长三角第十一届空气质量管理技术研讨会

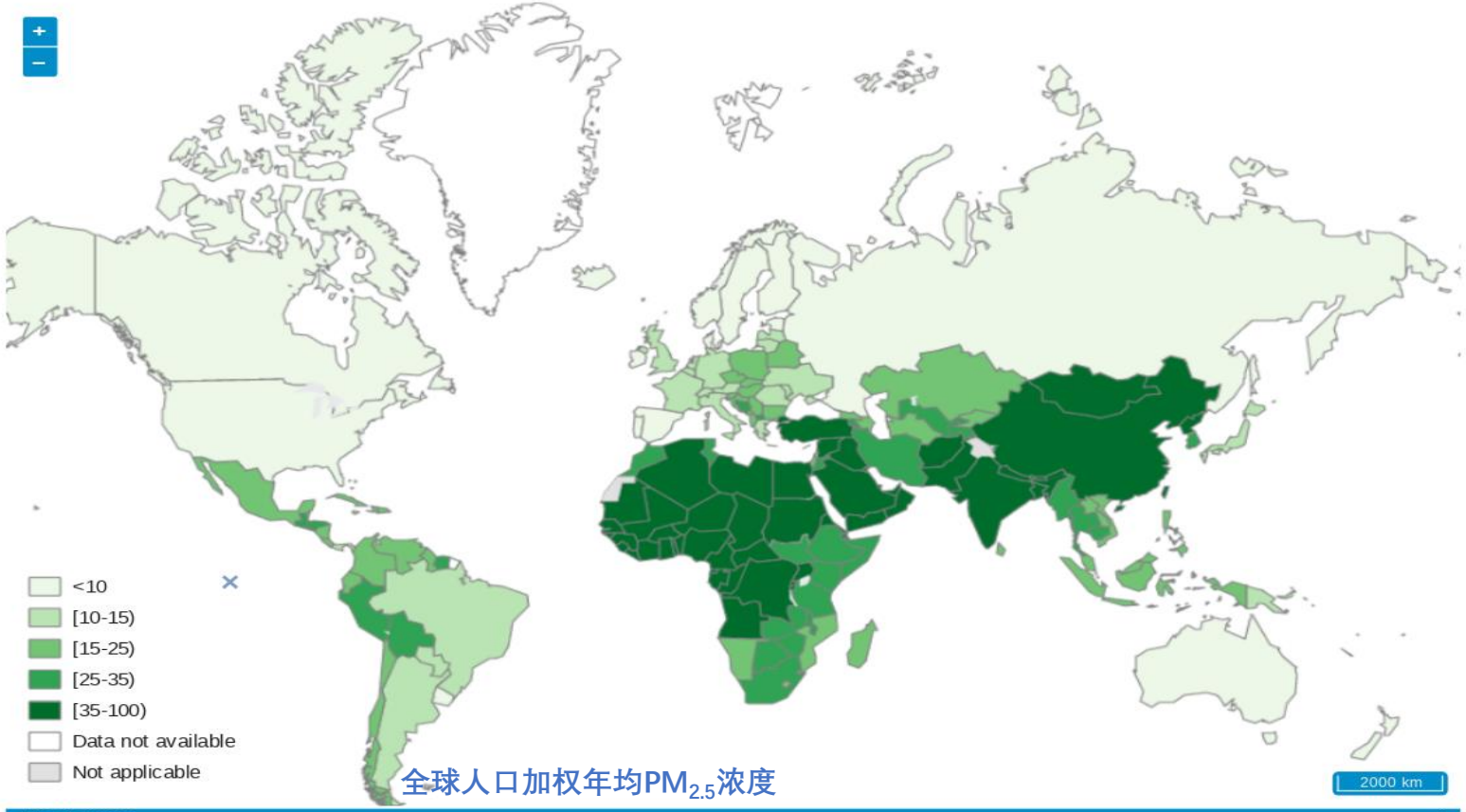
城市双碳行动与清洁空气协同治理路径

贺克斌

2023年08月31日， 上海

- 基本背景
- 融合清单
- 模型预测
- 协同路径

空气污染仍然是全球普遍面临的问题，亚洲首当其冲需要采取行动

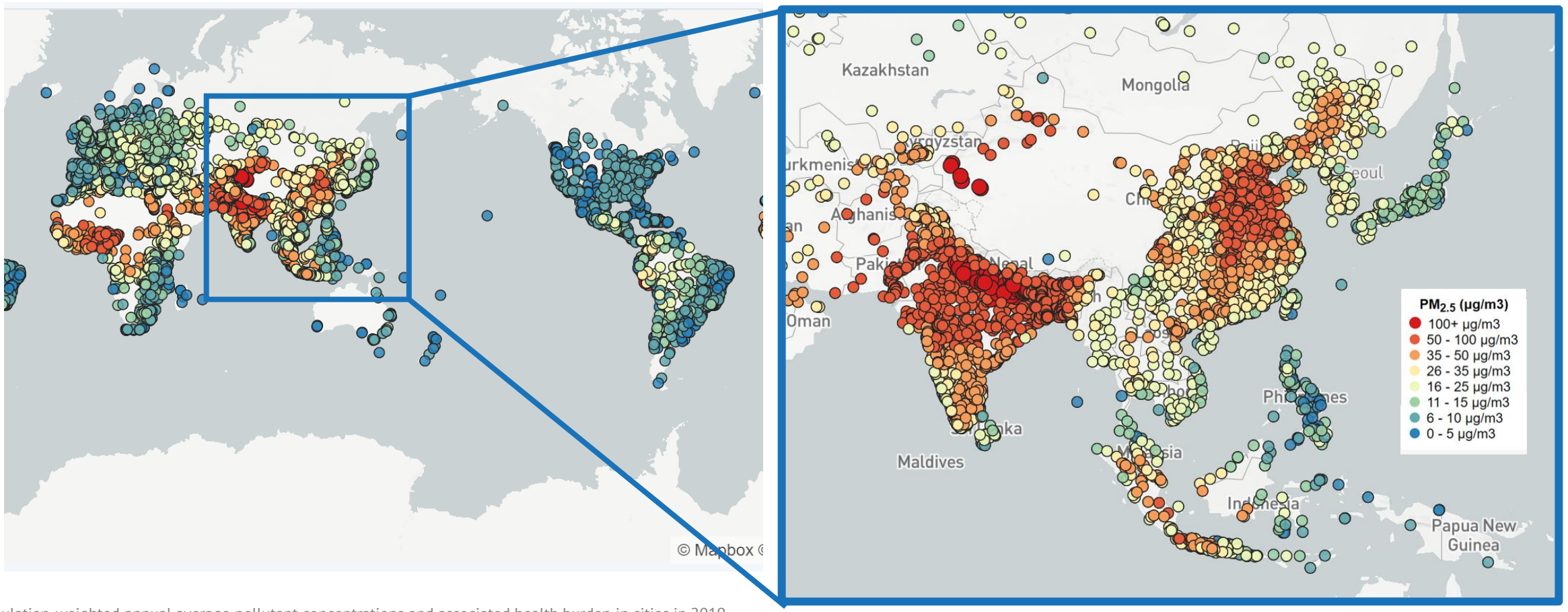


全球人口加权年均$PM_{2.5}$浓度

来源：世界卫生组织，2022

基于全球117个国家的6000多个城市的监测数据显示，几乎全球人口（99%）呼吸的空气都超过了新的指导值要求（5μg/m³）；南亚、东亚和西非地区人口加权年均$PM_{2.5}$浓度处于或高于第一阶段过渡目标值（35μg/m³）。

空气污染仍然是全球普遍面临的问题，亚洲首当其冲需要采取行动

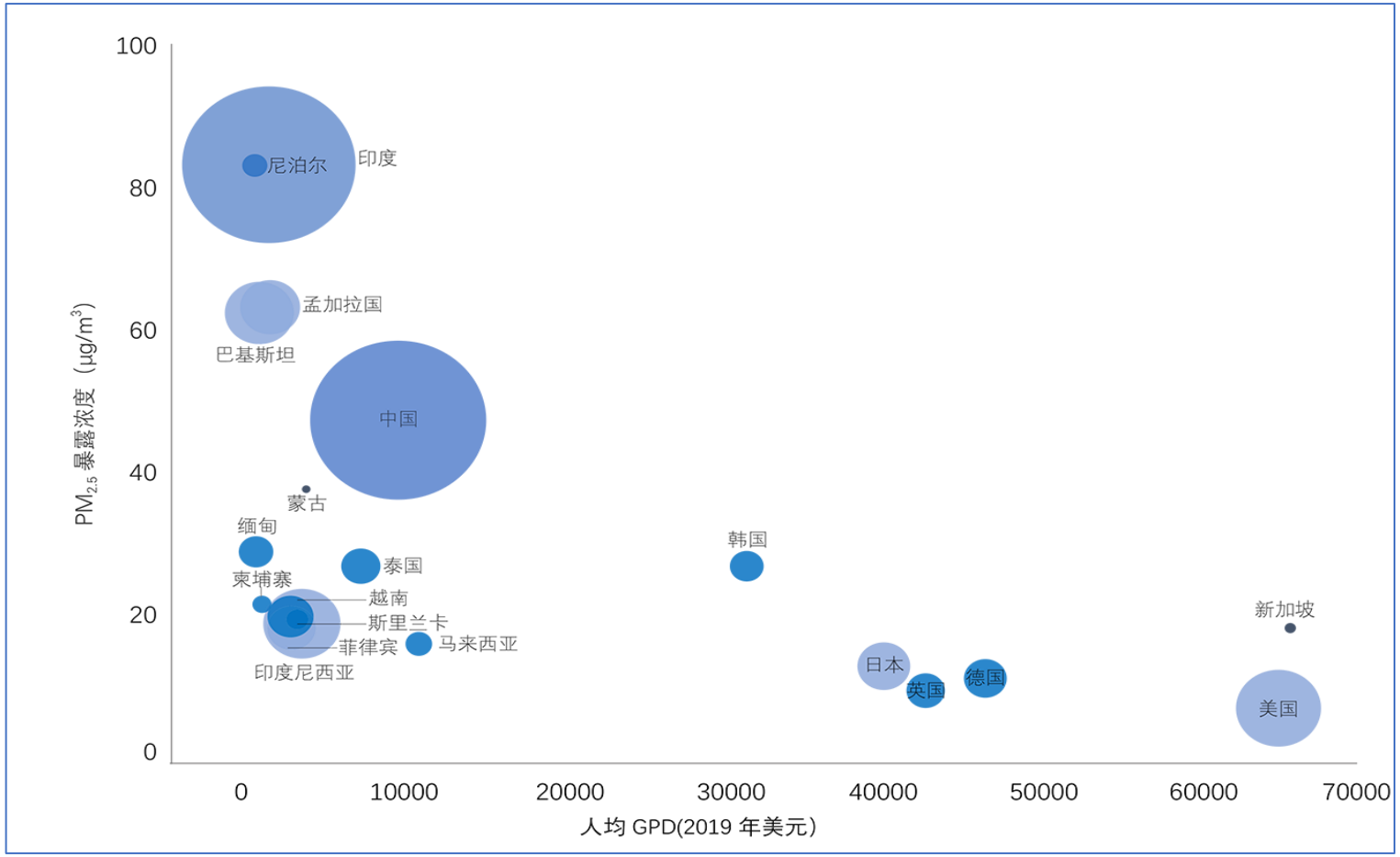


Population-weighted annual average pollutant concentrations and associated health burden in cities in 2019

来源：健康效应研究所，2022

2019年全球城市人口加权年均$PM_{2.5}$浓度

部分亚洲国家则仍面临环境和经济双重挑战



2019年各国$PM_{2.5}$暴露浓度与人均GDP

注：人均GDP使用2019年美元价衡量，气泡大小代表各国人口数量。

数据来源：Global Burden of Disease Study 2019, World Development Indicators数据库

近一半亚洲国家的空气质量不能达到当地标准

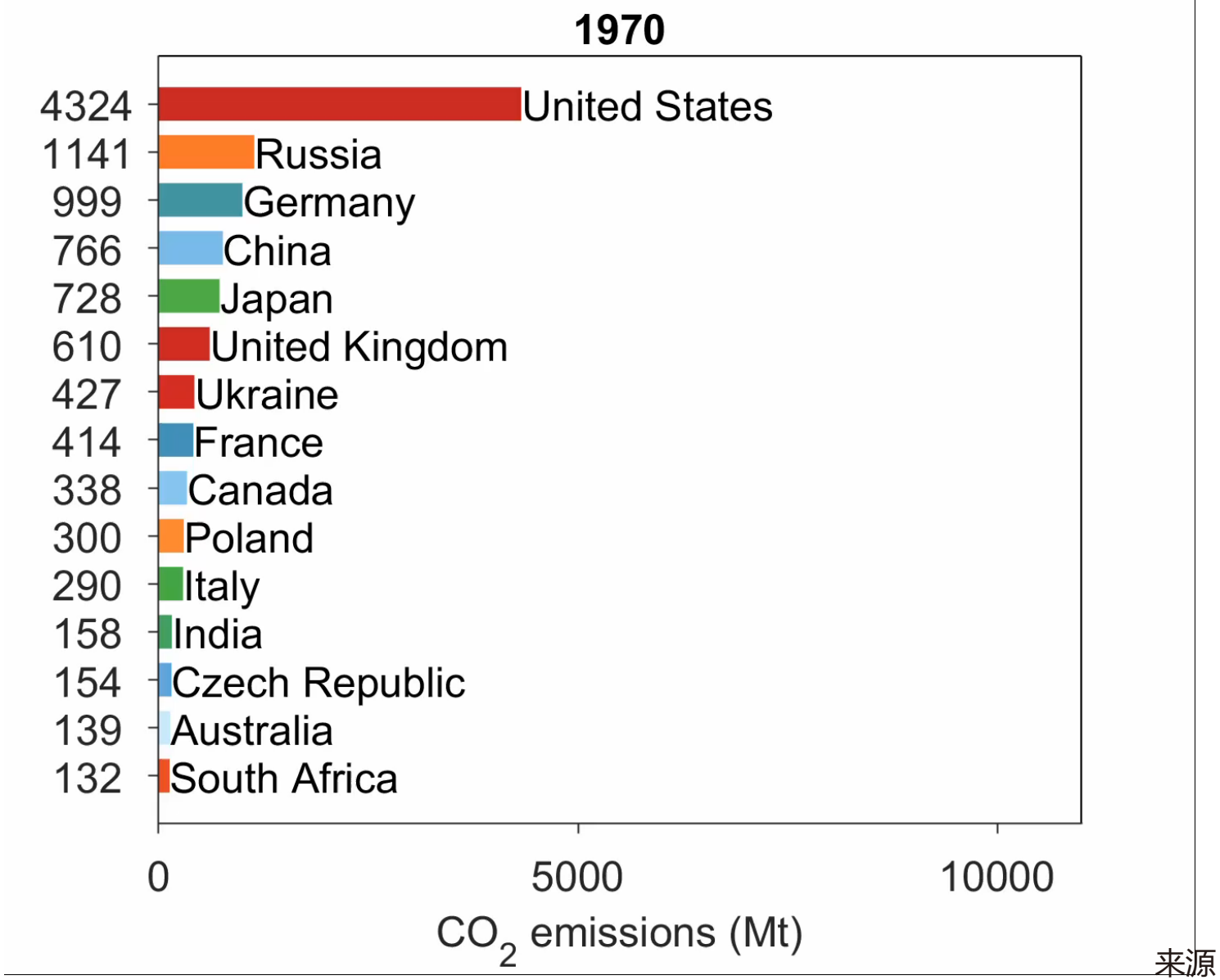
各国$PM_{2.5}$年均浓度标准限值和2021年监测浓度

来源：CAA

有近一半亚洲国家的空气质量不能达到当地标准。尽管巴基斯坦、孟加拉国、缅甸等国家设置了相对严格的限值（参考WHO IT-3、IT-4），但监测浓度值却超标严重。

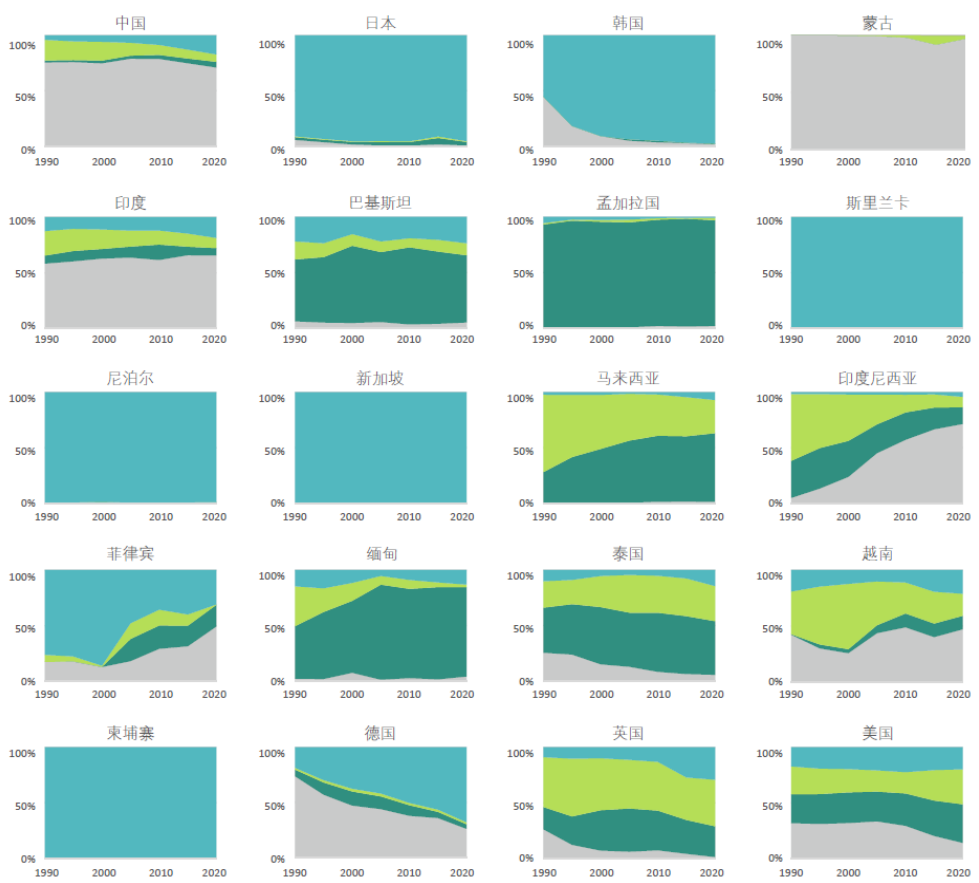
中国$PM_{2.5}$年均浓度标准限值参考WHO IT-1，是最为宽松的过渡阶段目标，仅比印度标准严格。但中国标准对于空气质量改善起到了积极的引领作用，当前全国开展$PM_{2.5}$监测的城市年均浓度平均值已经低于标准限值要求，为 30μg/m^3 。

全球前十五碳排放国历史演变



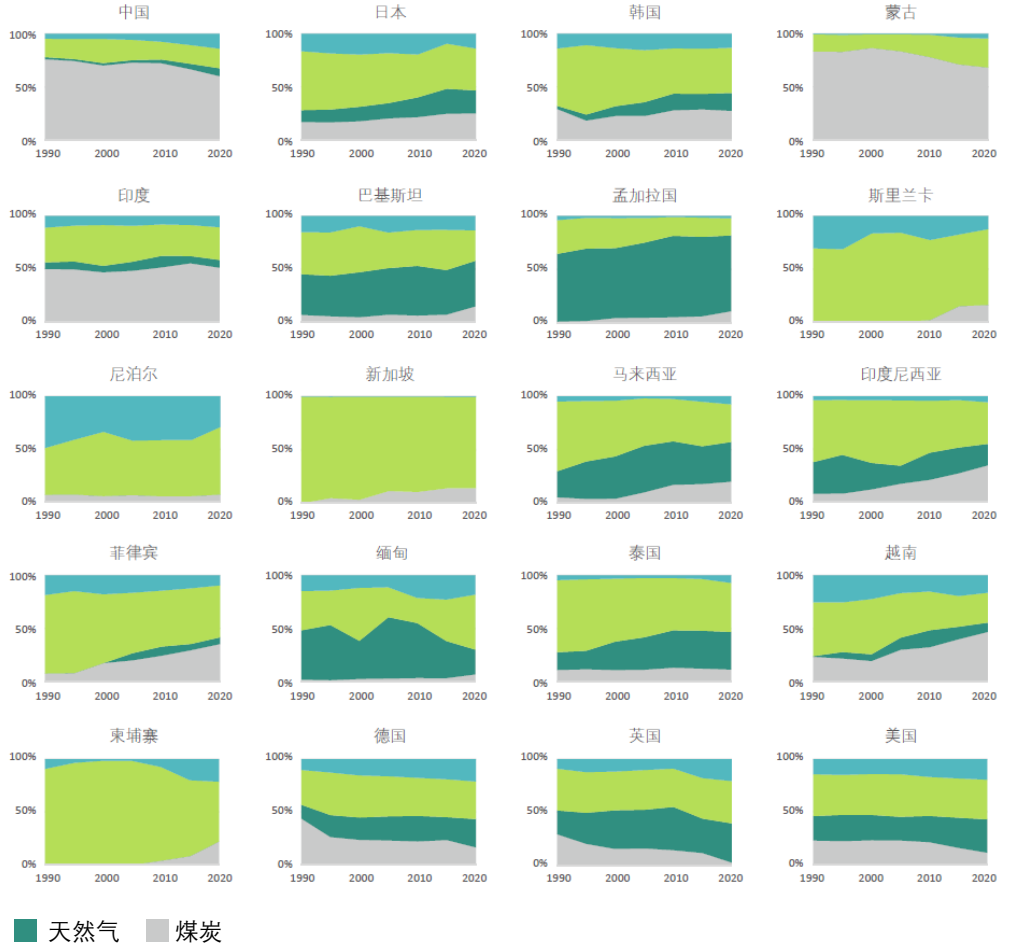
来源：清华大学MEIC数据平台

多数亚洲国家对化石能源依赖度较高，中蒙印煤炭消费比重超过一半



1990-2019年各国能源生产结构变化趋势

数据来源： U.S. Energy Information Administration数据库



1990-2019年各国能源消费结构变化趋势

数据来源： U.S. Energy Information Administration数据库

可再生能源与核能　石油　天然气　煤炭

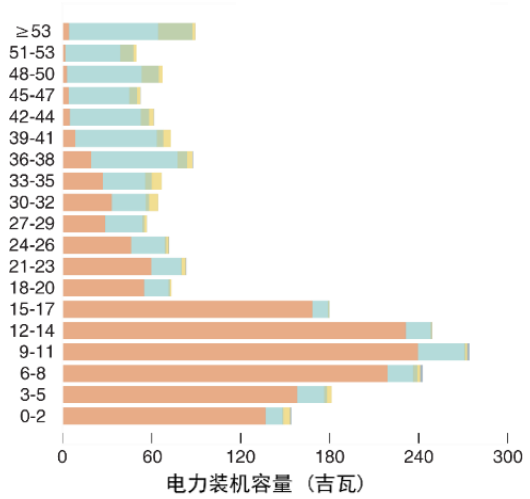
相比欧美典型国家逐步转向更为清洁、均衡的能源结构，多数亚洲国家对化石能源依赖度较高。

中国煤炭在能源生产和消费中始终占据绝对主导地位，但是占比在逐步下降。蒙古和印度的能源结构与中国类似，煤炭消费占比均超过一半以上。

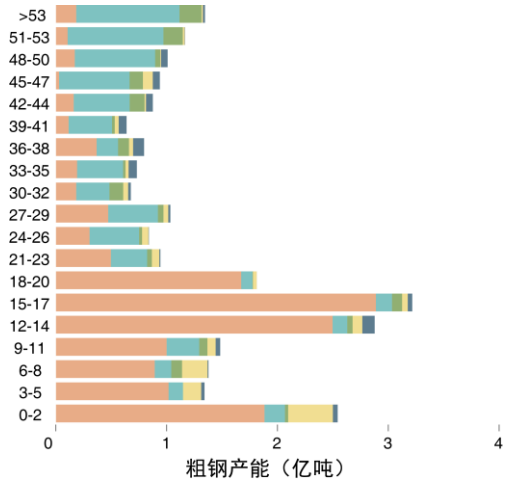
东南亚国家对石油消费的依赖明显，比例在28%~86%之间。印尼、越南、菲律宾的产能结构中，煤炭生产逐步上升。

亚洲重点化石能源基础设施呈现年轻化分布特征

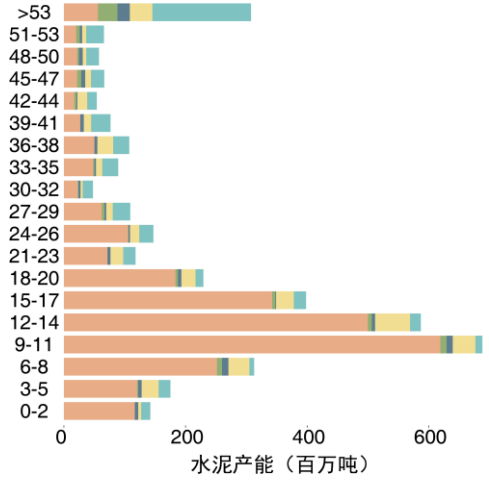
电力



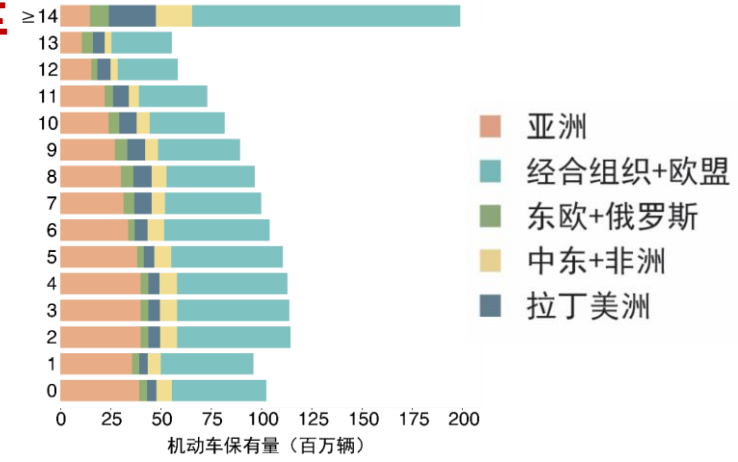
钢铁



水泥



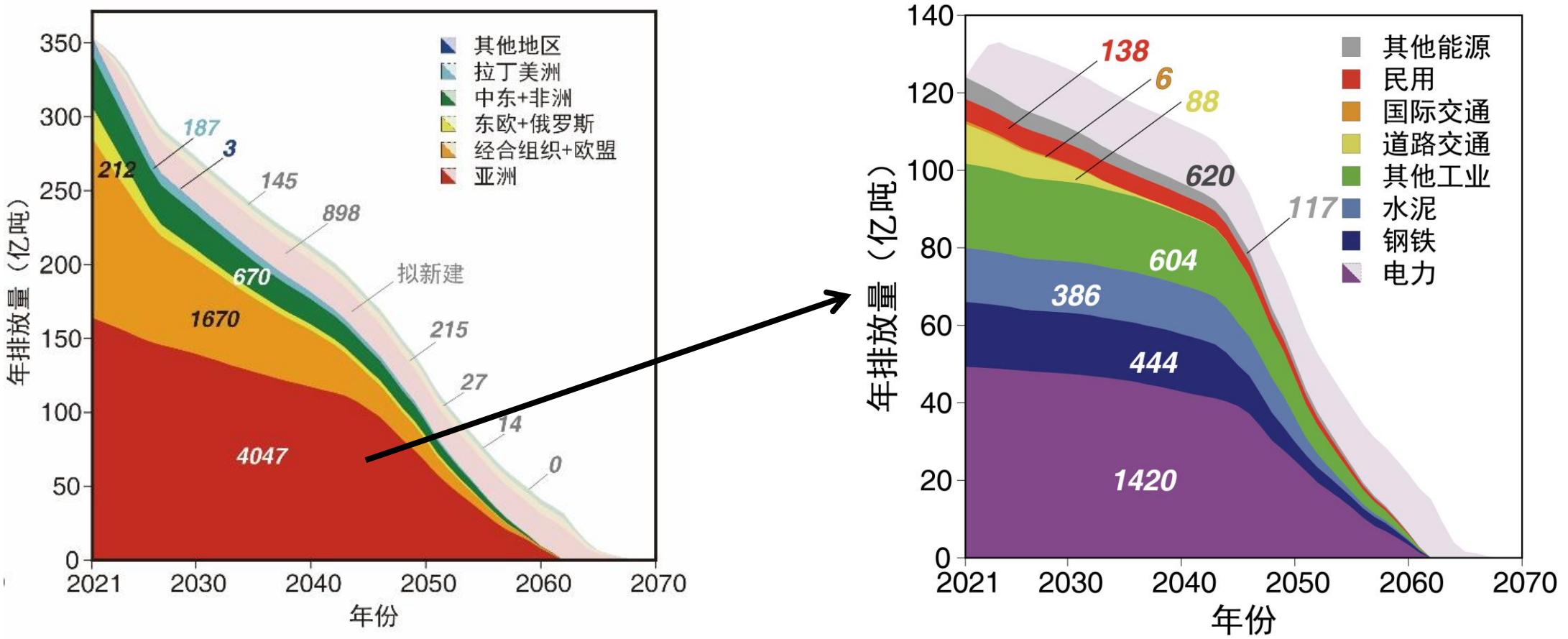
机动车



全球能源基础设施碳排放及锁定效应2021

以发展中国家为主的亚洲等区域是当前重点行业能源基础设施的发展热点。

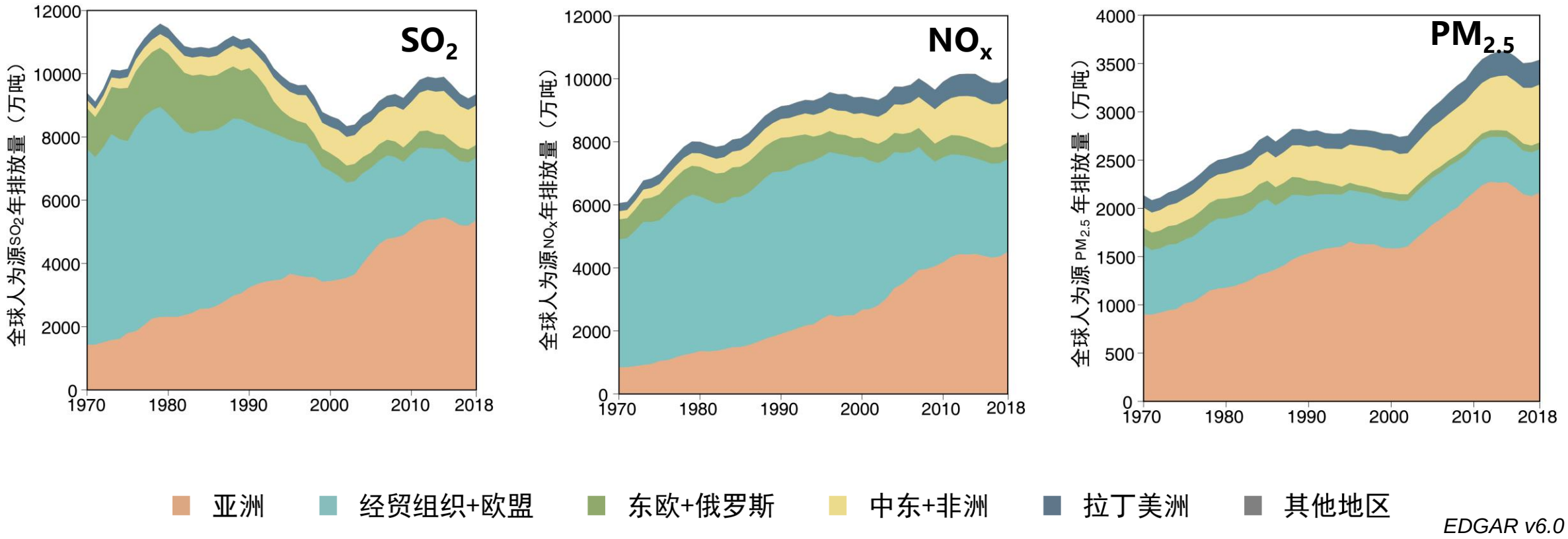
亚洲年轻化能源基础设施锁定未来气候影响



全球能源基础设施碳排放及锁定效应2021

亚洲贡献了2021年全球碳锁定效应的50%，电力、工业主导了现有能源基础设施的碳排放锁定效应，总计占比超过70%.

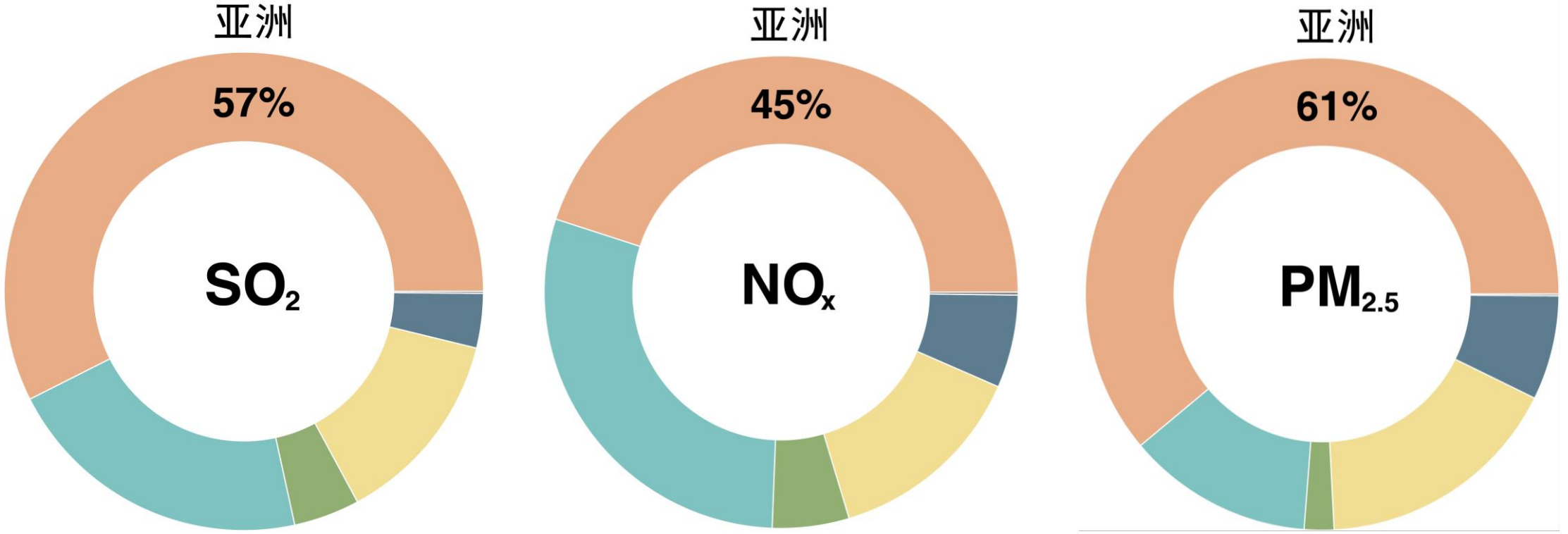
污染物排放热点逐渐向亚洲地区转移



EDGAR v6.0

近五十年来亚洲主要污染物排放实现跨越式增长，已经主导了当前全球人为源污染物排放的发展态势。

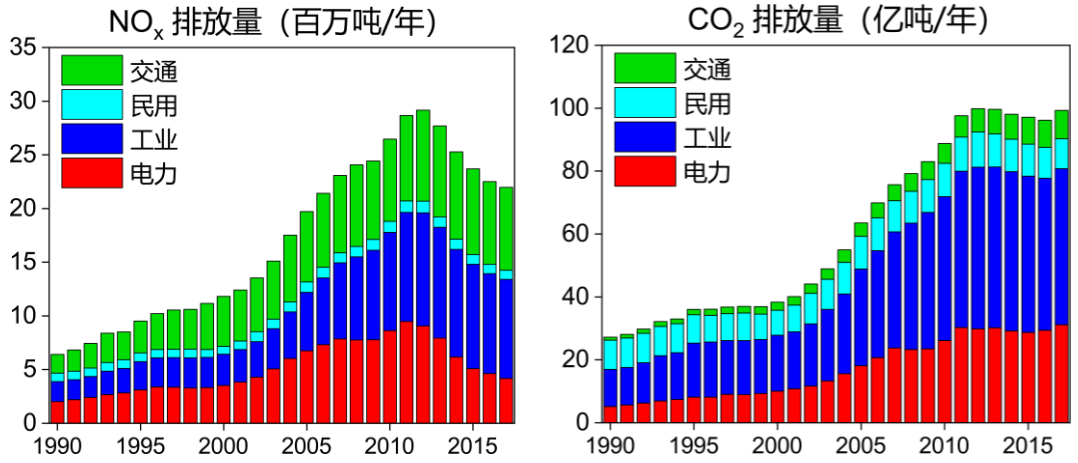
亚洲污染物排放集中度显著



EDGAR v6.0

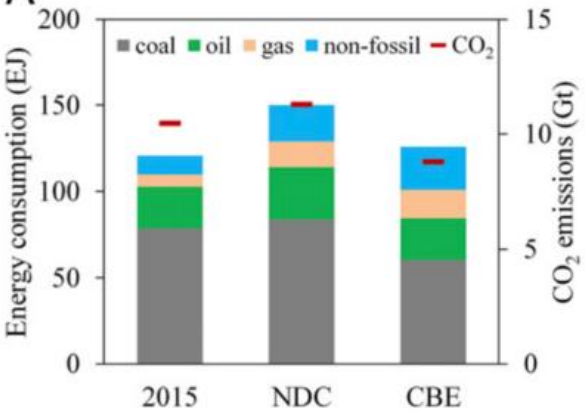
2018年亚洲地区主要污染物贡献率达45-61%，仍面临大气污染防治的严峻紧迫形势。

减污降碳协同治理是实现气候目标和空气质量改善目标的关键



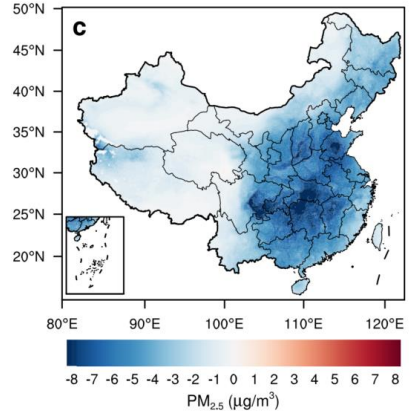
来源：MEIC

空气质量改善需求推动持续碳减排



Xing et al., PNAS, 2020

气候目标推动空气质量改善



Tang et al., Nat. Commun, 2022

- 大气污染物和二氧化碳排放同根同源，通过减少化石燃料燃烧能够实现减污降碳协同治理。
- 气候目标和空气质量改善目标存在协同关系，减污降碳协同治理将是未来实现气候目标和空气质量改善目标的关键。

在城市层面推进减污降碳协同治理对实现宏观目标具有重要意义

关于京津冀大气污染传输通道城市执行大气污染物特别排放限值的公告

为贯彻落实党的十九大关于“打赢蓝天保卫战”“提高污染排放标准”的要求，切实加大京津冀及周边地区大气污染防治工作力度，依据《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国大气污染防治法》，决定在京津冀大气污染传输通道城市执行大气污染物特别排放限值。现将有关事项公告如下：

一、执行地区

执行地区为京津冀大气污染传输通道城市行政区域。

京津冀大气污染传输通道城市包括北京市，天津市，河北省石家庄、唐山、廊坊、保定、沧州、衡水、邢台、邯郸市，山西省太原、阳泉、长治、晋城市，山东省济南、淄博、济宁、德州、聊城、滨州、菏泽市，河南省郑州、开封、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳市（以下简称“2+26”城市，含河北雄安新区、辛集市、定州市，河南巩义市、兰考县、滑县、长垣县、郑州航空港区）。

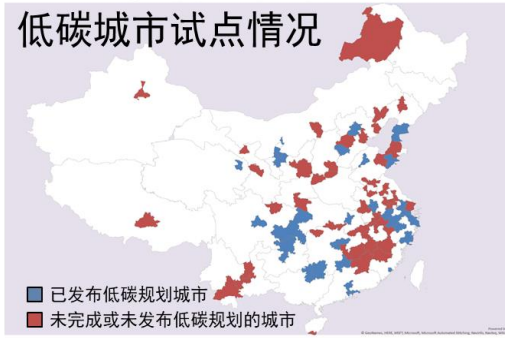
二、执行行业与时间

（一）新建项目。

1.对于国家排放标准中已规定大气污染物特别排放限值的行业以及锅炉，自2018年3月1日起，新受理环评的建设项目执行大气污染物特别排放限值。

2.对于目前国家排放标准中未规定大气污染物特别排放限值的行业，待相应排放标准制修订或修改后，新受理环评的建设项目执行相应大气污染物特别排放限值，执行时间与排放标准实施时间或标准修改单发布时间同步。

3.地方有更严格排放控制要求的，按地方要求执行。



生态环境部
国家发展和改革委员会
工业和信息化部
住房和城乡建设部
交通运输部
农业农村部
国家能源局

文件

环综合〔2022〕42号

关于印发《减污降碳协同增效实施方案》的通知

各省、自治区、直辖市和新疆生产建设兵团生态环境厅（局）、发展改革委、工业和信息化主管部门、住房和城乡建设厅（局）、交通运输厅（局、委）、农业农村（农牧）厅（局、委）、能源局：

《减污降碳协同增效实施方案》已经碳达峰碳中和工作领导小组同意，现印发给你们，请结合实际认真贯彻落实。

生态环境部 国家发展和改革委员会
工业和信息化部 住房和城乡建设部
交通运输部 农业农村部
国家能源局
2022年6月10日

（十八）开展城市减污降碳协同创新。统筹污染治理、生态保护以及温室气体减排要求，在国家环境保护模范城市、“无废城市”建设中强化减污降碳协同增效要求，探索不同类型城市减污降碳推进机制，在城市建设、生产生活各领域加强减污降碳协同增效，加快实现城市绿色低碳发展。（生态环境部、国家发展改革委、住房城乡建设部等按职责分工负责）

- 城市是中国减排政策落地实施的独立行政单元，也是减污降碳协同治理工作的先行者。过去减污和降碳工作首先分别在重点区域城市和试点城市开展，然后逐步将经验推广至全国。

- 2022年发布的《减污降碳协同增效实施方案》提出开展城市减污降碳协同创新、探索不同类型城市减污降碳推进机制，凸显了在城市层面推进减污降碳工作的重要意义。

中国城市减污降碳协同治理研究进展

现有研究	研究对象	研究方法	研究时段	研究问题
Chen et al., 2006	上海	MARKAL	2000-2020	能源政策的协同效益
Liu et al.,2013	北京	GAINS-city	2005-2030	协同治理路径探究
谢元博等, 2013	北京	LEAP	2010-2020	协同治理路径探究
Ramaswami et al., 2017	280个地级市	能源级联与物质流交换模型	--	跨部门策略的协同减排效益
Liu et al., 2017	苏州	能源平衡模型	2010-2020	碳减排策略下的协同效益
Lin et al., 2018	厦门	LEAP	2012-2050	碳达峰目标下的协同效益
Wu et al., 2021	广州	LEAP	2015-2030	碳达峰目标下的协同效益
Jiang et al., 2021	深圳	LEAP	2015-2030	协同治理路径探究
Shu et al., 2022	“2+26”城市	GAINS-JJJ	2017-2030	“蓝天保卫战”的协同效益
清华大学, 2022	济南	LEAP	2019-2035	空气质量达标目标下的协同效益

- 现有研究聚焦中短期目标城市在碳达峰/空气质量目标下的减污降碳协同治理路径。
- 从研究对象来看，以**案例型研究**居多，**面向全国城市的研究很少。**

城市减污降碳协同治理案例研究具有较高精度

城市本地数据收集

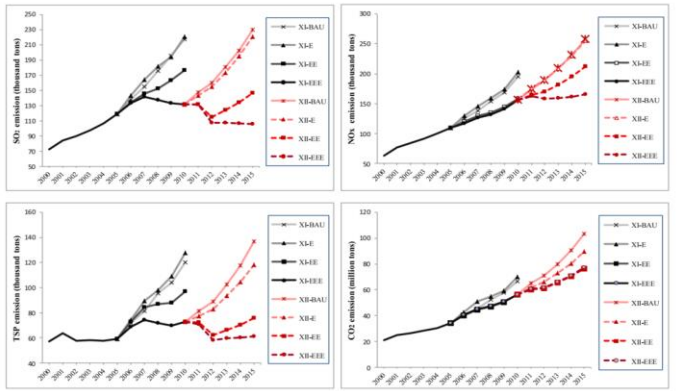
年鉴+当地部门提供统计数据

Table 1
Data sources of LEAP-Xiamen plus model.

Data requirements	Sources
Basic social and economic data	
GDP, population, industrial structure	Statistical Yearbook of the Xiamen Special Economic Zone (2011–2016)
Energy consumption data	
Coal	Municipal Statistical Bureau Municipal Bureau of Economy and Technology Information
Gasoline, diesel, fuel oil, LPG, crude oil	Municipal Statistical Bureau Xiamen Development and Reform Commission Xiamen Transportation Bureau
Natural gas	Municipal Statistical Bureau Municipal Bureau of Utilities and Gardening
Electricity	Xiamen Construction Bureau Fujian Electronic Power Company Limited
Non-energy sector data	
Agricultural and industrial production	Statistical Yearbook of the Xiamen Special Economic Zone (2011–2016)
Waste disposal	Municipal Statistical Bureau Xiamen Environmental Protection Bureau
Forest data	Municipal Bureau of Utilities and Gardening

Lin et al., JCP, 2018

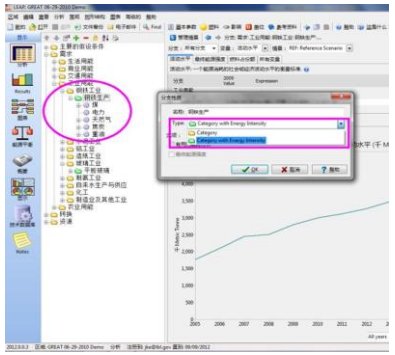
历史协同减排效益测算



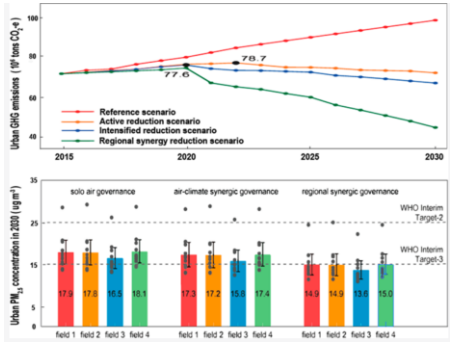
乌鲁木齐“十一五”规划产生的协同减排效益分析

Zhou et al., JCP, 2016

未来协同治理路径研究



LEAP软件截图



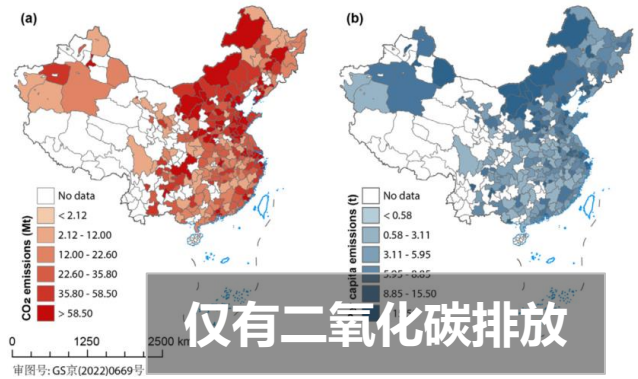
Jiang et al., EST, 2021

深圳市协同治理路径研究

案例型研究收集了大量城市本地数据，支持开展较高精度的协同治理研究。基于本地数据建立的大气污染物和二氧化碳排放融合清单可支持历史协同减排效益测算。将本地化参数输入以LEAP为代表的具有细致行业划分、丰富技术细节的自下而上的模型中，可模拟案例城市在协同治理路径下的排放变化情况。

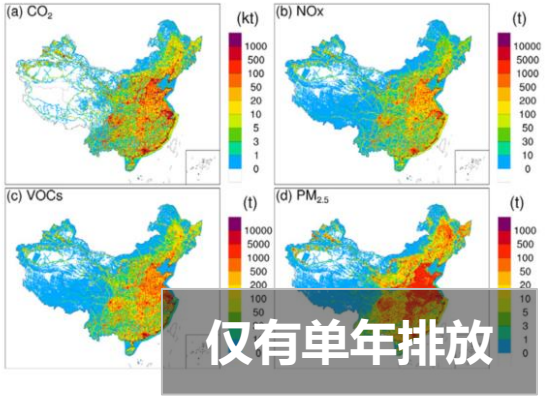
尚无成熟的基础数据库和技术方法支撑全国城市开展相关研究

全国城市尺度基础排放数据库



仅有二氧化碳排放

Shan et al., 2022



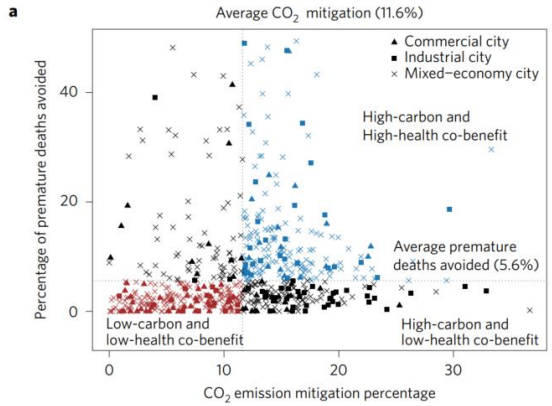
仅有单年排放

Gao et al., 2022

限制

全国城市尺度协同治理研究

中国城市跨部门碳减排政策的健康协同效益



Ramaswami et al., NCC，2017

- 各类案例研究采用的基础数据不尽相同，可比性较差。
- 缺少全国城市尺度二氧化碳和主要大气污染物的融合清单序列。

- 已有的全国城市尺度协同治理研究未能建立完整的自下而上城市未来预测模型，仅讨论了特定的减排政策。

- 基本背景
- 融合清单
- 模型预测
- 协同路径

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**

大气污染物与二氧化碳的融合排放清单及来源识别

融合清单源分类体系建立

行业 产品/燃料类型 | 工艺/燃烧技术 末端控制技术

活动水平数据系统重构

自上而下宏观统计 | 自下而上调查核算

碳排放计算参数扩充

高分辨率时空分配重构

设备级演替 | 面源时空迁移 | 路网模型

污染物与CO_2排放深度融合清单构建

多目标协同减排方案制定

协同减排措施梳理

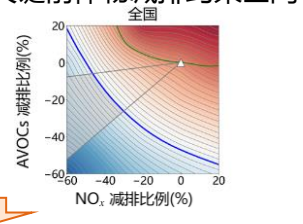
能源转型 能效提升 | 硫氮尘常规污染物治理 VOC专项治理

协同减排策略设计

单项措施评价

协同优选组合指标体系

O_3关键前体物减排约束区间



协同减排情景制定

能源转型路径

污染治理路径

碳达峰路径
提前达峰路径
减污降碳协同路径 …

全国及重点区域协同减排路径识别

全国及地方层面规划目标梳理

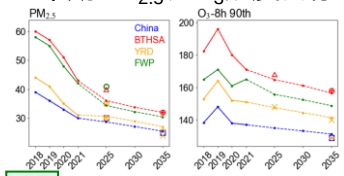
2035年实现“美丽中国” … | 2030实现碳达峰 2060年实现碳中和 …

自下而上的城市空气质量目标测算

城市污染分级

自下而上的空气质量目标测算

近中期$PM_{2.5}$、O_3浓度目标



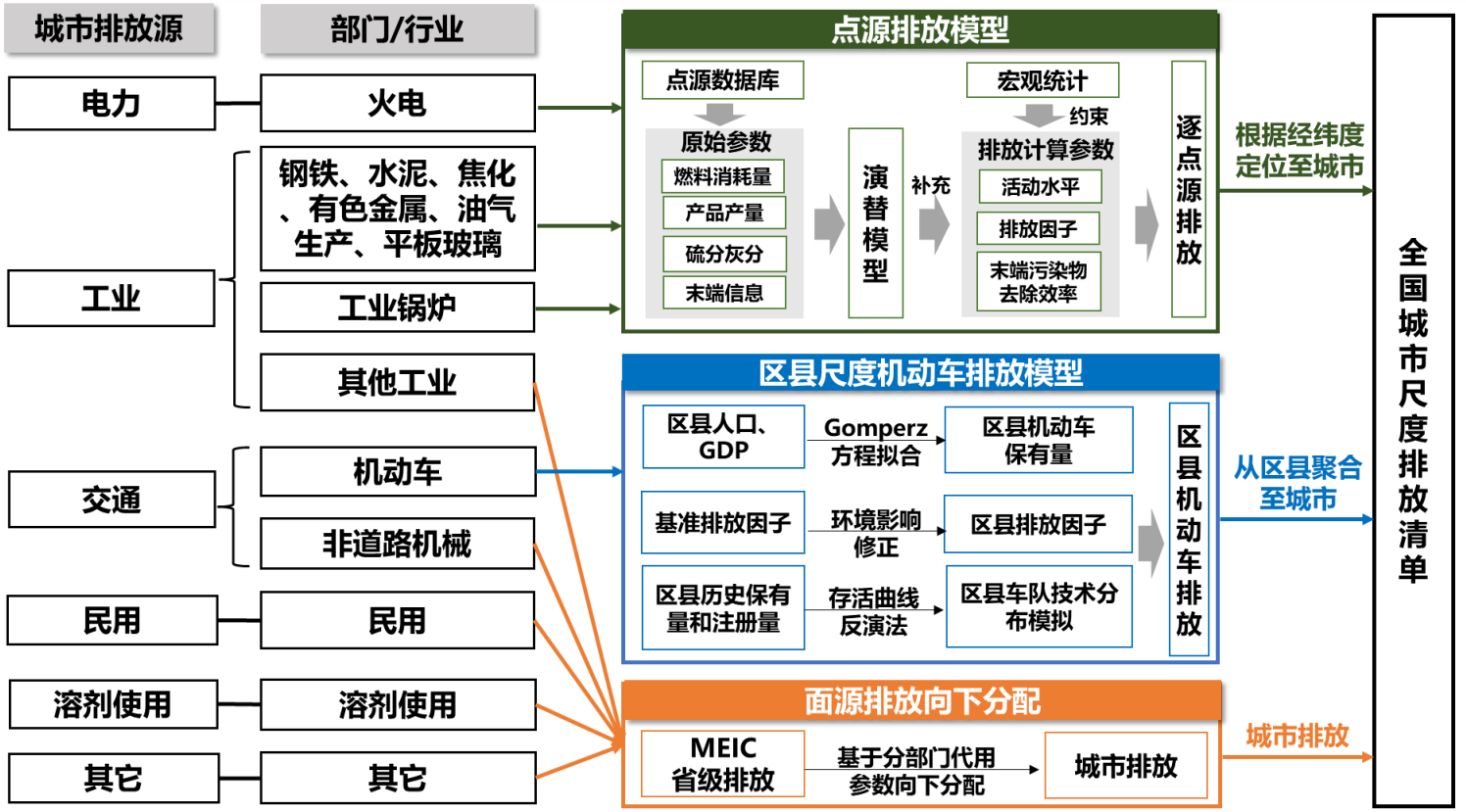
全国及重点区域协同减排路径识别

排放预测模型DPEC → 碳和污染物排放变化

空气质量模型 WRF-CMAQ → $PM_{2.5}$和O_3浓度变化

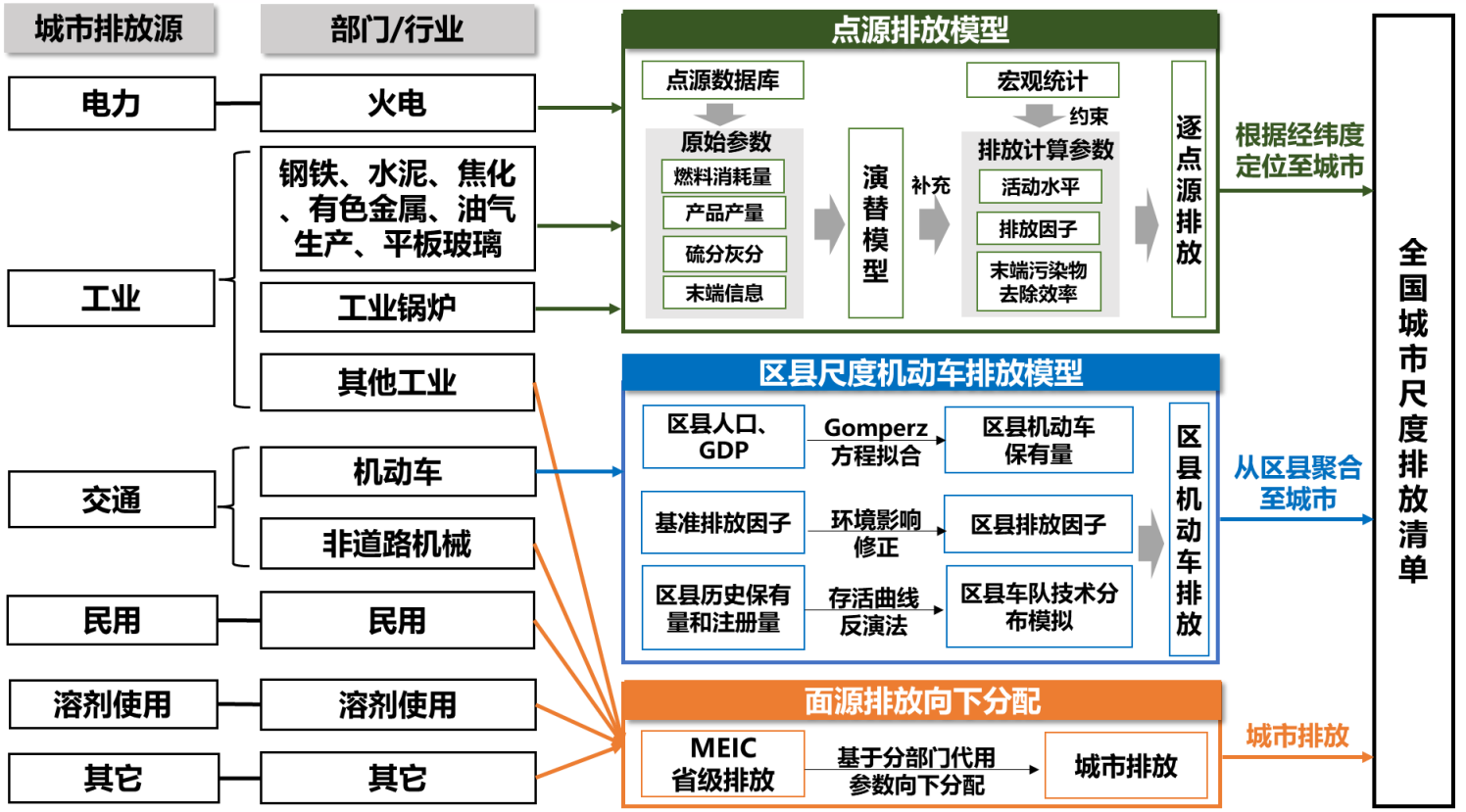
Tsinghua University

中国城市尺度排放清单建立方法学



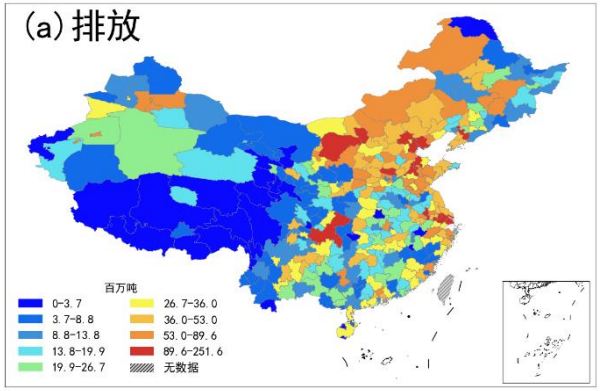
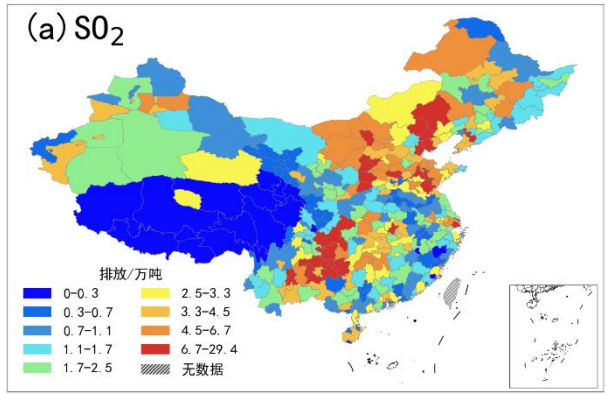
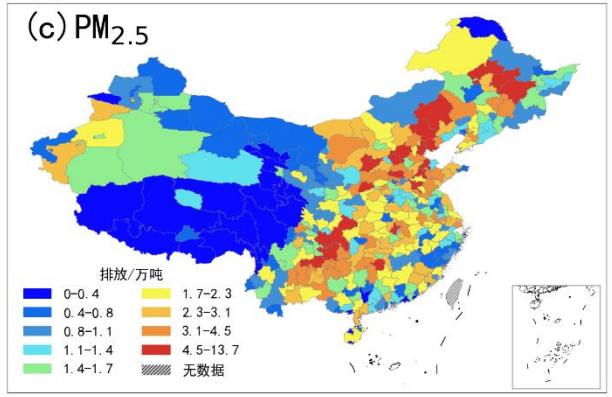
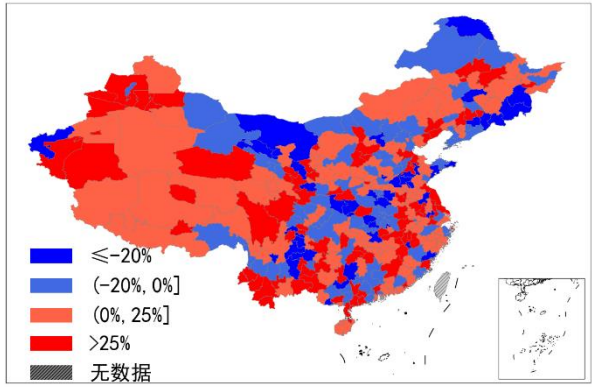
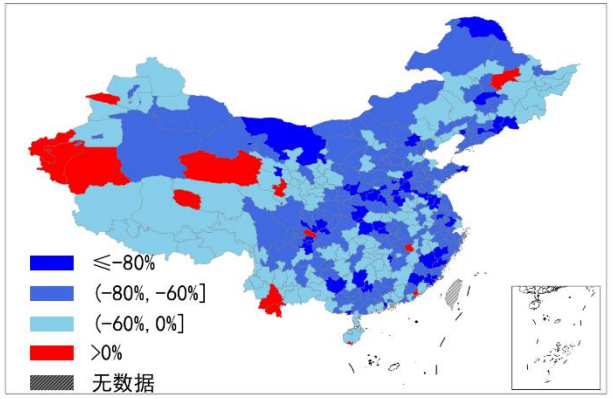
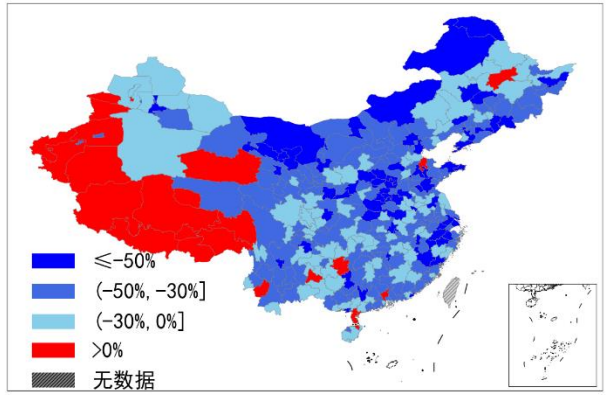
- 使用多源数据融合方法建立了全国城市排放基础数据库，根据数据特点和排放机理分别通过点源排放模型、区县尺度机动车排放模型和面源排放向下分配方法进行分部门排放表征。
- 耦合形成了2012-2018年中国城市尺度高分辨率二氧化碳与大气污染物排放融合清单，完整覆盖了各城市行政区划内所有源分类产生的直接排放。

中国城市尺度排放清单建立方法学



- 通过引入环境统计数据库、中国燃煤电厂数据库、中国水泥排放数据库、中国钢铁点源数据库等数据库中的大量点源信息及机动车模型中的区县尺度参数，保证了各城市排放计算参数具有较高的本地化率，进而能够较为准确地刻画城市排放特征。

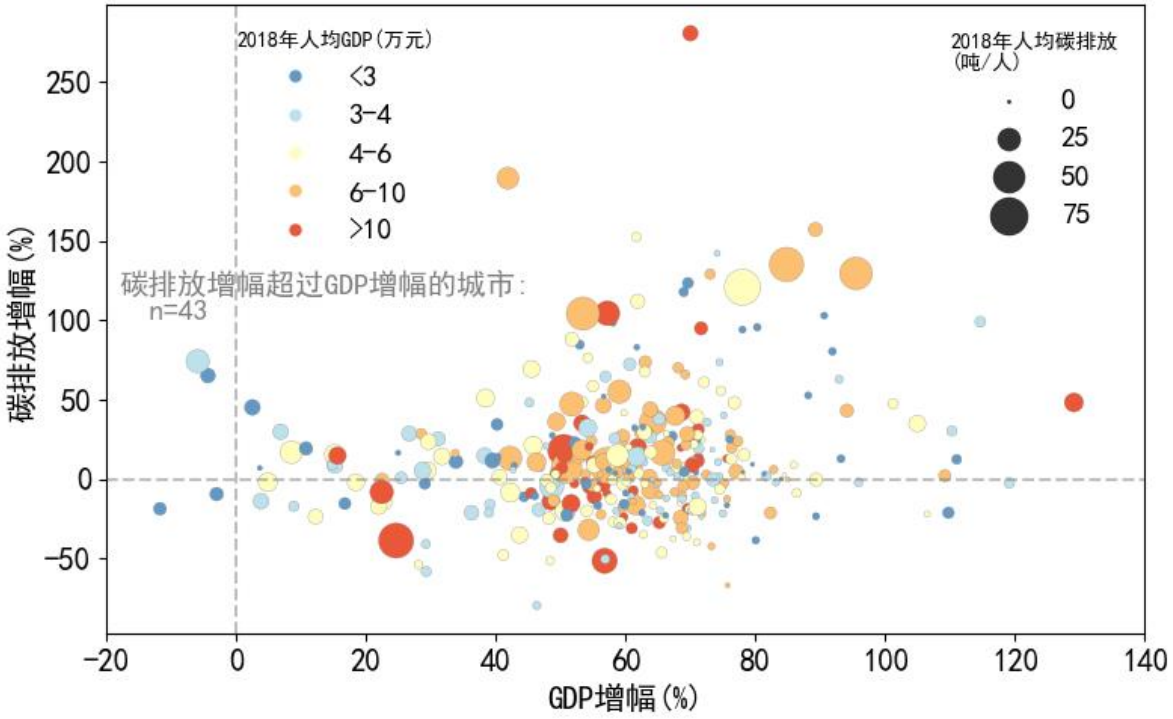
全国城市CO_2与主要大气污染物排放分布及变化情况

	CO_2	SO_2	$PM_{2.5}$
2018年排放			
2018年相对2012年排放变化比例			

- 我国城市二氧化碳和大气污染物排放整体呈现东高西低的分布格局，城市排放总量显示出高度不均等性。
- 2012-2018年，清洁空气行动分别推动全国95.8%和93.5%的城市实现了SO_2和$PM_{2.5}$减排。同时期实现碳减排的城市仅占38.2%。

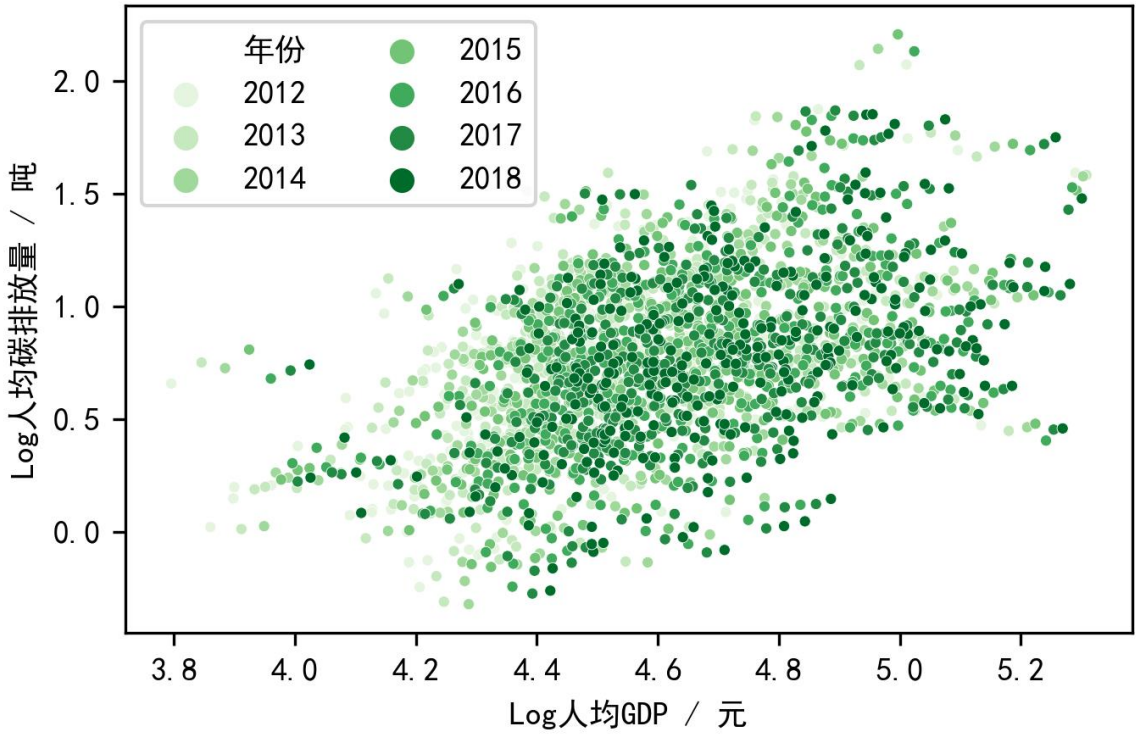
中国城市CO_2排放变化趋势分析

全国城市碳排放增幅与GDP增幅关系图



- 2012-2018年间，60%以上的城市（209个）未能实现GDP增长与碳排放增长脱钩，其中有43个城市的碳排放增速超过了GDP增速。

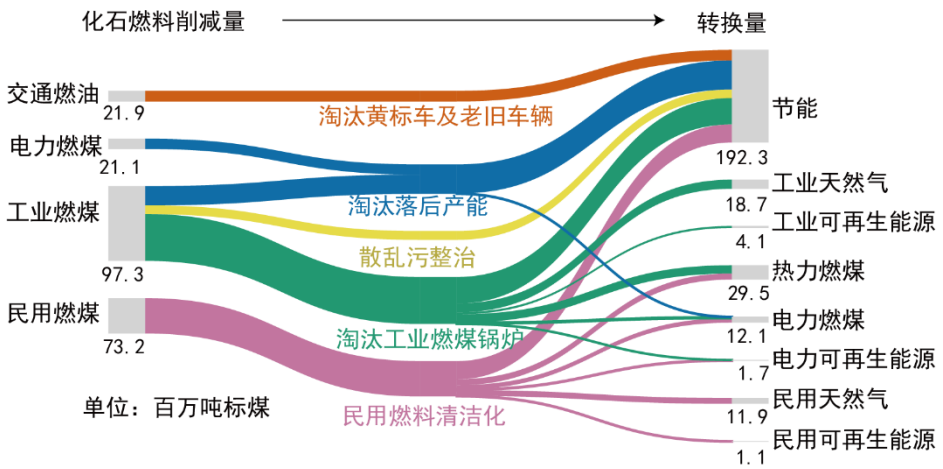
全国城市人均碳排放与人均GDP关系图



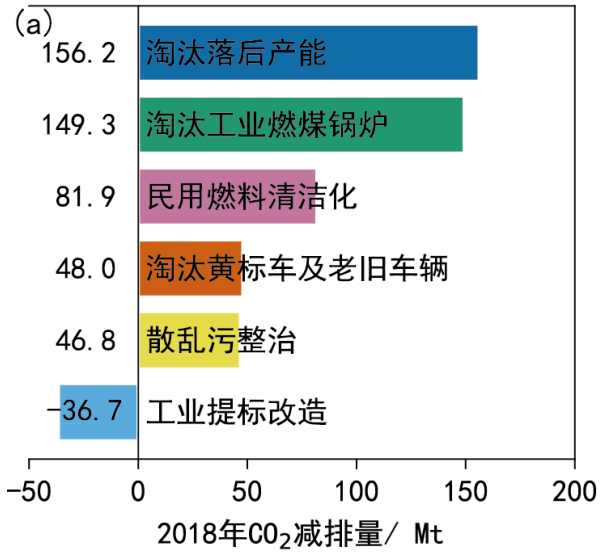
- 固定效应模型拟合结果显示，我国城市人均GDP和人均碳排放间整体仍然呈现正相关关系，尚未出现库兹涅茨曲线的倒U型特征。

中国协同减排情况分析

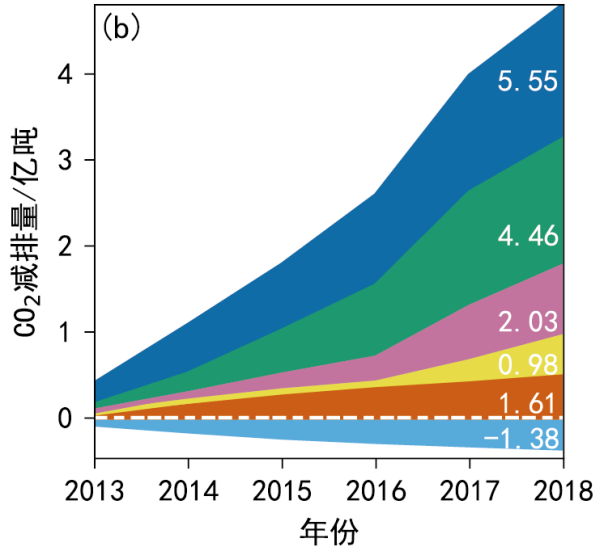
协同减排措施产生的能源变化情况



2018年CO_2协同减排情况



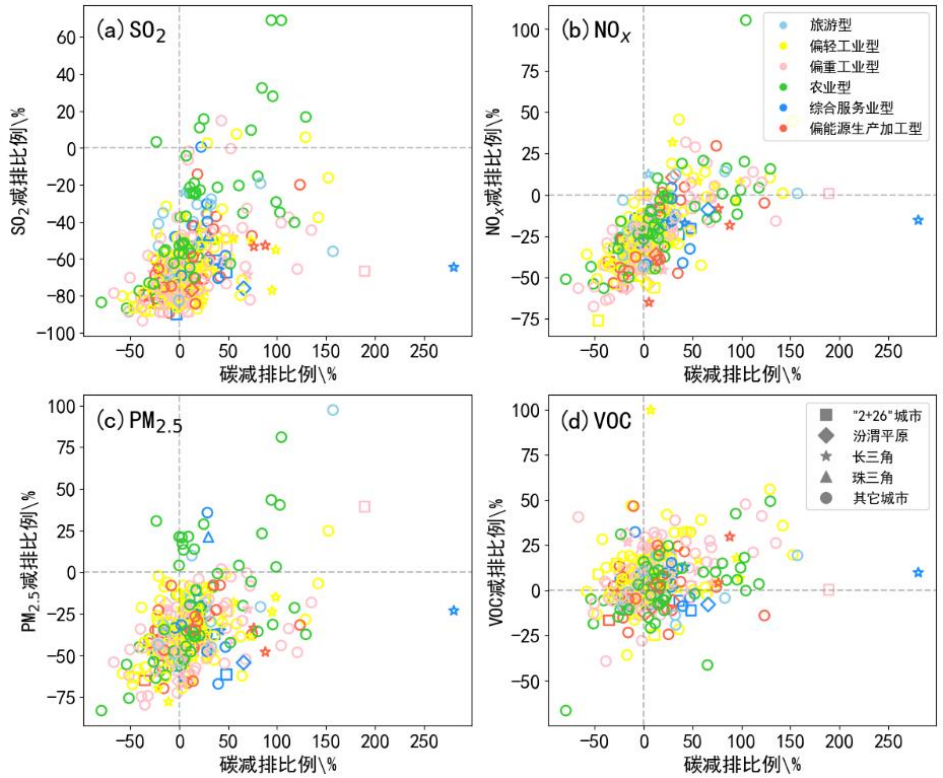
2013-2018年累计协同减排情况



研究量化了清洁空气行动各项协同减排措施带来的能源供应和消费结构变化以及相应的碳减排效益。2013 年至 2018 年，清洁空气行动产生的累计二氧化碳净减排量达到13.3亿吨，占同时段全国累计二氧化碳排放量的2.3%。淘汰落后产能和淘汰工业燃煤锅炉为碳协同减排量最高的两项措施。

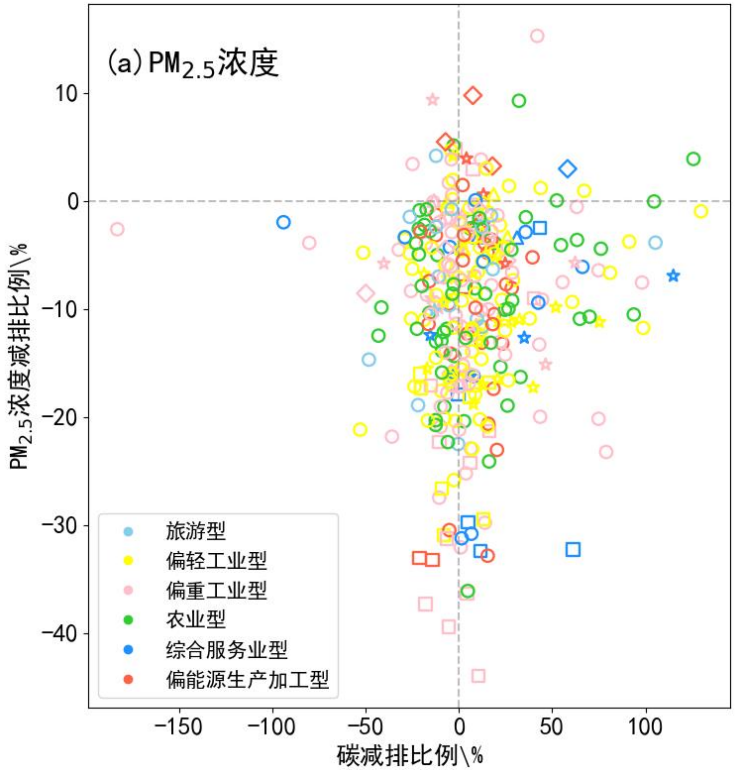
中国城市协同减排情况分析

2012-2018年城市协同减排情况分析



- 2012-2018年间，有127个城市实现SO_2、NO_X、$PM_{2.5}$和CO_2协同减排，仅占全国城市的37.4%。

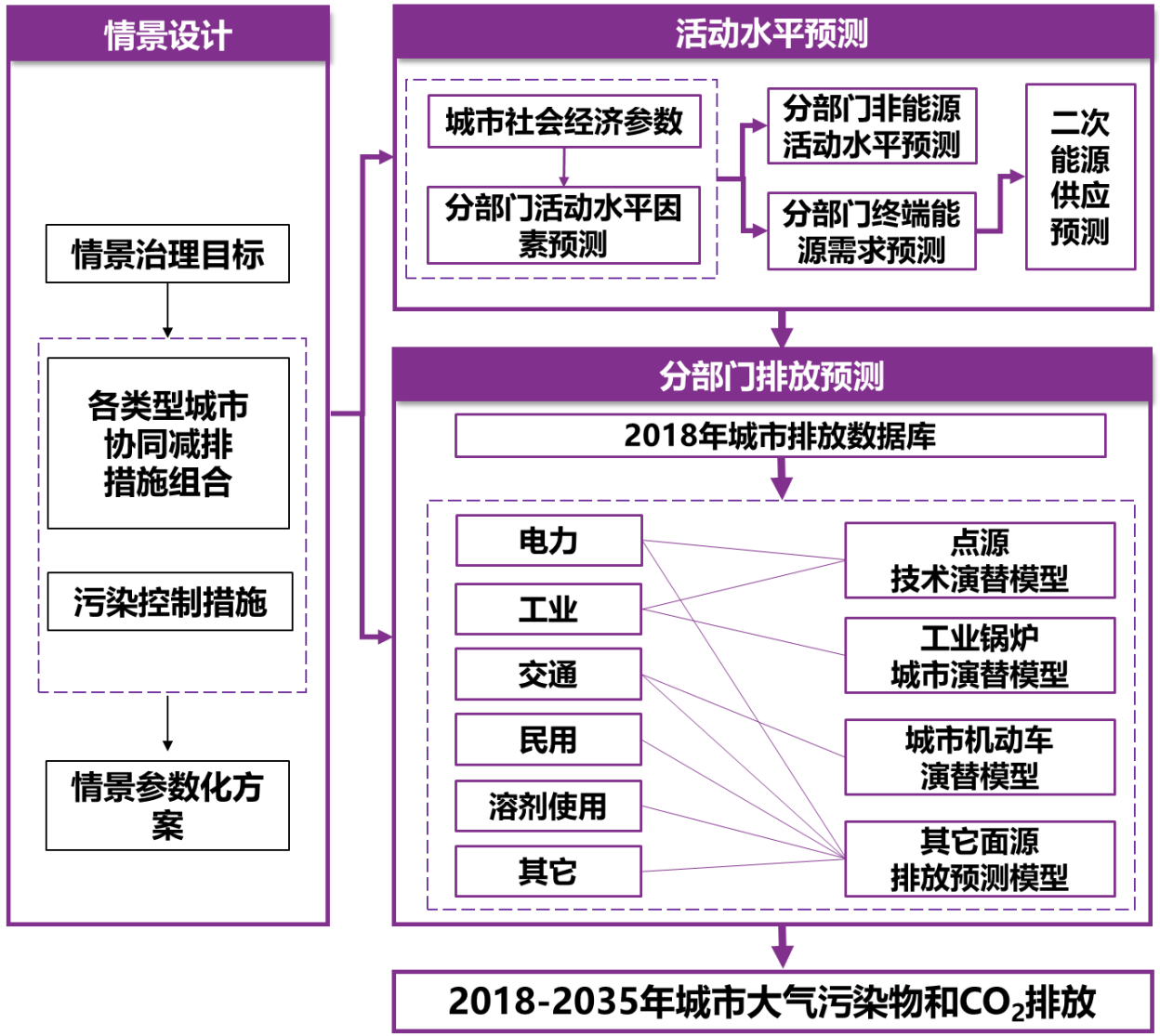
2015-2018年空气质量协同改善情况分析



- 2015-2018年，122个城市实现了碳排放和$PM_{2.5}$年均浓度同步下降。

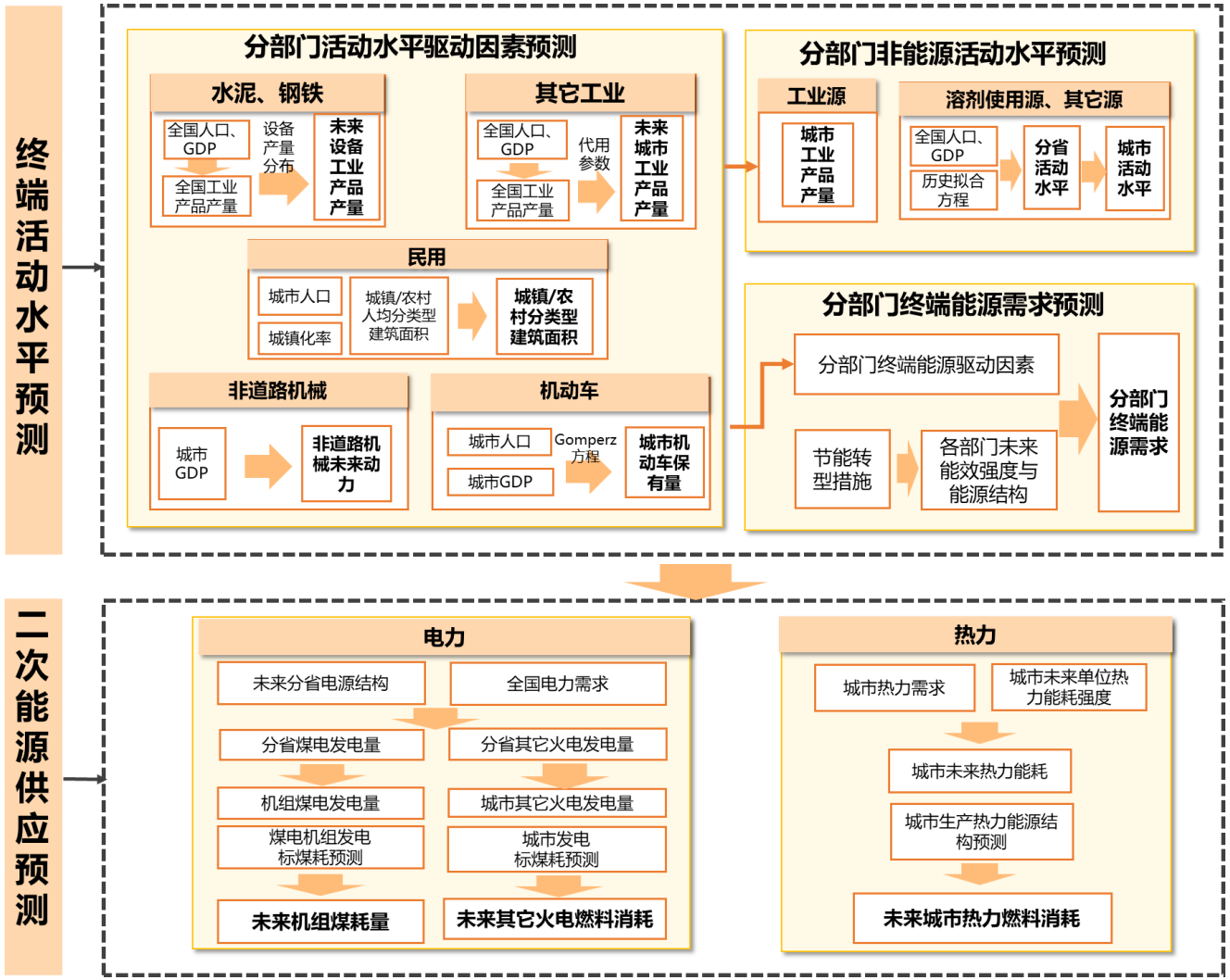
- 基本背景
- 融合清单
- 模型预测
- 协同路径

自下而上的中国城市未来排放预测模型



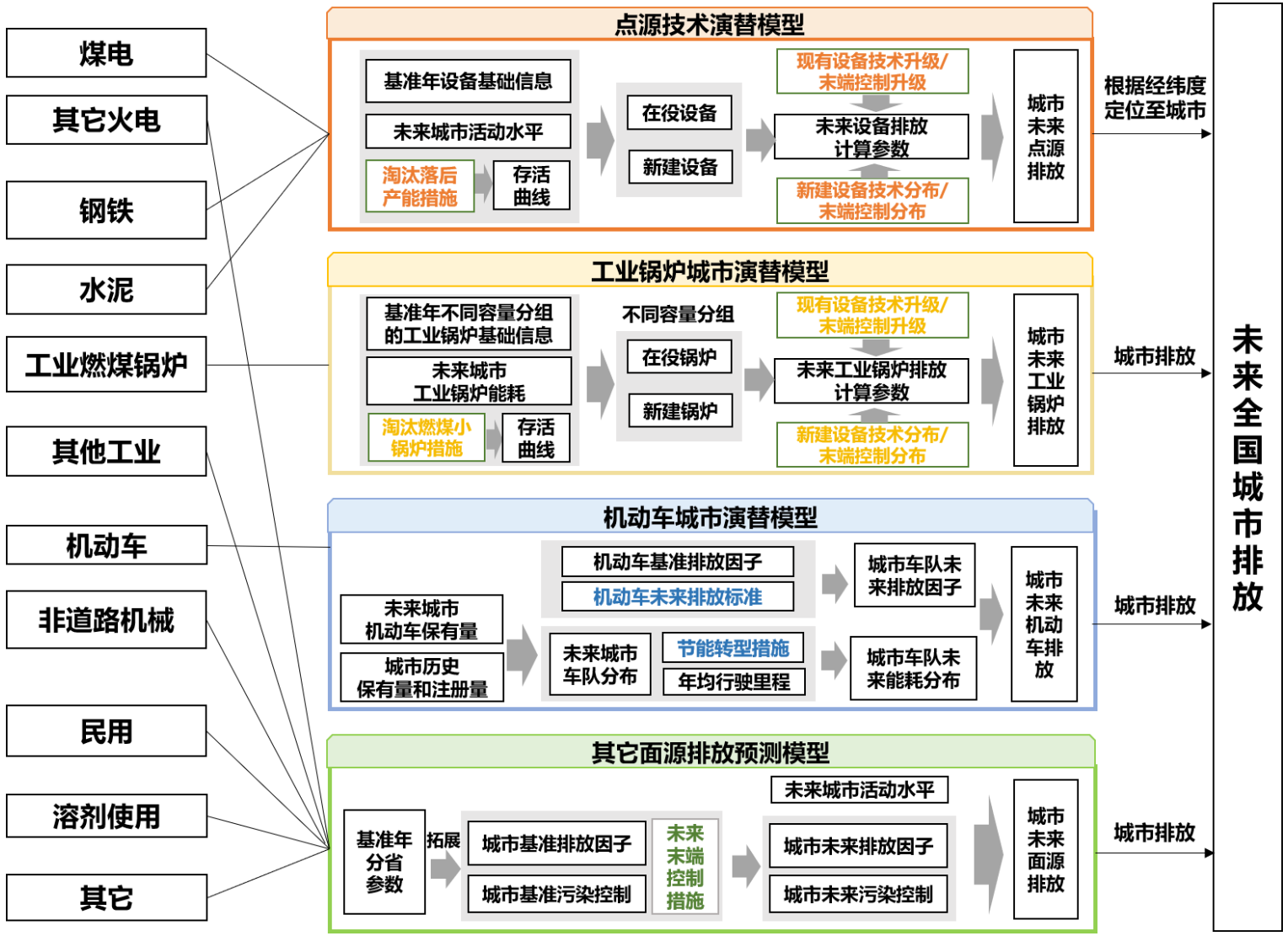
构建了自下而上的中国城市尺度排放预测模型，主要分为活动水平预测和分部门排放预测两个模块，支持纳入不同情景下城市级措施影响、动态预测2018-2035年全国城市的主要大气污染物和碳排放变化。

活动水平预测模块



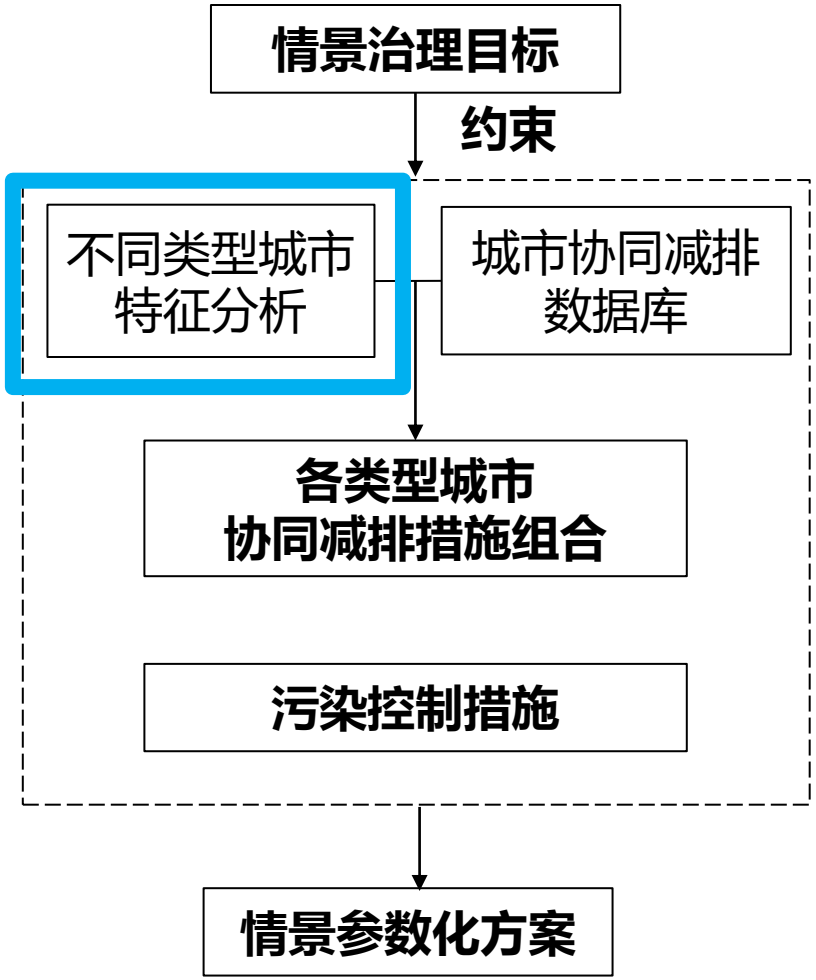
- 活动水平预测模块包括终端活动水平预测和二次能源供应预测两个部分。
- 终端活动水平预测模块首先以城市尺度社会经济参数为驱动预测分部门活动水平驱动因素，结合不同情景下的能源结构与能耗强度，最终得到各部门的终端活动水平。
- 二次能源供应预测从终端能源需求出发，结合城市产量分布情况、生产二次能源单位能耗及能源结构得到用于生产电力或热力的一次燃料消耗量。

分部门排放预测模块

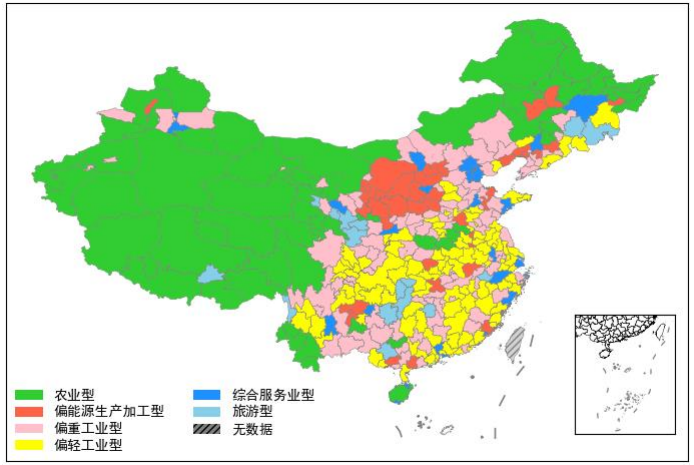


- 分部门排放预测模块的构建以所建立的城市数据库为数据基础。
- 根据不同部门的数据特点构建了不同精度的排放预测模型，动态表征减排措施影响下未来分部门排放因子、污染控制水平变化，最终预测得到未来全国城市排放。

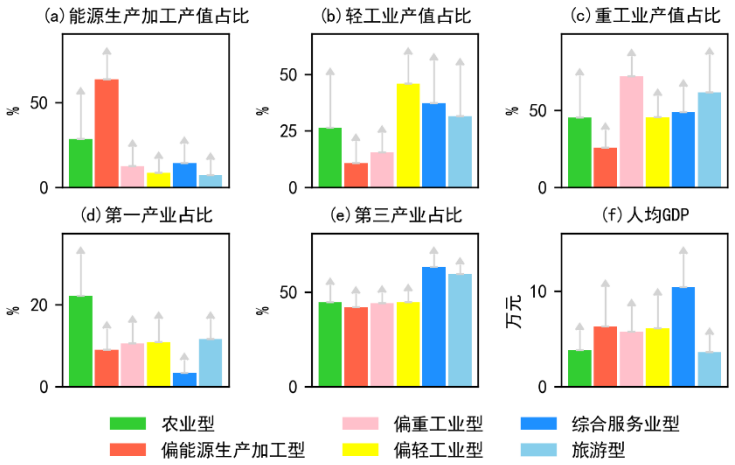
差异化减排情景构建方法



城市类型划分结果

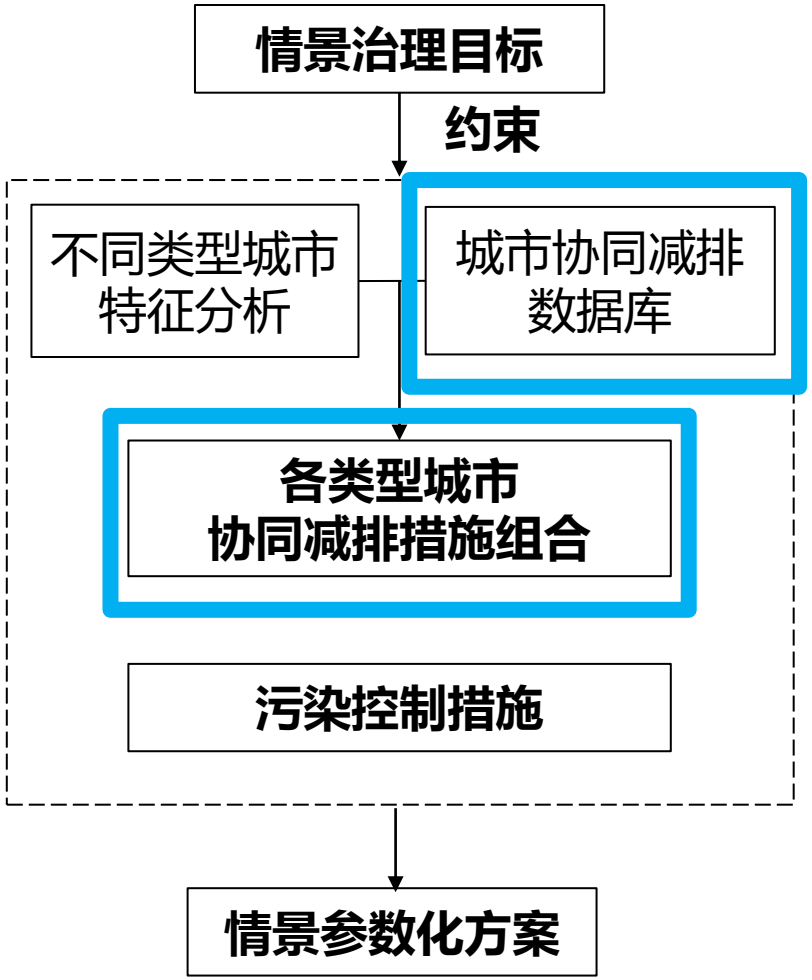


各类型城市特征



基于产业结构和经济发展相关信息，结合k-means聚类算法将全国城市划分为了**农业型、综合服务业型、旅游型、偏能源生产加工型、偏重工业型和偏轻工业型**六类城市，在不同情景治理目标下分析各类型城市的相关特征。

差异化减排情景构建方法



城市协同减排措施库

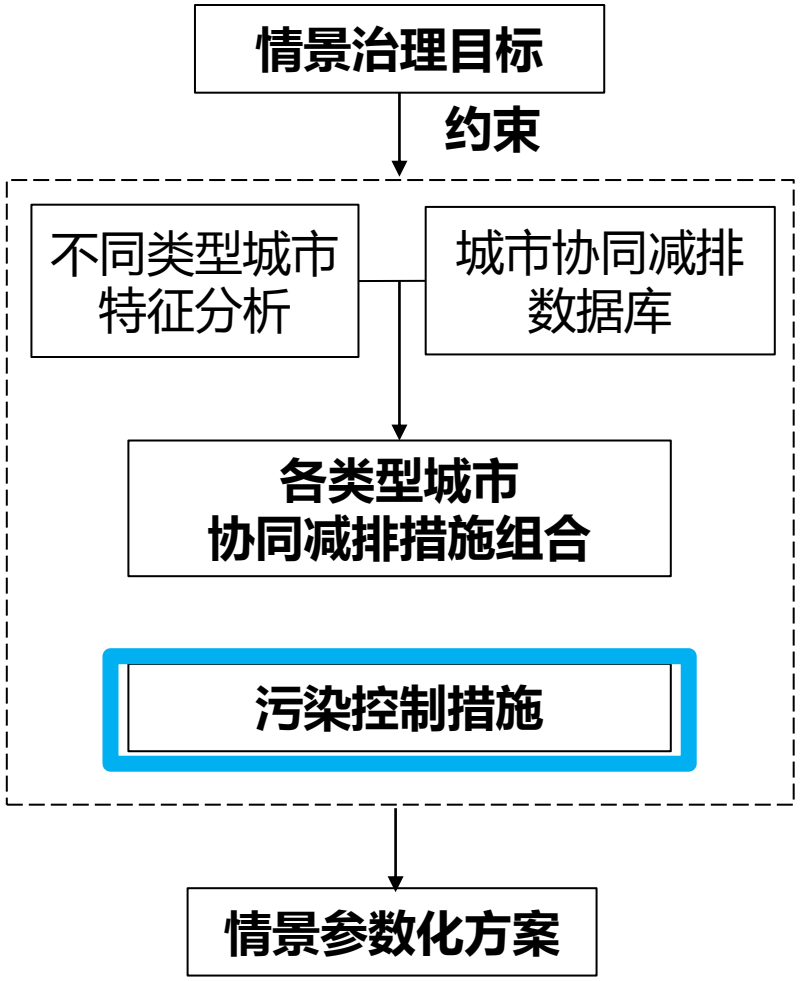
编号	措施	编号	措施
P1	电力-禁止新建产能	F2	石化化工-清洁能源替代燃煤
P2	电力-淘汰落后产能	M1	有色冶炼-淘汰落后产能
P3	电力-压减单位供电煤耗	M2	有色冶炼-清洁能源替代燃煤
P4	供热-淘汰燃煤小锅炉	O1	其它工业-淘汰落后产能
H1	供热-淘汰燃煤小锅炉	O2	其它工业-清洁能源替代燃煤
H2	供热-推广可再生能源和余热利用	V1	机动车-能效提升
S1	钢铁-淘汰落后产能	V2	机动车-推广 LNG 车辆
S3	钢铁-推广电炉炼钢	V3	机动车-推广新能源车辆
C1	水泥-淘汰落后产能	N1	非道路机械-淘汰老旧机械
L1	石灰-淘汰落后产能	N2	非道路机械-提升电动化比例
L2	石灰-清洁能源替代燃煤	R1	民用-建筑节能
B1	砖瓦-淘汰落后产能	R2	民用-散煤替代
B2	砖瓦-清洁能源替代燃煤	R3	民用-提升可再生能源比例
F1	石化化工-淘汰落后产能		

措施参数化方案

措施	强度	2018	…	2025	…	2030	…	2035
V1	常规减排	限制机动车保有量增长，千人机动车保有量饱和值为400						
	强化减排	限制机动车保有量增长，千人机动车保有量饱和值为250						
	最佳减排	限制机动车保有量增长，千人机动车保有量饱和值为325						
V2	常规减排	到2035年，各车型百公里油耗相较2018下降2%						
	强化减排	到2035年，新增小型客车百公里油耗降至6.0升/百公里，其它车型百公里油耗相对2018年下降15%						
	最佳减排	到2035年，新增小型客车百公里油耗降至5.0升/百公里，其它车型百公里油耗相对2018年下降15%						
V3	常规减排	到2030年，全市新增重型货车、公交车中天然气车比例达到2%						
	强化减排	到2030年，全市新增重型货车、公交车中天然气车比例达到5%						
	最佳减排	到2030年，全市新增重型货车、公交车中天然气车比例达到10%						
V4	常规减排	到2035年，新销售机动车中电动车占比在中小型客车中达到20%，在大型客车、重型货车和轻型货车中分别达到5%、4%和5%						
	强化减排	到2025年，新销售机动车中电动车占比在中小型客车中达到20%，在大型客车、重型货车和轻型货车中分别达到5%、4%和10%				到2035年，新销售中小型客车中电动车占比达到80%		到2035年，新销售中小型客车中电动车占比达到80%
	最佳减排	到2025年，新销售机动车中电动车占比在中小型客车中达到20%，在大型客车、重型货车和轻型货车中分别达到5%、4%和5%				到2035年，新销售中小型客车中电动车占比达到80%		
N1	常规减排	通过淘汰老旧农用机械，到2035年能效提升5%。						
	强化减排	通过淘汰老旧农用机械，到2035年能效提升10%。						
	最佳减排	通过淘汰老旧农用机械，到2035年能效提升20%。						
N2	常规减排	到2030年分别有10%和5%的农业机械和工程机械实现电动化。						
	强化减排	到2030年分别有20%和10%的农业机械和工程机械实现电动化。						
	最佳减排	到2030年分别有35%和20%的农业机械和工程机械实现电动化。						

- 减排情景由措施组合形成，包括协同减排措施与污染控制措施两个部分。
- 研究总结的城市协同减排措施库包括27条措施，涉及12个部门。对每项措施，本研究制定了可与城市未来排放预测模型对接的**最佳减排措施、强化减排措施、常规减排措施**三组参数化方案。

差异化减排情景构建方法



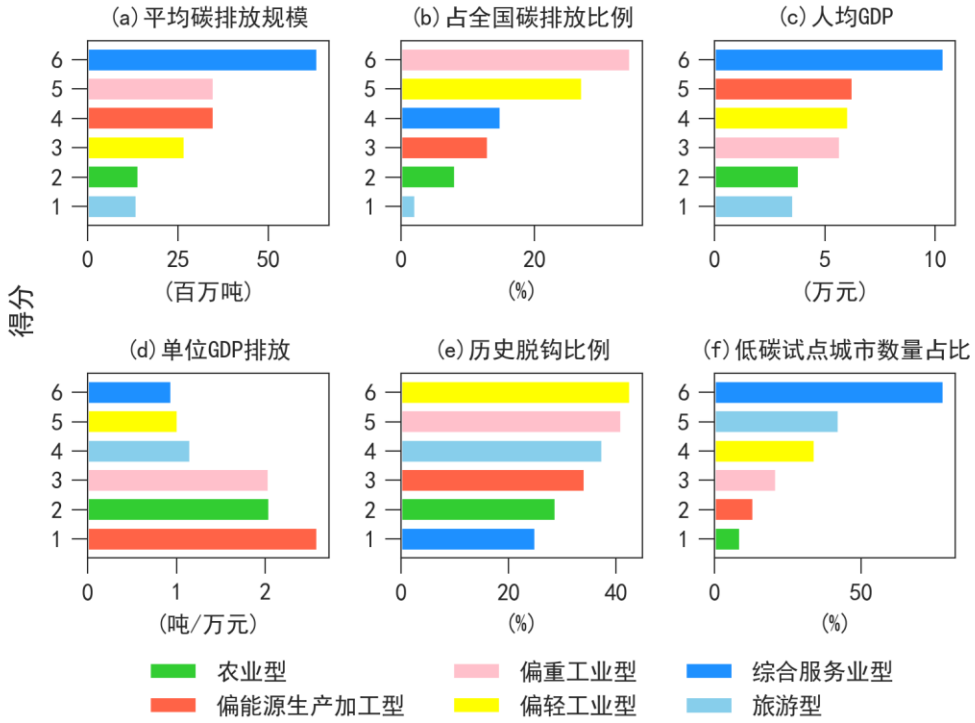
排放源	情景	区域	政策类型	2018	2019	2020	2021	...	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	...	2035
燃煤电厂	现行末端治理情景	全国	末端控制升级	行业现行排放标准：GB 13223-2011														
			燃烧技术演替	新建机组中超超临界机组比例提升至30%							新建机组中超超临界机组比例提升至35%							
	强化末端治理情景	京津冀及周边、汾渭平原	末端控制升级	开始实施超低排放改造					全面实现超低排放标准									
		长三角	末端控制升级	开始实施超低排放改造					全面实现超低排放标准									
		其它地区	末端控制升级	开始实施超低排放改造					全面实现超低排放标准									
		全国	燃烧技术演替	新建机组中超超临界机组比例提升至80%														
	最佳末端治理情景	全国	末端控制升级	开始实施超低排放改造					全面实现超低排放标准									
		全国	燃烧技术演替	新建机组中超超临界机组比例提升至80%							新建机组中超超临界机组比例提升至88%							
其他火电	现行末端治理情景	全国	末端控制升级	行业现行排放标准：GB 13223-2011														
			燃烧技术演替	GTCC技术安装比例提升至10%														
	强化末端治理情景	京津冀及周边、汾渭平原	末端控制升级	开始实施特别排放限值			全面实现特别排放限值			开始实施超低排放改造			全面实现超低排放标准					
			燃烧技术演替	GTCC技术安装比例提升至30%；CFB技术安装比例提升至40%						GTCC技术安装比例提升至38.6%；CFB技术安装比例提升至48.6%								
		长三角	末端控制升级	开始实施特别排放限值			全面实现特别排放限值			开始实施超低排放改造					全面实现超低排放标准			
			燃烧技术演替	GTCC技术安装比例提升至30%；CFB技术安装比例提升至40%						GTCC技术安装比例提升至38.6%；CFB技术安装比例提升至48.6%								
		其它地区	末端控制升级	开始实施特别排放限值			全面实现特别排放限值			开始实施超低排放改造						全面实现超低排放标准		
			燃烧技术演替	GTCC技术安装比例提升至30%；CFB技术安装比例提升至40%												GTCC、CFB技术安装比例分别提升至33.3%和43.3%		
	最佳末端治理情景	全国	末端控制升级	开始实施特别排放限值			全面实现特别排放限值			开始实施超低排放改造			全面实现超低排放标准					
			燃烧技术演替	GTCC、CFB技术安装比例分别提升至30%和40%						GTCC、CFB技术安装比例分别提升至38.6%和48.6%								

选取不同强度的污染控制措施可表征未来不同力度环境政策演变下各部门治理技术的分布演化。上图以电力部门为例展示了污染控制措施。

差异化情景构建：不同类型城市碳达峰目标分析

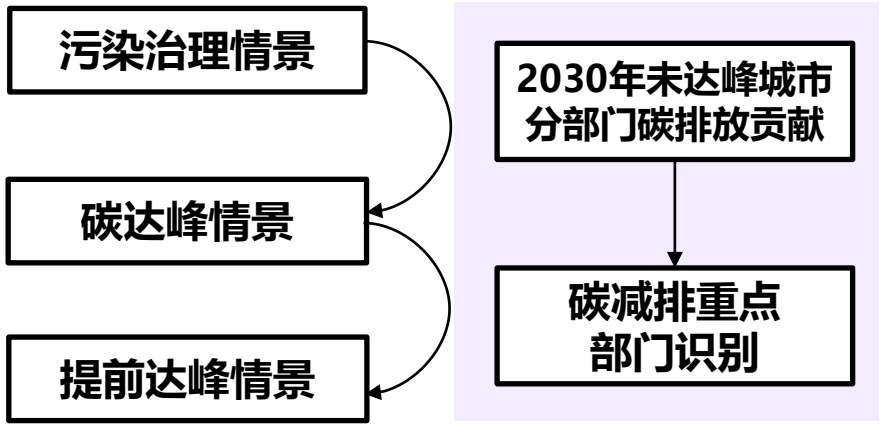
表 4.2　用于确定不同类型城市碳减排力度的评价指标

评价分类	评价指标	排序方式
减排重要性	平均碳排放规模	降序
	占全国总碳排放比例	降序
减排可行性	人均 GDP	降序
	单位 GDP 碳排放	升序
	历史脱钩比例	降序
低碳行动现状	低碳试点城市数量占比	降序

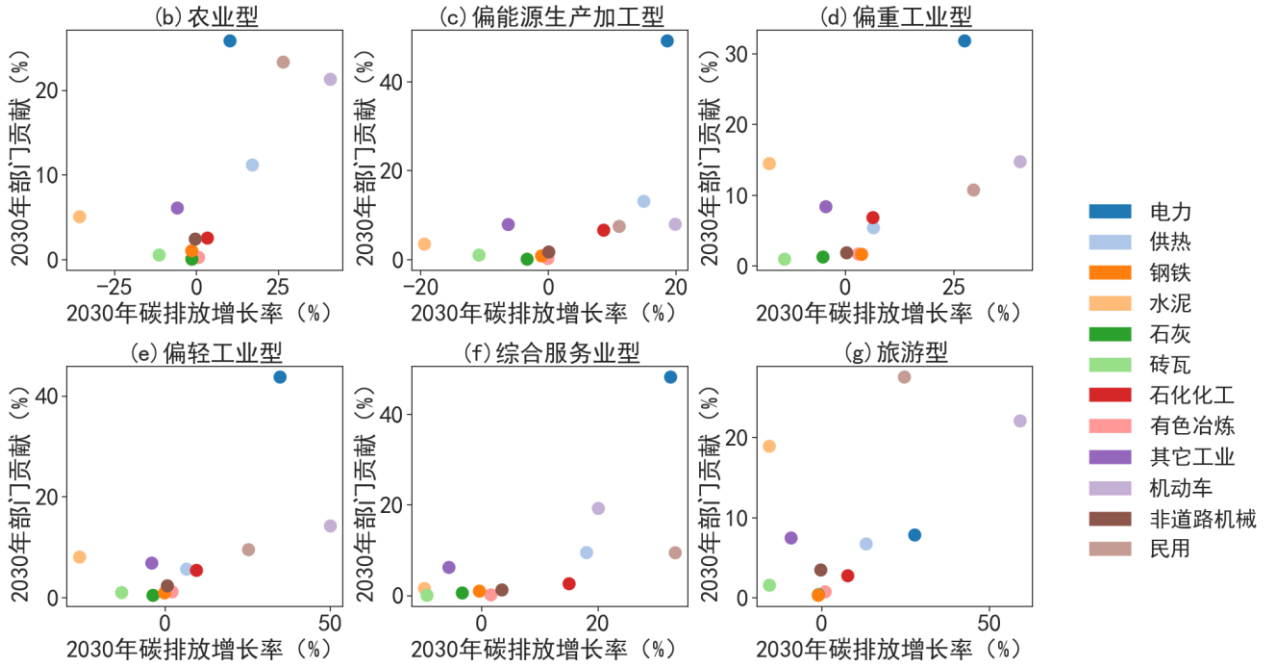


- 研究基于相对位次建立评分体系并评价了不同类型城市**碳减排重要性、碳减排可行性、低碳行动现状**，总得分越高代表对碳达峰的要求相应更高。
- 从综合得分来看，**综合服务业型城市**应当在城市碳达峰进程中发挥先锋作用；**偏轻工业型城市、 偏重工业型城市和偏能源生产加工型城市**应当积极推进碳达峰工作；**旅游型城市和农业型城市**碳达峰要求相对最低。

差异化情景构建：重点碳减排部门识别



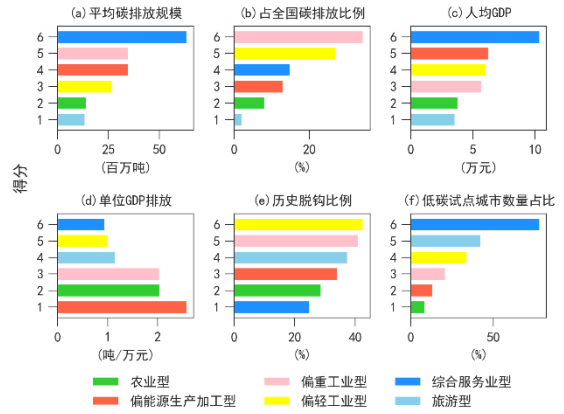
2030年污染治理情景下未达峰城市CO_2排放分部门贡献和增长率



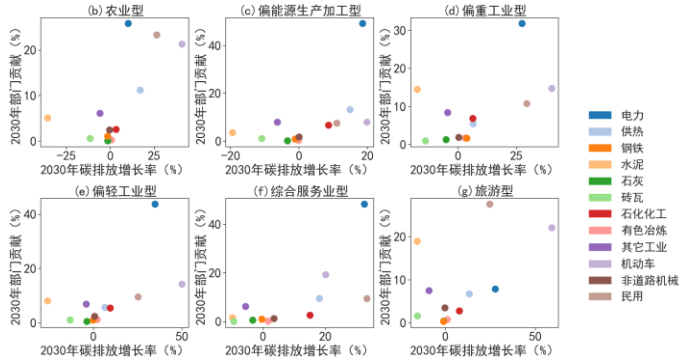
- 分析污染治理情景/碳达峰情景下未达峰城市分部门碳排放贡献，以**排放贡献占比和增长率大**的部门为重点碳减排部门，在碳达峰/提前达峰情景下优先强化对应部门的减排措施。
- 污染治理情景下到2030年，**电力、民用、机动车、供热**等部门是各类型未达峰城市碳排放增长的主要驱动力。

差异化情景构建：碳达峰和提前达峰情景下的协同措施组合

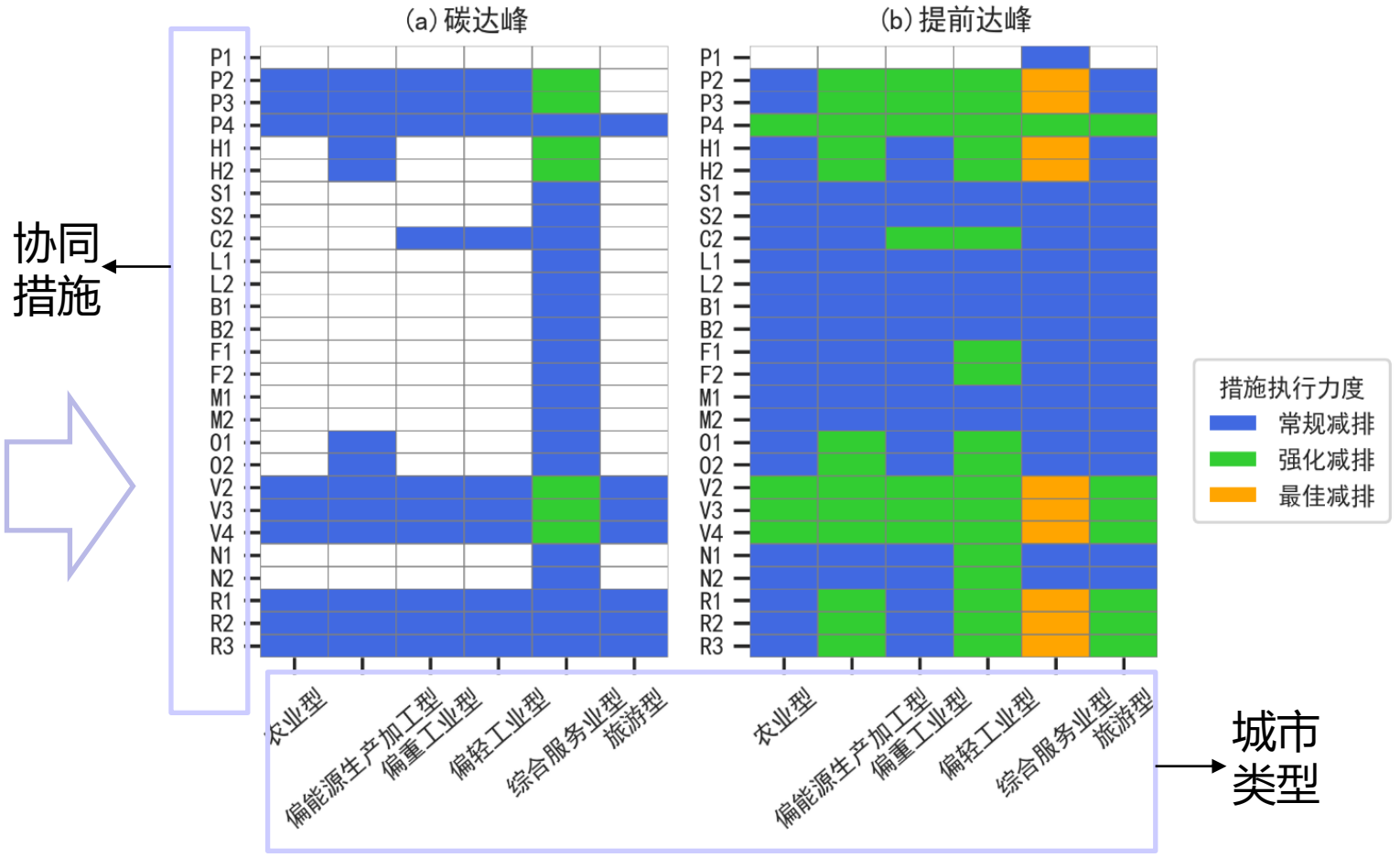
不同类型城市碳达峰目标分析



未达峰城市重点碳减排部门识别



协同措施

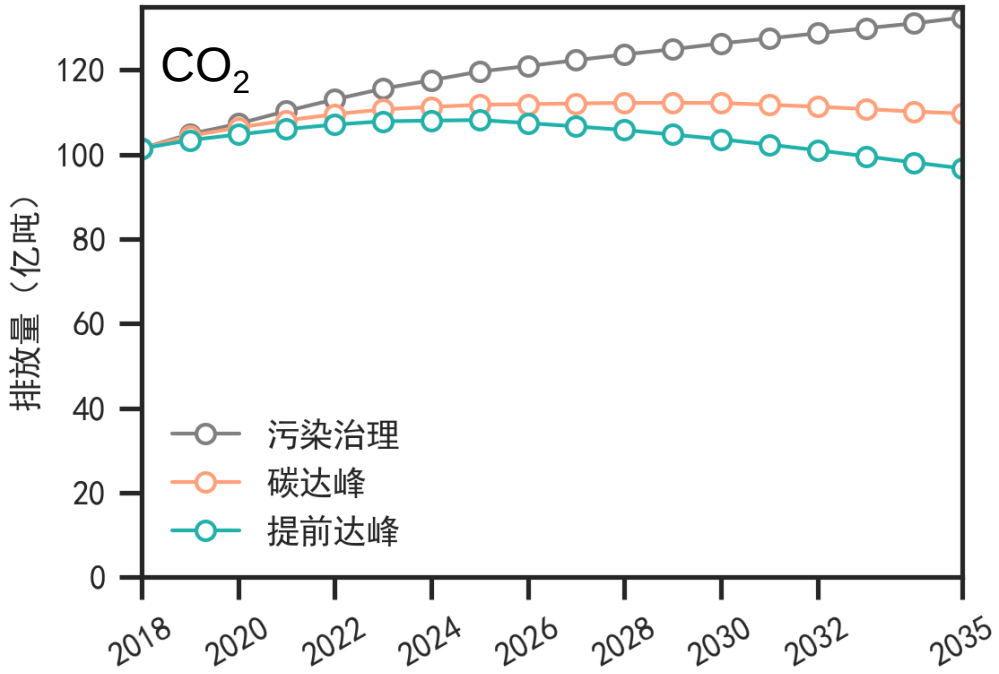


城市类型

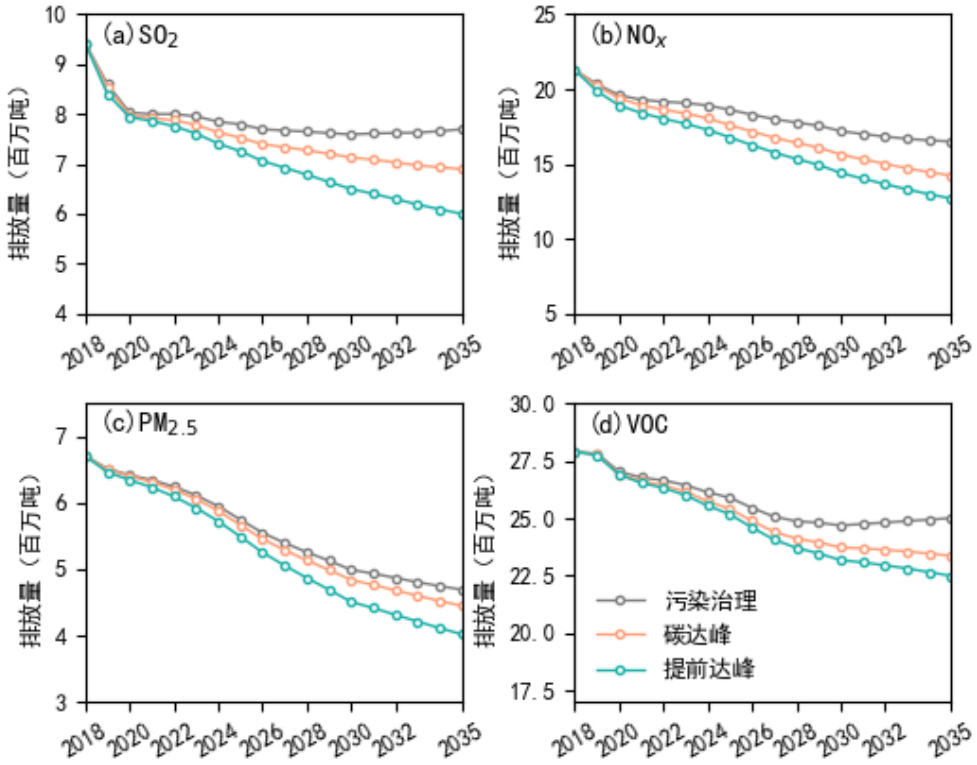
结合不同类型城市碳达峰目标，优先选取碳减排重点部门相关措施，在全国碳达峰和城市碳达峰目标约束下形成协同减排措施组合。

全国二氧化碳及主要大气污染物排放变化情况

全国二氧化碳排放变化

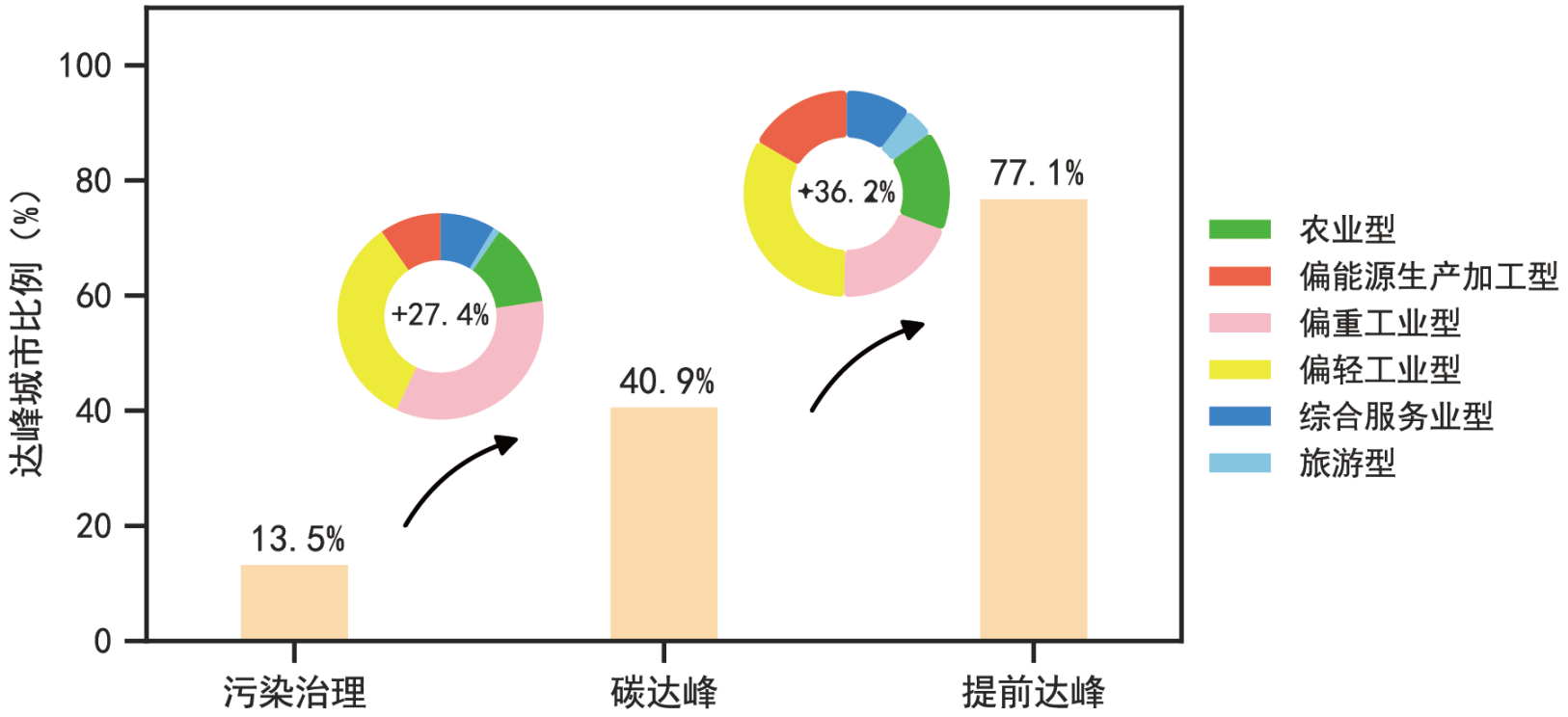


全国主要大气污染物排放变化



- 碳达峰情景下，主要大气污染物排放到2030年相对污染治理情景下降2.2-9.3%；提前达峰情景相对污染治理情景可进一步下降4.6%-16.1%。

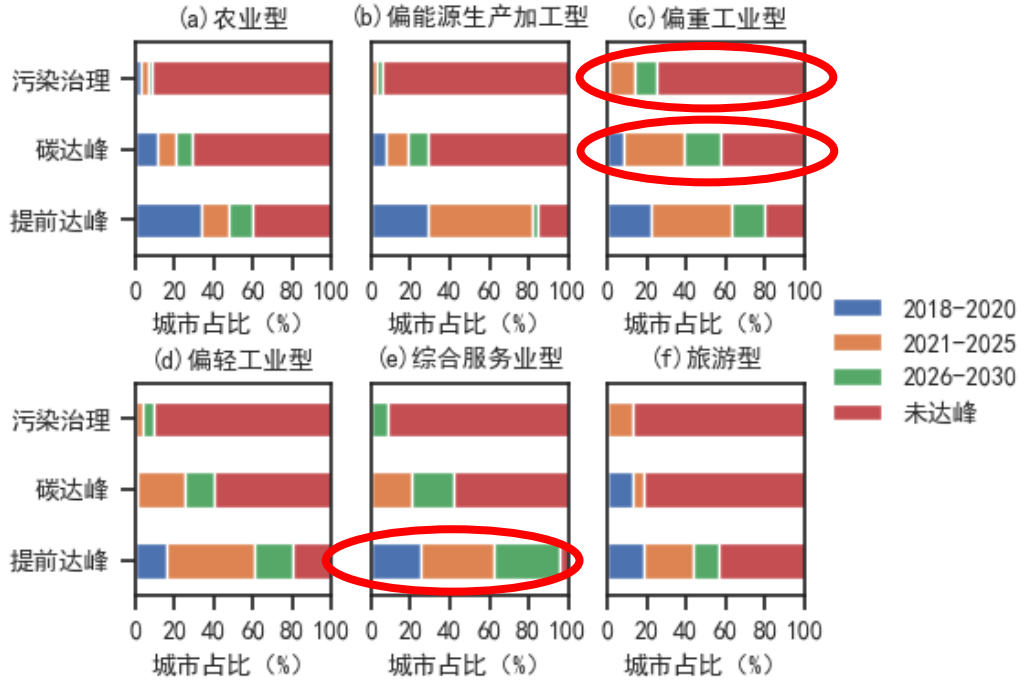
全国城市碳达峰情况



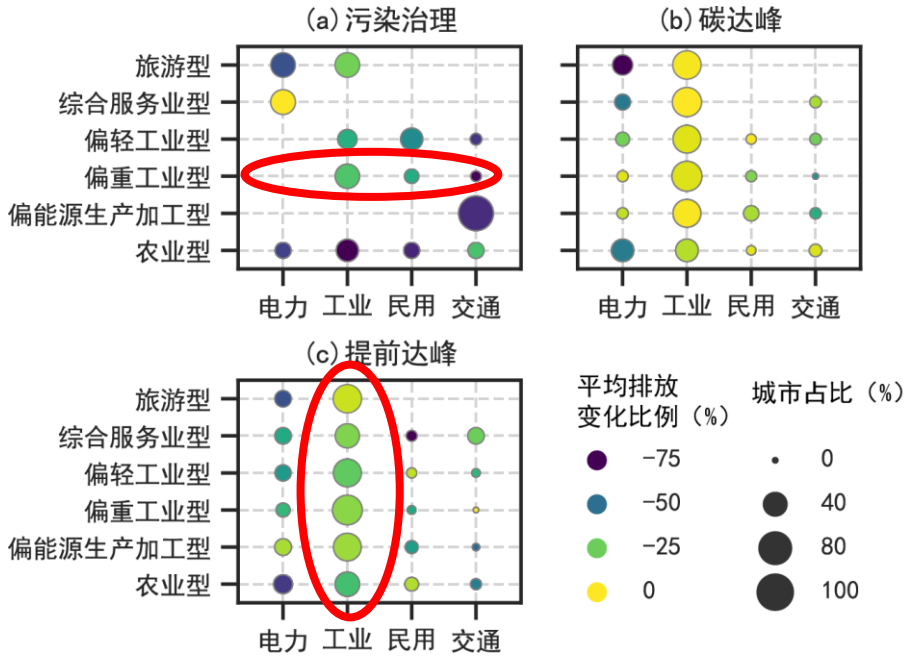
污染治理情景下，全国仅有**13.5%**的城市可实现2030年碳达峰。碳达峰和提前达峰情景下这一比例分别增长到**40.9%**和**77.1%**。

不同类型城市碳达峰及部门驱动力分析

不同类型城市达峰情况分析



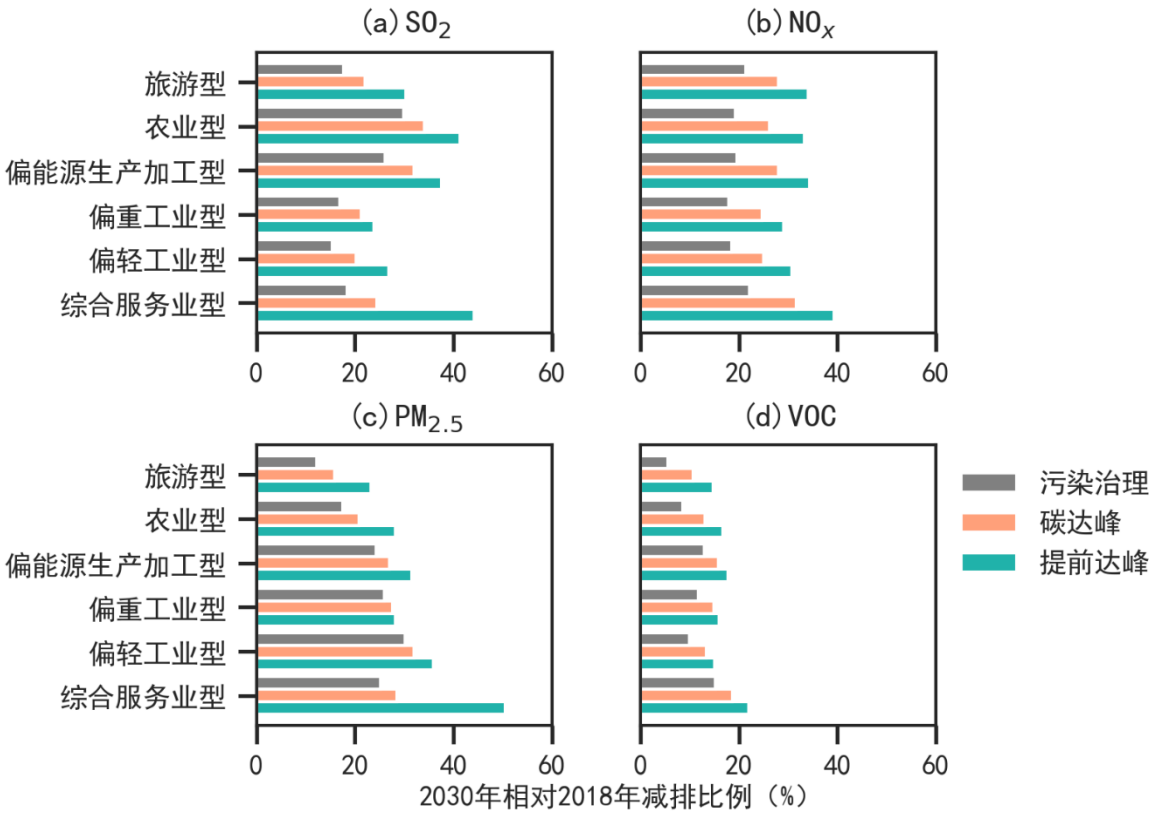
2035年相对2018年最大碳减排部门分析



- **污染治理情景**下，各类型城市的碳达峰率在5.3%-25%之间。在无额外协同减排措施的情况下，**钢铁、水泥等工业产品产量下降**成为**偏重工业型城市**实现达峰的主要驱动力。
- **碳达峰情景**下，各类型城市达峰率上升至18.8-53.0%，**偏重工业型城市**达峰率最高。
- **提前达峰情景**下，各类型城市达峰率进一步上升至49.2-96.8%，**综合服务业型**城市达峰率最高。该情景下**工业部门**对所有类型城市达峰均为最为重要的驱动力。

不同类型城市主要大气污染物减排情况

2030年相对2018年减排比例



- **污染治理情景**下，SO_2减排在农业型、偏能源生产加工型城市中较为突出，$PM_{2.5}$减排则在偏轻工业型城市和偏重工业型城市中较为突出。
- **碳达峰情景**下，相对污染治理情景，NO_x排放进一步下降的比例最高(6.4%-9.5%) 。
- **提前达峰情景**下，综合服务业型城市的大气污染物减排比例大幅上升， SO_2 、NO_x和$PM_{2.5}$的减排比例高达39.4%-50.6%。

- 基本背景
- 融合清单
- 模型预测
- 协同路径

协同目标下的情景设置

	情景名称	治理目标	协同减排措施选取	大气污染物控制措施
基准末端措施减排潜力	**参考情景**	无约束	无	现行末端治理
协同措施减排潜力	**强化减污**	最佳末端治理	无	最佳末端治理
	协同-强化减污	全国二氧化碳排放2025年达峰且全国城市年均$PM_{2.5}$浓度基本达到国家二级标准	优先选取$PM_{2.5}$浓度改善潜力较大的措施、碳减排重点部门的相应措施	

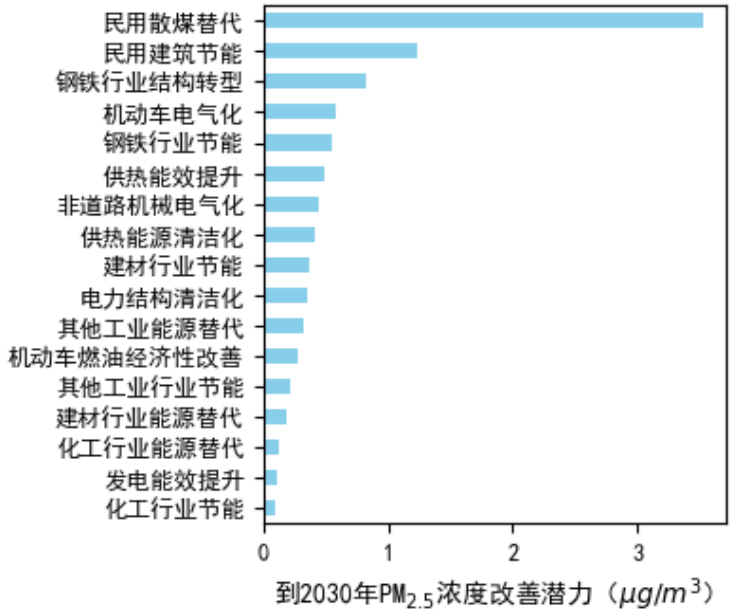
设置的情景用于探究：

1. 通过三个情景间的对比，探究末端措施和协同措施的减排与空气质量改善潜力；

2. 设计协同目标下的治理路径（协同-强化减污情景），分析城市空气质量改善与碳达峰情况。

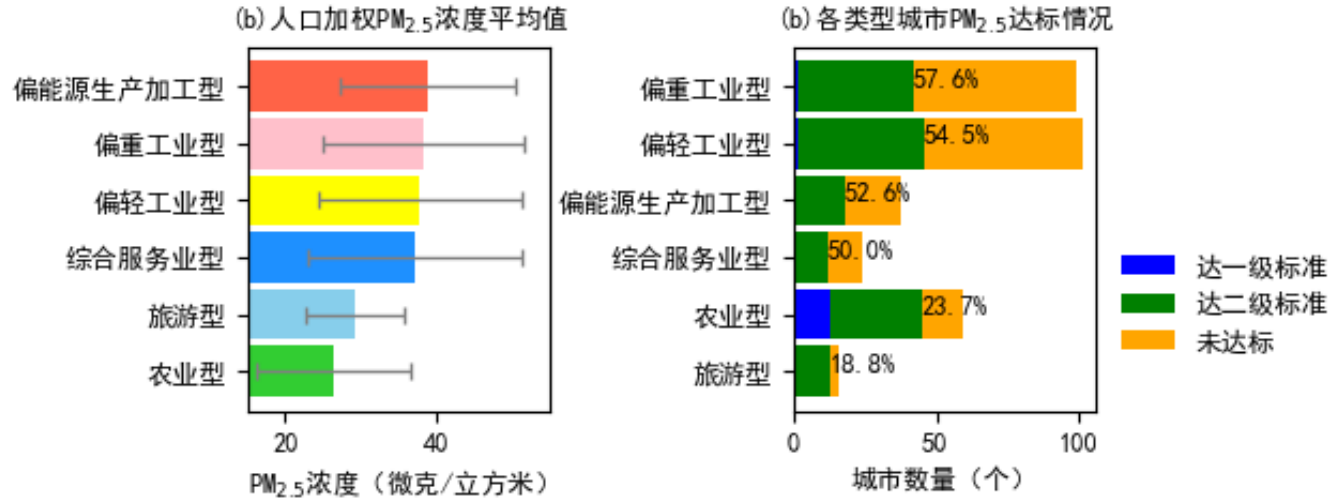
差异化情景构建：协同-强化治污情景

到2030年协同措施$PM_{2.5}$浓度改善潜力



程静，清华大学，2021

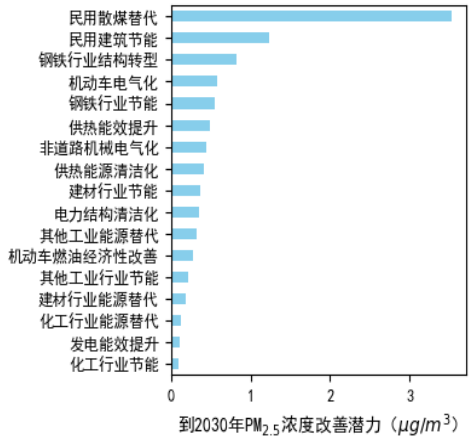
不同类型城市$PM_{2.5}$污染改善需求分析



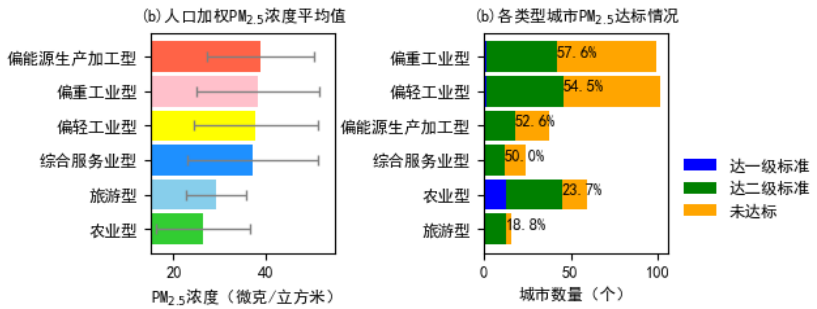
- **民用部门散煤替代**和**民用建筑节能**为$PM_{2.5}$浓度改善潜力最为突出的两项措施。
- **三类工业型城市**和**综合服务业型城市**$PM_{2.5}$污染较为严峻，在协同治理目标下需要更强的减排力度。

差异化情景构建：协同-强化治污情景下的协同减排措施组合

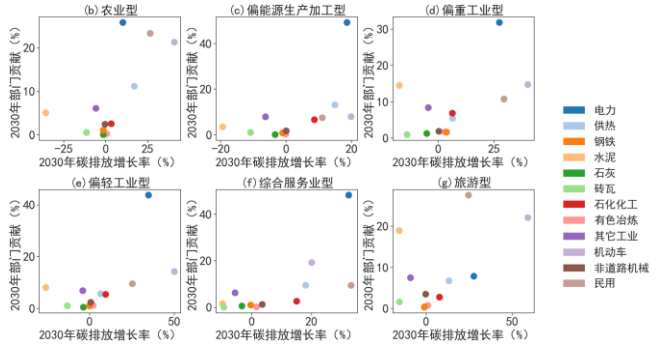
协同措施$PM_{2.5}$浓度改善潜力

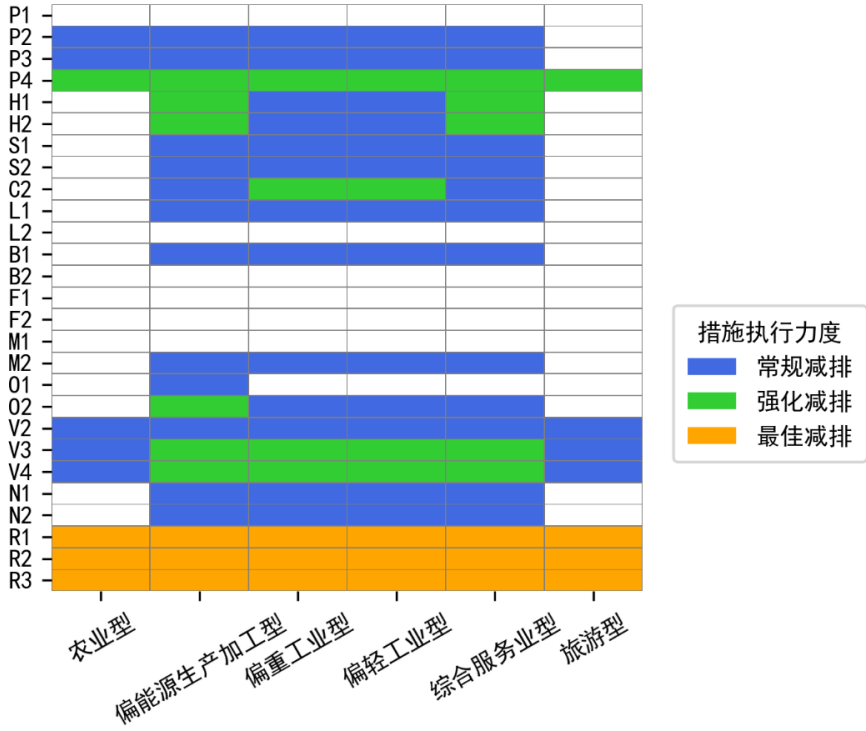


不同类型城市$PM_{2.5}$污染改善需求分析



未达峰城市重点碳减排部门识别

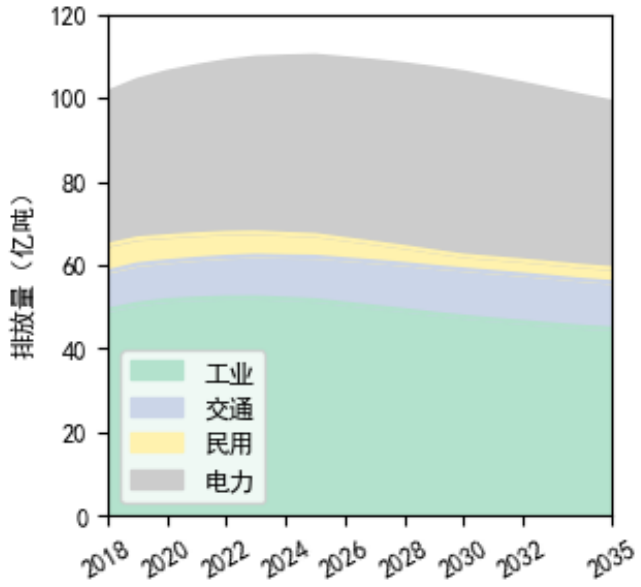




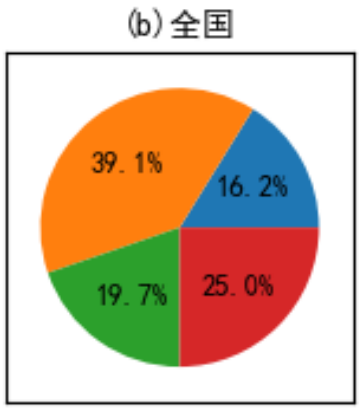
结合不同类型城市空气质量改善需求，优先选取到2030年$PM_{2.5}$浓度改善潜力较大的措施以及碳减排重点部门相关措施。

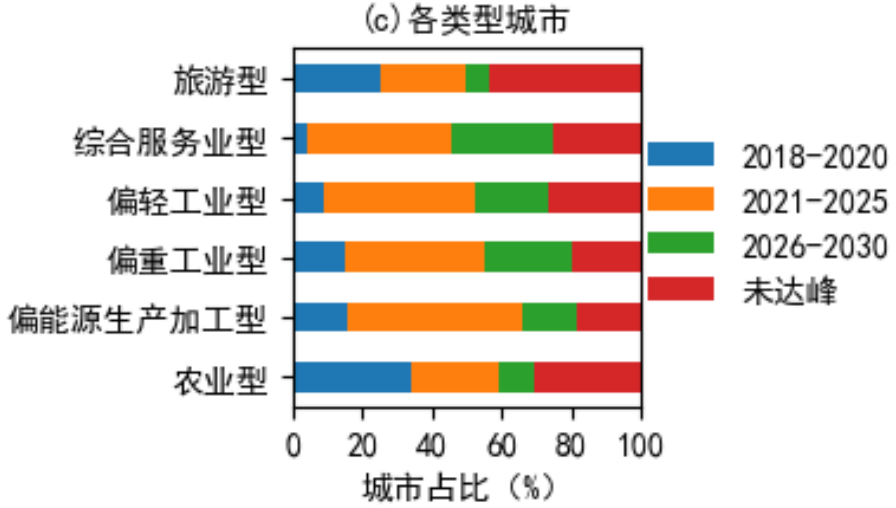
协同-强化减污情景下的全国碳排放变化及城市碳达峰情况

全国碳排放变化



城市碳达峰情况

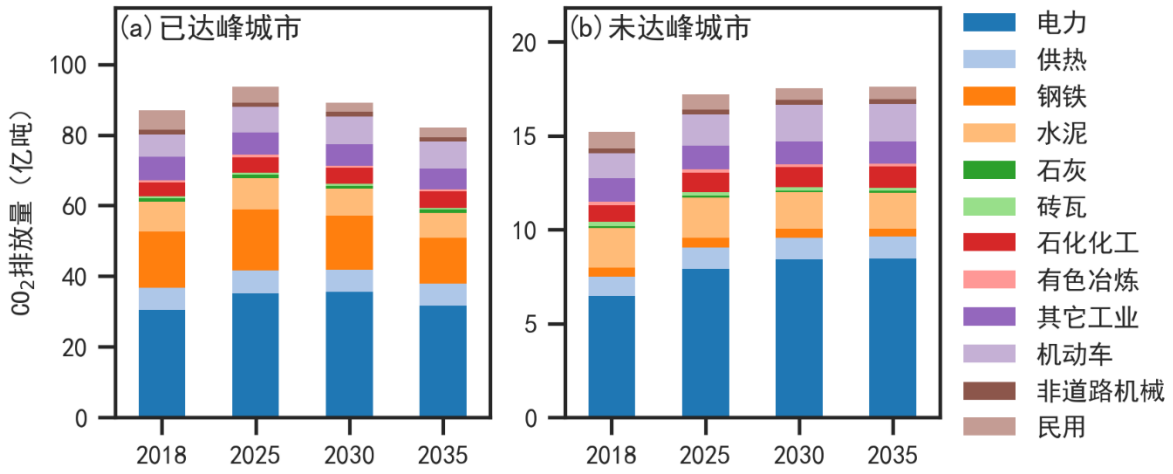




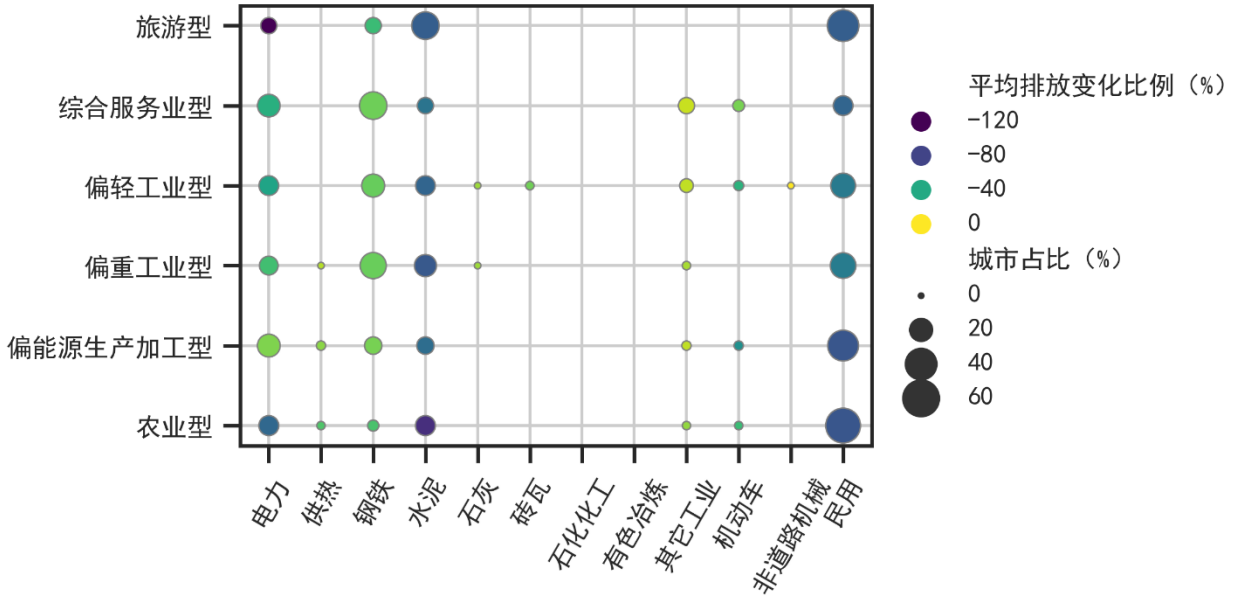
- 协同减排情景可推动全国**75%**的城市实现2030年前碳达峰。从城市类型来看，偏能源生产加工型、偏重工业型城市达峰率均超过80%以上。

协同-强化减污情景下的全国城市碳达峰部门驱动力

已达峰和未达峰城市分部门碳排放



已达峰城市最大碳减排部门

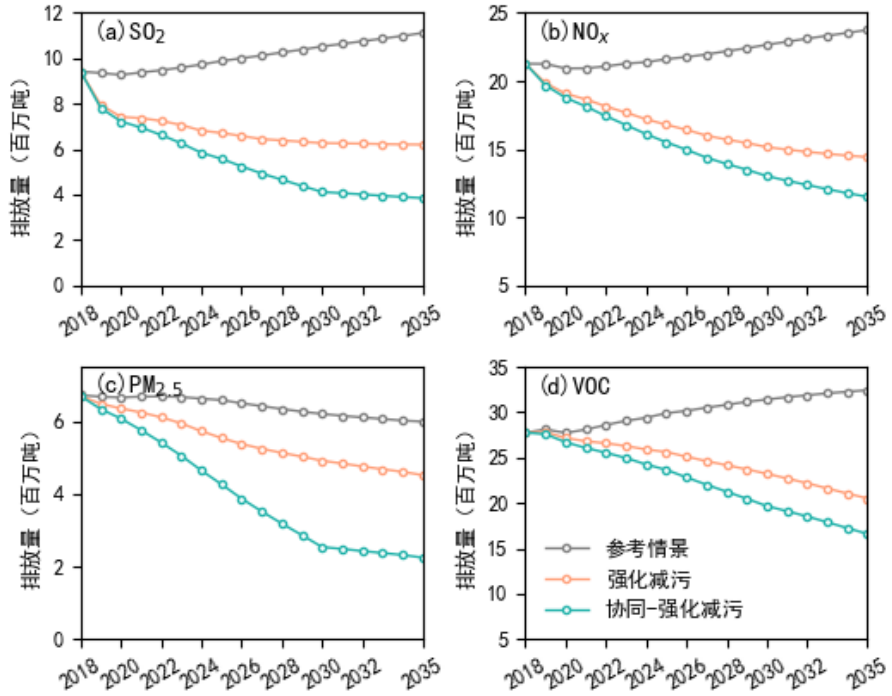


- 已达峰城市整体碳排放构成中**钢铁部门**占比较高，钢铁产量下降和及各类节能转型技术推广对这些城市碳达峰具有重要意义。同时，已达峰城市的**电力部门**碳排放在2030-2035年有较为显著的下降，推动了城市碳排放达到峰值。

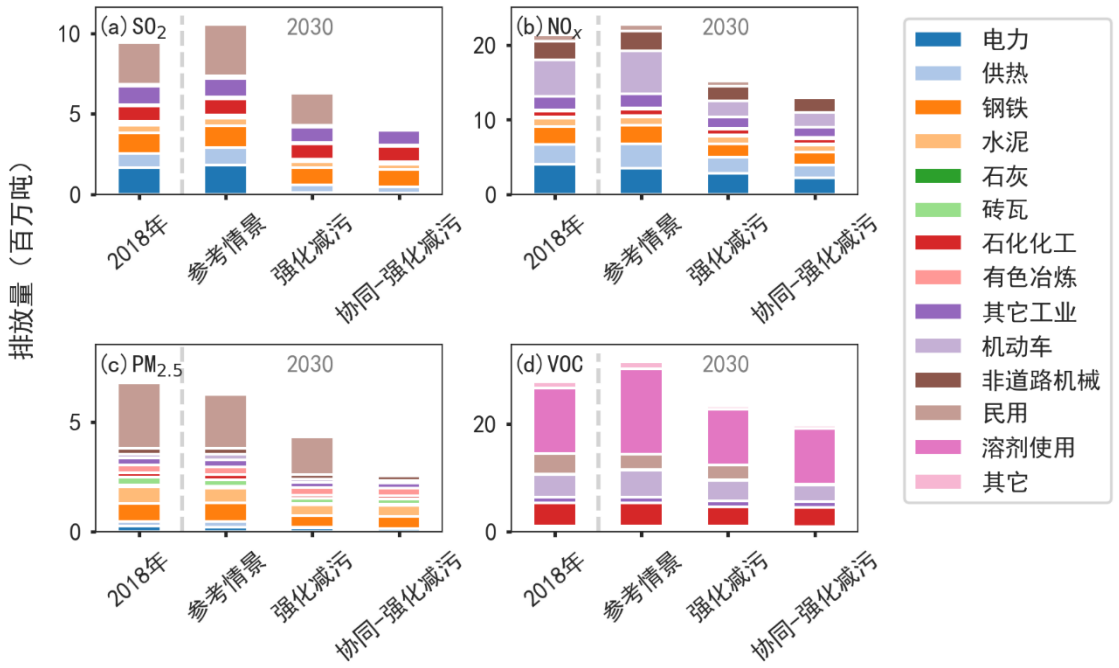
- 已达峰城市的最大碳减排部门集中在**电力、钢铁、水泥、民用**。民用部门对旅游型和农业型城市碳减排贡献尤为显著。

全国主要大气污染物排放变化情况

全国大气污染物排放变化



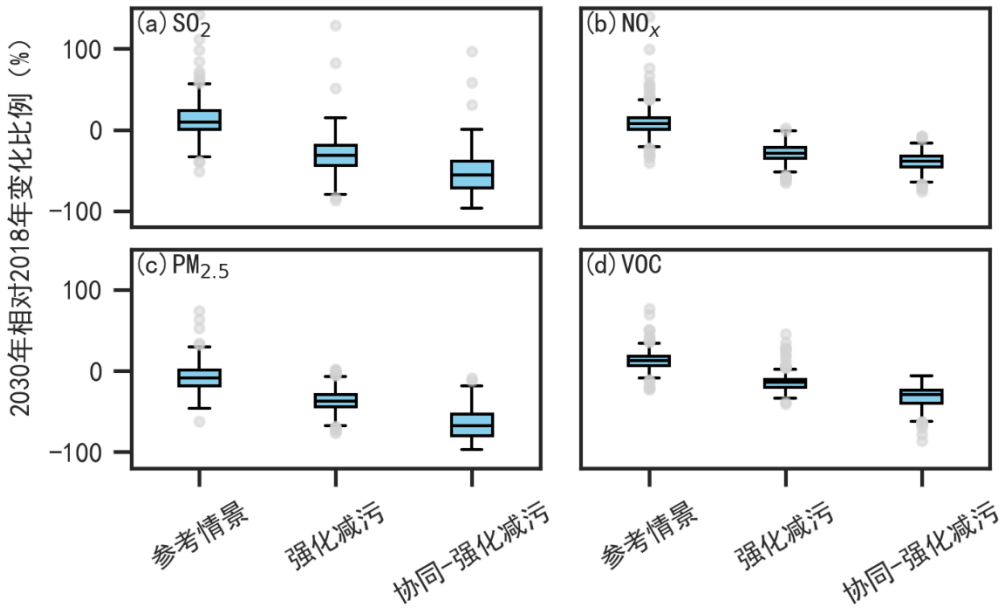
分部门排放贡献



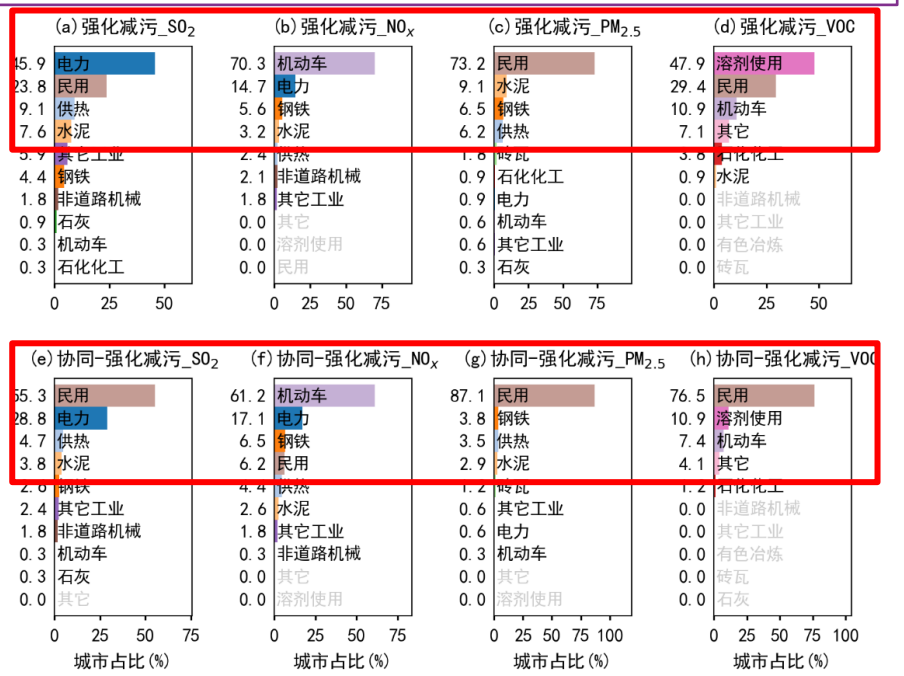
- **最佳末端治理**推动2030年SO_2、NO_x、$PM_{2.5}$和VOC排放相对参考情景下降了26.1 - 40.5%；通过实施协同目标下的**协同减排措施**，相对参考情景的下降比例可提升至37.4% - 60.9%。
- 协同减排措施对**SO_2、$PM_{2.5}$**的减排效益更为显著，主要来自**民用部门散煤削减。NO_x和VOC**减排则主要来自**机动车部门。**

全国城市主要大气污染物排放变化情况及部门驱动力解析

全国城市主要大气污染物排放变化



不同情景下城市首要减排部门解析

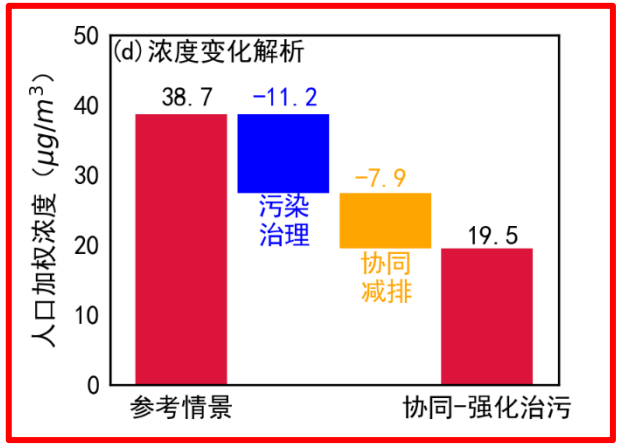


- 参考情景下，受到民用部门燃料结构自然转型的影响，73.8% 的城市在参考情景下实现 $PM_{2.5}$减排。其余污染物在排放变化比例中位数为9.8-12.5%，以VOC增长比例最高。
- 到2030年，**协同-强化减污**情景下除4个城市的SO_2排放相对2018年出现增长外，**其它城市均实现了四种主要大气污染物排放的下降。**

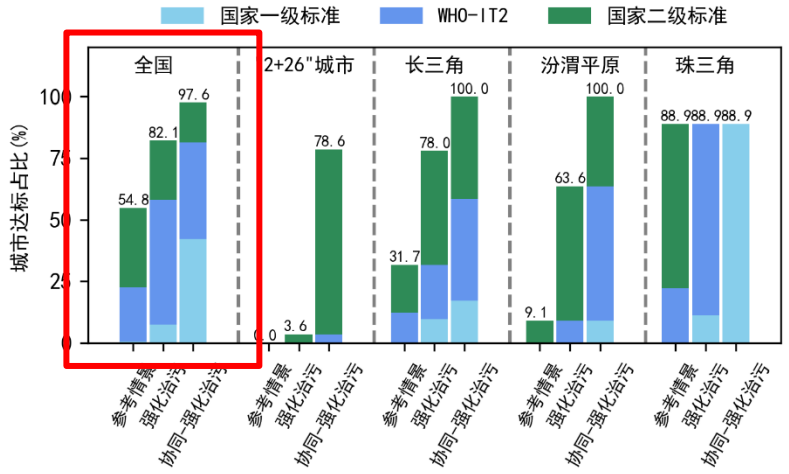
- 从末端措施来看，**电力部门超低排放改造、推广民用洁净煤、机动车排放标准加严、溶剂使用源源头替代**等措施具有较大减排潜力；从协同减排措施来看，**民用部门散煤替代**对SO_2、$PM_{2.5}$、VOC减排具有显著的推动作用。

不同情景下空气质量改善情况分析

2030年全国年均$PM_{2.5}$人口加权浓度

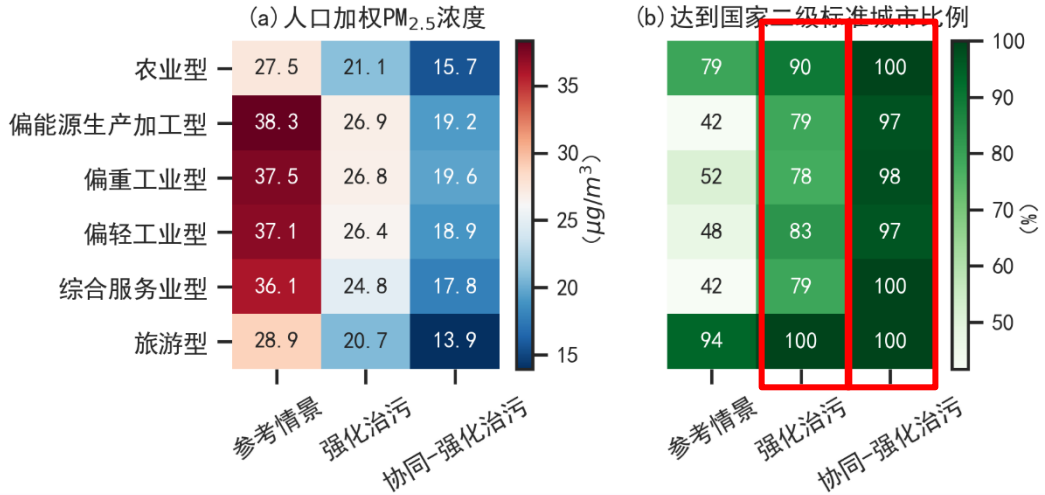


不同类型城市达标情况分析



到2030年，**最佳未端治理**和协同治理目标下的**协同减排措施**对全国年均$PM_{2.5}$人口加权浓度下降的贡献分别为**11.2** μg/m³和**7.9** μg/m³，达到国家二级标准的城市比例分别上升到**82.1%**和**97.6%**。

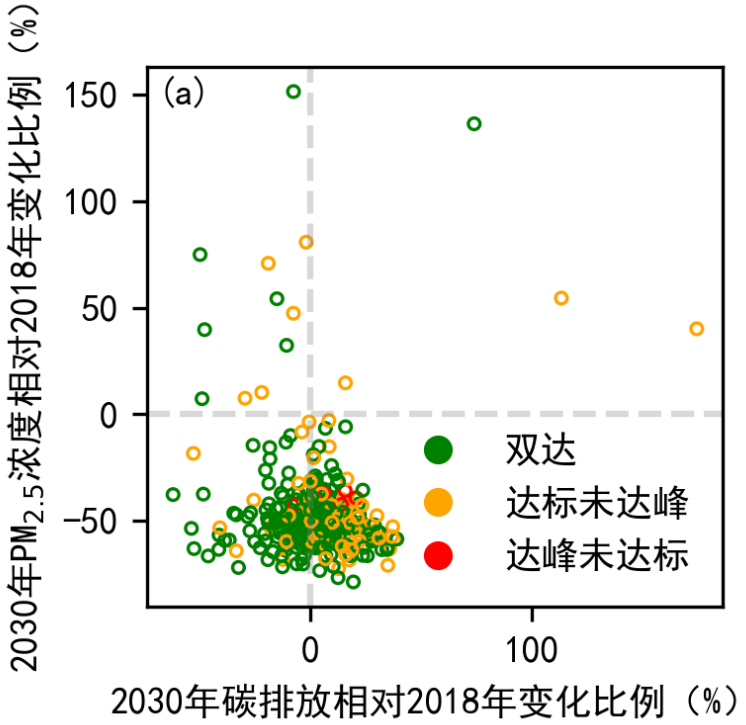
不同类型城市达标情况分析



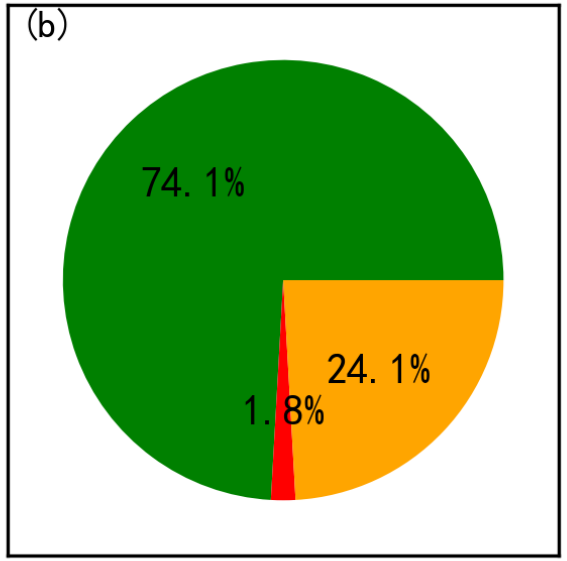
- 到2030年，依靠**最佳未端治理**，旅游型城市年均$PM_{2.5}$浓度全面达到国家二级标准；三类工业型城市和综合服务业型城市达到国家二级标准的比例增加至78%以上。
- **协同-强化减污情景**下，仅有三类工业型城市中有2-3%的城市未能达到国家二级标准。

协同-强化减污情景下城市“双达”情况分析

2030年全国城市碳排放变化及$PM_{2.5}$浓度变化关系图

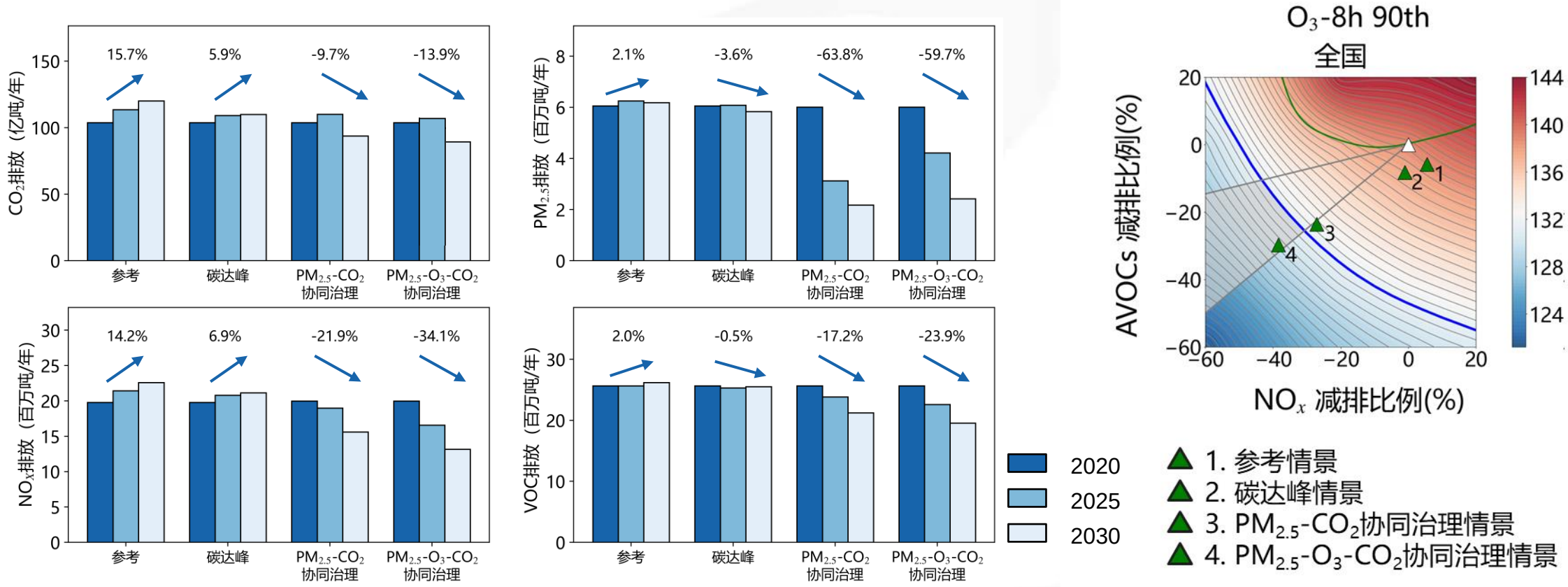


城市“双达”情况分析



- 到2030年，协同-强化治污情景下全国城市年均$PM_{2.5}$浓度相对基准年的平均变化比例为-45.2%，仅有16个地级市的$PM_{2.5}$浓度出现上涨，多数属于农业型城市，其中仅有4个城市的$PM_{2.5}$浓度和CO_2排放均出现上升。
- **协同-强化减污情景推动了74.1%的城市同时实现“双达”**（碳达峰，同时年均$PM_{2.5}$浓度达到国家二级标准），24%的城市实现了“达标未达峰”，仅有1.8%的城市“达峰未达标”。

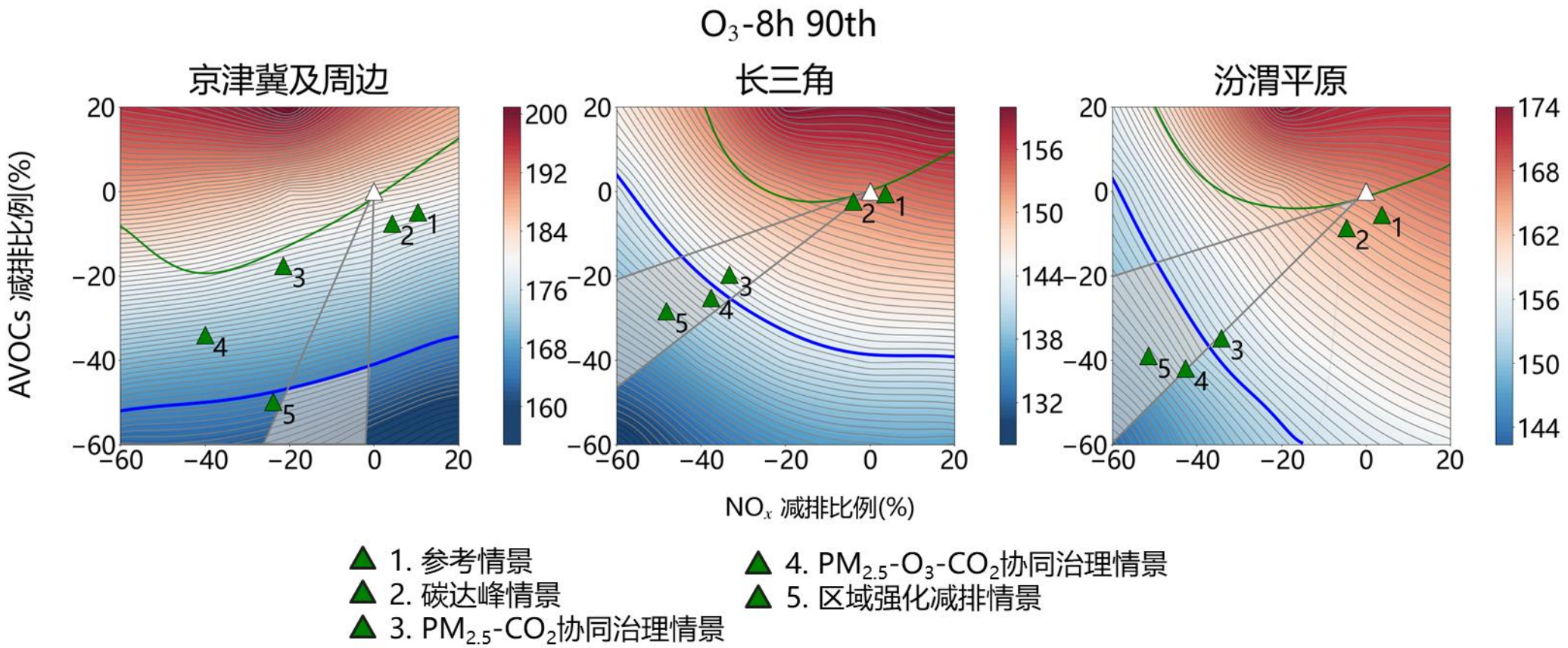
进一步构建$PM_{2.5}$-O_3-CO_2协同治理情景



在$PM_{2.5}$-O_3-CO_2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$PM_{2.5}$-CO_2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O_3浓度改善目标**

重点区域强化减排的O_3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O_3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O_3浓度进一步下降7 μg/m³，实现浓度改善目标**

实现碳中和目标的关键是科技创新

2050年实现净零排放的关键技术中 **50%** 目前 **尚未成熟**

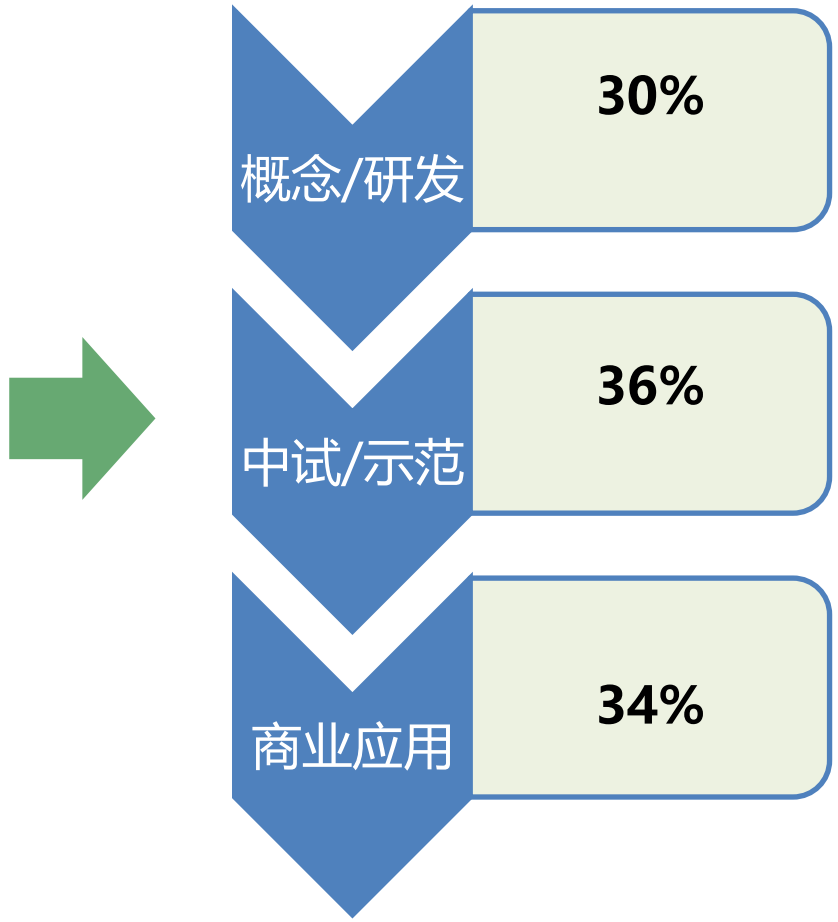
—— IEA，2050年实现净零排放：全球能源行业的路线图，2021

关键核心技术创新

科技部碳中和技术分类

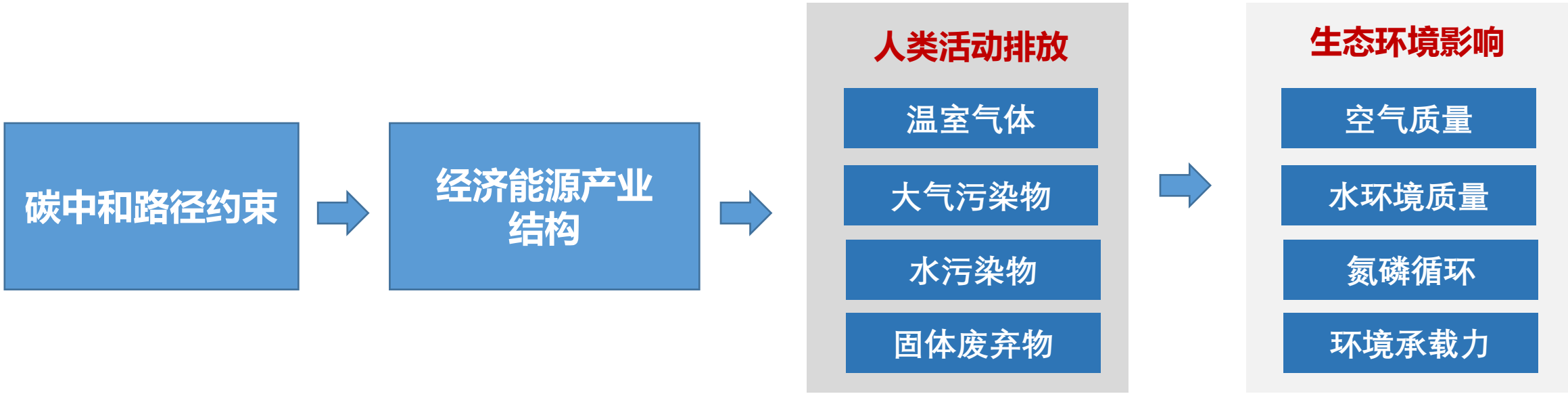
大类（5）	子类（18）	亚类（66）
1、零碳电力能源	可再生电力与核电	太阳能发电、风能发电、地热发电、海洋能发电、生物质发电、水力发电、核能发电
	储能	机械能储能、电气储能、电化学储能、热化学储能
	输配电	高比例可再生能源并网、交直流混联电网安全高效运行、先进电力装备
2、零碳非电能源	氢能	工业副产氢、电解水制氢、化工原料制氢、物理储氢、化学储氢、运氢、燃料利用、原料利用…
	非氢燃料	生物质制备燃料、CO2制备燃料、新型燃料、氨能燃料利用
	供暖	低品位余热利用、水热同产、热储能、热力与电力协同、其他热利用
3、燃料/原料与过程替代	电气化应用	工业电气化、建筑电气化、农业电气化、交通电气化
	燃料替代	生物质燃料替代、氢燃料替代
	原料替代	生物质原料替代、绿氢原料替代、捕集CO2原料替代、低碳建材/冶金/化工原料替代
	工业流程再造	钢铁流程再造、有色流程再造、化工流程再造、建材流程再造
	回收与循环利用	能量回收利用、物质回收利用
4、CCUS/碳汇与负排放	CCUS	捕集、压缩与运输、地质利用与封存
	负排放技术	碳移除、强化碳转化
	碳汇	陆地碳汇、海洋碳汇
5、集成耦合与优化	能源互联	多能协同发电、多能互补耦合应用
	产业协同	全产业链低碳集成与耦合、跨产业低碳集成与耦合
	节能减污降碳	效率提升、碳减排与大气污染物协同治理、碳减排与水污染物协同治理、碳减排与固体废弃物协同治理
	管理支撑	碳排放监测核算体系、碳中和决策支撑

减排贡献



来源：科技部二十一世纪管理中心

碳中和路径下人类活动巨变将对生态环境产生重大影响



- 在碳中和路径约束下，剧烈技术变革将改变社会经济产业结构，人类活动将在未来几十年内发生巨变，温室气体、大气污染物等人类活动排放将迅速减少。
- 能源版图、产业布局和人类排放的变化将进一步对生态环境产生重大影响。

谢谢！

感谢张强 、施沁人、耿冠楠 、 同丹、程静等帮助准备材料

清華大學
Tsinghua University