

环境空气质量标准研究系列报告

中国环境空气质量标准 修订达标路径分析



2025年10月



报告团队

- | | |
|-----|--------------------|
| 贺克斌 | 中国工程院院士 清华大学环境学院教授 |
| 张 强 | 清华大学地球系统科学系教授 |
| 耿冠楠 | 清华大学环境学院副研究员 |
| 刘 洋 | 清华大学环境学院博士后 |
| 陈伊妃 | 清华大学地球系统科学系博士生 |
| 仝元熙 | 清华大学地球系统科学系博士生 |
| 黎敬贤 | 清华大学环境学院博士生 |
| 何长沛 | 清华大学地球系统科学系博士生 |

致 谢

特别感谢亚洲清洁空气中心（Clean Air Asia, CAA）为本研究提供支持。

前言

环境空气质量标准是空气质量管理体系的核心基础，它既是衡量空气污染程度和健康风险的标尺，也是制定政策和规划措施的重要依据。

2012年，我国修订并发布了《环境空气质量标准》(GB3095-2012)，首次增设PM_{2.5}浓度限值，成为我国大气污染防治进程的重要里程碑。此后，国务院先后出台一系列清洁空气行动计划，包括《大气污染防治行动计划》、《打赢蓝天保卫战三年行动计划》、《空气质量持续改善行动计划》，推动我国大气污染物排放大幅削减，显著改善了空气质量并带来可观的健康效益。自2020年以来，全国整体PM_{2.5}年均浓度已连续五年达标，PM_{2.5}达标城市比例突破七成，空气质量水平实现历史性改善。

世界卫生组织（World Health Organization, WHO）在2021年发布新版《全球空气质量指南》，对包括PM_{2.5}在内的多种主要空气污染物的指导值和目标值进行调整，其中将PM_{2.5}年均浓度指导值由10μg/m³收紧至5μg/m³。随后，美国与欧盟于2024年先后完成环境空气质量标准修订，分别将PM_{2.5}年均浓度限值收紧至9μg/m³和10μg/m³。相比之下，我国现行PM_{2.5}限值较为宽松，亟需通过标准修订进一步强化健康导向，推动空气质量持续改善。

国务院于2023年11月发布的《空气质量持续改善行动计划》明确提出“启动环境空气质量标准及相关技术规范修订研究工作”。这一举措标志着我国环境空气质量标准迈入了修订的前期准备阶段。为响应这一政策动向，亚洲清洁空气中心（Clean Air Asia, CAA）在2021年完成的环境空气质量标准研究（一期）的基础上立项，联合清华大学、北京大学围绕环境空气质量标准修订开展系统研究（二期），旨在为我国的环境空气质量标准修订、以及下一阶段空气质量持续改善提供决策参考和依据。研究共形成以下三份成果报告。

- 《中国环境空气质量标准修订达标路径分析》，即本报告，提出了环境空气质量标准修订的建议值，构建了近中期可达的新标准情景，并建立“分阶段、分区域”的达标路径，同时评估了达标路径的协同降碳效益与健康收益。
- 《中国环境空气质量标准修订的经济影响评估》利用可计算一般均衡模型，系统评估了环境空气质量标准修订对宏观经济、产业结构、能源转型和公共健康的影响，并开展了成本效益分析。
- 《环境空气质量标准修订国际案例研究》梳理和总结了美国和欧盟在最新一轮环境空气质量标准修订方面的做法与管理实践，并进行对比分析。

目录

执行摘要	II
一、研究背景与目标	2
二、空气质量与排放现状	3
三、环境空气质量标准修订限值设计	6
四、新限值下的达标情景设计	7
五、达标路径及其减污降碳协同效益与健康收益	10
六、结论与政策建议	17
参考文献	19

执行摘要

修订环境空气质量标准，加严 PM_{2.5} 浓度限值，并以“分阶段、分区域”方式设置 PM_{2.5} 浓度目标，是推动我国空气质量持续改善的必由之路。我国现行 35 μg/m³ 的二级限值在国际上总体处于较为初级的水平，与 WHO 指导值及发达国家现行 / 拟议标准仍有显著差距。本研究在系统梳理我国环境空气质量标准与区域差异的基础上，提出环境空气质量标准修订的建议值与阶段性安排，构建近中期可达的新标准情景，建立可实施的达标路径，评估协同降碳效益与健康收益，形成支撑政策制定与政府决策的技术报告，为我国下一阶段空气质量持续改善、人民健康保障与经济社会高质量发展提供科学依据。

基于我国当前的空气质量与排放水平，并综合考虑健康效益与政策引领作用，研究建议将 25 μg/m³ 作为新的 PM_{2.5} 年均浓度标准限值，并明确了总体达标路径。到 2030 年全国 339 个城市和长三角地区 PM_{2.5} 浓度平均值率先低于标准限值，到 2035 年京津冀及周边地区和汾渭平原浓度平均值低于标准限值，形成“先进地区先行、重点区域攻坚、全国梯次推进”的总体格局。

围绕该目标，我国 2030 年前应充分发掘各部门结构调整和能效提升减排潜力，与末端治理协同发力。以 2024 年为基准，2030 年全国 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 和 VOCs 排放分别下降 25%、31%、30% 和 23%，可使全国 339 个城市的 PM_{2.5} 年均浓度降至 23.4 μg/m³，避免约 43 万人过早死亡，对应累计健康效益约 1.5 万亿元，协同削减 CO₂ 排放量 13.9 亿吨，相较 2024 年下降 12%，累计碳减排效益 0.9 万亿元；长三角地区在此阶段需要实现 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 和 VOCs 较 2024 年分别减排 32.1、96.3、26.0 和 108.9 万吨，使区域 PM_{2.5} 年均浓度达到 24.8 μg/m³，协同削减 3.5 亿吨 CO₂ 排放量，相对 2024 年下降 19%。

随后，在 2030~2035 年间进一步加大电力、工业与交通等部门的结构性调整和能效提升力度，充分挖掘结构性措施的减排潜力，到 2035 年全国 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 和 VOCs 排放相较 2024 年分别下降 57%、55%、66% 和 40%；此时全国 PM_{2.5} 年均浓度可降至 18.4 μg/m³，避免约 225 万人过早死亡，累计健康效益约 8.2 万亿元。重点区域方面，京津冀及周边地区与汾渭平原在 2035 年分别实现 SO₂、

NO_x、PM_{2.5} 和 VOCs 较 2024 年下降 41%~62%、53%~60%、55%~59% 和 34%~54%，对应 PM_{2.5} 年均浓度达到 25.0 与 24.5 μg/m³，整体实现 25 μg/m³ 浓度目标。与此同时，更严格的环境空气质量标准所驱动的各部门的结构性调整和能效提升力度也带来了可观的碳减排协同效益。在此达标路径下，2035 年全国 CO₂ 排放量下降至 80.9 亿吨，相较 2024 年削减 31.2 亿吨（下降 28%），京津冀及周边地区和汾渭平原 CO₂ 排放分别实现协同削减 6.2 亿吨和 2.9 亿吨，分别相对于 2024 年下降 26% 和 30%，2024~2035 年全国可获得累计碳减排效益 3.4 万亿元。

为确保上述路径落地见效，需聚焦能源、产业与交通三大领域的结构调整措施，实现系统减排与协同治理。

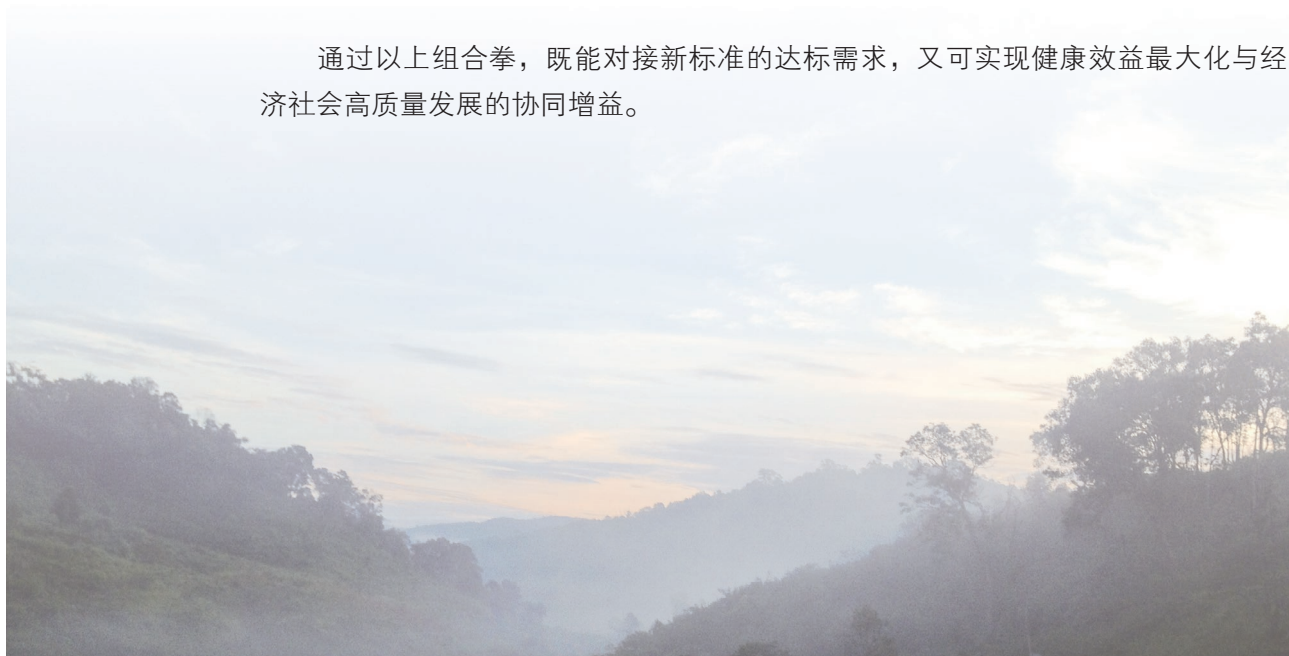
- 一是加快能源结构优化，用清洁能源满足新增需求，提升可再生能源开发与消纳能力，扩大电力、工业用煤的天然气与可再生能源替代规模，完善可再生能源与天然气的产—储—供—销体系；严格控制煤炭、石油等高碳化石能源消费总量，优先削减中小型燃煤/燃油锅炉、工业窑炉、民用散煤与传统生物质燃料。

- 二是优化供热与终端用能体系，提升终端用能电气化水平，重点地区不再新增煤炭产能和燃煤机组装机，提速供热管网建设，加快淘汰管网覆盖区内分散燃煤设施，推进以清洁电力、工厂余热和可再生低碳能源替代工业窑炉与分散供热。

- 三是推动产业结构升级与布局优化，大力发展电弧炉短流程炼钢，推进钢铁、水泥等重点行业节能降耗与超低排放巩固提升，系统整合并有序退出烧结、砖瓦、玻璃等行业落后产能。

- 四是以交通结构优化和清洁化终端为抓手，提高新能源汽车保有量占比与在用车辆排放控制水平，提升铁路在货运中的比重，推动高排放柴油火车淘汰及电动重卡推广，推进非道路移动机械的电动化与清洁燃料替代。

通过以上组合拳，既能对接新标准的达标需求，又可实现健康效益最大化与经济社会高质量发展的协同增益。



一、研究背景与目标

《环境空气质量标准》是我国大气环境管理的“底层规范”，直接支撑大气环境规划、空气质量管理与污染物排放标准的制定。适时修订空气质量标准，既是完善污染治理体系、对齐国家治理新要求的必由之路，也是推动空气质量持续改善的重要抓手，对保障人民健康与支撑经济社会高质量发展具有基础性意义。

围绕“标准修订为何种水平更为科学合理、采用何种达标路径更具可行性、实施新标准能够带来多大环境－气候－健康综合效益及其对各部门的影响”等关键问题，决策者与社会各界亟

需系统、量化、可检验的证据支撑与可操作的路线图。

本研究在系统梳理我国环境空气质量标准与区域差异的基础上，提出环境空气质量标准修订的建议值与阶段性安排，构建近中期可达的新标准情景，建立可实施的达标路径，评估减污降碳协同效益与健康收益，量化对电力、工业、交通、民用与农业等部门的影响，形成支撑政策制定与政府决策的技术报告，为我国下一阶段空气质量持续改善、人民健康保障与经济社会高质量发展提供科学依据。



二、空气质量与排放现状

2024 年，全国 339 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度平均值为 $29.3\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相较 2015 和 2020 年分别下降 41% 和 10%（如图 2-1）；339 个城市中，有 252 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到国家二级标准限值，占 74%（如表 2-1），相比于 2015 年提高 51 个百分点。

在当前环境空气质量标准下，重点区域中

仅长三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均值达标，年均浓度为 $33\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，达标城市占比达 71%。京津冀及周边地区和汾渭平原 2024 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度平均值分别为 42.2 和 $39.6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，距离 $35\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的标准仍有一定差距，且达标城市占比仅为 14%~15%。2020~2024 年间各区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的降幅明显低于 2015~2020 年间的降幅，尤其是已达标的长三

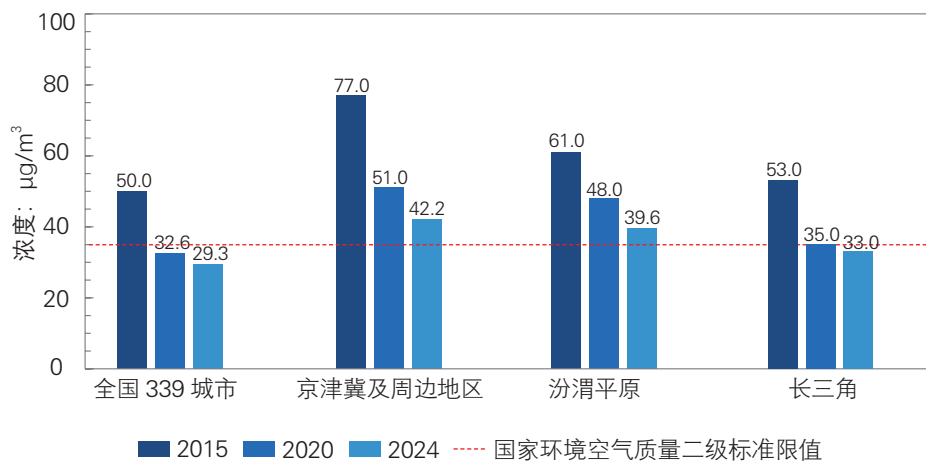


图 2-1 2015–2024 年中国重点区域年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势

数据来源：中国生态环境状况公报

表 2-1 全国和重点区域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度城市达标率

	全国	京津冀及周边地区	长三角地区	汾渭平原
现行标准限值 ($35\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)	74% (252/339)	14% (5/36)	71% (22/31)	15% (2/13)
WHO IT-2 ($25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)	38% (128/339)	0% (0/36)	10% (3/31)	0% (0/13)
WHO IT-3 ($15\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)	6% (20/339)	0% (0/36)	0% (0/31)	0% (0/13)

注：括号内的分子为全国或区域达标城市数量，分母为全国或区域城市总数

角地区，2024 年较 2020 年仅下降 $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ （如图 2-1）。这表明，随着 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐渐接近现行标准，后续的改善动力不足， $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降速度明显放缓。

我国现行 $\text{PM}_{2.5}$ 年均标准对应 WHO 过渡目标 IT-1，与 WHO 指导值仍有明显差距。若以 WHO 过渡目标 IT-2（ $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）作为新的参照，全国范围内仅约 38% 的城市能够达标，长三角地区约 10% 城市可达标，京津冀及周边和汾渭平原尚无城市达到该水平。若采用更严格的 WHO 过渡目标 IT-3（ $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ），全国城市达标比例不

足一成。为持续推动空气质量改善，亟需通过更严格的环境空气质量标准及配套措施的联动实施，形成新的减排动力。

自 2013 年以来，我国相继实施多轮清洁空气行动，主要大气污染物排放大幅削减。至 2024 年，我国主要污染物 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOC 的人为源排放量分别为 6.6、16.6、5.9 和 21.5 百万吨。排放来源结构上，能源燃烧过程及其主要相关部门占据主导地位（图 2-2、图 2-3），燃烧过程对上述四类污染物的排放贡献分别达到 78.7%、96.1%、67.3% 和 37.8%。当前，我国

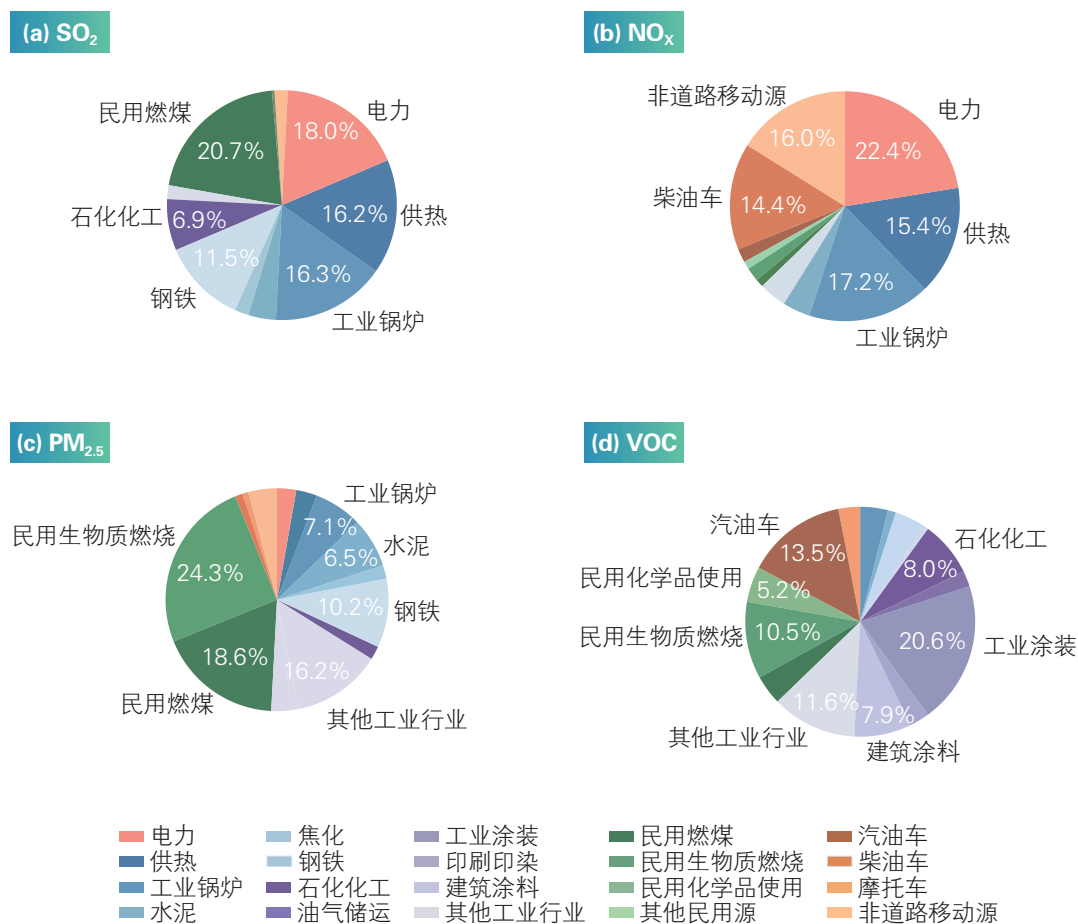


图 2-2 2024 年全国主要大气污染物分部门占比

仍然处于以煤为主的能源消耗结构，近年的工业燃煤总量仍超过 6 亿吨，使得供热、工业锅炉等燃烧过程主导的工业部门贡献了超过 30% 的 SO_2 和 NO_x 排放。值得注意的是，民用燃煤等民用部门的燃料燃烧活动贡献了超过 40% 的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放，提示在多数地区已“基本达标”的情况下，居民散煤等难监管端可能存在治理薄弱点，清洁取暖与终端替代应作为重点推进方向。对于燃油过程，移动源的柴油车和非道路机械贡献了约 30.4% 的 NO_x 排放，对二次 $\text{PM}_{2.5}$ 的生成具有重要影响，亟需通过结构优化与排放标准迭代实现持续降氮。

另一方面，非燃烧过程的排放同样不可忽视。2024 年，我国的生铁、粗钢、水泥产量分别达到 8 亿吨、10 亿吨和 18 亿吨的水平，是世界上主要的生产国，在钢铁、水泥的超低排放改造有序推进的背景下，这两个部门的非燃烧过程仍然能贡献约 16.7% 的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放和 15.5% 的 SO_2 排放，具有进一步减排的潜力。另外，VOC 作为二次 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要前体物，溶剂使用源和石化化工过程是其主要的排放源，二者合计贡献了约 40% 的 VOC 排放，因此，需要对这些重点部门加以管控以减少二次 $\text{PM}_{2.5}$ 的生成。

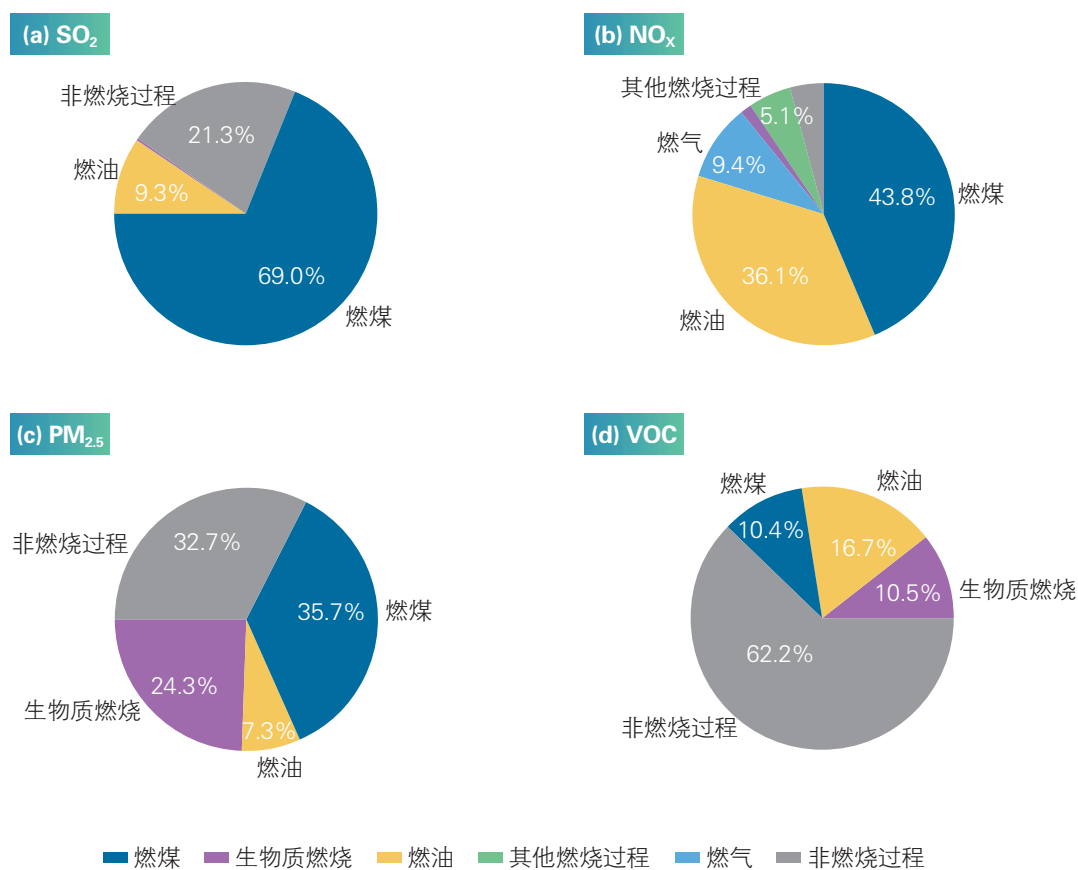


图 2-3 2024 年中国主要大气污染物人为源排放的部门贡献 (%)

数据来源：MEIC, <http://meicmodel.org.cn/>

三、环境空气质量标准修订限值设计

2024 年，全国有四分之三的城市达到现行标准，当前标准限值对这些已达标城市的引领作用明显减弱。然而，若不加甄别地直接对齐国际最严水平，势必给地方带来较大治理压力，尤以尚未全面达标的京津冀及周边地区、汾渭平原等区域为甚。

25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 是“美丽中国”建设提出的 2035 年目标，也是 WHO 过渡目标 IT-2。已有研究表明，在不额外叠加气候治理措施的情况下，采用最优的治理措施组合，到 2030 年可实现全国人口加权 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度达到 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下

(24.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Cheng 等, 2023)。若与气候治理协同推进，还可进一步改善 2.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，接近 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。鉴于当前已有近五分之一的城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度低于 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，在考虑以 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 作为阶段性限值的同时，有必要系统评估 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 作为标准限值修订值的可行性与达标路径。

所以，立足我国当前的空气质量与排放水平，综合考虑健康收益、政策引领与实施可达性，本研究将 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 作为优先评估的目标限值，系统测算其环境健康影响，并据此提出分阶段、分区域的达标路径（如表 3-1）。

表 3-1 不同目标限值下全国和重点区域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度城市达标率

	全国	京津冀及周边地区	长三角地区	汾渭平原
目标限值 1 (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	38% (128/339)	0% (0/36)	10% (3/31)	0% (0/13)
目标限值 2 (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	19% (63/339)	0% (0/36)	0% (0/31)	0% (0/13)

注：括号内的分子为全国或区域达标城市数量，分母为全国或区域城市总数

四、新限值下的达标情景设计

立足国家“2035 美丽中国”目标，统筹地方空气质量改善需求，在近中期（2030 和 2035 年）以全国 339 个城市整体 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度平均值达到所设参考限值为总体要求，同时对重点区域实行分阶段、分梯度的区域目标控制。研究据此设计 5 组新限值约束下的空气质量达标情景。基于各类减排措施的实施潜力评估 2030 年和 2035 年可实现的最大减排潜力；以最大减排潜力为约束，合理组合不同部门各类措施的执行力度，多次迭代得到全国和重点区域减排路径，使其 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模拟结果满足各情景的目标要求。

最终，研究在 $25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 限值下共设计 3 组情景（情景 1~3）， $20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 限值下设计 2 组情景（情景 4 和 5）。5 组情景中，对全国和重点区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度提出明确要求（表 4-1）。

- 情景 1 要求在 2030 年实现全国 339 个城市整体 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度平均值低于 $25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，京津冀及周边地区和汾渭平原年均浓度达到

$34\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、长三角地达到 $30\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

- 情景 2 在情景 1 的基础上加严 2030 年重点区域的年均浓度限值，并要求长三角地区先于其他重点区域实现 $25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 目标。

- 情景 3 将达标目标年份延迟至 2035 年，要求 2035 年全国和长三角地区达标的同时，京津冀及周边地区和汾渭平原的年均浓度低于 $28\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

- 情景 4 加严了全国的标准限值，要求 2035 年全国 339 个城市整体年均浓度到达 $20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，京津冀及周边地区和汾渭平原达到 $26\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，并要求长三角地区年均浓度达到 $23\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。

- 情景 5 进一步加严了重点区域的浓度限值，要求 2035 年全国整体年均浓度达到 $20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的同时，长三角先于其他重点地区达标，且要求京津冀及周边地区和汾渭平原基本实现实现 $25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 浓度目标。

通过梳理我国已有的和预计推行的治理措施，评估各类措施在 2030 年和 2035 年的实施潜力，

表 4-1 $\text{PM}_{2.5}$ 标准修订的空气质量达标情景定义

情景 序号	实现 年份	空气质量参考 限值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\text{PM}_{2.5}$ 目标年均浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
			全国	京津冀及 周边地区	长三角	汾渭平原
1	2030	25	≤ 25	≤ 34	≤ 30	≤ 34
2	2030	25	≤ 25	≤ 30	≤ 25	≤ 30
3	2035	25	≤ 25	≤ 28	≤ 25	≤ 28
4	2035	20	≤ 20	≤ 26	≤ 23	≤ 26
5	2035	20	≤ 20	≤ 25	≤ 20	≤ 25

测算最大力度实施各类措施可在 2030 年和 2035 年实现的减排效益，为不同环境空气质量标准修订情景下的达标路径设计提供约束条件。

首先，对我国 2013 年以来清洁空气行动期间和之后陆续发布的环境－气候治理措施进行梳理，整理了包括电力、工业、民用和交通部门的末端治理、结构调整和能效提升三个维度的措施。其次，结合各措施实施过程中所涉及技术的历史发展演变、当前市场占有率等因素预测了各类措施在 2030 年和 2035 年前的实施潜力。然后，基于社会经济可持续自然增长的假设，利用多尺度人为源排放清单模型（Multi-resolution Emission Inventory model for Climate and air pollution research, MEIC）和中国未来排放动态评估模型（Dynamic Projection model for Emissions in China, DPEC）（Cheng 等，2021），分别估计了最大化实施各类措施可在 2030 年和 2035 年实现的污染物和 CO_2 最大减排比例。各类措施与部门的对应关系如表 4-2 所示。

经过测算，预计非化石能源发电占比 2030 年达到 50%，2035 年达到 59%，发电设施完成超低排放改造；钢铁行业电炉钢比例 2030 年达到 30%，2035 年达到 40%，水泥行业单位产量能耗 2030 年下降至 112 kgce/t，2035 年降至

103 kgce/t；民用散煤存量清零；汽油车中，新能源车保有量占比 2030 年达到 60%，2035 年达到 80%，‘国 6’及以上标准车辆占比 2030 年达到 60% 以上，2035 年达到 70% 以上。

最大化实施各类措施，在全国尺度上，2030 年 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs 可实现的最大减排比例分别为 48%、45%、58% 和 35%，2035 年在 2030 年的基础上可进一步减排 5~10 个百分点。区域尺度上，汾渭平原和长三角地区硫氮尘三种污染物在 2030 年可实现 50% 左右的减排，而京津冀及周边地区可实现减排比例略低于前两个区域。对于 VOCs，京津冀及周边地区和长三角地区 2030 年最大减排比例在 30% 左右，汾渭平原相较二者有约 10% 的额外减排空间。

以最大减排比例为约束，研究组合不同部门各类措施的执行力度，计算主要污染物和 CO_2 的减排量。首先利用本团队开发的人工智能大气化学模型模拟不同情景的减排路径可实现的全国 339 城市和重点区域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度。随后，以浓度模拟结果是否满足情景要求的浓度目标为依据，多次迭代得到不同情景下全国和重点区域减排路径和相应的空气质量改善效果。最后，采用全球暴露－响应模型（Global Exposure Mortality



Model, GEMM) (Burnett 等 , 2018), 计 算 不 同 达标路径下由 PM_{2.5} 污染导致的过早死亡人数。采用支付意愿法, 利用统计生命价值 (Value of a Statistical Life, VSL) (Xie 等 , 2018), 定量评估不同达标路径带来的健康效益。不同情境下达标

路径的累计减排效益通过 2024 年到目标年的累计减排量乘以预期交易价格获得。其中预期交易价格以 2030 年预期碳市场交易价格 132 元 / 吨 CO₂ 排放计 (Qi 等 , 2022) , 并假设 2035 年预期交易价格与 2030 年相当。

表 4-2 各类措施与部门的对应关系

行业	治理措施	指标
电力 / 供热	电力结构清洁化	非化石能源发电占比
	发电能效提升	火电供电标煤耗 (gce/kwh)
	供热能源清洁化	非化石能源供热占比
	供热能效提升	供热设施平均热效率
	超低排放改造	超低排放改造产能占比
工业	钢铁行业结构转型	电炉钢比例
	钢铁行业节能	吨钢可比能耗 (kgce/t)
	建材行业能源替代	建材行业终端电力占比
	建材行业节能	单位产量能耗 (kgce/t; 重量箱)
	其他工业行业能源替代	其他工业终端电力占比
	超低排放改造	超低排放改造产能占比
民用 / 建筑	民用散煤替代	民用散煤存量 (亿吨)
	民用建筑节能	居民建筑节能率
	燃烧技术升级	先进炉灶占比
交通	非道路机械电气化	工程机械电气化率
		农业机械电气化率
	柴油车电气化	新能源车销售量占比
		新能源车保有量占比
	汽油车电气化	新能源车销售量占比
		新能源车保有量占比
	机动车燃料经济性改善	机动车百公里油耗 (L)
溶剂使用	排放标准升级	“国 6” 及以上标准车辆占比
	涂料源头替代	水性溶剂使用比例
	强化有机废气治理	VOCs 综合去除率

五、达标路径及其减污降碳协同效益与健康收益

基于不同情景的对比分析，研究提出新标准下可能的达标路径。以 $25\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 为标准限值，2030 年全国 339 城市整体 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度可达标，重点区域中，长三角地区可优先其他区域达标。为实现这一目标，各类污染物平均减排 30% 以上，协同削减 CO_2 排放量 13.9 亿吨，相较 2024 年下降 12%。在此减排力度基础上，进一步推进电力、工业和交通部门结构调整和能效提升相关的措施实施力度，加大减排力度。到 2035 年，全国可实现 339 城市年均浓度达到 $20\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，全国有 84% 城市可达标，京津冀及周边和汾渭平原整体 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度可达标。该路径下 2035 年全国 CO_2 排放量下降至 80.9 亿吨，协同削减 31.2 亿吨 CO_2 ，相对 2024 年减排 28%，2024~2035 年可获得累计碳减排效益 3.4 万亿元。

当 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度标准限值加严至 $25\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，并要求京津冀及周边地区和汾渭平原 2030 年年均浓度下降到 $34\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，长三角地区年均达到 $30\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下时（情景 1），全国 339 个城市整体 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度平均值可降至 $25.0\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，有 46% 的城市达标，相较 2024 年增加 8 个百分点。该浓度水平下，2024~2030 年全国可累计避免 7 万人过早死亡，将带来 0.2 万亿元的累积健康效益（图 5-4）。为实现这一目标，全国尺度上， SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 需要分别下降 20%、24%、26% 和 18%（图 5-1）。对于 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ ，持续推进散煤替代、民用传统生物质替代、民用建筑节能等民用部门治理措施，是在 2030 年实现全国 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 分别减排 26% 和 20% 的关键。对于 NO_x 和 VOCs，推进电力结构清洁化

和能效提升、柴油车和非道路机械电气化、机动车燃料经济性改善等措施是推动二者分别实现 24% 和 18% 减排的关键。在该路径下，全国在 2030 年 CO_2 排放可降至 106.5 亿吨，2024~2030 年可获得累计碳减排经济效益 0.4 万亿元。

区域尺度上，京津冀及周边、汾渭平原和长三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度分别达到 33.5、32.2 和 $28.0\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ （图 5-3），分别有 5%、0% 和 23% 的城市达到 $25\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 标准。相较 2024 年的浓度水平，3 个区域年均浓度分别下降 23%、19% 和 15%。

- 对于京津冀及周边地区， $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度在 2030 年达到 $34\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下， SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 需要分别相对 2024 年减排 14.7、115.8、40.0 和 115.1 万吨（表 5-1）。各项措施中，针对民用部门的散煤替代和燃烧技术升级是实现 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 减排的关键措施；对于 NO_x 和 VOCs，针对汽油车、柴油车和非道路移动源的末端治理和结构调整措施是减排的关键。

- 对于汾渭平原，在这一达标路径下， SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 需要分别相对 2024 年减排 16.8、31.6、12.1 和 26.5 万吨。与京津冀及周边地区类似，针对民用部门和交通部门的措施是减排的关键。

- 对于长三角地区，2030 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到 $30\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，四种污染物需分别减排 17.7、45.3、14.4、45.6 万吨。对于 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs，针对民用部门和交通部门的措施仍是减排的关键。与前两个地区不同的是，对于 SO_2 ，针对电力和工业力部门的措施，特别是针对

钢铁的结构转型和超低排放改造措施，以及针对电力部门的电力结构清洁化措施是重要举措。

在同样的标准限值条件下，对 2030 年重点区域的年均浓度限值提出更高的要求，并要求长三角地区先于其他重点区域实现 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 目标（情景 2），全国 339 城市年均浓度可达到 23.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，城市达标率可增加 6%。2024~2030 年，累计避免 43 万人过早死亡，获得健康效益 1.5 万亿元。全国尺度上，与上一个情景的达标路径相比各类污染物需要额外减排 4%~7%。需要加大针对电力、钢铁和水泥等行业的末端治理、能源结构调整和能效提升相关措施的实施力度，以确保电力、工业和交通部门的持续减排。在此达标

路径下，2030 年碳排放可下降至 98.2 亿吨，削减 CO_2 排放量 13.9 亿吨，相较于 2024 排放下降 12%，电力、工业、民用和交通部门减排分别贡献 36%、48%、8% 和 8% 的 CO_2 减排量（图 5-2）。2024~2030 年间全国可获得额外累计碳减排经济效益 0.9 万亿元。

为实现京津冀及周边地区和汾渭平原 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 及以下，长三角地区优先于前两个地区达标，需进一步全面强化重点区域电力、工业、民用和交通部门末端治理、能源结构调整和能效提升相关措施的实施力度。在此达标路径下，

- 京津冀及周边地区 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 分别需要额外减排 6.9、35.0、8.4 和 19.8 万吨，

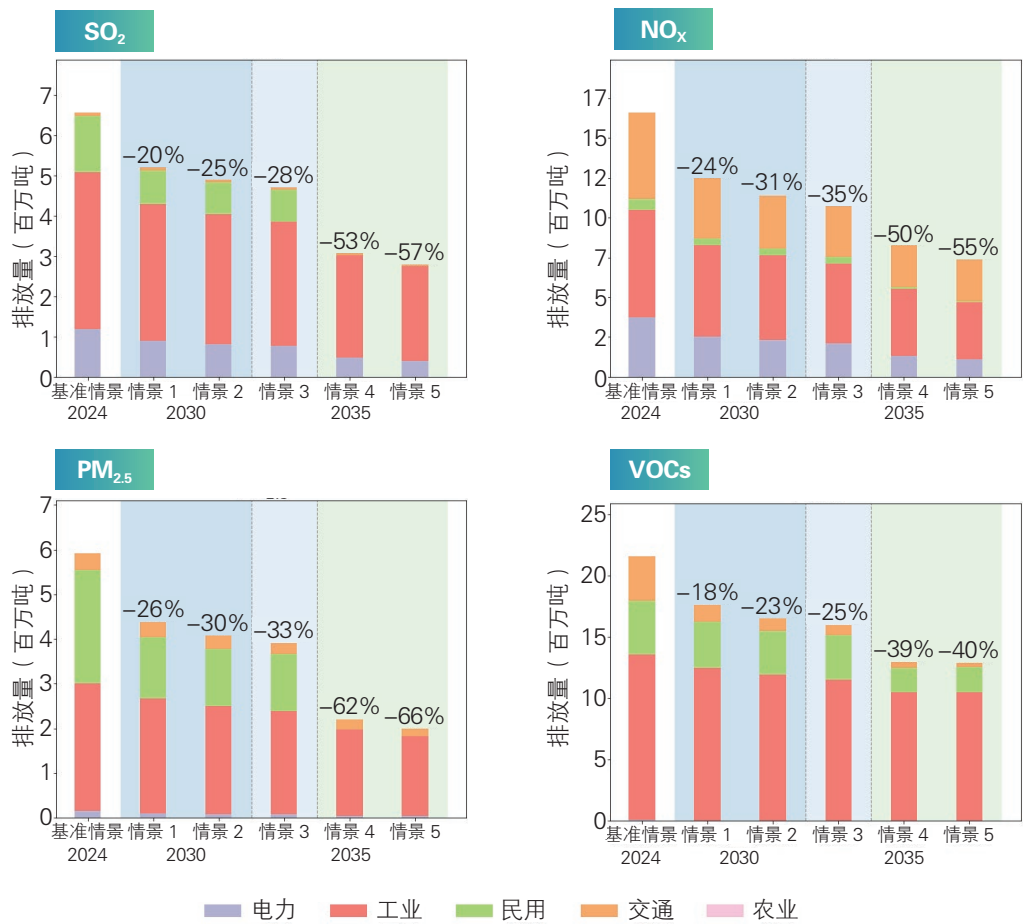


图 5-1 各情景下全国主要污染物排放量预测及部门构成

注：图中百分比表示相对于 2024 年基准的总削减率

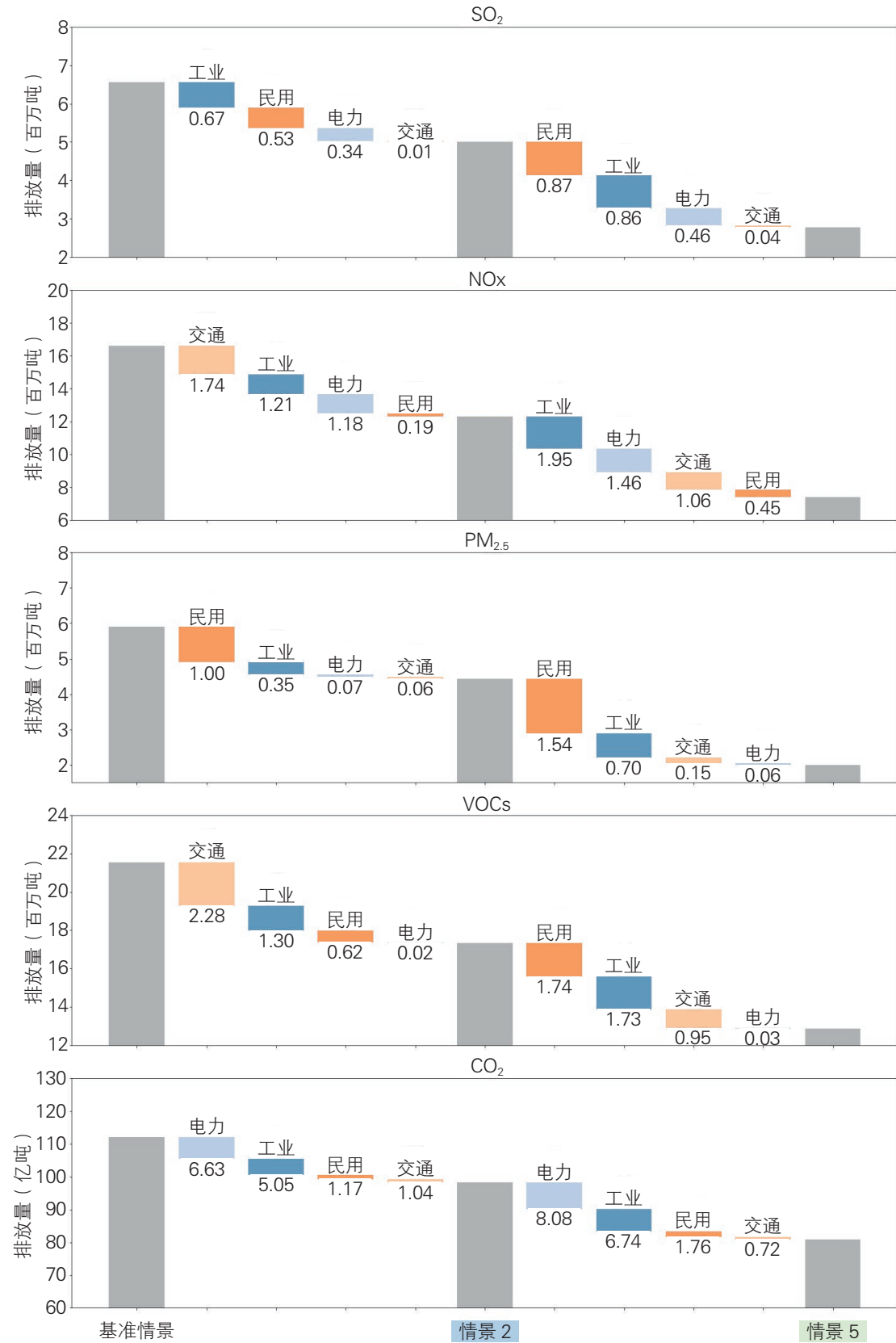
- 区域 PM_{2.5} 年均浓度可达到 30.0 μg/m³。
- 汾渭平原分别需要额外减排 9.0、23.4、8.2 和 19.2 万吨，区域 PM_{2.5} 年均浓度可达到 28.6 μg/m³。
 - 长三角地区各污染物分别额外减排 14.4、51.0、11.9 和 63.3 万吨，区域 PM_{2.5} 年均浓度达到 24.8 μg/m³。在协同减排方面，长三角地区到 2030 年 CO₂ 排放可下降至 15.2 亿吨，相对 2024 年减排 19%。

对于重点区域而言，民用部门可继续发挥减

排效力的空间有限。对于 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 额外的减排量，主要依靠加大钢铁、水泥和工业锅炉等行业的实施力度。但主要的贡献部门不同，如对于 SO₂ 减排，钢铁行业相关措施是京津冀及周边和长三角地区的关键措施，而汾渭平原则主要依靠电力行业的减排。此外，对于 VOCs，相较于汾渭平原，京津冀及周边和长三角地区减排需求较大，而这一部分的减排量主要依靠针对溶剂使用源的相关措施。

表 5-1 不同情景达标路径下重点区域排放量（万吨）

情景	部门	京津冀及周边地区				汾渭平原				长三角			
		SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	VOC	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	VOC	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	VOC
情景 1	电力	9.3	35.7	2.0	0.8	6.9	17.7	1.0	0.5	8.6	41.8	1.2	0.9
	工业	79.2	132.3	61.0	242.6	21.7	39.4	28.9	65.1	48.5	88.8	37.4	347.6
	民用	1.4	5.0	4.8	62.0	1.5	0.9	1.9	6.6	0.6	3.9	4.3	61.6
	交通	2.3	101.5	11.0	35.0	0.5	23.4	2.3	7.9	1.8	88.6	6.0	31.1
情景 2	电力	6.5	31.3	1.2	0.7	5.0	12.8	0.7	0.4	6.0	28.4	0.7	0.6
	工业	76.7	121.3	58.9	242.6	16.2	29.2	23.4	52.3	37.3	71.2	30.7	305.0
	民用	0.0	2.7	0.0	56.7	0.0	0.2	0.0	3.9	0.1	2.6	0.6	54.2
	交通	2.1	84.4	10.3	20.7	0.4	15.7	1.8	4.2	1.7	69.9	5.1	18.0
情景 3	电力	4.7	27.4	0.9	0.5	3.5	8.8	0.5	0.2	5.7	25.5	0.6	0.6
	工业	66.7	105.6	53.1	234.0	15.2	24.4	19.9	46.3	34.9	67.5	29.3	290.8
	民用	0.0	1.8	0.0	55.2	0.1	0.1	0.2	2.9	0.0	2.4	0.0	51.7
	交通	1.2	80.2	7.6	16.2	0.3	15.7	1.2	2.5	1.6	65.9	4.9	15.2
情景 4	电力	4.7	20.6	0.9	0.5	3.4	8.6	0.5	0.2	4.2	19.1	0.4	0.4
	工业	60.8	102.6	47.9	231.1	14.9	23.9	19.6	45.6	29.6	59.2	26.1	258.9
	民用	0.0	1.8	0.0	39.5	0.0	0.1	0.0	2.7	0.0	2.4	0.0	52.4
	交通	1.7	71.2	7.5	12.2	0.2	15.4	1.1	2.3	1.5	57.1	4.3	9.0
情景 5	电力	3.9	17.6	0.8	0.4	3.1	7.8	0.4	0.2	3.0	14.2	0.3	0.3
	工业	57.4	92.2	45.7	230.1	14.2	22.8	18.9	43.9	25.4	47.2	22.6	255.4
	民用	0.0	1.1	0.0	39.1	0.0	0.0	0.0	2.2	0.0	2.0	0.0	57.9
	交通	1.2	70.9	5.4	9.1	0.2	14.5	1.1	1.8	0.9	55.1	2.7	5.5

图 5-2 各情景下全国主要污染物和 CO_2 分部门排放削减量

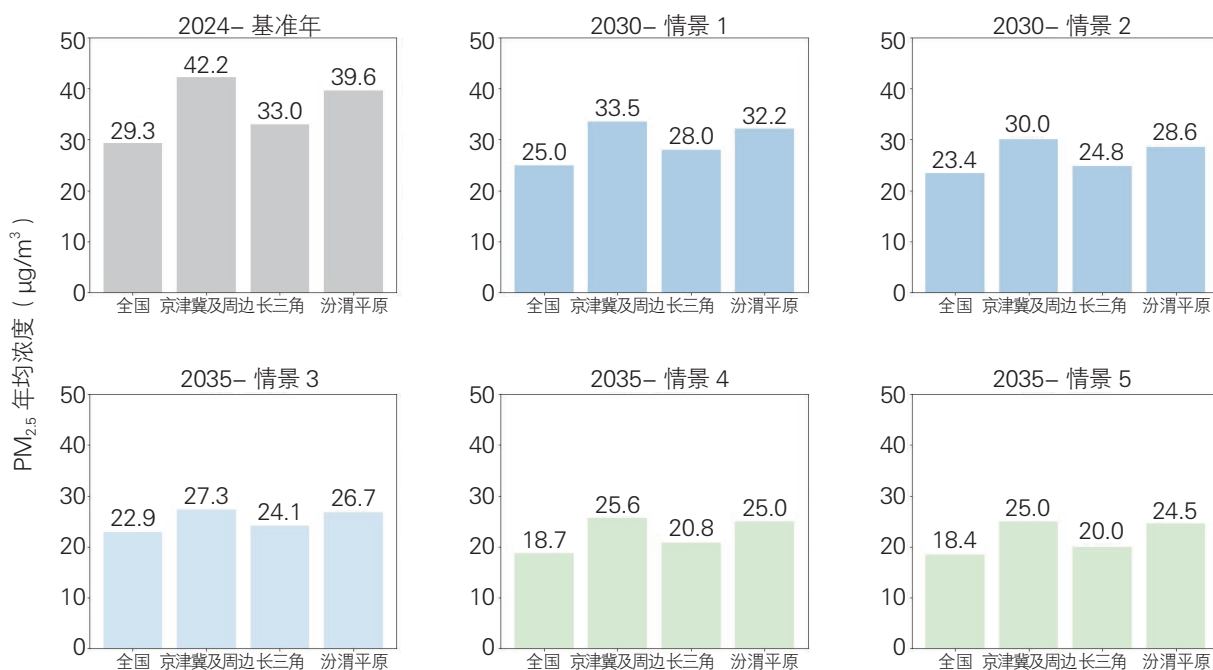


图 5-3 各情景下全国及重点区域年均 PM_{2.5} 浓度预测比较

根据 2030 年最大减排潜力的测算结果，情景 2 中重点区域的达标路径中的减排比例已接近 2030 年最大减排力度，而京津冀及周边和汾渭平原 PM_{2.5} 年均浓度距离实现 25 µg/m³ 限值还有一定差距。遵循治理行动“稳中求进”的原则，在全国和长三角地区实现 25 µg/m³ 目标的同时，考虑加严京津冀及周边和汾渭平原区域在 2035 年的浓度限值至 28 µg/m³，以接近“美丽中国”目标要求的 25 µg/m³（情景 3）。在此情景下，全国 339 城市年均浓度可达到 22.9 µg/m³。2024~2035 年，可累计避免 45 万人过早死亡，获得健康效益 1.6 万亿元。

全国尺度上，在情景 2 的基础上，实现情景 3 需要各类污染物在 2030~2035 年间继续减排 2%~4%。区域尺度上，长三角地区继续减排 4%。为了达到严格的标准限值，京津冀及周边地区 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 和 VOCs 分别需要额外减排 12%、6%、7% 和 3%。汾渭平原各污染物分别需要额外减排 5%、8%、9% 和 8%。2030 年后，持续加严末端治理的减排潜力大幅收窄，针对电

力、钢铁、水泥行业的结构调整和能效提升措施成为推动额外减排的关键。在此达标路径下，随着电力结构清洁化、钢铁行业结构转型和建材行业能源替代等具有协同减排效益的措施实施力度加大，到 2035 年全国碳排放量相对于 2024 年削减 17.8 亿吨，2024~2035 年全国累计碳减排效益达到 1.9 万亿元。

虽然在情景 3 的达标路径下，京津冀及周边地区城市在 2035 年达到 25 µg/m³ 标准限值的比例相比于 2030 年（情景 2）增加了 1.5 倍，汾渭平原增加了 3 倍，但这些区域达标率仍较低（23% 和 28%）。此外，全国 339 城市达标率达到 56%，长三角地区达标率达到 59%。相比于情景 2 达标路径可避免的过早死亡人数，情景 3 达标路径仅额外避免了 1 万人。因此，考虑在 2035 年，要求全国 339 城市达到更严格的标准限值 20 µg/m³（情景 4）。

全国尺度上，SO₂、NO_x、PM_{2.5} 和 VOCs 相对 2024 年分别需要减排 53%、50%、62% 和 39%。区域尺度上，重点地区各污染物相对 2024

年下降 37%~60%、49%~57%、51%~54% 和 34%~52%。全国 339 城市整体 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度可达到 $18.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，可在 2024~2035 年间累计避免 194 万人过早死亡，获得累计健康效益 7 万亿元，2035 年碳减排量相较于情景 3 增加 11 亿吨，累计碳减排效益 3.1 万亿元。京津冀及周边地区、汾渭平原和长三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度分别达到 25.6、25.0 和 $20.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。3 个重点区域城市年均浓度达到 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下的占比分别达到 37%、46% 和 98%。

在情景 4 基础上，要求长三角地区 2035 年先于其他重点地区达标，京津冀及周边地区和汾渭平原基本实现“美丽中国”目标（情景 5）。

在此情景下，全国 339 城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度可达到 $18.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，有 56% 的城市可以达标，有 84% 的城市达到 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。京津冀及周边地区、长三角地区和汾渭平原 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到 25.0、20.0 和 $24.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，分别有 47%、100% 和 46% 的城市可以达到 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。2024~2035 年间，全国可累计避免 225 万人过早死亡，获得健康效益 8.2 万亿元。相比于在 2030 年实现全国和长三角优先实现 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的减排路径（情景 2），该达标路径不仅要求重点区域各部门污染物减排力度接近 2035 年可实现的最大减排潜力，还强化了全国其他区域的措施实施力度。

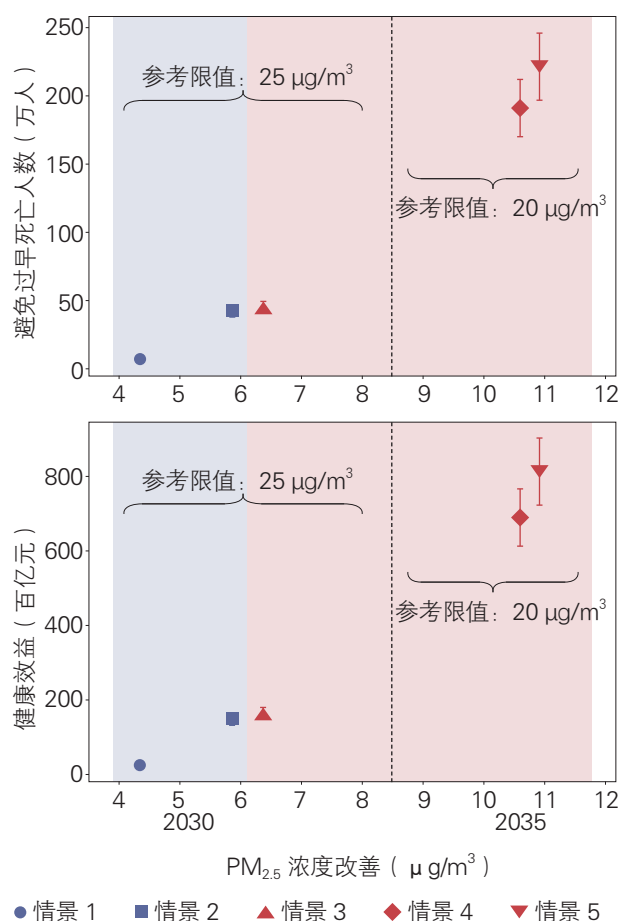


图 5-4 各情景下累计健康效益与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善幅度的关系

注：上图显示了在不同情景下，截至目标年份（2030 或 2035 年）全国累计可避免的过早死亡人数；下图显示了对应的累计货币化健康效益。X 轴表示各情景实现的全国年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对于 2024 年基准的改善幅度

该情景达标路径下，民用散煤替代、电力与供热结构清洁化、钢铁行业结构转型、汽油车/柴油车电气化和非道路机械电气化等结构调整措施发挥重要作用。

- 电力/供热部门中，2035年全国和重点区域非化石能源发电占比从2030年（情景2）的44%~50%上升到59.5%；非化石能源供热占比从23%~30%提升至40%；供热设施平均热效率从89%~94%增加至95%。

- 工业部门中，钢铁生产中电炉钢比例从24%~30%提升至40%；吨钢可比能耗从2030年的546.0~525.0 kgce/t下降至489.0 kgce/t；水泥、玻璃等建材行业终端电力占比从23%~27%上升至33%，水泥单位产量能耗下降至103.0 kgce/t；其他工业终端电力占比从45%~50%增至59%；钢铁、水泥等工业行业超低排放改造产能达到100%。

- 民用部门中，到2035年基本清零民用散煤存量。

- 交通部门中，柴油车和汽油车新能源车保有量占比从2030年的6%和22%分别增加至12%和47%；农业机械和工程机械电气化率从17%和31%分别提升至42%和25%；机动车百公里油耗从2030年下降8%~10%水平升级至下降

18%~22.5%水平；“国6”及以上标准车辆占比从2030年的46%~67%上升至70%~97%。

- 溶剂使用源中，水性溶剂使用比例从2030年的上升30%水平提升至上升60%水平，VOC综合去除率全国从35%提升至60%，重点区域达到65%。

全国SO₂、NO_x、PM_{2.5}和VOCs分别相对2024年排放下降57%、55%、66%和40%。3个重点区域SO₂、NO_x、PM_{2.5}和VOCs分别相对2024年排放下降41%~62%、53%~60%、55%~59%和34%~54%。从部门尺度看，2035年全国电力部门SO₂、NO_x、PM_{2.5}和VOCs分别减排80.1、263.9、12.4和5.1万吨；工业部门各污染物分别减排152.9、315.6、104.9和302.2万吨；民用部门分别减排139.8、63.7、253.7和236.7万吨；交通部门分别减排5.1、279.8、20.9和322.6万吨（图5-2）。在此达标路径下，2035年全国CO₂相对于2024年减排31.1亿吨，相较2024年下降28%，2024~2035年获得累计碳减排效益3.4万亿元。各部门中，电力和工业CO₂减排发挥重要的作用，分别贡献了总减排量的47%和38%；民用和交通分别贡献了9%和6%。



六、结论与政策建议

本研究结果表明,修订《环境空气质量标准》,加严 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度限值,并以“分阶段、分区域”方式设置 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度目标,是推动我国空气质量持续改善的必由之路。我国现行 $35\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的二级限值在国际上总体处于较为初级的水平,与 WHO 指导值及发达国家现行/拟议标准仍有显著差距。排放结构方面,重点部门与燃煤过程对排放量的贡献依然突出,能源燃烧过程对 SO_2 、 NO_x 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献长期超过三分之二,已成为制约排放进一步下降与质量继续改善的关键瓶颈。基于我国当前的空气质量与排放水平,并综合考虑健康效益与政策引领作用,建议将 $25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 作为新的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度标准限值,明确时间表与路线图:到 2030 年全国 339 个城市和长三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值率先低于标准限值,到 2035 年京津冀及周边地区和汾渭平原浓度平均值低于标

准限值,形成“先进地区先行、重点区域攻坚、全国梯次推进”的总体格局。

围绕上述目标,我国 2030 年前应充分发挥各部门结构调整和能效提升减排潜力,与末端治理协同发力。以 2024 年为基准,2030 年全国 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 排放分别下降 25%、31%、30% 和 23%,可使全国 339 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度降至 $23.4\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,累计避免约 43 万人过早死亡,对应多年累计健康效益约 1.5 万亿元,协同削减 CO_2 排放量 13.9 亿吨,降幅达 12%,累计碳减排效益 0.9 万亿元;长三角地区为实现率先达标,在此阶段需要实现 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 较 2024 年分别减排 32.1、96.3、26.0 和 108.9 万吨,使区域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达到 $24.8\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,协同削减 CO_2 排放量 3.5 亿吨,降幅达 19%。



随后，在 2030~2035 年间进一步加大电力、工业与交通等部门的结构调整 and 能效提升力度，充分挖掘结构性措施的减排潜力，到 2035 年全国 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 排放相较 2024 年分别下降 57%、55%、66% 和 40%；此时全国年均浓度可降至 $18.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2024~2035 年累计避免约 225 万人过早死亡，健康效益约 8.2 万亿元，协同削减 CO_2 排放量 31.2 亿吨，相较 2024 年下降 28%，累计碳减排效益 3.4 万亿元。

重点区域方面，京津冀及周边与汾渭平原在 2035 年分别实现 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 较 2024 年下降 41%~62%、53%~60%、55%~59% 和 34%~54%，对应年均浓度达到 25.0 与 $24.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，整体实现阶段性目标。两区域 CO_2 排放分别实现协同削减 6.2 亿吨和 2.9 亿吨，相对于 2024 年分别下降 26% 和 30%。

为确保上述路径落地见效，需聚焦能源、产业与交通三大领域的系统减排与协同治理。

- 一是加快能源结构优化，用清洁可再生能源满足新增需求，提升可再生能源开发与消纳能力，扩大电力、工业用煤的天然气与可再生能源

替代规模，完善可再生能源与天然气的产—储—供—销体系；严格控制煤炭、石油等高碳化石能源消费总量，优先削减中小型燃煤/燃油锅炉、工业窑炉、民用散煤与传统生物质燃料。

- 二是优化供热与终端用能体系，提升终端用能电气化水平，重点地区不再新增煤炭产能和燃煤机组装机，提速供热管网建设，加快淘汰管网覆盖区内分散燃煤设施，推进以清洁电力、工厂余热和可再生低碳能源替代工业窑炉与分散供热。

- 三是推动产业结构升级与布局优化，大力发展电弧炉短流程炼钢，推进钢铁、水泥等重点行业节能降耗与超低排放巩固提升，系统整合并有序退出烧结、砖瓦、玻璃等行业落后产能。

- 四是以交通结构优化和清洁化终端为抓手，提高新能源汽车保有量占比与在用车排放控制水平，提升铁路在货运中的比重，推动高排放柴油火车淘汰及电动重卡推广，推进非道路移动机械的电动化与清洁燃料替代。

通过以上组合拳，既能对接新标准的达标需求，又可实现健康效益最大化与经济社会高质量发展的协同增益。



参考文献

- 生态环境部 . (2025). 2024 中国生态环境状况公报 . <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202506/P020250604527010717462.pdf>
- Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C. A., Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di, Q., Brunekreef, B., Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., ... Spadaro, J. V. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(38), 9592–9597. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>
- Cheng, J., Tong, D., Liu, Y., Geng, G., Davis, S. J., He, K., & Zhang, Q. (2023). A synergistic approach to air pollution control and carbon neutrality in China can avoid millions of premature deaths annually by 2060. *One Earth*, 6(8), 978–989. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.07.007>
- Cheng, J., Tong, D., Zhang, Q., Liu, Y., Lei, Y., Yan, G., Yan, L., Yu, S., Cui, R. Y., Clarke, L., Geng, G., Zheng, B., Zhang, X., Davis, S. J., & He, K. (2021). Pathways of China's PM_{2.5} air quality 2015–2060 in the context of carbon neutrality. *National Science Review*, 8(12), nwab078. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab078>
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., ... Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907–1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- Geng, G., Liu, Y., Liu, Y., Liu, S., Cheng, J., Yan, L., Wu, N., Hu, H., Tong, D., Zheng, B., Yin, Z., He, K., & Zhang, Q. (2024). Efficacy of China's clean air actions to tackle PM_{2.5} pollution between 2013 and 2020. *Nature Geoscience*, 17(10), 987–994. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01540-z>
- Qi, S., Cheng, S., Tan, X., Feng, S., & Zhou, Q. (2022). Predicting China's carbon price based on a multi-scale integrated model. *Applied Energy*, 324, 119784. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119784>

WMO. (2021). 9789240034228–eng. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228–eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Xie, Y., Dai, H., Xu, X., Fujimori, S., Hasegawa, T., Yi, K., Masui, T., & Kurata, G. (2018). Co–benefits of climate mitigation on air quality and human health in Asian countries. *Environment International*, 119, 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.008>

Xue, T., Geng, G., Meng, X., Xiao, Q., Zheng, Y., Gong, J., Liu, J., Wan, W., Zhang, Q., Kan, H., Zhang, S., & Zhu, T. (2022). New WHO global air quality guidelines help prevent premature deaths in China. *National Science Review*, 9(4), nwac055. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwac055>

