

修订空气质量标准

保护人群健康

2024年1月



关于 ARCH (AiR-Climate-Health)

北京大学联合复旦大学、中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所、中国环境科学研究院、能源基金会等多家单位共同发起空气 - 气候 - 健康集成研究计划与交流平台 ARCH (AiR-Climate-Health)。ARCH 吸纳空气污染、气候变化和健康影响领域的研究机构、企事业单位、社会团体等组成学术交流与合作平台，旨在以健康驱动大气污染和气候变化的协同治理，并作为智库助力“碳中和”目标的尽快实现。

发布时间

2024 年 1 月

参与作者

(按拼音字母排序)

艾思奇	蔡 婧	曹靖原	陈仁杰	邓建宇
董妍君	段小丽*	宫继成	郝吉明*	阚海东*
康 宁	李芳洲	李湉湉	林 寰	刘 俊
刘 利	刘 欣*	刘园园	马 军	牛 越
阮清鸳	万 薇	王贝贝	王若涵	王书肖
王彦滢	魏永杰	吴 丹	薛 涛	张世秋
赵 斌	钟美龄	朱 彤*		

(*ARCH 指导委员会成员或者科学顾问)

免责声明

本报告是能源基金会支持空气 - 气候 - 健康集成研究计划与交流平台 (ARCH) 组织完成，由 ARCH 所有，对外公开发布，使用者不得出于商业目的销售、传播或制作相关衍生作品。ARCH 对于本报告保有最终解释权。

修订空气质量标准、保护人群健康

目录 CONTENTS



CONTENTS

研究背景

科学认知

标准制定

管理策略





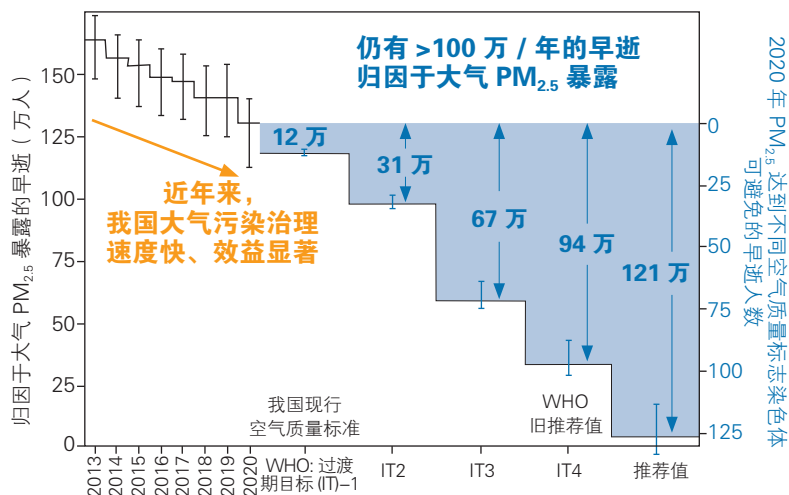
研究背景

紐萃泉普

修订空气质量标准
保护人群健康

主要发现

我国空气污染治理已显著改善居民健康水平，但距国际空气质量标准仍有较大差距



中国PM_{2.5}浓度迅速改善对超额死亡的影响，以及达到不同标准的改善作用

图源: Xue et al., 2022.

人民政协报

中国成为世界上治理大气污染速度最快的国家

刘炳江 2022年6月6日

2013年至2020年间，污染减少了近40%——平均预期寿命增加了约2年。虽然世界上许多地方近年来污染有所上升，但自2013年以来，全球污染总体上却在下降，完全归功于中国的影响。如果没有中国在这段时间内污染显著减少，全球平均污染水平将会增加。

芝加哥大学能源与环境政策研究所 EPIC NEWS JUN 14, 2022

中国用7年的时间就取得了美国用30年才取得的空气污染物跌幅。

彭博社 2022年6月14日



我国的空气污染治理

2012年修订和发布的《环境空气质量标准(GB3095-2012)》是中国大气污染防治进程的一个里程碑。在PM_{2.5}首次纳入环境空气质量标准后，我国于2013-2017年期间实施了以降低PM_{2.5}浓度为核心目标的《大气污染防治行动计划》，并于2018-2020年间实施了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》。在过去十年间，中国在保持经济快速发展的同时也实现了主要大气污染物排放量的逐年下降，城市空气质量整体改善显著。2013-2022，PM_{2.5}年均浓度下降约57%，成为世界上治理空气污染速度最快的国家。2020年PM_{2.5}长期暴露相关的过早死亡人数为139万，较2013年下降约20%。然而，随着我国超过六成的城市空气质量的全面达标，现行标准已不再具备引领大部分达标城市空气质量持续改善的作用；未来，如对标国际上更严格的空气质量标准指导值，还将获得更大的健康效益。是否要在“十四五”期间启动新一轮标准修订，为各地空气质量持续改善提供长期目标和动力，已被提上研究议程。

标准对比

中国现行环境空气质量标准（GB 3095-2012）与 2021 版世界卫生组织 AQG 及过渡期目标的对比，粗体数字显示有别于 2005 版的新修订（数据来源：朱彤等，科学通报，2022）。



新机遇

目前中国已在实施双碳战略，由于空气污染和气候变化同根同源，在致力于推动绿色转型、低碳发展的关键时期，持续推进空气质量改善不仅可以进一步降低因空气污染引致的各类健康风险、减少公共健康保护方面的开支、提升民众的生活质量，也可以降低温室气体排放、促进双碳目标达成。同时，借助更严格的空气质量标准和持续的空气质量改善行动，也将助力产业和经济结构调整，为中国整体的绿色转型和低碳发展提供巨大驱动力和政策实施基础。

修订空气质量标准
保护人群健康

污染物	指标	国家标准		AQG (2021)				指导值
		一级	二级	过渡期目标				
				1	2	3	4	
PM _{2.5} (µg/m ³)	年均值	15	35	35	25	15	10	5
	24h 平均	35	75	75	50	37.5	25	15
PM ₁₀ (µg/m ³)	年均值	40	70	70	50	30	20	15
	24h 平均	50	150	150	100	75	50	45
O ₃ (µg/m ³)	暖季峰值 (6 个月)				70			60
	日最大 8h 平均	100	160	160	120			100
NO ₂ (µg/m ³)	年平均	40	40	40	30	20		10
	24h 平均	80	80	80	50			25
SO ₂ (µg/m ³)	年均值	20	60	60				
	24h 平均	50	150	150	50			40
CO (mg/m ³)		4	4	4				4

空气质量指导值及标准对比

世界卫生组织 (WHO) 2021 年更新的《全球空气质量指南 (Air Quality Guidelines, AQG)》引发热议。该修订一是基于暴露响应关系在低浓度水平发现的健康影响的新证据，以及多国多城市的分析结论，加严了颗粒物 PM_{2.5}、PM₁₀ 的长期暴露和短期暴露阈值，其中 PM_{2.5} 年均限值由 10µg/m³ 下调到 5µg/m³，加严 50%。日均限值由 25µg/m³ 下调到 15µg/m³，加严 40%。二是基于 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，加严燃料燃烧的产物 NO₂ 控制要求，将 NO₂ 的年均浓度值从 40µg/m³ 变更为 10µg/m³；加严 75%。三是基于发现的臭氧污染长期暴露的健康影响，尤其是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 浓度全年连续 6 个月日最大 8 小时平均浓度均值，可简称 O₃ 高峰季节平均值，为 60µg/m³。

同时，WHO 也设置了过渡阶段目标值供各国参考。AQG 过渡值目的是指导污染水平相对较高的地区，依据过渡值制定符合本地区空气治理客观规律和经济社会发展趋势的空气质量标准限值或改善目标。我国当前 PM_{2.5} 标准限值与 WHO 建议的第一阶段过渡目标 (WHO IT-1 指导值) 相当，我国现行的标准限值是欧盟标准的 1.4 倍，日韩的 2.3 倍，新加坡及美国的 2.9 倍，新版指导标准的 7 倍，与充分保护健康的清洁空气标准有较大差距。

科学认知

- 空气污染具有哪些健康危害？相关暴露反应关系研究进展如何？
- 中国本土的人群证据与国际研究结论是否一致？

标准制定

- 关于空气质量标准的修订，国际上有哪些经验值得参考？
- 中国提高空气质量标准的成本和效益是多少？
- 典型地区如何达到世界领先的空气质量标准？

管理策略

- 如何增强空气污染暴露健康风险的预测预警和公众认知？
- 政策建议：尽快推动标准修订

概念：标准、基准、评价方法

空气质量标准 是基于一定时期环境毒理学和流行病学证据、以及环境风险判断和社会承受能力，对环境空气中污染物浓度做出的限制性规定。我国的《环境空气质量标准》在地位和《大气污染防治法》同等重要，是空气质量管理领域中最高等级的法规文件。中国大气污染防治法第三条第二款明确要求：“地方各级人民政府应当对本行政区域的大气环境质量负责，制定规划，采取措施，控制或者逐步削减大气污染物的排放量，使大气环境质量达到规定标准并逐步改善。”

大气环境基准 是指基于系统科学研究证据评估确定的大气污染物暴露与不良影响的程度或风险之间的一系列定量的暴露—反应关系。**基准值**是依据污染物对人体健康的暴露响应关系，找到最低风险阈值。基准是指导标准制定的科学依据。标准则是在此基础上，综合考虑保护和改善生活环境、生态环境，保障人体健康等要求、以及社会经济发展水平等，制定的在一段时间内能够实现的目标值，是综合反映空气质量改善客观规律和社会主观治理意愿的产物。

空气质量评价方法 是指导使用空气质量标准、规范环境空气质量评价工作的操作指南。一般规定环境空气质量评价的范围、评价时段、评价项目、评价方法及数据统计方法等内容。比如评判一个地区是否达标，既要分析年均浓度达标，也要分析日均浓度达标频次，还要分析空间站点的达标分布等。



报告介绍

空气质量标准何时修订、将标准设置在什么水平、新标准的实施将带来什么效益、付出多大成本、产生什么经济影响，这些决策者关切的问题亟需开展全面、综合的研究。在此背景下，能源基金会支持了“制定基于健康保护的中国环境空气质量标准”集成研究项目，从“科学认知”、“标准制定”、“管理策略”三个维度，梳理了我国空气质量标准所具备的工作基础，分析了科研、管理等方面潜在的不足和问题。本报告为集成研究项目各课题组的研究成果汇总，旨在为决策部门提供相关参考。



科学认知 对公众认知

研究进展综述
本土数据验证

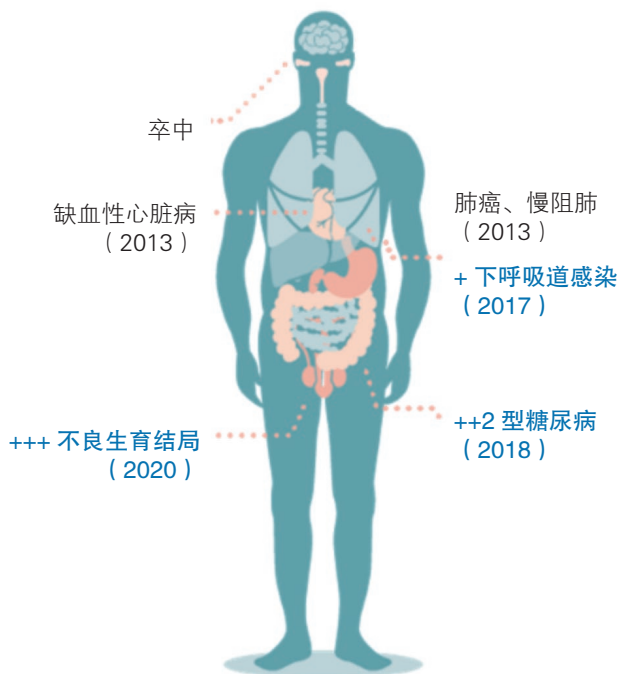
修订空气质量标准
保护人群健康

1.1 研究进展综述

— 北京大学, 朱彤、宫继成、薛涛

全球疾病负担评估报告采纳的空气污染暴露的健康结局

- 2013 年报告中, 下呼吸道感染仅包括儿童, 2017 年新增成人下呼吸道感染
- 不良生育结局包括低出生体重和早产, 及其介导的新生儿死亡风险



数据来源: Murray et al., Lancet 2020; Stanaway et al., Lancet 2018; Cohen et al., Lancet 2017; Lim et al., Lancet 2013

细颗粒物 PM_{2.5}

空气动力学直径小于 2.5 微米的颗粒物

粗颗粒物 PM₁₀

空气动力学直径小于 10 微米的颗粒物

臭氧 O₃

二氧化氮 NO₂

二氧化硫 SO₂

一氧化碳 CO

空气污染健康危害的概述

科学研究指出多种空气污染物皆会危害人体健康。主要的空气污染物可以根据相态分为两大类: (1) 作为混合物的 PM_{2.5} 和 PM₁₀; (2) 作为纯净物的气态污染物, 包括 O₃、NO₂、SO₂、CO。大量研究发现这些污染物与多种健康结局相关; 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”组合应该被决策者采纳、用于支撑环境质量的制定修订, 需要对已有证据进行全方位的评估。根据当前的研究进展, 空气污染暴露与全因死亡、心脑血管和呼吸道疾病之间具有因果联系; 且最新研究提示, PM_{2.5} 暴露还可能与代谢疾病、神经系统疾病和不良生育结局有关。由于不同空气污染物之间具有强相关性, 其健康风险并不相互独立, 本报告沿用全球疾病负担研究的分析方法, 以 PM_{2.5} 和 O₃ 作为空气污染健康效应的代表。

风险比

基于流行病学研究，据“中国文献荟萃分析-中国多中心研究-全球文献荟萃分析”优先级顺序进行筛选。

心脑血管疾病

心脑血管疾病是全球和我国的首要致死性疾病。PM_{2.5} 短期暴露量每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，心血管发病和死亡率分别增加 0.70% 和 0.38%

呼吸系统疾病

PM_{2.5} 暴露直接作用于呼吸道，可以诱发下呼吸道感染、慢性阻塞性肺病急性加重、哮喘等。浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，死亡率增加 0.96%



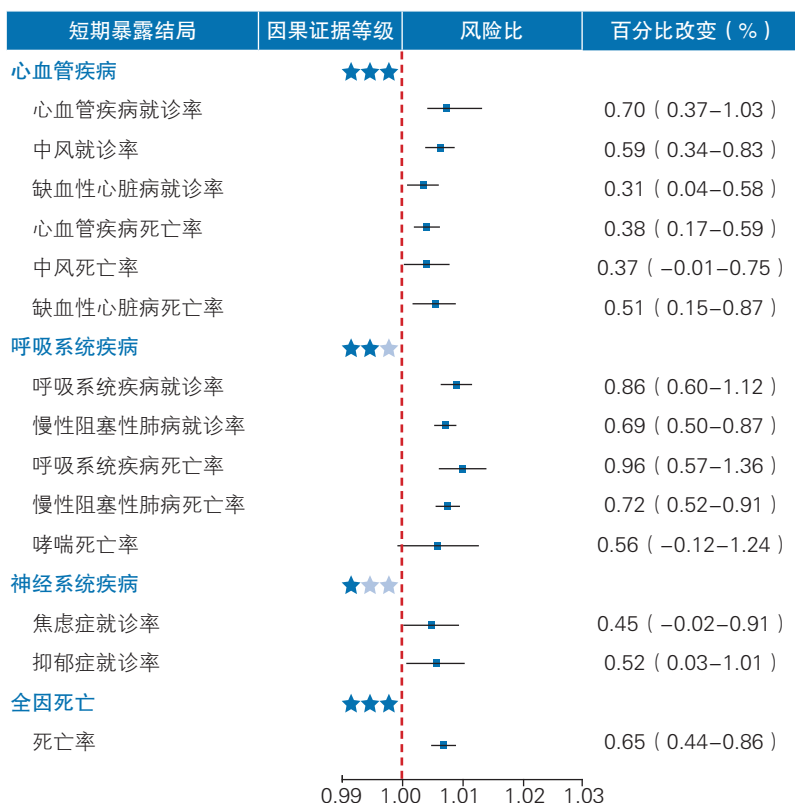
修订空气质量标准
保护人群健康

暴露反应关系及其因果等级

定量描述特定“暴露-结局”关联的函数被称为暴露反应关系，是判断空气质量标准的关键参考依据，通常从高质量的流行病学研究中获得。考虑到既往流行病学证据的严谨性、一致性和丰富程度，可以将空气污染健康效应划分为不同的因果等级，不同机构对因果等级的分类结果基本一致。以美国环保署《细颗粒物的综合科学评估报告》为例，特定暴露和结局组合共分为四个等级：因果联系（三星）、可能的因果联系（二星）、潜在的因果联系（一星）、因果联系不足（无星）。

PM_{2.5} 暴露的健康危害

PM_{2.5} 粒径小、比表面积大，暴露后可深达肺泡并沉积，诱发呼吸系统的免疫反应和炎症；PM_{2.5} 能够吸附空气中的重金属等有毒有害物质，部分成分能够穿透呼吸屏障、血脑屏障、胎盘屏障等多种生物膜，抵达多个身体器官，造成心脑血管系统、代谢系统、生殖系统疾病。长、短期 PM_{2.5} 暴露与全因死亡和心脑血管疾病之间具有因果联系（下图数据来源：Luo et al., 2023; Orellano et al., 2020; Gu et al., 2020; Ma et al., 2022）。



心脑血管疾病

PM_{2.5} 年均值或多年平均值每升高 10μg/m³, 缺血性心脏病患病风险增加 16%、中风患病风险增加 11%

全因死亡

暴露浓度每升高 10μg/m³, 成人全因死亡风险增加 8%、胎儿死亡(死产) 风险增加 11%

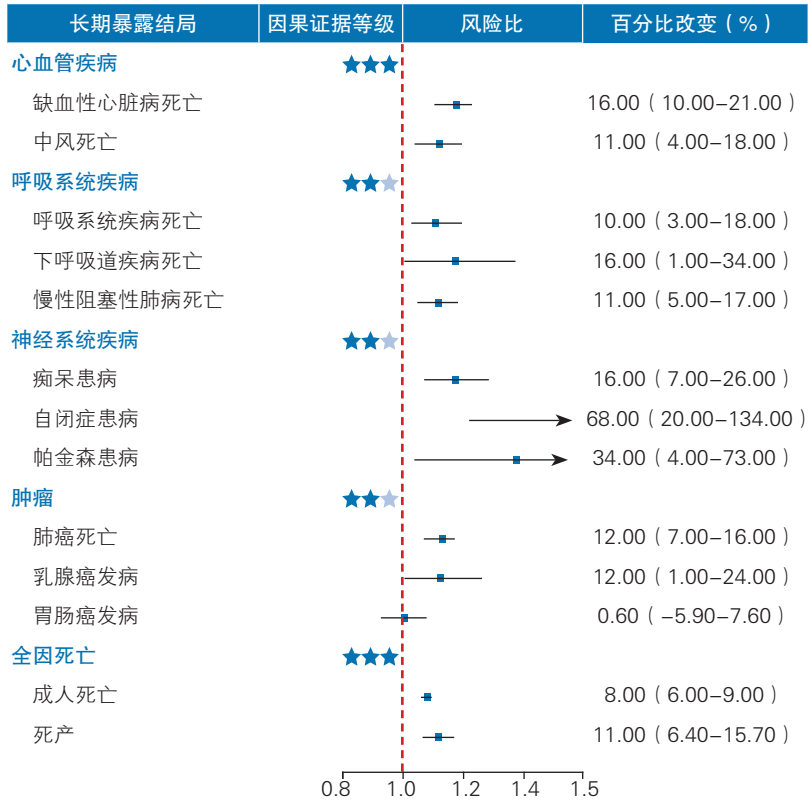
肺癌

PM_{2.5} 长期暴露导致巨噬细胞流入肺部并释放白细胞介素 1β, 在具有 EGFR 突变的肺泡 II 型上皮细胞内, 该过程提高了肿瘤发生概率。暴露浓度每升高 10μg/m³, 肺癌患病风险显著增加 12%

呼吸系统疾病

每日最大 8 小时臭氧 (MDA8) 浓度升高 10μg/m³, 每日因呼吸系统疾病就诊人数升高 0.26%、死亡的人数升高 0.39%

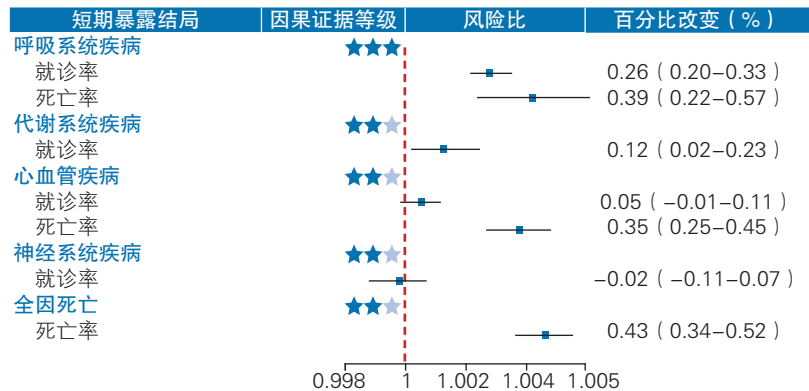
(数据来源 : Gu et al., 2020; Shi et al., 2020; Orellano et al., 2020)



(上图数据来源 : Chen et al., 2020; Xue et al., 2022; Gabet et al., 2021; Pritchett et al., 2022; Fu et al., 2019)

O₃ 暴露的健康危害

O₃ 是典型城市污染物之一、并且是一种强氧化剂。人体暴露于 O₃ 后会直接危害呼吸道系统, 短期 O₃ 暴露与呼吸系统疾病之间存在因果联系, 而长期暴露与呼吸道疾病的发病和死亡也存在可能的因果联系。与 PM_{2.5} 不同, O₃ 暴露影响心脑血管疾病的相关研究数量有限。心脑血管疾病与短期 O₃ 暴露之间仅存在可能的因果联系, 而与长期 O₃ 暴露的因果联系更弱。流行病学证据还揭示了 O₃ 暴露可导致特定脆弱人群的健康危害, 例如孕期 O₃ 暴露可能危害生殖健康, 孕期 O₃ 暴露与不良妊娠结局之间存在潜在的因果联系。



心脑血管疾病

O₃ 长期暴露浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，冠心病发病风险升高 3.5%

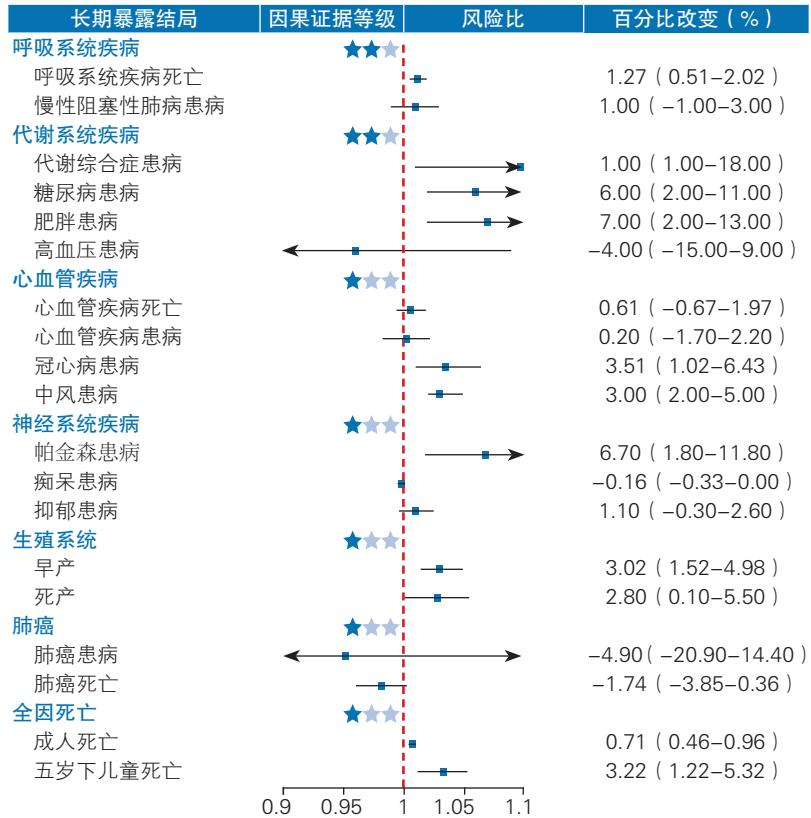
不良生育结局

孕前期 O₃ 暴露浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，早产发生率升高 3.02%、死胎发生率升高 2.8%

老年精神健康

O₃ 长期浓度每升高 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，帕金森病发病风险增加 6.7%

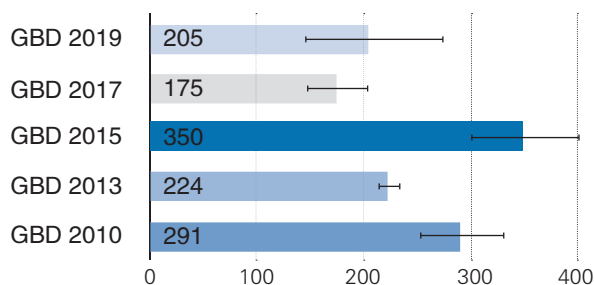
右图数据来源：Sun et al., 2022; Wright et al., 2023; Yang et al., 2018; Yu et al., 2023; Huang et al., 2020; Qin et al., 2021; Chen et al., 2022; Chen et al., 2017; Xue et al., 2023; Borroni et al., 2022.



暴露反应关系的不确定性

空气污染健康效应具有较大的不确定性，主要表现为疾病负担计算结果在不同研究之间存在差异。一方面，随着时间进展，疾病负担评估结果的变化体现了相关研究证据的积累和更新；另一方面，暴露反应关系及风险评估的结果存在不确定范围，在解读结果时，需要同时考虑点估计和置信区间。

全球疾病负担研究 (GBD) 估算结果



1990年归因于PM_{2.5}的早逝人数(万人)

PM_{2.5} 是 GBD 评估采纳的主要大气污

染物，暴露导致的健康结局包括：

+ 低出生体重、早立相关的儿童死亡

+ 二型糖尿病

+ 成人下呼吸道感染

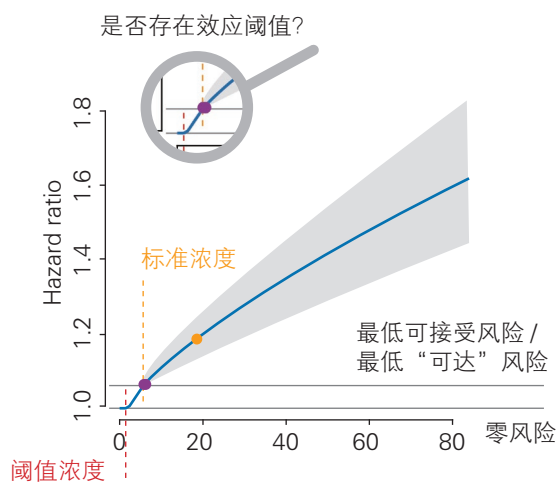
结局不变(数据更新)

儿童下呼吸道感染 + 4 种成人疾病：卒中、缺血性心脏病、肺癌、慢阻肺

数据来源：Murray et al. Lancet 2020; Stanaway et al. Lancet 2018; Cohen et al. Lancet 2017; Forouzanfar et al. Lancet 2015; Lim et al. Lancet 2013

修订空气质量标准
保护人群健康

暴露反应关系非线性



制定空气质量标准的前提假设是暴露反应关系是非线性的，在低浓度段存在效应阈值，因此，利用成熟的非线性模型分析空气污染的健康效应尤为必要。此外，目前最为广泛采用的是“亚线性”的暴露反应关系，用以反映边际效应递减的特征，亦即：减少单位浓度带来的空气污染治理的健康改善作用将随着浓度下降而增加。这为我们在低浓度下继续改善空气质量保护人体健康提供了重要科学依据。因此，明确暴露反应关系的非线性特点对环境政策制定十分重要（图源：Burnett et al., 2018）。

美国环保署划分的 PM_{2.5} 易感人群

- 证据充足：儿童、有色人种
- 有限证据：心肺患病、肥胖、低收入、吸烟、基因突变
- 证据不足：高龄、男性、城市化、不健康饮食

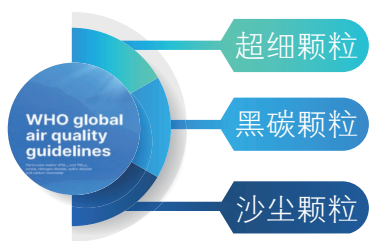
数据来源：U.S. EPA. Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, Dec 2019). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-19/188, 2019.

暴露反应关系的异质性和易感人群

越来越多的研究证实，同等的空气污染暴露浓度下，不同人群的健康风险具有差异；部分人群由于特定的生理遗传条件、社会经济水平、活动行为方式等因素，对空气污染更为易感。根据美国环保署最新的科学评估报告，已有充足的证据表明：儿童、少数族裔（主要是有色人种）对 PM_{2.5} 更易感；有限证据表明：心肺病人、肥胖者、低收入群体、吸烟者和部分变异基因的携带者为可能的易感人群；对于高龄、男性、城市化、不健康饮食是否增加人群易感性，尚缺乏足够证据。需要指出，上述证据来源于美国人群研究，中国应开展本土化的易感人群研究。

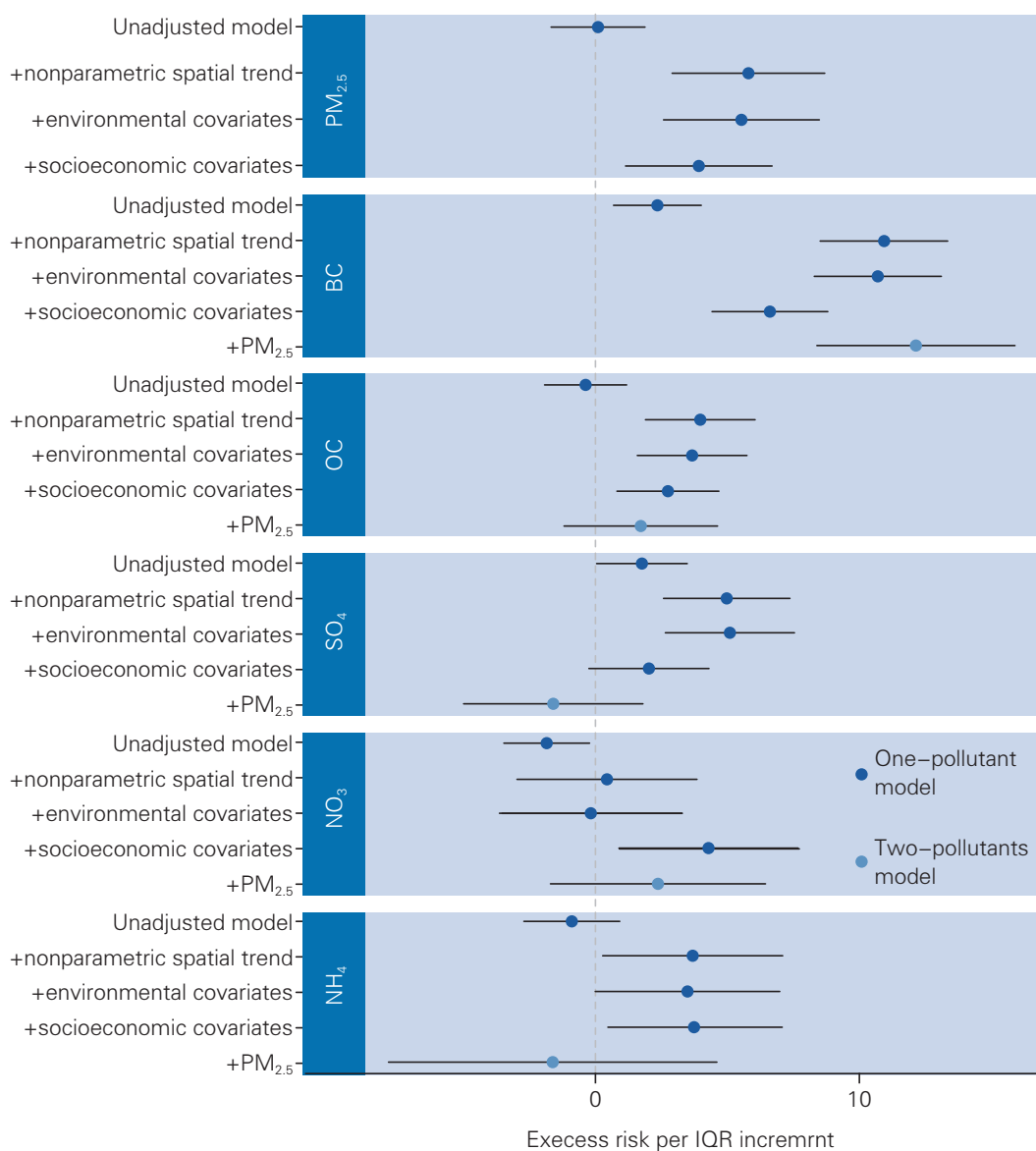


- 儿童死亡
- 呼吸系统发育
- 下呼吸道感染发病与死亡
- 早产
- 低出生体重
- 死胎
- 孕期疾病
- 代谢疾病
- 衰老
 - 生理衰弱
 - 退行性精神疾病



多种成分复合暴露反应关系

空气污染物是混合物，典型的代表是 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} ，其包含了复杂的物理、化学成分。已有研究证实不同类型单一成分的颗粒物具有不同毒性，因而不同组分构成的混合物表现出不同的健康效应。例如，WHO（2021）明确提出： $PM_{2.5}$ 中的超细颗粒、碳质颗粒和沙尘颗粒可能更具健康危害。空气污染物的来源决定了其组分构成，而污染源的时空分布与人群分布密切相关，导致不同地区空气污染的毒性存在差异。多种大气成分的复合暴露反应关系是未来需要研究的重点方面，是开展以健康效应为导向的环境治理工作的科学基础。



1.2 本土数据验证

——中国疾控中心环境与健康相关产品安全所

李涪涪、刘园园

问责式研究

在改善空气质量的背景下，对影响空气质量的政策或行动进行健康影响评估的方法，称为问责式研究（Accountability Study），该方法旨在阐明减排政策实施是否显著改善了公共卫生水平，可为未来的政策制定提供关键参考

近些年来，随着《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等国家战略的印发实施，我国大气污染防治工作成效显著。作为重点区域之一的京津冀及周边地区，环境空气质量逐年改善，重污染天数显著减少。在空气质量快速改善的背景下，针对中国人群开展流行病学研究，能够增强关于空气污染健康效应的科学认知，进一步解析相关健康风险复杂变化规律，为暴露反应关系提供本土化证据。本研究基于京津冀及周边地区本地化的多中心长时间序列数据，开展了针对不同健康结局、不同亚组人群的 PM_{2.5} 短期暴露的健康效应研究，并对比分析了 2013–2015 年和 2016–2018 年间 PM_{2.5} 暴露反应关系的差异。

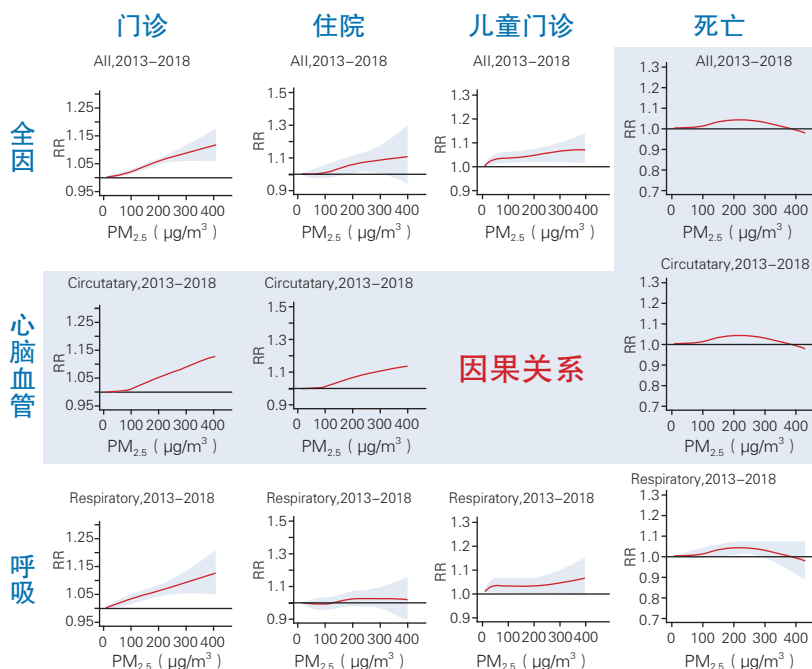
研究背景：京津冀地区 PM_{2.5} 浓度快速下降

空气污染物浓度变化幅度越大，相关健康风险的变动越剧烈，因而更容易被观测到。作为大气污染重点防治区域，2013–2018 年京津冀地区空气污染浓度显著下降，是研究空气污染健康效应的宝贵机会。本研究分别收集京津冀周边 30 个市县的死亡监测数据和 93 家医院的诊疗数据，并利用时间序列模型分析相关结果。



PM_{2.5} 短期暴露的健康风险

研究发现 2013–2018 年京津冀及周边地区 PM_{2.5} 浓度每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，普通人群非意外、心脑血管系统和呼吸系统疾病的死亡风险分别增加 0.04%、0.02% 和 0.03%；综合医院因病就诊风险增加 0.16%，儿童医院因病就诊风险增加 0.17%。北京市的住院情况显示，非意外疾病、心脑血管疾病和呼吸系统疾病的因病住院风险分别增加 0.34%、0.40% 和 0.17%。针对美国环保署给出的具有因果联系的“暴露 – 结局”组合，本研究均发现了显著的流行病学关联。

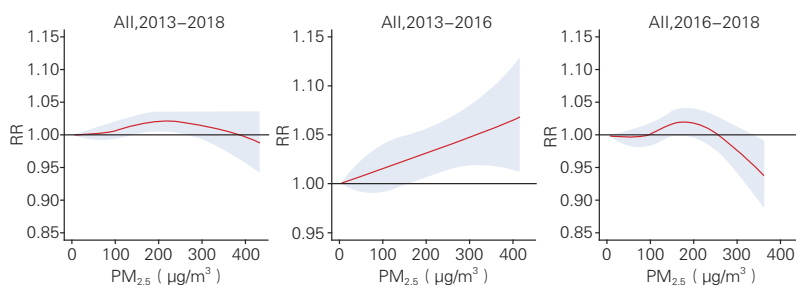


按照京津冀地区空气污染治理的阶段，可以将研究时段分成治理前期（2013–2015）和治理后期（2016–2018），后者空气污染水平大幅降低。分别针对上述两个阶段构建多种结局与 PM_{2.5} 短期暴露的关系，并将其进行对比，结果表明：2013–2015 年的暴露 – 反应曲线呈单调线性增加，而 2016–2018 年的暴露 – 反应曲线呈倒 J 形；2013–2018 年的暴露 – 反应曲线显示，相对风险值呈上升趋势，至 PM_{2.5} 约为 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 达到峰值，之后风险值下降。

修订空气质量标准
保护人群健康

污染治理改变暴露反应关系

这表示在第二阶段，暴露反应关联强度均呈现变弱的趋势。部分健康结局在 2016–2018 年 PM_{2.5} 短期暴露的健康效应甚至不再显著。



PM_{2.5} 成分健康效应及其差异

该研究进一步证实了不同 PM_{2.5} 成分之间健康效应存在较大差异，成分谱是影响 PM_{2.5} 混合物毒性的决定因素之一。研究发现 PM_{2.5} 碳组分 (OC 和 EC) 以及水溶性离子组分 (NH₄⁺ 和 NO₃⁻) 与人群死亡风险增加呈正相关；NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻ 与人群心血管疾病住院风险增加相关；同时，研究首次发现了多环芳烃成分 (苯并 [a] 蒽、苯并 [k] 荧蒽、苯并 [a] 芘) 与人群心血管疾病住院之间的相关性

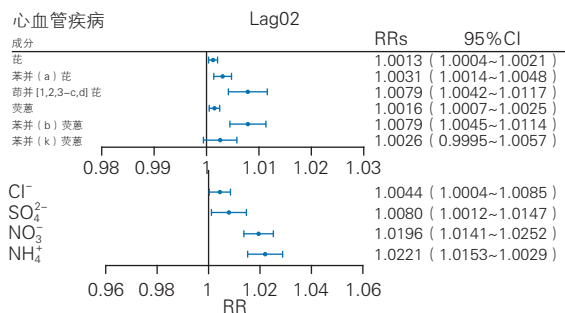
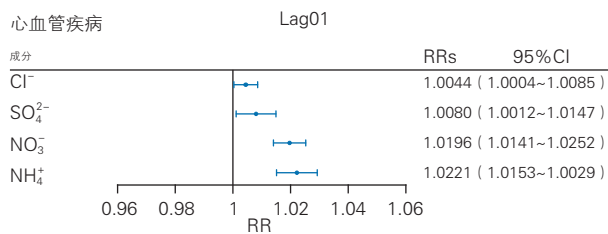
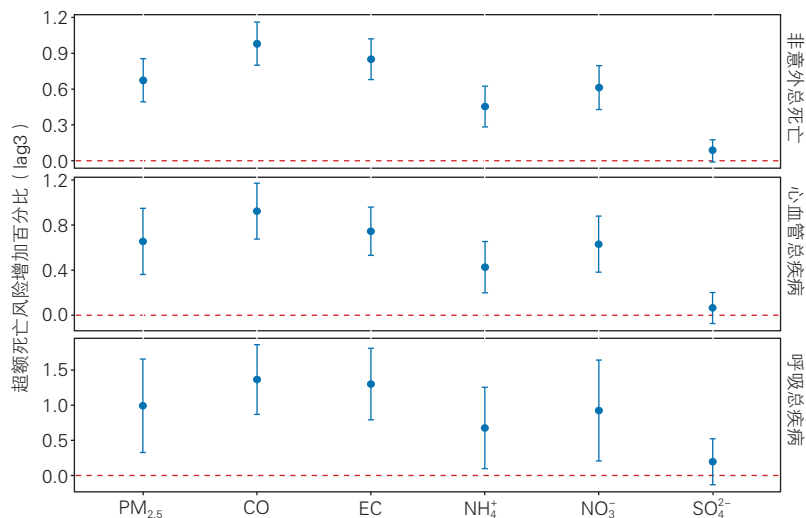
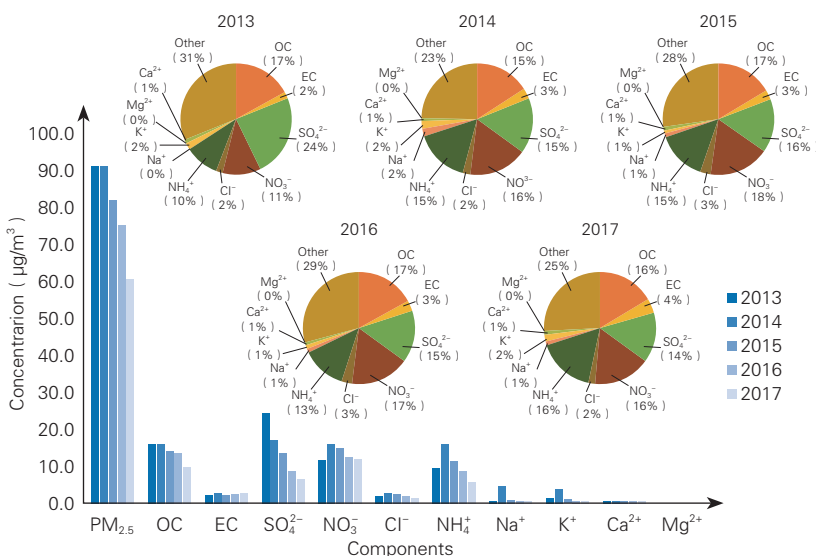
PM_{2.5} 成分对非意外总死亡、心血管系统疾病死亡、呼吸系统疾病死亡的影响

在 PM_{2.5} 多种成分中，碳质组分 (EC/OC) 的效应最显著。

多环芳烃成分 (苯并 [a] 蒽、苯并 [k] 荧蒽、苯并 [a] 芘) 与人群心血管疾病住院之间存在显著关联。

无机盐成分 NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻ 也与心血管疾病住院的风险存在显著关联。

大气十条期间，北京市 PM_{2.5} 成分变化



1.3 科学认知：小结

研究进展综述

健康效应研究
的前沿和不足

本土数据验证

结合本土证据
夯实科学基础

- 空气污染暴露与多种有害健康结局有关，PM_{2.5} 和 O₃ 暴露与呼吸循环系统疾病之间具有因果或可能的因果联系，长、短期暴露都将增加超额死亡风险；然而，定量描述空气污染健康效应的工具——暴露反应关系——仍不完善，关于其非线性、异质性、不确定性需要开展进一步研究，尤其是应该发展多种空气污染物复合的暴露反应关系。

- 基于京津冀地区的时间序列分析，本研究利用本土证据进一步明确了 PM_{2.5} 与心脑血管疾病和全因死亡之间具有因果联系；实际验证了空气质量改善对不同健康结局的改善；发现了 PM_{2.5} 浓度成分对不同健康结局的复杂影响。





标准制定

标准制定

标准制修订流程

WHO《全球空气质量指南》制定流程
美国国家环境空气质量标准制定流程

成本和效益分析

成本和效益分析对标准制定的影响
我国加严空气标准的成本和效益分析

可达性分析案例

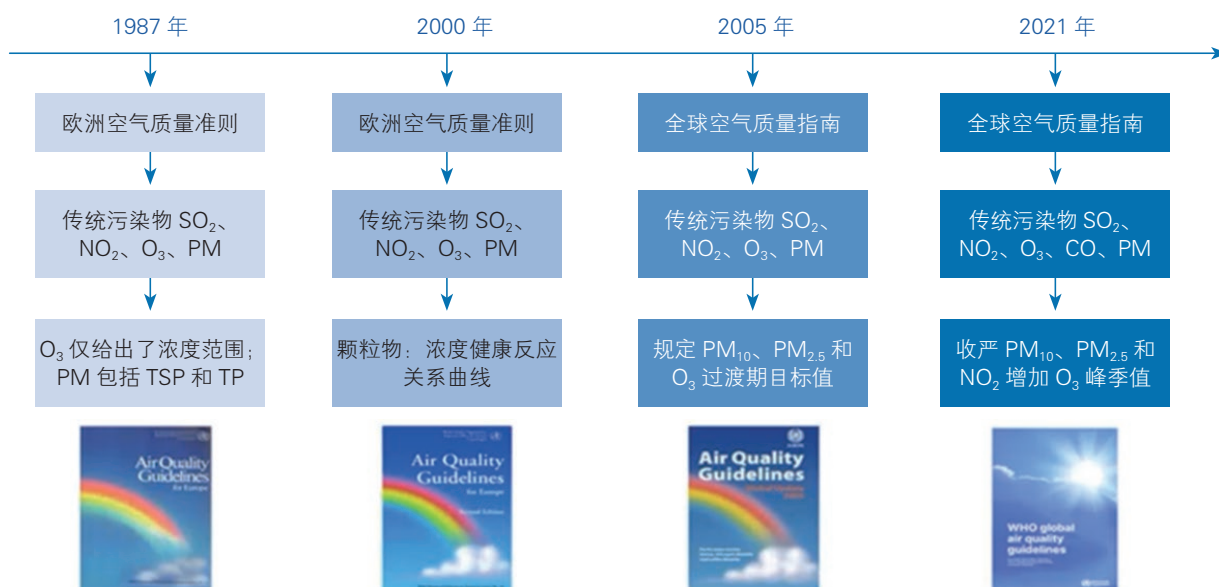
案例分析：海南省加严地方标准，达到世界领先空气质量水平

2.1 标准制定流程

—— 复旦大学¹ 中国环境科学研究院²

阚海东¹、魏永杰²、蔡婧¹、陈仁杰¹、牛越¹

特定研究对象暴露于环境污染物的浓度以及污染物的暴露-反应关系，是制定环境质量标准、评价、预测和控制环境污染的重要科学依据。在不同国家和地区，尽管存在差异，但是制定空气质量标准的基本方法类似，即：需要通过科学评估来分析政策选择、提出标准或限值、并辅之以公众审查和决策。我国大气基准研究开始时间较晚，根据实际情况，我国可充分借鉴国际已有的基准研究和制定体系，开展自己的基准相关工作，并为标准修订提供基础。



WHO《全球空气质量指南》(Global Air Quality Guidelines, AQG) 制定历程
空气质量标准从提出到完善，依赖于科学进步和知识积累，需要历经数代人的努力

基准 (Criteria)

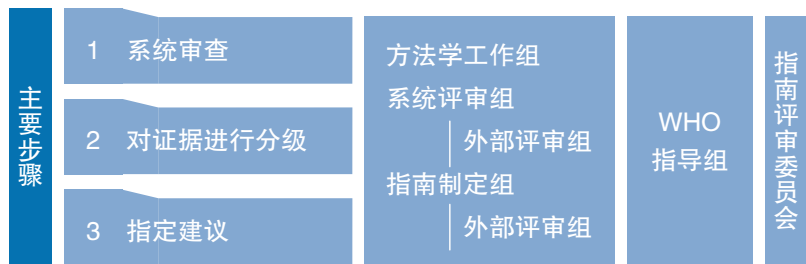
正式定义出现在1980年WHO出版的《大气污染术语手册》中：基准（或暴露-反应关系）指在定义了环境变量和目标变量的特定情况下，污染物暴露与不良影响的风险或程度之间的定量关系。美国环境保护署将其定义为“关于空气中各种浓度的污染物与其不利影响之间关系的科学知识汇编”。

大气环境基准

我国目前尚无大气环境基准的明确定义，通常将环境基准描述为“对人体健康与生态系统不产生有害效应的最大剂量或水平”。但在实际生态环境中，尤其是以人为研究和保护对象时，该剂量或水平会因个体差异而存在较大不同。

通过回顾和总结国际上已有的基准定义，立足于大气环境科学研究的特点，本报告提出“大气环境基准”和“大气环境基准值”两个概念。**大气环境基准**是指基于系统科学研究证据评估确定的大气污染物暴露与不良影响的程度或风险之间的一系列定量的暴露-反应关系。**大气环境基准值**是指基于系统科学研究证据评估确定的、在一定平均时间内，大气污染物对人体健康与生态系统不产生有害效应或影响很小的剂量或水平。大气环境基准值由暴露-反应关系确定。

修订空气质量标准
保护人群健康



WHO 指南制定的组织结构

WHO 制定空气质量基准的组织结构主要包括：1) WHO 指导组，由 WHO 工作人员组成，主要参与启动、构建和执行指南制定过程；2) 指南制定组，由专家和利益相关者组成，主要负责确定指南范围、制定 AQG 级别和其他指导意见；3) 方法学工作组，内部又分为偏倚风险评估工作小组、证据确定性评估工作小组、空气质量指导水平和阶段目标推导工作小组；4) 系统评审组，进行证据的系统评审；5) 外部评审组，根据需要提供意见和同行评审；6) 指南评审委员会，在出版前审查并批准指南文件。

WHO 指南制定流程和启示

WHO 基准文件的主要目标和内容包括：1) 汇编环境健康基准文件，即通过评估有关环境污染物（或其他物理和化学因素）暴露与人体健康之间关系的现有资料，指导设定可用于保护健康的暴露限值；2) 通过初步审查用于工业、农业、家庭或其他领域的物质的健康影响研究，确定新的或潜在的污染物；3) 明确对已确认的或潜在的污染物或其他环境因素健康影响科学认知的不足，鼓励、推动相关研究；4) 促进毒理学和流行病学方法的协调，以获得具有国际可比性的研究成果。WHO 在制定空气质量基准之后，再基于基准制定和发布指导值，即《全球空气质量指南》（AQG）。

AQG 的制定和更新主要包括 5 个步骤：1) 确定指南的范围和关键问题；2) 对相关证据进行系统回顾；3) 对系统回顾所产生的证据体系进行确定性评估；4) 制定 AQG 水平；5) 制定其他支持性指导意见。

WHO 制定《全球空气质量指南》（AQG）的具体流程

AQG 制定程序	解析	注间事项
1. 评估每个相对风险估计和浓度反应函数（如果可用）	系统评估每个污染物的健康结果	随机荟萃效应分析，浓度 - 响应关系取 95% 置信度范围内评估结果；取中等至高度确定性证据
2. 确定测定的最低暴露水平	使用线性模型进行分析，需要程序确定最低暴露水平	暴露分布的第 5 个百分点数（PS）均值作为起点
3. 确定健康结局的最小相关增量	高于最低水平的多大健康增量被视为相关增加	通常用 0 作为增量的基线水平，越接近 0 越接近 AQG 的理想水平
4. 确定 AQG 水平起点	将最小相关增量对应的污染物浓度作为 AQG 水平起点	长期：P5 均值作为 AQG 水平起点；短期：日浓度第 99 百分位数与对应的年度 AQG 水平
5. 比较各关键健康结局 AQG 水平	将所有关键健康结局按照步骤 1-4 确定响应的 AQG 水平，将最低的 AQG 水平作为 WHO 推荐的水平	避免个别健康结局的评估水平低于全因死亡率
6. 评估低暴露水平证据的确定性	对于证据较少的研究，因未开展 GRADE 评估需进行讨论	如考虑个体水平的风险偏移，低暴露水平相对风险增加
7. 考虑新的相关证据	定性或定量方式评估新出现的证据（主要在 2018 年 7 月 - 2020 年 6 月）	考虑新证据是否符合已经包含的研究
8. 进一步考虑污染物与健康结局之间的因果关联	2016 年后的所有污染物健康结局数据对的因果关系都值得进一步考虑，证据为中等或高确定性时，不影响已确定的 AQG 水平	——

ISA 报告

- ISA (Integrated Science Assessment), 即综合科学评估, 是对政策相关科学的全面评估和综合, 有助于说明环境空气中存在的(某种)污染物可能对公众健康产生可识别影响的种类和程度, 是审查当前一级(基于健康)和二级(基于福利) NAAQS 的科学基础。
- ISA 的主要内容包括: 1) 新的证据是否能进一步支持基准污染物暴露与特定健康之间的关系; 2) 当前 NAAQS 中的污染物指标、平均时间、标准限值是否合适。
- ISA 的制定和更新包括 5 个步骤: 1) 文献检索; 2) 研究选择; 3) 评价各个研究的质量; 4) 证据的评估、综合和整合; 5) 制定科学结论和确定因果联系。

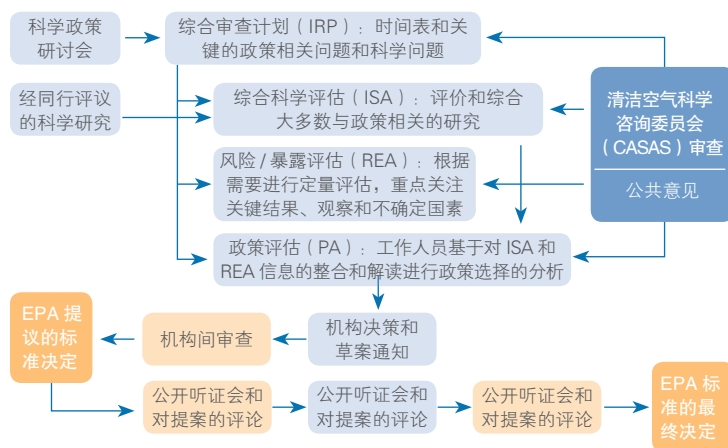
NAAQS 评估阶段

- ISA 阶段是指对最具政策相关性的科学证据进行全面审查和综合评估, 并作出关键科学判断, 这些科学判断对风险/暴露评估的发展以及涉及环境空气质量标准审查等其他方面具有重要意义。其目标是确定证据的优势和不确定性, 从证据中得出污染物对公共健康和福祉影响的因果联系的结论, 确定一般人群的潜在风险, 以及高危群体的风险。
- 风险/暴露评估是利用 ISA 中提供的信息和结论, 对与近期空气质量状况相关的人类健康或环境暴露的相关风险进行定量描述, 也包括与风险/暴露评估相关的不确定性评价。
- 政策评估旨在促进 CASAC 根据《清洁空气法案》的规定, 对考虑现有标准修订的充分性提出建议。政策评估主要关注与评估环境空气质量标准基本要素最相关的信息, 包括暴露指标、平均时间、形式和水平, 这一阶段中所有文件由 CASAC 起草、审查和发布, 公众可对其发表评论。

美国国家环境空气质量标准的制定流程

根据同行评审的建议, 美国环境保护署 (US EPA) 从发布空气质量基准文件转为发布综合科学评估 (ISA), 作为国家环境空气质量标准 (NAAQS) 的科学基础。目前, 美国环境保护署已发布六种基准污染物的 ISA (以健康影响为主) 及生态综合评估, 包括氮氧化物、硫氧化物、颗粒物、一氧化碳、臭氧和铅。NAAQS 审查关键步骤及部门包括: 1) 清洁空气科学咨询委员会 (CASAC); 2) 美国环境保护署研究与发展办公室, 负责组织科学政策研讨会; 3) 外部同行评议部分; 4) 综合审查计划批准部门; 5) ISA 制定部分; 6) 风险/暴露评估部分; 7) 政策评估部分; 8) 决策机构。

美国制修订 NAAQS 一般会经历了三个主要阶段, 分别是计划阶段、评估阶段和政策制定阶段, 并在每个阶段都征求公众意见, 以及接受 CASAC 的审查。在计划阶段, 启动科学政策问题研讨会, 形成对空气质量标准审查修订框架问题, 据此制订一份综合审查计划, 列出文件发布和整个审查的时间表等详细信息。评估阶段, 又分为 ISA 阶段、风险/暴露评估阶段和政策评估阶段。在最后的政策制定阶段, 针对提案和最终决定政策制定的决策过程, 制定提案和最终决定通知, 并审查其他联邦机构的通知草案。在综合考虑对提案的审查后, 美国环境保护署将发布最终标准。



美国环境保护署关于环境空气质量标准审查关键步骤示意图

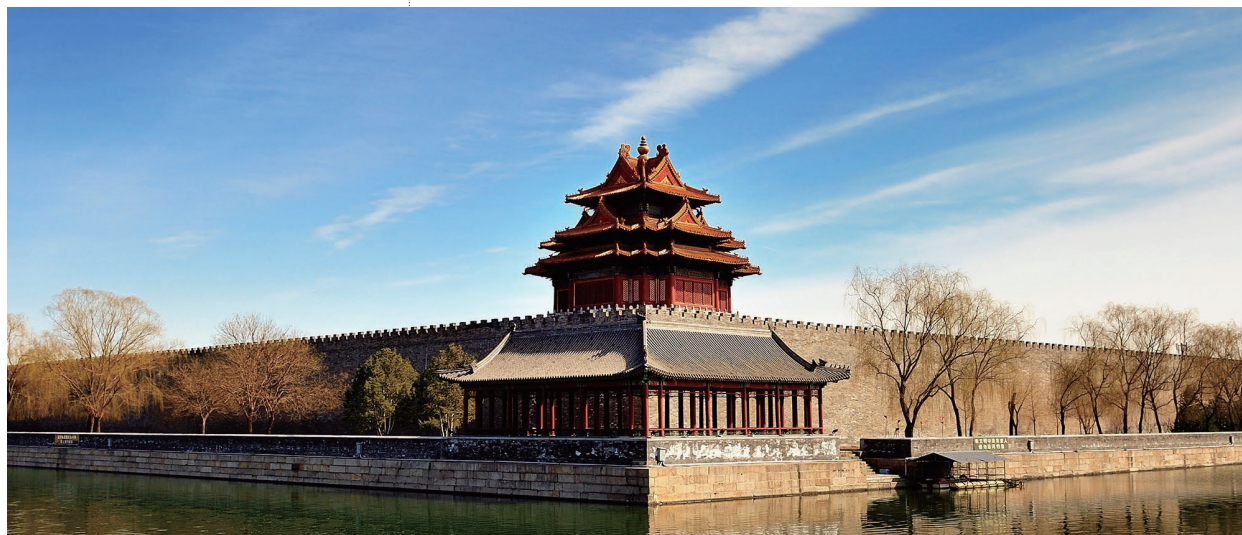
WHO 和美国环境保护署在大气基准研究中的异同点总结

	世界卫生组织	美国环境保护署
基准定义	暴露 - 反应关系	最新科学知识汇编 (ISA)
基本出发点	获取大气污染物暴露造成的健康影响的最低浓度值	评估目前空气质量标准下可能的健康风险
内容	系统综述最新科学知识, 确定因果关系。通过荟萃分析, 确定暴露 - 反应关系, 取健康影响的最低值, 计算空气质量指导值 (AQG)	系统综述最新科学知识, 确定因果关系, 通过政策相关背景浓度 (PRB)、最低测量浓度 (LML)、浓度 - 反应关系、风险估计 (RA), 进而通过政策评估 (PA) 制定标准值
制定过程	PECOS, 即, Population (人群) - Exposure (污染暴露水平) - Confounding (影响因素分析) - Outcomes (健康结局) - Study Design (研究设计)	未明确提出, 实质是 PECOS

关于发展我国大气基准的建议

我国大气基准研究发展较晚。未来需要根据我国的实际情况, 充分借鉴国际已有的基准研究和制定体系, 基于国际上关于基准研究的共识, 开展自己的基准相关工作, 包括:

- 1) 明确基准研究目标和关键问题;
- 2) 评估最新文献和成果;
- 3) 探寻我国人群的大气污染物暴露-反应关系, 明确因果关联;
- 4) 确定基准值, 咨询与决策中要充分考虑基准制定过程中的不确定性;
- 5) 在国家环境基准委员会领导下, 完善基准制定的相关组织机构建设。

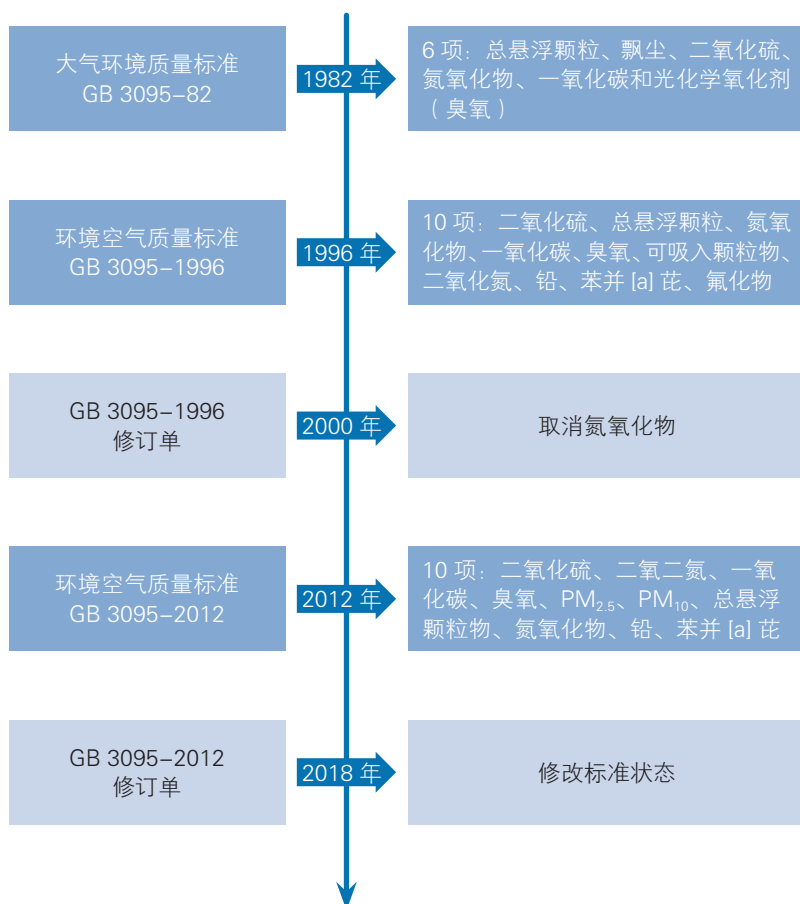


我国空气质量标准修订的背景

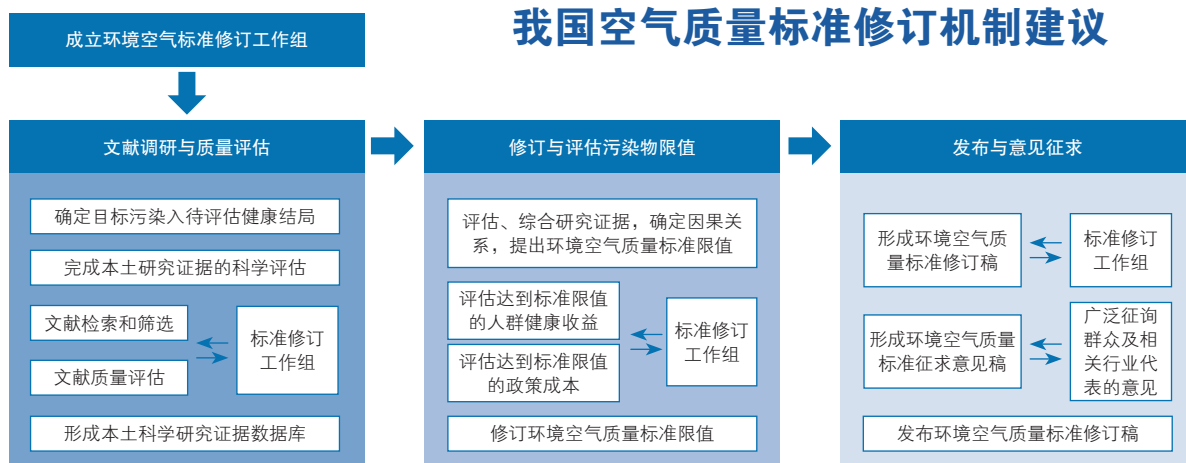
1982年，我国制定并发布首个环境空气质量标准《环境空气质量标准》（GB3095-82），并在1996、2000、2012年分别进行修订。

存在的不足

- 尚缺乏基于本土健康证据设立的基准。我国现行的标准以WHO《全球空气质量指南》作为依据，并没有考虑我国本土的环境基准研究结果。
- 缺少定期修订的机制。自1982年我国颁布首个大气环境质量标准以来，我国大气环境质量标准平均15年修订一次；相比之下，美国平均3-4年修订一次。目前，我国空气质量已得到显著改善，现有的流行病学证据显示现行空气质量标准不足以保护人群健康，因此定期修订空气质量标准是必要的。



我国空气质量标准修订机制建议



修订空气质量标准
保护人群健康

2.2 成本效益分析

—— 北京大学¹ 亚洲清洁空气中心² 海南大学³ 华南理工大学⁴

张世秋¹、万薇²、吴丹³、刘利⁴、林寰¹、王彦滢¹

政策影响分析 RIA

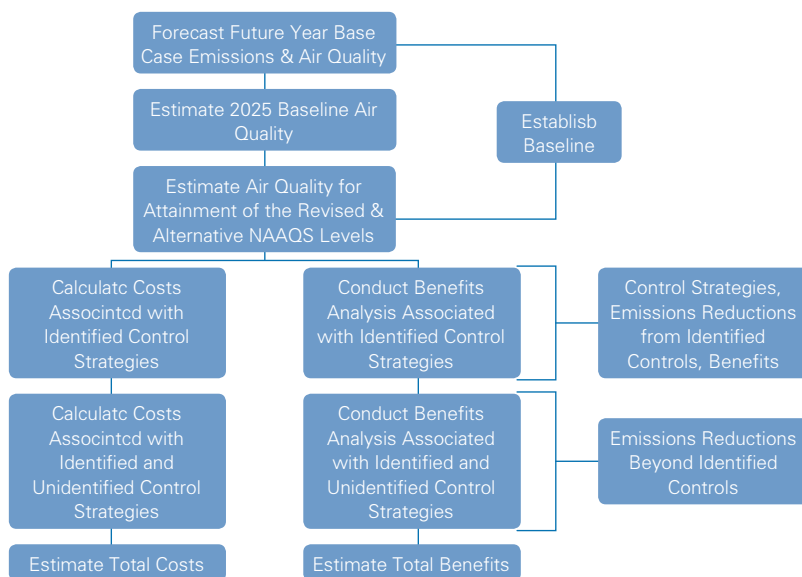
根据美国政府行政命令 12866 和 13563 号令的规定，美国环保署制定重要的国家空气污染相关法规时，需要开展规制的政策影响分析（Regulatory Impact Analyses, RIA）并公布报告，RIA 报告包含对法规的潜在社会效益和社会成本的描述，也评估了无法以货币形式量化的影响。

美国《清洁空气法案修订案 (1990)》评估

- 利用前瞻性经济分析方法，估算年减排成本约 650 亿美元，经济效益近 2 万亿美元
- 其中因避免过早死亡获得的健康效益占总效益的绝大部分，约 1.8 万亿美元
- 对比成本与效益，效益超过成本的 30 倍左右。

开展标准的经济分析，可为空气质量标准修订提供必要的政策支持。成本效益分析是公认的、应用最广泛和影响最大的公共政策分析方法，并在全球范围广泛应用。以美国为例，政府要求凡每年产生 1 亿美元以上经济效益影响的环境、健康、公共安全、就业等公共政策都需要开展政策影响分析（RIA）。其中，环境空气质量标准作为一项重要的法规，也需开展 RIA 分析。美国环保署就各项污染物指标的标准限值修订进行过十余次分析，明确成本和效益等经济考量是修订和实施标准的一个必备的决策依据。

国际上诸多针对空气质量改善的相关法规、政策、标准的经济分析表明，其带来的效益往往数倍于成本，例如美国的《清洁空气法案修订案（1990）》。其中，健康效益通常是标准实施总效益中最重要的组成部分，占比可高达九成以上；而健康效益改善又主要来自于 PM_{2.5} 长期暴露水平的降低。因此，标准修订带来的效益分析应以 PM_{2.5} 的长期暴露指标（年均浓度）为关键评估指标。成本方面，尽管学术研究层面通常讨论的是社会成本，但由于其涉及范围广，数据需求巨大，对于评估范围和类别争议过大；在标准修订的具体研究中，成本评估通常仅针对减排措施和技术开展直接成本估算，也就是减排带来的成本增量变化，通常包括减排措施与技术的投资成本、运营和维护成本等。



美国环保署臭氧标准 RIA 评估框架（示例）

统计生命价值 VSL

统计生命价值 (VSL) 理论将社会中的每一个个体的效用表述为“存活”与“死亡”状态下的效用的概率组合, 进而识别和发现个体对降低单位死亡风险的支付意愿。具体到特定的健康风险以及相应的政策情景, 个体为了降低一单位健康风险而最多愿意付出的金额 (支付意愿, WTP) 或是个体愿意承担健康风险增加一单位时最少需要补偿的金额 (受偿意愿, WTA) 即是该风险单位变化量的经济价值。WTP 法衡量的是个体为降低微小致命风险的意愿, 以人群为基础将其折算为统计意义上人群中的一例死亡, 即 VSL。

在实践中, 研究者更多地依据现有的 VSL 实证结果进行效益转移, 将已有估计值应用到新的政策案例。其准确性依赖于对 VSL 关键影响因素的识别。在影响因素方面, 学界对收入与 VSL 之间的正相关关系有共识。但是, 除此之外, VSL 的关键影响因素尚不清晰, 且 VSL 的收入弹性在不同人群间并不总是一致。另外, 大部分的 VSL 研究开展于发达国家, 发展中国家尚缺少可参考的基于规范估计方法的实证研究和健康影响经济评估的科学指南。

修订空气质量标准
保护人群健康

标准修订经济分析方法

分析方法主要涵盖三个模块: 健康价值评估、健康效益评估和减排成本分评估。

健康价值评估

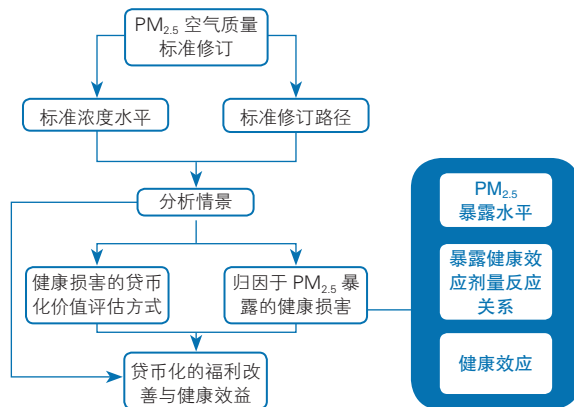
健康价值评估是经济分析过程中的关键参数, 包括针对致命风险和非致命风险的价值评估。针对致命风险 (mortality risk) 进行价值评估, 最主要的方法是上世纪六七十年代开始建立和发展起来的统计生命价值 (value of statistical life, VSL) 理论。本研究针对中国本土 VSL 研究开展定量分析, 希望借此补充发展中国家的研究证据, 识别和验证我国居民支付意愿 (willingness to pay, WTP) 的影响因素, 并与其他国家的研究结果比较, 更新本国的 VSL 估计值和效益转移参数, 以便提供更恰当的健康价值参数和规范的效益转移方案。

健康效益评估

健康效益评估是将健康价值评估得到的单位经济效益乘以基于流行病学研究获得的健康效应 / 风险的变化量, 用以评估和衡量不同情景下, 社会层面与健康风险相关的经济效益。

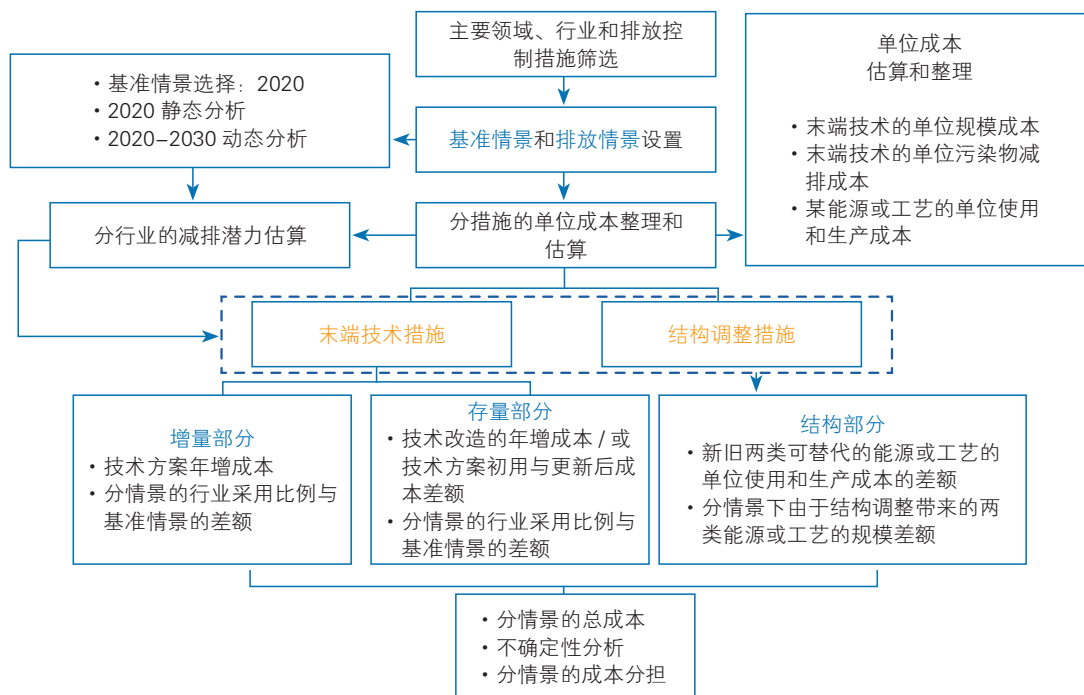
针对我国空气质量标准的关键指标 ($PM_{2.5}$ 年均浓度) 修订的不同情景 (时间、浓度限值), 计算总健康效益及其人群、空间分布情况, 包括

- (1) 达到不同标准的健康总效益, 以及不同浓度目标下可获得的额外改善效益;
- (2) 结合健康效益及相关经济效益的区域分布特征和人群分布特征, 识别出不同标准情景下的“利好”人群和区域;
- (3) 基于案例分析和未来目标年情景分析, 对比“早达标”和“晚达标”的健康效益差异, 为是否应该尽早修订和实施更严格的标准提供支持。具体技术路线如下图所示:



减排成本分析

本研究参考美国 PM_{2.5} 和 O₃ 空气质量标准修订所采用的方法来进行直接成本评估。直接减排成本分析采用自下而上的估算思路。首先，梳理和识别各重点行业 / 领域当前的主要减排措施；其次，分析各类关键减排措施在假设的普及率下能够实现的污染物减排潜力；再次，选择适宜的成本指标，对关键减排措施的单位成本进行分析；接着，基于措施的单位成本推算假设普及率下的措施总成本；同时，基于行业构建边际减排成本曲线；最后，对成本评估进行不确定性分析。

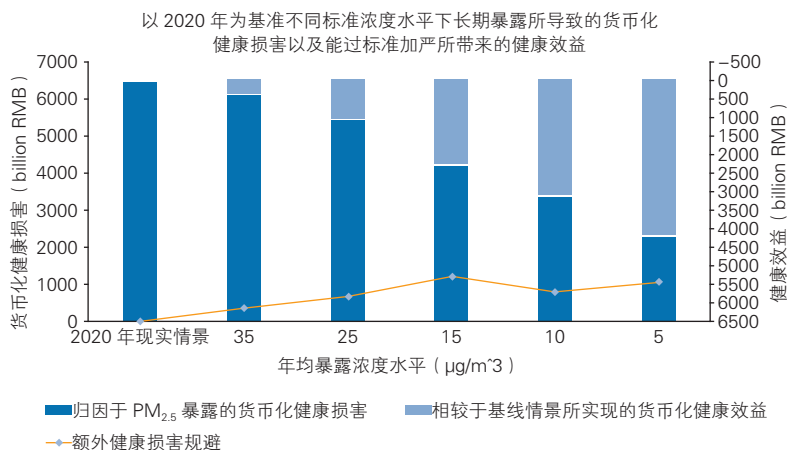


以 2020 年为基准年的效益估算

当年均浓度分别达到 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (相当于 WHO IT2)、10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO IT4)、以及 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO AQG 2021) 时:

- 所规避过早死亡人数分别为 30 万、87 万和 118.4 万例
- 可实现的因过早死亡风险规避带来的健康效益分别为 1.07 万亿、3.1 万亿、4.2 万亿元人民币
- 分别相当于 2020 年 GDP 现价总量 101.3 万亿元的 1%、3% 和 4%

加严标准的健康效益估算



成本估算的不足之处

由于未开展空气质量模拟，已识别措施将带来的空气质量改善尚不明确。尽管所估算的成本对应的是减排潜力全部释放的直接成本（相当于会达到更严格的标准所需要的成本），但不能将其和本报告的健康效益估算结果直接比较。

由于估算过程未考虑减排措施的多目标性，因此有些行业和措施的减排成本被高估。以交通行业为例，交通行业的能源结构调整措施（推广新能源车），其目的并不单纯是污染物减排，也包括了满足产业支持的需求等，但估算过程把措施带来的成本都归因于污染物减排。

除减排措施的多目标性特点外，减排措施的额外附加效益（如节能和结构调整的综合社会经济效益等）和技术的累积应用所带来的学习效应进而引致的成本降低，都可能使实际发生的社会成本远低于本研究的计算结果。这说明，在充分发挥重点行业可行措施减排潜力的情况下，减排的直接总成本仍然大概率会低于甚至远低于本报告设定的空气质量改善情景所带来的健康效益。

除了直接成本外，减排政策也会对宏观经济产生一系列相关影响，这也是决策者应当给予充分关注的，例如经济增长、经济结构、就业机会、家庭福祉等方面。包括中国在内的各国实践表明，清洁空气政策对于宏观经济的影响并非只有负面。空气污染减少可以降低医疗支出，减少过早死亡和发病风险从而增加劳动力资源；治理措施也会带来环保领域相关就业机会的增加，带来综合的社会经济效益。因此，污染减排和空气质量改善的综合社会成本有可能低于本报告估算的直接减排成本。

加严标准的减排成本估算

在 2020 年基线水平上，基于已识别措施估算出的重点行业减排潜力为：颗粒物 334.16 万吨、二氧化硫 131.78 万吨、和氮氧化物 596.67 万吨，减排总成本中值约为 1.71 万亿人民币（低值为 1.23 万亿，高值为 1.94 万亿）。本研究估算的成本对应的是减排潜力全部释放的直接成本（相当于会达到更严格的标准所需要的成本），这一成本大于空气质量水平达到 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时的健康效益（1.07 万亿），但小于空气质量水平达到更清洁空气水平（ $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）所带来的健康效益（分别为 3.1 万亿和 4.2 万亿）。这意味着已识别措施的直接成本接近或低于空气质量标准加严带来的健康效益。

分行业来看，交通行业的总减排成本最大，为 6191.76 亿元；石化行业最小，为 211.78 亿元；电力和钢铁居中且二者相近，分别为 3798.81 亿元和 2026.36 亿元。

综上，从成本效益分析的角度，全面实施更严格的空气质量标准有助于更好地保护公众健康。

分行业估算减排量和行业总成本

行业 / 领域	PM/ 万吨	SO ₂ / 万吨	NOx/ 万吨	成本 / 亿元
电力	37.40	33.72	59.60	1928.43
钢铁	2.83	27.95	92.33	3798.81
水泥	2.48	13.53	68.71	2026.36
石化	6.37	1.15	6.28	211.78
交通	-0.64	/	356.61	6191.76
民煤	285.72	55.43	13.14	2916.41

2.3 可达性分析案例

—— 清华大学，郝吉明、王书肖、赵斌

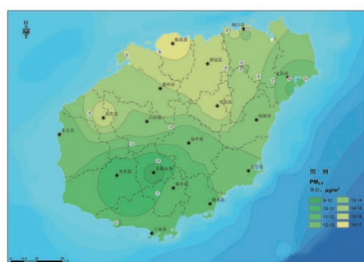
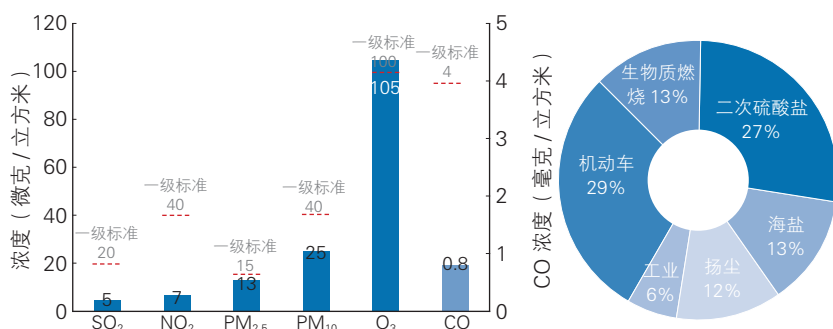
海南空气质量现状

2020年，海南PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO、PM₁₀年平均浓度均已达到环境空气质量（GB 3095-2012）一级标准，其中PM_{2.5}年均浓度为13μg/m³；O₃8小时第90百分位数浓度为105μg/m³，接近一级标准；空气质量优良天数比例为99.5%。海南现有环境空气质量已经处于全国领先水平，主要污染物浓度已经达到或接近世界领先水平，现有国家标准对海南空气质量持续改善的引领和推动作用逐渐减弱，急需对标发达国家环境空气质量标准，制定海南世界领先的环境空气质量标准。

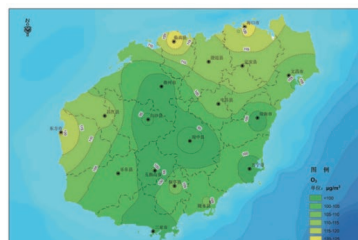
空气污染物分布及来源

- 总体呈现中部和南部地区较好，东部、北部和西部沿海城市略差的特征。这主要与西部地区工业企业分布较多，北部地区易受外来输送影响有关。
- 2020年，全省18个市县（不含三沙市）中，三亚、儋州、五指山、琼海、白沙及琼中等6个市县环境空气质量达到国家一级标准。五指山市空气质量最好。
- PM_{2.5}主要源为机动车（29%）、扬尘（12%）、海盐（13%）、生物质燃烧（13%）、工业源（6%）和二次硫酸盐（27%）；外来污染传输贡献率为41.6%

海南是中国的经济特区、自由贸易试验区。习近平主席在庆祝海南建省办经济特区30周年大会上的讲话和《中共中央国务院关于支持海南全面深化改革开放的指导意见》提出将海南建设成为国家生态文明试验区的要求。《国家生态文明试验区（海南）实施方案》进一步提出，到2025年，海南省生态环境质量继续保持全国领先水平；到2035年，生态环境质量和资源利用效率居于世界领先水平，海南成为展示美丽中国建设的靓丽名片。《中华人民共和国海南自由贸易港法》提出海南自由贸易港实行环境保护目标责任制和考核评价制度，这对制定海南自由贸易港各市县大气环境考核目标的科学性提出更高要求。由此可见，以海南为案例分析更高空气质量的可达性路径，不仅具有典型意义，更具有现实意义，有助于推动地方空气质量标准的实践（图源：2020年海南省生态环境质量公报）。



细颗粒物 (PM_{2.5}) 浓度空间分布示意图



臭氧 (O₃) 浓度空间分布示意图



可吸入颗粒物 (PM₁₀) 浓度空间分布示意图



二氧化氮 (NO₂) 浓度空间分布示意图

臭氧的长期浓度限值

WHO AQG 2021 基于 500 余篇学术论文提供的科学证据，研究证实了臭氧长期暴露与总死亡率和呼吸道死亡率之间关联的健康影响，在此基础上 WHO AQG 2021 增加 O₃ 季峰值评价指标。基于海南臭氧长期健康风险影响的考虑，在短期臭氧 8 小时浓度指标的基础上增设长期评价指标（季峰值）；由于目前尚未有国家标准设定臭氧季峰值，参考 WHO AQG 2021 和过渡期目标推荐值以及相关学者关于健康风险的研究成果，结合海南现状及远期可达性评估，综合确定海南臭氧季峰值浓度限值。

达标统计方法设计原则

达标统计方法总体按照浓度阈值和数据统计双向加严的原则，以体现新标准制定的世界领先性。如果出现浓度阈值和数据统计方法均加严导致新标准不具有可达性时，优先考虑加严浓度阈值，其次加严数据统计。

区域传输和气象对达标统计方法的影响

PM_{2.5}、PM₁₀、O₃ 等受区域传输影响较大的污染物日达标评价采取的百分位数越高受气象条件波动的影响就越大，越难以有效反映本地治污减排成效；考虑海南临近省份或国家污染均较重，采用第 95 百分位数，一方面与主要发达国家总体上处于可比的水平，另一方面能够有效去除重污染天气等极端气象条件的影响。为降低气象条件波动影响，PM_{2.5}、PM₁₀、O₃ 三项污染物采用三年滑动平均评价。

O₃ 峰季值的计算方法

采用连续 6 个月日最大 8 小时浓度的滑动平均值的最大值，计算滑动平均时间范围为前一年 8 月至当年 12 月。

修订空气质量标准
保护人群健康

海南省空气质量标准设计

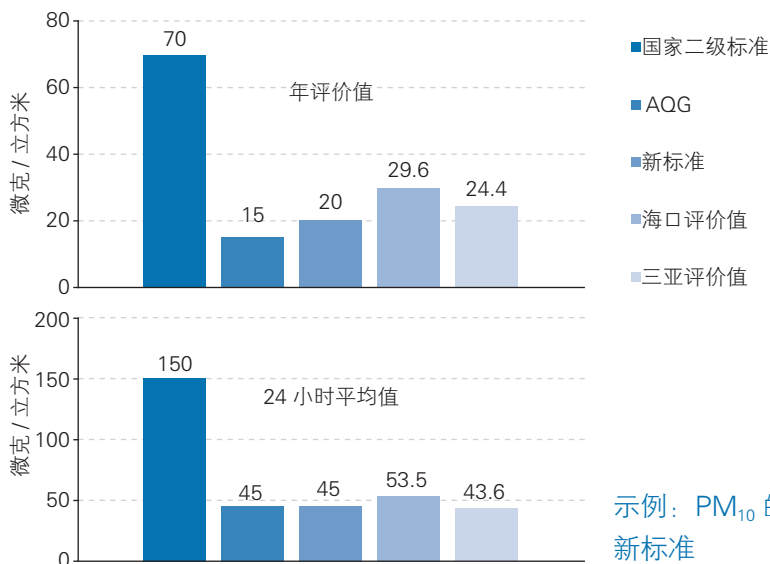
海南标准的设计一方面要体现与国际接轨，并处于世界领先水平，另一方面要符合海南本地实际情况，具有较强的指导性和实施性。以 WHO 指导值为框架体系，结合世界主要发达国家标准制定，从污染物浓度限值和达标统计方法两个方面来设计 SO₂、NO₂、CO、O₃、PM₁₀、PM_{2.5} 六项常规监测指标的海南省空气质量标准。

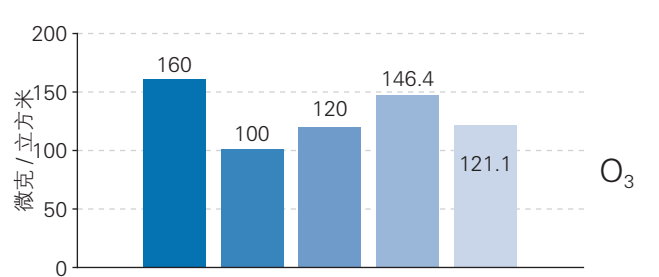
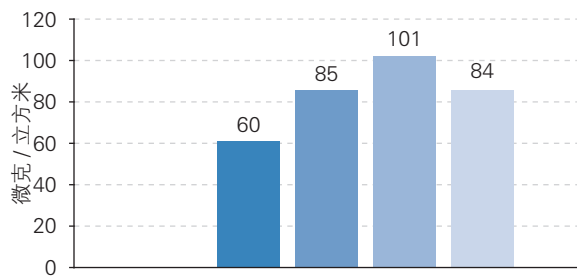
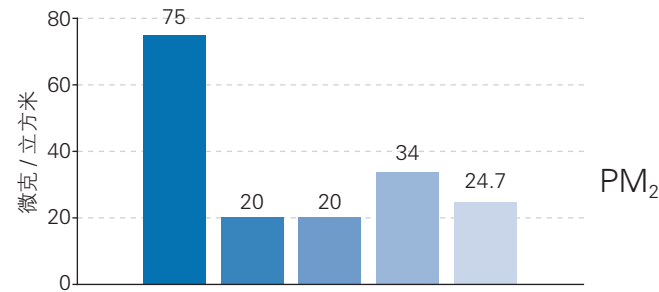
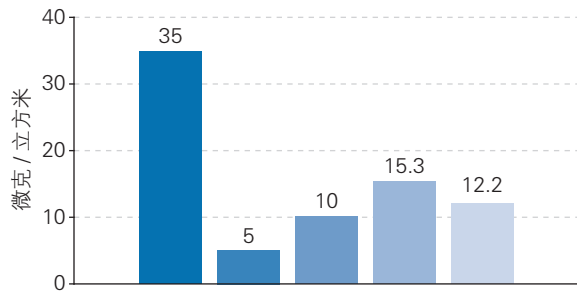
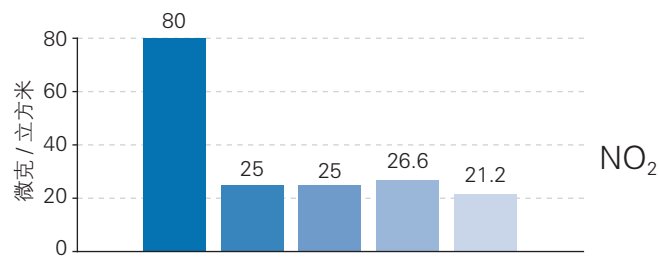
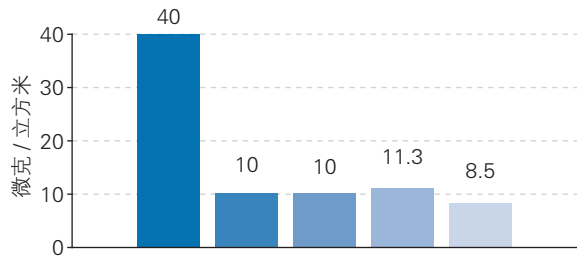
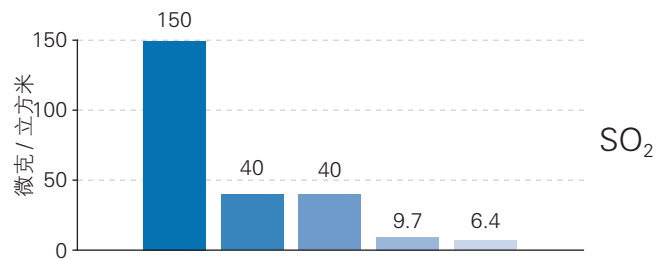
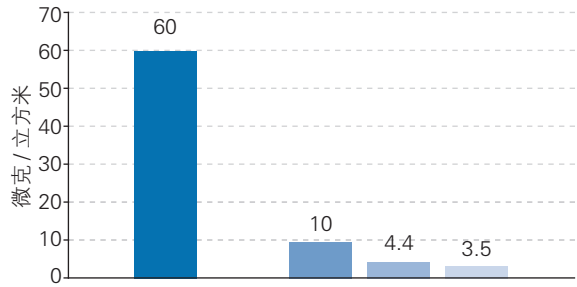
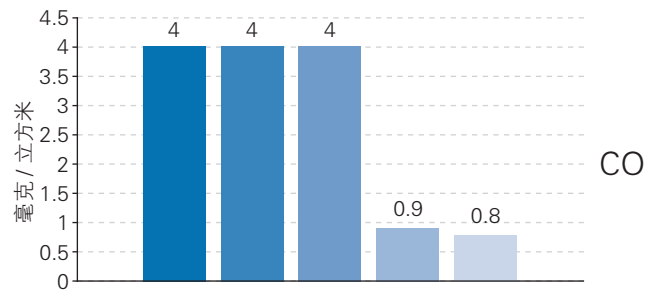
在浓度限值方面：

- 考虑海南省现状主要污染物水平较低，SO₂、NO₂ 年均浓度已经降至 10μg/m³ 以内，且污染物浓度空间差异较小，参考日本、欧盟等国家标准将原有两级标准合并为一级；
- 对于 SO₂、NO₂、CO 三项污染物初步考虑设定以“无显著健康风险”为导向的世界领先的浓度限值，采用 WHO AQG 2021；
- PM_{2.5}、PM₁₀、O₃ 三项污染物按照“浓度世界领先”的原则设定标准阈值，通过与 WHO 过渡阶段目标值、发达国家、空气质量较好的国家标准进行对比分析，综合确定浓度限值水平；
- 基于海南臭氧长期健康风险影响的考虑，在短期臭氧 8 小时浓度指标的基础上增设长期评价指标。

达标统计要求方面：

- 六项污染物年达标评价方法采用区域内站点平均值判断，与中国现行标准保持一致，确保新旧标准的延续性和可比性；
- 对于 SO₂、NO₂、CO 三项污染物统一采用 WHO 推荐的第 99 百分位数作为日达标评价方法；
- 由于 PM_{2.5}、PM₁₀、O₃ 受区域传输和气象影响较大，采用第 95 百分位数的三年滑动平均值的评价方法；
- 关于 O₃，采用峰季值的三年滑动平均值的评价方法。





年值

日值

海南省各项空气污染物浓度限值

海南省各项空气污染物浓度限值的统计方法

序号	污染物项目	平均时间	浓度限值	统计方法	单位	海口 2019-2021 评价值	三亚 2019-2021 评价值
1	二氧化硫 (SO ₂)	年平均	10	不允许超过	μg/m ³	4.4	3.5
		24小时平均	40	一年中所有日均值第99百分位数不允许超过		9.7	6.4
		1小时平均	150	一年中小时值第99百分位数不允许超过		12	8
2	二氧化氮 (NO ₂)	年平均	10	不允许超过	μg/m ³	11.3	8.5
		24小时平均	25	一年中所有日均值第99百分位数不允许超过		26.6	21.2
		1小时平均	200	一年中小时值第99百分位数不允许超过		43	28
3	一氧化碳 (CO)	24小时平均	4	一年中所有日均值第99百分位数不允许超过	mg/m ³	0.9	0.8
		1小时平均	10	一年中小时值第99百分位数不允许超过		0.9	0.8
4	臭氧 (O ₃)	季峰值	85	连续6个月日最大8小时浓度的滑动平均值的最大值(计算滑动平均时间范围为前一年8月至当年12月),取三年滑动平均值后不允许超过	μg/m ³	101	84
		日最大8小时平均	120	一年中所有日最大8小时浓度第95百分位数的三年滑动平均值不允许超过		146.4	121.1
5	颗粒物 (粒径小于等于10μm)	年平均	20	三年滑动平均值不允许超过	μg/m ³	29.6	24.4
		24小时平均	45	一年中所有日均值第95百分位数的三年滑动平均值不允许超过		53.5	43.6
6	颗粒物 (粒径小于等于2.5μm)	年平均	10	三年滑动平均值不允许超过	μg/m ³	15.3	12.2
		24小时平均	20	一年中所有日均值第95百分位数的三年滑动平均值不允许超过		34.0	24.7

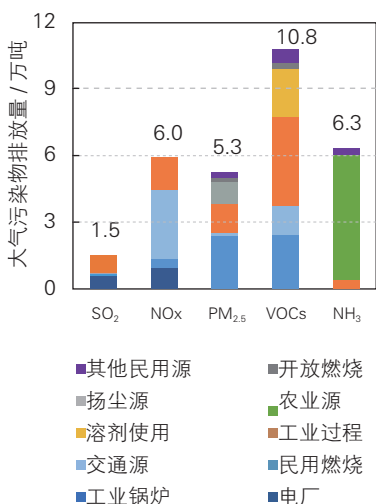
修订空气质量标准
保护人群健康

空气质量达标情景设计

本研究综合海南省本地化排放清单以及 ABA-CAS-EI 全国分省清单数据集, 构建海南省 2019 年全口径大气污染物排放清单。对于电力和工业部门的 SO₂、NO_x 及颗粒物排放, 使用海南本地化清单数据, 而对 VOCs 的排放采用 ABA-CAS-EI 中更加详细的清单数据。对于道路交通、扬尘源和餐饮源, 采用海南提供的本地化清单排放数据, 对于其他人为排放源, 使用 ABA-CAS-EI 的排放数据。能源燃烧源 (包含交通源、民用燃烧源、工业锅炉源和电厂源) 贡献了 34%~75% 的大气污染物 (除 NH₃) 排放; 工业过程源贡献了 24%~52% 的大气污染物 (除 NH₃) 排放; 农业源贡献了 88% 的 NH₃ 排放。在此基础上, 本研究考虑如下三种情景:

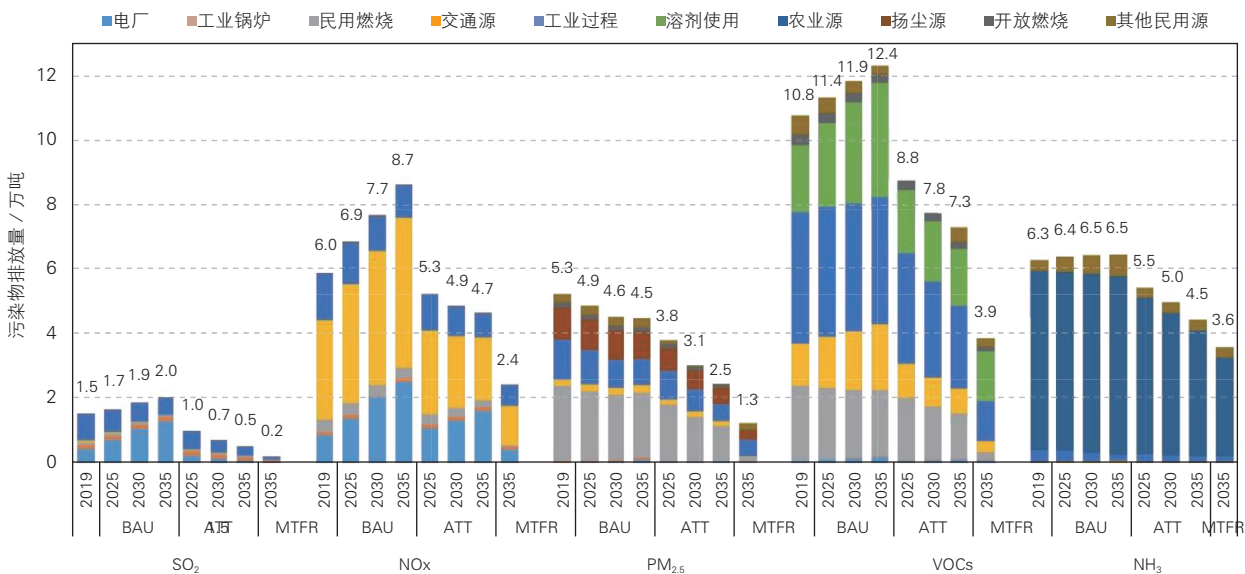
- 基准情景 (BAU): 考虑海南省未来经济社会发展导致活动水平变化的基础上, 假定未来仅延续十三五的能源和末端控制政策, 不实行新政策。
- 达标情景 (ATT): 在海南十四五规划和 2035 年中长期规划, 以及海南省碳达峰实施方案的基础上, 参考课题组对于各类控制措施经济有效性的评估结果, 并与海南省环科院等部门紧密沟通, 设定海南省达到新空气质量标准的政策措施。
- 最佳技术减排潜力情景 (MTFR): 在考虑海南省未来经济社会发展导致的活动水平变化的基础上, 假定海南在各个部门充分实施包括结构调整、能效提升和末端控制在内的一切技术可行的控制措施, 实现技术允许条件下最大可能的减排。

对于海南省外区域情景设定, 本研究采用课题组此前建立的 2035 年全国达标情景。在基准情景、达标情景和最佳技术减排情景当中, 海南省外区域情景设置保持一致。



全国达标情景

该情景假定到 2035 年“美丽中国基本实现”, 其中当前污染最重的区域总体上达到现行 PM_{2.5} 浓度标准 (年均 35μg/m³), 其他区域采取类似力度减排措施, 浓度达到更低水平 (Xing et al., 2020)。



标准可达性评估的技术路线



空气质量模式 WRF-CMAQ

CMAQ 模型采用 Lambert 投影坐标系，中心点经度为 110° E，中心纬度为 34°N。垂直方向共设置 14 个气压层，层间距自下而上逐渐增大。化学机制是：气相化学反应机理为 SAPRC07，气溶胶反应模块采用 AERO7+2D-VBS 机制。化学初始条件为：每个月提前三天开始模拟，将前一天得到的浓度场作为第二天的化学初始条件。化学边界条件为：第一层网格的边界条件来自 CMAQ 默认的预设值，第二层边界条件来自第一层的模拟浓度输出结果，第三层边界条件来自第二层的模拟浓度输出结果。

CMAQv5.3.2 模型所需要的气象场由 WRFv3.9.1 提供，气象场的初始及边界场数据来自美国国家环境预报中心 (NCEP)。WRFv3.9.1 模型选用的陆面过程参数化方案为 Pleim-Xiu，边界层参数化方案为 ACM2，积云参数化方案为 G-F，大气辐射方案为 RRTMG，微物理方案为 Morrison double-moment。

修订空气质量标准
保护人群健康

本研究采用带 2D-VBS 模块的 CMAQv5.3.2 空气质量模型模拟污染物排放对空气质量的影响。模型模拟的基准年为 2019 年，模拟时段为 2019 年 1、4、7、10 月和 2035 年 1、4、7 和 10 月。为了平衡模拟精度与计算资源需求，模拟范围采用三层嵌套。基准年所需的排放清单来源如下：国内人为源（船舶排放除外）排放数据来自 2019 年海南本地化清单和 2019 年 ABaCAS-EI，国外人为源（船舶排放除外）和森林草原火灾的排放数据来自 2015 年 IIASA 清单，2018 年船舶排放清单来自清华大学刘欢课题组，自然源 VOC 排放利用 MEGANv2.10 天然源排放清单在线计算，风沙尘排放和海盐排放基于 CMAQ 在线计算。未来年所需的排放清单见上文情景设置部分。

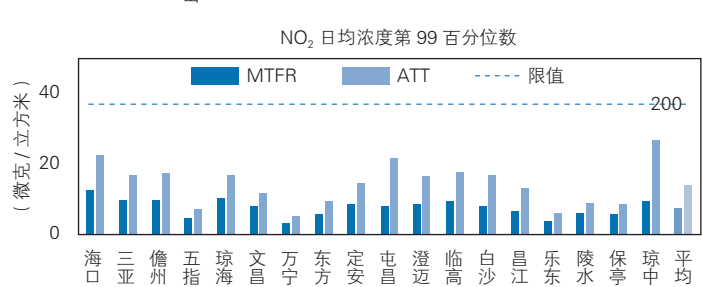
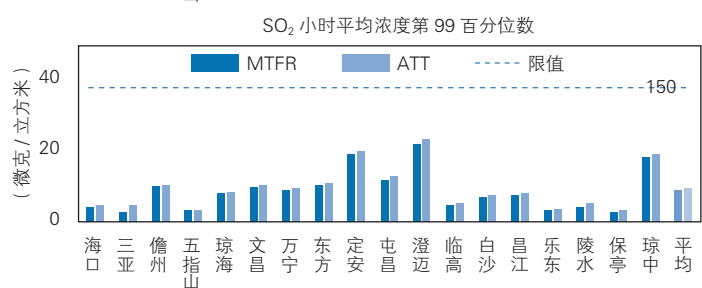
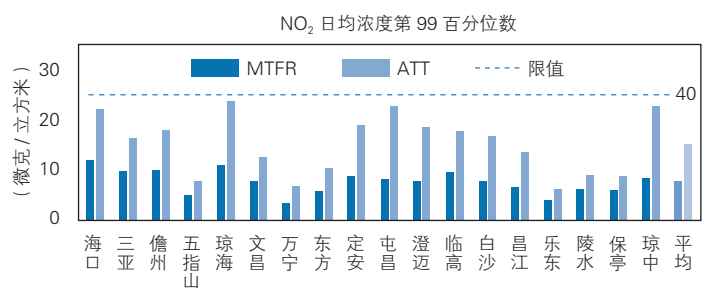
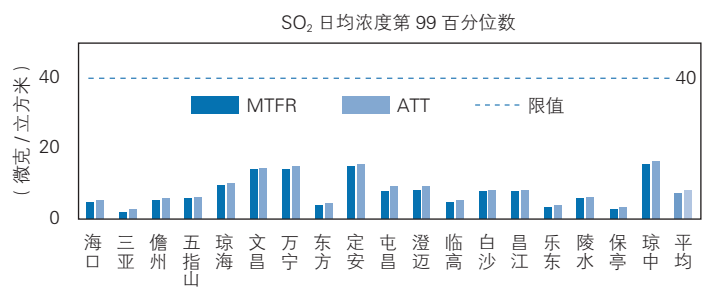
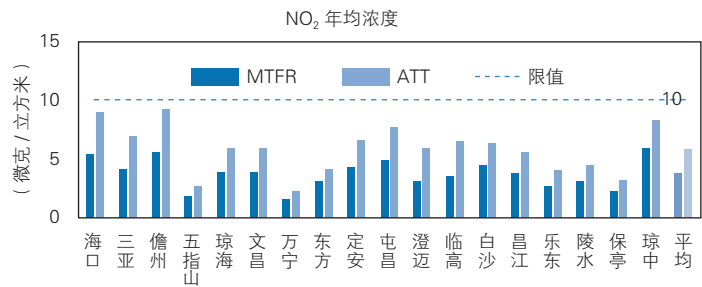
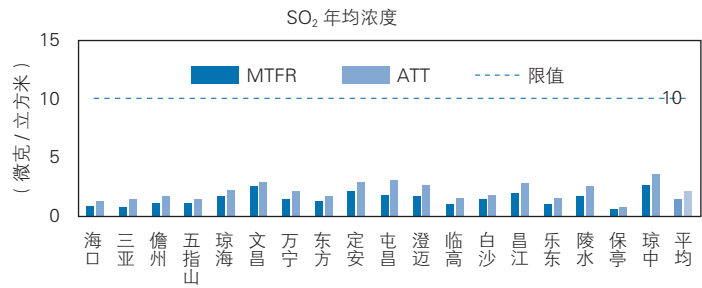
利用海南省海口市和三亚市的 PM_{2.5} 和 O₃ 逐小时观测浓度数据对基准年模拟结果进行校验分析，发现总体上模拟值与观测值的日变化趋势一致，浓度也较接近，说明基准年的模拟效果较好，该模拟配置能够用于未来年的模拟分析。

本研究使用 CMAQ 空气质量模型对海南省 2035 年达标情景和最佳技术减排潜力情景分别进行了模拟，根据上文提出的环境空气污染物浓度限值和统计方法，对 SO₂、NO₂、CO、O₃、PM₁₀、PM_{2.5} 六种污染物分别进行了可达性评估。可达性的评估方法参考 AbaCAS 的 SMAT-CE 模块。将 2035 年各市县以及 18 市县平均的预测浓度与新标准限值进行比较，如果某市县（18 市县平均）的 2035 年预测浓度小于新标准限值，说明该市县（18 市县平均浓度）能够达标。

世界领先空气质量标准的可达性评估结果

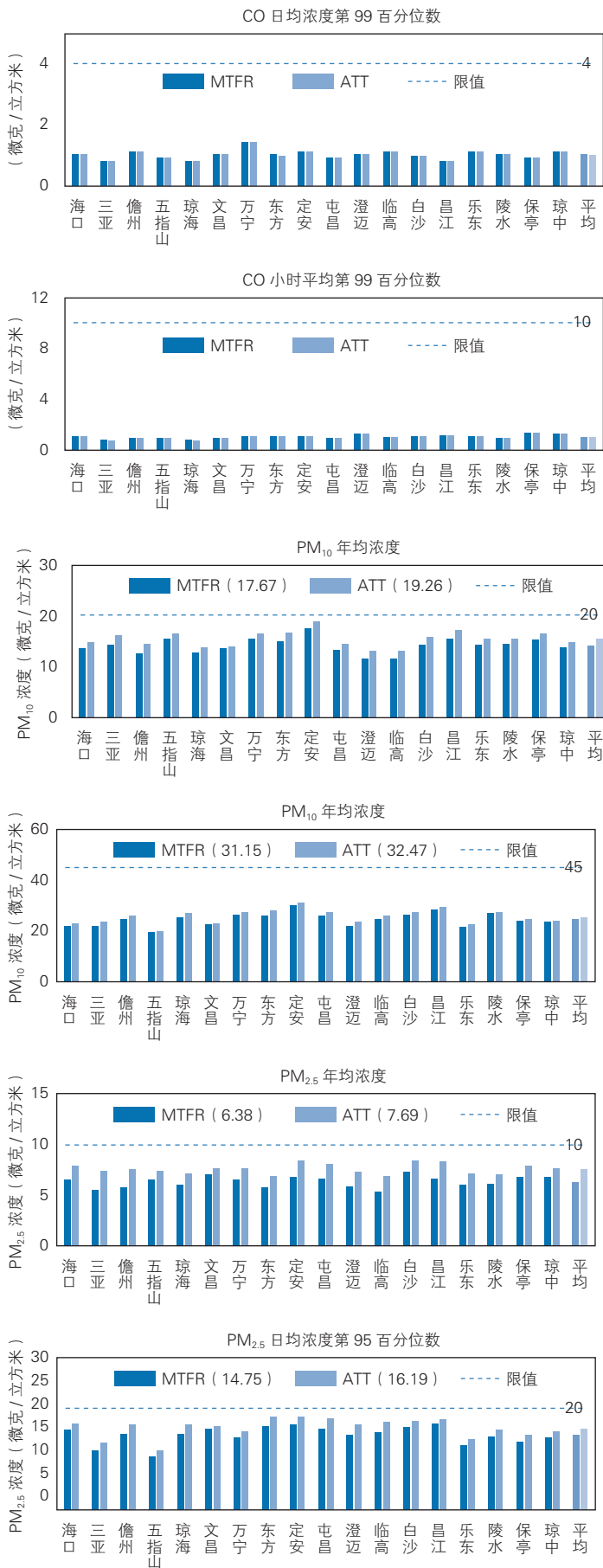
可轻松达标的空气污染物

在两种情景下，对于SO₂、NO₂和CO的各指标，18个市县的平均浓度以及18个市县均能达到所设计的标准，尤其是对于SO₂和CO这两种污染物，海南省在2035年可以较为轻松地达到设计标准。



颗粒物达标情况

对于年均浓度，各个市县中指标值最大的是定安，较为接近限值。对于日均浓度的第95分位数，各个市县中指标值最大所对应的地区包括定安、琼海和海口。总体来说，海南省PM_{2.5}和PM₁₀浓度可以达到设计标准，但需要注意重点区域的PM_{2.5}和PM₁₀浓度情况。



臭氧达标情况

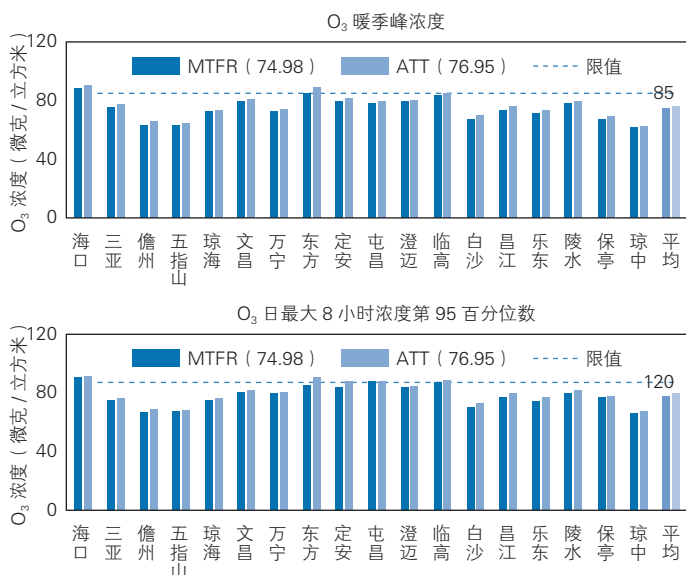
本研究判断海南省各污染物指标是否达标的依据是：若18市县的平均浓度能够达标，且绝大多数城市都达标，少数未达标城市超标不多，就认为总体达标。左图展示了O₃的达标情况。在最大减排情景下，对于O₃的两种指标，18市县的平均浓度达标，但均有两个城市超标，超标市县的指标值略微超过限值，超过幅度小于5μg/m³。在达标情景下，对于O₃的两种指标，18市县的平均浓度均达标，但暖季峰值浓度超标的有东方、海口和临高，最大8小时浓度的第95分位数超标的有海口、临高、东方、定安和屯昌。在达标情景下，超标市县的指标值略微超过限值，超过幅度小于10 μg/m³，其中临高、定安和屯昌超标程度极为微小。总体来说，海南省O₃浓度的两个指标能够达到设计标准，但需重点关注O₃浓度略微超标的市县。

PM_{2.5} 达标的健康收益

从BAU到ATT情景下PM_{2.5}减排带来的健康收益，包括脑卒中(Stroke)、缺血性心脏病(IHD)、慢性阻塞性肺疾病(COPD)、肺癌(Lung Cancer)和下呼吸道感染(LRI)致死人数的减少。达标情景下的减排可以为海南每年减少因PM_{2.5}暴露而早逝的人数是1526(95% CI: 1253-1789)人，其中减少因IHD早逝的人数最多，为468(95% CI: 426-511)人。从空间分布看，海口和三亚附近减少的早逝人口最多。

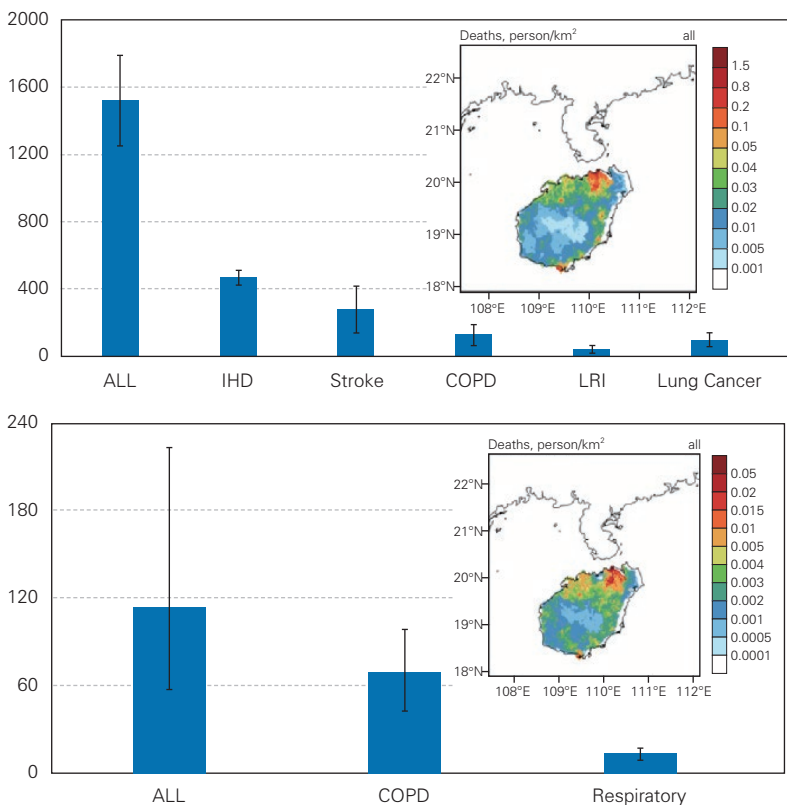
O₃ 达标的健康收益

达标情景下O₃减排带来的健康收益，包括因慢性阻塞性肺疾病(COPD)和呼吸系统疾病早逝人数的降低。达标情景下的减排可以为海南每年减少因O₃暴露而早逝的人数为114(95% CI: 58-223)人，其中减少因COPD早逝的人数最多，为69(95% CI: 42-98)人。从空间分布看，海口和三亚附近减少的早逝人口最多。



达标的健康效益评估

本研究基于BenMAP健康效益模型分别定量评估了2035年海南省从BAU情景到ATT情景因PM_{2.5}和O₃浓度降低而避免的早逝人数，评估了新标准实施带来的健康收益。PM_{2.5}长期暴露的健康风险通过全球暴露反应关系模型(GEMM)估算；O₃长期暴露的健康风险通过Turner等人(2016)对臭氧暴露与死亡率之间关系的研究估算。



2.4. 标准制定：小结

标准制定流程

它山之石
可以攻玉

成本效益分析

加严标准
一本万利

可达案例分析

路途虽远
行则可至

我国大气基准研究发展较晚,未来需要根据我国的实际情况,充分借鉴国际已有的基准研究和制定体系,基于国际上关于基准研究的共识,尽快开展基准相关的研判工作,包括但不限于:明确因果联系并确定我国人群的大气污染物暴露反应关系;在充分考虑不确定性的前提下,明确基准值;明确基准与空气质量标准的关系,尽快提出空气质量标准修订的时间表和技术路线。

开展标准的成本收益分析,可为空气质量标准修订提供必要的决策支持。经过保守估计,提高空气质量标准到世界领先水平(即WHO第四阶段目标IT4或AQG 2021)的减排直接总成本为1.71万亿人民币(1.23万亿~1.94万亿),远低于空气质量改善清洁情景(IT4/AQG)所带来的健康效益(3.1~4.2万亿)。

海南环境空气质量已经处于全国领先水平,现有国家标准对海南空气质量持续改善的引领和推动作用逐渐减弱。以海南空气质量能否率先达到国际领先水平开展达标分析,兼具典型性和实用性。分析表明,限制海南省空气质量达标的主要难点是臭氧和颗粒物控制,而一旦两者达标将对健康有显著的改善作用。海南空气质量达标路径设计的方法可以被其它地区借鉴。

3.1 增强公众认知

—— 北京科技大学¹ 公众环境研究中心²

段小丽¹、马军²、王贝贝¹、阮清驾²

蔚蓝地图 app



保护生态环境、维护身体健康，既需要政府重视，也需要每个公民身体力行。动员公众力量来保护生态环境、维护身体健康，也是最具普惠性、最有效率的措施。“居民环境与健康素养提升工作”也被纳入了《健康中国行动（2019—2030年）》中的“健康环境促进行动”，要求在2022年超过15%，在2030年达到25%以上。然而，当前我国的居民环境与健康素养仍然处于较低水平，调查研究表明，2018年我国居民的环境与健康素养水平为12.5%，相当于平均每100个15-69岁的人中，还不到13人具备基本的环境与健康素养。因此，提升公众环境与健康素养，为公众提示环境健康风险及防护建议刻不容缓。

公众环境与健康素养的提升旨在让公众能够采取自我防护措施，避免或减轻环境污染对人体健康的危害。目前提升公众环境健康素养的方式还十分缺乏，市面上的环境类APP多数局限于描述空气污染状况，提示公众户外运动可能的风险，然而尚未基于个体开展风险评估，也没有根据用户自身健康状况提出针对性的防护建议；目前也没有针对有色金属冶炼等高污染企业为附近居民进行风险提示的工具。因此，有必要建立针对公众个体的环境空气质量健康指数，并根据不同个体的健康状况和运动方式，给出公众需要的个性化建议，避免环境污染带来的健康风险；并且对高污染企业附近居民进行风险提示，有助于促进环境公平，助力美丽中国和健康中国目标的实现。

AQHI-for you



历史空气健康风险指数和当前的风险水平



个性化环境空气质量健康指数和风险感知

空气污染对公众健康影响的主要途径为呼吸吸入剂量，准确评估公众呼吸吸入空气污染物的剂量是评估空气污染造成环境健康风险的关键，研究通过纳入全国不同省份人群的呼吸量推荐值、体重推荐值，结合蔚蓝地图空气污染物数据，构建了全国环境空气质量健康指数本底地图，可为公众（包括心脏病或呼吸系统疾病患者、儿童及长者、一般居民）提供环境健康防护建议；并在此基础上构建了个性化环境空气质量健康指数（AQHI-for you），用户通过蔚蓝地图 app，输入自己身高、体重及基础健康状况等信息，为用户计算其所处位置的环境空气质量健康指数，并提供针对性的环境污染防护建议；而针对有运动需求的用户，可以通过输入运动信息，计算其当前空气质量下的运动健康风险，个性化的提供运动建议。

针对有色金属冶炼等高污染企业对周围居民的健康风险，通过系统梳理行业污染特征，识别行业污染环境健康风险特征污染物，依托蔚蓝地图污染企业数据库及污染企业地图，对企业周边用户提示健康风险，促进公众进行风险防护，助力环境公平。

预期目标

通过构建环境空气质量健康指数和高风险企业周边人群风险提示功能并依托蔚蓝地图发布能够实现在线评估不同人群暴露多种空气污染物的综合健康风险，一方面可以提高居民对环境健康的关注度；另一方面居民可以结合产品及时调整自己的行为模式来最大化规避风险，进而促进自身环境健康素养水平的提升；其次，可以通过定期生成用户风险提示报告，促进当地政府对风险人群的关注，并促进政府采取提升环境质量标准和排放标准、调整产业结构、规划工业园区等措施，以实现污染减排和环境质量的提升，达到保护公众健康的目标，同时有助于美丽中国和健康中国目标的实现。

碳达峰碳中和、美丽中国、健康中国等国家战略分别从能源气候经济、生态环境和卫生领域为中国实现更清洁的空气目标提供了多维度的战略和政策保障。国家已经发布或计划发布的《深入打好污染防治攻坚战指导意见》、《减污降碳协同增效实施方案》、《空气质量全面改善行动计划》等一系列重大政策措施，则为新时期减污降碳协同发力提供了新动力。中国正致力于到 2050 年实现建成社会主义现代化强国的目标，为此，也需要同时实现世界级空气质量目标，PM_{2.5} 年均值同步实现世界级空气质量（WHO 2005 版 AQG 的推荐值 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）是应有之义，这意味着，中国需继续通过 30 年努力实现欧美发达国家当前的空气质量水平。在这种长期战略背景下，应建立完善基于健康保护的空气质量标准体系，将其作为有效推动减污降碳协同增效的全局性战略性举措，以推动环境改善与气候变化管理协同、环境要素内部多污染物治理协同、生态文明建设和经济社会能源发展协同。

修订空气质量标准
保护人群健康

加强空气污染健康效应的基础研究，支撑空气质量基准体系的建立完善

空气污染的健康效应是制定环境空气质量基准的科学基础，但主要证据来源于真实世界的观察性研究，受复杂性和不确定性的影响，需要进一步加强研究，促进其成果转化、支持标准修订决策。对于当前研究不足、但颇为重要的新型健康结局（包括脑卒中、二型糖尿病、低出生体重和早产等），有必要引起重视和加强研究。进一步完善数据的共享机制、结合大人群、多组学的分析方法，在阐明生物机理的基础上、识别易感人群的暴露反应关系，以帮助识别空气污染健康效应人群异质性。尽快开展研究、定量分析大气成分和人群构成差异对大气污染暴露反应关系的修饰作用，以便支持合理规划分地区的环境空气质量标准。

基准是标准的基础，目前 WHO 指导值或基准主要借鉴了欧美发达国家的研究和当地的数据结论，有必要系统研究中国本地化的空气污染与人群健康的暴露反应关系，从而推动空气质量基准的出台。要依托中国环境基准委员会，建立生态环境与卫生健康部门的密切合作机制，开展中国空气质量基准的基础性研究，持续开展大气污染对人群健康急慢性影响的系统性研究，包括超低浓度区间、不同区域、易感人群等暴露反应关系、浓度暴露与不同疾病之间相关性等；也包括空气污染、气候变化与人体健康三者之间的相互影响和复杂关系等。推动建立空气质量基准和大气污染健康数据集成平台，实现相关研究的系统化。

充分结合国际经验、本土证据、双碳战略，加快推进标准修订

发达国家更新空气质量标准频次一般不超过 8 年。当前全国地级以上城市 PM_{2.5} 年均浓度已达标（29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ），距离上一次修订国家环境空气质量标准已超过十年。因此，应尽快启动标准评估修订程序。中国环境空气质量标准的制修订应以我国本土的最新的空气质量基准研究成果为主要依据，明确环境污染物最

低暴露风险，同时借鉴国际上先进的基准 / 标准制修订经验，在系统评估我国现有标准的基础上进行制修订。在现有国家环境基准委员会的基础上，成立环境标准专家委员会，除环境相关学科外，还应包括科学、工程、管理、法律、经济等多领域专家，建立空气质量标准定期审查和评估机制。

中国空气质量标准制的制修订要充分考虑我国大气环境污染问题的区域特征，必要时可制定严于国家标准的地方性空气质量标准或设置过渡期目标，实现“一地一策”地进行空气质量管理。可尽快制定和发布实施《海南世界领先水平空气质量标准》，考虑新标准和现有标准并行实施，涉及考核的地方统一采用国家现行标准，对自贸港等不涉及考核仅用于评价的区域可以考虑采用新标准引领，后期逐步过渡到考核阶段。

中国环境空气质量标准的制修订要充分考虑“双碳”战略对降污减排的协同作用，借鉴发达国家和地区成功经验，推动我国环境空气质量进一步改善。建议 2025 年前将 $PM_{2.5}$ 标准加严到 $25\mu g/m^3$ ，2030 年前将 O_3 标准加严到 $140\mu g/m^3$ ，2035 年前、2050 年前将 $PM_{2.5}$ 标准加严到 15 或 $10\mu g/m^3$ ，将有力推动能源生产、交通、工业、建筑和居民生活等各行业污染和碳减排。



建议完善评价方法，充分考虑空气污染健康效应复杂性，增强健康风险预报和预警

科学开展空气质量评价。在空间评价上，强化单站达标评价，推动污染地区的精准治理和敏感人群的健康防护。在时间评价上，可考虑提升 PM_{2.5} 等污染物日均浓度全年达标率，从而降低短期暴露带来的急性健康风险。对于年均浓度应采用三年滑动平均计算值，以有效过滤当年度因气象条件波动带来的浓度较大幅度的改变。与此同时，从 PM_{2.5} 总量控制逐步向以高健康风险的 PM_{2.5} 成分 / 来源控制进行转变，重视交通、居民固体燃料等污染来源。针对 PM_{2.5} 成分建立标准限值，开发以 PM_{2.5} 成分健康影响为导向的预警系统；对于医疗机构，需要关注 PM_{2.5} 污染预警信息，提前做好准备，如增加医院床位，更加关注心血管事件的发生，提醒心血管疾病患者做好健康防护，并给予指导；对于公民个人，提高对 PM_{2.5} 成分及重污染事件健康影响的认知，加强个人防护，减少在 PM_{2.5} 重污染天气下的出行活动，一旦发生不良症状，应及时就医。

以空气质量标准修订为抓手，优化减污降碳协同增效路径，推动环境改善、健康保护，气候安全等多重目标

借助实施更严格的空气质量标准，有助于以健康驱动大气污染防治和气候变化应对的协同治理。为实现空气质量达标和空气质量持续改善，标准加严将有力同步驱动更大力度的“四大结构”调整、从源头到末端的全过程治理提升可再生能源比例，加快散煤清洁化替代进程，持续推进非电行业、柴油机和 VOC 重点行业污染治理工作，有望实现全国人群 PM_{2.5} 年均暴露水平可从 2020 年的 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降到 2030 年 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2030 年之后，由于末端治理措施的减排潜力基本耗尽，碳中和目标下的深度低碳能源转型措施将成为我国空气质量持续深度改善的动力源泉。根据相关研究，在最严格的碳中和情景下，到 2050 年我国将基本完成低碳能源转型，2050 年全国碳排放总量将在当前排放水平基础上减少 90% 以上。届时，全国人群 PM_{2.5} 年均暴露水平达低于 WHO 2005 年版本指导值 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，空气污染问题有望得到根本解决。



信息来源于以下项目成果

项目名称	项目承担单位
基于健康的空气质量标准制修订的相关研究需求识别	北京大学
基于经济分析的空气质量标准修订路径研究	北京大学
中国典型城市PM _{2.5} 成分的短期暴露对健康的影响	中国疾控中心环境与健康相关产品安全所
支持环境空气质量标准制修订方法研究及在上海实践	复旦大学
我国大气颗粒物基准研究思路及“十四五”政策建议	中国环境科学研究院
推动海南省建立基于保护人体健康的世界级空气质量标准： 更严格空气质量标准的可行性	清华大学
高污染企业周边环境健康风险指数与居民暴露行为研究	北京科技大学/公众环境研究中心