

区域空气质量调控技术发展及其在京津冀的应用

贺克斌
清华大学环境学院

2016年11月15日，成都

主要需求：

更加精细的污染来源识别与源解析

阶段性控制方案的制定

重大事件的应对与快速评估

中长期治理规划的制定

共性问题：

各类行动措施对减排量贡献的定量核算

各类行动措施对浓度值改善的定量分析

区域空气质量调控技术系统

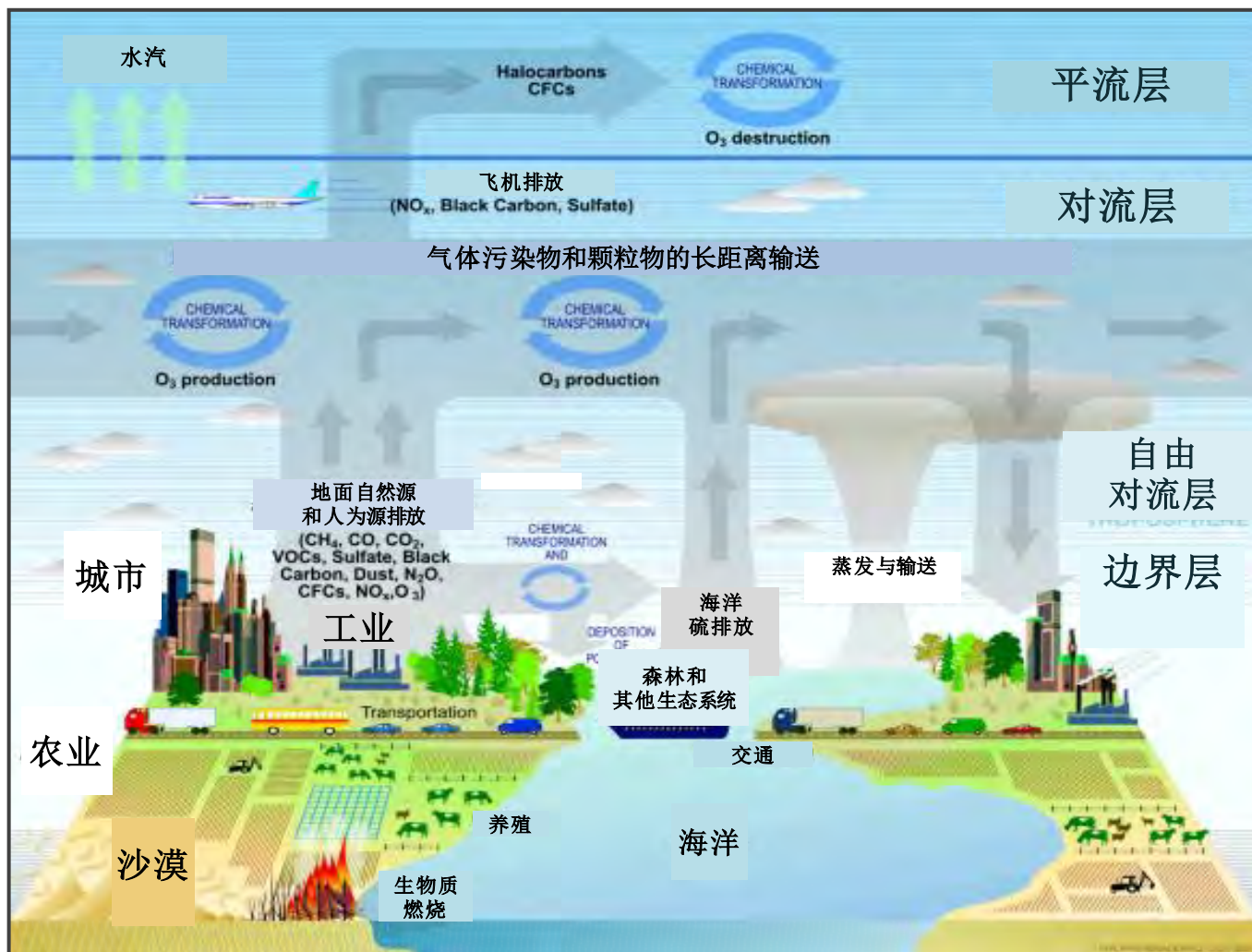
基本背景

技术发展

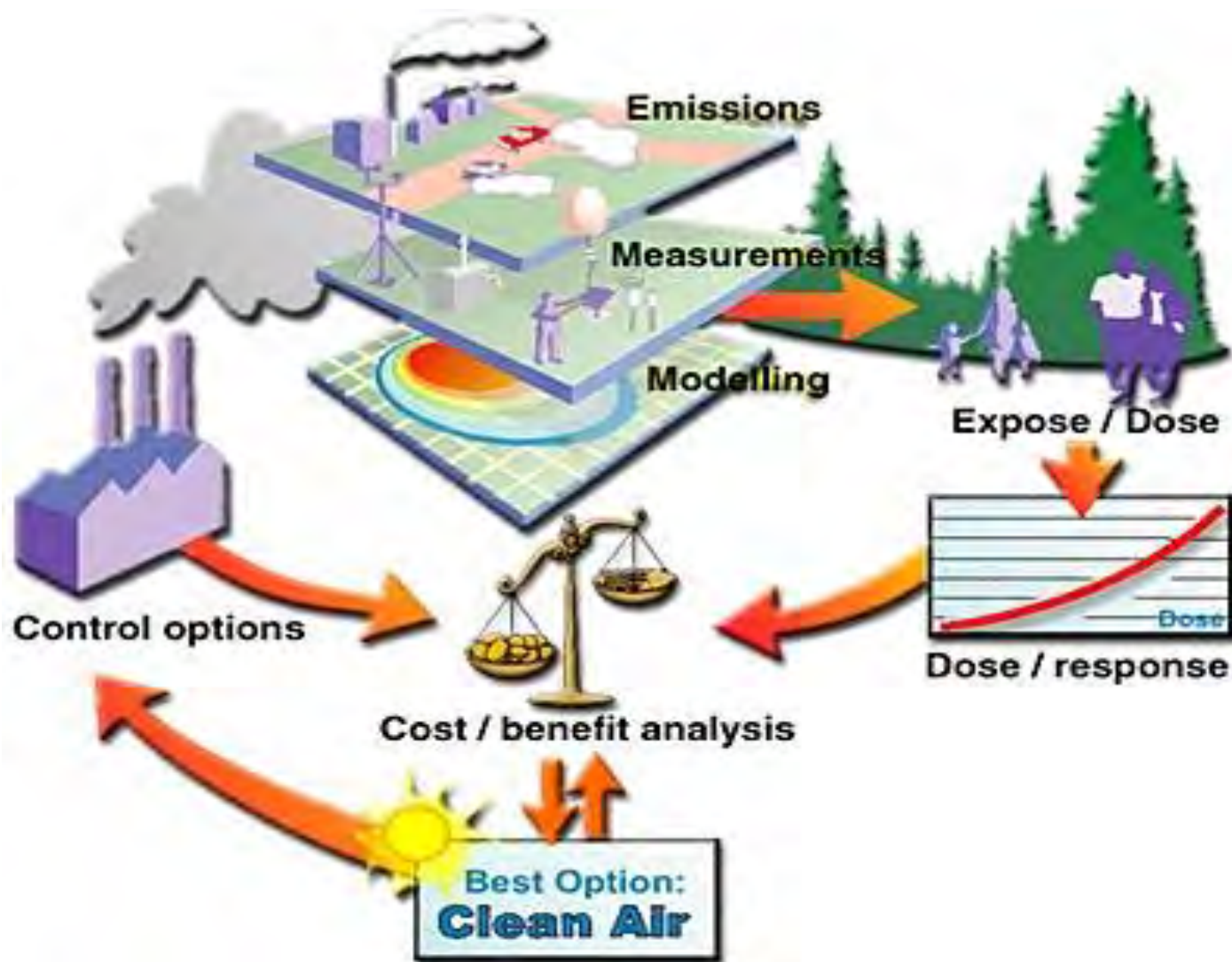
应用案例

主控因素：内因是排放，外因是气象

控制技术：源头减排技术，**区域调控技术**



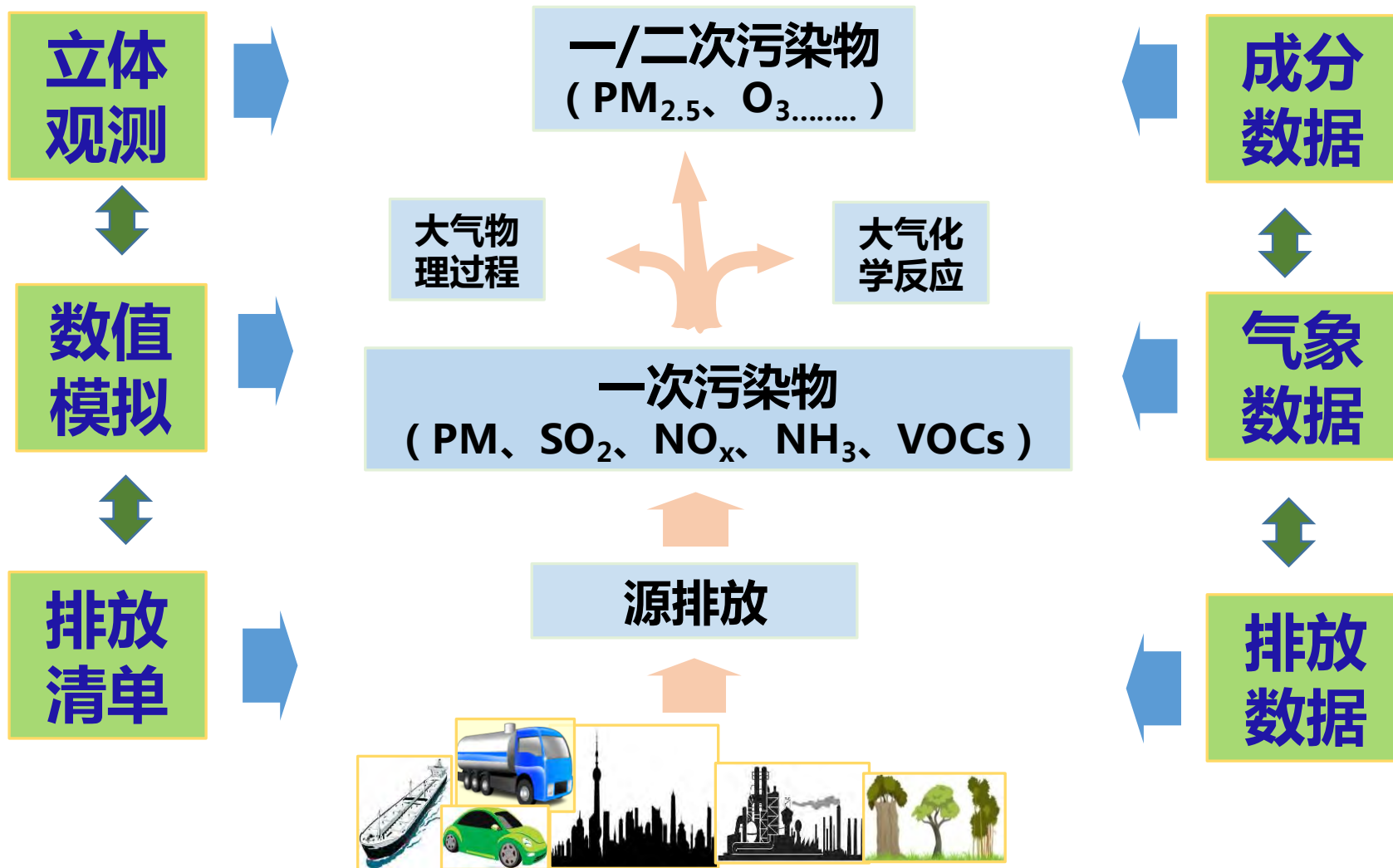
国际上区域空气质量调控技术体系



区域空气质量调控核心技术体系

核心技术

核心数据



我国现有环境管理体系对污染源的识别范围十分有限

	数亿台	数十万家	数亿辆	数亿辆	数百万吨	数十亿只	百万km ²	数十亿m ²
								
	固定 燃烧源	工艺 过程源	道路 机动车	非道路 移动源	溶剂 使用源	农业源	生物质 燃烧源	扬尘源
SO ₂	○	○	×	×	×	×	×	×
NO _x	○	○	○	×	×	×	×	×
PM ₁₀	○	○	○	×	×	×	×	×
PM _{2.5}	×	×	○	×	×	×	×	×
CO	×	×	○	×	×	×	×	×
VOC	×	×	○	×	×	×	×	×
NH ₃	×	×	×	×	×	×	×	×

大气组分立体观测技术平台

测量平台

时间范围

空间范围

小时到日尺度 月到年尺度

小尺度

大尺度

2 km

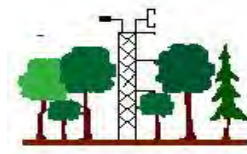
30 km

全球

地面站点



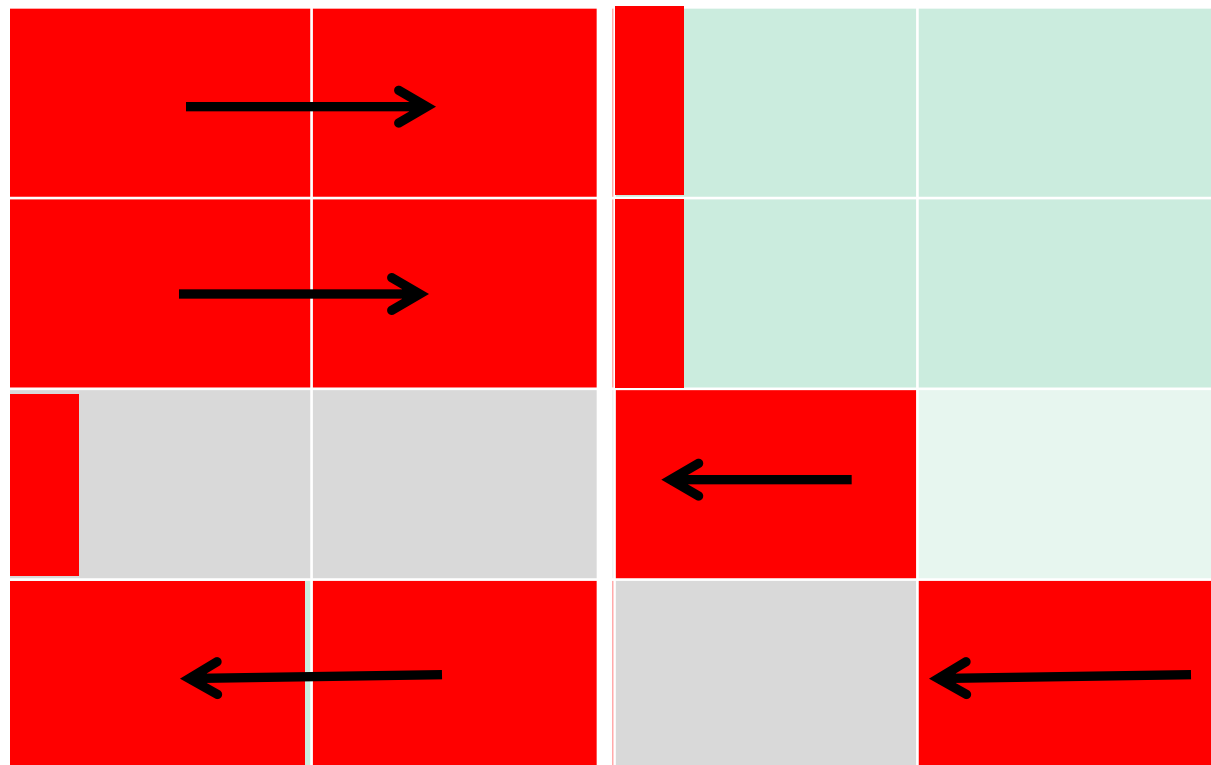
通量塔



航测



卫星遥感



对流层痕量气体与气溶胶测量主要卫星传感器

Solar Backscatter Thermal Infrared

Sensor	MOPITT	MISR	MODIS	AIRS	SCIA-MACHY	TES	OMI	CALIOP	GOME-2	IASI	GOSAT	VIIRS	TROP-OMI	
Platform (launch)	Terra (1999)				Aqua (2002)	Envisat (2002)	Aura (2004)		Calipso (2006)	MetOp (2006)		IBUKI (2009)	NPP (2011)	Sent-5 Precur (2014)
Typical Res (km)	22x22	18x18	10x10	14 x14	60x30	8x5	>24 x13	40x40	80x40	12 x12	11x11	6x6	7x7	
Aerosol		X	X		X		X	X	X			X	X	
NO ₂					X		X		X				X	
HCHO					X		X		X				X	
CO	XX			X	X	X				X			X	
Ozone					X	X	X		X	X			X	
SO ₂				X	X		X		X				X	
NH ₃						X				X				
CH ₄					X	X				X	X		X	
CO ₂					X	X				X	X			

来源：Randall Martin

大气污染数值模拟技术



全球多尺度全耦合嵌套网格空气质量预报模式系统
全球自适应网格大气污染预报模式

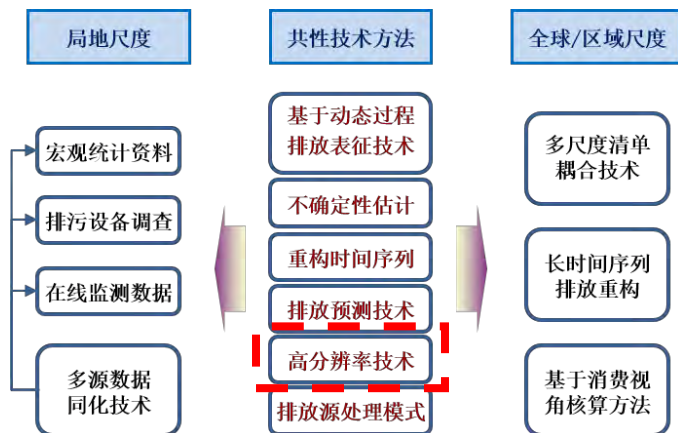
基本背景

技术发展

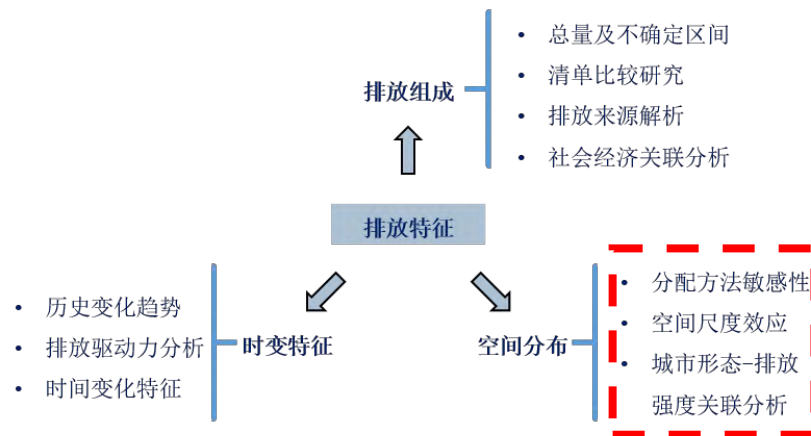
应用案例

大气污染物排放清单主要研究方向

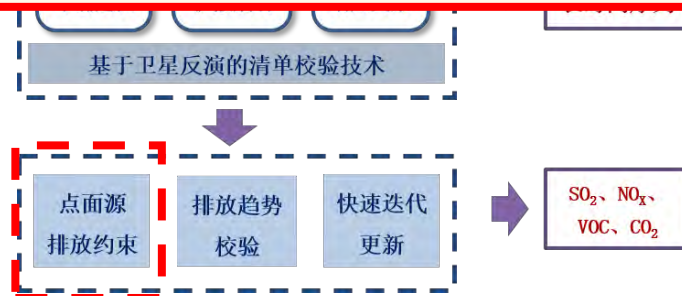
1. 排放清单建立技术(27%)



2. 排放特征分析研究(25%)

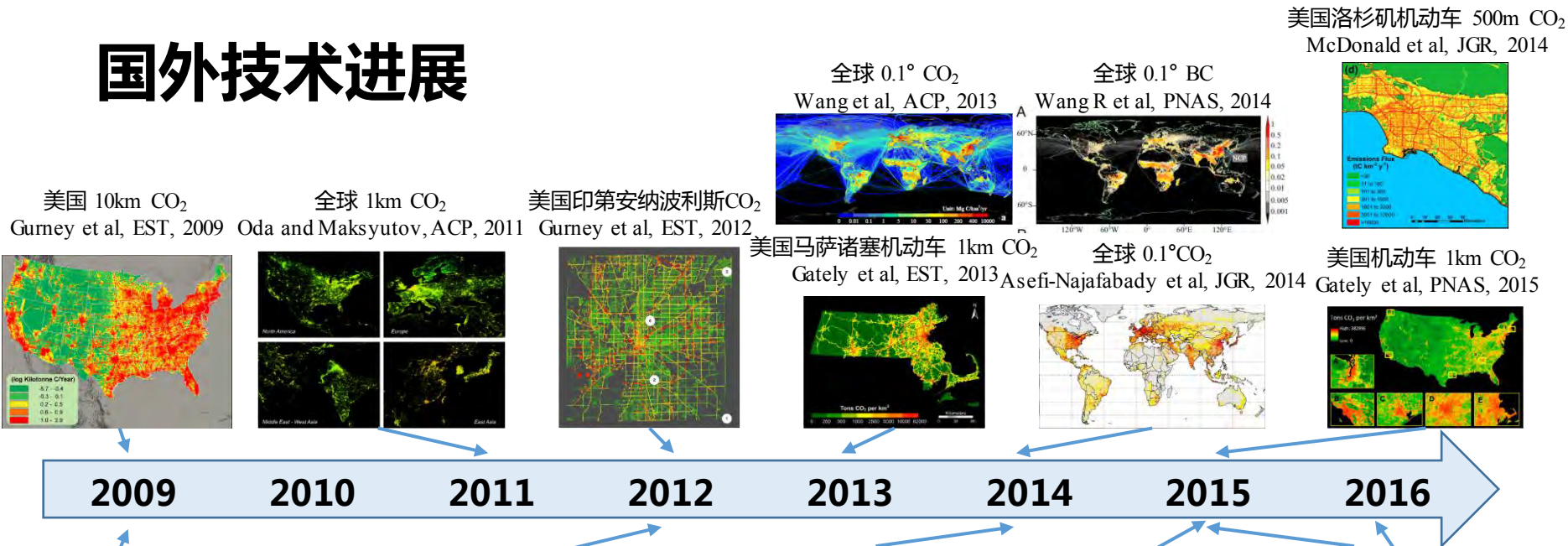


高分辨率清单技术既构成精细尺度排放表征的学术前沿，又对接管理决策的迫切需求，是当前研究热点之一！

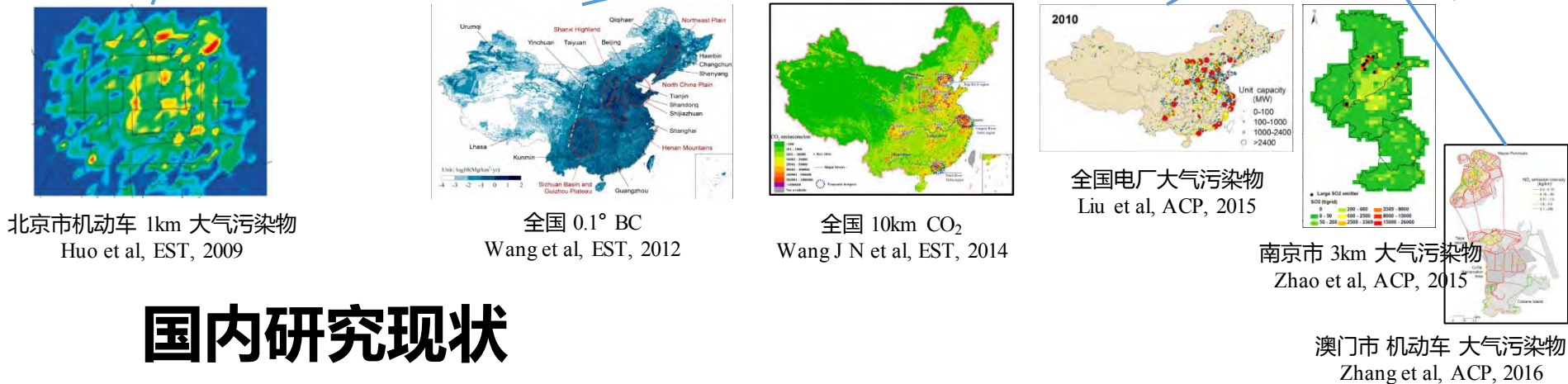


高分辨率排放清单研究主要进展

国外技术进展



国内研究现状



建立区域高分辨率机动车路网动态排放清单

大数据



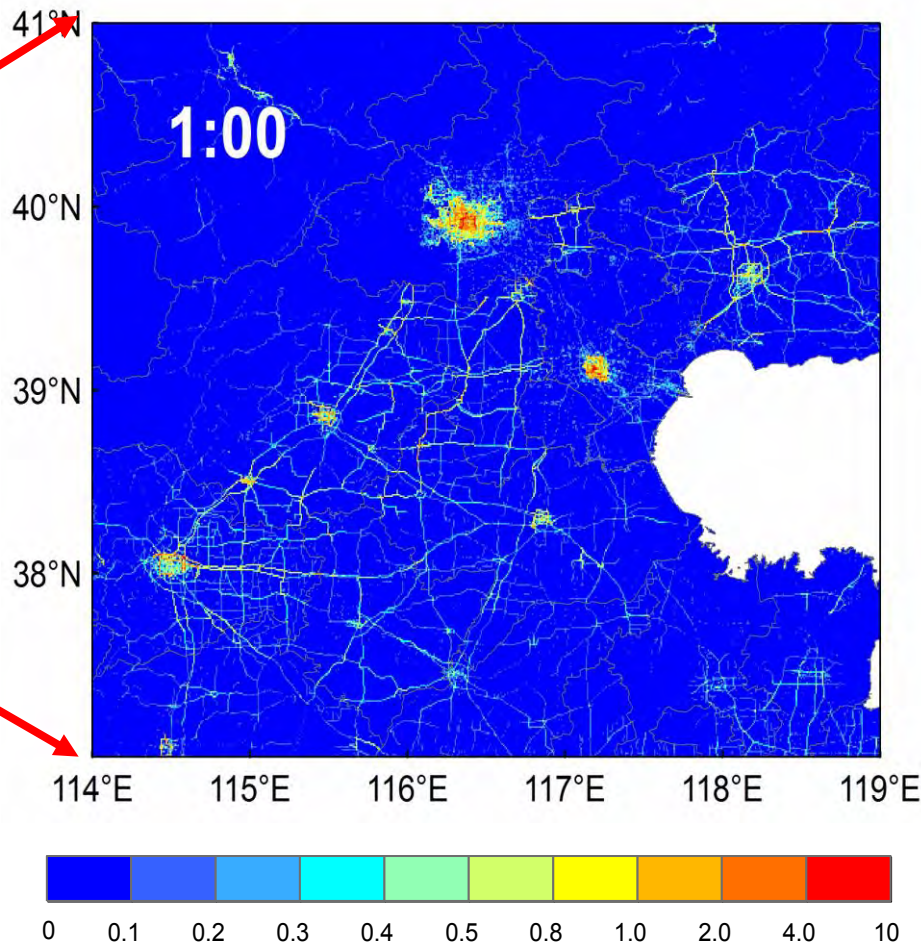
排放数据



交通数据

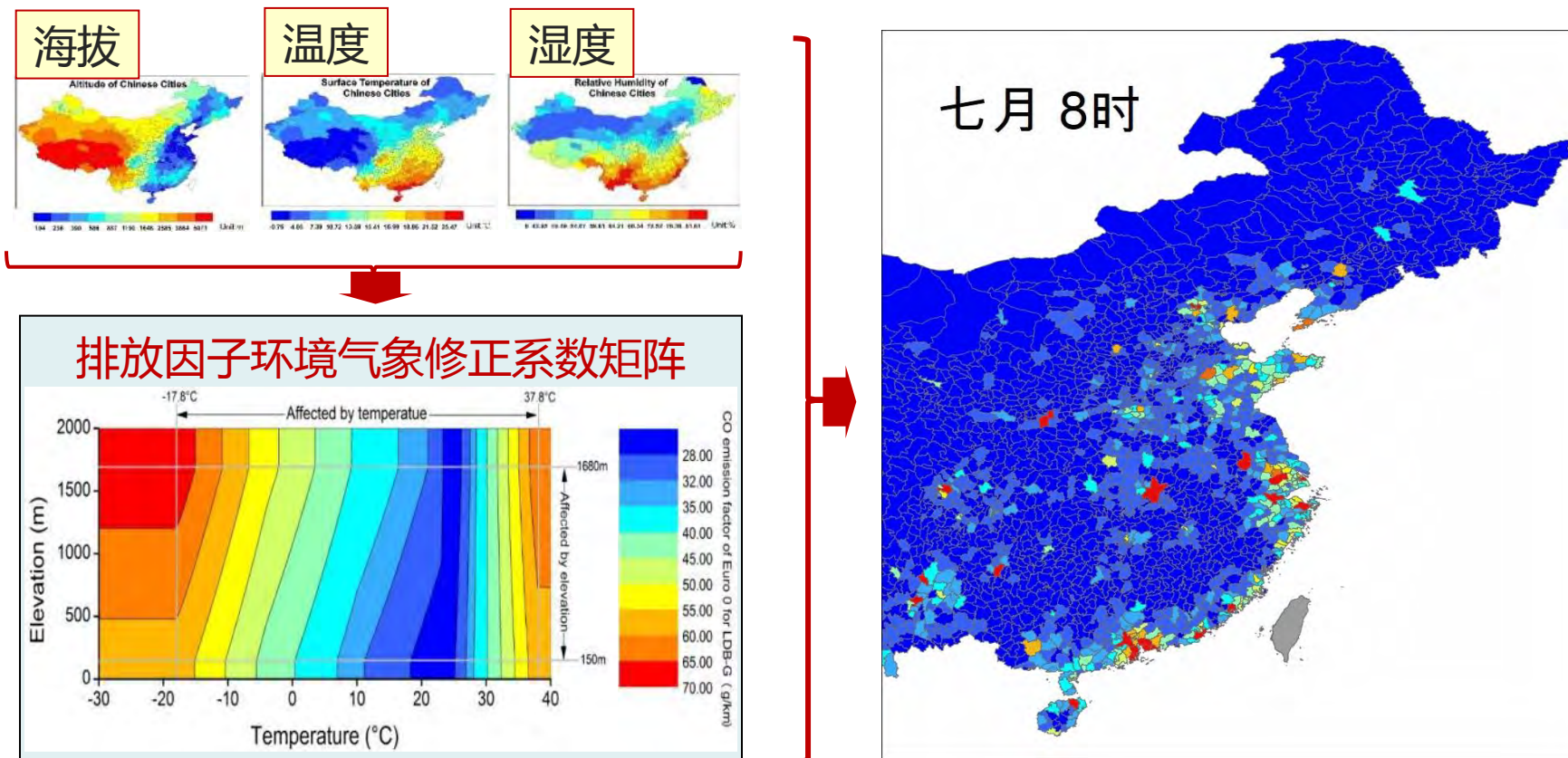


气象数据



建立区域高分辨率机动车路网动态排放清单

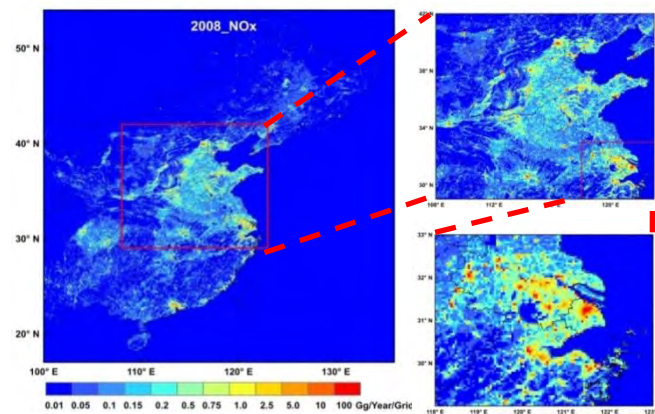
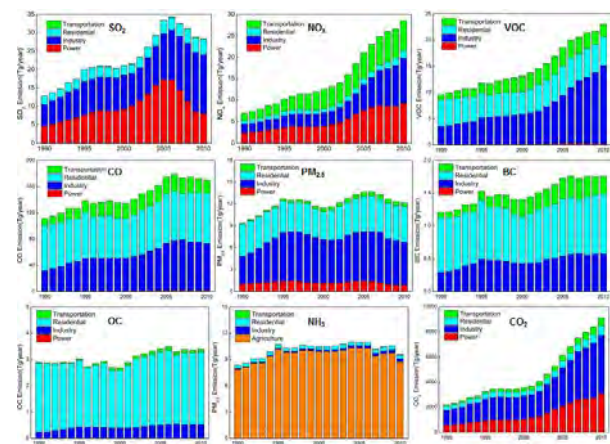
建立覆盖全国所有区县的排放因子环境气象修正系数矩阵
显著提升了机动车排放因子的时空精度



中国多尺度排放清单模型及在线数据共享平台 (MEIC)

MEIC模型提供的排放数据

- **年份:** 1990-2013
- **空间范围:** 中国大陆地区
- **污染源分类:** 约800种人为排放源, 最终合并为四个部门 (电力、工业、民用、交通)
- **物种:** SO_2 , NO_x , CO , NMVOC, NH_3 , BC, OC, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , CO_2
- **VOC成份:** 约600个VOC成份, 五种化学机制 (SAPRC99, SAPRC07, CB05, CBIV, and RADM2)
- **空间精度:** 可根据模式空间分辨率定制



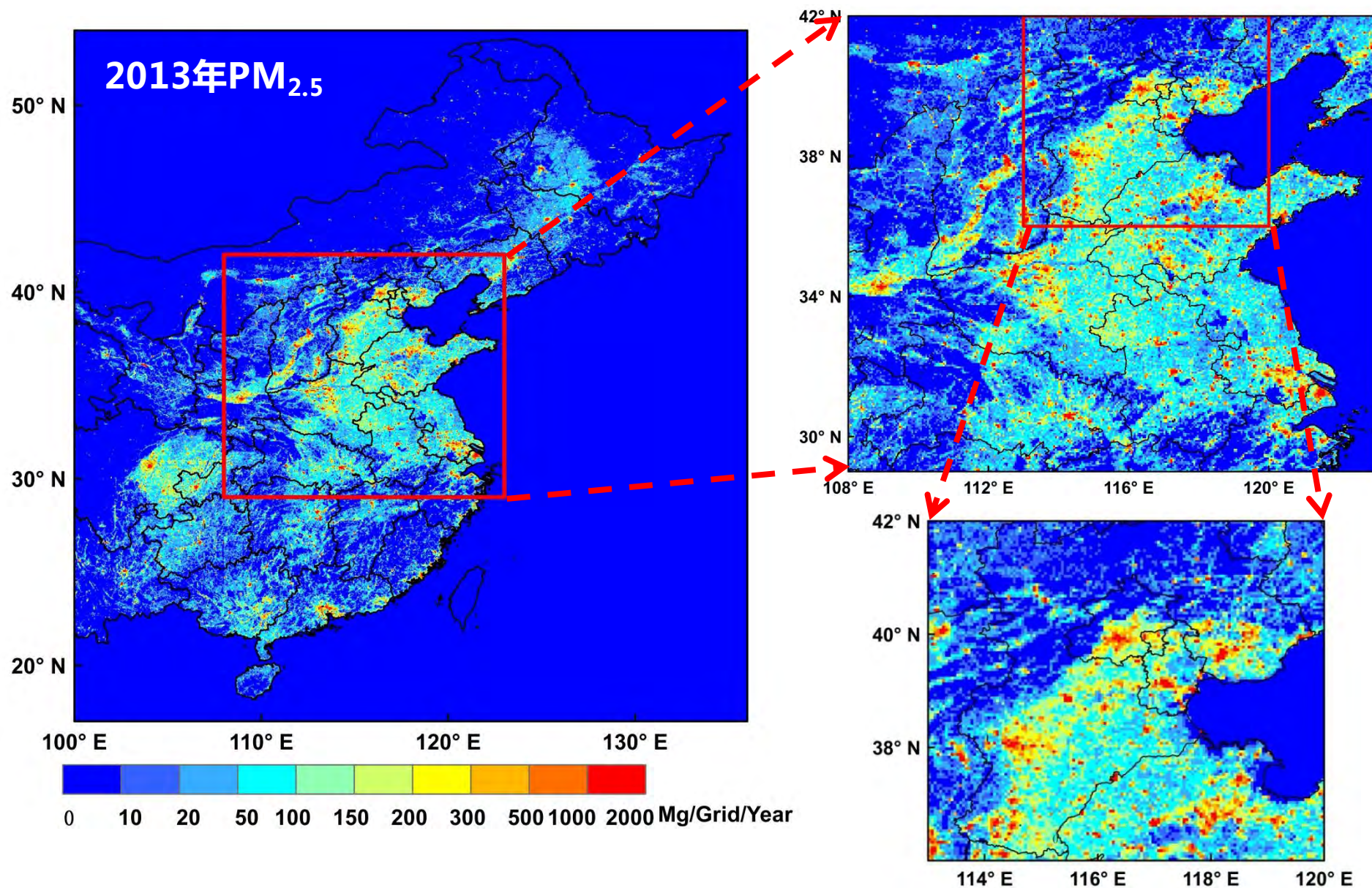
MEIC Model

BEA



The China Sustainable Energy Program
中国可持续能源项目

2013年多尺度高分辨率排放清单



中国国控监测站点体系



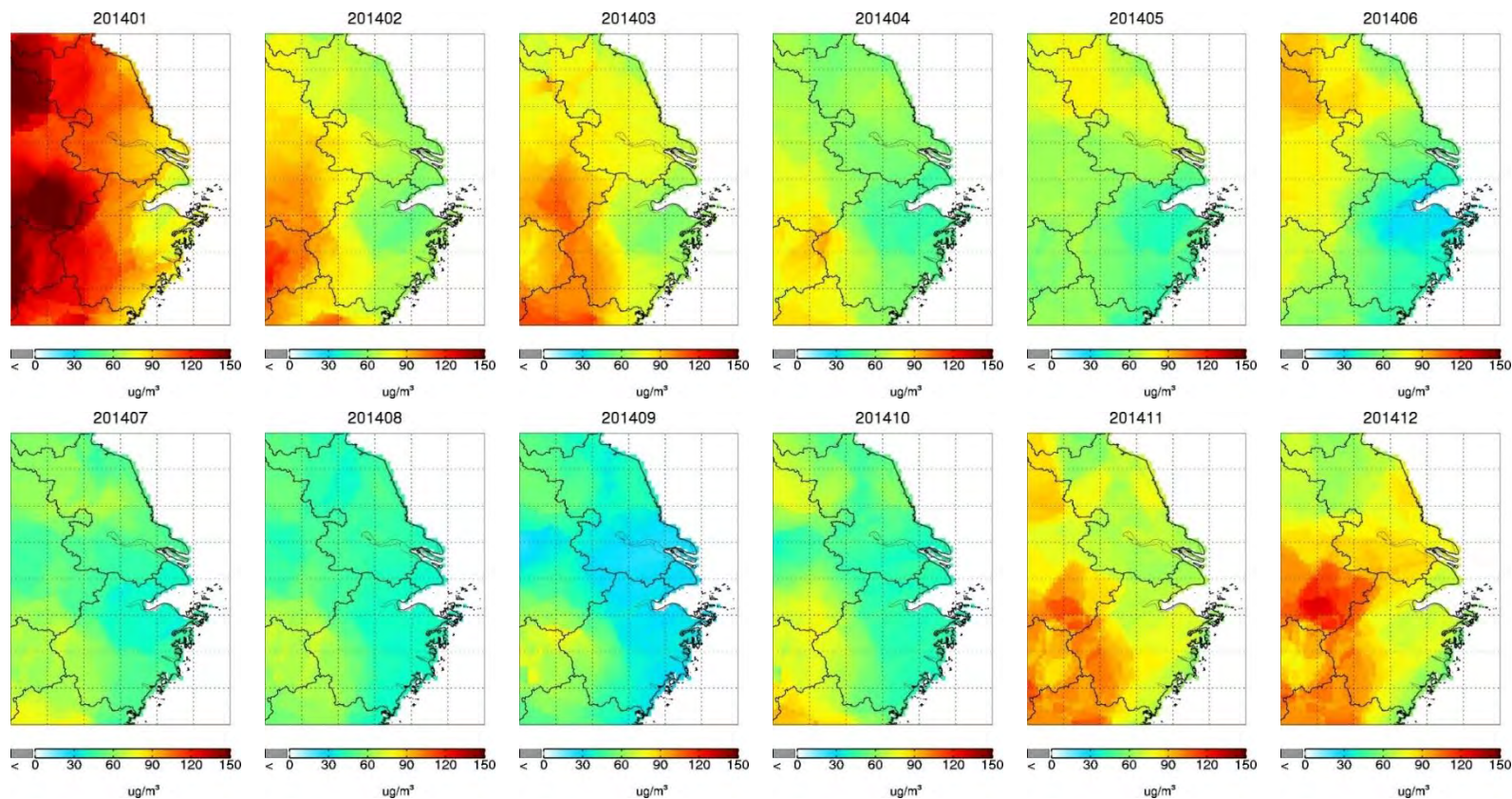
目前，中国环境监测总站共在**367**个城市设立了**1497**个国控监测站点，每小时公布包含SO₂、NO₂、CO、O₃、PM₁₀、PM_{2.5}和AQI在内的**10479**个数据

重污染分析：发生季节及时空分布特征

□ 2013-2015年数据分析表明：1-2月、11-12月是长三角地区

PM_{2.5}重污染月份。

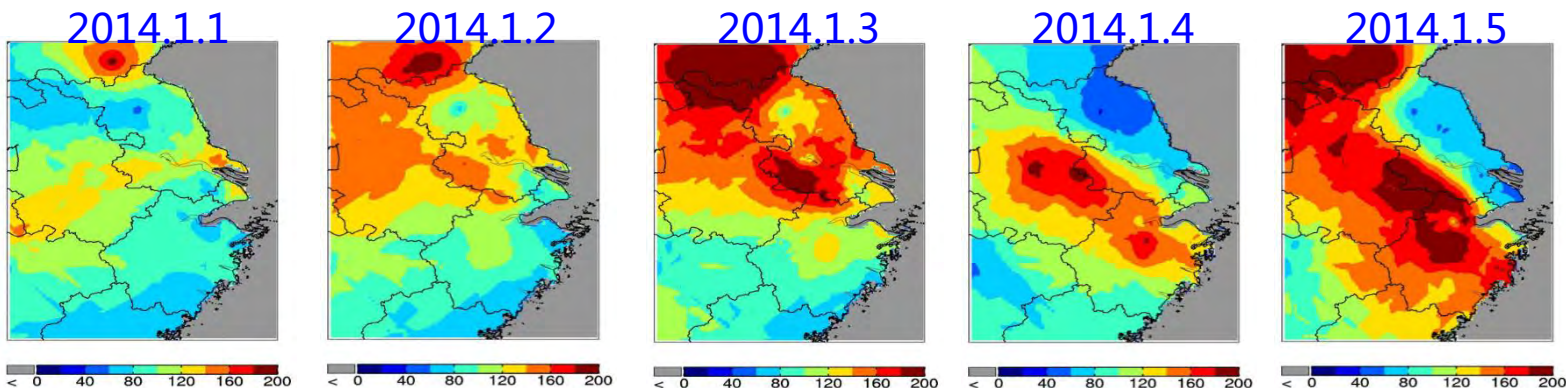
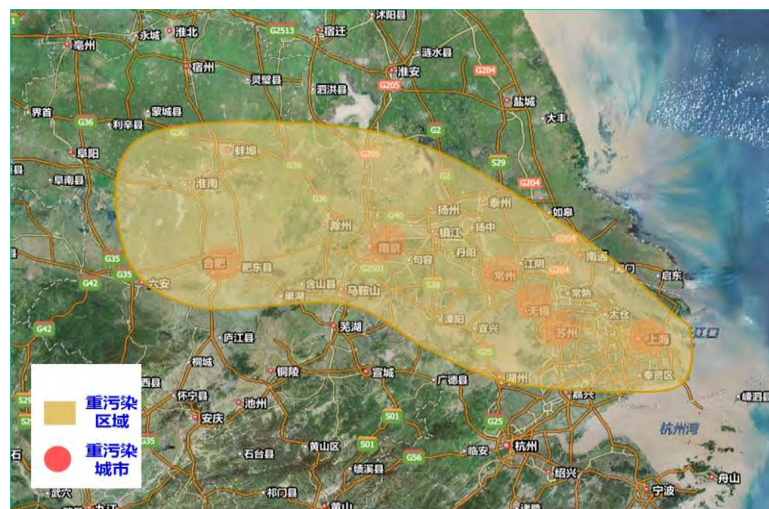
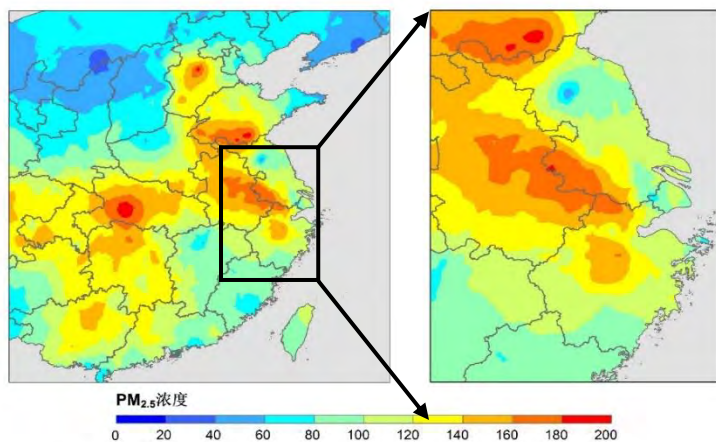
以2014年为例



重污染分析：核心污染带识别

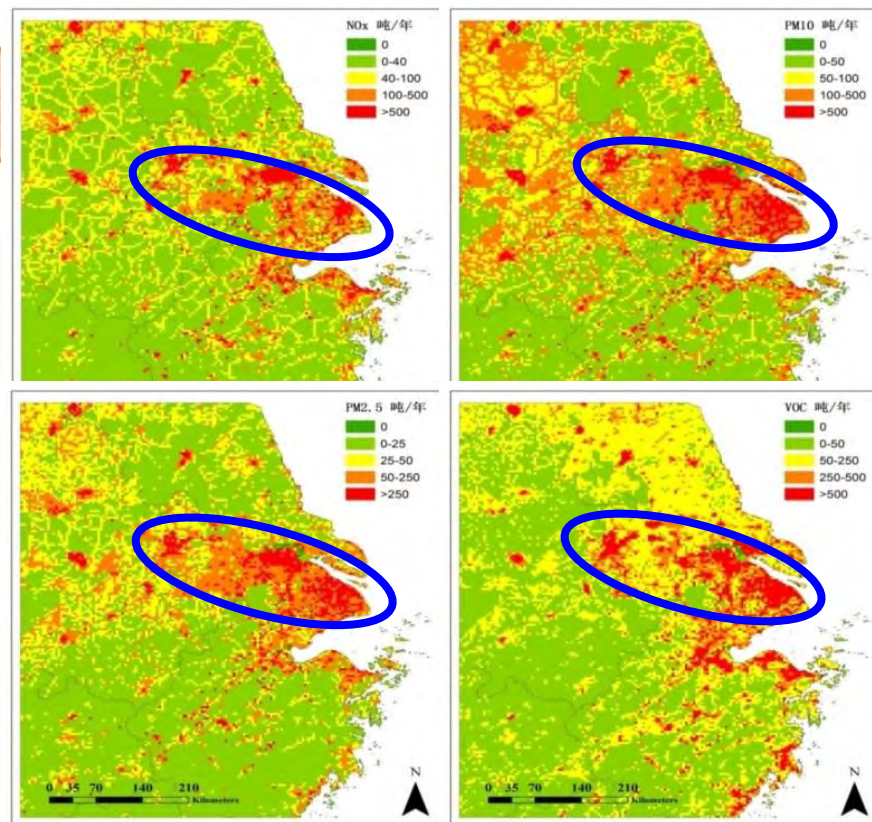
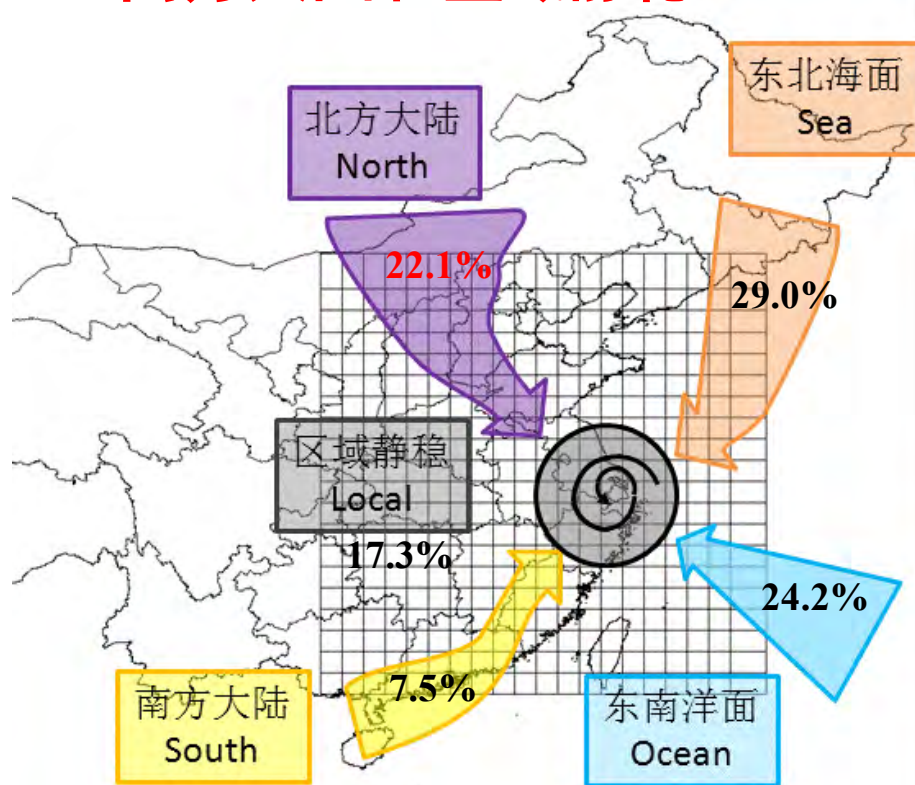
- 分析了长三角地区26城市2013-2015年共40次污染事件，结果表明：
苏、皖、浙交界区域是PM_{2.5}重污染带之一。

举例：2014.1.1-1.5 PM_{2.5}=148 μg m⁻³



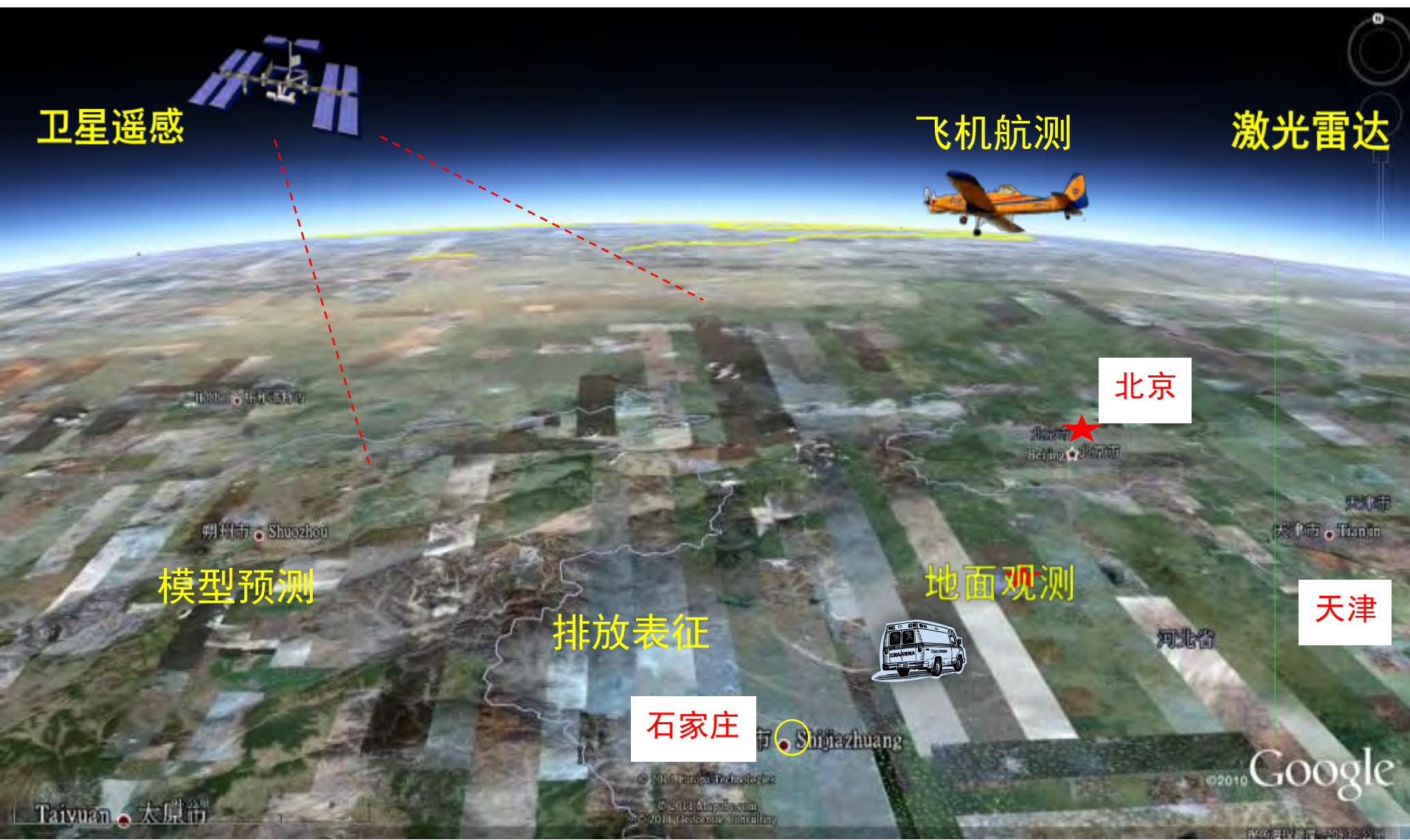
传输通道分析：区域传输通道识别

□ 基于2004-2014年GDAS数据，将长三角大气污染输送轨迹大致可分为5类：来自**北方大陆**、**东北海面**、**东南洋面**、**南方大陆**和**区域静稳**。

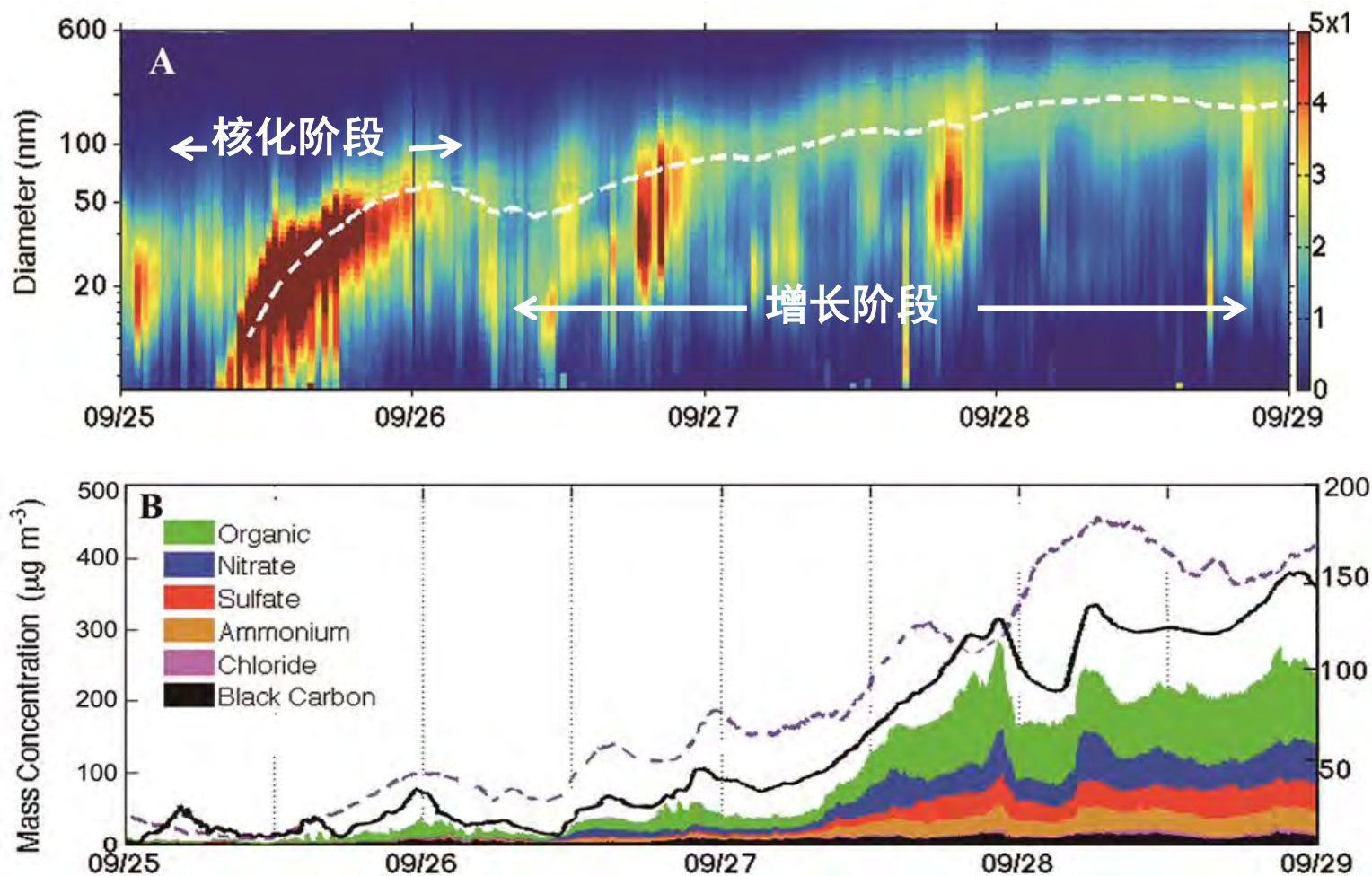


来源：上海环科院李莉等

立体观测系统



新粒子核化增长频发

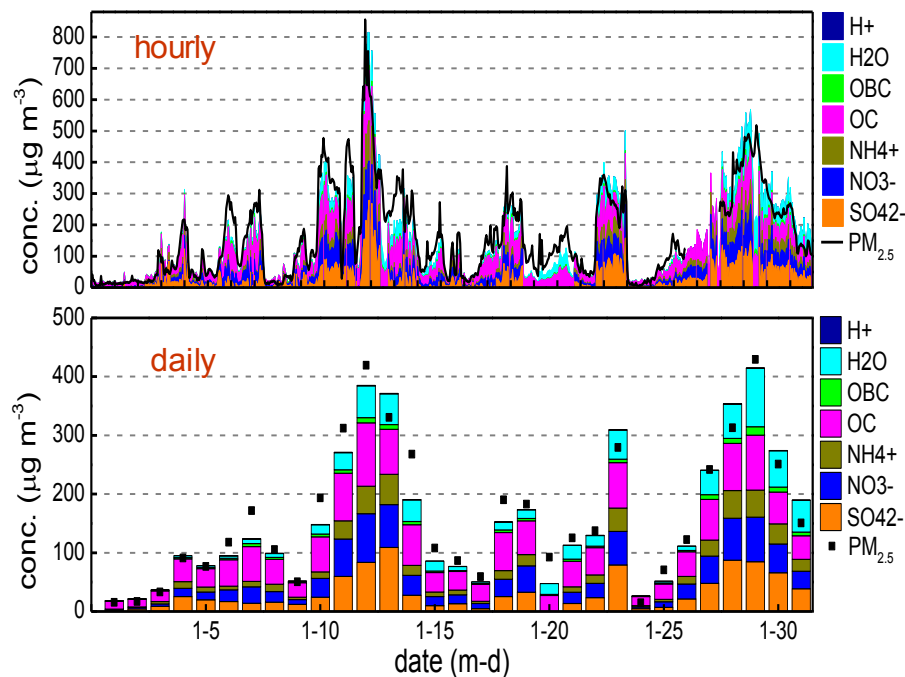


(Guo et al., PNAS, 2014)

典型重污染过程在线观测对比分析

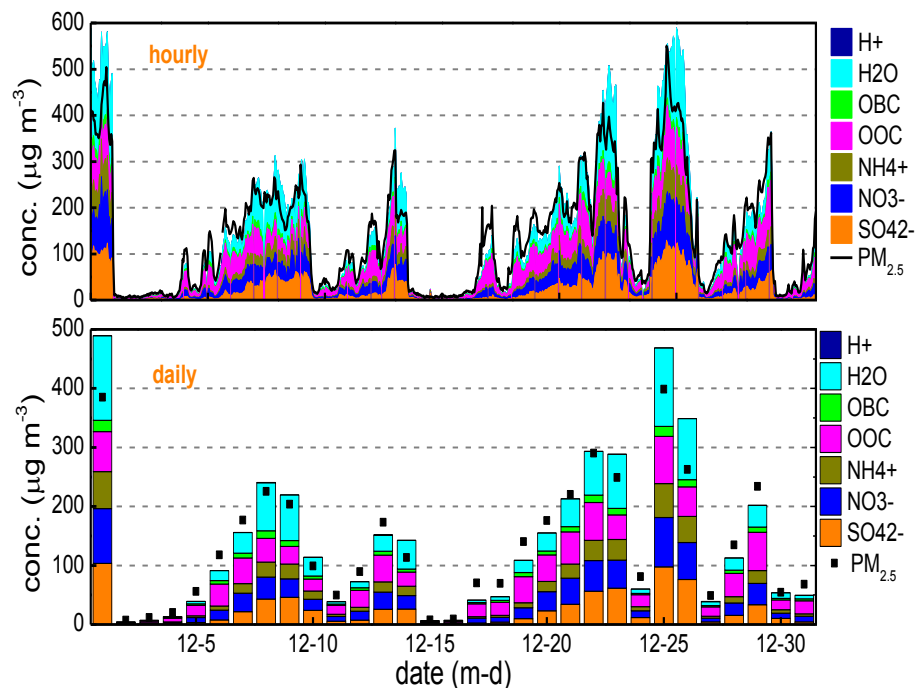
(观测点：清华大学)

2013年1月



➤ PM_{2.5}小时峰值: **855.1** ug m⁻³ (18:00 12/Jan)

2015年12月

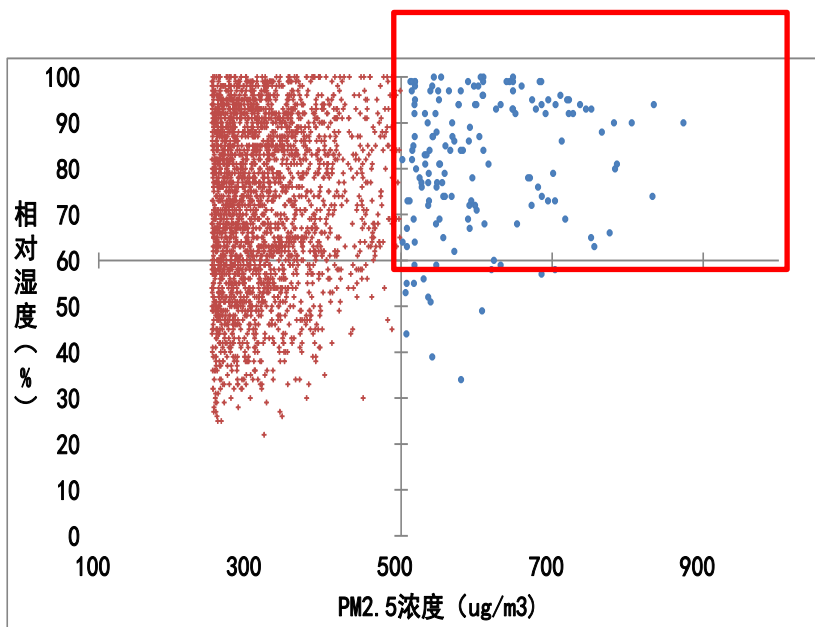


➤ PM_{2.5}小时峰值: **550.2** ug m⁻³ (14:00 25/Dec)

京津冀地区气象观测资料：

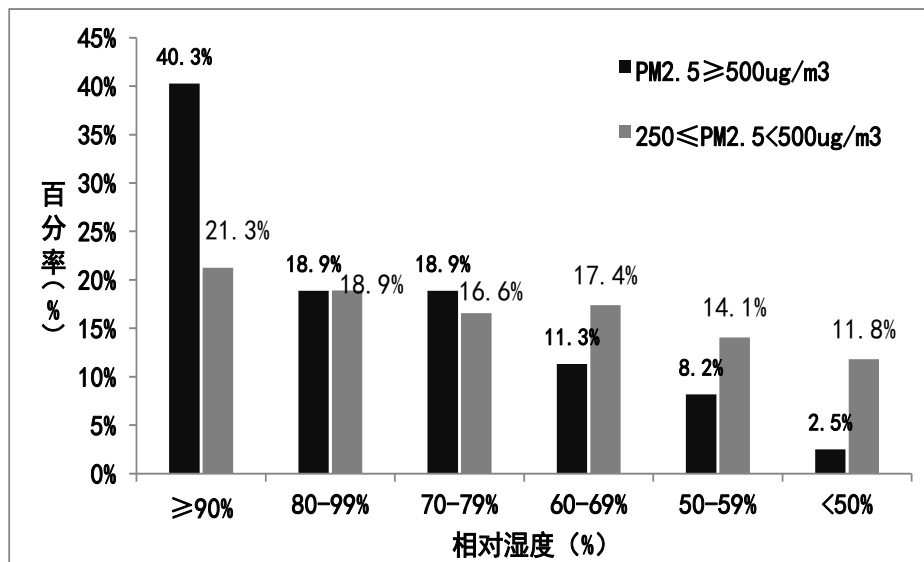
2013-2015年秋冬季严重污染时相对湿度

- PM_{2.5} ≥ 500ug/m³几乎都发生在高湿条件下，平均相对湿度为81.5%。
- 严重污染时刻（PM_{2.5} ≥ 250ug/m³）中75%样本相对湿度超过60%。
- 严重污染时刻（PM_{2.5} ≥ 250ug/m³）中有41.2%样本相对湿度超过80%。

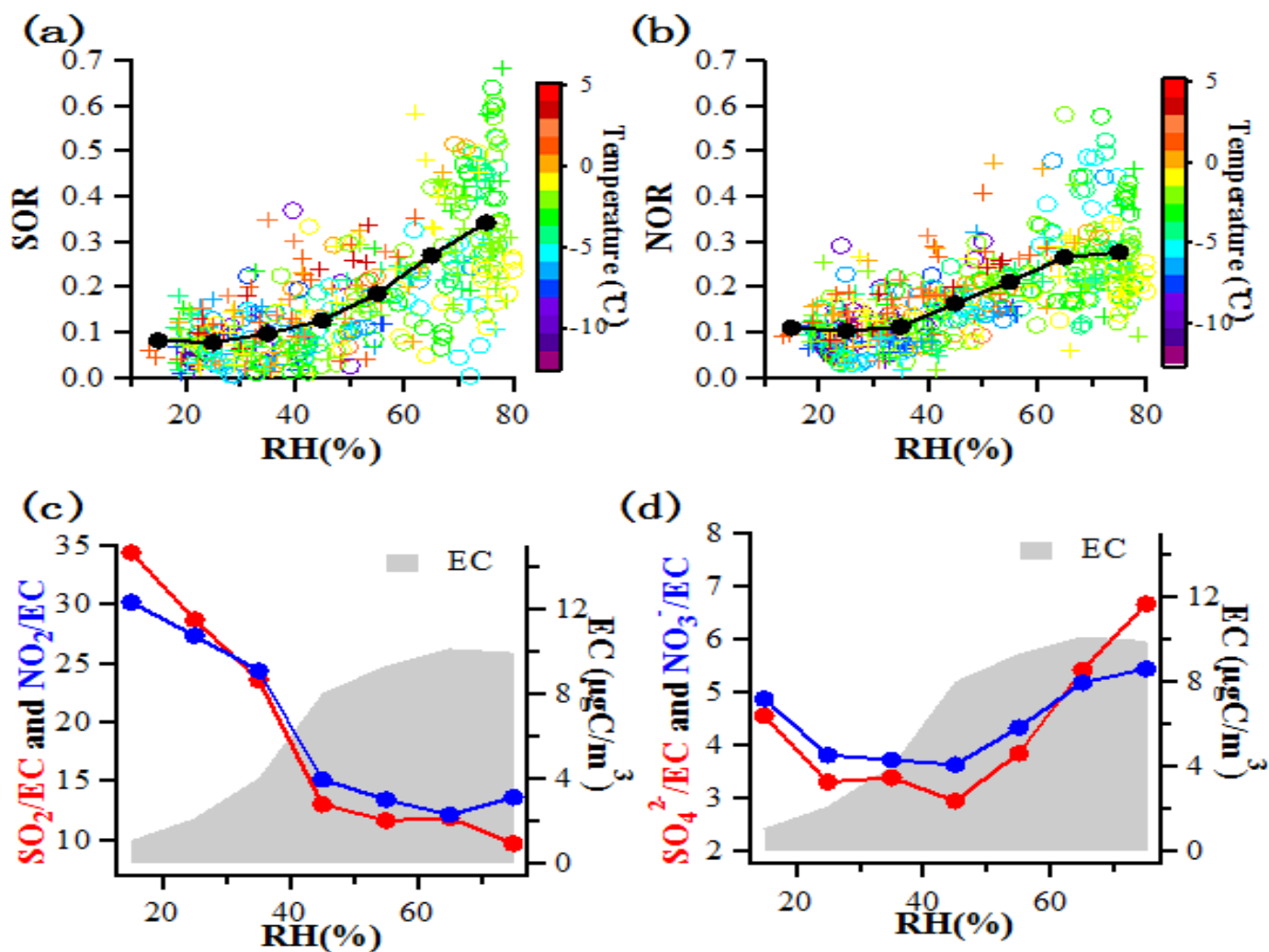


2013-2015年12月12日逐小时PM_{2.5} (≥250ug/m³)
与相对湿度散点图

	相对湿度					
	≥90%	80-99%	70-79%	60-69%	50-59%	<50%
PM _{2.5} ≥ 250ug/m ³	22.3%	18.9%	16.7%	17.1%	13.7%	11.3%



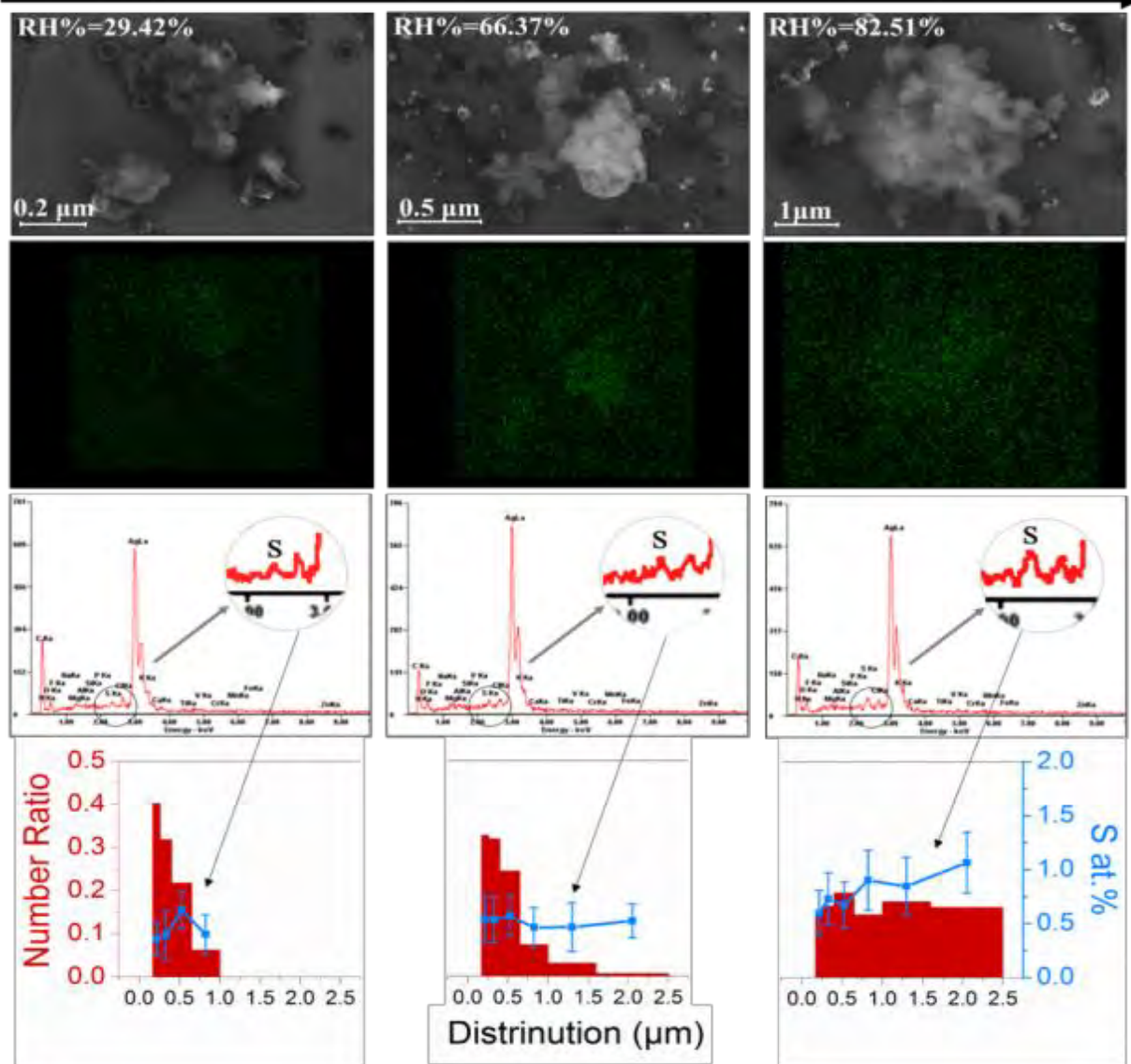
2013年1月重污染过程



高湿度下 SO_2 和 NO_x 在含矿物颗粒物表面向硫酸盐和硝酸盐的转化是SNA浓度急剧升高的最重要原因!

形貌与能谱分析获得高湿度下界面反应的直接证据

Increasing RH% →



Morphology 形貌

S-Mapping S元素分布

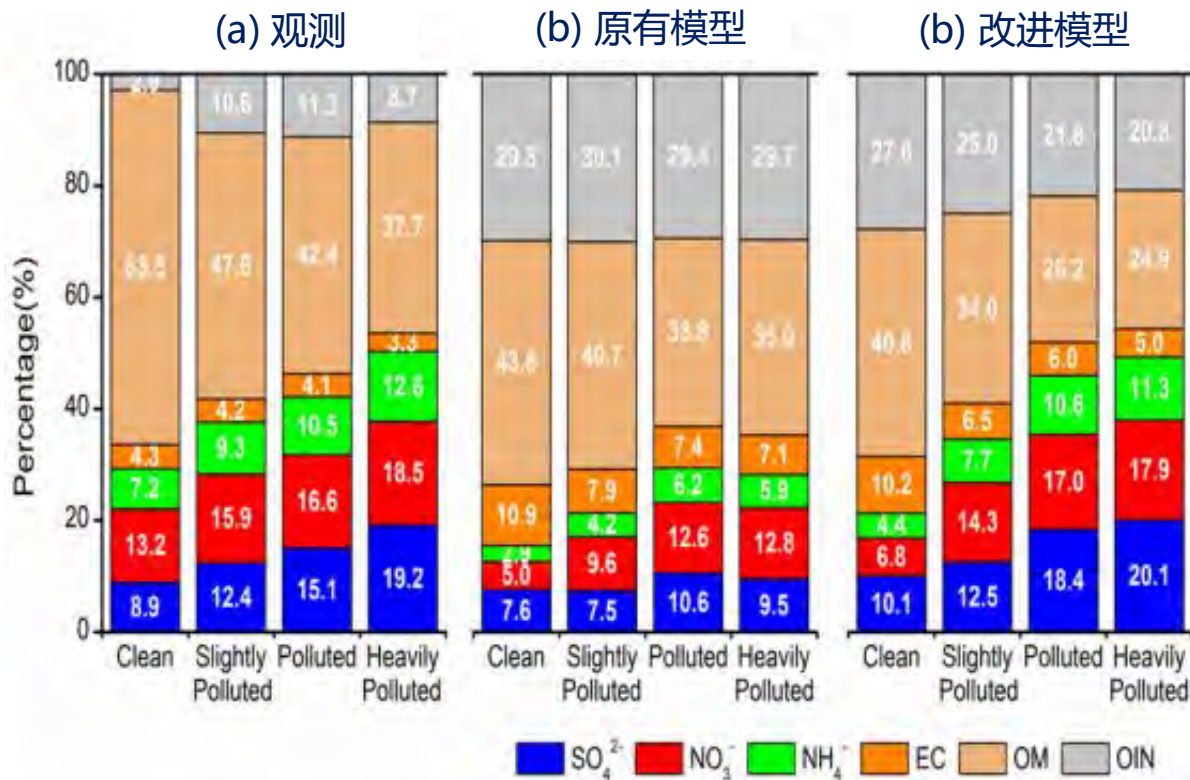
EDX-Spectra 能谱

粒径及S原子百分比
Size & S at. %

改进二次无机气溶胶非均相化学模块

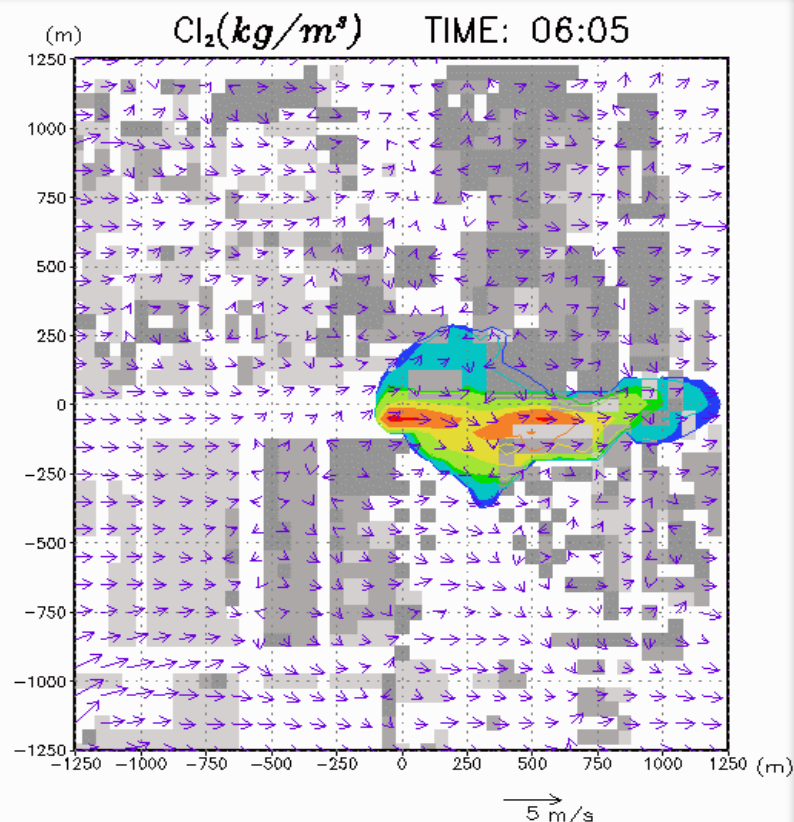
从大量实验室研究结果中筛选出九种非均相反应，在离线耦合的WRF-CMAQ模式中增加了新的非均相反应相机制

类别	反应 #	反应式	对 PM _{2.5} 贡献
默认版 CMAQ			
气相化学	R1	$\text{SO}_2 + \text{OH} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HO}_2$	硫酸盐
	R2	$\text{NO}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{HNO}_3$	硝酸盐
	R3	$\text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} (\text{g}) \rightarrow 2\text{HNO}_3 (\text{g})$	硝酸盐
	R4	$\text{NO}_3 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{O}_2$	硝酸盐
	R5	$\text{NTR}^a + \text{OH} \rightarrow \text{HNO}_3$	硝酸盐
	R6	$\text{NO}_3 + \text{VOCs}^b \rightarrow \text{HNO}_3$	硝酸盐
液相动力学	R7	$\text{HSO}_3^- + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$	硫酸盐
	R8	$\text{HSO}_3^- + \text{MHP}^c \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+$	硫酸盐
	R9	$\text{HSO}_3^- + \text{PAA}^d \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+$	硫酸盐
	R10	$\text{SO}_2 + \text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+ + \text{O}_2$	硫酸盐
	R11	$\text{HSO}_3^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ + \text{O}_2$	硫酸盐
	R12	$\text{SO}_3^{2-} + \text{O}_3 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{O}_2$	硫酸盐
	R13	$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 0.5\text{O}_2 \xrightarrow{\text{Fe(III)/Mn(III)}} \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$	硫酸盐
非均相化学	R14	$\text{N}_2\text{O}_5 + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightarrow 2\text{HNO}_3 (\text{aq})$	硝酸盐
	R15	$2\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HONO} + \text{HNO}_3$	硝酸盐
改进版 CMAQ			
新添加非均相化学	R16	$\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Aerosol} \rightarrow \text{Products}$	影响 R7
	R17	$\text{HNO}_3 + \text{Aerosol} \rightarrow 0.5\text{NO}_3^- + 0.5\text{NO}_x$	活化过程
	R18	$\text{HO}_2 + \text{Fe(II)} \rightarrow \text{Fe(III)} + \text{H}_2\text{O}_2$	影响 R4 和 R7
	R19	$\text{N}_2\text{O}_5 + \text{Aerosol} \rightarrow 2\text{NO}_3^-$	硝酸盐
	R20	$\text{NO}_2 + \text{Aerosol} \rightarrow \text{NO}_3^-$	硝酸盐
	R21	$\text{NO}_3 + \text{Aerosol} \rightarrow \text{NO}_3^-$	硝酸盐
	R22	$\text{O}_3 + \text{Aerosol} \rightarrow \text{Products}$	影响 R10-R12
	R23	$\text{OH} + \text{Aerosol} \rightarrow \text{Products}$	影响 R1-R2, R5
	R24	$\text{SO}_2 + \text{Aerosol} \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$	硫酸盐

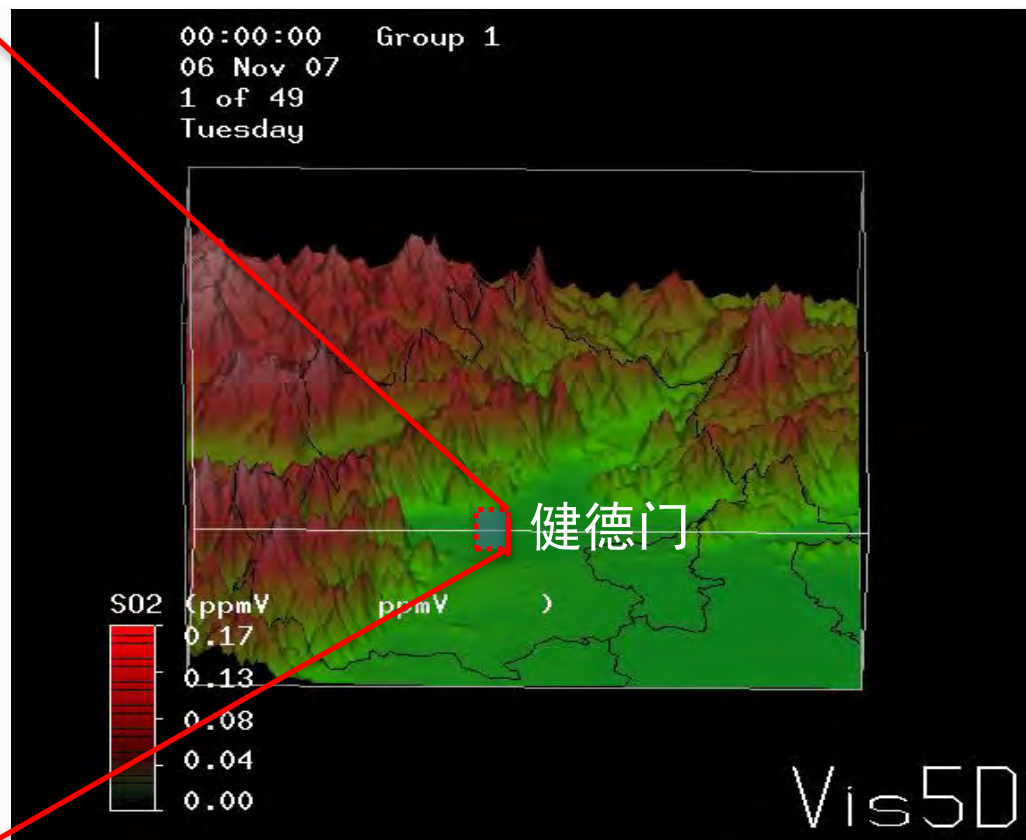


与原有模式相比，改进后的模式能够重现重污染过程中硫酸盐和硝酸盐对PM_{2.5}贡献相对清洁时期明显增强的现象

全球 ↔ 洲际 ↔ 区域 ↔ 城市群 ↔ 城市 ↔ 街区



- 边界层特性与扩散参数化
- 平流过程保证质量、元素守恒
- 极区传输处理
- 双向嵌套网格



构建了从全球、区域、城市、街区
多尺度多污染物的模式模拟体系
大气污染产生、输送和沉降规律

来源：中科院王自发团队

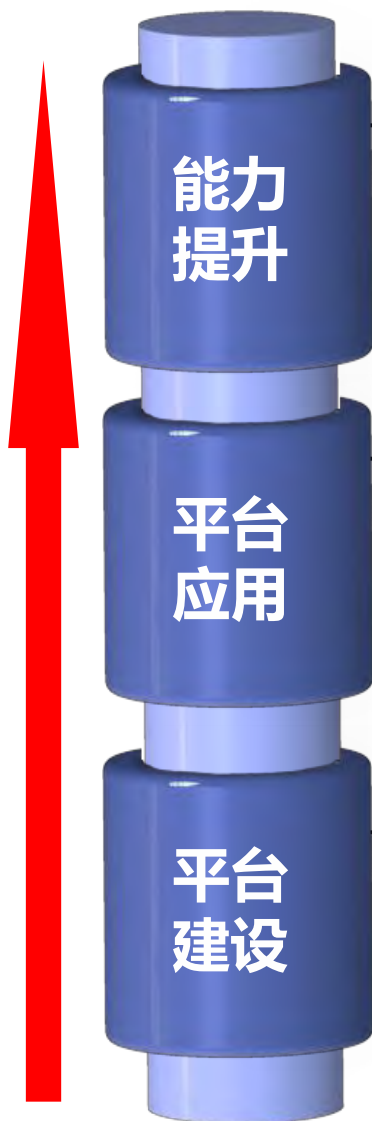
基本背景

技术发展

应用案例

河北省大气污染治理动态评估与管理技术平台

项目总体目标



提升河北省大气污染治理科学决策能力

- 目标管理、科学治霾、精准治污
- 为决策水平的持续提升提供科技支撑

助力河北省空气质量持续改善

- 为实现“大气十条”目标提供技术支持
- 重污染天气及重大活动空气质量保障
- 支撑“十三五”空气质量持续改善

建设大气污染防治动态决策支撑平台

- 集成区域空气质量动态调控技术
- 减排方案动态制订、跟踪、评估、优化
- 可视化管理、业务化支撑、可持续运行

平台建设目标

空气质量目标预警分析能力

- 考核管理：动态评估空气质量达标差距
- 定期预警：基于气象敏感性预警目标可达性
- 来源解析：区域及本地各部门贡献分析

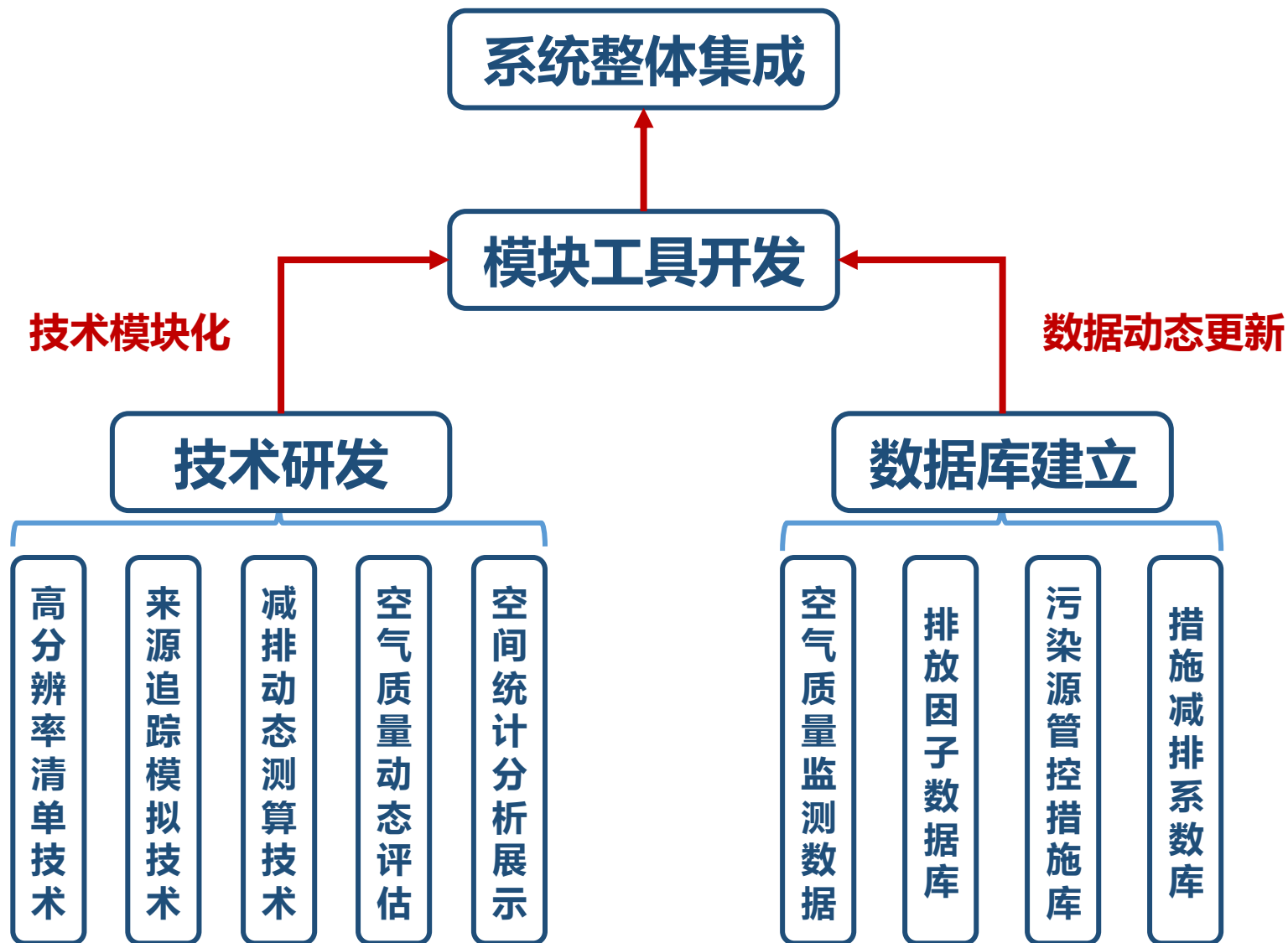
方案控制措施动态管理能力

- 快速响应：控制措施、排放清单、控制效果动态响应
- 组合管理：实现多种措施任意组合生成方案
- 动态更新：排放清单与措施库定期维护

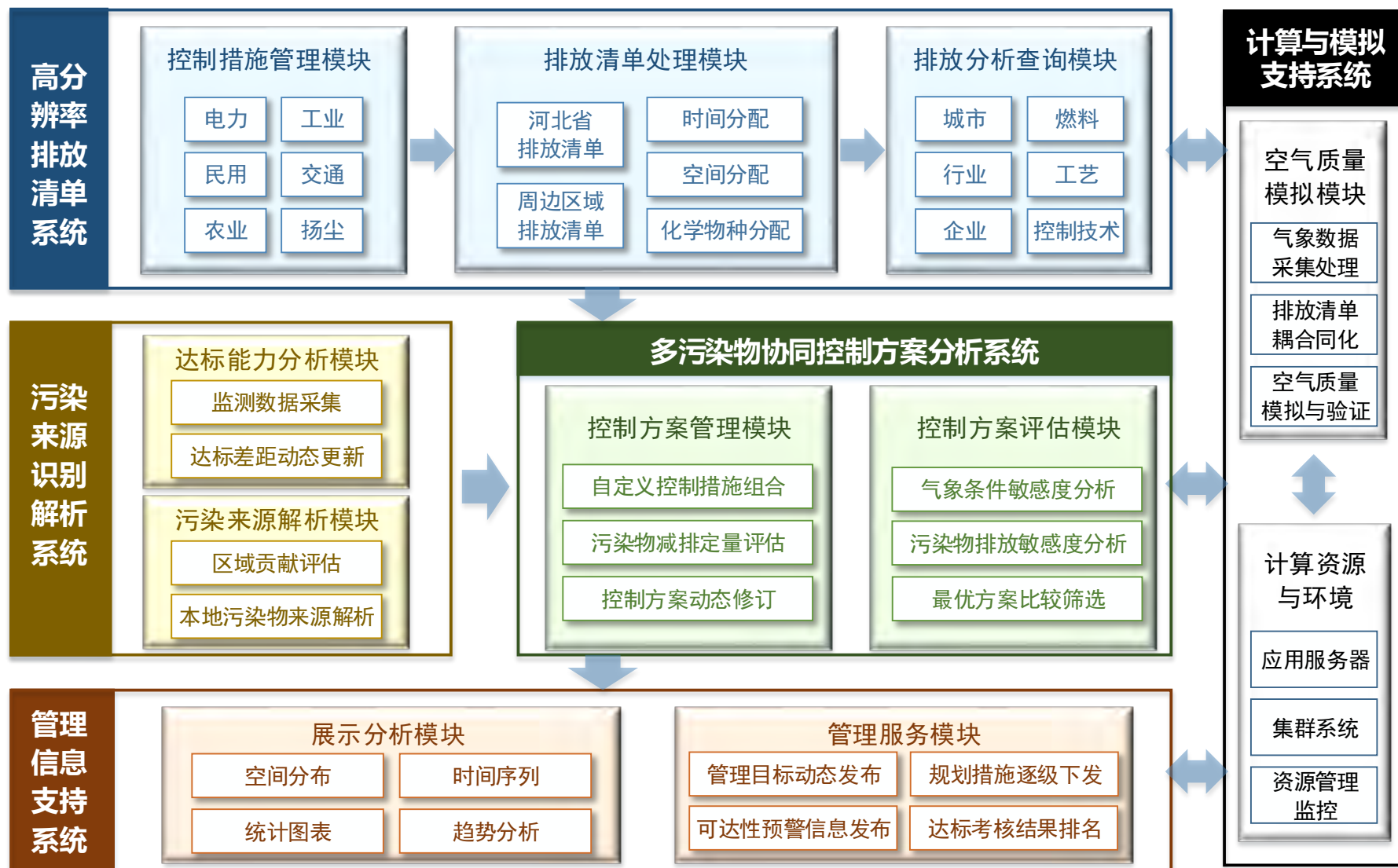
方案实施效果定量评估能力

- 总量减排：多污染物排放特征分析与减排量核算
- 沙盘推演：控制方案效果预评估与后评估
- 方案优选：比较控制效果，筛选最佳方案

系统建设内容

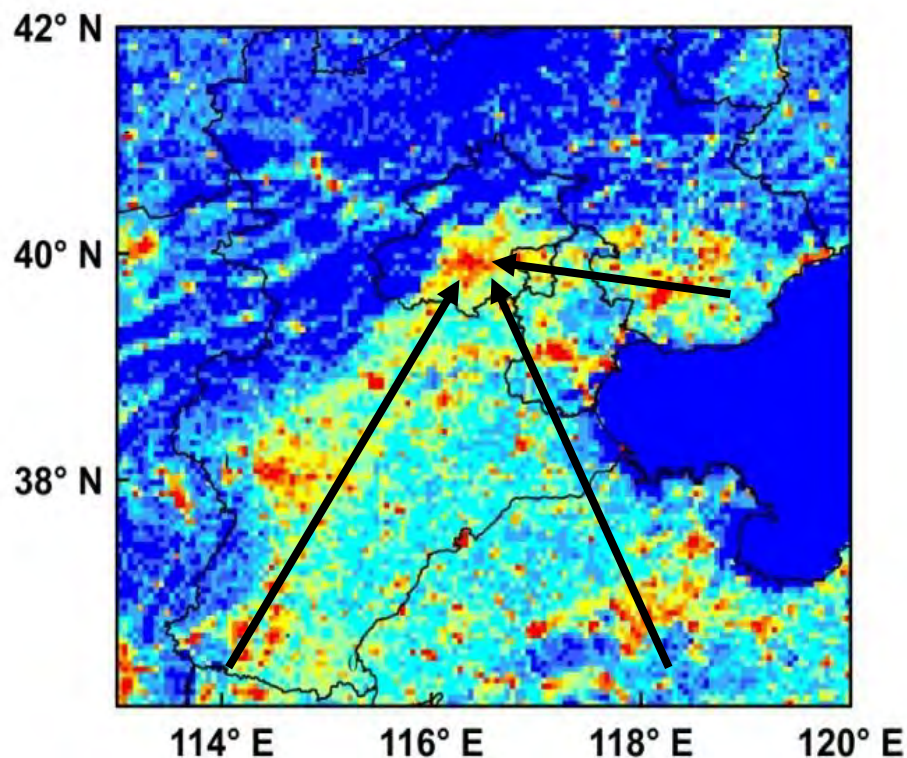
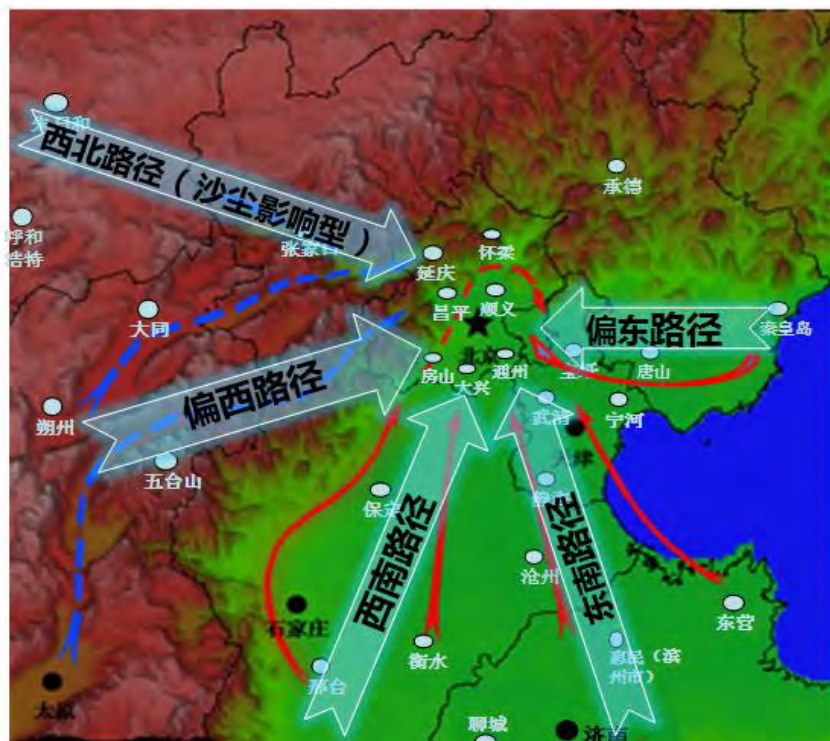


河北省大气污染治理动态评估与管理技术平台



案例1：来源识别与源解析

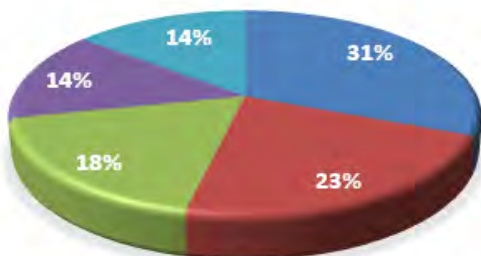
通过对污染物输送进行分析，发现有5条输送主要污染物输送路径影响北京。



环首都圈特殊地形导致污染物累积和输送的示意图

2014-2015公布的部分城市PM_{2.5}源解析结果

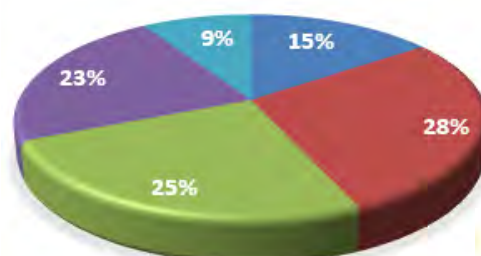
北京



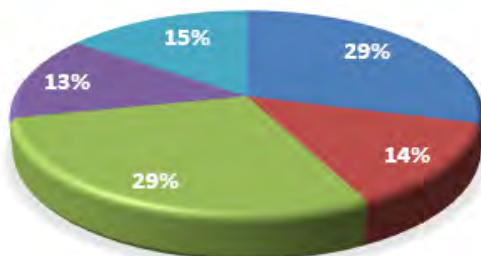
天津



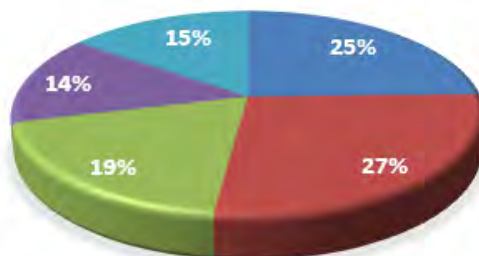
石家庄



上海



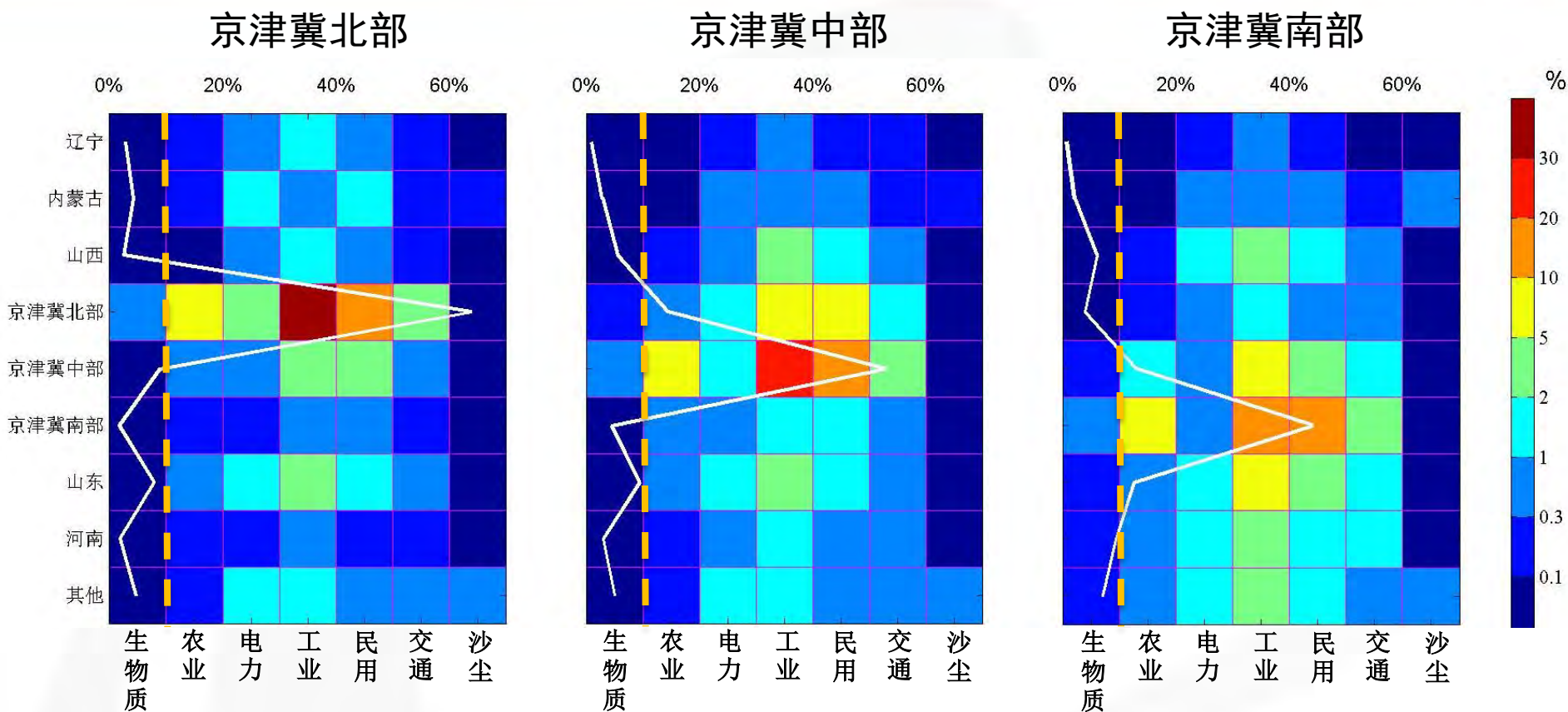
南京



杭州



2014年京津冀区域PM_{2.5}源解析

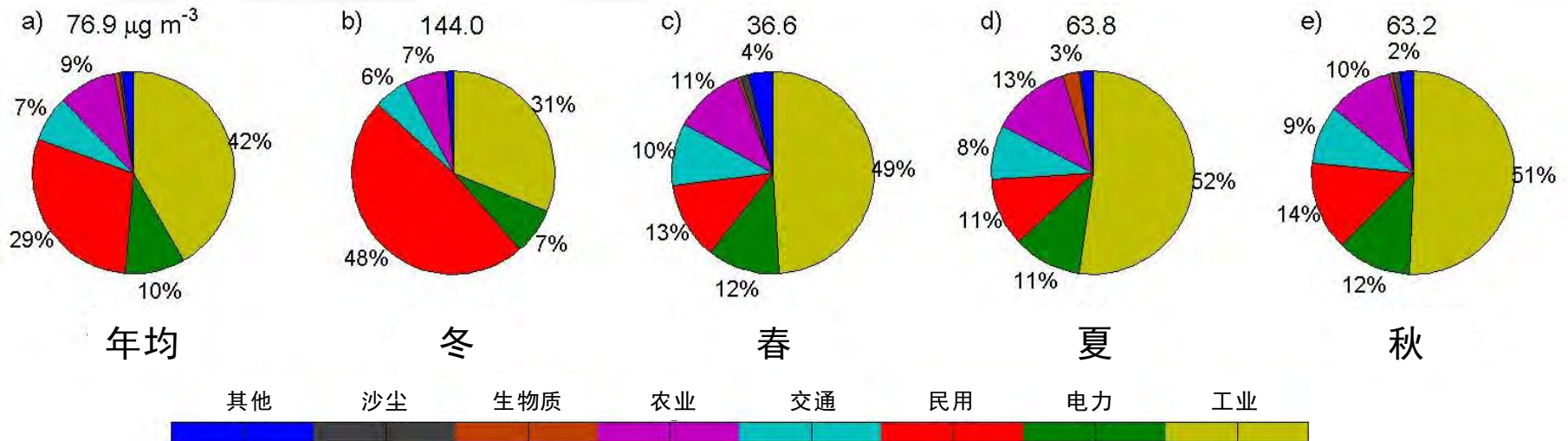
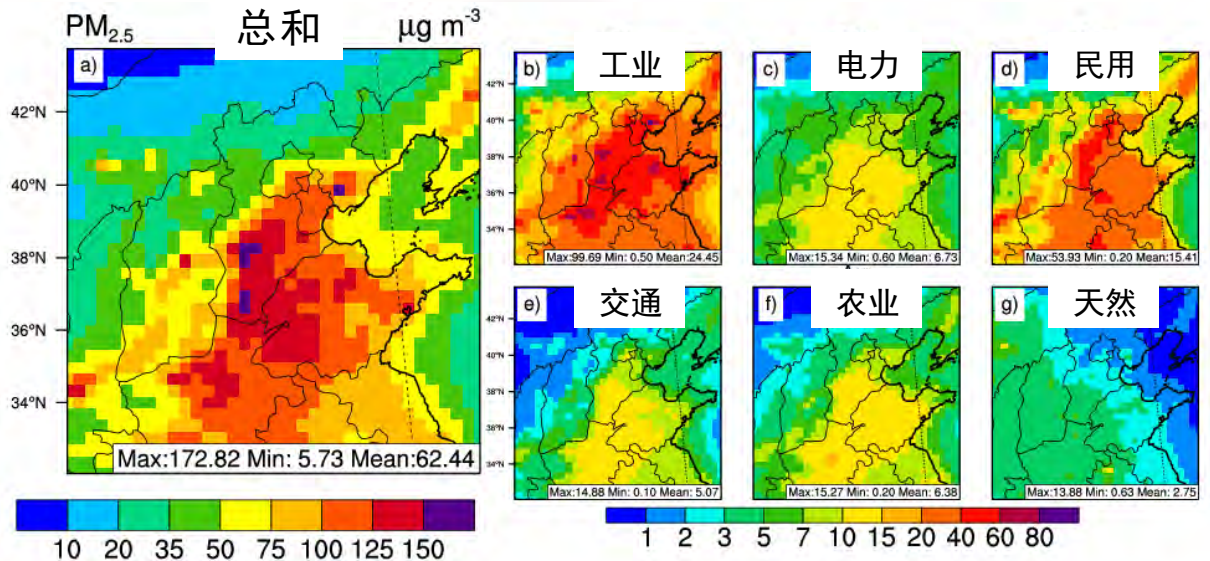


白线代表区域贡献，京津冀北部的自身贡献64%，其他区域贡献均不超过10%；京津冀中部自身贡献53%，另外还明显受到北部的传输影响；而京津冀南部自身贡献只有45%，受中部和山东的影响明显。彩色方格代表各地区的分部门贡献。本地和临近地区的贡献，均主要来自工业和民用部门。



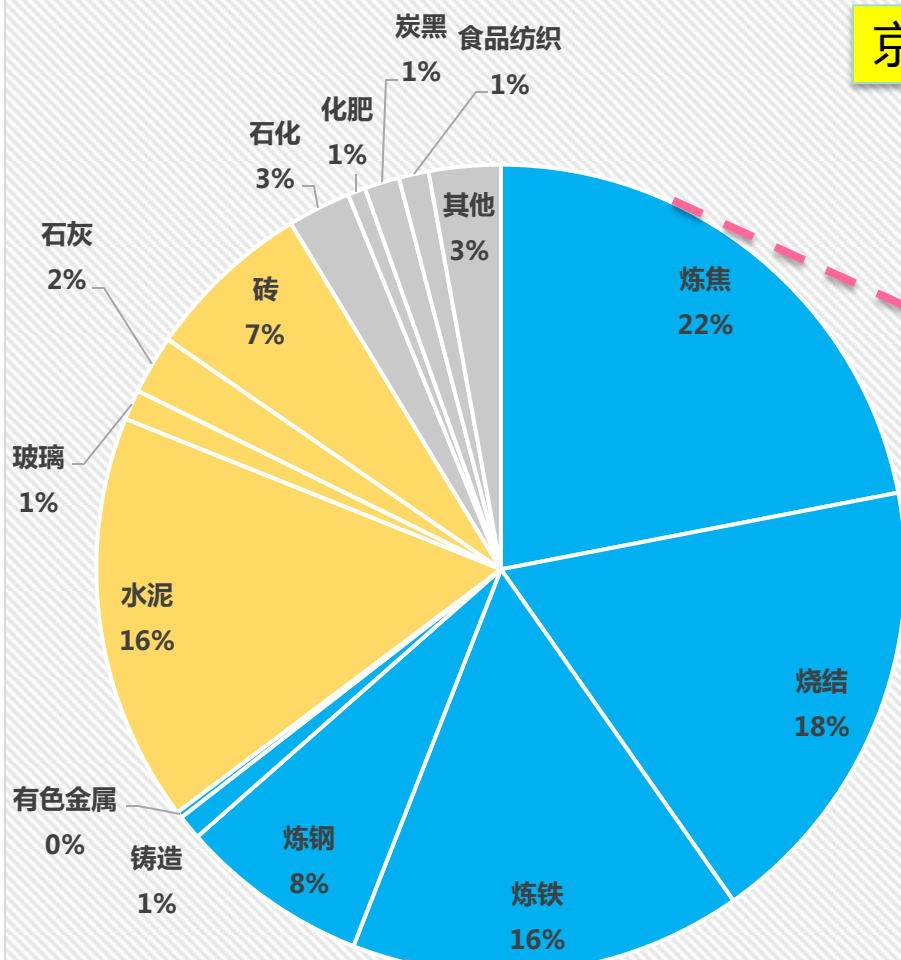
京津冀区域PM_{2.5}污染部门分担及季节变化

京津冀地区PM_{2.5}主要来自工业和民用两个部门。其中冬季由民用源主导；而其他季节由工业源主导。



部门细分—工业生产

京津冀中部



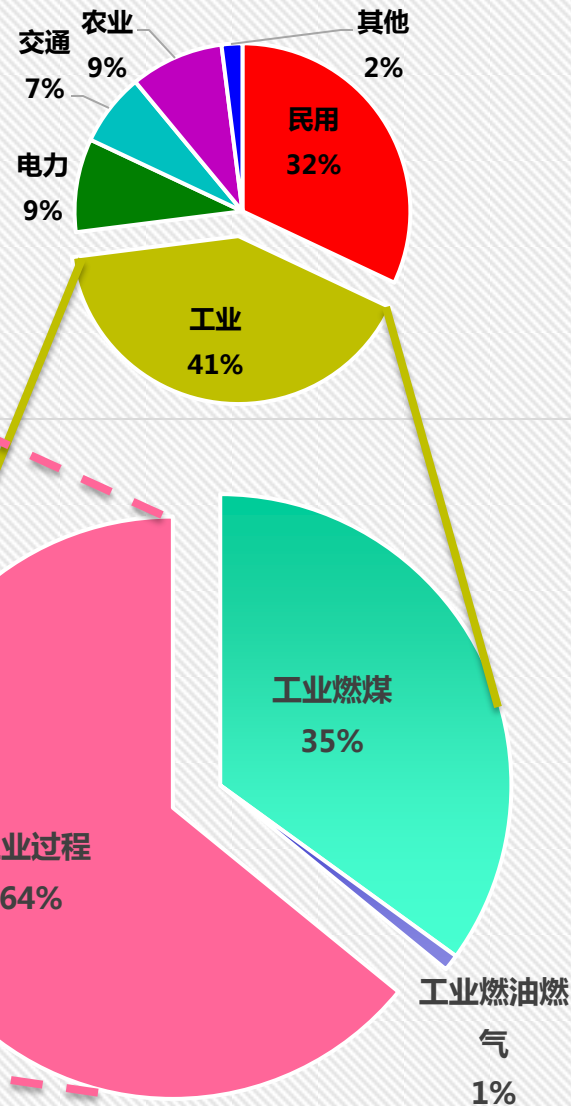
化工 9%



建材 27%



炼钢冶金 65%



案例2：治理方案的制定

“大气十条”政策措施总结

Control measures in the Action Plan

京津冀地区政策文件

Policy documents for BTH

- 国务院《大气污染防治行动计划》
The Air Pollution Prevention and Control Action Plan
- 《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》
The Detailed Rules for the Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas
- 《北京市2013-2017年清洁空气行动计划》
The Action Plan of Beijing for Clean Air from 2013 to 2017
- 《天津市清新空气行动方案》
The Action Plan of Tianjin for Clean Air
- 《河北省大气污染防治行动计划实施方案》
The Plan of Hebei Province for the Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan

结构调整 措施

Structure
adjustment
measures

- 源头减排，如
- 煤炭总量控制
- 清洁能源替代
- 淘汰落后产能
- 限制机动车等

末端控制 措施

End-of-pipe
control
measures

- 指末端控制技术
的应用与更新，
如实施脱硫、脱
硝，进行除尘升
级改造等。

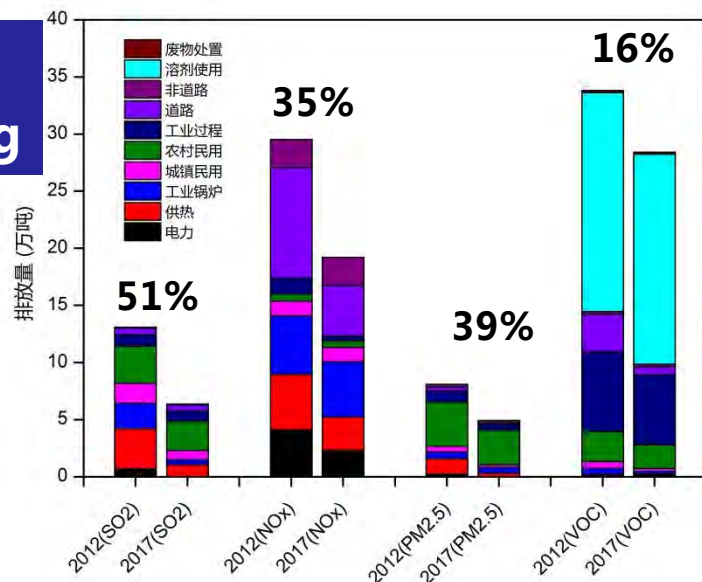
重点分析可
明确量化的
重要措施

Focus on
Quantifiable
measures

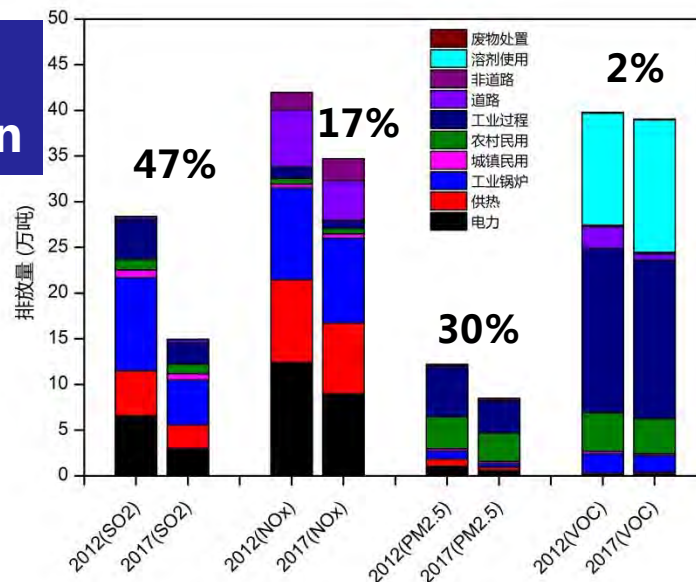
2017年主要污染物排放下降幅度

Emission reduction rates in 2017

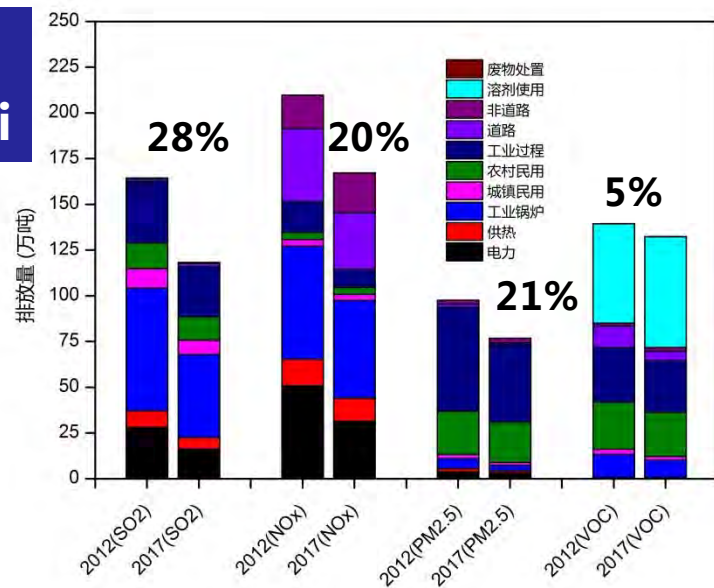
北京 Beijing



天津 Tianjin



河北 Hebei



- 河北污染物排放量削减率总体低于京津。Emissions reduction rates in Hebei are lower than Beijing and Tianjin.
- VOCs排放量削减缺乏政策的有效支撑。More stringent policies should be implemented on controlling VOCs emissions.
- 在SO₂和NO_x大幅削减的情况下，NH₃排放量未削减，造成区域NH₃进一步过剩。NH₃ will be further excess due to reductions of SO₂ and NO_x emissions.



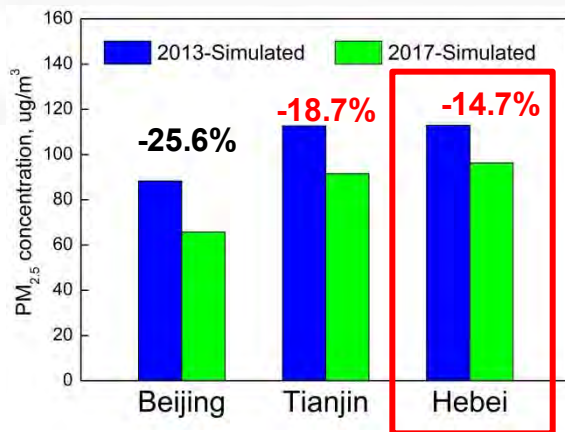
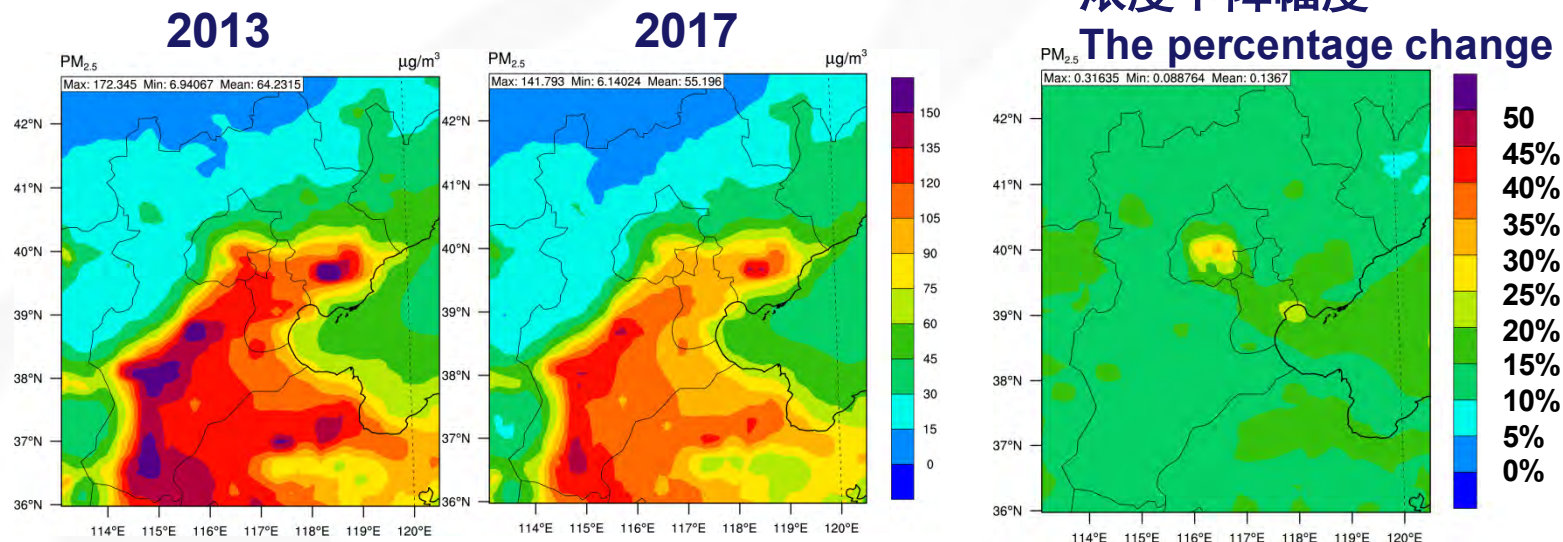
效果预评估：河北、天津难以实现改善目标

Pre-evaluation: hard for Tianjin and Hebei to achieve the goals

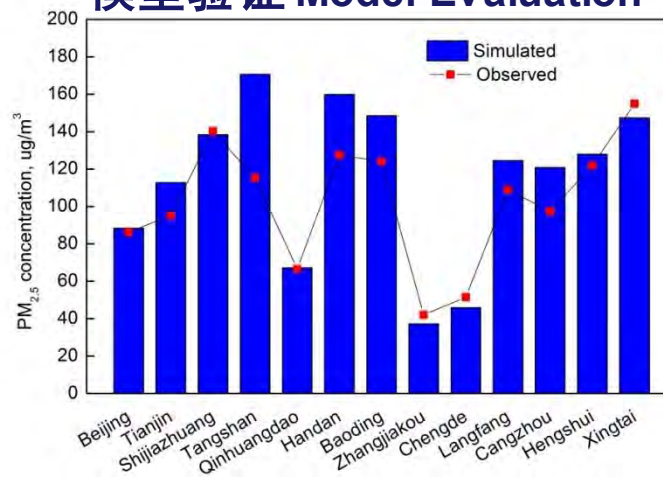
京津冀地区PM_{2.5}浓度变化 PM_{2.5} concentration changes in BTH

浓度下降幅度

The percentage change



模型验证 Model Evaluation

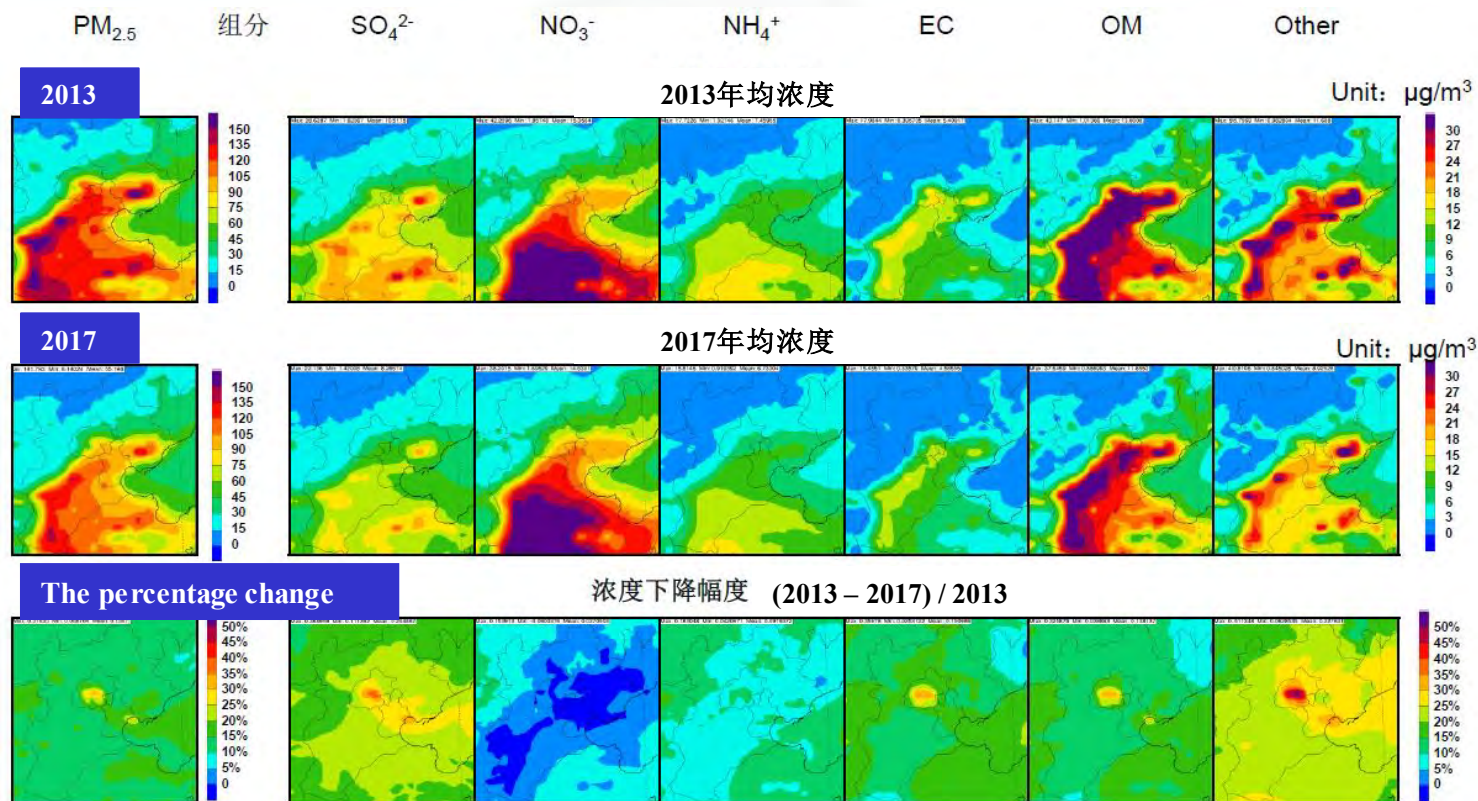


河北和天津无法达到预期效果的原因

Reasons for not achieving the reduction targets in Hebei and Tianjin

京津冀地区
PM_{2.5}浓度变化

PM_{2.5}
concentration
changes in BTH



- 华北地区NH₃过剩，大幅减少SO₂会促使冬季NO_x向硝酸盐转化。Following the SO₂ emission reductions, nitrate concentrations increase under NH₃-rich condition in winter.
- 在NH₃过剩条件下，二次无机离子对大气氧化性更为敏感。因华北属于VOC控制区，减少NO_x排放会增加臭氧浓度，增强大气氧化性，从而促进二次无机离子生成。As BTH is located in NH₃-rich conditions and VOC-limited regime, the NO_x emission reductions result in an elevated level of atmospheric oxidation capacity, then enhancing the SIA formation.



河北省五十条方案差距剖析

- ① 重点行业提标改造仍有减排空间。
- ② 对工业无组织尘减排力度不足。
- ③ VOCs减排缺乏明确定量措施。
- ④ 未能充分利用应急减排的削峰作用。
- ⑤ 计划2017年底完成的治理工程对2017年PM_{2.5}浓度改善没有效果。

深入治理方案制定

强化已有措施

重点工业源减排

- 钢铁行业：炼焦烧结炼钢炼铁全流程达标治理
- 火电行业：脱硫脱硝除尘技术改造
- 水泥行业：窑炉脱硝除尘达标治理
- 玻璃行业：窑炉脱硫脱硝达标治理
- 焦化行业：除尘、VOCs达标治理
- 燃煤锅炉：淘汰&脱硫除尘技术改造
- 石化行业：VOCs达标治理
- 工业涂装：汽车制造、金属设备制造等行业综合整治
- 其他行业：医药化工、有机化工、合成材料等VOCs治理

新增量化
减排措施

面源整治

- 扬尘源：道路、施工、堆场全面综合整治

移动源治理

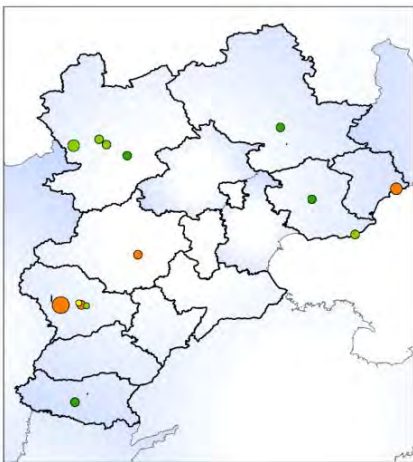
- 机动车：实施国五标准；淘汰黄标车

能源调整

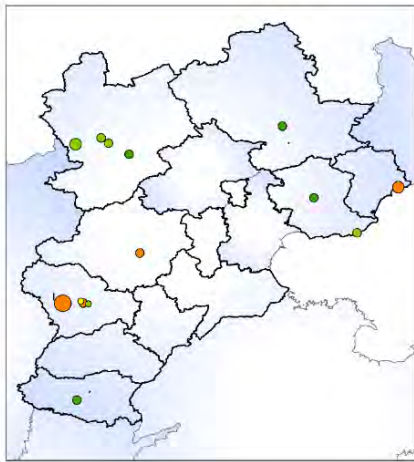
- 提高天然气比例，促进煤炭清洁利用

通过强化措施挖掘新增减排量

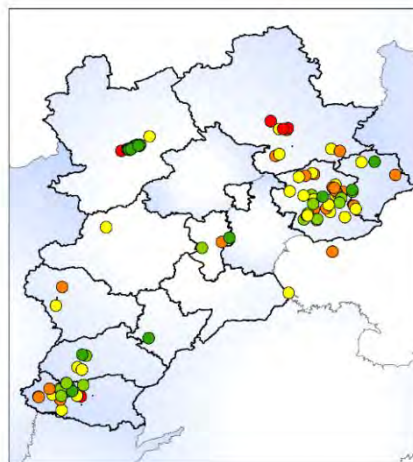
电厂SO₂：2.3万吨



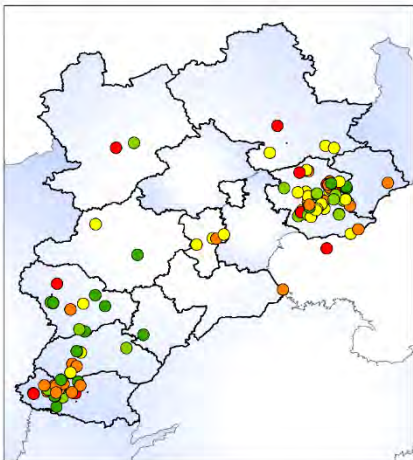
电厂NO_x：2.8万吨



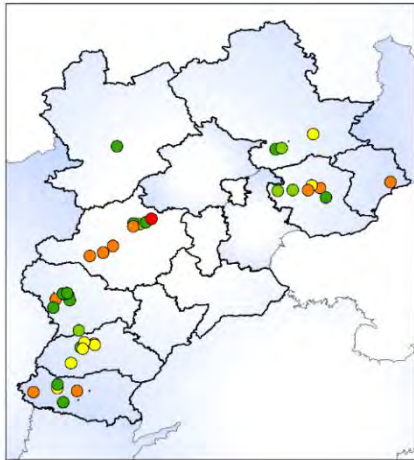
钢铁SO₂：11.7万吨



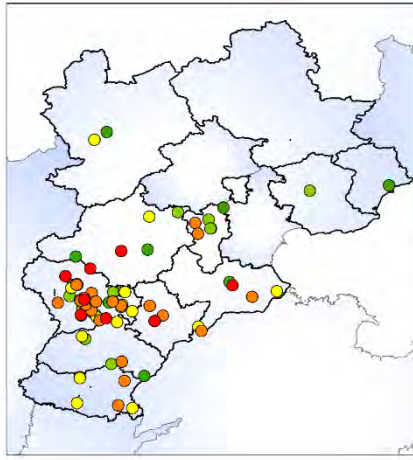
钢铁PM_{2.5}：5.9万吨



水泥NO_x：1.7万吨

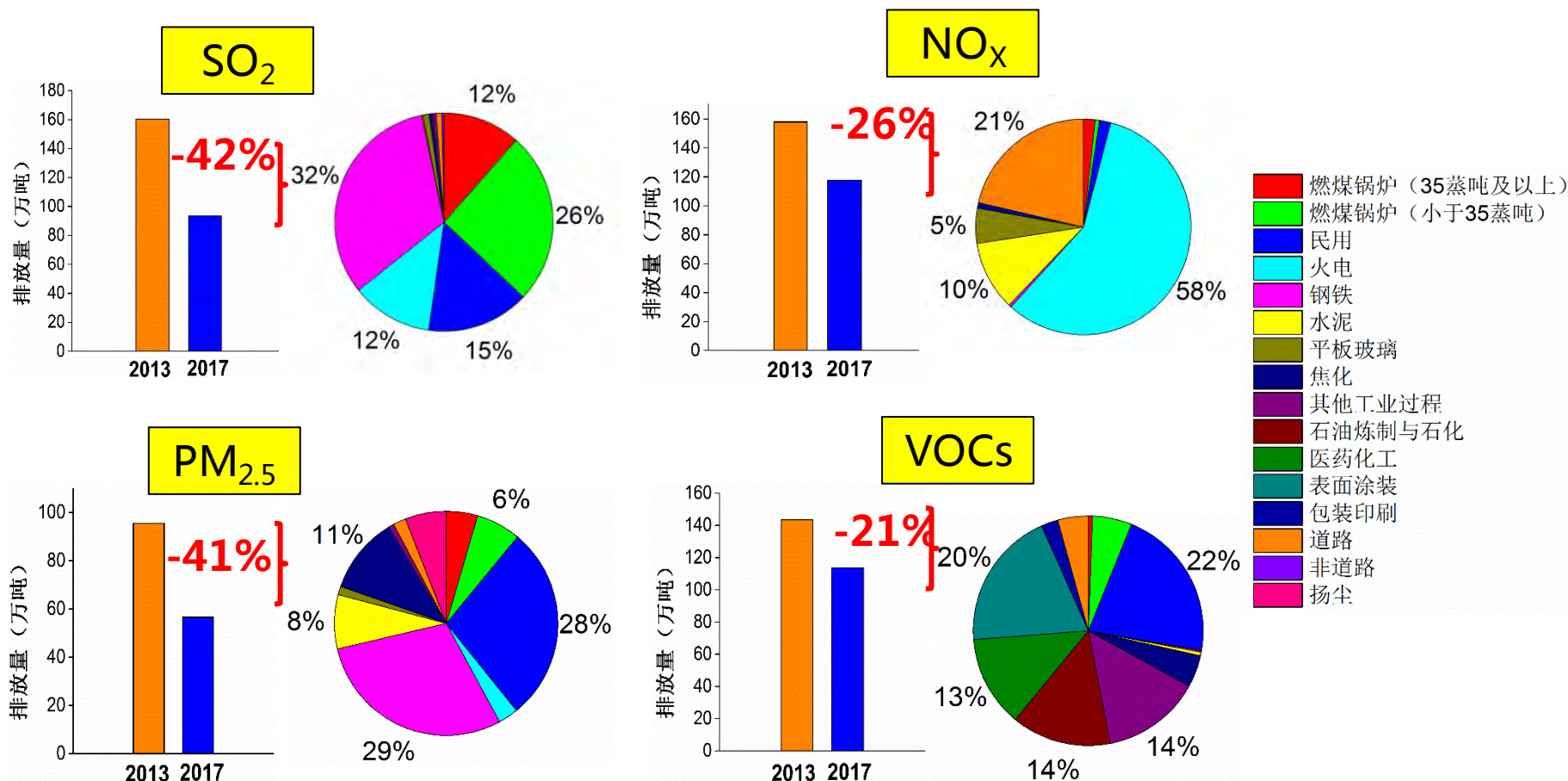


医药VOC：3.8万吨

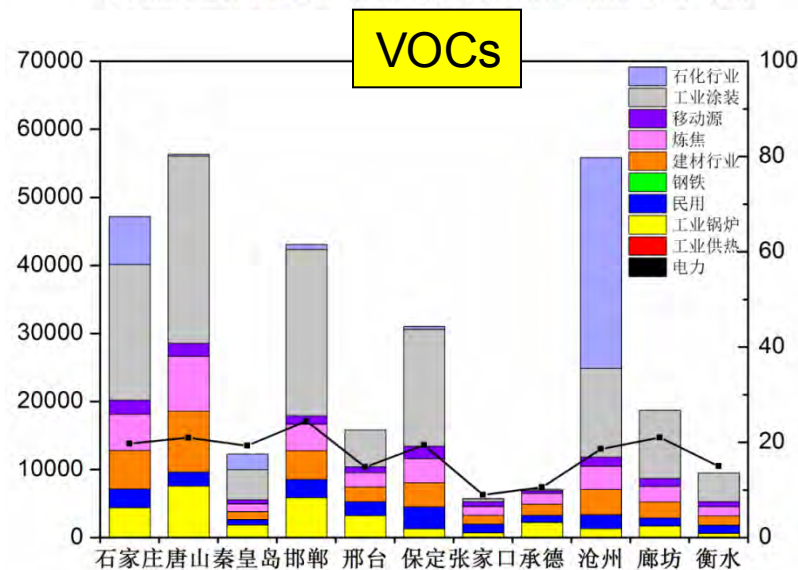
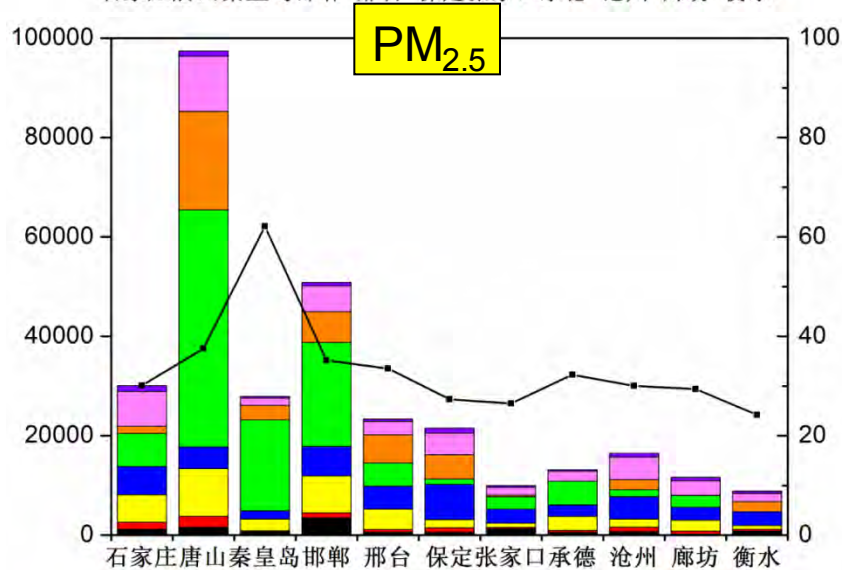
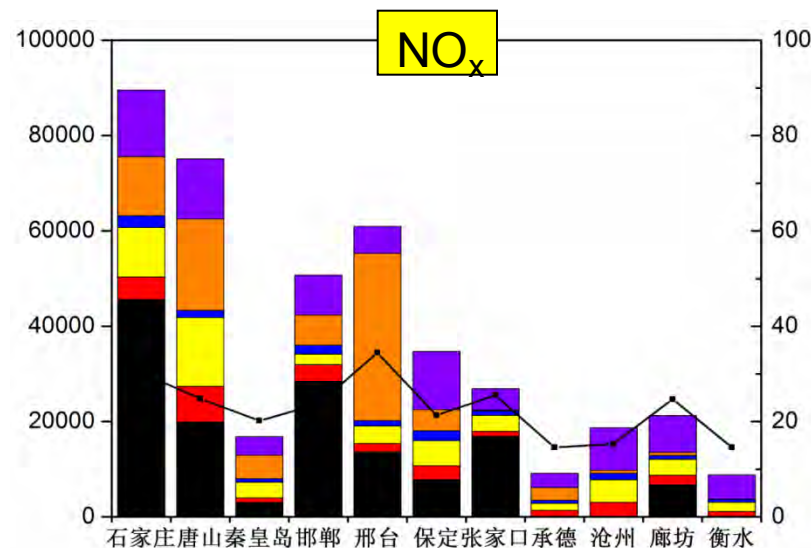
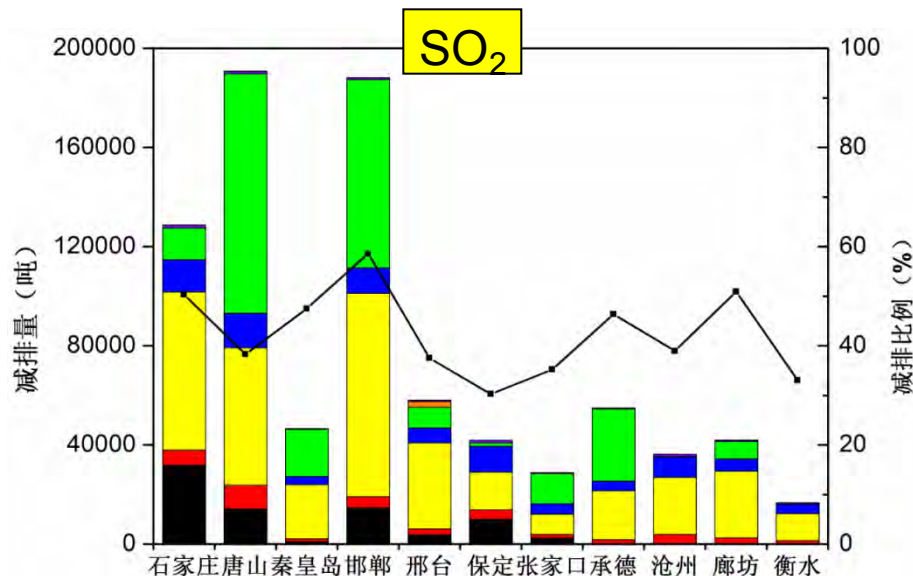


河北省深入治理方案减排量测算

与河北省大气50条相比，采用深入治理方案新增SO₂、NO_x、VOCs和PM_{2.5}减排量分别为16.6万吨、4.7万吨、22.3万吨和12.4万吨。2017年SO₂、NO_x、VOCs和PM_{2.5}总排放量削减比例可分别达到42%、26%、21%和41%。

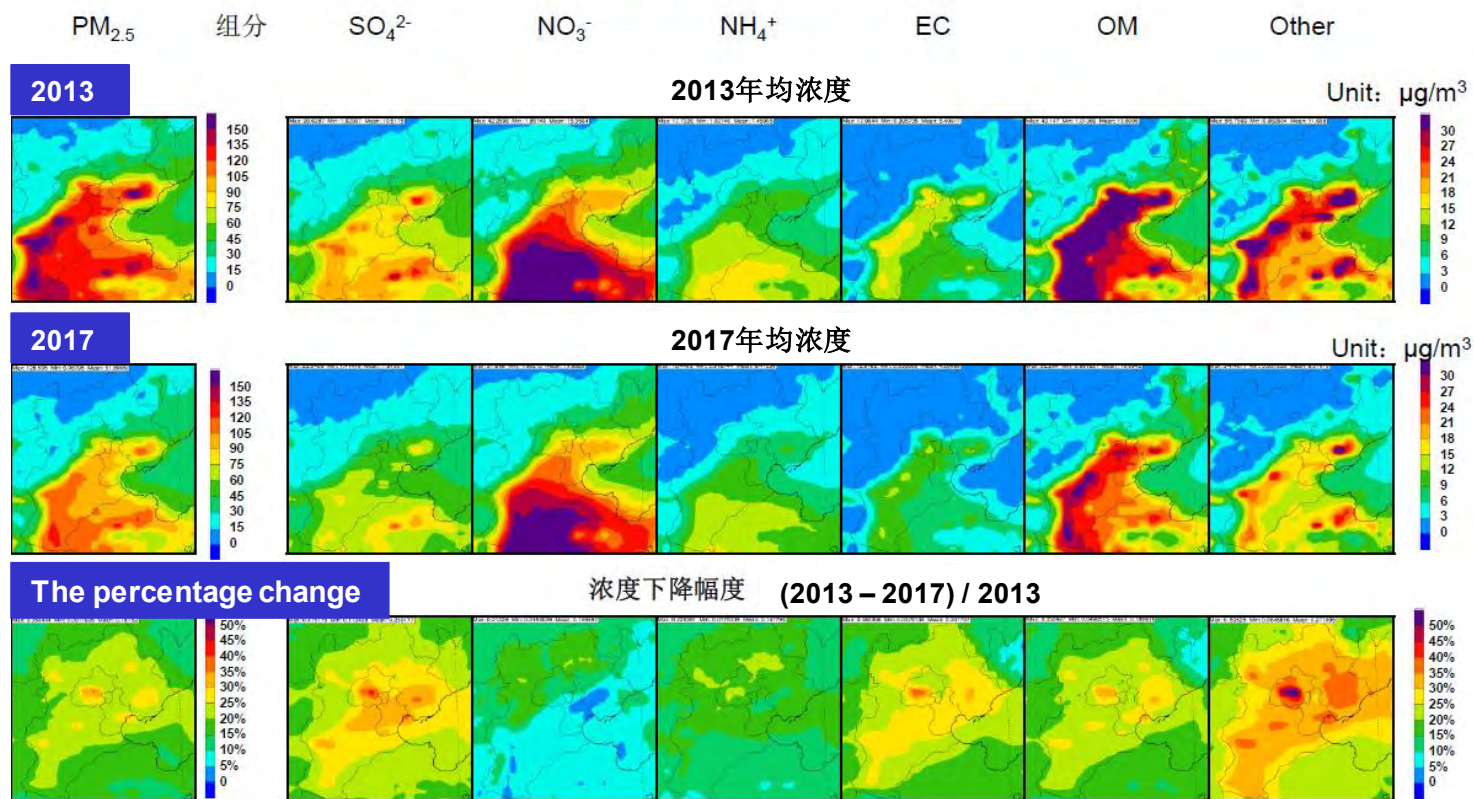


河北省深入治理方案减排量地区分解



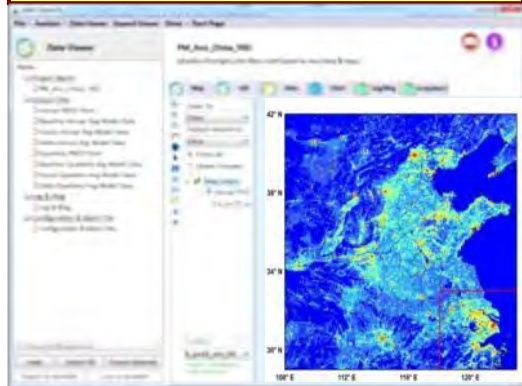
河北省深入治理方案效果分析

京津冀地区PM_{2.5}及其组分浓度变化



- 采用深入治理方案，2017年河北省平均PM_{2.5}浓度可下降**28%**。

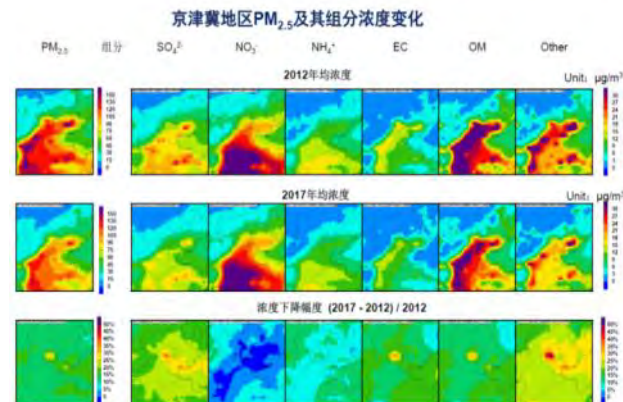
河北省大气污染治理动态评估与管理技术平台



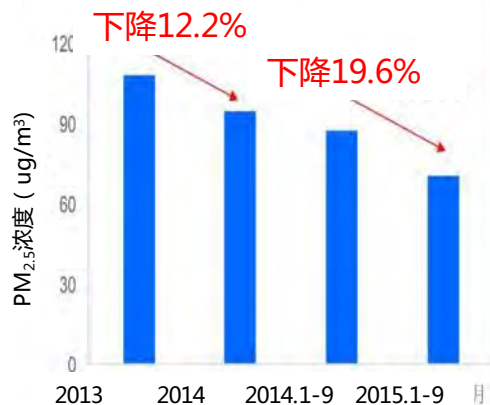
河北大气50条



河北达不到大气十条要求 NO_x和VOC_s等减排幅度不够



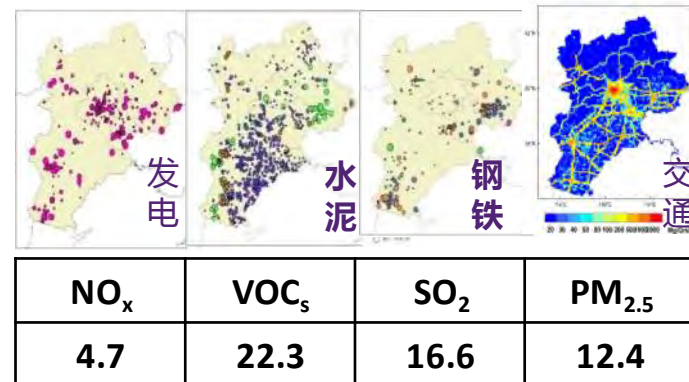
获得更好的改善效果



发布新的政府文件



高分辨率排放清单识别出新的污染源 新增减排潜力55万吨

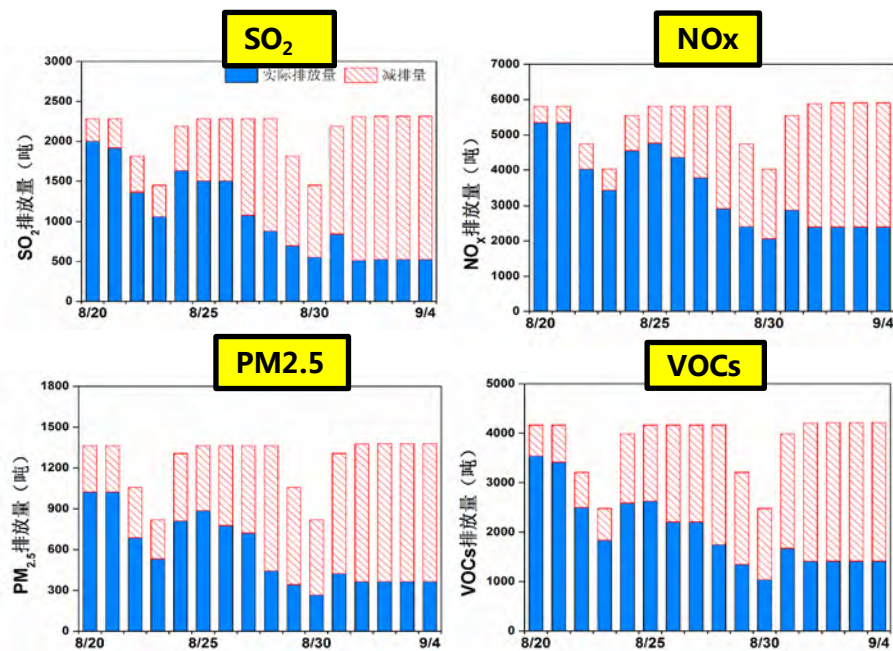


案例3：重大事件应对与快速评估

阅兵保障与红色应急后评估对比

阅兵期间减排幅度达到 **50-70%**

70% SO₂、55% NO_x、71% PM_{2.5}、63% VOCs



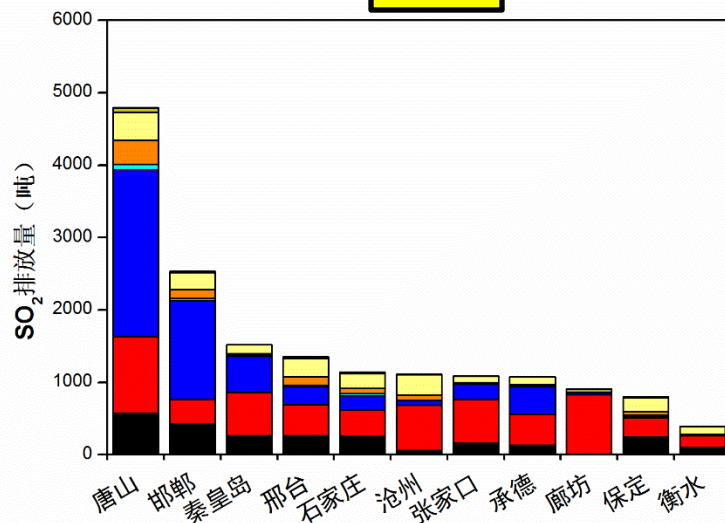
红色应急期间减排幅度达到 **10-30%**

来源：北京工业大学程水源团队

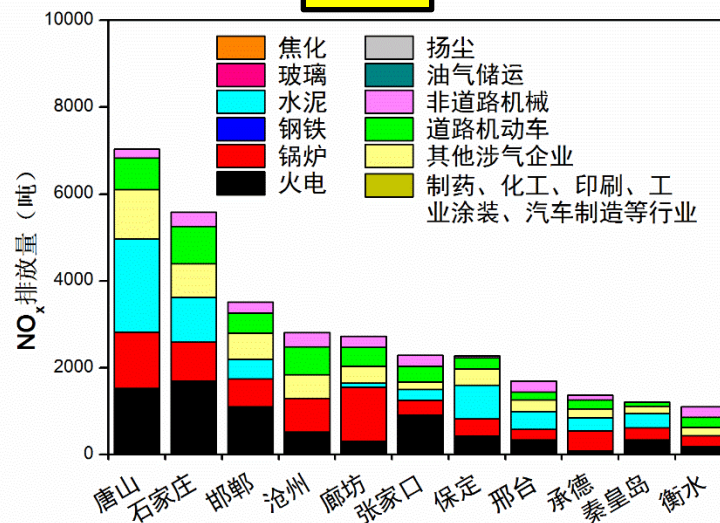
污染物		SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	VOCs
北京	减排量 (吨)	32	125	168	46	159
	减排比例	14%	31%	29%	25%	29%
天津	减排量 (吨)	79	76	65	156	210
	减排比例	12%	7%	20%	24%	16%
河北 (第一次预警)	减排量 (吨)	470-540	1007-1307	416-474	795-919	857-1037
	减排比例	15%-17%	21%-27%	16%-18%	16%-19%	14%-17%
河北 (第二次预警)	减排量 (吨)	631	1312	573	1105	1349
	减排比例	20%	29%	24%	26%	22%

方案减排量行业分布

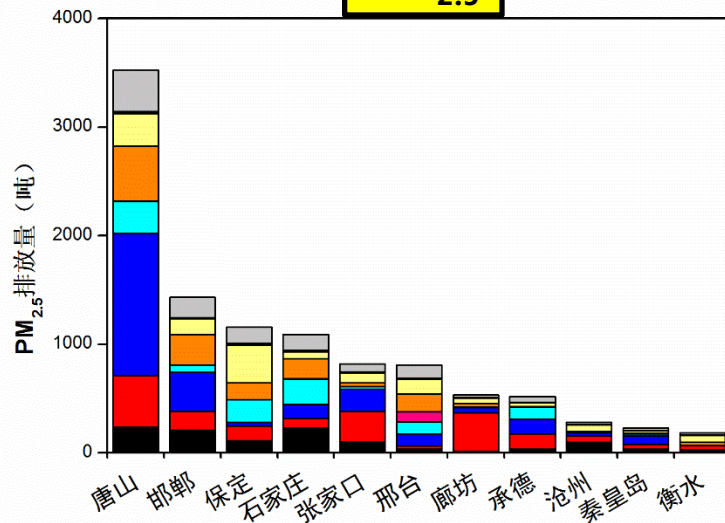
SO₂



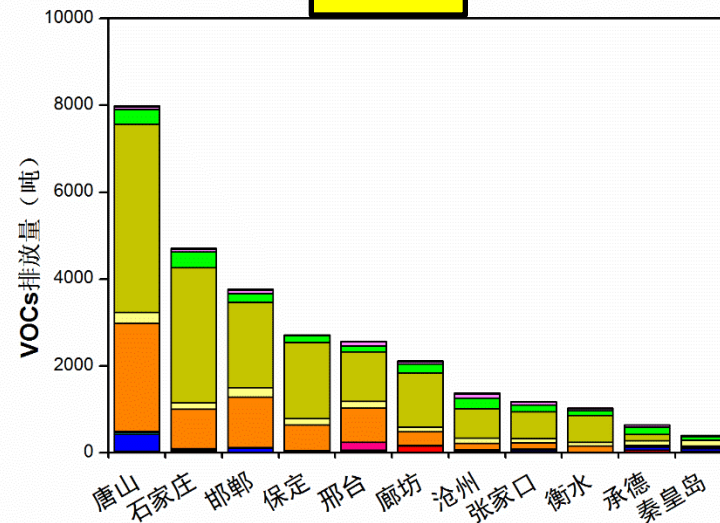
NO_x



PM_{2.5}



VOCs

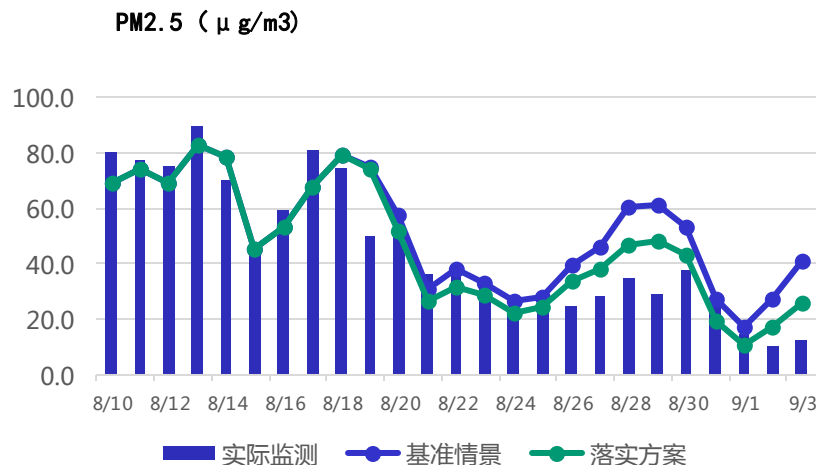


阅兵保障与红色应急后评估对比

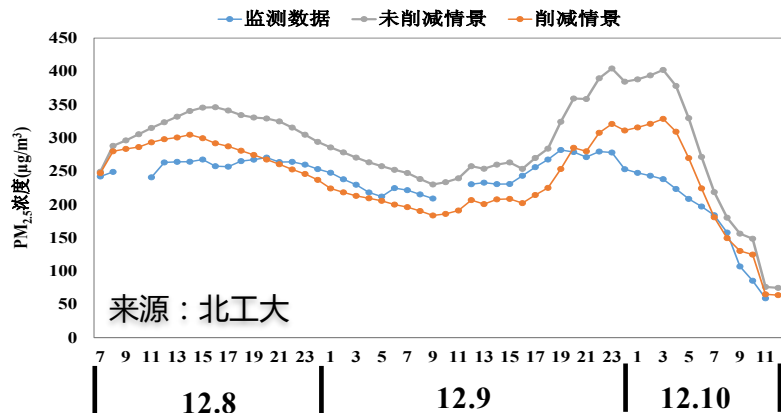
红色应急减排效益明显优于阅兵保障减排

- **阅兵保障**PM_{2.5}平均浓度下降**25-40%**
- **第一次红色应急**PM_{2.5}平均浓度下降**17%**
- **第二次红色应急**PM_{2.5}平均浓度下降**20-25%**
- 阅兵保障期间减排**400吨**，PM_{2.5}下降1 μg/m³
- 红色应急期间减排**40吨**，PM_{2.5}下降1 μg/m³

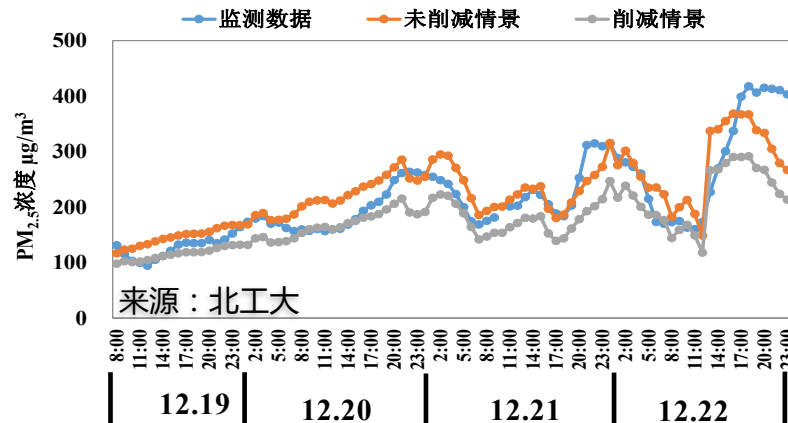
阅兵保障效果后评估



第一次红色应急效果后评估

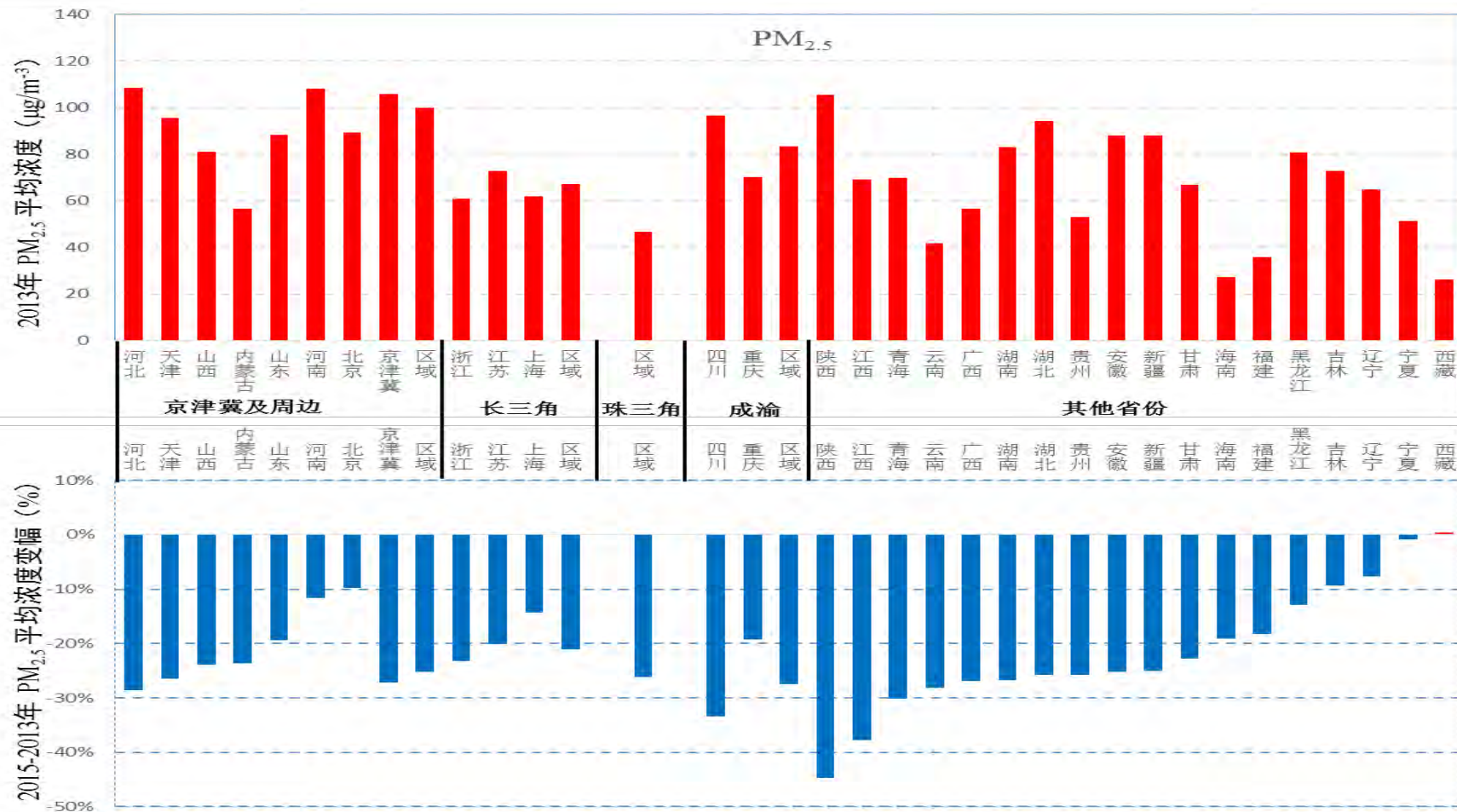


第二次红色应急效果后评估



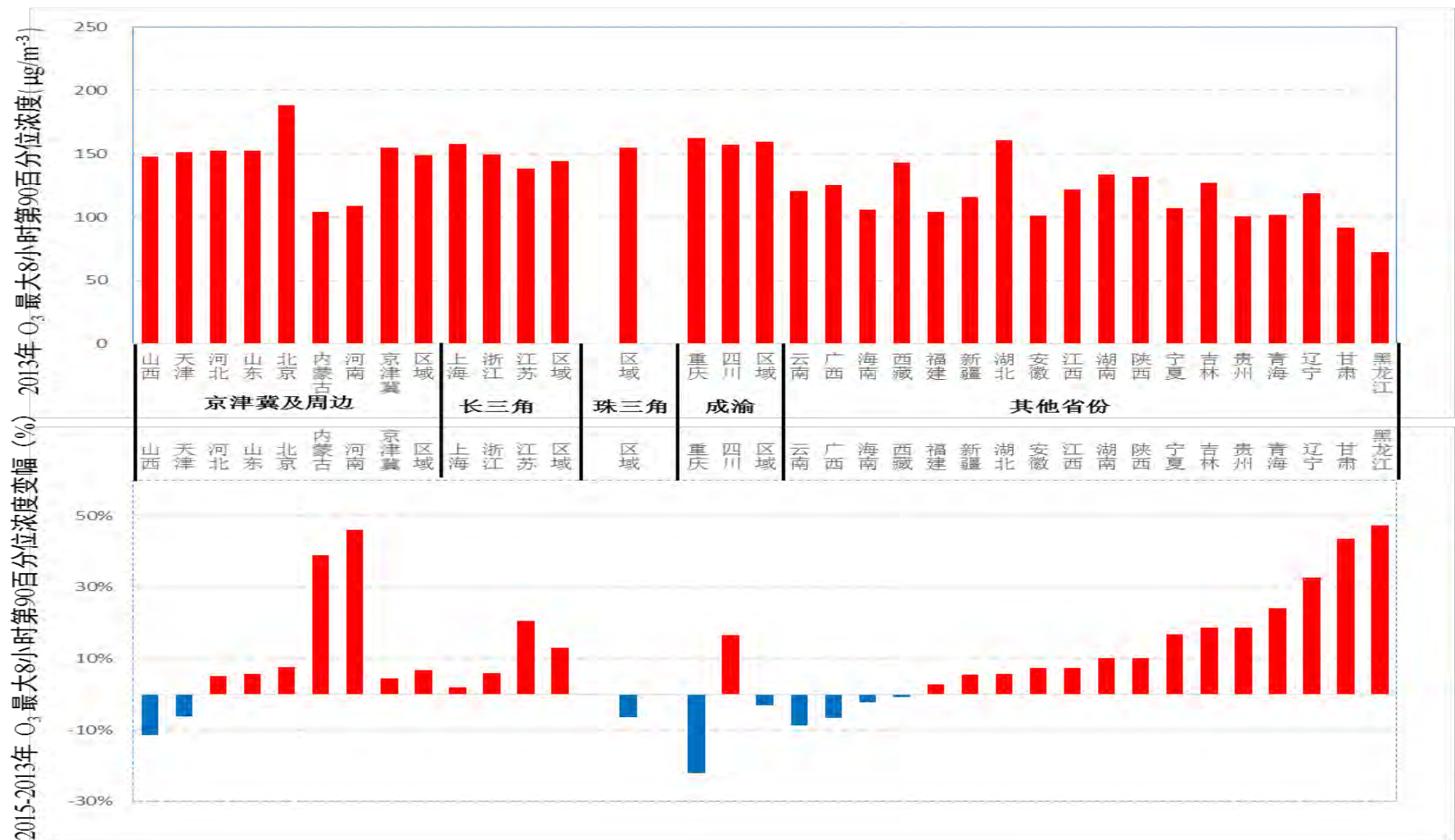
案例4：臭氧问题分析

2013-2015年全国PM_{2.5}污染变化情况



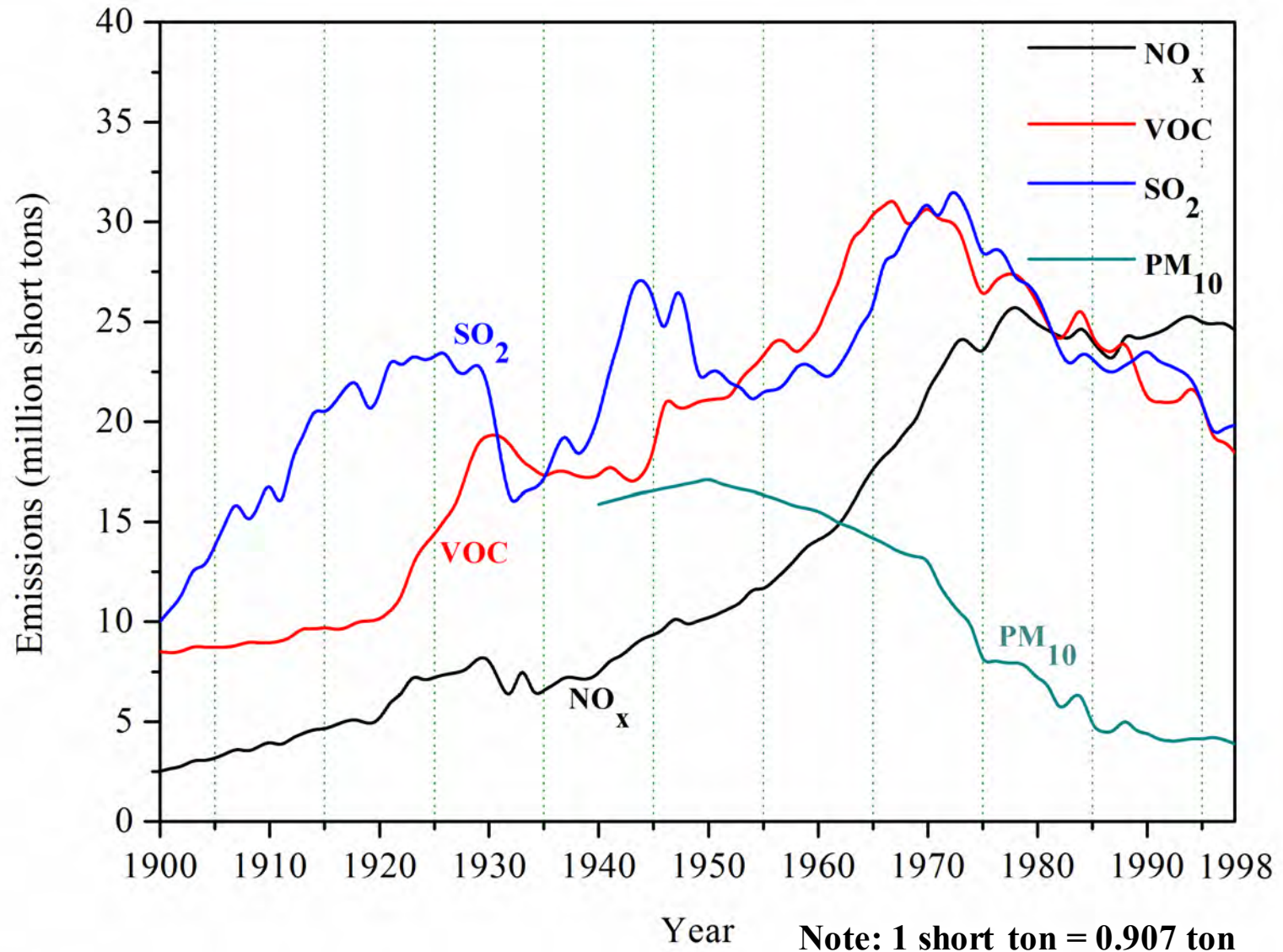
来源：中国工程院评估报告

2013-2015年全国O₃污染变化情况



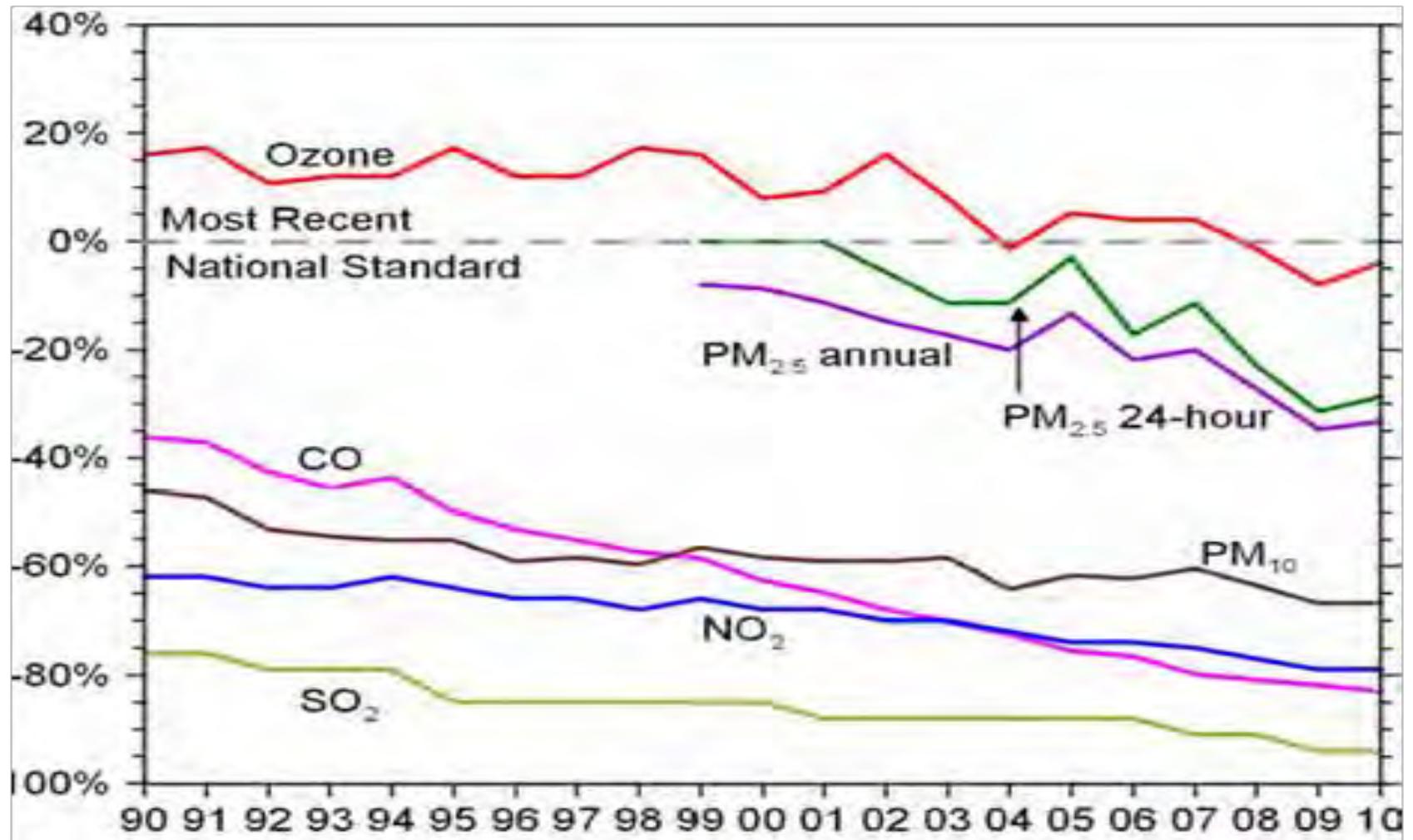
来源：中国工程院评估报告

NO_x, VOC, SO₂ and PM₁₀ Emissions in US : 1900-1998

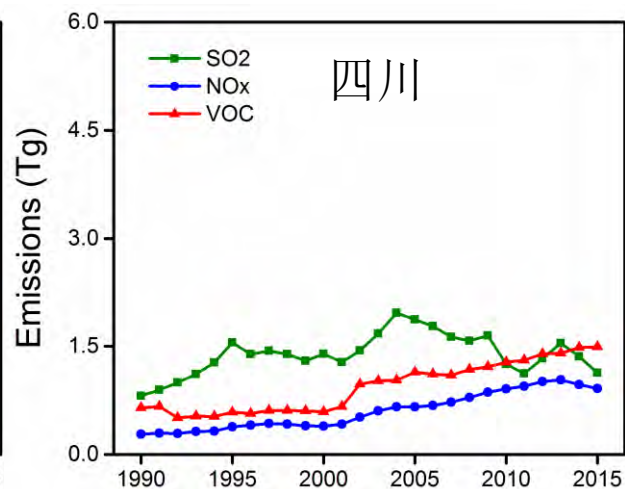
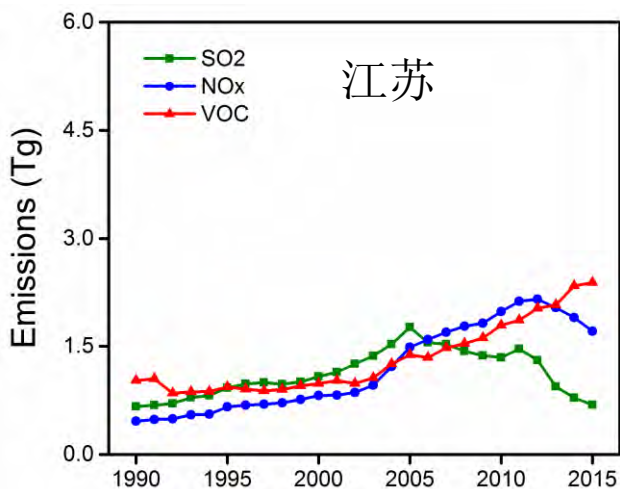
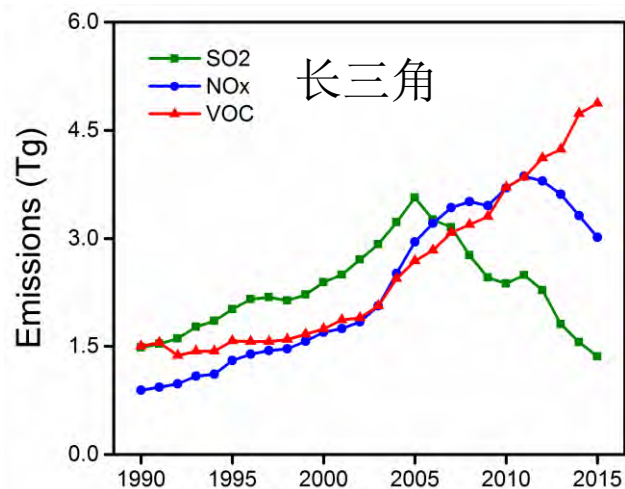
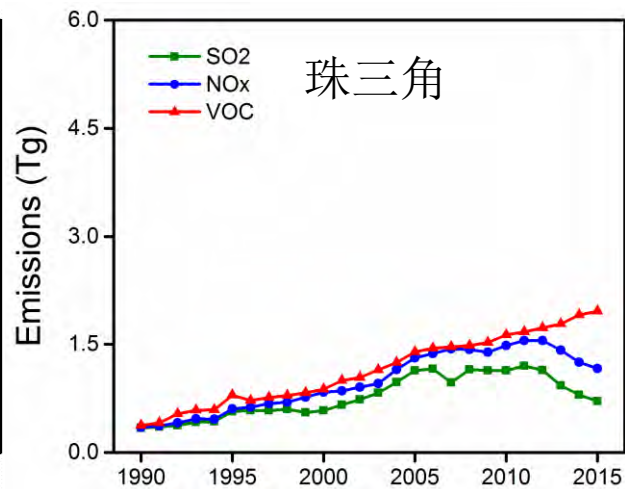
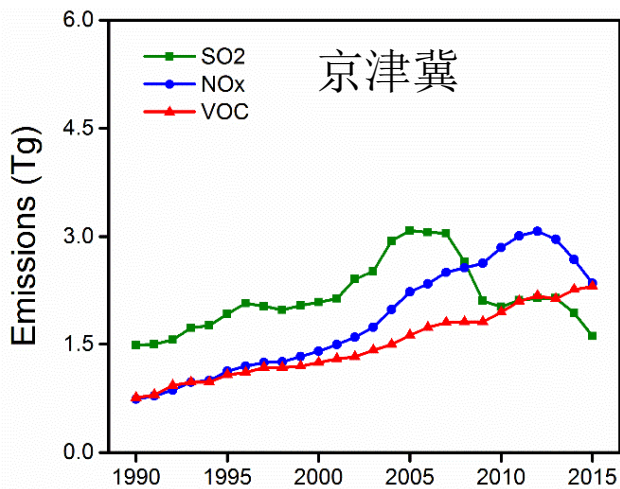
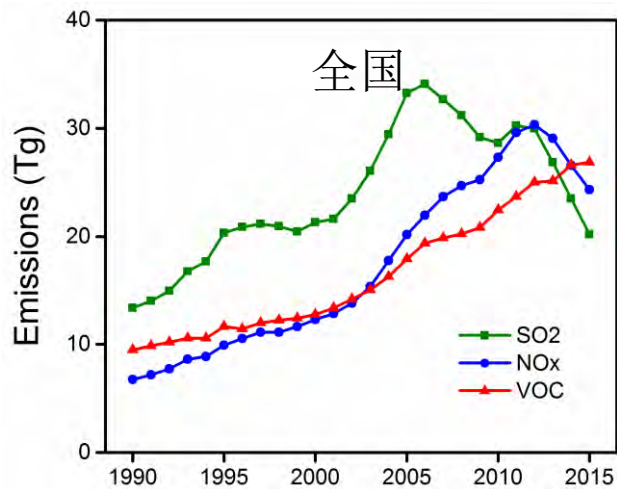


资料来源: NATIONAL AIR POLLUTANT EMISSION TRENDS, 1900-1998, US EPA

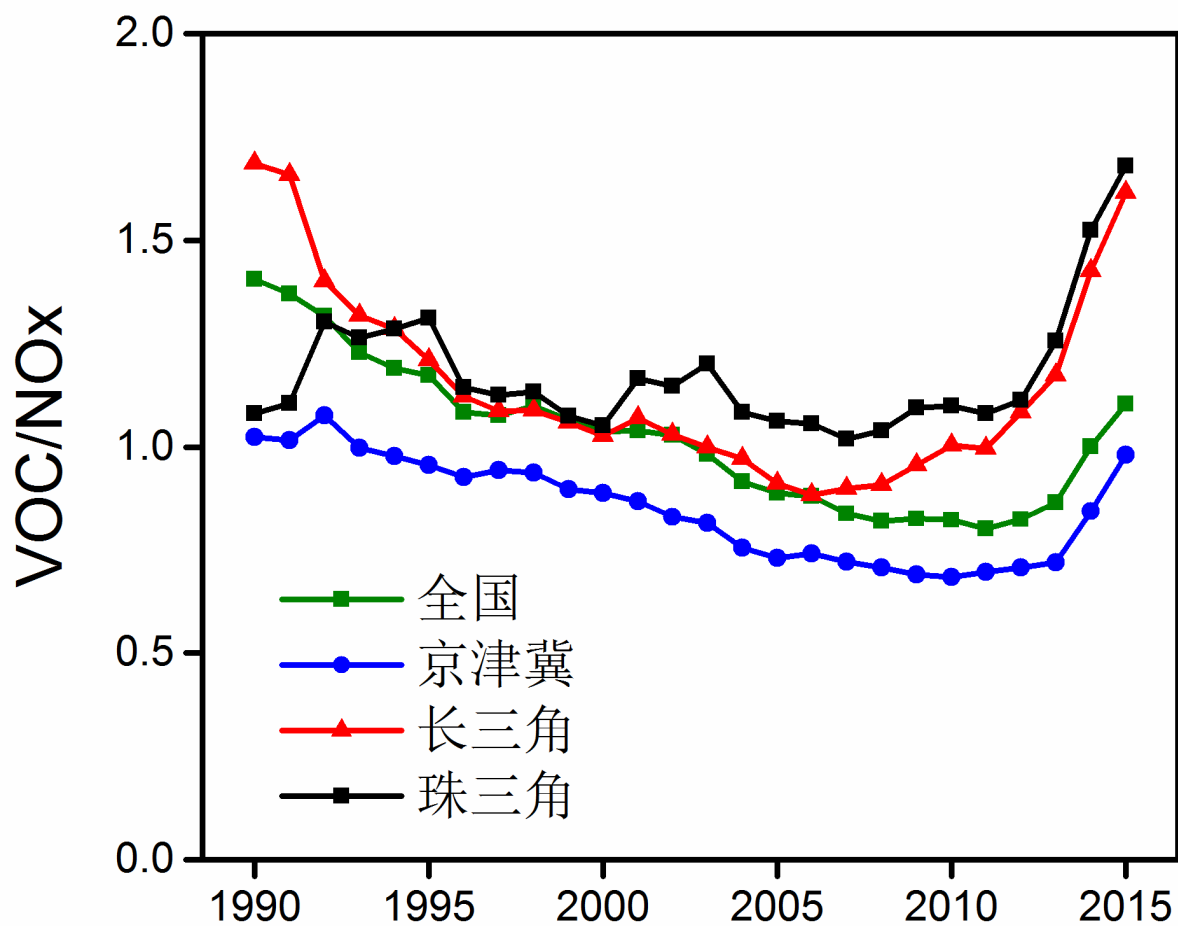
US Air Quality Trends: 1990-2010



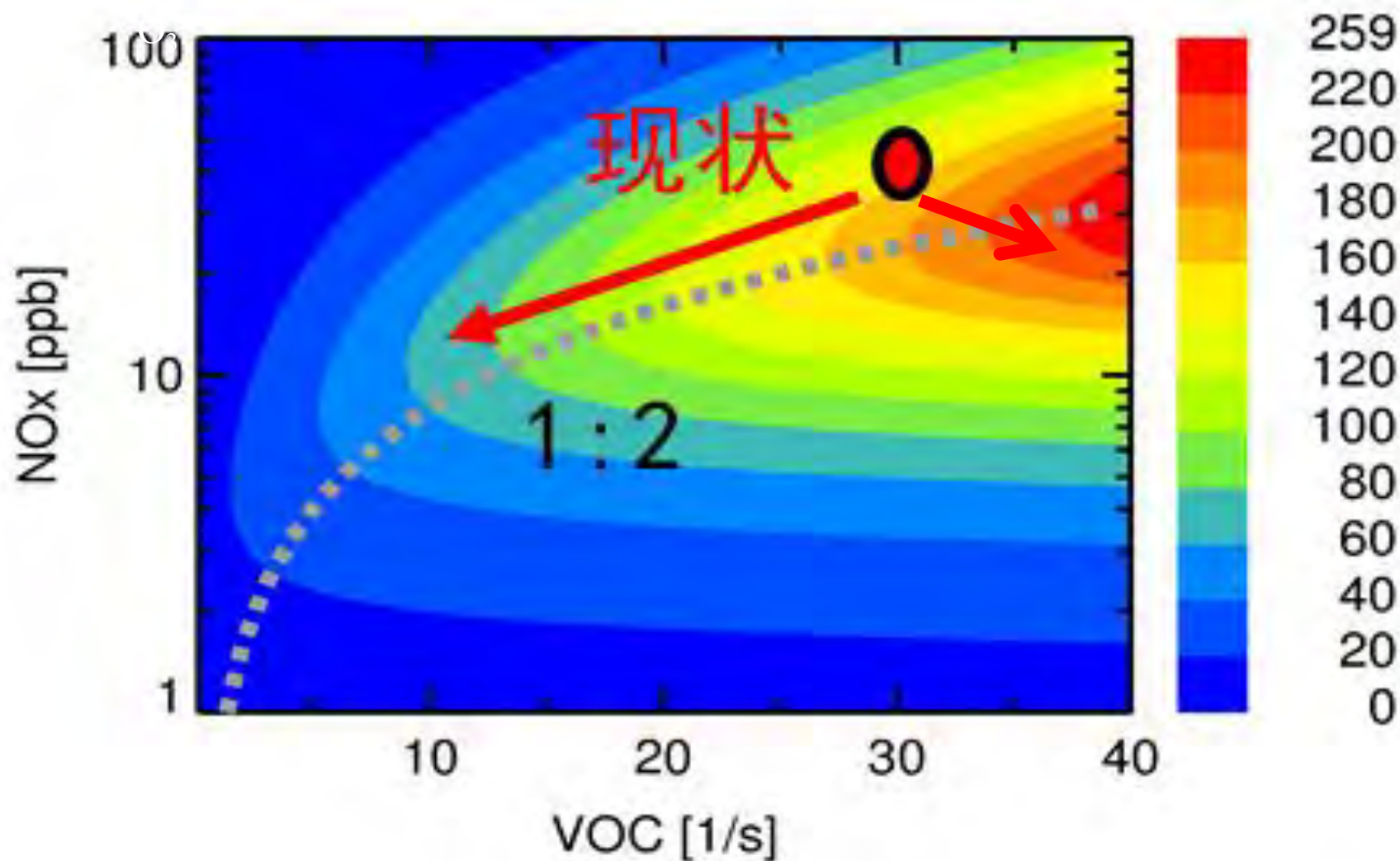
SO₂, NO_x, VOC 排放趋势(1990-2015)



VOC/NO_x 排放比值变化趋势(1990-2015)

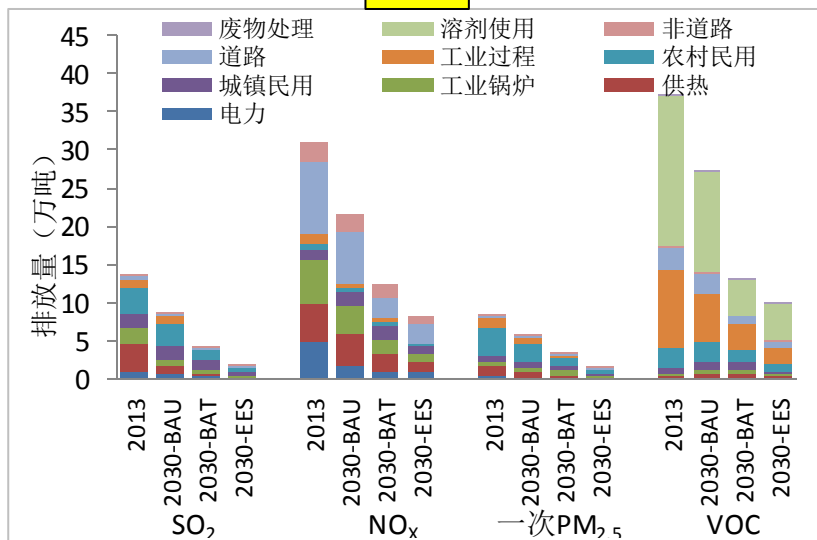


区域VOCs和NO_x协同减排

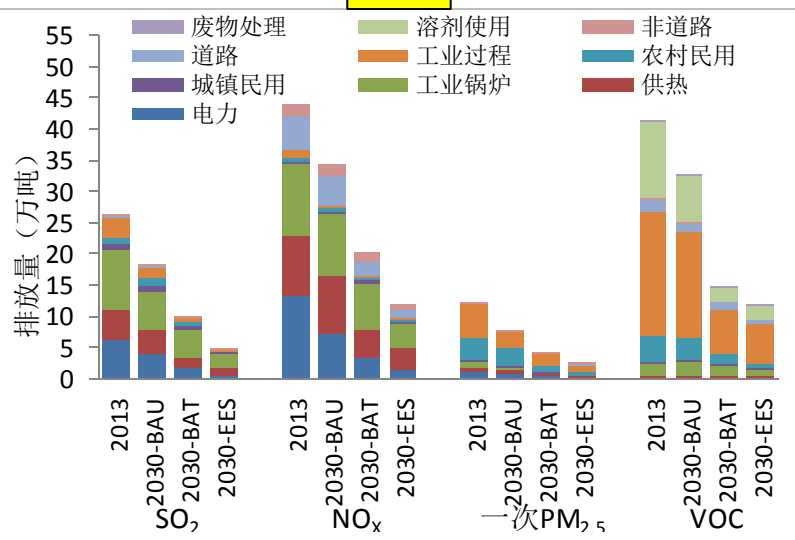


2030年主要污染物排放下降幅度

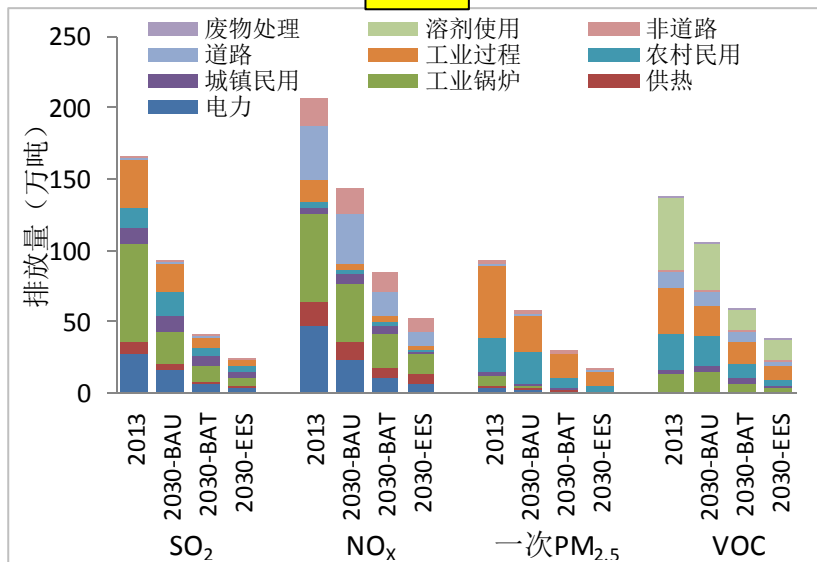
北京



天津



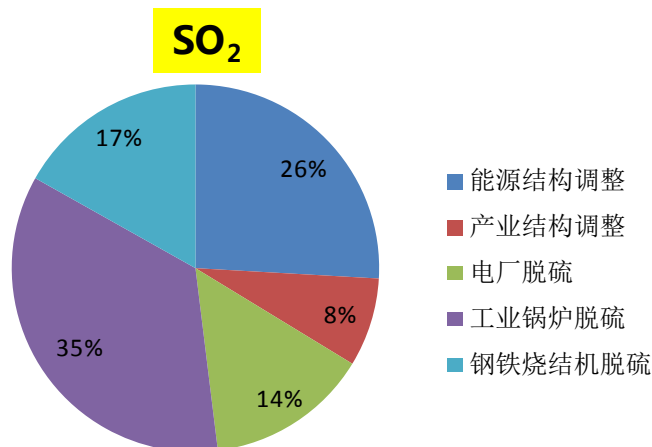
河北



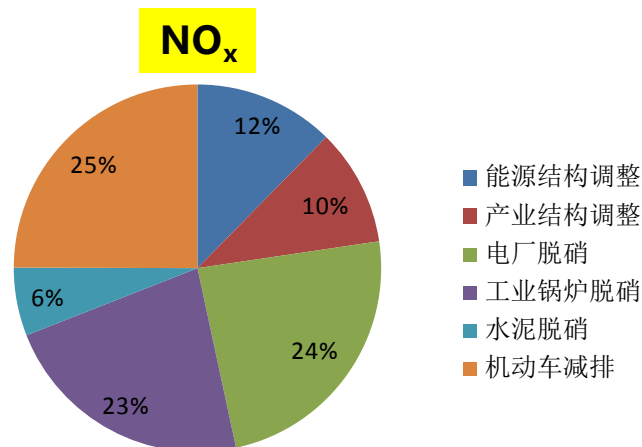
- **基准情景下**，现有政策可将2030年的SO₂、NO_x、一次PM_{2.5}、VOCs排在**2013年基础上**削减1/3左右；
- **最佳技术情景**通过强化末端控制，可使SO₂、NO_x、一次PM_{2.5}、VOCs排在**基准情景下**再削减1/2左右；
- **强化情景**通过进一步调整京津冀地区能源、产业结构，可使SO₂、NO_x、一次PM_{2.5}、VOCs排在**2013年基础上**分别削减**85%、74%、82%、72%**。

说明：由于图中仅展示了四个物种，所以没有添加NH₃的排放，经核算，强化情景下NH₃减排幅度为**40%左右**。

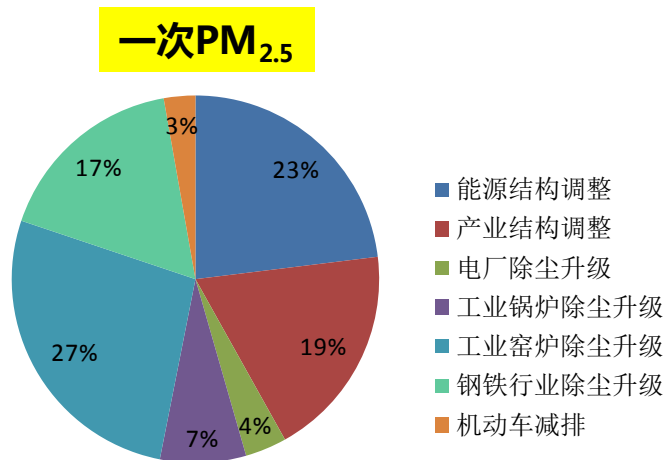
强化情景下各项措施的减排贡献



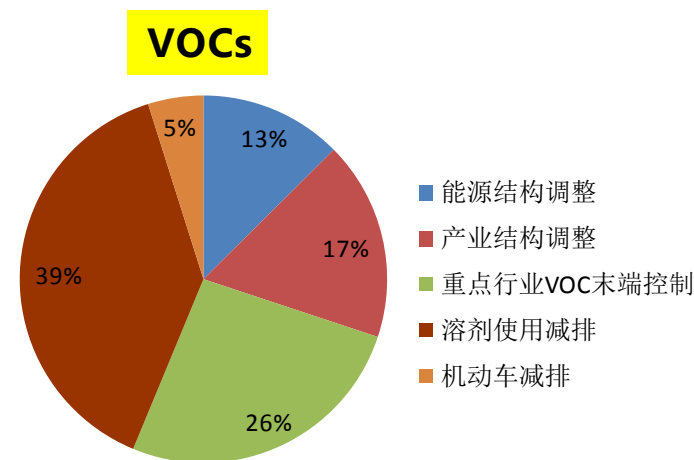
工业锅炉脱硫 > 能源结构调整 > 钢铁烧结机脱硫



机动车减排 > 电厂脱硝 > 工业锅炉脱硝



工业窑炉除尘升级 > 能源结构调整 > 产业结构调整



溶剂使用减排 > 重点行业VOC末端控制 > 产业结构调整

说明：1.民用散煤整治主要体现在了民用煤改气，一次煤炭消费大幅降低，因此归并到了能源结构调整之中。

2. 机动车NO_x的减排主要是由重型、中型卡车贡献。

Future Critical National Road-map: Coordinating Control of PM_{2.5} and O₃

数亿台	数十万家	数亿辆	数亿辆	数百万吨	数十亿只	百万km ²	数十亿m ²
							
固定 燃烧源	工艺 过程源	道路 机动车	非道路 移动源	溶剂 使用源	农业源	生物质 燃烧源	扬尘源



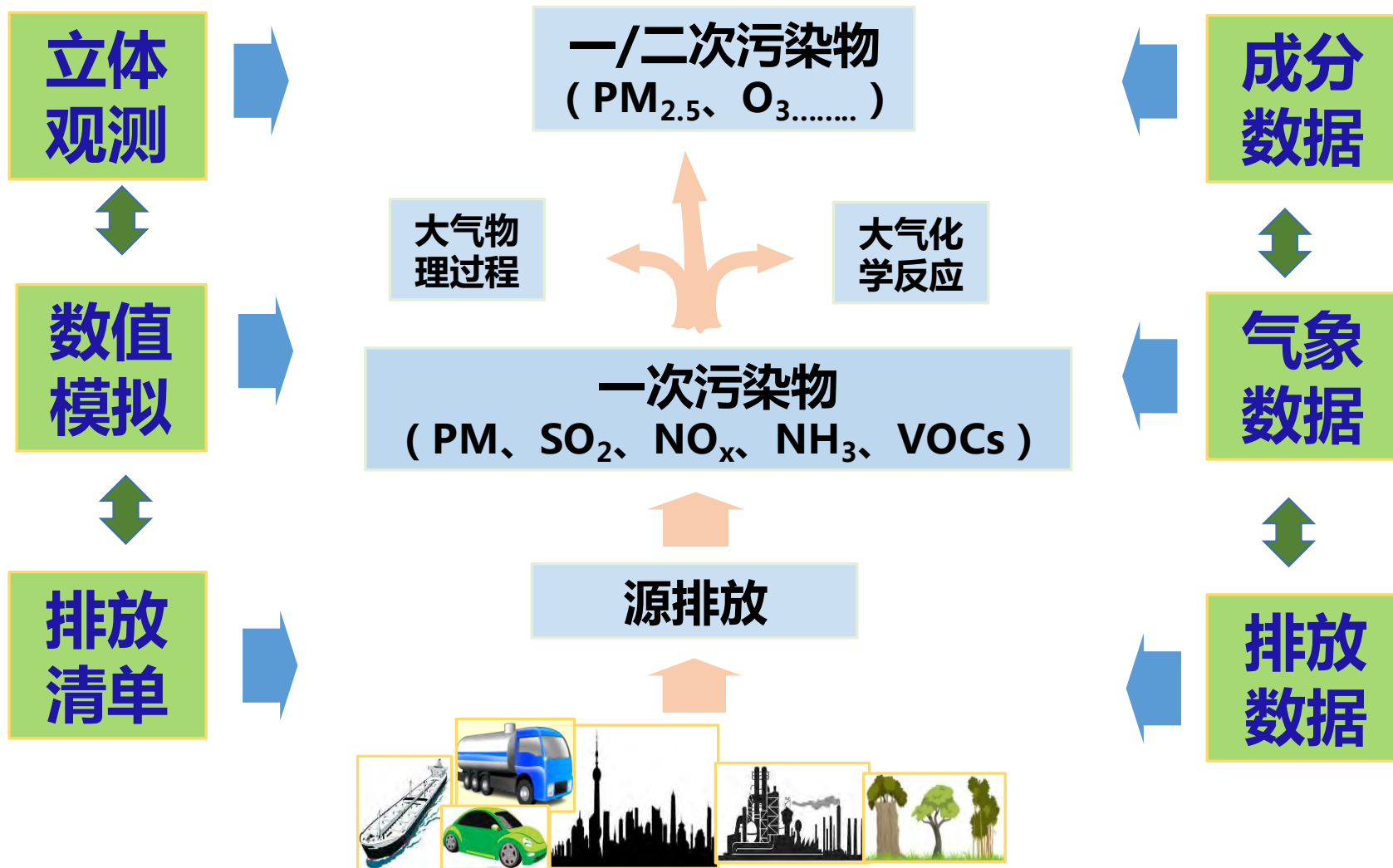
SO ₂	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃
-----------------	-----------------	------------------	-------------------	------	-----------------



区域空气质量调控核心技术体系

核心技术

核心数据



谢谢!

邮件地址:

hekb@tsinghua.edu.cn