

大气细颗粒物组分对心肺系统健康影响的研究进展

金玉, 凤志慧*

山东大学公共卫生学院劳动卫生与环境卫生学系, 山东 济南

收稿日期: 2025年12月21日; 录用日期: 2026年1月16日; 发布日期: 2026年1月23日

摘要

细颗粒物(fine particulate matter, PM_{2.5})作为空气污染的重要组成部分, 对公众健康构成严重威胁, 已成为全球公共卫生领域面临的重大挑战。近年来, 越来越多的流行病学研究表明, 无论短期还是长期暴露于PM_{2.5}均与心血管和呼吸系统疾病的发生与发展密切相关。然而, 相较于PM_{2.5}整体质量浓度, 其不同化学组分对心肺系统健康的影响研究仍十分缺乏, 相关证据相对有限。因此, 本文通过梳理近年来相关文献, 综述PM_{2.5}组分暴露对心肺系统健康效应的研究进展, 以期对未来组分健康效应研究提供参考, 为制定更精准的环境治理策略、促进人群心肺健康提供科学依据。

关键词

PM_{2.5}组分, 心血管系统疾病, 呼吸系统疾病

Research Progress on the Impact of Fine Particulate Matter Components in the Atmosphere on Cardiopulmonary System Health

Yu Jin, Zhihui Feng*

Department of Labor Hygiene and Environmental Hygiene, School of Public Health, Shandong University, Jinan Shandong

Received: December 21, 2025; accepted: January 16, 2026; published: January 23, 2026

*通讯作者。

文章引用: 金玉, 凤志慧. 大气细颗粒物组分对心肺系统健康影响的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(1): 2123-2129. DOI: 10.12677/acm.2026.161268

Abstract

Fine particulate matter (PM_{2.5}), as an important component of air pollution, poses a serious threat to public health and has become a major challenge in the field of global public health. In recent years, a large number of epidemiological studies have shown that both short-term and long-term exposure to PM_{2.5} is closely related to the occurrence and development of cardiovascular and respiratory diseases. However, compared with the overall mass concentration of PM_{2.5}, research on the impact of its different chemical components on the health of the cardiopulmonary system is still very scarce, and the relevant evidence is relatively limited. Therefore, this paper reviews the research progress on the health effects of PM_{2.5} component exposure on the cardiopulmonary system by reviewing relevant literature in recent years, with the aim of providing a reference for future research on the health effects of components and offering a scientific basis for formulating more precise environmental governance strategies and promoting cardiopulmonary health in the population.

Keywords

PM_{2.5} Components, Cardiovascular System Diseases, Respiratory System Diseases

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

细颗粒物(particulate matter, PM_{2.5})是指空气中直径小于或等于 2.5 微米的悬浮颗粒物。PM_{2.5} 作为一种典型的大气污染物,具有粒径小、活性强、易携带有毒有害物质等特性,对人类健康构成了严重的威胁[1]。然而值得注意的是,PM_{2.5}并非单一成分污染物,而是由多种化学成分组成的复杂混合物,其主要成分有黑碳(black carbon, BC)、元素碳(elemental carbon, EC)、有机碳(organic carbon, OC)、有机物(organic matter, OM)、硫酸盐(sulfate, SO₄²⁻)、硝酸盐(nitrate, NO₃⁻)、铵盐(ammonium, NH₄⁺)和金属与类金属元素等,这些组分对健康可能产生不同的影响。

研究表明 PM_{2.5} 对人类健康的影响,不仅取决于其粒径和浓度还与其组分密切相关。目前,与心血管系统和呼吸系统相关的健康风险研究主要聚焦于单个颗粒物,对于不同组分健康影响的证据尚缺乏。此外,由于不同地区污染程度、组分组成、气象条件以及人口构成等多种因素的影响,研究结果不尽相同。因此,识别大气 PM_{2.5} 中可能的关键毒性组分,对于人群心肺系统的健康及环境空气质量政策的制定具有重要意义。本文通过梳理近年来相关文献,主要对大气 PM_{2.5} 组分暴露对心血管系统和呼吸系统健康影响的研究进行综述,以期为后续 PM_{2.5} 组分深入研究提供一定参考依据。

2. 大气 PM_{2.5} 组分暴露对心血管系统健康的影响

心血管疾病(cardiovascular diseases, CVD)是全球范围内导致死亡的主要原因之一,包括冠心病、心力衰竭、脑血管疾病和高血压等。目前,已有研究表明大气 PM_{2.5} 组分暴露与心血管系统疾病发生与发展有关。

2.1. PM_{2.5} 与心血管疾病

关于 CVD 发病风险方面,一项关于长期暴露于大气 PM_{2.5} 化学组分的研究发现,六种 PM_{2.5} 组分(BC、

OM、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、氯化物[chloride, Cl^-]均与 CVD 发病风险呈正相关, 其浓度每增加 1 个四分位数间距(interquartile range, IQR)对 CVD 发病风险的比值比(odds ratio, OR)介于 1.24 到 1.53 之间; 在这些成分中 NO_3^- 、 Cl^- 和 OM 对 CVD 发病风险的增加有较大的贡献[2]。在中国开展的一项队列研究发现, 长期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 特定组分(BC、 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-})与 CVD 发病风险呈正相关, 且在 SO_4^{2-} 中观察到最大的发病风险比, 其次为 NH_4^+ 、BC 和 NO_3^- , 但未发现 OM 与 CVD 发病风险之间的关联[3]。此外, $\text{PM}_{2.5}$ 的金属元素和多环芳烃组分中也观察到类似的关联。例如一项针对精神分裂症患者短期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分的研究发现, 金属或类金属(镉)、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和多环芳烃(荧蒽和萘)均会增加其心血管发病风险[4]。

关于 CVD 死亡风险方面, Liang 等[5]进行的一项前瞻性队列研究发现, 长期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分与心血管死亡风险升高有关, 且 BC、 NH_4^+ 、OM、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 的风险比高于 $\text{PM}_{2.5}$ 总质量。Yang 等[6]研究发现, $\text{PM}_{2.5}$ 组分中 EC、OC、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的每 IQR 浓度升高与心肌梗死死亡风险增加相关。广州的一项研究也发现 EC、OC 和 NO_3^- 与心血管疾病死亡率增加有关[7]。在北京开展的一项研究发现 BC 与心血管疾病死亡存在正相关, BC 每上升一个 IQR 时, 心血管疾病死亡人数增加 2.70% [8]。另一项北京的研究也表明 BC 的每 IQR 浓度增加与心脑血管疾病死亡风险增加相关, 且高温与高浓度 BC 组合对死亡风险存在协同效应[9]。在西安进行的一项研究也发现了类似的关联, 然而在协同效应上则表现出低温与高污染对健康风险的放大效应[10]。此外, 在 $\text{PM}_{2.5}$ 的金属元素组分中也发现了类似的关联。Wang 等[11]在上海市开展的研究表明, OC、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、钾、铜、砷和铅的每 IQR 浓度增加与 CVD 死亡率增加相关。哈尔滨的一项研究则发现, $\text{PM}_{2.5}$ 金属成分复合暴露与心血管系统疾病死亡风险存在关联, 其 RR 值为 1.038 [12]。此外还有研究发现 $\text{PM}_{2.5}$ 组分暴露与 CVD 住院之间的联系。例如 Lu 等[13]在巴基斯坦进行的研究发现, 镍、铝、铁、钛和 NO_3^- 暴露与心血管住院之间存在关联。

2.2. $\text{PM}_{2.5}$ 与脑卒中

在天津市开展的一项研究发现, 短期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 组分中 EC、锌和铁与缺血性脑卒中复发风险呈正相关, EC、锌和铁每升高 1 个 IQR 浓度时, 缺血性脑卒中复发入院风险分别增加 4.64%、4.22% 和 3.42% [14]。Zhang 等[15]进行的一项时间序列研究发现, 11 种 $\text{PM}_{2.5}$ 成分(OC、EC、 Cl^- 、镁、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、铜、锰、铅和锌)与脑卒中急诊就诊之间存在显著的正相关。德国的一项队列研究中也发现了颗粒物化学组分暴露与脑卒中风险增加有关, 且 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的影响更大[16]。一项时间序列研究发现, EC 和金属元素(铬、铁、铜、锌、砷、硒和铅)与缺血性卒中住院风险存在显著的关联, 提示它们可能是短期 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露引起缺血性卒中住院风险的主要有害组分[17]。

2.3. $\text{PM}_{2.5}$ 与高血压

Lv 等[18]的研究表明, 长期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 组分(BC、OM、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-})与高血压患病率显著相关, 其比值比分别为 1.07、1.07、1.05、1.03 和 1.03。一项多中心研究结果也显示, 与 BC 和 SO_4^{2-} 相比, NO_3^- 、 NH_4^+ 和 OM 的每 IQR 浓度增加与舒张压升高有更强的相关性[19]。太原的一项研究发现, $\text{PM}_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 短期暴露与老年高血压患者血压升高显著相关[20]。另一项中国的研究表明, 短期 $\text{PM}_{2.5}$ 组分(SO_4^{2-} 、BC 和 OM)暴露对高血压患者的收缩压、平均动脉压和脉压水平升高具有统计学意义[21]。此外, 在 $\text{PM}_{2.5}$ 金属元素组分中也观察到了类似的关联。例如 Wang 等[22]开展的一项定组研究发现, 在 $\text{PM}_{2.5}$ 结合的金属成分中, 锰、钛和硒与血压水平升高有很强的关联。

2.4. 可能的机制

尽管目前 $\text{PM}_{2.5}$ 组分暴露对心血管系统影响的具体生物学机制尚未完全明确, 但已有研究提示可能

与氧化应激、炎症反应及自主神经系统功能紊乱有关[23]。例如,有报道,BC可能通过下调DNA甲基化水平,引发全身性炎症和氧化应激反应,进而导致血压升高[24]。另一项研究指出,PM_{2.5}中的碳成分可通过调节多种激素与细胞受体,加快斑块形成从而增加缺血性脑卒中风险[25]。因此,未来仍需更多研究进一步揭示其具体作用通路,为相关防治策略提供依据。

3. 大气 PM_{2.5} 组分暴露对呼吸系统健康的影响

大气 PM_{2.5} 组分暴露与呼吸系统健康的研究也受到关注,目前 PM_{2.5} 组分暴露与肺功能、呼吸系统疾病住院、死亡风险以及哮喘等健康结局存在关联。

3.1. PM_{2.5} 与肺功能

大气 PM_{2.5} 组分暴露可能造成人群肺功能的下降。一项基于青年人群队列的实证研究发现,PM_{2.5} 组分中 BC、NO₃⁻ 以及 OM 暴露与肺功能指标之间存在显著的负向影响,对青年人群的大、小气道功能均有所损伤,而 NH₄⁺ 主要影响大气道功能指标,SO₄²⁻ 主要影响小气道功能指标[1]。Yang 等[26]开展的一项全国性横断面分析结果显示,BC、OM、NH₄⁺、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 与大多数肺功能指标呈负相关,并且 OM 和 NO₃⁻ 的相关性大于 PM_{2.5}。一项关于黑碳短期暴露与肺功能关联的研究结果显示,BC 与年轻健康个体的 1 秒内用力呼气量(forced expiratory volume in the first second, FEV₁)降低有关,BC 浓度每增加 1 个 IQR,FEV₁ 下降 1.59% [27]。一项针对 37 名中国健康成年人的面板研究发现,PM_{2.5} 中含碳成分短期暴露与肺功能下降有关,特别是晚间对呼气峰值流速(peak expiratory flow, PEF)的影响更显著[28]。成都市一项研究发现,短期内儿童肺功能指标降低可能与发生重污染天气有关,女生的肺功能指标主要受 SO₄²⁻、Cl⁻ 影响[29]。此外,在 PM_{2.5} 金属元素组分中也观察到了这种关联。例如 Zhou 等[30]研究发现,短期暴露于 Cu 和 As 等金属成分与慢性阻塞性肺病患者 FEV₁、PEF 和用力肺活量(forced vital capacity, FVC)降低相关。Satoru 等[31]在日本进行的研究发现,PM_{2.5} 中化学组分(如 SO₄²⁻、钾)与健康青少年肺功能下降显著相关。

3.2. PM_{2.5} 与呼吸系统疾病

Wang 等[32]研究发现,短期暴露于 EC、OC、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 对呼吸道疾病死亡率具有显著影响,每 10 μg/m³ 浓度增加呼吸道疾病死亡率分别增加 44.99%、10.40%、5.338% 和 7.34%。Michikawa 等[33]在日本东京开展的一项病例交叉研究发现,碳元素与呼吸道死亡率密切相关。广州的研究也发现 EC 对呼吸系统疾病死亡率的增加具有统计学意义[7]。北京的一项研究表明,BC 浓度每升高 IQR 呼吸系统疾病死亡人数超额增加百分比为 1.80% [9]。PM_{2.5} 组分暴露除了与呼吸系统疾病死亡之间存在关联外,也有研究发现与呼吸系统疾病就诊、住院风险有关。一项探讨了沈阳市 PM_{2.5} 离子成分对呼吸疾病门诊数影响的研究发现,SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Cl⁻、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 和 Na⁺ 浓度每增加 1 个 IQR,呼吸系统疾病日门诊就诊人数增加百分比分别为 3.22%、4.67%、5.41%、7.38%、0.14%、7.64%、3.57% 和 0.46% [34]。一项评估了 PM_{2.5} 组分短期暴露与呼吸系统疾病住院关联的研究发现,除 NO₃⁻ 外,其他组分(EC、OC、SO₄²⁻ 和 NH₄⁺) 均会显著增加成人因肺炎住院的风险[35]。

3.3. PM_{2.5} 与哮喘

在加拿大安大略省开展的一项研究发现,早期暴露于 OM、BC、NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 与儿童哮喘发作呈正向关联,而 SO₄²⁻ 表现为负向关联[36]。武汉市一项横断面调查发现,儿童在子宫内时期暴露于 PM_{2.5} 组分对其患哮喘风险增加的组分有 SO₄²⁻、OM 和 NO₃⁻,在出生后第一年则为 SO₄²⁻、BC 和 NO₃⁻ [35]。此外,在 PM_{2.5} 金属元素组分中也观察到类似的关联。一项关于母亲孕期 PM_{2.5} 金属成分混合暴露的研究发现,PM_{2.5} 金属成分混合暴露与婴幼儿哮喘和喘息发生显著相关,其中镍、铅、铬、铍和铊对混合暴露效应有较大

贡献[37]。

3.4. 可能的机制

关于 PM_{2.5} 组分对呼吸系统影响的生物学机制有研究报道, As 吸入后与蛋白质和酶的巯基相互作用, 抑制线粒体酶和氧化磷酸化的解耦, 从而损害细胞呼吸, 发挥毒性作用[38]。一项实验研究发现, 生命早期镉暴露可能诱导支气管上皮细胞内质网应激, 从而加重卵清蛋白诱导的过敏性哮喘[39]。高浓度铵离子暴露可改变体内的酸碱平衡, 引发代谢性酸中毒, 导致呼吸频率和深度的改变, 从而影响整体肺功能[1]。未来仍需要更多的毒理学研究来进一步探索 PM_{2.5} 不同组分对呼吸系统疾病影响机制。

4. 总结与展望

综上, 现有证据已揭示 PM_{2.5} 主要化学组分——含碳组分(EC、OC、BC)、水溶性离子(NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻)以及金属和类金属——暴露与心血管系统和呼吸系统健康风险之间存在关联。但在不同研究中, 对健康结局产生影响的 PM_{2.5} 主要组分存在差异, 这可能与不同研究的组分暴露评估方式、研究方法、研究地区污染物水平及来源、人群的特征及易感性不同等因素有较大关系。虽然目前已有关于 PM_{2.5} 组分与心血管系统和呼吸系统疾病的相关研究, 但多数研究仅关注对心血管疾病或呼吸系统疾病大类健康结局的影响, 针对细分健康终点的研究仍十分有限。此外, 在现有研究中, 关注较多的 PM_{2.5} 组分主要是含碳组分和水溶性离子, 而对金属和类金属以及有机物的研究较少。最后, 大多数研究针对某一特定组分进行暴露-反应关系分析, 多组分复合暴露的联合效应研究比较少见。近年来, 随着贝叶斯核机器回归、加权分位数和回归等先进统计模型的出现, 为评估混合暴露效应及识别关键毒性组分提供了有力的分析工具。在实际应用中研究者应在研究设计阶段明确变量选择依据, 并在数据分析中考虑不同来源数据的异质性, 采用测量误差校正或敏感性分析, 以提高研究结果的稳健性与可解释性。

因此, 建议未来的研究应在更精确的组分暴露评估方法上开展大规模人群研究, 进一步探讨 PM_{2.5} 组分短期、长期以及复合暴露对心肺系统健康结局的影响, 进而阐明组分健康效应的机制, 这对于心血管疾病和呼吸系统疾病的一级预防具有重要意义。

参考文献

- [1] 慕芸. PM_{2.5} 组分与肺功能——基于山东省青年人群队列的实证研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东财经大学, 2025.
- [2] 蒋叶. 大气 PM_{2.5} 组分长期暴露与新发心血管疾病关联及代谢危险因素的中介效应研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2023.
- [3] 刘麟炯. PM_{2.5} 组分长期暴露与国人心血管疾病及全因死亡的关联性研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2022.
- [4] 李宇轩. 细颗粒物(PM_{2.5})及其组分与精神分裂症患者心血管风险的关系[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽医科大学, 2023.
- [5] Liang, R., Chen, R., Yin, P., van Donkelaar, A., Martin, R.V., Burnett, R., *et al.* (2022) Associations of Long-Term Exposure to Fine Particulate Matter and Its Constituents with Cardiovascular Mortality: A Prospective Cohort Study in China. *Environment International*, **162**, Article ID: 107156. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107156>
- [6] Yang, J., Zhou, M., Li, M., Yin, P., Hu, J., Zhang, C., *et al.* (2020) Fine Particulate Matter Constituents and Cause-Specific Mortality in China: A Nationwide Modelling Study. *Environment International*, **143**, Article ID: 105927. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105927>
- [7] 李碧霞. 广州市大气颗粒物及其组分对人群疾病死亡影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2021.
- [8] 龚天宜. 北京市黑碳与 PM_{2.5} 的人群健康效应研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都信息工程大学, 2019.
- [9] 张莹, 辛金元, 张小玲, 等. 北京市气温与黑碳和 PM_{2.5} 对疾病死亡影响的交互效应[J]. 中国环境科学, 2020, 40(7): 3179-3187.

- [10] 欧奕含, 张小玲, 张莹, 等. 西安 BC、PM_{2.5} 与气温协同对心脑血管疾病死亡的影响[J]. 中国环境科学, 2021, 41(9): 4415-4425.
- [11] Wang, C., Hao, L., Liu, C., Chen, R., Wang, W., Chen, Y., *et al.* (2020) Associations between Fine Particulate Matter Constituents and Daily Cardiovascular Mortality in Shanghai, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **191**, Article ID: 110154. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110154>
- [12] 伍亚, 邹凤娟, 沈明辉, 等. 哈尔滨市大气 PM_{2.5} 中五种金属成分复合暴露对人群死亡风险的影响[J]. 环境卫生学杂志, 2024, 14(9): 752-761.
- [13] Lu, Y., Lin, S., Fatmi, Z., Malashock, D., Hussain, M.M., Siddique, A., *et al.* (2019) Assessing the Association between Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Constituents and Cardiovascular Diseases in a Mega-City of Pakistan. *Environmental Pollution*, **252**, 1412-1422. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.078>
- [14] 吴妍, 冯利红, 田瑛泽, 等. 2019-2020 年天津市 PM_{2.5} 组分与绿化环境暴露水平对缺血性卒中中复发的时间序列分析研究[J]. 环境卫生学杂志, 2025, 15(7): 580-586.
- [15] Zhang, Y., He, Q., Zhang, Y., Xue, X., Kan, H. and Wang, X. (2022) Differential Associations of Particle Size Ranges and Constituents with Stroke Emergency-Room Visits in Shanghai, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **232**, Article ID: 113237. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113237>
- [16] Rodins, V., Lucht, S., Ohlwein, S., Hennig, F., Soppa, V., Erbel, R., *et al.* (2020) Long-Term Exposure to Ambient Source-Specific Particulate Matter and Its Components and Incidence of Cardiovascular Events—The Heinz Nixdorf Recall Study. *Environment International*, **142**, Article ID: 105854. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105854>
- [17] Wang, W., Liu, C., Ying, Z., Lei, X., Wang, C., Huo, J., *et al.* (2019) Particulate Air Pollution and Ischemic Stroke Hospitalization: How the Associations Vary by Constituents in Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, **695**, Article ID: 133780. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133780>
- [18] Lv, S., Li, Z., Li, H., Liu, M., Wu, Z., Yu, S., *et al.* (2023) Long-Term Effects of PM_{2.5} Components on Hypertension: A National Analysis in China. *Environmental Research*, **222**, Article ID: 115323. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115323>
- [19] Du, X., Zhang, Y., Liu, C., Fang, J., Zhao, F., Chen, C., *et al.* (2021) Fine Particulate Matter Constituents and Sub-Clinical Outcomes of Cardiovascular Diseases: A Multi-Center Study in China. *Science of the Total Environment*, **759**, Article ID: 143555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143555>
- [20] 哈里买买提·那斯尔, 刘楠楠, 田家瑜, 等. 太原市大气 PM_{2.5} 及其不同组分短期暴露对老年高血压患者血压的影响[J]. 环境卫生学杂志, 2023, 13(5): 363-370.
- [21] 张丽. PM_{2.5} 及其组分与生活行为因素对高血压患者血压水平影响的交互作用研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [22] Wang, J., Wu, S., Cui, J., Ding, Z., Meng, Q., Sun, H., *et al.* (2022) The Influences of Ambient Fine Particulate Matter Constituents on Plasma Hormones, Circulating TMAO Levels and Blood Pressure: A Panel Study in China. *Environmental Pollution*, **296**, Article ID: 118746. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118746>
- [23] Fiordelisi, A., Piscitelli, P., Trimarco, B., Coscioni, E., Iaccarino, G. and Sorriento, D. (2017) The Mechanisms of Air Pollution and Particulate Matter in Cardiovascular Diseases. *Heart Failure Reviews*, **22**, 337-347. <https://doi.org/10.1007/s10741-017-9606-7>
- [24] Lei, X., Chen, R., Wang, C., Shi, J., Zhao, Z., Li, W., *et al.* (2019) Personal Fine Particulate Matter Constituents, Increased Systemic Inflammation, and the Role of DNA Hypomethylation. *Environmental Science & Technology*, **53**, 9837-9844. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02305>
- [25] Vivanco-Hidalgo, R.M., Wellenius, G.A., Basagaña, X., Cirach, M., González, A.G., Ceballos, P.d., *et al.* (2018) Short-term Exposure to Traffic-Related Air Pollution and Ischemic Stroke Onset in Barcelona, Spain. *Environmental Research*, **162**, 160-165. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.12.024>
- [26] Yang, T., Chen, R., Gu, X., Xu, J., Yang, L., Zhao, J., *et al.* (2021) Association of Fine Particulate Matter Air Pollution and Its Constituents with Lung Function: The China Pulmonary Health Study. *Environment International*, **156**, Article ID: 106707. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106707>
- [27] 王雅铮, 胡大字, 贾旭, 等. 大气黑碳短期暴露与年轻健康个体肺功能和呼出气一氧化氮的关联研究[J]. 环境与健康杂志, 2020, 37(8): 673-677.
- [28] Huang, S., Feng, H., Zuo, S., Liao, J., He, M., Shima, M., *et al.* (2019) Short-Term Effects of Carbonaceous Components in PM_{2.5} on Pulmonary Function: A Panel Study of 37 Chinese Healthy Adults. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**, Article 2259. <https://doi.org/10.3390/ijerph16132259>
- [29] 杨皓, 高绪芳, 鞠勇, 等. 成都市两监测点大气 PM_{2.5} 污染及其离子成分对儿童肺功能的影响[J]. 环境与健康杂志, 2018, 35(12): 1051-1054.

-
- [30] Zhou, L., Tao, Y., Li, H., Niu, Y., Li, L., Kan, H., *et al.* (2021) Acute Effects of Fine Particulate Matter Constituents on Cardiopulmonary Function in a Panel of COPD Patients. *Science of the Total Environment*, **770**, Article ID: 144753. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144753>
- [31] Kobayashi, S., Yoda, Y., Takagi, H., Ito, T., Wakamatsu, J., Nakatsubo, R., *et al.* (2023) Short-Term Effects of the Chemical Components of Fine Particulate Matter on Pulmonary Function: A Repeated Panel Study among Adolescents. *Science of the Total Environment*, **895**, Article ID: 165195. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165195>
- [32] Wang, Y., Shi, Z., Shen, F., Sun, J., Huang, L., Zhang, H., *et al.* (2019) Associations of Daily Mortality with Short-Term Exposure to PM_{2.5} and Its Constituents in Shanghai, China. *Chemosphere*, **233**, 879-887. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.249>
- [33] Michikawa, T., Yamazaki, S., Ueda, K., Yoshino, A., Sugata, S., Saito, S., *et al.* (2021) Effects of Exposure to Chemical Components of Fine Particulate Matter on Mortality in Tokyo: A Case-Crossover Study. *Science of the Total Environment*, **755**, Article ID: 142489. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142489>
- [34] 洪也, 张莹, 马雁军, 等. 沈阳市 PM_{2.5} 离子成分对呼吸疾病门诊数影响研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4697-4705.
- [35] 张媛媛. PM_{2.5} 组分暴露与呼吸系统疾病的关联研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2022.
- [36] Lavigne, É., Talarico, R., van Donkelaar, A., Martin, R.V., Stieb, D.M., Crichton, E., *et al.* (2021) Fine Particulate Matter Concentration and Composition and the Incidence of Childhood Asthma. *Environment International*, **152**, Article ID: 106486. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106486>
- [37] 张晋. 母亲孕期 PM_{2.5} 金属成分混合暴露对婴幼儿哮喘和喘息的影响[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2024.
- [38] El-Ghiaty, M.A. and El-Kadi, A.O.S. (2023) The Duality of Arsenic Metabolism: Impact on Human Health. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, **63**, 341-358. <https://doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-051921-020936>
- [39] 王雯静. 生命早期镉暴露增加小鼠过敏性哮喘的易感性[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽医科大学, 2023.