京津冀地区雾霾与能源清洁利用

清华大学 姚强

2015年1月13-16日

济南、石家庄

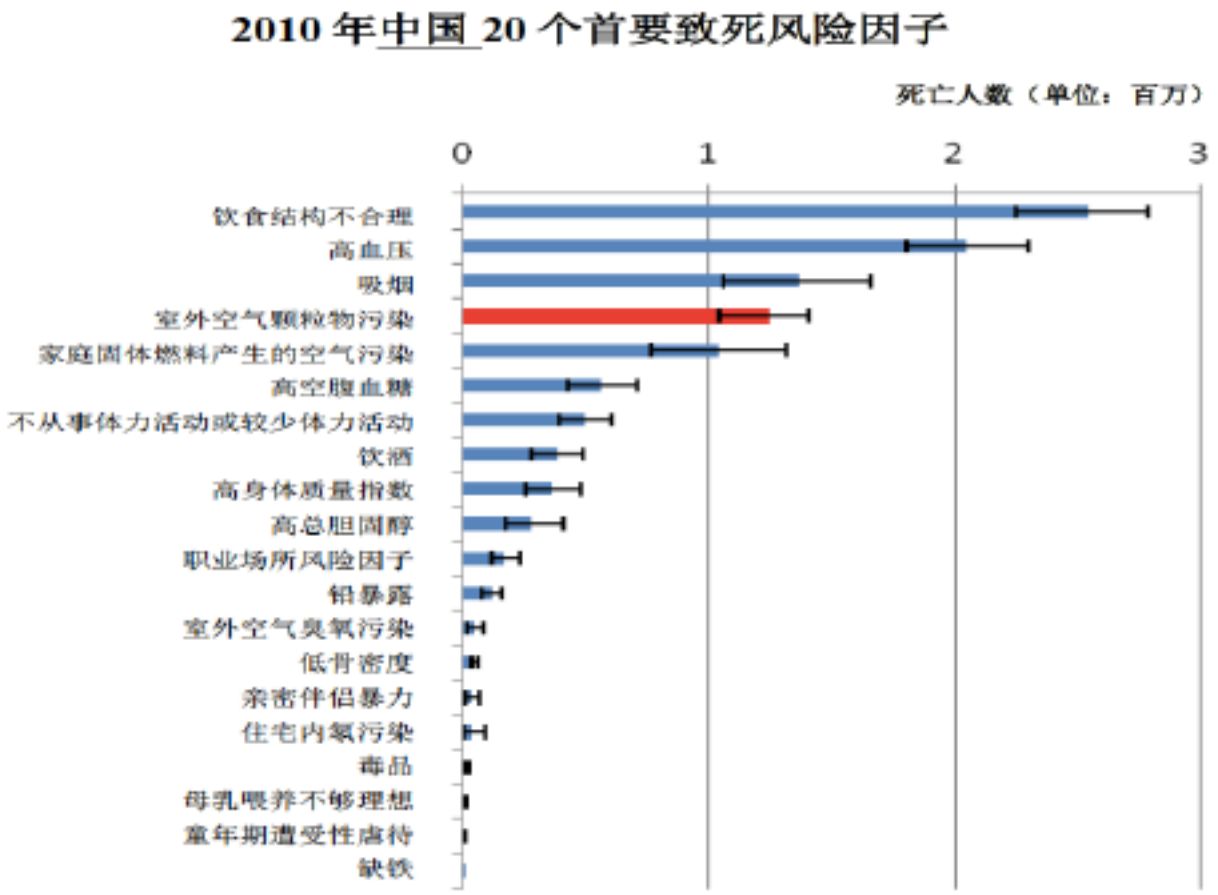
Particle And Combustion Engineering Research Group

Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

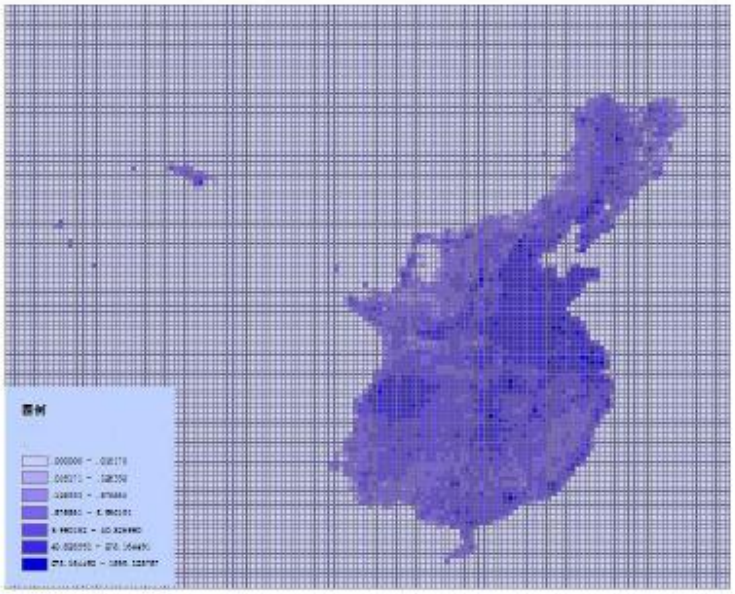
内容

- **大气污染之源：煤炭燃烧**
- 大气污染控制之策
- 化石燃料燃烧$PM_{2.5}$的控制

Particle And Combustion Engineering Research Group
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084



- **滕飞，**煤炭总量控制的协同效益研究 ——煤炭的真实成本 2012，“煤炭消费总量控制与能源结构转型”国际研讨会，2014.11.17，北京



2012年合计因煤排放PM2.5造成的超额死亡人数为***67万人***

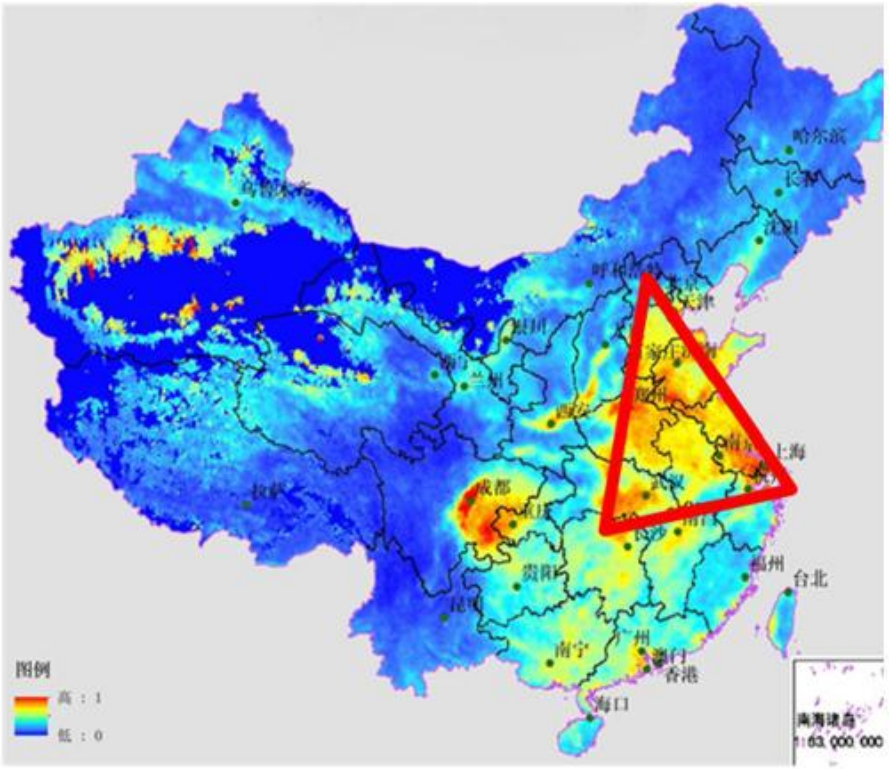
慢性阻塞***8.4万人***

肺癌***6.5万人***

脑卒中***35万人***

缺血性心脏病***17万人***

- **滕飞，**煤炭总量控制的协同效益研究 ——煤炭的真实成本 2012，“煤炭消费总量控制与能源结构转型”国际研讨会，2014.11.17，北京

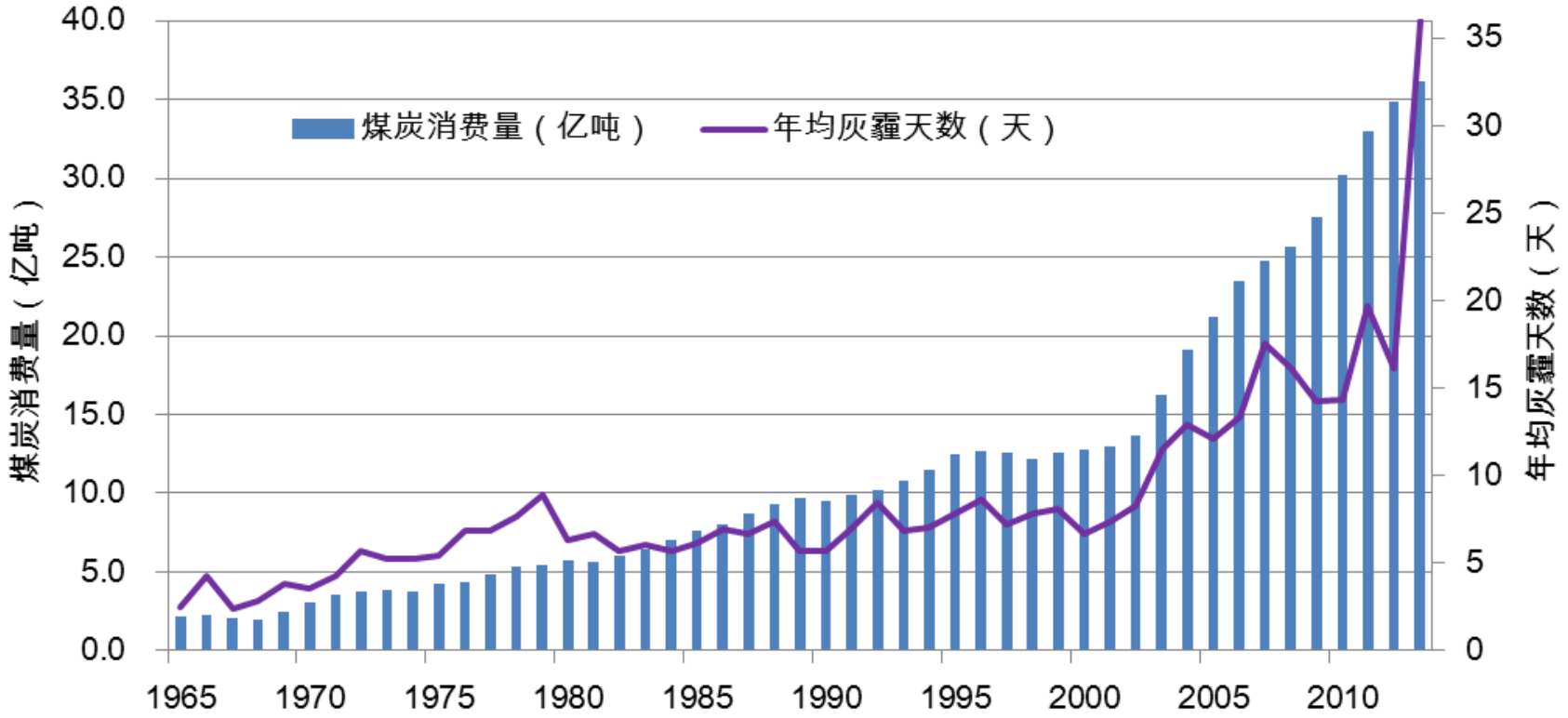


2011-2012年AOD平均值空间分布

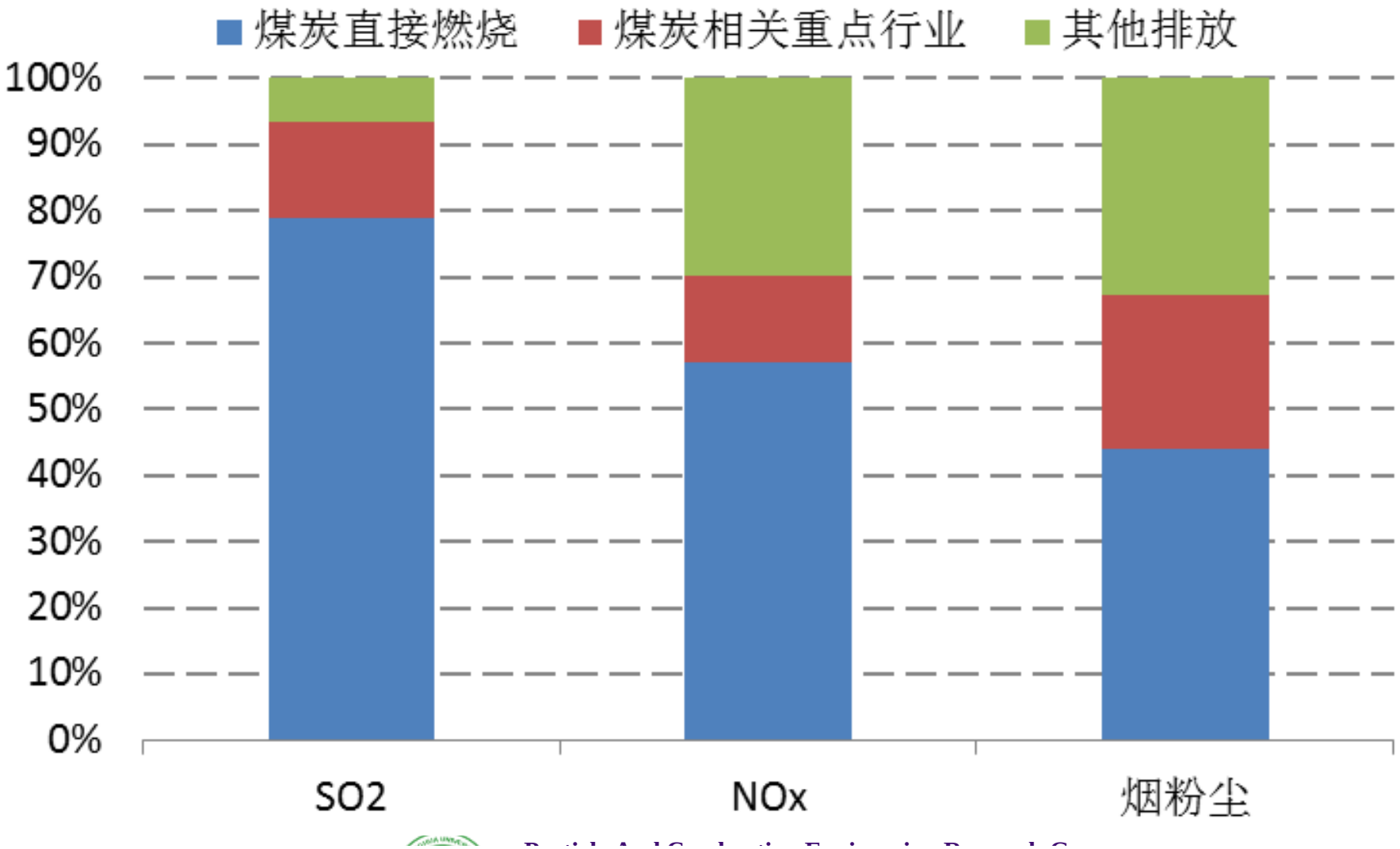
2013年主要区域$PM_{2.5}$年均浓度超标情况

- 王金南，大气环境容量约束下的中国，煤炭消费总量控制，“煤炭消费总量控制与能源结构转型”国际研讨会，2014.11.17，北京

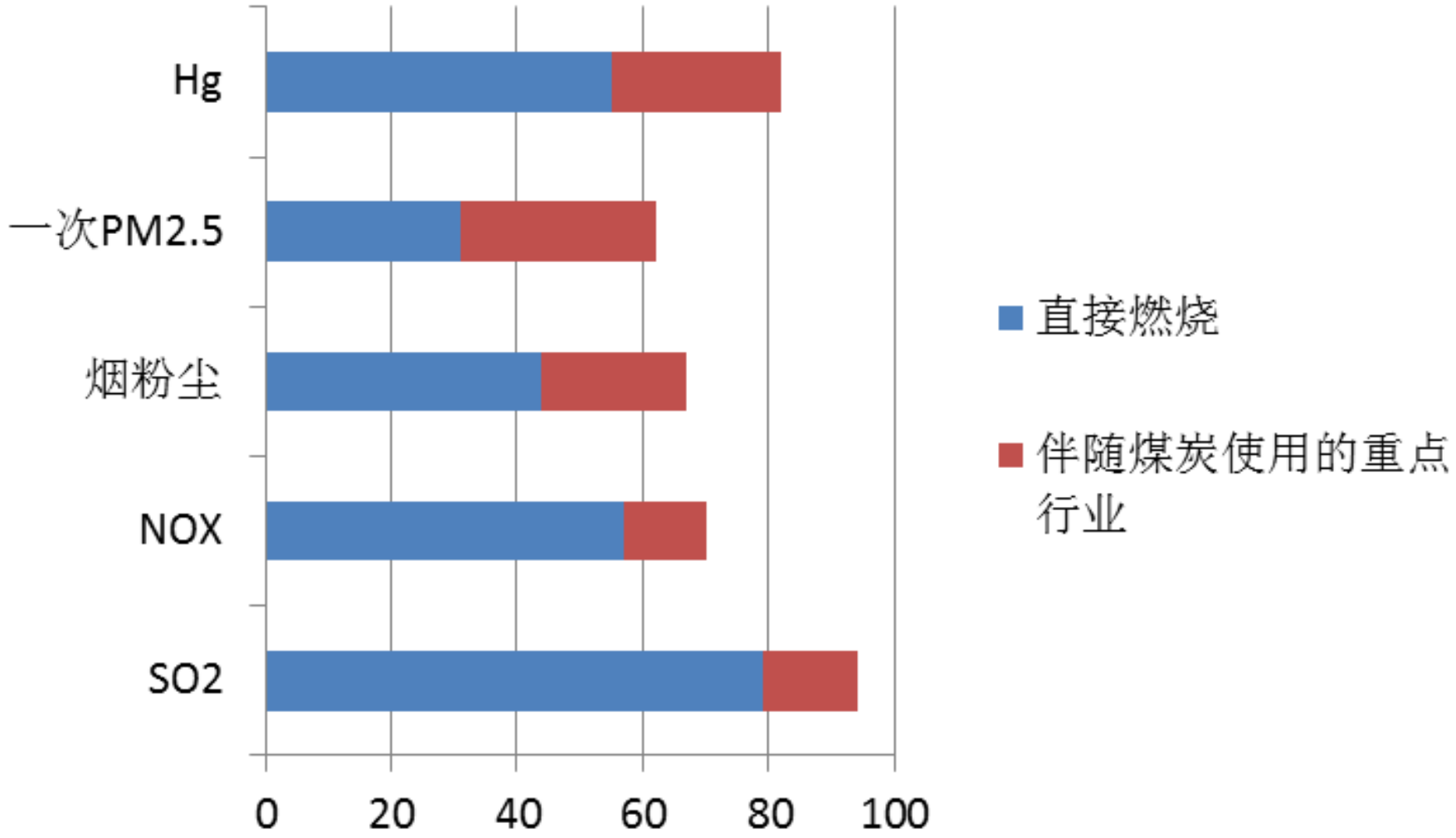
中国历史煤炭消费量与年均灰霾天数



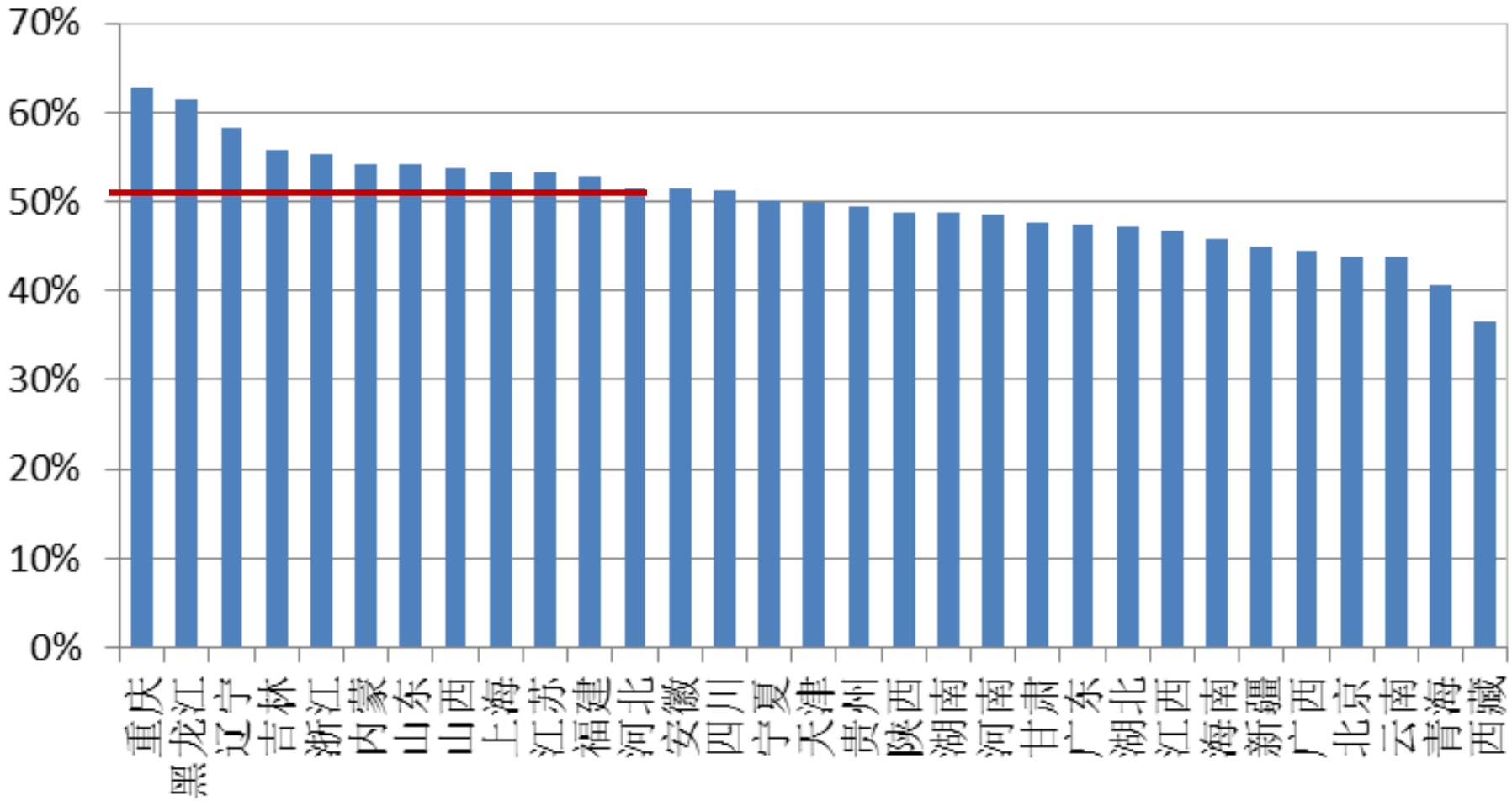
中国煤炭使用过程中的SO2、NOx和烟粉尘排放量占比



煤炭使用对中国大气污染物排放量的占比（%）



通过情景分析得到的煤炭使用对各省PM2.5浓度的贡献百分比



煤炭消费总量控制，“煤炭消费总量控制与能源结构转型”国际研讨会，2014.11.17，北京

煤炭使用对中国东部8个重要省份PM2.5年均浓度的贡献

省份	基于情景分析的结果	贡献区间
北京	43.9%	44%～54%
天津	49.9%	50%～60%
河北	51.6%	52%～62%
上海	53.3%	53%～63%
江苏	53.2%	53%～63%
浙江	55.3%	55%～65%
广东	47.3%	47%～57%
山东	54.2%	54%～64%

APEC Blue 说明什么

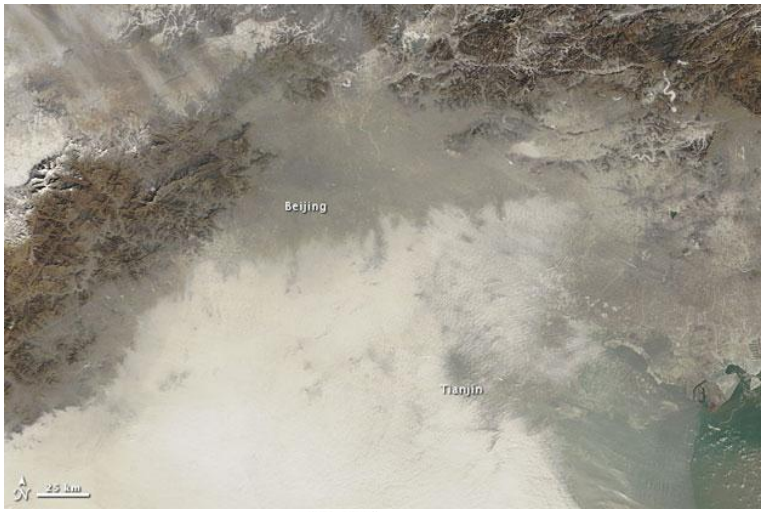
- 源头减排是关键！
- 这次的PM2.5的浓度下降大约30%以上。
- 这表明北京

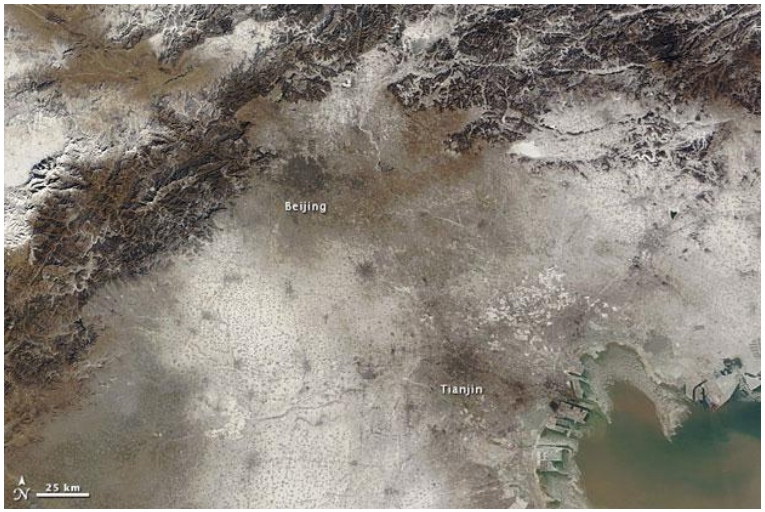
2017年的目标要在这样的条件下实现

Particle And Combustion Engineering Research Group

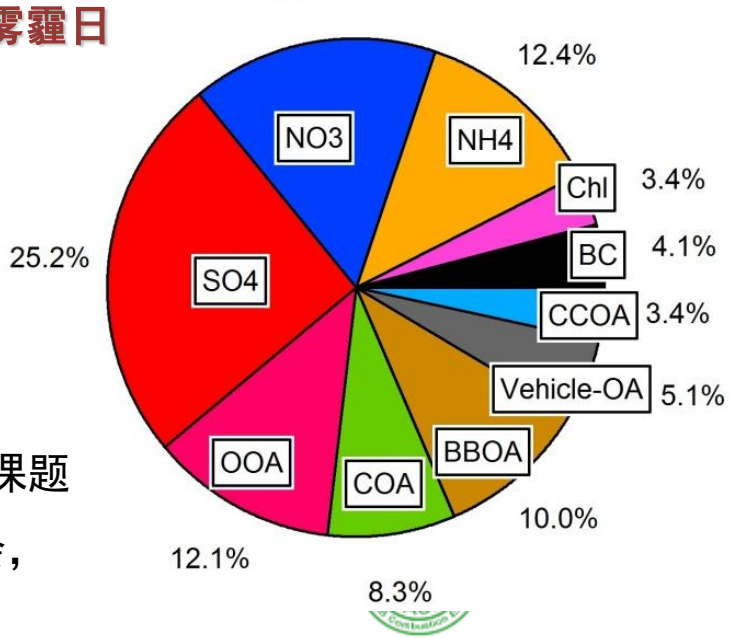
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

雾霾成因分析是大气污染控制的关键

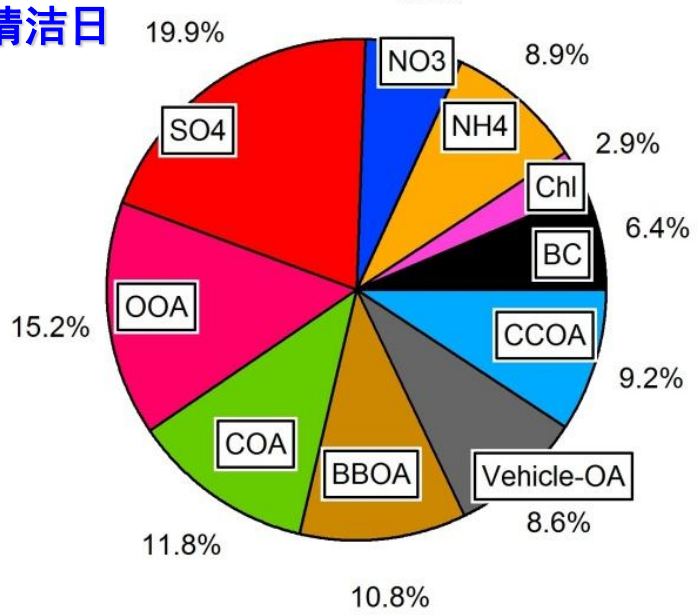




雾霾日



清洁日



胡敏，973课题年度总结会，2014. 1. 20

11	天津	天津	95.6	394
12	沧州	河北	93.6	380
13	北京	北京	90.1	646
14	武汉	湖北	88.7	339
15	成都	四川	86.3	374
16	乌鲁木齐	新疆	85.2	387
17	合肥	安徽	84.9	383
18	泰州	江苏	80.9	474
19	淮安	江苏	80.8	513
20	长沙	湖南	79.1	325
21	无锡	江苏	75.8	391
22	哈尔滨	黑龙江	75.7	756
23	常州	江苏	75.6	322
24	南京	江苏	75.3	312
25	徐州	江苏	74.9	304
26	太原	山西	74.2	416
27	湖州	浙江	73.5	414
28	沈阳	辽宁	72.7	464
29	镇江	江苏	71.6	263
30	扬州	江苏	71.1	312
31	宿迁	江苏	70.7	502
32	南通	江苏	70.2	248

33	长春	吉林	69.2	425
34	南昌	江西	69.1	255
35	金华	浙江	69.0	473
36	连云港	江苏	68.0	407
37	兰州	甘肃	67.1	259
38	苏州	江苏	67.1	384
39	盐城	江苏	67.0	455
40	嘉兴	浙江	66.9	417
41	衢州	浙江	66.5	406
42	绍兴	浙江	66.4	426
43	杭州	浙江	66.1	361
44	秦皇岛	河北	65.2	335
45	重庆	重庆	63.9	187
46	西宁	青海	63.2	319
47	青岛	山东	61.7	280
48	上海	上海	60.7	421
49	呼和浩特	内蒙古	59.1	216
50	温州	浙江	56.5	248
51	肇庆	广东	54.7	174
52	南宁	广西	54.7	199
53	台州	浙江	53.0	284
54	佛山	广东	52.3	160
55	广州	广东	52.2	159
56	承德	河北	51.5	407
57	大连	辽宁	50.7	224
58	宁波	浙江	50.4	416
59	贵阳	贵州	49.4	229
60	江门	广东	48.4	158
61	丽水	浙江	47.9	196
62	中山	广东	47.6	146
63	东莞	广东	46.0	165
64	银川	宁夏	43.7	164
65	张家口	河北	43.1	471
66	深圳	广东	39.7	131
67	珠海	广东	37.9	157
68	惠州	广东	37.2	121
69	昆明	云南	35.5	123
70	福州	福建	33.2	112
71	舟山	浙江	32.1	353
72	厦门	福建	31.3	89
73	拉萨	西藏	26.0	101
74	海口	海南	25.6	130

可能的减排目标

	目前 (80-100ug/m³)		35ug/m³目标 (2030年)		15ug/m³ 目标 (2050)	10ug/m³ 目标
来源	比例（%）	浓度 (ug/m³)	浓度	减排比例	浓度	浓度
燃煤	20-22	16-21	6-7	70%	3-4	2-3
移动源	20-25	16-23	10-12	50%	3-4	2-3
周边燃煤	20-25	16-23	8-10	60%	3-4	2-3
其他工业源	15-16	12-14	4-5	70%	2-3	1-2
扬尘	10-16	10-12	4-5	50%	2-3	1-2
生活等	4-5	5	2-3	30%	1-2	1-2
农业等	4-5	5	2-3	30%	1-2	1-2
总量		80-100	34-40	60%	15-20	10-15

全国

- 2013年全国平均70.1ug/m3,如果按年天累计总计：2.46亿吨；按全国2200（NOx)+2100(Sox)+1200(Pm2.5)+2500(VOC)+(NH3),考虑转化率等因素，大数为10000万吨总量，即大约在大气中的平均停留时间为2.5天
- 如果要降到35ug/m3，即要减少一半。5000万吨排放量。
- 达到15ug/m3,要减少78.5%。2150万吨
- 10ug/m3,要减少85%。1500万吨。

Particle And Combustion Engineering Research Group

Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

内容

- 大气污染约束
- 大气污染控制之策
- 化石燃料燃烧$PM_{2.5}$的控制研究

Particle And Combustion Engineering Research Group
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

- 达到国际同等水平的结构减排分析
- 非化石能源11%（今年有望达到）
- 天然气5.5---23.8%
- 油17.7---35.6%
- 煤67.5-28.6%

- 同等控制水平下：
- SO2减少60%
- NOx增加10%
- VOC增加10%
- 一次颗粒物减少60%

- 总体排放量减少仅为20%。

Particle And Combustion Engineering Research Group
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

能源消费结构改善

- 明确控制我国化石能源、特别是煤炭的每年的消费总量是关键所在。至今为止，我国历年来总的耗煤量为400亿吨，而到2050年前我国还需要耗煤量大约1600亿吨（以每年40亿吨计），不控制可能还要高，这是无论如何无法承受的。
- 是否可将我国煤炭的消费总量控制在40亿吨/年？
- 增加可再生能源比例，增量部分主要依靠清洁能源来实现？
- 煤炭的消费结构：发电、炼焦、煤化工。减少工业及民用煤的使用。

煤的消费结构变化（40亿吨煤），万吨

	用煤量（亿吨）	SO_2	NOx	PM	可能转化PM
发电（2011）	～20	913	948	155	2016
发电（2015）	～22	795	735	120	1650
发电（达标）	***22***	***220***	***220***	***66***	***696***
钢铁	6.4	640	192	32	1254
水泥	5.6	560	224	28	1173
其他民用	4	580	100	20	1026
化工	2	~	~		
总排放量	40	2000	736	146	4150

燃煤污染控制

- 强化脱硝装置的建设（易）、投运（难），迅速控制NOx的排放总量。
- 继续实现脱硫装置的建设，提高效率与比例。如果按40亿吨煤炭消费量计，按1%含硫量计，排放量将达到7200万吨，考虑到其他行业的排放，要实现90%的总体效率，才能实现实现720万吨的控制数。
- 加强中小锅炉和工业窑炉的燃煤污染排放的控制力度，改用清洁燃料或其他有效措施
- 强化新的污染控制技术的基础研究、开发与应用

清洁调度

- 从安全调度到节能调度再到清洁调度

- 发电企业实现清洁调度，建立相应的清洁调度机制和技术手段，实现在预测基础上的清洁调度：不是基于成本，而是基于污染物排放的调度方式

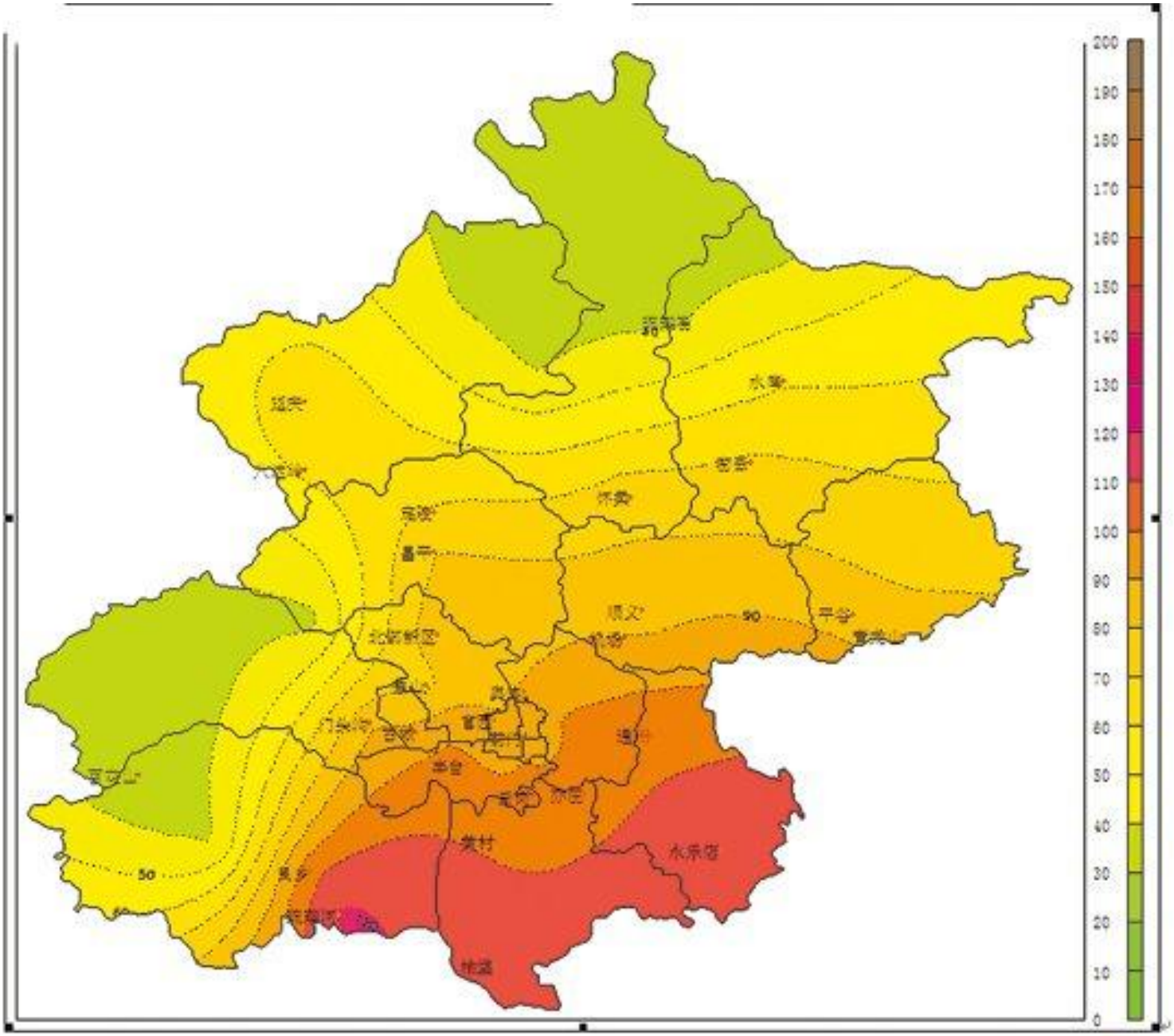


图 6　2013 年全市 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布图

TAKEFOTO.CN 北京

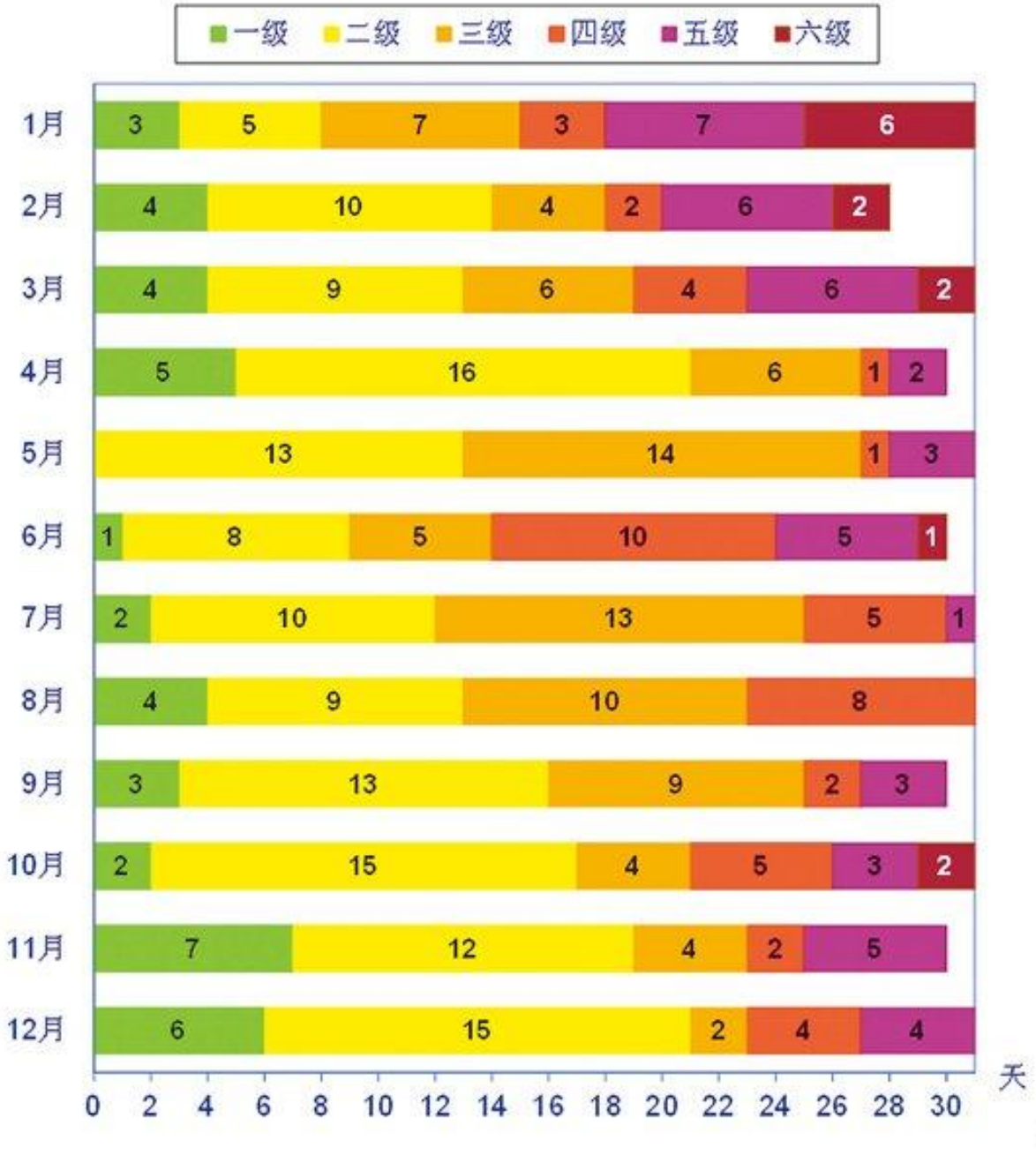


图 2 2013 年各月空气质量等级个数

TAKEFOTO.CN 北京

jing, 100084

预测与监控

- 天气因素不可控，但可以提前预报并采取措施
- 建立相应的预警机制，在预报的基础上，最好提前一天减下来。
- 加强环保执法，精细化环保法规，在严重污染期加强处罚力度
- 上述措施需区域联动

改变发展观

- 重新审视“发展是硬道理”这一发展观，要强调科学发展观，可持续发展观的根本理念。
- 北京市应该停止发展。
- 考虑北京功能的减少，中国应该出现政治、文化、经济多功能的分散，转变政府的职能。
- 控制北京市建设速度与人口。实现人口和零增长
- 改变公众的消费、出行、住宿和饮食等生活习惯

公布病情和死亡率\污染源

- 全国各大城市可以每天公布主要与污染相关的呼吸道疾病和心脏病的发病率日报

- 每日公布主要排放源的每天各主要污染物的排放总量、单位产品耗量等。并明确是否符合环保标准要求的情况

公众关系

- 加强非政府组织和其他公共媒体在环境保护中的特殊作用的分析
- 利用新型媒体实现快速的信息传播
- 加强与非政府组织和非盈利机构的合作
- 加强科学的普及
- 科学家要改变模棱两可和谨小慎微的做法，只强调未知的问题和进一步需要研究的东西的提出，而要加强对已有知识的传播和宏观的把握。

京津冀地区

- 平均浓度为103.6ug/m3; 按21.71万平方公里计算，平均2.5天停留时间算为年排放量为328.5万吨
- 每天排放量大约在9000吨。降到60ug/m3,总体要下降42%的量(2017年)，达5220吨
- 达标35ug/m3,总体排放量要下降为66%,即排放3000吨
- 达到15ug/m3,降85.5%，1300吨
- 达10ug/m3,降90.3%，900吨

Particle And Combustion Engineering Research Group
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

- 北京的汽车保有量520万辆，总耗油量在630万吨左右，以每天2万吨计（100ppm)：二氧化硫的排放量为4吨左右，应该不是主要问题，问题是硫对于其他污染物有影响。总体上讲假设每天行驶有2.4*10**8，即2.4亿公里。NOx和HC总量在100吨左右，对这个阶段的PM贡献率应在10%以下。当然汽车还有一个是提供了扬尘。这也值得研究，早期王玮的研究表明，交通扬尘的平均负荷为3.82g/m^2

	欧I	欧II	欧III	欧IV	欧V	欧VI
PM	35	24	12	6	1.2	1.2
HC+NOx	240	120	84	42	30	30

- 北京燃煤总量为2300万吨/年，即冬天多，每天消费量约为10万吨，排放的二氧化硫约100-200吨（按排放浓度为100-200mg/m^{3}计，平均脱硫率达到90-95%），氮氧化物约200-400吨（排放浓度为200-400mg/m^{3}计），烟尘大约50-100吨（50-100mg/m^3)，考虑二次颗粒形成的复杂性，考虑50%的转化率，并且考虑重量的增加，大约总量贡献在400-800吨，应该在15-20%左右。目前控制水平如何，值得研究。

河北与天津燃煤

- 天津：7000万吨，每天20万吨，排放的二氧化硫约200-400吨，氮氧化物约400-800吨，烟尘大约100-200吨，考虑二次颗粒形成的复杂性，考虑50%的转化率，并且考虑重量的增加，大约总量贡献在800-1600吨
- 河北：2.7亿吨标煤，每天90吨，排放的二氧化硫约900-1800吨，氮氧化物约1800-3600吨，烟尘大约450-900吨，考虑二次颗粒形成的复杂性，考虑50%的转化率，并且考虑重量的增加，大约总量贡献在3600-7200吨
- 河北的面积为18.88万km2，负荷：143吨/km2
- 北京1.64万km2，140吨/km2
- 天津1.19万km2，586吨/km2

减排之路

- 煤的比例每年降1-2%，到2025-2030年降到50%以上，到2050年降到30%左右
- 油：保持18%左右
- 天然气：2020年增加到10%以上，2030年后增加到15%。

- 非化石能源：2020年：15-18%
- 2030年25-30%，2050年35-45%

- 污染控制：

控制一次颗粒物

控制二次颗粒物的前体物

Particle And Combustion Engineering Research Group

Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

内容

- 大气污染约束
- 大气污染控制之策
- 化石燃料燃烧$PM_{2.5}$的控制研究

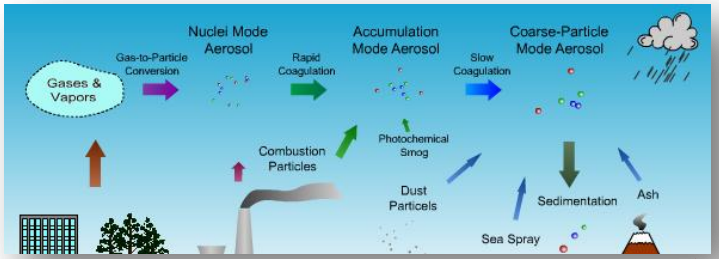
Particle And Combustion Engineering Research Group
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

化石燃料燃烧排放$PM_{2.5}$源头控制技术的基础研究(2013CB228500)

清华大学、北京大学、浙江大学、华中科技大学
天津大学、东南大学、上海交通大学、中国矿业大学

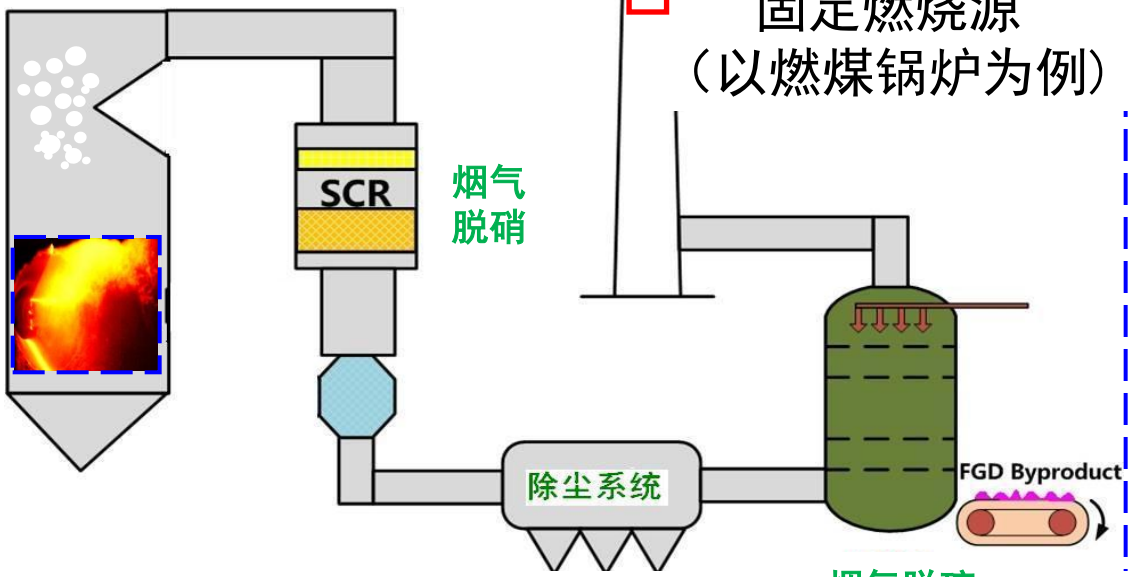
Particle And Combustion Engineering Research Group
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

项目的基本思想：思路

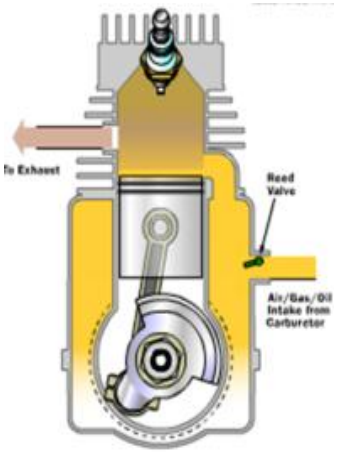


灰霾、健康、环境、气候

固定燃烧源
（以燃煤锅炉为例）



移动燃烧源
（以内燃机为例）

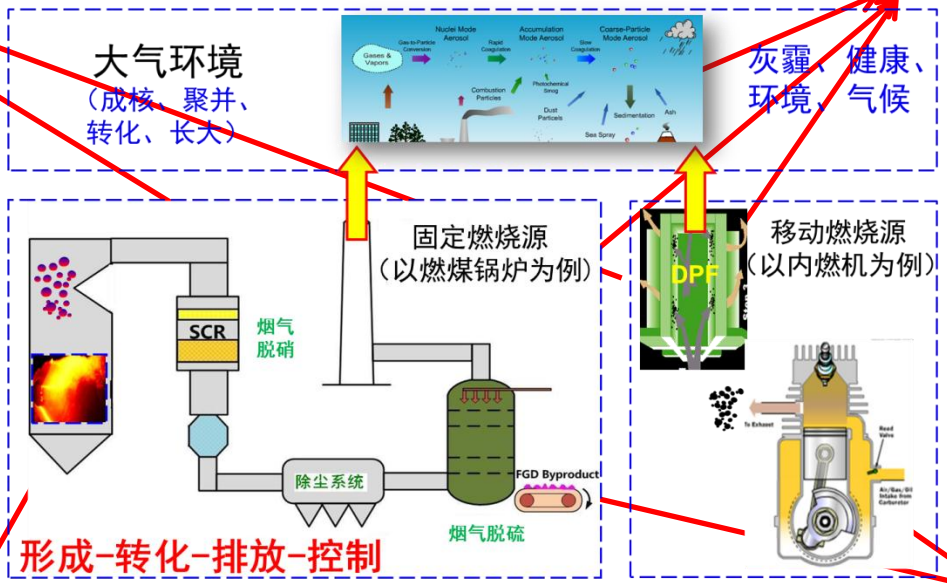


形成-转化-排放-控制

四个关键科学问题

4. 细颗粒物在多场作用下多相流动中迁移、沉积和分离机制

3. 细颗粒物聚并、长大及与气态污染物转化机理



1. 煤中矿物质迁徙、转化的细颗粒物形成及非均相反应机制

2. 碳质细颗粒物形成及湍流耦合快速氧化机理

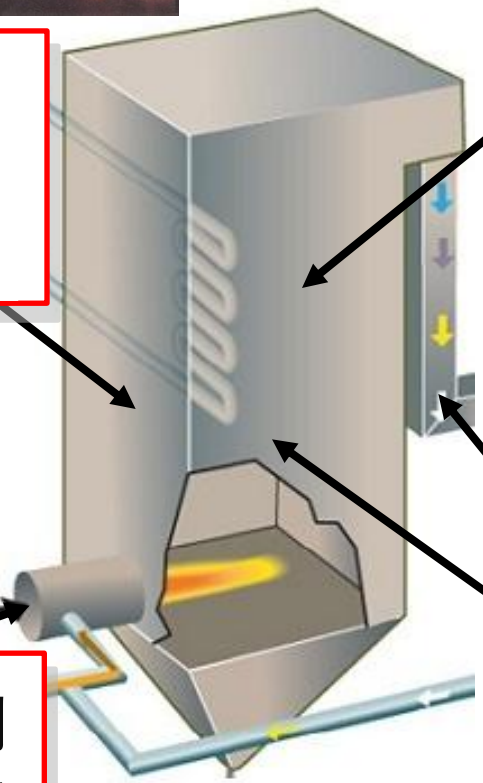
1. 煤中矿物质迁徙、转化形成细颗粒物的规律及调控机制

燃烧条件：气氛、温度、氧量

吸附剂、添加剂

(2) 燃烧方式调整控制炉内细颗粒物生成

(3) 燃烧过程中非均相反应和物理吸附抑制细颗粒物生成



煤+煤　煤+生物质

重金属

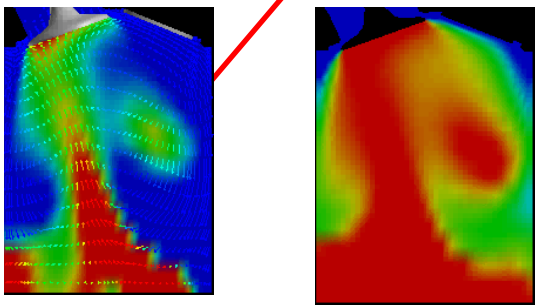
细颗粒物

(1) 燃料矿物组分调配减少细颗粒物生成的机制

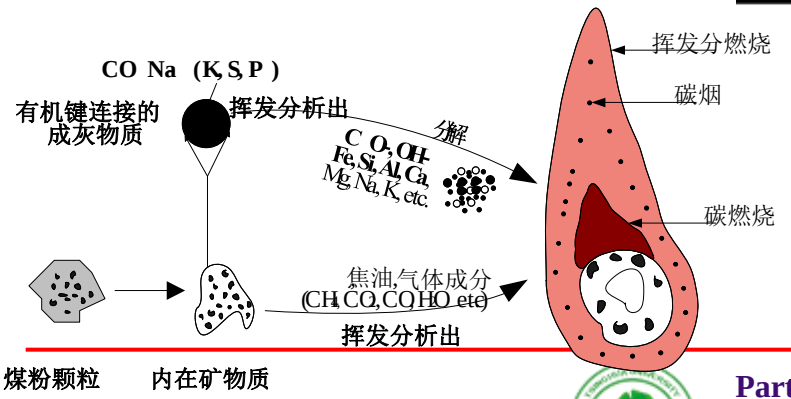
(4) 细颗粒物与有毒元素的相互作用与联合脱除

2. 燃烧过程碳质颗粒物形成与快速氧化

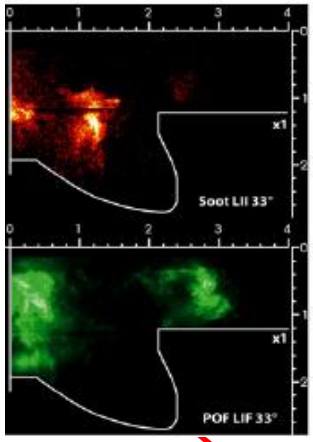
(1) 高温高压条件下碳质颗粒物形成机理



缸内喷雾燃烧过程中碳烟分布



(2) 含碳质细颗粒物的湍流涡团破碎与混合强化机理



(3) 碳质细颗粒物快速氧化的燃烧条件

(4)碳质细颗粒物氧化反应动力学及关键基团研究

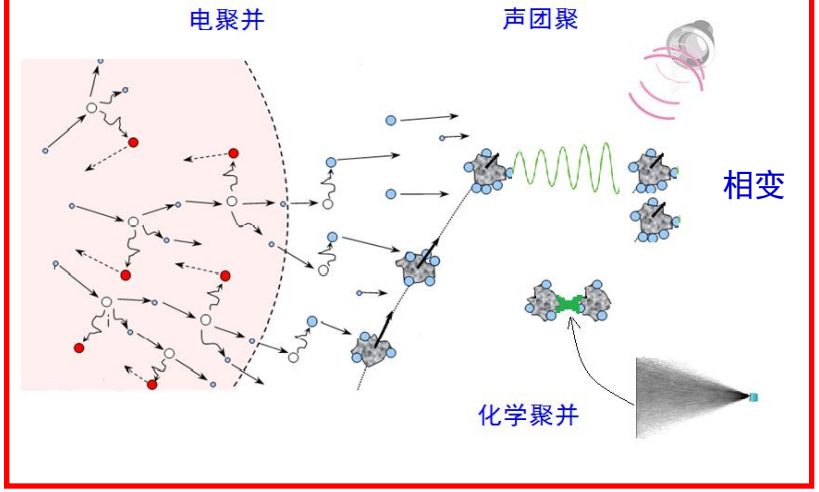
Particle And Combustion Engineering Research Group

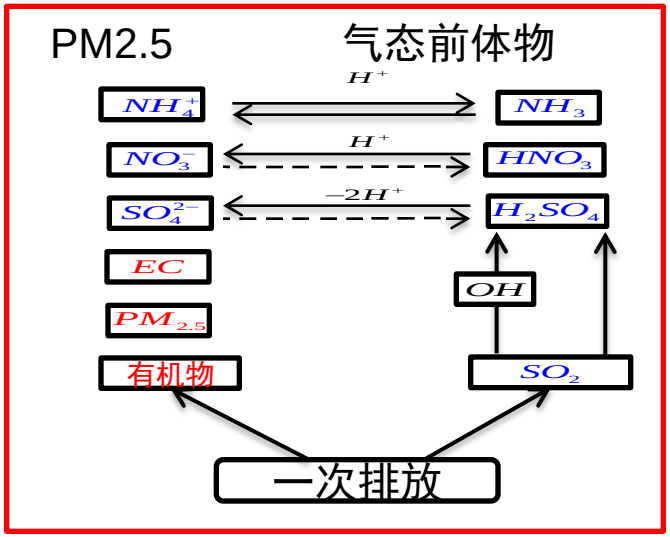
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

3. 细颗粒物聚并长大及与气态污染物转化机理及控制方法

电凝并、声团聚、水汽相变和化学团聚对细颗粒物聚并脱除的促进作用和影响机制

城市点长期观测和区域点的加强观测观测到强大气氧化性条件下气态污染物向细粒子的转化以及细粒子的混合态演变和吸湿性增强



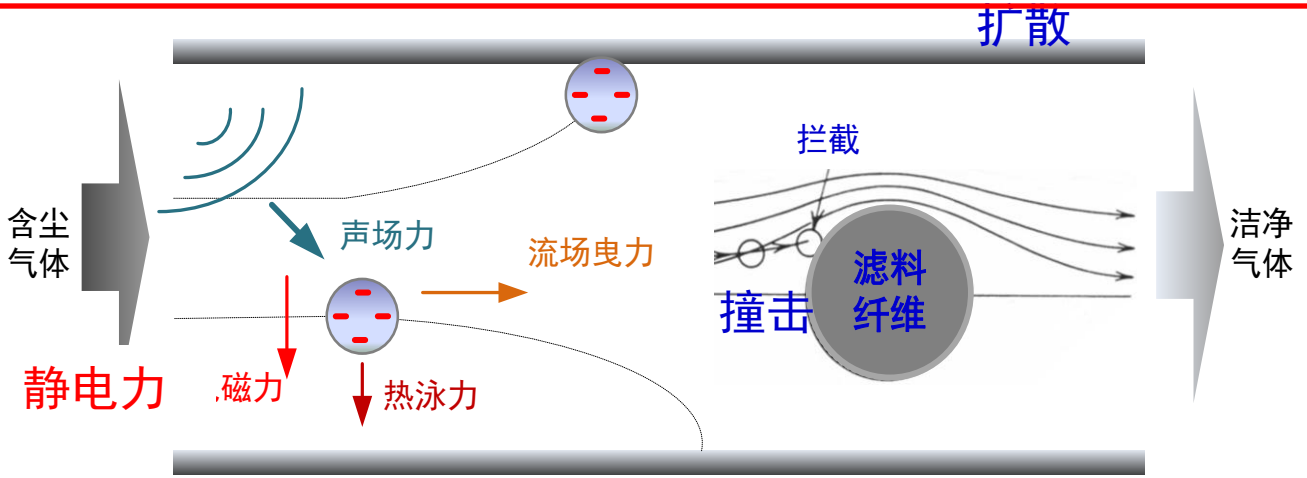


获取多因素作用下细颗粒物声团聚和化学团聚的影响规律以及PM2.5颗粒核化凝结特性

建立了“准实际”大气烟雾箱模拟实验平台，揭示了光解速率常数是影响颗粒物老化过程的关键因素，为源排放颗粒物与气态污染物的共同去除提供了借鉴

4. 细颗粒物在多场作用下的迁移、沉积及分离过程高效脱除

开发源排放颗粒物采样装置（2套）和实验室测评系统；现场测试10个电厂或其他固定源；搭建实际燃煤烟气多功能试验平台并开展PM2.5转化与增强脱除研究



微米颗粒单纤维沉积、微米颗粒与表面的相互作用的AFM测量、PM2.5脱除技术的实验研究与中试、过滤介质结构特性对细颗粒物质量排放、数量排放及粒径分布的影响规律、研究过滤压降和微观颗粒层结构的关联、不同烟气湿度下颗粒荷电和迁移规律研究

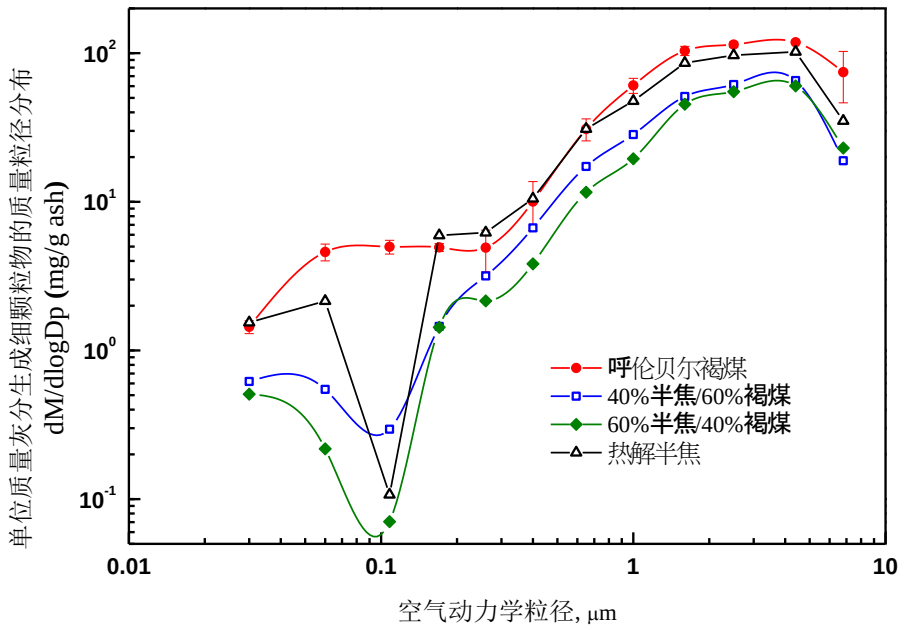
移动源纳米催化剂的性能优化准则及高活性催化剂开发；新型过滤介质应用方案及表面修饰技术实验研究；真实发动机及整车排气条件下催化剂对排气中多种污染物的协同脱除

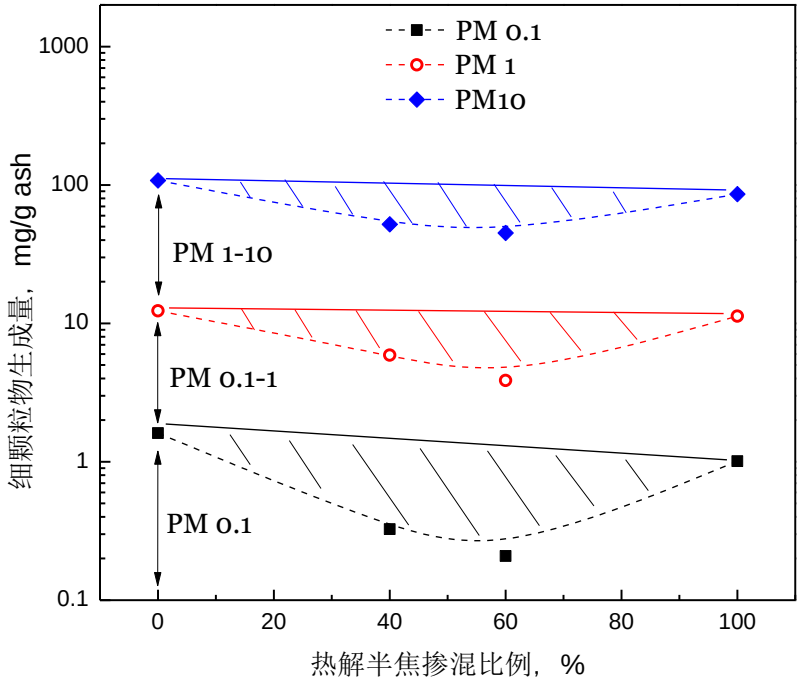
潜在控制技术方向

一、利用不同燃料矿物组分之间的交互作用，可有效减少细颗粒物生成

褐煤&半焦混烧颗粒物大幅度下降

呼伦贝尔褐煤&半焦 混烧



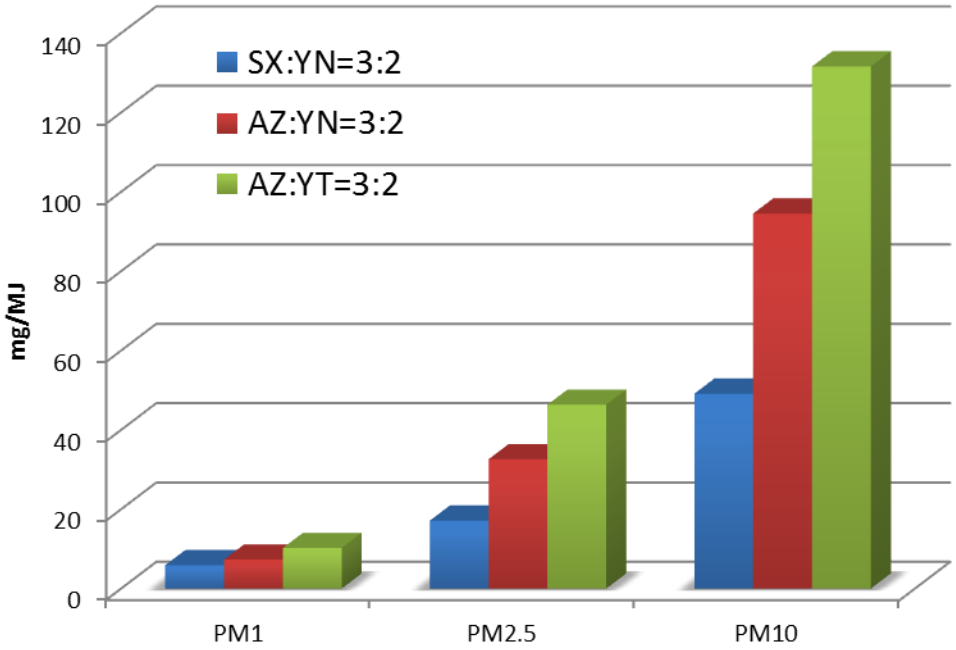


- 褐煤单独燃烧产生的$PM_{0.1}$质量是半焦单独燃烧的~1.6倍，而亚微米颗粒质量二者相当，微米级颗粒质量褐煤是半焦的~1.3倍；
- 两组混烧工况在三个粒径范围内的质量均只有两组单独燃烧的工况的一半左右

Particle And Combustion Engineering Research Group

Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

矿物调配减少颗粒物排放总量

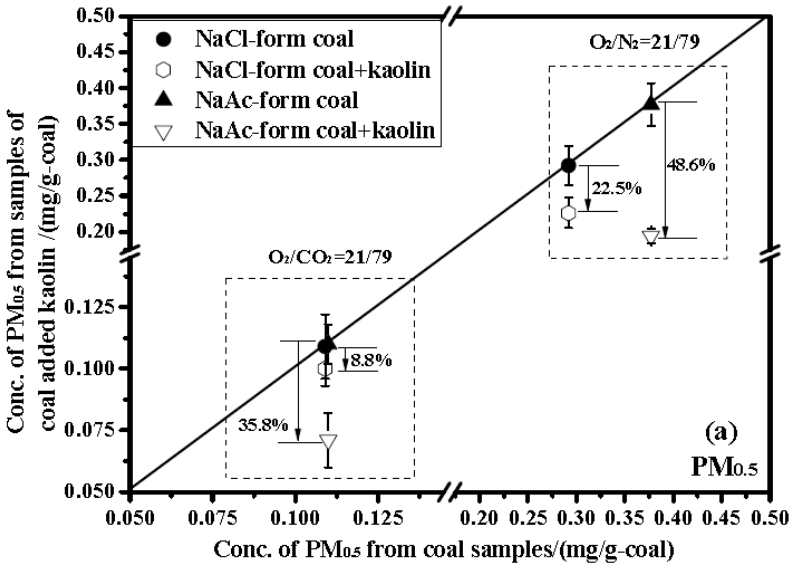


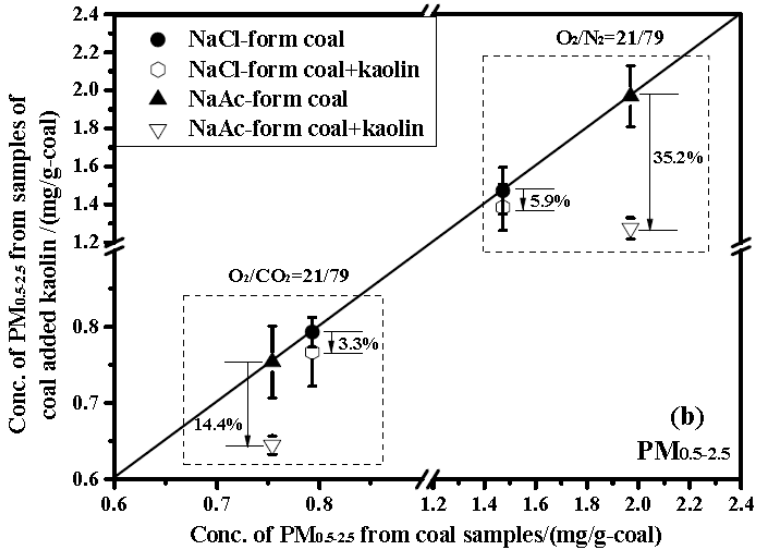
煤种调配后PM_1、$PM_{2.5}$、PM_{10}总量比较

- 通过对不同燃煤矿物组分调配的研究，获得PM减排最优的配煤方案，为电厂的配煤燃烧提供依据；
- 混煤比例为SX:YN=3:2时，$PM_{2.5}$和PM_{10}的生成量均是最少的。从电厂控制颗粒物生成的角度，混煤比例SX:YN=3:2为最优的配煤方案。

二、高温条件下硅铝酸盐通过液相捕集控制PM2.5 生成的新机理

高岭土对不同形态Na的作用

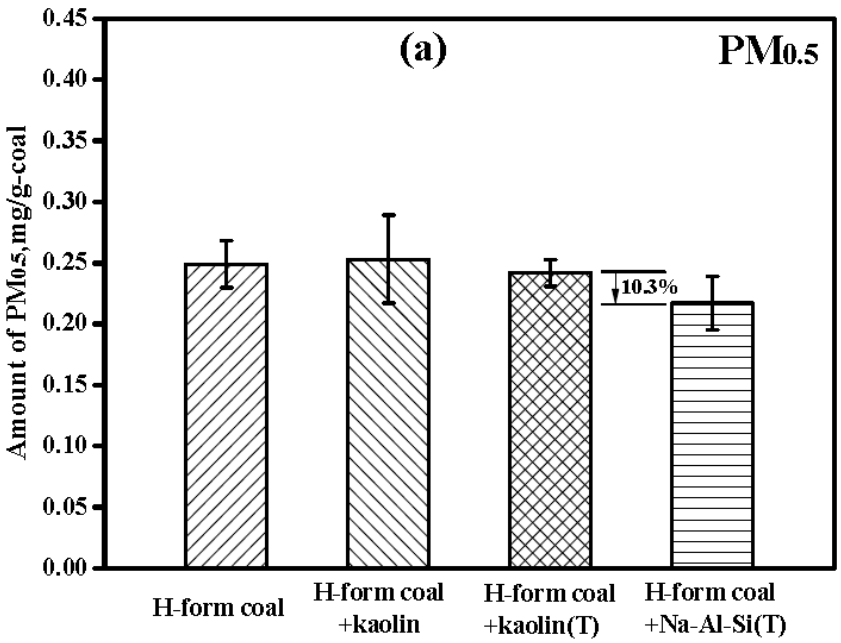


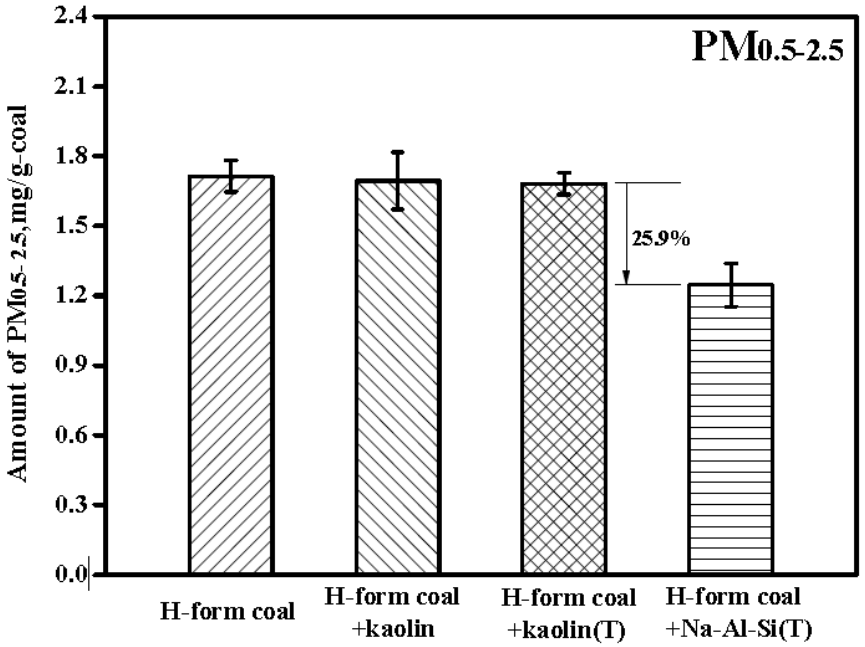


NaCl-form coal 和 NaAc-form coal 燃烧时，高岭土对$PM_{2.5}$ 的控制作用

- 高岭土对$PM_{0.5}$的控制能力要强于对$PM_{0.5-10}$；
- 空气燃烧下，高岭土对NaAc-form煤PM的控制优于NaCl-form煤，氧/燃料燃烧下趋势相反；
- 不同燃烧气氛下，NaCl-form 煤和NaAc-form 煤PM生成量不同，PM与高岭土碰撞效率的差异导致控制效果的差异。

钠铝硅酸盐对$PM_{2.5}$的捕获作用





添加Na-Al-Si前后H-form煤$PM_{2.5}$颗粒物排放浓度对比

- 使用Na-Al-Si添加剂与煤粉进行混烧，发现该添加剂能够通过液相捕集作用有效的减少H-form煤燃烧过程中$PM_{2.5}$的生成。

Particle And Combustion Engineering Research Group

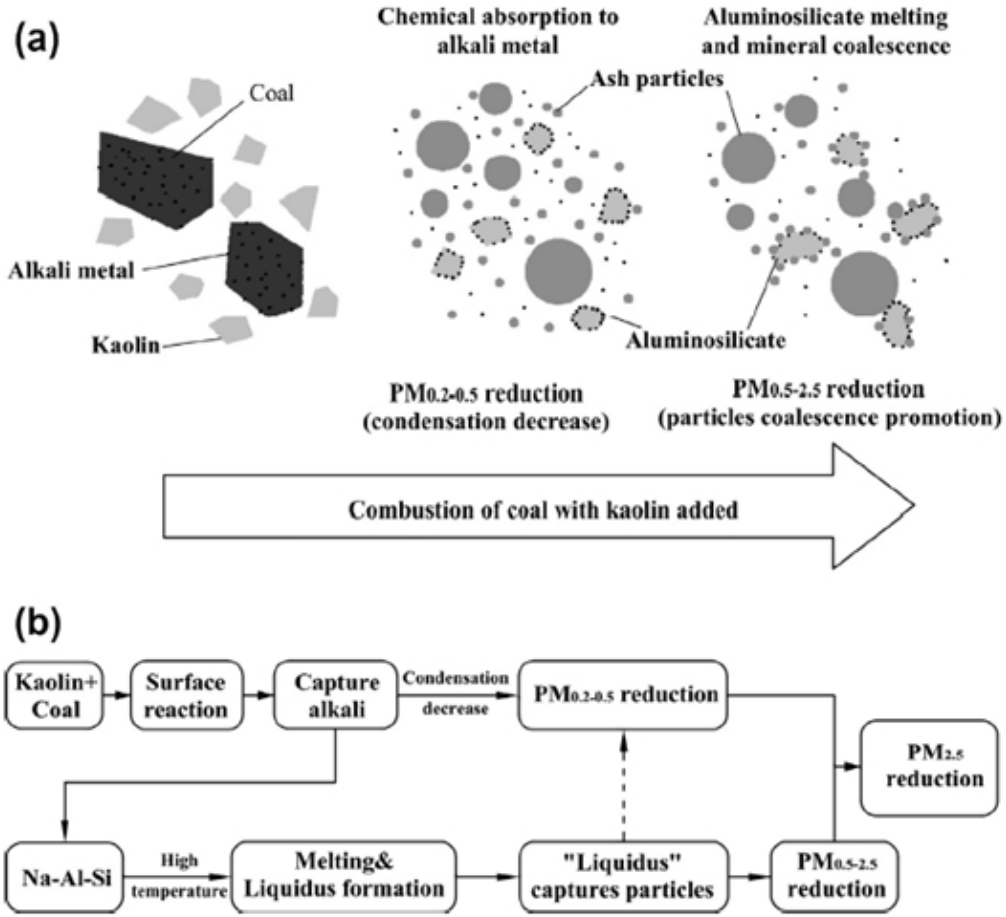
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

钠铝硅酸盐对$PM_{2.5}$的捕获作用

- 机理分析

化学吸附

液相捕集



Particle And Combustion Engineering Research Group

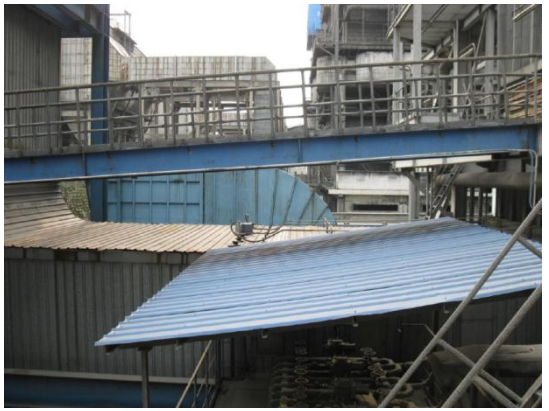
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

三、探索了不同团聚方式下细颗粒物聚并长大效果及其影响因素

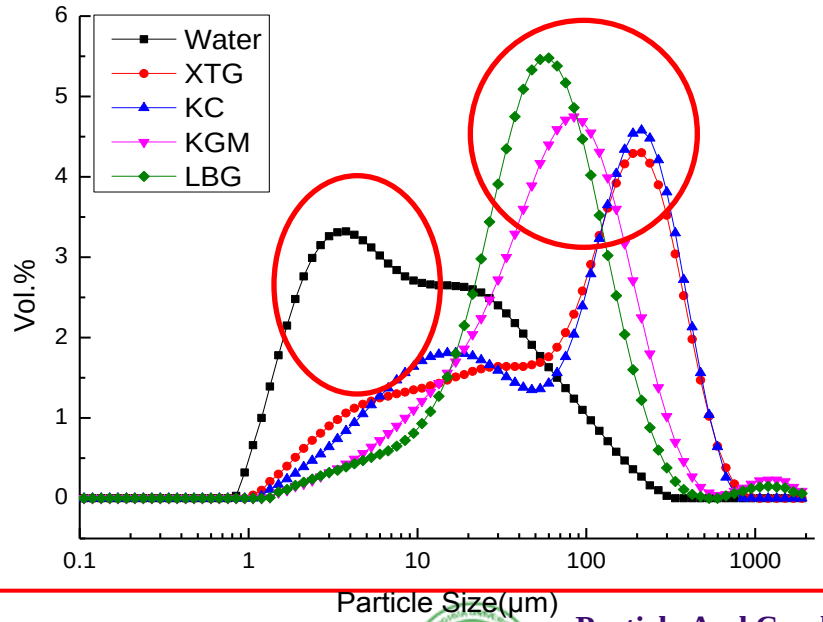
不同化学团聚剂下细颗粒物化学团聚长大效果

- **分析高分子聚合物作为团聚剂使颗粒聚合长大机理；**
- **对电厂PM2.5控制进行可行性研究；**

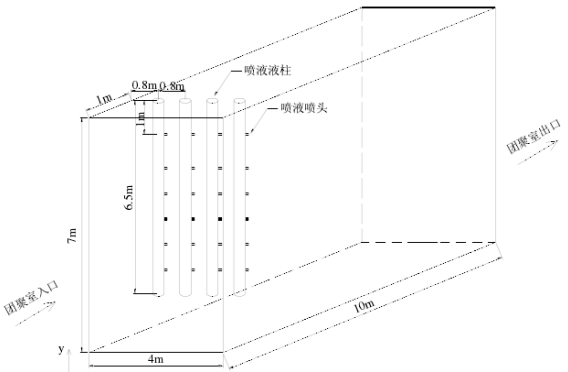
- **浓度提高，增加团聚剂分子，增大碰撞概率，增强团聚效果，经济性考虑，浓度不宜过大；**
- **温度升高，分子活性增强，分子运动加剧，增强团聚效果；**



湖南耒阳发电厂烟道1



不同种类化学团聚剂团聚效果

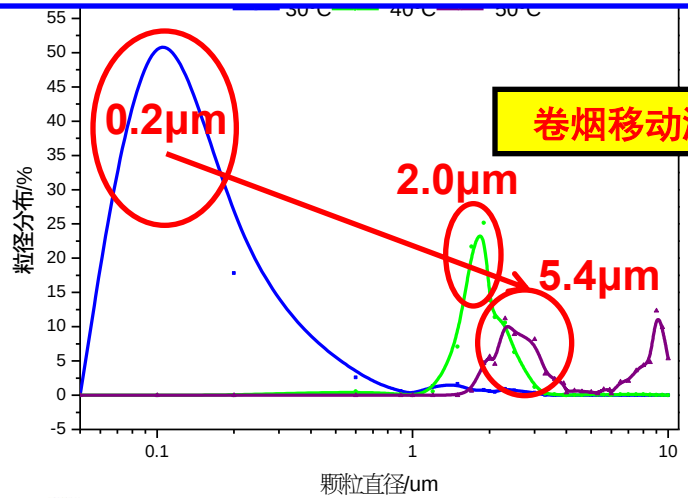


电站烟道团聚示意图

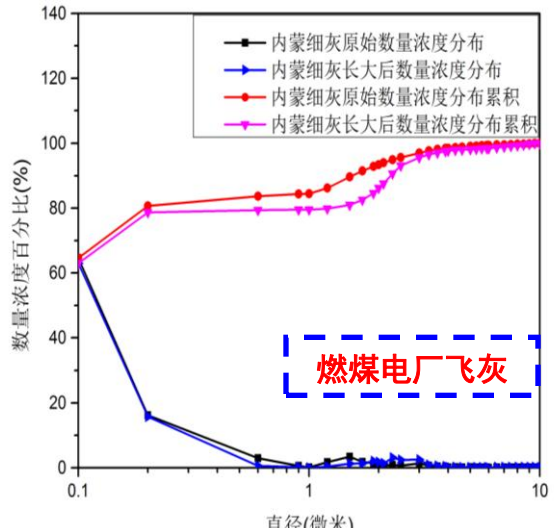
Particle And Combustion Engineering Research Group
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

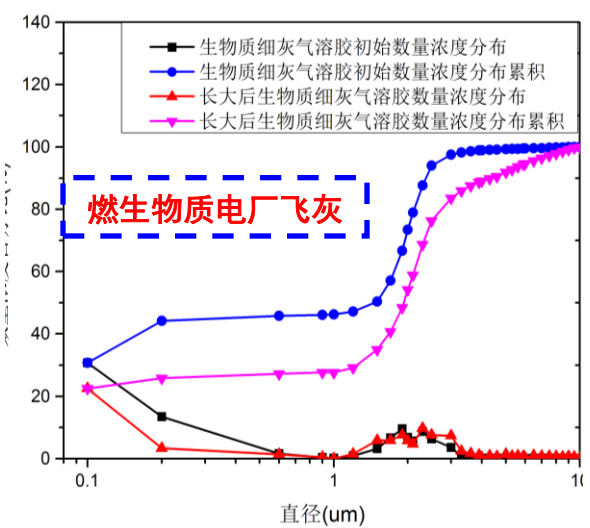
不同源细颗粒物核化凝结长大特性

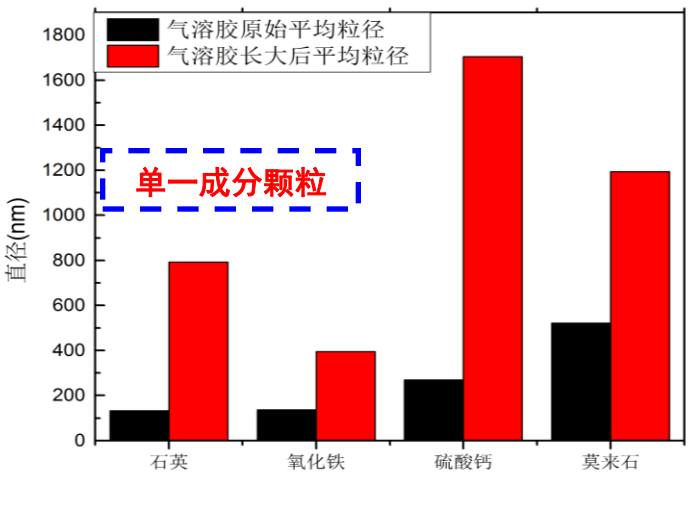
- 建立激光测试技术，发现水汽核化凝结大幅度形成大颗粒；颗粒特性、环境湿度、温度对凝结有影响。
- 该方向可望用于脱硫塔后部细颗粒脱除



温度/℃	速度/(m/s)	入口浓度/(cm^{-3})	$\overline{D}$/μm
40	0.21	3.03E+08	2.005
		6.05E+08	1.759
	0.42	1.51E+08	0.540
		3.03E+08	0.381



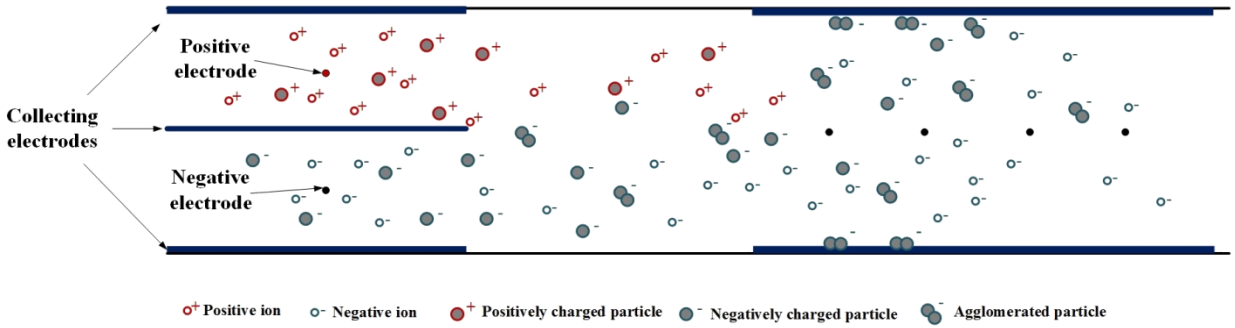




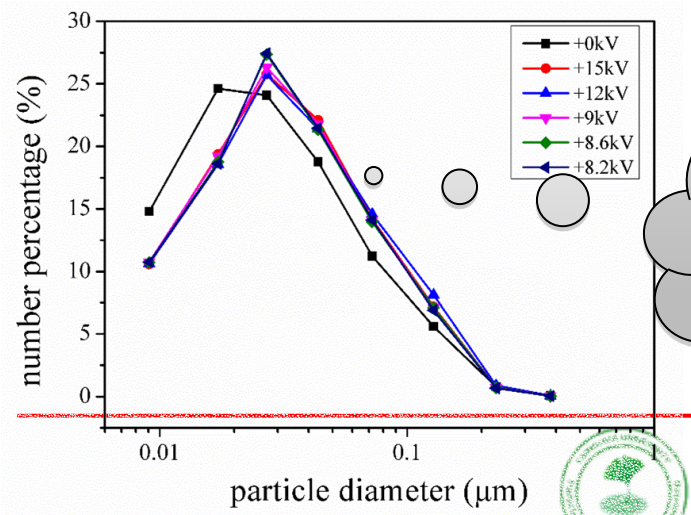
四、研究了细颗粒物在不同荷电条件下的荷电特性及高效脱除

细颗粒物荷电特性研究-双极荷电

- **通过PIV光学检测结合ELPI在线检测方法，研究不同放电参数和电极布置方式下颗粒的凝并和收集特性，发现不同电压匹配可以增强细颗粒聚并。**

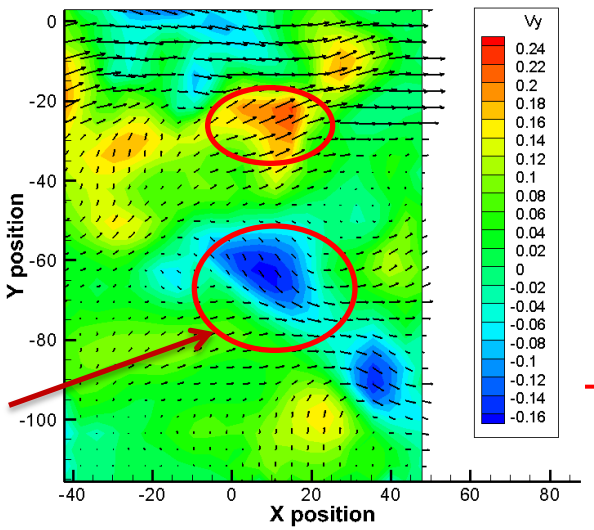


双极性电凝并过程示意图



不同电压配合形式下分级颗粒数目比例（锯齿线）

双极荷电能增强细颗粒物有效凝并



Particle And Combustion Engineering

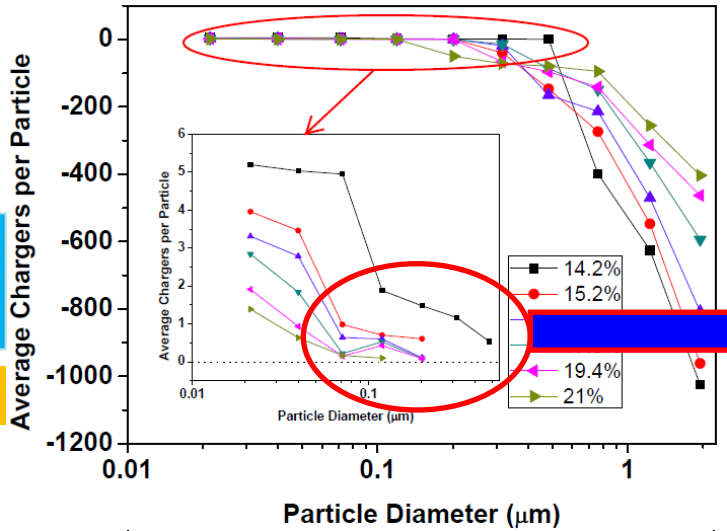
Department of Thermal Engineering

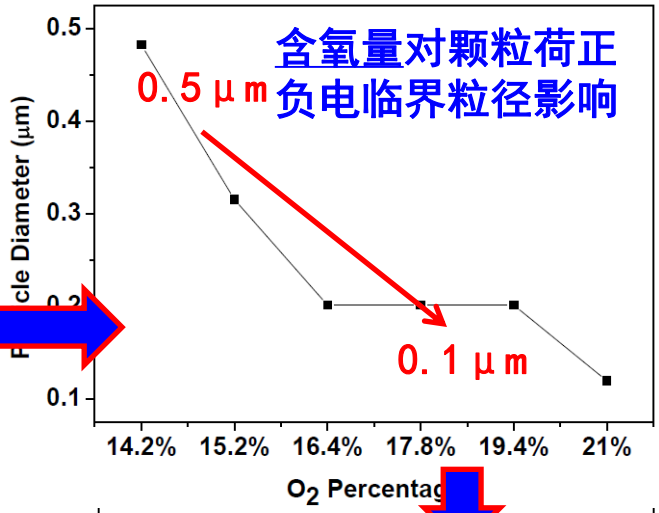
基于脉冲放电电凝并的细颗粒物高效脱除研究

- **利用脉冲放**电电负性气体加强$PM_{2.5}$**荷**电和颗粒团聚；
- **脉冲放**电+**直流收**尘可以实现细颗粒物高效脱除；

利用电负性气体研究
强化细颗粒荷电

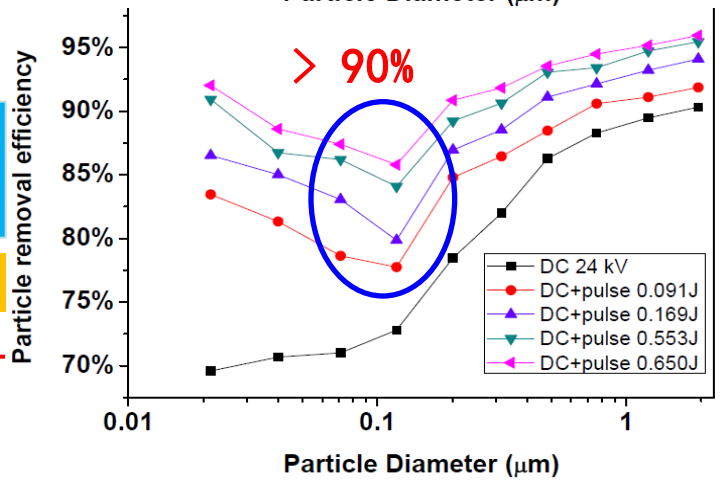
荷电临界粒径，最优参数

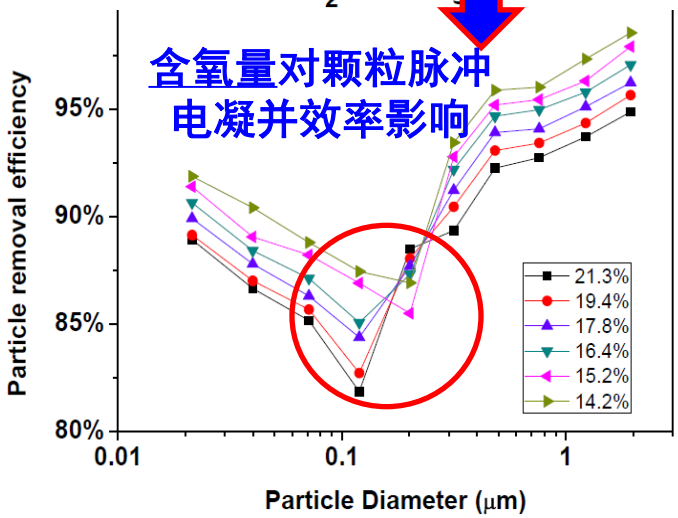




基于脉冲放电电凝并
高效脱除细颗粒物

荷电特性影响，烟气影响

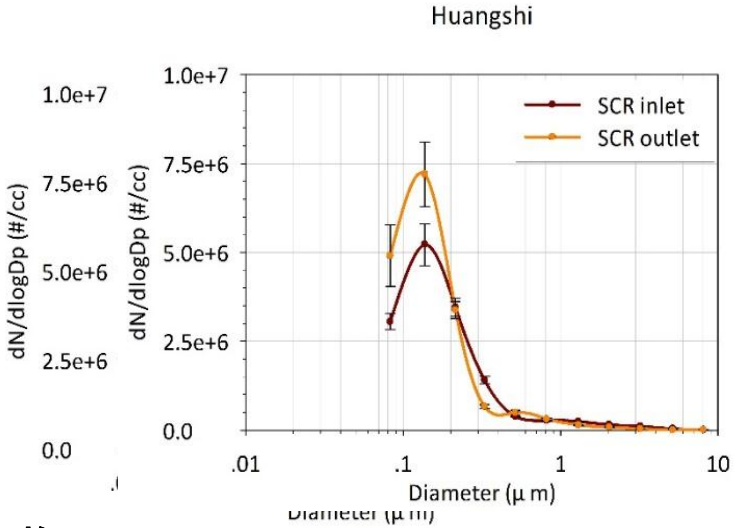




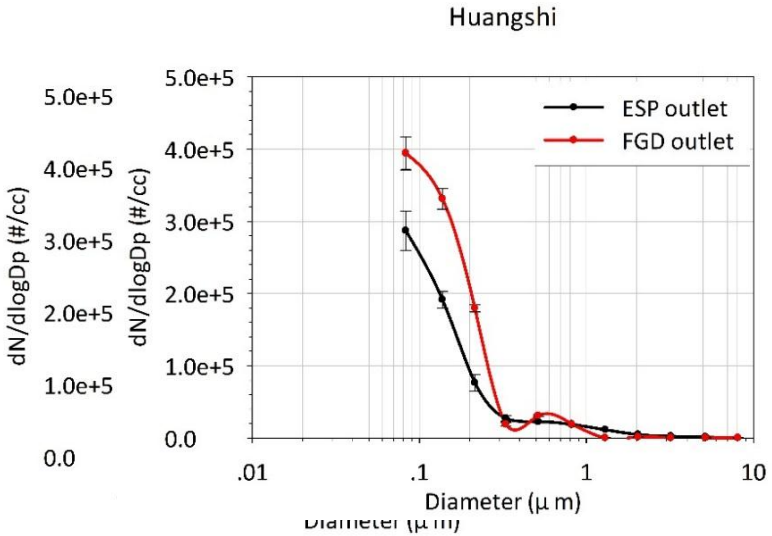
五、获得SCR和WFGD中PM2.5的转化规律，提出了基于汽相变和化学团聚增强燃煤烟气PM2.5脱除的方法

脱硝和脱硫增加细颗粒的排放

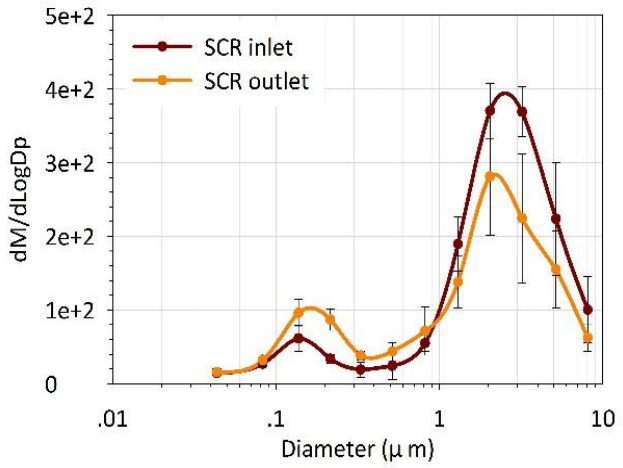
脱硝之后，细颗粒物（≤1μm）浓度上升

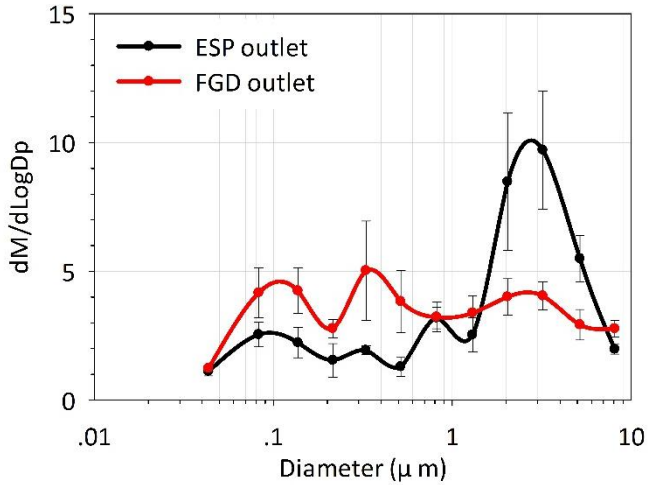


脱硫之后，细颗粒物（≤1μm）浓度上升。



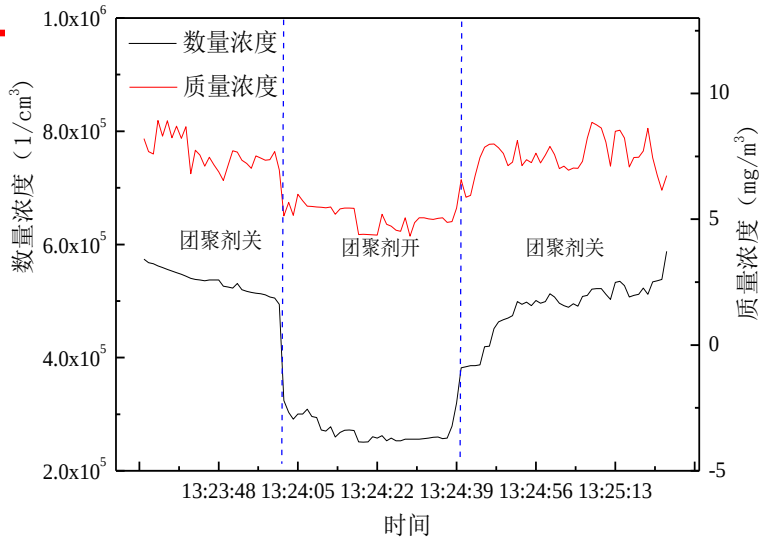
脱硝后，颗粒物中 NH_4^+ SO_4^{2-} 浓度明显升高，形成硫酸铵、硫酸氢铵气溶胶





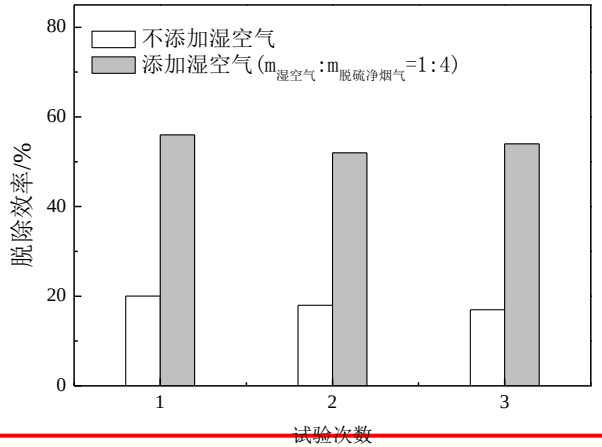
增强电除尘和WFGD脱除$PM_{2.5}$

应用化学团聚技术：在电除尘器入口烟气中喷入团聚剂溶液可使电除尘出口颗粒物浓度降低30%以上；脱硫液中添加化学团聚剂可使脱硫系统出口细颗粒物浓度降低40%左右



应用化学团聚增强电除尘脱除$PM_{2.5}$

应用水汽相变技术：通过脱硫塔入口烟气温湿度调节和WFGD系统的过程优化，并在湿法脱硫净烟气中注入适量湿空气，可使$PM_{2.5}$排放浓度降低40-50%左右



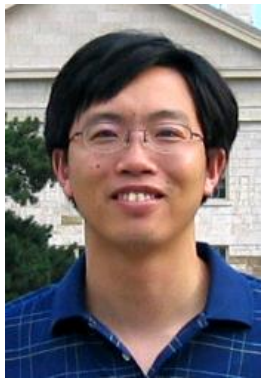
添加湿空气增进$PM_{2.5}$脱除的性能

信心来自于大家的关注

- 雾霾污染是一个复杂的污染
- 治理雾霾的核心是源头控制
- 要重视二次颗粒物的形成的一次来源：SO2、NOx、VOC和NH3
- 燃煤仍是重点，但电站已经不是重点
- 从大点源到量广面大的小点源和面源的控制
- 从粗放到精细的控制
- 从单一控制到多元、多场的控制

感谢颗粒与燃烧课题组团队

李水清



- 教授，主要从事颗粒动力学、颗粒过滤基础、煤富氧燃烧以及生物质燃烧积灰等研究。已完成和在研国家自然科学基金5项，国际合作项目多项。

卓建坤

- 讲师，主要从事生物质先进发电技术、固体废弃物低温热解技术应用基础研究和示范，开展国家工程研究中心的基地建设和

宋蔷

- 副教授，主要从事燃烧污染物（氮氧化物和颗粒物）形成和排放控制技术的研究。承担863重大项目课题、科技攻关课题、自然科学基金、国际合作和企业合作等项目。

Special acknowledgment to

宣小平博士、黄斌博士
赵香龙博士、岳勇博士
孙旭光博士、彭科博士
张小峰博士、王世昌博士
王珲博士、孟忠伟博士
徐晓光博士、何百磊博士
徐海卫博士、龙正伟博士
柳冠青博士、唐君实博士
王宇博士、熊刚博士
张易扬博士、吴宁博士
方朝钢博士、卢智恒博士
张志昊博士、李庚达博士

Particle And Combustion Engineering Research Group
Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

希望人类与地球同命运

We are with the Earth

谢谢！(Thanks)