

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2023083004

CSTR:32061.14.hjhx.2023083004

褚旭, 陈慧明, 姚晓红, 等. 地下车库 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及重金属健康风险评估[J]. 环境化学, 2025, 44(2): 558-566.

CHU Xu, CHEN Huiming, YAO Xiaohong, et al. Pollution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and health risk assessment of heavy metals in underground garage[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44 (2): 558-566.

## 地下车库 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及重金属健康风险评估\*

褚旭<sup>1</sup> 陈慧明<sup>1</sup> 姚晓红<sup>1,2</sup> 张健<sup>1</sup> 龙超<sup>1\*\*</sup>

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京, 210023; 2. 江苏开放大学环境生态学院, 南京, 210019)

**摘要** 地下车库广泛应用于现代建筑中, 其内部的颗粒物污染情况及其健康风险值得深入研究. 本研究以南京某地下车库为研究对象, 监测了地下车库空气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 污染情况, 分析了车库内 PM<sub>2.5</sub> 及其中重金属元素 (Pb、Cr、Cu、As、Ni、Cd、Co、Mn) 的浓度变化规律和时空分布特征, 评价了车库 PM<sub>2.5</sub> 中重金属对工作人员和停车用户两种人群的吸入健康风险. 研究表明, 车库日平均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度为 (42.12±13.64) μg·m<sup>-3</sup>, 浓度变化范围为 26.62—66.70 μg·m<sup>-3</sup>; 五一假期地下车库 PM<sub>2.5</sub> 污染相对较小, 工作日和休息日的平均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度区别不大; 车库颗粒物污染贡献: 环境背景>车库使用频率>车库通风问题. 车库 PM<sub>2.5</sub> 中测定重金属的平均总质量浓度为 0.082 μg·m<sup>-3</sup>, 决定非致癌和致癌风险的重金属分别为 Mn 和 Cr. 车库重金属非致癌风险处于安全水平 (HI<1), 致癌风险对工作人员达到高概率水平 (ILCR<sub>total</sub>=1.47×10<sup>-5</sup>), 对停车用户也不应完全忽略.

**关键词** 地下车库, PM<sub>2.5</sub>, 重金属, 健康风险评估.

**中图分类号** X-1; O6 **文献标识码** A

## Pollution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and health risk assessment of heavy metals in underground garage

CHU Xu<sup>1</sup> CHEN Huiming<sup>1</sup> YAO Xiaohong<sup>1,2</sup> ZHANG Jian<sup>1</sup> LONG Chao<sup>1\*\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 2. School of Environment and Ecology, Jiangsu Open University, Nanjing, 210019, China)

**Abstract** The particulate matter pollution inside underground garages commonly used in modern buildings and its related health risks deserve in-depth research. This study took an underground garage in Nanjing as the research subject, monitored the air pollution of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) within the garage, analyzed the concentration variations and spatiotemporal distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> as well as its heavy metal elements (Pb, Cr, Cu, As, Ni, Cd, Co, Mn), and evaluated the inhalation health risks of heavy metals in the garage PM<sub>2.5</sub> to both workers and parking users. The results show that the overall daily mean mass concentration of PM<sub>2.5</sub> in the garage was (42.12±13.64) μg·m<sup>-3</sup>, falling within the range of 26.62 to 66.70 μg·m<sup>-3</sup>. Notably, the levels of PM<sub>2.5</sub> pollution in the underground garage during the May Day holiday test were relatively low, and there

2023年8月20日收稿(Received: August 20, 2023).

\* 江苏省自然科学基金项目(BK20220786), 江苏省高等学校自然科学基金(21KJD610002)和污染控制与资源化研究国家重点实验室开放基金(PCRRF21030)资助.

**Supported by** Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20220786), Universities Natural Science Foundation of Jiangsu Province (21KJD610002) and Open Foundation of State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse (PCRRF21030).

\*\* 通信联系人 **Corresponding author**, Tel: 025-89680380, E-mail: [clong@nju.edu.cn](mailto:clong@nju.edu.cn)

was no significant difference in the average PM<sub>2.5</sub> mass concentration between working days and rest days. The relative contribution to garage particle pollution was as follows: environmental background > garage use frequency > garage ventilation issues. The mean total mass concentration of heavy metals detected in PM<sub>2.5</sub> within the garage was 0.082 μg·m<sup>-3</sup>. Notably, Cr and Mn were the specific heavy metals associated with carcinogenic and non-carcinogenic risks, respectively. The non-carcinogenic risks posed by heavy metals within the garage remained within safe levels (HI<1). Conversely, the carcinogenic risks reached a high probability level (ILCR<sub>total</sub>=1.47×10<sup>-5</sup>) and warrant careful consideration for workers, and it should not be entirely ignored for users.

**Keywords** underground garage, PM<sub>2.5</sub>, heavy metals, health risk assessment.

近年来,我国城市规模不断发展扩大,城市机动车保有量逐年增加,地上空间不断缩小.地下车库作为城市重要的停车场所,其使用频率不断上升.然而,地下车库在解决停车需求、缓解城市空间紧张度的同时,也带来了一系列环境污染问题.汽车尾气排放是造成城市空气污染的重要污染源,而地下车库中汽车来往频繁,且地下车库空间结构普遍为封闭半封闭性,加剧了地下车库空气污染的风险.汽车尾气主要排放一氧化碳、氮氧化物、挥发性有机物、颗粒物等污染物质,其中细颗粒物(fine particulate matter, PM<sub>2.5</sub>)可在空气中漂浮多天,长期暴露于高水平 PM<sub>2.5</sub> 会增加罹患癌症的风险;同时,其中附着的一些重金属元素,具有难降解、高生物亲和力、高毒性等特点,被人体吸入、摄食后会对呼吸系统、心血管系统造成影响<sup>[1-2]</sup>.细颗粒物污染不仅会影响空气质量,还会对水体、土壤等生态系统造成严重影响,破坏生态环境<sup>[3]</sup>.

目前,国内外针对地下车库 PM<sub>2.5</sub> 及重金属污染展开了一定的研究. Li 等<sup>[4]</sup> 在 2011 年研究了武汉某地下车库的颗粒物污染情况,并检测 PM<sub>10</sub> 颗粒物样品中的 Fe、Mn、Zn、Pb、Cu 等元素,结果发现车库出口相比入口,PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 污染更严重,且 PM<sub>10</sub> 颗粒物中最丰富的元素是 Fe. Liu 等<sup>[5]</sup> 于 2019 年以保定市 8 个居民区为研究对象,定量评价了自然通风地下车库工作日颗粒物(PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub>)、CO<sub>2</sub> 和 TVOC 浓度及其与交通量的关系.结果表明,地下车库中 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度分别略高于和显著高于周边环境;地下车库中 PM<sub>10</sub> 和 TVOC 浓度与交通流量均呈极显著相关( $P < 0.01$ ),PM<sub>2.5</sub> 浓度与环境浓度普遍呈极显著相关( $P < 0.01$ ). 2013 年,Obaidullah 等<sup>[6]</sup> 比较了比利时 3 个不同的封闭式停车场和两条街道的颗粒物污染情况,发现车库中的颗粒物浓度总体上显著高于街道浓度,同时 PM<sub>2.5</sub> 浓度超过世卫组织(WHO)和美国环保署(US EPA)推荐的 24 h 参考值,PM<sub>10</sub> 浓度也超过了 WHO 和欧盟(EU)准则.

另一方面,国内外也展开了很多针对颗粒物中重金属的风险评价研究,其中大部分采用了 US EPA 颁布的风险评价模型<sup>[7-10]</sup>;但目前鲜有针对地下车库这一特定环境颗粒物重金属健康风险的研究.鉴于此,本研究旨在监测地下车库微环境空间的颗粒物污染状况,了解车库空气颗粒物的时空分布特性及重金属组成成分的特征,同时参考 US EPA 颁布的健康风险评估模型,针对地下车库工作人员和停车用户确定不同的污染物暴露模型参数并进行健康风险评估,以期为地下车库空间的大气污染控制提供科学依据和理论支持.

## 1 材料与方法(Materials and methods)

### 1.1 样品采集

本研究采样点位于南京大学仙林校区扬州楼北楼停车场,地下车库占地 13574 m<sup>2</sup>,设计停车位 249 个.车库设有 1 个车辆入口、1 个车辆出口和 8 个战时人防通道,车库内机械通风系统未运行.车库主要为校内教职工通勤所使用;车库内有 6 个工作岗位,分别位于车库出入口、车库西南角及东北角及车库中心两侧,工作人员会经常性地不同岗位交替站岗工作,工作日每日工作 8 h,且岗亭中设有办公及休息区域,可以认为工作人员 8 h 均处在车库环境中.本研究采样点布设原则参考《环境空气质量监测点位布设技术规范(试行)》(HJ 664—2013)<sup>[11]</sup>,水平方向上选择车库出入口、车库离入口较远

的内部(通风死角)、车库中部(核心区)等位置;垂直方向上在人体呼吸区高度(距离地面 1.5 m 高度)采样,以供后续健康风险评价使用.采样车库位置及具体采样点如图 1 所示.

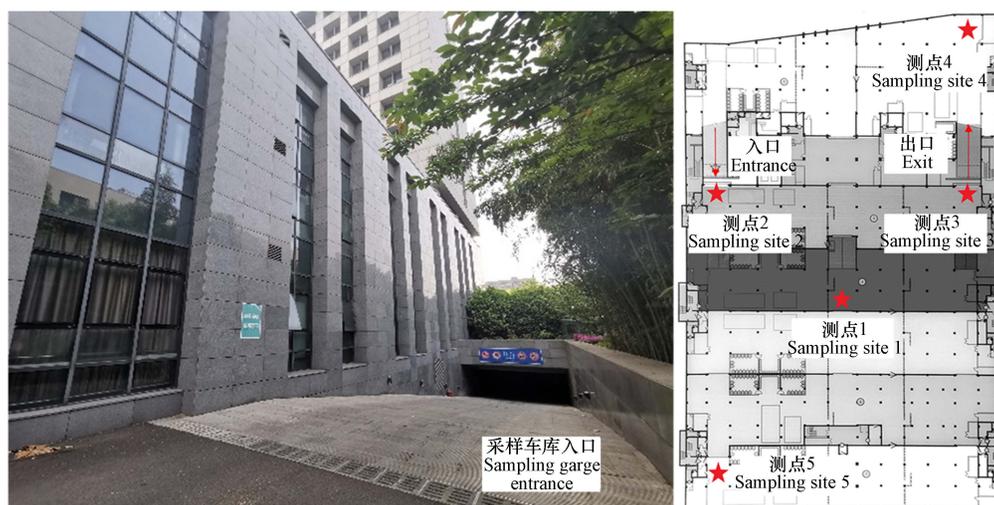


图 1 采样车库位置及具体采样点示意图

Fig.1 Schematic diagram of the location of the sampling garage and specific sampling sites

本研究采样时间为 2023 年 3 月—2023 年 5 月,采样质量保证及控制方法参照《环境空气质量手工监测技术规范》(HJ 194—2017)<sup>[12]</sup>中滤膜采样法的相关要求进行.采样期间每组采样 2 次,其中 4 组分别在工作日(周一至周五)和休息日(周六至周日)各采样 1 次;另有两组对五一节假日及进行特别监测,节假日按休息日计、调休周末按工作日计.通过 12 次采样,得到共 60 份有效实验样本.使用搭载 PM<sub>2.5</sub> 大气颗粒物切割器(崂应)的中流量智能 TSP 采样器(崂应 2030A 型)及 90 mm 玻璃纤维滤膜(崂应)采集颗粒物样品,每次采样采集 5 个点位,设置采样流量为 100 L·min<sup>-1</sup>,采样时间 24 h.颗粒物采样时的气温、大气压数据来自颗粒物采样器;用于对比分析的环境背景 PM<sub>2.5</sub> 浓度来自中国空气质量在线监测分析平台的南京空气质量指数日历史数据<sup>[13]</sup>.

## 1.2 样品处理与分析

试样制备方法参考《空气和废气 颗粒物中金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》(HJ 777—2015)<sup>[14]</sup>进行.本实验使用 PQ9000 电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, 德国 Analytik Jena 公司)测定 PM<sub>2.5</sub> 样品中 8 种重金属(Pb、Cr、Cu、As、Ni、Cd、Co、Mn)的质量浓度.

## 1.3 健康风险评价

以 US EPA 发布的人体健康风险评估模型为基本框架,研究 Pb、Cr、Cu、As、Ni、Cd、Co 和 Mn 共 8 种重金属对人体的健康风险.

### (1) 暴露模型计算方法

本研究评估使用采样车库的不同人群(工作人员、停车用户)通过 PM<sub>2.5</sub> 吸入的颗粒物重金属的健康风险,使用以下公式计算每日经呼吸系统进入人体的重金属剂量:

$$\text{ADD(LADD)} = \frac{C \times \text{InhR} \times \text{ET} \times \text{AEF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (1)$$

式中,ADD 为非致癌物质日均暴露剂量,mg·(kg·d)<sup>-1</sup>;LADD 为致癌物质终身日均暴露剂量,mg·(kg·d)<sup>-1</sup>;C 为颗粒物重金属质量浓度,mg·m<sup>-3</sup>.其它参数意义及单位见表 1.

表 1 健康风险评估模型参数

Table 1 Parameters used in health risk assessment model

参数 Parameter	意义 Meaning	单位 Unit	参考值 Reference value	来源 Source
InhR	呼吸速率	m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	0.98	[15]
ET	日暴露时间	h·d <sup>-1</sup>	工作人员 8 停车用户 0.5	本研究

续表 1

参数 Parameter	意义 Meaning	单位 Unit	参考值 Reference value	来源 Source
AEF	年暴露频率	d·a <sup>-1</sup>	260	[15]
ED	暴露持续年限	a	50	[16]
BW	标准体重	kg	66.2	[15]
AT	平均暴露时间	d	致癌 70×365 非致癌 ED×365	[16]

表 1 给出了基于国内现有研究及 US EPA 总结的各参数具体取值. 其中, 根据车库所在单位的使用性质、工作要求等情况, 使用车库工作人员每日工作 8 h, 停车用户每日使用车库 0.5 h 为模型参数; 所有人群均假设为成年人且不分性别.

### (2) 健康风险表征

根据 US EPA 综合风险信息系统(IRIS)和国际癌症研究机构(IARC)的分类标准, 将被认为具有致癌效应的 As、Cd、Ni、Co 和 Cr 分为第一组, 将非致癌性金属 Cu、Pb、Mn 分为第二组. 第一组元素同时计算致癌/非致癌风险, 第二组元素只计算非致癌风险.

单个元素的非致癌风险以危害系数(hazard quotient, HQ)衡量, 计算公式为:

$$HQ = ADD/RfD \quad (2)$$

式中, RfD 为日参考摄入量(reference doses), mg·(kg·d)<sup>-1</sup>.

采用危害指数(hazard index, HI)计算元素的总体非致癌风险, HI>1 表明可能产生非致癌风险, 数值越大, 风险越高. HI 计算公式为:

$$HI = \sum HQ \quad (3)$$

致癌物质被认为不存在阈值, 使用增量终身致癌风险值(incremental lifetime cancer risk, ILCR)定量形容污染物的致癌风险, 计算公式为:

$$ILCR = LADD \times SF \quad (4)$$

式中, SF 为斜率因子(slope factor, SF), [mg·(kg·d)<sup>-1</sup>]<sup>-1</sup>.

ILCR 的容许极限值为 10<sup>-6</sup>—10<sup>-4</sup>. ILCR 值低于 10<sup>-6</sup> 表明致癌风险可忽略; ILCR 值在 10<sup>-6</sup>—10<sup>-5</sup> 之间表明存在较小概率的致癌风险; ILCR 值在 10<sup>-5</sup>—10<sup>-4</sup> 之间表明存在较大概率的致癌风险; ILCR 值高于 10<sup>-4</sup> 表明有确定的致癌风险. 8 种元素的 RfD 及 SF 值列于表 2.

表 2 重金属元素的参考剂量和致癌斜率因子

Table 2 Reference doses and slope factors of heavy metals

元素 Element	参考剂量/[mg·(kg·d) <sup>-1</sup> ] RfD	致癌斜率因子/[mg·(kg·d) <sup>-1</sup> ] <sup>-1</sup> SF
As	3.00×10 <sup>-4</sup>	15.1
Cd	1.00×10 <sup>-3</sup>	6.10
Co	5.71×10 <sup>-6</sup>	9.8
Ni	2.06×10 <sup>-2</sup>	0.84
Cr	2.86×10 <sup>-5</sup>	41
Cu	4.02×10 <sup>-2</sup>	—
Mn	1.43×10 <sup>-5</sup>	—
Pb	3.52×10 <sup>-3</sup>	—

## 2 结果与讨论 (Results and discussion)

### 2.1 PM<sub>2.5</sub> 污染特征

图 2(a)反映了采样点平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度与对应时间的南京市 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化. 结果表明, 整个采样期

间内, 采样点平均  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度为  $(42.12 \pm 13.64) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 浓度变化范围为  $26.62 \sim 66.70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . 同时可以看出, 所有采样时间段中, 采样所在地下车库的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度均明显高于南京市平均  $\text{PM}_{2.5}$  浓度, 与其变化趋势基本一致. 从图 2 还可以看出, 采样时间段内车库  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度最低的时间集中在五一黄金周附近, 推测为五一期间: (1) 学校放假, 车库中车流量很低, 空气中的颗粒物稳定沉降, 使得  $\text{PM}_{2.5}$  浓度不断降低; (2) 南京市空气质量较好, 由外部环境带入的空气颗粒物浓度较低; (3) 栖霞街道区域发生了强度较高的降雨, 由于高强度降雨对  $\text{PM}_{2.5}$  的清除作用<sup>[17]</sup>, 导致  $\text{PM}_{2.5}$  浓度有所降低.

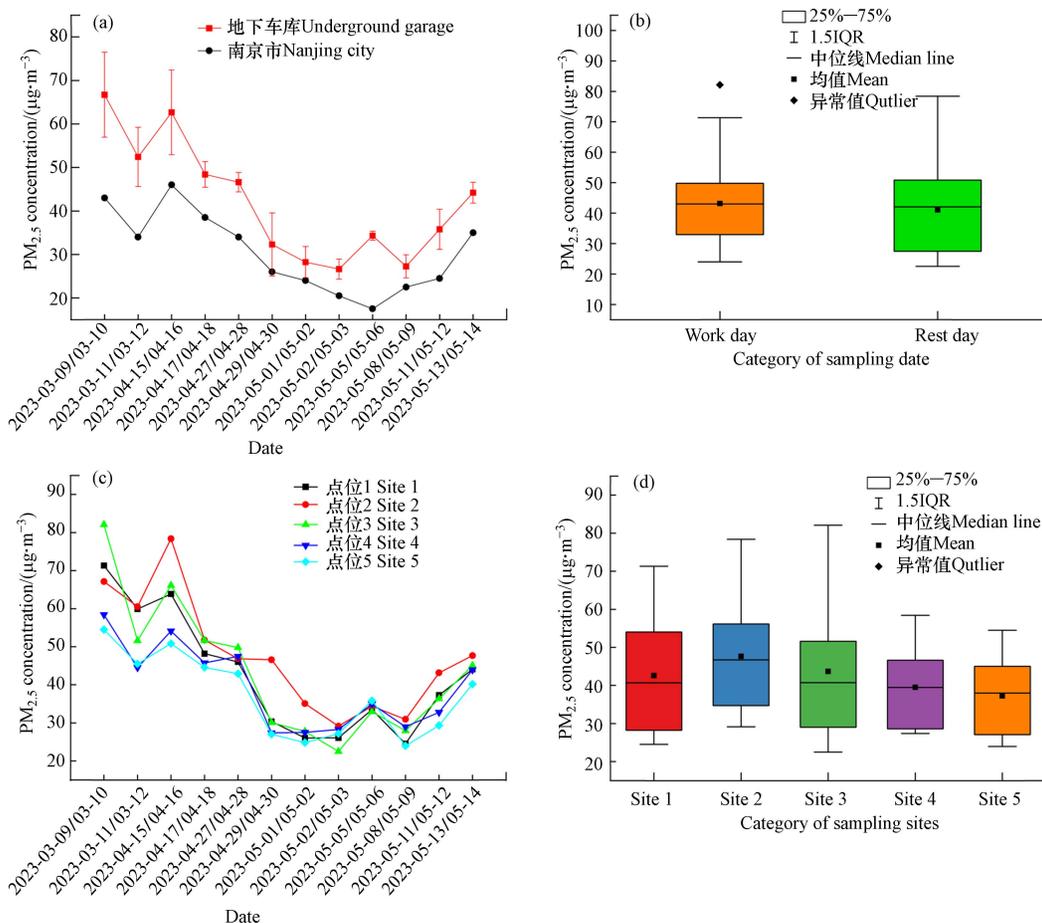


图 2  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化及时空分布特征

(a) 采样车库与南京市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化; (b) 不同时间  $\text{PM}_{2.5}$  浓度; (c) 不同采样点  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化; (d) 不同采样点  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度

Fig.2  $\text{PM}_{2.5}$  concentration changes and its spatiotemporal distribution characteristics

(a) Changes of  $\text{PM}_{2.5}$  concentration from sampling garage and Nanjing city; (b)  $\text{PM}_{2.5}$  concentration at different times; (c) Changes of  $\text{PM}_{2.5}$  concentration at different sampling points; (d) Average concentration of  $\text{PM}_{2.5}$  at different sampling sites

以工作日和休息日区分各采样时间段, 得到不同时间采样点  $\text{PM}_{2.5}$  平均质量浓度对比如图 2(b) 所示. 由图 2(b) 可知, 采样期间工作日  $\text{PM}_{2.5}$  平均质量浓度略高于休息日, 分别为  $43.17 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $41.06 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 且工作日存在异常偏高值 ( $82.12 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ). 工作日期间, 行政楼来往车辆较多, 汽车尾气排放产生的颗粒物较多, 且车流量、人流量大, 扬起沉降到地面的颗粒物, 并且进入车库的过程中也会携带外界的灰尘. 但总体来说, 工作日和休息日的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度区别不大, 可以认为车流量对地下车库颗粒物浓度的影响程度相对外界环境颗粒物污染对车库  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的直接影响程度较小.

采样方案确定的各采样点中, 5 个采样点分别代表车库几何中心(采样点 1)、车库入口(采样点 2)、车库出口(采样点 3)、车库通风死角(采样点 4)和正对入口的车库拐角(采样点 5). 分别考察采样时间段内不同采样点位  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度变化和平均  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度对比, 结果分别如图 2(c) 和 2(d) 所示. 由图可知, 采样期间 5 个采样点位的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度变化趋势基本一致, 平均  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度分别为  $42.59 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $47.62 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $43.66 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $39.51 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $37.21 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均浓度由高到低排序依次为: 采样点 2 > 采样点 3 > 采样点 1 > 采样点 4 > 采样点 5. 采样点 2 为车库入口, 汽车进入车库的过程中, 由

于带入外界颗粒物、扬起地面上的降尘、怠速阶段汽车颗粒物排放量增加<sup>[18]</sup>等因素,导致该点的颗粒物浓度最大. 采样点 3 为车库出口, 同样存在扬起降尘、汽车颗粒物排放等问题, 此外, 汽车在冷启动过程中, 由于发动机和催化器还没有达到最佳工作温度, 也可能导致更多的颗粒物排放<sup>[19]</sup>. 采样点 1 作为采样车库结构的几何中心, 由于该车库采用自然通风, 空间相对封闭, 空气流通较差, 颗粒物在车库中难以扩散, 加上中心汽车流量大, 容易产生较大的颗粒物污染. 采样点 4 为车库通风死角, 颗粒物扩散难度更大, 但由于车库死角的车流量很小, 此处受到汽车尾气排放和扬起降尘的影响小, 导致其 PM<sub>2.5</sub> 污染相对较低. 而采样点 5 作为正对车库入口的拐角处, 由于通风效果相对较好、车流量相对车库中心更小等因素, 使得其 PM<sub>2.5</sub> 污染最低.

总之, 可以认为汽车排放及扬尘对采样期间所测车库 PM<sub>2.5</sub> 污染的影响相比车库结构导致的较差通风性对车库 PM<sub>2.5</sub> 污染的影响更大. 事实上, 车辆出入口的人员活动相对密集, 其造成的健康风险应得到重点关注.

## 2.2 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征及健康风险评价

PM<sub>2.5</sub> 中 Pb、Cr、Cu、As、Ni、Cd、Co 和 Mn 共 8 种重金属的平均浓度如图 3(a) 所示. 采样时间段内, 测样车库 PM<sub>2.5</sub> 中测定重金属的平均总质量浓度为 0.082 μg·m<sup>-3</sup>, 在 PM<sub>2.5</sub> 平均质量浓度中占比约 0.21%. 车库 PM<sub>2.5</sub> 中所测重金属元素的质量浓度从大到小排序依次为: Cu>Mn>Pb>As>Cr>Ni>Co>Cd, 其中 Cu 元素平均质量浓度最高, 达到了 31 ng·m<sup>-3</sup>.

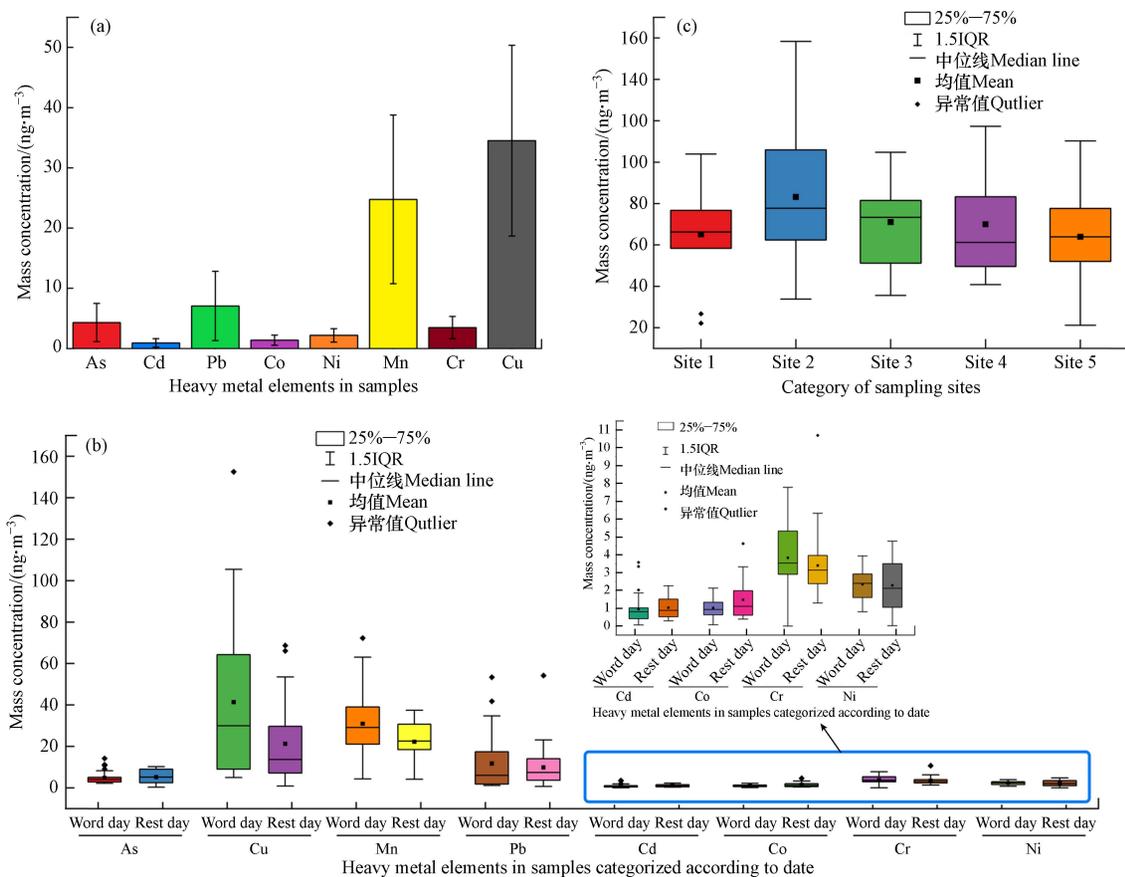


图 3 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征

(a) PM<sub>2.5</sub> 中各重金属平均浓度; (b) 不同采样点 PM<sub>2.5</sub> 中各重金属浓度对比; (c) 不同采样点 PM<sub>2.5</sub> 中重金属平均浓度

Fig.3 Characteristics of heavy metal pollution in PM<sub>2.5</sub>

(a) Average concentration of each heavy metal in PM<sub>2.5</sub>; (b) Concentration comparison of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> at different sampling sites; (c) Average concentration of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> at different sampling sites

类比 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度分析方法, 以工作日和休息日区分各采样时间段, 得到不同时间采样点 PM<sub>2.5</sub> 中各重金属平均质量浓度对比如图 3(b) 所示. 可以发现, 所测重金属中 Cu、Mn、Pb、Cr、Ni 等 5 种重金属元素平均质量浓度遵循工作日>休息日的规律, 推测为汽车尾气排放、机器磨损等过程中进

入空气的颗粒物重金属含量高于环境空气中的颗粒物重金属含量,因而相比于外界环境颗粒物污染的直接影响,车流量对地下车库颗粒物浓度的影响程度更大;而 As、Cd、Co 的 3 种重金属元素不符合此规律,考虑到颗粒物污染来源广泛,质量浓度较小的重金属元素受到外界环境污染源中相应元素含量的影响可能更大.考察采样期间不同采样点 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的平均浓度,结果如图 3(c)所示.采样期间各采样点平均 PM<sub>2.5</sub> 中重金属质量浓度分别为 65 ng·m<sup>-3</sup>、83 ng·m<sup>-3</sup>、71 ng·m<sup>-3</sup>、70 ng·m<sup>-3</sup> 及 64 ng·m<sup>-3</sup>,平均浓度由高到低排序依次为:采样点 2>采样点 3>采样点 4>采样点 1>采样点 5,与 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间分布规律基本一致.

利用上述重金属暴露模型,分别计算采样期间内测样地下车库工作人员、停车用户吸入 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物中 8 种重金属元素的非致癌及致癌暴露量,结果见表 3.鉴于采样车库的工作及使用情况,重金属质量浓度采用所有工作日浓度的平均值同时代表工作人员和停车用户的呼吸情况.由表 3 可知,8 种重金属中,Cu 的非致癌日均暴露量最高,分别为 ADD<sub>工作人员</sub>=2.64×10<sup>-6</sup> mg·(kg·d)<sup>-1</sup> 和 ADD<sub>停车用户</sub>=1.65×10<sup>-7</sup> mg·(kg·d)<sup>-1</sup>;As 的致癌终身暴露量最高,分别为 LADD<sub>工作人员</sub>=3.01×10<sup>-7</sup> mg·(kg·d)<sup>-1</sup> 和 LADD<sub>停车用户</sub>=1.88×10<sup>-8</sup> mg·(kg·d)<sup>-1</sup>.

表 3 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的吸入暴露量

Table 3 Inhalation exposure of heavy metals in PM<sub>2.5</sub>

重金属 Heavy metal	ADD/mg·(kg·d) <sup>-1</sup>		LADD/mg·(kg·d) <sup>-1</sup>	
	工作人员 Worker	停车用户 User	工作人员 Worker	停车用户 User
As	4.22×10 <sup>-7</sup>	2.64×10 <sup>-8</sup>	3.01×10 <sup>-7</sup>	1.88×10 <sup>-8</sup>
Cd	8.37×10 <sup>-8</sup>	5.23×10 <sup>-9</sup>	5.98×10 <sup>-8</sup>	3.74×10 <sup>-9</sup>
Co	1.06×10 <sup>-7</sup>	6.61×10 <sup>-9</sup>	7.55×10 <sup>-8</sup>	4.72×10 <sup>-9</sup>
Ni	1.95×10 <sup>-7</sup>	1.22×10 <sup>-8</sup>	1.40×10 <sup>-7</sup>	8.72×10 <sup>-9</sup>
Cr	3.05×10 <sup>-7</sup>	1.91×10 <sup>-8</sup>	2.18×10 <sup>-7</sup>	1.36×10 <sup>-8</sup>
Cu	2.64×10 <sup>-6</sup>	1.65×10 <sup>-7</sup>	—	—
Mn	2.24×10 <sup>-6</sup>	1.40×10 <sup>-7</sup>	—	—
Pb	9.11×10 <sup>-7</sup>	5.69×10 <sup>-8</sup>	—	—

利用上述健康风险效应模型,分别计算采样地下车库工作人员、停车用户通过空气吸入 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物中 8 种重金属元素的非致癌风险和 5 种致癌重金属元素的致癌风险,结果如表 4 所示.

表 4 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的非致癌风险及致癌风险

Table 4 Non-carcinogenic and carcinogenic risks of heavy metals in PM<sub>2.5</sub>

重金属 Heavy metal	HQ		ILCR	
	工作人员 Worker	停车用户 User	工作人员 Worker	停车用户 User
As	1.41×10 <sup>-3</sup>	8.79×10 <sup>-5</sup>	4.55×10 <sup>-6</sup>	2.84×10 <sup>-7</sup>
Cd	8.37×10 <sup>-5</sup>	5.23×10 <sup>-6</sup>	3.65×10 <sup>-7</sup>	2.28×10 <sup>-8</sup>
Co	1.85×10 <sup>-2</sup>	1.16×10 <sup>-3</sup>	7.40×10 <sup>-7</sup>	4.62×10 <sup>-8</sup>
Ni	9.48×10 <sup>-6</sup>	5.93×10 <sup>-7</sup>	1.17×10 <sup>-7</sup>	7.32×10 <sup>-9</sup>
Cr	1.07×10 <sup>-2</sup>	6.66×10 <sup>-4</sup>	8.93×10 <sup>-6</sup>	5.58×10 <sup>-7</sup>
Cu	6.57×10 <sup>-5</sup>	4.11×10 <sup>-6</sup>	—	—
Mn	1.57×10 <sup>-1</sup>	9.81×10 <sup>-3</sup>	—	—
Pb	2.59×10 <sup>-4</sup>	1.62×10 <sup>-5</sup>	—	—
合计(HI/ILCR <sub>total</sub> )	0.1879	0.0117	1.47×10 <sup>-5</sup>	9.19×10 <sup>-7</sup>

针对非致癌风险,工作人员和停车用户的危害指数 HI 分别为 0.1879 和 0.0117,均处于安全范围内,说明其对人体健康影响较小.对于工作人员和停车用户,各重金属元素非致癌风险危害系数由高到低排序都依次为: Mn>Co>Cr>As>Pb>Cu>Cd>Ni,其中 Mn 的非致癌风险 HQ 值最高,工作人员和停车用户分别为 0.157 和 9.81×10<sup>-3</sup>,占非致癌风险的绝大部分.

针对致癌风险, 工作人员和停车用户的增量终身致癌风险总值  $ILCR_{total}$  分别为  $1.47 \times 10^{-5}$  和  $9.19 \times 10^{-7}$ , 对工作人员存在较高概率的致癌风险, 对停车用户的致癌风险可以忽略. 对于工作人员而言, Co、Cd、Ni 3 种元素的致癌风险可以忽略, 而 As 和 Cr 的致癌风险达到了低概率致癌水平, 分别为  $4.55 \times 10^{-6}$  和  $8.93 \times 10^{-6}$ ; 对于停车用户而言, 所有 5 种元素的致癌风险都可忽略. 对于工作人员和停车用户, 各重金属元素非致癌风险危害系数由高到低排序依次为: Cr>As>Co>Cd>Ni, 其中 Cr 的致癌风险  $ILCR$  值最高, 分别为  $8.93 \times 10^{-6}$  和  $5.58 \times 10^{-7}$ . 可以发现, 对于地下车库工作人员, PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素导致的癌症风险已不容忽视, 虽然在可接受范围内, 但可能在暴露个体的整个生命周期中存在较高的潜在性致癌健康风险. 尽管 Cr 在测样 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物中的质量浓度相对较低, 而由于其较高的毒性, 在采样车库中可能产生了最为明显的致癌健康风险.

以每个采样组中的工作日平均浓度作为衡量不同人群在车库中的重金属暴露情况, 分析不同时间重金属的非致癌风险及致癌风险变化, 结果如表 5 所示. 可以发现, 不论对工作人员还是停车用户, 致癌风险和非致癌风险随时间的变化趋势都有所不同, 其中非致癌风险(HI 值)最高分别为 0.352 和 0.0220, 最低分别为 0.082 和 0.0052; 致癌风险(总  $ILCR$  值)最高分别为  $2.13 \times 10^{-5}$  和  $1.33 \times 10^{-6}$ , 最低分别为  $5.76 \times 10^{-6}$  和  $3.60 \times 10^{-7}$ . 本次测试中, 决定非致癌风险和致癌风险的重金属元素分别为 Mn 和 Cr, 二者的浓度变化趋势不同导致了非致癌风险值和致癌风险值变化趋势的不一致.

表 5 不同时间工作人员和停车用户的非致癌风险及致癌风险

Table 5 Non-carcinogenic and carcinogenic risks to workers and users at different times

日期 Date	HI		$ILCR_{total}$	
	工作人员 Worker	停车用户 User	工作人员 Worker	停车用户 User
3.9—3.10	0.280	0.0175	$2.13 \times 10^{-5}$	$1.33 \times 10^{-6}$
4.17—4.18	0.352	0.0220	$1.33 \times 10^{-5}$	$8.29 \times 10^{-7}$
4.27—4.28	0.153	0.0096	$1.45 \times 10^{-5}$	$9.05 \times 10^{-7}$
5.5—5.6	0.082	0.0052	$5.76 \times 10^{-6}$	$3.60 \times 10^{-7}$
5.8—5.9	0.216	0.0135	$1.82 \times 10^{-5}$	$1.14 \times 10^{-6}$
5.11—5.12	0.182	0.0114	$1.64 \times 10^{-5}$	$1.03 \times 10^{-6}$

同时值得注意的是, 在致癌重金属浓度较高的几个测试时间段内, 不论是工作人员还是停车用户, 都产生了不容忽略的致癌风险, 这意味着对于停车用户而言, 车库内 PM<sub>2.5</sub> 中重金属的致癌风险不应完全忽略.

### 3 结论(Conclusion)

(1) 观测期间, 地下车库总平均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度为  $(42.12 \pm 13.64) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 浓度变化范围为  $26.62 \sim 66.70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 平均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度未超标, 但均明显高于市区平均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度, 两者浓度变化趋势基本一致. 工作日和休息日的平均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度区别不大, 分别为  $43.17 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $41.06 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 说明车流量对地下车库颗粒物浓度的影响程度相对外界环境颗粒物污染对车库 PM<sub>2.5</sub> 浓度的直接影响程度较小.

(2) 选取了 5 个代表不同使用频率和通风情况的采样点位, 测得其 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化趋势基本一致, 平均 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度分别为  $42.59 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $47.62 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $43.66 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $39.51 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $37.21 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 车库出入口及车辆频繁通过的几何中心相比车库角落污染更高, 说明汽车排放及扬尘等对地下车库 PM<sub>2.5</sub> 污染的影响程度相对于车库结构导致的较差通风性对 PM<sub>2.5</sub> 污染的影响程度更大.

(3) 车库 PM<sub>2.5</sub> 中测定重金属(Pb、Cr、Cu、As、Ni、Cd、Co 和 Mn)的平均总质量浓度为  $0.082 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 在 PM<sub>2.5</sub> 平均质量浓度中占比约为 0.21%; 重金属元素的质量浓度从大到小排序依次为: Cu>Mn>Pb>As>Cr>Ni>Co>Cd, 其中 Cu 元素平均质量浓度最高, 达到了  $31 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ . Cu、Mn、Pb、Cr、Ni 等 5 种元素平均质量浓度遵循工作日>休息日的规律, 表明其受车流量影响更大; 而 As、Cd、Co 等 3 种重金属元素不符合此规律, 表明其受外界环境背景的影响更大.

(4)健康风险评价表明,决定非致癌和致癌风险的重金属分别为 Mn 和 Cr.车库重金属非致癌风险处于安全水平( $HI < 1$ ),致癌风险对工作人员达到高概率水平( $ILCR_{total} = 1.47 \times 10^{-5}$ ,主要由 As 和 Cr 贡献),对停车用户根据不同时间污染情况不同,也存在不能忽略的情况( $ILCR_{total} > 10^{-6}$ ).

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] KHAN M F, HWA S W, HOU L C, et al. Influences of inorganic and polycyclic aromatic hydrocarbons on the sources of  $PM_{2.5}$  in the Southeast Asian urban sites[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2017, 10(8): 999-1013.
- [ 2 ] 刘新蕾, 欧阳婉约, 张彤. 大气颗粒物重金属组分的化学形态及健康效应 [J]. *环境化学*, 2021, 40(4): 974-989.  
LIU X L, OUYANG W Y, ZHANG T. Chemical speciation and health effect of heavy metals in atmospheric particulate matter[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(4): 974-989 (in Chinese).
- [ 3 ] WRIGHT L P, ZHANG L M, CHENG I, et al. Impacts and effects indicators of atmospheric deposition of major pollutants to various ecosystems - A review[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, 18(8): 1953-1992.
- [ 4 ] LI Y X, XIANG R B. Particulate pollution in an underground car park in Wuhan, China[J]. *Particuology*, 2013, 11(1): 94-98.
- [ 5 ] LIU Z J, YIN H, MA S Y, et al. On-site assessments on variations of  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $CO_2$  and TVOC concentrations in naturally ventilated underground parking garages with traffic volume[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 247: 626-637.
- [ 6 ] OBAIDULLAH M, PEETERS L, BRAM S, et al. Comparison of particle emissions from enclosed parking garages and streets[J]. 2013, 15(4): 457-465.
- [ 7 ] PONGPIACHAN S, LIU S X, HUANG R J, et al. Variation in day-of-week and seasonal concentrations of atmospheric  $PM_{2.5}$ -bound metals and associated health risks in bangkok, Thailand[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, 72(3): 364-379.
- [ 8 ] MohseniBANDPI A, ESLAMI A, GHADERPOORI M, et al. Health risk assessment of heavy metals on  $PM_{2.5}$  in Tehran air, Iran[J]. *Data in Brief*, 2018, 17: 347-355.
- [ 9 ] 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 等. 保定地区  $PM_{2.5}$  中重金属元素的污染特征及健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 38-44.  
LEI W K, LI X R, ZHANG L, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in  $PM_{2.5}$  collected in Baoding [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 38-44 (in Chinese).
- [ 10 ] 孟昭伟, 张同军, 郑晶利, 等. 西安市大气  $PM_{2.5}$  中金属和类金属元素污染特征及健康风险评价 [J]. *公共卫生与预防医学*, 2021, 32(5): 28-32.  
MENG Z W, ZHANG T J, ZHENG J L, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of metals and metalloid elements in atmospheric  $PM_{2.5}$  in Xi'an [J]. *Journal of Public Health and Preventive Medicine*, 2021, 32(5): 28-32 (in Chinese).
- [ 11 ] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量监测点布设技术规范: HJ 664—2013 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Technical regulation for selection of ambient air quality monitoring stations(on trial): HJ 664—2013 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013(in Chinese).
- [ 12 ] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量手工监测技术规范: HJ 194—2017 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2017.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Technical specifications on manual methods for ambient air quality monitoring: HJ 194—2017 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017 (in Chinese).
- [ 13 ] 王杰. 中国空气质量在线监测分析平台 [DB/OL]. [2023-5-17]. 2013,  
WANG J. China air quality online monitoring and analysis platform [DB/OL]. [2023-5-17]. 2013,
- [ 14 ] 中华人民共和国环境保护部. 空气和废气 颗粒物中金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法: HJ 777—2015 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Ambient air and waste gas from stationary sources emission - Determination of metal elements in ambient particle matter-Inductively coupled plasma optical emission spectrometry: HJ 777—2015 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016(in Chinese).
- [ 15 ] 中华人民共和国环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population: Adults[M]. Beijing: China Environmental Press, 2013 (in Chinese).
- [ 16 ] ASSESSMENT N C F E, United States Environmental Protection Agency Office of Research and Development. Exposure factors handbook 2011 edition. [M]. Washington, DC: National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, 2011
- [ 17 ] 于彩霞, 邓学良, 石春娥, 等. 降水和风对大气  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的清除作用分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(12): 4620-4629.  
YU C X, DENG X L, SHI C E, et al. The scavenging effect of precipitation and wind on  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(12): 4620-4629 (in Chinese).
- [ 18 ] 胡志远, 付佳铭, 韩维维, 等. 怠速起停对汽油车油耗及颗粒数量排放的影响 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(3): 1016-1022.  
HU Z Y, FU J M, HAN W W, et al. Study on the effect of idle start-stop technology on fuel consumption and particle number emission of GDI vehicle [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(3): 1016-1022 (in Chinese).
- [ 19 ] 孟忠伟, 邓盟, 范咏玲, 等. 常温下发动机冷热启动工况排放特性实验研究 [J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(5): 1-9,27.  
MENG Z W, DENG M, FAN Y L, et al. Experimental study on emission characteristics of engine under cold and hot start-up condition at room temperature [J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(5): 1-9,27 (in Chinese).