2026 中国空气质量改善的健康效应评估

迈向空气污染健康影响减半目标



AiR Climate Health
ARCH
空气 气候 健康

CLEAN AIR ASIA
亚洲清洁空气中心

本报告由北京大学空气气候健康研究团队编制，亚洲清洁空气中心提供支持。

报告审阅

朱　彤　中国科学院 院士
北京大学 环境科学与工程学院 教授

作者列表

薛　涛　北京大学 医学部 长聘副教授、研究员
宫继成　北京大学 环境科学与工程学院 教授
刘　俊　北京科技大学 能源与环境工程学院 副教授
王若涵　北京大学 公共卫生学院
康　宁　北京大学 公共卫生学院

传播支持

黄新皓　亚洲清洁空气中心　环境项目顾问
朱　妍　亚洲清洁空气中心　传播与能源主管

图片来源及致谢

本报告部分图片选自“中国中小学生视角下空气污染与健康画展”。该画展由中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所应世界卫生组织邀请，于 2025 年 3 月在哥伦比亚卡塔赫纳举行的第二届全球空气污染与健康大会期间举办。本报告经授权使用画展作品，相关图片仅限用于本报告，不得用于其他用途。

特此感谢中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所王林研究员、李湉湉研究员、潘力军研究员和杨文静副研究员在画展作品协调、版权确认及图片使用授权等方面给予的大力支持。

封面图片作品名称为《环境健康》，作者为慈溪市慈吉中学方胤丞。报告正文中所使用的其他作品信息在对应图片处标注。

版式设计

臣邦设计

执行摘要

空气污染是影响公众健康的重要环境风险因素。自 2013 年以来，中国相继实施了《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》和《空气质量持续改善行动计划》等三阶段清洁空气行动，推动空气质量实现了历史性、全局性改善，并带来了显著的公众健康收益。《中国空气质量改善的健康效应评估》系列研究持续追踪这一进程，通过量化评估我国大气污染防治政策行动的健康效益，为不同阶段的政策实施进展与成效分析提供科学支撑。

本次年度报告是系列研究的第四期成果。2025 年是《空气质量持续改善行动计划》和“十四五”规划收官之年，也是“十五五”规划谋篇布局的关键节点。同年 3 月，世界卫生组织（WHO）提出到 2040 年将全球空气污染相关健康影响较 2015 年降低 50% 的新目标（以下简称“WHO 减半目标”），为评估清洁空气行动的健康效益提供了新的目标导向和评价框架。在此背景下，本期研究首次围绕 WHO 减半目标开展评估，将研究视角进一步从“总体健康效益是否改善”拓展至“既有和未来清洁空气行动能否支撑长期健康目标的实现”。报告重点围绕三个方面开展研究：

（1）系统评估我国三阶段清洁空气行动计划（2013—2025 年）的健康效益，并对未来空气污染暴露水平及相关疾病负担变化进行前瞻性预测；

（2）围绕细颗粒物（$PM_{2.5}$）长期暴露相关健康风险，评估不同政策情景下 WHO 减半目标的实现前景，并重点分析新修订的《环境空气质量标准》（GB 3095—2026）对目标实现的推动作用；

（3）在关注总体疾病负担变化基础上，开展分病因的疾病负担评估和驱动因素分解，分析不同健康结局实现 WHO 减半目标的改善进程，并识别人口老龄化等关键因素对未来健康收益释放的影响。

研究结果表明，中国过去十余年的清洁空气行动已为实现 WHO 减半目标奠定了坚实基础。新版《环境空气质量标准》（GB 3095—2026）将大幅推进 WHO 减半目标的实现进程，我国能否最终实现 WHO 减半目标，高度依赖未来减排力度与低碳转型进程。与此同时，人口老龄化正成为未来健康收益持续提升的重要制约因素，并可能加剧空气污染对痴呆等典型老年疾病的健康负担。主要研究发现如下：

（一）中国三阶段清洁空气行动持续降低人群污染暴露水平，蓝天保卫战期间健康收益释放最为显著

过去十余年，我国持续实施三阶段清洁空气行动，$PM_{2.5}$ 长期暴露水平显著下降，空气质量改善带来的健康收益持续累积。研究显示，2013—2025 年，全国人口加权平均 $PM_{2.5}$ 暴露浓度由 64.4 μg/m^3 下降至 27.4 μg/m^3，累计降幅达 57.4%；同期，$PM_{2.5}$ 长期暴露相关成人健康风险累计下降 27.2%。分阶段来看，第一阶段、第二阶段和第三阶段清洁空气行动实施期间，$PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担分别减少 10.4 万、32.5 万和 13.3 万，其中第二阶段“蓝天保卫战”期间健康收益释放最为显著。结果表明，我国清洁空气行动取得显著健康成效，为推动以保护公众健康为导向的空气质量管理体系奠定了重要基础。

（二）低碳发展是实现 WHO 减半目标的重要基础，新版空气质量标准达标有望大幅推进目标实现进程

研究发现，中国是全球最有希望实现 WHO 减半目标的发展中国家之一，但实现路径高度依赖未来减排力度与低碳转型进程。情景预测结果显示，到 2040 年，在低排放情景下，我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关健康风险较 2015 年下降 52.7%，可实现 WHO 减半目标；在中等排放情景和高排放情景下，降幅则可能仅为 34.7% 和 22.4%，目标实现面临较大不确定性。

此外，研究分析了新修订的《环境空气质量标准》对于 WHO 减半目标的推动作用。结果表明，2025 年，超过新版标准 $PM_{2.5}$ 年均浓度二级限值（25 μg/m^3）的污染暴露仍是导致相关疾病负担的关键因素。研究发现，如能全部避免，$PM_{2.5}$ 长期暴露相关死亡的人群归因分数将较 2015 年累计下降 44.1%，相当于完成 WHO 减半目标进度的约 88%。换言之，如果 2025 年全国 $PM_{2.5}$ 暴露水平以等比例趋势下降，当人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度达到 23.7μg/m^3 时，预计相应人群归因分数将降至 2015 年的 50%，即实现 WHO 减半目标。这表明，新版标准的实施将显著提升我国空气污染健康风险控制水平，为我国实现 WHO 减半目标提供重要支撑。

（三）不同健康结局改善进程存在差异，人口老龄化成为未来健康效益改善的重要瓶颈

研究发现，$PM_{2.5}$ 长期暴露相关成人健康风险的未来变化具有明显的疾病异质性，不同健康结局实现 WHO 减半目标的进程并不完全一致。到 2040 年，在低排放情景下，脑卒中、缺血性心脏病、慢性阻塞性肺疾病和慢性肾脏病等四种疾病的 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关健康风险较 2015 年分别下降 67.8%、64.0%、60.9%、56.7%，均达到 WHO 减半目标；肺癌和下呼吸道感染的降幅分别为 49.8% 和 47%，基本接近 WHO 减半目标；2 型糖尿病的降幅为 37.3%，仍有一定改善空间；而痴呆的改善进展相对滞后，疾病负担不仅未下降反而有上升趋势。

进一步的驱动因素分解表明，$PM_{2.5}$ 暴露水平的下降虽然在一定程度上降低了痴呆等典型老年疾病的健康风险，但人口老龄化的快速加剧显著扩大了易感人群规模，从而抵消了部分健康收益。结果提示，未来空气质量健康效益评估应进一步加强分病因分析，并强化空气污染防治与积极应对人口老龄化、慢性病防控等公共卫生政策的协同治理。

根据上述评估结果，研究建议：

首先，完善空气质量改善的健康效应评估方法体系，提高健康风险评估的科学支撑能力。要加强分病因、分人群、分区域的健康风险评估，持续跟踪心脑血管疾病、慢性阻塞性肺疾病、肺癌、慢性肾脏病、2 型糖尿病、痴呆和下呼吸道感染等重点健康结局的变化特征，提高空气质量改善健康效应评估的科学性和精细化水平，为大气污染治理、公共卫生决策和重点人群保护提供更加坚实的科学支撑。

其次，要充分发挥新版《环境空气质量标准》的健康引领作用，持续深化减污降碳协同治理，为我国实现 WHO 减半目标奠定坚实基础。一方面，以新版标准分阶段实施为契机，坚持以保护公众健康为导向，持续推进 $PM_{2.5}$ 深度治理。近期应以实现 30 μg/m^3 过渡阶段限值为重点，巩固 " 十四五 " 时期空气质量改善成效，防止 $PM_{2.5}$ 浓度在低位平台期出现反弹；中长期应以全面达到 25 μg/m^3 二级限值为牵引，进一步强化重点区域和重点行业污染减排，加快能源结构调整、产业结构优化和交通运输绿色转型，持续深化减污降碳协同治理，推动污染物与温室气体协同减排，不断降低人群 $PM_{2.5}$ 暴露水平，为实现 WHO 减半目标和持续释放空气质量改善健康效益提供长期保障。另一方面，加强新版标准实施效果评估，推动新版标准尽快转化为实际健康收益，并为标准持续优化升级提供科学依据。

再次，要加强大气污染防治与积极应对人口老龄化相关政策的衔接，提高重点疾病和重点人群健康保护水平。推动空气质量改善与老年健康服务和重点慢病管理等政策的衔接协同，加强空气污染健康风险与慢性病综合防控协同研究，重点关注老年人群以及痴呆、2 型糖尿病等老龄化敏感疾病，完善重点人群健康防护措施，提高空气质量改善带来的健康收益。

最后，要推动建立以保护公众健康为导向的空气质量管理体系，加强空气污染与健康治理领域国际合作。通过将健康风险识别结果反馈到大气污染治理和公共卫生干预全过程，推动空气质量管理由“浓度达标导向”逐步向“健康效益驱动”转变，促进清洁空气行动持续转化为更加长期、稳定和公平的健康收益，为美丽中国建设、健康中国建设和全面实现 WHO 减半目标提供更加科学的决策支撑。一是完善空气质量监测和评价体系，在现有空气质量监测基础上进一步叠加人口分布和健康风险信息，识别污染浓度较高且人口相对集中的重点区域，关注健康收益转化不足的重点人群，推动大气污染治理资源配置更加贴近实际人群健康需求。二是充分发挥健康效应评估对空气质量目标制定、重点区域治理和减排策略选择的支撑作用，建立与新版《环境空气质量标准》分阶段实施相衔接的达标策略，推动空气质量达标管理更加精细化。三是要积极参与全球空气污染与健康治理，加强与 WHO 等国际组织以及其他国家和地区在健康影响评估、空气质量管理和减污降碳协同等方面的政策交流与经验分享，深化空气污染与健康治理领域国际合作，共同推动全球空气污染健康负担持续下降。

目录

引言		1
一、研究背景	1.1 细颗粒物长期暴露的健康危害	4
	1.2 中国清洁空气行动与健康效应评估研究进展	4
	1.3 世卫组织减半目标及我国实现面临的新挑战	5
	1.4 本报告的评估目标与分析框架	6
二、评估方法	2.1 研究设计与总体框架	6
	2.2 数据来源与处理	7
	2.3 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担评估	9
	2.4 世卫组织减半目标实现前景评估	11
	2.5 驱动因素分解	12
三、中国清洁空气行动计划对人群 $PM_{2.5}$ 暴露的改善作用	3.1 清洁空气行动持续降低人群暴露水平，未来改善幅度取决于减排路径	14
	3.2 重点区域空气污染暴露水平普遍下降，局部地区污染反弹仍需关注	15
四、空气污染暴露相关健康风险的改善情况	4.1 空气质量改善持续释放健康收益，空气污染暴露相关健康风险显著下降	18
	4.2 不同健康结局改善程度存在差异，痴呆等老龄化相关疾病负担改善相对有限	19

五、人口老龄化背景下我国空气污染健康风险的新特征	5.1 人口老龄化进程加快，老年人口规模和占比同步上升	22
	5.2 不同健康结局随年龄增长的死亡风险变化存在明显差异，痴呆受人口老龄化影响更为显著	23
六、我国实现空气污染健康影响减半目标的前景	6.1 空气质量标准将大幅推进 WHO 减半目标实现进程	26
	6.2 我国实现 WHO 减半目标需持续推进低碳发展	28
	6.3 不同健康结局实现 WHO 减半目标的进程存在明显差异，痴呆和 2 型糖尿病改善相对滞后	30
七、$PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担变化的驱动因素分解	7.1 $PM_{2.5}$ 暴露水平下降是健康收益的主要来源，未来需依靠低碳发展抵消人口老龄化影响	34
	7.2 不同健康结局归因疾病负担变化的驱动因素存在明显差异，人口老龄化对痴呆和 2 型糖尿病的影响更为突出	37
八、结论与建议		41
参考文献		45

引言

自 2013 年以来，中国相继实施了《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》和《空气质量持续改善行动计划》等三阶段行动计划，推动空气质量实现了历史性、全局性改善，由此带来了显著的公众健康收益。科学认识我国空气质量改善的健康效应，对于既往政策评估和未来治理规划均至关重要。《中国空气质量改善的健康效应评估》系列研究持续追踪这一进程，通过量化空气质量改善的健康效益，为不同阶段清洁空气行动的实施进展与政策成效评估提供科学支撑。同时，研究也为系统总结和向全球展示中国空气污染治理成效提供了关键科学证据，并为全球空气质量管理与健康风险评估提供了重要的方法参考。

2026 年，系列研究进入第四期。前期研究发现，《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》实施后，我国居民人均预期寿命增加约半年；与此同时，空气污染相关健康风险呈现结构性变化，长期暴露导致的慢性疾病负担持续下降，而短期高浓度暴露引发的急性健康风险日趋集中。本期研究在延续评估空气污染暴露相关健康风险改善情况的基础上，首次聚焦世界卫生组织（WHO）提出的全球空气污染健康影响减半目标，对我国未来空气污染暴露水平及相关疾病负担变化开展前瞻性预测，并结合不同政策情景、分病因疾病负担评估和驱动因素分解，分析我国实现 WHO 减半目标的前景、关键影响因素及面临的挑战。


有毒垃圾
可回收物



研究背景

01

作品名称：《环境健康》 作者：潘昕艾，山东省济南市美里湖第一小学

1.1 细颗粒物长期暴露的健康危害

空气污染是全球重要环境健康风险因素之一，也是导致过早死亡的第二大危险因素，仅次于高血压。最新版全球疾病负担研究（Global Burden of Disease Study, GBD）结果提示，细颗粒物（$PM_{2.5}$）长期暴露仍是我国环境相关疾病负担的重要来源，持续推进空气质量改善、降低人群暴露水平，对于促进公众健康具有重要意义[1]。

$PM_{2.5}$ 暴露对健康的影响与其理化特性和体内作用过程密切相关。$PM_{2.5}$ 粒径小、比表面积大，具有较强的穿透能力和吸附能力，可携带重金属、多环芳烃、硫酸盐、硝酸盐及黑碳等多种有害成分，经呼吸道进入人体[2]。吸入后的 $PM_{2.5}$ 可沉积于细支气管和肺泡区域，诱发氧化应激、炎症反应、免疫调节异常和内皮功能损伤；部分细颗粒物及其活性成分还可进一步进入血液循环，突破血气屏障、血脑屏障和胎盘屏障，进而影响多个组织和器官系统[3-5]。长期暴露下，上述生物学过程可能通过慢性炎症、动脉粥样硬化进展、血栓形成、肺功能下降及代谢紊乱等途径，增加多种慢性疾病和过早死亡风险[6-8]。

随着机制研究和流行病学证据不断积累，$PM_{2.5}$ 长期暴露的健康危害已得到较为系统的科学证实。美国环境保护署（EPA）发布的《颗粒物综合科学评估》（Integrated Science Assessment for Particulate Matter, PM ISA）系统总结了颗粒物暴露与健康结局之间的流行病学、毒理学和临床研究证据[9]。评估认为，$PM_{2.5}$ 长期暴露与全因死亡、心血管疾病和呼吸系统疾病之间存在明确的因果关系；与肺癌、神经系统疾病之间可能存在因果关系；与代谢疾病和生殖疾病之间提示存在因果关系。以上证据表明，$PM_{2.5}$ 长期暴露对人体多个器官系统具有广泛的健康影响，为开展不同健康结局的疾病负担评估提供了重要理论依据。

1.2 中国清洁空气行动与健康效应评估研究进展

为应对 $PM_{2.5}$ 污染带来的健康风险，我国于 2012 年发布《环境空气质量标准》（GB 3095—2012），首次将 $PM_{2.5}$ 纳入国家环境空气质量评价体系，成为我国大气污染治理的重要里程碑。此后，我国陆续实施了三个阶段的大气污染防治行动计划，包括：第一阶段《大气污染防治行动计划》（2013—2017 年，简称“大气十条”）、第二阶段《打赢蓝天保卫战三年行动计划》（2018—2020 年）以及第三阶段《空气质量持续改善行动计划》（2023—2025 年），逐步形成了以 $PM_{2.5}$ 污染防治为重点、持续推进空气质量改善的国家大气污染治理体系。

环境空气质量标准在这一过程中发挥了重要的引领作用。为进一步保护人群健康，2026 年 3 月 1 日起，新修订的《环境空气质量标准》（GB 3095—2026）正式实施，并进一步收严 $PM_{2.5}$ 等主要污染物限值。修订后的标准采用分阶段实施方式：第一阶段自 2026 年 3 月 1 日起至 2030 年 12 月 31 日，执行过渡阶段浓度限值，其中 $PM_{2.5}$ 年均浓度二级限值为 30 微克 / 立方米（$\mu g/m^3$）；第二阶段自 2031 年 1 月 1 日起，在全国范围内执行修订后的污染物浓度限值，其中 $PM_{2.5}$ 年均浓度二级限值为 25 $\mu g/m^3$，与 WHO 最新版《全球空气质量指南》第二阶段过渡目标（IT-2）相衔接。2026 年 6 月，《美丽中国建设“十五五”规划》（国发〔2026〕20 号）发布，明确提出到 2030 年，全国 $PM_{2.5}$ 年均浓度下降至 27 $\mu g/m^3$ 以下；到 2035 年，全国 $PM_{2.5}$ 年均浓度下降至 25$\mu g/m^3$ 以下。新版《环境空气质量标准》中 25 $\mu g/m^3$ 限值的全面实施，与美丽中国建设目标相衔接，为我国中长期空气质量持续改善和健康收益持续释放提供了重要目标指引。

在持续深入推进清洁空气行动的带动下，我国空气质量显著改善，$PM_{2.5}$ 年均浓度从 2013 年的 68 $\mu g/m^3$ 下降到 2025 年的 28 $\mu g/m^3$，成为全球

空气质量改善速度最快的国家[10]。《中国空气质量改善的健康效应评估》系列研究前期成果表明，空气质量改善已带来可观的健康收益[11-13]。“大气十条”和“蓝天保卫战”实施后，我国居民人均预期寿命增加约半年；与此同时，空气污染相关健康风险呈现结构性变化，长期暴露导致的慢性疾病负担持续下降，而短期高浓度暴露带来的急性健康风险日益日趋集中。当前空气污染健康风险的结构性变化表明，我国空气质量管理正由以污染治理为重点，逐步迈向持续改善、精细治理和健康导向并重的新阶段。

1.3 世卫组织减半目标及我国实现面临的新挑战

2025 年 3 月，世界卫生组织（WHO）在第二届全球空气污染与健康大会上提出新的全球目标：到 2040 年，将全球空气污染相关健康影响较 2015 年降低 50%（以下简称“WHO 减半目标”）[14]。空气污染相关健康影响取决于多种因素，不仅包括空气质量，还包括人群脆弱性。选用何种指标评估空气污染相关健康影响的改善幅度，则体现了“WHO 减半目标”的作用范围以及未来达标规划所触及的健康影响要素。

2025 年 5 月，世界卫生大会正式批准了 WHO 总干事报告《增强全球应对空气污染造成的不良健康影响最新路线图》[15]。其中，明确提出了“WHO 减半目标”具体测算方法：以 2015 年为参考基线，到 2040 年，各国将人为来源空气污染导致死亡的人群归因分数（Population-attributable fraction, PAF）降低 50%。与传统以污染物浓度改善为核心的目标相比，以人群归因分数衡量的“WHO 减半目标”更加关注空气质量改善能否转化为可量化的健康收益，为清洁空气行动成效评估提供了新的目标导向和评价框架。另外，人群归因分数并未全面考虑人口脆弱性等复杂因素对空气污染健康风险的影响，对于类似于我国的快速老龄化国家，该指标的适用性不强。因此，应该考虑归因疾病负担人数等其它指标，全面衡量我国是否能够在 2040 年达成最严格意义上的“空气污染健康影响减半”。

研究表明，中国是最有希望实现 WHO 减半目标的发展中国家之一。2015—2021 年间，中国 $PM_{2.5}$ 暴露相关疾病负担下降约 19%，不仅优于全球平均水平，也高于印度、印度尼西亚、埃及和巴基斯坦等其他 $PM_{2.5}$ 暴露相关健康风险较高国家的改善幅度[16]。然而，未来能否实现 WHO 减半目标仍取决于长期减排力度和低碳转型进程。



2025 年国际清洁空气蓝天日“健康生活 · 畅快呼吸”科普活动现场。图源：亚洲清洁空气中心

尽管我国已取得显著进展，实现 WHO 减半目标仍面临新的阶段性挑战。一方面，我国大气污染治理已进入深水区，传统末端减排潜力逐步收窄，进一步降低 $PM_{2.5}$ 暴露水平的边际难度和单位治理成本持续上升。已有研究估算，2013—2017 年，全国人群 $PM_{2.5}$ 暴露水平每降低 1 μg/m^3 的治理成本约为 490 亿元人民币；2018—2020 年，这一成本已上升至约 1000 亿元人民币 [17]。随着单位减排成本不断提高，下一阶段空气质量管理不仅需要关注污染物浓度是否持续下降，更需要关注有限治理投入如何带来更大的健康收益，以及应优先降低哪些健康风险。另一方面，仅关注总体 $PM_{2.5}$ 归因健康风险变化，已难以充分反映不同健康结局对空气质量改善的响应差异。$PM_{2.5}$ 与不同疾病结局之间具有不同形态的暴露反应关系函数，这意味着相同幅度的 $PM_{2.5}$ 浓度下降，对不同疾病负担的改善程度并不一致 [18, 19]。因此，在治理成本不断上升、减排空间逐步收窄的背景下，开展分病因疾病负担评估，是识别健康收益分布和目标实现潜力的重要基础。

与此同时，我国人口年龄结构正在快速变化，人口老龄化趋势将进一步影响 $PM_{2.5}$ 暴露相关健康负担。国家统计局数据显示，截至 2025 年底，我国 60 岁及以上老年人口达到 3.2 亿，占总人口的 23%；预计到 2035 年前后，该群体规模将突破 4 亿，占总人口比重超过 30%，进入重度老龄化阶段 [20]。随着老年人口持续增加，$PM_{2.5}$ 暴露相关疾病负担也将发生深刻变化。缺血性心脏病、脑卒中、慢性阻塞性肺疾病、慢性肾脏病和痴呆等疾病主要集中于中老年人群 [21]。$PM_{2.5}$ 浓度下降能够降低暴露相关健康风险，但老年易感人群规模扩大将同步推高相关疾病基线负担 [22]。因此，在人口老龄化持续加速背景下，空气质量改善带来的健康收益能否充分转化为疾病负担下降，取决于污染暴露水平变化、疾病基线风险及人口结构演变等多重因素的共同作用。

1.4 本报告的评估目标与分析框架

《中国空气质量改善的健康效应评估》系列研究前期成果主要围绕污染暴露改善、疾病负担下降及健康收益分布特征开展评估，为科学认识我国大气污染治理成效提供了重要证据。在 $PM_{2.5}$ 污染治理进入深水区和人口老龄化持续加速的背景下，仅关注总体疾病负担变化，已难以满足健康导向型空气质量管理的决策需求。因此，有必要在 WHO 减半目标框架下，对我国空气污染相关健康影响进行持续评估，并进一步开展分病因分析，识别不同健康结局的改善进程、目标差距及其影响因素，以判断现有和未来空气质量改善幅度是否能够支撑长期健康目标的实现。

基于上述背景，本期报告拟在系统评估 2013—2025 年我国三个阶段清洁空气行动计划的健康效益基础上，进一步围绕 WHO 减半目标，分析我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关健康风险的未来变化趋势，评估不同政策情景下目标实现前景，并重点分析新修订的《环境空气质量标准》对目标实现的推动作用。与既往主要关注总体疾病负担变化相比，本报告进一步开展分病因的疾病负担评估和驱动因素分解，刻画不同健康结局的改善进程差异，并关注人口老龄化等结构性因素对未来健康收益释放的影响。

具体而言，本报告重点回答三个核心问题：（1）我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关健康风险距离 WHO 减半目标还有多大差距；（2）不同健康结局实现 WHO 减半目标的进程是否一致；（3）我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担变化主要受哪些因素驱动，未来健康收益释放将受到哪些关键因素影响。

通过上述分析，本报告将空气质量改善健康效应评估从总体疾病负担变化进一步拓展至不同健康结局的目标实现进程及其驱动因素识别，为在 WHO 减半目标框架下优化我国空气质量持续改善路径、完善健康导向的大气污染治理体系，以及推动空气污染防治与慢性病管理、老年健康保护协同提供科学依据。

评估方法

02



作品名称：《环境健康》 作者：陆毅，江苏省灌云中等专业学校

2.1 研究设计与总体框架

本报告采用健康影响评估框架，在中国大陆县级行政单元尺度上评估 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担。研究首先在县级尺度完成 $PM_{2.5}$ 暴露水平、人口规模、年龄性别结构、基线死亡率和暴露 - 反应关系的匹配，并进一步汇总至省级和全国尺度开展分析。研究包括历史评估和未来预测两个阶段：历史评估用于量化 2013—2025 年我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担的改善情况；未来预测用于评估不同政策情景下 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担的变化趋势及 WHO 减半目标的实现前景。

本报告对 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关的成人健康风险开展分病因评估，并将分病因汇总结果作为 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担。$PM_{2.5}$ 暴露健康结局的选择兼顾经典研究方法与最新科学证据。一方面，纳入全球疾病负担研究（GBD）已采用的主要健康结局 [18, 19]，包括缺血性心脏病（Ischemic Heart Disease, IHD）、脑卒中（Stroke）、慢性阻塞性肺疾病（Chronic Obstructive Pulmonary Disease, COPD）、下呼吸道感染（Lower Respiratory Infections, LRI）、气管、支气管和肺癌（Tracheal, Bronchus, and Lung Cancer）、2 型糖尿病（Type 2 Diabetes Mellitus, T2DM）以及阿尔茨海默病及其他痴呆（Alzheimer’s Disease and Other Dementias, AD），上述健康结局的暴露 - 反应关系采用 GBD 2023 研究中的疾病特异性暴露 - 反应函数。另一方面，鉴于最新研究揭示了 $PM_{2.5}$ 长期暴露与慢性肾脏病（Chronic Kidney Disease, CKD）之间存在非线性暴露 - 反应关系，本研究进一步将慢性肾脏病纳入分析 [23]。最终纳入的 8 类健康结局覆盖循环系统、呼吸系统、代谢系统和神经系统等 $PM_{2.5}$ 长期暴露影响较明确、疾病负担较重的主要疾病，可较为全面地反映 $PM_{2.5}$ 长期暴露的健康影响。

为检验暴露 - 反应模型设定对评估结果的影响，本研究开展敏感性分析，采用全球暴露死亡模型（Global Exposure Mortality Model, GEMM）中针对非传染性疾病和下呼吸道感染（NCD+LRI）的暴露 - 反应模型估计 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人全因死亡负担，并与基于分病因汇总模型估计的 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担进行比较，以验证总体变化趋势和 WHO 减半目标评估结果的稳健性 [24]。同时，敏感性分析进一步表明，在纳入慢性肾脏病后，分病因汇总模型结果与全因死亡模型结果具有更高的一致性。

本研究总体框架包括四个步骤：

（1）构建全国县级尺度 $PM_{2.5}$ 暴露、人口规模、年龄性别结构及分病因基线死亡率数据库；

（2）基于分病因暴露 - 反应关系估计 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担；

（3）结合不同政策情景下 $PM_{2.5}$ 浓度、人口结构和基线死亡率变化，预测未来 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担；

（4）评估 WHO 减半目标的实现进展，并通过驱动因素分解解析 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担变化的潜在影响因素。

2.2 数据来源与处理

2.2.1 $PM_{2.5}$ 暴露数据

历史 $PM_{2.5}$ 暴露数据来源于大气成分近实时追踪数据集（Tracking Air Pollution in China, TAP）[25]。该数据集融合地面监测、卫星遥感、化学传输模型、气象场和土地利用等多源信息，并采用机器学习与数据融合方法构建中国高空间分辨率 $PM_{2.5}$ 浓度数据。本报告采用逐年 $PM_{2.5}$ 年均浓度数据，并结合县级人口分布计算人口加权平均 $PM_{2.5}$ 暴露水平。

未来 $PM_{2.5}$ 浓度变化受大气污染防治、气候变化减缓和社会经济发展等多种因素影响。本研究设定低排放情景、中等排放情景和高排放情景三种政策情景，以反映不同减排力度和社会经济发展模式下空气质量改善的趋势。上述三种政策情景分别对应第六次耦合模式比较计划（Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6）中的 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景*。具体而言，SSP1-2.6 代表可持续发展和积极气候减缓背景下的发展路径，SSP2-4.5 代表延续中等社会经济发展趋势的路径，SSP5-8.5 代表化石能源依赖程度较高、温室气体排放水平较高的发展路径[26]。本研究采用 CMIP6 中 GISS-E2.1-G 气候模式的 5 组集合成员（r1i1p3f1、r2i1p3f1、r3i1p3f1、r4i1p3f1 和 r5i1p3f1）的模拟结果预测未来 $PM_{2.5}$ 浓度变化。考虑到 CMIP6（2° ×2.5°）与 TAP（1km ×1 km）空间分辨率存在差异，本研究将 TAP 网格中心与对应的 CMIP6 网格进行匹配，以 2025 年 TAP 浓度为基准，利用 CMIP6 模拟的未来变化趋势校正各 TAP 网格的未来 $PM_{2.5}$ 浓度。随后，将历史和未来 $PM_{2.5}$ 暴露统一汇总至县级尺度开展后续分析。

2.2.2 人口数据

历史人口数据来源于 WorldPop 全球高分辨率人口数据集[27]。为提高人口规模和年龄性别结构估计与我国官方统计数据的一致性，本研究结合《中国统计年鉴》、历次全国人口普查及其他官方统计资料，对 WorldPop 人口数据进行约束校正，并按照县级行政区划汇总获得县级人口规模及年龄性别结构。

未来人口数据采用与不同 SSP 情景相匹配的高分辨率人口预测数据。为保证历史人口数据与未来人口预测数据之间的时间连续性，以历史基准年为衔接点，对未来人口预测结果进行比例校准，最终获得县级尺度分年龄、分性别人口数据。

2.2.3 基线死亡率与死因数据

分病因死亡率数据主要来源于全球疾病负担（GBD 2023）数据库[28]。对于历史时期的基线死亡率，在数据可获得的情况下，结合中国疾病预防控制中心死因监测系统数据进行一致性校正，以提高我国本土疾病负担估计的适用性。对于未来时期的基线死亡率，本报告参考 GBD 2023 的预测结果，并结合我国历史变化趋势进行外推估计，同时以历史与预测重叠年份为衔接点，对预测结果进行一致性校准，以保证历史数据与预测数据之间的连续性[29]。

* 注：SSP 为共享社会经济路径（Shared Socioeconomic Pathways），用于描述不同社会经济发展模式；SSP1 代表可持续发展路径，SSP2 代表中间路径，SSP5 代表传统化石燃料为主路径；后缀 2.6、4.5 和 8.5 表示相应的辐射强迫水平，用于反映不同气候变化和排放约束强度。

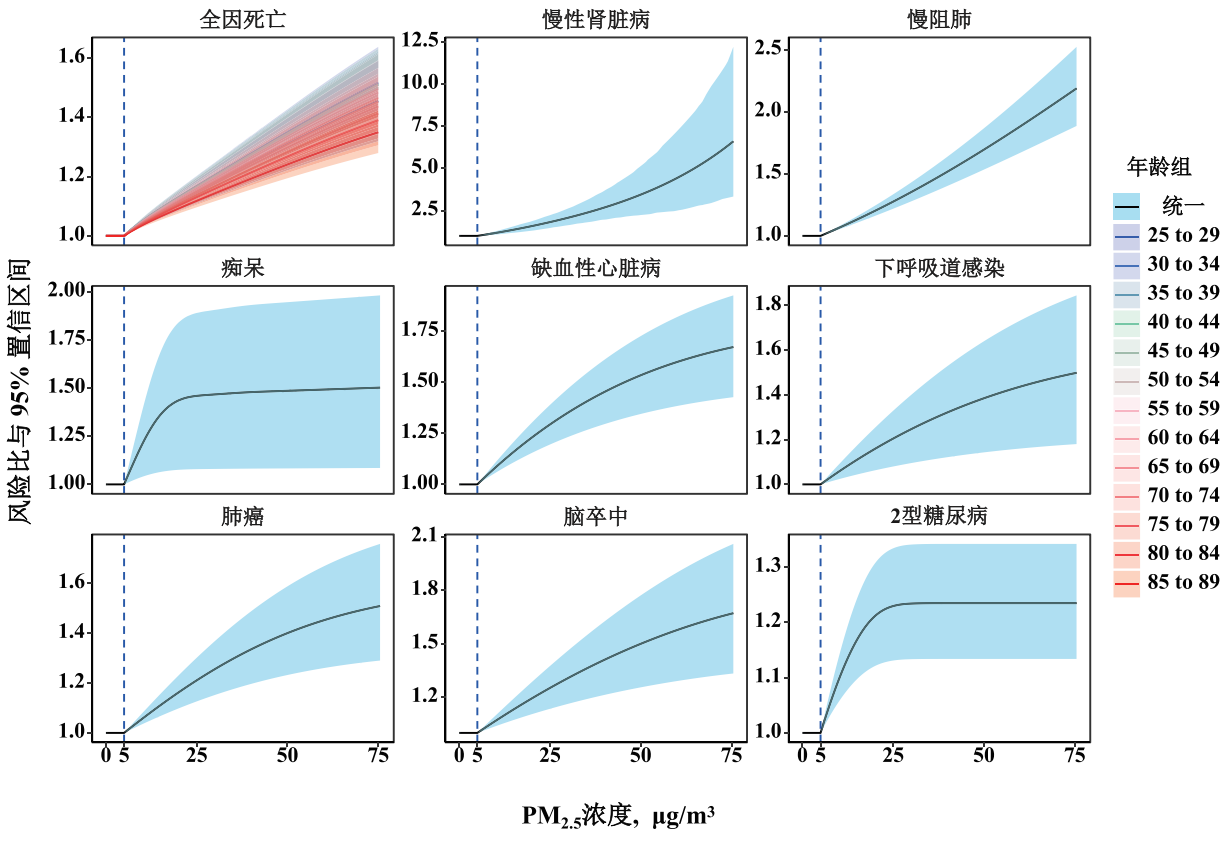
2.2.4 暴露 - 反应关系函数

$PM_{2.5}$ 长期暴露与分病因死亡风险之间的暴露 - 反应关系主要采用 GBD 2023 研究构建的疾病特异性暴露 - 反应函数，纳入分析的健康结局包括缺血性心脏病、脑卒中、慢性阻塞性肺疾病、下呼吸道感染、肺癌、2 型糖尿病以及痴呆 [17, 18]。上述暴露 - 反应函数整合了全球多地区流行病学研究证据，用于描述不同 $PM_{2.5}$ 暴露水平下各健康结局的死亡风险变化。考虑到 GBD 2023 研究框架中尚未纳入 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关慢性肾脏病疾病负担评估，本研究采用既往荟萃分析研究获得的暴露 - 反应关系，将慢性肾脏病作为补充健康结局纳入分析 [22]。

图 2.1 具体展示了 $PM_{2.5}$ 暴露与不同健康结局死亡风险之间的暴露 - 反应关系。总体来看，不同健康结局的函数形态存在明显差异：缺血性心脏病、脑卒中、下呼吸道感染和肺癌的曲线整体呈持续上升趋势，在中低浓度区间风险增加较快，随后增速逐渐放缓；慢阻肺的曲线上升相对平缓；2 型糖尿病和痴呆的曲线表现出低浓度区间快速上升、高浓度区间趋于平台的特征；慢性肾脏病的暴露 - 反应曲线不确定性较大，尤其在较高 $PM_{2.5}$ 浓度区间置信范围明显变宽，提示其风险估计仍存在较大不确定性。全因死亡的暴露 - 反应关系进一步体现出年龄异质性。不同年龄组的相对风险均随 $PM_{2.5}$ 浓度升高而上升，但上升幅度和曲线斜率有所不同。

图 2.1

$PM_{2.5}$ 与不同健康结局的暴露反应关系函数



2.3 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担评估

本研究采用全球疾病负担（GBD）研究和既往空气污染健康影响评估研究广泛应用的健康影响评估方法。首先，计算不同 $PM_{2.5}$ 长期暴露的归因风险：

$$若\ C_{j,k} > TMREL，AF_{j,k,s} = 1-[RR_s(C_{j,k}) / RR_s(TMREL)]^{-1} \quad (1)$$

$$若\ C_{j,k} \leqslant TMREL，AF_{j,k,s} = 0 \quad (2)$$

其中，$AF_{j,k,s}$ 表示地区 j、年份 k、疾病 s 对应的 $PM_{2.5}$ 人群归因分数；$RR_s(C_{j,k})$ 表示对应暴露水平下的相对风险，$C_{j,k}$ 表示对应的 $PM_{2.5}$ 暴露浓度。当 $PM_{2.5}$ 浓度低于理论最低风险暴露水平（Theoretical Minimum Risk Exposure Level, TMREL）时，人群归因分数设定为 0。

随后，结合人口规模和基线死亡率计算 $PM_{2.5}$ 归因疾病负担指标：

$$AN_{i,j,k,s} = AF_{j,k,s} \times Pop_{i,j,k,s} \times Mor_{i,k,s} \quad (3)$$

其中，i 代表年龄性别结构，$AN_{i,j,k,s}$ 表示对应的 $PM_{2.5}$ 暴露相关死亡数；$Pop_{i,j,k,s}$ 表示对应人口数；$Mor_{i,k,s}$ 表示对应疾病的基线死亡率。

2.4 世卫组织减半目标实现前景评估

人群归因分数（PAF）是评估 WHO 减半目标的核心指标，反映了空气污染暴露对死亡风险的相对贡献。与 PAF 相比，归因疾病负担进一步综合考虑了人口规模、年龄性别结构和基线死亡率等因素的动态变化，更能够反映空气质量改善在真实人群中的实际健康收益。因此，本研究结合我国空气污染暴露特征和现有健康影响评估体系，分别采用 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关死亡的人群归因分数和 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担两个评价指标，从两个层次评估我国实现 WHO 减半目标的进展及未来前景。

第一，基于人群归因分数评估新修订的《环境空气质量标准》（GB 3095—2026）对 WHO 减半目标的推动作用。本研究以 $PM_{2.5}$ 年均浓度 35 μg/m^3（2012 版标准二级限值，对应 WHO《全球空气质量指南》第一阶段过渡目标〔简写为 WHO IT-1，下同〕）、30 μg/m^3（2026 版标准过渡阶段限值）、25 μg/m^3（2026 版标准二级限值，对应 WHO IT-2）、20 μg/m^3、15 μg/m^3（WHO IT-3）和 10 μg/m^3（WHO IT-4）作为参考限值（全国所有地区均达到），测算了 2025 年不同参考限值情景下 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关人群归因分数的变化。该分析不考虑未来人口规模、年龄性别结构和基线死亡率变化的影响，仅反映 $PM_{2.5}$ 暴露水平本身变化对健康风险的影响，用于判断空气质量标准对实现 WHO 减半目标的直接贡献。若某一参考限值情景下人群归因分数较 2015 年下降 50% 及以上，则认为该情景达到 WHO 减半目标要求。

第二，基于归因疾病负担评估未来不同政策情景下我国实现 WHO 减半目标的实际前景。在 PAF 基础上，本研究进一步结合三种未来政策情景（低排放情景、中等排放情景和高排放情景）下的 $PM_{2.5}$ 暴露水平、人口规模、年龄性别结构和基线死亡率变化，预测 2040 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露成人归因疾病负担，并与 2015 年进行比较。若某一政策情景下 2040 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因死亡人数较 2015 年下降 50% 及以上，则认为在综合考虑污染暴露、人口结构变化和基线死亡率等因素的条件下，该情景能够支撑我国实现 WHO 减半目标。

2.5 驱动因素分解

$PM_{2.5}$ 归因健康风险由多种因素共同决定[30]。考虑到长期、空间精细化数据的可获得性，本报告将两个时间点之间 $PM_{2.5}$ 归因疾病负担的变化分解

为四类驱动因素的贡献：$PM_{2.5}$ 暴露变化（*C*）、人口规模变化（*Tot*）、年龄性别结构变化（*Str*）以及基线死亡率变化（*Mor*）。对于全因死亡或任一单病因死亡，设基准年为 *t0*，比较年为 *t1*，则基准年的 $PM_{2.5}$ 暴露相关死亡数可表示为：

$$AN_{t0} = AF_{t0} \times Tot_{t0} \times Str_{t0} \times Mor_{t0} \quad (4)$$

在此基础上，依次将各驱动因素由 *t0* 替换为 *t1*，可构建一组虚拟归因疾病负担：

$$vAN_{AF} = AF_{t1} \times Tot_{t0} \times Str_{t0} \times Mor_{t0} \quad (4\text{-}1)$$
$$vAN_{Tot} = AF_{t1} \times Tot_{t1} \times Str_{t0} \times Mor_{t0} \quad (4\text{-}2)$$
$$vAN_{Str} = AF_{t1} \times Tot_{t1} \times Str_{t1} \times Mor_{t0} \quad (4\text{-}3)$$
$$AN_{t1} = AF_{t1} \times Tot_{t1} \times Str_{t1} \times Mor_{t1} \quad (4\text{-}4)$$

在上述分解顺序下，相邻两项之间的差值分别表示 $PM_{2.5}$ 暴露、人口规模、年龄性别结构和基线死亡率变化对 $PM_{2.5}$ 暴露相关疾病负担变化的贡献。由于驱动因素分解结果可能受到替换顺序影响，报告进一步遍历四类因素的全部可能排列顺序（24种），取平均值作为最终分解结果。该方法可降低分解顺序对结果的影响，从而更稳健地评估不同因素对 $PM_{2.5}$ 暴露相关疾病负担变化的相对贡献。



2023 年六五环境日“城市正添蓝”诗歌计划活动现场。
图源：亚洲清洁空气中心

中国清洁空气行动计划对人群 $PM_{2.5}$ 暴露的改善作用

03



作品名称：《只此青绿》 作者：徐思雯，上海市川沙中学南校

3.1 清洁空气行动持续降低人群暴露水平，未来改善幅度取决于减排路径

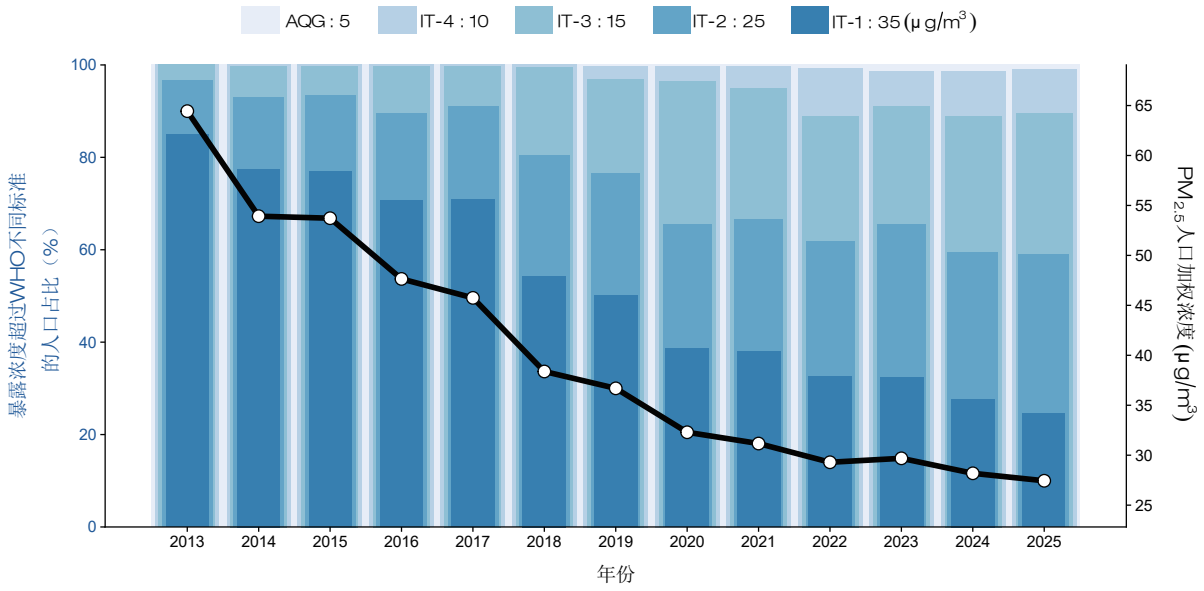
《2025 中国生态环境状况公报》显示，2025 年，全国地级及以上城市 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 28.0 μg/m^3，比 2020 年的 33 μg/m^3 下降 15%，完成《空气质量持续改善行动计划》中设定的下降 10% 的目标要求，全国层面空气质量实现历史最优。

本研究表明，2013—2025 年，全国人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度持续下降，反映出我国三阶段清洁空气行动计划的实施持续降低了居民长期暴露水平。总体来看，全国人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度从 2013 年的 64.4 μg/m^3 下降至 2025 年的 27.4 μg/m^3，累计下降 57.4%（图 3.1）。分阶段来看，第一阶段和第二阶段清洁空气行动期间 $PM_{2.5}$ 暴露水平下降较快，第三阶段仍保持持续改善趋势，但降幅有所收窄。具体而言，第一阶段《大气污染防治行动计划》（“大气十条”）实施后降至 45.7 μg/m^3，第二阶段《打赢蓝天保卫战三年行动计划》实施后降至 32.3 μg/m^3，第三阶段《清洁空气持续改善行动计划》实施后进一步降至 27.4 μg/m^3。这表明，在空气质量显著改善的基础上，进一步降低 $PM_{2.5}$ 暴露水平的难度逐步增加，进入了攻坚深化阶段。

与此同时，新修订的标准为空气质量持续改善和健康风险持续降低提供了更高水平的目标引导。2025 年，全国人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度已降至 27.4 μg/m^3，较 2013 年下降 57.4%；按 2021 版《环境空气质量标准》设定的 $PM_{2.5}$ 年均浓度二级限值 35 μg/m^3 衡量，居住在超过 35 μg/m^3 地区

图 3.1

2013—2025 年我国人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度变化



黑色折线表示全国人口加权 $PM_{2.5}$ 年均浓度，柱状图表示暴露于超过 WHO 空气质量指导值及过渡时期目标值的人口比例。其中，AQG 为 WHO 全球空气质量指导值，对应 5 μg/m^3；IT–1 为 WHO 过渡时期目标 1，对应 35 μg/m^3；IT–2 为 WHO 过渡时期目标 2，对应 25 μg/m^3，亦对应我国新版环境空气质量标准；IT–3 为 WHO 过渡时期目标 3，对应 15 μg/m^3；IT–4 为 WHO 过渡时期目标 4，对应 10 μg/m^3。

的人口比例已由 2013 年的 84.8% 降至 2025 年的 24.5%，高浓度暴露人口显著减少；但若按 2026 版《环境空气质量标准》设定的 $PM_{2.5}$ 年均浓度二级限值 25 μg/m^3 评估，2025 年仍有 58.8% 的人口居住在超标地区。随着空气质量持续改善，相比污染物浓度指标，未来应更加关注污染暴露变化，以及是否真正转化为过早死亡风险和疾病负担降低和重点人群健康风险下降，切实提升人群健康水平和社会福祉。

2025 年以后，不同未来政策情景下 $PM_{2.5}$ 暴露水平逐渐呈现明显分化（图 3.2）。到 2040 年，在低排放情景（SSP1-2.6）下，全国人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度预计降至 14.3 μg/m^3，较 2025 年下降 47.6%；中等排放情景（SSP2-4.5）下降至 21.1 μg/m^3，降幅为 22.7%；高排放情景（SSP5-8.5）仅下降至 24.6 μg/m^3，降幅为 9.9%。上述结果表明，未来我国 $PM_{2.5}$ 暴露水平能否持续显著下降，在很大程度上取决于减排力度和低碳转型进程。持续推进减污降碳协同，将为进一步降低居民长期暴露水平、释放空气质量改善健康效益提供重要保障。

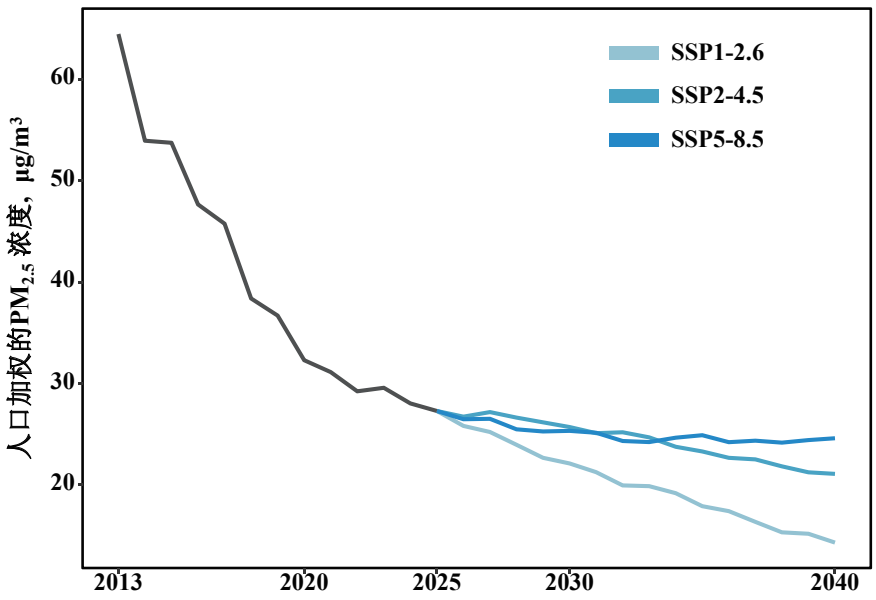
3.2 重点区域空气污染暴露水平普遍下降，局部地区污染反弹仍需关注

图 3.3 展示了 2013、2020 和 2025 年各省（自治区、直辖市）人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度的变化情况。总体来看，三阶段清洁空气行动实施以来，全国各地区 $PM_{2.5}$ 暴露水平普遍下降，其中京津冀及周边地区、长三角地区、成渝地区以及华中地区等早期污染程度较高区域改善幅度尤为明显，反映出过去十余年我国空气质量改善具有较广泛的区域覆盖性。

从不同阶段来看，第一、第二阶段清洁空气行动期间，大多数省份 $PM_{2.5}$ 暴露水平快速下降；进

图 3.2

2013—2040 年三种政策情景下我国人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度的变化



SSP1–2.6、SSP2–4.5、SSP5–8.5 分别代表低排放情景、中等排放情景和高排放情景。

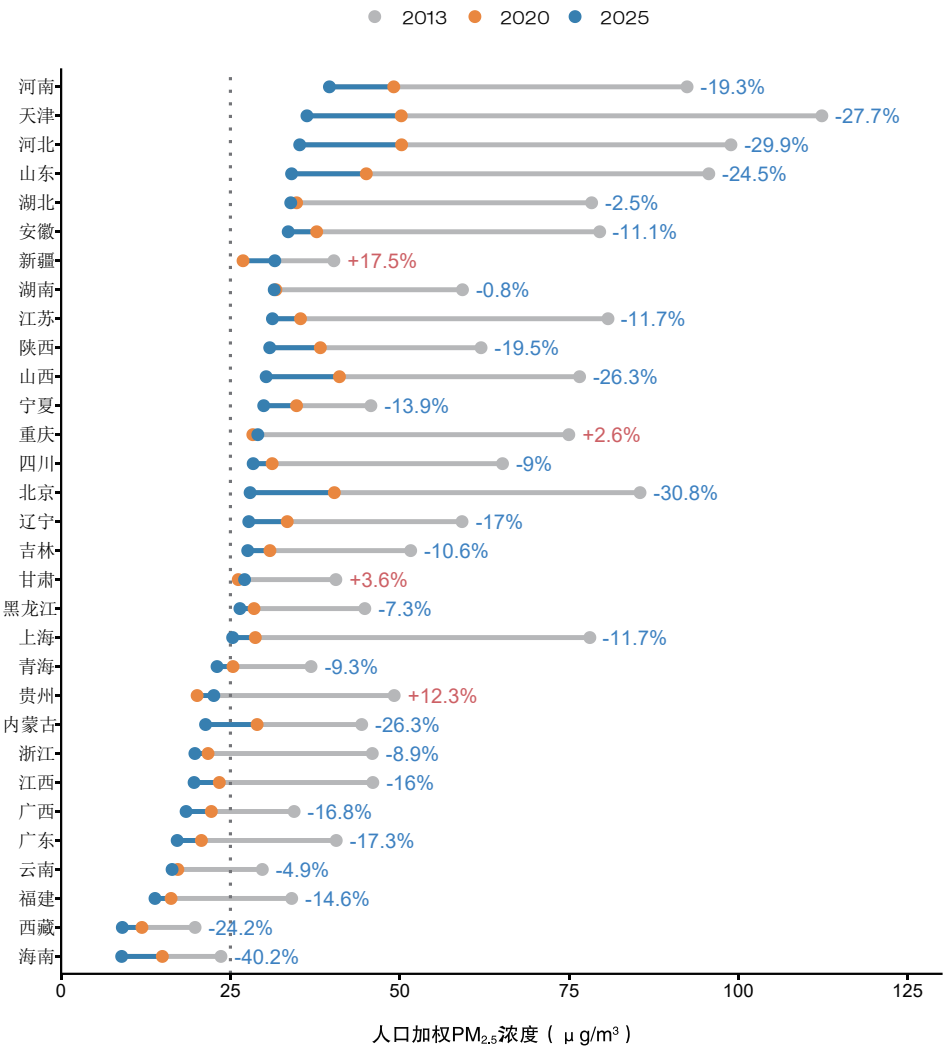
入第三阶段后，大多数省份 $PM_{2.5}$ 暴露水平继续下降，但下降速度有所放缓，区域间改善差异逐渐显现。

2020—2025 年，北京、河北、天津、山西和内蒙古等地区仍保持较快改善速度，人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度分别下降 30.8%、29.9%、27.7%、26.3% 和 26.3%。与此同时，新疆、贵州、甘肃和重庆等少数地区人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度分别上升 17.5%、12.3%、3.6% 和 2.6%，提示局部地区仍存在污染波动甚至反弹风险。

总体而言，全国 $PM_{2.5}$ 暴露水平持续下降的总体趋势没有改变，但不同地区空气质量改善进程已出现分化。未来应更加注重区域差异化治理，持续巩固重点地区治理成效，同时加强局部污染反弹地区的精准防控，推动全国空气质量持续改善。

图 3.3

2013、2020 和 2025 年各省份人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度变化



灰色、橙色和蓝色圆点分别表示 2013 年、2020 年和 2025 年各省份人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度；灰色线段表示 2013—2020 年变化，蓝色线段表示 2020—2025 年变化。右侧数字表示 2020—2025 年相对于 2020 年的变化幅度，蓝色表示下降，红色表示上升。各省份按 2025 年人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度由高到低排序。

空气污染暴露相关健康风险的改善情况

04



作品名称：《洁净空气与疾病防控》 作者：徐一然，天津外国语大学附属滨海外国语学校

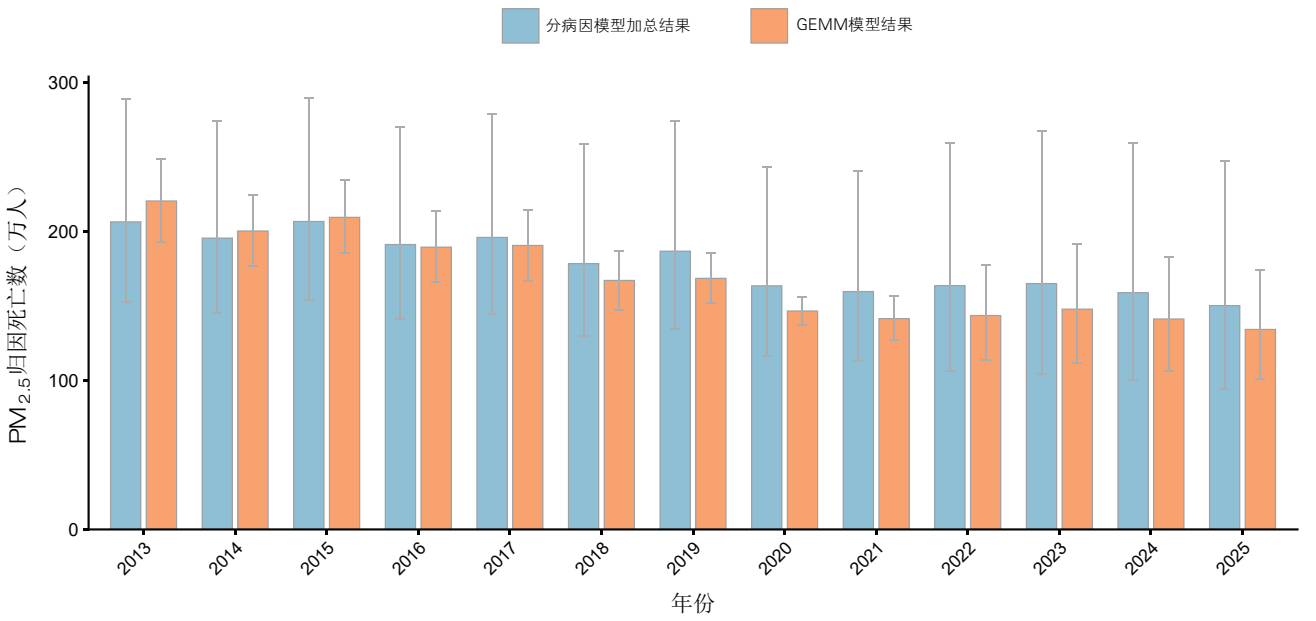
4.1 空气质量改善持续释放健康收益，空气污染暴露相关健康风险显著下降

2013—2025 年，随着空气质量持续改善，我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露导致的健康风险持续下降。分病因汇总模型结果显示，$PM_{2.5}$ 长期暴露导致的成人疾病负担由 2013 年的 206.5 万（95%CI: 152.9~288.7 万）下降至 2025 年的 150.3 万（95%CI: 94.0~247.2 万），累计下降 27.2%（图 4.1）。分阶段来看，第一阶段、第二阶段和第三阶段清洁空气行动实施期间，$PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担分别减少 10.4 万、32.5 万和 13.3 万。这表明，三阶段清洁空气行动均持续释放健康收益，有效降低了 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关疾病负担，其中第二阶段健康收益释放最为显著。

敏感性分析结果显示，$PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人全因死亡负担同样呈下降趋势，由 2013 年的 220.5 万（95%CI: 193.1~248.9 万）下降至 2025 年的 134.3 万（95%CI: 100.8~174.2 万），总体变化趋势与基于分病因汇总模型的评估结果一致，均表明 2013—2025 年我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关成人健康风险持续下降，说明本研究关于清洁空气行动持续释放健康收益的结论具有较好的稳健性。

图 4.1

2013—2025 年我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关成人健康风险变化



蓝色柱形表示分病因暴露 – 反应关系的评估结果，即分别估计 8 类健康结局的 $PM_{2.5}$ 归因疾病负担加总得到的成人疾病负担；橙色柱形表示敏感性分析结果，即基于 GEMM 全因死亡暴露 – 反应函数直接估计的 $PM_{2.5}$ 归因成人全因死亡负担；误差线表示 95% 置信区间。

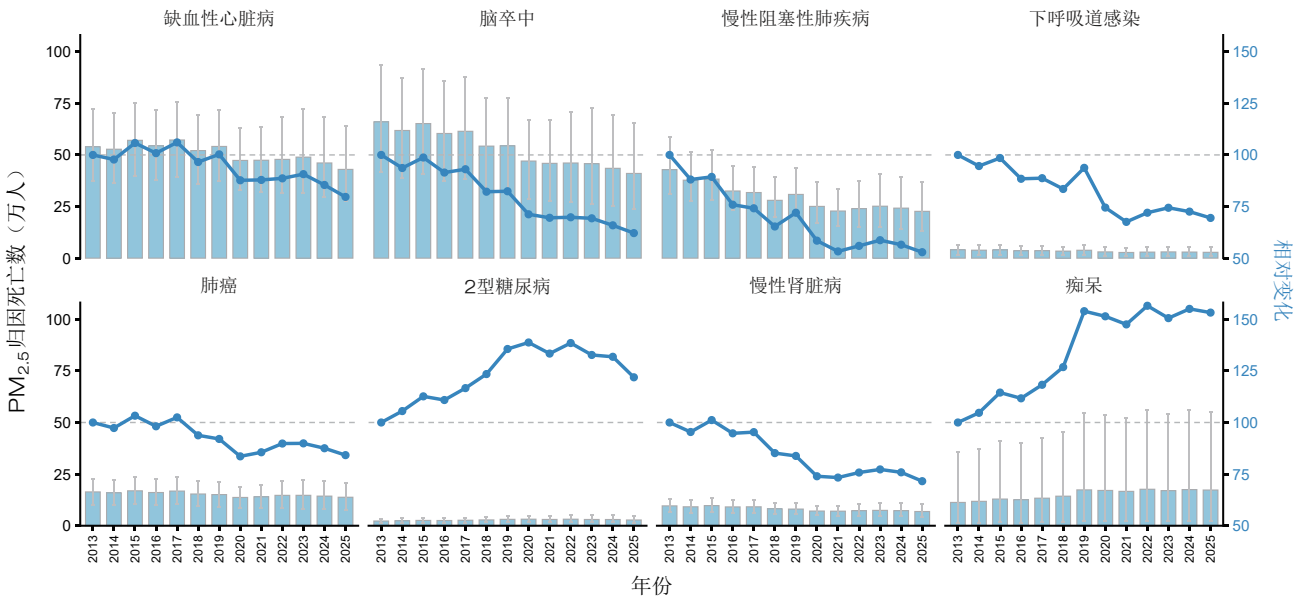
4.2 不同健康结局改善程度存在差异，痴呆等老龄化相关疾病负担改善相对有限

图 4.2 展示了 2013—2025 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因分病因成人疾病负担的变化情况。2025 年，$PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担主要集中于心脑血管疾病、呼吸系统疾病和神经系统疾病。其中，缺血性心脏病归因疾病负担最高，为 43.0 万（95%CI: 27.6~64.0 万）；其次为脑卒中 41.0 万（95%CI: 23.6~65.4 万）、慢性阻塞性肺疾病 22.7 万（95%CI: 13.3~37.1 万）、痴呆 17.3 万（95%CI: 2.1~55.2 万）和肺癌 13.8 万（95%CI: 7.7~20.9 万）。慢性肾脏病、下呼吸道感染和 2 型糖尿病的归因疾病负担相对较低，分别为 6.9 万（95%CI: 4.3~10.5 万）、2.8 万（95%CI: 1.1~5.2 万）和 2.8 万（95%CI: 1.5~4.6 万）。

总体来看，2013—2025 年，大多数健康结局的 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担均呈下降趋势，但不同健康结局的改善幅度存在明显差异。其中，慢性阻塞性肺疾病降幅最大，归因疾病负担累计下降 47.1%；其次为脑卒中，下降 37.9%；下呼吸道感染和慢性肾脏病分别下降 30.5% 和 28.4%；缺血性心脏病和肺癌降幅相对较小，分别下降 20.3% 和 15.8%。

图 4.2

2013—2025 年我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因分病因成人疾病负担变化



柱形表示不同年份 $PM_{2.5}$ 归因疾病负担，误差线表示 95% 不确定区间；折线表示相对于 2013 年的归因疾病负担变化，2013 年设为 100%。各分图分别展示缺血性心脏病、脑卒中、慢性阻塞性肺疾病、下呼吸道感染、肺癌、2 型糖尿病、慢性肾脏病和痴呆等健康结局。左侧纵轴为 $PM_{2.5}$ 归因死亡数，右侧纵轴为相对变化。

相比之下，痴呆和 2 型糖尿病归因疾病负担分别增加 53.2% 和 21.9%，并未随着 $PM_{2.5}$ 暴露水平下降而同步改善。这表明，空气质量改善并不必然带来所有健康结局疾病负担的同步下降。对于痴呆和 2 型糖尿病等受人口老龄化、疾病谱变化和基线死亡率变化影响较大的健康结局，$PM_{2.5}$ 暴露下降带来的健康收益可能被人口结构变化和疾病流行趋势部分抵消。这也提示，未来空气质量健康效益评估应更加关注不同健康结局的差异化变化，并加强空气污染防控与老龄健康管理、慢性病防控等政策的协同衔接。



2025 年“北京・昌平环十三陵骑行文化季”活动现场。图源：亚洲清洁空气中心

人口老龄化背景下我国空气污染健康风险的新特征

05



作品名称：《瓶子中的珍稀空气》 作者：杨家盈，广东省南海中心小学

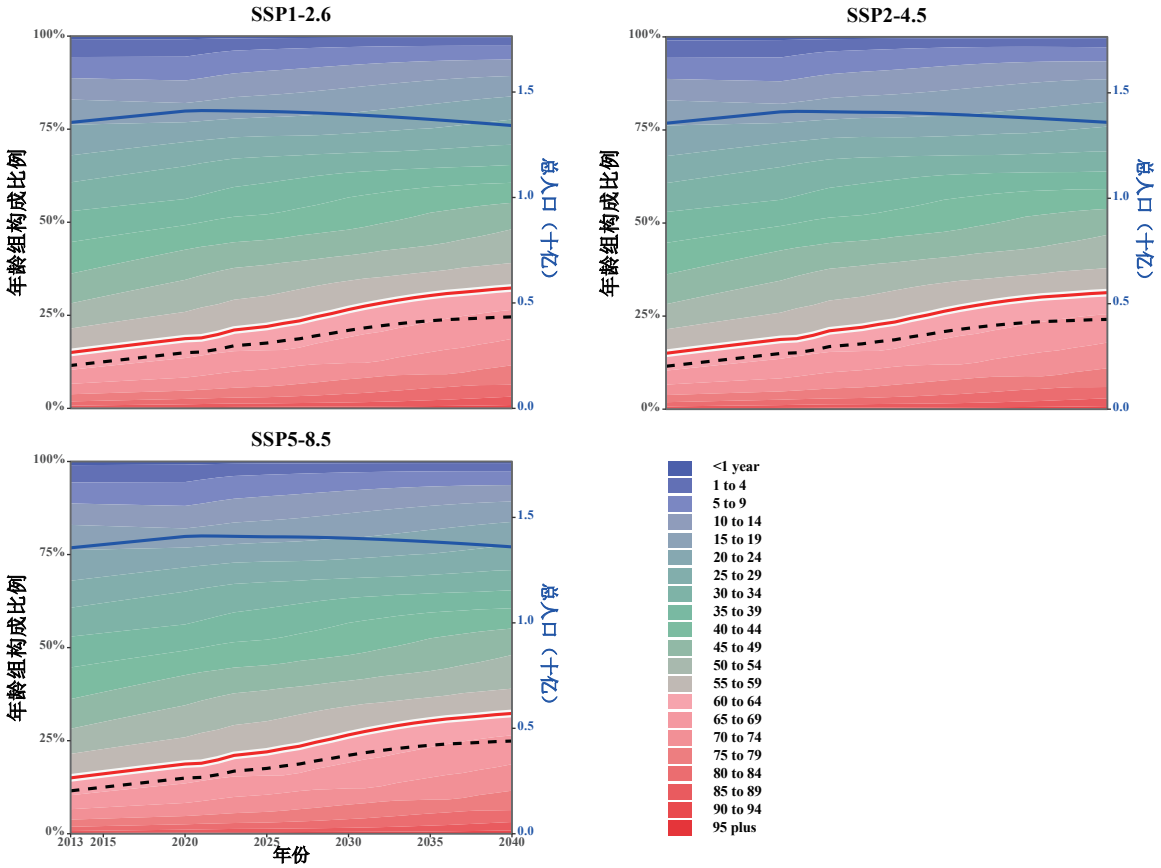
5.1 人口老龄化进程加快，老年人口规模和占比同步上升

2013—2040 年，我国人口老龄化程度持续加深，60 岁及以上人口规模和占比均呈持续上升趋势（图 5.1）。60 岁及以上人口占比由 2013 年的 15.0% 上升至 2025 年的 22.0%，提高 7.0 个百分点；到 2040 年，在低排放情景（SSP1-2.6）、中等排放情景（SSP2-4.5）和高排放情景（SSP5-8.5）下，该比例预计分别达到 32.3%、31.3% 和 32.3%，较 2013 年进一步提高 16.3—17.3 个百分点。

从人口规模看，60 岁及以上人口由 2013 年的 2.04 亿增加至 2025 年的 3.10 亿，增加 1.06 亿；到 2040 年，在低排放情景（SSP1-2.6）、中等排放情景（SSP2-4.5）和高排放情景（SSP5-8.5）下，该数量预计分别达到 4.34 亿、4.26 亿和 4.40 亿，较 2025 年进一步增加 1.16—1.30 亿。与此同时，0—14 岁和 15—59 岁人口占比整体下降，人口年龄结构持续向老龄化方向演变，高龄人口规模不断扩大。

图 5.1

2013—2040 年不同未来政策情景下我国人口规模及年龄结构变化



SSP1–2.6、SSP2–4.5 和 SSP5–8.5 分别表示低排放情景、中等排放情景和高排放情景。堆叠面积表示各年龄组人口构成比例，蓝色实线表示总人口规模，红色实线表示 60 岁及以上人口占比，黑色虚线表示 60 岁及以上人口规模。

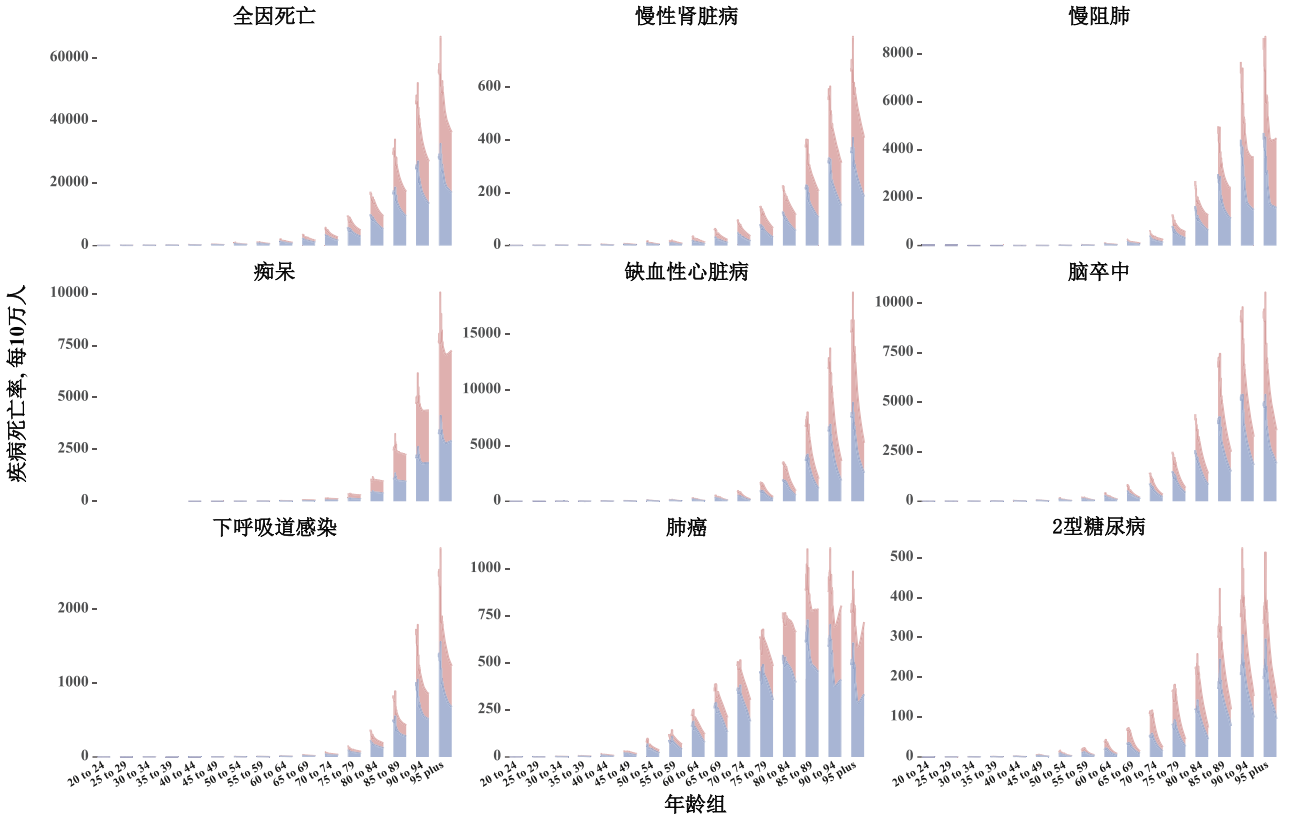
5.2 不同健康结局随年龄增长的死亡风险变化存在明显差异，痴呆受人口老龄化影响更为显著

分年龄、分性别基线死亡率分析显示（图5.2），不同健康结局的死亡率均呈现随年龄增长而上升的特征，但不同疾病随年龄增长的变化幅度存在明显差异，对人口老龄化的敏感程度并不一致。以60—64岁男性为参照，2025年男性全因死亡率在80—84岁约升至7.5倍，在95岁及以上约升至22倍，呈随年龄增长而持续上升的趋势。在各类健康结局中，痴呆的年龄梯度最为显著。同样以60—64岁为基准，男性痴呆死亡率在80—84岁约为33倍，在95岁及以上约为230倍，表现出明显的加速增长。相比之下，肺癌、慢性肾脏病和2型糖尿病虽也主要发生于60岁及以上人群，但其死亡率随年龄增长的相对增幅相对有限。

从长期变化趋势看，在相同年龄和性别人群中，不同疾病基线死亡率的变化趋势亦存在差异。全因死亡、缺血性心脏病等多数疾病总体呈下降趋势，而痴呆和肺癌等疾病在部分中高龄人群中的下降幅度较为有限，部分年龄组甚至呈现平台或波动趋势。这表明，随着人口老龄化持续加深，痴呆等老年性疾病的基线疾病负担仍将保持较高水平，即使空气质量持续改善，其健康收益也可能受到人口老龄化和疾病谱变化的影响而部分减弱。

图 5.2

2013–2040 年不同健康结局死亡率的变化趋势



每个年龄组内的红色和蓝色曲线分别表示女性和男性在2013–2040年间的年龄别死亡率变化轨迹。



我国实现空气污染健康影响减半目标的前景

06



作品名称：《请爱护环境吧》 作者：王章砚，武汉外国语学校美加分校

6.1 空气质量标准将大幅推进 WHO 减半目标实现进程

空气质量标准是我国大气污染防治的重要基石，为改善空气质量发挥了重要引领作用。2026 年 2 月，我国《环境空气质量标准》自 2012 年发布以来首次完成修订，进一步收严了 $PM_{2.5}$ 等主要污染物浓度限值，为推动 $PM_{2.5}$ 浓度持续下降、降低人群健康风险提供了新的政策引导。本研究定量评估了新修订的《环境空气质量标准》（GB 3095—2026）对实现 WHO 减半目标的推动作用。

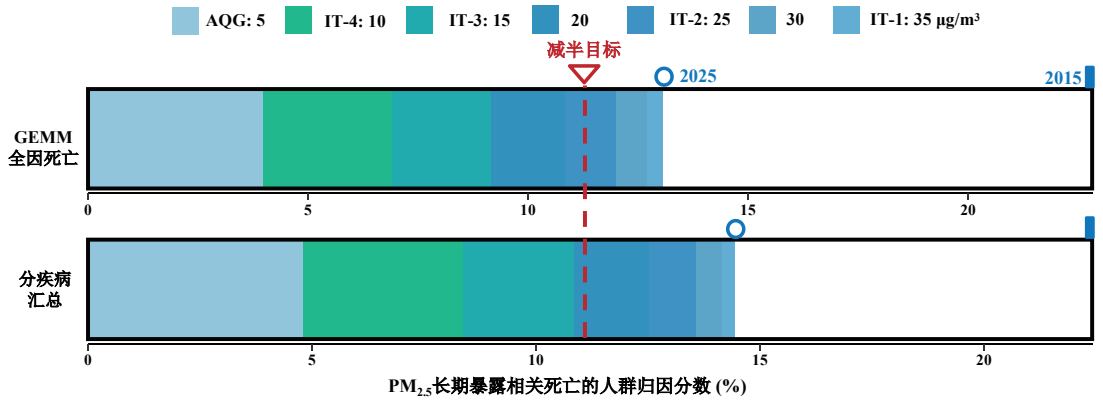
基于 2025 年最新数据，本研究分别设置 35 μg/m^3、30 μg/m^3、25 μg/m^3、20 μg/m^3、15 μg/m^3 和 10 μg/m^3 作为 $PM_{2.5}$ 年均浓度的参考限值，测算不同参考限值以上的 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关死亡的人群归因分数，并与 2015 年基线水平进行比较，以评估空气质量标准对实现 WHO 减半目标的直接贡献。

分病因汇总模型结果显示（图 6.1），2025 年真实情景下，我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关死亡的人群归因分数为 14.4%，较 2015 年下降 35.6%。若全国所有地区人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度进一步达到 35 μg/m^3、30 μg/m^3、25 μg/m^3、20μg/m^3、15 μg/m^3 和 10 μg/m^3，相应人群归因分数可分别进一步下降 0.3、0.9、1.9、3.6、6.1 和 9.6 个百分点。也就是说，超过新版标准 $PM_{2.5}$ 年均浓度二级限值（25 μg/m^3）的污染暴露如能全部避免，相应人群归因分数将较 2015 年累计下降 44.1%，相当于完成 WHO 减半目标进度的约 88%。进一步测算表明，如果 2025 年全国 $PM_{2.5}$ 暴露水平以等比例趋势下降，当人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度达到 23.7μg/m^3 时，预计相应人群归因分数将降至 2015 年的 50%，即实现 WHO 减半目标。

敏感性分析得到相似结果。2025 年真实情景下，我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关死亡的人群归因分数为 13.1%，较 2015 年下降 42.7%。若全国所有地区人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度进一步达到 35 μg/m^3、30 μg/m^3、25 μg/m^3、20μg/m^3、15 μg/m^3 和 10 μg/m^3，相应人群归因分数可分别进一步下降 0.4、1.1、2.2、3.9、6.2 和 9.1 个百分点。超过新版标准 $PM_{2.5}$ 年均浓度二级限值（25 μg/m^3）的污染暴露如能全部避免，相应人群归因分数将较 2015 年累计下降 52.5%，已达到 WHO 减半目标要求。

图 6.1

不同 $PM_{2.5}$ 年均浓度限值对 WHO 减半目标总体实现进程的影响



横向柱形条表示 2015 年基线情景下 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关人群归因分数；红色虚线表示在 2015 年基线基础上下降 50% 所对应的减半目标要求水平；蓝色空心圆表示 2025 年真实情景下的人群归因分数水平。不同颜色区段表示以不同年均浓度（35 μg/m^3、30 μg/m^3、25 μg/m^3、25 μg/m^3、20 μg/m^3、15 μg/m^3 和 10 μg/m^3）作为标准参考限值的情景下，2025 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露的人群归因分数。

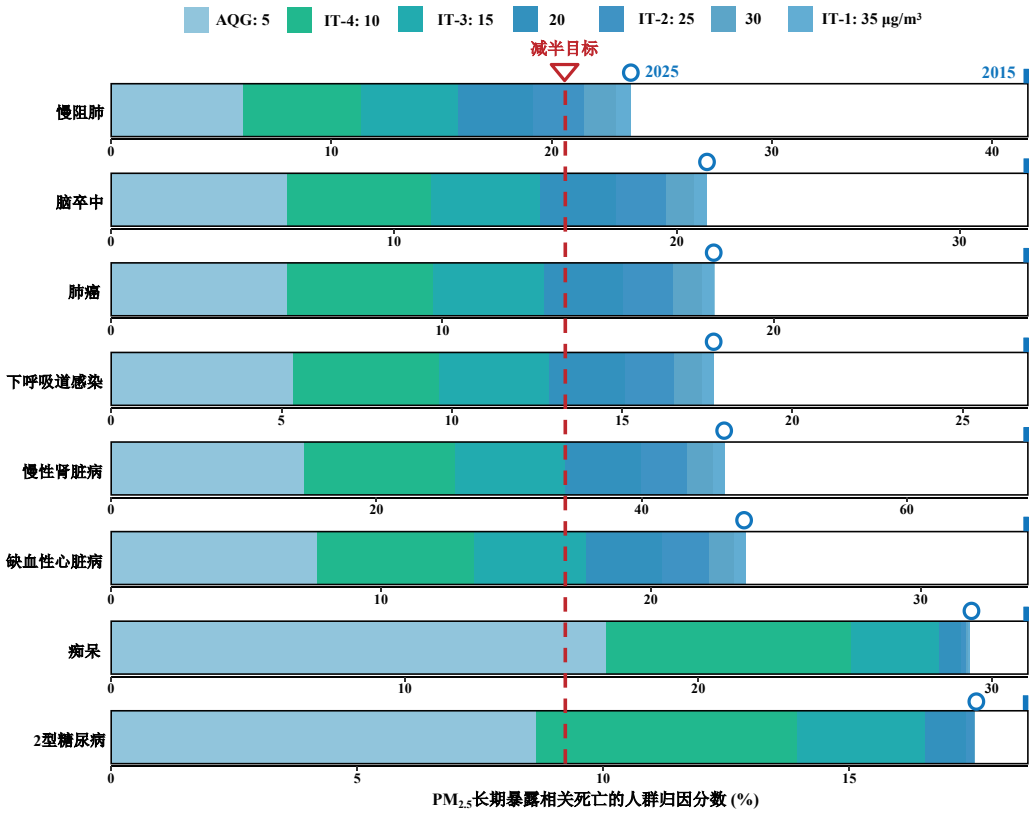
综合两种模型结果，考虑到计算方法存在一定不确定性，暂不考虑人口结构和基线死亡率变化的条件下，2025 年，超过新版标准 $PM_{2.5}$ 年均浓度二级限值（25 μg/m^3）的污染暴露仍是导致相关疾病负担的关键因素。如能全部避免，$PM_{2.5}$ 长期暴露相关死亡的人群归因分数较 2015 年的下降比例将基本接近或达到 WHO 减半目标。这表明，此轮空气质量标准修订将显著推进我国实现 WHO 减半目标的进程。

值得关注的是，不同健康结局从空气质量标准收严中获得的改善程度存在明显差异（图 6.2）。当全国所有地区人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度均达到 25 μg/m^3 时，慢性阻塞性肺疾病人群归因分数较 2015 年累计下降约 54.0%，已达到 WHO 减半目标要求；脑卒中、肺癌、下呼吸道感染、慢性肾脏病和缺血性心脏病分别下降约 44.9%、44.2%、43.9%、42.3% 和 39.9%，虽尚未达到减半要求，但均较 2025 年真实情景进一步接近目标水平。相比之下，痴呆和 2 型糖尿病的人群归因分数较 2015 年累计降幅分别仅为 7.3% 和 6.8%，提示仅依靠 $PM_{2.5}$ 年均浓度标准收严，仍不足以显著降低这两类疾病的空气污染归因风险，实现 WHO 减半目标仍面临较大挑战。

总体来看，新修订的《环境空气质量标准》（GB 3095—2026）的实施将进一步降低 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关健康风险，并显著推进我国实现 WHO 减半目标。然而，不同健康结局从空气质量标准修订中获得的健康收益并不一致，痴呆、2 型糖尿病等疾病的改善进程相对缓慢。

图 6.2

八种健康结局在不同 $PM_{2.5}$ 年均浓度限值情景下的 WHO 减半目标实现进程



其它标注同上图。

6.2 我国实现 WHO 减半目标需持续推进低碳发展

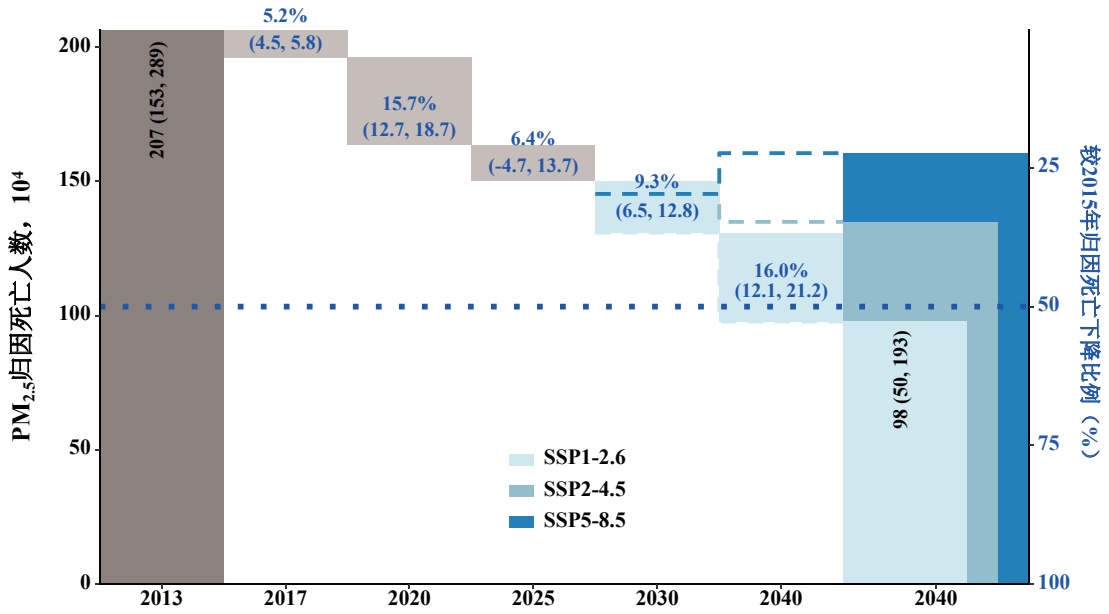
进一步结合未来不同政策情景下 $PM_{2.5}$ 暴露、人口规模、人口年龄性别结构及基线死亡率变化，本研究采用 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担评估我国实现 WHO 减半目标的前景。

结果显示，不同政策情景下我国实现减半目标的前景存在明显差异（图 6.3）。在低排放情景（SSP1-2.6）下，2040 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担预计降至 97.8 万 (95%CI: 50.2~192.9 万)，较 2015 年下降 52.7%，能够实现 WHO 减半目标；而在中等排放情景（SSP2-4.5）和高排放情景（SSP5-8.5）下，2040 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担分别为 135.0 万（95%CI: 70.6~260.3 万）和 160.5 万（95%CI: 84.2~302.0 万），较 2015 年分别下降 34.7% 和 22.4%，均未达到 WHO 减半目标。

敏感性分析进一步验证了上述结论（图 6.4）。虽然不同模型得到的归因疾病负担绝对值存在一定差异，但不同政策情景下对于目标能否实现的判断保持一致。在低排放情景（SSP1-2.6）下，2040 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担预计降至 80.5 万（95%CI: 58.4~107.5 万），较 2015 年下降 61.6%，能够实现减半目标；而在中等排放情景（SSP2-4.5）和高排放情景（SSP5-8.5）下，2040 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担分别为 118.1 万（95%CI: 85.3~156.3 万）和 144.5 万（95%CI: 103.5~193.6 万），较 2015 年分别下降 43.6% 和 31.0%，均未达到 WHO 减半目标。上述结果表明，持续推进低碳发展，是我国实现 WHO 减半目标的重要保障。

图 6.3

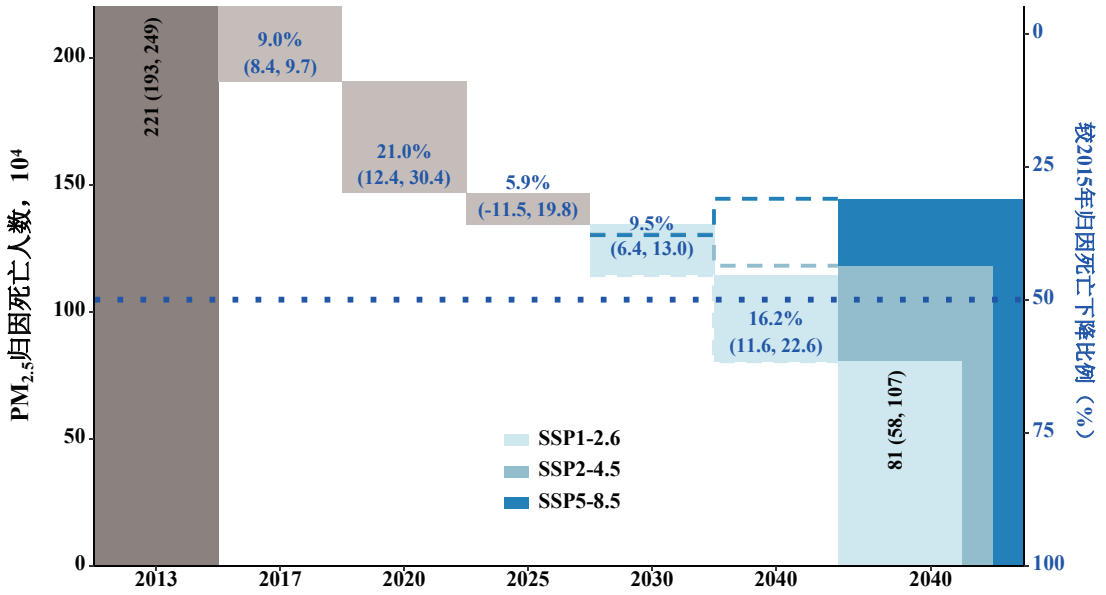
2013—2040 年我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关成人健康风险变化及 WHO 减半目标实现进程



柱形和阶梯状色块表示不同阶段成人归因疾病负担变化，蓝色虚线表示归因风险较 2015 年下降 50% 的目标线；浅蓝、中蓝和深蓝分别表示低排放情景（SSP1–2.6）、中等排放情景（SSP2–4.5）和高排放情景（SSP5–8.5）。

图 6.4

2013—2040 年我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关成人健康风险变化及 WHO 减半目标实现进程的敏感性分析：基于全球暴露死亡模型（GEMM）的重新测算



图注同上。

6.3 不同健康结局实现 WHO 减半目标的进程存在明显差异，痴呆和 2 型糖尿病改善相对滞后

研究显示，不同健康结局实现 WHO 减半目标的进程存在明显差异（图 6.5 和表 6.1）。按照不同政策情景下的目标实现情况，大致可分为三类。

第一类为在低排放情景和中等排放情景下均可实现 WHO 减半目标的健康结局，以脑卒中为代表。在低排放情景（SSP1-2.6）、中等排放情景（SSP2-4.5）和高排放情景（SSP5-8.5）下，2040 年脑卒中的 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担分别为 21.0 万、30.7 万和 37.2 万，较 2015 年分别下降 67.8%、52.9% 和 42.9%，其中低排放情景和中等排放情景均达到减半要求，高排放情景仍未达到减半要求。

第二类为仅在低排放情景下能够实现 WHO 减半目标的健康结局，包括慢性肾脏病、慢性阻塞性肺疾病和缺血性心脏病。在低排放情景下，上述三类疾病 2040 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担分别为 4.2 万、15.0 万和 20.5 万，较 2015 年分别下降 56.7%、60.9% 和 64.0%，均达到减半要求；而中等排放情景和高排放情景下降幅度明显减小，均未达到减半要求。这表明，这类疾病健康收益的持续释放高度依赖未来 $PM_{2.5}$ 暴露浓度水平进一步下降。

第三类为即使在低排放情景下仍难以实现 WHO 减半目标的健康结局，包括肺癌、下呼吸道感染、2 型糖尿病和痴呆。其中，肺癌和下呼吸道感染在低排放情景下接近减半目标，2040 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担较 2015 年分别下降 49.8% 和 47.0%；2 型糖尿病下降 37.3%，仍有一定改善空间。值得注意的是，痴呆的成人疾

病负担不仅未下降，反而有上升趋势：在低排放情景、中等排放情景和高排放情景下，2040 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担分别为 24.9 万、28.4 万和 31.1 万，较 2015 年增加 92.4%、119.9% 和 140.8%。结合人口老龄化分析结果可以看出，痴呆等疾病主要发生于高龄人群，人口老龄化带来的基线疾病负担持续增加，在一定程度上抵消了空气质量改善带来的健康收益。因此，仅依靠降低 $PM_{2.5}$ 暴露水平，难以实现痴呆疾病负担的大幅下降。

总体而言，$PM_{2.5}$ 长期暴露相关成人健康风险的未来变化具有明显的疾病异质性。对于痴呆、2 型糖尿病、下呼吸道感染和肺癌等需重点关注的健康结局，未来可作为推进大气污染治理政策与慢性病防治、老年健康服务等公共卫生政策协同治理重点方向。

表 6.1

2040 年不同健康结局 $PM_{2.5}$ 暴露相关疾病负担相对于 2015 年的变化比例

健康结局	高排放情景 (SSP5-8.5)	中等排放情景 (SSP2-4.5)	低排放情景 (SSP1-2.6)
脑卒中	-42.9%	-52.9%	-67.8%
慢性肾脏病	-25.2%	-37.5%	-56.7%
慢性阻塞性肺疾病	-24.6%	-40.1%	-60.9%
缺血性心脏病	-38.8%	-49.1%	-64.0%
肺癌	-10.3%	-25.1%	-49.8%
痴呆	+140.8%	+119.9%	+92.4%
下呼吸道感染	-6.6%	-23.5%	-47.0%
2 型糖尿病	-16.1%	-22.7%	-37.3%

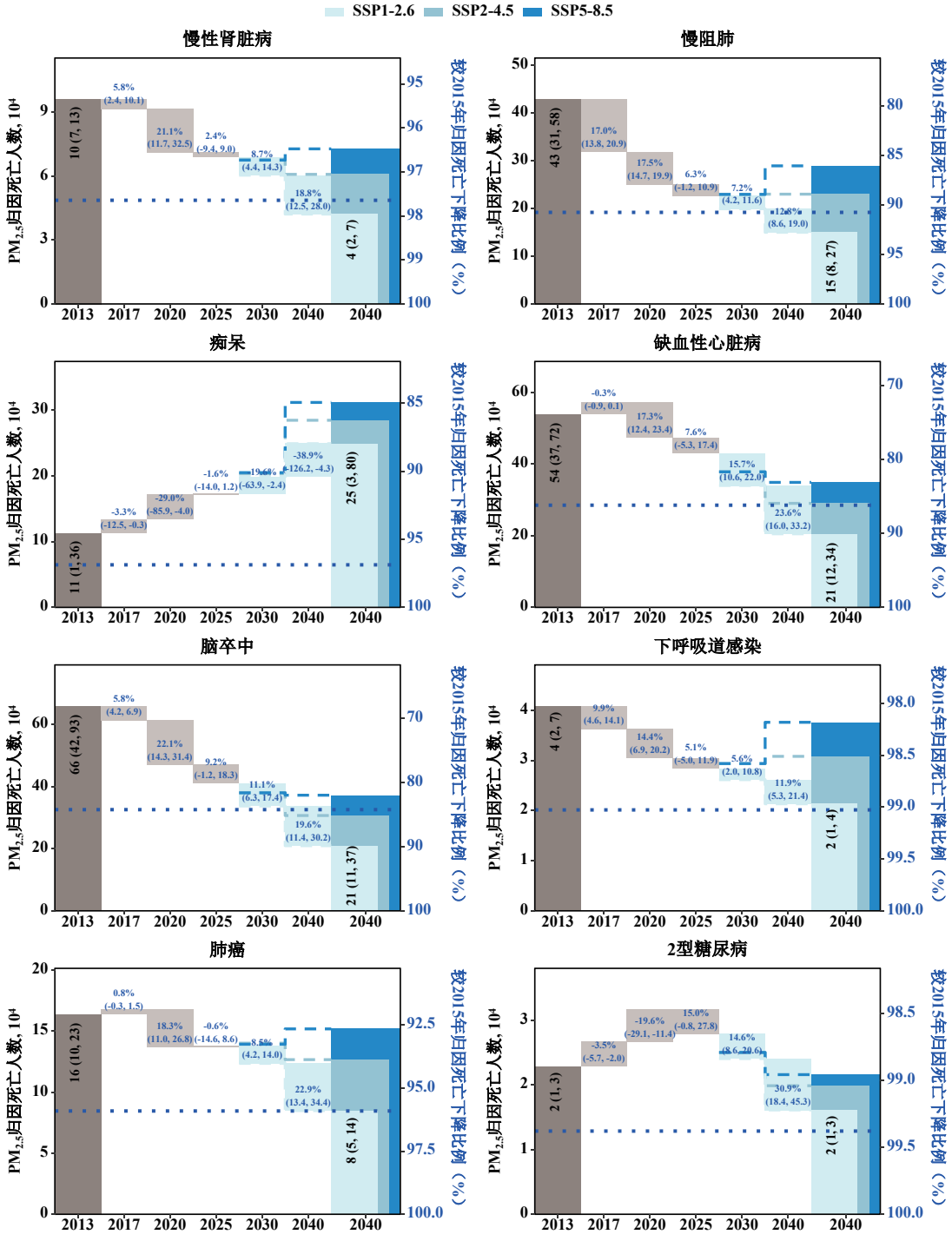
表中数值表示 2040 年 $PM_{2.5}$ 归因疾病负担相对于 2015 年的变化比例；负值表示下降，正值表示增加。变化比例≤ –50% 表示达到 WHO 减半目标。



2025 年国际清洁空气蓝天日“健康生活 · 畅快呼吸”科普活动现场。图源：亚洲清洁空气中心

图 6.5

2013—2040 年我国八种健康结局对应的 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关成人健康风险变化及 WHO 减半目标实现进程



柱形和阶梯状色块表示不同阶段分病因归因疾病负担变化，蓝色虚线表示归因风险较 2015 年下降 50% 的目标线；浅蓝、中蓝和深蓝分别表示低排放情景（SSP1–2.6）、中等排放情景（SSP2–4.5）和高排放情景（SSP5–8.5）。





$PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担变化的驱动因素分解

07

作品名称：《居室常开窗》 作者：张严予，重庆市沙坪坝区杨公桥小学

为进一步识别 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担变化的主要驱动因素，本研究将 2013—2025 年历史时期及 2025—2040 年未来时期的归因疾病负担的变化分解为 $PM_{2.5}$ 暴露变化、人口规模变化、年龄性别结构变化和基线死亡率变化四个因素，分析不同因素对归因疾病负担变化的相对贡献。总体来看，$PM_{2.5}$ 暴露下降是推动成人归因疾病负担下降的主要因素，而人口老龄化则是推动成人归因疾病负担增加的主要因素。对于不同健康结局，未来疾病负担能否持续下降，取决于 $PM_{2.5}$ 浓度持续改善和基线死亡率下降能否抵消人口老龄化带来的疾病负担上升压力。

7.1 $PM_{2.5}$ 暴露水平下降是健康收益的主要来源，未来需依靠低碳发展抵消人口老龄化影响

2013—2025 年，我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担由 206.5 万下降至 150.3 万，累计减少 56.2 万。驱动因素分解结果显示，$PM_{2.5}$ 暴露水平下降是归因疾病负担减少的首要驱动因素，共减少 86.6 万；基线死亡率变化进一步减少 56.5 万。与此同时，人口老龄化导致归因疾病负担增加 81.0 万，人口规模变化增加 5.8 万。总体来看，过去十余年空气质量持续改善和疾病防控水平提升产生的健康收益，超过了人口老龄化带来的负担增加，使我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因疾病负担持续下降。

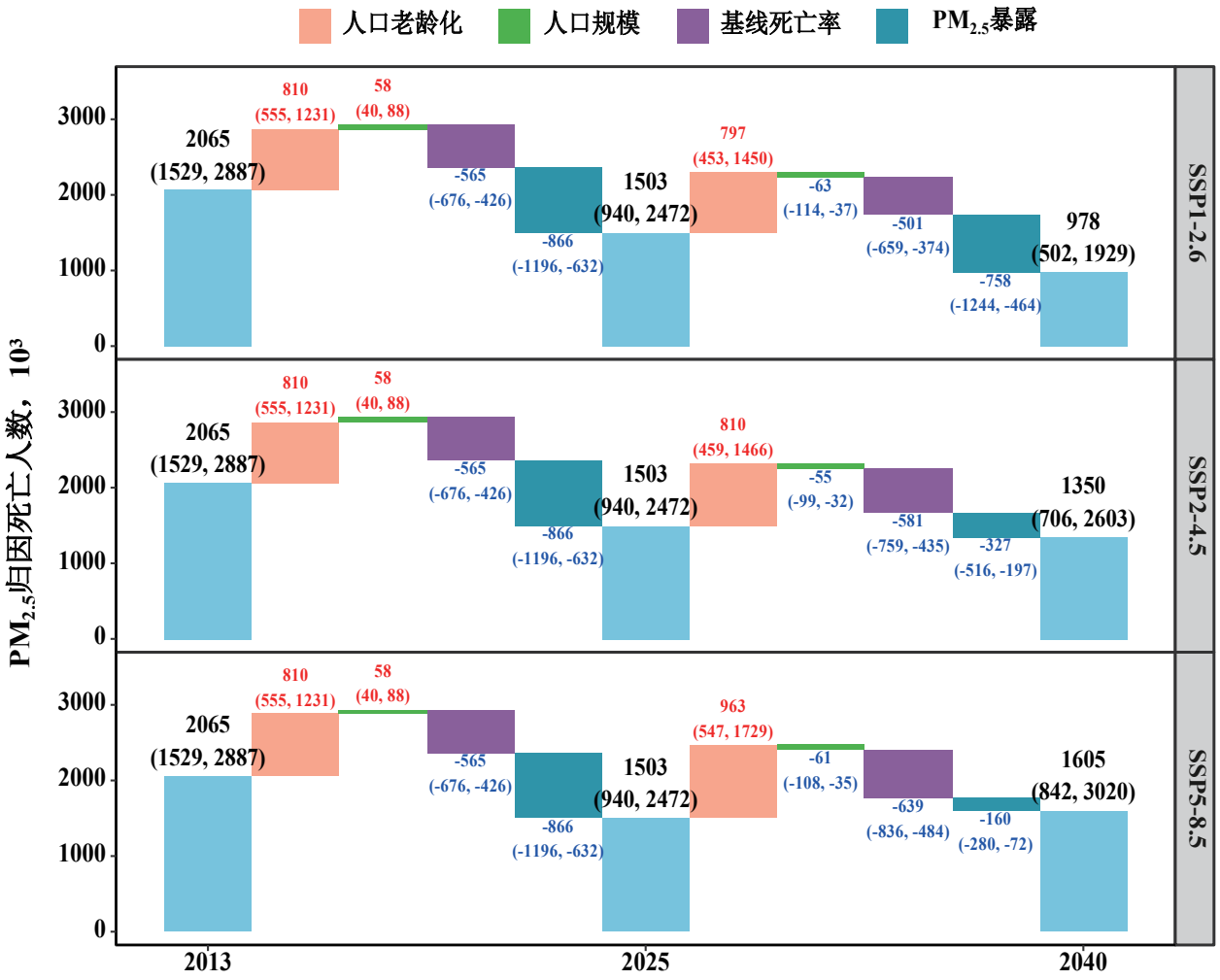
2025—2040 年，未来不同政策情景下我国归因疾病负担的驱动因素贡献呈现明显分化（图 7.1）。在低排放情景（SSP1-2.6）下，2040 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担预计降至 97.8 万，较 2025 年净减少 52.5 万。其中，$PM_{2.5}$ 暴露水平下降减少 75.8 万，基线死亡率变化减少 50.1 万，二者基本抵消了人口老龄化增加 79.7 万带来的影响。在中等排放情景（SSP2-4.5）下，2040 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人负担为 135.0 万，较 2025 年仅减少 15.3 万，下降幅度明显收窄。在高排放情景（SSP5-8.5）下，2040 年 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人负担升至 160.5 万，较 2025 年增加 10.2 万；此时 $PM_{2.5}$ 暴露水平下降仅减少 16.0 万，已不足以抵消人口老龄化带来的 96.3 万负担增长。

上述结果表明，人口老龄化并不会改变空气质量改善带来健康收益的方向，但会显著影响削弱健康收益对于归因疾病负担持续下降的贡献程度。未来只有持续推进低碳转型，才能保持足够的空气质量改善幅度，抵消人口老龄化带来的健康负担增长，实现归因疾病负担持续下降。

敏感性分析进一步支持上述结论（图 7.2）。结果显示，2013—2025 年，我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因全因死亡负担累计减少 86.2 万，主要由 $PM_{2.5}$ 暴露下降驱动；同期人口老龄化仍表现为重要的负担增加因素。2025—2040 年，低排放情景下 $PM_{2.5}$ 暴露改善和基线死亡率下降能够抵消老龄化压力，使归因疾病负担继续下降；而在中等排放情景和高排放情景下，$PM_{2.5}$ 暴露改善贡献明显缩小，难以充分抵消人口老龄化带来的负担增加。总体而言，基于分病因汇总模型的评估结果与敏感性分析结果一致，进一步验证了 $PM_{2.5}$ 暴露水平下降是降低成人归因疾病负担的核心动力，而人口老龄化是影响未来健康收益释放的关键制约因素。

图 7.1

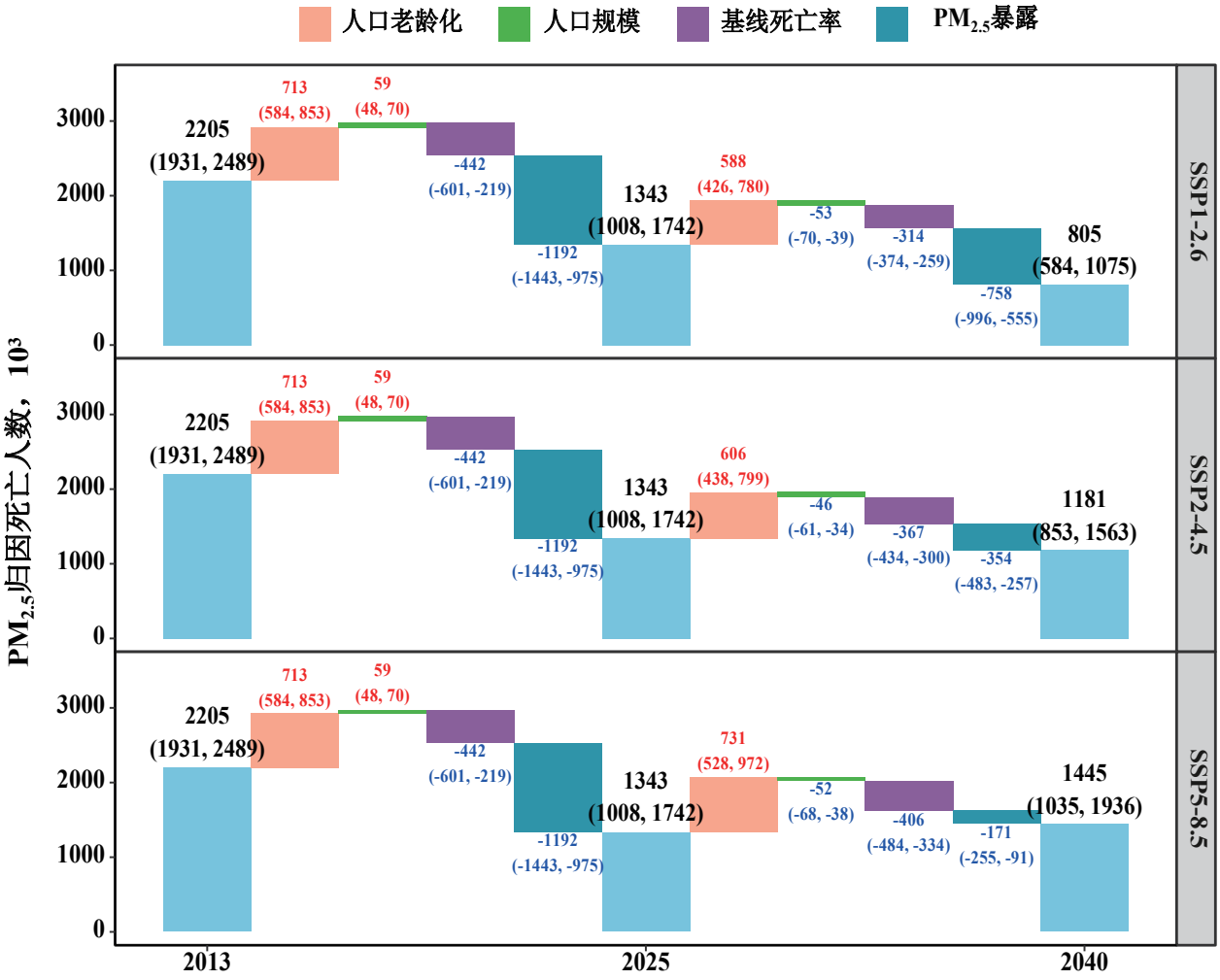
2013—2040 年我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担变化的驱动因素分解



图中展示 2013—2025 年历史时期以及 2025—2040 年不同政策情景下，基于分病因暴露 – 反应关系加总得到的成人归因疾病负担变化及其驱动因素分解结果。柱形表示不同时间点或情景下 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关成人归因疾病负担，分解色块表示人口老龄化、人口规模变化、分病因基线死亡率变化和 $PM_{2.5}$ 暴露变化对归因疾病负担变化的贡献。

图 7.2

2013—2040 年我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担变化的驱动因素分解的敏感性分析：基于全球暴露死亡模型（GEMM）的重新测算



图注同上。

7.2 不同健康结局归因疾病负担变化的驱动因素存在明显差异，人口老龄化对痴呆和2型糖尿病的影响更为突出

分病因驱动因素分解结果显示，人口老龄化对所有健康结局均表现为增加疾病负担的因素，但不同疾病受到 $PM_{2.5}$ 暴露水平下降、基线死亡率变化和人口老龄化的综合影响程度不同，因此未来健康收益的改善情况存在明显差异。

第一类为健康收益持续释放、归因疾病负担下降较为稳健的健康结局，以脑卒中为代表。2013—2025 年，脑卒中归因疾病负担由 66.0 万下降至 41.0 万，净减少 25.0 万。其中，$PM_{2.5}$ 暴露水平下降使其减少 27.7 万，基线死亡率变化减少 22.6 万，二者共同抵消了人口老龄化增加 23.5 万和人口规模变化增加 1.7 万的影响。2025—2040 年，脑卒中归因疾病负担在三种政策情景下均继续下降：低排放情景、中等排放情景和高排放情景对应的 2040 年归因疾病负担分别为 21.0 万、30.7 万和 37.2 万，说明暴露改善和基线死亡率下降共同推动其负担持续降低。

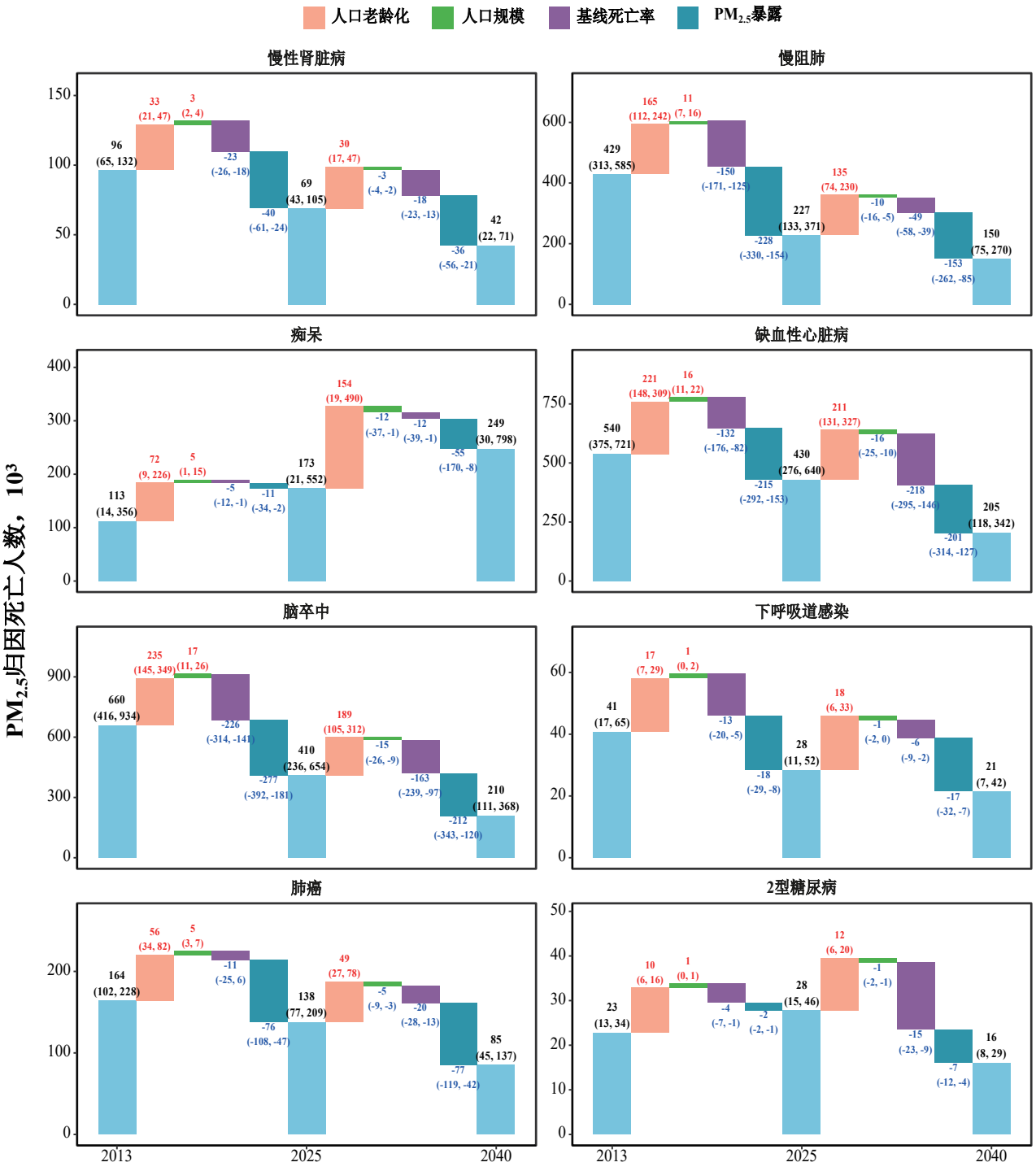
第二类为未来健康收益高度依赖持续减排的健康结局，包括慢性阻塞性肺疾病、缺血性心脏病、慢性肾脏病和肺癌。这类疾病在 2013—2025 年均受益于 $PM_{2.5}$ 暴露下降，实现了较大幅度的疾病负担下降；但未来随着人口老龄化持续加剧，到 2040 年，仅在低排放情景下，$PM_{2.5}$ 暴露持续改善及基线死亡率下降能够继续抵消老龄化带来的负担增长；在中等排放情景和高排放情景下，$PM_{2.5}$ 暴露改善幅度明显减弱，疾病负担下降趋势明显放缓，部分健康结局甚至出现回升风险。以慢性阻塞性肺疾病为例，2013—2025 年其归因疾病负担由 42.9 万下降至 22.7 万，净减少 20.2 万；其中 $PM_{2.5}$ 暴露水平下降减少 22.8 万，基线死亡率变化减少 15.0 万，抵消了人口老龄化增加 16.5 万和人口规模增加 1.1 万的影响。到 2040 年，低排放情景下慢性阻塞性肺疾病归因疾病负担进一步降至 15.0 万，但在中等排放情景和高排放情景下分别升至 23.0 万和 28.9 万。

第三类为人口老龄化影响尤为突出的健康结局，包括痴呆、2 型糖尿病和下呼吸道感染。2013—2025 年，痴呆归因疾病负担由 11.3 万增加至 17.3 万（净增加 6.0 万），其中人口老龄化增加 7.2 万，人口规模增加 0.5 万，而 $PM_{2.5}$ 暴露水平下降和基线死亡率变化分别仅减少 1.1 万和 0.5 万；2 型糖尿病归因疾病负担由 2.3 万升至 2.8 万（净增加 0.5 万），其中人口老龄化增加 1.0 万，人口规模增加 0.1 万，而基线死亡率变化和 $PM_{2.5}$ 暴露水平下降分别减少 0.4 万和 0.2 万。预计未来这一趋势仍将持续。在低排放情景下，2025—2040 年，人口老龄化预计将新增 15.4 万例痴呆归因死亡，而 $PM_{2.5}$ 暴露改善仅减少 5.5 万例，难以抵消人口老龄化带来的影响，三种排放情景下痴呆归因疾病负担均继续上升。2 型糖尿病归因疾病负担在低排放情景下到 2040 年预计降至 1.6 万，但在中等排放情景和高排放情景下分别下降至 2.0 万和 2.2 万，下降幅度明显收窄。此外，对于下呼吸道感染，2013—2025 年，其归因疾病负担由 4.1 万降至 2.8 万；在低排放情景下，2040 年预计进一步降至 2.1 万，其中 $PM_{2.5}$ 暴露改善减少 1.7 万、基线死亡率变化减少 0.6 万，与人口老龄化增加 1.8 万相互抵消，负担下降幅度受到限制。

总体来看，$PM_{2.5}$ 暴露水平下降仍是减少成人归因疾病负担的核心动力，但人口老龄化正在改变健康收益的转化效率。对于脑卒中，$PM_{2.5}$ 暴露改善和基线死亡率下降能够持续释放健康收益；对于慢性阻塞性肺疾病、缺血性心脏病、慢性肾脏病和肺癌，低碳发展是保持健康收益的关键；而对于痴呆、2 型糖尿病和下呼吸道感染，$PM_{2.5}$ 暴露水平下降带来的健康收益更容易被人口老龄化和基线疾病风险变化抵消。

图 7.3

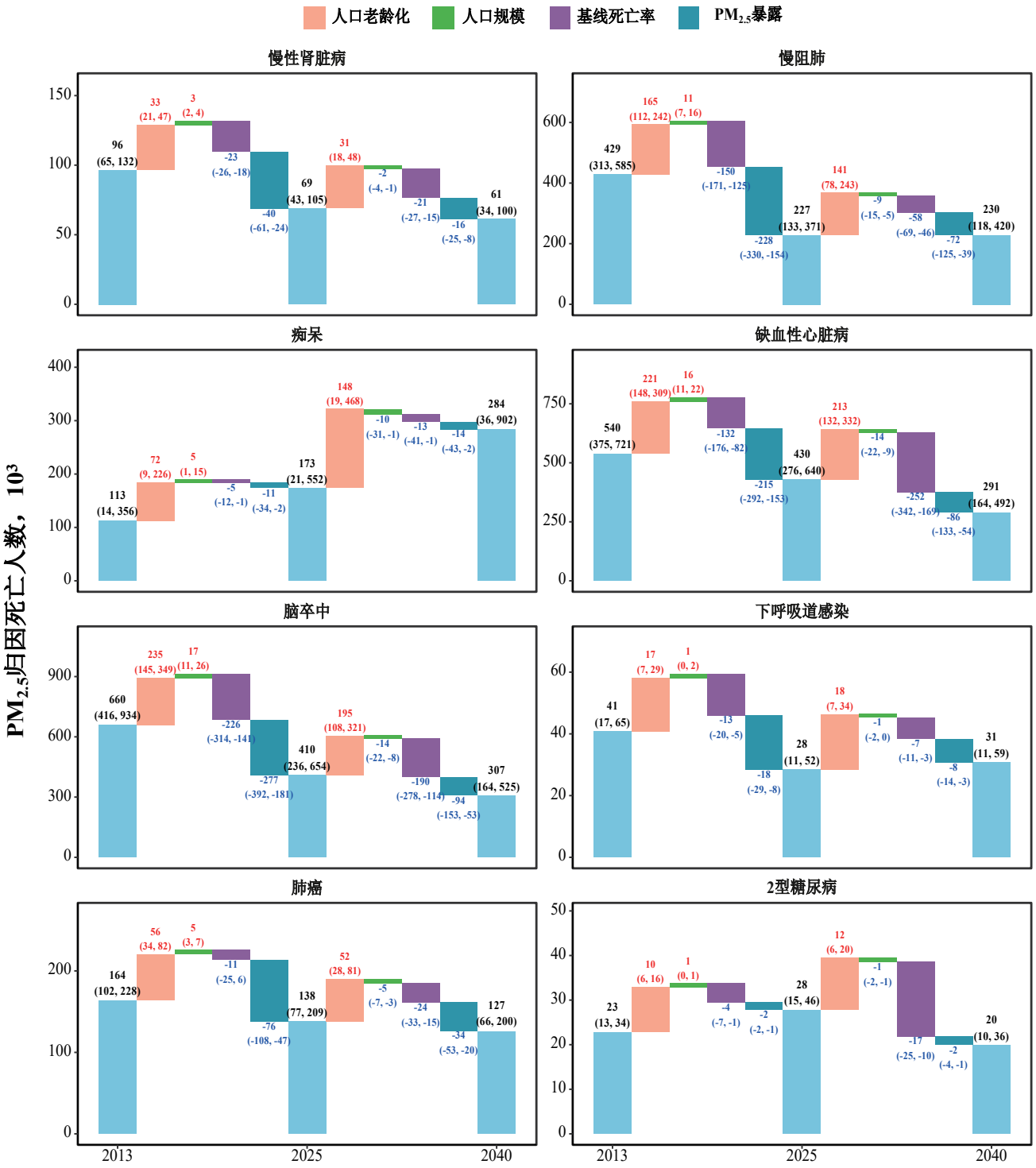
低排放情景（SSP1–2.6）下，2013—2040 年分病因 $PM_{2.5}$ 暴露相关健康风险变化的驱动因素分解



图中展示 2013—2025 年历史时期以及 2025—2040 年未来时期全因归因疾病负担变化的分解结果。柱形表示不同时间点 $PM_{2.5}$ 归因疾病负担，分解色块表示人口老龄化、人口规模变化、分病因基线死亡率变化和 $PM_{2.5}$ 暴露变化对归因疾病负担变化的贡献。

图 7.4

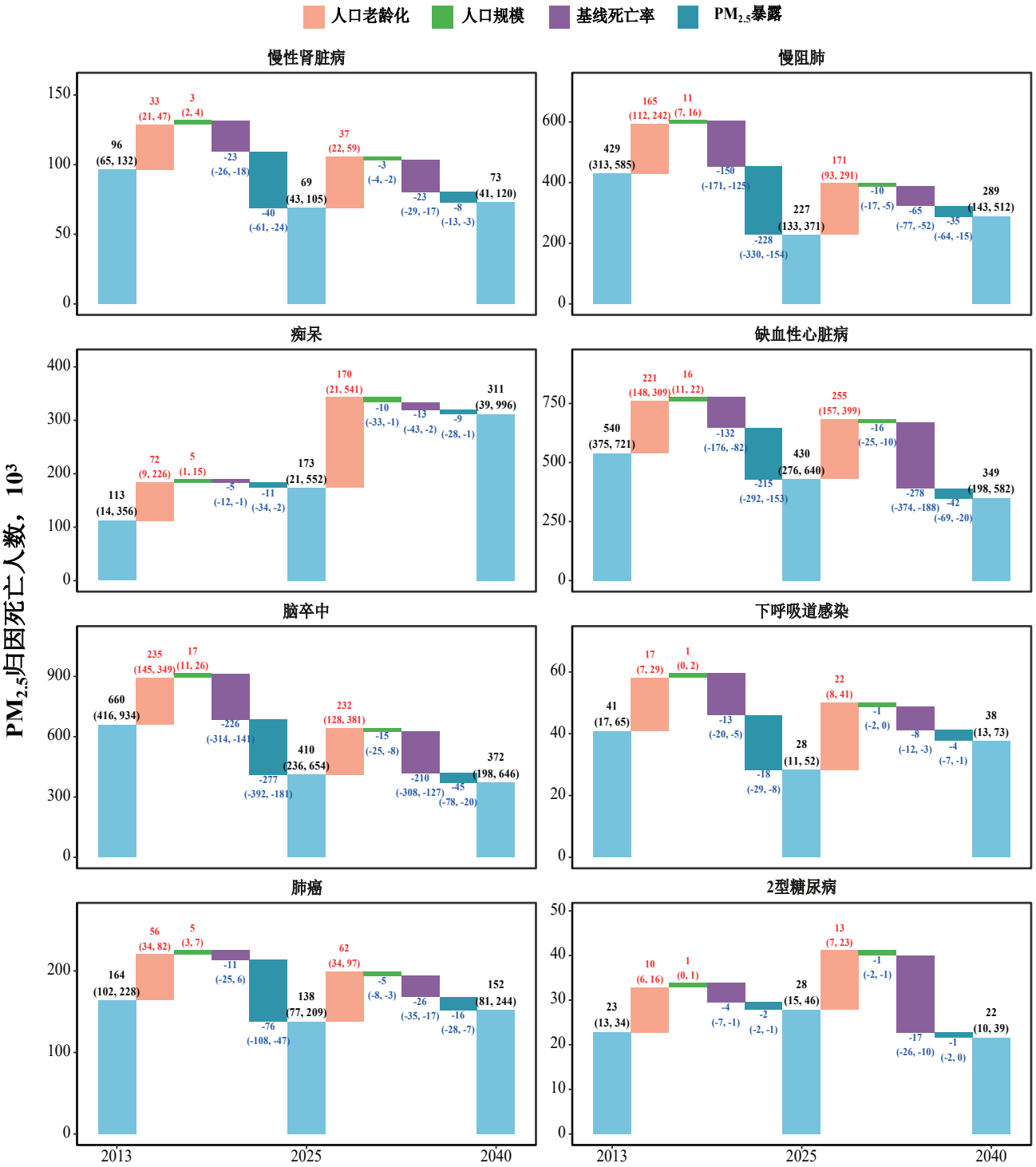
中等排放情景（SSP2–4.5）下，2013—2040 年分病因 $PM_{2.5}$ 暴露相关健康风险变化的驱动因素分解



图注同上。

图 7.5

高排放情景（SSP5–8.5）下，2013—2040 年分病因 $PM_{2.5}$ 暴露相关健康风险变化的驱动因素分解



图注同上。

结论与建议

08



作品名称：《绿水青山就是金山银山》 作者：华朱一奕，浙江省南浔锦绣实验学校

本报告延续《中国空气质量改善的健康效应评估》系列研究的评估思路，在 WHO 空气污染健康影响减半目标框架下，系统评估了我国 $PM_{2.5}$ 暴露相关成人健康风险的历史变化、未来趋势及其驱动因素。研究结果表明，过去十余年我国持续实施清洁空气行动，大幅降低了 $PM_{2.5}$ 暴露水平，显著减少了空气污染相关健康风险，为实现 WHO 减半目标奠定了重要基础。同时，随着 $PM_{2.5}$ 浓度进入持续改善的新阶段，人口老龄化和疾病谱变化正成为影响空气质量改善健康效益的重要因素。未来，持续释放空气质量改善带来的健康收益，不仅需要进一步推动 $PM_{2.5}$ 深度治理和减污降碳协同，还需要更加注重空气污染防治与积极应对人口老龄化、慢性病防控和易感人群健康保护之间的统筹衔接，推动空气质量管理由“浓度达标导向”逐步向“健康效益驱动”转变。

1. 我国空气质量持续改善取得显著健康收益，但未来健康收益提升面临人口老龄化新挑战

研究结果显示，2013 年以来，伴随三阶段清洁空气行动持续实施，全国人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度由 64.4 μg/m^3 下降至 27.4 μg/m^3，累计下降 57.4%；$PM_{2.5}$ 长期暴露归因成人疾病负担由 206.5 万下降至 150.3 万，累计下降 27.2%，表明持续改善空气质量已带来显著公共健康收益。

与此同时，随着 $PM_{2.5}$ 浓度不断降低，空气质量改善进入深水区，进一步降低人群污染暴露水平的难度不断增加；人口老龄化加速和疾病谱变化正在改变空气污染相关健康风险结构，逐步削弱空气质量改善带来的健康收益。尤其是痴呆和 2 型糖尿病等老龄化敏感疾病，其归因疾病负担改善明显慢于其他健康结局，提示未来健康收益提升将更多受到人口结构变化的影响。

总体来看，我国空气污染防治已进入由“降低污染浓度”向“持续提升健康收益”转变的新阶段，在继续推进空气质量改善的同时，更需要统筹考虑人口老龄化背景下健康风险的新变化。

2. 新版空气质量标准将大幅推进 WHO 减半目标的实现，但实现长期健康收益仍需综合施策

WHO 提出到 2040 年将空气污染导致死亡的人群归因分数较 2015 年降低 50% 的目标，为全球空气污染治理提供了新的健康评价目标。本研究首次定量评估了我国新版《环境空气质量标准》（GB 3095—2026）对实现 WHO 减半目标的促进作用。结果表明，2025 年，超过新版标准 $PM_{2.5}$ 年均浓度二级限值（25 μg/m^3）的污染暴露仍是导致相关疾病负担的关键因素。研究发现，如能全部避免，$PM_{2.5}$ 长期暴露相关死亡的人群归因分数将较 2015 年累计下降 44.1%，相当于完成 WHO 减半目标进度的约 88%。进一步测算显示，如果 2025 年全国 $PM_{2.5}$ 暴露水平以等比例趋势下降，当人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度达到 23.7μg/m^3 时，预计相应人群归因分数将降至 2015 年的 50%，即实现 WHO 减半目标。这表明，此次标准修订不仅将进一步改善空气质量，也将显著提升我国空气污染健康风险控制水平，为我国实现 WHO 减半目标提供重要支撑。

但进一步分析表明，WHO 提出的减半目标基于人群归因分数（PAF），而真实人群健康收益还受到人口规模、人口老龄化和疾病基线风险等因素共同影响。即使 $PM_{2.5}$ 浓度达到新版标准，部分健康结局的归因疾病负担改善仍可能受到人口老龄化等因素制约。例如，慢性阻塞性肺疾病已实现 WHO 减半目标，而痴呆和 2 型糖尿病等受人口老龄化影响较为显著的疾病改善进展明显滞后。这说明，未来实现空气污染健康风险持续下降，需要

在持续改善空气质量的同时，加强重点疾病防控和重点人群健康保护，实现环境治理与公共卫生协同推进。

3. 低碳发展是实现 WHO 减半目标和持续释放健康收益的关键保障

未来情景预测结果显示，经过持续努力，我国实现 WHO 减半目标具有可行性，但高度依赖未来空气污染治理力度、气候变化政策强度以及社会经济发展路径。仅在低排放情景下，我国 $PM_{2.5}$ 长期暴露相关成人归因疾病负担到 2040 年有望较 2015 年下降 50% 以上，实现 WHO 减半目标；中等排放情景和高排放情景均无法达到目标要求。这表明，减半目标的实现需要强有力的空气污染防治政策与气候变化减缓政策协同推进。

驱动因素分解进一步表明，$PM_{2.5}$ 暴露水平下降始终是降低健康风险的决定性因素，而人口老龄化将在未来持续推高疾病负担。只有在低排放情景下，污染暴露持续下降和基线死亡率改善带来的健康收益，才能有效抵消人口老龄化带来的负担增加；若未来空气质量改善速度放缓，则健康收益释放将明显减弱，甚至可能导致部分疾病负担（如痴呆）重新上升。

这一结果进一步说明，持续推进空气污染治理与绿色低碳发展，不仅是改善环境质量、应对气候变化的重要途径，也是应对人口老龄化背景下健康风险增长的重要公共卫生策略。下一阶段应继续推进能源、工业、交通、居民生活源和农业等重点领域减排，深化减污降碳协同，减少结构性污染来源，防止 $PM_{2.5}$ 浓度在低位平台期出现反弹[31, 32]。在传统末端治理空间逐步收窄、单位减排成本上升的背景下，应进一步通过能源结构调整、产业结构优化和低碳转型持续释放空气质量改善潜力。

综上所述，建议如下：

1. 完善空气质量改善的健康效应评估方法体系，提高健康风险评估的科学支撑能力

随着我国空气质量持续改善，空气质量改善的健康效应评估应由总体健康效益评价进一步向重点疾病、重点人群和未来健康风险预测拓展，不断完善健康效应评估的方法体系。

建议持续优化空气污染健康效应评估技术方法，在常规空气质量监测和总体疾病负担评估基础上，加强分病因、分人群、分区域的健康风险评估，进一步完善空气污染长期健康影响、未来情景预测和驱动因素分析等技术方法，持续跟踪心脑血管疾病、慢性阻塞性肺疾病、肺癌、慢性肾脏病、2 型糖尿病、痴呆和下呼吸道感染等重点健康结局的变化特征，不断提高空气质量改善健康效应评估的科学性和精细化水平，为大气污染治理、公共卫生决策和重点人群保护提供更加坚实的科学支撑。

2. 充分发挥新版空气质量标准的健康引领作用，持续深化减污降碳协同治理，为我国实现 WHO 减半目标奠定坚实基础

本研究表明，我国能否实现 WHO 减半目标，高度依赖未来减排力度与低碳转型进程。同时，新版《环境空气质量标准》（GB 3095—2026）实施，为我国空气质量持续改善和健康风险持续降低提供了新动力。

下一阶段，建议以新版标准分阶段实施为契机，坚持以保护公众健康为导向，持续推进 $PM_{2.5}$ 深度治理。近期应以实现 30 μg/m^3 过渡阶段限值为重点，巩固 " 十四五 " 时期空气质量改善成效，防止 $PM_{2.5}$ 浓度在低位平台期出现反弹；中长期应以全面达到 25 μg/m^3 二级限值为牵引，进一步强化重

点区域和重点行业污染减排，加快能源结构调整、产业结构优化和交通运输绿色转型，持续深化减污降碳协同治理，推动污染物与温室气体协同减排，不断降低人群 $PM_{2.5}$ 暴露水平，为实现 WHO 减半目标和持续释放空气质量改善健康效益提供长期保障。同时，加强新版标准实施效果评估，推动新版标准尽快转化为实际健康收益，并为标准持续优化升级提供科学依据。

3. 加强大气污染防治与积极应对人口老龄化相关政策的衔接，提高重点疾病和重点人群健康保护水平

人口老龄化将成为未来影响空气污染健康收益的重要因素。建议推动空气质量改善与老年健康服务和重点慢病管理等政策的衔接协同，加强空气污染健康风险与慢性病综合防控协同研究，重点关注老年人群以及痴呆、2 型糖尿病等老龄化敏感疾病，完善重点人群健康防护措施，提高空气质量改善带来的健康收益。

对于老年人以及心脑血管、呼吸系统等慢性疾病患者等易感人群，应加强重污染天气健康预警、个体防护指导、基层随访管理和长期健康风险沟通。对于痴呆、2 型糖尿病、慢性肾脏病和下呼吸道感染等改善进展较慢的健康结局，应将空气污染暴露纳入重点疾病风险管理和老年健康促进框架，推动环境健康干预与认知功能保护、代谢风险控制、肾脏疾病管理和感染防控等措施协同推进 [22, 33]。

4. 推动建立以保护公众健康为导向的空气质量管理体系，加强空气污染与健康治理领域国际合作

空气质量改善的最终目标是保护公众健康。空气质量管理的根本目的是降低人群健康风险、最大化空气质量改善带来的健康效益。以保护公众健康为导向，并非简单地在现有空气质量管理体系中增加健康评价指标，而是将健康风险识别结果进一步反馈到大气污染治理和公共卫生干预全过程，推动空气质量管理由“浓度达标导向”逐步向“健康效益驱动”转变，促进清洁空气行动持续转化为更加长期、稳定和公平的健康收益，为美丽中国建设、健康中国建设和全面实现 WHO 减半目标提供更加科学的决策支撑。

建议进一步完善空气质量监测和评价体系，加强环境监测、人口结构、疾病负担和医疗卫生等数据共享，在污染物浓度监测基础上叠加人口暴露信息，持续评估人口加权平均 $PM_{2.5}$ 暴露浓度、超标暴露人口比例及区域暴露差异等指标，并将 $PM_{2.5}$ 暴露相关健康风险、重点疾病结局和易感人群纳入空气质量改善成效评价。重点识别空气污染浓度较高且人口相对集中的重点区域，关注健康收益转化不足的重点人群，将其作为优先治理和精准施策的重要依据，使治理资源配置更加贴近实际人群健康需求。

在此基础上，充分发挥健康效应评估对空气质量目标制定、重点区域治理和减排策略选择的支撑作用，建立与新版《环境空气质量标准》分阶段实施相衔接的达标策略，推动空气质量达标管理更加精细化。对于 $PM_{2.5}$ 暴露水平较高、改善放缓或人口暴露风险较大的地区，应强化污染源精准管控和区域协同治理；在制定污染治理措施时，应综合比较不同污染源、不同减排措施组合的健康效益，优先采取能够实现污染物和温室气体协同减排、产生较大健康收益的治理措施。

同时，空气污染健康影响减半是全球共同目标，实现这一目标需要各国共同努力。建议我国要积极参与全球空气污染与健康治理，加强与 WHO 等国际组织以及其他国家和地区在健康影响评估、空气质量管理和减污降碳协同等方面的政策交流与经验分享，深化空气污染与健康治理领域国际合作，共同推动全球空气污染健康负担持续下降。

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] World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution.2022, https://www.who.int/news–room/fact–sheets/detail/ambient–(outdoor)–air–quality–and–health.

[3] Feng S, Huang F, Zhang Y, et al. The pathophysiological and molecular mechanisms of atmospheric $PM_{2.5}$ affecting cardiovascular health: A review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 249: 114444.

[4] Fleischer N L, Merialdi M, Van Donkelaar A, et al. Outdoor Air Pollution, Preterm Birth, and Low Birth Weight: Analysis of the World Health Organization Global Survey on Maternal and Perinatal Health [J]. Environ Health Perspect, 2014, 122(4): 425–430.

[5] Bai L, Benmarhnia T, Chen C, et al. Chronic Exposure to Fine Particulate Matter Increases Mortality Through Pathways of Metabolic and Cardiovascular Disease: Insights From a Large Mediation Analysis [J]. Journal of the American Heart Association, 2022, 11(22): e026660.

[6] M ü nzel T, Sørensen M, Lelieveld J, et al. A comprehensive review/expert statement on environmental risk factors of cardiovascular disease [J]. Cardiovascular research, 2025, 121(11): 1653–1678.

[7] Alexeeff S E, Liao N O S, Liu X, et al. Long–Term $PM_{2.5}$ Exposure and Risks of Ischemic Heart Disease and Stroke Events: Review and Meta–Analysis [J]. Journal of the American Heart Association, 2021, 10(1): 30.

[8] Hamra G B, Guha N, Cohen A, et al. Outdoor Particulate Matter Exposure and Lung Cancer: A Systematic Review and Meta–Analysis [J]. Environ Health Perspect, 2014, 122(9): 906–911.

[9] U.S. Environmental Protection Agency. Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter [J]. 2019.

[10] 生态环境部 . 2025 中国生态环境状况公报 [M]. 2026.

[11] Zheng Y X, Xue T, Zhang Q, et al. Air quality improvements and health benefits from China's clean air action since 2013 [J]. Environ Res Lett, 2017, 12(11): 9.

[12] Xue T, Wang R H, Wang M, et al. Health benefits from the rapid reduction in ambient exposure to air pollutants after China's clean air actions: progress in efficacy and geographic equality [J]. Natl Sci Rev, 2024, 11(2): 11.

[13] Xue T, Kang N, Wan W, et al. Health–oriented strategies are needed to optimize China’s 2025 clean air action plan [J]. Science Bulletin, 2024, 69(13): 2007–2008.

[14] World Health Organization. Second Global Conference on Air Pollution and Health [J]. 2025.

[15] World Health Organization. Updated road map for an enhanced global response to the adverse health effects of air pollution.2025, https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/EB156/B156_24–en.pdf.

[16] Kang N, Wang R, Li P, et al. Beyond the halving commitment: China can do more to achieve clean air for global health [J]. The Innovation, 2025, 6(10): 100996.

[17] 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]. Nature Geoscience, 2024, 17(10): 987–994.

[18] Zheng P, Afshin A, Biryukov S, et al. The Burden of Proof studies: assessing the evidence of risk [J]. Nature Medicine, 2022, 28(10): 2038–2044.

[19] Huang X, Steinmetz J, Marsh E K, et al. A systematic review with a Burden of Proof meta–analysis of health effects of long–term ambient fine particulate matter ($PM_{2.5}$) exposure on dementia [J]. Nature Aging, 2025, 5(5): 897–908.

[20] 国家统计局 . 中华人民共和国 2025 年国民经济和社会发展统计公报 [M]. 2026.

[21] Ferrari A J, Santomauro D F, Aali A, et al. Global incidence, prevalence, years lived with disability (YLDs), disability–adjusted life–years (DALYs), and healthy life expectancy (HALE) for 371 diseases and injuries in 204 countries and territories and 811 subnational locations, 1990–2021: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021 [J]. The Lancet, 2024, 403(10440): 2133–2161.

[22] Xu F, Huang Q, Yue H, et al. The challenge of population aging for mitigating deaths from $PM_{2.5}$ air pollution in China [J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 5222.

[23] Li P, Ni X, Wu J, et al. Global and national burden of chronic kidney disease attributable to fine particles: An updated exposure–response meta–analysis [J]. The Innovation, 2026: 101429.

[24] Burnett R, Chen H, Szyszkowicz M, et al. Global estimates of mortality associated with long–term exposure to outdoor fine particulate matter [J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2018, 115(38): 9592–9597.

[25] Geng G, Xiao Q, Liu S, et al. Tracking Air Pollution in China: Near Real–Time $PM_{2.5}$ Retrievals from Multisource Data Fusion [J]. Environ Sci Technol, 2021, 55(17): 12106–12115.

[26] Chen Y, Guo F, Wang J, et al. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100 [J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 83.

[27] Tatem A J. WorldPop, open data for spatial demography [J]. Scientific Data, 2017, 4(1): 170004.

[28] Hay S I, Ong K L, Santomauro D F, et al. Burden of 375 diseases and injuries, risk–attributable burden of 88 risk factors, and healthy life expectancy in 204 countries and territories, including 660 subnational locations, 1990–2023: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2023 [J]. The Lancet, 2025, 406(10513): 1873–1922.

[29] Vollset S E, Ababneh H S, Abate Y H, et al. Burden of disease scenarios for 204 countries and territories, 2022–2050: a forecasting analysis for the Global Burden of Disease Study 2021 [J]. The Lancet, 2024, 403(10440): 2204–2256.

[30] Cohen A J, Brauer M, Burnett R, et al. Estimates and 25–year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015 [J]. The Lancet, 2017, 389(10082): 1907–1918.

[31] Tang R, Zhao J, Liu Y, et al. Air quality and health co–benefits of China's carbon dioxide emissions peaking before 2030 [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1008.

[32] Du P, Du H, Liu Y, et al. Targeting 50% air–pollution mortality reduction by 2040 requires transformative health–oriented precision emission reduction [J]. The Innovation, 2026: 101276.

[33] Yin H, Brauer M, Zhang J, et al. Population ageing and deaths attributable to ambient $PM_{2.5}$ pollution: a global analysis of economic cost [J]. The Lancet Planetary Health, 2021, 5(6): e356–e367.

扫码查看更多

北京大学环境健康

亚洲清洁空气中心