

减污降碳背景下的空气质量管理

贺克斌

清华大学环境学院 清华大学碳中和研究院

2024-08-29, 上海



报告内容

- 背景与进展
- 问题与挑战
- 协同路径分析
- 未来展望

“双碳”目标与空气质量改善目标具有高度一致性

碳达峰碳中和

二氧化碳排放量在
2030年左右达到峰值
并争取尽早达峰

争取2060年前实现
碳中和

2030

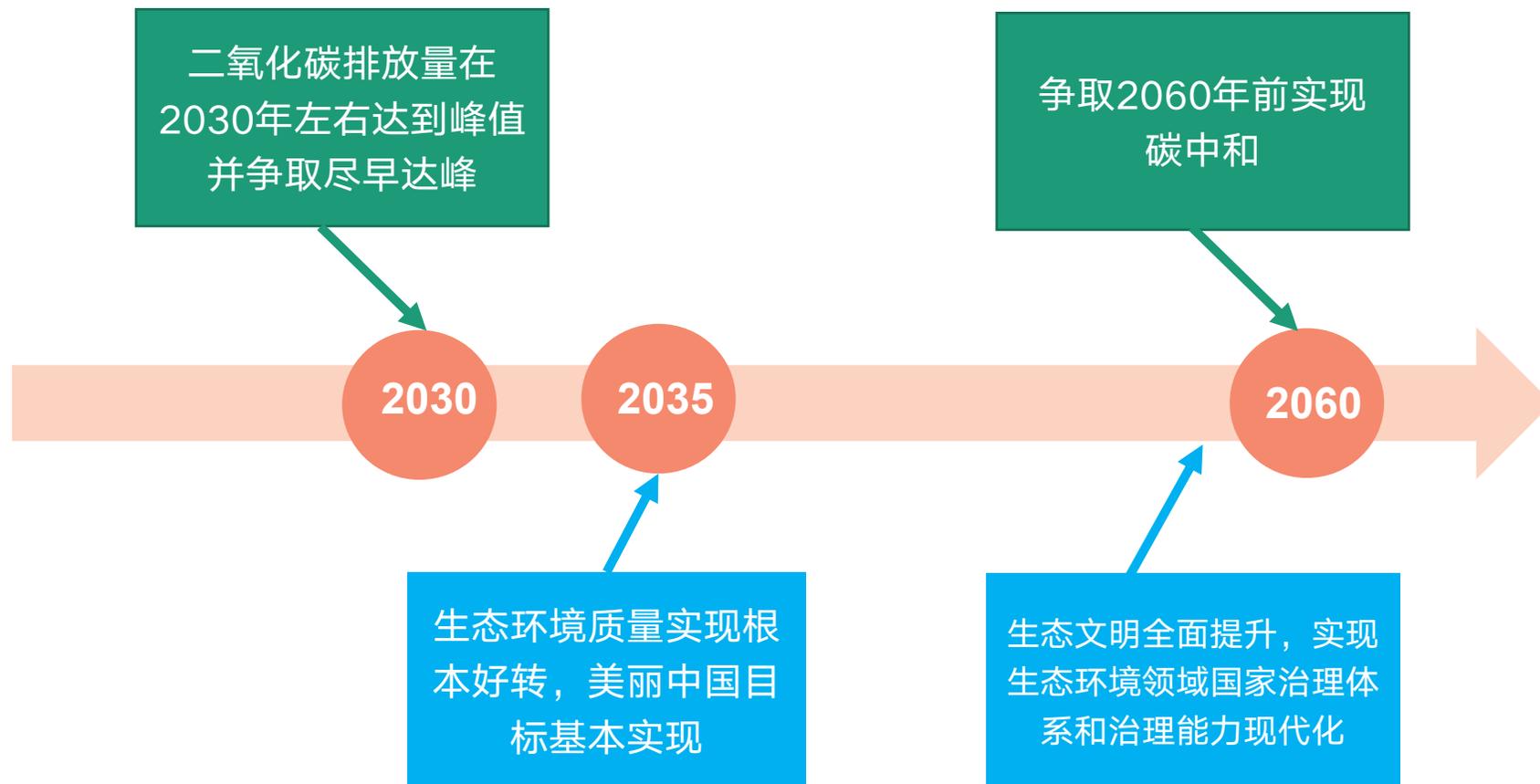
2035

2060

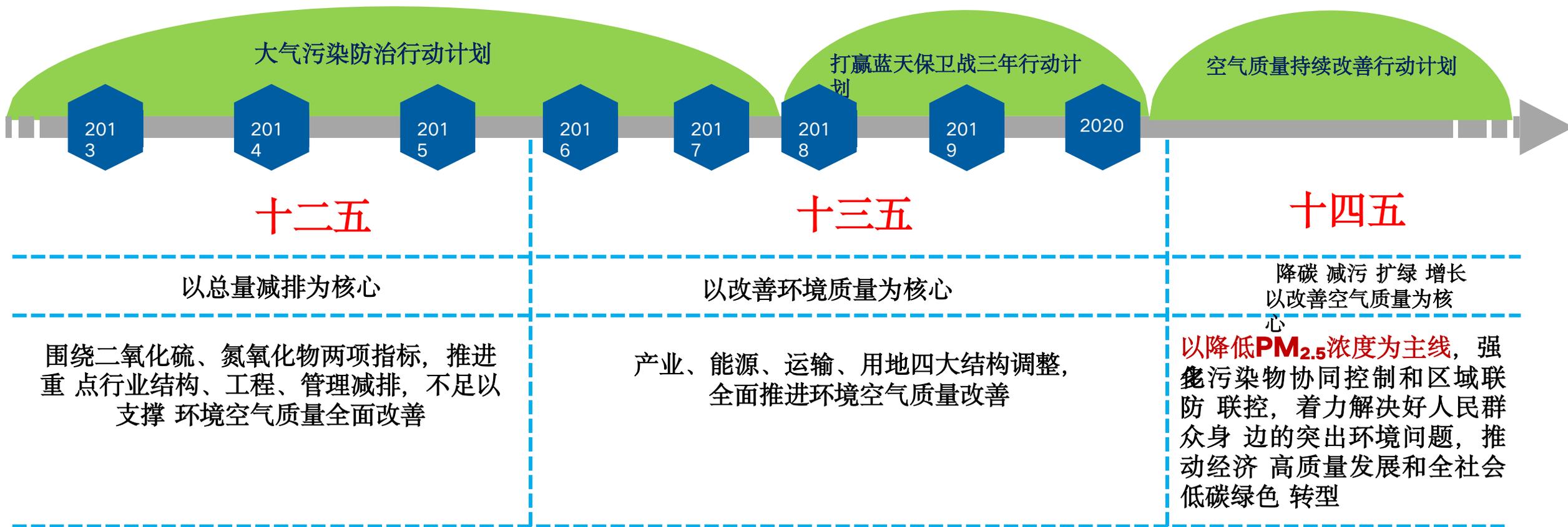
空气质量改善

生态环境质量实现根本
好转，美丽中国目标
基本实现

生态文明全面提升，实现
生态环境领域国家治理体
系和治理能力现代化



大气污染防治顶层设计



Major clean air actions implemented 2013-2020

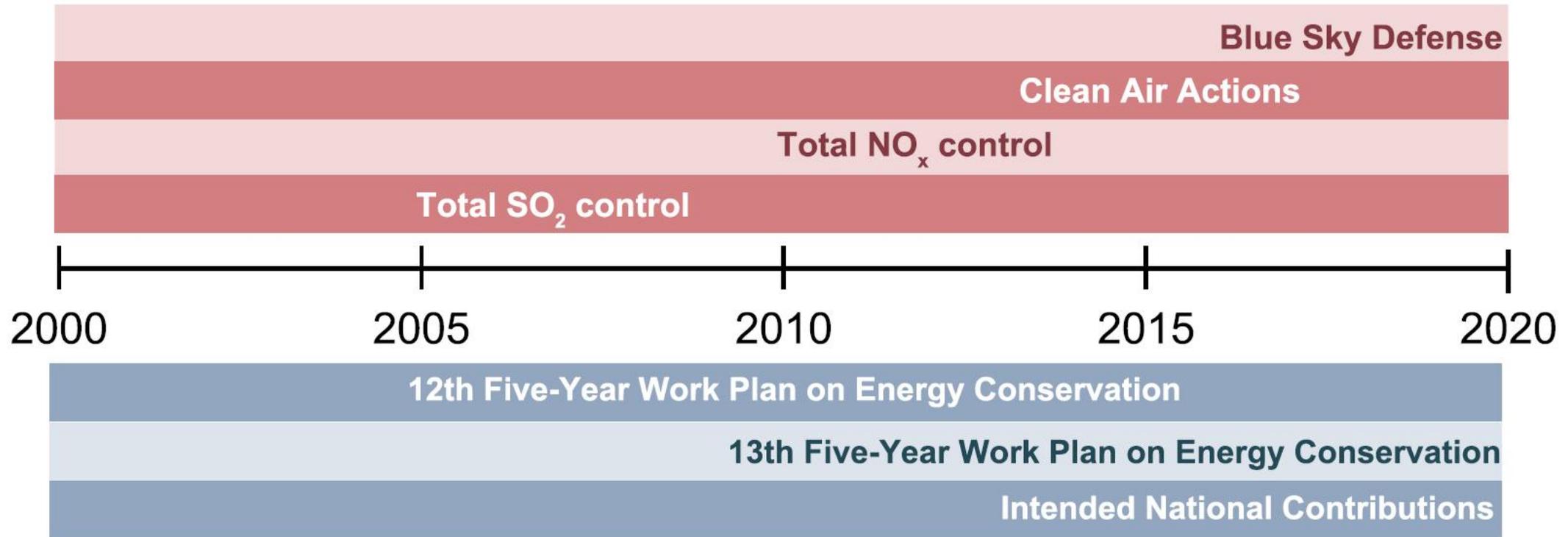


	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
 Ultra-low emission retrofits of coal-fired power plants	Deadline governance for desulfurization, denitrification and dust removal in the power industry			71% completed ultra-low emission retrofits		88% completed ultra-low emission retrofits		
 In-depth governance of non-power industries	Deadline governance for desulfurization, denitrification and dust removal in the steel, cement and flat glass industries				620 million tons of crude steel capacity started ultra-low emission retrofits			
 VOCs integrated control	Completed more than 50,000 VOCs control projects							
 Integrated control of coal-fired boilers	Phased out more than 200,000 small coal-fired boilers					Phased out more than 110,000 coal-fire boilers Basically eliminated coal-fired boilers		
 Clean heating in rural areas							Launched a pilot program for clean heating in winter in the northern region Completed the bulk coal substitution in 25	
 Mobile source emission control	Fully implemented National IV standard (National V Standard in key areas)			Fully implemented National V standard		Fully implemented National VI Standard for light vehicles		
 Integrated control of agriculture	The application area of soil testing and formulated fertilization technology reached 133 million hectares, and the open burning of straw was effectively controlled							
 Integrated control of fugitive dust	More than 230,000 cases of construction related fugitive dust were controlled nationwide; the machine sweeping rate of urban roads in key areas exceeded 90%; more than 30,000 hectares of mine land were restored; more than 10 million hectares of green land were newly created							



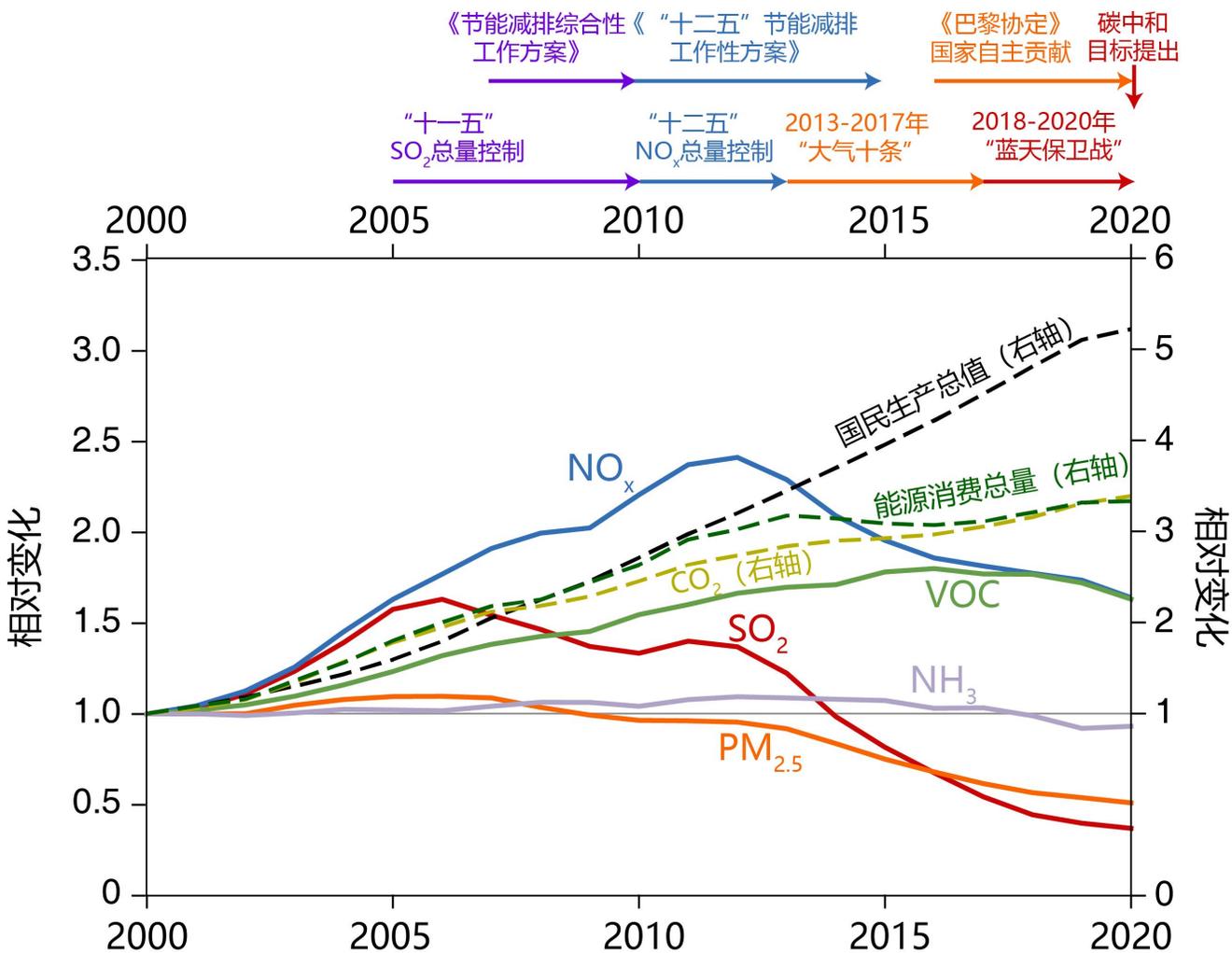
Impact of anthropogenic activities on atmospheric environment

Air pollution control policy



Energy and climate policy

中国主要大气污染物排放量的攀升势头逐步被遏制



2013年以来随着《大气十条》的实施，大气污染防治领域实现历史性变革，主要大气污染物排放量迅速下降。

全国SO₂、NO_x和一次PM_{2.5}排放量已分别于2006、2012和2006年达到峰值，2020年排放量相较峰值分别下降了77%、32%和53%；

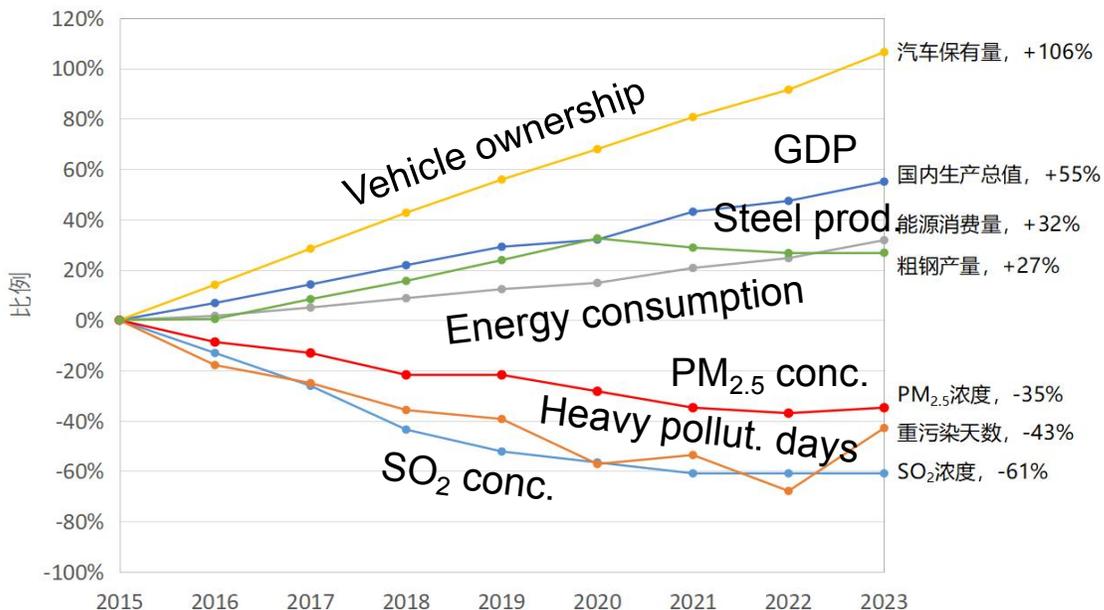
VOCs和NH₃的减排是过去大气污染防治的薄弱环节，排放量长期居高难下。2017年以来VOCs和NH₃排放首次出现拐点，但减排幅度较小。

空气质量改善成效显著，获得高度认可



较2015年，2023年在中国**GDP增加55%**，**汽车保有量增加106%**的情况下：

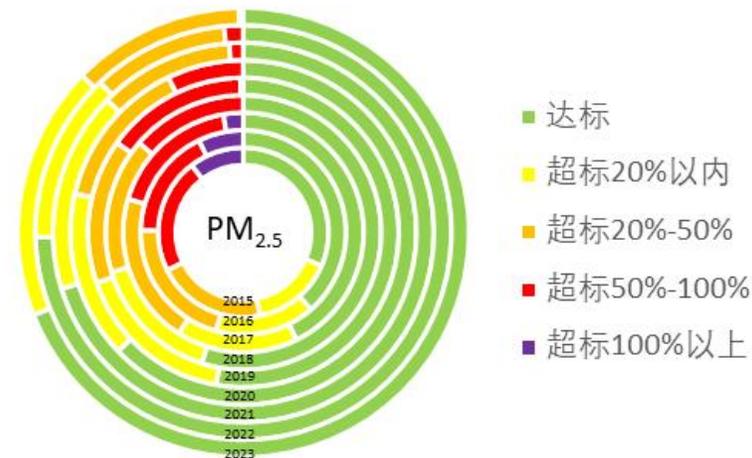
- **PM_{2.5}浓度下降35%**，**重污染天数减少43%**
- **空气质量达标城市数量由99个提高至203个**，**增幅105%**
- **大气污染与经济社会发展实现脱钩**



经济发展

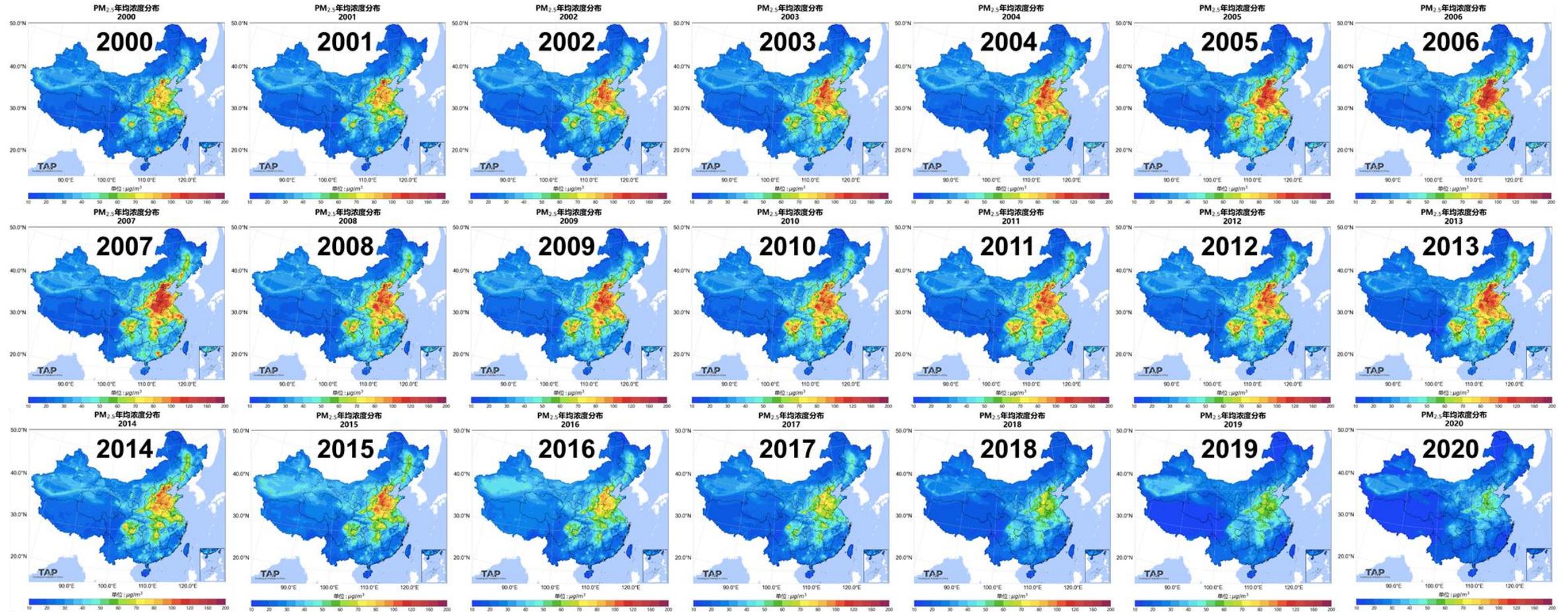


环境向好

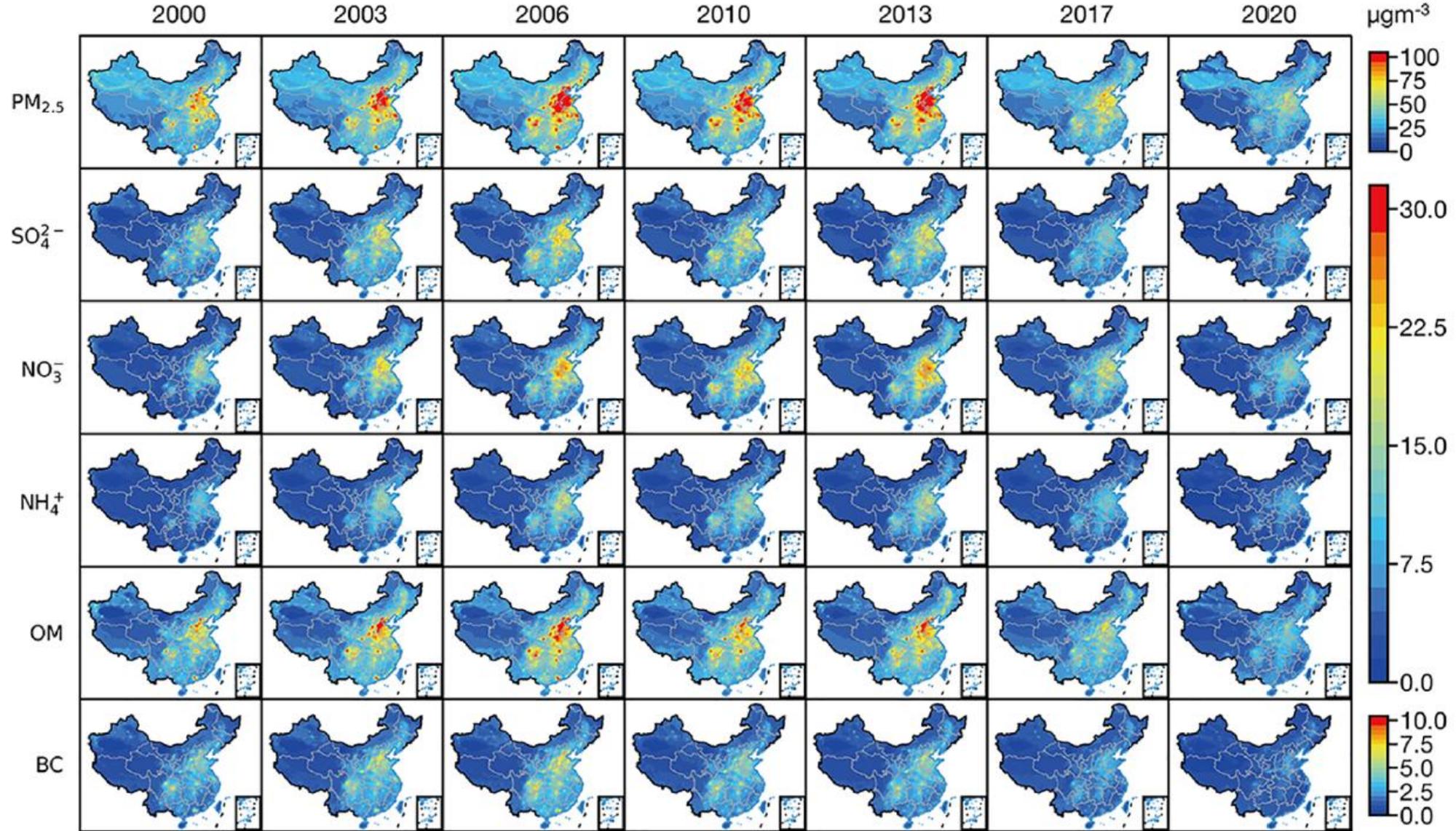


城市大气污染物浓度达标情况

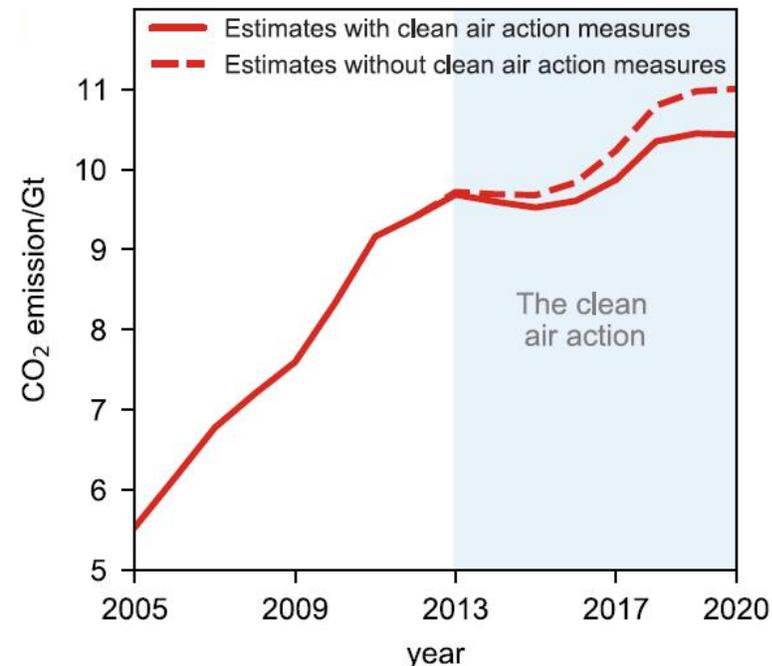
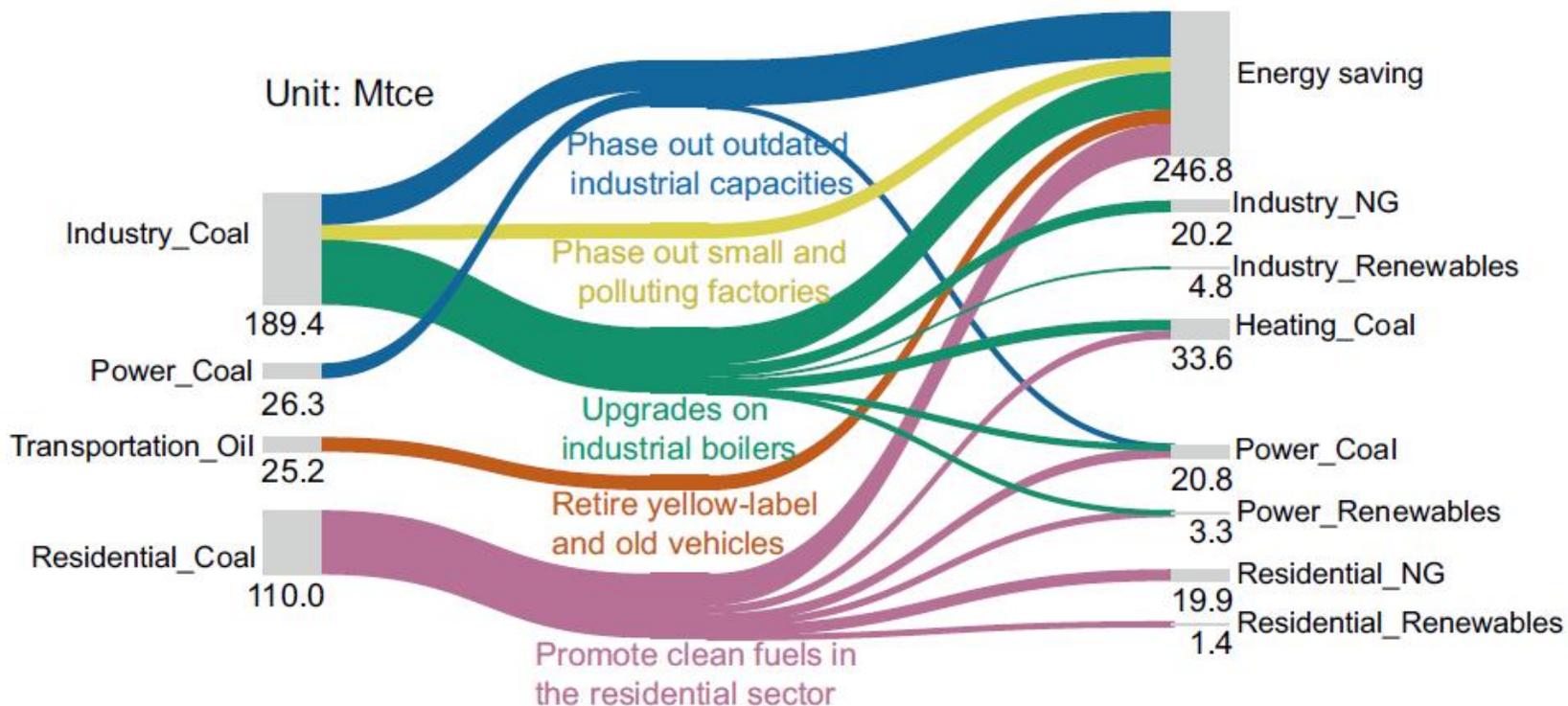
2000年以来PM_{2.5}浓度变化情况



Long-term variation in PM_{2.5} composition 2000–2020



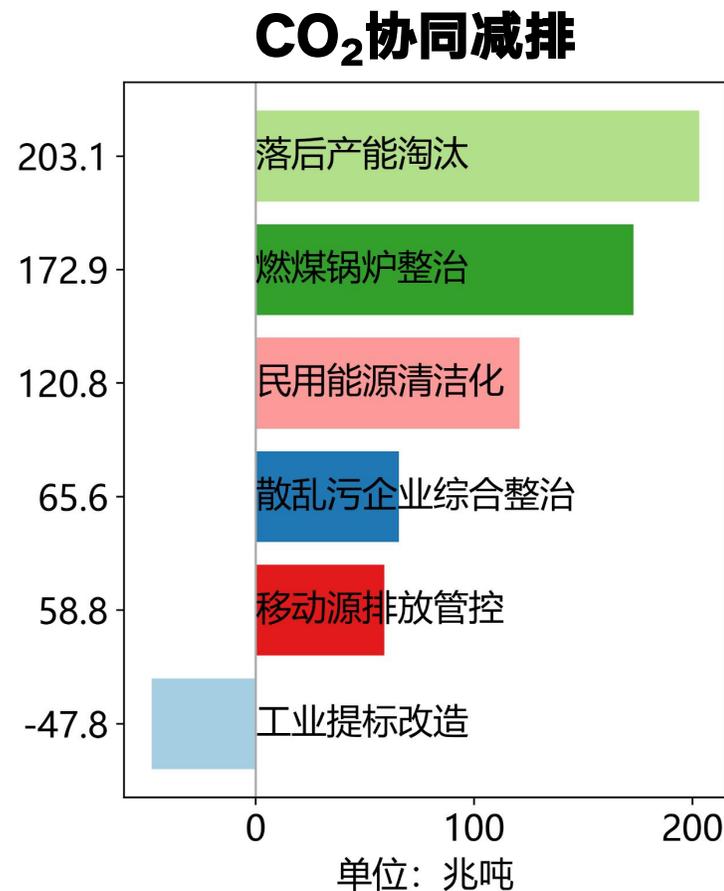
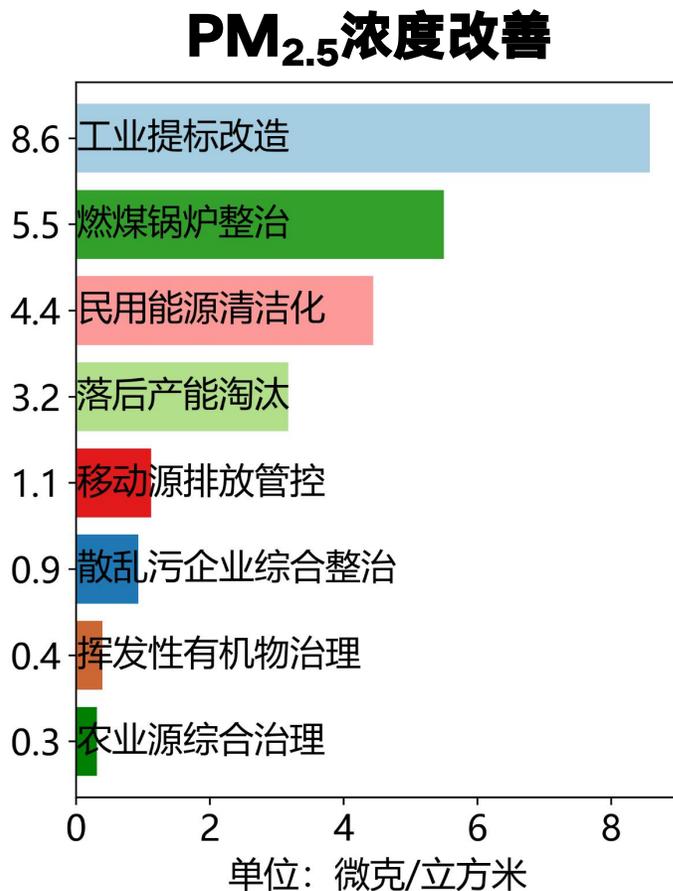
清洁空气行动实施推动能源转型与CO₂减排



2013-2020年清洁空气行动措施对能源消费结构的影响

清洁空气行动推动结构转型措施落地，13-20年间累计节能10.6亿吨标准煤，减排CO₂ 24.3亿吨

各类减排措施的减污降碳协同效益



落后产能淘汰、燃煤锅炉淘汰、民用能源清洁化等多项结构转型相关措施取得显著协同减排效益

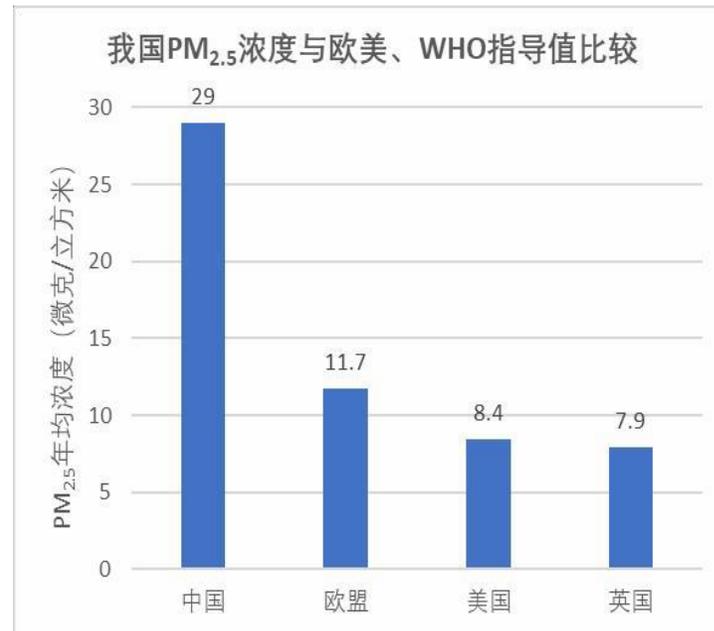
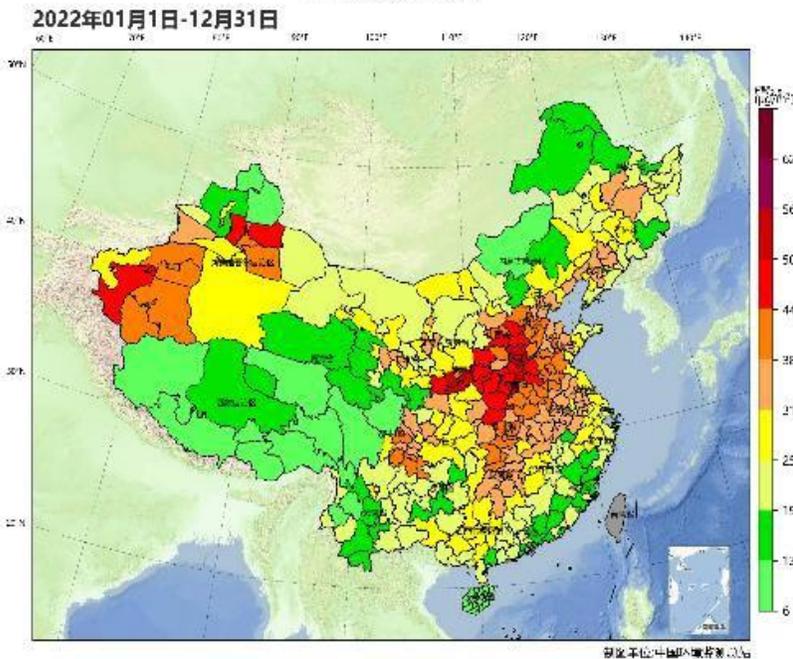
报告内容

- 背景与进展
- 问题与挑战
- 协同路径分析
- 未来展望

PM_{2.5}浓度水平依然处于高位

- ▶ **2022年**，全国仍有**超过四分之一**的城市**PM_{2.5}年均浓度超标**（**35**微克/立方米）
- ▶ **重点区域污染突出**：京津冀及周边地区和汾渭平原**PM_{2.5}平均浓度**分别为全国平均浓度**1.5**和**1.6**倍
- ▶ **与国际先进水平差距仍然很大**：全国**PM_{2.5}浓度**是**WHO**准则值（**5**微克/立方米）的**5.8**倍，是欧美当前水平的**2~4**倍
- ▶ **空气质量与发达国家历史同期还有较大差距**

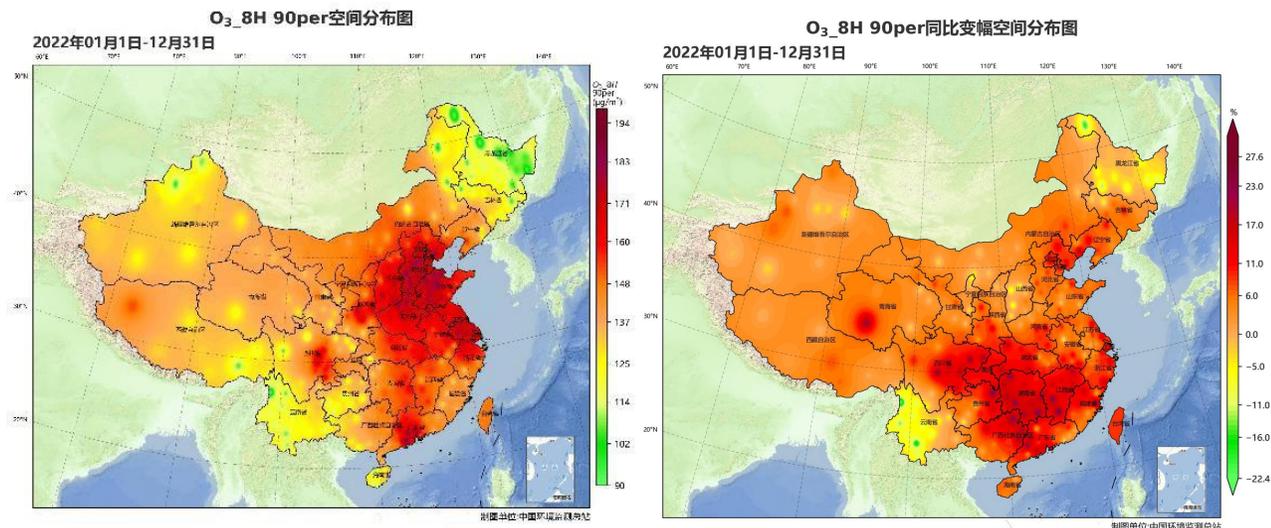
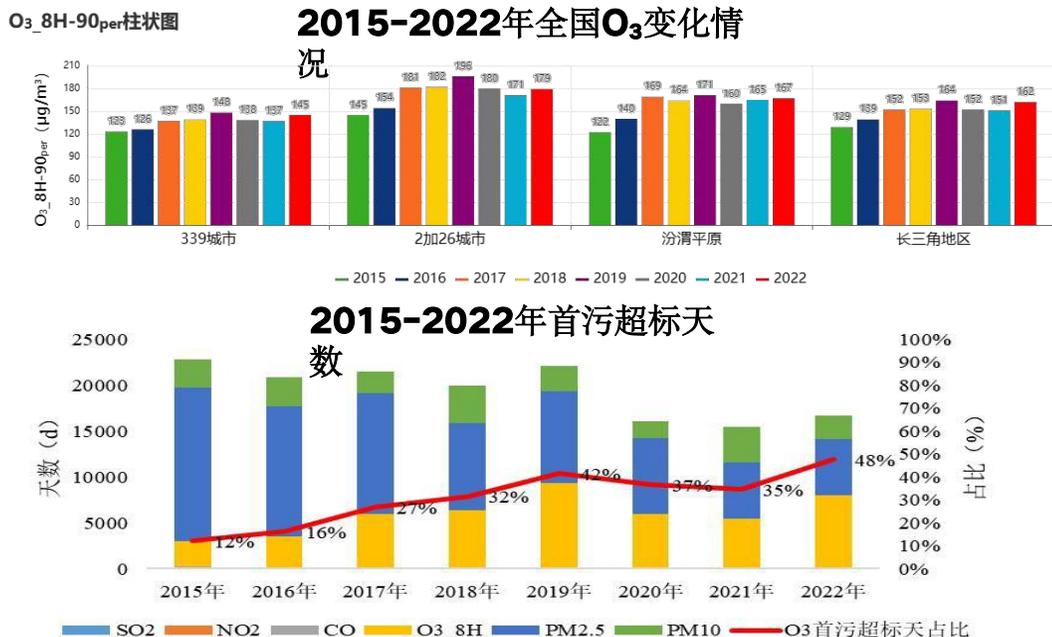
PM_{2.5}空间分布图



国家	2021年人均GDP (万美元)	目前PM _{2.5} 浓度 (µg/m³)	人均GDP达到2-2.5万美元水平年份	当年PM _{2.5} 浓度 (µg/m³)
中国	1.25	30	2035年	25
韩国	3.18	25	2006年	30左右
意大利	3.3	17	1990-2002	22左右
西班牙	2.96	10	2003-2005	13左右
法国	4.04	12	1990-2002	18-23
日本	4	12	1987-1989	26左右
德国	4.63	12	1990-1991	31左右
英国	4.23	10	1995-	21左右

O₃污染问题逐渐凸显

- ▶ **2022年**，全国O₃平均浓度为**145**微克/立方米，比**2015年**上升**17.9%**；京津冀及周边地区、长三角、汾渭平原等区域均有所反弹
- ▶ 超标天占比达**48%**，逐渐成为优良天数比例最主要因素
- ▶ 超标城市数量明显增加：**超标城市数量从2015年的19个增加到2022年的82**
↑



重污染天气依然高发频发

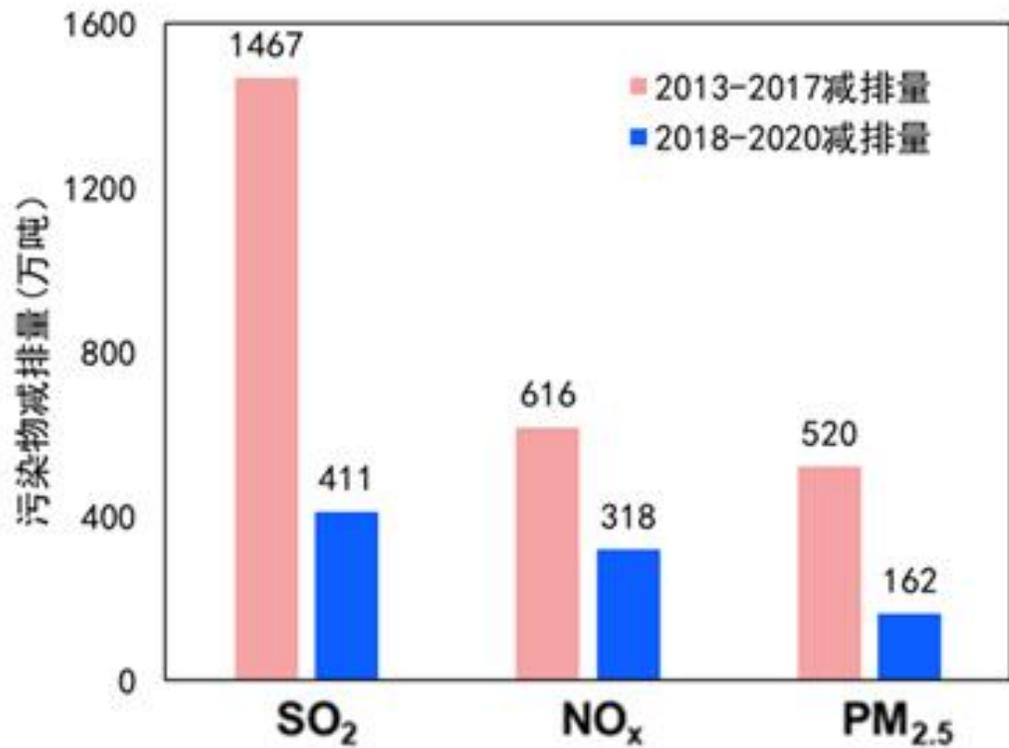
“十四五”要求基本消除重污染天气，即重污染天数比例低于**1%**

- ▶ 扣除沙尘后，2022年全国重污染天数比例为0.9%，但仍有**4个省份**（河南、新疆、河北、陕西）、**55个城市**超过1%，其中**29个城市**超过2%
- ▶ 部分区域重污染天气易发多发。主要集中在京津冀及周边地区、汾渭平原、天山北坡城市群；其中天山北坡城市群重污染天数比例明显高于其他区域
- ▶ 重污染天气过程**PM_{2.5}**贡献大。约**56%**的重度及以上污染由PM_{2.5}引起；主要发生在秋冬季

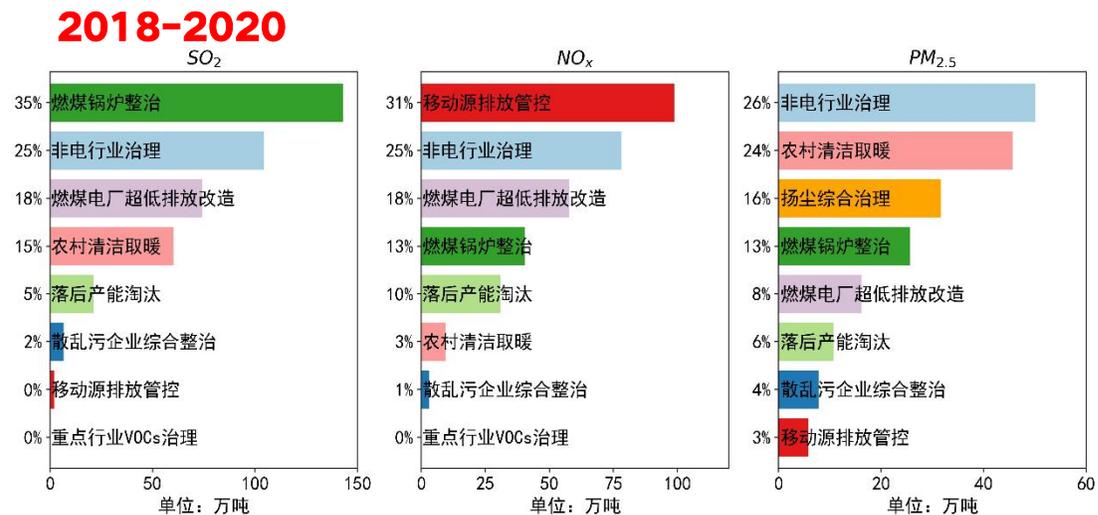
城市	重污染天数比例	城市	重污染天数比例
五家渠市	14.2%	菏泽市	3.0%
石河子市	12.6%	平顶山市	3.0%
昌吉州	8.5%	衡水市	2.7%
濮阳市	4.1%	哈尔滨市	2.7%
乌鲁木齐市	4.1%	西安市	2.7%
开封市	3.8%	渭南市	2.7%
漯河市	3.8%	保定市	2.5%
许昌市	3.6%	德州市	2.5%
咸阳市	3.6%	襄阳市	2.5%
新乡市	3.6%	郑州市	2.5%
邢台市	3.6%	绥化市	2.2%
邯郸市	3.3%	聊城市	2.2%
安阳市	3.3%	荆门市	2.2%
鹤壁市	3.3%	商丘市	2.2%
周口市	3.3%		

2022年重污染天数比例超过2%的城市（扣除沙尘）

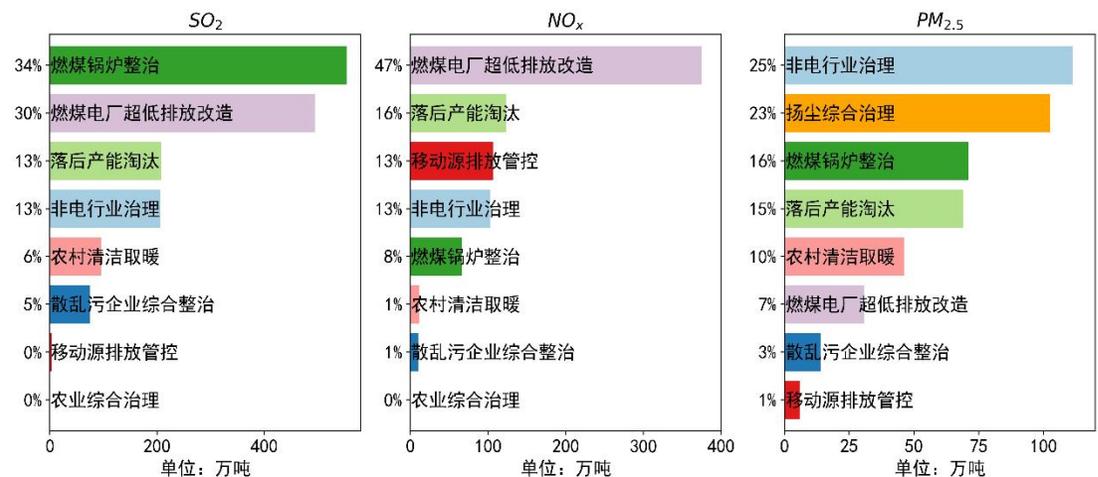
末端治理减排潜力逐渐收窄



2013-2017与2018-2020污染物减排量对比



2013-2017



2013-2020年不同治理措施对污染物减排的贡献

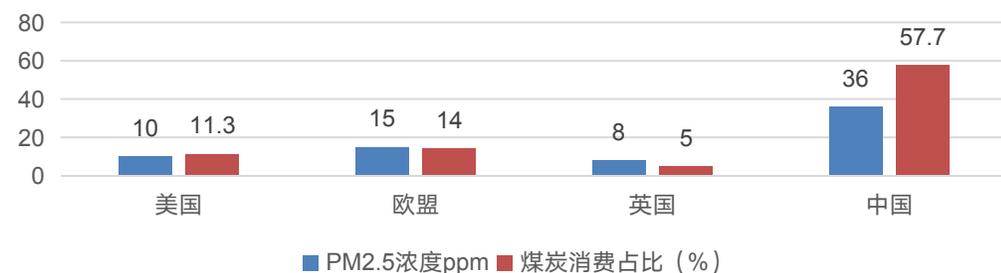
随着清洁空气行动深入开展，末端治理措施的减排潜力逐渐收窄，结构转型的减排潜力亟待释放

生态环境结构性矛盾突出

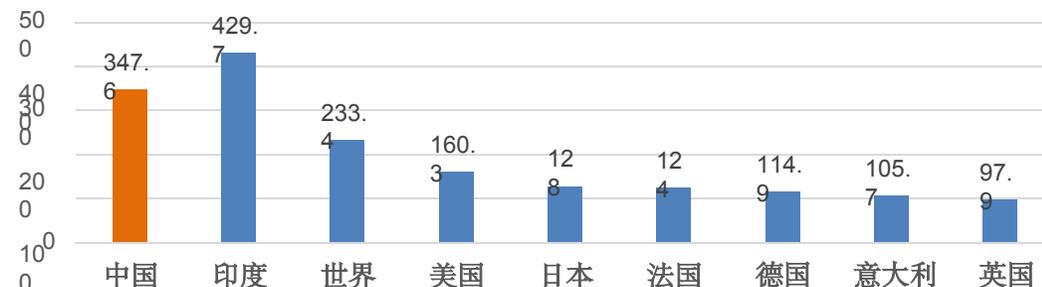
- **以重化工为主的产业结构、以煤为主的能源结构、以公路货运为主的运输结构没有根本改变。**2022年我国经济总量占世界18%，但粗钢、水泥产量和煤炭消费量分别占世界总量的**53.9%、51.3%和54.2%**
- 煤炭消费比重2022年56.2%，反弹0.3个百分点，显著高于美国12.0%、德国17.5%、日本26.3%、韩国和澳大利亚27.8%，世界平均27.0%
- 2022年我国非化石能源消费比重为17.5%，同比提高0.8个百分点，与年均增长1个百分点目标仍有差距，还未达到2030年碳达峰方案序时进度
- 我国单位GDP能耗和单位GDP碳排放强度分别为3.4吨标煤/万美元、6.9吨二氧化碳/万美元，高于世界平均水平，远高于美国、日本、德国等发达国家

地区	粗钢产量	煤炭消耗	乘用车
美国（937万km ² ）	0.88亿吨	5.4亿吨	2.8亿辆
欧洲（28国）	3亿吨	5亿吨	3.5亿辆
中国（960万km ² ）	10亿吨	40亿吨	3.2亿辆

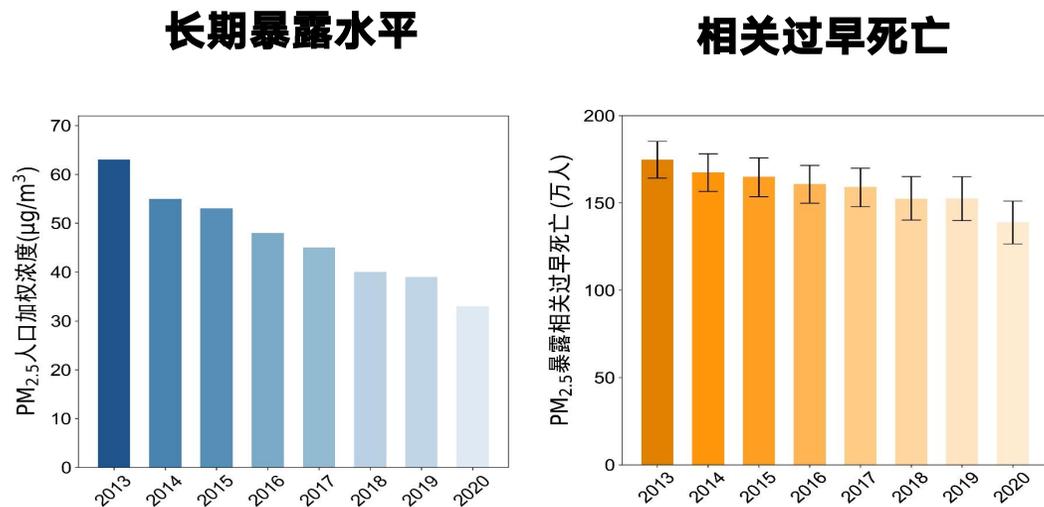
2019年PM2.5浓度（ppm）与煤炭占比（%）



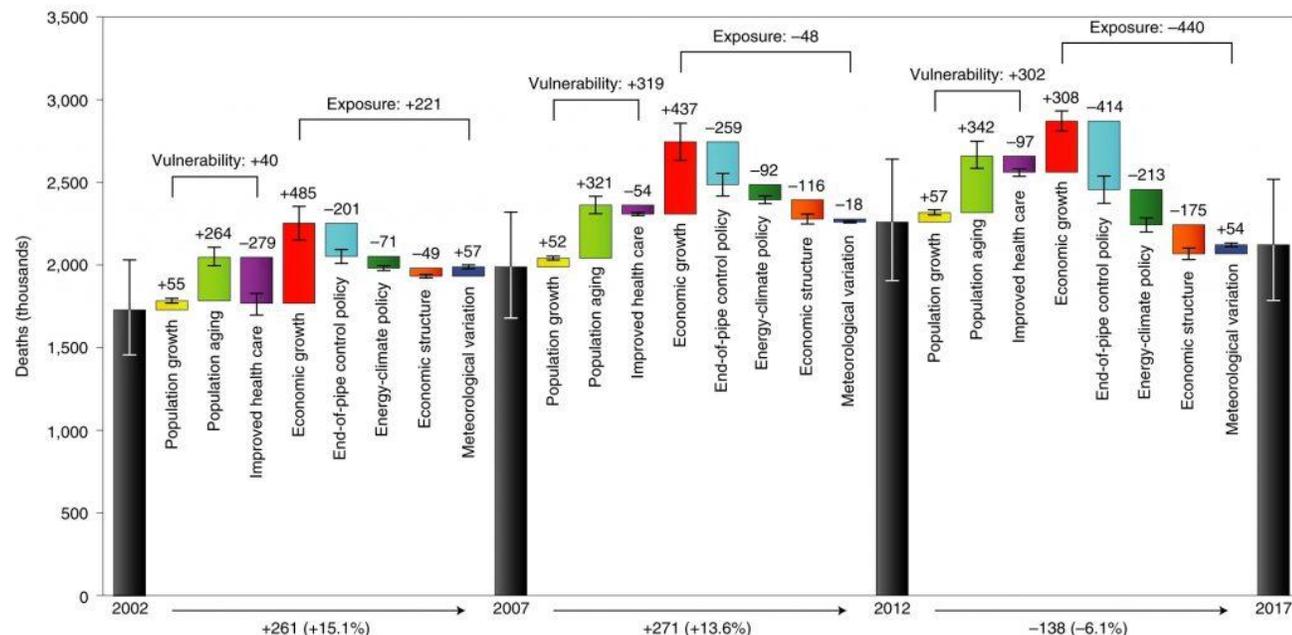
2018年国家单位GDP能耗（吨标煤/百万美元）



人口老龄化部分抵消了空气污染改善的健康效益



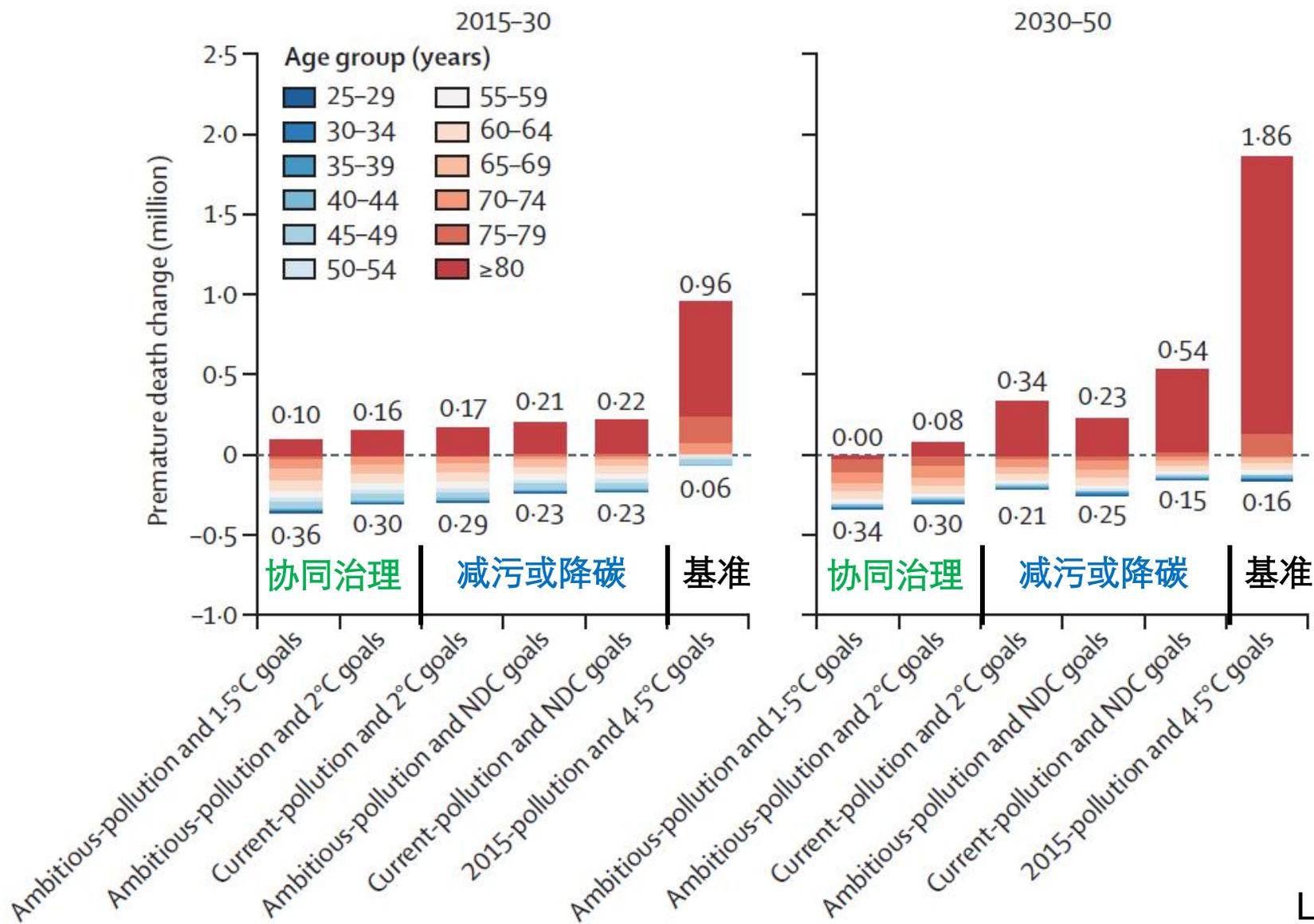
2013-2020年PM_{2.5}污染暴露及健康损失变化



PM_{2.5}污染健康损失变化的主要驱动因素

- ▶ 大气十条减排措施推动2013-2020年间PM_{2.5}暴露水平下降48%，相关过早死亡人数降低20%
- ▶ 人口老龄化导致对空气污染暴露的脆弱人群增加，部分抵消了污染改善的健康效益。

减污降碳协同治理能够最大限度保护敏感人群健康



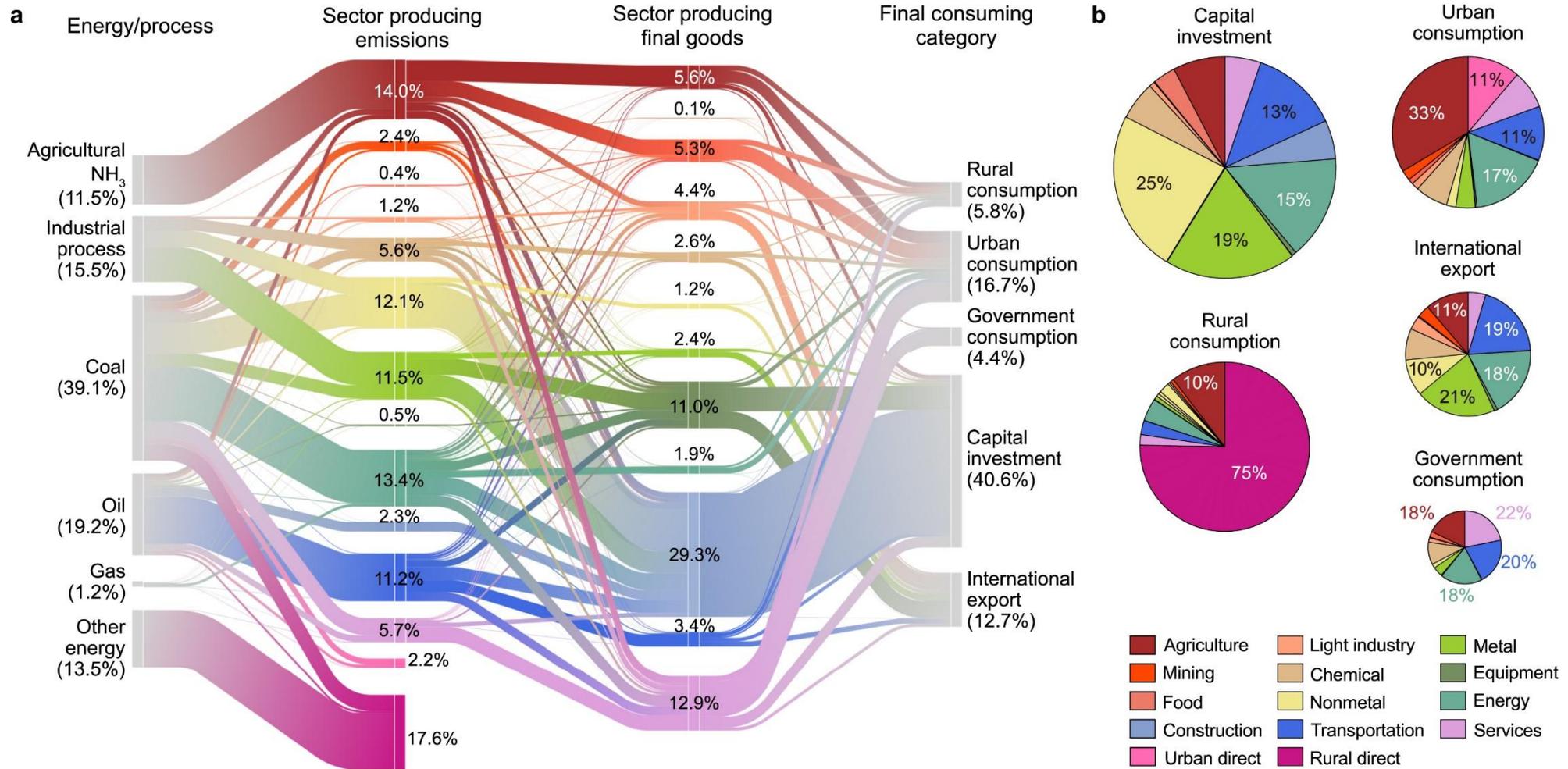
评估了18种可能的减排路径下中国未来空气质量变化和 health 影响：

- 发现大多数减排路径下空气质量的改善无法抵消老龄化的负面影响；
- 由于未来老龄化人群对空气污染的脆弱性逐步增加，单独实施减污或降碳措施将难以持续保护人群健康；
- 只有减污降碳协同减排路径能够显著减少中长期（2030年后）的PM_{2.5}污染健康损失。

报告内容

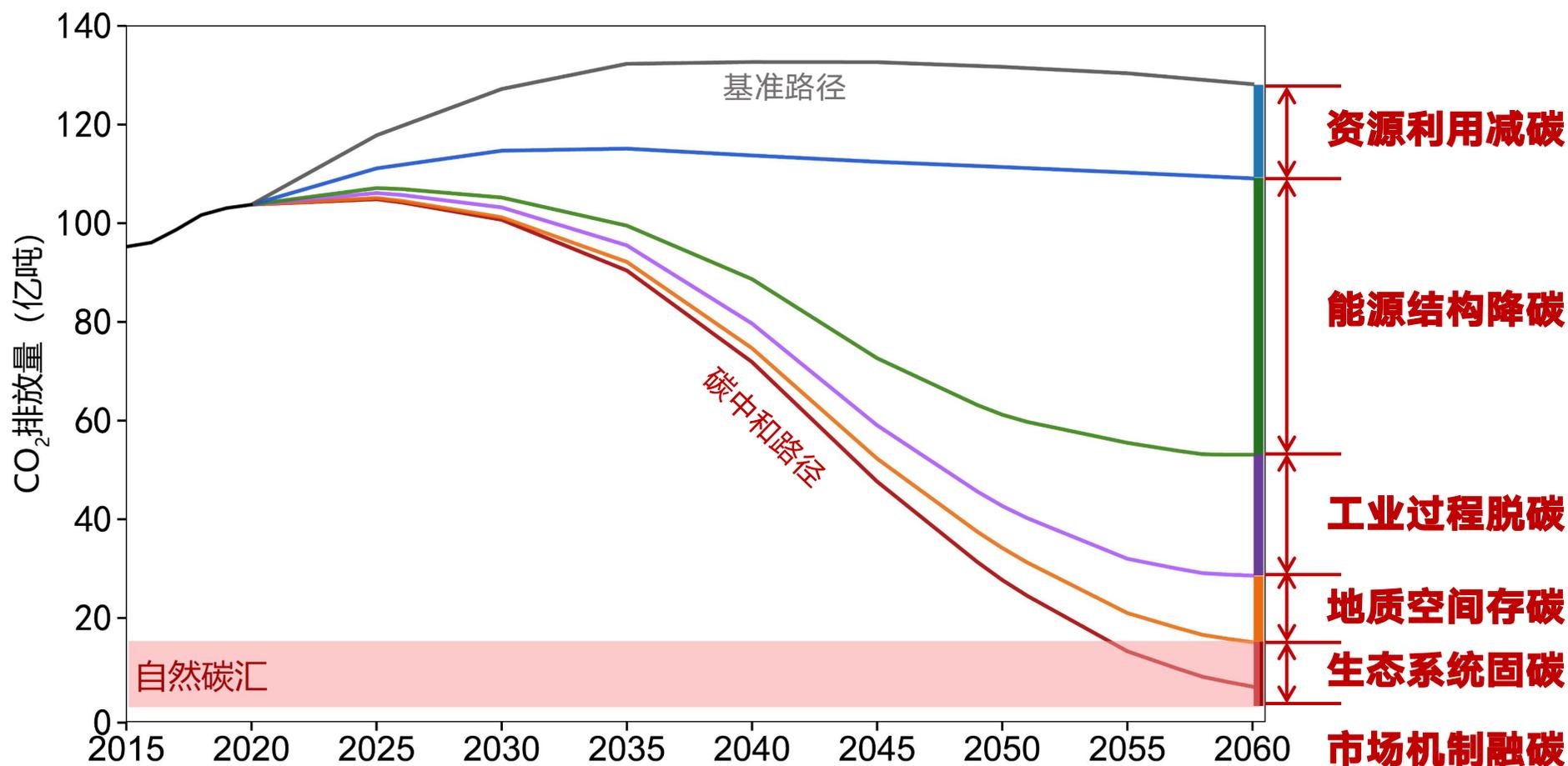
- 背景与进展
- 问题与挑战
- 协同路径分析
- 未来展望

Tracing PM_{2.5} air pollution in supply chains

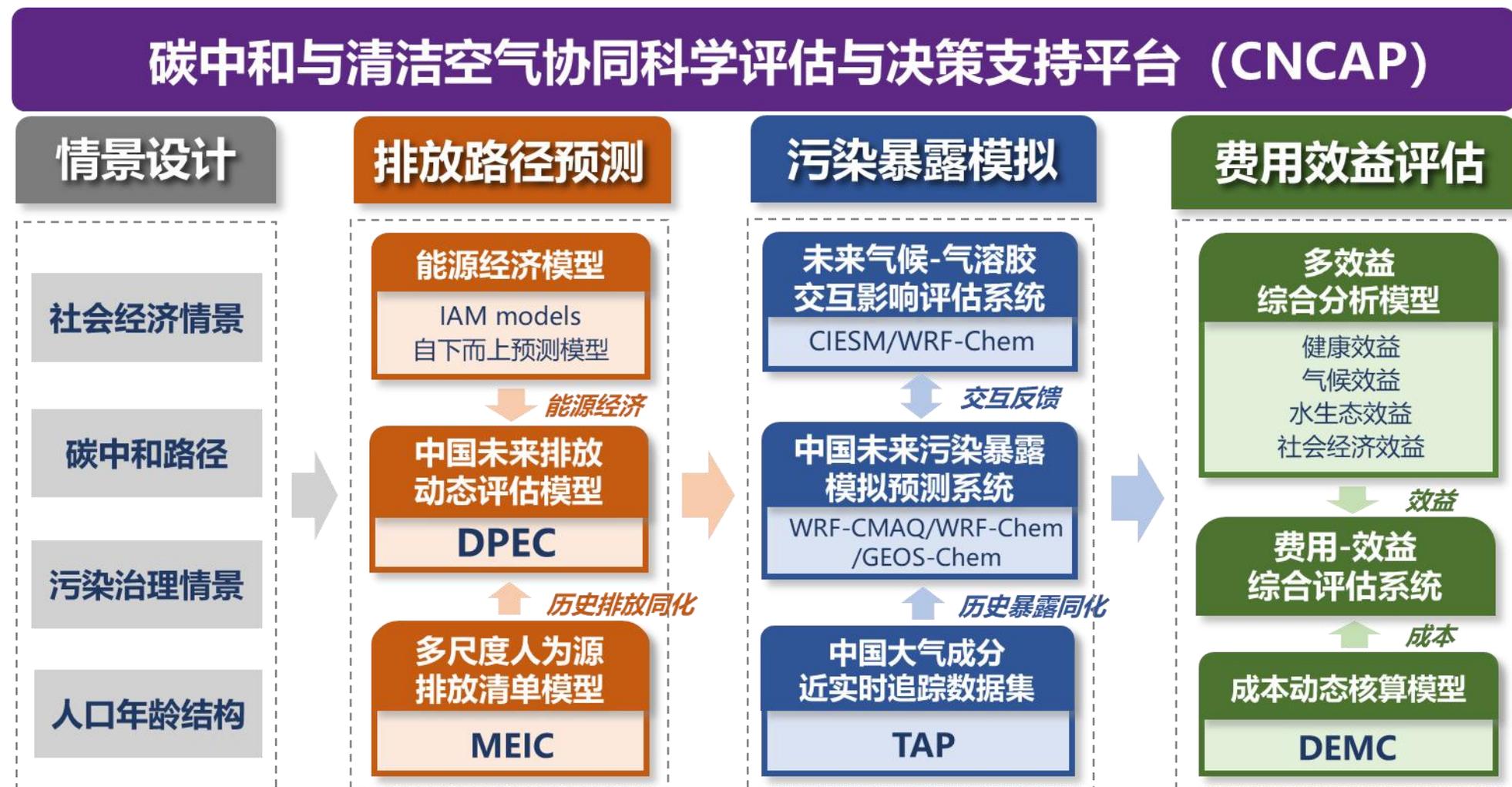


减污降碳协同路径设计

在未来碳减排路径选择方面，应当综合利用**资源利用减碳**、**能源结构降碳**、**工业过程脱碳**、**地质空间存碳**、**生态系统固碳**和**市场机制融碳**等多种技术路径逐步实现碳中和，同时充分考虑不同技术路径对大气污染减排的协同效应，**将推动空气质量持续改善作为碳中和技术路径选择的重要约束条件**，以最大限度实现“减污降碳”协同效应。

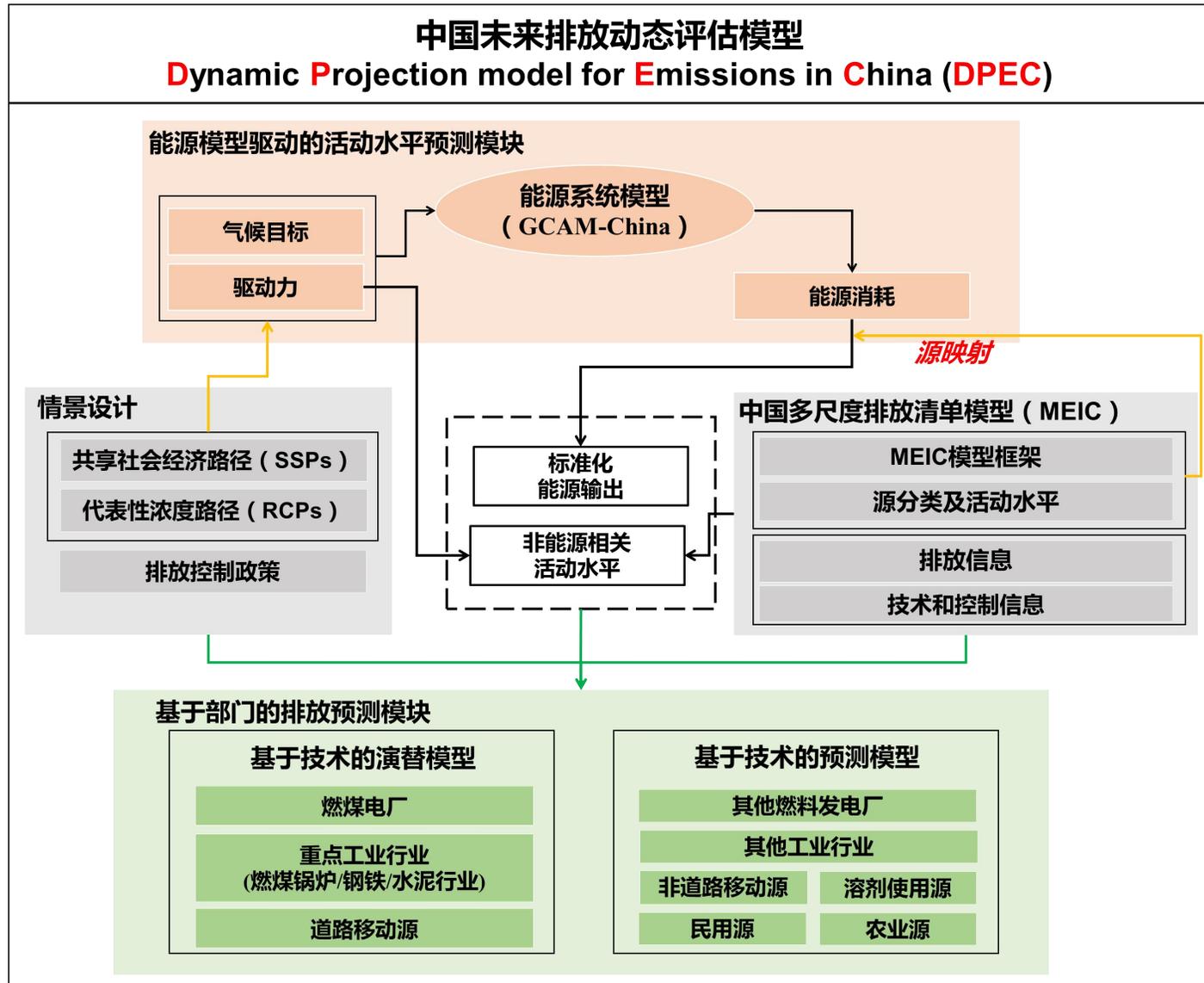


碳中和与清洁空气协同科学评估与决策支持平台 (CNCAP)



清华大学以自主研发的中国多尺度排放清单模型MEIC、中国未来排放动态评估模型DPEC、中国大气成分近实时追踪数据集TAP、成本动态核算模型DMEC为基础，耦合集成综合评估模型GCAM-China、地球系统模型CIESM、大气化学传输模型WRF-Chem/WRF-CMAQ，形成了碳中和与清洁空气协同科学评估与决策支持平台CNCAP。

中国未来排放动态评估模型 (DPEC)



- 与综合评估模型动态链接，获取未来活动水平数据；
- 部门尺度基于技术演替的排放预测模块；
- 无缝衔接IPCC情景库，与CMIP情景可比较，更符合中国实际；
- 与MEIC模型完全耦合，输出模式直接可用的未来排放情景数据。

耦合IPCC AR6气候情景与中国清洁空气政策

CMIP6 情景

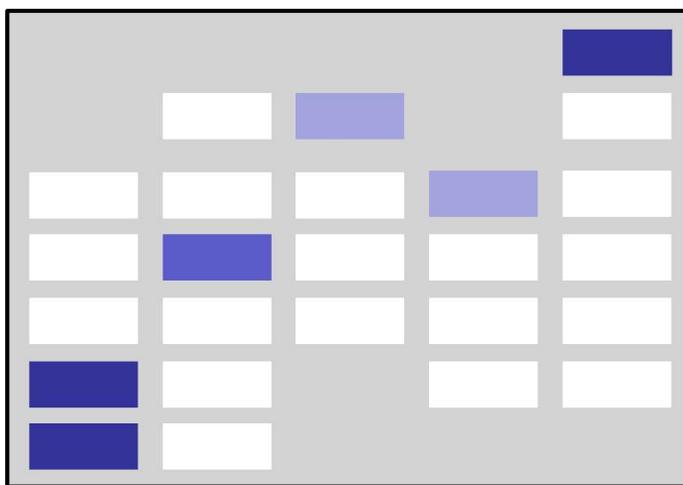
共享社会经济路径

SSP1 SSP2 SSP3 SSP4 SSP5

气候目标

2100 年辐射强迫 ($W m^{-2}$)

8.5
7.0
6.0
4.5
3.4
2.6
1.9



最佳末端控制(BHE) 强化末端控制(ECP) 当前末端控制(BAU)

WHO (AQG & IT-3) NAAQS (35)

空气质量目标

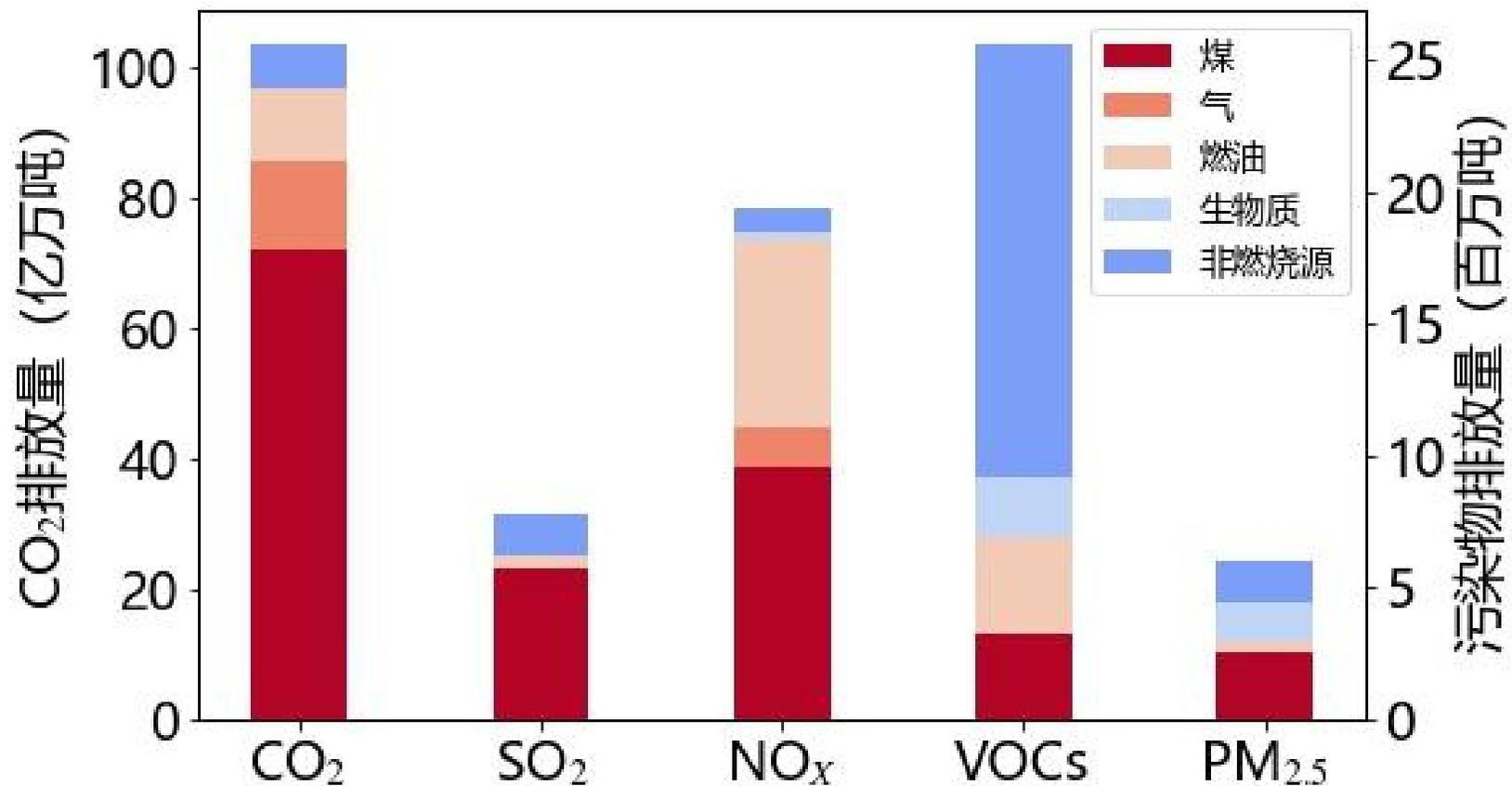
本地污染控制情景



清洁空气政策

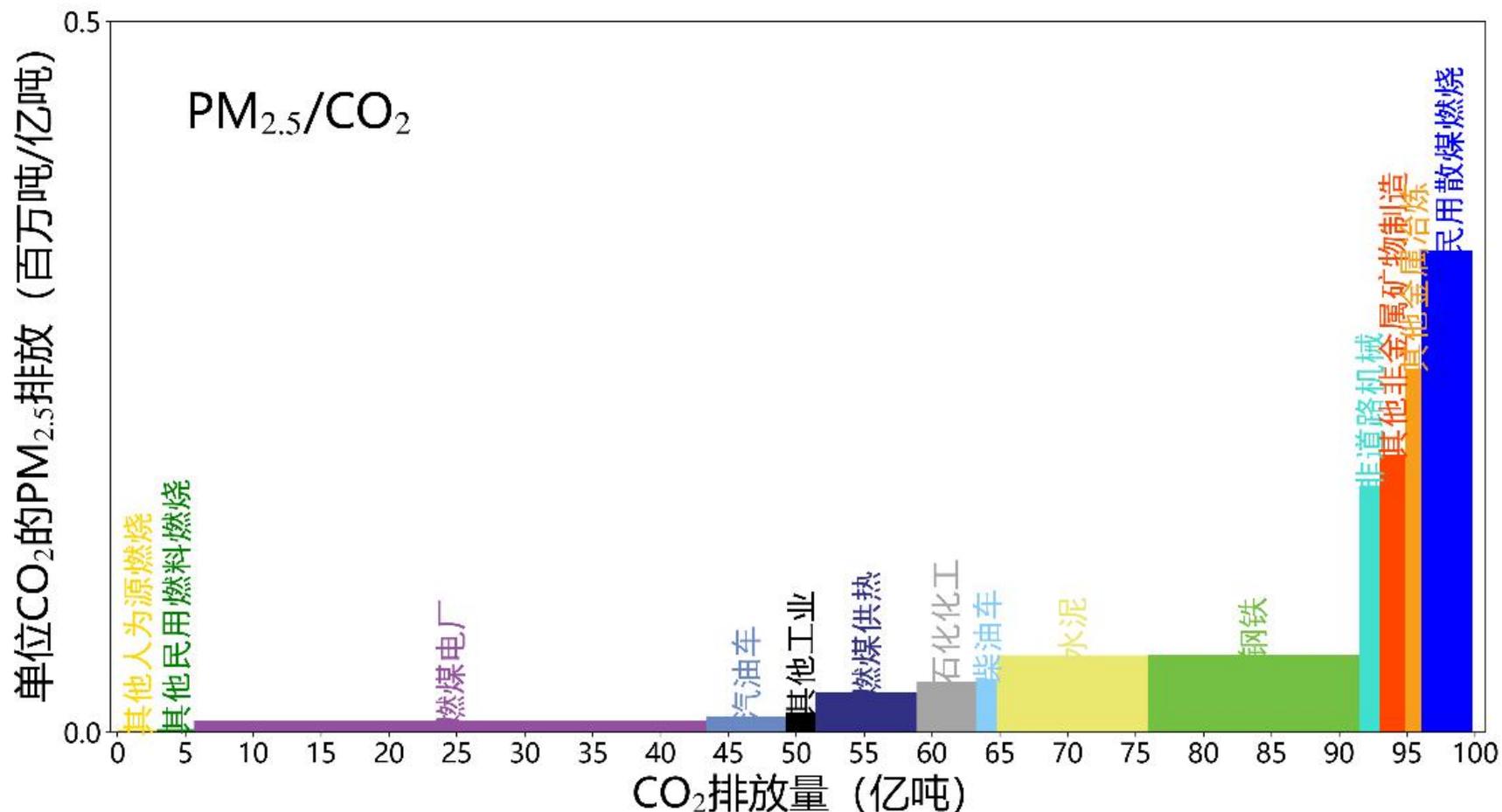
Emission source	Scenario	Region	2015	...	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	...	2033	2034	2035	...	2040	...	2045	2046	2047	...	2050
Coal-fired boilers	BAU	All region	GB 13271-2014																										
	BTH & FWP	GB 13271-2014				limits																							
	ECP	YRD	GB 13271-2014				limits																						
	Other	GB 13271-2014				limits																							
BHE	All region	GB 13271-2014				limits																						BAT recommended	
Iron and steel plants	BAU	All region	GB 28662-2012 (sinter)/ GB16171-2012 (coke) / GB 28663-2012 (iron) / GB 28664-2012 (steel)																										
	BTH & FWP	standards				limits																							
	ECP	YRD	standards				limits																						
	Other	standards				limits																							
BHE	All region	standards				limits																						BAT	
Nonferrous metal	BAU	All region	GB 31574-201529(Pb,Zn), GB 31575-201530(Cu,Al), GB 25468-201031(Mg), GB 25467-201032(Ni)																										
	BTH & FWP	standards					special limits																						
	ECP	YRD	standards				special limits																						
	Other	standards					special limits																						
BHE	All region	standards				special limits																						BAT	
Cement plants	BAU	All region	Cement energy norm; GB 4915-2013																										
	BTH & FWP	GB 4915-2013					special limits																						
	ECP	YRD	GB 4915-2013				special limits																						
	Other	GB 4915-2013					special																						
BHE	All region	GB 4915-2013				special limits																						BAT	
Flat glass	BAU	All region	GB29495-2013																										
	BTH & FWP	GB29495-2013					special limits																						
	ECP	YRD	GB29495-2013				special limits																						
	Other	GB29495-2013					special limits																						
BHE	All region	GB29495-2013				special limits																						BAT	
Brick/lime	BAU	All region	GB 29620-2013 (brick and lime)																										
	BTH & FWP	standards					special limits																						
	ECP	YRD	standards				special limits																						
	Other	standards					special limits																						
BHE	All region	standards				special limits																						BAT	

不同能源消费品种对2020年CO₂和大气污染物排放的贡献



燃煤依然是当前CO₂和大气污染物排放共同的最主要来源

基于污染源的减污降碳协同减排潜力评估



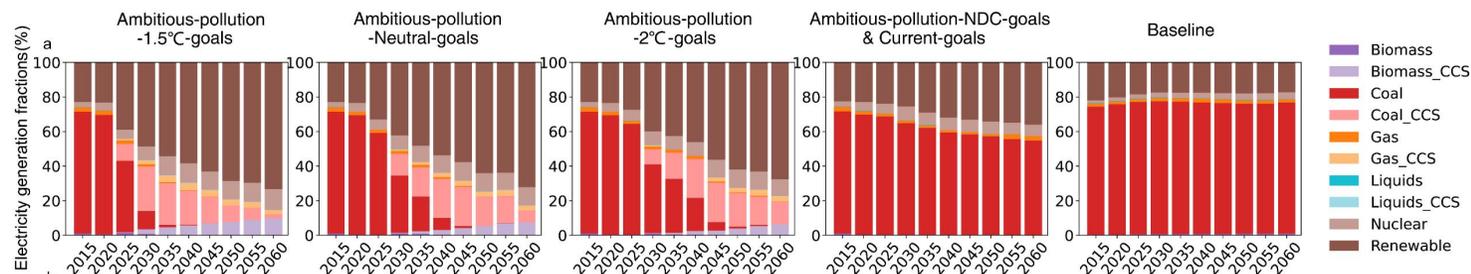
2020年各类源每单位CO₂排放量对应的大气污染物排放

减污降碳协同路径情景

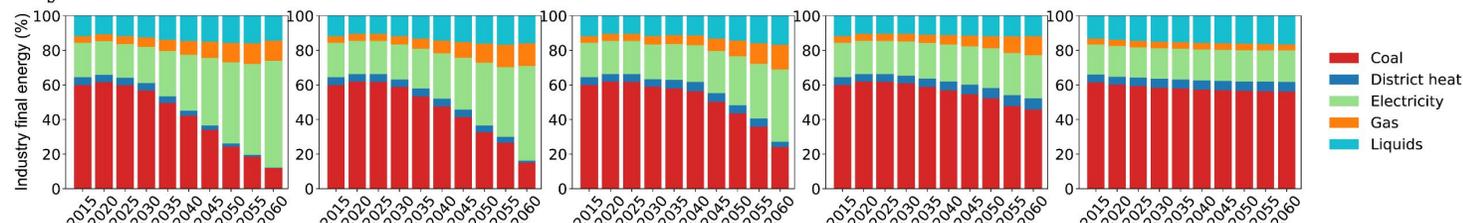
	近期（2020-2030）	中长期（2030-2060）
参考情景	• 社会经济在可持续发展目标下增长，但不考虑额外的碳减排及空气质量目标约束，提供基线参考情景。	
末端治理	• 社会经济在可持续发展目标下增长，不考虑碳减排约束，但实施严格的末端治理措施以改善空气质量。	
碳达峰 +末端治理	• 以减排成本优先原则选取降碳措施，2030年左右实现碳达峰；同时实施严格末端治理措施。	• 无进一步的碳减排目标约束，不再额外推动低碳转型措施；继续实施严格末端治理措施。
碳中和 +末端治理	• 以减排成本优先原则选取降碳措施，2030年左右实现碳达峰；同时实施严格末端治理措施。	• 以2060年前实现碳中和为目标，以减排成本优先原则持续推动低碳转型措施；继续实施严格末端治理措施。
减污降碳协同	• 基于不同措施的空气质量改善协同度优选降碳措施，推动碳排放早日达峰；同时实施严格末端治理措施。	• 以2060年前实现碳中和为目标，以减排成本优先原则持续推动低碳转型措施；继续实施严格末端治理措施。

不同情景下中国未来能源结构变化

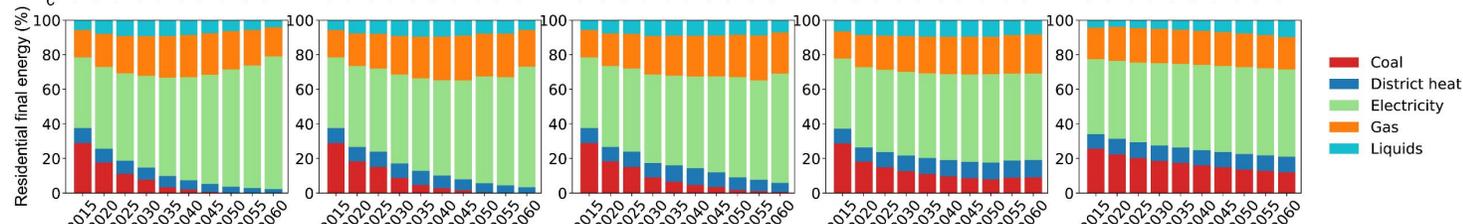
发电结构



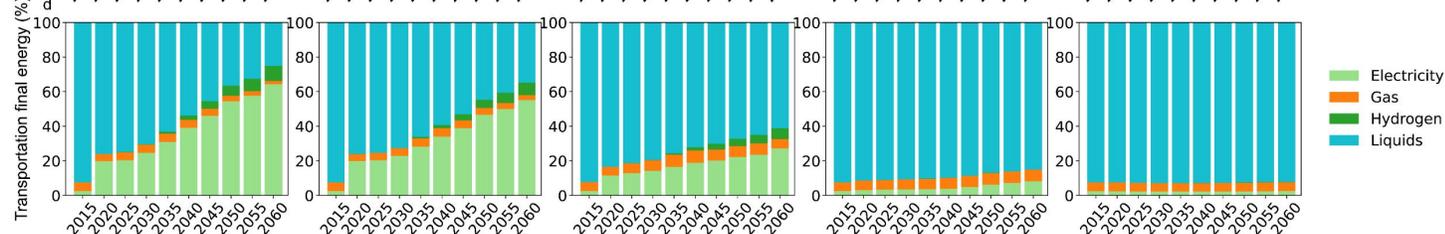
工业终端能源消费结构



民用终端能源消费结构



交通终端能源消费结构

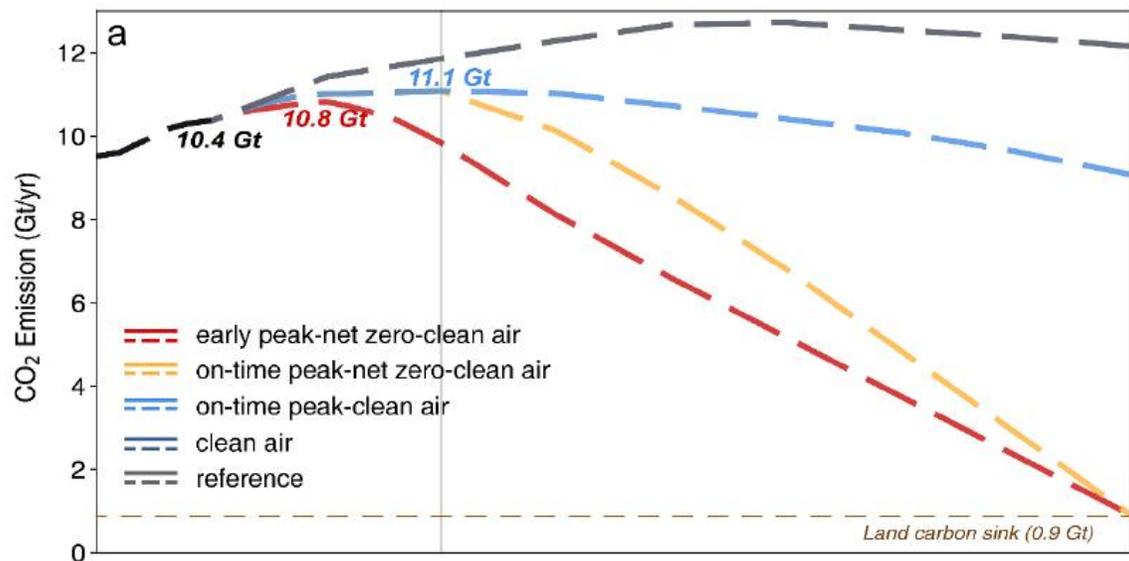


Tong et al., Atmos. Chem. Phys., 2020; Cheng et al., Natl. Sci. Rev.

在碳中和情景下，2060年我国将基本完成低碳能源转型，以煤、油为主的高碳能源结构得到根本改变：一次能源消费中非化石能源占比高达**72%**；可再生能源发电占比将达到**70%**以上；工业部门终端煤炭消费比例低于**15%**，新能源车占比达到**60%**以上，民用部门能源**全面清洁化**。

实现碳中和的排放路径大致在2度情景和1.5度情景之间，更接近1.5度情景。

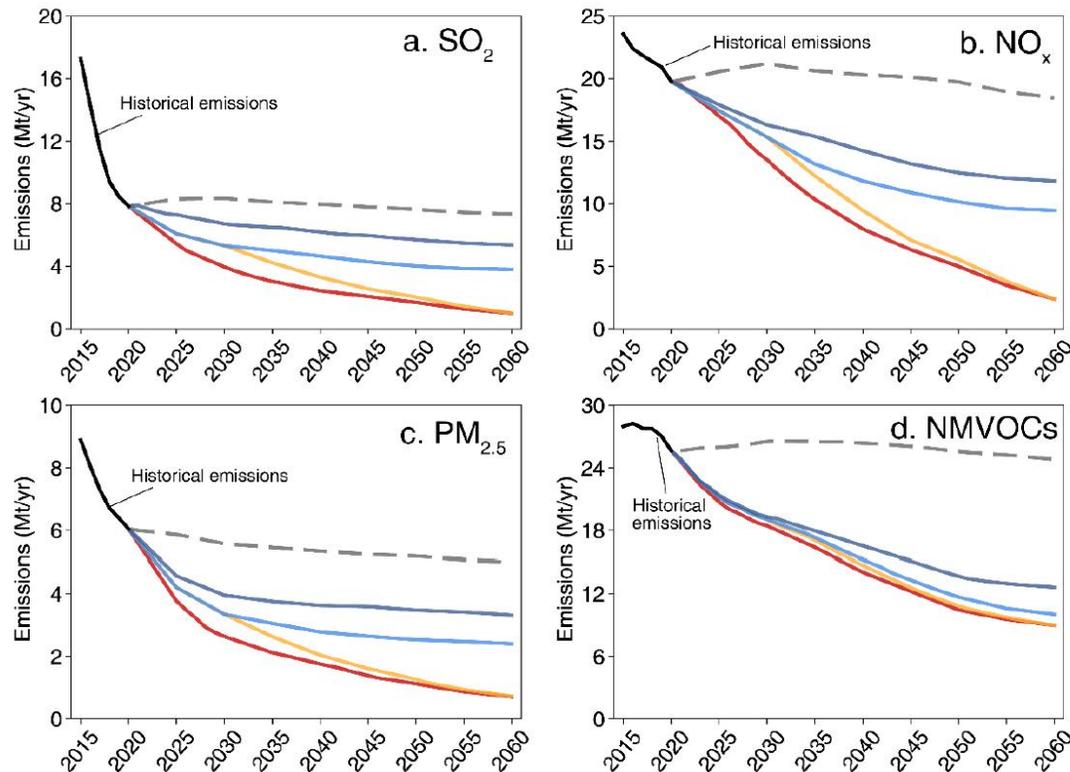
不同路径下CO₂及主要大气污染物排放变化



不同路径下2015-2060年CO₂排放变化

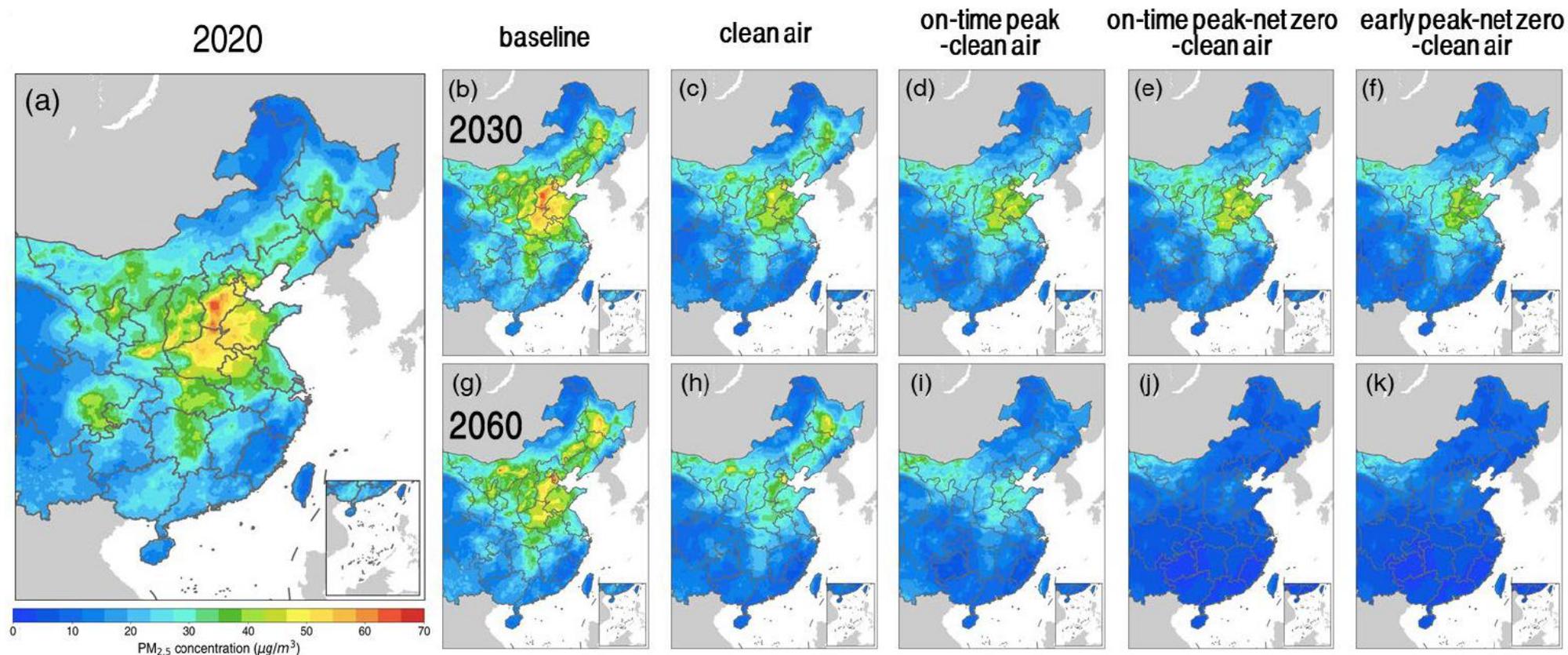
现行的以末端控制为主的清洁空气政策可以使大气污染物排在2030年之前保持下降态势，但2030年后进一步减排的空间和潜力将大幅收窄。

而在碳中和情景下，深度低碳能源转型将带来显著的污染物协同减排效益：主要大气污染物排在2030-2060年之间将进一步下降67%（NO_x）至83%（SO₂）。



不同路径下2015-2060年主要大气污染物排放变化

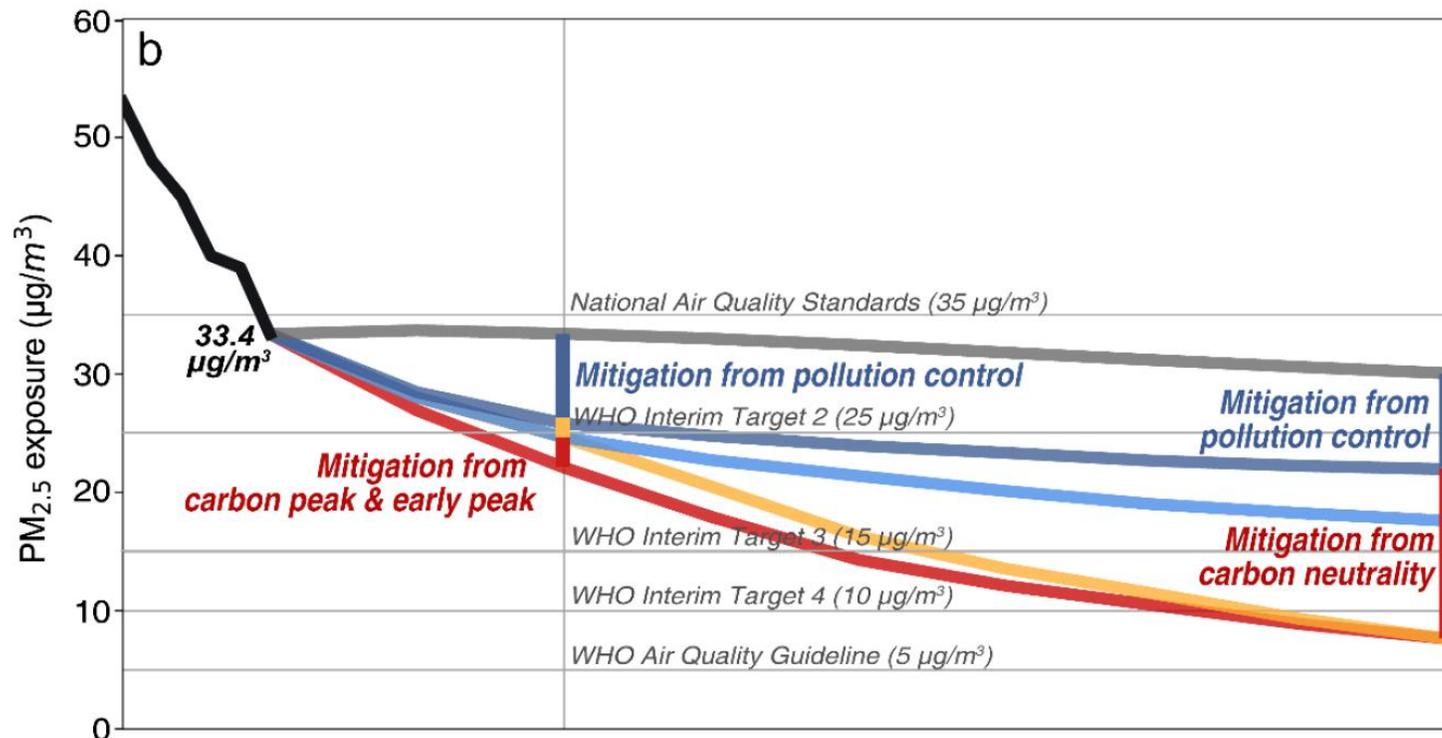
不同排放路径下中国未来PM_{2.5}浓度变化



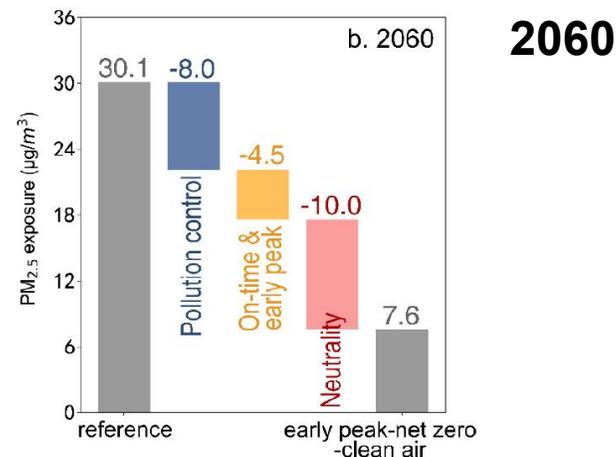
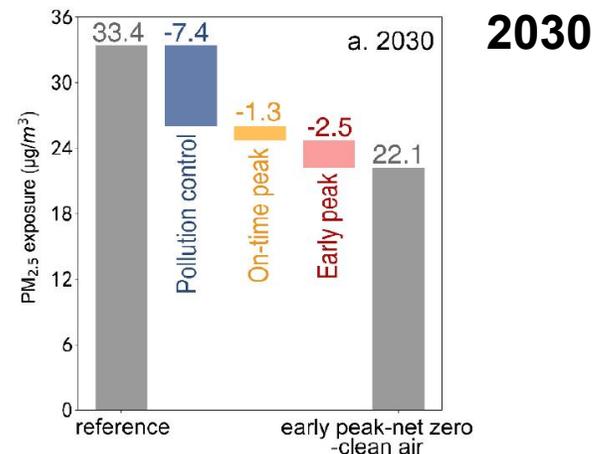
在末端治理路径下，2030年全国大部分地区PM_{2.5}年均浓度可达到 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的现行环境空气质量标准，但2030年之后PM_{2.5}浓度持续下降的空间不大；

在减污降碳协同路径下，到2060年全国绝大部分地区PM_{2.5}年均浓度降低到 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，PM_{2.5}空气污染问题将得到基本解决。

减污降碳协同路径推动PM_{2.5}污染暴露水平持续下降



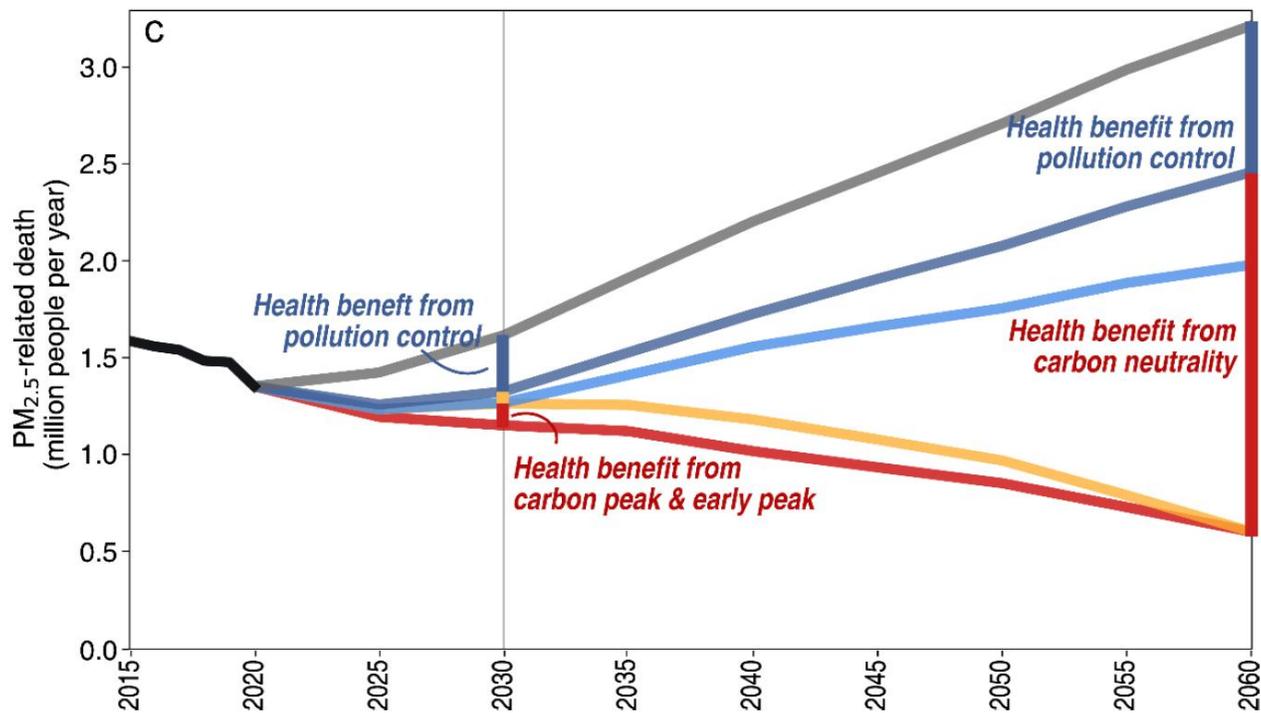
不同路径下2015-2060年PM_{2.5}暴露水平变化



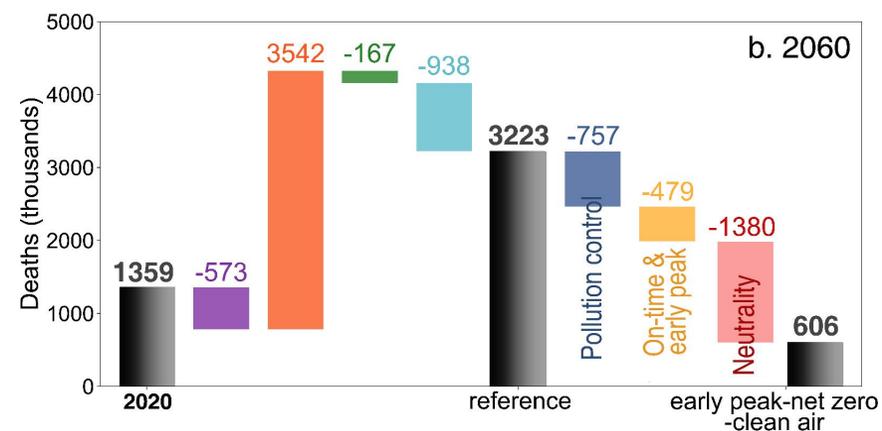
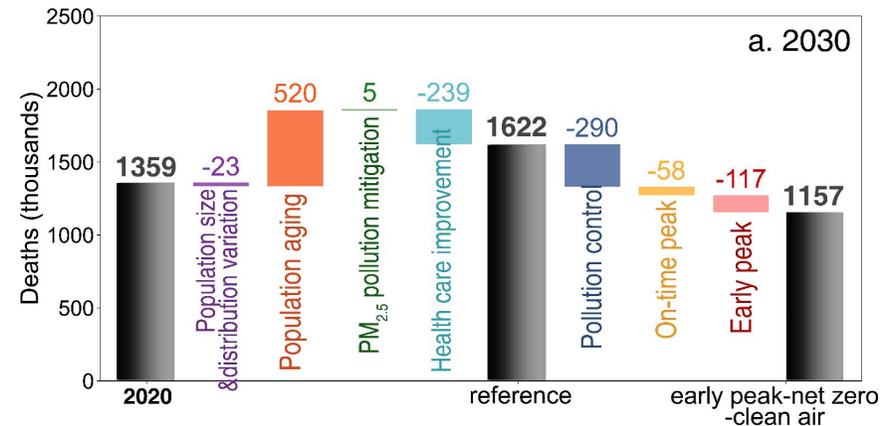
协同路径下PM_{2.5}暴露水平变化的驱动因素

减污和降碳分别是近期（2030年前）和中长期（2030年后）PM_{2.5}暴露水平下降的主要驱动力

减污降碳协同路径的健康效益



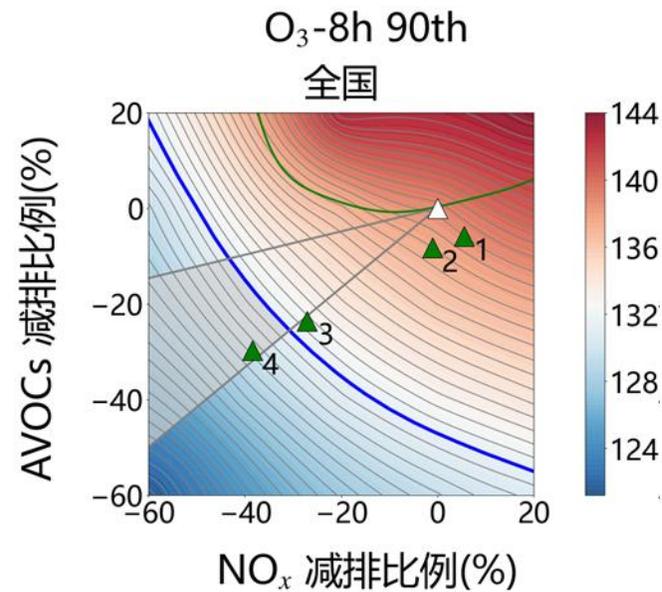
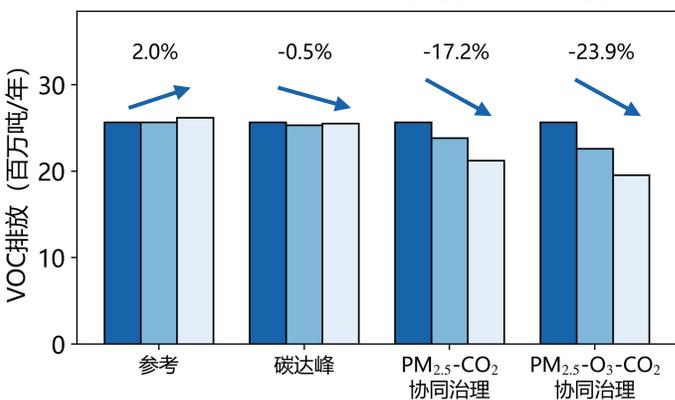
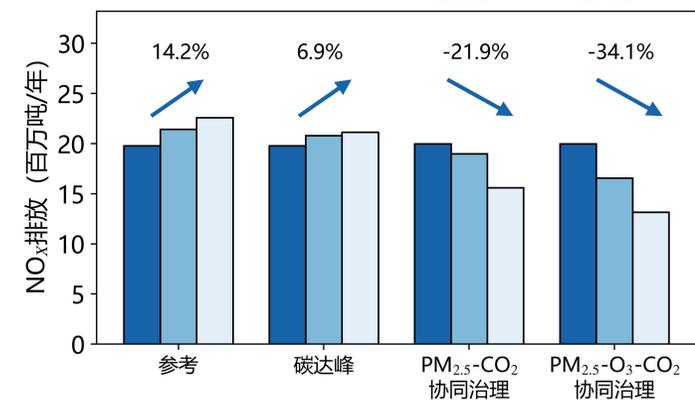
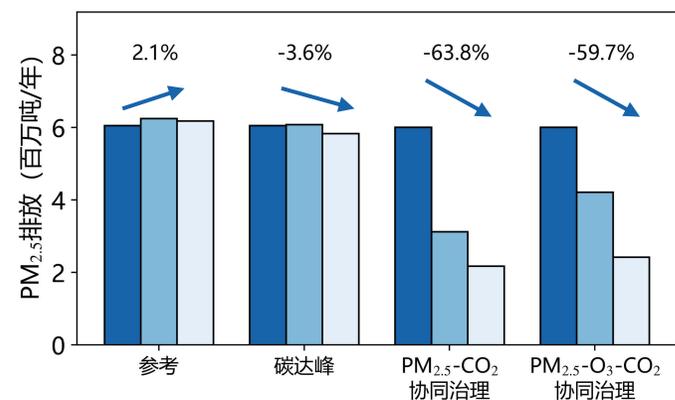
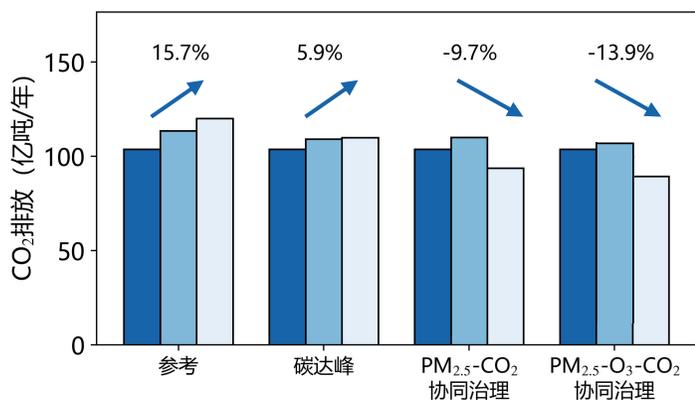
不同路径下2015-2060年人群健康损失变化



协同路径下人群健康损失变化的驱动因素

在人口老龄化背景下，通过减污降碳协同发力将能够最大限度保护人群健康，获得持续健康效益

进一步构建PM_{2.5}-O₃-CO₂协同治理情景

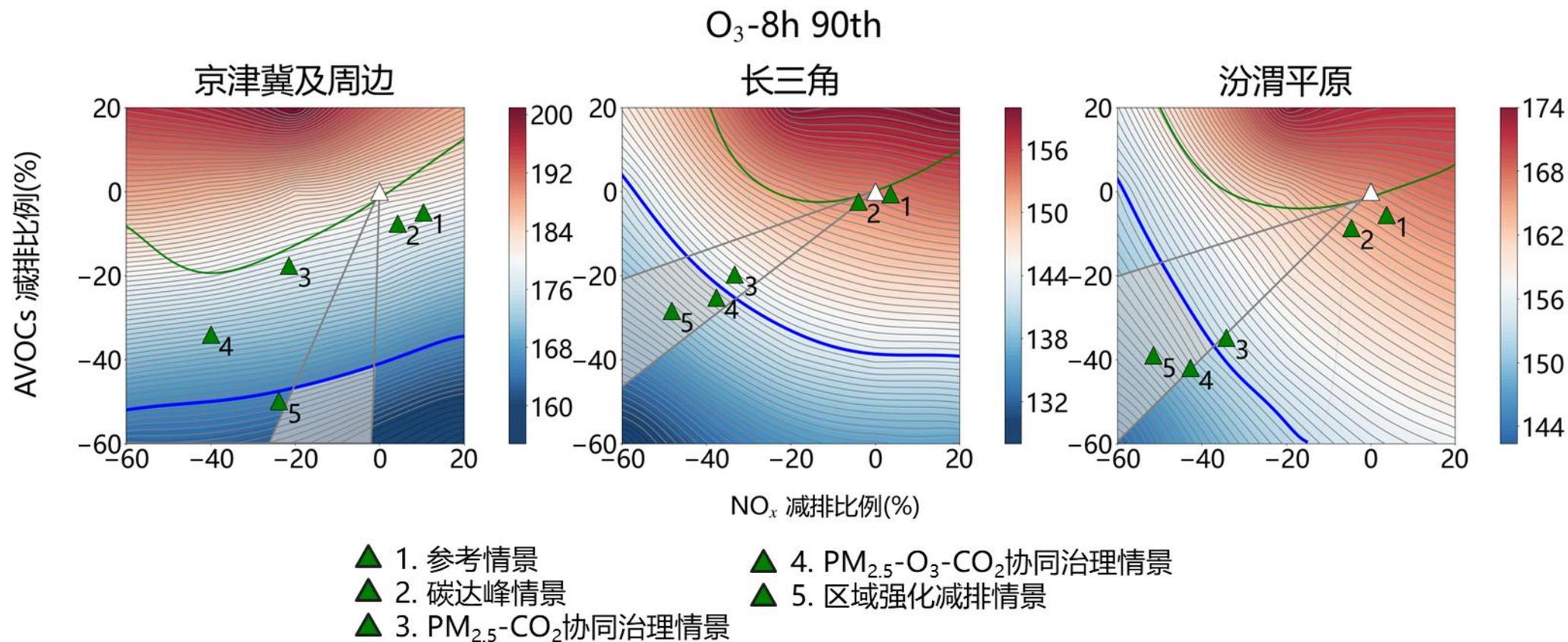


- 2020
- 2025
- 2030
- ▲ 1. 参考情景
- ▲ 2. 碳达峰情景
- ▲ 3. PM_{2.5}-CO₂协同治理情景
- ▲ 4. PM_{2.5}-O₃-CO₂协同治理情景

在PM_{2.5}-O₃-CO₂协同治理情景中:

- 由于考虑了措施的减污降碳协同性，能够实现与碳达峰和PM_{2.5}-CO₂协同治理情景相近的碳减排目标；
- 同时考虑了臭氧前体物NO_x和VOC的协同减排，可在全国尺度上实现O₃浓度改善目标

重点区域强化减排的O₃空气质量改善效益



- 由于各地区排放结构、发展程度不一，全国统一的污染物减排方案下重点区域O₃污染改善效果有限
- 加强重点区域减排，将使得京津冀及周边地区O₃浓度进一步下降7 μg/m³，实现浓度改善目标

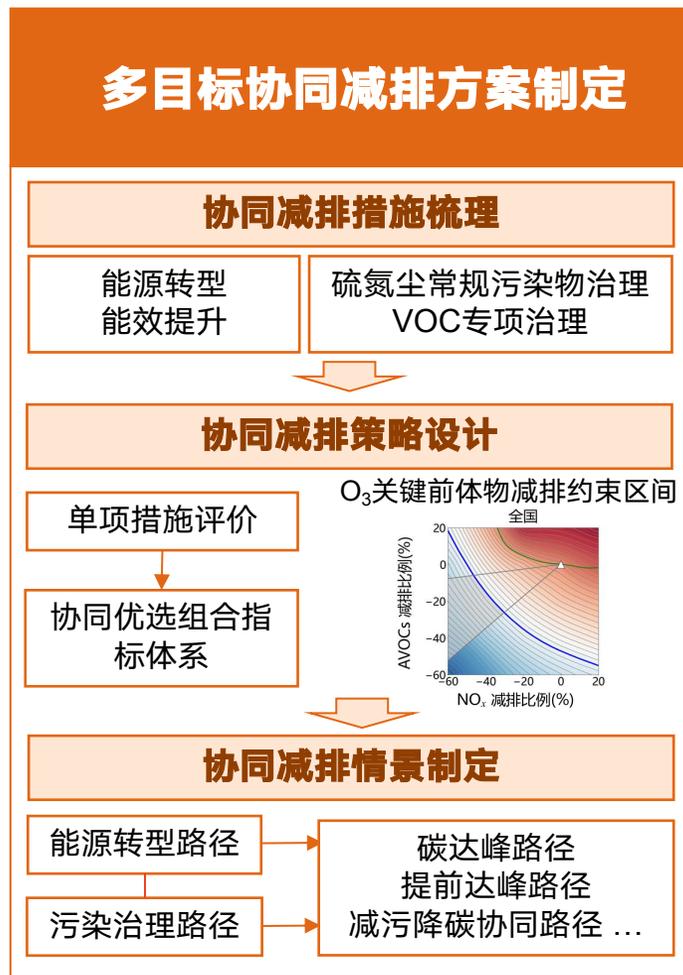
报告内容

- 背景与进展
- 问题与挑战
- 协同路径分析
- 未来展望

展望一：融合清单编制

融合清单编制：深度融合的来源解析与协同减排路径识别

构建大气污染与温室气体深度融合的来源解析与协同减排路径识别技术体系

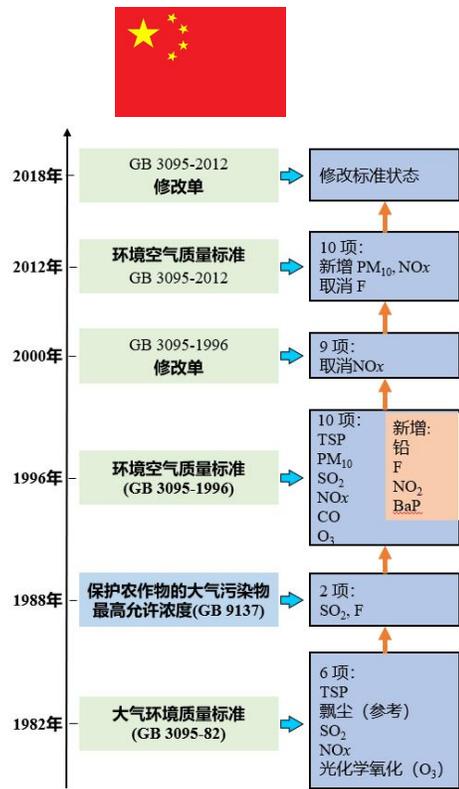


梳理我国和欧美环境空气质量标准制修订历程

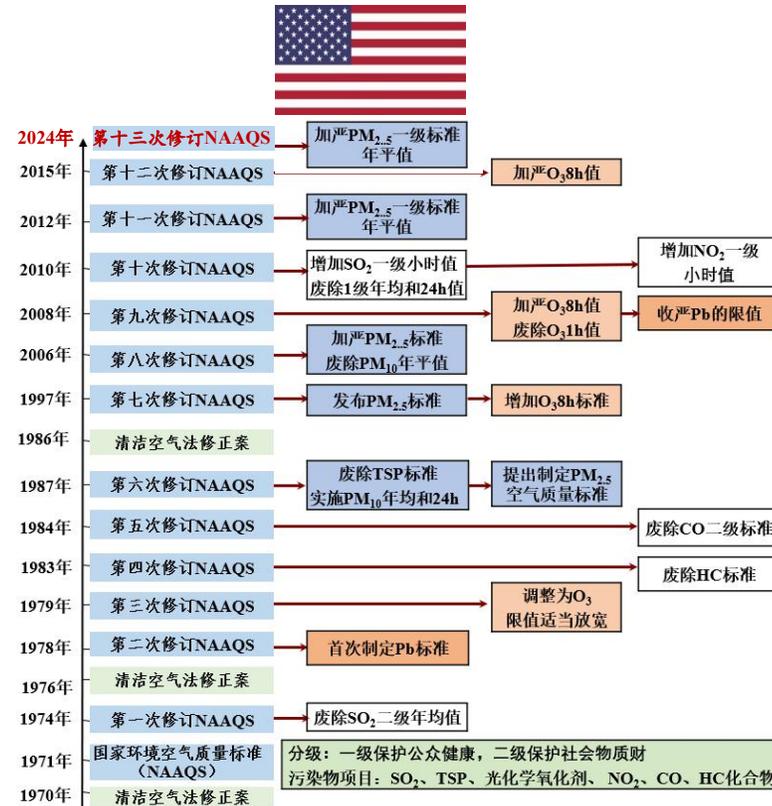


中国环境与发展国际合作委员会
China Council for International Cooperation
on Environment and Development

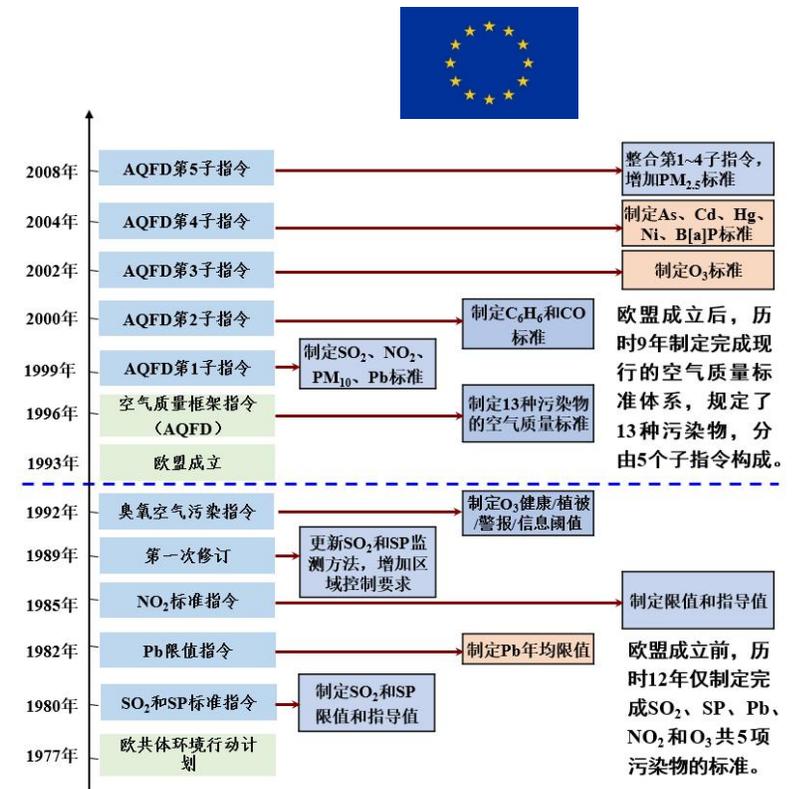
我国现行《环境空气质量标准》采用世卫组织《全球空气质量指南》过渡期1阶段目标，PM_{2.5}年均浓度限值为35μg/m³，相比美国（9μg/m³）、日韩（15μg/m³）、欧盟（20μg/m³）浓度限值宽松很多



1982年首订标准，先后5次修订



1971年首订标准，历经13次修订



1980年首订标准指令，逐步修订完善

展望二：国际公约管控物种的多维关联

大气污染前体物与国际公约管控物质具有一定的同根同源性

国际公约

气候变化公约

水俣公约

蒙特利尔公约

斯德哥尔摩公约

管控物种

CO₂、CH₄、
N₂O、...

Hg

ODS

POPs



电厂



工业



交通



民用



开放燃烧



废弃物处理



农业



溶剂

大气污染物

SO₂、NO_x、PM、VOCs、NH₃

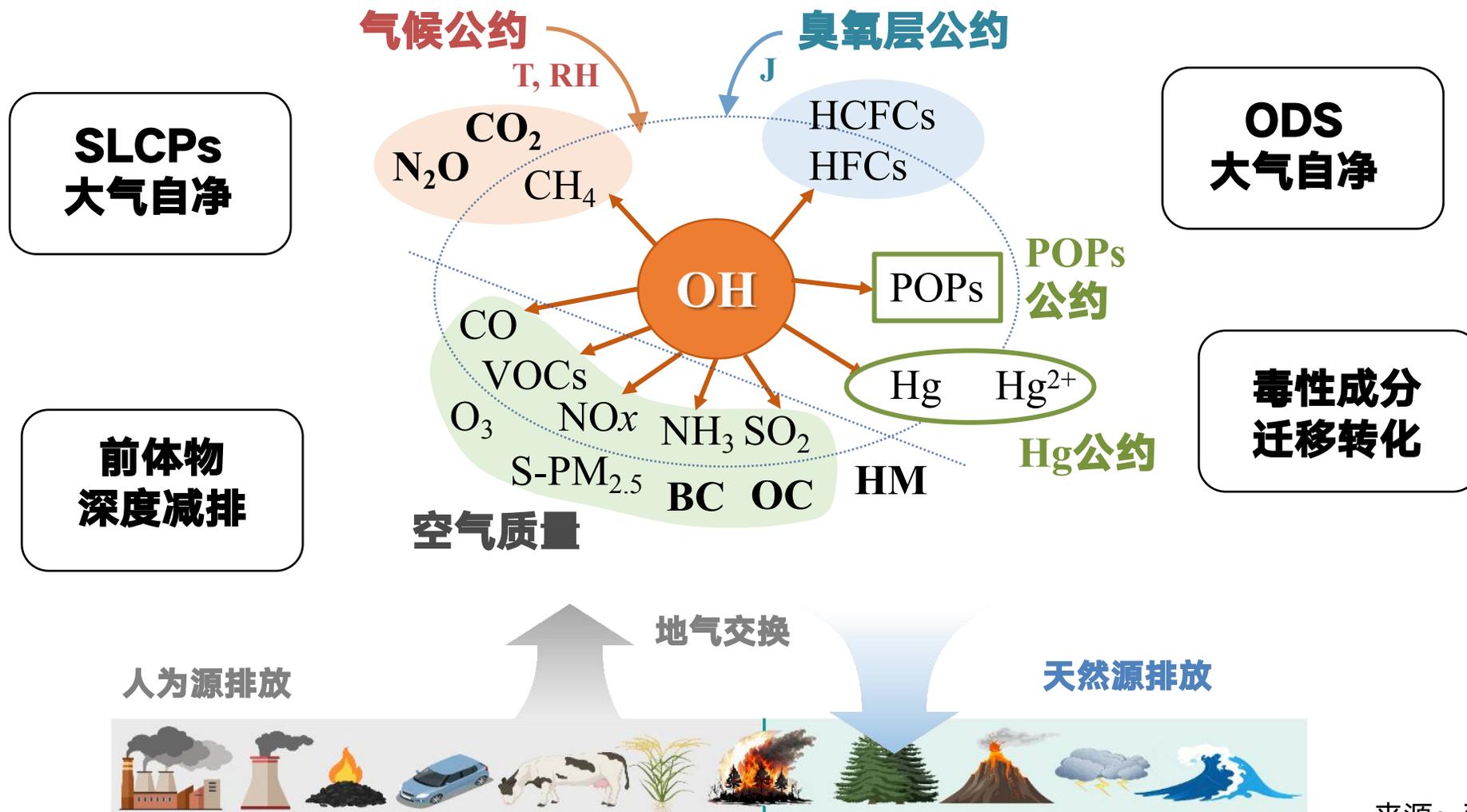
大气污染
防治政策

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

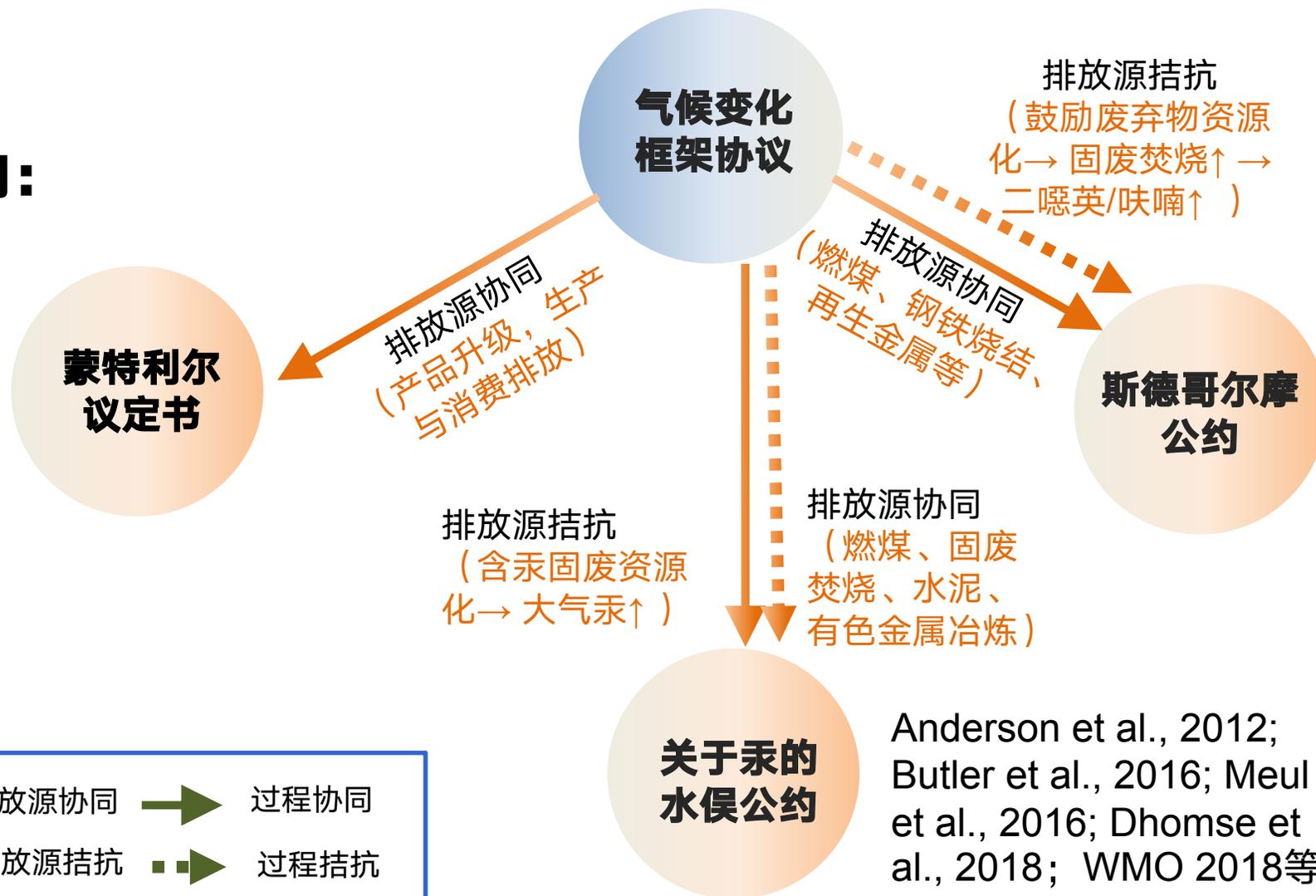
探索多目标约束的大气氧化性调控



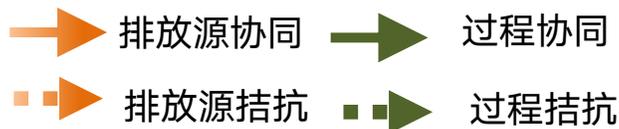
国际公约的履约重点及公约之间的协同效应(1)

气候公约对其他公约的影响：

排放控制协同为主，
存在部分拮抗过程



□ 来源和过程协同

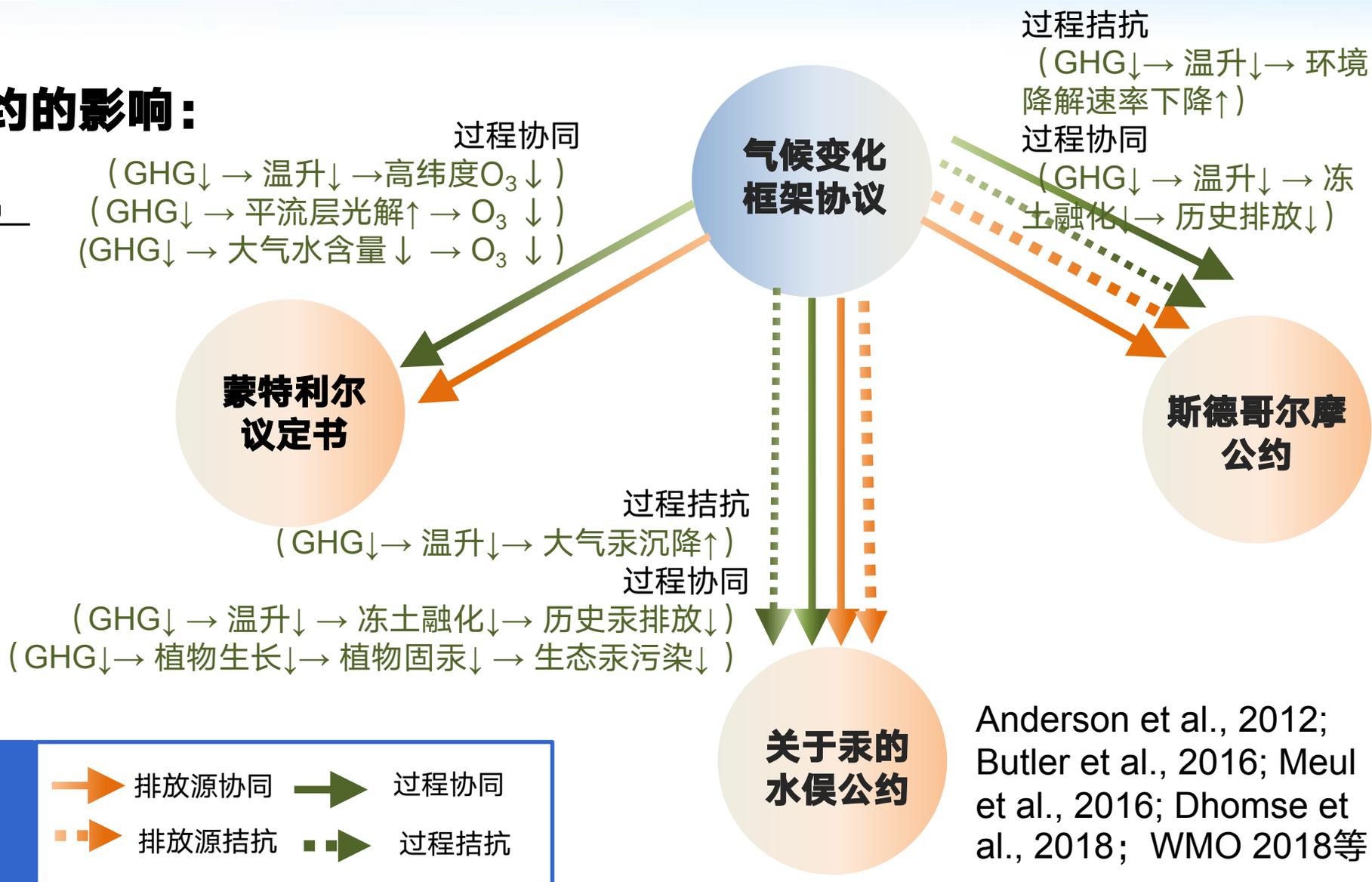


国际公约的履约重点及公约之间的协同效应(2)

气候公约对其他公约的影响：

环境过程极其复杂，

协同与拮抗并存



□ 来源和过程协同

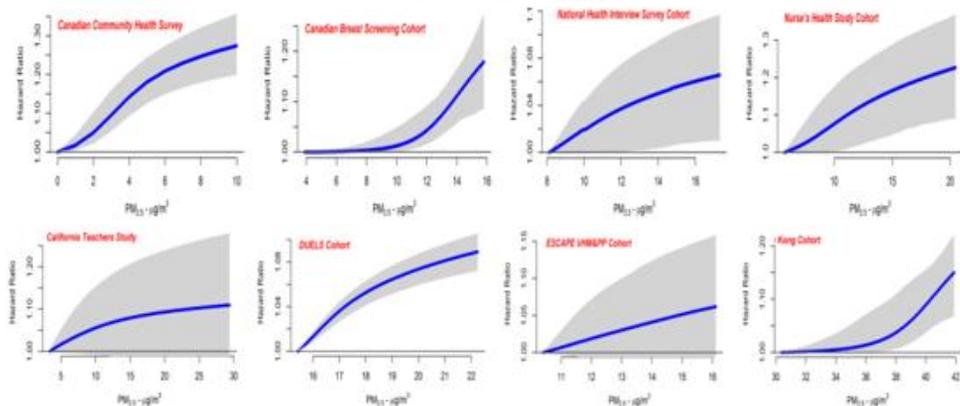
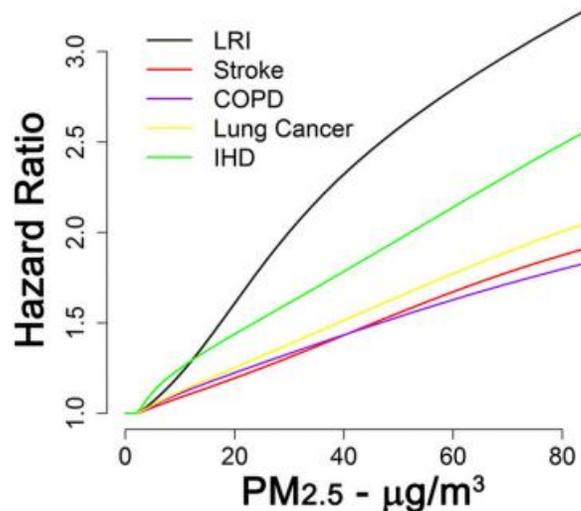
展望三：健康效应的深化分析

颗粒物健康效应评估：“等量等毒” → “等量不等毒”

现行的颗粒物健康效应评估方法：
基于颗粒物质量 → 假设“等量等毒”

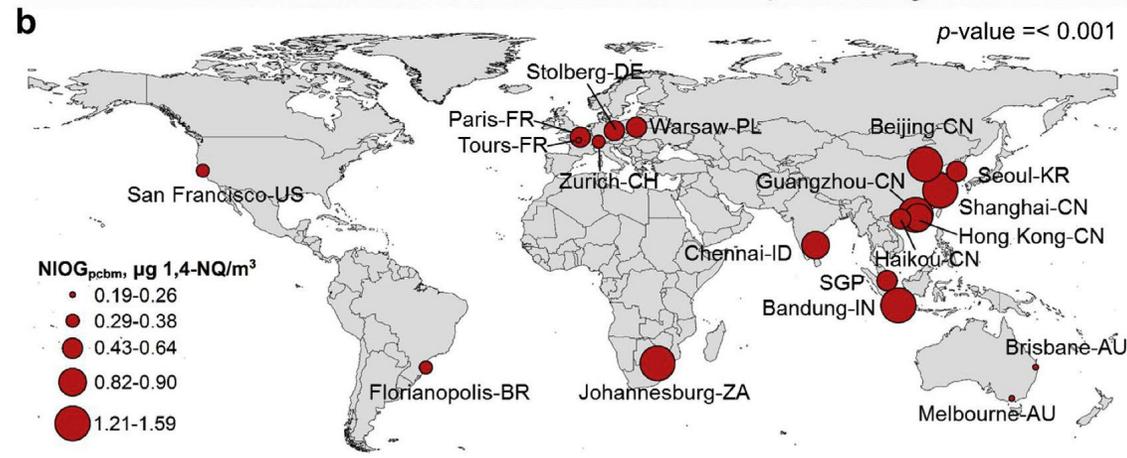
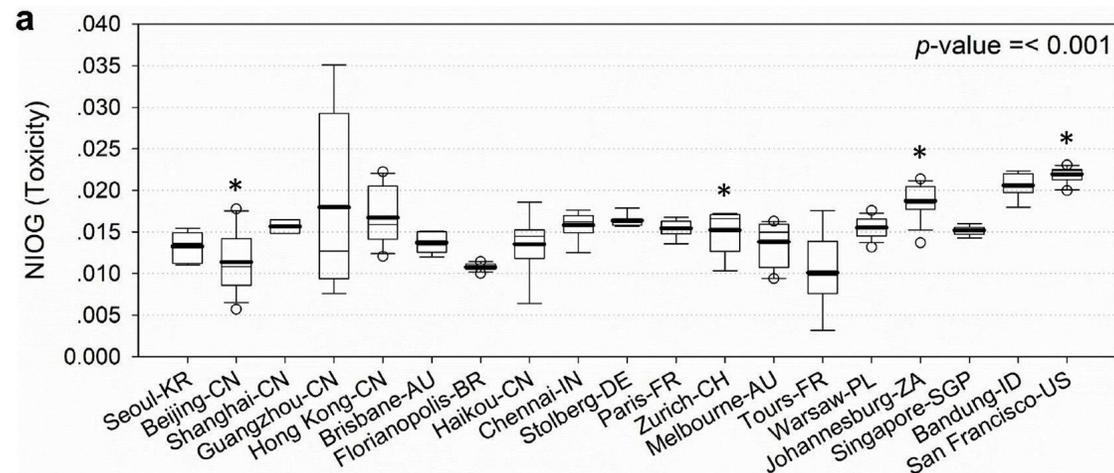
VS

不同地区单位质量颗粒物的毒性差异显著



基于不同流行病学研究的综合集成

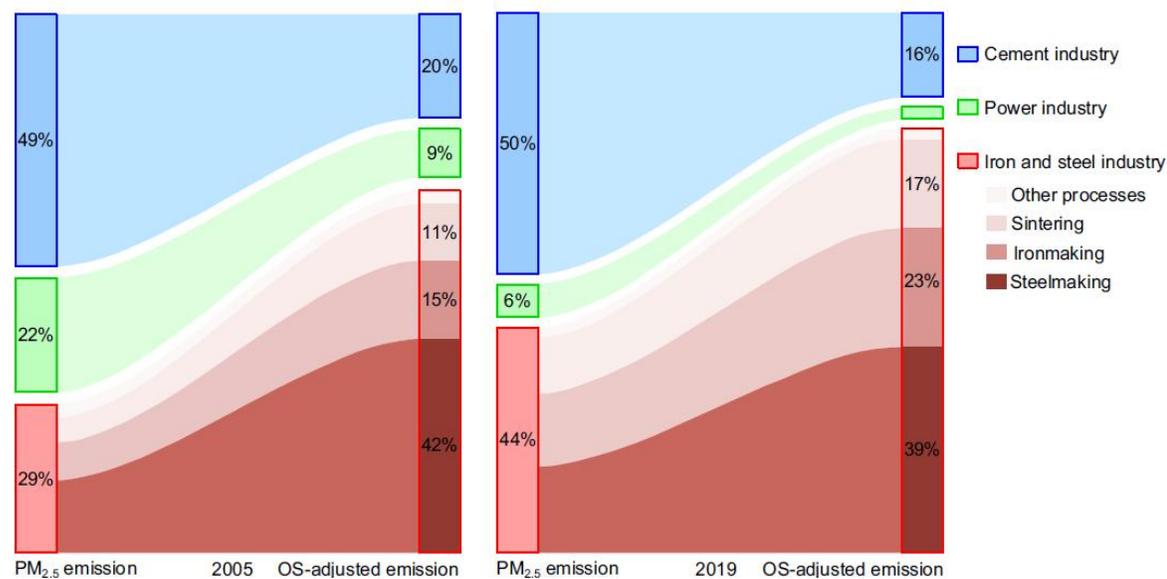
(Burnett et al., PNAS, 2018)



Li et al., 2019, AE

排放源对颗粒物健康效应的影响

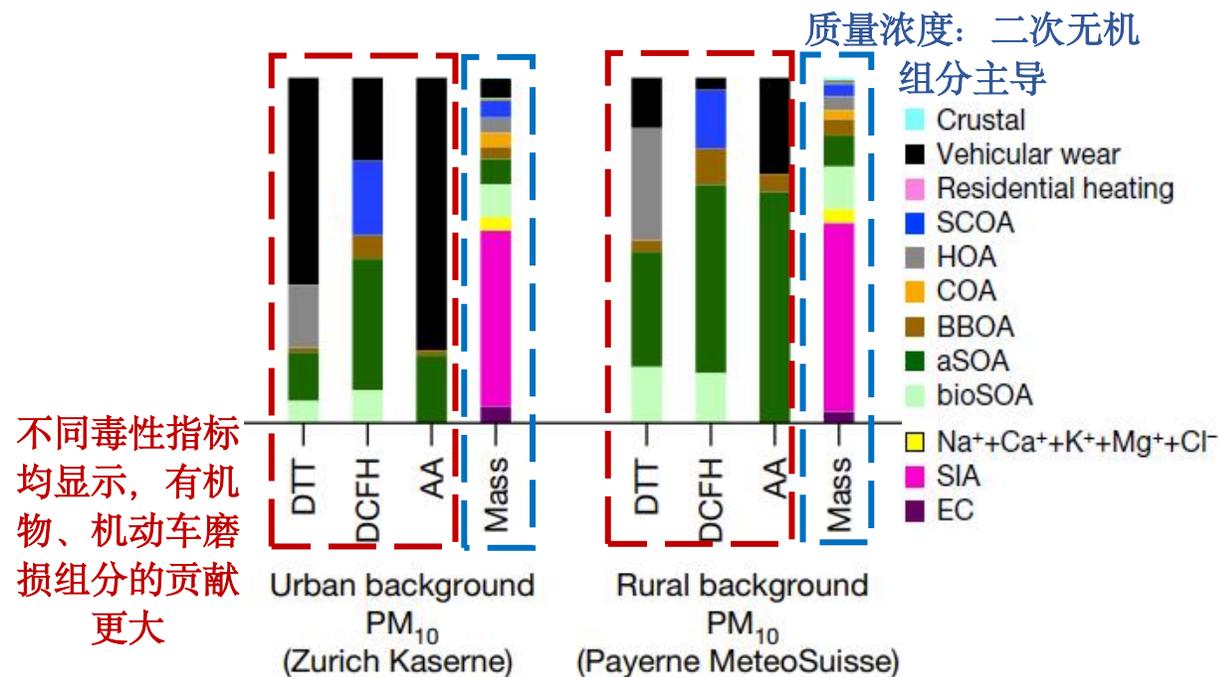
不同工业源颗粒物的对PM_{2.5}质量和毒性的贡献明显不同



我国不同工业源排放对PM_{2.5}质量和毒性贡献的显著差异

Wu et al., 2023, Nature Communications

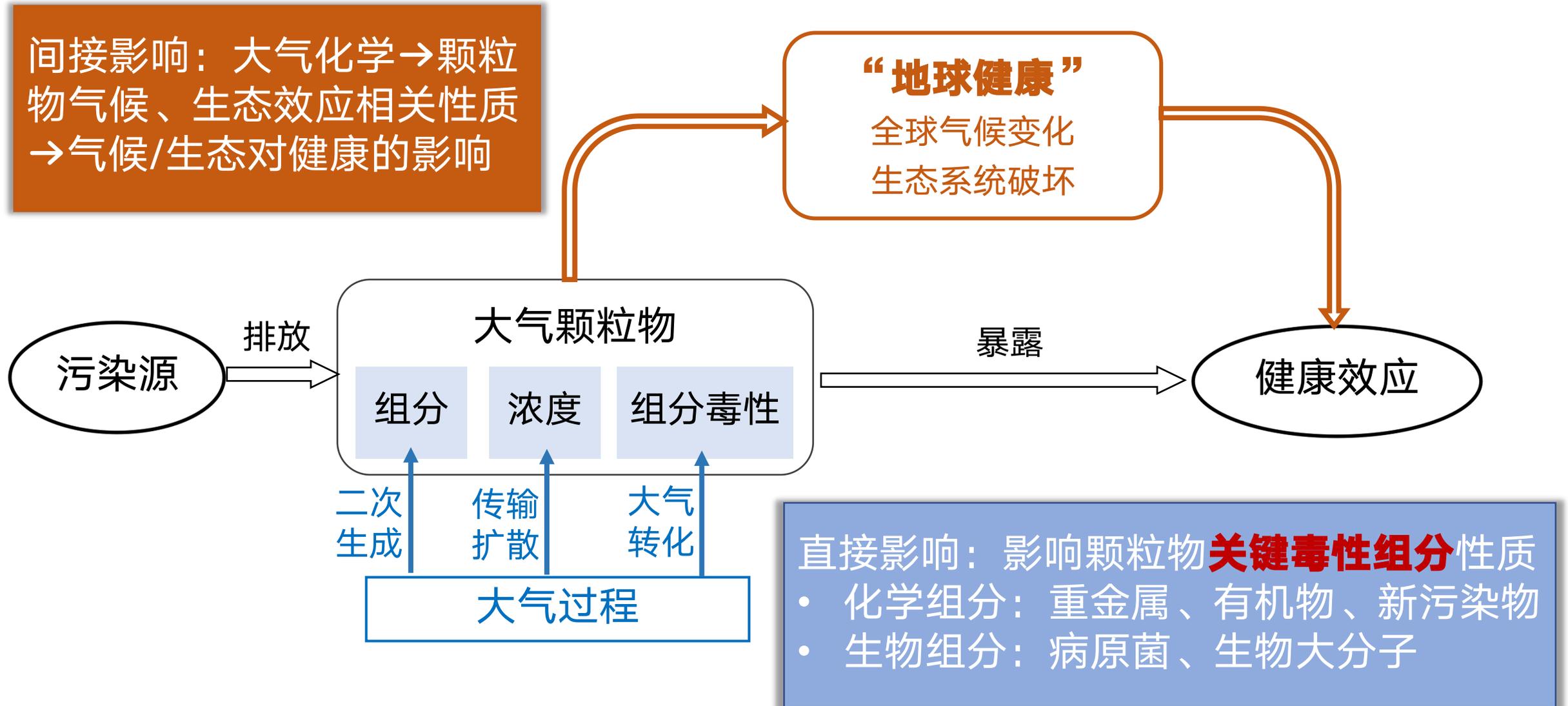
大气颗粒物的质量与毒性的关键贡献组分差异显著



Daellenbach et al., 2020, Nature

→需建立颗粒物全组分清单，特别是厘清关键毒性组分的排放源

大气颗粒物单位质量毒性差异的成因：大气过程



减排行业的协同

减排物种的协同

减排部门的协同

我国应对气候变化的重要行动

部门/主管单位	政策名称	主要内容
全领域 总领	《中共中央 国务院 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》	确定全国到2025年、2030年、2060年目标，明确各领域政策方向
全领域 总领	《国务院 2030年前碳达峰行动方案》	确定全国十四五与十五五目标，分领域重点任务及具体目标指标 各地区梯次有序碳达峰，因地制宜、试点推广
全领域 生态环境部等	《 减污降碳 协同增效实施方案》	强化多介质源头防控、重点协同减污降碳领域具体任务目标 加强技术创新、制度模式、市场机制等创新与保障
国家能源局	《 能源 碳达峰碳中和标准化提升行动计划》	新能源发电涉网安全标准建设、完善特高压交、直流标准体系建设、加快完善新型储能技术标等
工业和工信部、 发改委等	《 工业 领域碳达峰实施方案》	总体行业目标：2030年前工业领域二氧化碳达峰 总体任务举措：深入调整产业结构，淘汰落后产能、控制两高一低行业产能、鼓励绿色制造； 优化用能结构、电气化、提升能效； 加快数字化转型、园区微电网、绿色供应链； 加强资源循环利用
	《 有色金属行业 碳达峰实施方案》	
	《 建材行业 碳达峰实施方案》	
	《关于促进 钢铁工业 高质量发展的指导意见》	
城乡建设 住建部、发改 委	《 城乡建设 领域碳达峰实施方案》	总体目标：2030年前城乡建设领域碳排放达峰 任务举措：低碳城市建设，提高建筑节能水平 推动可再生能源应用、终端电气化、光储直柔 推广绿色建造方式和绿色建材应用
	《“十四五” 建筑节能 与绿色建筑发展规划》	
	《“十四五” 建筑业 发展规划的通知》	

我国应对气候变化的重要行动

部门/主管单位	政策名称	主要内容
交通运输部	《推进多式联运发展优化调整运输结构工作方案》	目标：基础设施发展、节点衔接融合、运输装备绿色智能、运输服务安全可靠 任务举措：优化客货运输结构，提升大宗货物中长距离铁路水路运输比例，建设公共交通体系；提升运输装备能效；优化用能结构
	《绿色交通“十四五”发展规划》	
	《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》	
农业农村部	《农业农村减排固碳实施方案》	目标：农业温室气体减排，增强土壤固碳，保障粮食安全、乡村振兴 任务：种植业减肥增效、稻田管理、畜牧饲喂粪污管理改进、农机节能、农村可再生能源替代等
科技部等	《科技支撑碳达峰碳中和实施方案》	煤炭清洁利用、新能源供应、储能、技术零碳工业流程、低碳建筑、碳捕集等负碳技术
教育部等	《加强碳达峰碳中和高等教育人才培养体系建设工作方案》 《绿色低碳发展国民教育体系建设实施方案》	加强绿色低碳教育、培养专业人才、深化产教融合
财政部	《财政支持双碳工作的意见》	明确支持方向，发挥税收激励作用、政府采购、资金引导等财政手段
绿色消费 发改委等	《促进绿色消费实施方案》	食品、服装、居住家电、交通、包装、文旅等引导
国务院等	《碳排放权交易管理暂行条例》	生态环境部主管，行业范围逐步扩大，免费和有偿结合分配配额，综合因素调整配额分配，处罚条例等
地方行动	《北京市碳达峰实施方案》《河北省碳达峰实施方案》	各地方政府结合实际发展情况制定

减污降碳协同一体研究框架



谢谢!

感谢张强、同丹、郑光洁、耿冠楠、郑博、程静、刘洋、肖清扬、吴清茹等帮助准备材料



<http://meicmodel.org>

<http://tapdata.org>

Tong, D., Cheng, J., Liu, Y., Yu, S., Yan, L., Hong, C., Qin, Y., Zhao, H., Zheng, Y., Geng, G., Li, M., Liu, F., Zhang, Y., Zheng, B., Clarke, L., and Zhang, Q (2020), Dynamic projection of anthropogenic emissions in China: methodology and 2015–2050 emission pathways under a range of socio-economic, climate policy, and pollution control scenarios, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 5729–5757, <https://doi.org/10.5194/acp-20-5729-2020>.

Cheng, J., D. Tong, Q. Zhang, Y. Liu, Y. Lei, G. Yan, L. Yan, S. Yu, R. Y. Cui, L. Clarke, G. N. Geng, B. Zheng, X. Y. Zhang, S. J. Davis, and K. B. He (2021), Pathways of China's PM_{2.5} air quality 2015-2060 in the context of carbon neutrality, *Natl. Sci. Rev.*, <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab078>.

Cheng, J., D. Tong, Y. Liu, S. Yu, L. Yan, Q. Y. Xiao, B. Zheng, G. N. Geng, K. B. He, and Q. Zhang (2021), Comparison of current and future PM_{2.5} air quality in China under CMIP6 and DPEC emission scenarios, *Geophys. Res. Letts.* 48, e2021GL093197.

Liu, Y., D. Tong, J. Cheng, S. J. Davis, S. Yu, B. Yarlagadda, L. E. Clarke, M. Brauer, A. J. Cohen, H. D. Kan, T. Xue, and Q. Zhang (2022), Role of climate goals and clean-air policies on reducing future air pollution deaths in China: a modelling study, *Lancet Planet. Health.*, 6, e92-99.

Cheng, J., D. Tong, Y. Liu, G. N. Geng, S. J. Davis, K. B. He, and Q. Zhang (2023). A synergistic approach to air pollution control