

2025 中国空气质量改善的健康效应评估

关注空气污染的急性健康风险



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 北京大学公共卫生学院 副教授
王若涵 北京大学公共卫生学院
邓建宇 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

朱 妍 亚洲清洁空气中心 传播主管
梁 缘 亚洲清洁空气中心 高级传播官员
王 思 亚洲清洁空气中心 环境研究员

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大环境风险因素。自 2013 年起，中国相继实施《大气污染防治行动计划》、《打赢蓝天保卫战三年行动计划》以及目前的《空气质量持续改善行动计划（2021-2025）》，推动空气质量实现了历史性、全局性的改善。科学评估这些政策的健康效益，对于总结过去、规划未来至关重要。《中国空气质量改善的健康效应评估》系列报告持续追踪这一进程，通过定量评估为不同阶段的行动计划进展与成效分析提供研究证据。

在第三阶段行动计划收官以及迈向“十五五”之际，2025 年度报告首次将评估视角从长期慢性健康风险，拓展至由短期高浓度暴露引发的急性健康风险，并提供结构对比分析，以期为空气污染精准防控和健康风险精细化管理提供关键科学视角，助力清洁空气行动策略转向健康风险管理导向的新阶段。本研究基于 2013–2024 年全国网格化空气污染与人口数据，系统量化了暴露相关的健康风险变化，揭示了当前中国空气污染健康风险的结构性的转变。

主要发现

一、PM_{2.5} 健康风险结构转变，慢性负担持续下降，但短期急性风险日趋集中

我国 PM_{2.5} 污染治理成效显著，其长期暴露导致的过早死亡人数由 2013 年的 166 万降至 2024 年的 108 万，短期暴露死亡人数也从 21 万降至 8 万。这标志着持续深入的清洁空气行动从根本上减轻了人群面临的普遍性慢性健康威胁。然而，在浓度整体下降的背景下，PM_{2.5} 暴露健康风险呈现出新的特征：其健康影响更多地与少数极端污染事件挂钩。研究发现，PM_{2.5} 短期暴露的健康效应集中化趋势增强。2024 年，全年浓度最高的前 5% 污染日所导致的急性死亡负担，占全年短期暴露总负担的比例已升至 18.3%，较 2013 年（10.4%）有显著提升，且在空气质量较优的东部沿海省份尤为突出，呈现“占比上升与人口聚集叠加”的特征。这表明，在气候变化导致极端天气多发的背景下，应对短期、高强度的污染事件的重要性进一步凸显。

二、O₃ 短期急性风险增幅显著，具有典型的季节性和城市型特征

与 PM_{2.5} 暴露相关健康负担下降形成对比的是，O₃ 的短期急性健康风险正在快速上升。2024 年，归因于短期 O₃ 暴露的死亡人数较 2013 年增加了约 1.7 倍。O₃ 污染具有典型的季节性和城市型特征，其健康负担高度集中在夏季，对公共健康构成的结构性威胁日益凸显。值得关注的是，O₃ 的急性风险在时间分布上极度集中。研究显示，全国多个地区全年约 50% 的 O₃ 急性健康风险，仅来源于全年浓度最高的前 5% 污染

日。这一特征意味着，针对少数关键污染日实施精准干预，即可用较高的成本效益规避大部分健康风险。

三、健康风险分布存在明显区域与人群差异，精准防控是提升效益的关键

空气污染的健康改善效益在全国范围内并非均等分布。从空间上看，山东、河南、江苏等传统人口大省和重点污染区域，尽管改善幅度显著，但当前的绝对疾病负担依然位居全国前列。同时，O₃ 暴露负担在华北、华东等地区相较 2013 年仍有上升，提示区域治理重点需动态调整。从人群分布看，城市居民的 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露水平普遍高于农村，短期暴露的城乡差距更为突出。这些差异要求未来的治理策略需要基于信息化手段实现对脆弱人群的精准防护，从而最大化健康收益的边际效应。

四、建立健康导向的精准防控体系，是未来治理的必然方向

当前空气污染健康风险的结构性转变，要求环境治理政策从以“浓度达标”为核心，转向以“健康效益最大化”为核心。本研究揭示的风险集中化特征表明，建立分季节、分污染物的国家级急性健康风险预警体系刻不容缓。例如，在冷季重点防控 PM_{2.5} 急性暴露，在暖季重点防控 O₃ 急性暴露，能够以最小社会成本锁定最大健康收益。同时，必须深化 PM_{2.5} 与 O₃ 的协同防控，并持续关注区域差异化，方能应对气候变化等不确定因素带来的新挑战，最终实现清洁空气行动的全面健康福祉。

目录

一、空气污染暴露的健康效应概述	1.1 影响人体健康的主要空气污染物	3
	1.2 影响人体健康的主要空气污染物暴露类型	3
	1.3 空气污染健康效应的因果等级	3
	1.4 细颗粒物暴露的健康效应	3
	1.5 臭氧暴露的健康效应	4
	1.6 长期暴露与短期暴露健康效应的对比	5
	1.7 环境空气质量标准与健康风险管理	5
二、空气污染暴露相关健康风险定量评估方法	2.1 空气污染短期暴露的健康风险测算	8
	2.2 空气污染长期暴露的健康风险测算	12
三、中国的清洁空气行动计划对人群暴露的改善作用	3.1 空气污染暴露改善的时间趋势	14
	3.2 空气污染暴露改善的空间趋势	17
	3.3 空气污染暴露的人群分布	17
四、空气污染暴露相关健康风险的改善情况	4.1 空气污染暴露健康风险的变化趋势	22
	4.2 空气污染暴露健康风险的区域差异	23
五、短期暴露健康风险的集中化特征		29
六、结论与展望		33
参考文献		36

引言

自 2013 年以来，中国实施了强有力的大气污染治理政策，空气质量持续改善取得了显著成就。科学认识中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至关重要。北京大学空气 - 气候 - 健康研究团队与亚洲清洁空气中心合作，持续开展中国空气质量改善的健康效应评估研究并发布系列报告。在 2023 年和 2024 年的报告中，我们重点评估了 $PM_{2.5}$ 和 O_3 长期暴露对慢性疾病负担以及生命早期健康的影响与改善情况。

本次年度报告是系列研究成果的第三期，旨在将研究视角拓展至短期暴露及其健康风险，系统量化短期高浓度暴露引发的急性负担，并与长期暴露的健康影响进行对比，以期为空气污染精准防控和健康风险精细化管理提供关键科学视角，助力清洁空气行动策略转向健康风险管理导向的新阶段。本报告基于 2013–2024 年全国网格化空气污染与人口数据，采用疾病负担评估方法系统测算相关死亡人数的变化，并分析其时间、空间及人群分布特征。

空气污染暴露的 健康效应概述

01



1.1 影响人体健康的主要空气污染物

空气污染是当前全球公共卫生领域面临的重大挑战，多种污染物已被证实对人体健康构成显著威胁。常见的空气污染物包括二氧化硫（SO₂）、氮氧化物（NO_x）、一氧化碳（CO）、碳氢化合物以及臭氧（O₃）等气态物质，同时也包括化学组成复杂的颗粒态污染物（气溶胶）。根据空气动力学直径，颗粒物可进一步划分为总悬浮颗粒物（TSP）、可吸入颗粒物（PM₁₀）和细颗粒物（PM_{2.5}）。在全球疾病负担（Global Burden of Disease, GBD）研究中，PM_{2.5} 和 O₃ 已被确认为两大独立的健康风险因子，对全球发病、死亡及伤残的贡献显著，构成了沉重的疾病负担^[1]。

1.2 影响人体健康的主要空气污染物暴露类型

空气污染对人群健康的影响不仅取决于污染物浓度，也与暴露的时间模式密切相关。人群空气污染暴露通常指接触超过安全标准的污染物的人数、超标程度及累计暴露时长。根据暴露时长，其健康效应可分为短期暴露和长期暴露两类。

短期暴露（急性效应）指因单日或连续数日高浓度污染事件引发的急性健康效应，如诱发脑卒中、慢性阻塞性肺疾病急性加重或心肌梗死等。

长期暴露（慢性效应）则指在年度乃至数十年尺度上持续处于中低浓度污染环境中所导致的累积性健康损害，此类慢性暴露会显著增加多种慢性非传染性疾病的发病与死亡风险。

1.3 空气污染健康效应的因果等级

为系统评估污染物与特定健康结局之间关联的科学确定性，国际权威机构构建了基于证据强度的因果推断分级框架。以美国环境保护署发布的《颗粒物综合科学评估》和《臭氧综合科学评估》为例，该机构综合流行病学研究、临床试验及毒理学证据，将污染物与健康效应之间的因果关系划分为多个等级^{[2][3]}，其中主要分级类型包括：

- 有因果关系——科学证据充分且一致，表明污染物暴露与健康效应之间存在确切的因果联系；
- 可能存在因果关系——证据较为充分，但仍存在一定不确定性或研究结果存在差异；
- 提示存在因果关系——证据相对有限，但足以提示潜在的健康风险。

图 1.1 展示了 PM_{2.5} 与 O₃ 长期和短期暴露与相关疾病的证据等级汇总。目前，全球主要卫生与环境机构已就此分类框架达成基本共识，例如，世界卫生组织（WHO）也基本采用类似的分级方式，作为指定空气质量标准指导值的科学基础。总之，该体系为制定精准的公共卫生干预政策和实施高效的环境风险管理提供了重要科学依据。

1.4 细颗粒物暴露的健康效应

细颗粒物（PM_{2.5}）是空气中直径小于 2.5 微米的可吸入颗粒物，具有极强的穿透能力，可携带重金属、多环芳烃等有害物质经呼吸道进入人体，沉积于肺泡并突破血气屏障、血脑屏障及胎盘屏障等多种生物屏障，进而影响多个组织与器官系统。作为全球广泛关注的环境健康风险因子，PM_{2.5} 的健康危害已得到大量毒理学和流行病学研究证实^[4-6]。

PM_{2.5} 长期暴露被认为具有慢性健康效应，是导致全球和区域疾病负担的首要污染物之一，根据 GBD 研究测算，每年约导致 783 万的过早死亡^[7,8]。

长期暴露与多种慢性非传染性疾病存在因果关系，GBD 研究重点评估了其对于缺血性心脏病、脑卒中、慢性阻塞性肺病（COPD）、下呼吸道感染、肺癌以及 2 型糖尿病的疾病负担。此外，长期暴露对生命早期健康影响显著，可导致低出生体重和早产等不良妊娠结局，进而影响婴幼儿的健康和生存率。

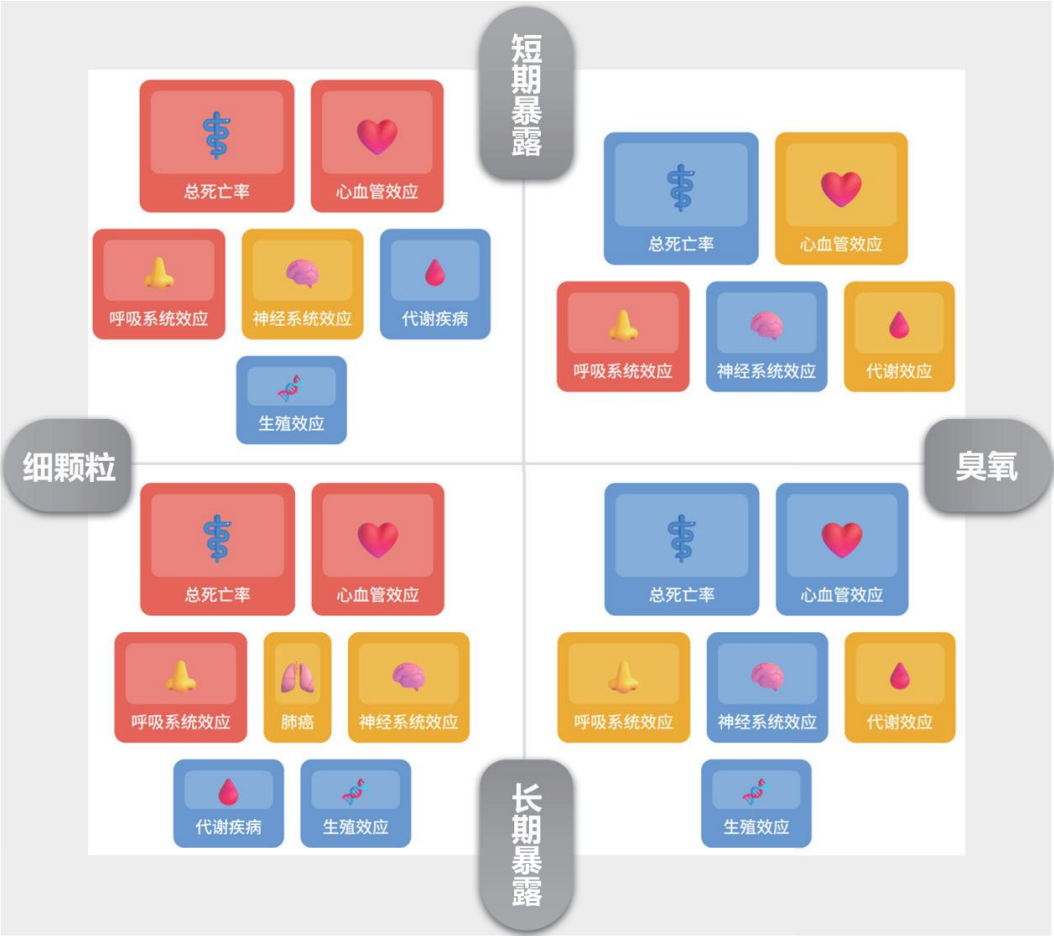
PM_{2.5} 短期暴露被认为具有急性健康效应，与总死亡率、心血管效应、呼吸系统效应均存在明确的因果关系。短时间的高浓度暴露可诱发心肌梗死、心律失常和 COPD 急性加重等急性事件，导致超额死亡和住院风险增加。

1.5 臭氧暴露的健康效应

臭氧（O₃）作为一种强氧化性的二次污染物，是典型的城市污染物之一^[9-11]。人体暴露于 O₃ 后可直接危害呼吸系统。

暖季 O₃ 长期暴露被认为具有慢性健康效应。O₃ 长期暴露对呼吸系统健康的证据较为充分。GBD 研究依据其导致的慢性阻塞性肺病（COPD）评估相关超额死亡风险。长期暴露与全因死亡率之间可能存在因果联系。流行病学研究还表明，O₃ 暴露对特定脆弱人群（如孕妇）构成健康威胁，孕期 O₃ 暴露可能与不良妊娠结局存在潜在的因果关系^[3]。

图 1.1
PM_{2.5} 与 O₃ 长期和短期暴露与相关疾病的证据等级汇总



红色：暴露与结局有因果关系；黄色：暴露与结局可能存在结果关系；蓝色：暴露与结局提示存在因果关系

O₃ 短期暴露被认为具有急性健康效应。短期 O₃ 暴露与呼吸系统疾病之间存在因果关系，可引发哮喘、支气管炎等呼吸道症状的急性发作。与 PM_{2.5} 相比，其对心脑血管疾病的影响研究相对有限，目前证据显示心脑血管疾病与短期 O₃ 暴露之间仅可能存在因果关系。

1.6 长期暴露与短期暴露健康效应的对比

本报告同时评估了 PM_{2.5} 和 O₃ 的长期和短期暴露健康风险，突显了两种污染物的结构性差异：

- **死亡负担规模差异**——总体而言，PM_{2.5} 长期暴露是导致我国空气污染相关死亡负担的首要因素，其规模（百万级别）远大于 PM_{2.5} 短期暴露（十万级别）和 O₃ 暴露（十万级别）。这强调了持续进行长期空气质量改善以解决慢性疾病问题的根本重要性。

- **PM_{2.5} 风险特征的变化**——随着我国 PM_{2.5} 长期暴露的成功控制，PM_{2.5} 风险已从普遍慢性威胁转化为需要兼顾集中性的、急性的风险，提示精准、分时段、分区域的短期预警是 PM_{2.5} 防控的关键手段。

- **O₃ 风险的突出性**——O₃ 的长期和短期暴露死亡负担绝对值相对较小，但其短期暴露导致的急性死亡负担增幅最为显著，2024 年较 2013 年增加约 1.7 倍，且风险高度集中在少数极端污染天和特定区域。这提示 O₃ 问题在未来空气污染健康风险中潜在的重要性，尤其需要在夏季对其短期高浓度暴露进行强化预警与干预。

1.7 环境空气质量标准与健康风险管理

环境空气质量标准是在综合环境毒理学与流行病学证据、环境风险评估及社会承受能力基础上，对环境空气中污染物浓度设定的限制性规范。由于



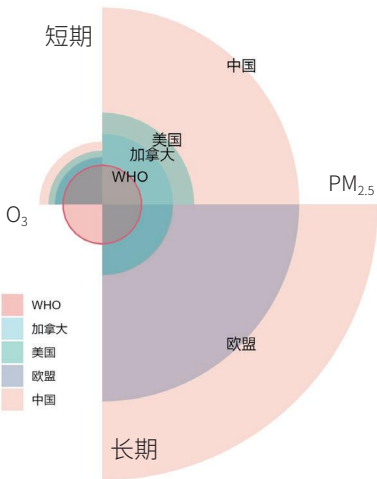
人体免疫系统具有一定缓冲能力，只有当空气污染物浓度超过安全阈值时，暴露才会对健康产生显著影响。因此，当空气质量标准依据最新科学证据制定时，超标暴露人群的比例可作为健康风险的代理指标，从而将空气质量达标评估转化为一种高效且可近似反映健康风险的手段。

2012 年修订发布的《环境空气质量标准》（GB3095-2012）首次将 PM_{2.5} 纳入标准，为我国大气污染防治进程树立了新的里程碑。此后，我国相继出台了《大气污染防治行动计划》（2013–2017 年，以下简称“第一行动计划”）、《打赢蓝天保卫战三年行动计划》（2018–2020 年，以下简称“第二行动计划”）以及《空气质量持续改善行动计划》（2021–2025 年，以下简称“第三行动计划”），为空气质量改善提供了政策支撑。

目前，国内外关于 PM_{2.5} 与 O₃ 的空气质量标准如图 1.2 所示。参考现行常用达标标准，可用于评估超标暴露水平，并作为健康风险的指示。尽管中国现行标准（PM_{2.5} 短期达标：日均浓度 < 75 μg/m³，长期达标：年均浓度 < 35 μg/m³；O₃ 短期达标：日最大 8 小时平均浓度 < 160 μg/m³，长期达标：第 90 百分位数 < 160 μg/m³）相较早期标准更加严格，但仍显著高于 WHO 指南和其他主要发达国家标准，这反映出发展中国家在环境保护与经济社会发展之间的权衡与过渡性特征，也意味着在当前空气质量水平下，大量人群仍将伴随较高的潜在健康风险。

随着治理成效显现，2024 年全国地级及以上城市 PM_{2.5} 年均浓度降至 29.3 μg/m³，并连续五年低于 35 μg/m³ 的现行标准，全国 74% 的城市 PM_{2.5} 年均浓度达标，65% 的城市空气质量全面达标。在此背景下，现行标准已难以持续引领大多数城市改善空气质量。实施更严格的标准、推动空气质量持续提升已成为必然趋势。本报告系统评估了 2013–2024 年我国长短期 PM_{2.5} 与 O₃ 暴露达标情况，并计算其对死亡负担的影响趋势，亦可为空气质量标准的修订与环境健康风险管理提供科学指导依据。

图 1.2
国内外 PM_{2.5} 与 O₃ 空气质量标准对比



红色圆形表示 WHO 现行空气质量标准，其余国家标准的圆形半径按与 WHO 标准的比例绘制

空气污染暴露相关健康 风险定量评估方法

02

2.1 空气污染短期暴露的健康风险测算

2.1.1 基于多中心研究非线性暴露反应关系的构建

为了建立 $PM_{2.5}$ 和 O_3 短期暴露与全因死亡率之间的非线性暴露反应关系模型，本研究采用了基于结构因果建模理论的三阶段方法。该框架假设 $PM_{2.5}$ 或 O_3 短期暴露与全因死亡之间存在一个潜在的非线性函数 $RR(x) = \exp[f(x)]$ ，步骤如下：1) 利用 Yitzhaki^[12] 的理论建立研究的线性估计与非线性暴露反应关系 $f(x)$ 之间的理论关系；2) 通过基于样条的元回归估计 $f(x)$ 的参数；3) 根据估计的参数重构完整的非线性暴露反应关系。

第一阶段，根据 Yitzhaki^[12] 在 1996 年提出的理论，线性估计值 $\hat{\beta}$ 本质上是非线性暴露反应关系导数 $f'(x)$ 的加权平均，基于此本研究建立起了文献报告的线性估计与非线性暴露反应关系导数 $f'(x)$ 之间的数学关联。第二阶段为了求解 $f'(x)$ ，本研究使用了样条函数来表示 $f'(x)$ ，将线性模型的估计值 $\hat{\beta}$ 表示为积分值 π_k 的线性组合， θ_k 为线性组合系数，同时也是待估系数。对于某一个多中心研究 i ，假设该研究中有 m 个中心或城市，并报告了 m 个效应值，即报告了 $\hat{\beta}_i$ （。为了从文献提供的均值、方差、四分位距等统计量中获取暴露分布，本研究假设短期 $PM_{2.5}$ 或 O_3 暴露的分布符合 Gamma 分布，并通过报告的统计量估计 Gamma 分布的形状参数 α 和尺度参数 δ ，之后按照上述方法计算 π_{ki} 。获得 $\hat{\beta}_i$ 和 π_{ki} 后，采用随机效应模型对 θ_k 进行参数估计，为解决某些多中心研究中心数量较多导致权重过大的问题，模型对研究进行分层，加入随机效应项进行回归获得待估系数 θ_k 。第三阶段，相关参数的估计值 $\hat{\theta}_k$ 之后，代入 $f'(x)$ 表达式获得暴露反应关系导数的估计 $\hat{f}'(x)$ 。在设定理论最小风险水平 (Theoretical Minimum Risk Level, TMREL) 后，对 $\hat{f}'(x)$ 进行积

分获得暴露反应关系 $\hat{f}(x)$ ，并通过 500 次随机模拟获得 $\hat{f}(x)$ 置信区间。

2.1.2 全球多中心证据收集与整合

本研究对短期 $PM_{2.5}$ 和 O_3 暴露与全因死亡进行了标准的荟萃分析，系统检索了 MEDLINE、Scopus、Embase 等数据库。采用与 WHO 文献质量评级框架对纳入文献进行质量评估并排除低质量文献。最终短期 $PM_{2.5}$ 暴露与全因死亡相关研究共纳入了 85 篇文献进行定量分析，共计 804 个效应值，覆盖全球 6 个大洲共 35 个国家（图 2.1）；短期 O_3 暴露与全因死亡相关研究共纳入 103 篇文献，共计 841 个效应值，覆盖全球 5 个大洲共 37 个国家（图 2.2）。两种污染物的相关研究分布区域有很大一部分重叠，最终纳入分析的效应值主要都来源于东亚、北美和欧洲，非洲地区的相关研究较少。

利用检索的文献结果和上一部分提到的非线性暴露反应关系构建方法，本研究构建了短期 $PM_{2.5}$ 和 O_3 暴露与全因死亡的暴露反应关系。根据 WHO 提出的短期 $PM_{2.5}$ 和 O_3 暴露的指导值，本研究将短期 $PM_{2.5}$ 和 O_3 暴露的 TMREL 分别设为 $15\mu g/m^3$ 和 $100\mu g/m^3$ 。图 2.3 和图 2.4 分别展示的是基于以上方法获得的短期 $PM_{2.5}$ 和 O_3 暴露与全因死亡的非线性暴露反应关系，两者均表现出明显的非线性特征，在低浓度段风险增加较快，高浓度段风险增加趋于平缓。由于两种污染物的浓度差异和所选取的 TMREL 不同，两种污染物为全球平均浓度时，短期 $PM_{2.5}$ 暴露的相关风险远高于短期 O_3 暴露的相关风险。另外，需要说明，由于 TMREL 相对于能够观测到的 O_3 浓度水平较高，在远低于 TMREL 的暴露情境中，仍能观测到 O_3 浓度上升与总死亡率上升的现状关联，说明由于 TMREL 的选择， O_3 短期暴露相关的急性健康风险有可能被低估。

图 2.1

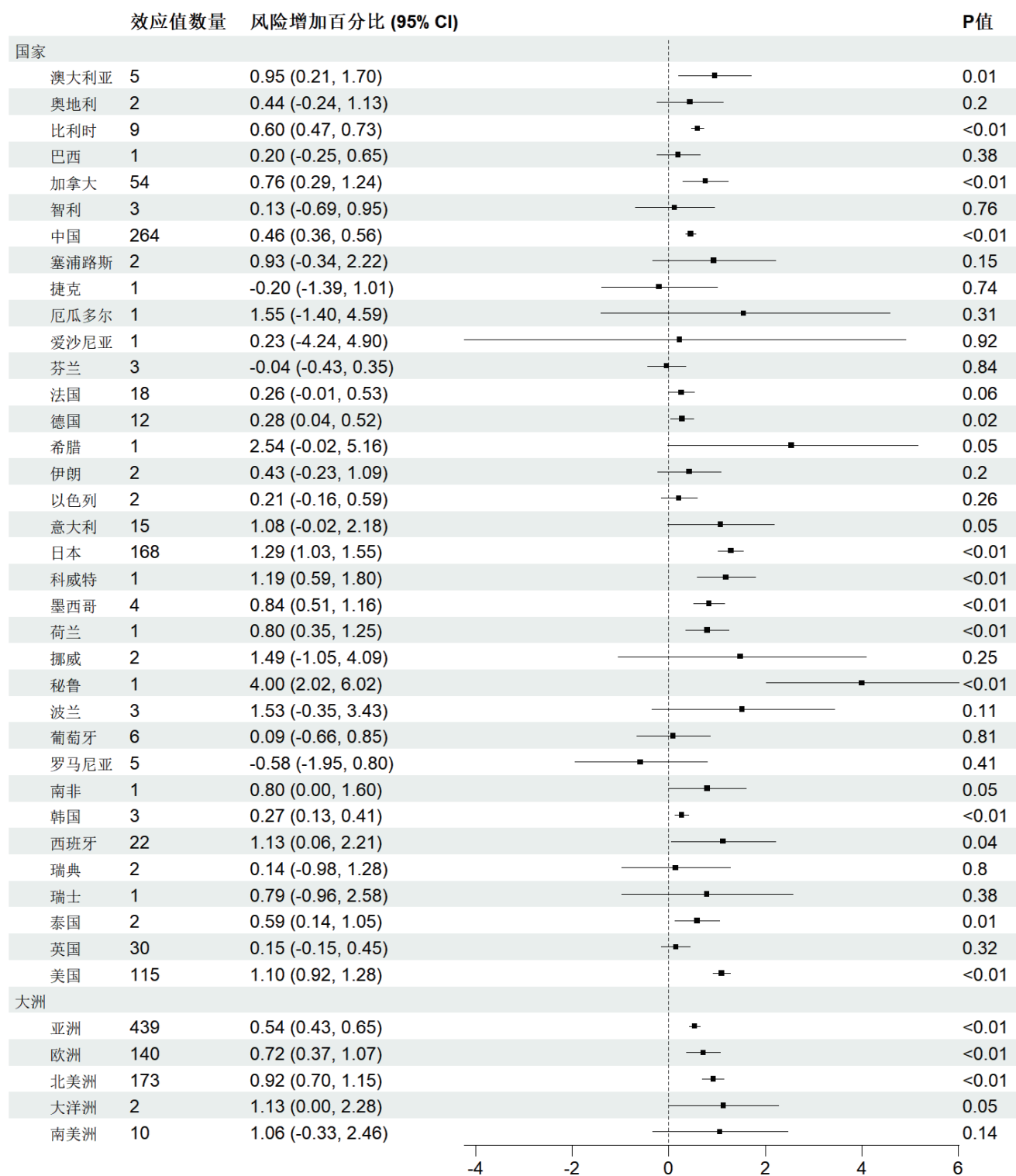
短期 PM_{2.5} 暴露每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 全因死亡风险增加百分比

图 2.2

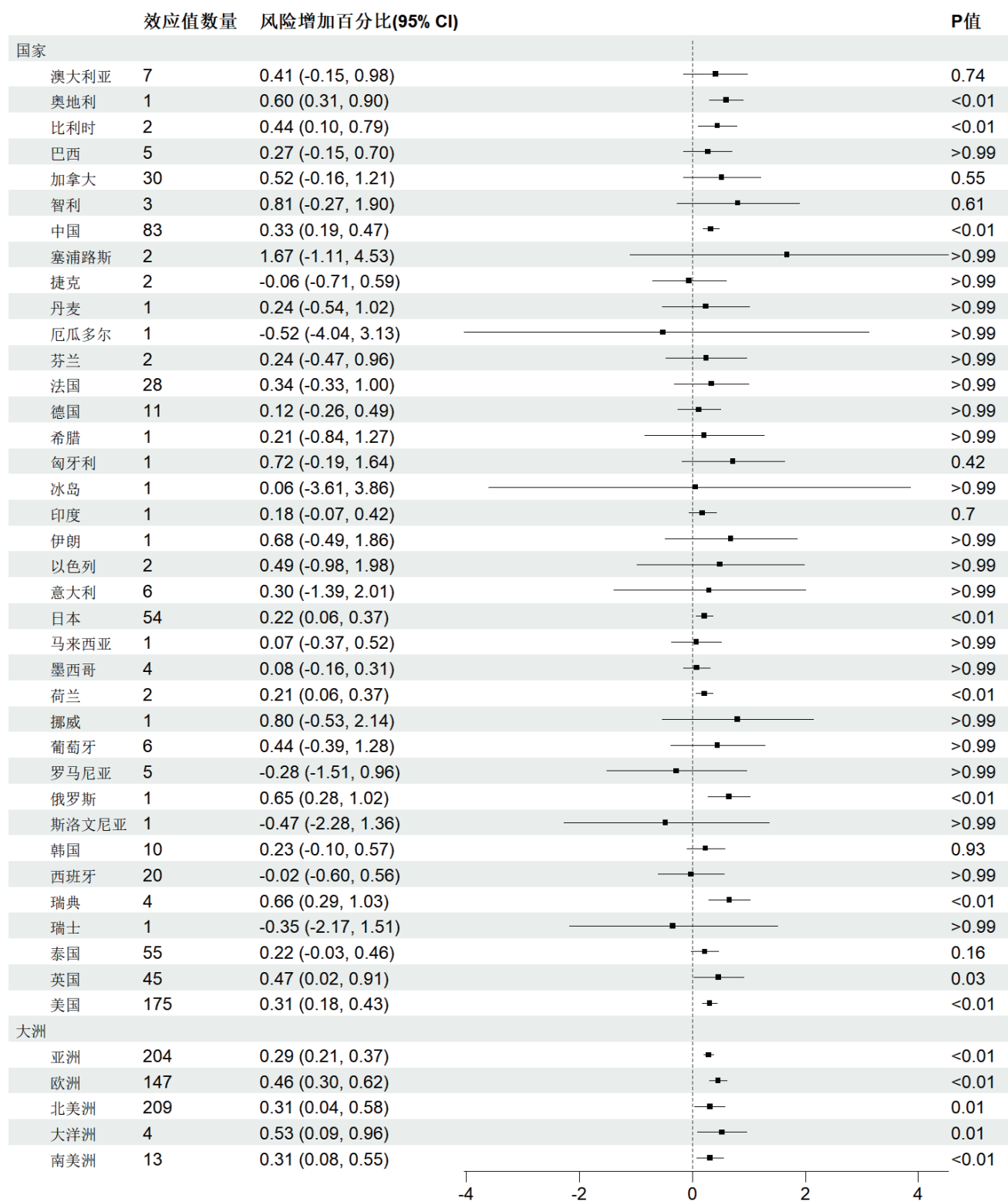
短期 O₃ 暴露每增加 10 μg/m³ 全因死亡风险增加百分比

图 2.3

短期 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露与全因死亡暴露反应关系

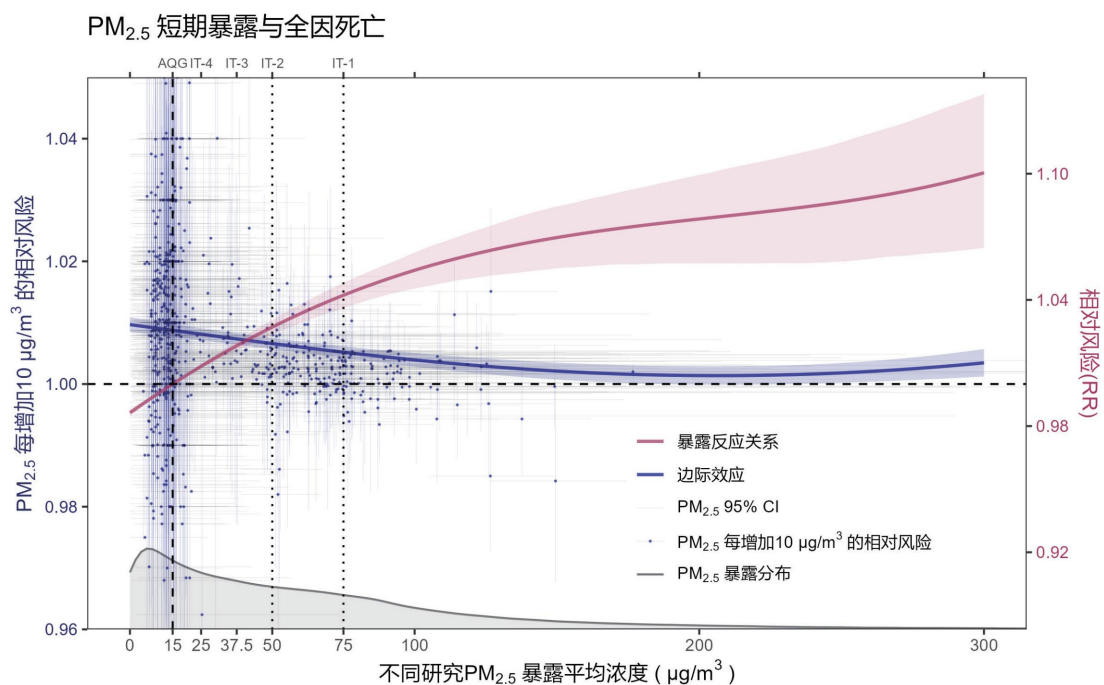
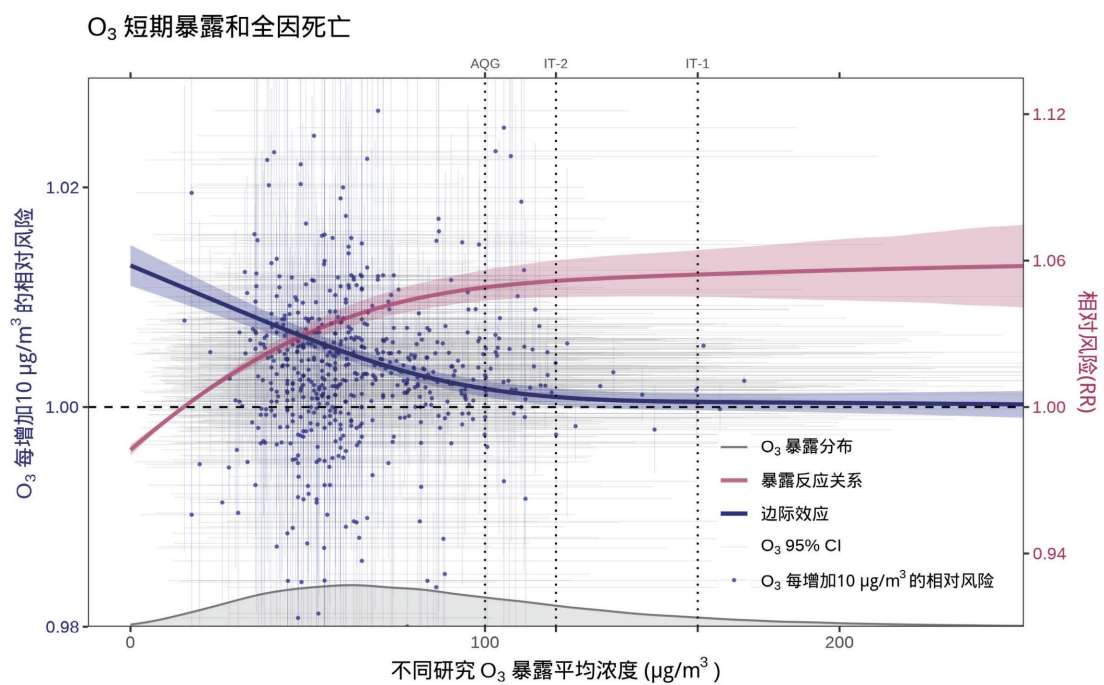


图 2.4

短期 O_3 暴露与全因死亡暴露反应关系



2.1.3 短期暴露的健康风险测算

短期 $PM_{2.5}$ 暴露的归因风险和归因死亡数由式 (1、2) 计算获得, 其中 AF_{ij} 代表第 i 个网格点在第 j 天由于特定 $PM_{2.5}$ 暴露的归因风险度; x_{ij} 是第 i 个网格第 j 天的 $PM_{2.5}$ 浓度值; $f(\cdot)$ 是在图 2.3 和 2.4 中的暴露反应关系; P_{ij} 是第 i 个网格第 j 天的死亡概率; Pop_{ij} 是第 i 个网格第 j 天的对应的人口; AN_{ij} 是第 i 个网格第 j 天的特定 $PM_{2.5}$ 暴露的归因死亡数。95% 置信区间使用蒙特卡洛方法进行 500 次随机模拟得到。不同年龄、性别、城乡亚组的疾病负担通过调整不同亚组死亡率 P_{ij} 和人口 Pop_{ij} 获得。

$$AF_{ij} = \max\left\{\left[1 - \frac{1}{f(x_{ij})}\right], 0\right\} \cdots \cdots (1)$$

$$AN_{ij} = AF_{ij} \times P_{ij} \times Pop_{ij} \cdots \cdots (2)$$

2.2 空气污染长期暴露的健康风险测算

空气污染长期暴露的健康风险评估沿用全球疾病负担 (GBD) 的技术路线, 与 2023 和 2024

年度报告保持一致。基于网格化污染浓度数据和 WorldPop (<https://www.worldpop.org>) 的人口分布信息, 将城市化地图与按性别、年龄及城乡居住情况分层的人口地图进行整合, 为不同亚组人群生成覆盖全国的高分辨率网格化地图 (1×1 km), 并在此基础上计算空气污染物的健康风险。

其中, 中国大气污染追踪数据集 (Tracking Air Pollution in China, TAP) 通过融合地面监测、卫星遥感及大气化学传输模式, 提供我国 $PM_{2.5}$ 与 O_3 年尺度和日尺度的网格化浓度数据^[13]。结合人口分布数据 (以中国人口普查数据作为总体约束, 辅以逐年的网格化全球人口密度数据), 可获得全国人群的 $PM_{2.5}$ 与 O_3 暴露状况。考虑到人口分布对健康风险的影响, 通常采用人口加权平均浓度, 即以人口数量为权重计算各网格点污染浓度的平均值, 作为空气污染长期暴露水平的评价指标。空气污染定量健康风险的计算方法参照公式 (1、2), 其中 $PM_{2.5}$ 长期暴露与人群发病及死亡风险的暴露-反应关系函数均来源于 GBD 研究。



中国的清洁空气行动计划 对人群暴露的改善作用

03



3.1 空气污染暴露改善的时间趋势

自 2012 年《环境空气质量标准》（GB3095-2012）修订实施以来，我国大气污染防治进入加速推进的关键阶段，全国 PM_{2.5} 长期与短期暴露水平均呈显著下降趋势，空气质量持续改善。2024 年，人口加权平均 PM_{2.5} 浓度为 29.7 μg/m³，较 2013 年下降 52.7%。居住在年均 PM_{2.5} 浓度超过我国《环境空气质量标准》一级年均限值（35 μg/m³，等同于世界卫生组织过渡性目标 IT-1）地区的人口比例由 83% 降至 33%，意味着超过一半的居民已能够呼吸到达标空气（图 3.1）。

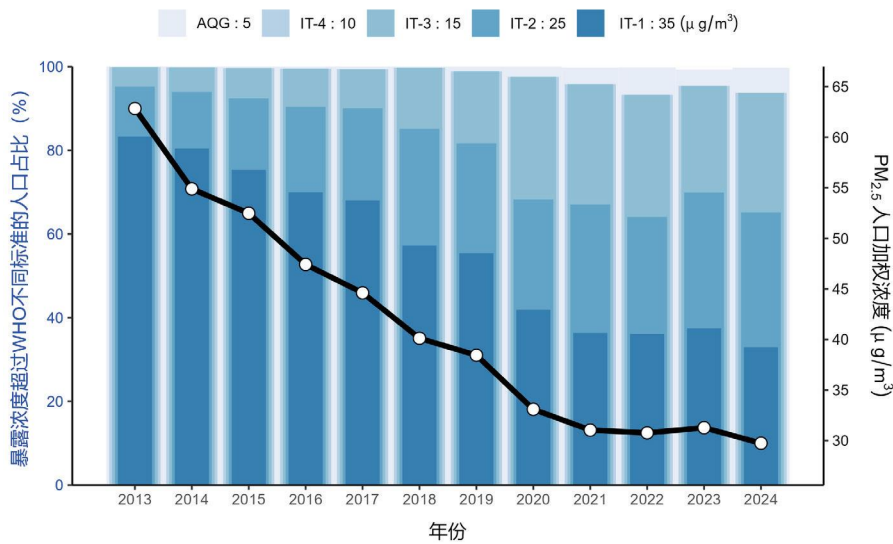
基于 TAP 提供的网格化日暴露数据，结合不同空气质量标准，计算得到全国尺度的人口加权超标天数。2024 年人口加权平均 PM_{2.5} 超标污染天数（日均浓度 > 75 μg/m³）为 20 天，相较 2013 年减少 87 天，超标比例由 29.3% 下降至 5.3%

（图 3.2）。同期，PM_{2.5} 短期暴露为优的天数（空气质量分指数 IAQI < 50）占比由 32.1% 提升至 70.0%，而优良天数（IAQI < 100）占比由 70.1% 提升至 94.7%，且 2024 年中度及以上污染天数（IAQI > 150）占比小于 1%（图 3.3）。上述结果表明，我国 PM_{2.5} 空气质量在过去十余年间整体改善显著，优良天数占比持续增加。

O₃ 长期与短期暴露水平整体均呈现“先上升后下降”的趋势，并在 2019 年达到峰值。就长期暴露而言，2013 至 2019 年，人口加权平均 O₃ 浓度由 124.4 μg/m³ 升至 152.5 μg/m³，同时，自 2017 年起，超过 90% 人口生活在 O₃ 长期暴露水平超过 WHO 第一阶段过渡期目标（IT-1，100 μg/m³）的地区。此后在有效管控下，暴露水平上升的趋势逐步缓解，至 2024 年，人口加权平均 O₃ 浓度下降至 139.7 μg/m³，（图 3.4）。

同时，2013 至 2019 年，人口加权的短期 O₃

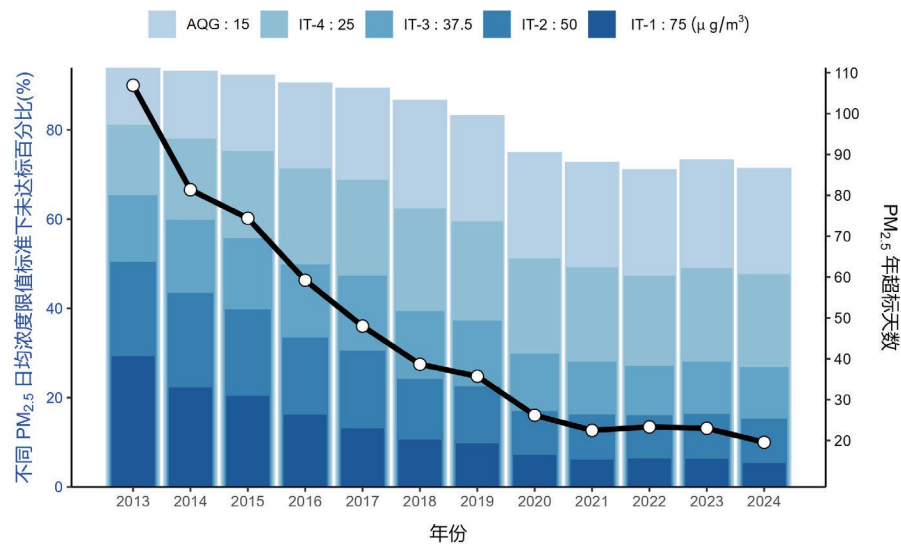
图 3.1
2013–2024 年人口加权的 PM_{2.5} 暴露浓度趋势



黑色折线表示人口加权的 PM_{2.5} 年均浓度，柱状图表示暴露于超出 AQG 不同阶段目标值空气污染的人口比例；其中 AQG 为全球空气质量指导值，为 5 μg/m³；IT-1 表示 WHO 过渡时期值 I，为 35 μg/m³；IT-2 表示 WHO 过渡时期值 II，为 25 μg/m³；IT-3 表示 WHO 过渡时期值 III，为 15 μg/m³；IT-4 表示 WHO 过渡时期值 IV，为 10 μg/m³。

图 3.2

2013–2024 年人口加权的 PM_{2.5} 超标天数与未达标人群比例



黑色折线表示人口加权的 PM_{2.5} 超标天数，柱状图表示暴露于超出 AQG 不同阶段目标值空气污染的人口比例；其中 AQG 为全球空气质量指导值，为 15 µg/m³；IT-1 表示 WHO 过渡时期值 I，为 75 µg/m³；IT-2 表示 WHO 过渡时期值 II，为 50 µg/m³；IT-3 表示 WHO 过渡时期值 III，为 37.5 µg/m³；IT-4 表示 WHO 过渡时期值 IV，为 25 µg/m³。

图 3.3

2013–2024 年 PM_{2.5} 空气质量指数等级天数占全年比例

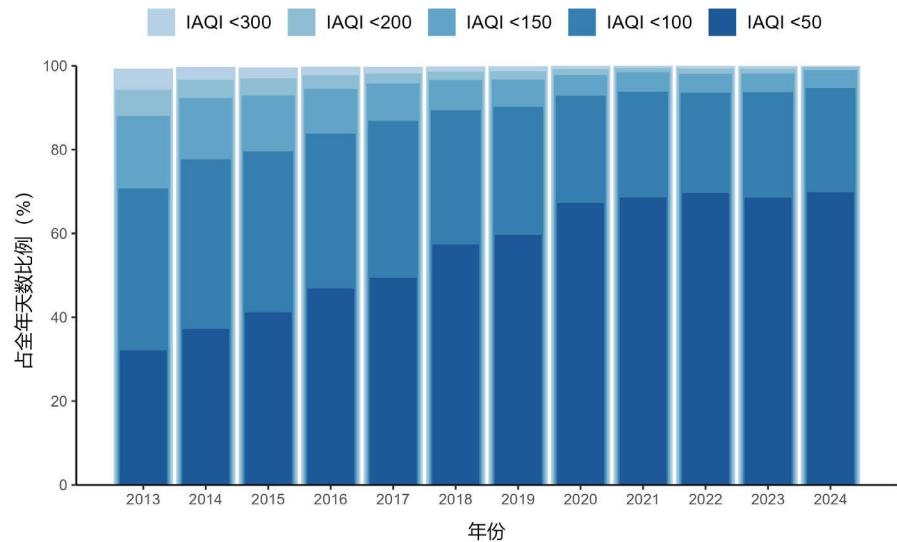
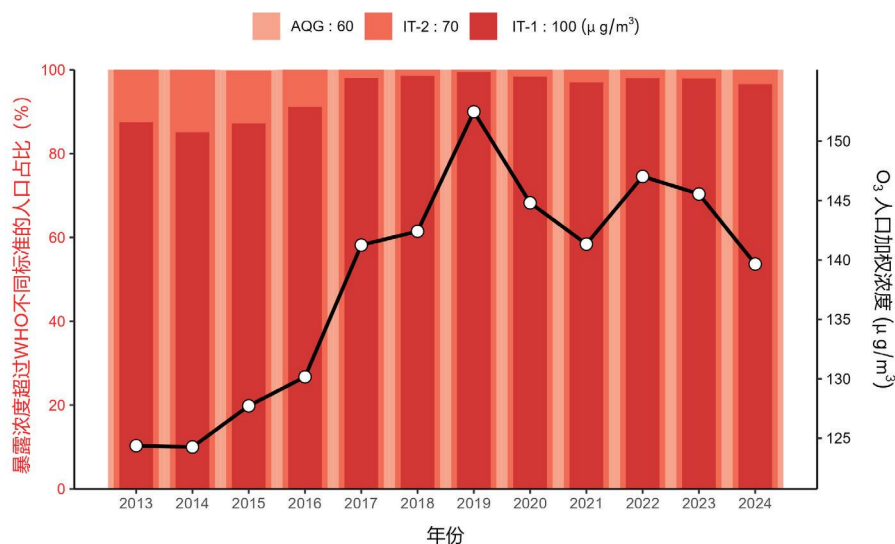


图 3.4

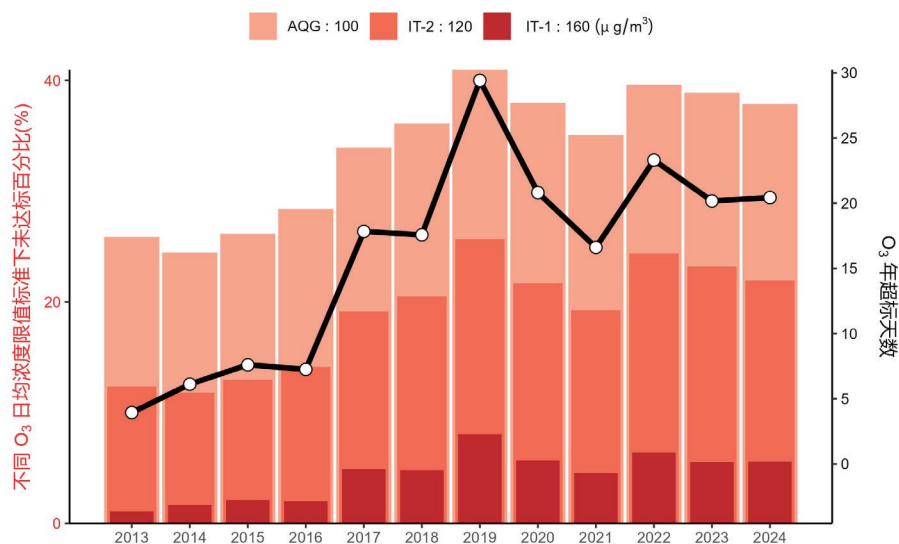
2013–2023 年人口加权的 O_3 暴露浓度趋势



黑色折线表示人口加权的 O_3 年均浓度，柱状图表示暴露于超出 AQG 不同阶段目标值空气污染的人口比例；其中 AQG 为全球空气质量指导值，为 $60 \mu g/m^3$ 。

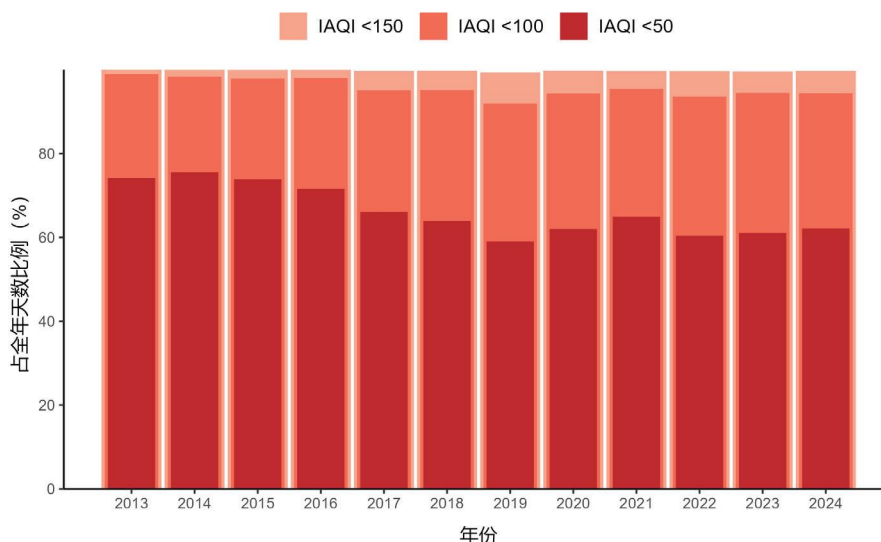
图 3.5

2013–2024 年人口加权的 O_3 超标天数与未达标人群比例



黑色折线表示人口加权的 O_3 超标天数，柱状图表示暴露于超出 AQG 不同阶段目标值空气污染的人口比例；其中 AQG 为全球空气质量指导值，为 $100 \mu g/m^3$ ；IT-1 表示 WHO 过渡时期值 I，为 $160 \mu g/m^3$ ；IT-2 表示 WHO 过渡时期值 II，为 $120 \mu g/m^3$ 。

图 3.6

2013–2024 年 O₃ 空气质量指数等级天数占全年比例

暴露超标天数 (O₃ 日最大 8 小时平均浓度大于 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 由 4 天增加至 29 天。2020 年后, 暴露水平逐步缓解, 至 2024 年, 人口加权的超标天数下降到 20 天 (图 3.5)。O₃ 短期暴露于空气质量为优的天数 (IAQI < 50) 占比由 74.1% 下降至 62.1%, 优良天数 (IAQI < 100) 占比由 99.0% 下降至 94.4% (图 3.6)。结果, 显示尽管近年来总体暴露水平上升趋势有所遏制, 但与 2013 年相比 O₃ 短期高浓度天数仍呈恶化趋势。

3.2 空气污染暴露改善的空间趋势

图 3.7 至图 3.10 展示了 2013–2024 年间 PM_{2.5} 与 O₃ 暴露浓度及超标天数变化趋势的分布。每个省份的趋势采用最小二乘法拟合月均浓度与超标天数。结果显示, 在清洁空气行动计划实施期间, PM_{2.5} 暴露浓度和超标天数整体显著下降, 京津冀、华北平原、汾渭平原、长三角和成渝等重点管控区域改善幅度

尤为显著; 相较之下, O₃ 污染形势呈现整体上升趋势, 其中华北、华东地区的 O₃ 浓度升高最为明显, 天津市的超标天数增长趋势尤为突出。

3.3 空气污染暴露的人群分布

图 3.11 和图 3.12 分别展示了我国不同人群特征 (性别、年龄、城乡) 下的空气污染长期和短期暴露的人群分布情况。若各亚群体暴露水平接近, 则雷达图呈 “正圆”; 偏离 “正圆” 的起伏则反映出人群间差异。整体来看, 无论长期还是短期暴露, 城市人群的 PM_{2.5} 水平均普遍高于农村, O₃ 暴露亦略高于农村, 且在短期暴露中城乡差距尤为显著。除城乡差异外, 性别和年龄组间并未观察到明显区别。与 2013 年相比, 2024 年 PM_{2.5} 长期与短期暴露的城乡差距有所缩小, 雷达图逐渐趋近于 “正圆” (虚线); 然而, O₃ 暴露的城乡差异依旧存在, 并呈一定扩大趋势。

图 3.7

2013–2024 年 PM_{2.5} 暴露浓度下降趋势 ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{年}$)

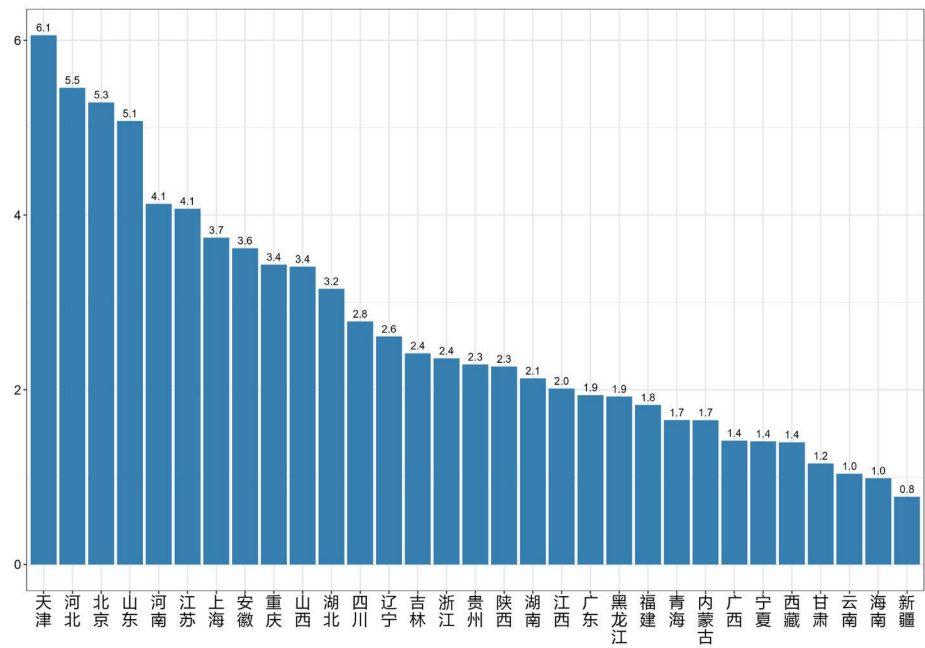


图 3.8

2013–2024 年 O₃ 暴露浓度上升趋势 ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{年}$)

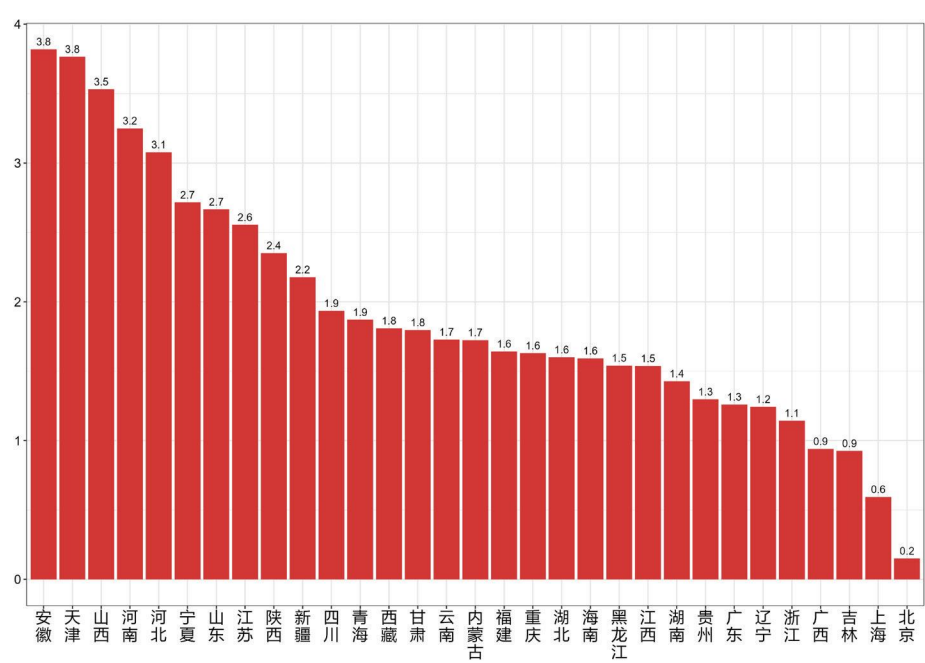


图 3.9

2013–2024 年 PM_{2.5} 超标天数减少趋势 (天/年)

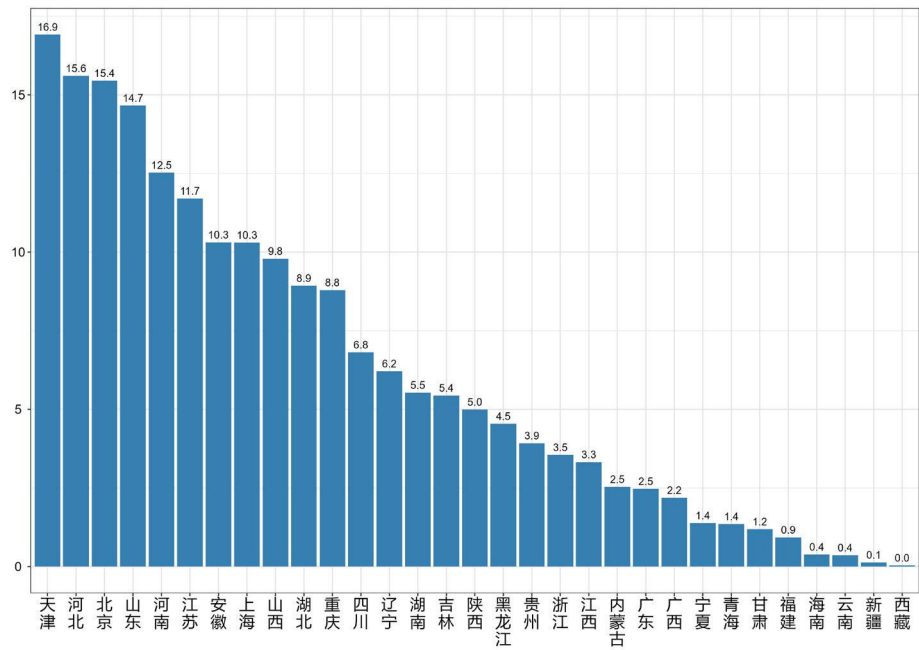


图 3.10

2013–2024 年 O₃ 超标天数增加趋势 (天/年)

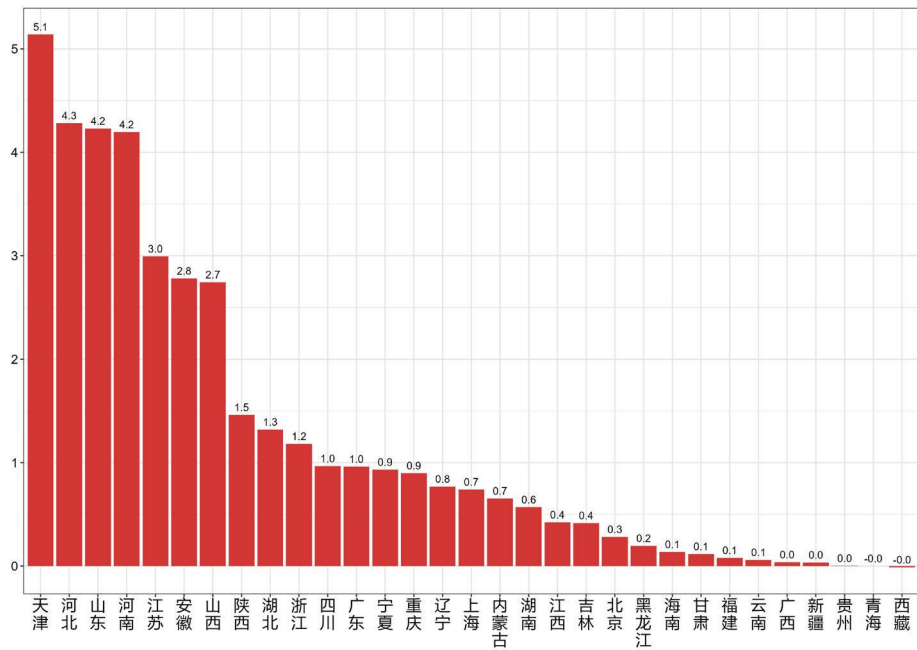


图 3.11

分人群的空气污染长期暴露情况（左：PM_{2.5}，右：O₃）

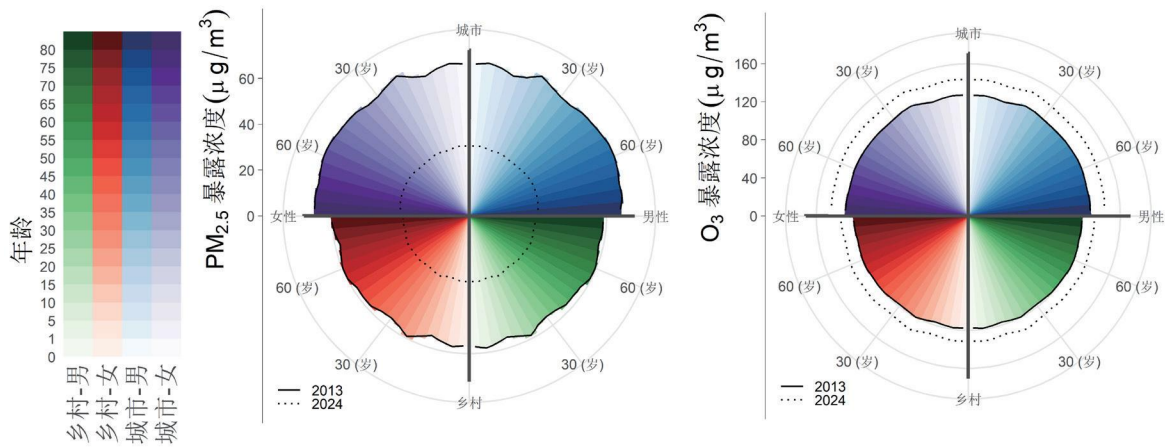
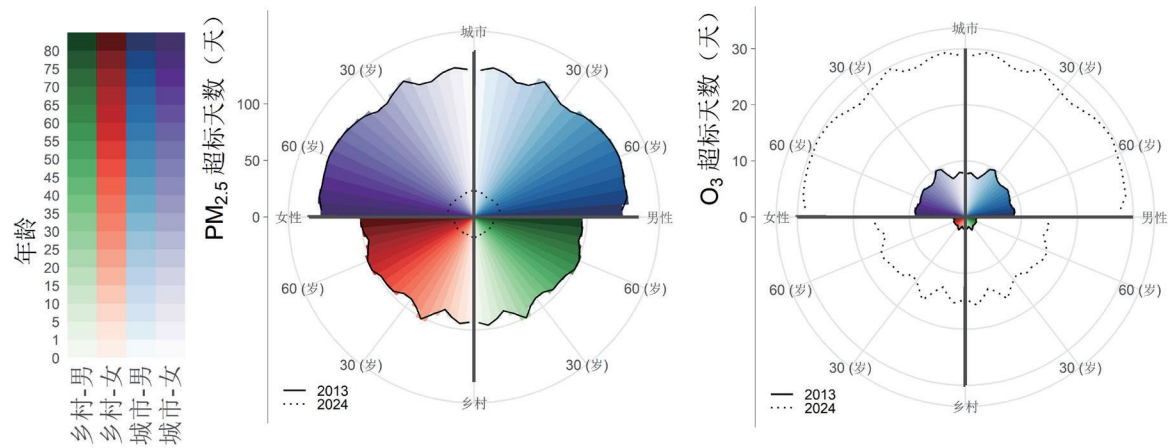


图 3.12

分人群的空气污染短期暴露情况（左：PM_{2.5}，右：O₃）



空气污染暴露相关健康 风险的改善情况

04



4.1 空气污染暴露健康风险的变化趋势

图 4.1 和图 4.2 展示了我国 2013-2024 年间空气污染长期和短期暴露导致的死亡人数变化趋势。整体来看，PM_{2.5} 暴露导致的死亡人数呈明显下降趋势，而 O₃ 暴露导致的死亡人数先升后降。

对于长期暴露，PM_{2.5} 导致的死亡人数由 2013 年的 166 万（95% CI: 127~176 万）下降至 2024 年的 108 万（95% CI: 86~121 万），显示出持续改善的成效；同期，O₃ 导致的死亡人数从 15 万（95% CI: 6~20 万）上升至 2019 年的 22 万（95% CI: 10~31 万），随后回落至 2024 年的 17 万（95% CI: 8~24 万），呈现“先增后降”的波动特征。

在短期暴露方面，PM_{2.5} 相关死亡人数由 2013 年的 21 万（95% CI: 18~24 万）下降至 2024 年的 8 万（95% CI: 7~9 万），下降幅度显著，但整体规模远低于长期暴露。O₃ 短期暴露死亡人数从 2013 年的 0.4 万（95% CI: 0.1~0.8 万）升至 2019 年的 0.9 万（95% CI: 0.2~1.7 万），2024 年回落至 0.8 万（95% CI: 0.2~1.3 万），总体影响较小但趋势与长期暴露一致。从月尺度变化趋势看，PM_{2.5} 与 O₃ 短期暴露的疾病负担高峰期呈现明显错

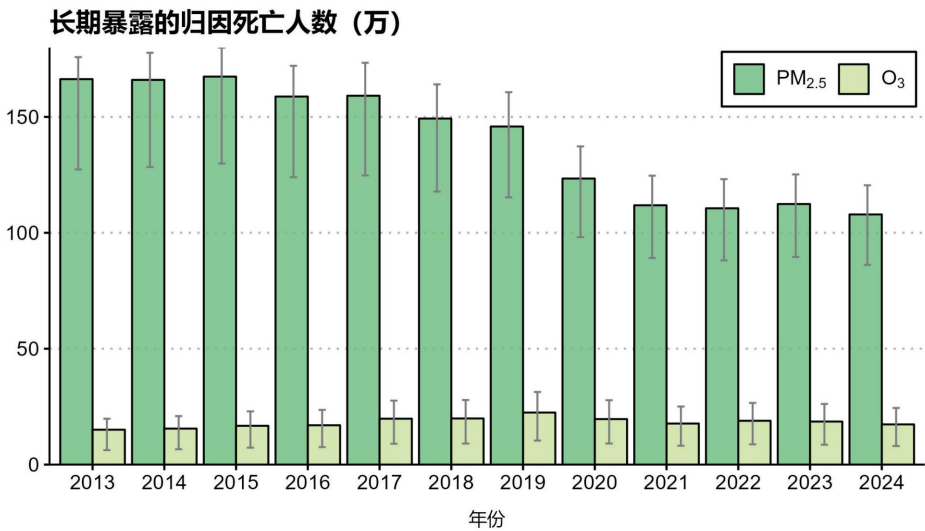
峰特征：PM_{2.5} 短期暴露疾病负担主要集中于冬季（12 月至次年 2 月），夏季（6 月至 8 月）则相对较轻；O₃ 则恰好相反，其疾病负担以夏季为高峰，冬季则显著减轻（图 4.3）。

综合来看，PM_{2.5} 仍是我国当前空气污染相关死亡负担的主要污染物，且长期暴露的影响远大于短期暴露。但近年来短期暴露健康风险的改善幅度更为显著，反映出我国在重污染天气应对与阶段性治理方面的政策成效。未来清洁空气行动应继续以改善 PM_{2.5} 为核心，同时关注 O₃ 暴露的结构性风险，以进一步降低整体疾病负担。

图 4.4 进一步揭示了高浓度短期暴露（前 5% 天数）对全年急性死亡负担的贡献。2013-2024 年间，PM_{2.5} 短期暴露致死效应呈明显集中化，全国范围内高浓度 PM_{2.5} 短期暴露造成的疾病负担占比由 10.4% 逐步升至 18.3%，在近三年（2022-2024）趋于稳定。与此相对，O₃ 短期暴露的总体疾病负担虽持续增加，但高浓度 O₃ 短期暴露的占比却由 28.6% 下降至 22.2%。其中，2017 年前呈现出稳定下降趋势，之后则转为波动状态。

图 4.5 比较了 2013 年与 2024 年 PM_{2.5} 和 O₃ 长、短期暴露相关的死亡负担。总体来看，不同空

图 4.1
2013–2024 年 PM_{2.5} 与 O₃ 长期暴露导致的超额死亡人数



气污染暴露类型导致的死亡负担从大到小排列依次为 $\text{PM}_{2.5}$ 长期暴露、 O_3 短期暴露、 $\text{PM}_{2.5}$ 短期暴露和 O_3 长期暴露。但值得注意的是，虽然 O_3 短期暴露的绝对死亡负担相对较小，其增长幅度却最为显著：2024 年的超额死亡人数是 2013 年的约 1.7 倍，远高于 $\text{PM}_{2.5}$ 长期暴露（0.6 倍）、 O_3 长期暴露（1.2 倍）以及 $\text{PM}_{2.5}$ 短期暴露（0.4 倍）。这一结果凸显出 O_3 短期暴露在未来空气污染健康风险中潜在的重要性，应在防控与预警中予以重点关注。

4.2 空气污染暴露健康风险的区域差异

图 4.6 和图 4.7 分别展示了我国各省（自治区、直辖市）2013 年与 2024 年 $\text{PM}_{2.5}$ 短期与长期暴露所致的归因死亡人数变化情况。总体来看，2024 年大多数地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 归因死亡人数较 2013 年显著下降，反映出空气质量改善带来的健康效益。长期暴露方面，山东（10.2 万人）、河南（9.2 万人）、江苏（8.0 万人）和四川（7.4 万人）位列全国前列；

图 4.2

2013–2024 年 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 短期暴露导致的超额死亡人数

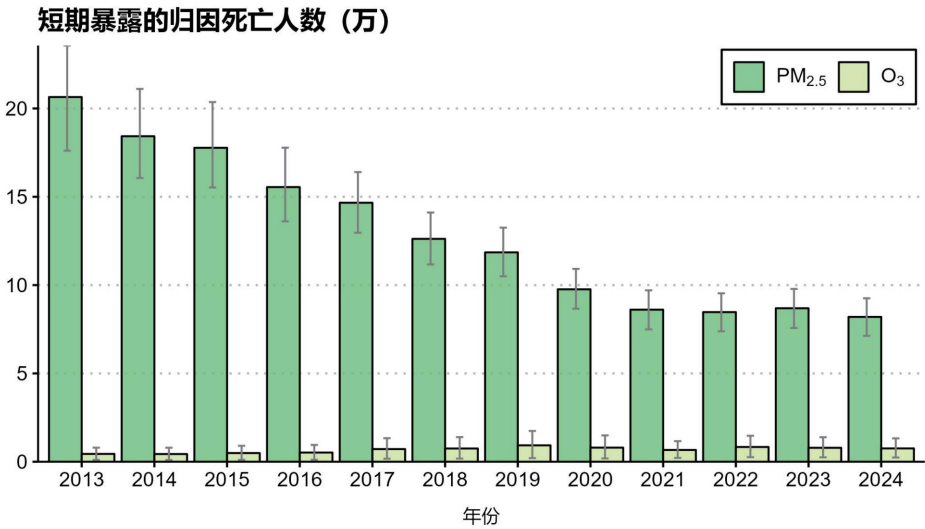
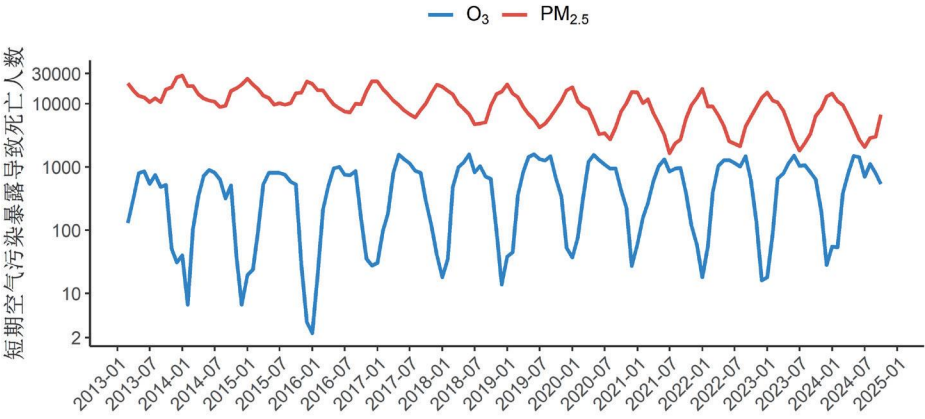


图 4.3

2013–2024 年 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 短期暴露导致的超额死亡人数变化趋势



西藏、青海、宁夏和海南归因死亡人数最低，均不足 0.5 万人。短期暴露方面，山东（0.82 万人）、河南（0.86 万人）、江苏（0.55 万人）仍为高位，而西藏、青海、宁夏和海南不足 0.05 万人。

图 4.8 和图 4.9 分别呈现了 2013 年与 2024 年各省因 O₃ 长期和短期暴露导致的归因死亡人数变化。与 PM_{2.5} 明显下降的趋势不同，多数省份 O₃ 长期暴露导致的死亡人数呈上升态势，显示其健康风险仍存在上升压力。长期暴露方面，2024 年山东（1.8 万

人）、江苏（1.4 万人）、河南（1.4 万人）和河北（1.1 万人）居于全国前列；西藏、青海、宁夏和海南死亡人数最低，不足 0.1 万人。短期暴露方面，高位省份与长期暴露相似，但整体人数远低于 PM_{2.5}。

总体来看，PM_{2.5} 和 O₃ 在不同地区的健康影响呈现出明显的区域差异：PM_{2.5} 长期和短期暴露均显示显著下降趋势，而 O₃ 长短期暴露仍有上升压力，提示未来空气污染防控需要兼顾两类污染物的特点，采取差异化治理策略。

图 4.4

高浓度 PM_{2.5} 和 O₃ 污染日（前 5%）短期暴露疾病负担全年占比的时间变化趋势

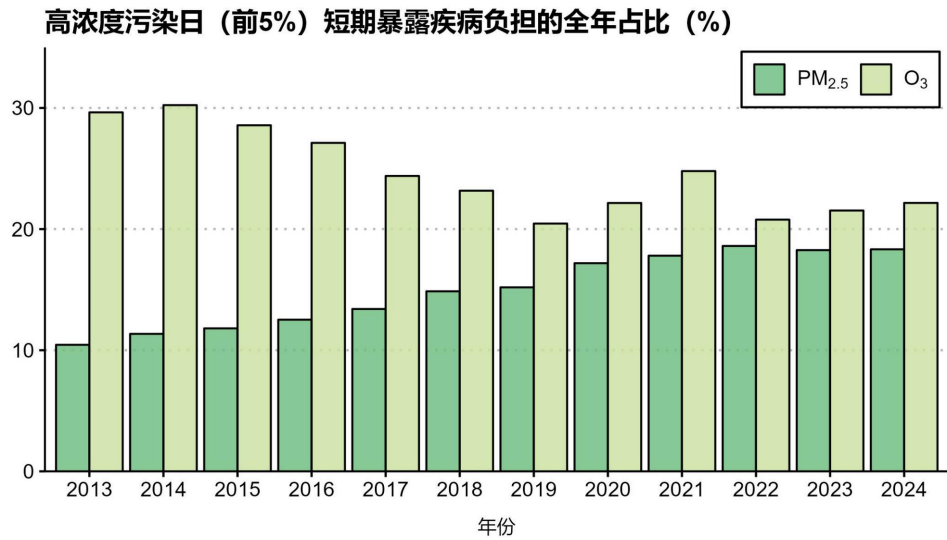


图 4.5

2013、2024 年 PM_{2.5} 和 O₃ 长短期暴露相关死亡人数的对比

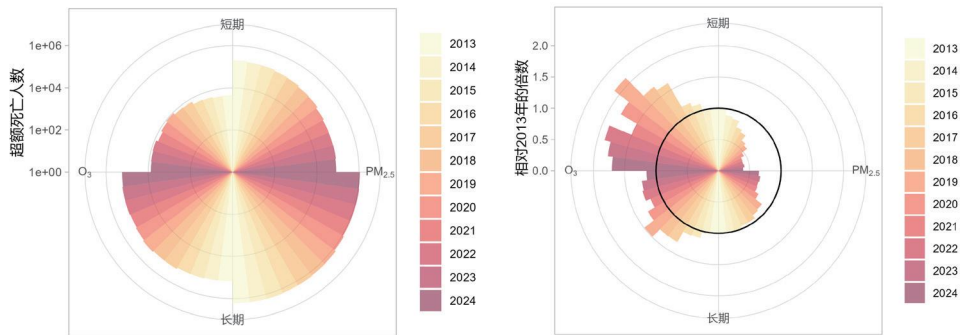


图 4.6

2013 和 2024 年 PM_{2.5} 长期暴露相关死亡的省份分布

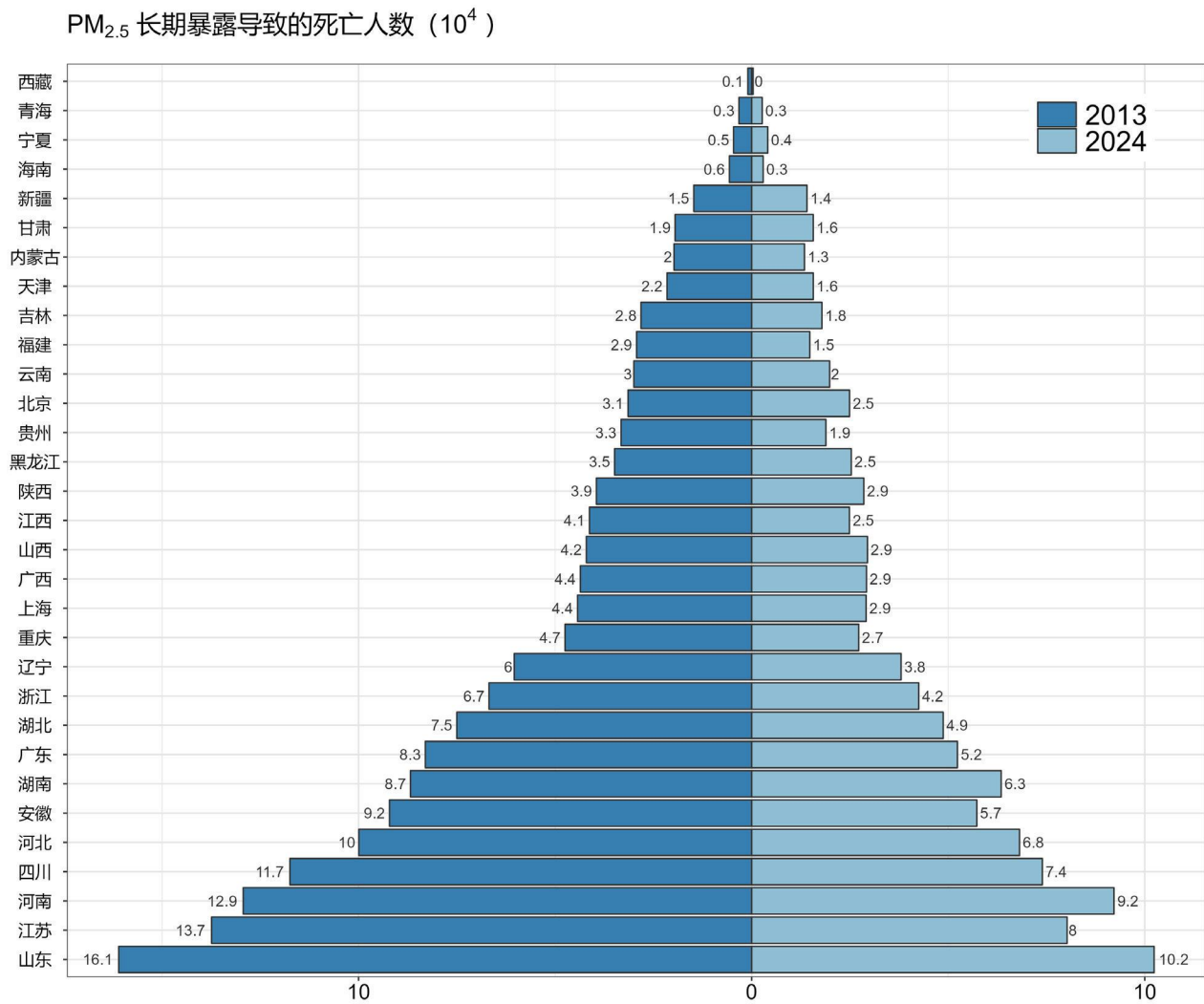


图 4.7

2013、2024 年 PM_{2.5} 短期暴露相关死亡的省份分布

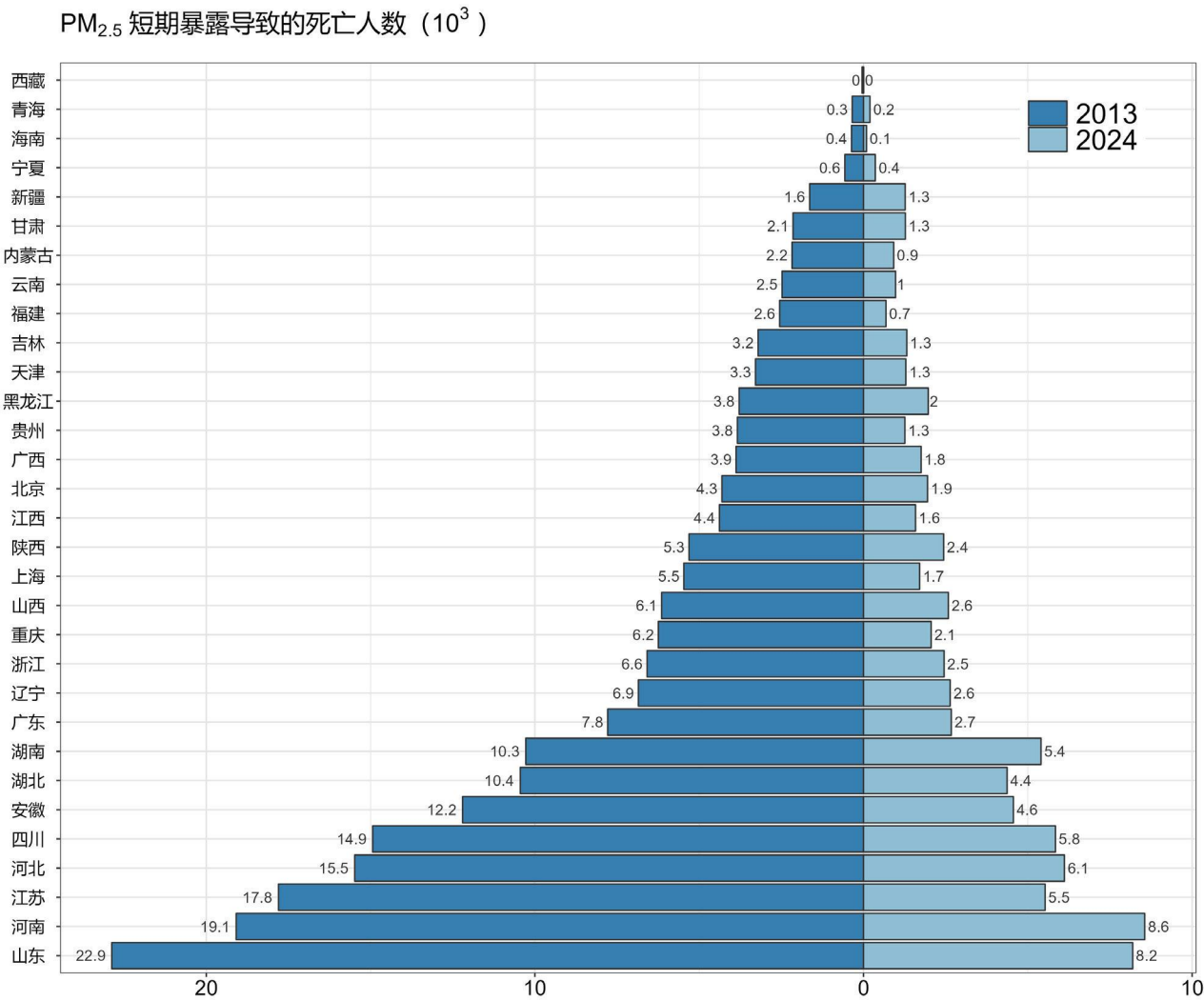


图 4.8

2013 和 2024 年 O₃ 长期暴露相关死亡的省份分布

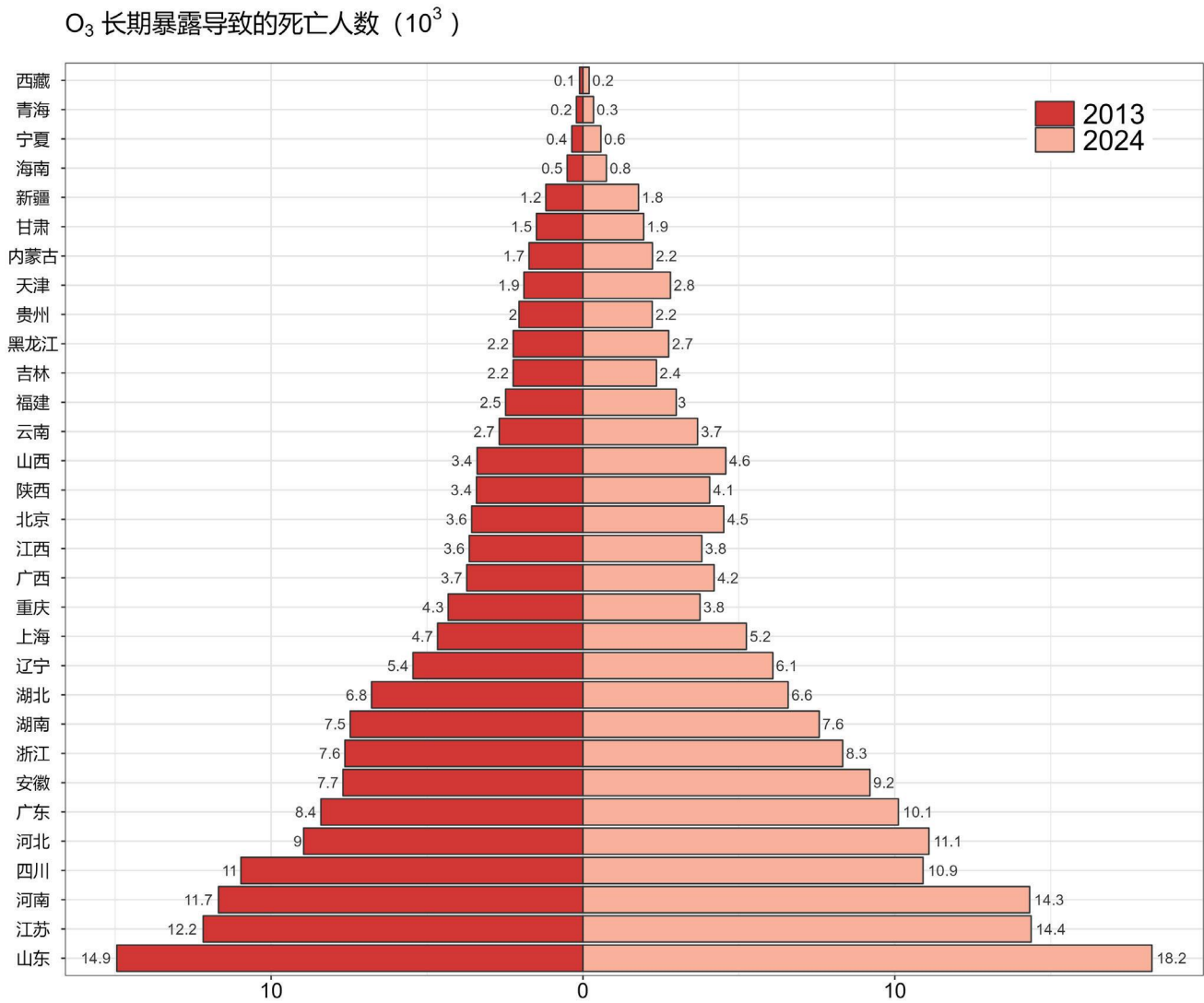
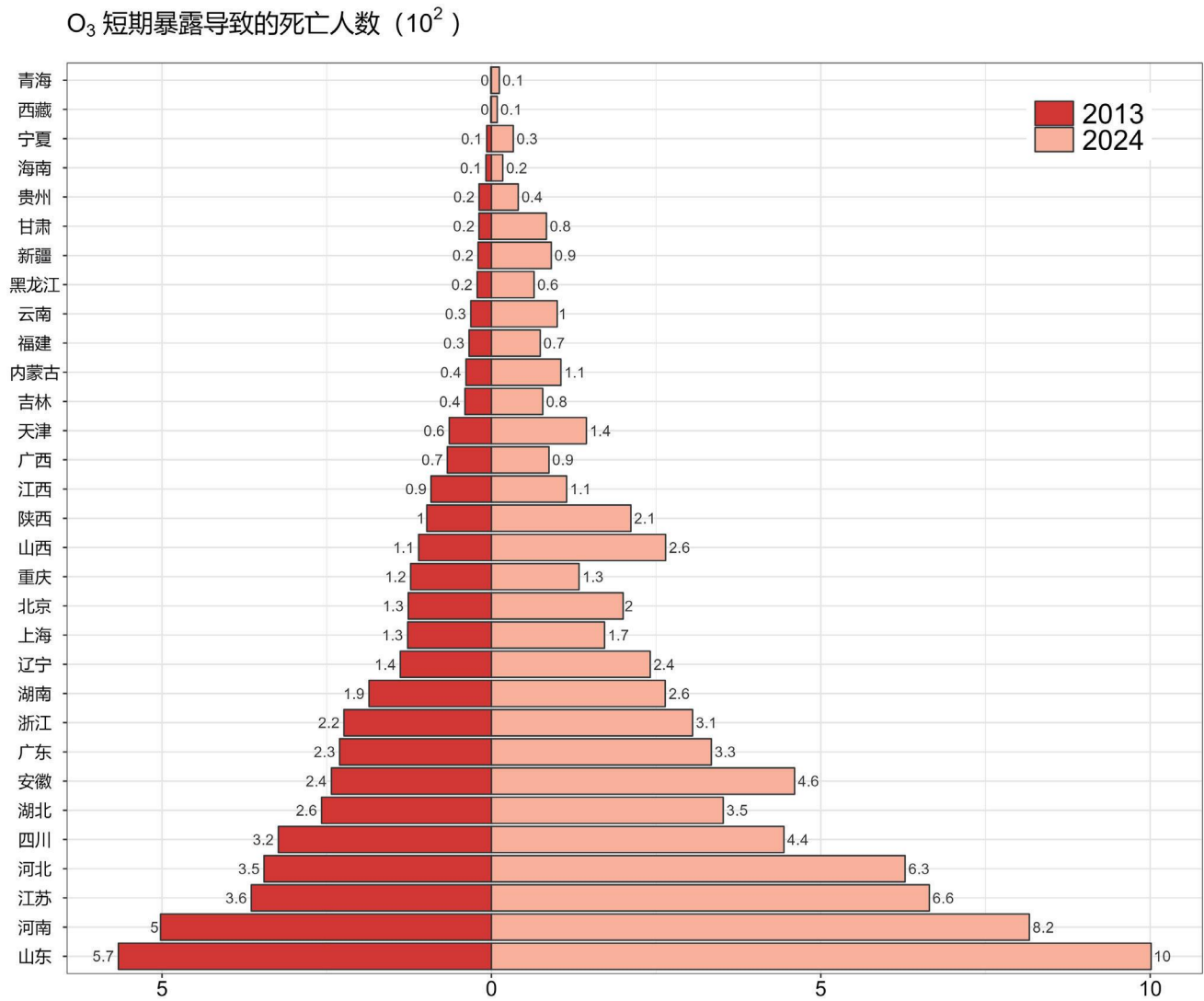


图 4.9

2013 和 2024 年 O₃ 短期暴露相关死亡的省份分布



短期暴露健康风险的 集中化特征

05



空气污染预警是预防和减轻短期 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 暴露健康损害的重要干预手段。然而，过于频繁的预警可能引发公众“预警疲劳”，削弱信息关注度与响应度，从而降低健康收益转化率。基于此，本报告选取全年 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 浓度最高的 18 天（约占全年 5%），评估这两类污染物在该高浓度时段引发的疾病负担及其占全年疾病负担的比例，以衡量空气污染预警的潜在健康收益。

图 5.1 展示了 2013 和 2024 年各省份在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高的前 5% 污染日中短期暴露疾病负担在全年的占比。2013-2024 年间，该占比整体上升，增幅最显著的区域集中在东部沿海省份，如海南、福建、广东、江西和浙江。这些地区人口密集、经济活动频繁，高浓度污染日对健康负担的贡献不断增加，呈现“占比上升与人口聚集叠加”的特征，显示出东部地区在空气污染治理与健康防护方面的高度脆弱性，也突出了开展精准预警的紧迫性。

图 5.2 呈现了各省份在 O_3 浓度最高的前 5% 污染日中短期暴露疾病负担在全年的占比。与 $\text{PM}_{2.5}$ 不同， O_3 相关健康风险更加高度集中于少数高污染日，全国多个地区占比超过 50%，表明仅需针对约 5% 的高污染日开展预警，即可规避大部分 O_3 健康风险。2013-2024 年间，全国整体占比下降，但黑龙江、吉林和南部部分省份（如贵州、广西、福建、海南、江西、云南、广东）仍维持较高水平。例如贵州省 2024 年大部分地区占比仍超过 50%，说明在该区域实施精准 O_3 预警具备较高的成本效益和健康收益潜力。

综上， $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 短期暴露在时间趋势与空间分布上呈现差异： $\text{PM}_{2.5}$ 疾病负担整体趋轻但集中化增强， O_3 疾病负担整体趋重但在部分区域高度集中。两者均凸显空气污染预警在减少短期健康损害方面的关键作用，尤其应针对东南部人口稠密地区的高污染日开展精准预警，以实现健康收益最大化。



图 5.1

PM_{2.5} 浓度最高的前 5% 污染日中短期暴露疾病负担在全年的占比

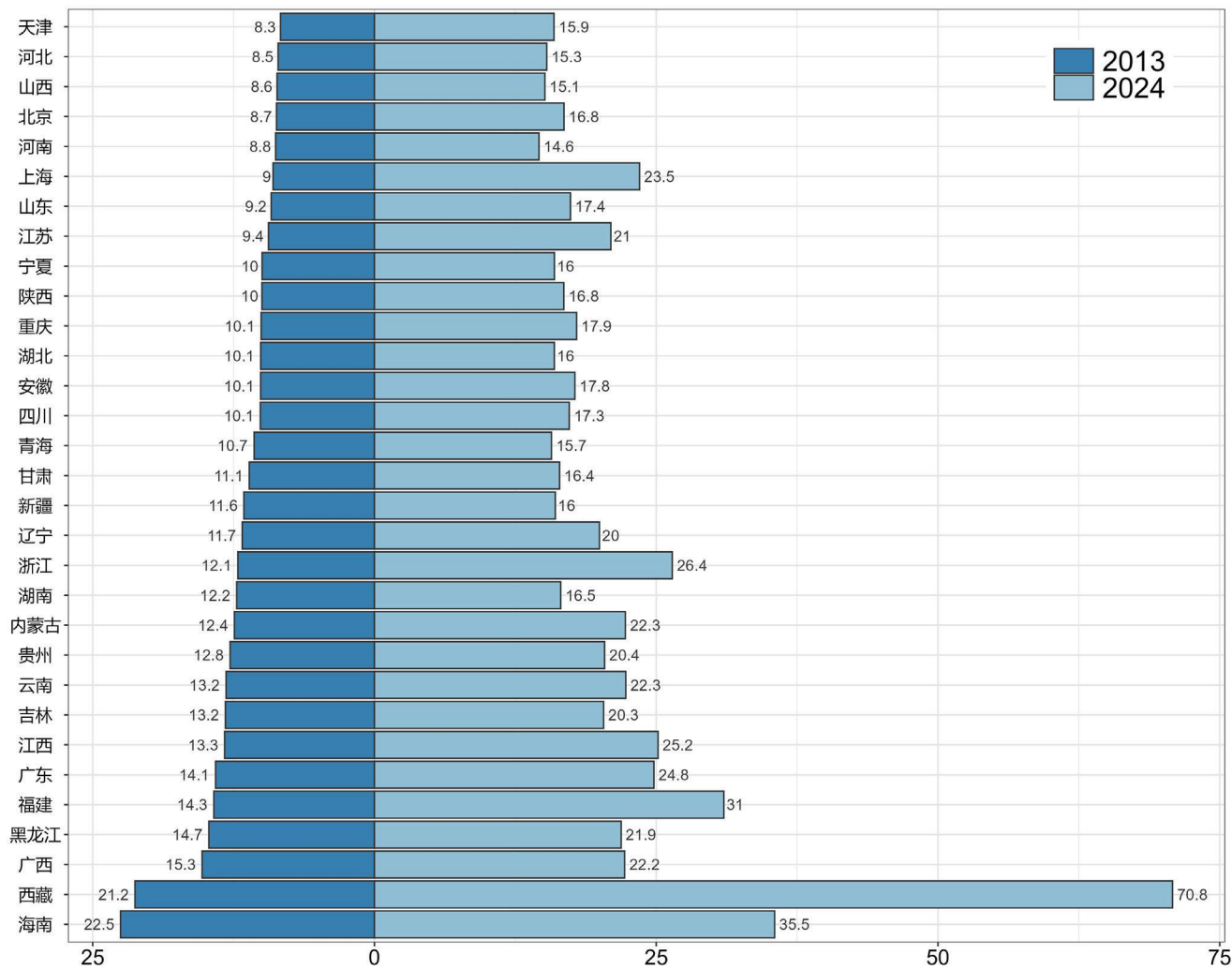
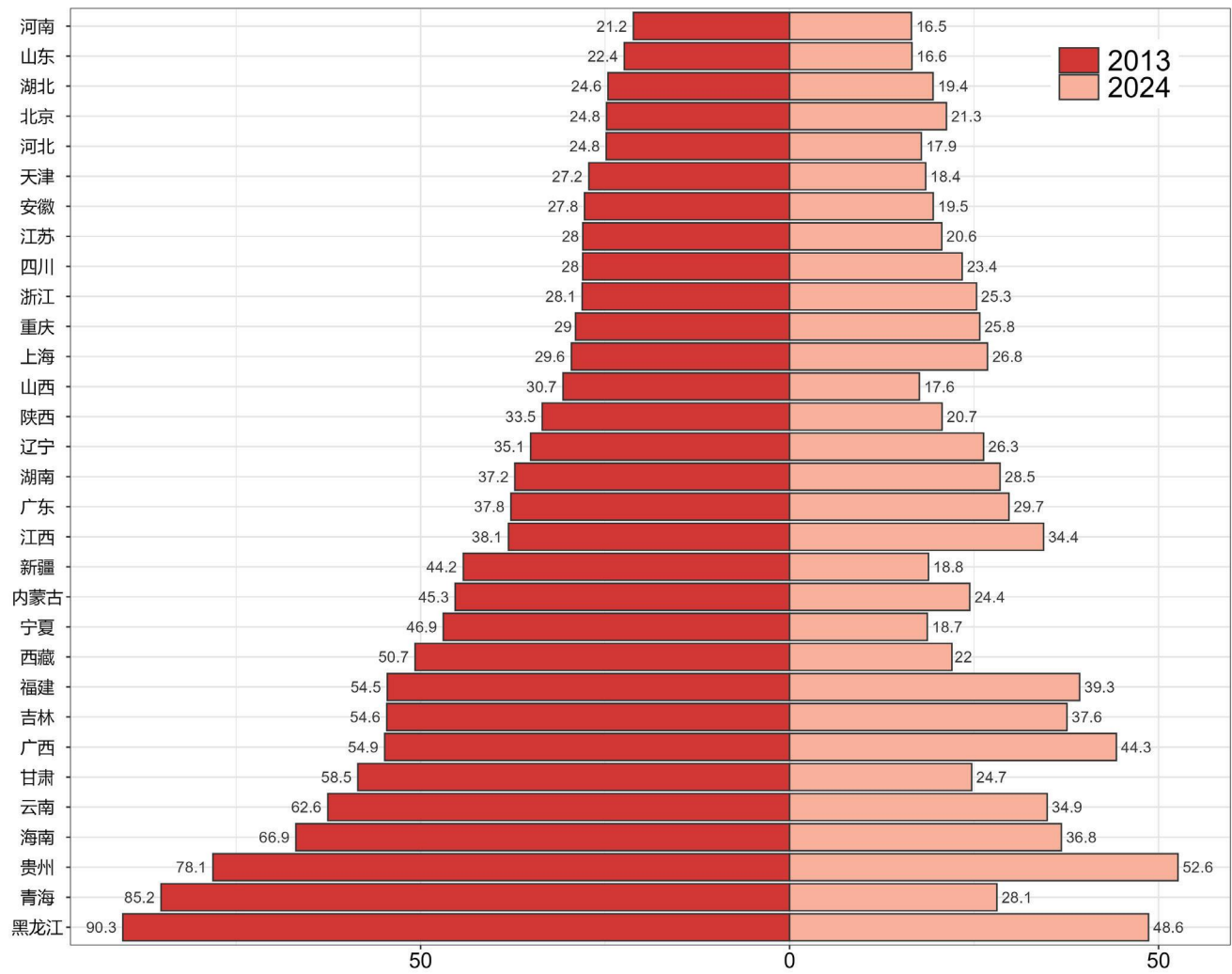


图 5.2

O₃ 浓度最高的前 5% 污染日中短期暴露疾病负担在全年的占比



结论与展望

06



本研究系统分析了 2013–2024 年间我国空气污染暴露及其健康风险的变化特征，并从时间、空间、人群等多个维度揭示了空气污染长期暴露和短期暴露改善对公共健康的影响。研究结果显示：

PM_{2.5} 健康风险结构转变，慢性负担持续下降，但短期急性风险日趋集中

我国 PM_{2.5} 污染治理成效显著，其长期暴露导致的过早死亡人数由 2013 年的 166 万降至 2024 年的 108 万，短期暴露死亡人数也从 21 万降至 8 万。这标志着持续深入的清洁空气行动从根本上减轻了人群面临的普遍性慢性健康威胁。然而，在浓度整体下降的背景下，PM_{2.5} 暴露健康风险呈现出新的特征：其健康影响更多地与少数高污染事件挂钩。

研究发现，PM_{2.5} 短期暴露的健康效应集中化趋势增强。2024 年，全年浓度最高的前 5% 污染日所导致的急性死亡负担，占全年短期暴露总负担的比例已升至 18.3%，较 2013 年（10.4%）有显著提升，且在空气质量较优的海南、福建、广东等东部沿海省份尤为突出，呈现“占比上升与人口聚集叠加”的特征。这表明，在气候变化导致极端天气多发的背景下，应对短期、高强度的污染事件的重要性进一步凸显。

O₃ 短期急性风险增幅显著，具有典型的季节性和城市型特征

与 PM_{2.5} 暴露相关健康负担下降形成对比的是，O₃ 的短期急性健康风险正在快速上升。2024 年，归因于短期 O₃ 暴露的死亡人数较 2013 年增加了约 1.7 倍。O₃ 污染具有典型的季节性和城市型特征，其健康负担高度集中在夏季，对公共健康构成的结构性威胁日益凸显。

值得关注的是，O₃ 的急性风险在时间分布上极度集中。研究显示，全国多个地区全年约 50% 的 O₃ 急性健康负担，仅来源于全年浓度最高的前 5% 污染日。这一特征意味着，针对少数关键污染日实施精准干预，即可以极高的成本效益规避大部分健康风险。

健康风险分布存在明显区域与人群差异，精准防控是提升效益的关键

空气污染的健康改善效益在全国范围内并非均等分布。从空间上看，山东、河南、江苏等传统人口大省和重点污染区域，尽管改善幅度显著，但当前的绝对疾病负担依然位居全国前列。同时，O₃ 暴露负担在华北、华东等地区相较 2013 年仍有上升，提示区域治理重点需动态调整。

从人群分布看，城市居民的 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露水平普遍高于农村，短期暴露的城乡差距更为突出。此外，老年人、已有心肺基础疾病的高危人群对短期污染暴露更为敏感。这些差异要求未来的治理策略需要基于信息化手段实现对脆弱人群的精准防护，从而最大化健康收益的边际效应。

建立健康导向的精准防控体系，是未来治理的必然方向

当前空气污染健康风险的结构转变，要求环境治理政策从以“浓度达标”为核心，转向以“健康效益最大化”为核心。本研究揭示的风险集中化特征表明，建立分季节、分污染物的国家级急性健康风险预警体系刻不容缓。例如，在冷季重点防控 PM_{2.5} 急性暴露，在暖季重点防控 O₃ 急性暴露，能够以最小社会成本锁定最大健康收益。同时，必须深化 PM_{2.5} 与 O₃ 的协同防控，并持续关注区域差

异化，方能应对气候变化等不确定因素带来的新挑战，最终实现清洁空气行动的全面健康福祉。

综上所述，PM_{2.5} 暴露健康风险正稳步下降，O₃ 健康风险虽近期有所缓解，但短期高浓度暴露增幅明显且仍具结构性压力。未来应进一步强化精准防控、高浓度天数预警及差异化干预措施，以实

现空气污染改善的全面健康效益最大化。建立季节性预警机制、推动健康效益导向的评估体系、强化PM_{2.5} 与臭氧协同控制，将成为下一阶段空气污染健康风险管理的重点。从“浓度达标”转向“健康优先”，是实现空气质量改善健康效益最大化的关键路径。



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): 2162–203.
- [2] AGENCY U S E P. Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter [Z]. 2019
- [3] AGENCY U S E P. Integrated Science Assessment (ISA) for Ozone and Related Photochemical Oxidants [Z]. 2013
- [4] TURNER M C, ANDERSEN Z J, BACCARELLI A, et al. Outdoor air pollution and cancer: An overview of the current evidence and public health recommendations [J]. *CA–Cancer J Clin*, 2020, 70(6): 460–79.
- [5] RAJAGOPALAN S, AL–KINDI S G, BROOK R D. Air Pollution and Cardiovascular Disease JACC State–of–the–Art Review [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 72(17): 2054–70.
- [6] ORGANIZATION W H. Ambient (outdoor) air pollution [Z]. World Health Organization. 2022
- [7] LIU H, LEI J, LIU Y, et al. Hospital admissions attributable to reduced air pollution due to clean–air policies in China [J]. *Nature medicine*, 2025.
- [8] 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.
- [9] COX L A, JR. Air Pollution and Mortality in the Medicare Population [J]. *JAMA*, 2018, 319(20): 2134–5.
- [10] NIU Y, ZHOU Y, CHEN R, et al. Long–term exposure to ozone and cardiovascular mortality in China: a nationwide cohort study [J]. *The Lancet Planetary Health*, 2022, 6(6): e496–e503.
- [11] QIAO J, WANG Y, LI X, et al. A Lancet Commission on 70 years of women's reproductive, maternal, newborn, child, and adolescent health in China [J]. *Lancet*, 2021, 397(10293): 2497–536.
- [12] YITZHAKI S. On Using Linear Regressions in Welfare Economics [J]. *Journal of Business & Economic Statistics*, 1996, 14(4).
- [13] GENG G N, XIAO Q Y, LIU S G, 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): 12106–15.

扫码查看更多



北京大学环境健康



亚洲清洁空气中心