·综 述·

全球热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属分布及健康风险研究进展

伍燕春[1]，余越[1]，罗嘉欣[1]，李井爱[1]，何昌华[2,3]

1. 海南医科大学公共卫生学院，海口 571199；
2. 海南省疾病预防控制中心公共卫生研究所，海口 571129；
3. 海南省预防医学科学院，海口 571129
通信作者：何昌华，E-mail：hechanghua2006@126.com

【摘 要】本文系统综述了 2014—2024 年全球热带地区关于大气 $PM_{2.5}$ 中 14 种重(类)金属的浓度谱系、时空分布及其健康风险研究进展。结果表明，热带地区国家间大气 $PM_{2.5}$ 中铝(Al)和铁(Fe)浓度普遍较高，地域性差异为中高收入<高收入<中低收入的国家；其他重(类)金属也存在一定的地域性复合污染差异，中低收入国家以钡(Ba)、锌(Zn)和锰(Mn)为主，中高收入国家以锌(Zn)、锰(Mn)和铜(Cu)为主，高收入国家以锌(Zn)、锰(Mn)和铅(Pb)为主。14 种重(类)金属非致癌风险的危害系数(HQ)均较低(HQ<1)；砷(As)、铬(Cr)和钴(Co)的致癌风险(CR)较为明显，其中中低收入国家以 Cr 和 Co、中高收入国家以 Cr 和 As、高收入国家以 Cr 的致癌风险较明显($CR>1\times10^{-6}$)。本综述可为热带地区国家制定差异化环境标准与健康防护策略提供一定的科学参考。

【关键词】重(类)金属；大气细颗粒物($PM_{2.5}$)；健康风险；热带地区；致癌风险

Current research status on distribution and health risks of heavy metals (metalloids) in atmospheric $PM_{2.5}$ in tropical regions: a systematic review

WU Yanchun[1], YU Yue[1], LUO Jiaxin[1], LI Jing′ai[1], HE Changhua[2,3] (*1. School of Public Health*, *Hainan Medical University*, *Haikou* 571199, *China*; *2. Institute of Public Health*, *Hainan Provincial Center for Disease Control and Prevention*, *Haikou* 571129, *China*; *3. Hainan Academy of Preventive Medicine*, *Haikou* 571129, *China*)
Corresponding author: HE Changhua, E-mail: hechanghua2006@126.com

【**Abstract**】 This article systematically reviews the research progress in the concentration spectrum, spatio-temporal distribution, and health risks of 14 heavy metals (metalloids) in atmospheric $PM_{2.5}$ in tropical regions around the world from 2014 to 2024. The results showed that the concentrations of aluminum (Al) and iron (Fe) in atmospheric $PM_{2.5}$ among countries in tropical regions were both high and followed the trend of countries with mid-high income < countries with high income < countries with mid-low income. Other heavy metals (metalloids) also had certain regional composite pollution differences. Specifically, the pollution was dominated by barium (Ba), zinc (Zn), and manganese (Mn) in the countries with mid-low income, Zn, Mn, and copper (Cu) in the countries with mid-high income, and Zn, Mn, and lead (Pb) in the countries with high income. The hazard quotients (HQ) of non-carcinogenic risk of 14 heavy metals (metalloids) were low (HQ < 1). The carcinogenic risk (CR) of arsenic (As), chromium (Cr), and cobalt (Co) was high. Specifically, the CR of Cr and Co in the countries with mid-low income, Cr and As in the countries with mid-high income, and Cr in the countries with high income was high ($CR > 1 \times 10^{-6}$). This review can provide scientific references for tropical countries and regions in formulating differentiated environmental standards and health protection strategies.

【**Keywords**】 heavy metals (metalloids); $PM_{2.5}$; health risk; tropical regions; carcinogenic risk

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0 DOI：10.11847/zgggws1147580
基金项目：海南省自然科学基金(821MS150)
第一作者：伍燕春(1997—)，硕士在读，研究方向：环境与健康。
收稿日期：2025-04-01 修回日期：2025-08-11 录用日期：2025-08-30
利益冲突：不存在 伦理审查：不需要 出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

细颗粒物(fine particulate matter, $PM_{2.5}$)空气动力学直径≤2.5 μm，因体积小、成分复杂和环境活性高的特点，易携带重(类)金属、细菌、毒素及致癌物等进入人体[1–2]。特别源于人为污染的重(类)金属元素更易聚集在大气 $PM_{2.5}$ 中[3–6]，通过呼吸过程在人体内蓄积引发疾病[7]。此外，重(类)金属也会干扰生物地球化学循环，造成环境与健康风险[8–9]。已有研究表明，多数重(类)金属即使在极低浓度下也具有毒性，甚至产生致癌性[10–11]。2013 年 10 月，国际癌症研究机构(IARC)已将空气污染的主要组成部分——细颗粒物归类为Ⅰ类致癌物[12–14]，其中砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)和镍(Ni)是已知对肺、皮肤、膀胱的明确致癌物[15]。根据世界卫生组织(WHO)统计，空气污染每年可导致全球约 700 万人过早死亡[16]。相关报道指出，2017 年全球约有 330 万人因空气颗粒物暴露而过早死亡，预计在 2050 年将增至约 600 万人[17]。现有研究显示，气候因素(气温、降水、日照等)变化会显著影响空气污染物的成分及浓度，从而间接或直接地影响空气污染物在人体内产生的健康危害强度[18–19]。热带地区承载了全球约 40% 的陆地面积与居住人口，预估到 2050 年居住人口将增至 50%，未来将会承载大量的人口迁移与发展需求[20]。随着全球气候变化和工业化进程的加速，热带地区空气质量可能衍生的健康风险问题也将日益凸显。当前，许多研究主要集中在局地分析大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属的来源、影响因素及健康风险上，在聚焦系统探析热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属分布与健康风险整体现状的文献报道相对较少。本文通过综述近年来全球热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中研究关注度较高的 14 种重(类)金属在浓度分布特征、污染源解析及健康风险的研究报道，旨在梳理和总结热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属的种类、浓度水平、分布特征及健康风险。以期进一步了解热带气候、地理环境和人类活动等条件对大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属分布特征、健康风险差异以及关键驱动机制的影响作用。为助推跨区域的大气环境与健康研究成果应用，促进并保障热带地区的生态环境安全，推动经济、社会和环境的可持续协调发展提供参考。

1　文献检索方法(图 1)

以中文数据库(中国知网、万方数据和维普中文期刊)和英文数据库(PubMed 和 Web of Science)为文献来源。中文检索词为“细颗粒物”“$PM_{2.5}$”“健康”“金属”“元素”“来源”和“风险”；英文检索词为 “fine particulate matter” “$PM_{2.5}$” “health” “metal” “element”“source”和“risk”。通过检索词组合在 5 个数据库中全文检索 2014 年 1 月 1 日—2024 年 12 月 31 日正式发表的期刊文献。累计获取 6 650 篇原始文献。聚焦全球热带地区开展的研究筛选文献，最终对 77 篇符合纳入标准的研究文献进行综述分析(图 1)。

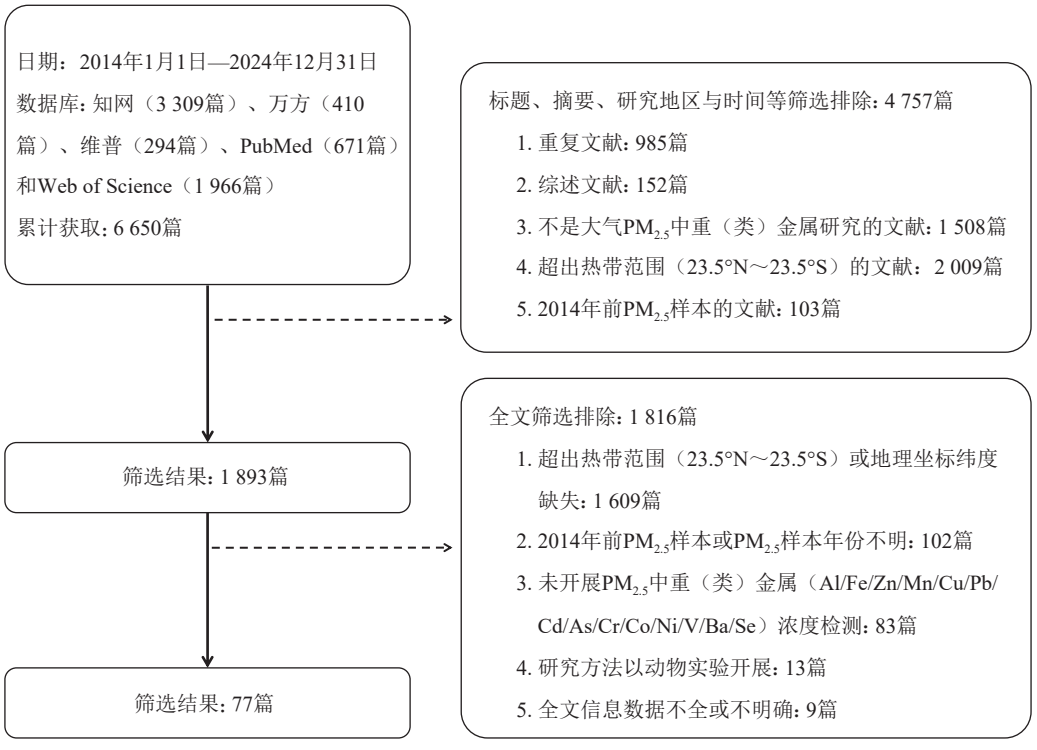


图 1　文献筛选流程图

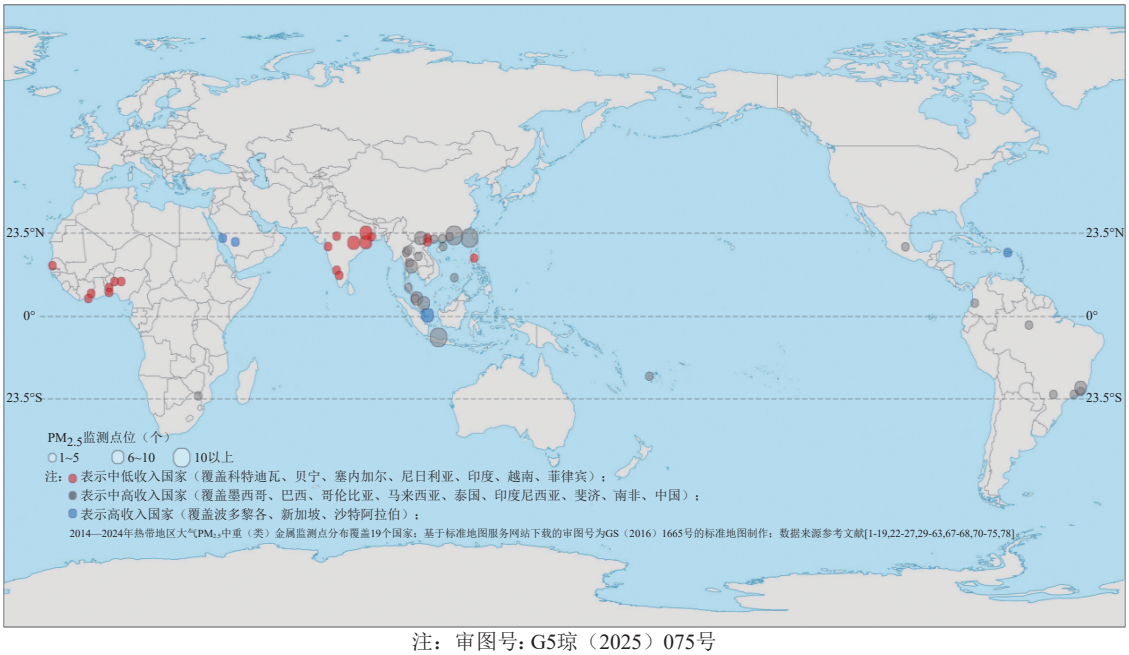
Fig. 1　Flowchart of literature screening

2 热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属分析

2.1 检测方法与特点 2014—2024 年，热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属的研究主要采用以下检测技术：电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)[21–28]、电感耦合等离子体光谱法(inductive coupling plasma optical emission spectrometer, ICP-OES)[14,19,29–31]、能量色散 X 射线荧光光谱法(energy-dispersive X-ray fluorescence, ED-XRF)[11,32–36]、X 射线荧光光谱法(X-ray fluorescence, XRF)[37]、全反射 X 射线荧光光谱法(total reflection X-ray fluorescence, TXRF)[38–39]、原子吸收分光光度法(atomic absorption spectrometry, AAS)等[12,40–42]。这些技术在分析流程的复杂性、检测限、元素特异性以及样品前处理要求等方面各具优势与局限。如 ED-XRF 技术具有非破坏性检测的特点[36]；TXRF 在分析过程中存在光谱线重叠和灵敏度较低的问题。但在测量低负载 $PM_{2.5}$ 中的 K、Cu 和 Zn 时显示出较高的可靠性；相对而言，ICP-OES 在测定 Ca、Cr、Ni 和 Pb 方面则更为精确[43]。

2.2 时空特征 基于文献筛选与结果分析，近年来，热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属污染研究有明显的地域分布特征：亚洲地区(主要在东亚、南亚、东南亚和西亚)占主导地位，而非洲、大洋洲、北美洲和南美洲则呈现低关注度或研究相对较少。

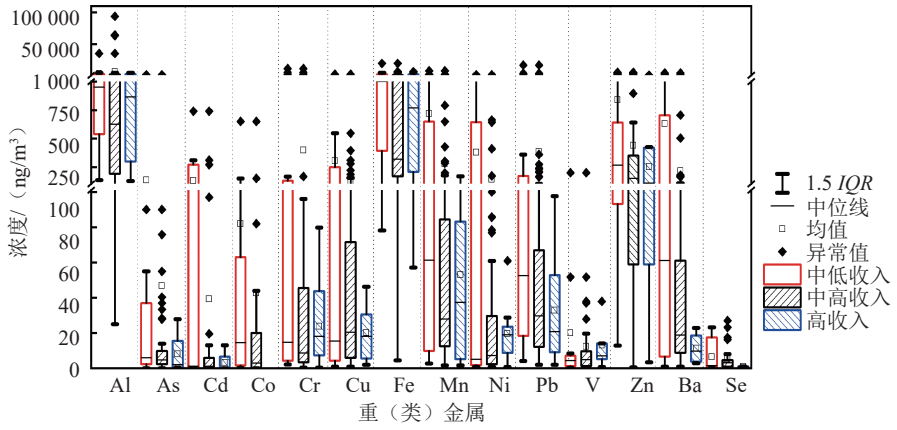
2.2.1 国家层面(图 2～图 4) 本综述纳入的文献研究范围覆盖中低收入国家(科特迪瓦、贝宁、塞内加尔、尼日利亚、印度、越南、菲律宾)、中高收入国家(墨西哥、巴西、哥伦比亚、马来西亚、泰国、印度尼西亚、斐济、南非、中国)和高收入国家(美国波多黎各、新加坡、沙特阿拉伯)。监测点多数聚焦于城区、工业区、交通区、居民区和学校等大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属污染敏感或典型暴露区域(图 2)。在热带地区国家，Al 和 Fe 是大气 $PM_{2.5}$ 中含量相对较高的金属元素[23–24,30,44–45]。其浓度特征表现为中高收入<高收入<中低收入的国家；其次是 Zn、Mn、Cu、Pb 和 Ba 等金属元素[31–32,46–47]；其中 Ba、Zn 和 Mn 在中低收入国家，Zn、Mn 和 Cu 在中高收入国家，Zn、Mn 和 Pb 在高收入国家的大气 $PM_{2.5}$ 中浓度也相对较高(图 3)。此外，Al 在泰国、印度和尼日利亚，Fe 在印度、中国和尼日利亚，Zn 在斐济、中国和泰国，Mn 在印度、泰国和新加坡，Cu 在印度、中国和泰国的大气 $PM_{2.5}$ 中浓度也相对较高(图 4)。值得关注的是，热带地区工业化城市或工业聚集区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属工业源贡献特征凸显[18,35,40,48]。如泰国罗勇工业区大气 $PM_{2.5}$ 中 Zn、Fe、Pb 和 Mn 浓度分别为 374、279、28 和 21.9 ng/m^3[49]；印度比莱工业区大气 $PM_{2.5}$ 中 Cr、Fe、Mn、Al、Co、Ni 和 Cu 浓度分别高达 5 350、2 530、2 450、1 920、650、1 610 和 1 690 ng/m^3[42]。从空间上看，热带地区城市大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属浓度通常呈现以下特征：农村低于中小型或轻工业城市<大或重工业城市[42]，郊区<居民区<交通区<工业区[10,50–51]，室外环境<室内场所[34,51]；这些分布特征均不同程度与人类活动强度及污染空间分布相关。



注：审图号：G5琼（2025）075号

图 2 热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属监测点分布

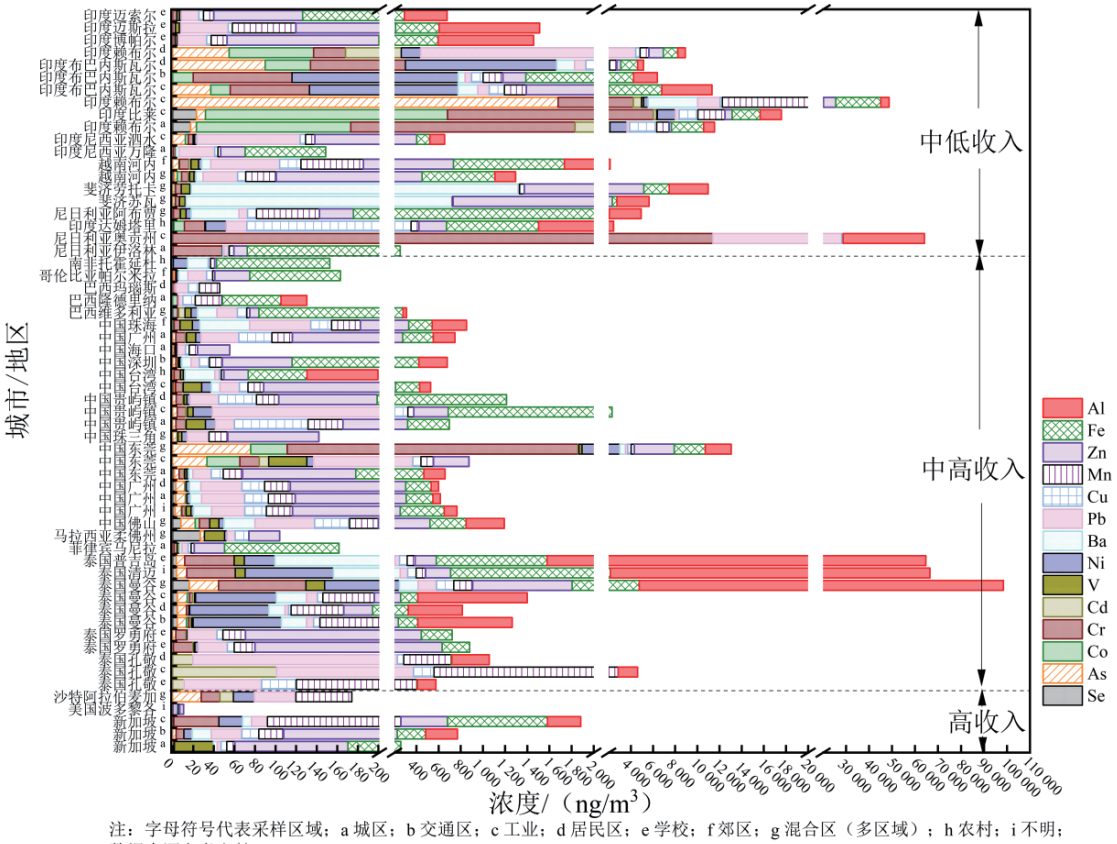
Fig. 2 Distribution of heavy metal (metalloid) monitoring points in atmospheric $PM_{2.5}$ in tropical regions



注：数据来源参考文献 [1, 3, 7-8, 10-11, 15-16, 18-19, 21, 24-27, 31-32, 35-40, 42, 44-49, 52-55, 57, 59-60, 64-65, 71-72, 74-75, 77]。

图 3　热带地区国家大气 $PM_{2.5}$ 中主要重（类）金属浓度比较（2014—2024）

Fig. 3　Comparison of the concentrations of major heavy metals (metalloids) in atmospheric $PM_{2.5}$ in tropical countries from 2014 to 2024



注：字母符号代表采样区域：a 城区；b 交通区；c 工业；d 居民区；e 学校；f 郊区；g 混合区（多区域）；h 农村；i 不明；数据来源参考文献[1, 3, 7-8, 10-11, 15-16, 18-19, 24, 26-27, 31-32, 35-40, 42, 44-49, 52-54, 57, 59-60, 65, 71-72, 74-75, 77]。

图 4　热带地区城市大气 $PM_{2.5}$ 中各重（类）金属浓度构成情况（2014—2024）

Fig. 4　Concentration composition of heavy metals (metalloids) in atmospheric $PM_{2.5}$ in tropical regions from 2014 to 2024

2.2.2 时间层面　近年来热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重（类）金属研究，采样周期多覆盖冬季、夏季，旱季、雨季，季风前期、季风期和季风后期等时段，而春季和秋季覆盖度相对较低。大气 $PM_{2.5}$ 中重（类）金属浓度一般为冬季高于秋季、春季和夏季[46,52–54]，夏季低于冬季、秋季和春季[46,52–56]，旱季高于雨季[2,31,49,57]，季风后期高于季风前期和季风期[12]。季节浓度差异受大气层逆温、局地气象条件、地形和人为排放等多种因素影响[13,40]。就日含量而言，大气 $PM_{2.5}$ 中 Cu、Mn、Zn、Pb 和 V 白天浓度高于晚上[33,58]，可能是晨间逆温层形成机制和交通高峰期尾气排放的双重作用所致。

3　热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重（类）金属来源

3.1　*源解析方法与特点*　对于大气 $PM_{2.5}$ 中重（类）金属来源的研究，近年来热带地区城市普遍采用的分析方法包括富集因子法（enrichment factor, EF）、主成分分析（principal component analysis, PCA）、反

轨迹模型(hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory, HYSPLIT)、化学质量平衡(chemical mass balance, CMB)以及正定矩阵分解模型(positive matrix factorization, PMF)等。各种分析方法均具有其特定的优势与局限性。EF 法主要用于定性分析，能够有效区分重(类)金属的自然源与人为污染源[54,59–60]。PCA 广泛应用于识别大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属污染源的类型，然而其权重计算的缺陷限制了其定量解析能力[17,61–62]。HYSPLIT 模型通过气象场模拟与粒子追踪技术，揭示气团迁移路径及污染物扩散机制，有助于识别大气污染的潜在来源[2,9,56,63–65]。CMB 和 PMF 为定量的受体模型，其中 CMB 模型依赖于污染源化学剖面数据定量分析源贡献，但对排放数据的精度要求较高[66]，而 PMF 模型源解析则无需识别污染排放源化学剖面[22,67–69]。同时，文献反映 PMF 模型也是当前应用到识别和量化大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属来源的主流源解析工具。

3.2 主要重(类)金属污染来源(表 1) 当前，热带地区城市大气 $PM_{2.5}$ 中所含重(类)金属的源解析研究主要集中在重(类)金属与其他相关成分的协同源解析[32,62,70]，以及跨越不同粒径谱系的成分研究。一方面，比较 $PM_{2.5}$ 与粉尘(PM_{10} 或 PM_1)中重(类)金属成分的源解析结果[3,15,71]。另一方面，鉴于源解析方法受限于输入源谱数据的完整性，不同的源解析方法可能导致源解析结果的差异性[57,68]。热带地区城市大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属主要污染来源见表 1。

表 1 2014—2024 年热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属主要来源构成
Table 1 Main sources of heavy metals (metalloids) in atmospheric $PM_{2.5}$ in tropical regions from 2014 to 2024

重(类)金属	污染来源构成及参考文献
Al	土壤(地壳)[58–59]、道路粉尘(扬尘)[1,56,59]、建筑材料[61]、车辆尾气[56]、灰尘[9]、海洋喷雾[9]、有色冶金[28]、焚化炉排放[28]、土壤再悬浮[34]、道路粉尘再悬浮[67]、建筑焊接活动[30]
As	工业排放[72]、锅炉燃烧[1]、煤燃烧[28]
Cd	车辆排放[57]、建筑钢材[61]、船舶/车辆排气[9]、钢铁厂[28]、燃煤源[67]、轮胎磨损(非废气交通排放)[67]
Co	工业排放[19,72]、汽车废气[28]、车辆排放[19]、车辆制动排放(非废气交通排放)[67]
Cr	金属表面磨损[61]、工业来源[56]、船舶排放[9]、道路粉尘(扬尘)[1,49]、汽车废气[28,67,69]、燃煤[54]、交通/扬尘[62]、车辆排放[19]、非废气排放[55]
Cu	汽车排放[19]、土壤和道路粉尘[13]、钢铁工业[13]、煤燃烧[67]、冶金工业[59]、建筑材料及装饰[61]、船舶/车辆尾气[56,58]、船舶排放[9]、灰尘[9]、工业排放[67]、非废气排放[55]、土壤源[30]
Fe	煤燃烧[13]、车辆排放[34,57]、废金属回收[57]、土壤(地壳)[56,58–59, 61]、道路粉尘(扬尘)[1,59]、灰尘[9]、船舶排放[9]、钢铁厂[13,28]、交通/扬尘[62]、土壤再悬浮[34]、非废气排放[55]、建筑焊接活动[30]、工业来源[49]
Mn	交通排放[13]、煤燃烧[13]、车辆排放[57]、冶金工业[59]、土壤和机动车粉尘[61]、船舶/车辆尾气[58, 69]、工业来源[56]、船舶排放[9]、钢铁厂[28]、交通/扬尘[62]、非废气排放[55]
Ni	炼油[72]、交通排放[13]、地壳[61]、船舶/车辆尾气[56,58]、船舶排放[9]、船舶重油[1]、石油燃烧[28]、工业排放[19]、道路粉尘[49]
Pb	汽车排放[56–57]、土壤和道路粉尘[13]、煤燃烧[67]、金属冶炼[59]、建筑油漆[61]、船舶/车辆尾气[56]、燃油燃烧[56]、车辆排气[9]、钢铁工业[13,28]、工业排放[62]、化石燃料燃烧[34]、垃圾焚烧发电厂[55]、土壤源[30]
V	燃煤电厂[72]、交通排放[13]、土壤和道路粉尘[13]、车辆排放[57]、船舶/车辆尾气[9,56,58]、工业来源[56]、燃油燃烧[56]、船舶重油[1]、石油燃烧[28]、船舶排放[54]、汽车尾气排放[67]
Zn	汽车排放[56–57]、废金属回收[57]、地壳[58,61]、工业来源[19]、灰尘[9]、海洋喷雾[9]、钢铁厂[28]、非废气排放[55]、垃圾焚烧发电厂[55]、土壤源[30]
Ba	焚化炉排放[28]、汽车废气[28]、电路板制造[54]、车辆排放[19]、工业排放[19]、轮胎磨损及制动(非废气交通排放)[67]
Se	燃煤电厂[72]、煤燃烧[28]、车辆排放[34]、化石燃料燃烧[34]

4 热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属暴露的健康风险

4.1 健康风险评估模型与方法 近年来，热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属健康风险评价研究，主要采用美国环境保护署推荐的人体健康风险评估模型。该模型综合考虑了大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属暴露浓度、暴露时长和毒性强度系数，并结合参考剂量和人群人均寿命，从致癌和非致癌两个维度评估大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属对人体健康的潜在影响。评估的重(类)金属包括国际癌症研究机构认定的Ⅰ类致癌物以及普遍认为可能对人类具有致癌性的有毒元素[16,49,55]。

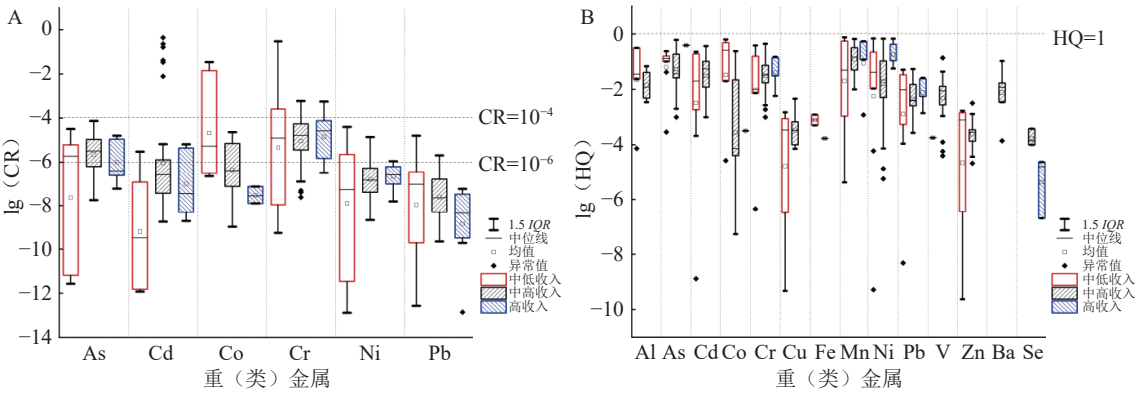
经口腔摄入、呼吸道吸入和皮肤接触是重(类)金属进入人体并可能对健康造成危害的 3 种暴露途径。既往研究多聚焦于容易被忽视的呼吸道吸入途径[21]，而对另外 2 种暴露途径的健康风险研究相对不足。近年来的研究显示，热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属通过不同暴露途径所致的健康风险存在差异。如在印度丹巴德、沙特阿拉伯麦加和越南河内的研究均发现，$PM_{2.5}$ 中重(类)金属经口腔摄入途径暴露风险相对较高[16,67,73]；

在印度赖布尔及中国珠三角地区和深圳市的研究表明，大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属通过呼吸道途径暴露的健康风险更大[21,46,74]。

4.2 致癌与非致癌风险　根据 US EPA 提出的健康风险评估模型，评估人体重(类)金属暴露的致癌风险(carcinogenic risk, CR)，$CR \leqslant 1\times10^{-6}$ 表明致癌风险可忽略；$1\times10^{-6}<CR\leqslant1\times10^{-4}$ 表明处于可接受的致癌风险范围内；$CR>1\times10^{-4}$ 表明致癌风险不可接受[35,52]。评估人体重(类)金属暴露的危害系数(hazard quotients, HQ)和危害指数(hazard index, HI)，HQ 或 HI≤1 表明非致癌风险在可接受范围内；HQ 或 HI>1 表明存在不可接受的非致癌风险[52]。

4.2.1 致癌风险(图 5A)　近年热带地区主要关注 As、Cd、Co、Cr(VI)、Ni 和 Pb 金属元素对人类的致癌作用[16,49]。值得注意的是，在 Cr(VI)的致癌风险评估中，多数研究直接利用大气 $PM_{2.5}$ 中 Cr 总浓度估算，而少数研究则根据 US EPA 推荐比例 1/7Cr 总浓度校正 Cr(VI)的致癌风险[19,46,48,55]。在热带地区城市，As 和 Cr 对成人[8,31–32,55,71–72]、Cd 对成人和儿童的致癌风险相对明显($CR>1\times10^{-6}$)[10,71]。如泰国曼谷市、印度尼西亚泗水市、中国广州市和东莞市等地的研究显示，大气 $PM_{2.5}$ 中 As 和 Cr 对成人的致癌风险高于儿童 3～5 倍，且均超过 1×10^{-6}[8,48,55,71]；泰国孔敬府的研究发现，大气 $PM_{2.5}$ 中 Cd 对儿童和成人的致癌风险分别高达 0.23×10^{1} 和 4.4×10^{-1}[10]；泰国曼谷市的研究表明，大气 $PM_{2.5}$ 中 Cd 对成人的致癌风险为 1.46×10^{-6}[71]。在热带地区国家，As、Cr 和 Co 的致癌风险较明显，中低收入国家以 Cr 和 Co、中高收入国家以 Cr 和 As、高收入国家以 Cr 的致癌风险较明显($CR>1\times10^{-6}$)。

4.2.2 非致癌风险(图 5B)　近年来热带地区主要探讨 Al、Fe、Zn、Mn、Cu、Pb、Cd、As、Cr、Co、Ni、V、Ba 以及 Se 金属元素的非致癌风险。在热带地区城市，14 种重(类)金属通过呼吸道途径产生的 HQ 均<1[8,17,27,52]，但 Mn、Ni、Cr、As 和 Cd 呈现相对较高的 HQ[1,12,27,75]；其中，Mn 表现出较高的 HQ，可能与其生物利用度相对较高有关[74]。在热带地区国家，尽管大气 $PM_{2.5}$ 中单一重(类)金属的 HQ 均<1，但需关注热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中多种重(类)金属的 HI。如泰国曼谷市、尼日利亚奥贡州和中国中山市等地大气 $PM_{2.5}$ 中多种重(类)金属的 HI 已超过 1[26–27,71]，表明存在不可接受的非致癌风险。



注：A $PM_{2.5}$中重（类）金属经呼吸暴露的健康风险（CR）比较；B $PM_{2.5}$中重（类）金属经呼吸暴露的健康风险（HQ）比较；数据来源参考文献 [1, 3, 8, 10, 16-19, 21, 26-27, 31-32, 35, 44, 46, 48, 54-55, 59, 65, 71-72, 75-76]。

图 5　热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属经呼吸暴露的健康风险比较(2014—2024)

Fig. 5　Comparison of health risks of respiratory exposure to heavy metals (metalloids) in atmospheric $PM_{2.5}$ in tropical regions from 2014 to 2024

4.2.3 致癌和非致癌风险的影响因素　研究文献显示，致癌和非致癌的风险程度可能受以下因素的综合影响出现差异化特征。一方面，局地气象条件(风向、温度、湿度、降雨量等)[66,76]、人为活动(交通排放、工业排放)[65,77]、工业布局[3,10]、区域地理环境(如地形地貌、植被覆盖度)[8–9]、当地环境政策等影响因素可能导致热带地区不同城市间大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属成分及含量暴露程度差异[56,59]；另一方面，大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属对人体健康的危害强度与呼吸频率、体重、暴露时间、致癌斜率因子、参考剂量和重(类)金属生物可利用度密切相关。如儿童的致癌和非致癌风险均要高于成人[3,16,39, 46,67]，可能是因为儿童的呼吸频率和体重与成人不同所导致[39]；成人的致癌和非致癌风险高于儿童，可能与成人在大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属的暴露时间高于儿童有关[7,75]。Cr 浓度(5.6 ng/m^3)较低但对人体致癌风险($CR>6.3\times10^{-5}$)较高，与其致癌斜率因子有关[54]。Fe 和 Zn 浓度(248 和 553 ng/m^3)较高，但对人体危害系数($HQ=1.7\times10^{-4}$ 和 $HQ=8.85\times10^{-4}$)较低，与其参考剂量有关[18]；印度赖布尔市和加尔各答市的研究显示，大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属对人体的健康风险

可能因生物可利用浓度低于总浓度而被高估[74,78]。基于重(类)金属实际暴露水平[33]，及其在人体内的生物可利用性浓度可更科学合理地评价大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属健康风险[7,26,41,59,74]。

目前，关于我国热带地区城市大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属的研究，多集中在浓度分布规律及化学形态分析方面，部分研究涉及了重(类)金属的来源、生物有效性评估及对人体的健康风险评价，但对大气 $PM_{2.5}$ 低浓度区域中的重(类)金属系统性研究尚显不足，亟须开展全面、系统的研究。未来可着重于以下方面研究：(1)深入分析热带气象条件(温度、降雨量等)与大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属浓度之间的关系及其影响；(2)综合分析个体暴露浓度、重(类)金属生物可利用度和环境因素协同作用的影响，科学合理地研究大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属的健康风险；(3)热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属特定污染源的健康风险研究较为缺乏，深入研究特定污染源的健康风险可为热带城市优先防控大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属污染源提供科学参考。本文虽对热带地区大气 $PM_{2.5}$ 中重(类)金属浓度分布特征、污染来源及健康风险予以广泛分析和探讨，但仍存在以下局限性：(1)时空可比性不足。现有文献中样本的采样时间多局限于短期或特定季节(如季风期等)，部分国家缺乏长期或同步监测数据。本综述可能不完全代表全球热带地区情况；(2)研究区域异质性。现有研究多聚焦于单一城市或工业区，缺乏对不同功能区(如工业区、交通区、居民区)的系统性对比；(3)方法学差异。大气 $PM_{2.5}$ 样本采样方式、采样仪器、滤膜材质及仪器检出限的不统一，可能导致重(类)金属浓度数据存在方法误差。

数据可用性声明 本综述的原始数据均可从所引用参考文献中获取。

参考文献

[1] Zheng Y, Chen S L, Chen Y Y, et al. Association between $PM_{2.5}$-bound metals and pediatric respiratory health in Guangzhou: an ecological study investigating source, health risk, and effect[J]. Frontiers in Public Health, 2023, 11: 1137933.

[2] Linh B D, Le H A, Truong N X. Physico-chemical properties and transboundary transport of $PM_{2.5}$ in Bien Hoa city, Dong Nai province, southeastern Vietnam[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(13): 36533-36544.

[3] 赵委托, 陈娟, 胡渭平, 等. 电镀企业周边大气颗粒物 $PM_{2.5}$、PM_{10} 和 TSP 中重金属分布特征及健康风险评价 [J]. 生态毒理学报, 2017, 12(3): 470-484.

[4] Ahmed M, Guo X X, Zhao X M. Determination and analysis of trace metals and surfactant in air particulate matter during biomass burning haze episode in Malaysia[J]. Atmospheric Environment, 2016, 141: 219-229.

[5] Ndong Ba A, Cazier F, Verdin A, et al. Physico-chemical characterization and *in vitro* inflammatory and oxidative potency of atmospheric particles collected in Dakar city's (Senegal)[J]. Environmental Pollution, 2019, 245: 568-581.

[6] Oetari P S, Hadi S P, Huboyo H S. Trace elements in fine and coarse particles emitted from coal-fired power plants with different air pollution control systems[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 250: 109497.

[7] Huang L, Bai Y H, Ma R Y, et al. Winter chemical partitioning of metals bound to atmospheric fine particles in Dongguan, China, and its health risk assessment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(13): 13664-13675.

[8] 袁鸾, 徐伟嘉, 岳玎利, 等. 广州不同环境空气 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染特征与风险评价 [J]. 中国环境监测, 2021, 37(6): 91-100.

[9] Yen P H, Yuan C S, Wu C H, et al. Transport route-based cluster analysis of chemical fingerprints and source origins of marine fine particles ($PM_{2.5}$) in South China Sea[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806(Pt 2): 150591.

[10] Sakunkoo P, Thonglua T, Sangkham S, et al. Human health risk assessment of $PM_{2.5}$-bound heavy metal of anthropogenic sources in the Khon Kaen province of Northeast Thailand[J]. Heliyon, 2022, 8(6): e09572.

[11] Haswani D, Sunder Raman R, Yadav K, et al. Pollution characteristics and ecological risks of trace elements in $PM_{2.5}$ over three COALESCE network sites—Bhopal, Mesra, and Mysuru, India[J]. Chemosphere, 2023, 324: 138203.

[12] Behera R R, Satapathy D R, Majhi A. Human health risk assessment model associated with $PM_{2.5}$ bound metals in paradip port township, India[J]. Chemosphere, 2024, 350: 141111.

[13] EzhilKumar M R, Karthikeyan S, Chianese E, et al. Vertical transport of PM and PM and its source identification in the street canyons of Chennai metropolitan city, India[J]. Atmospheric Pollution Research, 2021, 12(1): 173-183.

[14] Botle A, Singhal R K, Basu H, et al. Health risk assessment of heavy metals associated with Coarse and Quasi-accumulative airborne particulate matter in Mumbai city situated on the Western Coast of India[J]. Environmental Technology and Innovation, 2020, 19: 100857.

[15] Wu Y J, Li G Y, An T C. Toxic metals in particulate matter and health risks in an e-waste dismantling park and its surrounding areas: analysis of three PM size groups[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(22): 15383.

[16] Abdulaziz M, Alshehri A, Badri H, et al. Concentration level and health risk assessment of heavy metals in $PM_{2.5}$ in ambient air of Makkah city, Saudi Arabia[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2022, 31(5): 3991-4002.

[17] Chifflet S, Guyomarc'h L, Dominutti P, et al. Seasonal variations of metals and metalloids in atmospheric particulate matter ($PM_{2.5}$) in the urban megacity Hanoi[J]. Atmospheric Pollution Research, 2024, 15(1): 101961.

[18] Kawichai S, Bootdee S, Sillapapiromsuk S, et al. Epidemiological study on health risk assessment of exposure to $PM_{2.5}$-bound toxic metals in the industrial metropolitan of Rayong, Thailand[J]. Sustainability, 2022, 14(22): 15368.

[19] Mahapatra P S, Panda U, Mallik C, et al. Chemical, microstructural, and biological characterization of wintertime $PM_{2.5}$ during a land campaign study in a coastal city of eastern India[J]. Atmospheric Pollu-

tion Research, 2021, 12(9): 101164.

[20] Rupali P. Introduction to tropical medicine[J]. Infectious Disease Clinics of North America, 2019, 33(1): 1-15.

[21] 张洛红, 范芳, 蒋炜炜, 等. 珠三角地区大气 $PM_{2.5}$ 中重金属污染水平及健康风险评价 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(1): 370-380.

[22] Kumar V, Sahu M, Biswal B, et al. Temporal dynamics and source characteristics of fine particulate matter using positive matrix factorization (PMF)[J]. Atmospheric Pollution Research, 2025, 16(8): 102539.

[23] Othman M, Latif M T, Jamhari A A, et al. Spatial distribution of fine and coarse particulate matter during a southwest monsoon in Peninsular Malaysia[J]. Chemosphere, 2021, 262: 127767.

[24] Guo L C, Liu T, He G H, et al. Short-term mortality risks of daily $PM_{2.5}$-bound metals in urban region of Guangzhou, China, an indica tion of health risks of $PM_{2.5}$ exposure[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 228: 113049.

[25] Gui C Y, Zhang H, Lv Z L, et al. Effects of fine particulate matter bound heavy metals on intentional self-harm deaths in Guangzhou, China, insight from core chemical constituents[J]. International Journal of Biometeorology, 2025, 69(2): 357-365.

[26] Anake W U, Benson N U, Tenebe I T, et al. Chemical speciation and health risks of airborne heavy metals around an industrial community in Nigeria[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020, 26(1): 242-254.

[27] Wu Y J, Li G Y, Yang Y, et al. Pollution evaluation and health risk assessment of airborne toxic metals in both indoors and outdoors of the Pearl River Delta, China[J]. Environmental Research, 2019, 179: 108793.

[28] Yi S Y, Li X N, Chen W P. High-resolution risk mapping of heavy metals in soil with an integrated static-dynamic interaction model: a case study in an industrial agglomeration area in China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 455: 131650.

[29] Raparthi N, Yadav S, Khare A, et al. Chemical and oxidative properties of fine particulate matter from near-road traffic sources[J]. Environmental Pollution, 2023, 337: 122514.

[30] Kraisitnitikul P, Thepnuan D, Chansuebsri S, et al. Contrasting compositions of $PM_{2.5}$ in Northern Thailand during La Niña (2017) and El Niño (2019) years[J]. Journal of Environmental Sciences, 2024, 135: 585-599.

[31] Mani S A, Peltier R E, Le Mestre M, et al. Black carbon and elemental characterization of $PM_{2.5}$ in dense traffic areas in two cities in Fiji, a Small Island Developing State[J]. Science of the Total Environment, 2022, 845: 157136.

[32] Pongpiachan S, Wang Q Y, Apiratikul R, et al. Combined use of principal component analysis/multiple linear regression analysis and artificial neural network to assess the impact of meteorological parameters on fluctuation of selected $PM_{2.5}$-bound elements[J]. PLoS One, 2024, 19(3): e0287187.

[33] Xu H M, Léon J F, Liousse C, et al. Personal exposure to $PM_{2.5}$ emitted from typical anthropogenic sources in southern West Africa: chemical characteristics and associated health risks[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(10): 6637-6657.

[34] Fernandes K S, dos Santos E O, Godoi R H M, et al. Characterization, source apportionment and health risk assessment of $PM_{2.5}$ for a rural classroom in the Amazon: a case study[J]. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2021, 32(2): 363-375.

[35] Galvão E S, Santos J M, Goulart E V, et al. Health risk assessment of inorganic and organic constituents of the coarse and fine PM in an industrialized region of Brazil[J]. Science of the Total Environment, 2023, 865: 161042.

[36] Polezer G, Oliveira A, Potgieter-Vermaak S, et al. The influence that different urban development models has on $PM_{2.5}$ elemental and bioaccessible profiles[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 14846.

[37] Morton S, Honda T, Zimmerman E, et al. Non-nutritive suck and airborne metal exposures among Puerto Rican infants[J]. Science of the Total Environment, 2021, 789: 148008.

[38] Mateus-Fontecha L, Vargas-Burbano A, Jimenez R, et al. Understanding aerosol composition in a tropical inter-Andean valley impacted by agro-industrial and urban emissions[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, 22(13): 8473-8495.

[39] Edlund K K, Killman F, Molnár P, et al. Health risk assessment of $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5}$-bound trace elements in Thohoyandou, south Africa[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(3): 1359.

[40] Khobragade P P, Vikram Ahirwar A. Chemical and morphological characterization of $PM_{2.5}$ samples collected over an urban industrial region Raipur, Chhattisgarh[J]. Acta Geophysica, 2023, 71(6): 3057-3076.

[41] Corona Sánchez J E, del Carmen Angeles González Chávez M, Carrillo González R, et al. Metal(loid) bioaccessibility of atmospheric particulate matter from mine tailings at Zimapan, Mexico[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(15): 19458-19472.

[42] Pervez S, Sahu R K, Tripathi M, et al. Assessment and evaluation of ambient $PM_{2.5}$ in relation to its health effects in mineral-based coal-fired areas[J]. Geofizika, 2020, 37(1): 67-90.

[43] Zhi M K, Zhang K, Zhang X, et al. A statistic comparison of multi-element analysis of low atmospheric fine particles ($PM_{2.5}$) using different spectroscopy techniques[J]. Journal of Environmental Sciences, 2022, 114: 194-203.

[44] Sulaymon I D, Mei X D, Yang S J, et al. $PM_{2.5}$ in Abuja, Nigeria: chemical characterization, source apportionment, temporal variations, transport pathways and the health risks assessment[J]. Atmospheric Research, 2020, 237: 104833.

[45] 徐伟嘉, 林满, 岳玎利, 等. 东莞大气 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染特征与生态风险 [J]. 环境科学与技术, 2021, 44(S1): 155-160.

[46] 古添发, 闫润华, 姚沛廷, 等. 深圳市大气中 $PM_{2.5}$ 载带金属污染特征及健康风险 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(1): 88-95.

[47] Zhou S Z, Davy P K, Wang X M, et al. High time-resolved elemental components in fine and coarse particles in the Pearl River Delta region of Southern China: dynamic variations and effects of meteorology[J]. Science of the Total Environment, 2016, 572: 634-648.

[48] Lestiani D D, Santoso M, Kijin S, et al. Toxic elements, sources and health risk assessment of $PM_{2.5}$ in an industrial area of Surabaya, Indonesia[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2024: 1-19.

[49] Kawichai S, Bootdee S, Chantara S. Health risk assessments and source apportionment of $PM_{2.5}$-bound heavy metals in the initial eastern economic corridor (EEC): a case study of Rayong province, Thailand[J]. Atmospheric Pollution Research, 2024, 15(9): 102205.

[50] Huboyo H S, Isworo S, Oetari P S, et al. Trace metals pollution in ambient air of urban and rural coastal environments[J]. Global NEST Journal, 2024, 26(1): 05174.

[51] Alias A, Latif M T, Othman M, et al. Compositions, source apportio-

nment and health risks assessment of fine particulate matter in naturally-ventilated schools[J]. Atmospheric Pollution Research, 2021, 12(10): 101190.

[52] 何昌华, 伍燕春, 杨夕, 等. 海口市城区 2021—2022 年大气 $PM_{2.5}$ 中主要重金属构成特征及健康风险评价 [J]. 中国热带医学, 2024, 24(6): 664-671.

[53] Yan R H, Peng X, Lin W W, et al. Trends and challenges regarding the source-specific health risk of $PM_{2.5}$-bound metals in a Chinese megacity from 2014 to 2020[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(11): 6996-7005.

[54] 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 等. 珠海市郊区大气 $PM_{2.5}$ 中元素特征及重金属健康风险评价 [J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1553-1561.

[55] Huang W Q, Zhang Z S, Huang J J, et al. High contribution of non-exhaust emission to health risk of $PM_{2.5}$-bound toxic metals in an urban atmosphere in south China[J]. Atmospheric Environment, 2023, 306: 119824.

[56] Templonuevo Cruz M, Simpas J B, Holz R, et al. Characteristics of particulate matter during New Year′s eve fireworks and Taal volcano ashfall in Metro Manila on January 2020[J]. Urban Climate, 2023, 50: 101587.

[57] Bui T H, Nguyen T P M. Source identification and health risk assessment of $PM_{2.5}$ in urban districts of Hanoi using PCA/APCS and UNMIX[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(8): 11815-11831.

[58] Nan N, Yan Z P, Zhang Y R, et al. Overview of $PM_{2.5}$ and health outcomes: focusing on components, sources, and pollutant mixture co-exposure[J]. Chemosphere, 2023, 323: 138181.

[59] Polezer G, Potgieter-Vermaak S, Oliveira A, et al. The new WHO air quality guidelines for $PM_{2.5}$: predicament for small/medium cities[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2023, 45(5): 1841-1860.

[60] McNeill J, Snider G, Weagle C L, et al. Large global variations in measured airborne metal concentrations driven by anthropogenic sources[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 21817.

[61] Idris S A, Hanafiah M M, Khan F, et al. Indoor generated $PM_{2.5}$ compositions and volatile organic compounds: potential sources and health risk implications[J]. Chemosphere, 2020, 255: 126932.

[62] 雷建容, 云龙, 苏翠平, 等. 深圳城市大气 $PM_{2.5}$ 中金属元素的在线测量与来源特征 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 80-85.

[63] Niampradit S, Kliengchuay W, Mingkhwan R, et al. The elemental characteristics and human health risk of $PM_{2.5}$ during haze episode and non-haze episode in Chiang Rai Province, Thailand[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(10): 6127.

[64] Nayebare S R, Aburizaiza O S, Siddique A, et al. Ambient air quality in the holy city of Makkah: a source apportionment with elemental enrichment factors (EFs) and factor analysis (PMF)[J]. Environmental Pollution, 2018, 243: 1791-1801.

[65] You S M, Yao Z Y, Dai Y J, et al. A comparison of PM exposure related to emission hotspots in a hot and humid urban environment: concentrations, compositions, respiratory deposition, and potential health risks[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599-600: 464-473.

[66] 刘启龙. 云南省蒙自市大气 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析 [J]. 四川环境, 2020, 39(5): 82-88.

[67] Bui T H, Nguyen D L, Nguyen T P M, et al. Correction to: chemical characterization, source apportionment, and human health risk assessment of $PM_{2.5}$ in an urban area in Hanoi, Vietnam[J]. Air Quality, Atmosphere and Health, 2023, 16(5): 1089.

[68] Tobarra D, Yubero E, Carratala A. Trends of anthropogenic sources in a southeastern Mediterranean coastal site over five years[J]. Atmospheric Environment, 2025, 355: 121279.

[69] 何昌华, 杨夕, 伍燕春, 等. 2020—2022 年海口市城区大气 $PM_{2.5}$ 中重 (类) 金属组成及来源解析 [J]. 环境卫生学杂志, 2024, 14(10): 802-811.

[70] 韩新宇, 卢秀青, 钟曜谦, 等. 云南省有色冶炼集中区春季大气颗粒物污染过程分析 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2021, 43(1): 90-100.

[71] Ahmad M, Manjantrarat T, Rattanawongsa W, et al. Chemical composition, sources, and health risk assessment of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in urban sites of Bangkok, Thailand[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(21): 14281.

[72] Alias N F, Khan M F, Sairi N A, et al. Characteristics, emission sources, and risk factors of heavy metals in $PM_{2.5}$ from southern Malaysia[J]. ACS Earth and Space Chemistry, 2020, 4(8): 1309-1323.

[73] Kumari S, Jain M K, Elumalai S P. Assessment of pollution and health risks of heavy metals in particulate matter and road dust along the road network of Dhanbad, India[J]. Journal of Health and Pollution, 2021, 11(29): 210305.

[74] Mishra A, Pervez S, Verma M, et al. Chemical fractionation of particulate-bound metal(loid)s to evaluate their bioavailability, sources and associated cancer risk in India[J]. Science of the Total Environment, 2023, 857(Pt 2): 159516.

[75] Nguyen T P M, Bui T H, Nguyen M K, et al. Assessing pollution characteristics and human health risk of exposure to $PM_{2.5}$ -bound trace metals in a suburban area in Hanoi, Vietnam[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2022, 28(3-4): 433-454.

[76] Tran P T M, Adam M G, Tham K W, et al. Assessment and mitigation of personal exposure to particulate air pollution in cities: an exploratory study[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 72: 103052.

[77] Zhang Z H, Khlystov A, Norford L K, et al. Characterization of traffic-related ambient fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in an Asian city: environmental and health implications[J]. Atmospheric Environment, 2017, 161: 132-143.

[78] Mitra S, Das R. Health risk assessment of construction workers from trace metals in $PM_{2.5}$ from Kolkata, India[J]. Archives of Environmental and Occupational Health, 2022, 77(2): 125-140.