

·综述·

室内大气 PM_{2.5} 中重金属研究进展

邱育权¹, 阳许¹, 费志军², 杨晶麟¹, 仇广乐³

1. 贵州医科大学公共卫生与健康学院 环境污染与疾病监控教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学资源与环境工程学院 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室; 3. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室

摘要:近年来大气 PM_{2.5} 污染及危害受到广泛关注,其中富集的重金属对生态环境和人体健康构成了潜在威胁。由于人类大部分时间是在室内度过,因此室内大气 PM_{2.5} 中重金属污染对人类具有极大威胁。该文总结了室内大气 PM_{2.5} 及其中的重金属污染现状与分布规律,归纳了室内大气 PM_{2.5} 中重金属浓度影响因素、源解析及健康风险评估等研究进展,提出了现阶段研究存在的问题,并对未来室内大气 PM_{2.5} 中重金属污染研究进行了展望,有利于室内大气 PM_{2.5} 中重金属污染合理评估以及标准完善,为防治室内颗粒物污染提供科学依据。

关键词:室内污染;PM_{2.5};重金属;源解析;健康风险评估;进展

中图分类号:R122.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-5914(2024)04-0368-08

Heavy metals in indoor air fine particles (PM_{2.5}): a review of recent studies

QIU Yu-quan*, YANG Xu, FEI Zhi-Jun, YANG Jing-lin, QIU Guang-le

*Key Laboratory of Environmental Pollution Monitoring and Disease Control, Ministry of Education, School of Public Health, Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 550025, China

Corresponding author: YANG Xu, E-mail: yangxu@gmc.edu.cn

Abstract: In recent years, atmospheric PM_{2.5} pollution and its hazard have received widely attention, the heavy metals enriched it posed a great threat to ecological environment and human health. Since humans spend most of their time in indoors, heavy metals in indoor air PM_{2.5} poses a greater threat to human. This paper not only analyzed and summarized the status and distribution of indoor air PM_{2.5} and its heavy metal pollution, but also conducted a comprehensive review of the concentration influencing factors, source apportionment and health risk assessment of heavy metals in indoor air PM_{2.5}, raised the existing problems in the current research, and looked forward to the future research on heavy metal in indoor air PM_{2.5}, which is conducive to the reasonable assessment and standards improvement of heavy metals in indoor air PM_{2.5}, and provides a scientific basis for the prevention and control of indoor particulate pollution.

Keywords: Indoor pollution; PM_{2.5}; Heavy metals; Source apportionment; Health risk assessment; Research advance

近年来,以大气 PM_{2.5} 为主的室内环境污染及其导致的人类健康问题引起了广泛关注^[1-3]。大气 PM_{2.5} 指环境空气中空气动力学等效直径小于 2.5 μm 的颗粒物,能长时间悬浮于空气中,实现长距离输送,并且具有较大的比表面积和较强的吸附能力,能吸附 As、Fe、Mn、Pb 等重金属污染物,不仅能影响气候环境及大气能见度,且能通过呼吸沉降到肺泡,随着血液循环运输到全身,影响人体健康^[4-5]。PM_{2.5} 中吸附的重金属难以被生物降解,在人体内通过氧化应激反应、炎症因子释放等对人体产生毒理效应^[6]。

无论是室外还是室内环境,人类均直接暴露于不同浓度的 PM_{2.5} 中,据相关统计,人类一天中有 70%~90% 的时间处于各类室内环境中,因此相较于室外环

境,室内环境中的 PM_{2.5} 及其中重金属污染更容易引起人体健康危害^[7-9]。据世界卫生组织 2022 年数据显示,每年约有 320 万人过早死于室内空气污染引起的疾病^[10]。越来越多的研究表明 PM_{2.5} 及其中重金属与呼吸系统疾病、心脑血管疾病、神经系统疾病等有直接关系^[9],亦与胎儿早产、流产具有显著相关性^[11-12],是室内的主要污染物之一。基于上述因素,对室内 PM_{2.5} 的重金属元素研究以及其健康风险评估显得尤为重要。

笔者总结分析了室内 PM_{2.5} 及其中重金属研究进展,包括浓度水平、分布规律,及重金属浓度影响因素、源解析及健康风险评估等,提出了目前的研究进展及存在问题,并且对未来研究方向进行展望。

1 室内 PM_{2.5} 污染现状与特点

我国室内 PM_{2.5} 污染研究主要包括室内 PM_{2.5} 浓度监测、室内 PM_{2.5} 来源解析、室内外 PM_{2.5} 污染关系以及健康风险评估等方面^[13]。

1.1 室内 PM_{2.5} 浓度标准 随着全球经济的快速发

DOI:10.16241/j.cnki.1001-5914.2024.04.018

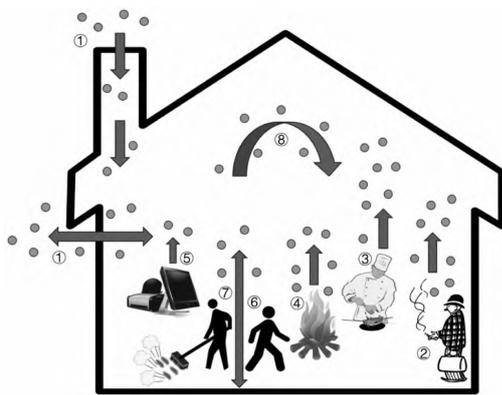
基金项目:贵州省基础研究项目(202342920285211911);大学生创新创业项目(S202210660124;S202310660060)

作者简介:邱育权(2002-),男,本科生,从事室内颗粒物中重金属污染研究。

通信作者:阳许, E-mail: yangxu@gmc.edu.cn

展,世界各国及相关组织对环境空气 PM_{2.5} 的浓度标准进行严格的限定,但针对室内 PM_{2.5} 的浓度限值却未给出明确标准,国内外大部分研究参考现有的环境空气浓度标准对室内 PM_{2.5} 浓度进行评估^[14-15]。2021 年世界卫生组织(WHO)已下调室外环境空气 PM_{2.5} 的平均浓度限值^[16],年平均浓度从原来 10 μg/m³ 降至 5 μg/m³,24 h 平均浓度从原来 25 μg/m³ 降至 15 μg/m³;我国于 2012 年发布了室外环境空气 PM_{2.5} 的平均浓度限值^[17],国内大多数室内 PM_{2.5} 的研究以其二级浓度限值为主要参考标准,即年平均 35 μg/m³,24 h 平均 75 μg/m³;美国国家环境保护局(US EPA)早在 1997 年就制定了室外环境空气 PM_{2.5} 质量浓度标准^[18]:年均值为 15 μg/m³,日均值为 65 μg/m³,并且于 2006 年修改了此标准^[19],规定了室外 PM_{2.5} 浓度日均值为 35 μg/m³;而 2020 年欧盟^[20]规定的环境空气 PM_{2.5} 质量浓度年均值为 20 μg/m³;我国在 2022 年新修订的室内空气质量标准将 PM_{2.5} 浓度限值纳入其中^[21],规定其日均值为 50 μg/m³。

1.2 室内 PM_{2.5} 来源 室内 PM_{2.5} 来源多种多样^[22],根据其产生方式,将室内 PM_{2.5} 的来源分为直接产生、二次悬浮与室内空气运输。图 1 为基于上述三大分类绘制出的室内 PM_{2.5} 污染来源,包括(1)直接产生:室外 PM_{2.5} 污染,室内吸烟,室内烹饪,室内燃烧,打印机、复印机以及电脑等办公用品,室内人员的生理活动;(2)二次悬浮:家务活动,室内人员走动;(3)室内空气运输。



注:①室外 PM_{2.5} 污染;②室内吸烟;③室内烹饪;④室内燃烧;⑤打印机、复印机以及电脑等办公用品;⑥室内人员的生理活动;⑦家务活动、室内人员走动;⑧室内空气运输。

图 1 室内 PM_{2.5} 污染来源(改编自《中国室内环境与健康研究进展报告 2018—2019》)图 3-4^[9])

室外 PM_{2.5} 通过通风和渗透进入到室内环境,与室外 PM_{2.5} 浓度、渗透效率、室内沉降率以及室内外交换率相关^[23]。相关研究进一步表明,室外 PM_{2.5} 进入室内还与室外气象参数、风向以及建筑物本身裂缝的大小与形状相关^[24-26]。吸烟是室内 PM_{2.5} 形成的主要来源,其所产生的颗粒物直径大多小于 2.5 μm^[22,27]。段琼等^[28]

对吸烟区颗粒物浓度检测结果表明,吸烟区 PM_{2.5} 浓度日均值为 604 μg/m³,其污染倍数相较于美国环境空气质量二级标准日均值(65 μg/m³)为 9.292;另一项针对室内香烟燃烧后时间的实验表明,一支传统香烟燃烧完 1 h 以后,所产生的 PM_{2.5} 浓度仍高于其背景浓度^[29];也有学者指出香烟粗细也是影响 PM_{2.5} 形成的因素之一,即粗支香烟产生的 PM_{2.5} 浓度水平比细支香烟更高^[30]。烹饪是仅次于吸烟的室内 PM_{2.5} 污染另一大来源^[31],其来源主要为食物与食用油在高温下发生一系列的化学反应,如热氧化与热裂解^[32]。研究常见烹饪方式(家庭烹饪、湖南菜、山东菜以及烧烤)发现,烧烤所产生的 PM_{2.5} 浓度最高,4 种烹饪方式所产生 PM_{2.5} 浓度均值分别为 494.9、331.3、404.8 与 1 841.9 μg/m³^[32];Wallace 等^[31]对室内油炸烹饪方式所释放的颗粒物进行检测,结果得出,烹饪时间内所产生的颗粒物体积浓度是非烹饪时间的 10 倍,其中 PM_{2.5} 浓度水平增加了 3 倍;He 等^[33]的实验结果反映,在正常通风情况下,烹饪结束 15 min 后,室内 PM_{2.5} 浓度可下降至背景浓度,而在最差通风情况下,烹饪结束 45 min 后,室内 PM_{2.5} 浓度仍为背景浓度的 2 倍;Bousiotis 等^[34]在监测室内 PM_{2.5} 浓度时,发现在烹饪过程中厨房区域 PM_{2.5} 浓度出现峰值。此外,烹饪时的温度也可能是厨房 PM_{2.5} 产生的重要影响因素^[35],而烹饪中使用的煤炭、液化气以及农村厨灶使用的生物性燃料(木材与秸秆)在燃烧过程中同样会释放不同浓度的颗粒物,引起室内 PM_{2.5} 污染^[27]。电脑、打印机等办公设备也是室内环境不可忽略的重要污染源,其主要为打印机工作时产生的碳粉与纸粉以及电脑电路板长时间处在 60 ℃ 以上高温会产生颗粒物以及多溴二苯醚等污染物^[35]。随着电脑、打印机等办公设备工作时间的增加,PM_{2.5} 浓度与质量浓度也随之增加,即单位时间内污染程度增加,而在设备工作结束 10 min 后,所产生的 PM_{2.5} 浓度与质量浓度仍处于较高水平^[36]。此外,室内人员本身生理活动亦可产生 PM_{2.5},如皮肤细胞脱落^[37]、咳嗽、打喷嚏等,而咳嗽、打喷嚏可使生物气溶胶从口鼻中释放,具有传染疾病的风险^[38-39]。Zoran 等^[40]利用 Pearson 相关系数探讨新型冠状病毒肺炎(COVID-19)与 PM_{2.5} 浓度关系,结果发现 COVID-19 每日新增病例数与 PM_{2.5} 日均值之间存在正相关($R^2=0.25$),而这可能与病毒附着在 PM_{2.5} 上有关。

走动、扫地、使用吸尘器等室内人员活动会引起 PM_{2.5} 的二次悬浮。室内 PM_{2.5} 二次悬浮的程度主要取决于人员数量、活动类型、活动强度^[22]以及建筑类型^[33]、建筑年龄^[41]等。Bhangar 等^[42]招募志愿者在房间内完成指定动作,结果显示,当志愿者模拟坐着办公时,每人产生的生物气溶胶为 $(0.9 \pm 0.3) \times 10^6$ 个/h,行走时结果则为该值的 5~6 倍,而在铺有地板的房间里,无

论是坐或行走,室内至少 60%~70%的生物气溶胶来自人与地板的接触。

此外,PM_{2.5}在室内空气中的混合、层流、再悬浮、凝固以及相变也会影响到室内 PM_{2.5}的浓度^[43]。

1.3 室内 PM_{2.5} 污染现状 随着我国国民经济迅速发展,对化石能源的需求量不断增大,引起了一系列环境污染问题,特别是大气环境污染问题^[44]。室内空气中 PM_{2.5}对人类健康的影响开始受到国内研究人员的广泛关注^[9];2011 年以来,国家对大气污染防治提出新要求,将 PM_{2.5}污染的治理列入大气污染防治项目;2013 年冬季,我国多个省市出现雾霾天气,其首要污染物为 PM_{2.5}^[45];2014 年,我国在全国 161 个城市设置 PM_{2.5}监测点,对 PM_{2.5}浓度进行实时在线监测^[46];2016 年,我国在“健康中国 2030”规划纲要第十四章“加强影响健康的环境问题治理”中提到,“全面实施城市空气质量达标管理,促进全国城市环境空气质量明显改善”^[47]。由此可见,以 PM_{2.5}为主的大气环境污染物越发受到重视。而在 2022 年新修订的室内空气质量标准中,正式将 PM_{2.5}浓度纳入标准,标志着我国室内 PM_{2.5}污染正式受到严格限制,同时也在一定程度上说明我国开始重视提升室内空气质量以及室内传染病控制等室内环境安全问题^[48]。

2014 年,张锐等^[49]对北京市 3 种不同建筑类型进行 PM_{2.5}监测,发现办公室、住宅、学校室内 PM_{2.5}浓度日均值分别为 85.3、85.5 和 85.6 μg/m³,其高于国家二级标准日均值(75 μg/m³)的比例分别为 39.5%、42.7%、41.2%,并且室内 PM_{2.5}浓度在冬季最高、夏季最低;2015 年,董俊刚等^[50]以西安市某高校研究生高层公寓为研究对象,测定室内外颗粒物和 PM_{2.5}的质量浓度,结果表明在该公寓冬季存在严重的颗粒物污染,室内 PM_{2.5}质量浓度范围在 52~112 μg/m³,室内颗粒物质量浓度普遍低于室外,多数为室外颗粒物质量浓度的 1/2,其中室内 PM_{2.5}质量浓度占总悬浮颗粒物的 50%以上;2016 年,刘建峰等^[51]对唐山农村地区 12 户燃煤和非燃煤住宅进行室内 PM_{2.5}污染监测,发现燃煤和非燃煤住宅室内 PM_{2.5}均值分别为 130.1、72.4 μg/m³,较《建筑通风效果测试与评价标准》燃煤室内超标率为 65%、非燃煤为 35%,通过室内外 PM_{2.5}浓度拟合相关系数也反映出室内 PM_{2.5}污染程度与室外 PM_{2.5}浓度具有一定的相关性;2017 年,郭春梅等^[52]对天津市 4 户家庭室内 PM_{2.5}进行采样检测,结果显示室内 PM_{2.5}浓度最高达 113 μg/m³,其达到国家二级标准的天数平均比例为 55%^[53];2018—2019 年翟和亮等^[54]对六安市 18 家酒店室内 PM_{2.5}进行监测,结果显示其室内 PM_{2.5}均数达到 114.48 μg/m³,较国家二级标准室内超标率达到 62%;2019 年,李盛等^[55]对榆中县 20 户农村家庭进行环境颗粒物水平调查,结果发现 20 户住宅室内客

厅与卧室 PM_{2.5}浓度中位数分别为 105.6、102.4 μg/m³,其超标率均为 78.26%;2020 年,黄冬娟等^[56]于 50 家柳州市公共场所进行 PM_{2.5}浓度监测,其质量浓度最高达 168 μg/m³。

综上所述,我国不同类型的室内场所均可能存在 PM_{2.5}污染问题,室内污染严重程度普遍为冬季高、夏季低;在无室内污染源情况下(如燃煤),室外颗粒物浓度普遍大于室内并存在一定的相关性;而室内颗粒物污染主要以 PM_{2.5}为主。

1.4 室内 PM_{2.5} 分布规律 室内 PM_{2.5}分布规律主要体现在空间、时间以及气候差异上,不同因素会造成其分布规律存在差异。

在空间差异上,不同建筑场所、不同功能区以及南北方室内 PM_{2.5}存在不同程度的污染。在不同建筑场所中,商场、餐厅、网吧等人流量较大场所,室内 PM_{2.5}污染程度要比学生宿舍等人流量较小的场所严重。对于同种类型公共场所,在通风条件等其他条件下,人流量越大、人走动越频繁,室内 PM_{2.5}污染越严重^[57]。对于不同烹饪类型的餐馆,室内 PM_{2.5}污染程度也存在着明显差异^[22],其中餐厨联通的餐饮场所室内的 PM_{2.5}浓度比餐厨分开的餐饮场所高^[58]。对于存在吸烟活动的场所中,有研究表明吸烟人群较大的室内场所往往比吸烟人群较小的室内场所 PM_{2.5}污染更严重,室内超过 90%的颗粒物由烟草释放产生^[59],并且在香烟烟雾中存在大量钾和氯化物等标志物^[60]。在非燃煤和燃煤住宅也存在 PM_{2.5}污染差异,燃煤场所室内外 PM_{2.5}浓度均高于非燃煤场所,室内明显高于室外,且农村地区较为严重,其主要原因是使用燃煤、传统炉灶等造成的 PM_{2.5}污染^[51,61],且厨房是室内主要的污染区^[62]。在不同功能区中,城市由于存在交通排放、工业排放以及建筑扬尘,故城市室内的 PM_{2.5}浓度总体高于农村^[63]。靠近公路或建筑工地的室内环境 PM_{2.5}浓度高于大学校园、科技园等环境幽静的郊区^[64]。工业区室内 PM_{2.5}浓度一般高于商业区和居民区^[65]。我国大气 PM_{2.5}浓度地域变化总体表现为北高南低、东高西低^[66],这可能是由于我国重工业城市主要集中在北方有关^[67],使我国室内 PM_{2.5}浓度地域变化总体也表现为北高南低、东高西低。

在时间差异上,一般呈现为冬季高、夏季低,春秋两季两者相差较小,总体上呈冬季>春季≈秋季>夏季^[67],其原因可能在于夏季频繁降水、强风,将空气中 PM_{2.5}沉降、分散、稀释,而冬季气层结构稳定,易形成逆温层以及冬季燃烧取暖排放加剧^[68-69]。在气候差异上,在强降雨天气和大风天气下,当无明显室内污染源时,室内 PM_{2.5}浓度随着相对湿度的增大而增大,随着温度的升高而减小,但与气压变化无明显关系^[69];而降雨量与 PM_{2.5}呈现较强的负相关性^[70]。在室内无明显污染源

且室外 PM_{2.5} 浓度较高时, 对室内 PM_{2.5} 整体浓度起主要影响的因素为室外 PM_{2.5} 浓度^[71]。

2 室内 PM_{2.5} 中重金属污染现状与特点

大气 PM_{2.5} 中的重金属按其含量划分, 可分为主要元素(如 Al、Fe、Ca、Mg)、次主要元素(如 Mn、Ni、Cu、Zn、As 等)和微量元素(Ag、Cd 等); 按其来源可分为地壳元素(如 Al、Fe、Ca、Mg 等)、污染元素(如 Zn、Cu、Mn、Ni、Pb、As、Cd 等)^[72]。目前我国大气 PM_{2.5} 重金属研究较多的元素为 Pb、V、As、Mn、Ni、Cr、Cd、Zn、Cu 等^[73-74], 《环境空气质量标准(2012)》对空气 PM_{2.5} 中重金属 Pb、Hg、As、Cd 和 Cr(VI) 浓度给出了限值^[17]。室内 PM_{2.5} 重金属研究主要集中在非主要元素或污染元素上, 为 As、Cd、Cr、Pb、Ni、Cu、Fe、Mn、Zn 等^[75-76]。

2.1 室内 PM_{2.5} 重金属污染现状 由表 1 可知, 在室

内外差异上, 大部分室内场所 PM_{2.5} 及其重金属浓度为室外>室内。在季节差异上, 室内 As 一般呈现为冬季>夏季>春季~秋季, Cd、Pb 为冬季>春季~秋季>夏季, 而 Mn 则为秋季污染较明显。目前南京、天津、广州等城市对室内 PM_{2.5} 及其重金属污染进行了大量研究, 其采样点主要位于商场、餐馆、办公室、宿舍住宅等具有代表性和研究意义的室内场所, 其中冬季、夏季研究较多, 而春季、秋季研究较少。室内 PM_{2.5} 中 Mn 和 Pb 的浓度污染水平较突出, 不仅与各种环境因素作用、产生严重的交叉污染, 还对人体造成神经疾病、恶性肿瘤、肠胃不适等损伤^[77-78]。

2.2 室内 PM_{2.5} 重金属分布规律 室内 PM_{2.5} 中重金属元素浓度不仅与室外重金属浓度相关, 也与室外 PM_{2.5} 浓度相关^[88], 主要表现在不同空间、时间以及不同直径的颗粒物上^[6]。

表 1 不同地区建筑物室内 PM_{2.5} 及其重金属污染情况

地区	建筑类型	时间	场所数	PM _{2.5} 室内/室外浓度均值(μg/m ³)	PM _{2.5} 中重金属室内/室外浓度均值(ng/m ³)				参考文献
					As	Cd	Mn	Pb	
广州	购物场所	2014.11—2014.12	3	49.47/-	13.46/-	2.78/-	32.74/-	92.31/-	[79]
广州	餐饮场所	2014.11—2014.12	3	62.42/-	14.19/-	3.99/-	43.10/-	112.16/-	
南京	餐饮场所	2016.12—2017.11 春季	1	69.33/66.72	7.26/7.34	1.82/1.91	36.53/40.26	57.29/62.88	[80]
		2016.12—2017.11 夏季		51.97/50.10	8.72/8.04	1.94/2.05	21.75/23.92	45.86/50.69	
		2016.12—2017.11 秋季		68.42/60.48	8.32/8.71	1.91/1.88	39.97/40.97	60.39/60.93	
		2016.12—2017.11 冬季		99.43/103.09	9.95/10.15	2.57/2.66	52.85/56.13	81.11/87.19	
科贾埃利	餐饮场所	2011.5	14	-/-	111.00/-	4.59/-	69.10/-	42.80/-	[81]
南京	办公场所	2016.12—2017.11 春季	1	26.47/66.72	4.04/7.34	1.10/1.91	22.22/40.26	33.62/62.88	[80]
		2016.12—2017.11 夏季		24.00/50.10	2.71/8.04	1.04/2.05	11.04/23.92	24.13/50.69	
		2016.12—2017.11 秋季		37.71/60.48	5.18/8.71	1.76/1.88	32.11/40.97	52.6/60.93	
		2016.12—2017.11 冬季		41.13/103.09	5.75/10.15	1.53/2.66	28.57/56.13	49.47/87.19	
西安	办公场所	2015.11.14—2015.12.14	1	89.00/127.00	43.00/63.00	1.60/6.20	16.00/31.00	95.00/365.00	[82]
南京	学生宿舍	2015.12.25—2016.7.26 夏季	27	40.67/79.92	5.70/6.31	1.12/1.41	17.73/21.94	28.6/38.05	[14]
		2015.12.25—2016.7.26 冬季	52	83.44/79.92	17.43/23.03	4.57/5.56	49.01/66.72	113.11/143.49	
兰州	学生宿舍	2012.11—2013.1	1	92.06/147.31	-/-	1.60/1/10	-/-	108.50/121.50	[83]
德黑兰	学生宿舍	2012.5—2013.5	1	-/-	3.01/5.13	0.29/0.36	15.25/41.05	60.57/91.73	[15]
广州	居民住宅	2014.11—2014.12	3	53.50/-	14.19/-	3.22/-	29.10/-	110.19/-	[79]
南京	居民住宅	2015.7.16—2015.8.8 夏季	1	36.90/81.20	8.86/11.82	1.82/3.36	61.83/71.92	8.25/12.53	[84]
		2014.12.20—2015.1.3 冬季		60.30/119.50	6.97/10.39	0.26/0.43	19.70/31.97	15.01/35.00	
天津	居民住宅	2011.6.12—2011.7.2 夏季	101	120.00/99.00	11.97/24.11	1.75/2.35	35.84/37.77	93.35/51.90	[85]
		2011.11.30—2011.12.12 冬季		165.00/140.00	7.57/25.90	31.27/35.13	13.00/40.99	31.47/86.39	
兰州	居民住宅	2012.11—2013.1	1	170.15/215.27	-/-	2.60/3.70	-/-	43.10/55.50	[83]
铜仁	农村	2018.6 夏季	9	24.00/-	-/-	0.40/-	10.00/-	4.60/-	[86]
		2018.12 冬季		32.00/-	-/-	0.60/-	6.70/-	8.90/-	
兰州	实验室	2012.11—2013.1	1	83.21/116.45	-/-	0.60/0.90	-/-	20.80/21.40	[83]
哈尔滨	实验室	2015.1—2015.2	1	99.82/-	0.03/0.07	0.03/0.05	0.20/0.48	0.09/0.86	[87]
中国标准				35(年均);50(日均)	6(年均)	5(年均)	-	500(年均) 1000(季均)	[17,21]
欧盟标准				20(年均)	6	5	-	500(年均)	[20]
WHO 标准				5(年均);15(日均)	-	5	-	500(年均)	[16]

注:“-”为无数据。

在空间分布特征上,室内 PM_{2.5} 重金属浓度大多小于室外,主要是因为建筑外围护结构对室外 PM_{2.5} 和重金属具有一定的阻隔作用,其次不同建筑类型与其所处地理位置导致其建筑气密性、空调和通风形式、室内人员活动、室外污染源等不同,从而导致室内 PM_{2.5} 中重金属浓度存在差异^[14]。烹饪是室内颗粒物的重要来源,而木炭燃烧是颗粒物中重金属元素含量的重要贡献源。研究人员检测了 14 家使用木炭烹饪的餐厅,发现这些餐厅 PM_{2.5} 中主要富集 Zn、Cr、As、Cu、Ni 和 Pb 等重金属元素,其中 Cr 和 Ni 的富集与室内不锈钢厨具的使用有关,而对 As 和 Cd 具有高度富集性,该研究还发现除 Mn 元素外,其他所有元素在 PM_{2.5} 中的含量高于 PM₁₀^[81],并且餐饮场所的 Al 明显高于购物场所,该发现可能与餐饮场所大量使用铝制品有关^[79]。在对学校宿舍和养老院的实验中,PM_{2.5} 中检测到含量最多的重金属元素为 Fe、Zn、Pb,这与室外土壤与道路灰尘的二次悬浮有关^[15]。由于实验室中实验设备和被动释放铜火焰原子吸收光谱等原因,导致室内 Cu 元素蓄积,使其有明显室内源^[89]。有学者对大学校园某研究中心进行监测,结果显示 PM_{2.5} 中 Cu 和 Zn 为主要重金属元素,Hg 含量为最低^[87]。而在地铁站里,Fe 是最重要的元素,并且地下站台比地上站台污染严重,这可能是轨道-车轮-刹车之间的物理摩擦所造成的^[90]。

在时间方面,主要体现在季节差异,一般表现为与自身采样点内的 PM_{2.5} 具有相同的季节变化规律,即冬季>夏季^[80],这主要与人为和气象因素有关(我国北方较明显)^[91],同时不同场所的环境、人员流动情况以及室内通风情况等也会影响其季节差异^[92]。王娟^[14]在监测冬、夏季宿舍内 PM_{2.5} 中重金属浓度变化时,发现宿舍冬季重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的平均质量浓度分别是夏季的 3.06、4.08、13.21、1.92、2.52、2.76、1.51、3.95 和 2.49 倍。贾春乾^[80]发现办公室内 As、Cu 和 Ni 元素表现为相同的季节变化规律,即冬季>春季~秋季>夏季,与办公室的 PM_{2.5} 浓度季节变化规律相同。

在不同直径的颗粒物上,一般认为直径越小的颗粒物所含的重金属元素含量越高^[15,84],其中 PM_{2.5} 中重金属所占比例约为 PM₁₀ 的两倍^[15]。

2.3 室内 PM_{2.5} 重金属浓度影响因素 由于 PM_{2.5} 等颗粒物为重金属的重要载体^[6],故影响室内 PM_{2.5} 的因素^[9]同样影响着室内 PM_{2.5} 中重金属的浓度分布,即室外渗透、室内直接污染源、室内空气运输以及室内人员家务、走动引起的颗粒物二次悬浮等。此外,自然通风会增加室内 PM_{2.5} 中重金属的含量,使用具有过滤功能的中央空调系统或室内空气净化装置能有效降低室内 PM_{2.5} 中重金属含量^[84]。

室内燃料燃烧、金属器具磨损以及肉食烹饪影响

着室内 PM_{2.5} 中 Fe、Zn 和 As 的浓度^[80]。室内打印机、复印机的使用以及不锈钢器具磨损影响着室内 PM_{2.5} 中 Cu、Cr 和 Ni 的浓度^[81,93]。蔡云梅等^[93]在评价室内灰尘中重金属的含量水平时发现,频繁使用打印机、复印机的采样点 Cu、Cr、Ni 的含量异常高。Satsangi 等^[94]对印度室内 PM_{2.5} 中重金属进行监测,发现城市和农村 PM_{2.5} 中 Cu 与 Fe、Mg、Zn、Mn 以及 K 呈现良好的相关性,而城市中室内 PM_{2.5} 中的 Cu 浓度升高与过度使用制热制冷的家用电器有关^[94],Pb 浓度的升高则与油漆涂料和油漆制品的使用相关^[88,95]。

3 室内 PM_{2.5} 重金属源解析

目前国内外在室内污染源解析上主要针对的是 PM_{2.5},而对其中重金属的源解析较少^[6]。对 PM_{2.5} 中重金属的源解析方法主要为受体模型法^[96-98]、源清单与源模型(扩散模型)法^[99]、富集因子法^[97]、铅同位素比值法^[100]以及相关性分析法^[101]。此外,基于大气气流轨迹气团的后向轨迹模型(HYSPLIT)^[102]以及模式识别方法与质子微探针技术联用的单颗粒分析法^[103]等同样也被用在 PM_{2.5} 中重金属的源解析中,但 HYSPLIT 模型需用到大气数据,因此不适用于室内分析。贾春乾等^[80]通过正交矩阵因子分解法(PMF)研究发现,办公室内 Cd、Zn 和 Pb 元素和餐厅内 Cd、As 和 Pb 元素表现出较强的相关性(|r|>0.4),表明这几种元素存在共同的污染源;朱凤芝等^[101]用相关分析和主成分分析了广州市室内 6 种典型室内场所室内细颗粒物和金属污染,发现绝大部分来源于周围的交通源、工业源及燃烧源;而 Jung^[104]利用铅同位素比值法表明了室内 As 和 Cr 主要来源为室外交通排放。在利用 PMF 等模型进行源解析过程中,常需要判断重金属污染源性质,表 2 汇总了室内部分污染源标志性重金属元素,不同污染源的标志性元素存在一定交叉,并且每个污染源的标志性元素含量不一^[84]。

表 2 部分室内污染源标志性重金属元素

污染源类型	标志性元素	参考文献
肉食烹饪及烹饪烟雾	Zn、As、Cr、Cu	[81]
餐具磨损	Cr、Ni	[105,106]
炉灶燃烧	As、Sn、Ba	[107]
吸烟	Cd	[108]

4 室内 PM_{2.5} 重金属健康风险评估

室内 PM_{2.5} 重金属的健康风险评估相较于室外研究主要不同点在于暴露剂量的计算上,由于不同建筑室内功能不同,导致处于该不同建筑室内的人群在暴露时间、暴露频率以及行为-活动模式上不尽相同^[109]。目前我国对室内 PM_{2.5} 中重金属健康风险评估相关研究已经加以重视,广东、南京、湖南、贵州等地

已开始对室内 PM_{2.5} 中重金属健康风险评价开展研究^[80,86,93,110]。陈泉等^[111]对株洲市典型居民住宅以及学生宿舍 PM_{2.5} 中重金属进行健康风险评价,表示在采样期间 As、Cd 及 Cr 存在一定致癌风险,尤其是宿舍室内成人 As 的致癌风险(ILCRi)和综合致癌风险(R)均超过 10⁻⁴,存在较高的致癌风险。

各国均对室内外 PM_{2.5} 中部分重金属浓度进行了限制,我国空气质量标准中对 Pb、Cd 和 Cr 进行了浓度限值^[7]。目前我国常用的是 US EPA 健康风险评估方法,由于地域差异,该方法在使用时需进行参数上的修正,并且在评估过程中对重金属生物可及性考虑较少,故会对重金属暴露的人体健康风险评价结果造成偏倚^[6,88]。

5 室内 PM_{2.5} 重金属及有机污染物研究的问题与展望

目前对室内 PM_{2.5} 重金属的研究主要集中在 PM_{2.5} 与重金属的浓度监测以及健康风险评估上,也有研究涉及到室内重金属的源解析以及重金属对人体的毒理效应。而未来需加强以下方向的研究:(1)我国环境空气 PM_{2.5} 中重金属浓度限值仅有 5 种,完善其他重金属的浓度限值对相关规范和标准的建立具有重要意义;(2)目前对于室内污染源解析主要针对的是 PM_{2.5},而对其中的重金属源解析相关研究较少,加强不同室内场所重金属的源解析研究对于分析不同室内重金属污染规律尤为重要;(3)由于不同场所室内重金属来源不一,故在同一城市不同场所的室内环境 PM_{2.5} 中的重金属污染情况也不同,而相关的规律分析较少,因此分析总结不同室内 PM_{2.5} 及其重金属的分布规律能为其防治提供支撑与依据;(4)目前大多数 PM_{2.5} 中重金属风险评估仅针对浓度而忽视其生物可及性,因此在风险评估中加入重金属生物可及性因素可减小其评估误差。

利益冲突 本研究无实际或潜在利益冲突

参考文献

- [1] Amnuaylojaroen T, Parasin N. Perspective on particulate matter: from biomass burning to the health crisis in mainland southeast Asia [J]. *Toxics*, 2023, 11: 553.
- [2] Kalluči E, Noka E, Bani K, et al. Correlation between COVID-19 and air pollution: the effects of PM_{2.5} and PM₁₀ on COVID-19 outcomes [J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2023, 27: 39-47.
- [3] Liu Y, Ma H, Zhang N, et al. A systematic literature review on indoor PM_{2.5} concentrations and personal exposure in urban residential buildings [J]. *Heliyon*, 2022, 8: 10174.
- [4] 江华亮, 王宗爽, 武雪芳, 等. 我国大气 PM_{2.5} 中砷的污染特征、来源及控制 [J]. *环境工程技术学报*, 2015, 5(6): 464-470.
- [5] 林治卿, 裴著革, 杨丹凤, 等. PM_{2.5} 的污染特征及其生物效应研究进展 [J]. *解放军预防医学杂志*, 2005, 23(2): 150-152.
- [6] 赵朕, 罗小三, 索晨, 等. 大气 PM_{2.5} 中重金属研究进展 [J]. *环境与健康杂志*, 2017, 34(3): 273-277.
- [7] Gao P, Lei T, Jia L, et al. Exposure assessment of PM_{2.5} during winter in outdoor and indoor environments of research center: spatial-temporal distribution, carbonaceous compositions and contributions of infiltration [J]. *Sci Total Environ*, 2016, 573: 854-861.
- [8] Brasche S, Bischof W. Daily time spent indoors in German homes—baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants [J]. *Int J Hyg Environ Health*, 2005, 208: 247-253.
- [9] 中国环境科学学会室内环境与健康分会组织. 中国室内环境与健康研究进展报告 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [10] World Health Organization. Household air pollution [EB/OL]. [2023-12-15]. [2024-4-10]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>.
- [11] Basu R, Pearson D, Ebisu K, et al. Association between PM_{2.5} and PM_{2.5} constituents and preterm delivery in California, 2000-2006 [J]. *Paediatr Perinat Epidemiol*, 2017, 31: 424-434.
- [12] Xue T, Zhu T, Geng G, et al. Association between pregnancy loss and ambient PM_{2.5} using survey data in Africa: a longitudinal case-control study, 1998-2016 [J]. *Lancet Planet Health*, 2019, 3: 219-225.
- [13] Lin Y, Zou J, Yang W, et al. A review of recent advances in research on PM_{2.5} in China [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2018, 15: 438.
- [14] 王娟. 大学校园室内 PM_{2.5} 重金属污染特征及健康风险评估 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [15] Hassanvand MS, Naddafi K, Faridi S, et al. Characterization of PAHs and metals in indoor/outdoor PM₁₀/PM_{2.5}/PM₁ in a retirement home and a school dormitory [J]. *Sci Total Environ*, 2015, 527: 100-110.
- [16] World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [M]. Geneva: World Health Organization, 2021.
- [17] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3095-2012 环境空气质量标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [18] US EPA. National ambient air quality standards for Particulate matter [S]. 1997.
- [19] US EPA. National ambient air quality standards for particulate matter [S]. 2006.
- [20] European Union. EU air quality standards [S]. Belgium: European Commission, 2020.
- [21] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 18883-2022 室内空气质量标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [22] 王清勤, 李国柱, 赵力, 等. 建筑室内细颗粒物 PM_{2.5} 污染现状、控制技术与标准 [J]. *暖通空调*, 2016, 46(2): 1-7.
- [23] Hänninen O, Hoek G, Mallone S, et al. Seasonal patterns of outdoor PM infiltration into indoor environments: review and meta-analysis of available studies from different climatological zones in Europe [J]. *Air Qual Atmos Health*, 2011, 4: 221-233.
- [24] Chithra VS, Shiva-Nagendra SM. Impact of outdoor meteorology on indoor PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ concentrations in a naturally ventilated classroom [J]. *Urban Clim*, 2014, 10: 77-91.
- [25] Han Y, Qi M, Chen Y, et al. Influences of ambient air PM_{2.5} concentration and meteorological condition on the indoor PM_{2.5} concentrations in a residential apartment in Beijing using a new approach [J]. *Environ Pollut*, 2015, 205: 307-314.
- [26] Li A, Ren T, Yang C, et al. Study on particle penetration through straight, L, Z and wedge-shaped cracks in buildings [J]. *Build Environ*, 2017, 114: 333-343.
- [27] 石华东. 室内空气 PM_{2.5} 污染的国内研究现状及综合防控措施 [J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(6): 111-114.
- [28] 段琼, 张渝, 李红格, 等. 太原市某办公室 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 的实测与研究 [J]. *能源研究与信息*, 2006, 22(1): 12-17.
- [29] Protano C, Manigrasso M, Avino P, et al. Second-hand smoke generated by combustion and electronic smoking devices used in real scenarios: ultrafine particle pollution and age-related dose assessment [J]. *Environ Int*, 2017, 107: 190-195.
- [30] Ji S, Liu Z, Liu P. Effects of the grade/price and thickness of cigarette on the PM_{2.5} concentration of smoke [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2023, 30: 71409-71414.
- [31] Wallace LA, Emmerich SJ, Howard-Reed C. Source strengths of

- ultrafine and fine particles due to cooking with a gas stove [J]. *Environ Sci Technol*, 2004, 38:2304–2311.
- [32] Wang G, Cheng SY, Wei W, et al. Chemical characteristics of fine particles emitted from different chinese cooking styles [J]. *Aerosol Air Qual Res*, 2015, 15:2357–2366.
- [33] He C, Morawska L, Hitchins J, et al. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses [J]. *Atmos Environ*, 2004, 38:3405–3415.
- [34] Bousiotis D, Alconcel LS, Beddows DCS, et al. Monitoring and apportioning sources of indoor air quality using low-cost particulate matter sensors [J]. *Environ Int*, 2023, 174:107907.
- [35] Destailats H, Maddalena RL, Singer BC, et al. Indoor pollutants emitted by office equipment: a review of reported data and information needs [J]. *Atmos Environ*, 2008, 42:1371–1388.
- [36] 朱维斌, 胡楠, 尹招琴. 室内打印机颗粒污染物特性的测量与分析 [J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(5):104–107.
- [37] Tian Y, Licina D, Savage N, et al. Size-resolved total particle and fluorescent biological aerosol particle emissions from clothing; proceedings of the International Conference on Indoor Air Quality and Climate, F, 2016 [C].
- [38] Ai ZT, Melikov AK. Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: a review [J]. *Indoor Air*, 2018, 28:500–524.
- [39] 中国环境科学学会室内环境与健康分会组织. 中国室内环境与健康研究进展报告 2020–2022 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [40] Zoran MA, Savastru RS, Savastru DM, et al. Assessing the relationship between surface levels of PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 738:139825.
- [41] Xu H, Guinot B, Ho SSH, et al. Evaluation on exposures to particulate matter at a junior secondary school: a comprehensive study on health risks and effective inflammatory responses in northwestern China [J]. *Environ Geochem Health*, 2018, 40:849–863.
- [42] Bhangar S, Adams RI, Pasut W, et al. Chamber bioaerosol study: human emissions of size-resolved fluorescent biological aerosol particles [J]. *Indoor Air*, 2016, 26:193–206.
- [43] Nazaroff WW. Indoor particle dynamics [J]. *Indoor Air*, 2004, 14:175–183.
- [44] 王迪, 向欣, 聂锐. 改革开放四十年大气污染防治的国际经验及其对中国的启示 [J]. *中国矿业大学学报(社会科学版)*, 2018, 20(6):57–69.
- [45] 喻义勇, 陆晓波, 朱志峰, 等. 南京 2013 年 12 月初持续重污染天气特征及成因分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2015, 27(2):11–16.
- [46] 新华社. 解读国务院常务会议加强雾霾等大气污染治理 [EB/OL]. [2014-02-13]. [2024-04-10]. https://www.gov.cn/zhengce/2014-02/13/content_2603649.htm?from=timeline&isappinstalled=0.
- [47] 新华社. “健康中国 2030”规划纲要 [EB/OL]. [2016-10-25]. [2024-04-10]. https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm?eqid=8f41987b002a7e4a000000026471aa44.
- [48] Lewis D. Indoor air is full of flu and COVID viruses. Will countries clean it up? [J]. *Nature*, 2023, 615:206–208.
- [49] 张锐, 陶晶, 魏建荣, 等. 室内空气 PM_{2.5} 污染水平及其分布特征研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2014, 31(12):1082–1084.
- [50] 董俊刚, 闫增峰, 曹军骥. 西安冬季高层公寓室内外颗粒物浓度水平与变化 [J]. *科技导报*, 2015, 33(6):42–45.
- [51] 刘建峰, 王宝庆, 任自会, 等. 唐山农村地区冬季室内外 PM_{2.5} 浓度污染特征 [J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(3):283–286.
- [52] 郭春梅, 赵珊珊, 由玉文, 等. 天津市住宅室内 PM_{2.5} 质量浓度及影响因素 [J]. *中国粉体技术*, 2018, 24(1):80–85.
- [53] 郭春梅, 赵珊珊, 赵一铭, 等. 我国居住建筑室内 PM_{2.5} 研究现状及进展 [J]. *环境监测管理与技术*, 2018, 30(4):12–17.
- [54] 翟和亮, 陈栋, 罗慧敏, 等. 2018—2019 年六安市宾馆室内空气卫生状况及影响因素分析 [J]. *预防医学情报杂志*, 2021, 37(1):114–120.
- [55] 李盛, 王金玉, 王先良, 等. 兰州市榆中县农村住宅室内环境颗粒物水平及影响因素调查 [J]. *职业与健康*, 2023, 39(7):945–949.
- [56] 黄冬娟, 顾小利, 潘榕, 等. 柳州市公共场所室内 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染及其与室外污染的关系 [J]. *环境卫生学杂志*, 2022, 12(7):505–509.
- [57] 刘章现, 王国贞, 刘林洪. 大中型商场空气中 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染水平分析 [J]. *环境与健康杂志*, 2006, 23(4):336–338.
- [58] 沈凡, 贾予平, 张屹, 等. 北京市冬季公共场所室内 PM_{2.5} 污染水平及影响因素 [J]. *环境与健康杂志*, 2014, 31(3):262–263.
- [59] 王欣, 郭新彪. 国内公共场所室内环境烟草烟雾污染现状的研究进展 [J]. *中国预防医学杂志*, 2010, 11(9):965–968.
- [60] Wallace L. Indoor particles: a review [J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 1996, 46:98–126.
- [61] 张玉, 曹曼, 韩雪燕, 等. 中国城乡家庭燃料燃烧导致的室内细颗粒物污染特征及差异 [J]. *中国医学科学院学报*, 2023, 45(3):382–389.
- [62] 吴可嘉, 潘军, 董泽琴. 贵州农村冬季不同燃料燃烧产生的室内外 PM_{2.5} 研究 [J]. *环保科技*, 2012, 18(2):40–44.
- [63] 李明, 张永勇, 侯立安. 我国室内空气细颗粒物污染现状与防控对策 [J]. *环境工程技术学报*, 2018, 8(2):117–128.
- [64] 刘阳生, 沈兴兴, 毛小琴, 等. 北京市冬季公共场所室内空气中 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 和 PM₁ 污染研究 [J]. *环境科学学报*, 2004, 24(2):190–196.
- [65] 朱中平, 杜海荣, 管新艳, 等. 深圳市部分幼儿园室内空气 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度调查 [J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(4):328–330.
- [66] 罗源, 颜丽, 陈思宇, 等. 中国 PM_{2.5} 质量浓度与传染病发病率的相关性分析 [J]. *地球环境学报*, 2020, 11(3):235–244.
- [67] 姜蕴聪, 杨元建, 王泓, 等. 2015—2018 年中国代表性城市 PM_{2.5} 浓度的城乡差异 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(11):4552–4560.
- [68] Liu B, Wu J, Zhang J, et al. Characterization and source apportionment of PM_{2.5} based on error estimation from EPA PMF 5.0 model at a medium city in China [J]. *Environ Pollut*, 2017, 222:10–22.
- [69] Zhang YL, Cao F. Fine particulate matter PM_{2.5} in China at a city level [J]. *Sci Rep*, 2015, 5:14884.
- [70] 顾庆平, 高翔, 陈洋, 等. 江苏农村地区室内 PM_{2.5} 浓度特征分析 [J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2009, 48(5):593–597.
- [71] 王智, 张金萍, 金春月. 大气污染期间北京住宅室内外空气中 PM_{2.5} 的浓度水平 [J]. *科学与技术工程*, 2019, 19(5):312–318.
- [72] 马艳华, 宁平, 黄小凤, 等. PM_{2.5} 重金属元素组成特征研究进展 [J]. *矿物学报*, 2013, 33(3):375–381.
- [73] Duan J, Tan J. Atmospheric heavy metals and Arsenic in China: situation, sources and control policies [J]. *Atmos Environ*, 2013, 74:93–101.
- [74] 石晓兰, 宗政, 彭辉, 等. 近 10 年华北背景大气 PM_{2.5} 中重金属健康风险及污染源的变化 [J]. *环境科学*, 2023, 44(10):5335–5343.
- [75] 王芳, 王娟, 韩苗苗, 等. 大学校园室内 PM_{2.5} 重金属污染特征及其健康风险评估 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(5):955–960.
- [76] 周利. 室内颗粒物的环境化学特征、来源识别及风险评估——以合肥市为例 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [77] 周传龙, 代朝猛, 张亚雷, 等. 大气重金属引发交叉污染的研究进展 [J]. *环境化学*, 2012, 31(9):1344–1348.
- [78] 刘佳, 张美云. 我国大气颗粒物中重金属污染特征及健康风险评估研究进展 [J]. *职业与健康*, 2022, 38(12):1721–1724, 1728.
- [79] 石同幸, 杨铁骥, 蒋琴琴, 等. 广州市部分公共场所室内空气中 PM_{2.5} 成份及健康危害分析 [J]. *实用预防医学*, 2014, 21(12):1412–1415.
- [80] 贾春乾. 大学校园典型室内环境 PM_{2.5} 中重金属组分分析及健康风险评估 [D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [81] Taner S, Pekey B, Pekey H. Fine particulate matter in the indoor air of barbeque restaurants: elemental compositions, sources and health risks [J]. *Sci Total Environ*, 2013, 454:79–87.
- [82] Yongyong Z, Ying J, Ming L, et al. Characterization of metal(loid)s in indoor and outdoor PM_{2.5} of an office in winter period [J]. *Hum Ecol*

- Risk Assess, 2018, 24:307-316.
- [83] 陶燕,李亚,王婷,等.兰州市冬季室内外颗粒物污染特征及其理化特性研究[J].环境与健康杂志,2016,33(1):44-47.
- [84] 孟丹.居住建筑室内外 PM_{2.5} 及其重金属元素的关联性研究[D].南京:南京理工大学,2016.
- [85] 王钊.天津市某社区老年人 PM_{2.5} 及载带重金属暴露水平和健康风险研究[D].天津:南开大学,2013.
- [86] 贾亚琪,高庚申,迟峰,等.万山汞矿区室内空气 PM_{2.5} 中重金属健康风险评价[J].环保科技,2019,25(4):28-31.
- [87] Gao P,Lei T,Jia L,et al. Exposure and health risk assessment of PM_{2.5}-bound trace metals during winter in university campus in Northeast China[J]. Sci Total Environ, 2017, 576:628-636.
- [88] 金丹.沈阳市室内灰尘重金属暴露的人体健康风险评价[D].沈阳:沈阳大学,2016.
- [89] Zhang J,Chen J,Yang L,et al. Indoor PM_{2.5} and its chemical composition during a heavy haze - fog episode at Jinan, China[J]. Atmos Environ, 2014, 99:641-649.
- [90] Chang L,Chong WT,Wang X,et al. Recent progress in research on PM_{2.5} in subways [J]. Environ Sci Process Impacts, 2021, 23:642-663.
- [91] Xu H,Cao J,Chow JC,et al. Inter-annual variability of wintertime PM_{2.5} chemical composition in Xi'an, China:evidences of changing source emissions[J]. Sci Total Environ, 2016, 545:546-555.
- [92] 雷啸.武汉市某地下空间颗粒物污染及风险评价[D].武汉:华中农业大学,2021.
- [93] 蔡云梅,黄涵书,任露陆,等.珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价[J].环境科学,2017,38(9):3620-3627.
- [94] Satsangi PG,Yadav S,Pipal AS,et al. Characteristics of trace metals in fine (PM_{2.5}) and inhalable (PM₁₀) particles and its health risk assessment along with in-silico approach in indoor environment of India[J]. Atmos Environ, 2014, 92:384 - 393.
- [95] Praveena SM,Abdul-Mutalib NS,Aris AZ. Determination of heavy metals in indoor dust from primary school (Sri Serdang, Malaysia): estimation of the health risks[J]. Environ Forensics, 2015, 16:257-263.
- [96] Watson JG,Cooper JA,Huntzicker JJ. The effective variance weighting for least squares calculations applied to the mass balance receptor model[J]. Atmos Environ, 1984, 18:1347-1355.
- [97] Luo XS,Ip CCM,Li W,et al. Spatial-temporal variations, sources, and transport of airborne inhalable metals PM₁₀ in urban and rural areas of northern China [J]. Atmos Chem Phys, 2014, 14:13133-13165.
- [98] 杨婧,郭晓爽,滕曼,等.我国大气细颗粒物中金属污染特征及来源解析研究进展[J].环境化学,2014,33(9):1514-1521.
- [99] Viana M,Kuhlbusch TAJ,Querol X,et al. Source apportionment of particulate matter in Europe:a review of methods and results [J]. J Aerosol Sci, 2008.
- [100] Jung CC,Syu ZH,Chou CC,et al. A study to characterize the lead isotopic fingerprint in PM_{2.5} emitted from incense stick and cigarette burning[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2023, 30:56893-56903.
- [101] 朱凤芝,任明忠,张漫雯,等.广州市夏季室内 PM_{2.5} 中金属元素的污染水平与来源分析[J].上海环境科学集,2016(2):18-23.
- [102] Maldonado PG,Campa A,Gonzalez-Castanedo Y,et al. Size distribution and concentrations of heavy metals in atmospheric aerosols originating from industrial emissions as predicted by the HYSPLIT model[J]. Atmos Environ, 2013, 71:234-244.
- [103] Wang J,Guo P,Li X,et al. Source identification of lead pollution in the atmosphere of Shanghai City by analyzing single aerosol particles (SAP)[J]. Environ Sci Technol, 2000, 34:1900.
- [104] Jung CC. Investigation of source and infiltration of toxic metals in indoor PM_{2.5} using Pb isotopes during a season of high pollution in an urban area[J]. Environ Geochem Health, 2023, 46:7.
- [105] Wu X,Keegan J,Behan P. Migration analysis of Cr, Ni, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, and Mo in internet -bought food serving stainless -steel utensils by ICP-MS and XRF[J]. Food Addit Contam Part B Surveill, 2021, 14:256-263.
- [106] Kumar R,Srivastava PK,Srivastava SP. Leaching of heavy metals (Cr, Fe, and Ni) from stainless steel utensils in food simulants and food materials[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 1994, 53:259-266.
- [107] Liu Y,Xing J,Wang S,et al. Source-specific speciation profiles of PM_{2.5} for heavy metals and their anthropogenic emissions in China [J]. Environ Pollut, 2018, 239:544-553.
- [108] Wu D,Landsberger S,Larson SM. Evaluation of elemental cadmium as a marker for environmental tobacco smoke[J]. Environ Sci Technol, 1995, 29:2311-2316.
- [109] 段小丽.暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评价中的应用[M].北京:科学出版社,2012.
- [110] 黎志豪,刘建龙,邹引引,等.住宅室内 PM_{2.5} 重金属污染特征与健康风险评价[J].建筑热能通风空调,2020,39(5):49-52.
- [111] 陈泉,李灿,魏小清,等.株洲市冬季室内 PM_{2.5} 污染成分特征及健康风险研究[J].环境污染与防治,2019,41(9):1088-1093.

收稿日期:2023-09-27 责任编辑:黄丽媛