中国中长期空气质量改善路径及健康效益

清華大學
Tsinghua University

ENERGY FOUNDATION
能源基金会

摘要

我国当前空气质量距美丽中国愿景和欧美发达国家水平仍存在较大差距。本研究设计了中国 2030 年和 2050 年的清洁空气总体目标；结合能源转型和末端控制措施构建了中国未来排放情景；评估了不同情景的环境与健康效益。研究表明，在 NDC 承诺和蓝天保卫战政策的强化作用下，中国基本可以在 2030 年可达到 35 μg/m^3 的国家环境空气质量标准，但难以实现未来中长期（2030-2050 年）的根本性改善。与 2 度全球温升目标相适应的能源转型对中国在 2050 年实现 15 μg/m^3 的环境目标起到关键性作用；1.5 度下的能源转型则有助于将全国平均暴露水平进一步降低至 10 μg/m^3 以下。相较于现有政策情景，同时开展深度能源转型（2 度和 1.5 度）和最佳可行末端治理，可分别在 2030、2050 年避免 24 – 37 和 136 – 164 万人的过早死亡，有效缓解未来人口变化导致的健康负担。

作者团队

清华大学

贺克斌，张强，同丹，程静，刘洋

支持机构

能源基金会

2020 年 4 月

目录

1. 背景介绍 1
1.1. 我国大气污染防治历程 1
1.2. 当前我国大气污染形势 1
1.3. 我国建设美丽中国愿景 4
2. 我国中长期清洁空气总体目标设计 5
2.1. 我国空气质量标准演变历程 5
2.2. 我国中长期清洁空气总体目标设计 6
3. 我国中长期减排路径探究 8
3.1. 研究方法学框架 8
3.2. 实现清洁空气目标的减排路径设计 9
4. 我国中长期能源、排放和空气质量演变 11
4.1. 不同气候目标下的能源系统演变 11
4.2. 不同情景下的碳排放变化 13
4.3. 不同情景下的污染物排放变化 15
4.4. 不同情景下全国及重点区域的空气质量演变 18
5. 气候政策对实现清洁空气目标的关键作用 22
5.1. 气候与环境政策对污染物减排的贡献 22
5.2. 气候与环境政策对空气质量改善的贡献 23
6. 我国中长期空气质量改善的健康效益 25
7. 主要结论 29
参考文献 30

1. 背景介绍

1.1. 我国大气污染防治历程

我国大气污染防治进程始于 20 世纪 70 年代，在经历了 1970-1990 年间对工业点源的悬浮颗粒物控制，1990-2000 年间对燃煤和工业源的二氧化硫（SO_2）和悬浮颗粒物的控制，于 2000 年进入对多污染源导致的区域复合型污染的控制阶段。2000-2018 年我国加快了大气污染防治进程。

附表 1 总结了自 2000 年以来中国政府提出的主要大气污染防治措施。2001-2005 年间，我国大气污染防治工作的综合目标是将全国 SO_2 排放量削减 10%，并将“两控区”SO_2 排放量降低 20％以控制全国的酸雨和 SO_2 污染。在《“十一五”规划》中我国将 SO_2 排放量纳入国家约束性总量控制目标，要求以火电厂建设脱硫设施为重点，确保 2010 年全国 SO_2 排放量较 2005 年下降 10%。“十二五”期间，我国进一步将 NO_x 排放纳入国家约束性总量控制目标，要求 2015 年全国的 NO_x 和 SO_2 排放量分别较 2010 年降低 10%和 8%。

2013 年，国务院颁布了《大气污染防治行动计划》（简称“大气十条”），以颗粒物浓度为约束对各地区的大气污染防治工作提出了具体要求，这是我国大气污染防治的重大举措，是第一次以环境质量为目标约束的战略行动。2018 年，继“大气十条”之后，生态环境部发布实施《打赢蓝天保卫战三年行动计划》，制订了未来三年内，我国在大气污染防治方面的任务、目标及计划，以期大幅减少大气污染物的排放，明显改善环境空气质量，增强人民的蓝天幸福感。

1.2. 当前我国大气污染形势

近年来我国大气细颗粒物（$PM_{2.5}$）污染显著改善。2018 年全国 $PM_{2.5}$ 年均浓度为 39 μg/m^3，相较 2013 年降低了 45.8%。从重点区域的变化来看，表 1 展示了 2013-2018 年全国及京津冀、汾渭平原、长三角和珠三角等重点区域 $PM_{2.5}$ 年均浓度及降幅。京津冀、长三角、珠三角作为“大气十条”中的重点区域，2013-2017 年 $PM_{2.5}$ 污染显著改善，且京津冀的改善幅度最大，其 $PM_{2.5}$ 年均降幅达到 11.9%。2017 年，汾渭平原成为全国 $PM_{2.5}$ 污染最严重的区域，$PM_{2.5}$ 年均浓度达 67 μg/m^3，京津冀、长三角和珠三角地区的 $PM_{2.5}$ 年均

浓度分别为 64、44 和 34 μg/m^3，珠三角地区的 $PM_{2.5}$ 年均浓度已达到全国空气质量二级标准。2017-2018 年，作为“蓝天保卫战”的重点区域，京津冀和汾渭平原的 $PM_{2.5}$ 污染得到明显改善，相较 2017 年的 $PM_{2.5}$ 年均浓度分别降低了 14.1%和 10.8%，远高于全国的平均降幅，但浓度值仍高达 55 和 58 μg/m^3，距离国家二级空气质量标准（35 μg/m^3）和 WHO 第三阶段过渡限值[1]（15 μg/m^3）仍存在较大差距。

表 1　全国及重点区域 2013-2018 年年均 $PM_{2.5}$ 浓度变化

区域		2013（74 城市统计）	2017（74 城市统计）	2013-2017 年均降幅	2017（338 城市统计）	2018（338 城市统计）	2017-2018 年降幅
全国		72	48	9.6%	43	39	9.3%
京津冀	北京	90	58	10.4%	58	51	12.1%
	天津	94	62	9.9%	62	52	16.1%
	河北	108	68	10.9%	65	55	15.4%
	全区域（13 市）	106	64	11.9%	64	55	14.1%
长三角	上海	59	39	9.8%	39	36	7.7%
	江苏	70	49	8.5%	50	46	8.0%
	安徽	82	58	8.3%	56	49	12.5%
	全区域（25 市）	67	44	10.0%	48	44	10.2%
珠三角	广东	49	36	7.4%	33	31	6.1%
	全区域（9 市）	47	34	7.8%	31	29	6.5%
汾渭平原	陕西	90	54	12.0%	55	48	12.7%
	山西	79	59	7.0%	63	55	12.7%
	河南	105	62	12.3%	66	61	7.6%
	全区域（12 市）	93	67	7.9%	64	58	10.8%

图 1 展示了 2013-2018 年全国各省市年均 $PM_{2.5}$ 浓度变化情况。从省级尺度看，各省在 2013-2018 年间的 $PM_{2.5}$ 浓度均呈现出总体下降趋势。北京、天津、河北、内蒙古、浙江、湖北和湖南等省市 $PM_{2.5}$ 浓度在六年间的降幅在 40%以上；吉林、黑龙江、四川和青海等省份的 $PM_{2.5}$ 浓度降幅则达到 50%以上。至 2018 年，内蒙古、吉林、黑龙江、浙江、福建、广东、海南、贵州、云南、西藏和青海等地区的 $PM_{2.5}$ 年均浓度已达到国家二级空气质量标准。

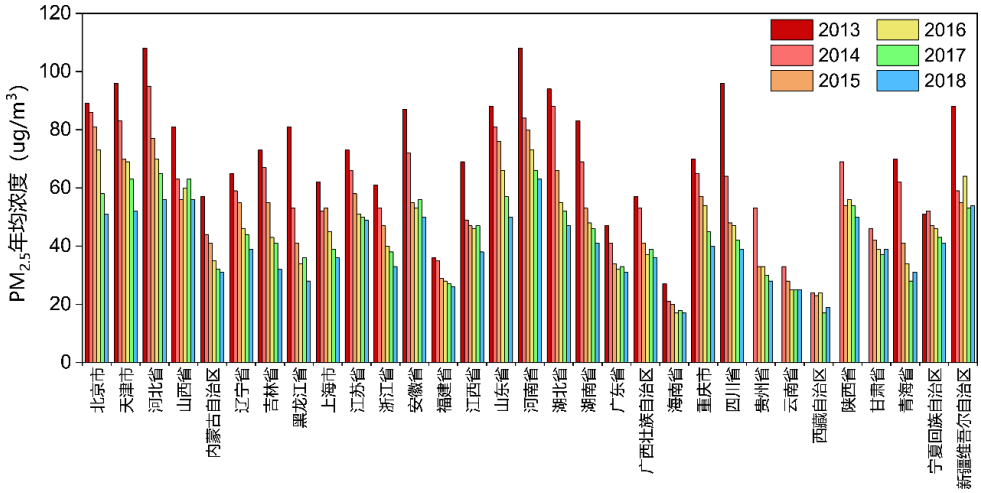

图 1　2013-2018 年全国各省市 $PM_{2.5}$ 年均浓度

不同于 $PM_{2.5}$ 污染的显著改善，近年来全国臭氧（O_3）污染日益凸显。2013-2018 年各省市 O_3 最大 8 小时平均浓度如图 2 所示。2013 年，全国 74 个重点城市 O_3 日最大 8 小时平均浓度第 90 百分位数为 72-190 μg/m^3，平均为 139 μg/m^3，日均值超标天数比例为 5.9%。2017 年，全国 74 个重点城市 O_3 日最大 8 小时平均浓度第 90 百分位数上升至 117-218 μg/m^3 之间，平均为 167 μg/m^3，较 2013 年上升 20.1%。继 2017 年后，2018 年全国 338 个城市大气 O_3 浓度持续走高。全国 338 个城市的臭氧轻度污染天次比例达到 7.2%。考虑到全球大气 O_3 背景浓度在持续升高，加之颗粒物污染的持续改善，未来臭氧污染可能会进一步加剧，并成为影响大气环境、公众健康、气候变化的重要因素，应给予高度关注，并加强臭氧和颗粒物污染的协同控制，制订 NO_x 和 VOCs 等多污染物非线性协同控制策略。

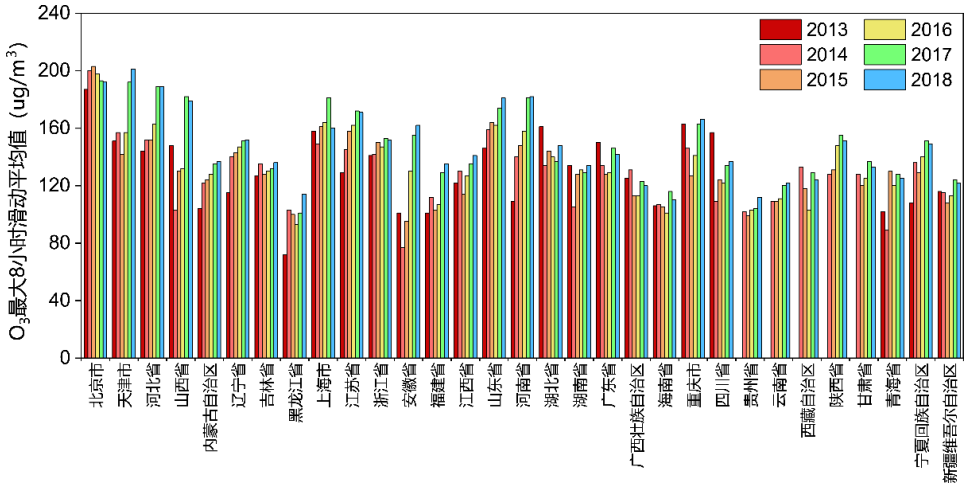

图 2　2013-2018 年全国各省市 O_3 最大 8 小时平浓度

1.3. 我国建设美丽中国愿景

2012 年，中国共产党第十八次全国代表大会提出，要把建设生态文明作为党的政治思想中心，提出建设“美丽中国”的愿景。到 2035 年，生态环境质量实现根本好转，美丽中国目标基本实现。到本世纪中叶，物质文明、政治文明、精神文明、社会文明、生态文明全面提升，绿色发展方式和生活方式全面形成，人与自然和谐共生，生态环境领域国家治理体系和治理能力现代化全面实现，建成美丽中国。当前“美丽中国”的愿景已全面融入到经济、政治、文化和社会建设的方方面面，已经纳入到国家“十三五”发展规划当中，要在实现其他社会经济发展目标的同时更好地实践生态环境保护。建设美丽中国，描绘了社会主义生态文明新时代的美好蓝图，也将满足人民群众对于美好环境的愿望，特别是对于改善空气质量的诉求。

我国的大气污染治理虽取得了阶段性进展，但结构性污染问题仍然突出。一方面，我国当前 $PM_{2.5}$ 浓度与发达国家及 WHO 的建议值存在明显差距。另一方面，我国是目前世界上最大的 CO_2 排放国，2016 年 CO_2 排放量达到 92 亿吨，占到了全球总排放量的四分之一以上。《中国气候变化蓝皮书（2019）》[2] 指出，1901 年到 2018 年，中国地表年平均气温呈显著上升趋势，近 20 年是 20 世纪初以来的最暖时期。1951 年到 2018 年，中国年平均气温每 10 年升高 0.24℃，升温率明显高于同期全球平均水平，气候系统变暖趋势进一步持续。为应对气候变化，我国签署了《巴黎协定》，提交了 NDC 自主减排承诺：到 2030 年，单位国内生产总值的碳排放量相比 2005 年下降 65%左右；非化石能源占一次能源消费比重达到 20%左右；二氧化碳排放量在 2030 年左右达到峰值并争取尽早达峰。治理空气污染和应对气候变化的在目标措施等方面具有协同效应，协调相关政策和行动将更好地发挥协同增效的作用。因此，在我国中长期发展规划中，应推进节能、碳强度减排和污染物减排目标紧密结合。

2. 我国中长期清洁空气总体目标设计

2.1. 我国空气质量标准演变历程

图 3 展示了我国空气质量标准的演变历程。我国自 1979 年颁布并实施《中华人民共和国环境保护法（试行）》之后，对大气环境质量保护工作有了明确的要求。随后 1982 年，我国制定并颁布了《大气环境质量标准》（GB 3095-82）[3]，对总悬浮颗粒物、飘尘（参考）、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、光化学氧化剂等 6 种空气污染物的浓度进行了规定。1996 年进行了第一次修订，增加了二氧化氮、铅、苯并芘和氟化物的浓度限值，并且将飘尘改为 $PM_{2.5}$，光化学氧化剂改为臭氧。在 2008 年，环境保护部（现生态环境部）下达修订《环境空气质量标准》（GB 3095-1996）[4] 项目计划。随后 2012 年颁布了《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）[5]，增加了 $PM_{2.5}$ 年均、日均浓度限值和臭氧 8 小时平均浓度限值，收严了 PM_{10} 和 NO_2 浓度限值，同时提高了数据的有效性要求。

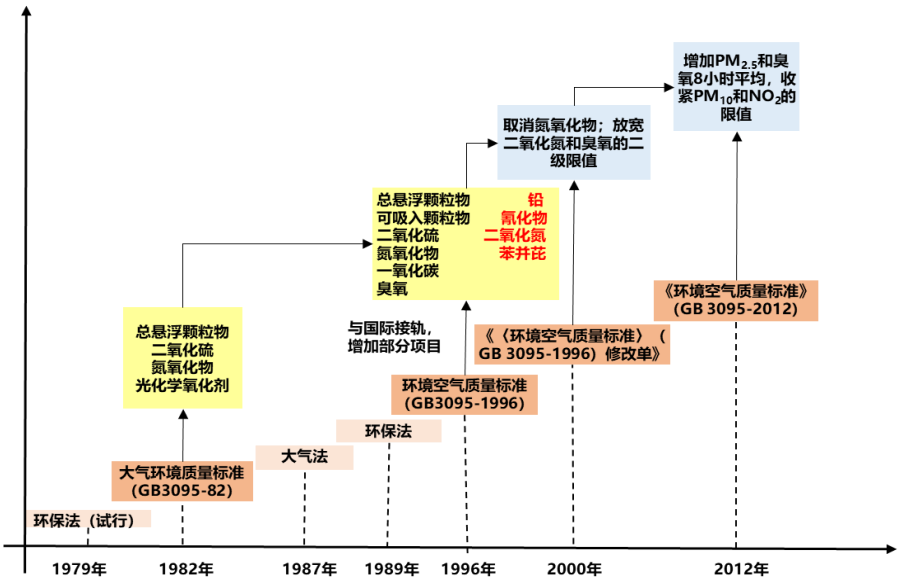

图 3　我国的空气质量标准演变历程

虽经过多次修订，我国现行的环境空气质量标准与 WHO 污染物浓度限值相比仍有一定差异。图 4 展示了我国当前各类污染物的浓度限值和相应的 WHO 建议值，可以看出当前我国大部分污染物浓度限值在一级、二级水平上与 WHO 各阶段目标值并非完全匹配。以 SO_2 为例，我国当前的浓度限值中设置年平均、24 小时平均和 1 小时平均，而在 WHO 的浓度准则中，出于健康最大化的考虑，最新的标准分为 1 小时平均值和 10

分钟平均值。此外，我国当前的空气质量标准浓度限值较为宽松，如我国 $PM_{2.5}$ 年均浓度为 35μg/m³，相比美国 15μg/m³，欧盟 25μg/m³ 和 WHO 推荐值 10μg/m³ 还存在较大差距。总结欧美的污染防治历程可以发现，曾饱受空气污染困扰的国家通过积极立法、加严标准、科学管控，基本实现了空气质量的根本性改善。未来我国也需要通过逐步推行更严格的空气质量标准实现清洁空气的目标。

	《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）			世界卫生组织《空气质量准则》				
	类型	一级	二级	类型	第一阶段	第二阶段	第三阶段	建议值
SO_2	年平均	20	60	1小时平均	125	50		20
	24小时平均	50	150	10分钟平均				500
	1小时平均	150	500					
NO_X	年平均	40	40	年平均	40	40	40	40
	24小时平均	80	80	24小时平均	200	200	200	200
	1小时平均	200	200					
O_3	日最大8小时平均	100	160	日最大8小时平均	160	160	160	100
	1小时平均	160	200					
PM_{10}	年平均	40	70	年平均	70	50	30	20
	24小时平均	50	150	24小时平均	150	100	75	50
$PM_{2.5}$	年平均	15	35	年平均	35	25	15	10
	24小时平均	35	75	24小时平均	75	50	37.5	25

图 4　我国与 WHO 的环境空气质量浓度限值对比

2.2. 我国中长期清洁空气总体目标设计

通过对比我国空气质量标准与发达国家及 WHO 的差距，本研究制定了中国中长期清洁空气总体目标，如图 5 所示。中国中长期空气质量目标分为两个阶段，第一阶段在 2030 年左右全国所有地区基本实现 35ug/m³ 的国家标准，到 2035 年生态环境质量实现根本好转，美丽中国目标基本实现。在第二阶段本世纪中叶时，生态文明建设全面提升，对空气质量的要求进一步提高，全国所有地区基本实现 15ug/m³ 的 WHO 第三阶段过渡时期目标（IT-3），尽可能地保护居民健康。

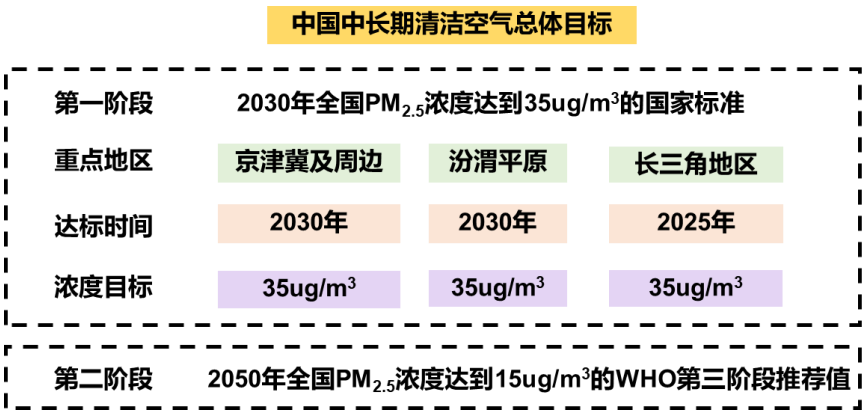

图 5 中国中长期清洁空气总体目标设计

从重点区域角度看，2018 年京津冀及周边、长三角和汾渭平原地区的 $PM_{2.5}$ 年平均值分别为 60ug/m^3、44ug/m^3 和 58ug/m^3，均高于国家空气质量标准。《打赢蓝天保卫战三年行动计划》将京津冀及周边、汾渭平原和长三角地区设立为三个重点区域，本研究中同样将上述三个污染相对严重的地区设置为重点区域。对于长三角地区，由于当前 44ug/m^3 的 $PM_{2.5}$ 年均浓度与 35ug/m^3 的国家标准相距不远，同时近年来保持了相对稳定的减排幅度，因此，将长三角地区第一阶段目标设定为在 2025 年达到 35ug/m^3 的国家标准。对于京津冀及周边和汾渭平原地区，2018 年的 $PM_{2.5}$ 平均值尚未达到的国家标准，所以第一阶段标准设定与全国标准一致，在 2030 年左右实现 35ug/m^3 目标值。2050 年时，全国所有地区都应实现 15 ug/m^3（WHO IT-3）的空气质量目标，珠三角、长三角等区域可进一步推进实现 10 ug/m^3（WHO AQG）的目标。

3. 我国中长期减排路径探究

3.1. 研究方法学框架

本研究的方法学框架如图 6 所示，为探究我国中长期能源、排放、空气质量演变和健康影响，本研究耦合了 GCAM-China 综合评估模型 [6]、DPEC 排放预测模型 [7]、WRF-CMAQ 空气质量模型、IER 综合暴露评估模型 [8]。首先，依据不同的空气质量目标（如实现空气质量二级标准；实现 WHO 发布的空气质量指导值）和气候目标（如实现中国自主减排贡献目标；实现与全球升温低于 2 度相适应的气候目标）设立不同的清洁空气情景；在不同的清洁空气情景下设置具体的能源气候政策与污染防治政策。不同的能源气候政策和社会经济发展途径相结合，共同驱动综合评估模型 GCAM-China，生成不同情景下中国未来分省、分部门的能源消费情况。以 MEIC 历史排放清单为基础，排放预测模型 DPEC 在污染防治政策约束和未来能源驱动下，动态演替中国未来大气污染物与温室气体的排放变化，生成不同情景下的中国未来排放，作为人为源排放清单输入到 CMAQ 空气质量模型。多尺度区域空气质量模型 CMAQ 的气象场由 WRF 模型模拟提供，边界场由全球化学模式 GEOS-chem 模拟提供。为合理体现全球未来排放变化对中国空气质量的影响，GEOS-Chem 模型由不同 RCP 情景下的全球未来排放驱动。CMAQ 模型模拟生成中国区域未来的大气污染物浓度变化，一方面结合未来的人口分布情况，分析不同情景下中国未来的 $PM_{2.5}$ 暴露情况，并利用 IER 暴露响应方程计算不同情景下的过早死亡人数，量化能源与污染防治政策带来的健康效益；另一方面基于各城市的观测站点，分析不同情景下中国未来的 $PM_{2.5}$ 和 O_3 达标情况，量化相应的环境效益。此外，通过设置不同的敏感性实验，进一步分析气候能源政策和污染防治政策对实现空气质量目标的相对贡献，为我国中长期空气质量改善战略制定提供支持。

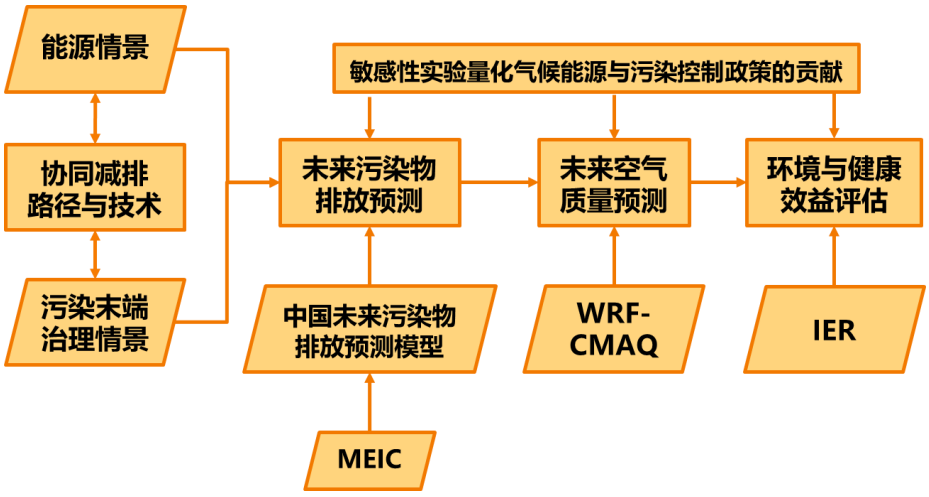

图 6　研究的方法学框架

3.2. 实现清洁空气目标的减排路径设计

以能源结构、产业结构调整为主的源头治理和以除污技术升级、排放管理强化为主的末端治理是实现我国中长期清洁空气战略的两个主要方向。本研究从能源产业结构调整和污染末端控制升级两个方面出发，结合中国已发布的能源与环境政策、国际应对气候变化的气候政策、不同社会经济发展情景、欧美发达国家最先进的污染治理技术，在省级尺度上构建了四组中国的未来大气污染物与温室气体排放情景（政策情景、强化政策情景、2 度情景和 1.5 度情景，如表 2 所示）。

在气候能源政策方面，为更好体现全球气候变化的背景和影响，本研究选取了 IPCC 报告中的几组不同典型浓度路径 RCPs，代表在 2100 年时可以实现不同的 CO_2 排放浓度和辐射强迫目标 [9-11]。RCP1.9 和 RCP2.6 路径下辐射强迫均在 2100 年之前达到峰值，至 2100 年时分别下降至小于 2.6 W/m^2 和 2W/m^2，已有研究表明 RCP1.9 和 RCP2.6 的排放路径可以大概率将 2100 年的全球升温控制在 2℃和 1.5℃以内，也常被应用作 2 度路径和 1.5 度路径 [9]。在其他 RCP 情景中，RCP3.4 与 RCP2.6 较为接近，均为先升后降的变化趋势，且在 2100 年时碳排放下降水平逐步接近 RCP1.9。RCP4.5 和 RCP6.0 是气候政策相对较弱的排放情景，辐射强迫在 2100 年分别稳定在 4.5 W/m^2 和 6.0 W/m^2，2100 年后的 CO_2 当量浓度分别稳定在 860ppm 和 650ppm 左右。

在排放控制政策方面，本研究构建了现有排放控制、强化排放控制、最佳排放控制三种情景。其中，现有排放控制政策全面考虑迄今为止发布的大气污染防治政策、规划，包括电力行业的超低排放、大气十条和蓝天保卫战等。强化排放控制政策以 2035 年建

成美丽中国为目标，在现有政策基础上分地区、分行业进一步推行超低排放治理升级。深度减排情景在确保 2035 年可以实现美丽中国目标基础上，逐步采用欧美发达国家的最佳污染治理技术，以期在 2050 年实现 WHO 第三阶段过渡目标，末端控制措施依据《环保部污染防治最佳可行技术指南》、欧盟的 BREFs 和美国环保局的 Air Control NET 等设定。各情景在电力、工业、民用、交通、溶剂使用等部门的具体措施请见附表 2。

表 2　六组排放情景的描述及能源、末端设置

排放情景	能源/末端设置	情景描述
政策情景	RCP4.5 现有污染物控制	◆ 描述现有气候能源政策与污染防治政策约束下中国未来的排放和空气质量演变； ◆ 能源转型方面以 NDC 目标为依据，2030 年碳排放强度较 2005 年下降 65%，非化石能源比例提升至 20%，2030 年实现碳达峰； ◆ 环境治理方面考虑已发布的大气污染防治政策措施，各行业实施现行排放标准，钢铁、有色、水泥、玻璃等重点行业在 2020 年左右实现特别排放限值。
强化政策情景	RCP3.4 强化污染物控制	◆ 以实现我国中长期清洁空气第一阶段目标为依据，在 2030 年建成美丽中国；同时提前、超额完成 NDC 承诺； ◆ 能源转型方面在 2025 年左右实现碳达峰，2030 年时非化石能源比例提升至 30%以上，煤炭比重低于 45%； ◆ 环境治理方面，持续推动污染治理升级，钢铁、水泥等重点行业先后完成超低排放改造。
2 度情景	RCP2.6 最佳污染物控制	◆ 与《巴黎协定》下全球 2℃温升目标和 2050 年全国实现 15ug/m^3 浓度目标相适应，中长期空气质量得到本质好转； ◆ 实施低碳能源深度转型，2030 和 2050 年时煤炭消费占比降至 40%和 15%以下；清洁低碳能源占比提升至 35%和 60%以上； ◆ 环境治理方面，在重点行业全面完成超低排放改造后逐步采用欧美发达国家的最佳污染治理技术，移动源排放逐步优于国际标准，同时加强对农业和溶剂使用的控制。
1.5 度情景	RCP1.9 最佳污染物控制	◆ 与《巴黎协定》下全球 1.5℃温升目标和 2050 年全国实现 10 ug/m^3 浓度目标相适应，中长期空气质量得到本质好转； ◆ 实施快速的低碳能源深度转型，2030 和 2050 年时煤炭消费占比降至 35%和 8%以下；清洁低碳能源占比提升至 45%和 75%以上； ◆ 环境治理方面，在重点行业全面完成超低排放改造后逐步采用欧美发达国家的最佳污染治理技术，移动源排放逐步优于国际标准，并加强对农业和溶剂使用的控制。

4 我国中长期能源、排放和空气质量演变

4.1. 不同气候目标下的能源系统演变

能源系统转型在实现气候目标的过程中起到重要作用。更低的化石能源消耗、更高的电气化程度和可再生能源比例有助于更好地实现温升控制、辐射强迫等气候目标，并对空气质量改善有显著协同效益。

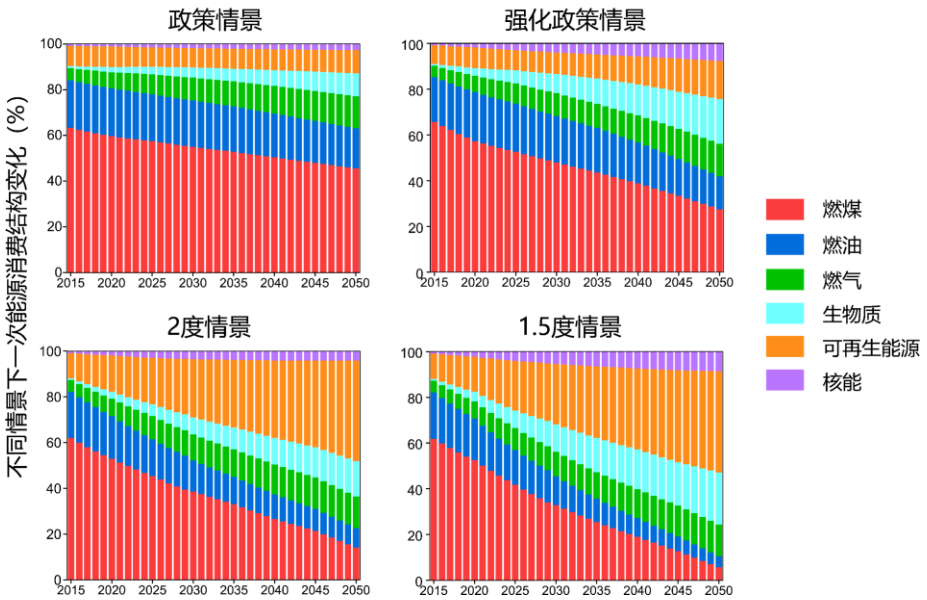

图 7　不同情景下我国未来一次能源消费结构演变

图 7 展示了不同情景下我国未来一次能源消费结构变化，图 8 进一步展示了化石能源消费量的变化情况。作为煤炭消费大国，2015 年时我国的燃煤量占到一次能源消费总量的 64%左右，化石能源占比高达 87%以上，可再生清洁能源占比不足 10%。从绝对量看，煤炭、石油、天然气的消费量分别为 3971 百万吨（原煤）、552 百万吨（原油）、2000 亿立方米天然气。工业和电力是主要的燃煤消耗部门，燃油则主要用于交通和工业部门。

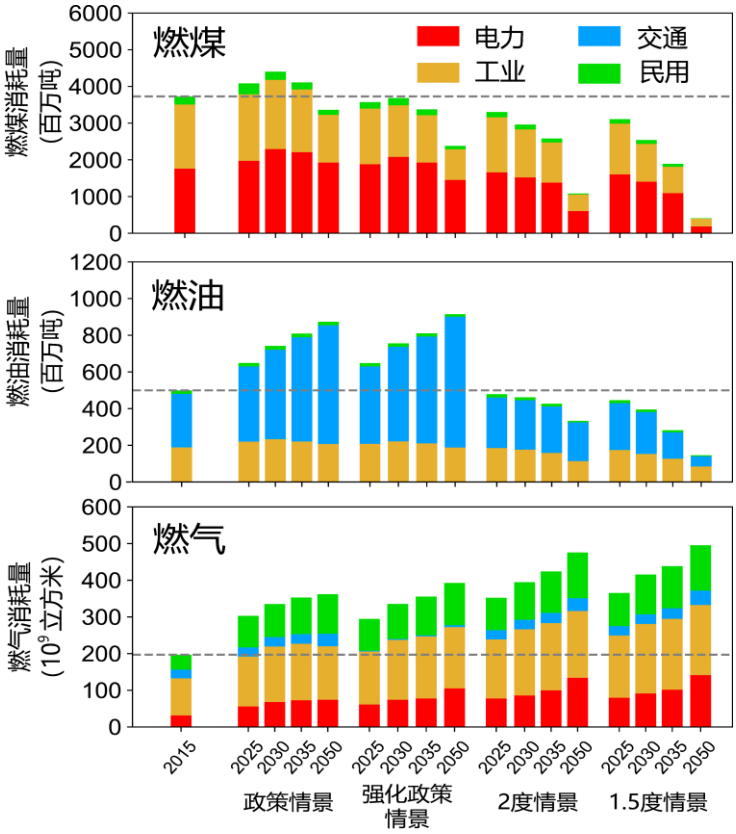

图 8　不同情景下我国未来化石能源消费量变化

在政策情景下，化石燃料消费占比有一定程度的削减，相较于 2015 年，煤炭的消费占比从 63.7%下降至 2030 年的 55.0%和 2050 年的 45.5%；从消费绝对量看，2030 和 2050 年分别消耗煤炭 4403 和 3330 百万吨（原煤），较 2015 年分别增长 18.1%和下降 10.7%。燃油消费占比相对保持稳定，2030 和 2050 年分别占一次能源消费总量的 20.2%和 17.6%；但燃油消费绝对量仍然呈增长态势，尤其是交通部门。交通部门油耗量在 2030 和 2050 年时较 2015 年分别上涨了 67.2%和 121.8%。燃气和生物质的消费占比逐步增加，其中民用、电力部门的增长最为显著，民用部门燃气消费量较 2015 年时增长了 122.3%（2030 年）和 165.7%（2050 年），电力部门则分别增长了 116.4%（2030 年）和 135.5%（2050 年），一定程度上反映了我国近年来不断强化的煤改电、煤改气政策。

相较于政策情景，强化政策情景的煤炭和化石能源消费占比进一步降低，生物质和可在再生能源比例有所增加。2030 年煤炭消费占比下降至 47.9%，2050 年时进一步下降至 27.5%。电力和工业煤耗的下降主导了这一变化，相比 2015 年，电力和工业煤耗在 2050 年时分别下降 17.5%和 52.2%。燃油消费量在 2015-2050 年间仍然保持了上涨态势，至 2030 和 2050 年时燃油消费总量较 2015 年分别上涨了 46.9%和 72.3%。

2 度和 1.5 度情景下我国未来能源结构将发生本质优化，具体体现为高碳化石能源消费的大幅下降与可再生能源、核能消费占比的显著提升。2 度情景下 2030 年煤炭消费占比下降至 36.2%，至 2050 年进一步下降至 16.7%。煤炭消费的绝对量在 2030 和 2050 年时分别下降至 2962 和 1332 百万吨（原煤），较 2015 年分别下降了 20.6%和 64.5%。燃油消费量呈现出先增加后下降的趋势，在 2030 年附近达到峰值，约 546 百万吨（原油）；至 2050 年时则下降至 380 百万吨（原油），较 2015 年下降 24%。2 度情景下可再生能源的比例在 2030 和 2050 年时分别达到 22.1%和 37.7%，在 2050 年时已远超过煤炭的消费占比，且高于煤炭和燃油等高碳能源总消费的占比（31.4%）。1.5 度情景下能源转型力度较 2 度情景进一步加强。2030 年化石能源总量消费占比为 62.1%，其中燃气占到 10.0%，煤炭、石油的消费占比分别为 31.9%、20.2%；至 2050 年时，煤炭、石油的消费占比分别削减至 6.3%和 13.2%。从消费绝量变化看，煤炭消费总量在 2030 和 2050 年时分别降低至 2642 和 837 百万吨（原煤），较 2015 年分别降低了 29.2%和 77.6%；燃油消费总量在 2030 和 2050 年时分别降低至 460 和 321 百万吨（原油），较 2015 年分别下降了 7.9%和 35.8%。1.5 度情景下生物质能应用显著提升，2030 年应用比例达到 11%，2050 年时进一步提升至 21%。

4.2. 不同情景下的碳排放变化

不同情景下中国未来 CO_2 的排放路径如图 9 所示。在政策情景下，CO_2 排放在 2030 年附近达到峰值，约 138 亿吨，较 2015 年增长了 28.4%。强化政策情景下 CO_2 排放在 2025 年附近实现达峰，峰值碳排放约 114 亿吨，较 2015 年的 CO_2 排放量增长 6.1%。政策情景可以实现我国国家自主减排贡献（NDC）中在 2030 年之前实现碳达峰的承诺，强化政策情景则将这一承诺进一步提前五年实现。在 2 度和 1.5 度情景下，CO_2 排放在 2020 年左右实现达峰，2030 年之后下降幅度更加显著。从碳排放强度变化来看，我国在 NDC 承诺中提出相较于 2005 年，到 2030 年单位 GDP 碳排放量需降低 60%-65%。结合各情景对应的社会经济发展假设，政策情景下 2030 年碳排放强度较 2005 年降低 63.1%，在我国 NDC 承诺的范围内，但有一定的实现风险；强化政策情景下，2030 年的碳排放强度较 2005 年将降低 69.2%，在 2 度和 1.5 度的低碳情景下，2030 年碳排放强度将下降 73.6%-78.4%，远超我国 NDC 的承诺范围。这也从另一方面印证了加强能

源系统的深度转型，可以在保障经济持续发展的前提下仍实现低碳排放以及本世纪中叶的碳中和目标，是实现经济发展与碳排放脱钩重要途径。

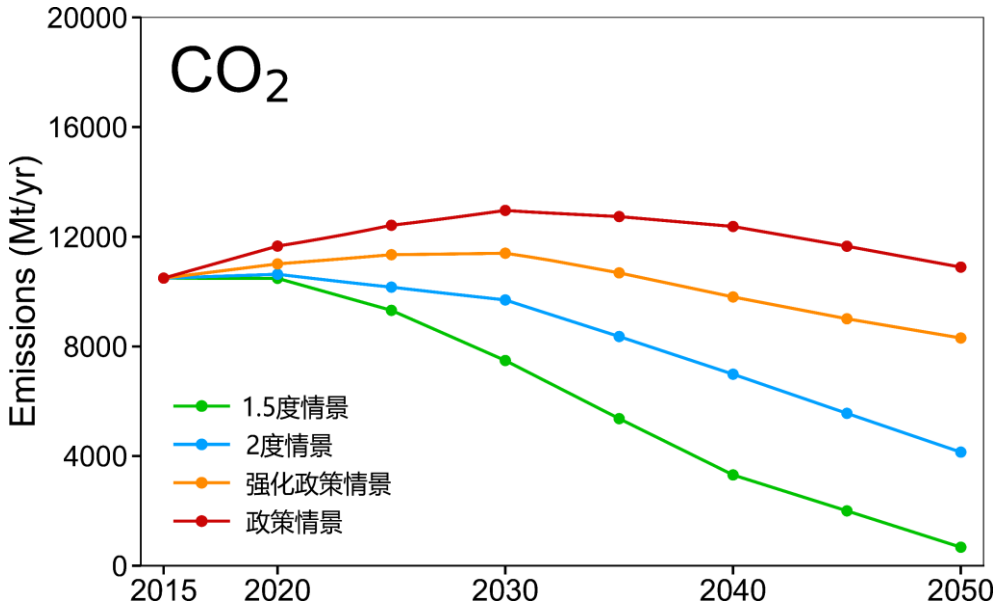

图 9　不同情景下中国未来 CO_2 排放趋势

图 10 进一步展示了不同情景在 2025、2030、2035 和 2050 等关键时间节点处的 CO_2 排放情况。2015 年我国的 CO_2 排放约 105 亿吨，电力和工业是主要的碳排放部门，分别占总排放的 34.5%和 47.1%。在政策情景下，碳排放总量与工业部门碳排放均在 2030 年附近达到峰值，民用部门在 2025 年附近达峰，电力部门碳排放达峰时间相对较晚，这一方面是因为工业和民用部门的电气化比例提高较为明显，导致了较高的发电需求，另一方面也由于政策情景下电力系统的低碳转型相对缓慢，使得煤炭消耗逐步集中于电力部门，且可再生能源、生物质能等清洁低碳能源发展不足。交通部门的 CO_2 排放呈现持续增长的态势，至 2030 和 2050 年时较 2015 年分别增长了 27.8%和 55.8%，主要由激增的机动车保有量和缓慢的交通系统能源转型导致。在强化政策情景下，2025 年碳排放总量达到 114.3 亿吨的峰值，峰值碳排放较 2015 年增长了 6.1%；至 2030 和 2050 年时 CO_2 排放分别达到 112.3 亿吨和 78.3 亿吨，较 2015 年分别增长了 4.3%和降低了 27.3%。

在 2 度和 1.5 度情景下，碳排放总量在 2030 年时分别降低至 98.9 亿吨和 74.9 亿吨，至 2050 年时进一步降低至 41.4 亿吨和 6.8 亿吨。从主要排放部门看，电力、工业部门的碳排放均在 2015 年后开始下降，且工业部门的降幅最为显著，表明工业部门的终端用能清洁转型和电气化改造最为迅速有力。至 2050 年时，2 度情景和 1.5 度情景下

工业部门的碳排放较 2015 年分别降低了 56.8%和 66.3%。电力部门的碳排放在 2015-2035 年之间的降幅相对较小，但 2035 年之后迅速下降，较 2015 降低 50%以上。这一现象说明电力系统的低碳能源转型相对滞后于工业系统，但具有巨大的碳减排潜力，并在 2030 年之后得到充分释放。民用和交通部门的碳排放则均在 2025 年附近达到峰值，但交通部门的碳减排相对缓慢，至 2050 年时的降幅均在 20%以下。2050 年时，交通部门的碳排放占比由 2015 年的 8.6%提升至 14.4%，这表明在未来低碳发展路径下，随着电力、工业等部门的深度碳减排，交通部门的碳排放贡献将逐步凸显，碳减排潜力有待进一步释放。

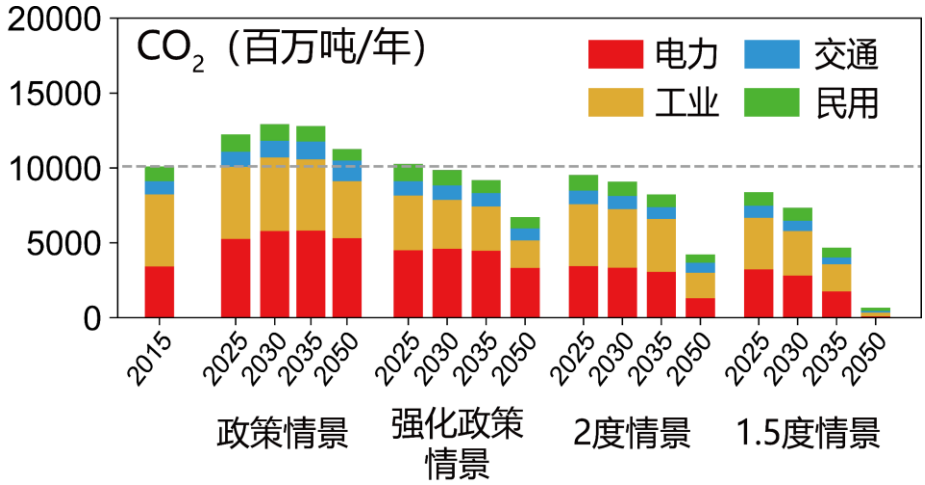

图 10　不同情景下分部门的 CO_2 排放变化

总体而言，政策情景和强化政策情景可以使中国在 2025-2030 年之间实现碳达峰，而 2 度和 1.5 度等低碳发展路径下我国未来的碳排放将持续降低。工业部门是碳减排最为显著的部门，电力部门次之，且碳排放降低主要发生在 2035 年之后。交通部门的碳减排相对滞后，与交通部门较低的碳排放占比和较高的碳减排成本有关；但随着电力、工业等部门的深度减排，交通部门的碳减排潜力有待进一步释放。

4.3. 不同情景下的污染物排放变化

根据 MEIC 模型测算，2015 年时我国 SO_2、NO_x、一次 $PM_{2.5}$ 和 NMVOCs 等主要污染物的排放量分别为 1741.0、2369.6、913.9 和 3104.9 万吨。图 11 显示了不同情景下中国未来上述主要污染物在未来分部门的排放变化情况；图 12 至图 14 进一步显示了不同情景下全国主要污染物在 2030 年和 2050 年时的减排比例。

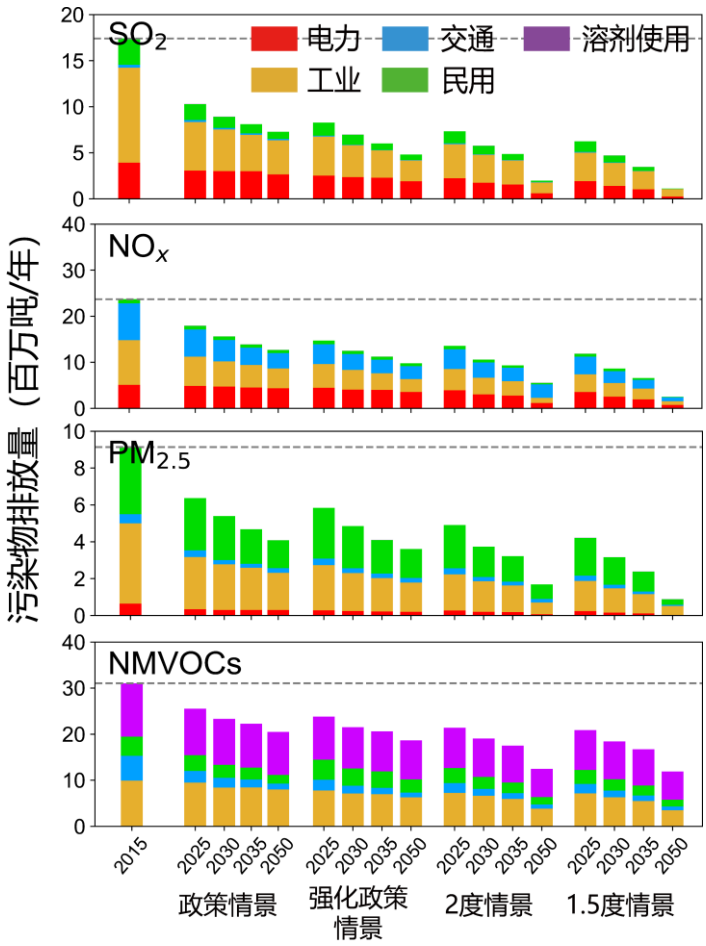

图 11 不同情景下主要污染物各部门的排放变化政策情景刻画了在现有政策约束下我国未来的污染物排放变化。该情景下各主要污染物排放在 2015-2020 间显著下降，尤其是 SO_2 在 2025 年时已降至 1094.9 万吨，相较 2015 年降低了 37.1%；至 2030 年时进一步降低至 831.1 万吨。2030 年时，NO_x 和一次 $PM_{2.5}$ 分别排放了 1252.5 和 496.7 万吨，较 2015 年分别降低了 28.1%和 73.0%。较快的污染物排放下降趋势反映出我国自 2015 年以来持续有效的污染防治政策，过去及未来五年也将是我国 SO_2、一次 $PM_{2.5}$ 等主要污染物排放下降最快的时段。在 2030 年之后由于没有额外的控制政策约束，各污染物的减排力度大大变缓，2030-2050 年间的排放趋于平稳，这一时期主要污染物的减排幅度都在 25%以内。

强化政策情景进一步考虑了更为严格的控制政策，刻画了在加严现有政策执行力度、前置现有减排目标完成时间的假设下我国未来污染物的排放演变情况。该情景下各主要污染物在 2015-2030 年之间呈现出更加稳定快速的减排趋势。至 2030 年时，全国 SO_2、NO_x、一次 $PM_{2.5}$ 和 NMVOCs 排放分别降低至 697.4、1250.6、485.1 和 2149.9 万吨，相较 2015 年分别降低了 59.9%、47.2%、46.9%和 30.8%。相较政策情景，得益于钢铁、水

泥、冶炼等高污染行业的超低排放改造和工业部门的电气化转型，额外的减排主要由工业部门主导；此外，全国范围内机动车排放标准的再次升级也对 NO_x 减排有较大贡献。至 2050 年时，SO_2、NO_x、一次 $PM_{2.5}$ 和 NMVOCs 排放进一步降低至 480.8、978.4、361.0 和 1865.6 万吨，较 2015 年的排放水平已分别降低 72.4%、58.7%、55.1%和 33.6%。

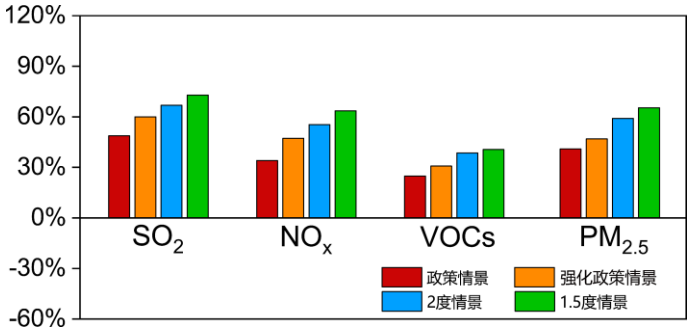

图 12　2030 年时主要污染物较 2015 年的减排比例

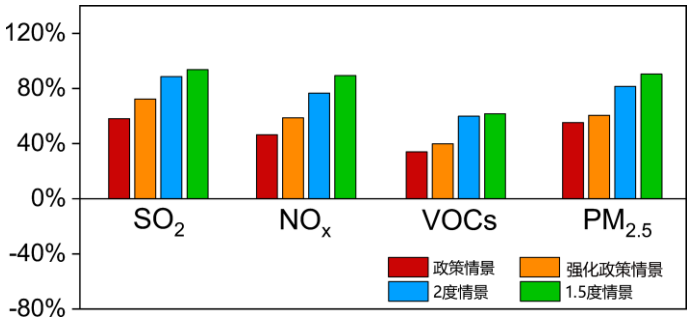

图 13　2050 年时主要污染物较 2015 年的减排比例

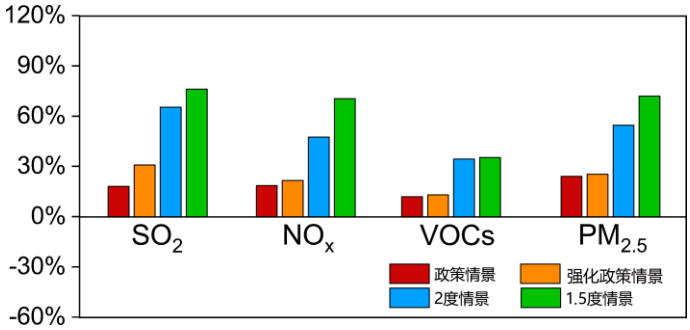

图 14　2050 年时主要污染物较 2030 年的减排比例

2 度和 1.5 度两个深度减排情景与国际 2 度和 1.5 度的温升目标、15 和 10 ug/m^3 的空气质量目标相适应，刻画了在深度能源转型和最佳污染防治下中国未来污染物的排放演变。2030 年时，2 度和 1.5 度情景在 2030 年时的末端控制水平略强于强化政策情景，额外的减排量主要得益于更加彻底的能源低碳转型，表明能源转型在中短期污染排放控制中同样有重要作用。在 2030 年之后，深度减排情景下中国以化石能源为主的能源结构在各个行业都得到本质改善，污染物末端控制逐步达到欧美等发达国家的水平，农业

氨和挥发性有机物排放也得到有效管控。污染物排放水平相较前述政策情景大幅降低。至 2050 年时，SO_2、NO_x、一次 $PM_{2.5}$ 和 NMVOCs 排放在 2 度情景下分别降至 198.5、594.1、168.9 和 1247.6 万吨，较 2015 年分别降低了 89%、77%、82%和 60%；在 1.5 度情景下进一步降低至 111.7、183.4、83.3 和 1118.1 万吨，较 2015 年分别降低了 94%、89%、90%和 62%。2030-2050 年的污染物排放降幅也非常显著；2 度情景下达到 50%，1.5 度情景下除 NMVOCs 外其他污染物较 2030 年的降幅均高达到 70%以上。

4.4. 不同情景下全国及重点区域的空气质量演变

2015 年全国 $PM_{2.5}$ 年均浓度高达 53.1μg/m^3，超出我国的环境空气质量二级标准（NAAQS，35μg/m^3）51.7%，较世界卫生组织（WHO）的环境空气质量第三阶段过渡值（IT-3，15 μg/m^3）和指导值（AQG，10 μg/m^3）更是有明显差距。如图 15 所示，除西部地区受沙尘天气影响外，京津冀及周边、汾渭平原和长三角地区是三个 $PM_{2.5}$ 污染最严重的区域，部分高值区的 $PM_{2.5}$ 浓度甚至高达 150μg/m^3 以上。

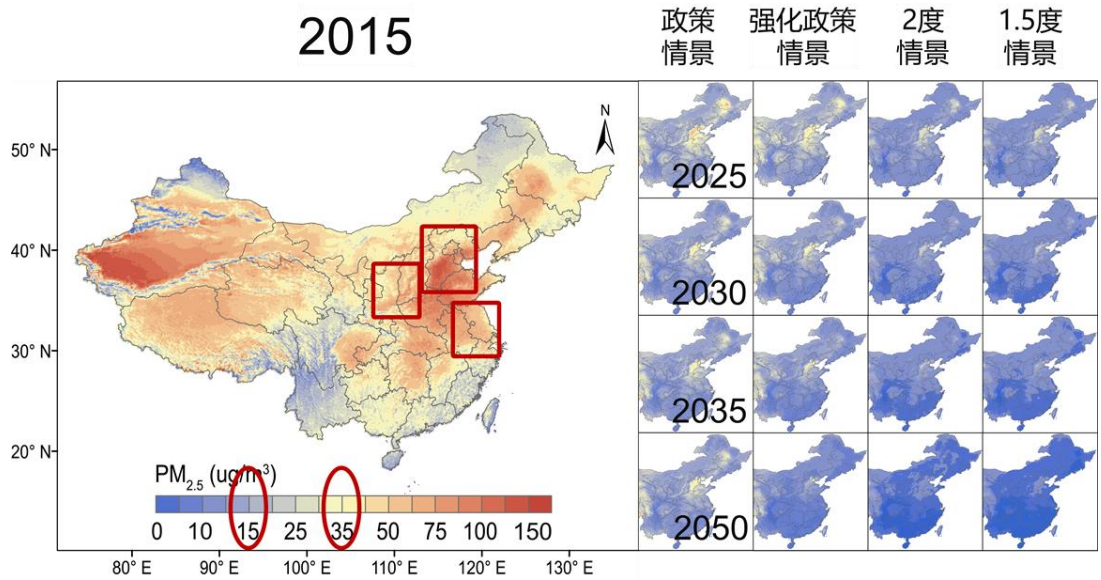

图 15 不同情景下全国 $PM_{2.5}$ 年均浓度分布的时空演变

图 15 展示了不同情景下全国 $PM_{2.5}$ 年均浓度分布的时空演变；图 16 量化了全国及重点区域在不同情景下未来人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度的变化，附表 3 则进一步细致统计了不同情景下未来城市及站点 $PM_{2.5}$ 浓度变化及达标情况。

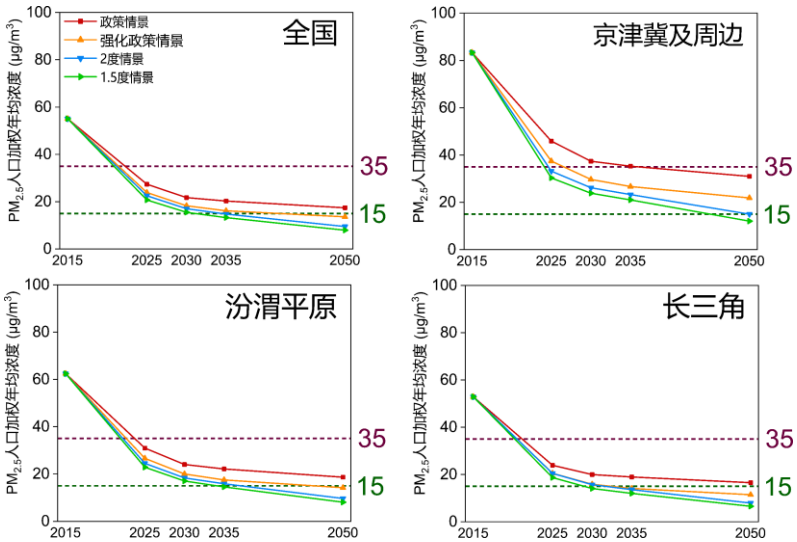

图 16　不同情景下全国及重点区域人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度变化

政策情景下，全国的空气质量已经得到普遍好转，汾渭平原和长三角在 2030 年时已不再是 $PM_{2.5}$ 污染的重点区域，但仍有相当一部分区域（如京津冀及周边）无法实现 NAAQS。但 2050 年时全国多数区域较 IT-3 仍有较大差距，而且在京津冀及周边的部分高 $PM_{2.5}$ 污染区并未得到明显改善。在强化政策情景下，2030 年时，全国仍然有部分区域无法实现 NAAQS 目标；2050 年时多数区域基本可以实现 IT-3 的空气质量目标值，但在京津冀仍然有一部分 $PM_{2.5}$ 污染热值区，对人群健康仍然有不可忽视的影响。在 2 度情景和 1.5 度情景下，全国大部分区域在 2025 年时即可实现 NAAQS 的目标值，并在 2030 年时进一步降低。至 2050 年时，2 度情景下全国绝大部分区域可以实现 IT-3 的空气质量目标值，1.5 度情景下大部分区域可进一步实现 AQG 指导值。

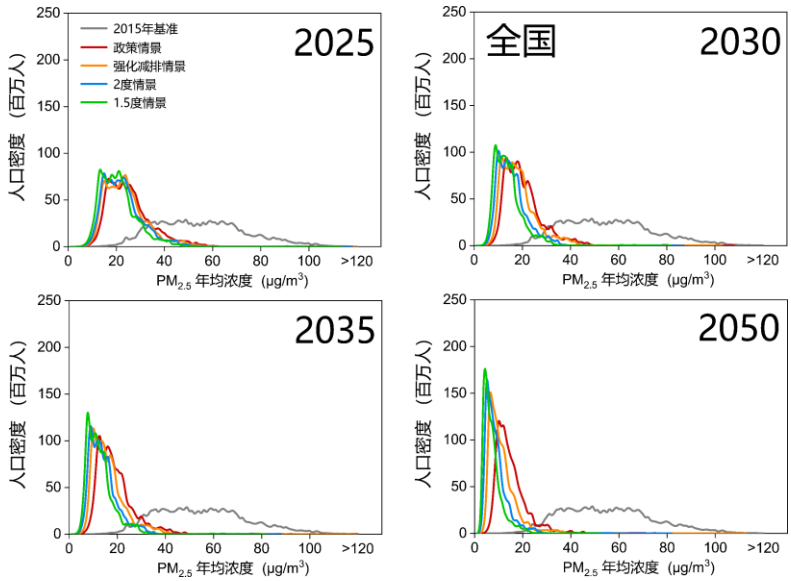

图 17　不同情景下全国人群 $PM_{2.5}$ 暴露曲线

从 $PM_{2.5}$ 的人群暴露水平变化来看，图 17 展示了不同情景下未来中国人群 $PM_{2.5}$ 暴露曲线的变化，图 18 进一步展示了全国及重点区域人群暴露比例。2015 年时，全国大部分人群分布在 35-75μg/m^3 的 $PM_{2.5}$ 浓度区间。在一定的能源和末端控制政策下，人群 $PM_{2.5}$ 暴露曲线显著向低浓度区间偏移，至 2030 年，即使在政策情景下，全国的大部分人口也基本暴露在 35μg/m^3 的 $PM_{2.5}$ 浓度下；但 2050 年主体人群仍暴露于 15μg/m^3 的 $PM_{2.5}$ 浓度之上。在 2 度和 1.5 度情景下，人群 $PM_{2.5}$ 暴露水平显著向 15μg/m^3 以下的低浓度区间偏移，全国 $PM_{2.5}$ 暴露水平得到根本性改善。

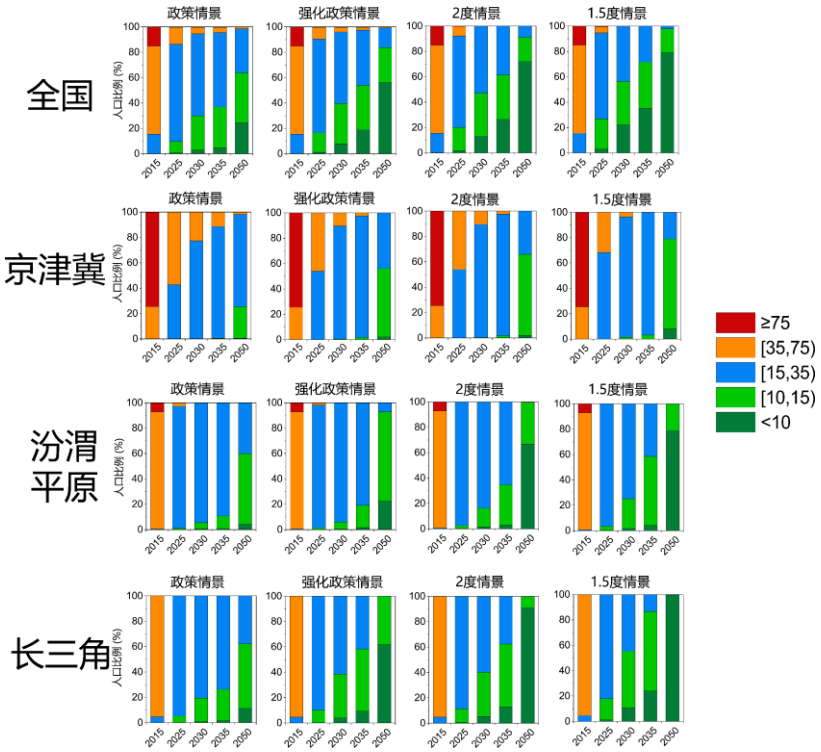

图 18　不同情景下全国及重点区域人群 $PM_{2.5}$ 暴露水平变化

从具体的人群暴露水平比例变化看，2015 年全国有近 85%的人群暴露于 35ug/m^3 的浓度之上，高于 75 ug/m^3 的人群暴露比例达到 15%。在当前政策、强化政策情景下，2030 年全国暴露水平高于 35 ug/m^3 的人群比例分别下降至 6%和 4%以下，但政策情景下 2050 年暴露水平低于 15 ug/m^3 的人群比例不足 65%。在深度减排情景下，2030 年全部人群基本暴露在 35 ug/m^3 以下；2 度情景 2050 年时暴露水平低于 15 ug/m^3 的人群比例高达 91%；1.5 度-交通情景下这一比例提升至 97%，且有 75%以上的人群暴露于 10 ug/m^3 以下。京津冀及周边的人群暴露水平高于全国。2015 年时，京津冀及周边有 99%以上的人群暴露于 35 ug/m^3 之上，高于 75 ug/m^3 的人群暴露比例达到 74%。在当前政策、强化政策情景下，2030 年时京津冀及周边暴露水平高于 35 ug/m^3 的人群比例分别

下降至 31%和 23%以下，但 2050 年暴露水平低于 15 ug/m^3 的人群比例不足 25%。2 度情景下，2030 年京津冀地区仍有近 9%的人口暴露于 35 ug/m^3 以上，2050 年有 34%人口暴露于 15 ug/m^3 以上，表明该区域需要更强有力的能源转型才能实现空气质量的根本改善。

从附表 3 统计的站点达标情况看，政策情景下 2030 年全国有 97%的城市可以实现 35 ug/m^3 的目标，且有 89%的城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度可以达到 25 ug/m^3 以下。不达标的城市和站点主要位于京津冀及周边地区，该区域 2030 年的城市和站点 $PM_{2.5}$ 年均浓度达标率仅分别为 68%和 62%。该情景下 2050 年全国有 76%的城市可以实现 15 ug/m^3 的空气质量目标，但京津冀和汾渭平原的达标情况不容乐观，两区域仅 4%和 64%的城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度可以达到 15 ug/m^3 以下。在 1.5 度情景下，2030 年时基本所有的城市和站点均可以实现 35 ug/m^3 的目标，且 2050 年时 99%和 96%的城市和站点可以实现 15 ug/m^3 的目标，但有 13%和 16%的城市与站点 $PM_{2.5}$ 年均浓度无法降到 10 ug/m^3 以下。

研究进一步设计了强化站点达标情景如图 19 所示。至 2050 年，在 1.5 度情景的基础上，强化达标情景中有额外 70%的油车被电动车取代，2050 年时交通源的 CO_2 排放量由 1.1 亿吨降到至 0.3 亿吨。在强化站点达标情景下，2050 年全国 98%的站点均可实现 15 ug/m^3 的目标，实现 10ug/m^3 目标的城市（站点）也由 87%（84%）提升至 92%（89%）。从人群暴露看，强化站点达标情景下 15 和 10 ug/m^3 以下的人群暴露比例分别提升至 99%和 86%，深度的交通电气化和碳减排可以使将近 5%的人口基本不再受 $PM_{2.5}$ 污染的健康损害。除 $PM_{2.5}$ 污染外，强化站点达标情景可以使额外 6%的城市的 O_3 最大 8 小时浓度降低至 100 ug/m^3 以下。

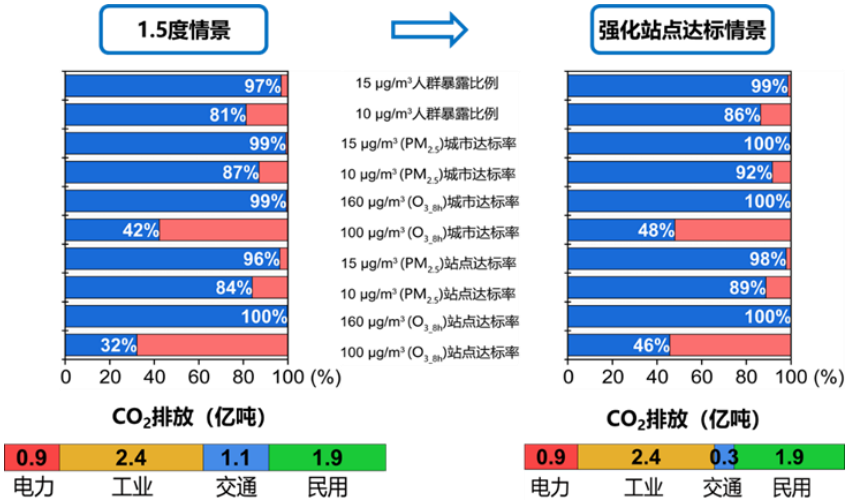

图 19　强化站点达标情景

5. 气候政策对实现清洁空气目标的关键作用

5.1. 气候与环境政策对污染物减排的贡献

能源转型和末端控制是实现清洁空气目标的重要途径。我国自 1990 年以来即开始了长达近 30 年的空气污染治理历程，并在不同阶段针对各自主要的污染源和污染特征制定了相应的控制政策。在这一过程中，我国以煤炭、石油为主的能源结构并未得到明显改善，1990 年时煤炭、石油的消费量占比分别为 76.2%和 16.6%，至 2010 年时煤炭、石油的消费占比仍高达 69.2%和 17.4%，末端治理在这一空气污染治理过程中始终发挥着重要主导作用。自“大气十条”实施以来，通过淘汰燃煤锅炉、落后产能、民用燃料清洁化等一系列政策，我国能源结构得到一定的优化升级，至 2017 年时，煤炭消费比重降低至 60.4%，石油消费比重为 18.8%，但以化石燃料为主的能源结构仍未得到本质转变；且有部分研究表明，末端治理升级仍是近十年污染物减排、$PM_{2.5}$ 污染改善的关键。本节将重点讨论若要实现我国中长期清洁空气目标，能源转型和末端控制对污染物减排的相对贡献。

在现有的能源和末端政策推动下，我国的能源结构和末端控制均得到一定优化。图 20 展示了相较于政策情景，至 2050 年能源转型和末端控制对污染物深度减排的贡献。在现有政策基础上，若要进一步实现污染物的长期深度减排，能源转型将发挥明显的主导作用。

在 2050 年时，相较于政策情景，能源转型对 SO_2、NO_x、一次 $PM_{2.5}$ 深度减排的贡献分别达到 72%-77%、66%-75%、75%-83%。在政策情景下，电力部门已完成超低排放改造，超低排放标准已接近国际上最强的电力排放限值，末端治理升级的减排空间已大幅压缩，因此电力部门的进一步减排基本由能源转型主导。在 2 度情景下，能源转型对电力部门 SO_2、NO_x、一次 $PM_{2.5}$ 的减排贡献分别达到 92%、83%和 85%，在 1.5 度情景下，这一比例进一步提升至 94%、84%和和 89%。对于工业部门，政策情景下钢铁等高污染工业逐步完成超低排放改造，但一方面工业超低排放改造后距国际最先进的排放限值仍有一定差距，另一方面还有相当一部分重污染行业，如有色金属、砖瓦石灰等尚未进行超低排放改造，因此末端治理升级仍有一定的减排空间。在 2 度情景下，末端控制对工业 SO_2、NO_x、一次 $PM_{2.5}$ 的减排贡献占比分别为 43%、39%和 20%；在 1.5 度情景下，随着工业能源转型的进一步加剧、电气化程度的进一步提升，末端控制对工业 SO_2、

NO_x 、一次 $PM_{2.5}$ 的减排贡献占比降低至 36%、35%和 16%。对民用部门减排而言，在 2 度情景下能源转型对民用 SO_2、NO_x、一次 $PM_{2.5}$ 的减排贡献占比已高达 78%、86%和 67%，得益于民用部门电气化比例的大幅提升和民用燃煤与传统生物质消费的削减，末端控制的贡献则主要得益于燃煤硫份、灰分含量的进一步降低和民用炉灶的升级改良。在 1.5 度情景下，民用燃煤和传统生物质基本被完全替代，能源转型的减排贡献进一步提升至 84%、91%和 84%。对交通部门而言，2 度情景下由于交通能源转型仍较为滞后和不足，末端控制贡献仍占有较大比重，对交通 NO_x 和一次 $PM_{2.5}$ 的减排贡献占比分别为 71%和 94%。在 1.5 度情景下，交通部门能源结构得到显著优化，电力、燃气和氢能使用比例在 2030 年之后明显提升，能源转型对交通 NO_x 和一次 $PM_{2.5}$ 的减排贡献占比达到 63%和 66%。

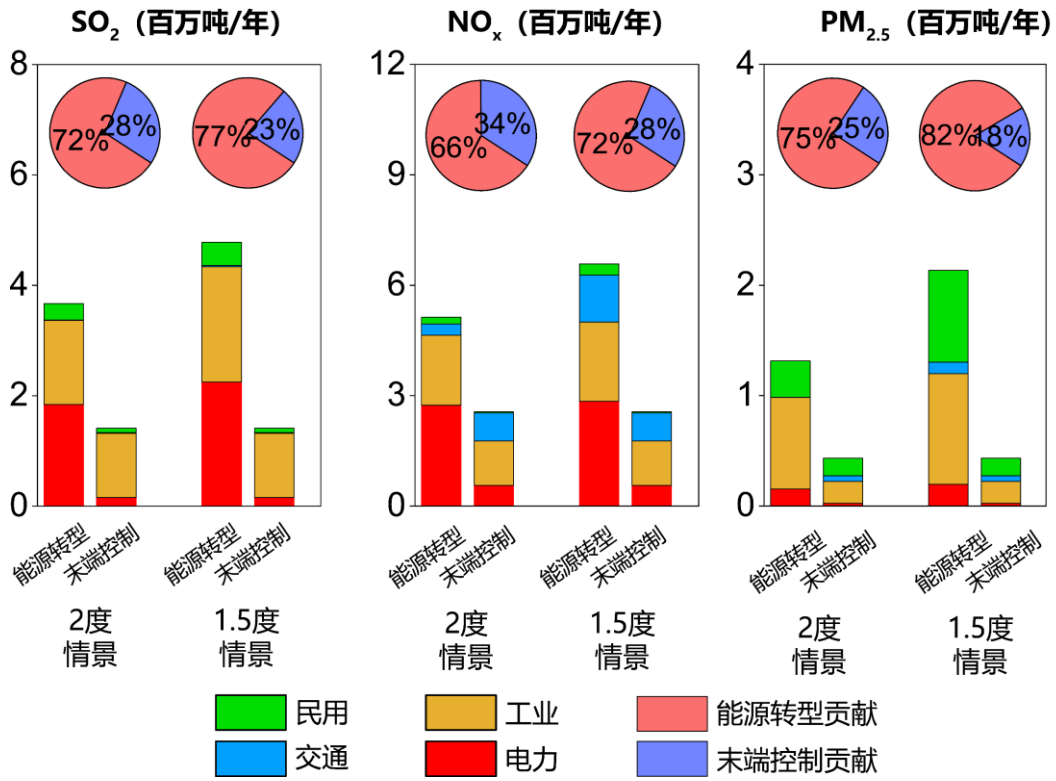

图 20　相较政策情景能源转型和末端控制对污染物减排的相对贡献

总体而言，在现有政策基础上，能源转型将主导电力、工业、民用部门污染物的长期深度减排，对交通部门深度减排也将发挥关键作用。末端控制仍有一定的减排潜力，2050 年末端控制对 SO_2、NO_x 和 $PM_{2.5}$ 减排的贡献分别为 23%-28%、28%-34%和 18%-25%。

5.2. 气候与环境政策对空气质量改善的贡献

图 21 展示了 2 度与 1.5 度减排路径下相较政策情景能源转型和末端控制对我国长期空气质量改善的相对贡献。

相较于政策情景，能源转型对实现我国 $PM_{2.5}$ 空气质量中长期的根本改善将起到重要主导作用。在当前的能源和末端控制水平基础上，若要在 2050 年实现 15ug/m^3 的目标值，能源转型对 $PM_{2.5}$ 浓度下降的贡献将在 69%以上；若要进一步实现 10ug/m^3 的目标值，能源转型的贡献占比将进一步增加，达到 75%以上。

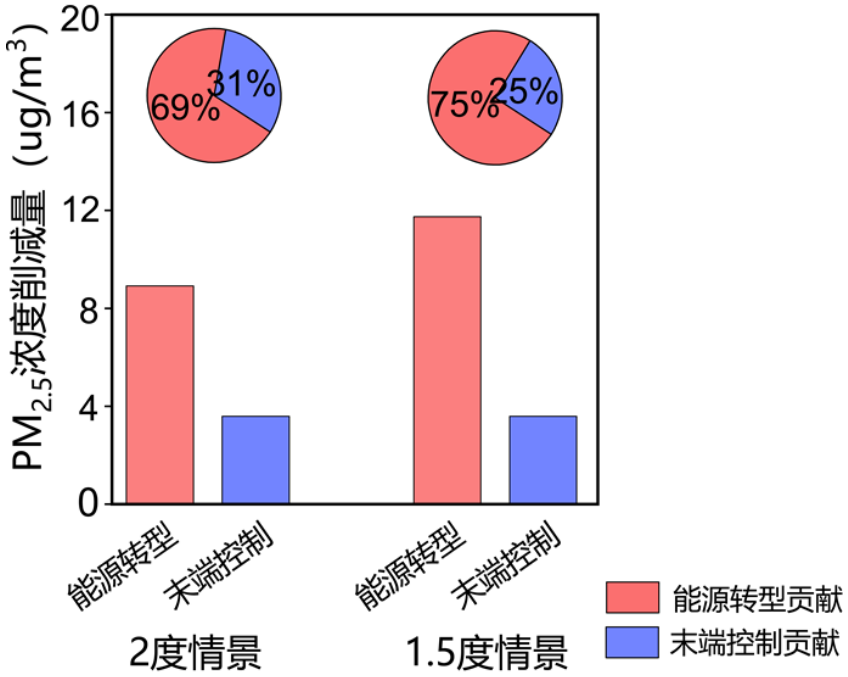

图 21　相较政策情景能源转型和末端控制对 $PM_{2.5}$ 污染改善的贡献

图 22 进一步展示了相较政策情景，能源转型和末端控制对 $PM_{2.5}$ 浓度改善的空间分布情况。从空间分异看，能源转型导致的 $PM_{2.5}$ 浓度下降同 $PM_{2.5}$ 浓度下降总量具有相似的空间分布性。这表明在当前能源和末端控制政策下，京津冀等主要污染区域的能源结构仍以高碳高污染的化石燃料为主，高污染区域的能源转型力度明显不足；也凸显出当前政策对高污染区域的污染治理仍以末端控制为主，能源转型对这些区域空气质量的本质好转有巨大潜力，并将发挥关键主导作用；空气污染严重的京津冀及周边区域，同样应是未来能源转型力度最大的区域之一。相较能源转型，末端控制导致 $PM_{2.5}$ 浓度下降的空间分异性相对较低，各区域呈现出相似的改善水平。表明在当前政策下，各区域的末端控制水平逐渐趋于一致；在未来逐步向最佳控制技术过渡发展的过程中，末端控制水平的区域差异经进一步减小。

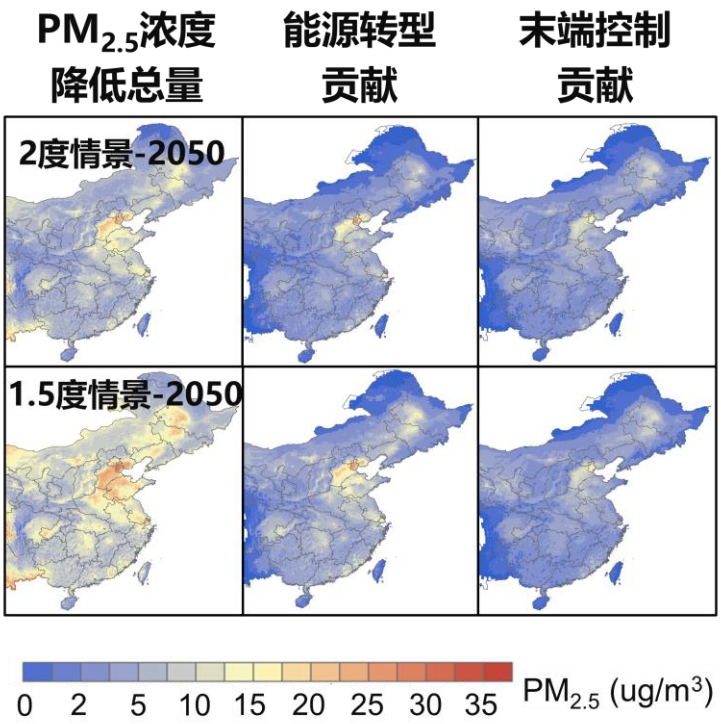

图 22　相较政策情景能源转型和末端控制导致 $PM_{2.5}$ 浓度变化的空间分布

6. 我国中长期空气质量改善的健康效益

空气污染是影响公众健康的重要因素之一，本研究进一步量化分析了不同情景下我国未来空气质量改善的健康效益。图 23 展示了不同情景下全国及重点地区未来由于 $PM_{2.5}$ 暴露导致的过早死亡。

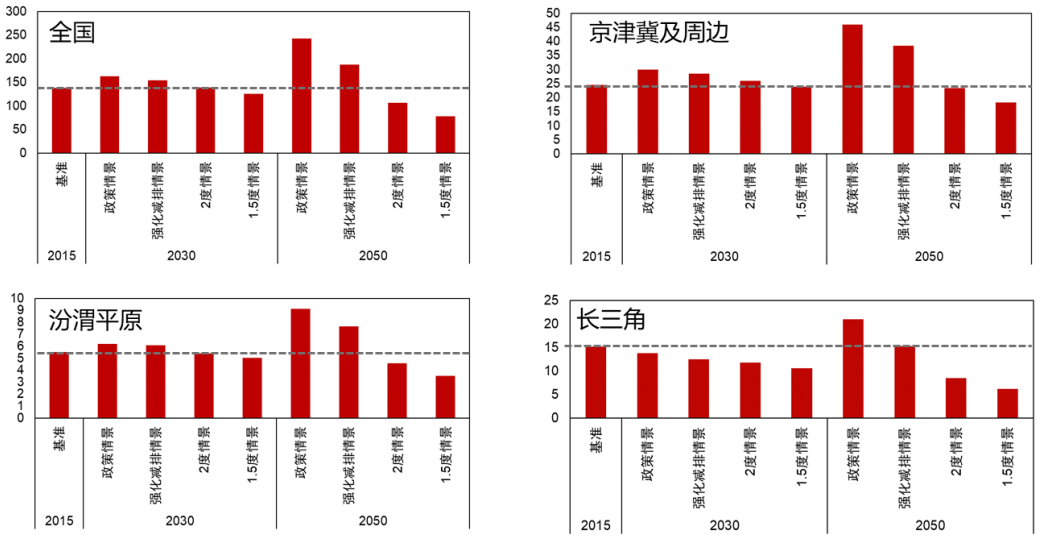

图 23　各情景下 2030 年、2050 年 $PM_{2.5}$ 暴露导致的过早死亡人数

从全国来看，在政策情景下 2030 年和 2050 年的过早死亡人数分别为 162.9 万和 242.4 万，相比 2015 年的 137.9 万增加 18.2%和 75.8%。大幅增长的过早死亡人数一方面由于减排力度匮乏，$PM_{2.5}$ 污染暴露严重；另一方面未来人口老龄化也有不可忽视的贡献。如图 24 所示，根据 SSP1 的情景预测，中国未来的人口老龄化将不断加剧，50 岁以上人口占比从 2015 年的 28.7%增加到 2030 年的 41.2%和 2050 年的 58.1%。

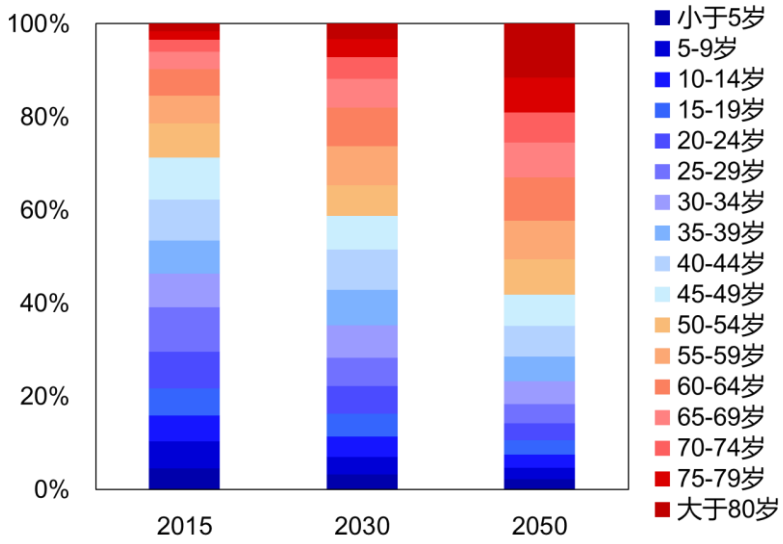

图 24　SSP1 情景下 2015 年、2030 年和 2050 年的中国人口结构

强化政策情景在 2030 年的过早死亡人数达到 154.1 万人，相比政策情景避免了 8.8 万人过早死亡，凸显了减排的贡献。相较政策情景，2050 年减排带来的健康效益进一步提升，$PM_{2.5}$ 相关过早死亡人数减少了 54.5 万。但相较 2015 年，政策情景和强化政策情景在 2030 和 2050 年的过早死亡人数均有所增加，表明现有强化政策下空气质量改善带来的健康效益不足以抵消人口老龄化导致的健康损失。在 2 度情景和 1.5 度情景下，2030 年 $PM_{2.5}$ 暴露导致的过早死亡人数为 138.7 万和 126 万，相比 2015 年减少了 0.8 万和 11.8 万，相比政策情景则下降了 14.8%和 22.6%。2050 年时 $PM_{2.5}$ 暴露导致的过早死亡人数下降至 106.5 万和 78.2 万，与 2030 年相比减少了 23.2%和 37.9%%。这表明随着能源结构的深度转型和末端控制措施的加严，空气质量改善带来的健康效益可以抵消大部分人口老龄化和人口分布变化带来的健康损失。

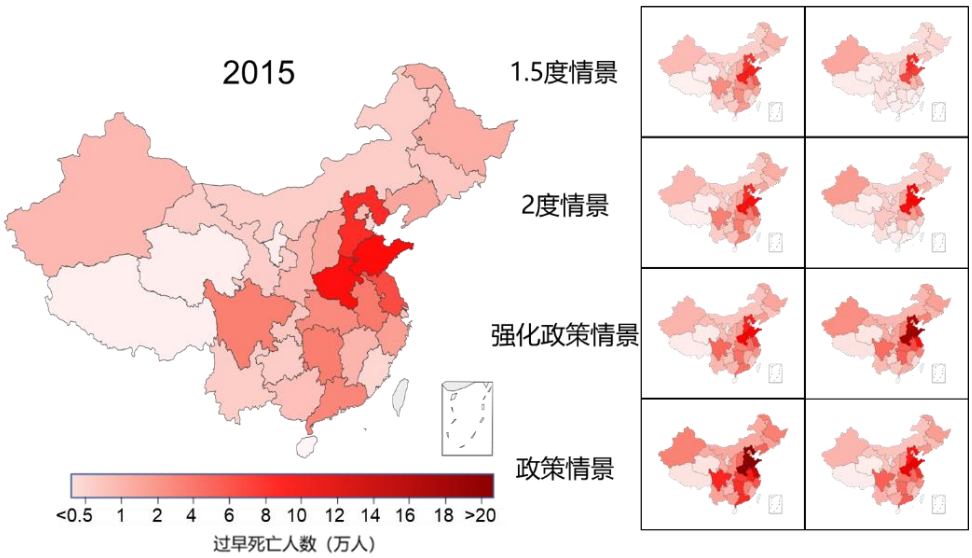

图 25　2015 年及 2030 年和 2050 年不同情景下全国各省过早死亡分布

从各重点地区来看，在 2015 年，京津冀及周边地区、汾渭平原和长三角地区由于 $PM_{2.5}$ 暴露导致的过早死亡人数分别为 24.5 万、5.5 万和 15.2 万，占全国的 32.8%，与上述区域严重的 $PM_{2.5}$ 暴露和密集的人口分布有关。图 25 显示了未来不同情景下全国 $PM_{2.5}$ 暴露相关过早死亡人数的空间变化。在政策情景下，京津冀及周边地区、汾渭平原和长三角地区 2050 年的过早死亡人数分别为 46.0 万、9.1 万和 21.0 万相比 2030 年分别增长了 53.3%、46.9%和 52.3%；而在 1.5 度情景下，上述区域 2050 年的过早死亡人数分别为 18.3 万、3.5 万和 6.2 万，相比 2030 年分别减少了 23.6%、29.9%和 40.9%，相比 2015 年则分别下降 25.5%、36.4%和 58.7%。表明同时实施强有力的末端控制和深度能源转型可以避免大量的过早死亡，空气质量改善效益可以抵消由于人口老龄化所带来的健康损失。也说明了 2030 年空气质量达标后持续改善的重要性，弥补人口老龄化下程空气污染对健康的损害。

研究进一步核算了未来不同情景下全国各省的 $PM_{2.5}$ 相关过早死亡人数。如图 26 所示，2015 年全国 $PM_{2.5}$ 暴露致死人数最多的是河南、山东和河北，达到为 11.7 万、11.5 万和 9.5 万。最少的 3 个省份分别为西藏、海南和青海，为 0.3 万、0.5 万和 0.6 万。

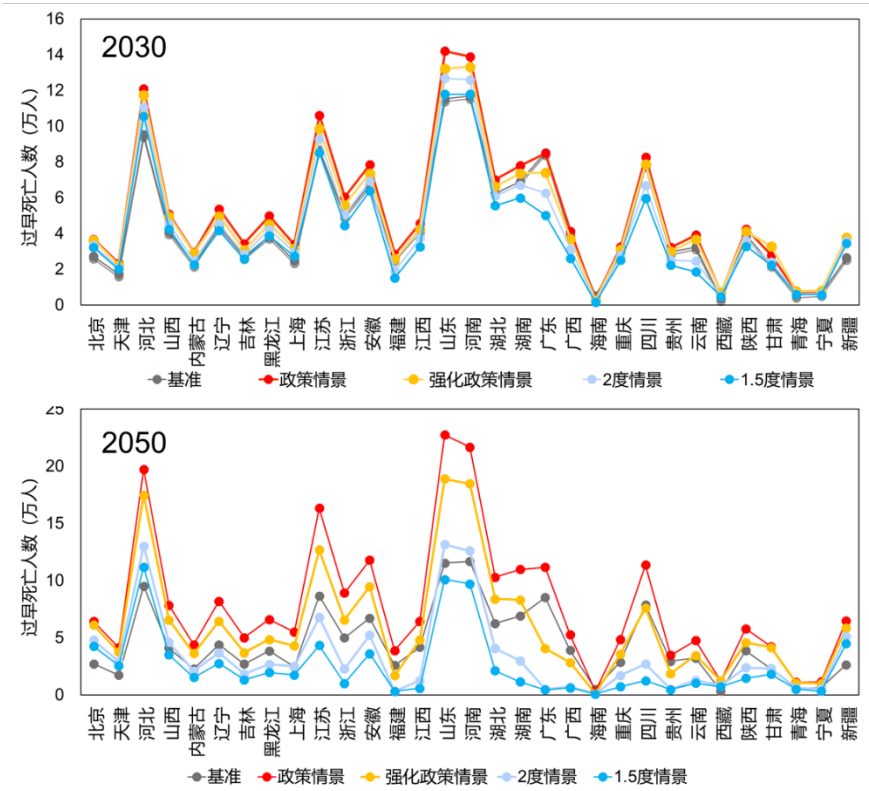

图 26　不同情景下未来各省市的 $PM_{2.5}$ 相关过早死亡变化

从分省的健康效益来看，未来各省与 $PM_{2.5}$ 相关的过早死亡人数将逐渐增加，各省由于空气质量改善带来的健康效益存在较大差异。在政策情景下，各省 $PM_{2.5}$ 暴露致死人数迅速增加，2050 年过早死亡人数最多的省份仍然是山东、河南和河北，分别为 34.2 万、33.2 万和 27.5 万。在强化政策情景下，所有省份在 2030、2050 年的 $PM_{2.5}$ 致死人数较政策情景均有所降低，山东、河北、河南、广东、四川和江苏 6 省在 2050 年相较政策情景避免的过早死亡人数均超过 2.5 万人，贡献了全国 41.6%的 $PM_{2.5}$ 致死人数下降量。另一方面，由于人口老龄化的影响，相对清洁地区进行空气质量持续改善带来的公共健康效益也会随时间增加。如海南、宁夏、青海和西藏四省， 2050 年政策情景的过早死亡人数分别为 0.7 万、1.3 万、1.4 万和 2.4 万。在 1.5 度情景下，上述省份在 2050 年相比政策情景可分别避免 0.5 万、0.4 万、0.3 万和 0.8 万的过早死亡。说明当前相对清洁的地区通过继续加强空气质量控制同样能够带来可观的健康效益。

7. 主要结论

（1）我国当前的 $PM_{2.5}$ 浓度还处在较高水平，实现美丽中国愿景还需付出长远努力。结合发达国家与我国 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势、$PM_{2.5}$ 暴露的健康影响，设计了我国中长期的清洁空气总体目标：至 2030 年全国绝大部分城市实现 35 μg/m^3 标准；2050 年时全国绝大部分地区实现 15 μg/m^3 的 WHO IT-3 目标值，部分城市可进一步实现 10 μg/m^3 的 WHO AQG 指导值。

（2）结合不同的能源转型及末端控制政策，构建了中国的未来排放情景，并评估了不同情景下的环境与健康效益。在政策情景和强化政策情景下， 2030 年 SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$ 排放相较 2015 年分别降低 49%-60%、34%-47%和 41%-47%，但 2030 年后减排幅度下降。在 2 度和 1.5 度路径下，2050 年 SO_2、 NO_x、$PM_{2.5}$ 较 2015 年分别下降 89%-94%、77%-89%和 82%-90%；较 2030 年的降幅分别达到 66%-76%、48%-71%和 55%-72%。

（3）政策情景下我国空气质量有所好转，但难以在 2030 年实现 35 μg/m^3 的目标；2 度情景可以在 2030、2050 年基本实现 35、15 μg/m^3 的目标，1.5 度情景有助于进一步实现 10 μg/m^3 目标。深度减排情景下我国空气质量将得到根本改善，人群暴露水平显著降低。

（4）相比政策情景，2030 年 2 度和 1.5 度情景可分别避免 24.2 万和 36.9 万人的过早死亡；2050 年时则分别避免了 135.9 万和 164.2 万人的过早死亡。需要同时强化能源和末端深度减排才能有效缓解未来人口变化导致的健康负担。

（5）在现有政策基础上，若要实现 15 μg/m^3 的目标值，能源转型将发挥重要主导作用，对 $PM_{2.5}$ 浓度下降的贡献在 69%以上；若要进一步实现 10 μg/m^3 的目标值，能源转型的贡献占比将进一步增加至 75%以上。

参考文献

1 WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. (2006).

2 中国气象局气候变化中心，2019.中国气候变化蓝皮书（2019）[R].北京.

3 大气环境质量标准 GB3095-1982.

4 环境空气质量标准（GB3095-1996）.

5 环境空气质量标准（GB3095-2012）.

6 Clarke, L. *et al.* CO2 emissions mitigation and technological advance: an updated analysis of advanced technology scenarios. (PNNL Report Pacific Northwest National Laboratory, Richmond, 2008).

7 Tong, D. *et al.* Dynamic projection of anthropogenic emissions in China: methodology and 2015-2050 emission pathways under a range of socioeconomic, climate policy, and pollution control scenarios (in review). *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2019-1125 (2020).

8 Burnett, R. T. *et al.* An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure. *Environ Health Perspect* **122**, 397-403, doi:10.1289/ehp.1307049 (2014).

9 Joeri Rogelj *et al.* Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development. In: Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global warming of 1.5 °C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. (2018). <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf>.

10 IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp., (2014).

11 Neill, B. C. T. *et al.* Eyring, Veronika *et al.* The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development* **9**, 3461-3482, doi:10.5194/gmd-9-3461-2016 (2016).

附表 1　2000-2018 年间我国四个主要的大气污染防治规划汇总

	《“十五”计划》	《“十一五”规划》	《“十二五”规划》	《大气污染防治行动计划》	《“打赢蓝天保卫战”三年行动计划》
覆盖时段	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2013-2017	2018-2020
综合目标	全国二氧化硫排放量下降 10%，“两控区”降 20%	确保到 2010 年 SO_2 排放量比 2005 年削减 10%	SO_2 排放下降 8%，NO_x 排放下降 10%	重点区域空气质量明显好转，京津冀、长三角、珠三角 $PM_{2.5}$ 浓度分别下降 25%、20%、15%	大幅减少污染物排放总量、协同减少温室气体；进一步明显降低 $PM_{2.5}$ 浓度；明显减少重污染天数
能源行业	以改善煤炭结构为导向，限制开采高硫煤			2017 年煤炭占能源消费比重降到 65%以下	2020 年煤炭消费比重降到 58%以下，电煤占比提高到 55%，非化石能源比重达到 15%；有效推进北方地区清洁采暖
电力/供热	以削减二氧化硫排放量为重点。	实施燃煤电厂脱硫工程；关停小火电	所有现役燃煤机组要淘汰或脱硫；单机容量 30 万千瓦以上的机组要全部脱硝；新建机组要脱硫脱硝；除尘改造	所有燃煤电厂都要脱硫；淘汰建成区中小燃煤锅炉	淘汰 30 万千瓦下煤电机组；重点区域严格控制新增煤电装机规模；建成区淘汰 10 蒸吨以下燃煤锅炉；重点区域 65 蒸吨燃煤锅炉超低排改造
钢铁/冶金	淘汰落后工艺	工业推广使用高效的布袋除尘设施；关停小钢铁	全面实施烧结机烟气脱硫，新建烧结机应配套建设脱硫脱硝设施；钢铁行业现役烧结（球团）设备全部使用高效除尘器	所有钢铁烧结机和球团设备安装脱硫设施	重点区域钢铁企业关停、搬迁、改造；进一步淘汰钢铁、焦化产能；钢铁行业超低排放改造；无组织排放深度治理

建材	淘汰落后技术，新型干法水泥产量的比重超过 20%	工业推广使用高效的布袋除尘设施；关停小水泥	新型干法水泥窑低氮燃烧技术改造；新建水泥生产线安装效率不低于 60%的脱硝设施；水泥除尘改造	新型干法窑低氮燃烧并脱硝；工业窑炉除尘设施升级改造	重污染水泥；玻璃企业搬迁；强化无组织排放管控；开展工业窑炉专项整治、加快不达标工业窑炉淘汰
其他工业			石油石化、有色、建材等行业的工业窑炉要进行脱硫改造；现有燃煤锅炉脱硫、新建锅炉的脱硫脱硝；20 蒸吨以上的锅炉使用高效除尘器	所有石油炼制和有色金属企业均脱硫；20 蒸吨以上燃煤锅炉脱硫；燃煤锅炉除尘升级改造	重点区域石化企业专项整治；出台化工行业泄露检测和修复标准；强化“散乱污”企业关停搬迁与升级改造；加强化工园区的集中整治
机动车		强化机动车污染防治	加速淘汰老旧汽车、黄标车，全面实施“国四”标准	提升燃油品质，加快淘汰黄标车和老旧车辆	调整运输结构，发展绿色交通；发展新能源车；2019 年起重点区域提前实施国六；加快老旧车淘汰

附表 2　各减排路径与排放情景的具体措施设置

情景	部门	能源气候政策	污染防治政策
政策情景	电力	1）至 2030 年，煤炭、非化石能源发电占比分别为 74.1%、22.9%；2050 年煤电占比降低至 64.6%，非化石能源发电占比提升至 32.0%	1）燃煤电厂实施《GB 13223-2011》排放标准
	工业	1）至 2030 年，钢铁、水泥落后产能分别淘汰 20%、24.1%；2050 年分别淘汰 32%、35.6%； 2）相较 2015 年， 2050 年时工业煤耗下降 25.5%，工业终端用能中煤炭占比将降低至 37.5%； 3）至 2030 年和 2050 年，工业电气化比例提升至 26.0%和 29.3%，氢能消费占比分别提升至 0.7%和 2.4%	1）各工业行业实施现行排放标准； 2）落实“十二五”规划与“大气十条”中相关行业的控制政策，钢铁、有色、水泥等重点工业行业的末端控制技术（高效 FGD、SCR、 FAB）安装比例提升 12%-25%，至 2020 年前实现特别排放限值； 3）淘汰 25MV 以下的工业燃煤锅炉
	民用	1）至 2030 年，民用燃煤比例降低至 17.0%，电力消费提升至 53.2%；至 2050 年，民用燃煤占比降低至 9.4%，电力占比提升至 58.1%	1）全国民用燃煤的平均硫份达到 0.8%；平均灰分达到 15%； 2）依据“大气十条”，加强对京津冀区域民用小锅炉的末端控制，淘汰建成区 25MV 以下的民用燃煤小锅炉
	交通	1)至 2030 年，燃气车和电动车比例分别提升至 5.3%和 1.7%；至 2050 年提升至 8.0%和 1.8%	1）轻型汽油车、重型柴油车 2017 年起实施“国五”标准； 2）轻型柴油车 2016 年起实施“国五”标准
	溶剂使用	-	1）印刷、喷涂行业执行已有排放标准；上海、广东实施发布的挥发性有机物排放标准
强化政策情景	电力	1）至 2030 年，煤炭、非化石能源发电占比分别为 64.6%、31.8%；2050 年煤电占比降低至 37.3%，非化石能源发电占比提升至 57.1%； 2）发电标煤耗降低 30%，电煤消耗较 2015 年下降 17.5%	1）燃煤电厂实施超低排放改造，且长三角地区率先完成； 2）其他电厂至 2025 年之前实现特别排放限值，之后实施超低排放改造
	工业	1）至 2030 年，钢铁、水泥落后产能分别淘汰 30%、31.1%；2050 年分别淘汰 45%、44.6%； 2）相较 2015 年，2030 与 2050 年时工业煤耗下降 19.6%和 52.2%，工业终端用	1）落实“蓝天保卫战”中相关行业的控制政策，钢铁、有色、建材等重点工业行业的末端控制技术（高效 FGD、SCR、 FAB）安装比例提升 30%-45%，工业无组织尘的控制效率提升 25%-35%； 2）至 2025 年，钢铁、水泥行业完成超低排放改造；

		能中煤炭占比降至 40.4%和 26.3%； 3）至 2030 年和 2050 年，工业电气化比例提升至 26.1%和 39.7%，氢能消费占比提升至 1.0%和 2.8%	3）加强化工行业的 LDAR 安装比例及末端控制，在 2025 年左右实现特别排放限值； 4）2025 年前淘汰 35MV 以下的工业燃煤锅炉,已有工业锅炉实现特别排放限值，2020-2025 年工业锅炉实施超低排放改造
	民用	1） 至 2030 年，民用燃煤比例降低至 15.5%，电力消费提升至 51.7%；至 2050 年，民用燃煤占比降低至 8.5%，电力占比提升至 59.0%； 2） 相较 2015 年，民用燃煤消费量在 2030 和和 2050 年时分别降低 8.4%和 58.0%	1）至 2030 年，全国民用燃煤的平均硫份达到 0.6%；平均灰分达到 12%； 2）依据“蓝天保卫战”，加强对京津冀及周边、汾渭平原民用小锅炉的末端控制，淘汰建成区 25MV 以下的民用燃煤小锅炉； 3）至 2030 年，淘汰 65%-70%的传统炉灶，推广生物质燃料清洁炉具
	交通	1)至 2030 年，交通燃油占比降低至 87.1%，电力和燃气消费占比分别提升 1.7%和 4.0%；至 2050 年时，燃油占比降低至 72.5%，电力和燃气占比分别提升至 12.4%和 12.2%，氢能消费推广至 1.5%	1）轻型汽油车 2017 年起实施"国五"标准，2019 年起实施"国六 a"标准，2022 年起实施"国六 b"标准； 2）重型汽油车 2020 年起实施"国五"标准，2022 年起实施"国六 a"标准，2025 年起实施"国六 b"标准； 3）轻型柴油车 2018 年起实施"国五"标准，2022 年起实施"国六 a"标准，2025 年起实施"国六 b"标准； 4）重型柴油车 2017 年起实施"国五"标准，2021 年起实施"国六 a"标准，2024 年起实施"国六 b"标准； 5）至 2030 年，非道路机械的综合排放系数较 2015 年降低 35%-40%
	溶剂使用	-	1）印刷、喷涂行业执行已有排放标准； 2）提升水溶性溶剂占比，至 2030 年时提升至 45%-55%； 3）提升 ACCA 等挥发性有机物回收与消除技术安装使用比例，至 2030 年时提升至 45%-55%
2度情景	电力	1）至 2030 年，煤炭、非化石能源发电占比分别为 40.1%、58.4%；2050 年煤电占比降低至 12.1%，非化石能源发电占比提升至 87.1%； 2）至 2050 年，发电标煤耗降低 52.5%，电煤消耗较 2015 年下降 65.8%	1）燃煤电厂实施超低排放改造，且长三角地区率先完成； 2）其他电厂至 2025 年之前实现特别排放限值，之后实施超低排放改造； 3）2030 年后各类型电厂逐步安装火电最佳污染物控制技术
	工业	1）至 2030 年，钢铁、水泥落后产能分别淘汰 45%、47.1%；2050 年分别淘汰 60%、56.8%； 2）相较 2015 年，2030 与 2050 年时工业煤耗下降 25.3%和 74.1%，工业终端用能中煤炭占比降至 37.9%和 9.9%； 3）至 2030 年和 2050 年，工业电气化比例提升至 31.0%和 54.5%，氢能消费占比提升至 3.8%和 19.9%	1）落实“蓝天保卫战”中相关行业的控制政策，钢铁、有色、建材等重点工业行业的末端控制技术（高效 FGD、SCR、 FAB）安装比例提升 35%-50%，工业无组织尘的控制效率提升 30%-40%； 2）至 2025 年，钢铁、水泥行业完成超低排放改造； 3）加强化工行业的 LDAR 安装比例及末端控制，在 2025 年左右实现特别排放限值； 4）2025 年前淘汰 25MV 以下的工业燃煤锅炉,已有工业锅炉实现特别排放限值，2020-2025 年工业锅炉实施超低排放改造； 5）2030 年之后，工业锅炉、钢铁、有色、建材、化工等高污染行业逐步安装行业最佳污染物控制技术

	民用	1） 至 2030 年，民用燃煤比例降低至 12.9%，电力消费提升至 54.1%；至 2050 年，民用燃煤占比降低至 3.1%，电力占比提升至 63.0%；传统民用生物质在 2025 年前被取代； 2） 相较 2015 年，民用燃煤消费量在 2030 和和 2050 年时分别降低 39.4%和 87.2%	1）至 2030 年，全国民用燃煤的平均硫份达到 0.6%；平均灰分达到 12%，至 2050 年进一步降低至 0.4%和 10%以下； 2）加强对全国民用小锅炉的末端控制，淘汰建成区 25MV 以下的民用燃煤小锅炉； 3）至 2050 年，淘汰全部的传统炉灶，推广生物质燃料清洁炉具
	交通	1) 至 2030 年，交通燃油占比降低至 75.8%，电力、燃气和氢能消费占比分别提升 11.7%、8.2%和 4.2%；至 2050 年时，燃油占比降低至 45.8%，电力、燃气和氢能占比分别提升至 24.2%、21.1%和 8.9%； 2) 交通燃油经济性得到提升； 3) 至 2050 年时交通燃油消费量较 2015 年降低 27.6%	1）轻型汽油车 2017 年起实施"国五"标准，2019 年起实施"国六 a"标准，2022 年起实施"国六 b"标准，2030 年起逐步实施"国七(假设)"标准； 2）重型汽油车 2020 年起实施"国五"标准，2022 年起实施"国六 a"标准，2025 年起实施"国六 b"标准，2040 年起逐步实施"国七(假设)"标准； 3）轻型柴油车 2018 年起实施"国五"标准，2022 年起实施"国六 a"标准，2025 年起实施"国六 b"标准，2035 年起逐步实施"国七(假设)"标准； 4）重型柴油车 2017 年起实施"国五"标准，2021 年起实施"国六 a"标准，2024 年起实施"国六 b"标准，2040 年起逐步实施"国七(假设)"标准； 5）至 2030 年，非道路机械的综合排放系数降低至 2015 年的 60%-55%；至 2050 年进一步降低至 40%-35%
	溶剂使用	-	1）提升水溶性溶剂占比，至 2030 年时提升至 45%-55%，至 2050 年时提升至 100%； 2）提升 ACCA 等挥发性有机物回收与消除技术安装使用比例，至 2030 年时提升至 45%-55%，至 2050 年时提升至 100%
1.5 度情景	电力	1）至 2030 年，煤炭、非化石能源发电占比分别为 30.9%、65.6%；2050 年煤电占比降低至 6.8%，非化石能源发电占比提升至 89.2%； 2）发电标煤耗降低 65%，电煤消耗较 2015 年下降 89.6%	同 2 度情景
	工业	1）至 2030 年，钢铁、水泥落后产能分别淘汰 50%、52%；2050 年分别淘汰 77%、82%； 2）相较 2015 年，2030 与 2050 年时工业煤耗下降 41.2%和 87.9%，工业终端用能中煤炭占比降至 32.1%和 3.1%； 3）至 2030 年和 2050 年，工业电气化比例提升至 36.2%和 58.9%，氢能消费占	同 2 度情景

	比提升至 6.5%和 27.8%	
民用	3） 至 2030 年，民用燃煤比例降低至 11.0%，电力消费提升至 55.6%；至 2050 年，民用燃煤占比降低至 0.6%，电力占比提升至 68.0%；传统民用生物质在 2025 年前被取代； 相较 2015 年，民用燃煤消费量在 2030 和和 2050 年时分别降低 51.2%和 95.0%	同 2 度情景
交通	1) 至 2030 年，交通燃油占比降低至 69.2%，电力、燃气和氢能消费占比分别提升 15.7%、10.6%和 4.5%；至 2050 年时，燃油占比降低至 24.8%，电力、燃气和氢能占比分别提升至 38.7%、24.6%和 11.9%； 2) 交通燃油经济性进一步提升； 3) 至 2050 年时交通燃油消费量较 2015 年降低 81.1%	同 2 度情景
溶剂使用	-	同 2 度情景

附表 3　不同情景下未来城市及站点 $PM_{2.5}$ 浓度变化及达标情况

情景	年份	空气质量目标		区域															
				全国				京津冀及周边（226 城市）				汾渭平原				长三角			
		$PM_{2.5}$ 年均限值	$PM_{2.5}$ 日均限值	年均浓度	城市年均浓度达标率	站点年均浓度达标率	城市日均浓度达标率	年均浓度	城市年均浓度达标率	站点年均浓度达标率	城市日均浓度达标率	年均浓度	城市年均浓度达标率	站点年均浓度达标率	城市日均浓度达标率	年均浓度	城市年均浓度达标率	站点年均浓度达标率	城市日均浓度达标率
政策情景	2015	35	75	53.1	29%	17%	82%	81.3	0%	0%	57%	60.4	0%	0%	78%	55.0	8%	4%	81%
	2025	35	75	26.2	92%	89%	96%	41.6	29%	29%	87%	28.8	100%	95%	94%	25.6	100%	100%	98%
	2030	35	75	21.2	97%	95%	98%	34.7	68%	62%	91%	22.9	100%	100%	97%	20.9	100%	100%	99%
		25	50		89%	84%	94%		18%	17%	83%		82%	88%	92%		96%	93%	97%
	2035	35	75	20.0	98%	96%	98%	33.0	82%	69%	93%	21.3	100%	100%	97%	19.8	100%	100%	100%
		25	50		91%	88%	95%		25%	24%	85%		91%	97%	93%		96%	95%	97%
	2050	15	35	17.0	76%	69%	94%	26.9	4%	5%	82%	16.6	64%	66%	92%	16.0	69%	65%	96%
		10	25		39%	27%	88%		0%	0%	70%		0%	0%	86%		15%	9%	90%
强化政策	2015	35	75	53.1	29%	17%	82%	83.3	0%	0%	57%	60.4	0%	0%	78%	55.0	8%	4%	81%
	2025	35	75	24.6	95%	92%	96%	39.1	50%	42%	88%	28.2	100%	97%	93%	23.0	100%	100%	98%
	2030	35	75	19.3	98%	97%	98%	31.7	89%	76%	92%	21.8	100%	99%	96%	18.1	100%	100%	100%
		25	50		92%	89%	95%		32%	28%	85%		91%	97%	92%		100%	100%	98%
	2035	35	75	17.3	98%	98%	99%	28.9	90%	85%	96%	19.4	100%	100%	98%	16.3	100%	100%	100%

情		25	50		95%	93%	96%		54%	47%	88%		100%	97%	94%		100%	100%	99%
景		15	35		91%	88%	97%		32%	29%	88%		100%	97%	95%		100%	100%	99%
	2050			12.1				21.3				13.4				11.3			
		10	25		65%	61%	93%		0%	1%	80%		9%	35%	90%		77%	66%	97%
	2015	35	75	53.1	29%	17%	82%	81.3	0%	0%	57%	60.4	0%	0%	78%	55.0	8%	4%	81%
	2025	35	75	23.5	95%	93%	97%	37.2	58%	47%	90%	26.2	100%	99%	95%	23.0	100%	100%	99%
		35	75		99%	98%	98%		93%	87%	93%		100%	100%	98%		100%	100%	100%
2 度	2030			18.2				30.0				20.2				18.0			
		25	50		93%	91%	96%		36%	34%	86%		100%	97%	94%		100%	100%	98%
情		35	75		99%	99%	99%		96%	92%	95%		100%	100%	98%		100%	100%	100%
景	2035			16.1				27.0				17.8				15.8			
		25	50		96%	94%	97%		64%	54%	89%		100%	99%	95%		100%	100%	99%
		15	35		97%	94%	98%		95%	78%	90%		100%	99%	96%		100%	100%	100%
	2050			10.3				16.1				11.6				9.5			
		10	25		82%	78%	95%		4%	5%	84%		64%	62%	93%		96%	93%	98%
	2015	35	75	53.1	29%	17%	82%	81.3	0%	0%	57%	60.4	0%	0%	78%	55.0	8%	4%	81%
	2025	35	75	21.7	97%	95%	97%	34.5	68%	58%	91%	24.6	100%	100%	95%	21.1	100%	100%	99%
		35	75		99%	99%	99%		96%	94%	94%		100%	100%	99%		100%	100%	100%
1.5	2030			16.9				27.8				18.9				16.3			
		25	50		95%	93%	97%		54%	48%	88%		100%	97%	80%		100%	100%	95%
度		35	75		100%	100%	100%		100%	99%	96%		100%	100%	100%		100%	100%	100%
情	2035			14.6				24.8				16.4				14.2			
景		25	50		97%	96%	98%		75%	69%	90%		100%	99%	96%		100%	100%	99%
		15	35		99%	97%	98%		98%	89%	97%		100%	100%	98%		100%	100%	100%
	2050			9.1				14.4				10.7				8.6			
		10	25		87%	84%	96%		11%	12%	86%		82%	77%	94%		100%	96%	99%