

降低大气细颗粒物健康危害的综合措施专家共识

大气污染健康防护专家共识编写组



DOI 10.11836/JEOM24590

摘要：

近年来，我国在大气细颗粒物(PM_{2.5})污染治理方面已取得了显著成效，但由于我国PM_{2.5}的高基线污染水平和公众对其危害的认知不足，其带来的健康危害仍将长期存在。针对我国在PM_{2.5}治理的现状、健康危害和防护收益的进展及其挑战，编写组依据最新的研究证据，从宏观和个体两个层面提出降低PM_{2.5}相关健康危害的措施并形成专家共识。宏观层面：(1)加强大气污染监测网络建设，推进信息化管理，完善健康风险的预警和应急响应机制，提高公共防护能力；(2)适时更新我国的大气质量标准，逐步推动地方性标准和颗粒物有害组分相关标准的制定，以实现更精准的污染控制；(3)持续推进协同减排，提升治理效率；(4)可持续建设绿地系统，优化生态屏障功能，从源头减少PM_{2.5}的扩散和沉降。个体层面：(1)优先选择公交车、步行、骑行等低碳出行方式；(2)佩戴口罩以减少PM_{2.5}的吸入；(3)使用空气净化设备以改善空气质量；(4)调整膳食模式，保证多样且均衡的营养素摄入；(5)使用清洁燃料代替固体燃料；(6)科学规划出行路线规避PM_{2.5}的高峰路段；(7)在PM_{2.5}浓度较低时，进行适度的户外或室内的体力活动；(8)提升环境健康素养，增强自我防护能力。本共识旨在为相关部门提供科学的政策指导和为公众提供针对性的防护措施，以更有效地应对PM_{2.5}污染带来的健康危害。

关键词：空气污染；细颗粒物；健康危害；防护措施；专家共识

Consensus on reducing health impacts of ambient fine particulate matter Expert Consensus Panel on Health Protection against Air Pollution

Abstract:

In recent years, China has achieved significant progress in controlling fine particulate matter with median aerodynamic diameter $\leq 2.5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}) pollution. However, due to the high baseline levels of PM_{2.5} and insufficient public awareness of its negative health impacts, the associated health risks will persist for an extended period. The task force reviewed the current status, health impacts, protective benefits, and challenges of PM_{2.5} management in China. Based on the latest research evidence, this consensus proposed measures to mitigate PM_{2.5}-related health risks at both macro and micro levels. From a macro perspective: (1) Strengthen the development of air pollution monitoring networks and advance information management, and improve health risk early warning and emergency response mechanisms to enhance public protection capabilities; (2) Timely update national air quality standards and progressively establish regional standards and standards related to the harmful chemical species in PM_{2.5} to achieve more fine-tuned pollution control; (3) Continue to promote collaborative emission reduction efforts and enhance pollution control efficiency; (4) Sustainably develop green space systems to optimize their ecological barrier functions, reducing PM_{2.5} dispersion and deposition at the source. From a micro perspective: (1) Prioritize low-carbon transportation options, such as buses, walking, or cycling; (2) Wear masks to reduce PM_{2.5} inhalation; (3) Use air purification devices to improve indoor air quality; (4) Adjust dietary patterns to ensure diverse and balanced nutrient intake; (5) Replace solid fuels with clean energy sources; (6) Strategically plan travel routes to avoid areas with high PM_{2.5} concentrations; (7) Engage in appropriate physical activity indoors or outdoors when PM_{2.5} levels are low; (8) Enhance environmental health literacy to strengthen self-protection capabilities. This consensus aims to provide scientific policy guidance to relevant authorities and targeted protective measures for the public to more effectively address the health risks posed by PM_{2.5} pollution.

Keywords: air pollution; fine particulate matter; health risk; protective measure; consensus

基金项目

国家自然科学基金项目(82373534, 81972993)

通信作者

林华亮, E-mail: linhualiang@mail.sysu.edu.cn

作者中包含编委会成员 有

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2024-12-06

录用日期 2025-06-18

文章编号 2095-9982(2025)09-1025-14

中图分类号 R122.7

文献标志码 A

►本文链接、作者贡献申明

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM24590

►引用

大气污染健康防护专家共识编写组. 降低大气细颗粒物健康危害的综合措施专家共识[J]. 环境与职业医学, 2025, 42(9): 1025-1037, 1053.

Funding

This study was funded.

Correspondence to

LIN Hualiang, E-mail: linhualiang@mail.sysu.edu.cn

Editorial Board Members' authorship Yes

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2024-12-06

Accepted 2025-06-18

► Link to this article, author contribution statement
www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM24590

► To cite

Expert Consensus Panel on Health Protection against Air Pollution. Consensus on reducing health impacts of ambient fine particulate matter[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2025, 42(9): 1025-1037, 1053.

细颗粒物(fine particulate matter with median aerodynamic diameter $\leq 2.5 \mu\text{m}$, $\text{PM}_{2.5}$)是全球最重要的疾病危险因素之一,每年导致约 780 万例的过早死亡;其中,我国因大气 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露引起的超额死亡超过 100 万例^[1]。如何降低 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露对健康的危害,成为我国及全球共同面临的重大公共卫生挑战。

为应对这一难题,我国政府于 2013 年推出了《大气污染防治行动计划》(简称:“大气十条”)^[2],经过不懈努力,2023 年全国优良天数比例已达到 85.5%^[3]。为巩固和扩大治理成果,保障群众健康权益,国务院在 2023 年印发了《空气质量持续改善行动计划》(新“大气十条”),明确提出到 2025 年全国地级及以上城市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度比 2020 年下降 10% 的目标^[4]。与此同时,我国也同步推进环境与健康工作的开展,《“十四五”环境健康工作规划》紧密结合我国《“健康中国 2030”规划纲要》《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》等相关要求,全面加强环境健康风险防控与人群健康防护,具体涵盖修订并出台环境健康管理政策,完善并推进风险监测评估体系,健全且完善标准规范,推动科学技术发展创新,开展居民健康素养监测提升工作以及加强专业队伍建设和高端智库组建^[5]。

然而,值得注意的是,我国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染基线水平较高,并且部分居民对其危害的认知仍然不足,这使得 $\text{PM}_{2.5}$ 带来的健康影响将长期存在。为系统应对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染带来的健康挑战,本共识基于我国当前污染治理现状、健康风险效应及防护效益的最新科学证据,组建了多学科领域的专家团队。专家组由 32 位正高级职称专家领衔,并纳入 11 位副高级职称人员以及青年骨干共同参与。所有共识组成员来自全国 27 个单位,涵盖北京大学、复旦大学、中山大学等 20 余所高等院校以及中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所、广东省公共卫生研究院、中国医学科学院阜外医院等科研机构与临床单位。所有成员均在相关专业领域具有深厚积累,其研究方向紧密围绕 $\text{PM}_{2.5}$ 健康风险防控的核心环节,涵盖大气污染物监测与暴露评估、颗粒物毒理与健康效应机制、环境流行病学与疾病负担研究、公共卫生干预策略制定与效果评估以及高危人群的健康防护与临床处置等重点方向。通过建立跨学科协作机制,系统推进综合性 $\text{PM}_{2.5}$ 防控策略的制定与实施。

共识采用共识形成会议法,就“降低 $\text{PM}_{2.5}$ 的健康危害的措施”草案咨询专家意见^[6]。具体实施过程

包括:组建多学科专家决策组,成员均为各领域权威专家且确保独立性和无利益冲突;同时设立独立的证据提供组,系统整理流行病学调查、实验验证、干预效果评价等研究证据。在初稿撰写前,首先举行公开讨论,邀请多学科专家代表就 $\text{PM}_{2.5}$ 健康危害防控的关键方向发表意见并接受质询,广泛收集观点、明确核心争议与证据需求,为初稿撰写奠定基础(图 1)。随后开展封闭研讨,基于证据报告,围绕“现行大气污染标准与 $\text{PM}_{2.5}$ 健康危害控制的优化路径”及“居民体力活动与 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露的健康收益平衡点”等议题,从证据的充分性、推荐建议与证据之间的一致性、措施在中国国情下的适用性等多个维度,开展结构化深度讨论。讨论以证据为依据,采用排序、多轮辩论、小组表决等形式凝聚专业判断,明晰推荐方向和强度。在此基础上,执笔人进行内容撰写,经多轮内部审核与专家组论证,不断优化表述的科学严谨性与逻辑连贯性。在初稿形成后,再次组织公开讨论,就共识建议的科学性、可行性和表述准确性听取更广泛专家的意见,并对反馈进行系统整理。之后通过封闭研讨对初稿进行逐条审议和修订,重点结合新一轮讨论内容完善推荐意见,最终经多轮修改和全体专家审核达成共识后形成终稿。全过程注重程序规范、证据支持和意见平衡,切实保障共识的科学性和适用性。其中,共识在证据整合阶段参照世界卫生组织(World Health Organization, WHO)的编写指南,共识采用推荐分级的评估、制定与评价(grading of recommendations, assessment, development, and evaluations, GRADE)系统,将证据的质量分为高、中、低和极低四类,并将防护策略设定强推荐与弱推荐两个推荐等级^[7](表 1)。本共识旨在:(1)为政府及相关机构的政策制定提供科学证据;(2)为普通民众,包括儿童、老年人和孕妇等敏感群体,传播科学防护知识,提升个体风险规避能力。

1 我国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染及其健康影响的现状与挑战

1.1 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染现状

自“大气十条”实施以来,我国在大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染治理方面取得显著成效。在 2013—2017 年第一阶段的清洁空气行动中,全国 74 个首批实施 GB 3095—2012《环境空气质量标准》的城市,其年均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度(浓度)从 $72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 $47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[3,8]。至 2020 年第二阶段结束,全国城市年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降至 $33 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,首次低于我国大气质量标准的二级限值^[3];2023 年,该浓度进一步降至 $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,空气质量整体保持向好

态势^[3]。

尽管全国整体空气质量有所改善,受北方地区的大型工业基地和冬季燃煤供暖系统以及东部地区经济发达、工业集中和高城市化水平等因素的影响,我国PM_{2.5}污染呈现出“北高南低、东高西低”的分布格局^[9]。以京津冀地区为例,作为中国重要的工业基地,该地区长期面临着工业生产、交通排放以及区域传输等多重污染源挑战,一直是我国PM_{2.5}污染防治的重点和难点区域。2023年该地区PM_{2.5}年均浓度为43 μg·m⁻³,超标天数占比达36.9%^[10]。在另一重要地区——长江三角洲(简称:长三角)地区,PM_{2.5}浓度分布则呈现西北高、东南低的特点^[9]。尽管防治成效显著,该地区PM_{2.5}年均浓度已降至32 μg·m⁻³^[3],但仍高于全国平均水平。此外,受大气环流和供暖活动影响,长三角地区冬季的PM_{2.5}浓度往往出现短期上升^[11]。

此外,随着近年来我国PM_{2.5}浓度的下降,大气污染特征逐渐转变为复合型污染的新格局,研究提示,PM_{2.5}与臭氧(ozone, O₃)的复合污染可对人群死亡等健康结局产生协同影响^[12]。在此背景下,O₃污染已成为部分地区(如汾渭平原、京津冀地区、长三角地区)夏季的首要污染物;同时,挥发性有机物(volatile or-

ganic compounds, VOCs)和氮氧化物(nitrogen oxides, NO_x)等前体物的排放增加也加剧了复合型污染^[13-15]。

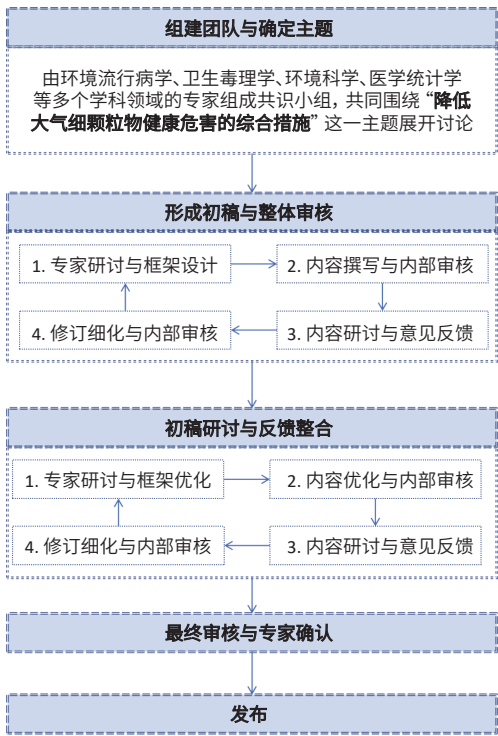


图 1 专家共识制定过程
Figure 1 Expert consensus development process

表 1 GRADE 证据质量分级及推荐等级

Table 1 GRADE quality of evidence and strength of recommendation

级别(Grade)	具体描述(Description)
证据质量分级(Quality of evidence)	
高(High)(A)	高质量RCT或系统性meta分析, 未来研究不太可能改变现有结论(High-quality RCTs or systematic meta-analyses, future research is unlikely to alter existing conclusions)
中(Moderate)(B)	一定局限性的RCT或系统性meta分析, 高质量队列研究, 未来研究可能对现有结论产生影响(RCTs or systematic meta-analyses with certain limitations, high-quality cohort studies, future research may impact existing conclusions)
低(Low)(C)	病例对照研究或观察性研究, 未来研究很可能改变现有结论(Case-control studies or observational studies, future research is likely to change existing conclusions)
极低(Very low)(D)	个案报告或专家意见, 现有证据非常不确定, 结论可能随时被推翻(Case reports or expert opinions, existing evidence is highly uncertain and conclusions may be overturned at any time)
推荐等级(Strength of recommendation)	
强推荐(Strong)	高证据质量, 防护策略利大于弊, 适用于大多数情况(High quality evidence, protection strategy benefits outweigh risks and applicable in most situations)
弱推荐(Weak)	低证据质量, 防护策略利弊不确定或依情境而定(Low quality evidence, protective strategy benefits and risks are uncertain or situation-dependent)

[注] RCT: 随机对照试验。

[Note] RCT: Randomized controlled trial.

1.2 PM_{2.5}的健康影响

PM_{2.5}以吸入的方式进入人体后,部分颗粒物会沉降在肺部,直接损害呼吸道防御功能;部分颗粒物可穿透气血屏障进入血液循环,诱发多系统病变,甚至导致死亡^[16]。具体而言,短期暴露于PM_{2.5}主要引起机体的急性损伤,显著增加我国居民急性事件的发生以

及非意外死亡的风险^[16-18]。PM_{2.5}浓度在暴露前0~24 h内每升高一个四分位距(interquartile range, IQR)(36 μg·m⁻³),我国318个城市人群的急性冠脉综合征发病风险增加1.32%^[17];另一项全国性研究显示,PM_{2.5}暴露每升高10 μg·m⁻³,当日因呼吸疾病住院的人数增加0.29%^[19];除心肺系统外,PM_{2.5}短期暴露与

精神障碍的急性关联也日益受到关注^[20-21]。而针对我国 272 个城市 2013—2015 年的时间序列分析研究发现, $\text{PM}_{2.5}$ 暴露前 2 d 的移动平均值每升高 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 相关的全因死亡风险增加 0.22%^[18]。

长期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 则持续损伤心肺功能, 加速慢性疾病进展, 并显著增加死亡风险^[16, 22]。在中国动脉粥样硬化性心血管疾病风险预测项目建立的前瞻性研究中观察到, $\text{PM}_{2.5}$ 每升高 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 脑卒中发病风险增加 13%, 且呈现出线性的暴露-反应关联^[22]; 针对中国非吸烟人群的研究显示, $\text{PM}_{2.5}$ 每升高 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 肺癌发病及相关死亡的风险比(hazard ratio, HR)分别达到 1.10[95%置信区间(confidence interval, CI): 1.04~1.17] 和 1.17(95%CI: 1.08~1.27)^[23]。此外, 一项全国性队列研究还指出, $\text{PM}_{2.5}$ 每升高 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 中国成年人全因死亡风险为 1.08(95%CI: 1.06~1.29), 且在低浓度时反应曲线更陡峭^[24]。来自中国特定地区的队列研究发现, 长期 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露与慢性病发病、死亡有显著关联^[25-26]。

$\text{PM}_{2.5}$ 的健康风险具有明显的地域性特征, 研究显示, 这与 $\text{PM}_{2.5}$ 组分分布密切相关, 例如: 次级无机离子(secondary inorganic aerosol, SNA)、有机物(organic matter, OM)、金属元素以及碳组分^[27]。我国学者与 WHO 合作开展的中老年健康影响因素分析中强调, 黑碳(black carbon, BC)、铵盐(ammonium, NH_4^+)可能是导致 $\text{PM}_{2.5}$ 健康危害的关键化学成分, 在控制潜在混杂因素后, 每增加一个标准差(standard deviation, SD)浓度的哮喘发病比值比(odds ratio, OR)分别为 1.18(95%CI: 1.10~1.28)和 1.21(95%CI: 1.08~1.34)^[28]。在中国西南部开展的 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分与糖尿病发病关联研究中, 观察到 OM 可能是 $\text{PM}_{2.5}$ 与糖尿病之间关联的最主要原因^[29]。

值得关注的是, 儿童、孕妇、老年人和心肺系统疾患等人群由于他们心肺系统和免疫系统的相对脆弱性, 在面对 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露时往往承受着更高的健康风险^[16, 24, 30]。具体而言, 产前 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露可显著增加多种不良妊娠结局的风险, 且人类早期的 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露也会影响儿童时期的健康状况, 甚至可能带来终身影响^[31-33]。来自全国 272 个城市的研究显示, 老年人与 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露相关的死亡风险远高于年轻人^[18]; 另一项研究提示, DNA 甲基化可能是 $\text{PM}_{2.5}$ 导致老年人虚弱的潜在生物标志物^[34]。此外, 一项针对心血管疾病高危人群的研究发现, $\text{PM}_{2.5}$ 的前 10 h 移动平均值中, 每升高一个 IQR 浓度($43.78 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 血压控制良好人群

的收缩压变化值为 -0.20 (95%CI: $-0.57\sim0.18$) mmHg, 而血压未得到控制人群的收缩压则增加 0.85 (95%CI: $0.36\sim1.35$) mmHg^[35]。

1.3 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露健康防护面临的挑战

尽管我国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度已显著降低, 但与发达国家相比仍存在较大差距, 且远超 WHO 的空气质量标准值^[36]。同时, 全国性标准难以充分考虑不同地区间 $\text{PM}_{2.5}$ 污染在浓度和化学成分方面的差异, 亟须从法律和政策标准层面制定和实施推动精细化的污染控制与健康防护措施^[37]。随着 $\text{PM}_{2.5}$ 危害组分不断被发现与识别, 目前对于这些组分的排放标准有待进一步完善^[27-29, 38]。此外, 经济的快速发展与环境保护和碳减排之间的矛盾日益凸显^[39], 日益严峻的 O_3 污染问题也使 $\text{PM}_{2.5}$ 的防治工作变得更加困难^[40]; 城市化进程中绿地空间的减少^[41]以及极端环境事件的频发增加了 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染事件的不确定性^[42], 同样也给 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治及其健康防护带来了新挑战。

从个体层面来看, 由于对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染危害的认知不足, 公众往往难以采取适当的保护措施来降低吸入 $\text{PM}_{2.5}$ 的风险^[36]。此外, 不健康的生活方式, 如缺乏锻炼和不良饮食习惯等, 会损害免疫功能, 使得机体在面对 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露时变得更加脆弱^[43]。因此, 如何增强公众对 $\text{PM}_{2.5}$ 危害的认知、降低 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露、引导其形成健康的生活方式, 是实现有效健康防护的关键要素。

针对 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露对中国居民的健康危害, 共识编写组基于现有防护证据的等级, 在宏观层面综合考虑了政策可行性、实施成本、社会效益以及环境可持续性等多方面因素, 在个人层面综合考虑了实施可行性、经济成本、健康效益的可及性以及社会文化接受度等因素, 最终确定的各项防护措施推荐等级详见表 2。

2 宏观层面的大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染物应对策略

2.1 加强监测网络和信息化建设, 完善健康风险应急响应机制

目前, 我国已设立覆盖地级及以上城市的监测站点, 并建立了多源数据集成和数据质量控制的综合信息平台, 如国家环境空气质量监测网和国家环境与健康综合监测网络, 为暴露评估和健康风险预测提供了坚实的技术支持。例如, 我国学者通过系统综述和现有监测系统数据的分析, 建立了覆盖生命周期的健康影响监测和评估指标体系; 整合了空气质量、气象、毒理学和健康数据, 建立了多源数据集成和数据质量

控制的雾霾健康影响综合信息平台；在此基础上，开发了基于个体暴露和人群健康风险评估的模型，形成了标准化的健康风险评估技术^[44]。这一系列研究成果不仅出版了两本专业书籍——《空气污染对人群健康影响数据清洗及评价方法》和《空气污染人群健康风险评估方法及应用》，还制定了 WS/T 666—2019《大气污染人群健康风险评估技术规范》，为全国范围内的健康风险评估提供了重要的技术指导^[44]。针对多源信息系统中的数据利用效率问题，我国学者提出利用多粒度方法进行整合，以提升信息系统的决策能力。

具体而言，指通过直接融合减少信息损失，中间层处理实现特征融合，决策层融合进行分析和决策等层面提高数据质量并支持复杂的环境监测，从而为信息系统的决策提供更可靠的支持^[45]。另一项基于多时相、多源地球观测数据开展的研究提出了一种使用深度学习对环境数据进行时空预测的新框架，经模拟和真实世界数据验证，该框架能有效地处理数据分布不均匀的问题，预测空气污染的时空分布，对气候模型中的缺失数据进行高精度填补，在信息化建设中发挥了重要作用^[46]。

表 2 降低 PM_{2.5} 健康危害的措施相关证据质量分级及推荐等级 (按证据等级以及推荐等级排列)

Table 2 Evidence quality and recommendation strength for measures to reduce PM_{2.5} health risks (ranked by strength of evidence and recommendation)

防护策略(Protective strategy)	证据等级(Quality of evidence)	推荐等级(Strength of recommendation)
宏观角度(Macro-level measures)		
加强监测网络和信息化建设,完善健康风险应急响应机制(Strengthen monitoring networks and advance information management, and improve health risk early warning and emergency response mechanisms)	A	强推荐(Strong)
适时修订我国大气质量标准,并推动地方和颗粒物有害组分标准的制定(Timely update national air quality standards and progressively establish regional standards and standards related to PM _{2.5} components)	B	强推荐(Strong)
持续推进协同减排,提升治理效率(Continue promoting collaborative emission reductions to enhance pollution control efficiency)	B	强推荐(Strong)
科学建设绿地系统,优化生态屏障功能(Scientifically develop green space systems and optimize their ecological barrier functions)	B	强推荐(Strong)
个体角度(Individual-level measures)		
选择低碳出行方式(Prioritize low-carbon transportation options)	A	强推荐(Strong)
合理佩戴口罩(Properly wear facial masks)	A	强推荐(Strong)
使用空气净化器(Use air purification devices)	A	强推荐(Strong)
培养健康饮食习惯(Adopt healthy dietary habits)	A	强推荐(Strong)
使用清洁家庭燃料(Use clean household fuels)	B	强推荐(Strong)
科学规划出行路线(Scientifically plan travel routes)	B	强推荐(Strong)
参与适度的体力活动(Engage in appropriate physical activity)	C	弱推荐(Weak)
提升环境健康素养(Enhance environmental health literacy)	C	弱推荐(Weak)

自 2013 年中国遭遇大范围的雾霾天气以来，各地政府部门通过多种渠道实时向公众发布当前的空气质量信息并逐步完善响应机制^[47]。一项基于空气污染联合防治(joint prevention and control of air pollution, JPCAP)政策、覆盖 285 个城市的准实验研究表明，通过强化区域间的紧急联动和建立组织协调单位，大气污染浓度显著降低，污染峰值减少，污染持续时间缩短，在重度污染区域和事件中效果尤为突出^[48]。空气质量信息发布对公众行为产生了积极影响，信息行为等效的暴露模型研究揭示，空气质量指数(air quality index, AQI)预警促使的减少 PM_{2.5} 暴露的保护行为，每年可降低与 PM_{2.5} 相关的 5.7%的过早死亡^[49]。在持续加强空气质量信息发布与响应机制建设进程中，面对

空气污染与极端天气对公众健康的双重威胁，我国学者提出了“全季节覆盖和以人口健康为导向的分级预警”的概念，并开发了一个热健康监测、预测和预警(heat-health surveillance, forecast and early warning, HHSEW)模型。据估计，该模型与目前的热浪预警系统相比，将降低 2 200 亿元人民币的高温相关健康负担^[50]。与此同时，对于儿童、老年人、孕妇等敏感群体的预警标准尚不完善，未来仍需加快针对这些敏感人群的研究进程并出台标准^[51]。此外，未来的预警系统和响应机制需紧跟技术发展步伐，例如，通过智能健康设备和移动应用，实时向居民推送个性化健康建议和预警信息，促使居民根据自身健康状况调整生活习惯和行为，以减少暴露危害^[52]。

因此,本文建议:(1)加强监测网络和信息化建设,实现健康风险的精准预测。(2)在 JPCAP 政策框架下,持续优化预警系统,完善应急响应机制,提高跨区域协调效率,确保在极端天气和重度污染情况下迅速采取有效措施。(3)为不同人群,特别是儿童、老年人和孕妇提供定制化的防护指南,将环境保护的信息化内容转化为通俗易懂、便于公众理解和接受的建议,从而提高居民的健康素养。

2.2 适时修订我国大气质量标准,并推动地方和颗粒物有害组分标准的制定

多项大气污染干预与人群健康效应的准自然实验研究结果表明,宏观的 $\text{PM}_{2.5}$ 控制措施与人群健康效应的改善息息相关,例如,2008 年北京奥运会期间,我国政府实施的空气质量改善措施显著降低了 $\text{PM}_{2.5}$ 水平,这降低了炎症因子和血栓形成的生物标志物水平,从而改善了心血管健康^[53];另一项研究涵盖 2013—2017 年全国 292 个城市,发现“大气十条”政策的实施显著降低了 $\text{PM}_{2.5}$ 及其主要组分的浓度,且空气质量改善越明显,人群健康效益越大^[54]。近年来,鉴于我国在 $\text{PM}_{2.5}$ 治理上取得的重大进展,新“大气十条”强调了适时启动环境大气质量标准修订工作的必要性^[4]。一项基于我国 72 城市的模拟情境-减排收益研究揭示,当 $\text{PM}_{2.5}$ 日均标准浓度达到国家环境标准的 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 WHO 推荐的 $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,人均预期寿命可分别增加 0.06 和 0.14 年;同时,研究建议将 $\text{PM}_{2.5}$ 日均标准浓度修订为 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,并进一步提出应在地区层面制定更严格的 $\text{PM}_{2.5}$ 标准^[37]。

针对 $\text{PM}_{2.5}$ “北高南低,东高西低”的区域性分布特征,我国在 2010 年颁布了 JPCAP 政策。经效应分配模型证实,该政策不仅能有效降低空气污染处理的成本,还有助于解决区域污染物传输的不平等问题^[55]。实践结果表明,得益于 JPCAP 政策的实施,京津冀、长三角等区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度显著下降,且降幅明显大于非联防联控区域^[56]。我国 31 个省份的 $\text{PM}_{2.5}$ 逐小时数据最新建模证据进一步指出,受降雨、风速、湿度等区域性气象条件以及工业结构、能源消耗等社会经济特征的影响,应从时空维度细化 JPCAP 策略:如在京津冀及周边地区,北京、天津、河北和山东划为核心控制区,全年需重点治理,尤其是冬季燃煤排放和工业污染;而河南、山西、陕西为外围控制区,与核心区协同治理^[57]。此外,另一项全国性的建模研究提出,对于已经达到当前大气标准的地区,应制定并实施更严格的标准以激发减排工作的动力,并估计在应用一级、二级区

域标准的情境下,预计到 2035 年可分别避免额外的 135 000 和 384 000 例全因死亡^[58]。针对海南省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度远低于现行大气标准,专家建议将该省的年均浓度限定在 $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,预计这一措施有望每年减少 1 526 (95%CI: 1 253~1 789) 例与 $\text{PM}_{2.5}$ 长期暴露相关的过早死亡^[59]。

随着 $\text{PM}_{2.5}$ 的关键危害组分被识别,从成分角度细化排放标准变得尤为关键。受气象因素及社会经济特征影响, $\text{PM}_{2.5}$ 组分区域分布特征显著^[60]。针对这一问题,一项基于近十年的全球空气污染数据的研究证据提出,应建立结构化且全面的监测框架和健康评估系统,包括通过源分析识别化学组分,因地制宜开发浓度-反应函数,以及探索组分的健康影响机制^[61]。同时,我国主要城市中 $\text{PM}_{2.5}$ 的健康风险管理研究建议,将砷(arsenic, As)、铬(chromium, Cr)和镉(cadmium, Cd)列为优先控制金属;将广州、上海、太原等 10 个城市推荐为优先治理的重点城市^[62]。此外,不同组分之间关系密切,对单一组分的过度控制可能导致其他组分水平升高。例如,硫酸盐(sulfate, SO_4^{2-})、硝酸盐(nitrate, NO_3^-)和 NH_4^+ 的生成和转化相互关联,过度控制 SO_4^{2-} 可能会打破大气中的化学平衡,进而对 $\text{PM}_{2.5}$ 的整体毒性产生影响。来自山东省临沂市的 $\text{PM}_{2.5}$ 成分分析报告强调应采取多组分协同控制策略;同时,鉴于该城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来源于东南方向和本地,研究进一步提出应加强周边城市(如日照市和济宁市)以及江苏省北部城市的区域联防联控,并对 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源采取针对性的控制措施^[63]。

综上所述,本文提出以下建议:(1)结合当前的污染状况与长远的发展规划,收紧 $\text{PM}_{2.5}$ 的标准阈值,早日实现与国际标准的接轨。(2)科学划分 $\text{PM}_{2.5}$ 的治理区域,明确重点治理区域,构建重点区域和周边区域协同治理的机制,综合考虑气象、经济因素和基线水平,从时空尺度建立区域标准。(3)对 $\text{PM}_{2.5}$ 组分建立监测和评估框架,区域和多组分协同减排,形成相对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 组分动态管理方案。(4)加强各项标准的严格执行力度,建立更严格的惩罚制度。

2.3 持续推进协同减排,提升治理效率

面对 $\text{PM}_{2.5}$ 减排带来的污染物不平衡和 O_3 增多问题以及能源密集型行业活动依旧活跃的现状,我国学者提出应进一步推动 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 联合控制,结合碳达峰、碳中和的新气候目标,实施更综合、更平衡的协同减排策略^[40]。目前, $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 联合控制政策已初显成效。据估算,与实施前相比,该政策实施后,京津冀地区的

PM_{2.5} 浓度下降了 19%, PM_{2.5} 相关的过早死亡下降了 18%^[64]。另一项研究进一步建议,可将京津冀、长江三角洲、珠江三角洲等核心区域归类为主要城市组,因地制宜实行 PM_{2.5}-O₃ 协同或 O₃ 主导的空气污染控制路线^[65]。同时,基于 PM_{2.5}-O₃ 协同控制评估模型,针对复合型污染的复杂性问题的,另一项研究模拟了 NO_x 和 VOCs 的边际减排成本曲线,提出通过差异化和协调控制 NO_x 和 VOCs 排放来实现空气质量改善的方法^[66]。此外,以实现全球气候目标和我国清洁空气政策为出发点,一项针对中国开展的综合建模分析提出,若我国能在 2060 年前实现低碳能源转型并实施积极的大气污染防治措施,全国人群的 PM_{2.5} 年均暴露水平有望降至大约 8 μg·m⁻³^[39]。

因此,本文建议持续推进清洁空气行动,实行与经济快速发展相匹配的综合性减排措施:(1)强化区域合作和科学调度,深入推进 PM_{2.5}-O₃ 协同治理工作,实现污染物的均衡排放控制。(2)改善能源结构,制定并执行逐步淘汰现有化石燃料设施的路线图,推广清洁能源使用,加快低碳能源转型进程。

2.4 科学建设绿地系统,优化生态屏障功能

提高植被覆盖率可以减轻大气污染物的危害,Zhang 等^[41]系统回顾了绿地、大气污染等环境因素对心脏健康影响的研究证据,提出提高绿地的分布和质量可降低大气污染浓度从而降低其带来的健康危害。在中国香港进行的一项时间分层病例交叉研究发现,随着归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)四分位数的上升,与 PM_{2.5} 暴露相关的肺炎死亡风险显著降低(趋势性检验 P 为 0.034)^[67]。一项来自上海的大规模前瞻性队列发现 PM_{2.5} 的减少介导了 26.6%的绿地健康效应^[68]。值得注意的是,绿地对空气质量的影响并非总是积极的,来自欧洲和美国 2615 个监测点的卫星数据研究重新审视了植被与空气质量之间的关系,揭示城市绿化可能会从行政区到整个城市范围内改善空气质量,但可能会在街道层面产生有害的影响,具体取决于植被类型、城市形态和空气动力学特征等多种因素^[69]。多项报告指出,绿地建设应与其他可持续发展目标有机结合,通过优化绿地布局,在促进空气流通、减少污染物滞留的同时,调节城市微气候和缓解热岛效应,减少能源消耗^[70-71]。例如,在低纬度、湿润地区规划形状复杂的蓝绿空间,而在高纬度、干旱地区则应优先规划形状规则且植被覆盖率高的综合性公园,以适应区域气候和生态条件,实现绿地建设效益的最大化^[72]。

因此,本文建议政府在绿地建设时,从可持续发展的视角出发,综合考虑城市整体布局,确保绿地建设在改善大气质量和保障居民健康方面的有效性。

3 个体层面的大气 PM_{2.5} 污染物应对策略

3.1 选择低碳出行方式

低碳出行方式,如公交车、自行车、步行等,被认为对环境、经济和健康等方面都有积极影响。一项涵盖了 80 项研究的系统综述提出,公交车、自行车、步行等出行方式不仅能提升个人幸福感、改善生活质量,还能提高生产率,节约道路资源以及缓解交通拥堵,减少碳排放,并改善空气质量,具有广泛的协同效益^[73]。另一项系统综述进一步提出,尽管自行车、步行的通行方式与使用机动交通工具相比面临更高的 PM_{2.5} 暴露风险,但由于它们具有高空气交换率和能够避开交通高峰时段等优势,仍可带来显著的健康收益^[74]。

本文鼓励公众选择低碳出行方式,践行 3 km 步行、5 km 骑行、10 km 公交的“3510 出行”理念,在减少碳排放的同时促进个人健康。

3.2 合理佩戴口罩

多项干预研究证实,当口罩正确佩戴,紧密贴合面部曲线,并且完全覆盖口鼻,延伸至下巴时,能有效过滤 PM_{2.5} 颗粒,降低健康风险^[75-77]。一项在北京开展的针对健康年轻人的随机双盲交叉试验,揭示在重污染天气下(PM_{2.5} ≥ 101 μg·m⁻³)佩戴 N95 口罩可有效降低血清中的炎症生物标志物水平,从而减少由 PM_{2.5} 诱导的气道炎症反应^[76]。然而,尽管口罩是降低 PM_{2.5} 暴露的有效手段,但佩戴时其带来的呼吸阻力可能会引起呼吸频率下降、血氧饱和度降低、心率及血压升高等潜在负面影响,因此,在采取防护时,仍需依据自己的身体状况选择口罩类型和佩戴时长^[75, 77]。

因此,本文建议:(1)根据大气质量决定是否需要佩戴口罩以及佩戴何种类型的口罩,佩戴时根据口罩呼吸阻力及个人健康状况,适时调整佩戴时长。(2)儿童、老人及心肺系统疾患人群,需在专业医师的指导下,谨慎选择适合的口罩类型^[78]。

3.3 使用空气净化器

空气净化器是改善室内空气质量、降低 PM_{2.5} 浓度的有效手段,可使室内 PM_{2.5} 浓度降低 22.6%至 92.0%^[79]。在一项针对健康年轻人的随机双盲交叉试验中,研究者发现短期使用空气净化器能够显著降低室内 PM_{2.5} 的平均浓度,有效改善与凝血和血管收缩相关的血液生物标志物水平,进而有助于降低血压和

改善炎症^[80]。此外,儿童、老年人、家庭主妇等人群每天的大部分时间都在室内度过,对于这些脆弱人群,研究表明短期或长期使用空气净化器不仅能够有效降低 PM_{2.5} 污染对健康的危害,还能提升生活质量,促进心肺健康^[81-84]。例如,通过在上海的 43 名哮喘儿童的卧室中放置空气净化器,分别设立两周的过滤期和非过滤期,研究发现过滤状态下个人暴露从 (40±17) μg·m⁻³ 降至 (25±14) μg·m⁻³,揭示了在实际环境中使用空气净化器减少哮喘儿童的污染物暴露的潜在好处^[81]。

本文推荐公众在室内环境中,尤其是脆弱人群,使用符合国家标准空气净化器,以改善空气质量。同时,将空气净化器放置在使用者活动时间最长的位置,并按照使用说明书进行定期的滤芯更换和维护^[85]。

3.4 培养健康饮食习惯

当前研究证据提示,PM_{2.5} 主要通过引发机体的氧化应激和炎症反应^[86],损害循环、呼吸、神经以及内分泌等多个系统进而对人体健康造成威胁^[87]。而健康的膳食模式,如地中海膳食模式 (Mediterranean diet, MED)、抗氧化膳食模式、抗炎膳食模式、东方健康膳食模式、终止高血压膳食模式 (dietary approaches to stop hypertension, DASH)、大脑保护性膳食模式 (Mediterranean-dash diet, MIND) 等,可通过抵御这些不良影响,实现健康防护^[88-90]。以 MED 膳食模式为例,其强调食用植物性食物、橄榄油和适度饮酒,通过清除活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 和自由基,改善内皮功能和血脂谱,对抗暴露于 PM_{2.5} 产生的不良影响^[88]。而东方健康膳食模式以食物多样性为核心,倡导低油少盐的饮食方式,强调增加新鲜水果和蔬菜、水产品以及豆制品和奶类的摄入,《中国居民膳食指南 (2022)》指出该模式不仅有助于促进中国居民的身体健康,还可控制肥胖,预防糖尿病、高血压等常见慢性疾病的发生^[90-91]。

提升 PM_{2.5} 暴露的健康防护能力还需要确保营养素的多样性与均衡摄入。抗氧化营养素,如 B 族维生素、维生素 E 和类胡萝卜素等,对于机体维持氧化-抗氧化平衡至关重要^[92]; 当其与 omega-3 脂肪酸含量丰富的深海鱼、亚麻籽和核桃等抗炎营养素丰富的食物一同摄入时,可通过去除 ROS 和螯合金属离子等途径进一步抑制氧化应激及炎症反应,减轻 PM_{2.5} 对机体的损害^[93]。水果、蔬菜、茶等植物性食物中活性物质含量丰富,可提升机体的抗氧化、抗炎症、抗血栓和抗肿瘤能力,进而抵御 PM_{2.5} 带来的健康风险^[93]。低糖、低盐、低脂饮食方式可降低与 PM_{2.5} 暴露相关的血脂

异常、超重肥胖和肠道菌群失调等风险^[94-95]。此外,膳食补充剂,如鱼油、维生素 E、维生素 C 和 B 族维生素,由于其抗氧化和抗炎的特性,在缓解 PM_{2.5} 健康危害方面的作用备受关注,尽管目前尚需更多的证据来确定其疗效和最佳剂量,但这种低成本的预防策略不失为一种可行的选择方向^[96-97]。值得注意的是,不同膳食成分之间对机体健康存在着复杂的协同和拮抗作用,如硒与维生素 C 能够协同增强抗氧化防御能力,这种协同作用可让机体在抵御自由基损伤时达到事半功倍的效果^[98]。

因此,本文建议选择适合个人生活习惯或健康状况的健康膳食模式并确保营养素的多样性与均衡摄入。例如,更适合中国人群习惯的东方健康膳食模式,其推荐每日摄入谷类 200~300 g、蔬菜 > 300 g、水果 200~350 g、动物性食物 120~200 g、烹调油 25~30 g、食盐 < 5 g^[90]。

3.5 使用清洁家庭燃料

木材、动物粪便、农作物残渣或煤炭等固体燃料作为烹饪或取暖能源使用,由于其燃烧效率低下,会产生包括高浓度 PM_{2.5} 在内的多种空气污染物,是室内重要的空气污染源^[99]。在中国农村地区对 271 217 名成年人进行的前瞻性队列研究中发现,与持续使用固体燃料做饭的参与者相比,曾经从固体燃料改用清洁燃料做饭的参与者心血管死亡风险和全因死亡率均较低,HR 分别为 0.83 (95%CI: 0.69~0.99) 和 0.87 (95%CI: 0.79~0.95),在固体燃料使用者中,使用通风炉灶也与较低的心血管死亡风险相关;而取暖时,HR 分别为 0.57 (95%CI: 0.42~0.77) 和 0.67 (95%CI: 0.57~0.79)^[100]。根据 2021 年全球疾病负担 (global burden of disease, GBD) 数据,在家做饭、进行其他活动时间较长的妇女、儿童、老年人受固体燃料健康影响尤为突出^[1]。在中国贵州省遵义市进行的一项前瞻性出生队列研究中发现,使用固体燃料用于家庭取暖的孕妇患妊娠糖尿病 (gestational diabetes mellitus, GDM) 的风险更高 [比值比 (odds ratio, OR) = 1.60, 95%CI: 1.18~2.18], 该研究呼吁使用更清洁的燃料替代固体燃料,并指出健康的生活方式,如饮食均衡、服用营养补充剂等,可能对暴露于室内燃料空气污染的 GDM 女性患者产生保护作用^[101]。此外,另一项针对中国 9997 名儿童的研究表明,儿童持续接触固体燃料会导致更大的肺损伤,且有过敏史的儿童更容易受到固体燃料暴露的影响,进一步强调了在这一弱势群体推广清洁燃料的必要性^[102]。

本文建议:家庭应该使用更清洁的燃料(比如天

燃气、液化石油气、电力或太阳能)来替代固体燃料,同时,在家庭环境中注意加强通风。

3.6 科学规划出行路线

车辆频繁加速与减速会显著增加尾气排放量,因此,在交通繁忙区域,PM_{2.5}浓度往往处于区域内的峰值水平^[103]。减少交通相关空气污染(traffic-related air pollution, TRAP)暴露的关键在于远离机动车道或避开繁忙的交通路段。具体而言,TRAP水平随着与机动车距离的增加而急剧下降,在距离交通道路100~150 m的范围内可观察到强烈的车辆排放特征;而在距离200~300 m处,PM_{2.5}浓度将降至在没有明显污染源影响的情况下的基线水平^[104]。以降低城市道路中的PM_{2.5}暴露为出发点,我国学者设计了城市空气健康导航系统,武汉市测试结果表明,该系统通过提供实时动态的风险预警和推荐低PM_{2.5}暴露的出行路线,有助于使用者减少约14.9%的骑行相关PM_{2.5}暴露和16.9%的步行相关PM_{2.5}暴露^[105]。

本文建议:(1)出行时优先选择车辆流量较少的路径,尽量避开主要交通繁忙区域,以降低大气PM_{2.5}暴露风险。(2)关注手机应用程序、新闻及官方网站的实时空气质量信息,合理规划出行路线和时间。

3.7 参与适度的体力活动

适度的体力活动可通过增加摄氧量来降低支气管和全身炎症水平,提升肺功能,进而改善身体状态^[106]。多项研究证据表明,定期进行的体力活动可以改善或减轻长期暴露于PM_{2.5}所造成的健康损害^[107-109]。例如,一项在健康成人中开展的交叉设计试验表明,在低PM_{2.5}(39 μg·m⁻³)和高PM_{2.5}(82 μg·m⁻³)水平暴露下,间歇性适度的体力活动均能抵消暴露于PM_{2.5}导致的第1秒用力呼气容积(forced expiratory volume in one second, FEV1)、用力肺活量(forced vital capacity, FVC)、呼气流量峰值(peak expiratory flow, PEF)等肺功能指标的下降^[108]。然而,也有其他研究指出空气污染与体力活动之间不存在交互作用^[110-111],又或者体力活动无法抵消PM_{2.5}暴露带来的负面影响^[112-113]。近期的研究证据做出了进一步阐述,个体的身体状况、体力活动的强度和持续时间、空气污染的浓度等因素,都可影响PM_{2.5}暴露下体力活动的风险-效益平衡。例如,一项来自我国大型的前瞻性队列发现,体力活动对心血管健康的益处,在低PM_{2.5}暴露环境中更为显著,而在高PM_{2.5}暴露环境中,其益处可能会减弱,甚至对农民群体而言,增加体力活动可能反而增加脑血管疾病的风险^[114]。目前,尽管该风险-效益阈值尚不明确,

但在低暴露水平和做好防护措施时进行定期体力活动仍然是值得推荐的^[115]。

因此,本文建议:(1)根据自身健康状况以及空气污染浓度谨慎考虑体力活动的类型和持续时间。(2)户外运动时避免污染浓度较高的交通繁忙时间段或人口密集地段;在室内进行时,可使用空气净化器以改善空气质量。

3.8 提高环境健康素养

环境健康素养是个体获取、理解、评估和应用环境健康信息,并做出明智决策的综合性能力^[116]。研究表明,具有较高环境健康素养的公众在面对环境暴露物时,能够采取及时有效的健康防护行为,如减少环境污染物暴露、采取健康的生活方式和积极寻找医疗帮助等,降低潜在的健康威胁^[116-117]。当进一步将环境健康素养细分为知识、信念和行为三个维度时,研究揭示基本知识的掌握程度对总体素养水平的影响最为显著,强调采用知-信-行(knowledge-attitude-practice, KAP)模型有助于公众提升环境健康素养并减轻PM_{2.5}对健康的负面影响^[118]。

本文建议公众采取KAP模式提升环境健康素养。例如,积极参与社区组织开展的环境污染相关健康活动,如健康义诊、健康讲座等^[119],利用电视、公众号、短视频等互动性强、趣味性强的新媒体方式^[120],学习健康科普知识;并在此基础上,逐步建立起环境健康观念并转化为实际行动,包括减少个人暴露,采取健康的生活方式等,以此应对PM_{2.5}污染对健康的潜在威胁。

4 展望

综上所述,目前有关PM_{2.5}污染的健康防护的研究和实践已经取得了一定的进展,不仅体现在大气污染物排放标准和相关政策的制定与完善上,还涵盖了个体层面的自我保护策略。然而,降低PM_{2.5}的健康威胁是一项长期且艰巨的任务,相关健康防护的研究和应用仍有待深化与拓展。

4.1 构建政策评估与动态优化体系

将政策转化的成效纳入绩效考核,并设立具体的评估指标及对应的奖惩机制,以此激励政策制定者和执行者。同时,建立科学、系统的评估体系,依据实践收益和科研成果,对现有政策进行评估,并及时修订法规和标准,形成区域特色、部门协作、行业专属的污染治理体系。

4.2 深化研究和探索高效防护策略

通过整合多源环境监测数据、健康数据和气象数

据, 深化大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染健康风险的评估, 明确从暴露到内暴露的关键时期、病理改变、亚临床状态直至疾病发生的完整链条, 并识别早期生物标志物, 为防护提供新思路; 加强针对不同排放情景(如产业结构调整、区域联防联控)的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度预测, 开展人群队列研究追踪长期暴露下的健康效应演变规律, 量化中国特色减排路径下的健康效益差异, 为制定精准防控策略提供科学依据; 深入解析 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的排放特征, 绘制区域污染图谱; 探索未知或尚未充分研究的潜在危害组分, 全面评估其健康影响; 关注敏感人群, 精准识别其健康反应的特征与 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露阈值, 提供个性化的保护措施。同时, 加强个体的健康风险研究, 如确定体力活动下 $\text{PM}_{2.5}$ 的暴露阈值, 以科学平衡室外运动时的 $\text{PM}_{2.5}$ 吸入风险与益处, 促进研究成果有效转化为政策措施, 发挥实际作用。

4.3 加强减排和防护技术的研发与推广

加大对清洁能源技术、工业排放控制技术、交通污染控制技术等的研发投入, 推动其在实际中的应用, 从源头上减少 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放。同时开发更高效、个性化的防护装备与空气净化技术, 确保公众的全方位防护。加快个体健康管理智能应用的研发和普及, 量身定制防护建议。推广数字化健康教育, 利用虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augmented reality, AR)和人工智能技术(artificial intelligence, AI), 打造互动性强、趣味性高的健康教育平台, 全面提升公众的环境健康素养与防护能力。

4.4 大数据在全球环境健康监测与干预中的应用

打破“数据孤岛”屏障, 实现数据互通共享和高效利用, 推动环境与健康大数据的充分利用和深度挖掘。在此过程中, 开发人工智能和机器学习算法等方法, 加快研发大数据整合分析技术。同时, 培养跨学科复合型的技术人才, 促进多学科交叉融合并提供智力支持; 建立健全法律法规, 筑牢数据安全防线。

编写组成员:

庄梓桐(中山大学公共卫生学院), 饶曼婷(中山大学公共卫生学院), 杨威怡(中山大学公共卫生学院), 艾中华(中山大学公共卫生学院), 张子龙(中山大学公共卫生学院), 孙生志(首都医科大学公共卫生学院), 杨音(中山大学公共卫生学院), 刘跃伟(中山大学公共卫生学院), 李国星(北京大学公共卫生学院), 罗斌(兰州大学公共卫生学院), 郑古峥玥(西藏民族大学医学院), 林华亮(中山大学公共卫生学院)

专家组成员(按姓氏拼音排序):

陈仁杰(复旦大学公共卫生学院), 邓芙蓉(北京大学公共卫生学院), 邓宇(中国医科大学公共卫生学院), 段军超(首都医科大学公共卫生学院), 段小丽(北京科技大学能源与环境工程学院), 郭庶(生态环境部华南环境科学研究所), 郭新彪(北京大学公共卫生学院), 贺淼(中国医科大学公共卫生学院), 黄存瑞(清华大学万科公共卫生学院), 黄婧(北京大学公共卫生学院), 阚海东(复旦大学公共卫生学院), 李京(山东第二医科大学公共卫生学院), 李国星(北京大学公共卫生学院), 李湉湉(中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所), 李杏(广东省公共卫生研究院), 梁凤超(南方科技大学公共卫生及应急管理学院), 林华亮(中山大学公共卫生学院), 刘芳超(中国医学科学院阜外医院), 刘翠清(浙江中医药大学公共卫生学院), 刘涛(暨南大学基础医学与公共卫生学院), 刘跃伟(中山大学公共卫生学院), 吕鹏(滨州医学院公共卫生学院), 罗斌(兰州大学公共卫生学院), 马文军(暨南大学基础医学与公共卫生学院), 毛振兴(郑州大学公共卫生学院), 施小明(中国疾病预防控制中心), 宋杰(新乡医学院公共卫生学院), 苏虹(安徽医科大学公共卫生学院), 孙生志(首都医科大学公共卫生学院), 汤乃军(天津医科大学公共卫生学院), 唐敬龙(青岛大学公共卫生学院), 王琼(中山大学公共卫生学院), 王重建(郑州大学公共卫生学院), 吴少伟(西安交通大学公共卫生学院), 向浩(武汉大学董辅初经济社会发展研究院), 肖建鹏(广东省公共卫生研究院), 杨博逸(中山大学公共卫生学院), 杨军(广州医科大学公共卫生学院), 杨音(中山大学公共卫生学院), 曾韦霖(广东省公共卫生研究院), 张志红(山西医科大学公共卫生学院), 张子龙(中山大学公共卫生学院), 邹云锋(广西医科大学公共卫生学院)

参考文献

- [1] BRAUER M, ROTH G A, ARAVKIN A Y, et al. Global burden and strength of evidence for 88 risk factors in 204 countries and 811 subnational locations, 1990-2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021[J]. *Lancet*, 2024, 403(10440): 2162-2203.
- [2] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知[EB/OL]. (2013-09-10) [2024-10-27]. https://www.gov.cn/zwgg/2013-09/12/content_2486773.htm.
State Council of the People's Republic of China. Notice of the action plan for air pollution prevention and control [EB/OL] (2013-09-10) [2024-10-27]. https://www.gov.cn/zwgg/2013-09/12/content_2486773.htm.
- [3] 生态环境部. 生态环境部发布《2023 中国生态环境状况公报》[EB/OL]. (2024-06-05) [2024-10-31]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202406/t20240605_1075031.shtml.
Ministry of Ecology and Environment. The Ministry of Ecology and Envi-

- ronment issued the "2023 communiqué on the state of China's ecological environment" [EB/OL]. (2024-06-05) [2024-10-31]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202406/t20240605_1075031.shtml.
- [4] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发《空气质量持续改善行动计划》的通知 [EB/OL]. (2023-11-30) [2024-10-27]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202312/content_6919000.htm.
State Council of the People's Republic of China. Notice of the state council on printing and distributing the action plan for continuous improvement of air quality [EB/OL]. (2023-11-30) [2024-10-27]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202312/content_6919000.htm.
- [5] 生态环境部办公厅. 关于印发《“十四五”环境健康工作规划》的通知 [EB/OL]. (2022-07-27) [2025-02-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/30/content_5703607.htm.
General Office of the Ministry of Ecology and Environment. Notice on the issuance of the "14th five-year plan for environmental health" [EB/OL]. (2022-07-27) [2025-02-12]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/30/content_5703607.htm.
- [6] World Health Organization. WHO handbook for guideline development [M]. 2nd ed. Geneva: World Health Organization, 2014.
- [7] 环境保护部. 环境保护部发布 2013 年重点区域和 74 个城市空气质量状况 [EB/OL]. (2014-03-25) [2024-10-31]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201403/t20140325_269648.htm.
Ministry of Environmental Protection. The Ministry of Environmental Protection released the air quality status of key areas and 74 cities in 2013 [EB/OL]. (2014-03-25) [2024-10-31]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201403/t20140325_269648.htm.
- [8] 生态环境部. 生态环境状况公报 [EB/OL]. 2024. [2024-11-11]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/>.
Ministry of Ecology and Environment. Communiqué on the state of the ecological environment [EB/OL]. 2024. [2024-11-11]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/>.
- [9] LIU X J, XIA S Y, YANG Y, et al. Spatiotemporal dynamics and impacts of socioeconomic and natural conditions on PM_{2.5} in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Environ Pollut*, 2020, 263: 114569.
- [10] WANG H, GE Q. Spatial association network of PM_{2.5} and its influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2023, 30(27): 70541-70557.
- [11] SU Z, LIN L, CHEN Y, et al. Understanding the distribution and drivers of PM_{2.5} concentrations in the Yangtze River Delta from 2015 to 2020 using Random Forest Regression [J]. *Environ Monit Assess*, 2022, 194(4): 284.
- [12] LIU C, CHEN R, SERA F, et al. Interactive effects of ambient fine particulate matter and ozone on daily mortality in 372 cities: two stage time series analysis [J]. *BMJ*, 2023, 383: e075203.
- [13] YANG J, CHEN X, LI M, et al. The division of PM_{2.5}-O₃ composite airborne pollution across China based on spatiotemporal clustering [J]. *J Clean Prod*, 2023, 401: 136706.
- [14] LI W, HAN X, LI J, et al. Assessment of surface ozone production in Qinghai, China with satellite-constrained VOCs and NO_x emissions [J]. *Sci Total Environ*, 2023, 905: 166602.
- [15] JIANG Y, HUANG J, LI G, et al. Ozone pollution and hospital admissions for cardiovascular events [J]. *Eur Heart J*, 2023, 44(18): 1622-1632.
- [16] ZHANG Q, MENG X, SHI S, et al. Overview of particulate air pollution and human health in China: evidence, challenges, and opportunities [J]. *Innovation*, 2022, 3(6): 100312.
- [17] CHEN R, JIANG Y, HU J, et al. Hourly air pollutants and acute coronary syndrome onset in 1.29 million patients [J]. *Circulation*, 2022, 145(24): 1749-1760.
- [18] CHEN R, YIN P, MENG X, et al. Fine particulate air pollution and daily mortality: a nationwide analysis in 272 Chinese cities [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 196(1): 73-81.
- [19] GU J, SHI Y, ZHU Y, et al. Ambient air pollution and cause-specific risk of hospital admission in China: a nationwide time-series study [J]. *PLoS Med*, 2020, 17(8): e1003188.
- [20] GU X, GUO T, SI Y, et al. Association between ambient air pollution and daily hospital admissions for depression in 75 Chinese cities [J]. *Am J Psychiatry*, 2020, 177(8): 735-743.
- [21] ZHUANG Z, LI D, ZHANG S, et al. Short-term exposure to PM_{2.5} chemical components and depression outpatient visits: a case-crossover analysis in three Chinese cities [J]. *Toxics*, 2024, 12(2): 136.
- [22] HUANG K, LIANG F, YANG X, et al. Long term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of stroke: prospective cohort study from the China-PAR project [J]. *BMJ*, 2019, 367: l6720.
- [23] ZHU M, HAN Y, MOU Y, et al. Effect of long-term fine particulate matter exposure on lung cancer incidence and mortality in Chinese nonsmokers [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2025, 211(4): 600-609.
- [24] LI T, ZHANG Y, WANG J, et al. All-cause mortality risk associated with long-term exposure to ambient PM_{2.5} in China: a cohort study [J]. *Lancet Public Health*, 2018, 3(10): e470-e477.
- [25] HU P, SHEN L, CHEN G, et al. Long-term exposure to fine particulate matter constituents and the prognosis of oral cancer patients: a prospective study in southeastern China [J]. *J Hazard Mater*, 2025, 487: 137304.
- [26] LI J, LU X, LIU F, et al. Chronic effects of high fine particulate matter exposure on lung cancer in China [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2020, 202(11): 1551-1559.
- [27] LI T, ZHANG Y, JIANG N, et al. Ambient fine particulate matter and cardiopulmonary health risks in China [J]. *Chin Med J*, 2023, 136(3): 287-294.
- [28] WANG X, GUO Y, CAI M, et al. Constituents of fine particulate matter and asthma in 6 low- and middle-income countries [J]. *J Allergy Clin Immunol*, 2022, 150(1): 214-222.
- [29] LI S, GUO B, JIANG Y, et al. Long-term exposure to ambient PM_{2.5} and its components associated with diabetes: evidence from a large population-based cohort from China [J]. *Diabetes Care*, 2023, 46(1): 111-119.
- [30] SHEN Y, JIANG L, XIE X, et al. Long-term exposure to fine particulate matter and fasting blood glucose and diabetes in 20 million Chinese women of reproductive age [J]. *Diabetes Care*, 2024, 47(8): 1400-1407.
- [31] LIANG Z, YANG Y, YI J, et al. Maternal PM_{2.5} exposure associated with stillbirth: a large birth cohort study in seven Chinese cities [J]. *Int J Hyg Environ Health*, 2021, 236: 113795.
- [32] CORY-SLECHTA D A, MERRILL A, SOBOLEWSKI M. Air pollution-related neurotoxicity across the life span [J]. *Annu Rev Pharmacol Toxicol*, 2023, 63: 143-163.
- [33] LIN Y T, SHIH H, JUNG C R, et al. Effect of exposure to fine particulate matter during pregnancy and infancy on paediatric allergic rhinitis [J]. *Thorax*, 2021, 76(6): 568-574.
- [34] JIANG M, WANG Y, TIAN S, et al. Air pollution control mitigates frailty progression: evidence from two cohorts of older adults and DNA methylation insights [J]. *Environ Sci Technol*, 2025, 59(20): 9907-9917.
- [35] LIN Z, WANG X, LIU F, et al. Impacts of short-term fine particulate matter exposure on blood pressure were modified by control status and treatment in hypertensive patients [J]. *Hypertension*, 2021, 78(1): 174-183.
- [36] WANG Y, CHANG J, HU P, et al. Key factors in epidemiological exposure and insights for environmental management: evidence from meta-analysis [J]. *Environ Pollut*, 2024, 362: 124991.
- [37] QI J, RUAN Z, QIAN Z M, et al. Potential gains in life expectancy by attaining daily ambient fine particulate matter pollution standards in mainland China: a modeling study based on nationwide data [J]. *PLoS Med*, 2020, 17(1): e1003027.
- [38] ZHENG Y, CHEN S, CHEN Y, et al. Association between PM_{2.5}-bound metals and pediatric respiratory health in Guangzhou: an ecological study inves-

- tigating source, health risk, and effect[J]. *Front Public Health*, 2023, 11: 1137933.
- [39] LIU Y, TONG D, CHENG J, et al. Role of climate goals and clean-air policies on reducing future air pollution deaths in China: a modelling study[J]. *Lancet Planet Health*, 2022, 6(2): e92-e99.
- [40] GENG G, LIU Y, LIU Y, et al. Efficacy of China's clean air actions to tackle PM_{2.5} pollution between 2013 and 2020[J]. *Nat Geosci*, 2024, 17(10): 987-994.
- [41] ZHANG K, BROOK R D, LI Y, et al. Air pollution, built environment, and early cardiovascular disease[J]. *Circ Res*, 2023, 132(12): 1707-1724.
- [42] YAN M, LI T. A review of the interactive effects of climate and air pollution on human health in China[J]. *Curr Environ Health Rep*, 2024, 11(2): 102-108.
- [43] MALLAH M A, SOOMRO T, ALI M, et al. Cigarette smoking and air pollution exposure and their effects on cardiovascular diseases[J]. *Front Public Health*, 2023, 11: 967047.
- [44] HAN J, XU D, XU D, et al. Air pollution health impact monitoring and health risk assessment technology and its application - China, 2006-2019[J]. *China CDC Wkly*, 2022, 4(26): 577-581.
- [45] YANG L, XU W, ZHANG X, et al. Multi-granulation method for information fusion in multi-source decision information system[J]. *Int J Approx Reason*, 2020, 122: 47-65.
- [46] AMATO F, GUIGNARD F, ROBERT S, et al. A novel framework for spatiotemporal prediction of environmental data using deep learning[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 22243.
- [47] CAO D, RAMIREZ C D. Air pollution, government pollution regulation, and industrial production in China[J]. *J Syst Sci Complex*, 2020, 33(4): 1064-1079.
- [48] GE T, CHEN X, GENG Y, et al. Does regional collaborative governance reduce air pollution? Quasi-experimental evidence from China[J]. *J Clean Prod*, 2023, 419: 138283.
- [49] WANG Z, LIU J, WANG B, et al. Health benefits from risk information of air pollution in China[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 15432.
- [50] WANG Q, CHEN C, XU H, et al. The graded heat-health risk forecast and early warning with full-season coverage across China: a predicting model development and evaluation study[J]. *Lancet Reg Health West Pac*, 2025, 54: 101266.
- [51] WU Y, ZHANG L, WANG J, et al. Communicating air quality index information: effects of different styles on individuals' risk perception and precaution intention[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(19): 10542.
- [52] ZHANG T, YANG L, FAN Z, et al. Comparison between threshold method and artificial intelligence approaches for early warning of respiratory infectious diseases - Weifang city, Shandong province, China, 2020-2023[J]. *China CDC Wkly*, 2024, 6(26): 635-641.
- [53] RICH D Q, KIPEN H M, HUANG W, et al. Association between changes in air pollution levels during the Beijing Olympics and biomarkers of inflammation and thrombosis in healthy young adults[J]. *Jama*, 2012, 307(19): 2068-2078.
- [54] LIU H, LEI J, LIU Y, et al. Hospital admissions attributable to reduced air pollution due to clean-air policies in China[J]. *Nat Med*, 2025, 31(5): 1688-1697.
- [55] DU J, SUN L. A benefit allocation model for the joint prevention and control of air pollution in China: in view of environmental justice[J]. *J Environ Manage*, 2022, 315: 115132.
- [56] WANG W, ZHAO C, DONG C, et al. Is the key-treatment-in-key-areas approach in air pollution control policy effective? Evidence from the action plan for air pollution prevention and control in China[J]. *Sci Total Environ*, 2022, 843: 156850.
- [57] ZHANG N, GUAN Y, LI Y F, et al. New region demarcation method for implementing the Joint Prevention and Control of Atmospheric Pollution policy in China[J]. *J Clean Prod*, 2021, 325: 129345.
- [58] ZHANG W, XU H, YU X, et al. Rigorous regional air quality standards for substantial health benefits[J]. *Earths Future*, 2023, 11(12): e2023EF003860.
- [59] SONG Q, ZHANG N, ZHANG Y, et al. The development of local ambient air quality standards: a case study of Hainan Province, China[J]. *Eco Environ Health*, 2024, 3(1): 11-20.
- [60] PANG N, GAO J, CHE F, et al. Cause of PM_{2.5} pollution during the 2016-2017 heating season in Beijing, Tianjin, and Langfang, China[J]. *J Environ Sci (China)*, 2020, 95: 201-209.
- [61] FORASTIERE F, ORRU H, KRZYANOWSKI M, et al. The last decade of air pollution epidemiology and the challenges of quantitative risk assessment[J]. *Environ Health*, 2024, 23(1): 98.
- [62] LI F, YAN J, WEI Y, et al. PM_{2.5}-bound heavy metals from the major cities in China: spatiotemporal distribution, fuzzy exposure assessment and health risk management[J]. *J Clean Prod*, 2021, 286: 124967.
- [63] LIU S, WANG G, KONG F, et al. Chemical composition, multiple sources, and health risks of PM_{2.5}: a case study in Linyi, China's plate and logistics capital[J]. *Environ Pollut*, 2025, 365: 125343.
- [64] WANG J, GAO A, LI S, et al. Regional joint PM_{2.5}-O₃ control policy benefits further air quality improvement and human health protection in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas[J]. *J Environ Sci (China)*, 2023, 130: 75-84.
- [65] GUAN Y, XIAO Y, WANG F, et al. Health impacts attributable to ambient PM_{2.5} and ozone pollution in major Chinese cities at seasonal-level[J]. *J Clean Prod*, 2021, 311: 127510.
- [66] SHU L, WANG T, LI M, et al. Optimizing emission control strategies for mitigating PM_{2.5} and O₃ pollution: a case study in the Yangtze River delta region of eastern China[J]. *Atmos Environ*, 2024, 319: 120288.
- [67] SUN S, SARKAR C, KUMARI S, et al. Air pollution associated respiratory mortality risk alleviated by residential greenness in the Chinese Elderly Health Service Cohort[J]. *Environ Res*, 2020, 183: 109139.
- [68] WU C, LIU J, LI Y, et al. Association of residential air pollution and green space with all-cause and cause-specific mortality in individuals with diabetes: an 11-year prospective cohort study[J]. *EBioMedicine*, 2024, 108: 105376.
- [69] VENTER Z S, HASSANI A, STANGE E, et al. Reassessing the role of urban green space in air pollution control[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2024, 121(6): e2306200121.
- [70] MUÑOZ L S, DUARTE D H S. Green infrastructure as a planning tool: a comprehensive systematization of urban redesign strategies to increase vegetation within public places[J]. *Cities*, 2025, 156: 105551.
- [71] BI S, CHEN M, TIAN Z, et al. Optimizing urban green spaces for air quality improvement: a multiscale land use/land cover synergy practical framework in Wuhan, China[J]. *Land*, 2024, 13(7): 1020.
- [72] HAN M, ZHANG T, SI Z. Optimizing urban blue-green space in climate adaptive planning: a systematic review of threshold value of efficiency thresholds[J]. *Landsc Ecol*, 2025, 40(1): 13.
- [73] DING D, LUO M, INFANTE M F P, et al. The co-benefits of active travel interventions beyond physical activity: a systematic review[J]. *Lancet Planet Health*, 2024, 8(10): e790-e803.
- [74] CEPEDA M, SCHOUFOR J, FREAK-POLI R, et al. Levels of ambient air pollution according to mode of transport: a systematic review[J]. *Lancet Public Health*, 2017, 2(1): e23-e34.
- [75] MAREK E M, VAN KAMPEN V, JETTKANT B, et al. Effects of wearing different face masks on cardiopulmonary performance at rest and exercise in a partially double-blinded randomized cross-over study[J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 6950.
- [76] GUAN T, HU S, HAN Y, et al. The effects of facemasks on airway inflammation and endothelial dysfunction in healthy young adults: a double-

- blind, randomized, controlled crossover study[J]. *Part Fibre Toxicol*, 2018, 15(1): 30.
- [77] BAO R, NING G, SUN Y, et al. Evaluation of mask-induced cardiopulmonary stress: a randomized crossover trial[J]. *JAMA Netw Open*, 2023, 6(6): e2317023.
- [78] 国家卫生健康委办公厅. 国家卫生健康委办公厅关于印发空气污染(霾)人群健康防护指南的通知 [EB/OL]. (2019-12-04)[2024-10-30]. https://www.gov.cn/fuwu/2019-12/10/content_5459931.htm.
General Office of the National Health Commission. Health protection guidelines for air pollution (haze) populations[EB/OL]. (2019-12-04)[2024-10-30]. https://www.gov.cn/fuwu/2019-12/10/content_5459931.htm.
- [79] CHEEK E, GUERCIO V, SHRUBSOLE C, et al. Portable air purification: review of impacts on indoor air quality and health[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 766: 142585.
- [80] CHEN R, ZHAO A, CHEN H, et al. Cardiopulmonary benefits of reducing indoor particles of outdoor origin: a randomized, double-blind crossover trial of air purifiers[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2015, 65(21): 2279-2287.
- [81] BARKJOHN K K, NORRIS C, CUI X, et al. Real-time measurements of PM_{2.5} and ozone to assess the effectiveness of residential indoor air filtration in Shanghai homes[J]. *Indoor air*, 2021, 31(1): 74-87.
- [82] SHAO D, DU Y, LIU S, et al. Cardiorespiratory responses of air filtration: a randomized crossover intervention trial in seniors living in Beijing: Beijing Indoor Air Purifier Study, BIAPSY[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 603-604: 541-549.
- [83] LIU S, CHEN J, ZHAO Q, et al. Cardiovascular benefits of short-term indoor air filtration intervention in elderly living in Beijing: an extended analysis of BIAPSY study[J]. *Environ Res*, 2018, 167: 632-638.
- [84] CHUANG H C, HO K F, LIN L Y, et al. Long-term indoor air conditioner filtration and cardiovascular health: a randomized crossover intervention study[J]. *Environ Int*, 2017, 106: 91-96.
- [85] JIANG J, LIU J, WANG C, et al. Exploring the long-term performance of air purifiers in removing particulate matter and formaldehyde across different residential environments[J]. *Environ Res*, 2024, 263(Pt3): 120194.
- [86] GANGWAR R S, BEVAN G H, PALANIVEL R, et al. Oxidative stress pathways of air pollution mediated toxicity: recent insights[J]. *Redox Biol*, 2020, 34: 101545.
- [87] MANANGA E S, LOPEZ E, DIOP A, et al. The impact of the air pollution on health in New York City[J]. *J Public Health Res*, 2023, 12(4): 22799036231205870.
- [88] LIM C C, HAYES R B, AHN J, et al. Mediterranean diet and the association between air pollution and cardiovascular disease mortality risk[J]. *Circulation*, 2019, 139(15): 1766-1775.
- [89] FAN C, WANG W, WANG S, et al. Multiple dietary patterns and the association between long-term air pollution exposure with type 2 diabetes risk: findings from UK Biobank cohort study[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2024, 275: 116274.
- [90] 国家卫生健康委员会, 中国营养学会. 中国居民膳食指南(2022)[M]. 北京: 中国营养学会, 2022.
National Health Commission, Chinese Nutrition Society. Dietary guidelines for Chinese residents (2022)[M]. Beijing: Chinese Nutrition Society, 2022.
- [91] LIM G H, NEELAKANTAN N, LEE Y Q, et al. Dietary patterns and cardiovascular diseases in Asia: a systematic review and meta-analysis[J]. *Adv Nutr*, 2024, 15(7): 100249.
- [92] MOKHTARE M, ABDI A, SADEGHIAN A M, et al. Investigation about the correlation between the severity of metabolic-associated fatty liver disease and adherence to the Mediterranean diet[J]. *Clin Nutr ESPEN*, 2023, 58: 221-227.
- [93] MIHAYLOVA D, DIMITROVA-DIMOVA M, POPOVA A. Dietary phenolic compounds-wellbeing and perspective applications[J]. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(9): 4769.
- [94] JOHNSON S A, KIRKPATRICK C F, MILLER N H, et al. Saturated fat intake and the prevention and management of cardiovascular disease in adults: an academy of nutrition and dietetics evidence-based nutrition practice guideline[J]. *J Acad Nutr Diet*, 2023, 123(12): 1808-1830.
- [95] ZHANG X, YUAN Y, LI C, et al. Effect of a salt substitute on incidence of hypertension and hypotension among normotensive adults[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2024, 83(7): 711-722.
- [96] ILAGHI M, KAFI F, SHAFIEI M, et al. Dietary supplementations to mitigate the cardiopulmonary effects of air pollution toxicity: a systematic review of clinical trials[J]. *PLoS One*, 2024, 19(6): e0304402.
- [97] LIN Z, CHEN R, JIANG Y, et al. Cardiovascular benefits of fish-oil supplementation against fine particulate air pollution in China[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 73(16): 2076-2085.
- [98] SAREMI N, KEYVANSHOKOOH S, MOUSAVI S M, et al. Synergistic effects of dietary selenium nanoparticles and vitamin C improve growth performance, immune response, and antioxidant status of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *J Trace Elem Med Biol*, 2024, 86: 127530.
- [99] GORDON S B, BRUCE N G, GRIGG J, et al. Respiratory risks from household air pollution in low and middle income countries[J]. *Lancet Respir Med*, 2014, 2(10): 823-860.
- [100] YU K, QIU G, CHAN K H, et al. Association of solid fuel use with risk of cardiovascular and all-cause mortality in rural China[J]. *Jama*, 2018, 319(13): 1351-1361.
- [101] DAI L, TAO L, LIAO D, et al. Effects of household air pollution and healthy lifestyle associated with gestational diabetes mellitus[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 26320.
- [102] WANG Y, ZHANG C, ZHANG W, et al. Impact of residential solid fuel usage and fuel conversion on children's lung function[J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 9046.
- [103] CHOI W, RANASINGHE D, DESHAZO J R, et al. Where to locate transit stops: cross-intersection profiles of ultrafine particles and implications for pedestrian exposure[J]. *Environ Pollut*, 2018, 233: 235-245.
- [104] FREY H C, GRIESHOP A P, KHYLSTOV A, et al. Characterizing determinants of near-road ambient air quality for an urban intersection and a freeway site[J]. *Res Rep Health Eff Inst*, 2022, 2022(207): 1-73.
- [105] JIANG P, GAO C, ZHAO J, et al. An exploration of urban air health navigation system based on dynamic exposure risk forecast of ambient PM_{2.5}[J]. *Environ Int*, 2024, 190: 108793.
- [106] World Health Organization. Global action plan on physical activity 2018–2030: more active people for a healthier world[R]. Geneva: World Health Organization, 2018.
- [107] GIALLOUROU G, KOUIS P, PAPATHEODOROU S I, et al. The long-term impact of restricting cycling and walking during high air pollution days on all-cause mortality: health impact Assessment study[J]. *Environ Int*, 2020, 140: 105679.
- [108] MATT F, COLE-HUNTER T, DONAIRE-GONZALEZ D, et al. Acute respiratory response to traffic-related air pollution during physical activity performance[J]. *Environ Int*, 2016, 97: 45-55.
- [109] TAINIO M, JOVANOVIC ANDERSEN Z, NIEUWENHUIJSEN M J, et al. Air pollution, physical activity and health: a mapping review of the evidence[J]. *Environ Int*, 2021, 147: 105954.
- [110] ELLIOTT E G, LADEN F, JAMES P, et al. Interaction between long-term exposure to fine particulate matter and physical activity, and risk of cardiovascular disease and overall mortality in U. S. women[J]. *Environ Health Perspect*, 2020, 128(12): 127012.

(下转第 1053 页)

4881-4892.

DING T, SUN Y G, HE Y K, et al. Analyzing current development and typical cases of clean heating supply in northwest China (I): policy status and existing problems [J]. *Proc CSEE*, 2020, 40(15): 4881-4892.

- [33] 黄悦悦, 张小恒, 张晟浩. 我国供热产业政策演变与现状研究 [J]. *产业创新研究*, 2024(17): 102-104.

HUANG Y Y, ZHANG X H, ZHANG S H. Research on the evolution and current status of China's heating industry policy [J]. *Ind Inn*, 2024(17): 102-104.

- [34] 王艳静. 夏热冬冷地区的供暖方式探讨 [C]//2021 供热工程建设与高效运行研讨会论文集. 成都: 中国市政工程华北设计研究总院有限公

司, 中国建设科技集团股份有限公司, 2021: 178-181.

WANG Y J. Discussion on heating mode in hot summer and cold winter area [C]//Proceedings of the Seminar on Construction and Efficient Operation of Heating Engineering in 2021. Chengdu: North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd. , China Architecture Design & Research Group, 2021: 178-181.

- [35] ZHANG R, HE Y, WEI B, et al. Nasopharyngeal carcinoma burden and its attributable risk factors in China: estimates and forecasts from 1990 to 2050 [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2023, 20(4): 2926.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 易迪)

(上接第 1037 页)

- [111] SUN S, CAO W, QIU H, et al. Benefits of physical activity not affected by air pollution: a prospective cohort study [J]. *Int J Epidemiol*, 2020, 49(1): 142-152.

- [112] KOCOT K, ZEJDA J E. Acute cardiorespiratory response to ambient air pollution exposure during short-term physical exercise in young males [J]. *Environ Res*, 2021, 195: 110746.

- [113] LAEREMANS M, DONS E, AVILA-PALENCIA I, et al. Short-term effects of physical activity, air pollution and their interaction on the cardiovascular and respiratory system [J]. *Environ Int*, 2018, 117: 82-90.

- [114] SUN D, LIU C, DING Y, et al. Long-term exposure to ambient PM_{2.5}, active commuting, and farming activity and cardiovascular disease risk in adults in China: a prospective cohort study [J]. *Lancet Planet Health*, 2023, 7(4): e304-e312.

- [115] WU P, GUO Q, ZHAO Y, et al. Emerging concern on air pollution and health: trade-off between air pollution exposure and physical activity [J]. *Eco Environ Health*, 2024, 3(2): 202-207.

- [116] ZHAO Y, SHENG Y, ZHOU J, et al. Influencing factors of residents' environ-

mental health literacy in Shaanxi province, China: a cross-sectional study [J]. *BMC Public Health*, 2022, 22(1): 114.

- [117] SCHULTE K, HUDSON B. A cross-sectional study of inequalities in digital air pollution information access and exposure reducing behavior uptake in the UK [J]. *Environ Int*, 2023, 181: 108236.

- [118] HUANG Y J, LEE P H, HSIEH S H, et al. Understanding factors influencing adoption of air pollution protective measures using the knowledge-attitude-behavior model [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 28414.

- [119] BHOR K B, VINAY V, AMBILDHOK K, et al. Effectiveness of oral health educational interventions on oral health of visually impaired school children: a systematic review and meta-analysis [J]. *Spec Care Dentist*, 2021, 41(3): 291-308.

- [120] DOHENY B M, INGLIS J J, BOLL K A, et al. Short animated video increases knowledge and perceived comfort in clinical counseling on inequitable health impacts of air pollution among interprofessional health learners and clinicians [J]. *BMC Med Educ*, 2023, 23(1): 858.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 王晓宇)