

# 南方某市地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中重金属健康风险评估

巫丰宏<sup>1</sup>, 雷骏斌<sup>1</sup>, 周峰<sup>2</sup>

(1. 南宁市疾病预防控制中心, 广西 南宁 530023; 2. 南宁轨道交通集团公司, 广西 南宁 530029)

**摘要:**以南方某城市的 10 个地铁车站作为研究对象, 分析空气可吸入颗粒物 (PM<sub>10</sub>) 样品中 10 种重金属砷 (As)、铬 (Cr)、镉 (Cd)、镍 (Ni)、汞 (Hg)、铅 (Pb)、锰 (Mn)、锑 (Sb)、锡 (Se)、铜 (Cu) 的质量浓度。采用美国环境保护局 (US EPA) 推荐的健康风险评估模型, 对重金属通过呼吸途径引起的人群健康风险进行评估。结果表明, 地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中的重金属 Cr 和 As 对人群可能存在潜在致癌健康风险; 重金属 Mn、Cu、Pb、Se、Hg 和 Sb 对人群的非致癌健康风险较小。提出, 应进一步关注地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中重金属对暴露人群可能存在的健康风险, 采取有针对性的措施进行防护。

**关键词:** 地铁车站; 空气; 可吸入颗粒物; 重金属; 健康风险评估

中图分类号: X823

文献标志码: B

文章编号: 1674-6732(2022)04-0072-06

## Health Risk Assessment of Heavy Metals in Metro Station's Airborne PM<sub>10</sub> in a South China City

WU Feng-hong<sup>1</sup>, LEI Jun-bin<sup>1</sup>, ZHOU Feng<sup>2</sup>

(1. Nanning Center for Disease Control and Prevention, Nanning, Guangxi 530023, China; 2. Nanning Rail Transit Group, Nanning, Guangxi 530029, China)

**Abstract:** Ten metro stations were selected for the study. The concentrations of ten heavy metals (As, Cr, Cd, Ni, Hg, Pb, Mn, Sb, Se, Cu) were determined. Inhalation exposure to these heavy metals was estimated for health risk recommended by US EPA. Increased lifetime cancer risk of commuter population may be induced by carcinogenic heavy metal Cr and As exposure. Non-carcinogenic hazards risks of heavy metal Mn, Cu, Pb, Se, Hg and Sb were low. Further attention should be paid to the possible health risk of heavy metals in metro station's airborne PM<sub>10</sub> for long-term exposure. Corresponding measures should be taken to protect passengers' health.

**Key words:** Metro station; Air; PM<sub>10</sub>; Heavy metal; Health risk assessment

地铁是一种重要的现代公共交通方式, 具有运量大、速度快以及绿色环保等优点, 地铁交通已成为现代大城市的主要公共交通方式, 承担了城市市内交通出行的最大客运量<sup>[1]</sup>。截至 2019 年底, 中国已累计建成超过 5 000 km 长度的地铁运营线路, 2019 年全年累计客运量超过 230 亿人次, 总里程和客运量均居世界第一<sup>[2]</sup>。与此同时, 地铁车站空气颗粒物引发的健康风险也越来越受到高度关注。地铁车站一般位于地面以下, 自然通风不足, 而且乘客高度密集、不利于车站空气中有害物质的扩散和排出<sup>[3]</sup>。可吸入颗粒物 (PM<sub>10</sub>) 是指空

气动力学直径 < 10 μm 的颗粒物, 其在空气中悬浮停留时间长, 易吸附各种有毒有害物质, 且可通过呼吸进入到人体的细支气管和肺泡部位, 是一类具有健康危害的空气污染物<sup>[4-8]</sup>。PM<sub>10</sub> 可吸附和富集多种重金属, 其中一些重金属如铬 (Cr)、砷 (As)、镍 (Ni)、镉 (Cd) 等具有致癌性和基因毒性, 这些有毒重金属以颗粒物为载体通过呼吸途径进入人体肺部, 可对人体产生潜在的健康危害<sup>[9]</sup>。为了研究地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中的重金属暴露对乘客人群的健康影响, 现对南方某市地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中重金属进行检测和分析, 并对其健康风险进

收稿日期: 2022-04-16; 修订日期: 2022-05-13

基金项目: 广西自然科学基金资助项目 (2017GXNSFBA198081)

作者简介: 巫丰宏 (1983—), 男, 副主任医师, 博士, 主要从事环境健康监测工作。

行定量评估, 以期相关部门制定控制措施提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 采样时间及地点

2021年9—10月, 选取南方某城市的10个地铁站作为采样地点。10个车站均为地下车站, 运行状态正常, 分布在4个城区, 包含线路换乘站、交通接驳站、单独车站等类型。采样地点在车站类型和位置分布上均具有一定的代表性。

### 1.2 采样及分析方法

在每个车站的站厅层设置1个采样点, 采样点位置避开通道、通风口、空调风口等, 并离墙壁距离1 m左右, 采样高度在人群呼吸带范围(距地面1.2~1.5 m)。使用2030型中流量环境空气颗粒物采样器(青岛崂应公司)和石英纤维滤膜(直径80 mm)进行PM<sub>10</sub>采样, 每个车站采样1次, 采样流量为100 L/min, 一次连续采样8 h。每次采样前均对采样器进行流量校准。

滤膜在采样前后均在相同温度和湿度条件下平衡24 h。采样后的滤膜经5%的HNO<sub>3</sub>浸泡及70℃水浴超声浸提后, 浸提液经过滤并稀释定容, 制备成测试样。依据《空气和废气 颗粒物中铅等金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 657—2013)<sup>[10]</sup>, 采用iCAP Q型电感耦合-等离子体质谱仪(美国Thermo Fisher公司)测定样品中的Cr、As、Cd、Ni、锰(Mn)、铜(Cu)、铅(Pb)、汞(Hg)、锑(Sb)及硒(Se)元素的质量浓度。

### 1.3 健康风险评估方法

PM<sub>10</sub>中的重金属通过呼吸途径引起的健康风险包括致癌健康风险和非致癌健康风险。采用美国环境保护局(US EPA)推荐的健康风险评估模型对PM<sub>10</sub>中重金属的健康风险进行评估。致癌健康风险值(ILCR)和非致癌健康风险值(HQ)的计算公式见式(1)和式(2):

$$\text{ILCR} = \text{LADD} \times \text{SF} \quad (1)$$

$$\text{HQ} = \text{ADD} / \text{RfD} \quad (2)$$

式中: LADD——致癌物终身日均暴露剂量, mg/(kg·d); SF——致癌强度系数, (kg·d)/mg; ADD——非致癌物日均暴露剂量, mg/(kg·d); RfD——引起非致癌风险的最大暴露参考剂量, mg/(kg·d)。

LADD和ADD的计算公式见式(3):

$$\text{LADD 或 ADD} = C \times \text{IR} \times \text{ED} / (\text{BW} \times \text{AT}) \quad (3)$$

式中: C——污染物日均暴露质量浓度, mg/m<sup>3</sup>; IR——呼吸速率, m<sup>3</sup>/d; ED——暴露持续时间, d; BW——体重, kg; AT——平均暴露时间, d。

经呼吸途径的暴露参数参考《中国人群暴露参数手册(成人卷)》<sup>[11]</sup>, 对于地铁乘客人群, 按每天1 h暴露时间进行估算(表1)。

表1 重金属经呼吸途径的暴露参数<sup>①</sup>

人群	IR/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	BW/ kg	ED/ d	AT(致癌物)/d	AT(非致癌物)/d
成年男性	18.0	68.2	24×365×1/24	70×365	24×365
成年女性	14.5	58.6	24×365×1/24	70×365	24×365

①参照US EPA的健康风险评估方法, 致癌物终身暴露时间按平均70 a计, 非致癌物的慢性暴露时间按平均24 a计。

根据国际癌症研究机构(IARC)的相关研究, As、Cr、Cd、Ni为致癌物质, Hg、Pb、Mn、Sb、Se、Cu为非致癌物质。参照US EPA的综合风险信息数据库(IRIS)及文献<sup>[12-14]</sup>确定SF及RfD(表2)。

表2 重金属经呼吸途径的剂量-反应参数

重金属	SF/ [(kg·d)·mg <sup>-1</sup> ]	RfD/ [mg·(kg·d) <sup>-1</sup> ]
Mn		3.0×10 <sup>-4</sup>
Cr	56	
Cu		2.0×10 <sup>-3</sup>
Pb		4.3×10 <sup>-4</sup>
As	20.7	
Se		1.0×10 <sup>-3</sup>
Cd	8.40	
Hg		1.0×10 <sup>-4</sup>
Ni	1.19	
Sb		3.0×10 <sup>-4</sup>

参照US EPA的健康风险评估标准<sup>[15]</sup>, 以ILCR评估重金属的致癌健康风险, 当ILCR < 10<sup>-6</sup>, 可以认为终身致癌健康风险较小, 在监管意义上认为是可接受的风险水平; 若ILCR为10<sup>-6</sup>~10<sup>-4</sup>, 认为可能存在致癌健康风险; 当ILCR > 10<sup>-4</sup>, 认为存在致癌的风险性较高。以HQ评估非致癌健康风险, 当HQ ≤ 1时, 认为非致癌健康风险较低, 可以忽略不计; 当HQ > 1时, 认为存在非致癌健康风险。

## 2 结果与讨论

### 2.1 地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中重金属特征

地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中重金属的监测结果见表 3。由表 3 可见,质量浓度较高的 3 种重金属分别是 Mn[(88.10 ± 25.59) ng/m<sup>3</sup>]、Pb[(59.36 ± 10.36) ng/m<sup>3</sup>] 和 Cr[(45.11 ± 24.51) ng/m<sup>3</sup>],质量浓度最小的重金属为 Se[(0.47 ± 0.43) ng/m<sup>3</sup>]。

表 3 地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中重金属元素监测结果

重金属	质量浓度均值	质量浓度范围
Mn	88.10 ± 25.59	70.0 ~ 152.0
Cr	45.11 ± 24.51	23.10 ~ 95.80
Cu	16.26 ± 5.78	8.80 ~ 24.40
Pb	59.36 ± 10.36	44.60 ~ 73.80
As	11.50 ± 2.42	8.90 ~ 17.90
Cd	0.57 ± 0.29	0.30 ~ 1.30
Hg	1.02 ± 1.59	0.40 ~ 3.80
Ni	17.77 ± 8.58	10.50 ~ 41.0
Sb	2.62 ± 0.79	1.90 ~ 4.60
Se	0.47 ± 0.43	0.40 ~ 1.18

相关文献报道,美国洛杉矶、芬兰赫尔辛基、中国上海等城市地铁站空气颗粒物中富含 Mn、Cr 等重金属,其来源可能与地铁列车车轮与铁轨的摩擦和冲击、制动器刹车等产生的金属颗粒有关<sup>[16-18]</sup>。Pb 一般被认为是机动车尾气排放的指示性产物。源解析研究表明,地铁站空气颗粒物中 Pb 的来源可能与地面机动车尾气污染进入车站内有关<sup>[19]</sup>。此外,As 和 Sb 的来源常见于煤炭、石油及天然气的燃烧,其中 As 是煤炭燃烧的指示性产物<sup>[20-21]</sup>。Ni 的常见来源为地面扬尘<sup>[22]</sup>。地面的机动车尾气、扬尘或其他大气污染物可通过车站出入口、通风系统等途径进入地铁站内,而地铁车站一般为地下空间,主要靠机械通风系统调节车站内的空气,不利于地铁车站空气污染物的稀释和排出,易导致空气颗粒物的积聚<sup>[23]</sup>。

### 2.2 PM<sub>10</sub> 中重金属的健康风险评估结果

#### 2.2.1 重金属的致癌健康风险评估

地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中的致癌重金属(Cr、As、Cd 和 Ni)的 ILCR 值见表 4。由表 4 可见,Cr 对成年男性和成年女性的终身致癌健康风险值均 > 10<sup>-6</sup>,可能存在致癌健康风险;当每日暴露时间达到 3 h 以上,As 对成年男性和成年女性的终身

致癌健康风险值均 > 10<sup>-6</sup>,可能存在致癌健康风险。

表 4 地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中致癌重金属的 ILCR 值

重金属	每日暴露时间/h	ILCR 值	
		成年男性	成年女性
Cr	1	9.52 × 10 <sup>-6</sup>	8.93 × 10 <sup>-6</sup>
	3	2.86 × 10 <sup>-5</sup>	2.68 × 10 <sup>-5</sup>
	8	7.62 × 10 <sup>-5</sup>	7.14 × 10 <sup>-5</sup>
As	1	8.97 × 10 <sup>-7</sup>	8.41 × 10 <sup>-7</sup>
	3	2.69 × 10 <sup>-6</sup>	2.52 × 10 <sup>-6</sup>
	8	7.18 × 10 <sup>-6</sup>	6.73 × 10 <sup>-6</sup>
Cd	1	1.81 × 10 <sup>-8</sup>	1.69 × 10 <sup>-8</sup>
	3	5.41 × 10 <sup>-8</sup>	5.08 × 10 <sup>-8</sup>
	8	1.44 × 10 <sup>-7</sup>	1.35 × 10 <sup>-7</sup>
Ni	1	7.97 × 10 <sup>-8</sup>	7.47 × 10 <sup>-8</sup>
	3	2.39 × 10 <sup>-7</sup>	2.24 × 10 <sup>-7</sup>
	8	6.38 × 10 <sup>-7</sup>	5.98 × 10 <sup>-7</sup>

地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中吸附和富集的多种有毒重金属(As、Cr、Cd 等)存在引发疾病的风险,如支气管炎、哮喘等慢性疾病,也可导致心血管疾病的死亡率增高,甚至产生致癌效应<sup>[24-25]</sup>,对于老人以及有呼吸疾病的人群,引发健康风险的可能性更大<sup>[26-28]</sup>。本研究显示,地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中的重金属 Cr、As 的 ILCR 值 > 10<sup>-6</sup>,可能存在致癌风险。有研究表明,地铁车站空气颗粒物中的有毒重金属可通过产生活性氧及氧化应激的方式损伤 DNA,诱导癌症的发生进程<sup>[29-30]</sup>,常见的致癌部位有肺部和鼻腔等<sup>[31]</sup>,也可抑制体外培养人体肝细胞的正常增殖过程<sup>[32]</sup>,对人体肺细胞也可产生基因毒性<sup>[33]</sup>。

#### 2.2.2 重金属的非致癌健康风险评估

地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中的非致癌重金属(Mn、Cu、Pb、Se、Hg 和 Sb)的 HQ 值见表 5。由表 5 可见,HQ 值均 < 1,表明这 6 种重金属对人体的非致癌健康风险均较小。

长期暴露于过量的 Mn 可损伤人体神经系统,导致神经系统锥体外束损害及出现震颤麻痹综合征;Hg 可损伤大脑的中枢神经系统,对肾脏也可产生毒性损害;Pb 可损伤造血系统,抑制血红蛋白的合成,引发溶血和贫血,同时对神经系统也可产生损害。此外,非致癌有毒重金属可催化活性氧或自由基,直接或间接损伤肺部细胞<sup>[34]</sup>。

表 5 地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中非致癌重金属的 HQ 值

重金属	每日暴露时间/h	HQ 值	
		成年男性	成年女性
Mn	1	$3.23 \times 10^{-3}$	$3.03 \times 10^{-3}$
	3	$9.69 \times 10^{-3}$	$9.08 \times 10^{-3}$
	8	$2.58 \times 10^{-2}$	$2.42 \times 10^{-2}$
Cu	1	$8.94 \times 10^{-5}$	$8.38 \times 10^{-5}$
	3	$2.68 \times 10^{-4}$	$2.51 \times 10^{-4}$
	8	$7.15 \times 10^{-4}$	$6.71 \times 10^{-4}$
Pb	1	$1.52 \times 10^{-3}$	$1.42 \times 10^{-3}$
	3	$4.55 \times 10^{-3}$	$4.27 \times 10^{-3}$
	8	$1.21 \times 10^{-2}$	$1.14 \times 10^{-2}$
Se	1	$5.17 \times 10^{-6}$	$4.84 \times 10^{-6}$
	3	$1.55 \times 10^{-5}$	$1.45 \times 10^{-5}$
	8	$4.13 \times 10^{-5}$	$3.88 \times 10^{-5}$
Hg	1	$1.12 \times 10^{-4}$	$1.05 \times 10^{-4}$
	3	$3.36 \times 10^{-4}$	$3.15 \times 10^{-4}$
	8	$8.97 \times 10^{-4}$	$8.41 \times 10^{-4}$
Sb	1	$9.60 \times 10^{-5}$	$9.00 \times 10^{-5}$
	3	$2.88 \times 10^{-4}$	$2.70 \times 10^{-4}$
	8	$7.68 \times 10^{-4}$	$7.20 \times 10^{-4}$

### 2.2.3 暴露时间的健康风险评估

人群在地铁车站中停留的时间越长,空气颗粒物中的重金属暴露水平越高,对健康的风险影响就越显著。有研究表明,如果每天在地铁站停留 30 min,Cu 和 Mn 的日暴露剂量分别增加 40% 和 60%<sup>[35]</sup>,地铁车站已成为人群重金属暴露的重要来源之一<sup>[36]</sup>。国内有研究发现,地铁乘客人群中,平均每日在地铁内停留时间在 1~3 h 的占 94%,停留时间 >3 h 的占 6%;地铁车站工作人员中,平均每日在地铁内工作时间 <8 h 的占 44%,工作时间 >8 h 的占 56%<sup>[37]</sup>。对于一些需要长期持续暴露于地铁环境的特定工作人群来说,影响更为显著。本研究中,当每日在地铁车站内暴露时间 >8 h,Cr 和 As 对成年男性、成年女性的 ILCR 值均 >10<sup>-6</sup>,可能存在致癌健康风险。对美国纽约市地铁环境空气颗粒物中重金属的健康风险研究也显示,Cr 对地铁环境暴露人群的 ILCR 值达到 10<sup>-5</sup>,高于可接受终身致癌健康风险一个数量级水平<sup>[38-39]</sup>。

### 3 不确定性分析

健康风险评估中的不确定性是对具体的暴露剂量数据或采用的各种评估参数的认识存在客观局限性所造成的,是不可避免的。本研究中的健康

风险评估的不确定性主要包括污染物暴露剂量测定的不确定性以及评估参数的不确定性。

经呼吸途径暴露重金属的致癌与非致癌健康风险评估受到呼吸暴露剂量以及具体采用的 SF、RfD、各种人群暴露参数等变量的影响。因此,这些变量可能会给健康风险评估带来不确定性。一方面,空气颗粒物中重金属浓度在呼吸道暴露剂量的计算中非常重要。因此,采样过程的环境如风速、温度、气压等以及仪器测定分析的精度、准确度等因素的影响是不确定性的一个重要来源。另一方面,计算健康风险所采用的 SF 和 ADD 等评估参数来自 US EPA 的风险评估信息系统和综合风险信息数据库;采用的暴露时间、呼吸速率、体重等参数来自《中国人群暴露参数手册》,评估参数的使用情况也会对评估结果产生直接影响,由此带来评估的不确定性。此外,受到污染物在人体内的代谢变化以及个体体质差异等因素的影响,研究对象群体的健康风险评估结果在一定程度上只能反映人群的风险平均水平。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

(1)对南方某城市地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中重金属进行监测,结果表明,Mn、Cr、Cu、Pb、As、Cd、Hg、Ni、Sb、Se 的质量浓度分别为 88.10,45.11,16.26,59.36,11.50,0.57,1.02,17.77,2.62 和 0.47 ng/m<sup>3</sup>。地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 已成为人群重金属暴露的重要来源之一,应引起高度重视。

(2)地铁车站空气 PM<sub>10</sub> 中重金属 Cr、As 的 ILCR 值 >10<sup>-6</sup>,可能存在致癌健康风险;对于地铁车站工作人员等需要长期持续暴露于地铁环境的高风险人群,重金属暴露的健康风险更应高度重视;重金属 Cd 和 Ni 的 ILCR 值 <10<sup>-6</sup>,致癌健康风险较低。非致癌重金属 Mn、Cu、Pb、Se、Hg 和 Sb 的 HQ 值均 <1,非致癌健康风险均较小。

### 4.2 建议

(1)地铁车站应采取有针对性的措施,如安装高效率的空气颗粒物过滤装置,提升对车站空气中颗粒物的净化能力;定期对地铁车站进行湿式清洗,及时清除集聚的颗粒物,改善地铁车站空气质量。此外,对于地铁乘坐人群以及车站工作人员,可佩戴口罩进行防护。加强车站管理,合理安排工作人员班次,提升车站通行效率,减少乘客及工作

人员在地铁内的停留和暴露时间。此外,应加强对各种污染源的监管和治理,加强道路扬尘、建筑扬尘等防范治理;有效控制大气污染,打好蓝天保卫战,从源头上减少污染的产生,有力防范污染所导致的健康风险,最大限度地保障人群的身体健

(2) 重金属对人群产生的健康风险,与不同人群的暴露浓度、呼吸速率、暴露时间,以及元素本身的毒理性质、在人体内的代谢特征、个体差异等因素有关。由于受到众多复杂因素的影响,使得风险评估结果在一定程度上只能反映人群的风险平均水平。今后可针对重金属的理化特性,寻找有特异性的人体内暴露指标以及生物效应标志物等,进行更加精准的内暴露测定及健康风险评估。

#### [参考文献]

- [1] FAN H, LI X, DENG J, et al. Time-dependent size-resolved bacterial and fungal aerosols in Beijing subway[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, 17(3): 799 – 809.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2019 年度统计分析报告[EB/OL]. (2020-05-07)[2022-03-16]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/5133>.
- [3] 陈远翔, 修光利, 杨军, 等. 城市轨道交通地下车站环境健康风险因子及相关标准的研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(12): 1139 – 1148.
- [4] YIN P, BRAUER M, COHEN A, et al. Long-term fine particulate matter exposure and non-accidental and cause-specific mortality in a large national cohort of Chinese men [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2017, 125(11): 117002.
- [5] YIN P, HE G, FAN M, et al. Particulate air pollution and mortality in 38 of China's largest cities: time series analysis[J]. *British Medical Journal*, 2017, 356: 667.
- [6] PUN V C, KAZEMIPARKOUHI F, MANJOURIDES J, et al. Long-term PM<sub>2.5</sub> exposure and respiratory, cancer, and cardiovascular mortality in older US adults[J]. *American Journal of Epidemiology*, 2017, 186(8): 961 – 969.
- [7] LI G, HUANG J, XU G, et al. The short term burden of ambient fine particulate matter on chronic obstructive pulmonary disease in Ningbo, China [J]. *Environmental Health*, 2017, 16(1): 54 – 62.
- [8] LIM C C, HAYES R B, AHN J, et al. Association between long-term exposure to ambient air pollution and diabetes mortality in the US[J]. *Environmental Research*, 2018, 165: 330 – 336.
- [9] MARTINS V, MORENO T, MINGUILLÓN M C, et al. Exposure to airborne particulate matter in the subway system [J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 511: 711 – 722.
- [10] 环境保护部. 空气和废气 颗粒物中铅等金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法: HJ 657—2013[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [11] 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.
- [12] 陆喜红, 吴丽娟, 任兰, 等. 南京市 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征分析及健康风险评估[J]. *四川环境*, 2016, 35(6): 115 – 119.
- [13] 姜杰, 李瑞园, 丘红梅, 等. 深圳大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征及健康风险评估[J]. *实用预防医学*, 2019, 26(7): 781 – 785.
- [14] US EPA. Integrated risk information system (IRIS) [EB/OL]. (2005-03-08)[2022-03-16]. <http://www.epa.gov/iris/>.
- [15] US EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I : human health evaluation manual (Part A, community involvement in superfund risk assessments) [R]. Washington DC: Office of Emergency of Remedial Response Environmental Protection Agency, 1999.
- [16] KAM W, NING Z, SHAFER M M, et al. Chemical characterization and redox potential of coarse and fine particulate matter (PM) in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles metro [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(16): 6769 – 6776.
- [17] AARNIO P, KOUSA A, YLLI-TUOMI T, et al. Composition of and exposure to PM<sub>2.5</sub> while commuting in the metro and on the street [J]. *Journal of Rural Problems*, 2011, 9(1): 127 – 131.
- [18] LU S L, LIU D Y, ZHANG W C H, et al. Physico-chemical characterization of PM<sub>2.5</sub> in the microenvironment of Shanghai subway [J]. *Atmospheric Research*, 2015, 153: 543 – 552.
- [19] 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.
- [20] HAN B, KONG S F, BAI Z P, et al. Characterization of Elemental Species in PM<sub>2.5</sub> samples collected in Four Cities of Northeast China [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2010, 209(1): 15 – 28.
- [21] 杨凌霄. 济南市大气 PM<sub>2.5</sub> 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.
- [22] 佚名. 有害重金属镍的大气排放污染研究取得新进展[J]. *科学通报*, 2012, 57(11): 1.
- [23] 王凯, 张霞, 张琳, 等. 某市地铁车站 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度的时空分布特征 [J]. *环境与职业医学*, 2020, 37(9): 853 – 857.
- [24] XU B, HAO J. Air quality inside subway metro indoor environment worldwide: A review [J]. *Environment International*, 2017, 107: 33 – 46.
- [25] KLEPCZYŃSKA-NYSTRÖM A, LARSSON B M, GRUNEWALD J, et al. Health effects of a subway environment in mild asthmatic volunteers [J]. *Respiratory Medicine*, 2012, 106(1): 25 – 33.
- [26] SALMA I, WEIDINGER T, MAENHAUT W. Time-resolved mass concentration, composition and sources of aerosol particles in a metropolitan underground railway station [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(37): 8391 – 8405.
- [27] 张文辉, 虞晓芬, 叶春, 等. 2015—2017 年杭州市大气 PM<sub>2.5</sub>

- 对儿童哮喘的影响 [J]. 中国预防医学杂志, 2020, 21(1): 65-69.
- [28] 王怀记, 毛翔, 石斌, 等. 武汉市地铁空气细颗粒物中金属污染物的健康风险评估 [J]. 公共卫生与预防医学, 2019, 30(1): 112-114.
- [29] HWANG S, KIM S Y, CHOI S, et al. Correlation between levels of airborne endotoxin and heavy metals in subway environments in South Korea [J]. Scientific Reports, 2021, 11(1):17086.
- [30] GALANIS A, KARAPETSAS A, SANDALTZOPOULOS R. Metal-induced carcinogenesis, oxidative stress and hypoxia signaling [J]. Mutation Research, 2009, 674(1-2):31-35.
- [31] LEE J C, SON Y O, PRATHEESHKUMAR P, et al. Oxidative stress and metal carcinogenesis [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2012, 53(4):742-757.
- [32] KIM C H, YOO D C, KWON Y M, et al. A study on characteristics of atmospheric heavy metals in subway station [J]. Toxicological Research, 2010, 26(2):157-162.
- [33] KARLSSON H L, LJUNGMAN A G, LINDBOM J, et al. Comparison of genotoxic and inflammatory effects of particles generated by wood combustion, a road simulator and collected from street and subway [J]. Toxicology Letters, 2009, 165(3): 203-211.
- [34] TAO F, GONZALEZ-FLECHA B, KOBZIK L. Reactive oxygen species in pulmonary inflammation by ambient particulates [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2003, 35(4):327-340.
- [35] AARNIO P, YLI-TUOMI T, KOUS A, et al. The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in the Helsinki subway system [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(28):5059-5066.
- [36] NIEUWENHUIJSEN M J, GÓMEZ-PERALES J E, COLVILLE R N. Levels of particulate air pollution, its elemental composition, determinants and health effects in metro systems [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 7995-8006.
- [37] 左甜甜. 西安地铁环境空气质量调查及其污染因素分析研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
- [38] LOXHAM M, NIEUWENHUIJSEN M J. Health effects of particulate matter air pollution in underground railway systems—a critical review of the evidence [J]. Particle and Fibre Toxicology, 2019, 16(1):12.
- [39] CHILLRUD S N, EPSTEIN D, ROSS J M, et al. Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and iron from steel dust and New York City's subway system [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(3):732-737.

(上接第71页)

- [15] 林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 等. 杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征 [J]. 环境科学, 2022, 43(1):123-131.
- [16] SONG M D, LI X, YANG S D, et al. Spatiotemporal variation, sources, and secondary transformation potential of volatile organic compounds in Xi'an, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, 21(6):4939-4958.
- [17] 蒋美青, 陆克定, 苏榕, 等. 我国典型城市群 O<sub>3</sub> 污染成因和关键 VOCs 活性解析 [J]. 科学通报, 2018, 63(12):1130-1141.
- [18] 沈龙娇, 梁胜文, 吴玉婷, 等. 武汉市居民区大气 VOCs 的污染特征和来源解析 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(5):11-19.
- [19] PING S, AN J, XIN J, et al. Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Research, 2016, 176:64-74.
- [20] WANG H L, CHEN C H, WANG Q, et al. Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the source analysis through a two-year continuous measurement [J]. Atmospheric Environment, 2013, 80:488-498.
- [21] 赵秋月, 李春燕, 陈凤, 等. 南通市夏季 VOCs 污染特征与来源研究 [J]. 中国环境监测, 2020, 36(1):148-156.
- [22] 严文莲, 刘端阳, 康志明, 等. 江苏臭氧污染特征及其与气象因子的关系 [J]. 气象科学, 2019, 39(4):477-487.
- [23] CARTER W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. Air & Waste, 1994, 44(7):881-899.