性来源主要有:PM<sub>2.5</sub> 具有较为明显的季节与年际变化特征,短期的观测结果评估的健康风险可能与长期实际健康风险具有很大不同;本研究仅从金属元素浓度角度评估了健康风险,无法全面体现金属元素的危害,可能会低估金属元素的健康风险。但本研究为研究不同行业人群颗粒物暴露水平及健康风险提供了科学的研究思路和较为可行的研究方法。为更科学地评估有毒金属元素的健康风险,需要进一步开展常态化、精细化研究。

### 3 结论(Conclusion)

(1) 采样期间,不同行业人群 PM<sub>2.5</sub> 暴露浓度顺序为公交车司机>环卫工人>铸造厂工人>学生>保安>餐厅员工,其中公交车司机与环卫工人暴露浓度超过国家二级标准;PM<sub>10</sub> 暴露浓度顺序为保安>餐厅员工>环卫工人>学生>铸造厂工人,均未超过国家二级标准。不同行业人群颗粒物暴露水平的日变化特征呈现明显的行业特点。室内工作人群颗粒物暴露浓度与各行业活动密切相关;室外工作人群则明显受到室外环境的影响,在人群密集或交通拥堵时会受到瞬时高浓度颗粒物的影响。

(2) 不同行业人群颗粒物暴露水平总体高于室外环境监测站监测的颗粒物浓度,其中铸造厂车间工人在工作时间的 PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 暴露水平是室外空气质量监测站的 1.7 倍和 2.1 倍。对比同一时间人群与监测站的颗粒物小时均值浓度,发现大部分时段不同行业人群颗粒物暴露浓度明显高于监测站浓度,并且车间工人、保安等群体的暴露浓度比监测站观测浓度高出一倍以上。

(3) 5 种不同微环境下,PM<sub>2.5</sub> 中金属元素浓度接近,且与国内其他城市研究结果相近。但部分重金属浓度高于我国空气质量标准或 WHO 规定的浓度限值。富集因子表明,Cd 为重度富集元素,其中在学生宿舍与工厂中最高,其人为源影响最大。而 Cu、Zn、Pb 等元素属于中度富集元素,受到自然与人为源的共同影响。4 种微环境比较,学生宿舍多种金属元素富集程度高于其他微环境。

(4) 不同微环境 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的非致癌风险可以忽略,但 Cr 的非致癌风险接近于 1。Cr 对于保安和学生群体的致癌风险也较高,对车间工人和环卫工人也具有一定致癌风险,应当引起足够重视。Ni、As 和 Co 元素则对保安和学生具有一定的致癌风险。总体而言,环卫工人所受非致癌风险最大,保安和学生则受到的致癌风险最大,均需要引起足够重视。

(5) 目前的空气质量监测网络仅能够反映环境空气质量,无法用于指导不同行业人群受到的颗粒物的影响,更无法准确评估颗粒物对人体健康的危害。因此,需要进行更精细化的观测,针对不同个体进行实时跟踪的暴露水平评估。本研究的几类人群表明,不同行业人群所受到的重金属污染具有一定的差异性,尤其是考虑到健康风险时,部分人群需要格外重视。

#### 参考文献 (References)

- [1] ZHAI S X, JACOB D J, WANG X, et al. Fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) trends in China, 2013–2018: Separating contributions from anthropogenic emissions and meteorology [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(16): 11031–11041.
- [2] KAUR S, NIEUWENHUIJSEN M J. Determinants of personal exposure to PM<sub>2.5</sub>, ultrafine particle counts, and CO in a transport microenvironment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(13): 4737–4743.

- [ 3 ] VALAVANIDIS A, FIOTAKIS K, VLACHOGIANNI T. Airborne particulate matter and human health: Toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 2008, 26(4): 339-362.
- [ 4 ] 许悦, 王可, 刘雪梅, 等. 室内外PM<sub>2.5</sub>中金属元素的污染特征及来源 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(4): 1257-1264.  
XU Y, WANG K, LIU X M, et al. Pollution characteristics and sources of metal elements in indoor and outdoor PM<sub>2.5</sub> [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(4): 1257-1264(in Chinese).
- [ 5 ] LI X Y, CLARK S, FLOESS E, et al. Personal exposure to PM<sub>2.5</sub> of indoor and outdoor origin in two neighboring Chinese communities with contrasting household fuel use patterns [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 800: 149421.
- [ 6 ] FANG B, ZENG H, ZHANG L, et al. Toxic metals in outdoor/indoor airborne PM<sub>2.5</sub> in port city of Northern, China: Characteristics, sources, and personal exposure risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 279: 116937.
- [ 7 ] 冉铮, 杨柳, 韩坤, 等. 2012—2019年天津市公交站微环境空气质量改善 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(10): 4549-4555.  
RAN Z, YANG L, HAN K, et al. Improvement of microenvironmental air quality in Tianjin bus stations from 2012 to 2019 [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(10): 4549-4555(in Chinese).
- [ 8 ] 柯钊跃, 王佳, 郑君瑜, 等. 广州市学龄儿童在校期间PM<sub>2.5</sub>暴露水平评价 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31(10): 1618-1624.  
KE Z Y, WANG J, ZHENG J Y, et al. PM<sub>2.5</sub> exposure assessment of school children at a primary school in Guangzhou, China [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(10): 1618-1624(in Chinese).
- [ 9 ] 邓芙蓉, 王欣, 苏会娟, 等. 北京市某城区儿童大气PM<sub>2.5</sub>个体暴露水平及影响因素研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2009, 26(9): 762-765.  
DENG F R, WANG X, SU H J, et al. Personal exposure to PM<sub>2.5</sub> of children living near traffic road and the influencing factors in Beijing [J]. *Journal of Environment and Health*, 2009, 26(9): 762-765(in Chinese).
- [ 10 ] STEINLE S, REIS S, SABEL C E, et al. Personal exposure monitoring of PM<sub>2.5</sub> in indoor and outdoor microenvironments [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 508: 383-394.
- [ 11 ] 李友平, 范忠雨, 李坤, 等. 不同出行方式PM<sub>2.5</sub>个体暴露及其影响因素 [J]. *环境化学*, 2015, 34(8): 1408-1416.  
LI Y P, FAN Z Y, LI K, et al. Commuter exposure to PM<sub>2.5</sub> and its influencing factors in different commuting modes [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(8): 1408-1416(in Chinese).
- [ 12 ] LIU M, GUO W T, CAI Y Y, et al. Personal exposure to fine particulate matter and renal function in children: A panel study [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115129.
- [ 13 ] CHEN X C, CHUANG H C, WARD T J, et al. Indoor, outdoor, and personal exposure to PM<sub>2.5</sub> and their bioreactivity among healthy residents of Hong Kong [J]. *Environmental Research*, 2020, 188: 109780.
- [ 14 ] LIN C, HU D Y, JIA X, et al. The relationship between personal exposure and ambient PM<sub>2.5</sub> and black carbon in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 737: 139801.
- [ 15 ] LI Y Q, XU H M, WANG J H, et al. Personal exposure to PM<sub>2.5</sub>-bound organic species from domestic solid fuel combustion in rural Guanzhong Basin, China: Characteristics and health implication [J]. *Chemosphere*, 2019, 227: 53-62.
- [ 16 ] LI F, YAN J J, WEI Y C, et al. PM<sub>2.5</sub>-bound heavy metals from the major cities in China: Spatiotemporal distribution, fuzzy exposure assessment and health risk management [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 124967.
- [ 17 ] 何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 等. 郑州市某生活区大气PM<sub>2.5</sub>中重金属污染特征及生态、健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2019, 40(11): 4774-4782.  
HE R D, ZHANG Y S, CHEN Y Y, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological and health risk assessment of atmospheric PM<sub>2.5</sub> in a living area of Zhengzhou City [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11): 4774-4782(in Chinese).
- [ 18 ] 胡月琪, 郭建辉, 张超, 等. 北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险 [J]. *环境科学*, 2019, 40(9): 3924-3934.  
HU Y Q, GUO J H, ZHANG C, et al. Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in road dust in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 3924-3934(in Chinese).
- [ 19 ] 徐映如, 凌利民, 沈俊毅, 等. 上海市虹口区PM<sub>2.5</sub>中重金属和类重金属污染特征及健康风险评价 [J]. *职业与健康*, 2021, 37(15): 2100-2105.  
XU Y R, LING L M, SHEN J Y, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals and metalloids in atmospheric PM<sub>2.5</sub> in Hongkou District of Shanghai [J]. *Occupation and Health*, 2021, 37(15): 2100-2105(in Chinese).
- [ 20 ] NIU Y Y, WANG F, LIU S M, et al. Source analysis of heavy metal elements of PM<sub>2.5</sub> in canteen in a university in winter [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 244: 117879.
- [ 21 ] LI P H, YU J, BI C L, et al. Health risk assessment for highway toll station workers exposed to PM<sub>2.5</sub>-bound heavy metals [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, 10(4): 1024-1030.
- [ 22 ] WANG F, ZHOU Y Y, MENG D, et al. Heavy metal characteristics and health risk assessment of PM<sub>2.5</sub> in three residential homes during winter in Nanjing, China [J]. *Building and Environment*, 2018, 143: 339-348.
- [ 23 ] 刘建伟, 晁思宏, 陈艳姣, 等. 北京市不同年龄人群PM<sub>2.5</sub>携带重金属的健康风险 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(4): 1540-1549.

- LIU J W, CHAO S H, CHEN Y J, et al. Health risk of PM<sub>2.5</sub>-bound heavy metals for different age population in Beijing, China [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(4): 1540-1549(in Chinese).
- [24] 刘素萍, 肖冻, 黄居梅, 等. 2014—2017年济南市城区细颗粒物中致癌金属元素季节性特征及来源分析 [J]. 预防医学论坛, 2019, 25(3): 226-228,231.
- LIU S P, XIAO D, HUANG J M, et al. PM<sub>2.5</sub> Analysis on seasonal variation and source analysis of carcinogenic heavy metals in PM<sub>2.5</sub>, Jinan city, 2014-2017 [J]. *Preventive Medicine Tribune*, 2019, 25(3): 226-228,231(in Chinese).
- [25] 张晓凯, 于蕾, 孙苗苗, 等. 济南市春季大气中PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>颗粒物分布状态及元素分析 [J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(25): 278-285.
- ZHANG X K, YU L, SUN M M, et al. Distribution and elemental analysis of particulate matter PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> in the atmosphere of spring in Jinan City [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(25): 278-285(in Chinese).
- [26] 孙湛, 刘素萍, 张谊, 等. 济南市PM<sub>2.5</sub>中金属及类金属元素季节性变化及相关性分析 [J]. *环境卫生学杂志*, 2017, 7(5): 403-407.
- SUN Z, LIU S P, ZHANG Y, et al. Seasonal variation and correlation of metals and metalloids elements in PM<sub>2.5</sub> in Jinan City [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2017, 7(5): 403-407(in Chinese).
- [27] CHENG M T, TANG G Q, LV B, et al. Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> and visibility in Jinan, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 102: 207-215.
- [28] LI Y Y, YANG L X, CHEN X F, et al. Indoor/outdoor relationships, sources and cancer risk assessment of NPAHs and OPAHs in PM<sub>2.5</sub> at urban and suburban hotels in Jinan, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 182: 325-334.
- [29] 张伟, 姬亚芹, 张军, 等. 辽宁省典型城市道路尘PM<sub>2.5</sub>成分谱研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(2): 412-417.
- ZHANG W, JI Y Q, ZHANG J, et al. Study on the road dust source profile of PM<sub>2.5</sub> in Liaoning Province typical cities [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(2): 412-417(in Chinese).
- [30] U. S. EPA. Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report). U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-09/052F, 2011[R]. [2022-03-05]. <https://cfpub.epa.gov/ncea/efp/recordisplay.cfm?deid=236252>.
- [31] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population[M]. Beijing, China Environmental Science Press, 2013(in Chinese).
- [32] US EPA. Integrated Risk Information System[R]. [2022-03-05]. <http://www.epa.gov/iris/>.
- [33] GAO P, LEI T T, JIA L M, et al. Exposure and health risk assessment of PM<sub>2.5</sub>-bound trace metals during winter in university campus in Northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 628-636.
- [34] WU D L, LIN M, CHAN C Y, et al. Influences of commuting mode, air conditioning mode and meteorological parameters on fine particle (PM<sub>2.5</sub>) exposure levels in traffic microenvironments [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, 13(2): 709-720.
- [35] LI T T, BAI Y H, LIU Z R, et al. Air quality in passenger cars of the ground railway transit system in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 367(1): 89-95.
- [36] KAUR S, NIEUWENHUIJSEN M, COLVILE R. Personal exposure of street canyon intersection users to PM<sub>2.5</sub>, ultrafine particle counts and carbon monoxide in Central London, UK [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(20): 3629-3641.
- [37] 项琳琳, 刘东, 左鑫. 上海市五类公共建筑室内PM<sub>2.5</sub>浓度的实测研究 [J]. *建筑热能通风空调*, 2016, 35(5): 6-11.
- XIANG L L, LIU D, ZUO X. Test study on PM<sub>2.5</sub> concentration distribution and influence factors of five types of public buildings in Shanghai [J]. *Building Energy & Environment*, 2016, 35(5): 6-11(in Chinese).
- [38] 崔小波, 牛丕业, 郭伟, 等. 北京市10家医院室内空气PM<sub>2.5</sub>监测报告 [J]. *心肺血管病杂志*, 2011, 30(1): 67-70.
- CUI X B, NIU P Y, GUO W, et al. Indoor air concentrations of PM<sub>2.5</sub> in 10 hospitals in Beijing [J]. *Journal of Cardiovascular and Pulmonary Diseases*, 2011, 30(1): 67-70(in Chinese).
- [39] 郑德生, 滕克强, 冯月明, 等. 不同场所室内外PM<sub>2.5</sub>浓度水平及其气象特征研究 [J]. *中国公共卫生管理*, 2017, 33(1): 28-31.
- ZHENG D S, TENG K Q, FENG Y M, et al. Research on level of PM<sub>2.5</sub> fine particles concentration and meteorological characteristics in different places [J]. *Chinese Journal of Public Health Management*, 2017, 33(1): 28-31(in Chinese).
- [40] 李风华, 吴琳, 张静, 等. 典型道路路边空气颗粒物及无机元素特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(7): 2460-2469.
- LI F H, WU L, ZHANG J, et al. Characteristic analysis of inorganic elements in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at urban roadside environment [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(7): 2460-2469(in Chinese).
- [41] World Health Organization. Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide [M]. *World Health Organization. Regional Office for Europe*, 2006, <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107823>.