

中国空气质量改善的健康效应评估



本报告由北京大学空气气候健康（AiR-Climate-Health, ARCH）研究团队编制



亚洲清洁空气中心提供支持



作者列表

朱 彤

中国科学院 院士

北京大学 环境科学与工程学院 教授

薛 涛

北京大学 公共卫生学院 研究员

王若涵

北京大学 公共卫生学院

佟明坤

北京大学 公共卫生学院

杨欣悦

北京大学 环境科学与工程学院

宫继成

北京大学 环境科学与工程学院 研究员

刘 俊

北京科技大学 能源与环境工程学院 副教授

张世秋

北京大学 环境科学与工程学院 教授

艾思奇

北京大学 环境科学与工程学院 博士后

李芳洲

北京大学 环境科学与工程学院 博士后

曹靖原

北京大学 环境科学与工程学院 博士后

鲁 鸿

北京大学 公共卫生学院

刘恒毅

北京大学 公共卫生学院

倪雪秋

北京大学 公共卫生学院

邓建宇

北京大学 公共卫生学院

王彦滢

北京大学 环境科学与工程学院

文字编辑

亚洲清洁空气中心 万薇

版式设计

亚洲清洁空气中心 传播组

目录

执行摘要

-----03—06

01 引言

-----07—14

02 研究内容与方法

-----15—18

03 主要研究发现

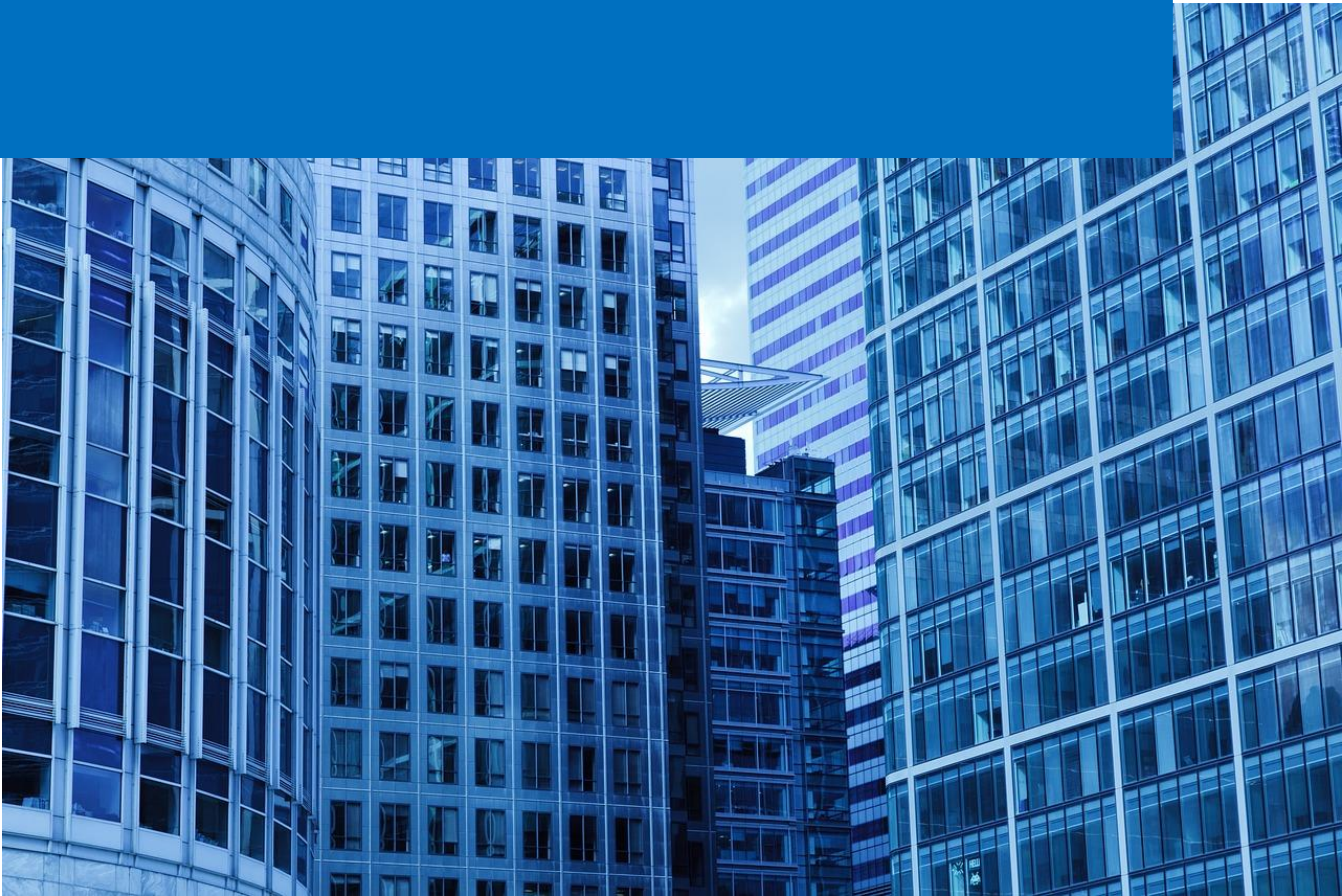
-----19—40

04 结论

-----41—42

05 参考文献

-----43—44



执行摘要

空气污染暴露是危害人群健康的首要风险因子之一。越来越多的研究证据表明，对于儿童，空气污染暴露会伤害其呼吸系统发育、诱发呼吸道感染和加剧哮喘；对于成人，空气污染暴露会增加肺癌、缺血性心脏病、卒中等致死性疾病，并可能与慢阻肺、糖尿病和退行性神经疾病存在关联。

定量评估空气污染暴露的健康风险是相关环境健康研究成果的集成，可以为相关政策标准的制定和成效评估提供关键科学依据。在中国，2012年修订和发布的《环境空气质量标准（GB3095-2012）》是大气污染防治进程的一个里程碑，在PM_{2.5}首次纳入标准后，实施了包括“大气十条”（2013-2017）和“蓝天保卫战”（2018、2019、2020）等关键行动政策，使得空气质量快速改善。我们需要关注这一历程和变化带来了什么样的健康改善，为中国在取得大气污染防治的阶段性胜利后如何迈向下一个新征程提供指引。

全球疾病负担研究（Global Burden of Diseases, GBD）促进了相关定量评估技术的推广，过去已有不少研究报告了PM_{2.5}和O₃暴露的中国疾病负担证据和健康影响变化。然而，已有研究仍然存在部分局限性，例如不同风险评估结果之间并不可比、无法区分死亡年龄对疾病负担的影响，并且很多研究直接采用全国统一基线分析，无法全面捕捉近年来在不同区域、不同人群结构下，城市化、老龄化等中国社会典型特征带来的空气污染健康效应的变化。



因而，十分有必要针对中国近年来大气污染治理带来的空气质量快速改善，利用最新的方法和输入数据、开展统一的健康影响评估。

本报告应用了最佳可得的健康风险评估方法，以2013年为参照、定量分析2013-2020年期间空气质量提升带来的健康改善效益，及其人群和空间分布。

本报告依循全球疾病负担评估的研究方法，将PM_{2.5}和臭氧（O₃）长期暴露相关成人早逝的总人数作为测算空气污染健康风险的主要指标，并将二氧化氮（NO₂）相关早逝作为敏感性分析指标。

为总结健康改善效益，本报告进一步计算“大气十条”和“蓝天保卫战”期间空气污染归因的预期寿命变化，并利用洛伦兹曲线和基尼系数分析了健康改善效益的均衡程度。结果显示：

“大气十条”与“蓝天保卫战”期间，与健康息息相关的大气污染物暴露浓度快速下降

“大气十条”期间，PM_{2.5}人口加权暴露浓度从69μg/m³降低到47μg/m³，经过“蓝天保卫战”治理，进一步降低到36μg/m³，接近我国现行标准（PM_{2.5}年均浓度35μg/m³）。从地区分布来看，华北地区PM_{2.5}人口加权暴露浓度的下降幅度最为明显。全国暴露在PM_{2.5}浓度超标水平中的人口占比从2013年的96%下降到2017年的77%，再降至2020年的47%。

“大气十条”期间O₃人口加权暴露浓度从111 μg/m³升高到121μg/m³，但随着“蓝天保卫战”的推进，O₃人口加权暴露污染有所改善，2020年人口加权浓度降至115μg/m³，仍然高于2013年基准暴露水平。从地区分布来看，华北和西北地区升高幅度尤为明显，而在长江三角洲、珠江三角洲等南方区域，O₃人口加权暴露浓度有轻微下降。从暴露在超标浓度水平（100μg/m³）的人口比例来看则有所下降，从2013年的83%下降到2017年80%，随后又降至2020年的73%。

“大气十条”实施的五年期间，人口加权NO₂暴露浓度从32μg/m³降低到28μg/m³，“蓝天保卫战”三年期间，进一步降至24μg/m³。其中，华北地区的下降幅度最大，长三角地区NO₂污染的改善趋势也较为明显。暴露在NO₂超标浓度水平（100 μg/m³）的人口比例也下降显著，从2013年的28%下降到2020年的2%。

更清洁的空气带来预期寿命增加，深度治理让更多人受惠

综合考虑PM_{2.5}和O₃暴露水平变化，“大气十条”期间预期寿命增加1.94月，“蓝天保卫战”期间预期寿命增加3.87个月；考虑预期寿命增加的人群分布，“大气十条”阶段，一半收益集中于约1/4人口，基尼系数为0.32；蓝天保卫战期间，一半收益集中于1/3人口，基尼系数为0.18，地区之间的不平等现象有所缓解。



“大气十条”和“蓝天保卫战”期间， NO_2 浓度降低避免了0.86和1.12个月的预期寿命损失，同样提示空气污染相关的健康风险在加速下降。

由于各地基础空气质量、年龄结构、健康基线水平的差异，导致空气质量改善与健康改善并不总是成正比。 $\text{PM}_{2.5}$ 健康收益受暴露改善幅度的影响，但并不完全由暴露改善决定——当暴露改善幅度相当时，在平均年龄更高的地区，健康收益更大。从地区分布来看，空气质量改善幅度最大的是京津冀地区的“2+26”城市，但健康改善最多的地区是长三角和四川盆地。此外，空气质量改善具有一定城乡差距，但健康改善的城乡差距

并不明显。

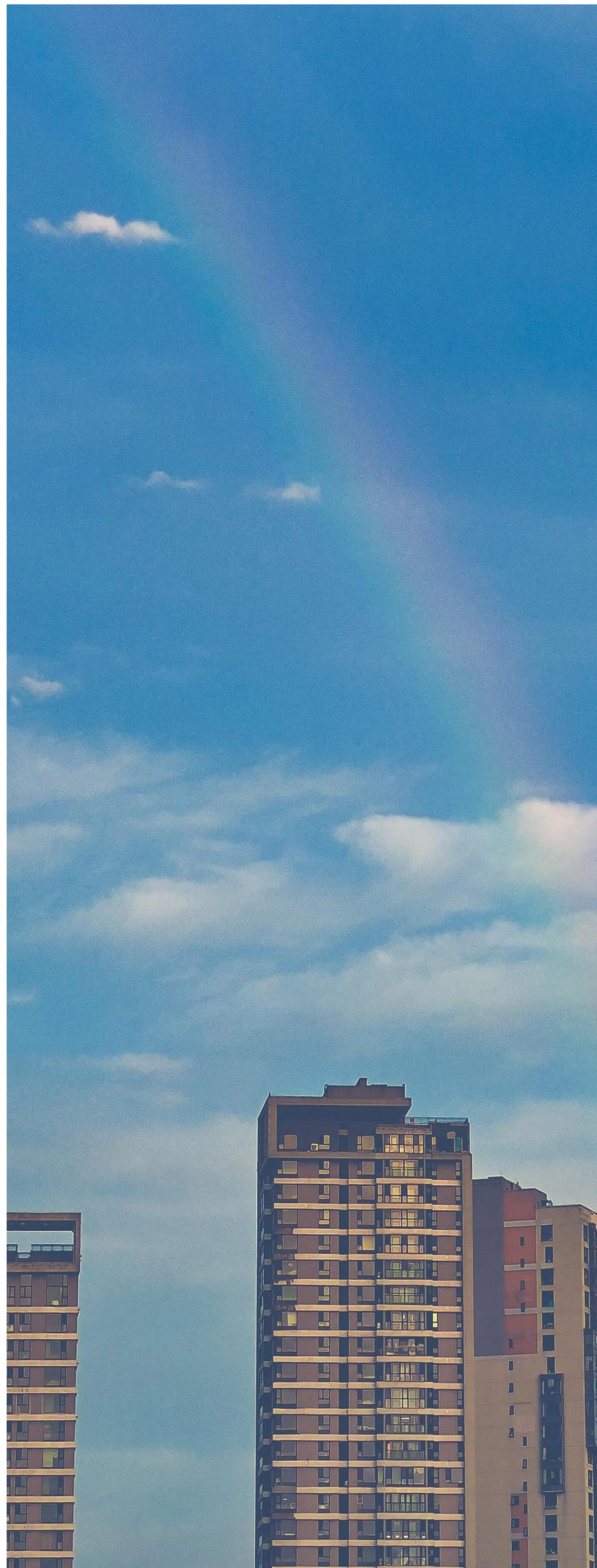
值得一提的是， $\text{PM}_{2.5}$ 与死亡的暴露反应关系呈现亚线性的特征，也就是说在浓度更低的区间，同样幅度的暴露改善将带来更大的健康收益。因此，在“大气十条”期间空气质量改善的基础上，“蓝天保卫战”期间的深度治理使得 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进一步下降，其健康效应提升的边际效应更强。总的来说，从“大气十条”到“蓝天保卫战”，由于强调了多污染物的协同控制、且不断深化的空气质量改善程度，空气治理促进健康的效率逐步放大、普惠程度逐步提高。

关注空气污染易感人群，进一步改善空气质量为“老龄化”社会减少疾病负担

为了进一步保护公众健康，世界卫生组织（WHO）2021年更新了《全球空气质量指导值》，其中最重要的变化是大幅加严了PM_{2.5}、NO₂的指导值，并增设了O₃高峰季指导值，同时也设置了过渡阶段目标供各国的空气质量管理参考。其中，PM_{2.5}年均指导值从10μg/m³降低至5μg/m³；第一阶段过渡目标值为35μg/m³，与我国现行标准相当。

评估显示，2020年中国PM_{2.5}人口加权暴露浓度与世卫组织第一阶段过渡目标值接近，NO₂人口加权暴露浓度低于第二阶段过渡目标值，O₃仍处于第一阶段过渡目标值以上。如果将《全球空气质量指导值》作为清洁空气的理想目标，我国当前空气质量仍有待进一步提高。

更深度的空气污染治理将使得易感人群也得到更大的健康保护，包括儿童、老年人，患有慢阻肺、心血管疾病、哮喘等基础疾病的人群，他们暴露在PM_{2.5}污染中更为脆弱。由于空气污染是诱发呼吸和循环系统慢性疾病的重要诱因，人口急剧老龄化会使得相关疾病负担占比增加，甚至抵消空气质量改善带来的健康收益。随着我国人口结构老龄化程度的进一步加深，加之社会对人口生育的重视，进一步开展多种空气污染物的深度、协同治理，以减少空气污染相关有害健康效应变得愈发重要。



01 引言

中国的空气污染治理和健康改善

——成绩与挑战





在过去七十余年，从发达国家到发展中国家，工业化和城市化造成了不同程度的空气污染危机，使其成为一项全球环境挑战。而人们对空气污染的健康风险认知也在逐步累积，推动着政策、标准和行动计划的出台和升级，促进了空气质量的改善和对公众健康的保护。

在中国，2012年修订和发布的《环境空气质量标准（GB3095-2012）》是大气污染防治进程的一个里程碑，在PM_{2.5}首次纳入标准后，我国经历了空气质量快速改善的“黄金十年”。我们需要关注这一历程和变化带来了什么样的健康改善，以及中国如何在“蓝天保卫战”取得阶段性胜利后，迈向下一个十年的新征程。

本报告通过健康效应的定量分析和评估回答上述决策者、学界、公众都十分关注的问题，这也是相关环境健康研究成果的集成过程，可以为过去大气污染治理关键政

策、标准的成效评估、未来政策的制定和标准的修订提供科学证据和信息参考。

空气污染的健康效应

多种空气污染物被认为能够危害人体健康。常规空气污染物包括臭氧（O₃）、二氧化氮（NO₂）、二氧化硫（SO₂）、一氧化碳（CO）四种气态污染物和颗粒态污染物（又称气溶胶）。颗粒污染物可以进一步区分为空气动力学直径小于2.5微米的细颗粒物（PM_{2.5}）、小于10微米的粗颗粒物（PM₁₀），是包括多种化学成分的混合物。

毒理和病理学研究发现，在短期或长期暴露于上述空气污染物后，人体可能诱发氧化应激、系统免疫等多种致病机制，并且

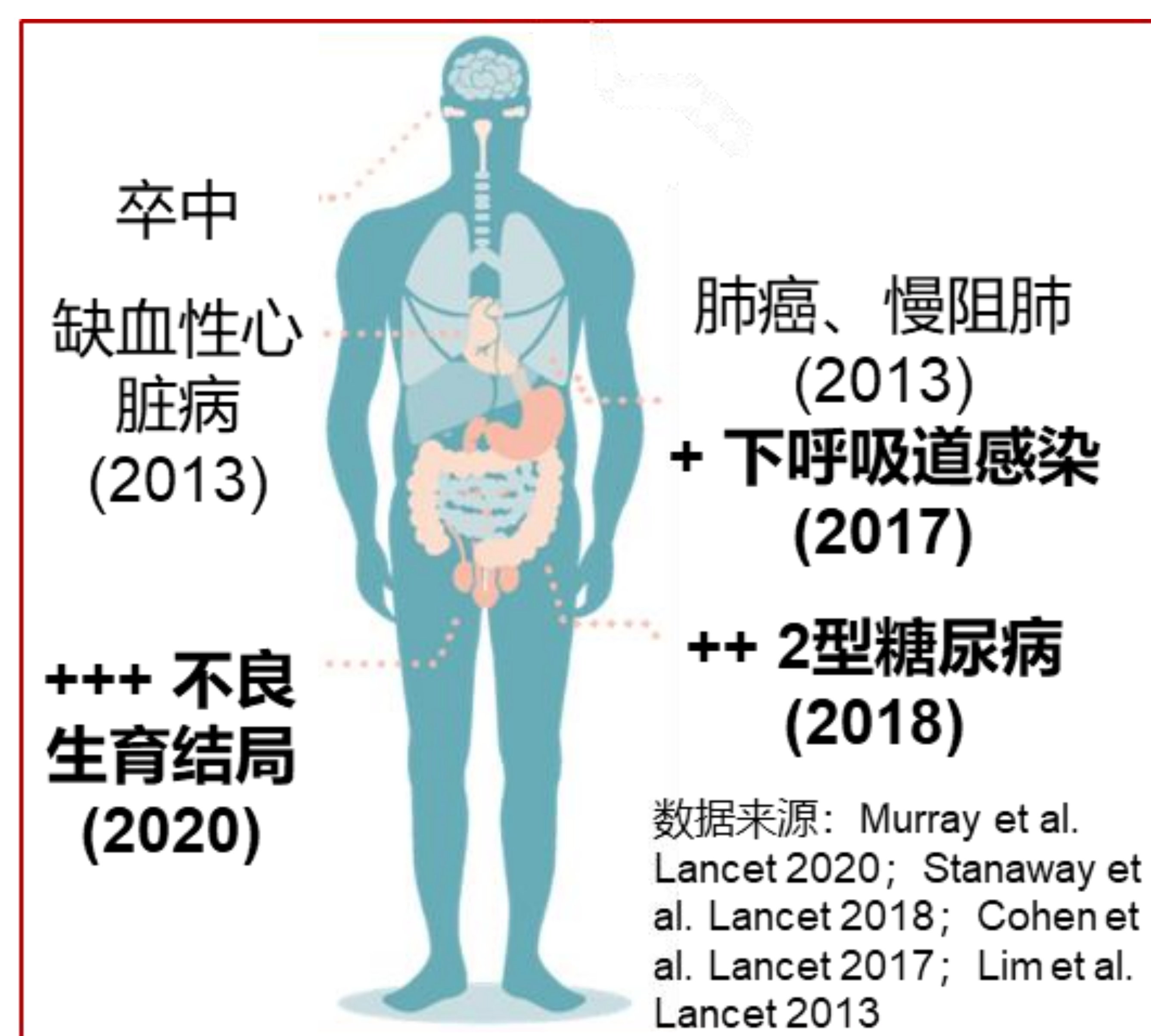
大量人群研究发现上述空气污染物暴露与多种健康结局存在统计关联。

在过去的十五年中，得益于科学家对于空气污染影响人类健康的不断研究，我们对于六种主要污染物如何影响人体各方面的健康有了更深入的了解和清晰的认识，也观察到了空气污染导致越来越多疾病种类的证据。例如，对于儿童，空气污染暴露会伤害其呼吸系统发育、诱发呼吸道感染和加剧哮喘¹。对成人，空气污染暴露会增加肺癌、缺血性心脏病、卒中等致死性疾病^{2,3}，并可能与慢阻肺、糖尿病和退行性神经疾病存在关联^{4,5}。

然而对于不同“暴露-结局”组合，研究进度并不相同、证据强度也有差异，究竟哪些“暴露-结局”组合应该被决策者所采纳、用于健康风险测算，需要对已有证据进行全方位的评估。例如，全球疾病负担研究（Global Burden of Diseases, GBD）选择了相关性更低、甚至呈现负相关的PM_{2.5}和O₃两种污染物作为暴露指标，仅考虑长期健康效应，选择疾病归因死亡作为健康结局。

最新的GBD评估涵盖的“暴露-结局”组合包括：PM_{2.5}长期暴露与低出生体重、早产、下呼吸道感染、二型糖尿病、慢性阻塞性肺病、肺癌、脑卒中、缺血性心脏病的组合，以及O₃长期暴露与慢性阻塞性肺病的组合。需要说明，其它空气污染物与疾病的关联并非不重要，但由于多种污染物之间的复杂相关性，暴露与疾病之间的因果关系有待进一步确认，并且不同空气污

染物的疾病风险存在“重复计算”，因此没有将多种污染物全盘纳入评估。总之，如何准确测算多种空气污染物联合暴露的疾病风险，仍是未被彻底解决的学术难题。



引言-图1 全球疾病负担所采纳的空气污染暴露相关健康结局

空气污染的疾病负担

定量评估空气污染暴露的健康风险是相关环境健康研究成果的集成，是相关政策、环境标准制定的关键科学证据。

描述空气污染暴露与健康结局发生概率的数学方程被称为暴露反应关系，是开展健康风险评估的核心方法。为了构建某一空气污染物（如 $PM_{2.5}$ ）与全因死亡的暴露反应关系，传统的方法是通过文献综合、统计模型（例如荟萃回归分析、非线性拟合等）关联某一种健康结局的相对风险度（Relative Risk, RR）估算值与得出该RR所对应的人群平均暴露水平（如平均 $PM_{2.5}$ 浓度）。例如，美国环保署（USEPA）曾基于上述方法，结合经济负担评估等多种技术手段，开发了 BenMAP 模型（Environmental Benefits Mapping and Analysis Program），用于测算 $PM_{2.5}$ 和 O_3 暴露导致的超额死亡，以及心脑血管和呼吸道疾病发病、住院、不良症状，并利用经济学方法将不同类型的健康风险转化为经济损失。

空气污染健康风险评估技术的推广得益于GBD研究进展，尤其是2014年Bernett et al. 发表了 $PM_{2.5}$ 长期暴露与归因死亡的IER模型（integrated exposure-response model）。然而，随着人群研究证据的积累，GBD所采用的疾病负担测算方法逐步进化，而这也增加了空气污染健康风险的不确定程度。总之，空气污染的疾病负担是基于“当前可获得的最佳证据”的健康

风险测量：基于相同的模型设定所得出的疾病负担内部可比，但风险定量的绝对值具有不确定性，并且在用于不同研究的横向对比前、需事先明确其模型设定的一致性。



借助GBD开发的模型，既往研究报告了 $PM_{2.5}$ 和 O_3 暴露的中国疾病负担证据。在长期 $PM_{2.5}$ 暴露方面，据IER模型估计，2013年约122万（95%CI：105~137万）25岁及以上成人的早死可归因于 $PM_{2.5}$ 暴露，包括的4种死因，即卒中、缺血性心脏病、慢阻肺和肺癌，分别占51%，25%，14%和10%。得益于有效的空气污染防控手段，2015年人口加权 $PM_{2.5}$ 暴露水平减低21.5%，减少了9.1%的死亡（约11万），主要减少的是卒中和慢阻肺导致的死亡。⁶ 2017年归因于 $PM_{2.5}$ 暴露的死亡人数进一步降低到100万（95%CI：90~120万），⁷ 当再进一步加入成人下呼吸道感染和二型糖尿病归因的死亡作为健康结局时，2017年中国归因于大气 $PM_{2.5}$ 暴露的死亡人数约124万（95%CI：108~139万）。⁸

根据global exposure mortality models (GEMMs) 模型估计, 2018年中国约140万归因于PM_{2.5}暴露导致的死亡, 比2015年减少20万人。⁹ 在暖季O₃暴露方面, GBD只纳入了慢阻肺导致的死亡为结局, 中国2017年约17.8万 (95%CI: 6.8~28.6万) 归因于O₃暴露的早死。⁸

21世纪后，区域性复合大气污染特征初步显现。通过实施区域联防联控机制，显著地改善了2008-2010年间举办的北京奥运会、上海世博会和广州亚运会会议期间的空气质量，为我国空气质量改善以及相关标准的修订提供了宝贵科学依据。2012年，我国对《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）再次进行修订，增设了PM_{2.5}浓度限值和臭氧8小时平均浓度限值，是近年来中国空气污染治理迅速获得成效的起点。

为了达成新的标准，2013年9月国务院出台《大气污染防治行动计划》（也称“大气十条”）¹⁰，全面强化燃煤、工业源、移动源、城市面源等污染源减排和综合治理，大力推进产业结构升级、技术改造革新和能源结构调整，完善环境监管，标志着由顶层设计、自上而下逐级分解且通过政治激励保障执行的大气污染规制行动开始实施，污染规制得到空前加严。“大气十条”要求截至2017年，京津冀、长江三角洲、珠江三角洲等区域PM_{2.5}细颗粒物浓度分别下降25%、20%、15%左右，其中北京市PM_{2.5}年均浓度控制在60μg/m³左右。

2014年4月和2015年8月全国人大常委会分别修订通过了《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国大气污染防治法》¹¹，被称为“史上最严”环保法和大气污染防治法。2012年，党的十八大报告中首次提出努力建设美丽中国任务。2017年，党的十九大报告再次提出建设美丽中国，并将美丽中国确定为建成现代化强国的新目标，即到2035年我国基本实现社会主义现代化，生态环境根本好转，美

丽中国目标基本实现。秉承习近平“绿水青山就是金山银山”理念、践行可持续发展国策，极大促进了我国空气污染的治理。在完成“大气十条”治理目标后，2018年6月国务院进一步出台了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》（也称“蓝天保卫战”），以京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原等区域为重点，在2018-2020年持续开展大气污染防治行动，并强调VOCs的控制、以期达到PM_{2.5}和O₃的协同治理。近年来，碳减排碳达峰目标的提出为空气污染治理注入新动能，2022年生态环境部等六部门制定了《减污降碳协同增效实施方案》，提出基于环境污染物和碳排放高度同根同源的特征，进一步优化治理路线，要求到2030年，大气污染防治重点区域碳达峰与空气质量改善协同推进取得显著成效，推动减污降碳协同增效。



空气污染治理的健康效应

“大气十条”实施后，我国空气质量得到明显改善。我国PM_{2.5}的年平均浓度从2013年的67.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 大幅下降到2017年的45.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ¹²，且减排政策被证明是PM_{2.5}改善的主要驱动因素。已有部分研究采用实证分析的方法，观测到“大气十条”政策对公共健康的改善作用。本研究团队基于“大气十条”这个准实验研究背景，利用多个具有全国代表性的调查数据，分析了政策前后PM_{2.5}改变在对多种亚临床指标的改善情况，包括肺功能²、血脂代谢¹³、肾功能²、活动能力¹⁴、精神健康¹⁵⁻¹⁷、医疗支出¹⁸等方面。例如，对于肾功能，研究发现，PM_{2.5}浓度降低可显著改善多种肾功能生物标志物，包括肾小球滤过率（GFRcys），血尿素氮（Blood Urea Nitrogen, BUN）和尿酸（Uric Acid, UA）。与之类似，血脂研究表明，PM_{2.5}降低可以显著降低低密度脂蛋白（Low-Density Lipoprotein, LDL）和总胆固醇（Total Cholesterol, TC）水平，揭示了PM_{2.5}暴露与脂质代谢的因果关系。

国内外其他学者也尝试通过多种因果推断的理论和方法，力图揭示“大气十条”政策实施所带来的空气质量改善和健康收益。例如，Yu et al.利用国内271个地级市2008-2018年的面板数据，采用双重差分法（difference-in-difference, DID）、倾向得分匹配（propensity score matching, PSM）的双重差分模型和三重差分模型（difference-in-difference-in-differences）

量化了“大气十条”政策对中国空气质量的影响，结合平行趋势检验和稳健性分析证实了清洁空气行动显著降低了试点地区PM_{2.5}和SO₂的污染浓度水平¹⁹。徐志虎等基于DID模型检验了“大气十条”政策对我国中老年人群的精神健康影响，研究发现，自该政策实施后，PM_{2.5}的浓度下降明显改善了我我国中老年人的抑郁程度和认知功能，其中，高响应组的中老年人抑郁程度下降了7.55%（95% CI: 2.83%, 12.03%），认知水平提高了2.70%（95% CI: 0.25%, 5.22%）²⁰。Ke Ju等利用国内一项前瞻性队列-中国家庭小组研究（Chinese Family Panel Study, CFPS）的调查数据，采用反事实因果实证分析、工具变量固定效应模型等检验手段，揭示了空气污染长期暴露与中老年人身心健康及自我健康评定之间的负性因果关联，证明了清洁空气行动对老龄人口的重要保护作用^{21,22}。

综上所述，亚临床指标改善的日积月累将能够带来更长远的健康改善，最终达到避免疾病发生，降低相关超额死亡风险。尽管，空气污染健康效应存在复杂性，利用真实世界数据几乎不可能全面捕捉空气质量改善的健康效益。因此，有必要采取风险评估方法，利用证据外推的方式、定量分析空气污染相关疾病负担减少，揭示“大气十条”和“蓝天保卫战”健康效应的全貌。

全球空气质量的新标准

在1958年，世界卫生组织（World Health Organization；WHO）发布的技术报告中开始关注空气污染对人体健康的损害²³。基于科学界在其后近30年对该问题的研究和认知的逐步积累，WHO欧洲办事处于1987年发布了首个基于健康保护的空气质量指南（Air Quality Guidelines；AQG），并不定期更新，目的在于协助各国政府和民间社会减少空气污染以及对人类的负面影响。WHO上一次发布AQG是在2006年（Air quality guidelines—global update 2005），涵盖了包括颗粒物（PM）和臭氧（O₃）在内的多项空气污染物的指导值，是我国空气质量标准（National air quality standards；NAAQs）修订的重要依据，我国现行标准的PM_{2.5}等关键指标浓度限值与WHO第一阶段目标（Interim Target -1；IT-1）一致。

随着空气污染的健康效应的证据越来越多，在2021年9月22日，WHO经过文献调研，通过科学的文献综述方法，制定了新的AQG，针对PM_{2.5}、PM₁₀、O₃和NO₂污染提出了更为严格、更具挑战性的目标，并规划了更长远的治理路径。与2005年版的AQG相比，本次修订的主要变化概括如下：（1）基于低浓度水平健康影响的队列研究新证据，收紧了PM_{2.5}、PM₁₀的长期暴露指标——年均指导值，其中PM_{2.5}年均指导值由10μg/m³下调到5μg/m³；（2）基于“多国家多城市”（multi-country multi-city，MCC）研究提供的数据²⁴，更新了部分污染物的概率分布特征（即24小时平均浓度的第99百分位与年

均值的比率），并据此重新评估了O₃日最大8小时平均值，结果与2005版AQG一致，更新了PM_{2.5}、PM₁₀的24小时指导值，制定了NO₂和CO的24小时指导值；（3）基于NO₂长期暴露与全因死亡率和呼吸道疾病死亡率之间关联的新证据，将NO₂的年均指导值从40μg/m³变更为10μg/m³^{25,26}；（4）基于长期臭氧浓度与总死亡率和呼吸道死亡率之间关联的健康影响证据，增设了O₃浓度高峰季平均值（即，暖季峰值），指导值为60μg/m³^{27,28}。

在2012年将PM_{2.5}首次纳入环境空气质量标准后，并且连续实施了“大气十条”和“蓝天保卫战”的强力治理政策后，2020年，中国337个城市中有202个城市实现6项标准污染物的年平均浓度全部达标，337个城市的国控监测站点PM_{2.5}整体年均浓度为33μg/m³，首次低于年均浓度标准水平。伴随着中国自2013年以来的空气质量持续改善，现行标准对于大部分已达标城市不再具有强有力的引领和驱动作用。是否要启动新一轮空气质量标准的修订已经提上研究议程，如何缩小现实可行的环境质量标准与AQG之间的差距，需要更深入的研究与决策权衡。



02

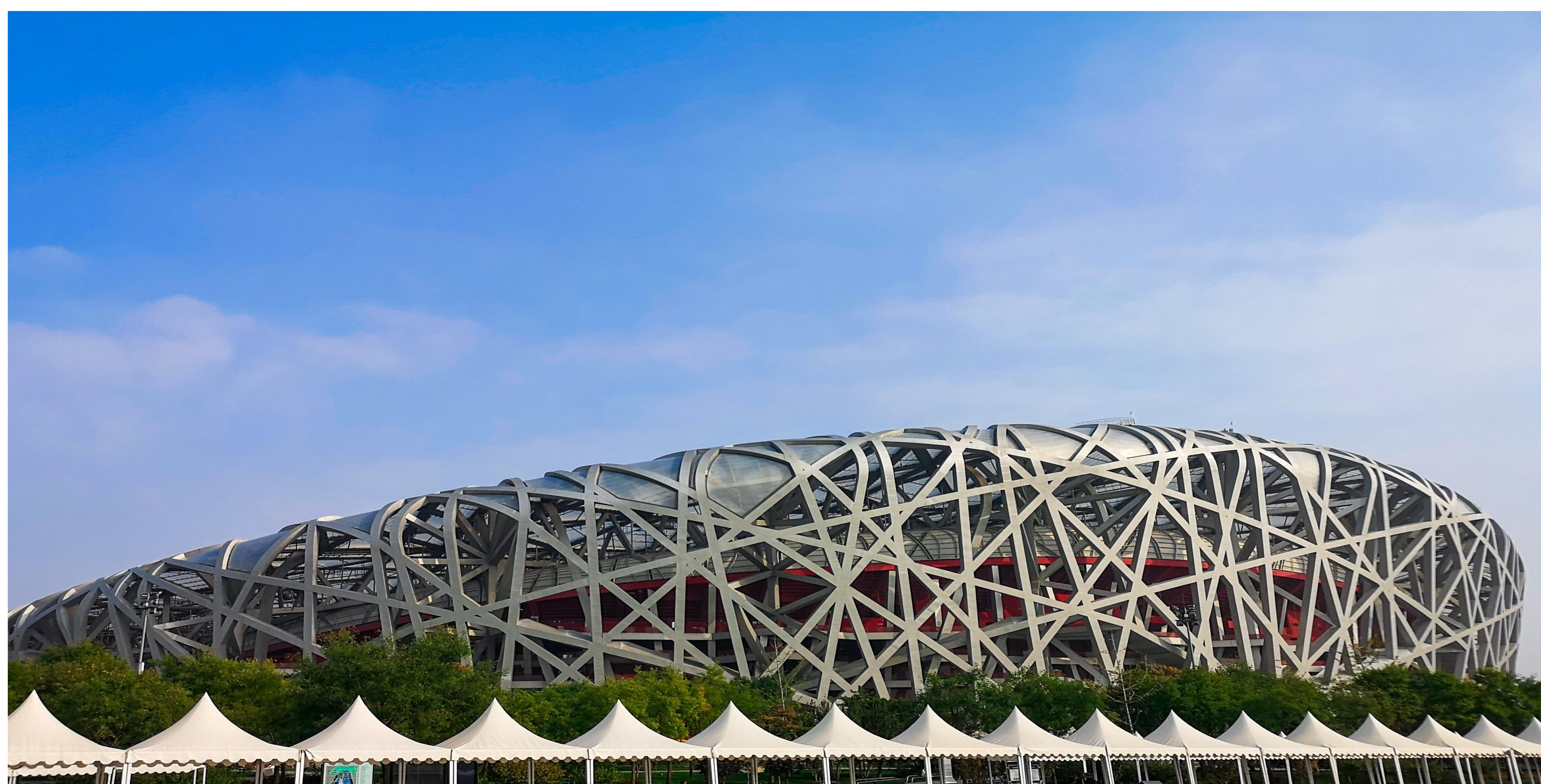
研究内容与方法

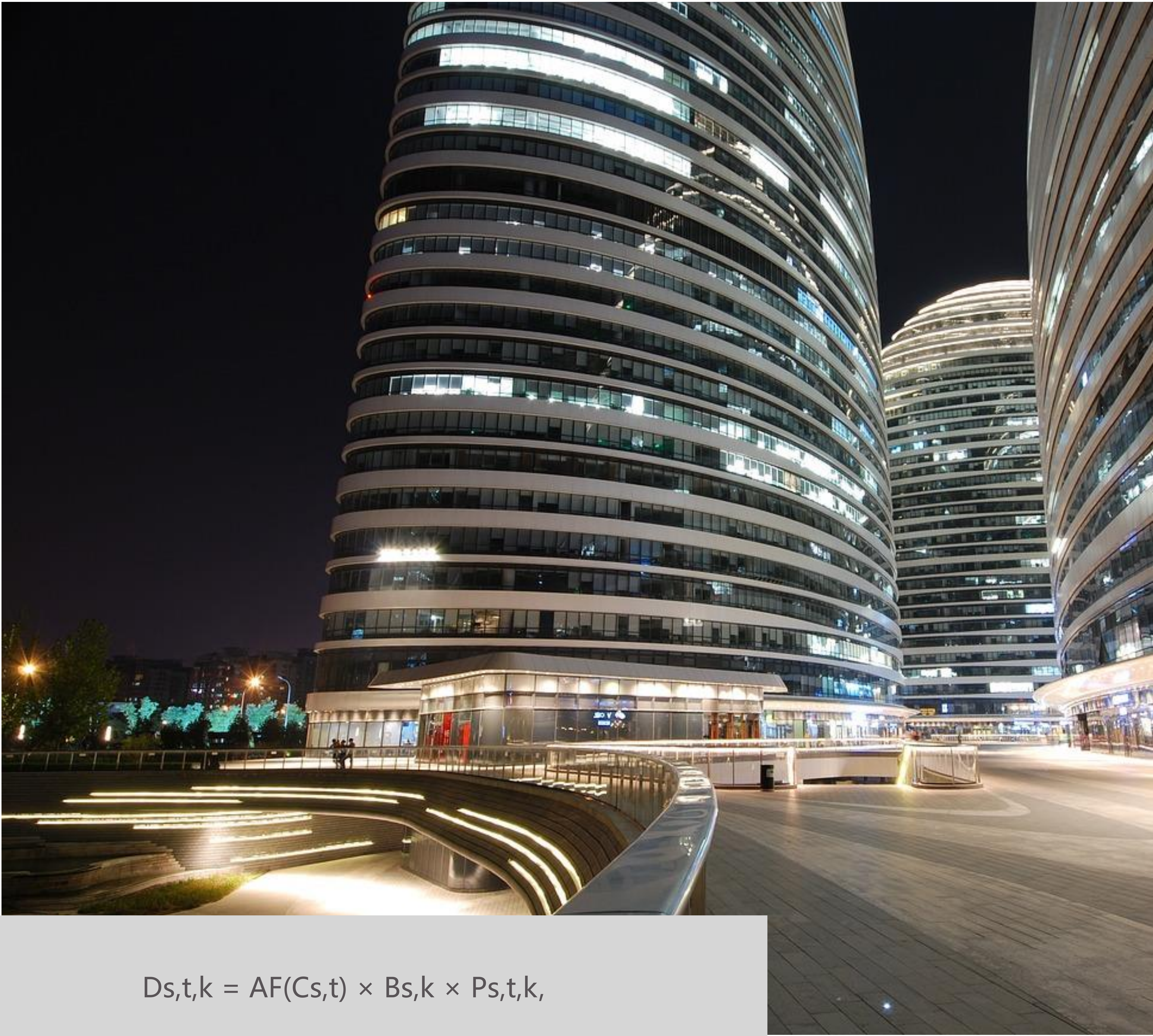


WHO制定更为严格的空气质量指导值为中国空气污染治理提出了新的挑战，为了更好、更快的推动空气质量改善，总结并且全面评估“大气十条”和“蓝天保卫战”的健康改善效应，可以为持续空气污染治理的注入更多动力。有鉴于此，该报告利用经典风险评估方法和高质量的输入数据，针对影响健康的主要空气污染物PM_{2.5}和O₃、以及典型城市空气污染物NO₂开展系统分析，估算2013-2020年间上述污染物相关的超额死亡风险、预期寿命损失等疾病负担指标，分析相关健康风险的变化趋势和地区分布，并且进一步利用基尼系数检验健康改善效益的人群分布是否均衡。本报告所采用的评估方法可参考已发表的研究成果，并且简述如下：

报告使用集成机器学习算法得到的PM_{2.5}和O₃浓度数据^{29,30}与来自WorldPop (<https://www.worldpop.org>) 的人口分布信息，将城市化地图与基于性别、年龄与城乡居住情况的人口地图合并，为亚

组人群开发出一系列覆盖全国的网格化地图（1 × 1 km），在此基础上进行空气污染物的疾病负担评估。首先，利用贝叶斯、正则化修剪工具（MR-BRT）开发的暴露反应函数³¹，确定每个空间网格下污染暴露的相对风险，并进一步转换成归因危险度百分比；其中，PM_{2.5}暴露的病因特异性死亡包括缺血性心脏病、中风、肺癌、慢性阻塞性肺疾病、下呼吸道感染和二型糖尿病，浓度取12个月平均值，O₃导致超额死亡则主要考虑慢性阻塞性肺疾病，浓度取暖季峰值^{32,33}。随后，根据网格化的基线死亡率、人口数与归因危险度百分比，计算特定年份与亚组人群长期PM_{2.5}和O₃暴露的归因死亡人数，见公式（1），下角标s、t、k分别代表空间网格、年份和“性别-年龄-城乡居住地”亚组，D_{s,t,k}即为第s个网格单元中第k个亚组人群在第t年的归因死亡人数；C、B、P分别表示PM_{2.5}或O₃年浓度、基线死亡率与人口规模。





$$D_{s,t,k} = AF(C_{s,t}) \times B_{s,k} \times P_{s,t,k},$$

$$AF(C_{s,t}) = 1 - 1 / RR_{s,t,k},$$

$$RR_{s,t,k} = MR-BRT_k(C_{s,t}) / MR-BRT_k(TMREL) \dots\dots (1)$$

为了进一步阐述空气治理所带来健康效应的改变，我们又基于各个年龄层的预期寿命（LE_k），将超额死亡人数拓展为时空分布下的生命损失年数（Years of Life Lost, YLL）和预期寿命损失数（Loss of Life Expectancy, LLE），并量化出衡量预期寿命改善的新指标——预期寿命增长数（Gain of Life Expectancy, GLE），其中y₁、y₂表示不同的大气污染治理时段。以上疾病负担指标的计算见公式（2，3），其置信区间的估计可利用蒙特卡罗方法实现。

在健康收益分布的均衡性研究中，我们将经济学中常用的不平等分析工具——洛伦兹曲线进行了改造，将预期寿命增长数（GLE）视为大气治理中的“健康收入”，绘制给定比例的人口所持有的健康收入总份额，并用基尼系数衡量与绝对平等之前的差距，以测算地域健康收益异质性。基尼系数越大，表明健康收益的分布越不均衡。关于NO₂相关超额死亡、预期寿命损失及其分布均衡性的测算，具体测算方法与PM_{2.5}和O₃类似。需要说明，该部分采用世界卫生组织获得2021版《全球空气质量指南》时所发展的暴露反应关系分析，利用全因死亡作为风险评估结局，详情请参考本团队已经发表的学术论文。³⁴

以上，综合衡量不同时期、不同区域的暴露改善、健康改善与健康效益的均衡分配情况，我们可以定量评价大气污染治理效果，为环境政策优化和公众健康促进提供启示。



$$LLE_{s,t} = LE0 * YLL_{s,t} / Ps,t, Ps,t = \sum_k Ps,t,k, YLL_{s,t} = \sum_k D_{s,t,k} \times LE_k, \dots (2)$$

$$GLEs = LLE_{s, t=y1} - LLE_{s, t=y2}$$

$$= LE0 (YLL_{s, t=y1} / Ps, t=y1 - YLL_{s, t=y2} / Ps, t=y2)$$

$$= LE0 [(Ps, t=y1 / Ps, t=y2) YLL_{s, t=y1} - YLL_{s, t=y2} \equiv YLGs] / Ps, t=y2$$

$$= LE0 * YLGs / Ps, t=y2, \dots (3)$$

03

主要研究发现



第一部分 细颗粒物的暴露变化及健康影响

PM_{2.5}暴露水平的变化

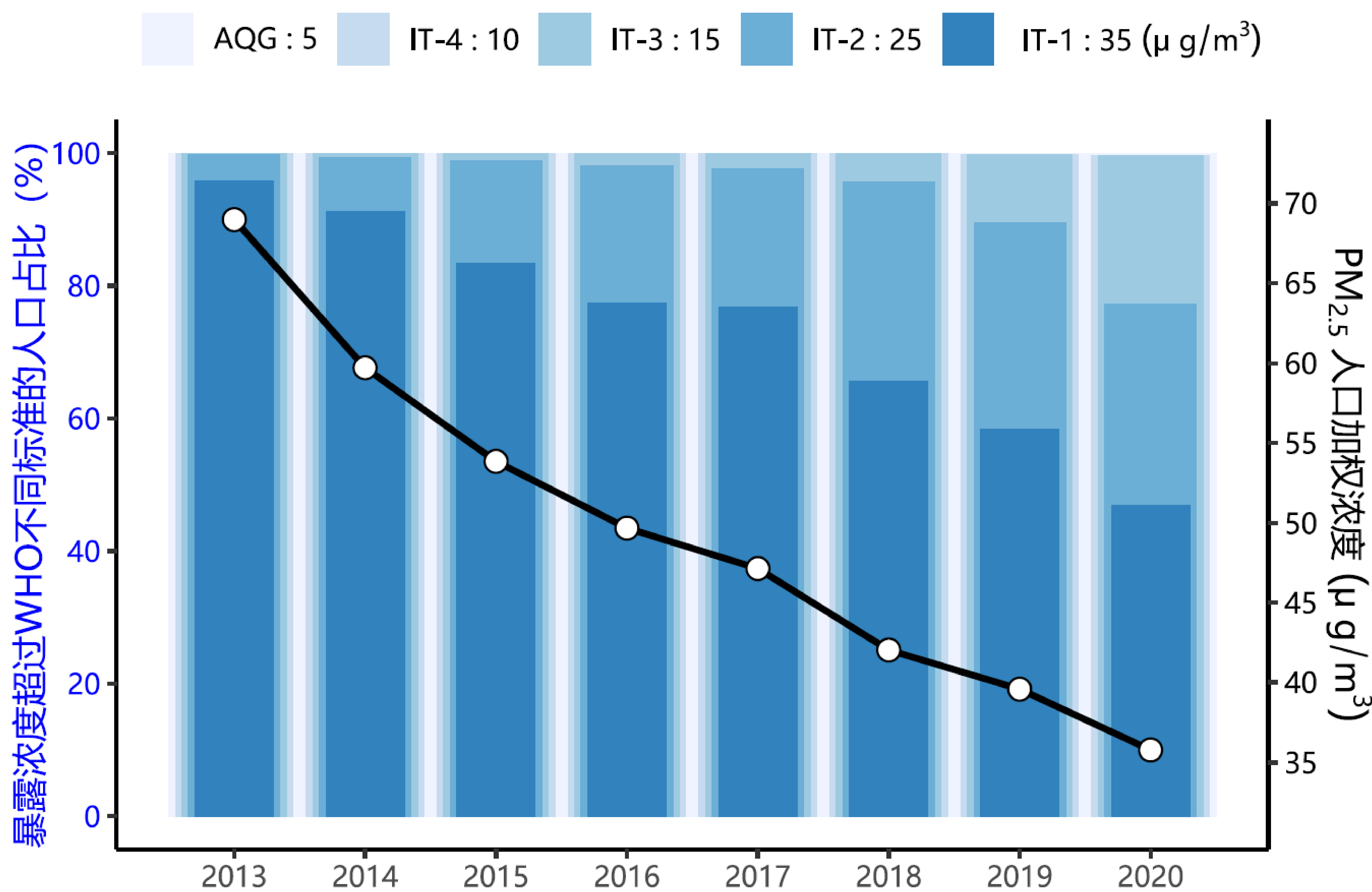


图1.1 2013-2020年人口加权的PM_{2.5}暴露浓度（右侧）及超过WHO标准的人口占比（左侧）

图1.1展示了人口加权的PM_{2.5}暴露浓度变化。“大气十条”实施的五年期间，PM_{2.5}暴露浓度从69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降低到47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；“蓝天保卫战”三年期间，进一步降低到36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。暴露在PM_{2.5}浓度超过中国《环境空气质量标准》年均值（35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，与WHO过渡期目标IT1相当）的人口占比从2013年的96%下降到2017年的77%，再降至2020年的47%。

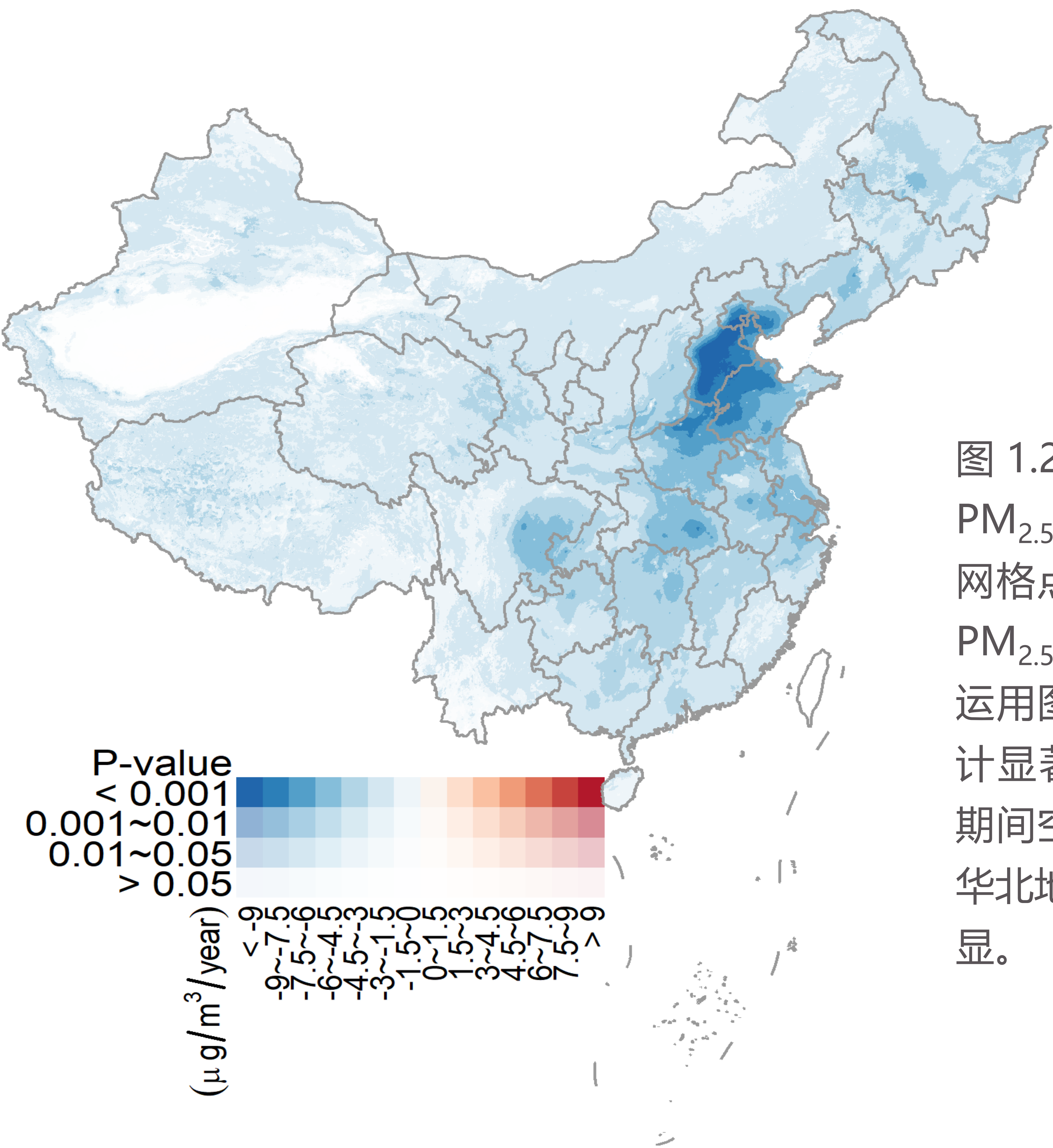


图 1.2 展示了 2013-2020 年间 PM_{2.5}降低趋势的空间分布。每个网格点上，利用最小二乘法计算 PM_{2.5}月均浓度的长期趋势，并且运用图层的透明度代表趋势的统计显著程度（P值）。结果说明期间空气颗粒物污染普遍下降，华北地区PM_{2.5}的下降幅度最为明显。

图1.2 2013-2020年PM_{2.5}浓度变化趋势的空间分布

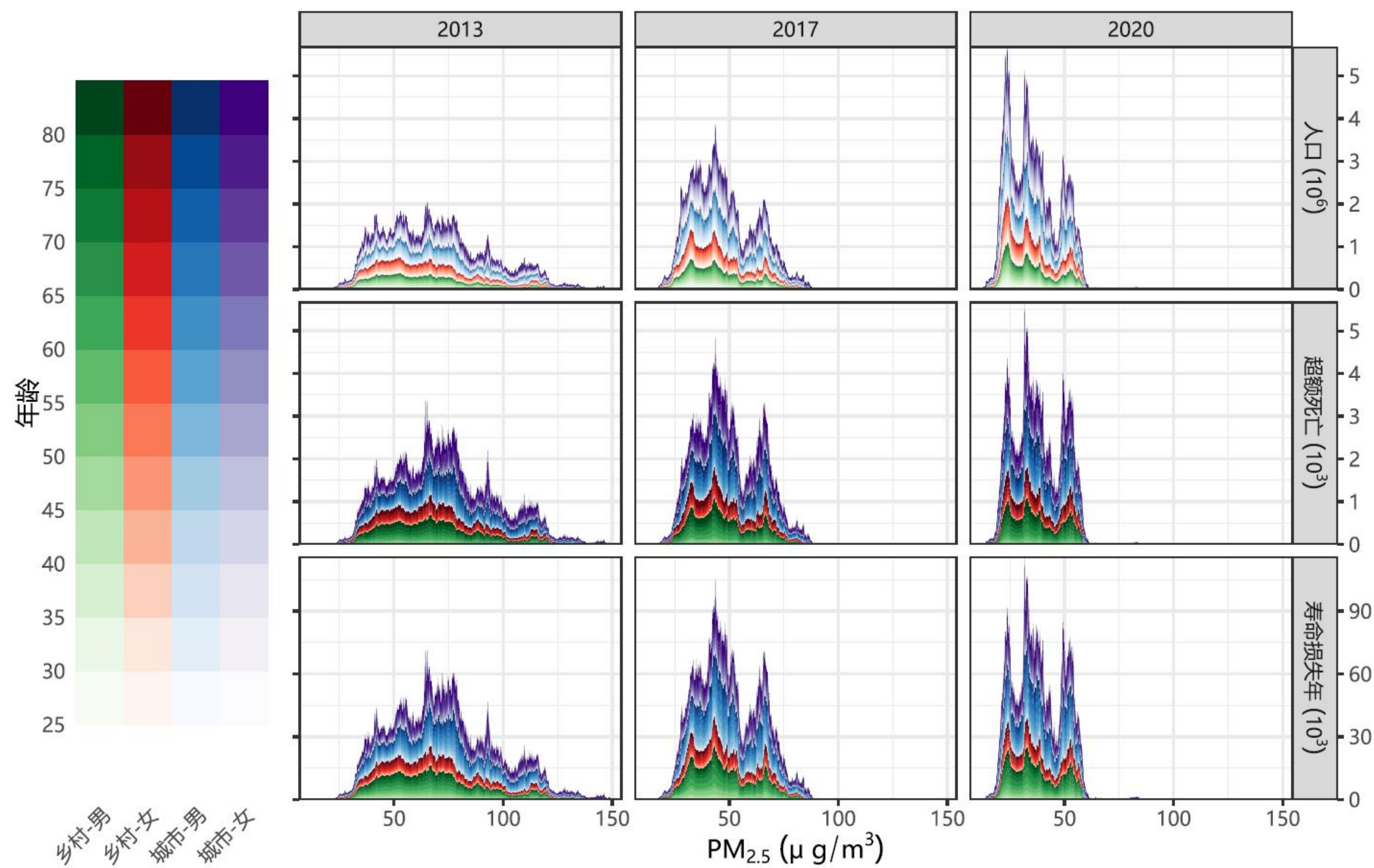


图1.3 2013年、2017年、和2020年PM_{2.5}暴露和疾病负担的人群分布情况

图1.3展示了2013、2017和2020年不同暴露水平的人口分布及其“城乡-年龄-性别”特征，三个人群分布的对比说明：从2013到2020年，人口向低暴露浓度区间集中，也证明了PM_{2.5}暴露水平的显著改善。PM_{2.5}浓度在不同城乡、年龄和性别的分布中较为统一，亚组之间的PM_{2.5}污染水平没有显著差异。作为对照，图中还展示了超额死亡人数和预期寿命损失的分布情况。

PM_{2.5}暴露的健康影响

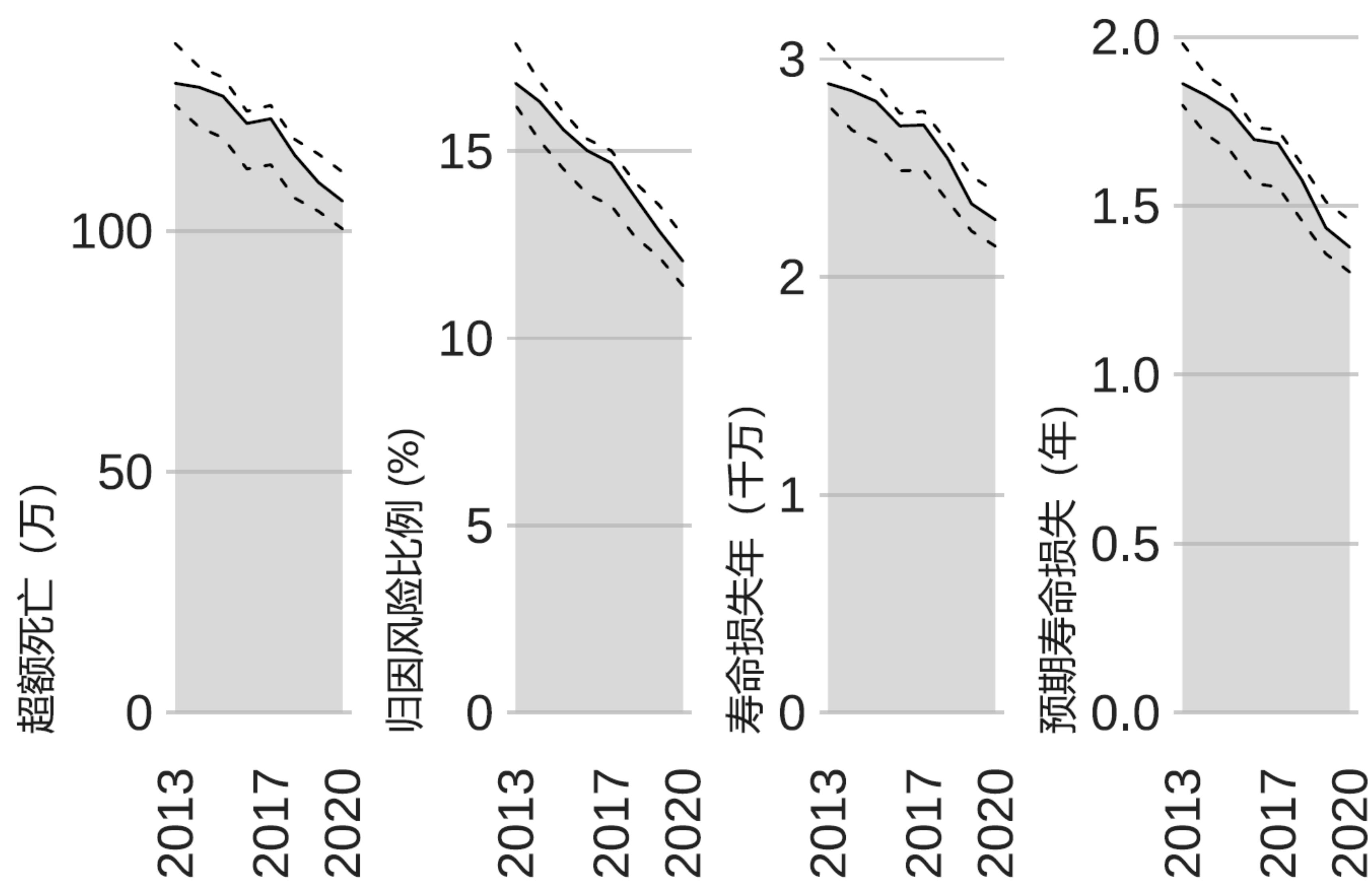


图1.4 2013-2020年PM_{2.5}暴露的疾病负担：超额死亡人数、归因风险占比、总寿命损失年和预期寿命损失

图1.4展示了2013-2020年归因于PM_{2.5}长期暴露的超额死亡人数、归因风险比、总寿命损失和预期寿命损失，本研究报告统一采用预期寿命损失作为度量疾病负担的主要指标¹。2013、2017和2020年，归因于PM_{2.5}暴露的预期寿命损失分别为1.86、1.69和1.38年。各项疾病负担指标均呈现接近线性的下降趋势，并且2017年后，下降趋势更陡峭、速度更快。

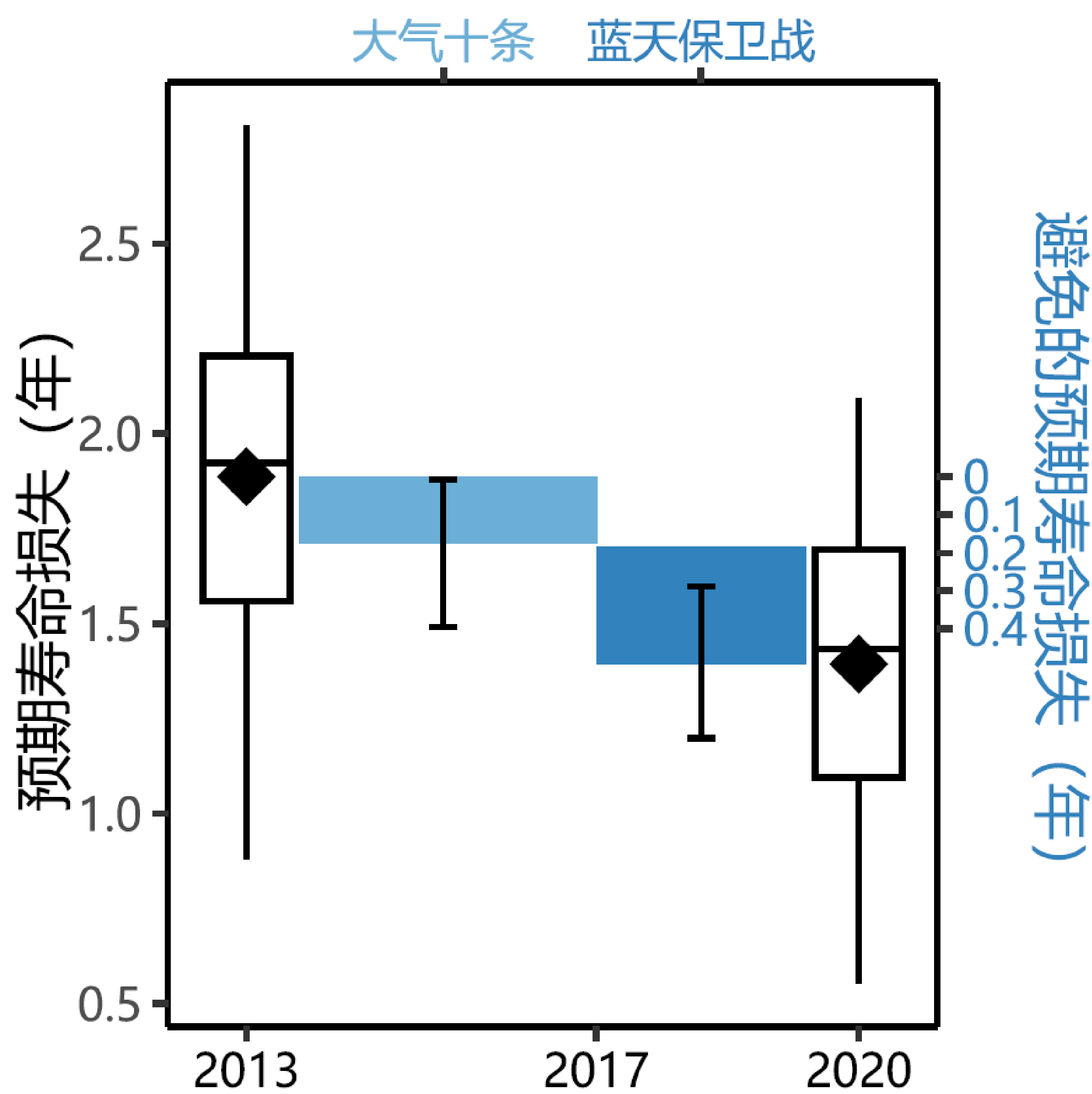


图1.5 PM_{2.5}暴露相关预期寿命损失的变化，以及归因于大气十条和蓝天保卫战期间暴露改善所避免的预期寿命损失

图1.5展示了2013-2020年归因于PM_{2.5}长期暴露的预期寿命损失及其变化量，作为各阶段治理空气污染对应的健康收益——“大气十条”期间避免预期寿命损失2.11月、“蓝天保卫战”期间避免预期寿命损失3.68个月。由于PM_{2.5}与死亡的暴露反应关系呈现亚线性的特征，在经过“大气十条”的治理后，“蓝天保卫战”得以从更低浓度的基础上、对PM_{2.5}污染进行深度治理，因此，污染减排的边际效应更强。

¹说明：在使用预期寿命损失度量空气污染的健康影响时，不同年龄段人群的横断面特征（死亡率和暴露水平）组成一个“生命量表”，代表一个“虚拟个体”的不同生命阶段。归因于空气污染的预期寿命损失指：“虚拟个体”在现实暴露情景和反事实暴露情景（即最小风险暴露水平）下预期寿命的差异。

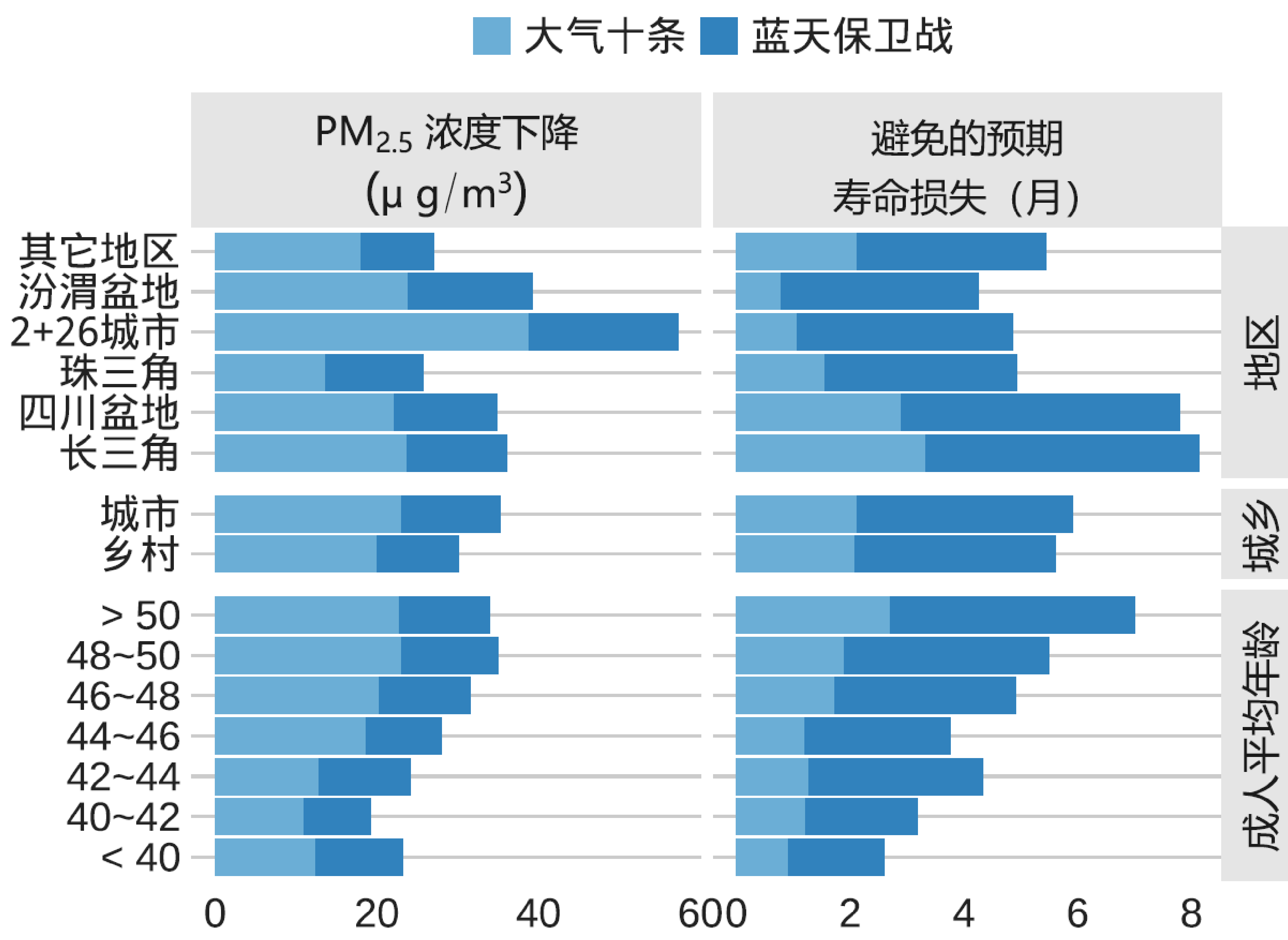


图1.6 分地区、分人群的PM_{2.5}暴露水平改善与健康改善

PM_{2.5}暴露及健康影响的“地区画像”

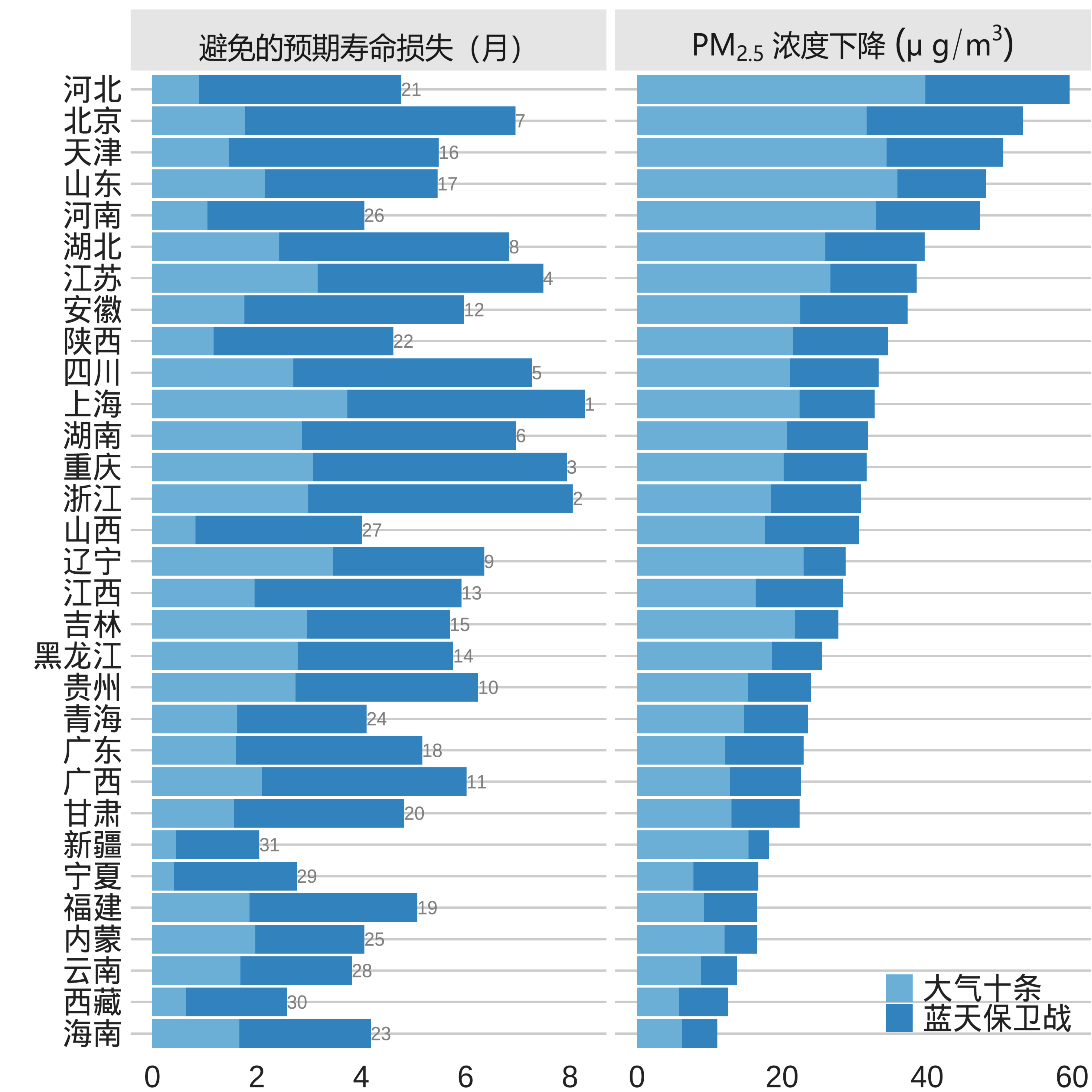


图1.7 分省的PM_{2.5}暴露水平改善与相关健康收益

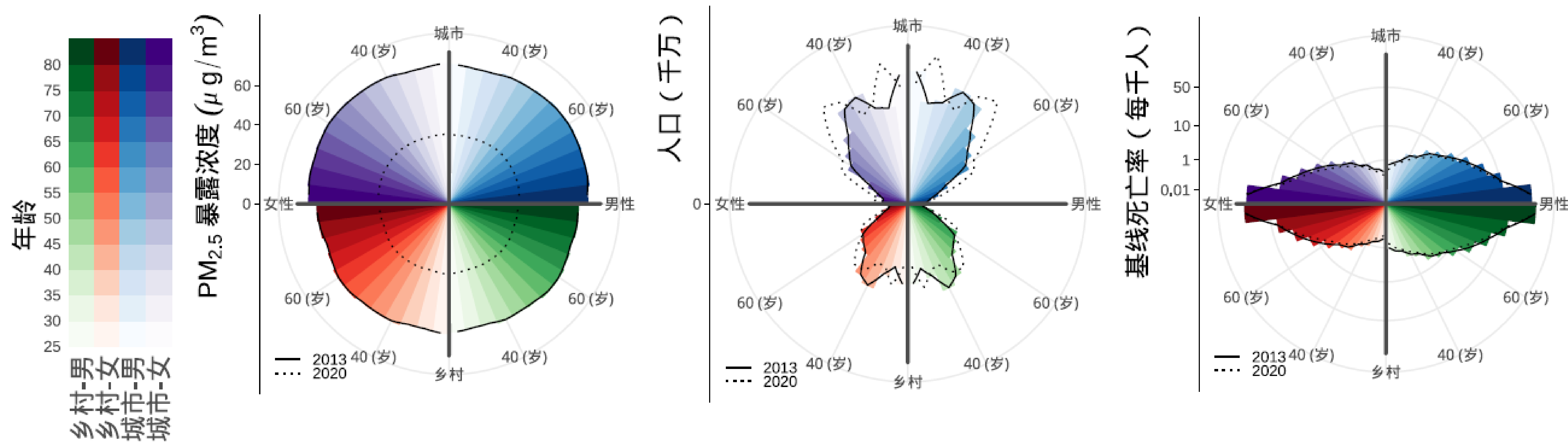


图1.8 PM_{2.5}疾病负担评估输入数据（浓度、人口、基线死亡风险）的人群分布

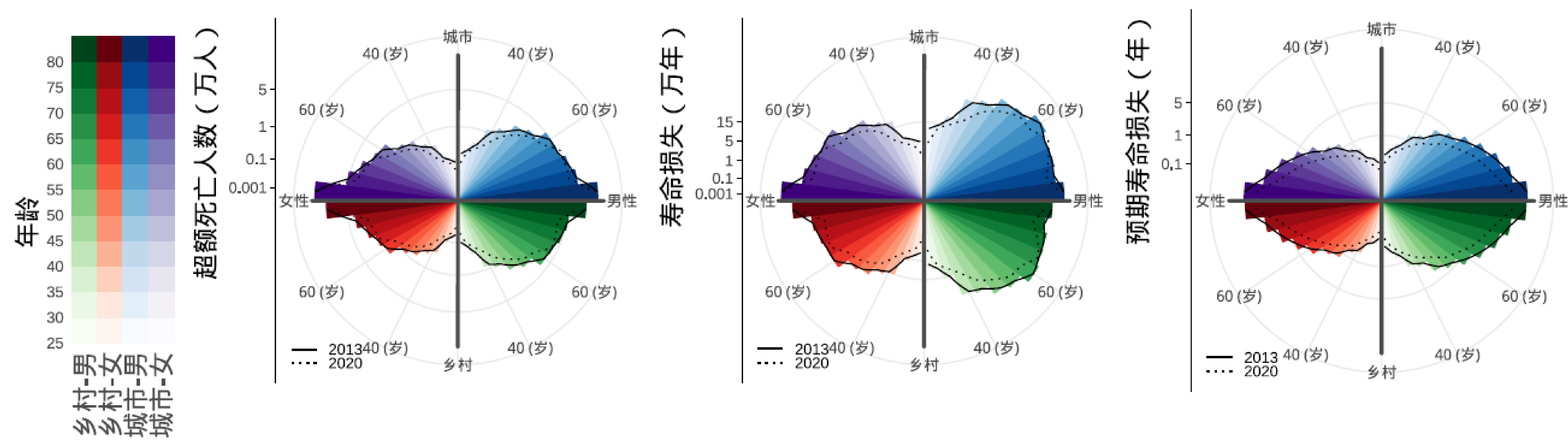


图1.9 PM_{2.5}疾病负担评估（超额死亡、寿命损失、预期寿命损失）的人群分布

图1.8和1.9展示了决定PM_{2.5}疾病负担评估模型的输入和输入数据的人群构成比例。图1.8展示了全国平均水平上疾病负担评估的输入变量及其人群分布；图1.9展示了全国平均水平上疾病负担评估输出指标的人群分布。结果表明，高年龄人群面临着更高的基线死亡风险，并承担了更大的PM_{2.5}疾病负担，男性群体承担的疾病负担略高于女性，且城乡之间疾病负担评估的输出与输入指标没有明显差异。附图1.1展示了各省城市的暴露水平以及疾病负担的人群分布；附图1.2展示了分城市的暴露改善和健康收益情况。

PM_{2.5}相关健康收益的分布及其不均衡程度

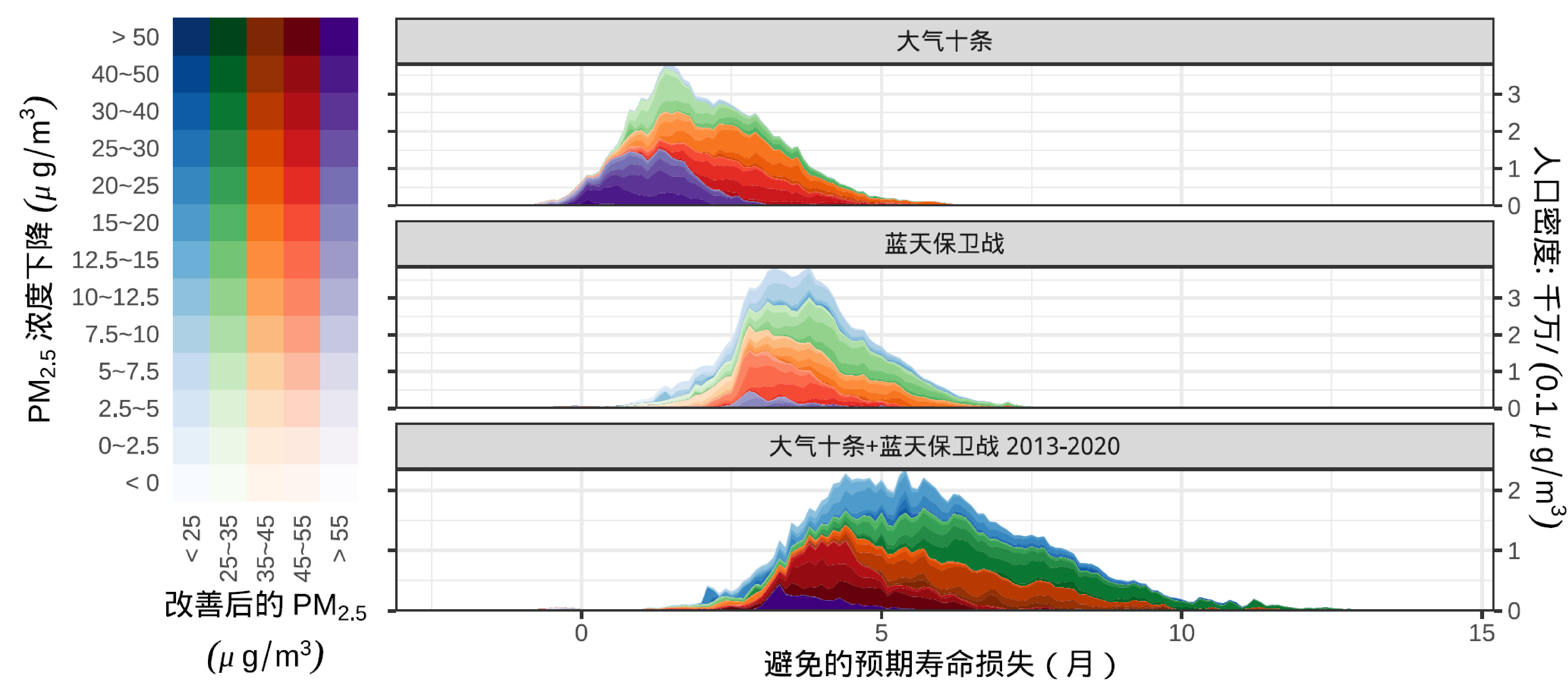


图1.10 不同PM_{2.5}水平及改善幅度下，相关健康改善的人群分布

图1.10展示了不同PM_{2.5}水平及其改善幅度下的人群健康改善的分布情况。结果表明，“大气十条”实施的五年期间，污染治理所避免的预期寿命损失集中在0-5个月的区间内，而“蓝天保卫战”的推进，使人群分布向预期寿命增加的方向移动，多数人群的PM_{2.5}暴露水平降低到55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。

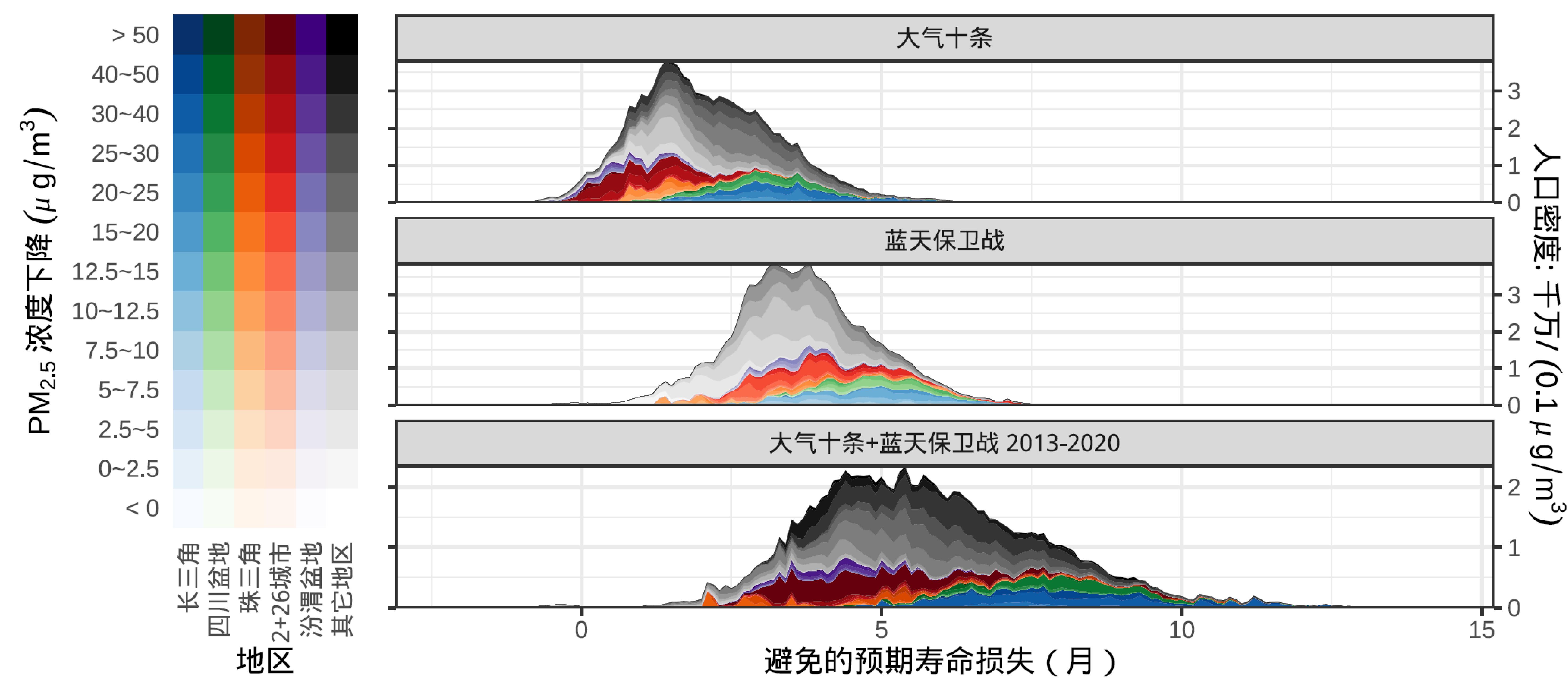


图1.11 不同地区和不同PM_{2.5}改善幅度下，相关健康改善的人群分布

图1.11进一步揭示在不同地区和不同PM_{2.5}改善幅度下健康改善的人群分布情况。“大气十条”期间，各地区健康改善的人群分布差异明显，长三角地区和四川盆地人群避免的预期寿命损失更多；而“蓝天保卫战”的治理，使得各区域健康改善的人口分布差异减小，其它地区的预期寿命增加量与长三角和四川盆地等地接近。

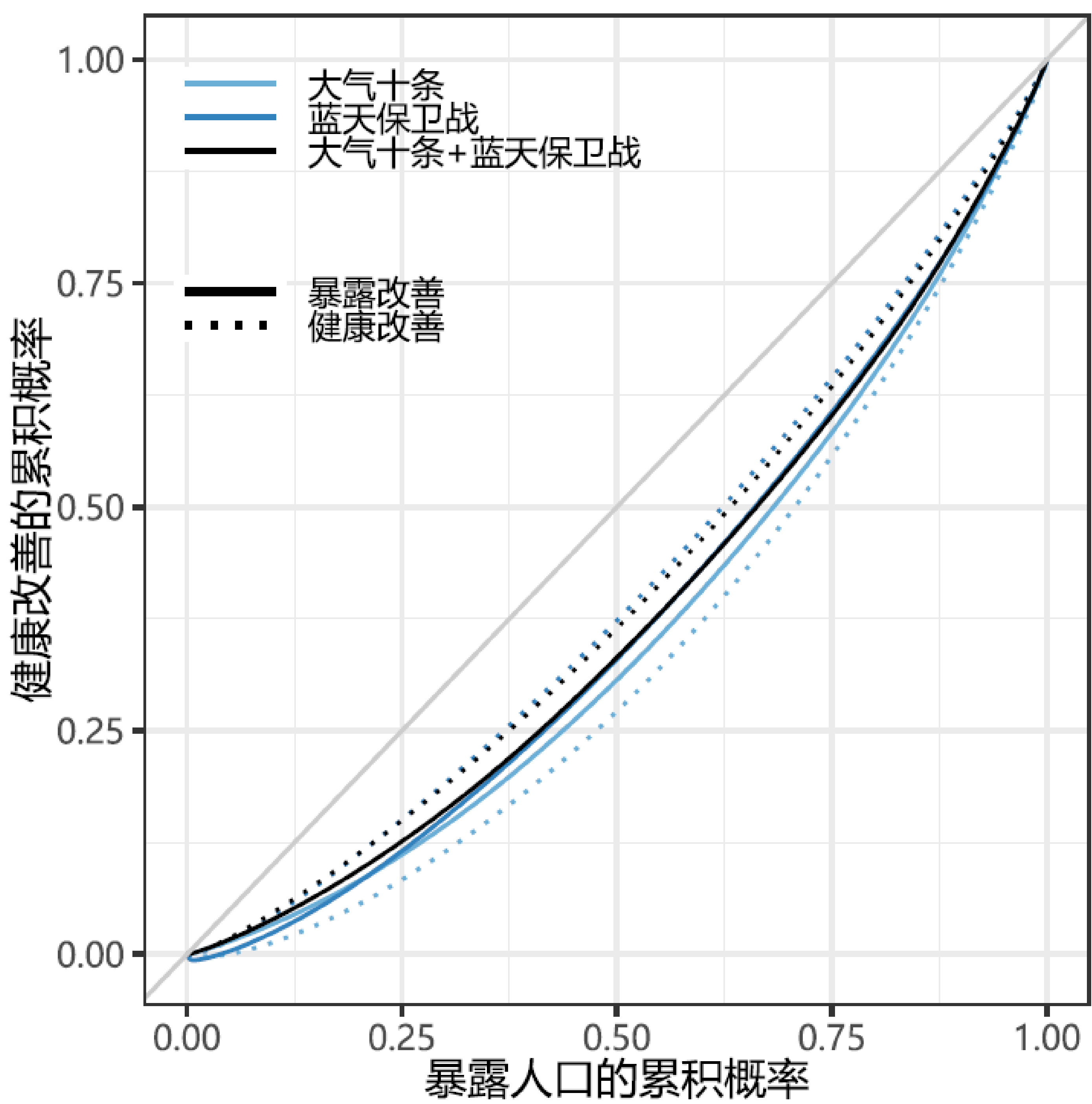


图1.12-1 大气十条和蓝天保卫战期间PM_{2.5}暴露水平改善（实线）和相关健康改善（虚线）的洛伦兹曲线

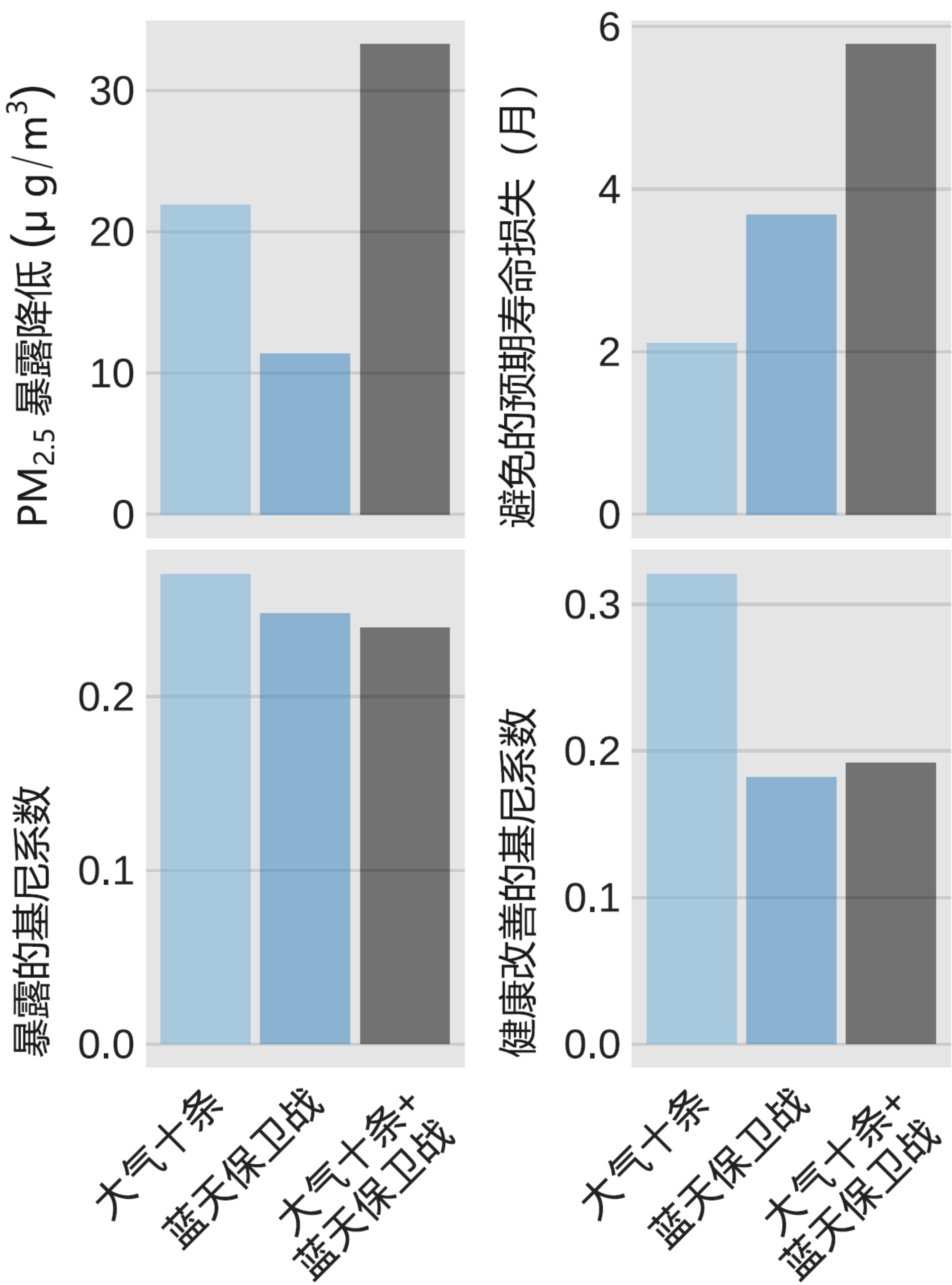


图1.12-2 暴露改善和健康改善的不均衡程度（基尼系数）

图1.12展示了“大气十条”与“蓝天保卫战”期间PM_{2.5}暴露水平改善和相关健康改善的洛伦兹曲线，基于此，可得到各阶段暴露改善和健康改善的基尼系数。相比于“大气十条”阶段，“蓝天保卫战”的治理虽然没有降低更多的PM_{2.5}污染，却有效避免了更多的预期寿命损失；两阶段暴露改善的基尼系数接近，但后者健康改善的基尼系数更小，仅为0.18。

第二部分 近地面臭氧的暴露变化及健康影响

O₃暴露水平的变化

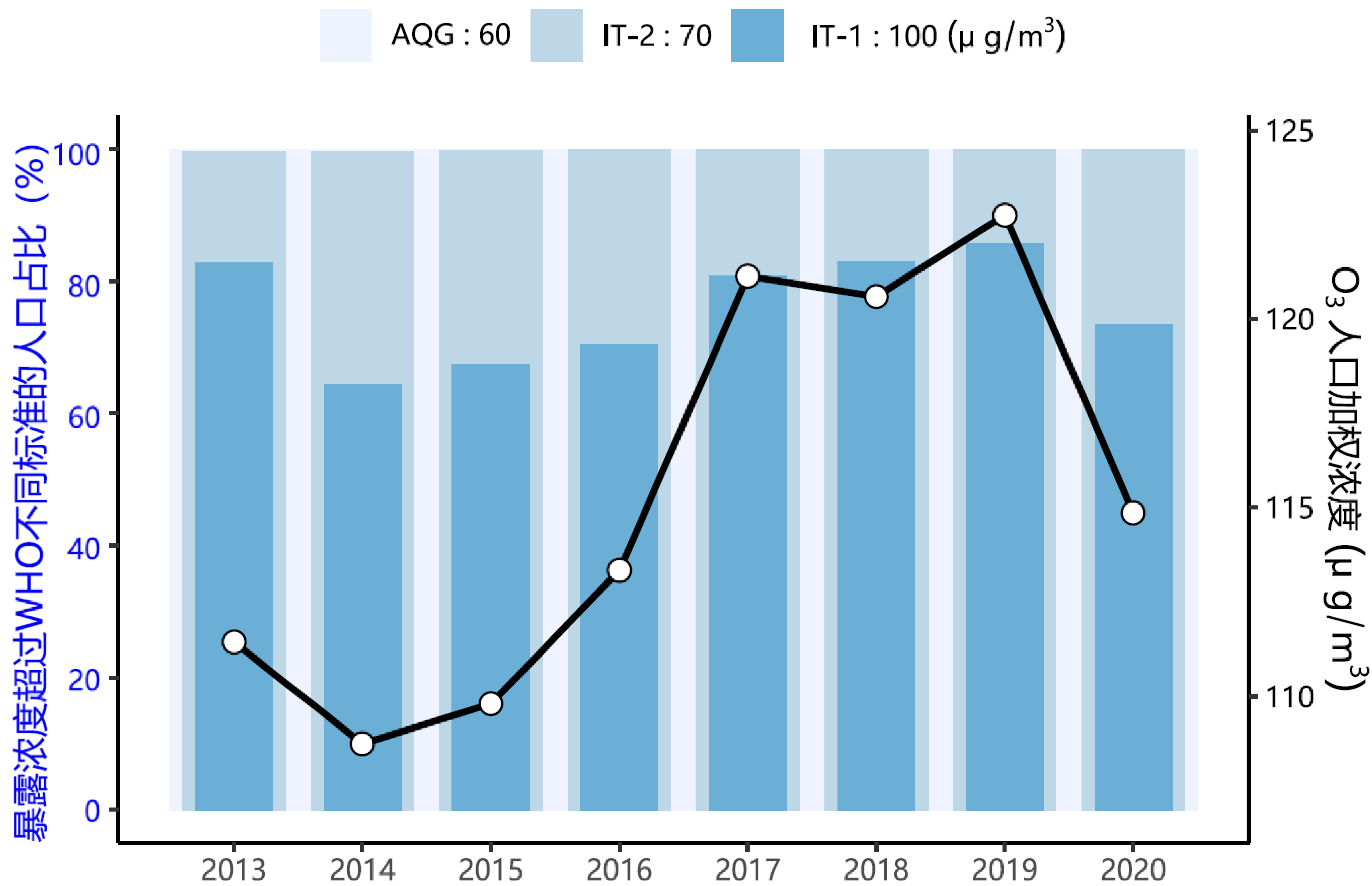


图2.1 2013-2020年人口加权的O₃暴露浓度（右侧）及超过WHO标准的人口占比（左侧）

图2.1呈现了2013-2020年人口加权的O₃暴露浓度变化。“大气十条”实施的五年期间，O₃暴露浓度从111 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 升高到121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，但随着“蓝天保卫战”的进行，O₃暴露污染有所改善，浓度降至115 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。生活在WHO过渡期目标IT1（100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）以上的人口比例从2013年的83%下降到2017年80%，随后又降至2020年的73%。

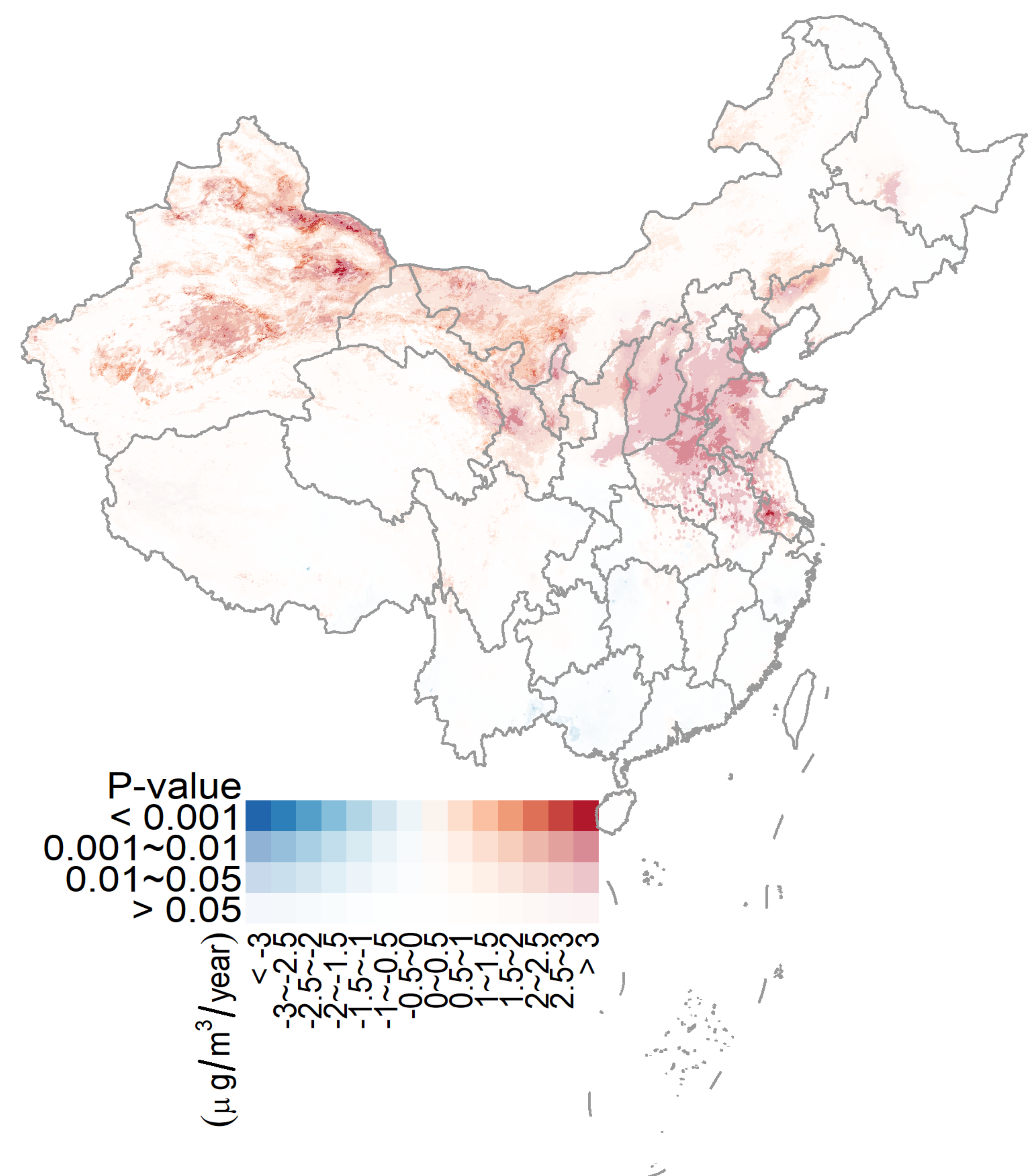


图2.2展示了2013-2020年间O₃人口加权暴露浓度改变趋势的空间分布情况。每个网格点上，利用最小二乘法计算O₃日8小时平均最大值（MDA8，Maximum Daily 8-hour Average）的月均浓度的长期趋势，并且运用图层的透明度代表趋势的统计显著程度（P值）。在此期间，近地面臭氧人口加权暴露浓度总体呈上升趋势，其中华北和西北地区升高幅度尤为明显。而在长江三角洲、珠江三角洲等南方区域，O₃人口加权暴露浓度有轻微下降。

图2.2 2013-2020年O₃浓度变化趋势的空间分布

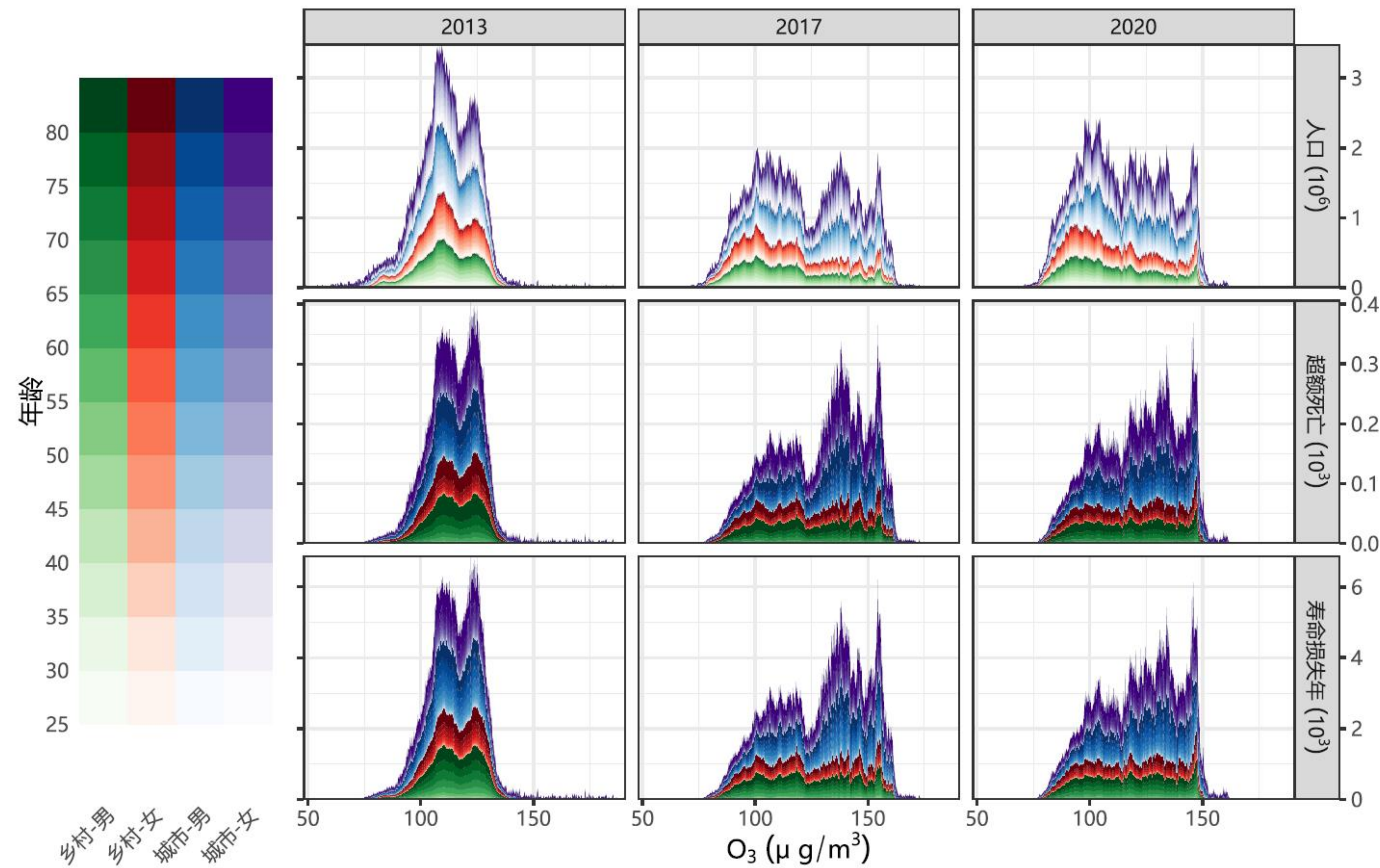


图2.3 2013年、2017年、和2020年O₃暴露和疾病负担的人群分布情况

图2.3则展示了2013、2017和2020年不同暴露水平的人口分布及其“城乡-年龄-性别”特征，比较结果显示：从2013到2017年，人口分布向高暴露浓度区间扩散，但2017-2020年间，人口逐渐向低暴露浓度区间转移，进一步佐证O₃污染程度先加剧后改善的情况。O₃在不同城乡、年龄和性别亚组中的污染程度相似，人群分布没有显著差异。

O₃暴露的健康影响

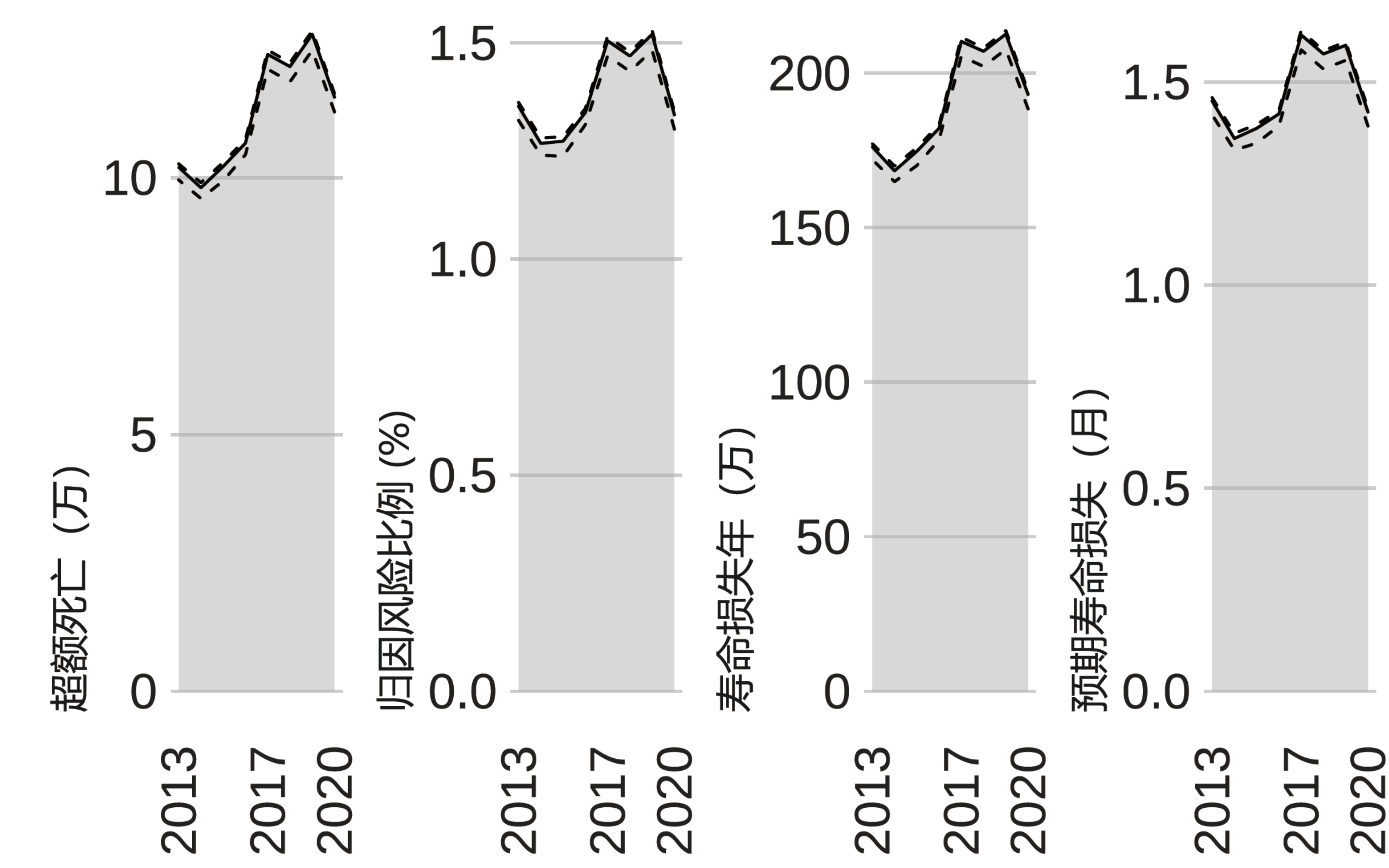


图2.4 2013-2020年O₃暴露的疾病负担：超额死亡人数、归因风险占比、总寿命损失年和预期寿命损失

图2.4展示了2013-2020年O₃长期暴露的疾病负担，包括超额死亡人数、归因风险比、总寿命损失和预期寿命损失。在2013、2017和2020年，归因于O₃暴露的预期寿命损失分别为1.45、1.62和1.43个月。各项疾病负担指标均呈现先波动上升后波动下降的趋势。

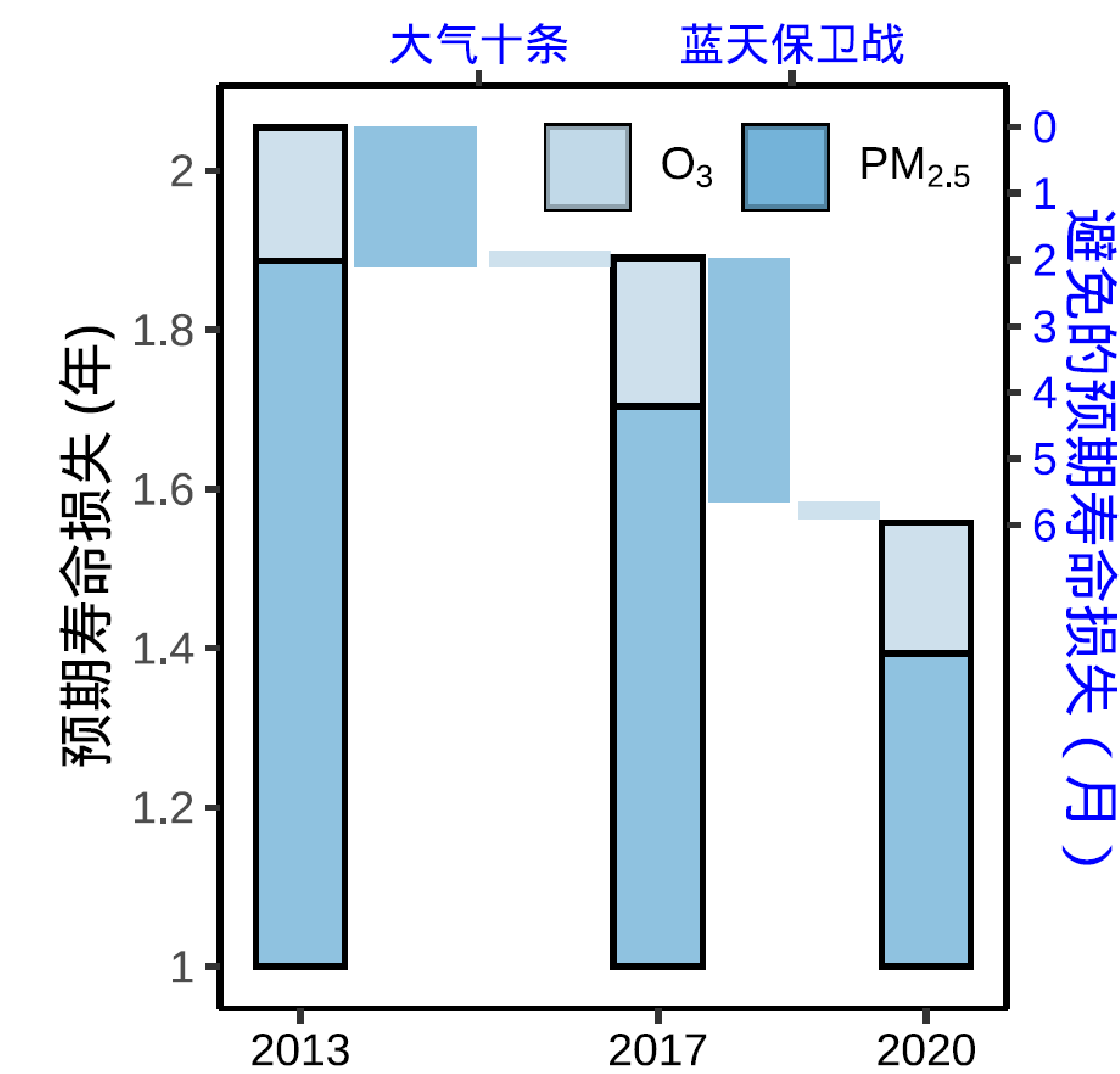


图2.5 合并O₃和PM_{2.5}暴露相关预期寿命损失的变化，以及归因于大气十条和蓝天保卫战期间所暴露改善所避免的预期寿命损失

图2.5展示了2013-2020年间综合考虑PM_{2.5}与O₃的联合暴露的预期寿命损失及其变化量，作为空气污染治理健康收益的度量，“大气十条”期间预期寿命增加1.94月，“蓝天保卫战”期间预期寿命增加3.87个月。结果进一步强调了PM_{2.5}和O₃联合治理的重要性。

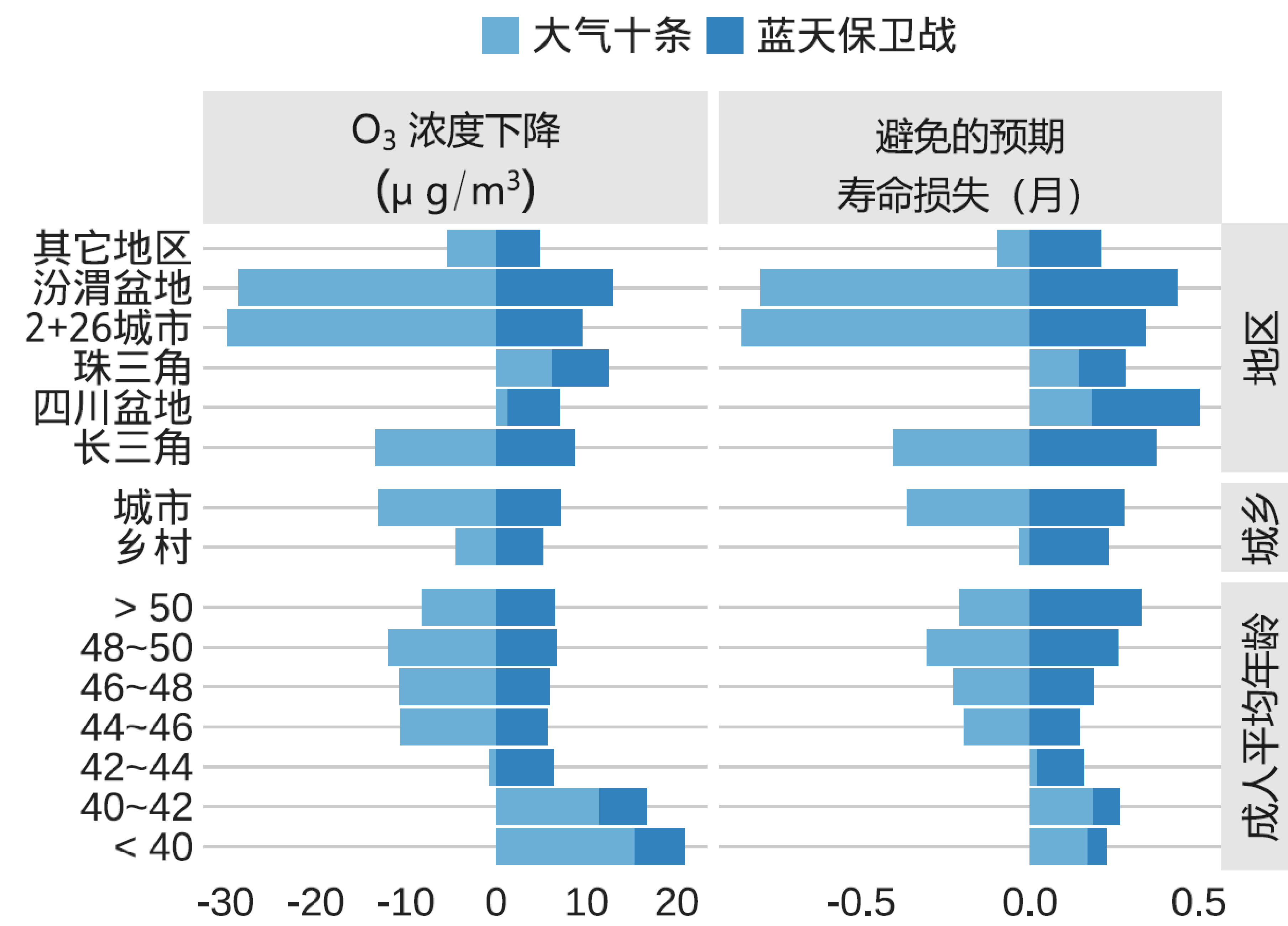


图 2.6 分地区、分人群的O₃暴露水平改善与健康改善

图2.6展示了不同地区和人群之间O₃的暴露改变（即浓度改变）和健康效应改变情况（即预期寿命的增减）。总体来看，O₃关联的健康收益也不完全由暴露改善决定。当暴露改善幅度相当时，平均年龄越高的地区，O₃带来的健康收益越大。与其它地区相比，四川盆地的O₃暴露改善并不明显，但其避免的预期寿命损失却是最多；反之，珠三角地区O₃的下降幅度仅次于汾渭平原，但其健康收益却排在倒数，这种差异可能源于地区之间年龄结构的不同。

O₃暴露及健康影响的“地区画像”

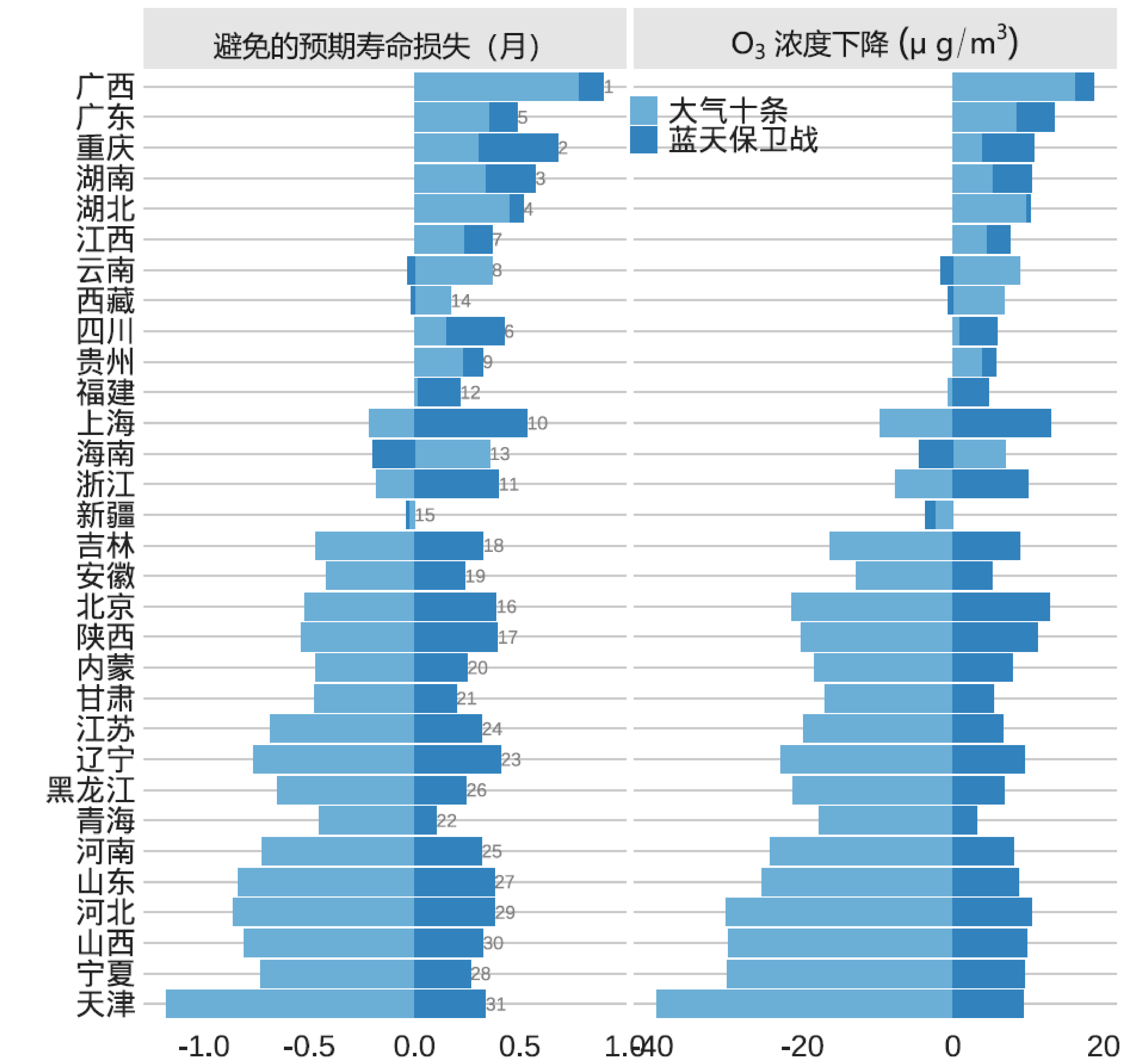


图 2.7 分省的O₃暴露水平改善与相关健康收益

图2.7展示了分省O₃暴露水平的变化及其对预期寿命的影响，相比于汇总的地区分析，较为细致的分省结果表明O₃的健康收益与其暴露水平的改变基本成比例。在所有省份中，暴露与健康改善最突出的是广西，而天津的污染加剧和健康危害则最为严重。

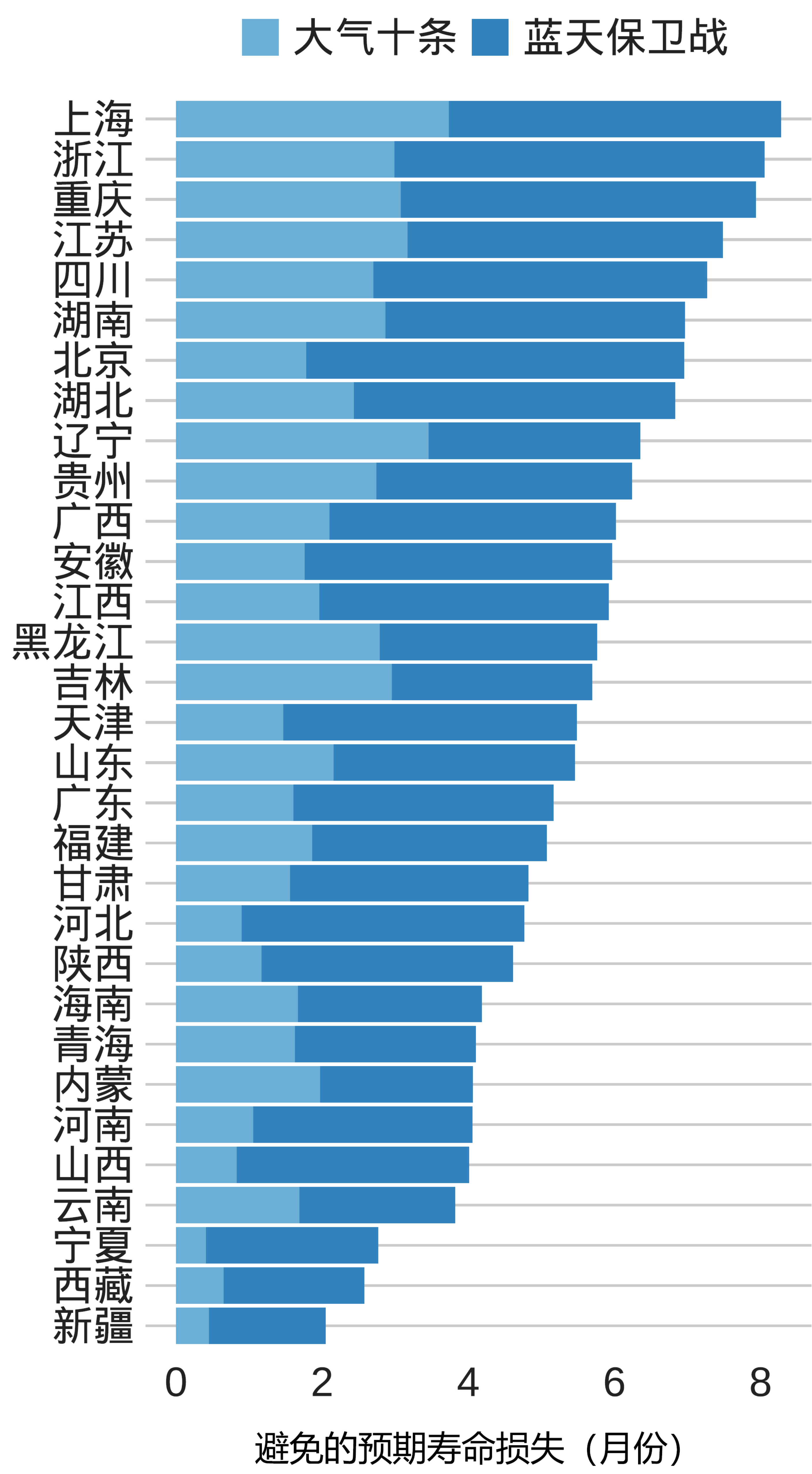


图2.8综合考虑了O₃与PM_{2.5}的联合暴露变化，揭示分省的健康改善情况。上海、浙江和重庆的污染治理取得了最明显的健康改善效果，而宁夏、西藏和新疆的健康改善程度较低，避免的预期寿命损失不足上海的1/3。

图2.8 合并O₃和PM_{2.5}暴露变化的健康改善

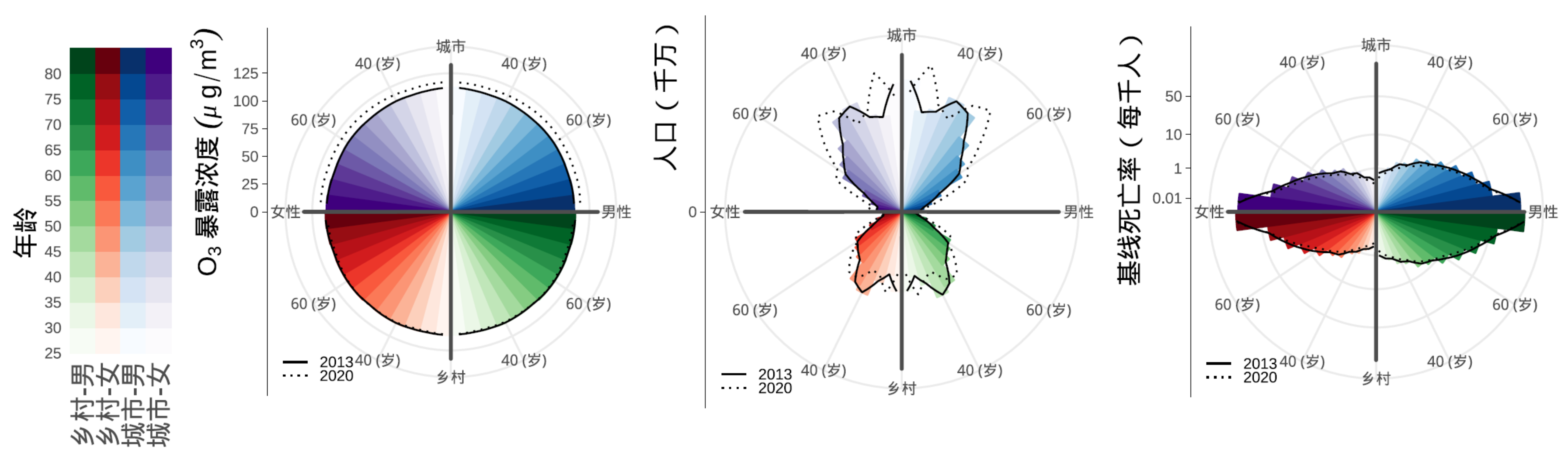


图2.9 O₃疾病负担评估输入数据（浓度、人口、基线死亡风险）的人群分布

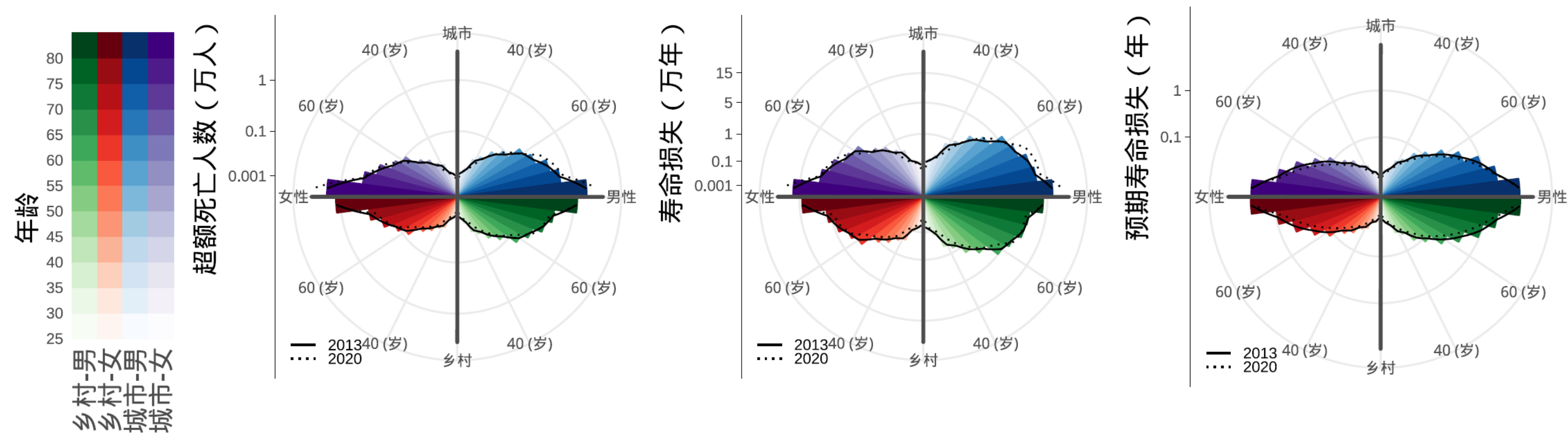


图2.10 O₃疾病负担评估输入数据（浓度、人口、基线死亡风险）的人群分布

图2.9和2.10展示了决定O₃疾病负担评估模型的输入和输入数据的人群构成比例。图2.9展示了全国平均水平上，疾病负担评估的输入变量及其人群分布；图2.10展示了全国平均水平上，疾病负担评估的输出指标及其人群分布。结果表明，由O₃导致的超额死亡、寿命损失和预期寿命损失在高年龄和男性群体中更明显。附图2.1展示了各省城市的暴露水平、人群构成及其疾病负担的分布情况；附图2.2展示了分城市的暴露改善及其健康收益；附图2.3展示了分城市的综合PM_{2.5}和O₃后的暴露改善及其健康收益。

O₃和PM_{2.5}综合健康收益的分布及其不均衡程度

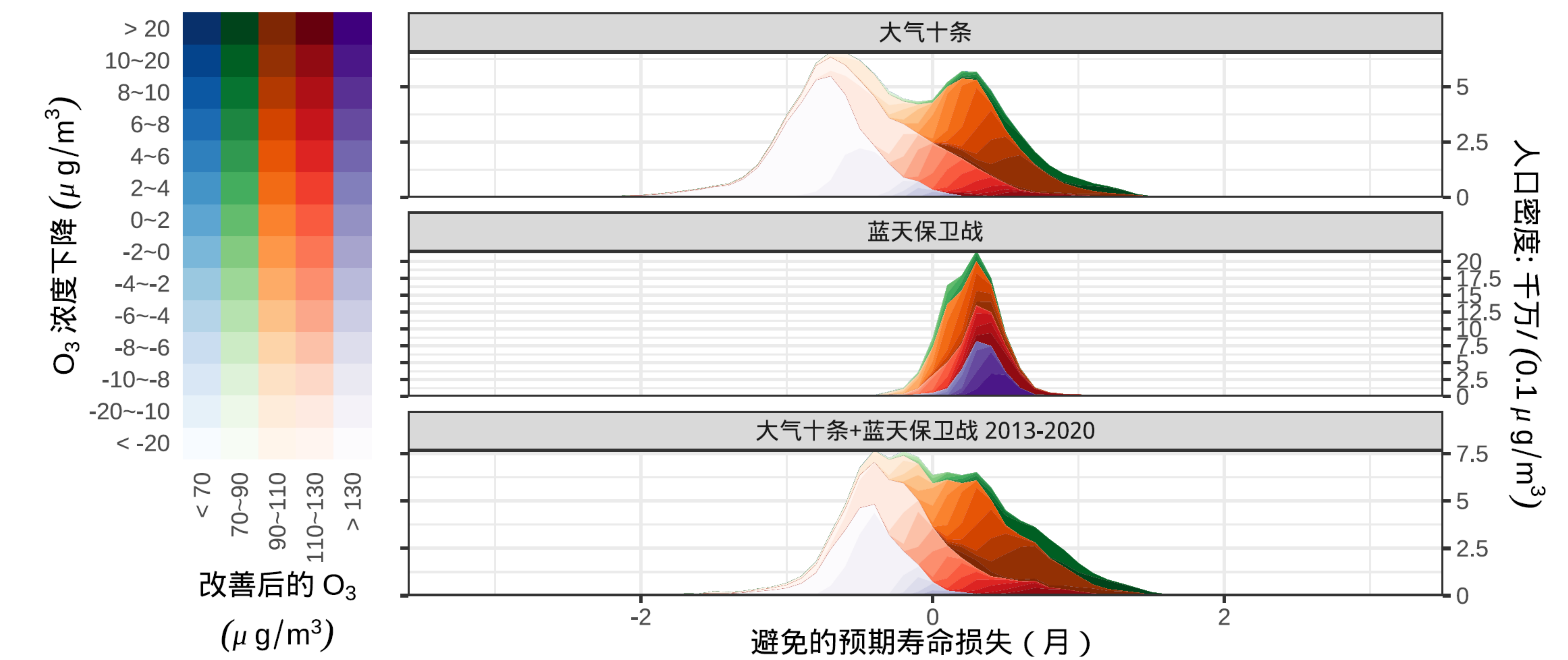


图2.11 不同O₃水平及改善幅度下，相关健康改善的人群分布

图2.11展示了不同O₃水平及其改善幅度下的人群健康改善的分布情况。“大气十条”期间，大部分人口居住区域的O₃污染水平上升，由此导致预期寿命损失的增加；而“蓝天保卫战”的推进，有效降低了O₃浓度，多数人群由此避免了0-1个月的预期寿命损失。

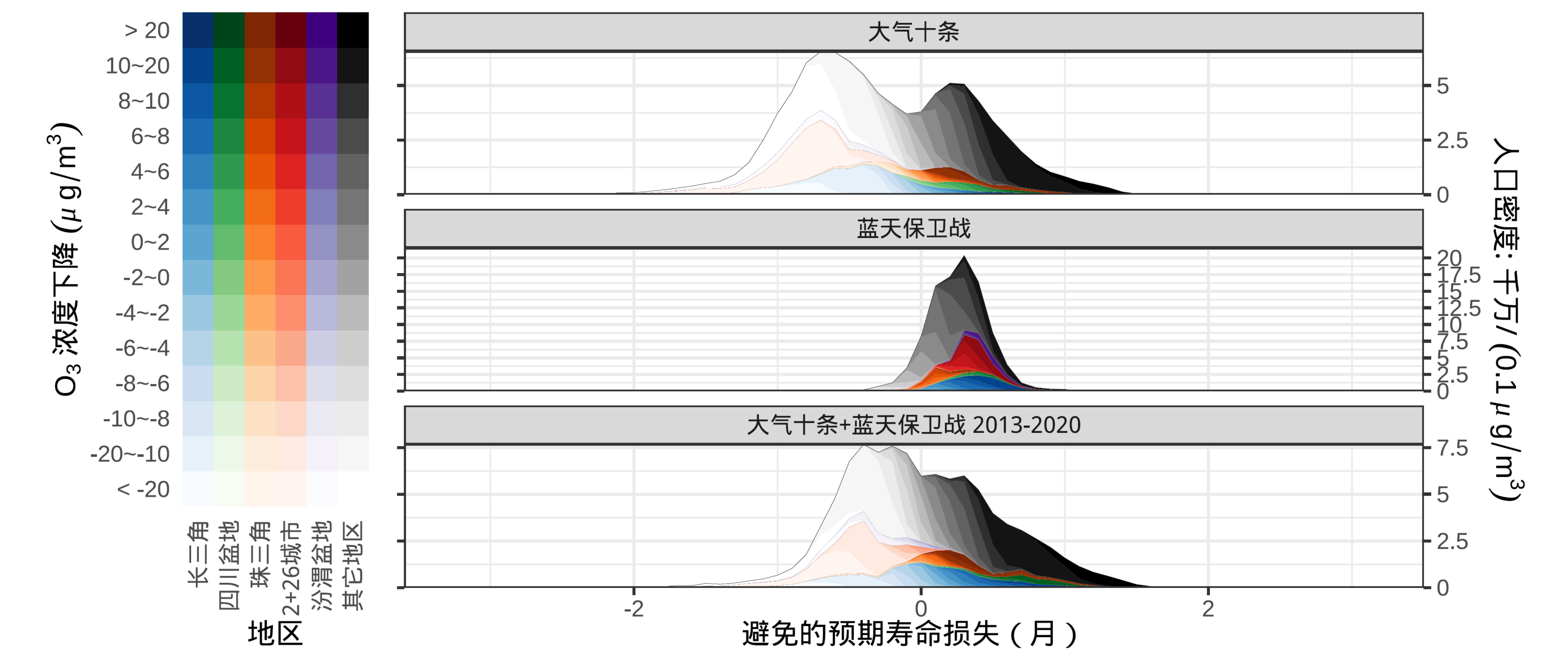


图2.12 不同地区 and 不同 O_3 改善幅度下，相关健康改善的人群分布

图2.12进一步揭示了分地区的不同 O_3 改善幅度下人群健康改善的分布情况。“大气十条”期间，每个地区仍有相当比例的人口暴露的 O_3 污染水平加重，而进入“蓝天保卫战”阶段，所有地区几乎全部人口的 O_3 暴露水平都有所改善。

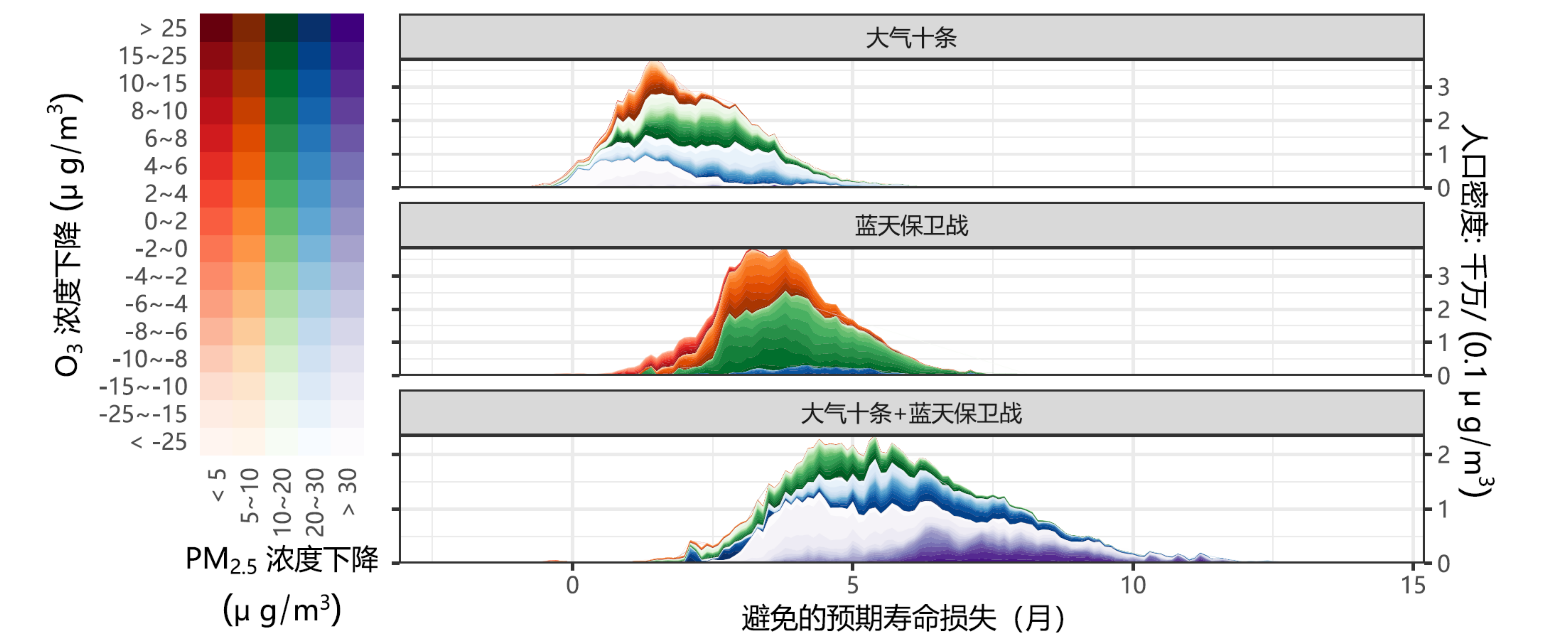


图2.13 不同 $PM_{2.5}$ 和 O_3 改善幅度下， $PM_{2.5}$ 和 O_3 综合健康改善的人群分布

图2.13展示了 $PM_{2.5}$ 和 O_3 综合健康改善的人群分布。结果表明，两阶段的空气污染治理使人群预期寿命大幅度增加，并且健康改善程度与 $PM_{2.5}$ 暴露改善幅度和 O_3 暴露改善幅度都保持了较高的一致性，即 $PM_{2.5}$ 和 O_3 的浓度下降越多，健康改善越明显。

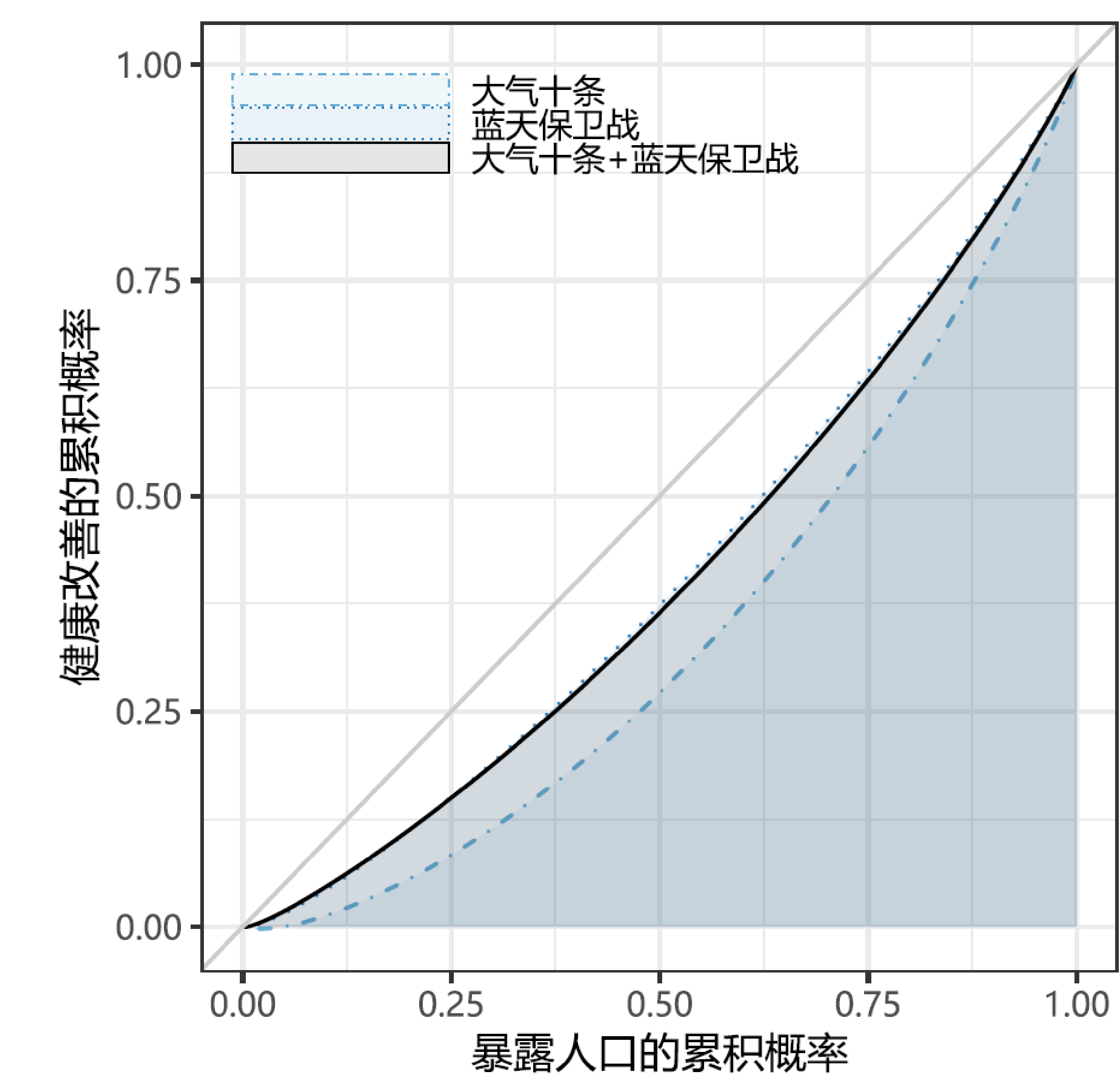


图2.14-1 大气十条和蓝天保卫战期间PM_{2.5}和O₃综合改善和相关健康改善的洛伦兹曲线

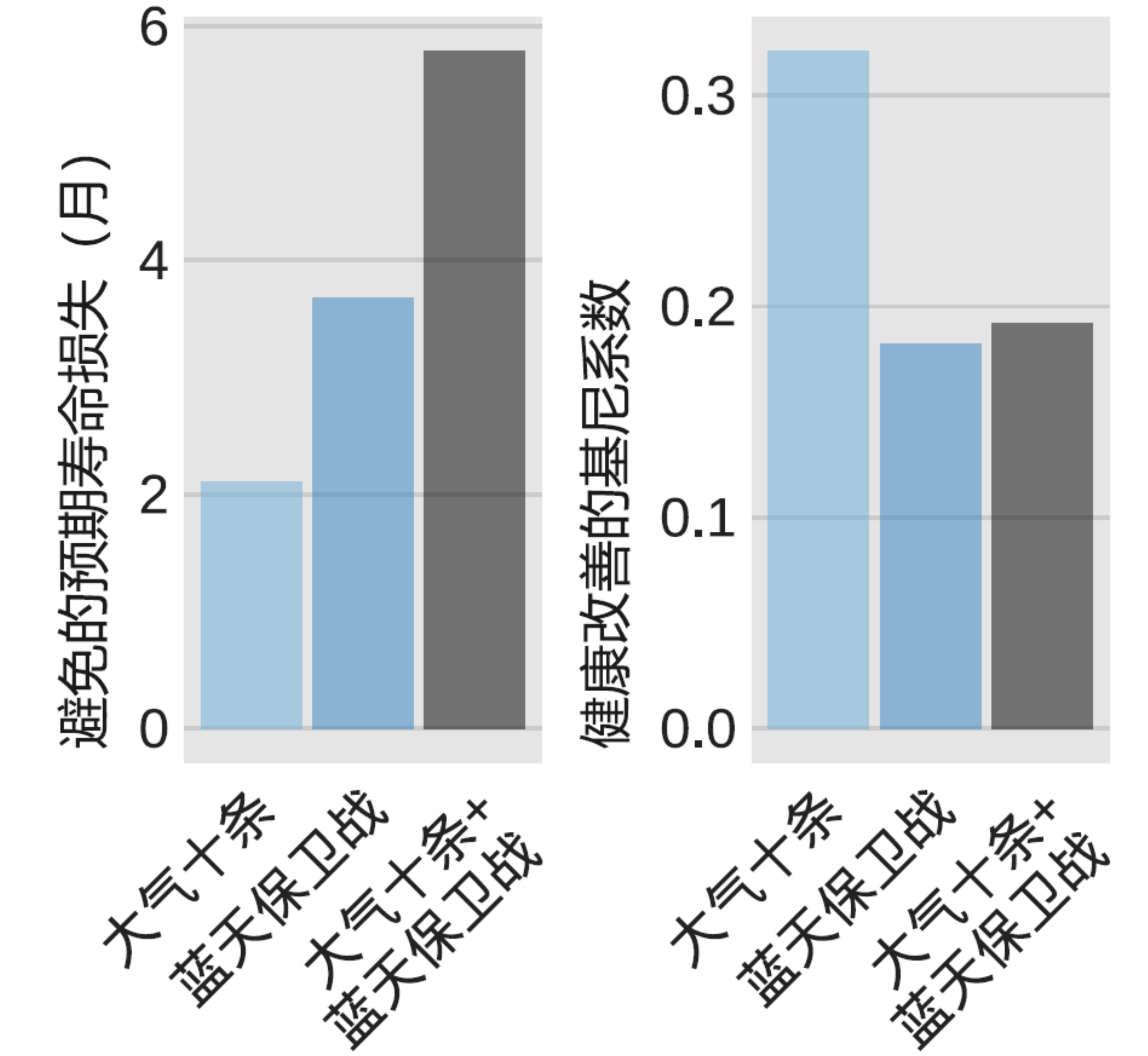


图2.14-2 O₃暴露改善和健康改善的平均水平及其不均衡程度（基尼系数）

图2.14展示了大气十条与蓝天保卫战期间PM_{2.5}和O₃综合改善和相关健康改善的洛伦兹曲线，以及由此可得到各阶段暴露改善和健康改善的基尼系数。“大气十条”阶段，一半收益集中于1/4人口，基尼系数为0.32；蓝天保卫战期间，一半收益集中于1/3人口，基尼系数为0.18，地区之间的不平等现象有所缓解。

第三部分：二氧化氮的暴露变化及健康影响

NO₂暴露水平的变化

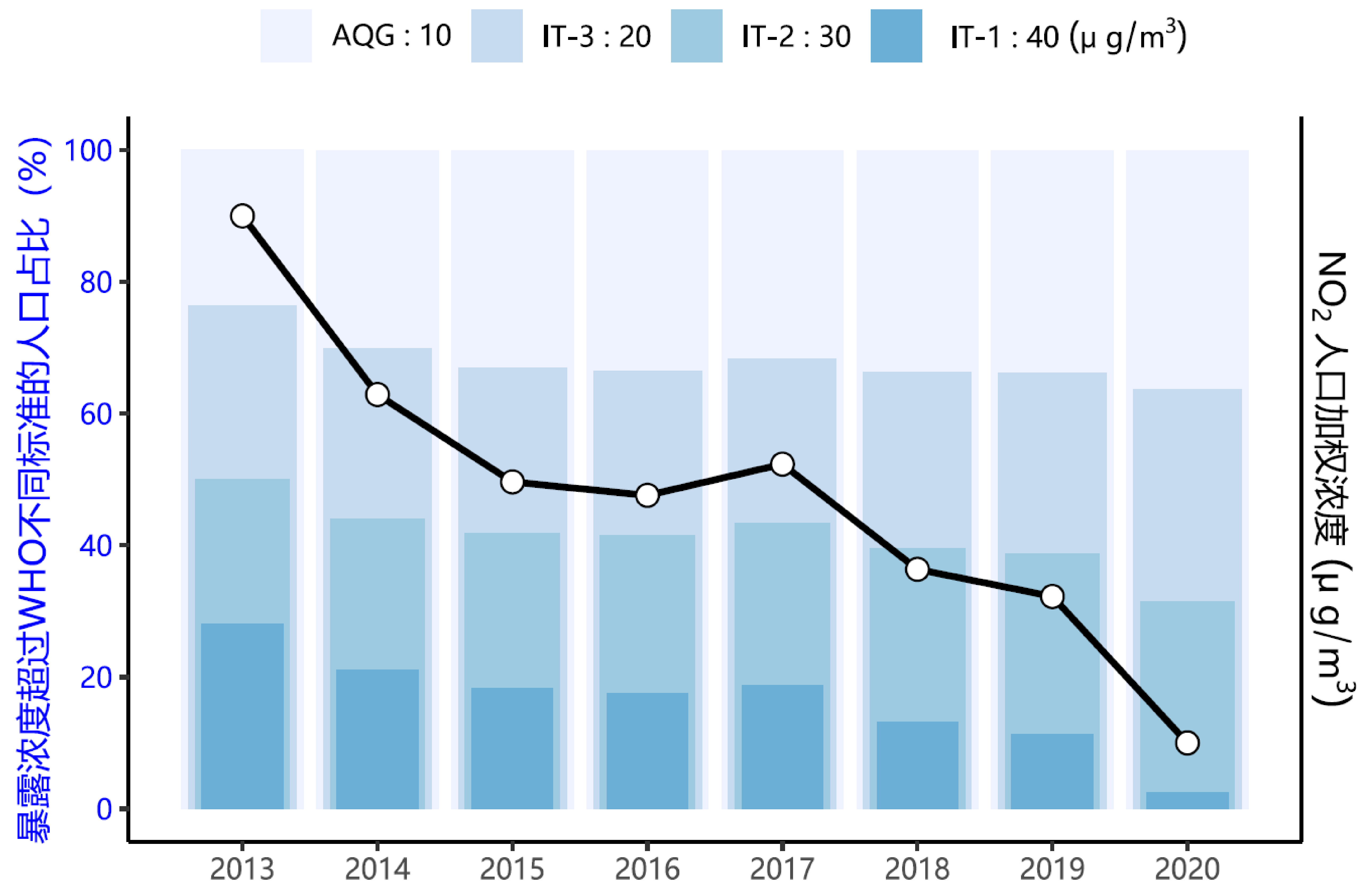


图3.1 2013-2020年人口加权的NO₂暴露浓度（右侧）及超过WHO标准的人口占比（左侧）

图3.1展示了2013-2020年人口加权的NO₂暴露浓度变化。“大气十条”实施的五年期间，NO₂暴露浓度从32µg/m³降低到28µg/m³，“蓝天保卫战”三年期间，进一步降至24µg/m³。人口分布中，暴露浓度超过WHO过渡期目标IT1（40µg/m³）的占比从2013年的28%下降到2017年19%，再降至2020年的2%。

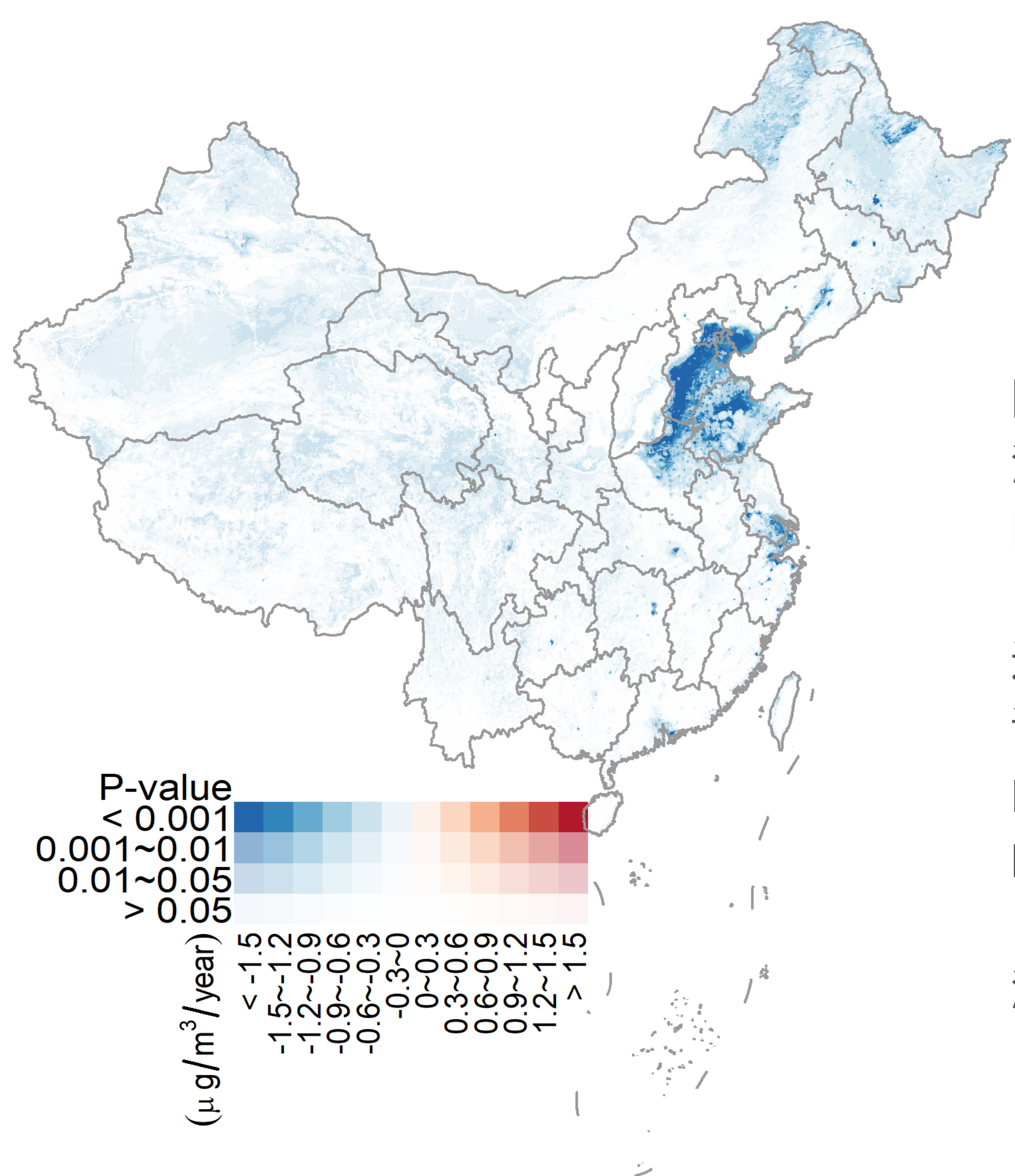


图3.2展示了2013-2020年间NO₂浓度降低趋势的空间分布。每个网格点上，利用最小二乘法计算NO₂月均浓度的长期趋势，并且运用图层的透明度代表趋势的统计显著程度（P值）。结果表明期间NO₂污染有所下降，华北地区的下降幅度最大，长三角地区NO₂污染的改善趋势也较为明显。没有显著差异。

图3.2 2013-2020年NO₂浓度变化趋势的空间分布

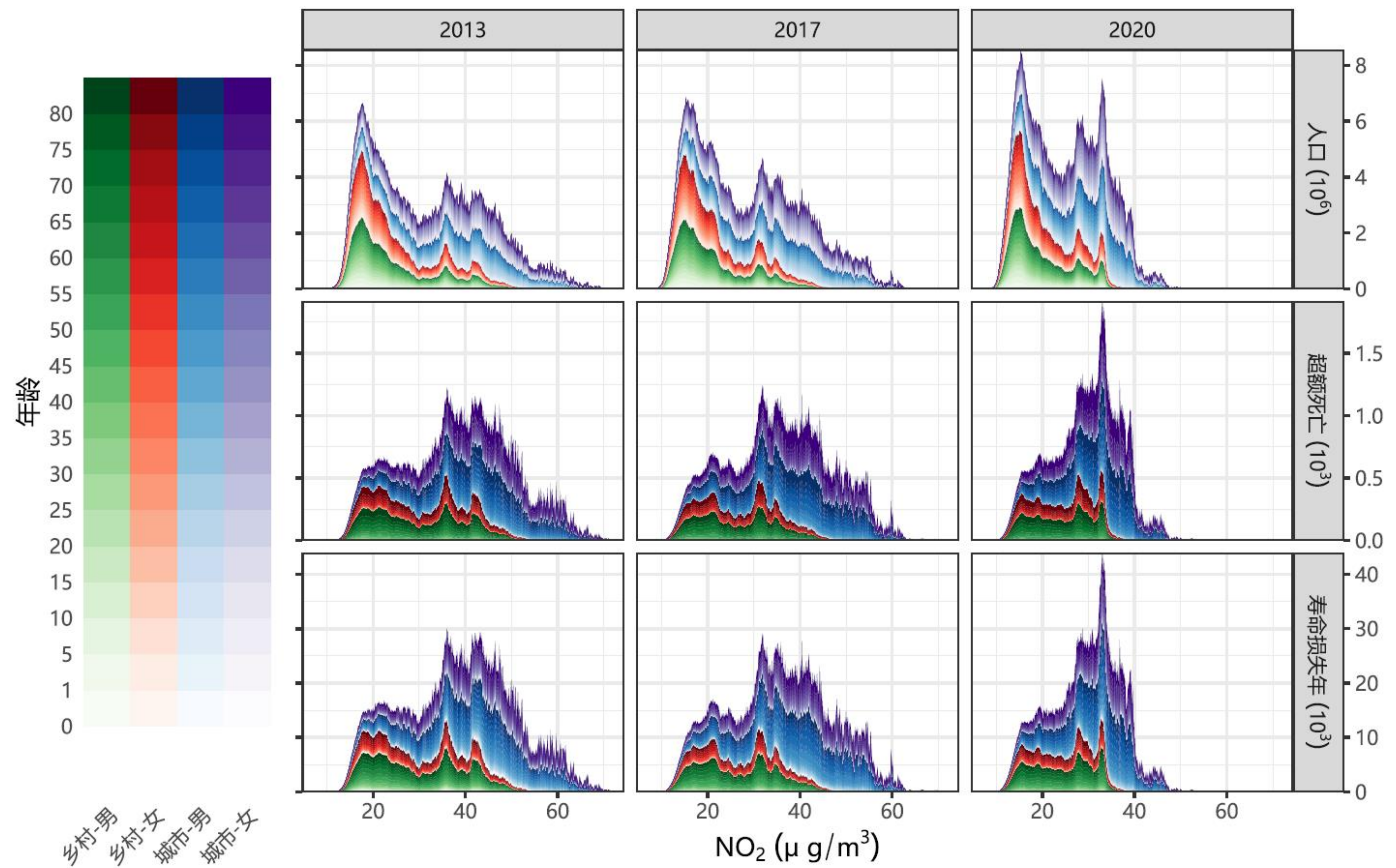


图3.3 2013年、2017年、和2020年NO₂暴露和疾病负担的人群分布情况

图3.3还对比了2013、2017和2020年不同暴露水平的人口分布及其“城乡-年龄-性别”特征，结果表明：从2013到2020年，人口分布呈现向低暴露浓度区间集中的趋势，这也说明NO₂污染程度的显著改善。此外，城市的NO₂浓度要明显高于乡村，而不同年龄和性别之间的NO₂暴露浓度差异不明显。

NO₂暴露的健康影响

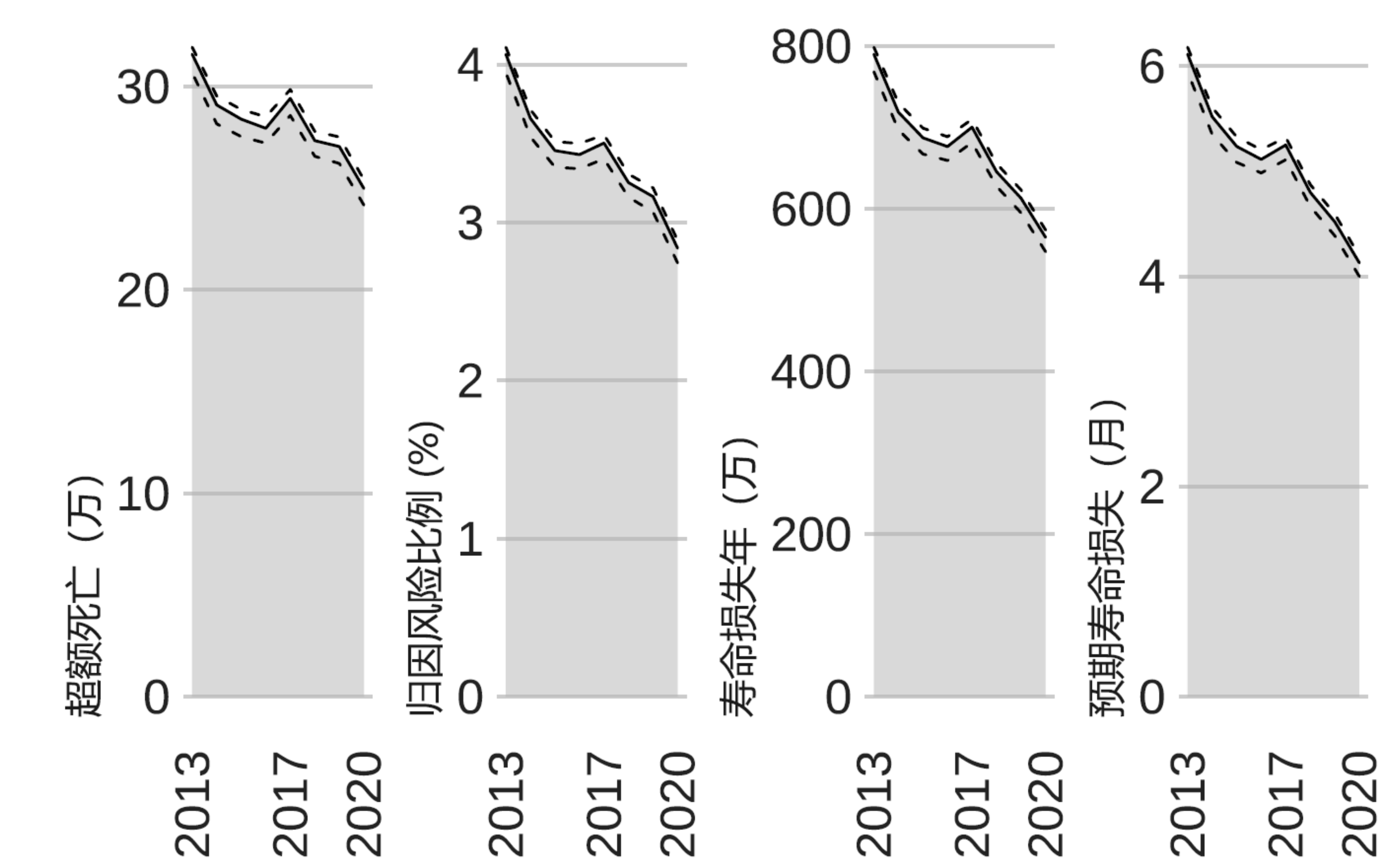


图3.4 NO₂暴露的疾病负担：超额死亡人数、归因风险占比、总寿命损失年和预期寿命损失，2013-2020

图3.4展示了2013-2020年NO₂长期暴露的疾病负担，包括超额死亡人数、归因风险比、总寿命损失和预期寿命损失。2013、2017和2020年，归因于NO₂暴露的预期寿命损失分别为6.11、5.24和4.13 个月。除去2017年的小范围的上升外，各项疾病负担指标均呈现总体呈现线性的下降趋势，和NO₂浓度的变化趋势相吻合

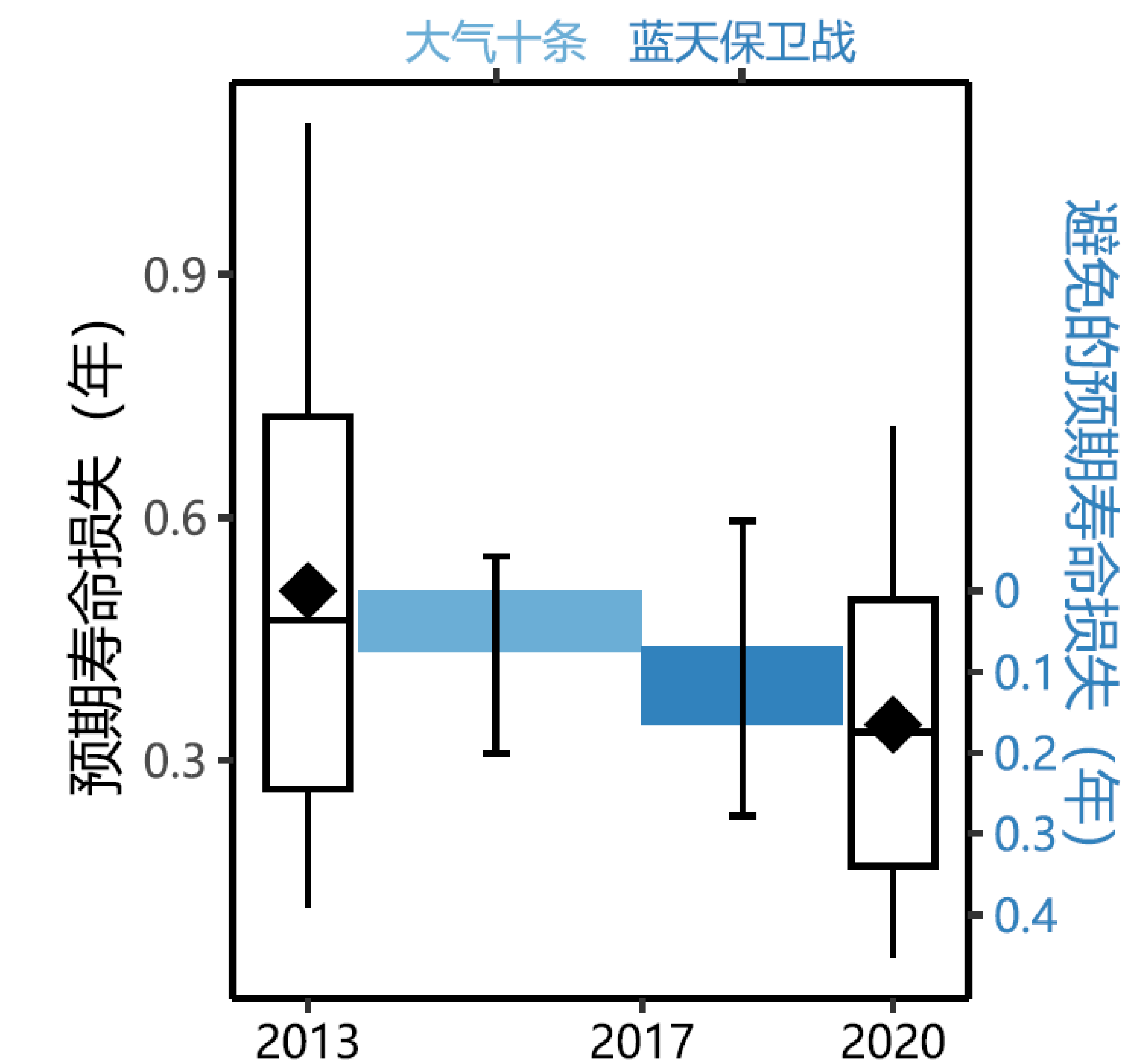


图3.5 NO₂暴露相关预期寿命损失的变化，以及归因于大气十条和蓝天保卫战期间所暴露改善所避免的预期寿命损失

图3.5展示了2013-2020期间归因于NO₂长期暴露的预期寿命损失及其变化，对比各阶段空气污染治理带来的健康收益。“大气十条”期间，空气治理避免了0.86个月的预期寿命损失，“蓝天保卫战”期间，避免了1.12个月的预期寿命损失。由于NO₂与死亡的暴露反应关系呈亚线性，因此在经过“大气十条”的治理后，“蓝天保卫战”得以从更低NO₂浓度的基础上深度治理污染，从而带来更强的减排边际效益。

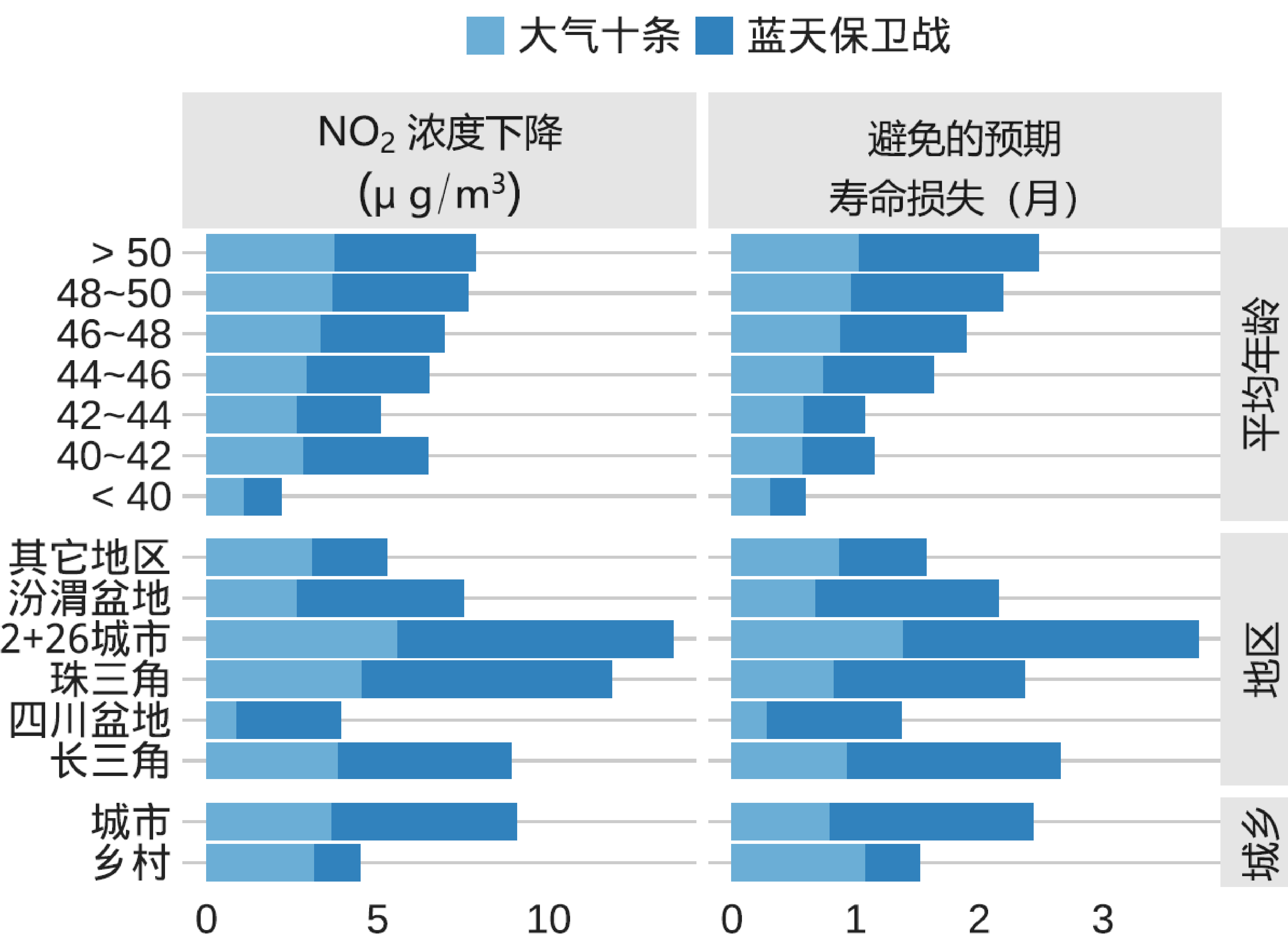


图3.6 分地区、分人群的NO₂暴露水平改善与健康改善

图3.6展示了不同地区、年龄结构、城乡居住情况下的NO₂暴露改善以及相关的健康收益。总体来看，NO₂空气质量的改善与健康改善呈现正比趋势，但也有少数例外。如，珠三角地区NO₂浓度的降低程度仅次于京津冀附近的2+26城市，但其健康收益的增加并不明显，这可能与珠三角地区平均年龄偏低有关。

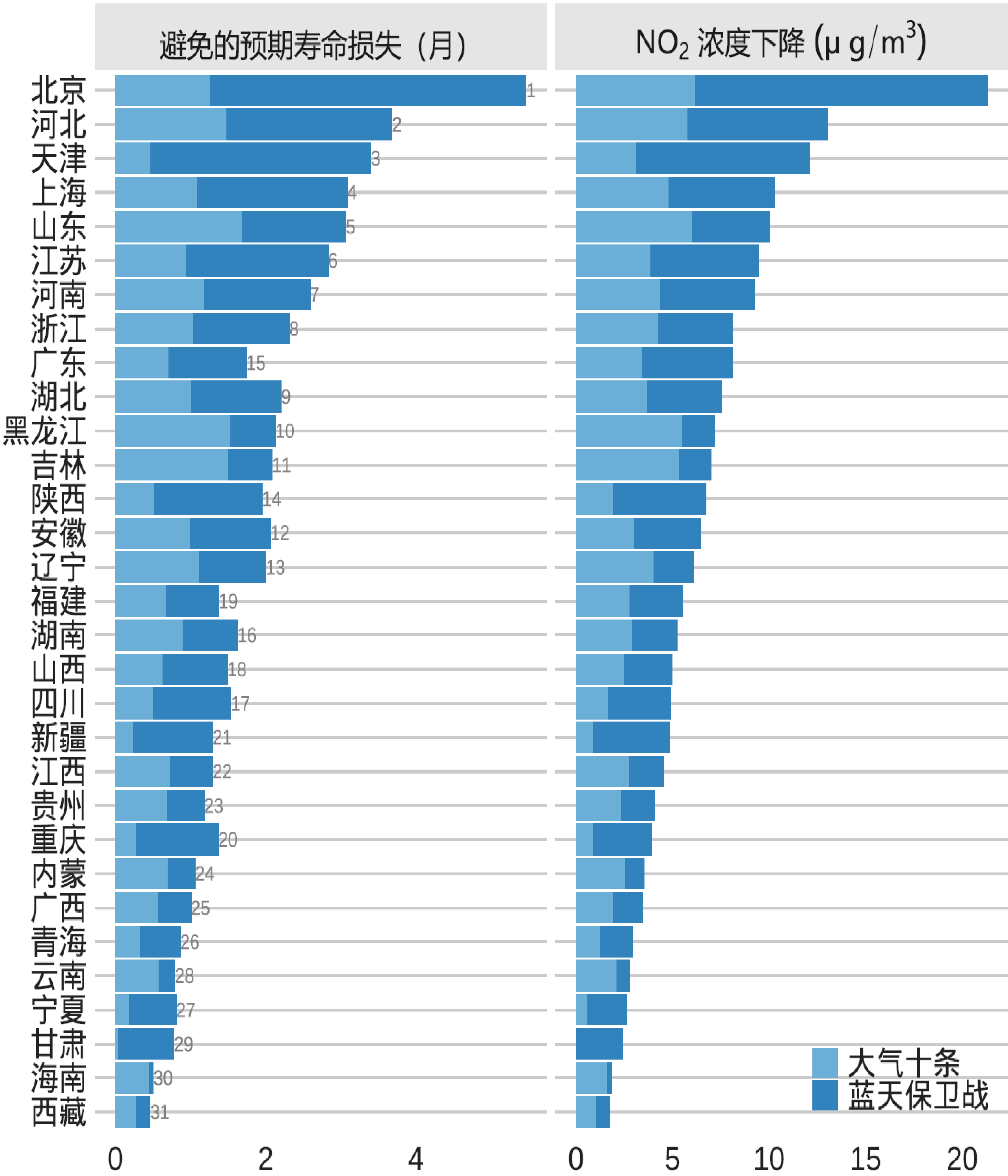


图3.7 分省的NO₂暴露水平改善与相关健康收益

图3.7展示了不同省份NO₂暴露改善及其所避免的预期寿命损失大小。结果表明，除去小部分省份的轻微变动，NO₂的健康收益与其暴露水平的改变总体成比例，这与地区汇总分析的结果类似。在所有省份中，暴露与健康改善最明显的是北京，最不明显的是西藏。

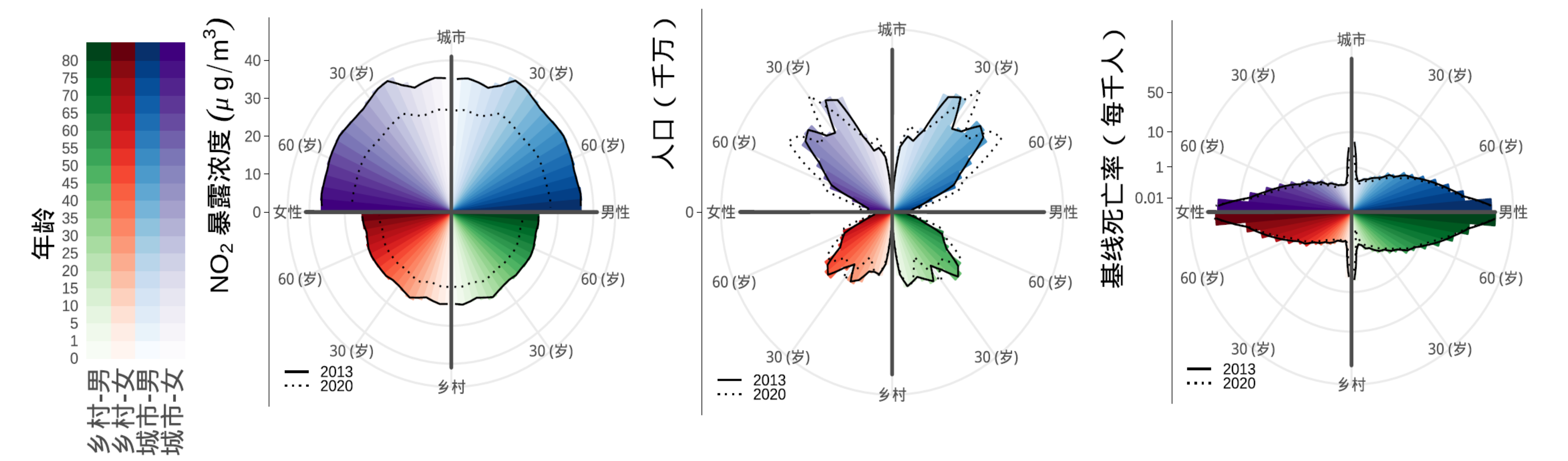


图3.8 NO₂疾病负担评估输入数据（浓度、人口、基线死亡风险）的人群分布

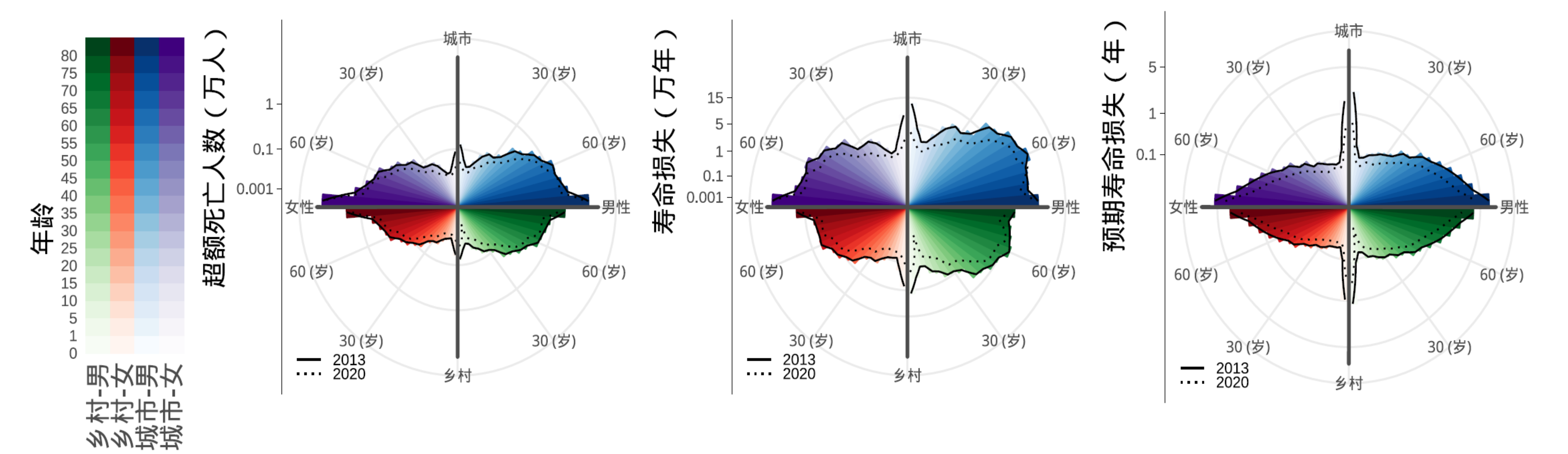


图3.9 NO₂疾病负担评估（超额死亡、寿命损失、预期寿命损失）的人群分布

图3.9和3.10展示了决定NO₂疾病负担评估模型的输入和输入数据的人群构成比例。图3.8展示了在全国平均水平上，不同亚组人群的疾病负担评估的输入变量；图3.9展示了在全国平均水平上，不同亚组人群的疾病负担评估输出指标。结果表明，NO₂导致的疾病负担在高年龄和男性群体中更为明显。附图3.1展示了各省城市的暴露水平、人群构成及其疾病负担的分布情况；附图3.2展示了分城市的暴露改善及其健康收益。

NO₂暴露水平的变化

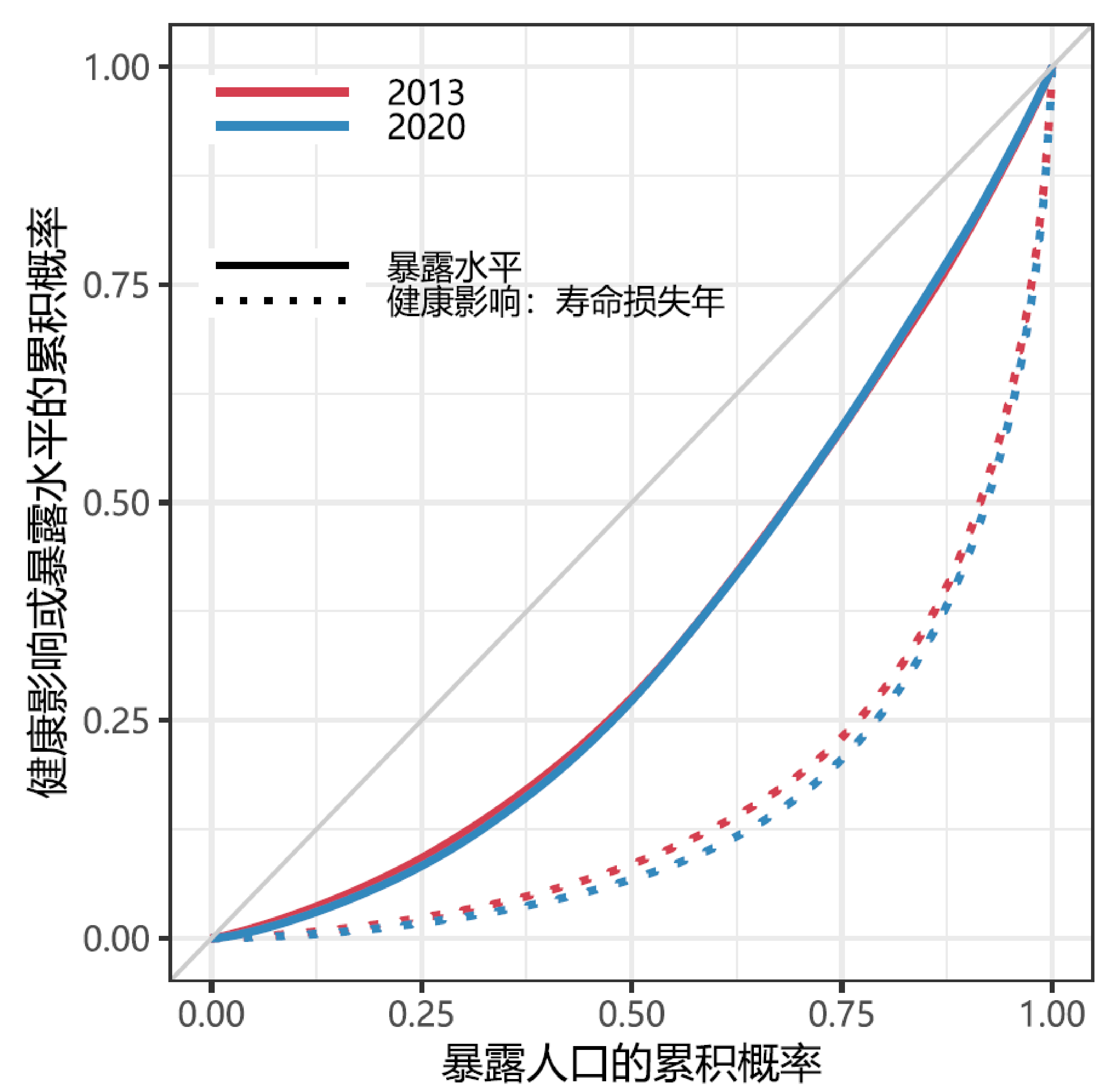


图3.10显示了NO₂暴露和疾病负担分布的洛伦兹曲线。结果显示，2013和2020年的暴露与健康分布的洛伦兹曲线接近，85%疾病负担集中于20%高危人群，不均衡性问题突出。

图3.10 NO₂暴露和疾病负担（寿命损失年）分布的洛伦兹曲线

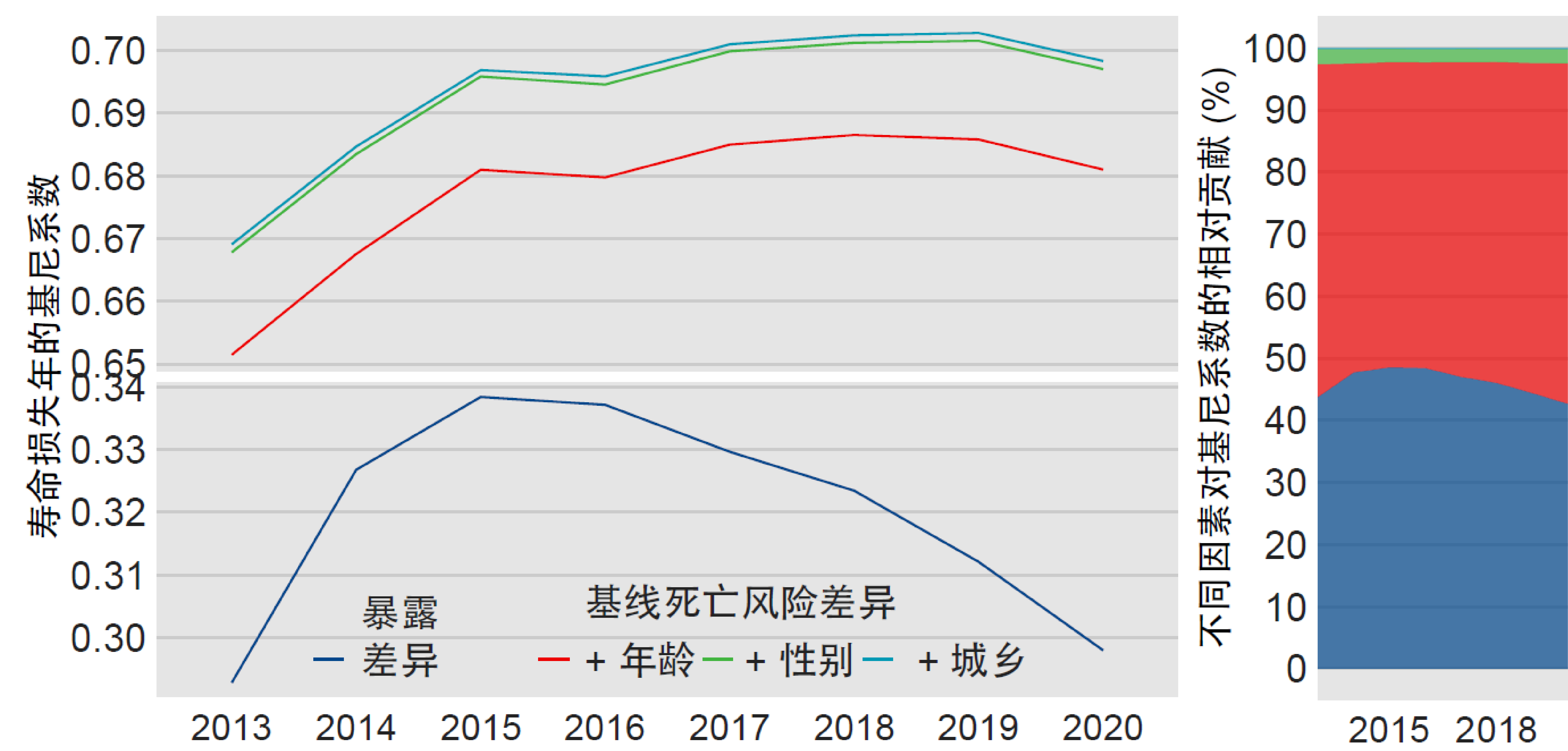


图3.11 NO₂疾病负担基尼系数的变化趋势及影响因素

图3.11进一步揭示NO₂疾病负担基尼系数的变化趋势及影响因素。总体来看，不同暴露水平之间的疾病负担差异要远小于不同人口特征（年龄、性别、城乡）之间的疾病负担差异，由暴露差异得到的基尼系数呈现先增后降的趋势。然而，2013至2020年间，人口特征之间疾病负担的不均衡分布现象愈发凸显，性别和城乡之间的差异化分布尤为严重，基尼系数达到0.7左右。

04

结论



在2012年底，中国修订了新的《环境空气质量标准》（GB 3095-2012），并采取了强有力的大气污染治理措施，使得空气质量得到了大幅改善，与健康息息相关的PM_{2.5}暴露浓度快速下降。“大气十条”期间，人口加权PM_{2.5}暴露浓度从69μg/m³降低到47μg/m³，经过“蓝天保卫战”期间的进一步污染治理深入，人口加权PM_{2.5}暴露浓度进一步降低到36μg/m³、接近我国现行标准（PM_{2.5}年均浓度35μg/m³）。

根据《全球疾病负担2019》研究测算，在60多种危害健康的风险因素中，室外空气PM_{2.5}和O₃污染排名第6和33位，被认为与缺血性心脏病、脑卒中、肺癌、慢性阻塞性肺病、下呼吸道感染、二型糖尿病、早产和低出生体重等多种疾病或不良健康结局有关。

“大气十条”期间因PM_{2.5}和O₃暴露水平的下降，预期寿命增加1.87个月，“蓝天保卫战”期间增加了3.94个月。根据空气污染健康效应的相关研究，空气质量改善的边际效应在低浓度端更大，因此，“蓝天保卫战”阶段对应的健康改善幅度更大，但这也应归功于在“大气十条”基础上的“持续努力”。

由于各地基础空气质量、年龄结构、健康基线水平的差异，导致空气质量改善与健康改善并不总是成正比。空气质量改善最多的是京津冀地区的“2+26”城市，但健康改善最多的地区是长三角和四川盆地。此外，空气质量改善具有一定城乡差距，但健康改善的城乡差距并

不明显。如果把空气质量改善的健康影响作为一种“收益”，与经济收入类似、具有潜在的分布不均衡的问题，重点治理地区、对空气质量敏感的人群，往往健康收益更高。本研究仿照经济学中的基尼系数，计算空气改善健康收益的均衡程度，结果显示：“大气十条”期间，一半收益集中于1/4人口，基尼系数0.32；“蓝天保卫战”期间，一半收益集中于1/3人口，基尼系数0.18，带来的健康收益更为均衡。

随着空气污染的健康效应的证据越来越多，2021年世界卫生组织制定了新的《全球空气质量指南》，针对PM_{2.5}、O₃和NO₂污染提出了更为严格、更具挑战性的目标，如果将上述国际指南作为清洁空气的理想目标，我国当前空气质量仍有待进一步提高，进而可获得更大的健康收益。



参考文献

- 1.Vrijheid M, Casas M, Gascon M, Valvi D, Nieuwenhuijsen M. Environmental pollutants and child health—a review of recent concerns. *International journal of hygiene and environmental health* 2016; 219(4-5): 331-42.
- 2.Xue T, Han Y, Fan Y, et al. Association between a rapid reduction in air particle pollution and improved lung function in adults. *Annals of the American Thoracic Society* 2021; 18(2): 247-56.
- 3.Guan T, Xue T, Liu Y, et al. Differential susceptibility in ambient particle-related risk of first-ever stroke: Findings from a national case-crossover study. *American Journal of Epidemiology* 2018; 187(5): 1001-9.
- 4.Peters R, Ee N, Peters J, Booth A, Mudway I, Anstey KJ. Air pollution and dementia: a systematic review. *Journal of Alzheimer's Disease* 2019; 70(s1): S145-S63.
- 5.Han Y, Wang Y, Li W, et al. Susceptibility of prediabetes to the health effect of air pollution: a community-based panel study with a nested case-control design. *Environmental Health* 2019; 18(1): 1-9.
- 6.Zheng Y, Xue T, Zhang Q, et al. Air quality improvements and health benefits from China's clean air action since 2013. *Environmental Research Letters* 2017; 12(11): 114020.
- 7.Xue T, Liu J, Zhang Q, et al. Rapid improvement of PM_{2.5} pollution and associated health benefits in China during 2013–2017. *Science China Earth Sciences* 2019; 62(12): 1847-56.
- 8.Yin P, Brauer M, Cohen AJ, et al. The effect of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across China and its provinces, 1990–2017: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet Planetary Health* 2020; 4(9): e386-e98.
- 9.Giani P, Anav A, De Marco A, Feng Z, Crippa P. Exploring sources of uncertainty in premature mortality estimates from fine particulate matter: the case of China. *Environmental Research Letters* 2020; 15(6): 064027.
10. 王金南, 雷宇, 环境保护 宁J. 实施《大气污染防治行动计划》:向PM_{2.5}宣战. 2014; (6): 4.
11. 全国人大常委会法制工作委员会行政法室, 童卫东. 《中华人民共和国大气污染防治法》释义及实用指南: 中华人民共和国大气污染防治法释义及实用指南; 2015.
12. 耿冠楠, 肖清扬, 郑逸璇, et al. 实施《大气污染防治行动计划》对中国东部地区PM_{2.5}化学成分的影响. 2020; 50(4): 14.
13. Li J, Yao Y, Xie W, et al. Association of long-term exposure to PM_{2.5} with blood lipids in the Chinese population: Findings from a longitudinal quasi-experiment. *Environment International* 2021; 151: 106454.
14. Wang H, Liu H, Guo F, et al. Association between ambient fine particulate matter and physical functioning in middle-aged and older Chinese adults: a nationwide longitudinal study. *The Journals of Gerontology: Series A* 2022; 77(5): 986-93.
15. Xue T, Guan T, Zheng Y, et al. Long-term PM_{2.5} exposure and depressive symptoms in China: a quasi-experimental study. *The Lancet Regional Health-Western Pacific* 2021; 6: 100079.
16. Xue T, Zhu T, Zheng Y, Zhang Q. Declines in mental health associated with air pollution and temperature variability in China. *Nature communications* 2019; 10(1): 2165.
17. Yao Y, Lv X, Qiu C, et al. The effect of China's Clean Air Act on cognitive function in older adults: a population-based, quasi-experimental study. *The Lancet Healthy Longevity* 2022; 3(2): e98-e108.

18. Xue T, Zhu T, Peng W, et al. Clean air actions in China, PM_{2.5} exposure, and household medical expenditures: A quasi-experimental study. *PLoS medicine* 2021; 18(1): e1003480.
19. Yu Y, Dai C, Wei Y, Ren H, Zhou JEE. Air pollution prevention and control action plan substantially reduced PM_{2.5} concentration in China. *Energy Economics* 2022; 113: 106206.
20. 徐志虎, 曹茹, 黄婧, 潘小川, 李国星. 《大气污染防治行动计划》实施后我国城市大气PM_{2.5}浓度下降程度与中老年人精神健康状态改善的关系 %J 环境与职业医学. *环境与职业医学* 2023; 40(02): 156-62.
21. Ju K, Lu L, Wang W, et al. Causal effects of air pollution on mental health among Adults—An exploration of susceptible populations and the role of physical activity based on a longitudinal nationwide cohort in China. *Environmental Research* 2023; 217: 114761.
22. Ju K, Lu L, Chen T, et al. Does long-term exposure to air pollution impair physical and mental health in the middle-aged and older adults?—A causal empirical analysis based on a longitudinal nationwide cohort in China. *Science of The Total Environment* 2022; 827: 154312.
23. WHO. Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future: World Health Organization, 2017.
24. Liu C, Chen R, Sera F, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *New England Journal of Medicine* 2019; 381(8): 705-15.
25. Heinrich J, Thiering E, Rzehak P, et al. Long-term exposure to NO₂ and PM₁₀ and all-cause and cause-specific mortality in a prospective cohort of women. *Occupational and environmental medicine* 2013; 70(3): 179-86.
26. Faustini A, Rapp R, Forastiere F. Nitrogen dioxide and mortality: review and meta-analysis of long-term studies. *European Respiratory Journal* 2014; 44(3): 744-53.
27. Karakatsani A, Samoli E, Rodopoulou S, et al. Weekly personal ozone exposure and respiratory health in a panel of Greek schoolchildren. *Environmental Health Perspectives* 2017; 125(7): 077017.
28. Huangfu P, Atkinson R. Long-term exposure to NO₂ and O₃ and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment international* 2020; 144: 105998.
29. Huang CH, Hu JL, Xue T, Xu H, Wang M. High-Resolution Spatiotemporal Modeling for Ambient PM_{2.5} Exposure Assessment in China from 2013 to 2019. *Environ Sci Technol* 2021; 55(3): 2152-62.
30. Wang YY, Huang CH, Hu JL, Wang M. Development of high-resolution spatio-temporal models for ambient air pollution in a metropolitan area of China from 2013 to 2019. *Chemosphere* 2022; 291: 8.
31. Murray CJL, Aravkin AY, Zheng P, et al. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet* 2020; 396(10258): 1223-49.
32. Xue T, Geng GN, Meng X, et al. New WHO global air quality guidelines help prevent premature deaths in China. *Natl Sci Rev* 2022; 9(4): 3.
33. Organization WH. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: executive summary. 2021. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
34. Xue T, Tong M, Wang M, et al. Health Impacts of Long-Term NO₂ Exposure and Inequalities among the Chinese Population from 2013 to 2020. *Environ Sci Technol* 2023; 57(13): 5349-57.