



# 北京PM<sub>2.5</sub>与冬季采暖热源的关系 及治理措施

倪维斗

清华大学热能工程系教授 中国工程院院士

2013年11月16日

# 主要内容

1

雾霾主要来自PM<sub>2.5</sub>

2

PM<sub>2.5</sub>的形成机制

3

NO<sub>x</sub>排放强度对比

4

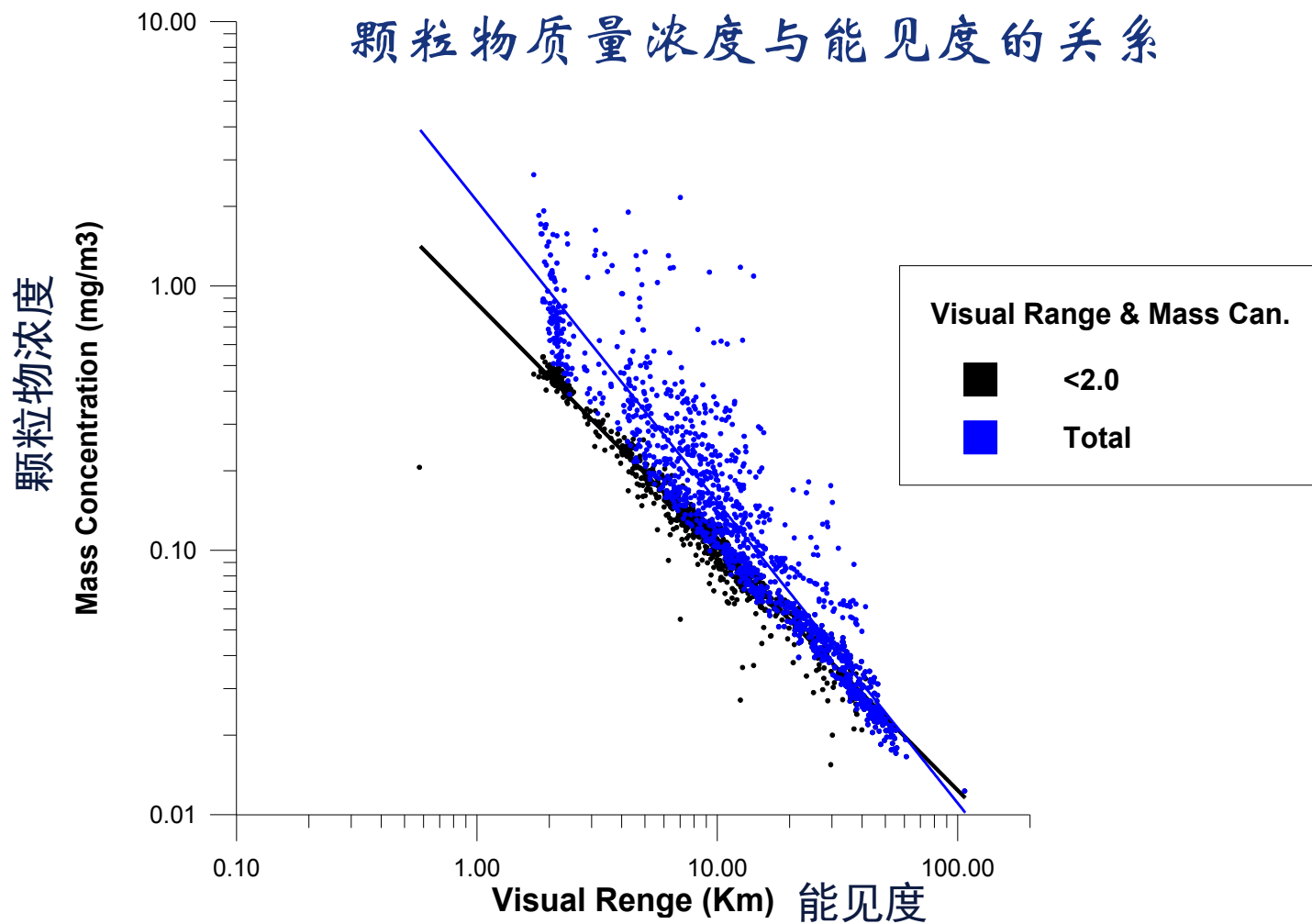
结论

# 2012-13冬季，全国多地遭遇雾霾天气

- 全国多地空气“重度污染”，部分城市污染指数突破测量上限，京津冀地区影响尤为明显
  - 2012年1月12日，北京持续空气六级严重污染，可吸入颗粒物浓度（ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）：北京786，天津500，石家庄960
  - 2013年10月20日哈尔滨冬季供暖第一天，空气严重污染，学校纷纷关闭， $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达1000
- 政策颁布，治理大气污染
  - 2013年9月国务院发布《大气污染防治行动计划》（国十条），要求用5年时间，全国空气质量总体改善，重污染天气大幅减少。
  - 2013年9月北京发布《北京市2013-2017年清洁空气行动计划》，要求2017年，全市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度比2012年下降25%。
  - **“煤改气”是其中一个重点**，要求2017年，燃煤总量比2012年削减1300万吨，改用天然气等清洁能源，具体推动建设包括燃气热电联产替代燃煤热电联产、削减农村散煤、煤制天然气、全面整治小锅炉、燃煤锅炉清洁改造等。

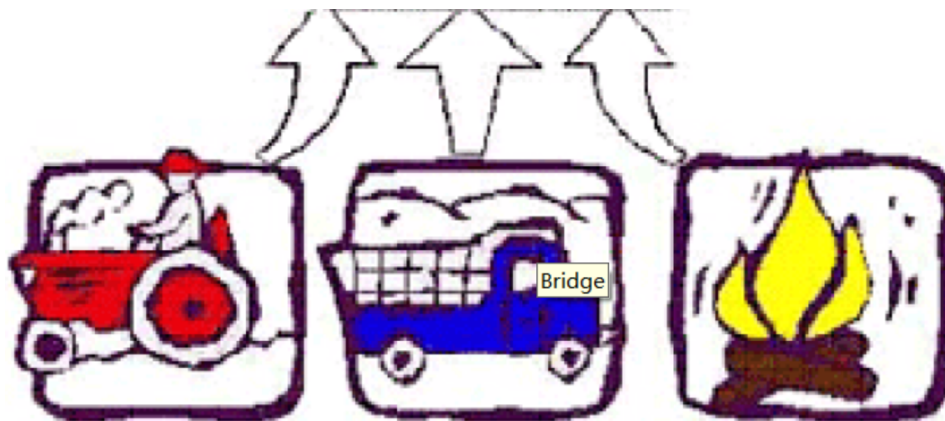


# 大气灰霾主要来自PM<sub>2.5</sub>



# 城市大气细颗粒物PM<sub>2.5</sub>的成分

- 工业、建筑，交通、电力、其它生产和生活活动以及天然源排放的**一次颗粒物**



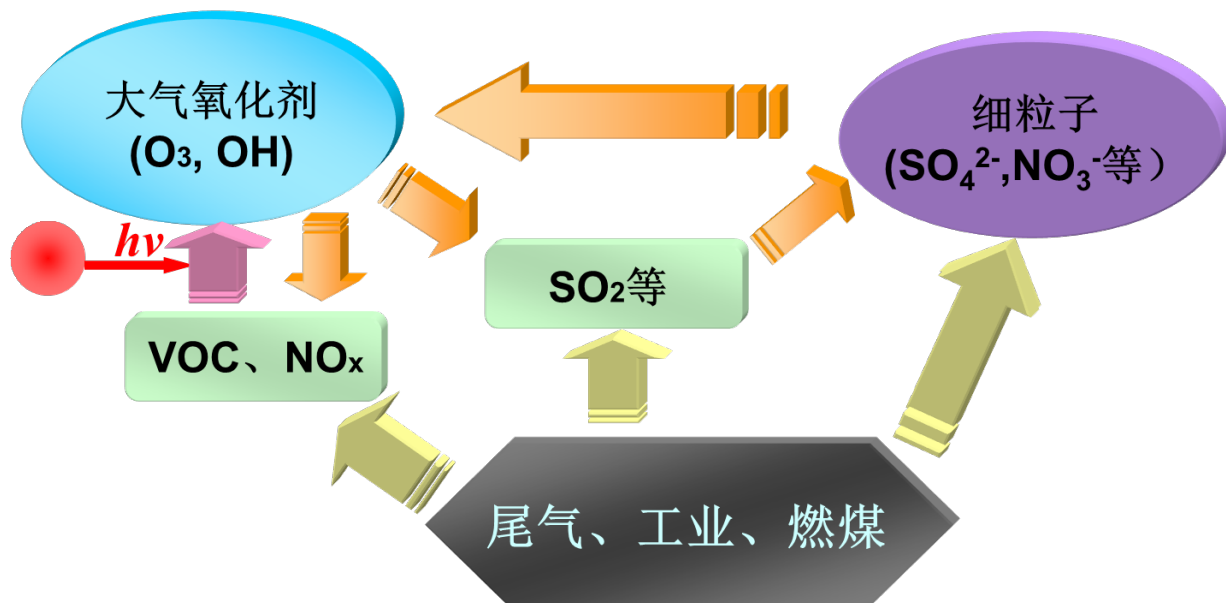
- 各种尘（沙尘、风扬尘、建筑、道路）
- 各种燃烧过程和工业过程等
  - 金属元素，碳黑/黑碳/元素碳，一次有机物等

- 由气体向颗粒物转化而生成的**二次颗粒物**
  - VOCs 二次有机颗粒物
  - SO<sub>2</sub> 硫酸盐颗粒物
  - NO<sub>x</sub> 硝酸盐颗粒物
  - NH<sub>3</sub> 铵盐颗粒物

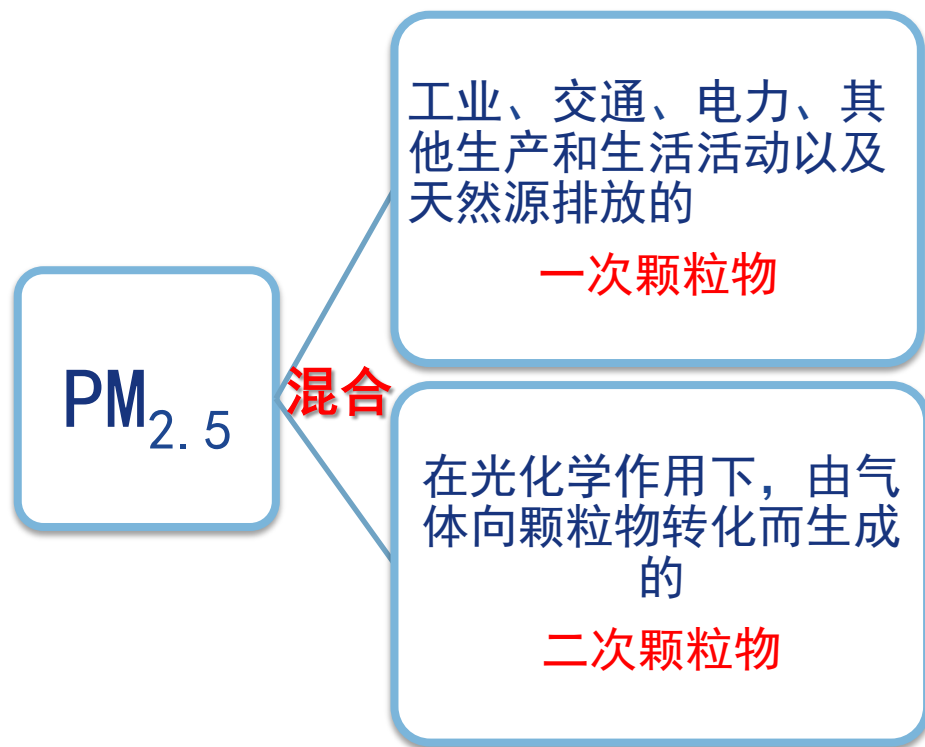
# 大气中的化学转化过程

- $\text{NO}_x$ 和挥发性有机物VOC在阳光紫外线的作用下能立即发生大量的光化学反应生成臭氧和大量各种自由基，使大气的氧化性大大增强。同时，强氧化性的自由基将一次气态污染物转化成二次细颗粒物。
- 细颗粒物颗粒小，比表面大，起反应床的作用，使气体向颗粒物的转化不断进行，导致两者积聚，浓度升高。

大气氧化剂（臭氧）可以将直接排放的气体污染物转化成细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )



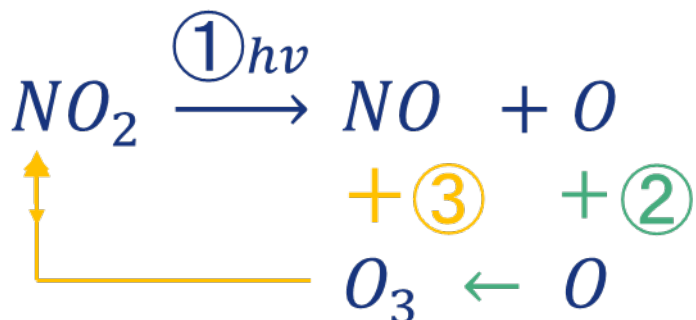
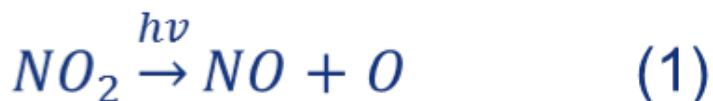
# 城市大气细颗粒物PM<sub>2.5</sub>的来源



- PM<sub>2.5</sub> 占到PM<sub>10</sub>的50%-80%
- 在许多大城市和特大城市中监测表明，二次颗粒物占50%-80%左右，二次颗粒物在PM<sub>2.5</sub>中的比例在重污染时期，明显增加
- 二次颗粒物形成是由于大气氧化性增强。其人为原因来自NO<sub>x</sub>和VOC的排放。

# NO<sub>x</sub>与VOC增强了大气氧化性

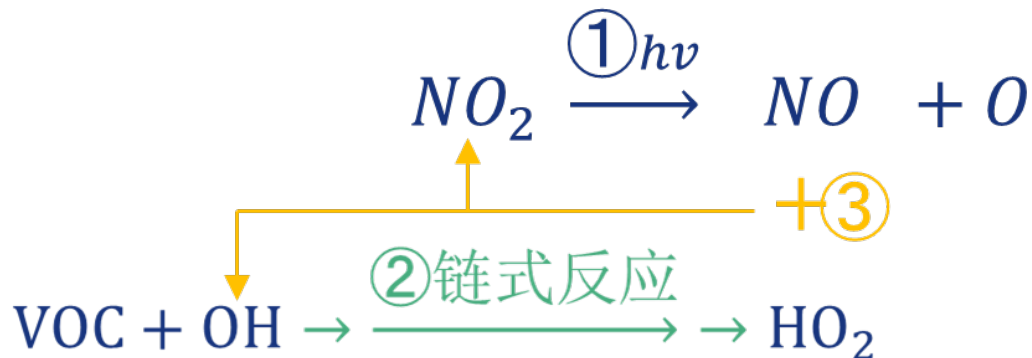
原循环反应：



当NO<sub>x</sub>与VOC存在时：



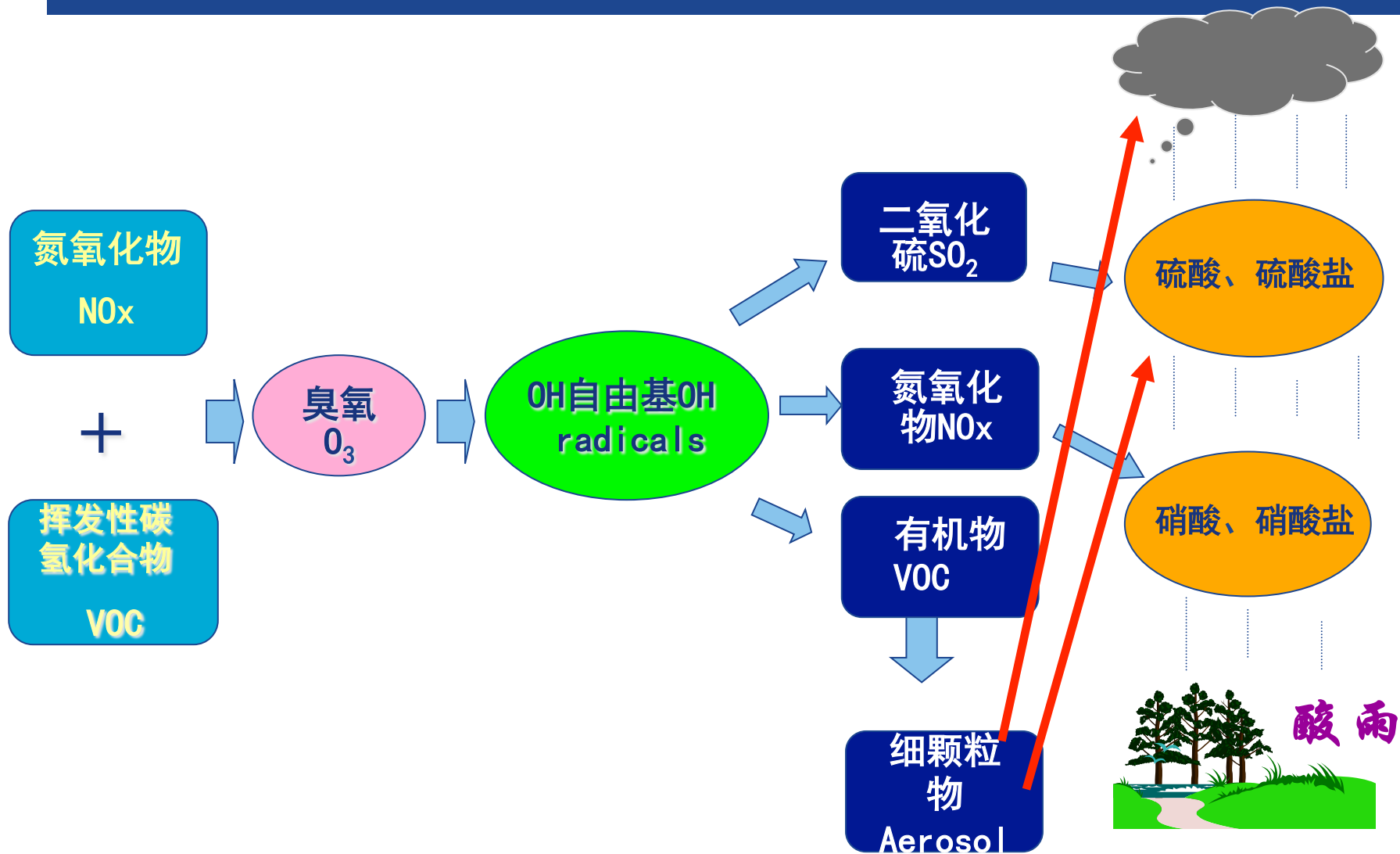
HO<sub>2</sub> + NO → NO<sub>2</sub> + OH (反应很快) 消耗掉(1)中产生的NO, 导致(3)无法进行, O<sub>3</sub>积聚



人为排放的NO<sub>x</sub>和VOC增强了大气氧化性。



# 大气氧化性增强导致二次污染—灰霾、光化学烟雾和酸雨





# 北京2013年1月12日重污染过程

西直门北(交通污染监控点) PM10 2013年1月12日 23:00

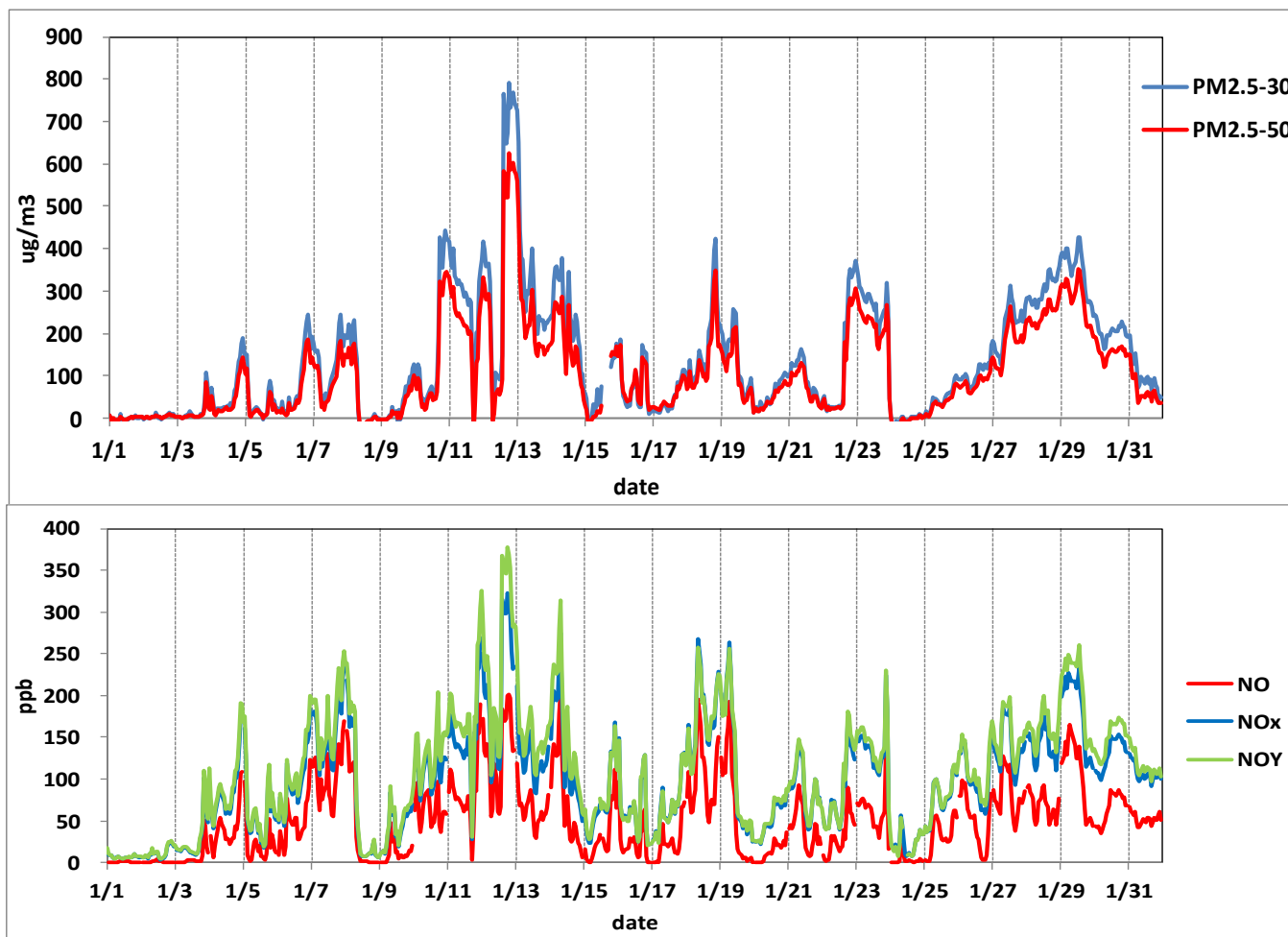
实时浓度 (微克/立方米)	24小时均值 (微克/立方米)	空气质量分指数 (IAQI)	级别及类别
<b>993</b>	<b>528</b>	<b>428</b>	<b>六级 严重污染</b>

西直门北 过去24小时 PM10 浓度变化曲线图 单位:微克/立方米



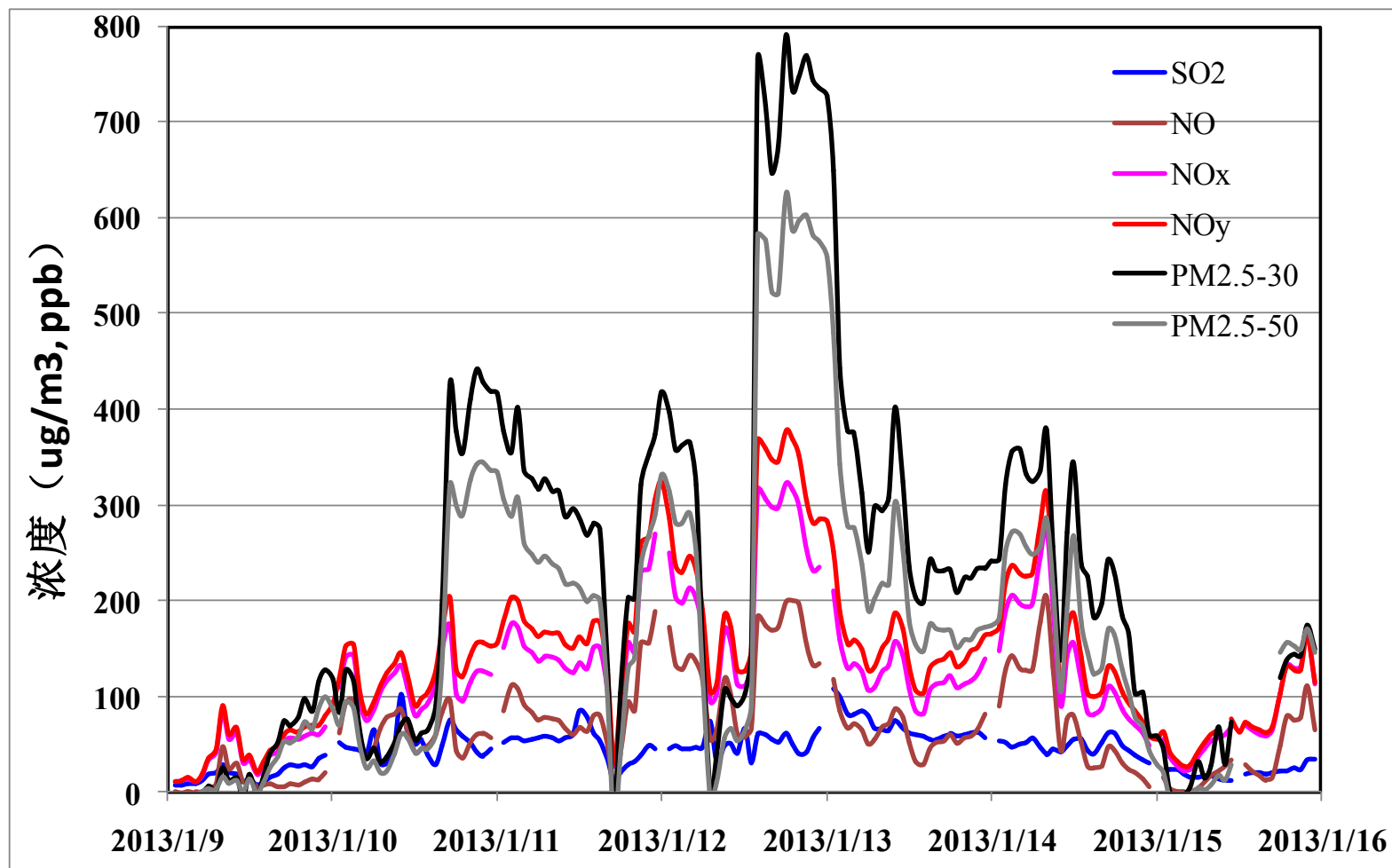
来源：网络数据（西直门北）  
 网络图片（西城区某住宅区，  
 上图：9日上午8时，  
 下图：12日上午8时）

# 北大站点2013年1月PM<sub>2.5</sub>和NO<sub>x</sub>变化过程



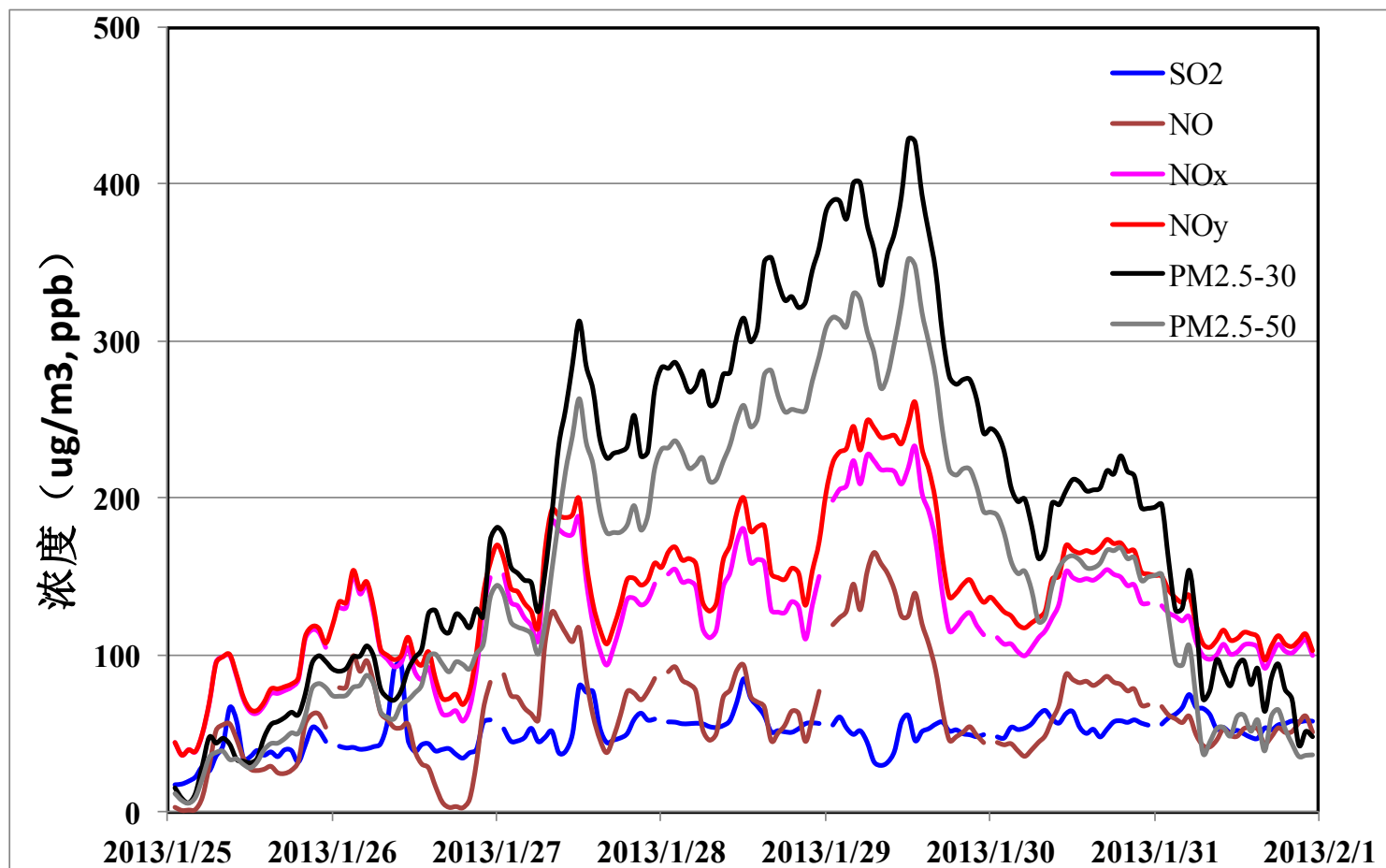
重度污染情况下大气中的NO<sub>x</sub>与PM<sub>2.5</sub>的同步变化

# 北大校园2013年1月中旬空气监测数据



重度污染情况下大气中的NO<sub>x</sub>与PM<sub>2.5</sub>的同步变化

# 北大校园2013年1月下旬空气监测数据



重度污染情况下大气中的NOx与PM2.5的同步变化



## 出现空气重污染现象时的特点

$\text{SO}_2$ 浓度低水平持平，变化小

$\text{NO}_x$ 与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化**强相关**，同步变化



## 城市PM<sub>2.5</sub>的来源-小结

- 大气灰霾主要来自PM<sub>2.5</sub>，包括工业等活动直接排放的一次颗粒物、由气体向颗粒物转发的二次颗粒物。
- PM<sub>2.5</sub>占到PM<sub>10</sub>的50%-80%，其中二次颗粒物组分占PM<sub>2.5</sub> 50%-80%左右，而且在重污染时期，二次颗粒物的组分在PM<sub>2.5</sub>中的比例明显增加。
- 二次颗粒物形成是由于大气氧化性增强。其人为原因来自NO<sub>x</sub>和VOC的排放。



# 治理NO<sub>x</sub>与VOC是解决PM<sub>2.5</sub>的重点

- NO<sub>x</sub>与VOC是构成PM<sub>2.5</sub>重度污染的元凶：
  - 增加大气氧化性，导致多种气体氧化成颗粒物
  - 对人体有害；NO<sub>x</sub>在大气中被氧化、吸水形成H<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>，有消光作用，与有机物结合形成有机硝酸质，etc.
- 控制NO<sub>x</sub>与VOC是解决PM<sub>2.5</sub>的重点
  - NO<sub>x</sub>来源：主要是化石燃料燃烧，易集中控制
  - VOC来源：化工业，汽车尾气，洗衣房，炊事、秸秆燃烧等



# 单位燃料NO<sub>x</sub>的排放强度

燃烧设备	排放强度		备注
	kg/tce	mg/m <sup>3</sup> 烟气	
大型燃煤锅炉热电联产	2	200	脱硝后
燃煤循环流化床	<0.5	<50	近年来加设SNCR
大型天然气锅炉	0.8	100	脱硝后, 国家标准, 相当于1.1 g/m <sup>3</sup> 天然气
天然气热电联产燃气蒸汽联合循环	1.2	52	脱硝后, 国家标准, 相当于1.5 g/m <sup>3</sup> 天然气
	0.7	30	脱硝后, 北京标准, 相当于0.9 g/m <sup>3</sup> 天然气

燃气热电联产NO<sub>x</sub>的排放量为常规大型燃煤热电联产的60% (同样热量的燃料)。



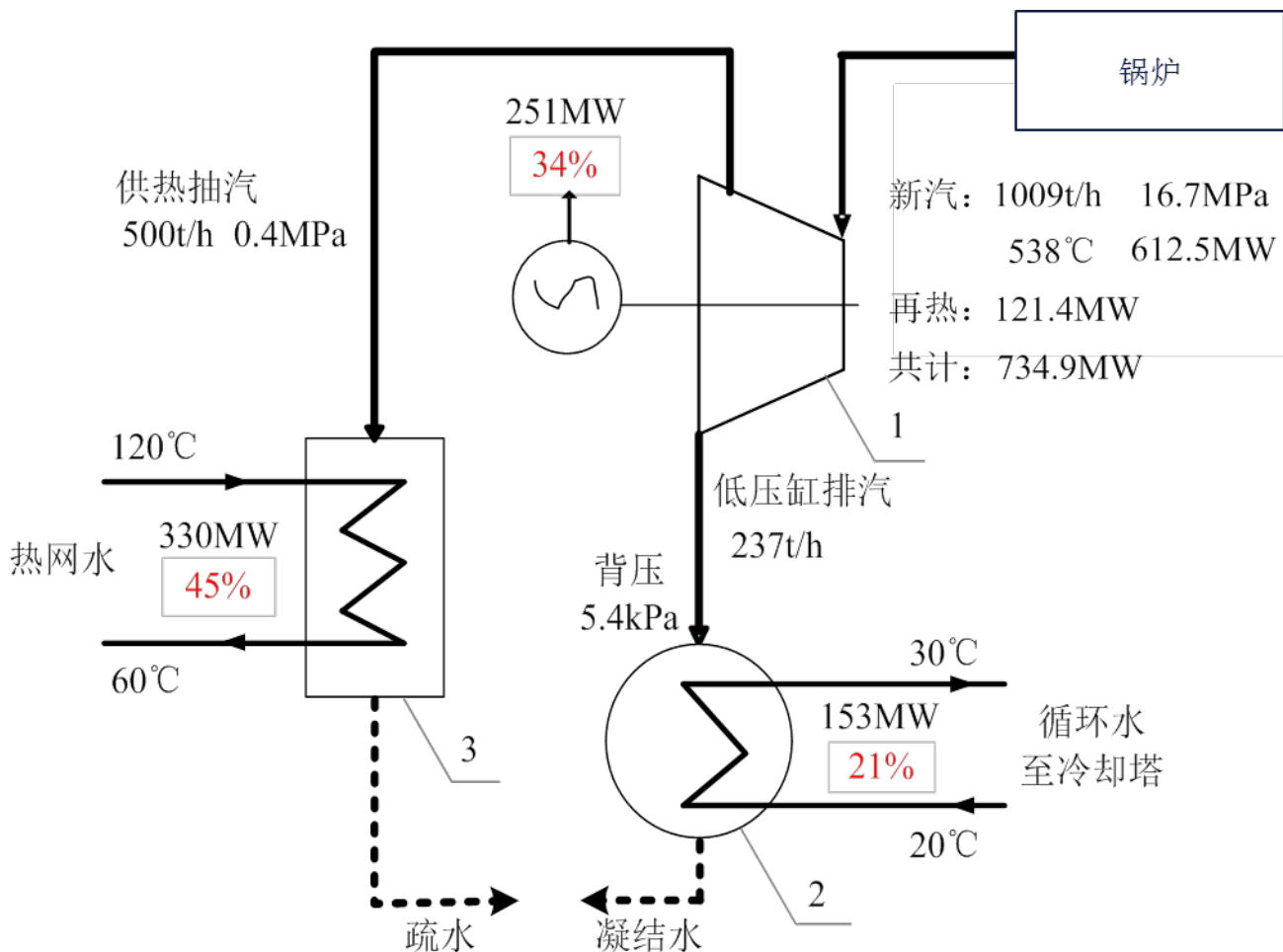
# 燃气热电联产特点

- 为保证发电效率，需要高温燃烧，产生大量NO<sub>x</sub>
- 与燃煤热电联产相比，热电比小
  - 热电联产时，燃气热电联产热电比小，也就是发电量大，为得到同样的热量，燃气热电联产需燃烧更多的燃料，导致燃气热电联产NO<sub>x</sub>排放量比燃煤热电联产更多

# 燃煤热电联产集中供热系统

供1亿m<sup>2</sup>为例

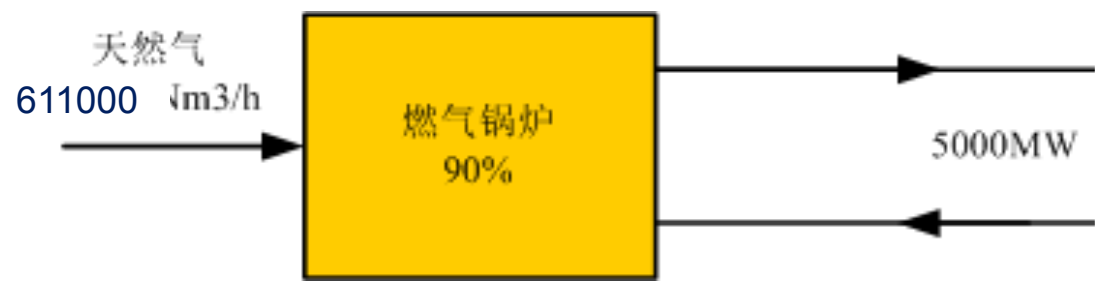
- 最大燃料消耗量  
1367t/h标煤
- 采暖期燃料消耗  
总量394万吨标煤
- NO<sub>x</sub> 瞬态排放量  
2.7t/h
- NO<sub>x</sub>总排放量0.8  
万吨



某亚临界300MW供热机组-热电联产供热系统图

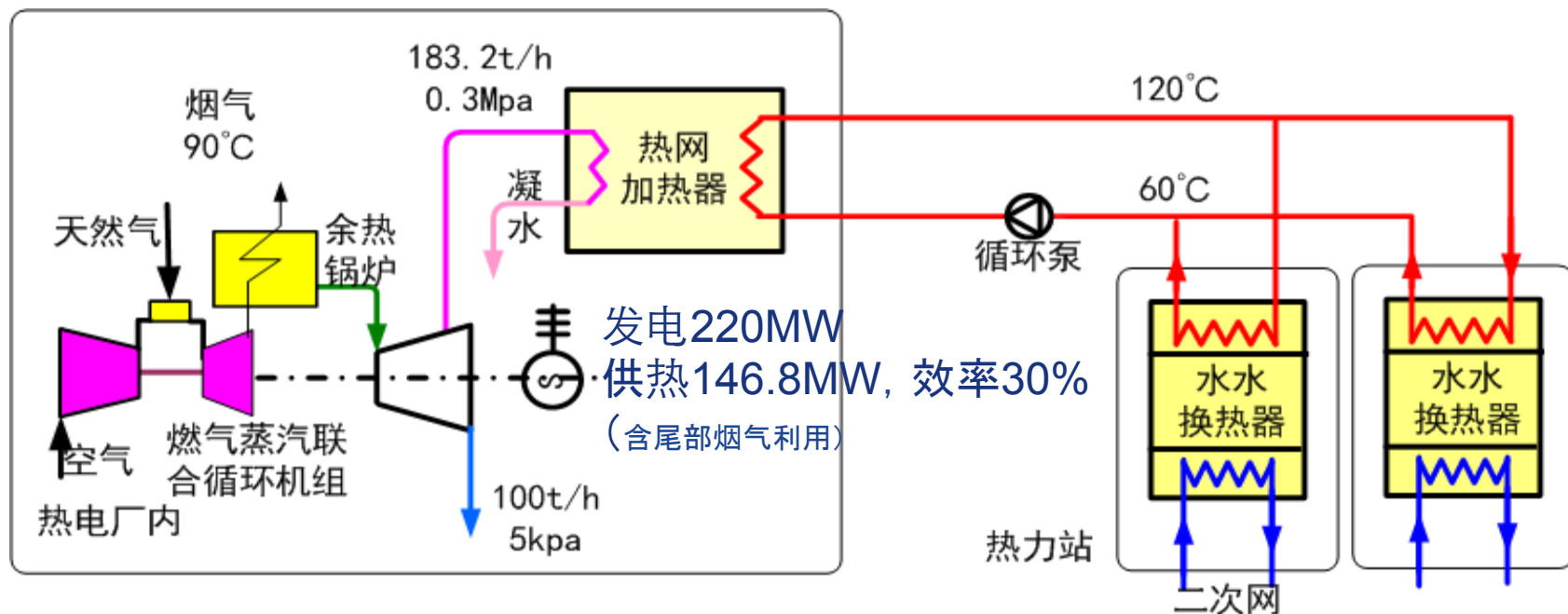
# 燃气锅炉供热

供1亿m<sup>2</sup>为例



- 最大燃料消耗量  
51.4万m<sup>3</sup>/h
- 采暖期燃料消耗  
总量14.8亿m<sup>3</sup>
- NO<sub>x</sub> 瞬态排放量  
0.6 t/h
- NO<sub>x</sub>总排放量  
0.2万吨

# 燃气热电联产集中供热系统

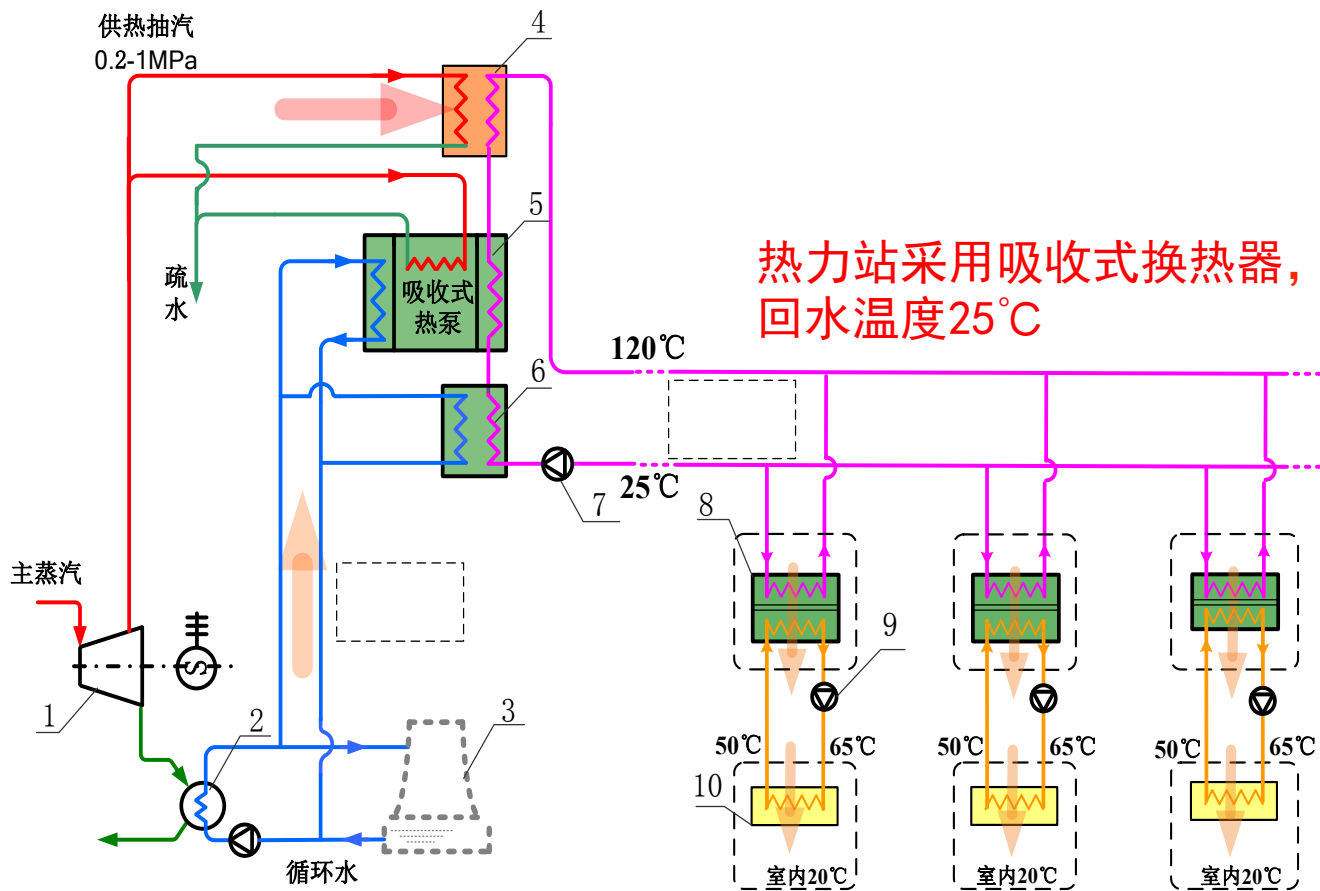


某9E——220MW机组-热电联产供热系统图

供1亿m<sup>2</sup>为例

- 最大燃料消耗量154万m<sup>3</sup>/h
- 采暖期燃料消耗总量44.4亿m<sup>3</sup>
- NO<sub>x</sub>瞬态排放量2.3t/h
- NO<sub>x</sub>总排放量0.7万吨(国标)

# 基于吸收式换热的燃煤热电联产集中供热系统



供1亿m<sup>2</sup>为例

- 最大燃料消耗量 904t/h标煤
- 采暖期燃料消耗总量260万吨标煤
- 最大NO<sub>x</sub> 排放量 1.8t/h
- 采暖期NO<sub>x</sub>排放总量0.5万吨

某亚临界300MW供热机组-热电联产供热系统图

# 综合比较

(供热面积均为1亿m<sup>2</sup>。)

供热方式	瞬态燃料消耗量		采暖期总量		发电功率	发电量	采暖期NO <sub>x</sub> 瞬态排放量	采暖期总排放NO <sub>x</sub> 量
	吨标煤/h	万立方米/h	万吨标煤	亿立方米	万MW	亿度	吨/h	万吨
燃煤热电联产	1367	-	394	-	0.38	108.8	2.7	0.8
燃气锅炉	-	51	-	14.8	-	-	0.6	0.2
燃气热电联产	-	154	-	44.4	0.70	201.6	2.3 (国标) 1.4 (北京)	0.7 (国标) 0.4 (北京)
基于吸收式换热的燃煤热电联产	904	-	260	-	0.24	67.8	1.8	0.5

目前北京城区的四家燃煤电厂（华电、国华、石景山、高井）被改成了天然气热电联产。但若对城市供热贡献相同，燃气热电联产并没有减少NO<sub>x</sub>的排放量。而且，燃煤可以做得更好。

# 燃煤可以做得更好

## 实测结果

来源：上海外高桥第三发电厂2013年1-6月报告

参数	单位	数量	备注
发电量	亿千瓦时/半年	57.28	两台机组：#7，#8
煤耗	克/千瓦时	274.65	
SO <sub>2</sub>	kg/tce	0.47	国家环保标准：2kg/tce； #7经检修，0.17kg/tce
NO <sub>x</sub>	kg/tce	0.37	国家环保标准：4.5kg/tce； #8机组排放量，装有SCR； 燃气热电联产排放量为 1.2kg/tce
粉尘	kg/tce	0.12	国家环保标准：0.5kg/tce

我国自主先进的清洁燃煤技术污染物排放非常少，发电时NO<sub>x</sub>的排放量低于燃气！



# 若将上海外高桥燃煤电厂的技术运用到热电联产中

上海外高桥燃煤电厂技术是我国自主的先进技术，若运用到热电联产中，NO<sub>x</sub>排放将会大量减少。

(供热面积均为1亿m<sup>2</sup>。)

供热方式	瞬态燃料消耗量		采暖期总量		发电功率	发电量	采暖期NO <sub>x</sub> 瞬态排放量	采暖期总排放NO <sub>x</sub> 量
	吨标煤/h	万立方米/h	万吨标煤	亿立方米	万MW	亿度	吨/h	万吨
燃煤热电联产	1367	-	394	-	0.38	108.8	2.7	0.8
基于吸收式换热的燃煤热电联产	904	-	260	-	0.24	67.8	1.8	0.5
基于上海外高桥技术的燃煤热电联产	1922	-	553	-	0.34	99.0	0.71	0.2
基于上海外高桥、吸收式换热技术的燃煤热电联产	878	-	253	-	0.16	45.3	0.33	0.09
燃气锅炉	-	51	-	14.8	-	-	0.6	0.2
燃气热电联产	-	154	-	44.4	0.70	201.6	2.3 (国标) 1.4 (北京)	0.7 (国标) 0.4 (北京)



采用我国自主的清洁煤燃烧技术，可以以燃煤为燃料，通过热电联产产生同样的热量，而NO<sub>x</sub>的排放量约仅为燃气蒸汽联合循环方式的13%，甚至低于天然气锅炉供热！



# 我国天然气资源短缺

- 发达国家天然气占其总能源30%以上，但目前我国天然气只占总能源不到5%，再未来考虑深度开发和进口，天然气也不会超过8%，除非全面开发成功页岩气。
- 北方城市纷纷“煤改气”形成天然气供应严重紧张<sup>①</sup>
  - 发改委指今年缺口或在220亿m<sup>3</sup>，11月连发两个通知预警今冬可能出现“气荒”<sup>②</sup>
  - 中石油人士表示：今冬明春国内天然气供需矛盾为历年最严重一次



## 重要结论

- 造成大气灰霾的主要原因是PM<sub>2.5</sub>，二次颗粒物的组分约占PM<sub>2.5</sub> 50%-80%。治理二次颗粒物是减少PM<sub>2.5</sub>总量，治理重度灰霾的关键。
- NO<sub>x</sub>导致大气氧化性增强，形成大量二次颗粒物，是大气重度灰霾的元凶。
- 盲目进行“热电联产煤改气”，用燃气热电联产替代燃煤热电联产并不能缓解大气污染。



# 谢谢！ 欢迎提问！

## 参与研究

清华大学 热能系

清华大学 建筑节能研究中心

北京大学 环境科学系

清华大学 热能工程系

倪维斗 院士

江 亿 院士

唐孝炎 院士

岳光溪 院士