



北京 PM_{2.5} 与冬季采暖热 源的关系及治理措施 项目成果报告

清华大学建筑节能研究中心

2014.8.27

项目信息

项目资助号:R-1308-18879

Grant Number:R-1308-18879

项目期:2013年8月1日至2014年1月31日

Grant period: 08/01/2013-01/31/2014

所属领域:建筑

Sector: Building

项目概述: 本项目根据 PM2.5 的形成机理, 提出在不同的地理、气象环境下(城市与农村)控制 PM2.5 生成量最关键的控量, 研究在不同的环境条件下氮氧化物 NOX 和挥发性碳氢化合物 VOC 对于大气氧化性的影响, 得出控制 PM2.5 生成的最关键的控因素。对北京市的冬季供热各种热源进行调研测试与计算, 得出不同燃料、不同燃烧方式下单位燃料产出的氮氧化物 NOX 和挥发性碳氢化合物 VOC 以及二次生成的 PM2.5 总量。基于北京市的供热规划进行情景分析, 分析按照目前的规划北京在 2015 年的采暖能耗以及对 PM2.5 生成的贡献量。根据以上分析, 提出从冬季供热热源调整的方面减少 PM2.5 排放量的合理政策建议与供热的技术发展方向, 并明确指出其经验效益与节能减排效果, 针对此优化情景, 提出具体的政策建议与技术措施建议。

Project Description: Based on the formation mechanism of PM2.5, researches are conducted on the impacts of NOx and VOC on atmospheric oxidation, by which we can identify the key control variables of PM2.5 generation. It is found that the total NOx emission amounts of various winter heating systems by investigations, tests and calculations of a wide range of Beijing winter heating sources. According to scenario analyses of Beijing current heating system planning, it could be drawn out that the entire energy consumption by heating systems and its contribution to PM2.5 formation in 2015. On the basis of above studies, some policy proposals and winter heating system development directions could be put forward for declining PM2.5 emissions from adjusting winter heating sources structure. It will be made clear that the economic and energy saving effects of these policies and technology directions.

项目成员: 江亿 唐孝炎 倪维斗 岳光溪 杨旭东 燕达 胡珊 王静贻

Project team: Yi Jiang, Xiaoyan Tang, Weidou Ni, Guangxi Yue, Xudong Yang, Da Yan, Shan Hu, Jingyi Wang,

关键词: 北京 PM_{2.5} NO_x 冬季采暖

Key Word: Beijing PM_{2.5} NO_x Centralized district heating

本报告由能源基金会资助。

报告内容不代表能源基金会观点。

This report is funded by Energy Foundation.
It does not represent the views of Energy Foundation.

摘要

近两年冬季，我国多地遭遇了严重的雾霾天气，尤其是京津冀地区，空气重度污染，影响了人们的生产、生活。为了治理严重灰霾天气，北京市政府采取了热电联产“煤改气”、煤制天然气、削减农村散煤等一系列措施。这些措施对减少灰霾有多大的作用，应该如何通过调整采暖方式来减少北京灰霾？

针对这些问题，本研究首先研究了 $PM_{2.5}$ 的形成机制与造成严重灰霾的关键因素；然后从采暖方式、采暖能耗水平等角度分析了北京市的冬季采暖热源现状，包括城市的集中供暖现状、农村分散采暖现状，在此基础上，通过调研、计算、测试等方法，比较了城市各类集中供暖热源、农村分散采暖方式对 $PM_{2.5}$ 的形成的影响；最后根据以上的研究成果，给出相应的如何通过调整采暖模式来治理北京 $PM_{2.5}$ 的政策建议。

研究表明：减少 NO_x 排放量是治理城市 $PM_{2.5}$ 的关键，而热电联产“煤改气”措施并不能显著降低 NO_x 排放量，反而会大幅增加天然气用量，造成用气矛盾，因此不宜作为治理大气污染的有效措施来大范围推广。农村的一次 $PM_{2.5}$ 排放总量远高于城市地区大型锅炉的排放水平，因此，农村应该作为北京市 $PM_{2.5}$ 减排的重要突破点之一，给予相应的重视，具体措施可以通过用型煤锅炉或生物质锅炉替代土暖气，这能有效减少农村地区的一次 $PM_{2.5}$ 排放。

目 录

1	引言	6
2	研究技术路线	6
3	细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的主要成分及形成机制	7
3.1	细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的主要成分	7
3.2	细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的形成机制	8
3.3	小结	10
4	北京市冬季采暖现状	11
4.1	城市	11
4.2	农村	11
5	北京市各种采暖热源对 $PM_{2.5}$ 形成的贡献分析	12
5.1	城市集中供热热源对 $PM_{2.5}$ 形成的贡献分析	12
5.2	北京市农村分散采暖热源对 $PM_{2.5}$ 形成的贡献分析	19
6	关于合理利用燃煤与天然气与优化供热能源结构的讨论	20
6.1	燃煤的合理利用	20
6.2	天然气的合理利用	24
7	对北京市采暖热源优化与 $PM_{2.5}$ 治理的政策建议	25
7.1	总体能源结构	25
7.2	城市采暖	26
7.3	农村采暖	26
	参考文献	27

1 引言

2012 年至 2013 年冬季,我国多地遭遇了严重的雾霾天气,空气重度污染,部分城市空气污染指数突破可吸入颗粒物浓度上限,尤其是京津冀地区。2012 年 1 月 12 日,北京持续空气六级严重污染,北京的可吸入颗粒物浓度高达 $786 \mu\text{g}/\text{m}^3$,天津为 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$,石家庄¹为 $960 \mu\text{g}/\text{m}^3$,超过了我国可吸入颗粒物浓度上限($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$)十倍以上²。2013 年 10 月 20-23 日,黑龙江省刚开始冬季采暖,多市即发生了严重的雾霾,空气质量急剧恶化,PM_{2.5}持续“爆表”,哈尔滨部分监测点³PM_{2.5}一度高达 $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。雾霾是雾和霾的组合词,但“雾”和“霾”实际上是有区别的。雾是指大气中因悬浮的水汽凝结、能见度低于 1 公里时的天气现象,而霾是空气中悬浮的大量微粒和气象条件共同作用的结果。近期全国多地出现的“雾霾”现象,从成因上更科学的说法应该是霾,或者灰霾,本文的研究也是针对空气中悬浮颗粒物造成能见度降低及各种危害的大气现象,因此本文中统一使用“灰霾”来指代。灰霾会对交通运输、农作物生长、生态环境等均产生重要影响,还会造成空气质量下降,灰霾中的可吸入颗粒物被吸入人体呼吸道后,会严重威胁人的健康,长期吸入严重者甚至会导致死亡。

冬季为灰霾天气的频发时期,说明灰霾天气的形成与冬季采暖有着密切的关系。为了治理大气污染,缓解严重灰霾天气造成的严重危害,北京市政府提出了空气治理目标和相应的政策措施,如《大气污染防治行动计划》(简称“国十条”)、《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》等,空气质量的治理目标包括到 2017 年,空气中的细颗粒物(PM_{2.5})年均浓度比 2012 年下降 25%以上,控制在 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$;治理的方法包括削减燃煤,提高电力、天然气等清洁能源的供应力度;推动燃气热电联产替代燃煤热电联产、煤制天然气、燃煤锅炉清洁改造、全面整治小锅炉、削减农村散煤等。那么,北京市冬季采暖对 PM_{2.5}的形成到底有多大影响,这些措施对缓解雾霾天气又多大作用,应该如何通过调整采暖方式来减少灰霾?本研究的目标即是回答这些问题。

2 研究技术路线

本研究的目标是明确北京 PM_{2.5}与冬季采暖热源的关系,并提出相应的治理措施和政策建议。针对此目标,本研究首先研究了 PM_{2.5}的形成机制与造成严重灰霾的关键因素;然后从采暖方式、采暖能耗水平等角度分析了北京市的冬季采暖热源现状,包括城市的集中供暖现状、农村分散采暖现状,在此基础上,通过调研、计算、测试等方法,比较了城市各类集中供暖热源、农村分散采暖方式对 PM_{2.5}的形成的影响;最后根据以上的研究成果,给出相应的如何通过调整采暖模式来治理北京 PM_{2.5}的政策建议。具体的研究技术路线图如图 1 所示。

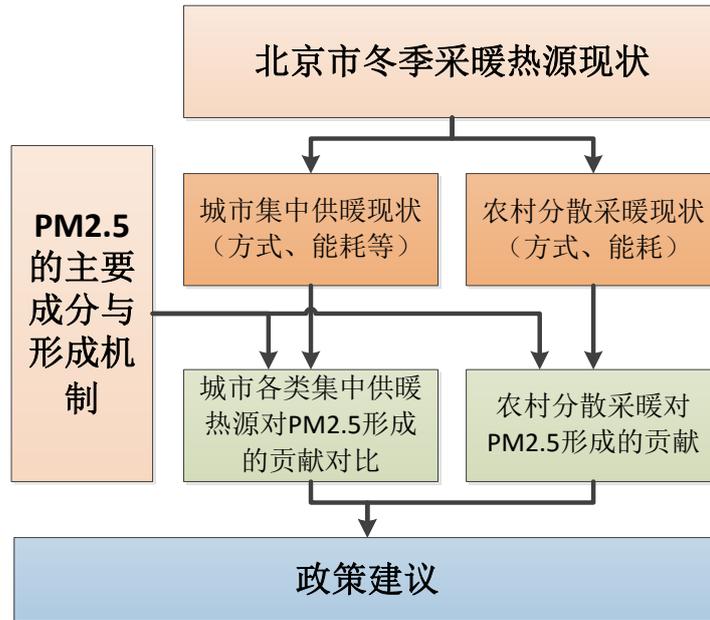


图 1 研究技术路线图

3 细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的主要成分及形成机制

3.1 细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的主要成分

中国大城市和特大城市的监测数据表明，在一般情况下，空气中粒径小于 $2.5 \mu m$ 的细颗粒物 ($PM_{2.5}$)，占到粒径小于 $10 \mu m$ 的细颗粒物 (PM_{10}) 的 50%-80%，而在出现重度空气污染、能见度低时， $PM_{2.5}$ 占了 PM_{10} 的绝大部分，说明造成严重大气灰霾的主要原因是粒径小于 $2.5 \mu m$ 的细颗粒物，即 $PM_{2.5}$ 。

北京大学唐孝炎院士的研究表明⁴，大气中的细颗粒物 $PM_{2.5}$ 包括一次生成的细颗粒物和二次生成的细颗粒物。一次细颗粒物来源于工业、建筑、交通、电力、其它生产和生活活动以及天然源的排放，例如沙尘、风扬尘、建筑与道路排放的各种尘，各种燃烧过程和工业过程等散发的金属元素、碳黑、元素碳、一次有机物等。二次细颗粒物是由各种人为排放的污染气体被大气氧化剂 (O_3 , OH 等) 氧化生成，包括二次有机颗粒物、硫酸盐颗粒物、硝酸盐颗粒物、铵盐颗粒物等，转化过程的示意图见图 2。在一般情况下，二次 $PM_{2.5}$ 占 $PM_{2.5}$ 总量的 50%-80% 左右；在重污染时期，二次 $PM_{2.5}$ 占 $PM_{2.5}$ 总量的比例还会明显增加。可见，二次 $PM_{2.5}$ 是严重灰霾天气时的主要污染成分。

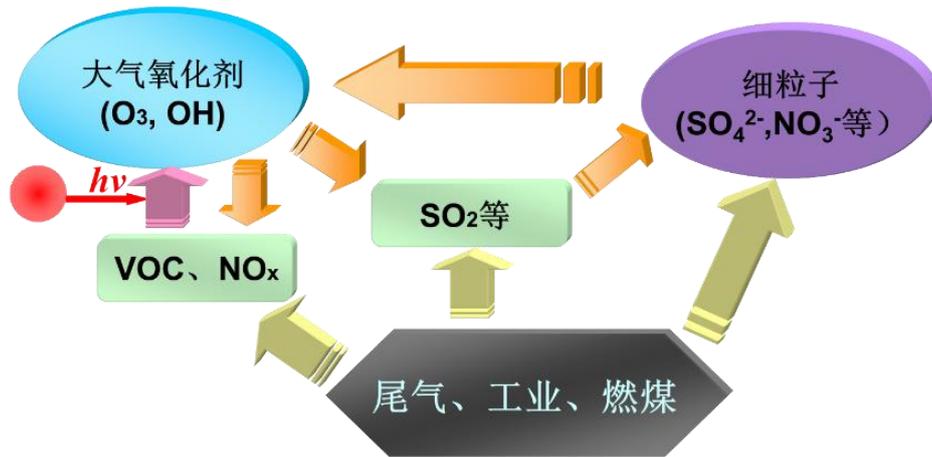
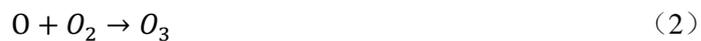


图 2 大气中的化学转化过程

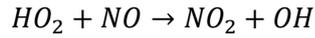
3.2 细颗粒物 PM_{2.5} 的形成机制

下面讨论二次 PM_{2.5} 的生成过程, 当空气中出现大量二氧化氮 NO_x 时, 有如下反应: NO₂ 在阳光的作用下发生光化学反应, 分解成一氧化氮 NO 和一个氧原子 O (如反应 (1) 所示); 氧原子 O 与空气中的氧气 O₂ 反应生成臭氧 O₃ (如反应 (2) 所示); 臭氧 O₃ 再和 (1) 中的生成物一氧化氮 NO 反应生成 NO₂ (如反应 (3) 所示), 该反应生成的 NO₂、O₂ 又可以作分别为 (1)、(2) 中的反应物进行光化学反应。反应 (1)、(2) 和 (3) 不断循环使得大气中的 O₃ 浓度保持在正常水平。



但是, 如果大气中同时还有 VOC, 则 VOC 会与大气中存在的 OH 自由基进行链式反应, 生成超氧化氢 HO₂ (如反应 (4) 所示)。HO₂ 将 (1) 中生成的 NO 氧化成 NO₂ 及 OH 自由基 (如反应 (5) 所示)。由于这个反应 (5) 的反应速度很快, 消耗掉 NO, 使 O₃ 无法与 NO 按照反应 (3) 进行还原反应生成 NO₂ 和 O₂, 致使大气中 O₃ 无法被消耗掉, 从而不断积聚, 浓度升高。也就是说, 大气中的 NO_x 与 VOC 会使 O₃ 在大气中积聚, 从而使大气氧化性增强。一旦大气氧化性增强, NO_x、VOC、SO₂ 等污染气体会被氧化成二次细颗粒物。同时, 由于这些二次生成的细颗粒物粒径小, 比表面积大, 为转化反应提供了大量的反应床, 使更多的气体污染物向二次颗粒物的转化不断进行。也就是说 NO_x 与 VOC 导致大气的氧化性显著增强, 形成大量二次 PM_{2.5}, 是造成严重灰霾天气的根本原因。





(5)

实际的监测数据也可证实这一点：图 3 至图 5 是北京大学气象站点监测 2013 年 1 月监测的逐时 $PM_{2.5}$ 、 NO_x 的浓度变化，可以发现在重度空气污染发生时， $PM_{2.5}$ 浓度与 NO_x 浓度的变化完全同步，佐证了 NO_x 与 $PM_{2.5}$ 浓度变化有很强的相关性。图 3 至图 5 同时也说明当 $PM_{2.5}$ 浓度出现尖峰时， SO_2 浓度始终稳定在较低的水平，说明并不能认为 SO_2 是导致 $PM_{2.5}$ 浓度增加的主要原因。

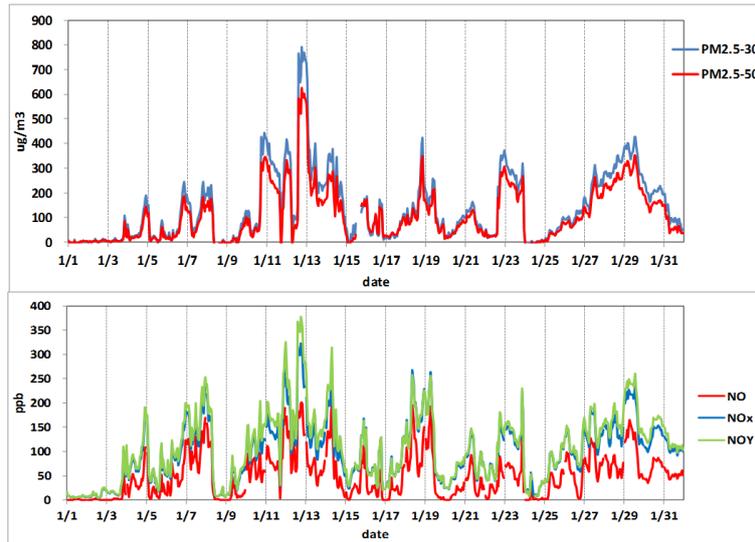


图 3 北京大学气象站点监测 2013 年 1 月 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 的变化过程

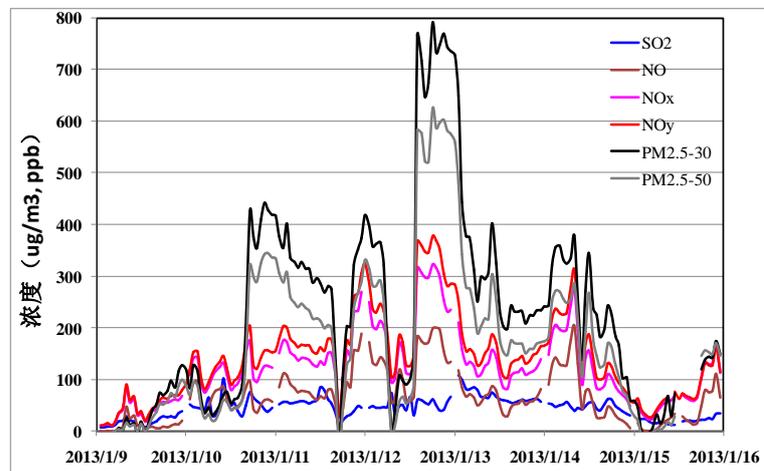


图 4 北京大学气象站点 2013 年 1 月中旬空气监测数据

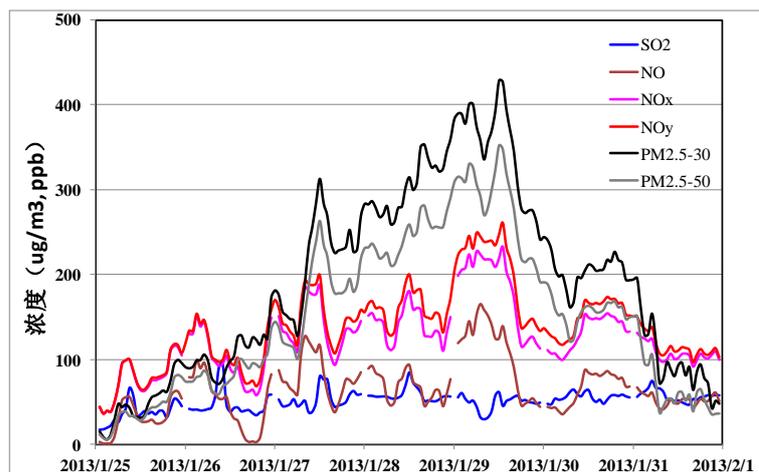


图 5 北京大学气象站点 2013 年 1 月下旬空气监测数据

由上述可见， NO_x 与 VOC 是引发重度灰霾天气的元凶，所以，控制 NO_x 与 VOC 的排放量是缓解灰霾天气的重点。 NO_x 的来源主要是化学燃料的燃烧，包括煤、天然气的燃烧，以及汽车中汽油燃烧等，易于集中控制。而 VOC 的来源包括化工业、汽车尾气、洗衣房、民用炊事、秸秆燃烧等，属于面源，远比 NO_x 排放源分散，难以控制。而 NO_x 与 VOC 只要控制其中一种，便可以阻止上述的（4）、（5）反应发生，抵制大气氧化性增强，遏制严重灰霾天气的形成。因此，从实际的空气质量控制和灰霾天气防治来说，最切实可行的措施便是**控制各种排放源的 NO_x 排放量**。

20 世纪 70 年代，为了减少大气中的细颗粒物，美国和欧盟开展了 NO_x 的治理行动。美国和欧盟不仅仅是确定 NO_x 的排放上限，而且考虑不同地区的环境容量不同，根据二次污染物的目标减少量来确定 NO_x 的排放总量，然后把总量分配到各地区⁵。1981 年起，日本也开始实施 NO_x 限排措施，以治理氮氧化物引起的大气污染。由此可见，发达国家的治理空气污染、尤其是治理 $\text{PM}_{2.5}$ ，均采用了减排 NO_x 的政策措施⁶。

3.3 小结

通过对细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的成分及形成机制进行研究可见：

大气灰霾主要来自 $\text{PM}_{2.5}$ ，包括工业等活动直接排放的一次细颗粒物和由气体向颗粒物转化的二次细颗粒物。 $\text{PM}_{2.5}$ 占到 PM_{10} 的 50%-80%，其中 $\text{PM}_{2.5}$ 组分占 $\text{PM}_{2.5}$ 50%-80% 左右，而且在重污染时期，二次颗粒物的组分在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的比例明显增加。因此，治理二次颗粒物是减少 $\text{PM}_{2.5}$ 总量，治理大气灰霾的关键。

二次颗粒物形成是由于大气氧化性导致气体污染物被氧化形成，而 NO_x 和 VOC 是导致大气氧化性增强，大量生成二次颗粒物，从而造成大气灰霾现象的元凶，所以治理 NO_x 和 VOC 是解决 $\text{PM}_{2.5}$ 的重点，而 VOC 污染源分散且不易控制，因此控制城市内的 NO_x 排放是治理大气污染，缓解灰霾现象的关键。

4 北京市冬季采暖现状

4.1 城市

2012年，北京市城镇人口共1783.7万人，集中供热面积为52555万m²，热电厂供热能力为7187MW，锅炉房供热能力为31111MW⁷。供热总量为35222万GJ，其中热电厂供热量为5752万GJ，锅炉房供热量为29470万GJ⁷。采暖热源形式主要为：燃煤锅炉、燃气锅炉、热电联产等。煤炭消耗总量为2265万t，其中发电和集中供热消耗1236万t，占煤炭消耗总量的55%；天然气消耗总量为92亿m³，其中发电和集中供热消耗35亿m³，占天然气消耗总量的38%⁷。

值得注意的是，根据“国十条”、《北京市2013-2017年清洁空气行动计划》等提出的为了提高空气质量而重点调整的城市集中采暖热源形式是热电联产“煤改气”（使用大型燃气热电联产全面替代大型燃煤热电联产）。2013年计划完成燃煤锅炉“煤改气”改造2100蒸吨⁸，实际完成2407蒸吨改造，四环内基本取消燃煤锅炉房，将北京城区的四家主力热电厂（华电、国华、石景山、高井）基本都改成了天然气热电联产，“煤改气”任务超额完成15%⁹。计划到2015年，北京城五环以内的燃煤设施都全部消失，四大燃气热电中心将取而代之，用气量预计高达170亿立方米。“十二五”期间为进行“煤改气”，北京市的基础设施建设资金将达300亿元¹⁰，北京天然气总消费量也将大幅增长。但是，到底这个措施对减少灰霾、改善空气质量能有多大的作用，是一个急需研究的问题。

4.2 农村

截至2012年底北京农村地区共182个乡镇，3940个村委会，215.2万户，常住人口582.5万⁷。为详细了解北京农村地区的采暖用能现状，我们通过随机抽取的方式，在北京市调研了153个村庄共计4235户农村家庭的采暖用能情况。调研结果显示，燃煤（包括散煤、煤球等）、秸秆树枝和电是北京农村常见的采暖能源形式，与之相匹配的采暖设备分别为土暖气、传统炕灶和电取暖设备（包括空调、电暖气和电褥子等）。表格1所示为北京农村地区采暖能源消耗的调研值和推算值。

表格 1 北京农村地区冬季采暖能源使用量

项目	能源年消耗量		
	调研总量	调研户均量	北京市总量
单位	t(万 kwh)	t(kWh)	万 t(万 kwh)
燃煤	9977.3	2.356	507.0
生物质	1987.2	0.469	101.0
电	105.8	249.8	53761.9

根据表格1中的数据，可计算北京市农村地区冬季采暖能耗，如表格2所示。计算结果显示，燃煤是目前北京农村地区冬季采暖能耗的最主要组成部分，占农村总采暖

能耗的 82.0%。通过对土暖气（使用燃煤）的污染物排放测试可以发现，燃煤单位质量的燃煤，CO、CO₂和 NO_x 的排放指标分别为 315.5 g/kg、1148.7 g/kg 和 464.5g/kg。因此，北京农村地区因土暖气燃烧燃煤所造成的 CO、CO₂和 NO_x 等污染物的排放分别可达到 160.0 万吨、582.4 万吨和 235.5 万吨。

表格 2 北京农村地区采暖能耗结构

项目	能源消耗总量	折合标煤	占比
单位	万 t(万 kwh)	万 tce	%
燃煤	507.0	362.1	82.0
生物质	101.0	57.7	13.1
电	53761.9	21.7	4.9
合计	——	441.6	100

5 北京市各种采暖热源对 PM_{2.5} 形成的贡献分析

5.1 城市集中供热热源对 PM_{2.5} 形成的贡献分析

从第 3 节的分析可以得出，控制 NO_x 的排放量是缓解北京大气重度灰霾天气的关键。冬季是灰霾天气的高发期，各类采暖热源是冬季重要的 NO_x 排放源。北京市目前正在推行热电联产“煤改气”，这个措施对治理雾霾、改善空气质量有多大的作用呢？针对这个问题，我们进行了如下的分析和计算。

5.1.1 不同集中供热热源单位燃料的 NO_x 排放量

表格 3 不同采暖方式单位燃料 NO_x 的排放强度

燃烧设备	排放强度		备注	数据来源
	kg/tce	mg/m ³ 烟气		
大型燃煤锅炉 热电联产	2	200	脱硝后	岳光溪院士提供 ¹¹
燃煤循环流化床	<0.5	<50	近年来加设 SNCR	岳光溪院士提供 ⁹
大型天然气锅炉	0.8	100	脱硝后，NO _x 排放强度相当于 1.1 g/m ³ 天然气，计算时过量空气系数取 1.1	国家标准 ¹² ,
天然气热电联产 燃气蒸汽联合循环	1.2	50	脱硝后，NO _x 排放强度相当于 1.5 g/m ³ 天然气，过量空气系数取 3	国家标准 ¹⁰
	0.7	30	脱硝后，NO _x 排放强度相当于 0.9 g/m ³ 天然气，过量空气系数取 3	北京标准 ¹³

表格 3 中列举出不同采暖方式**单位燃料（同样热量的燃料）**的 NO_x 的排放强度。大型燃煤锅炉热电联产燃烧每吨标煤的热量排放 2kg NO_x，相当于每立方米烟气排放 200mg NO_x。大型天然气锅炉的 NO_x 排放强度是 0.8kg/tce，而天然气热电联产因为需要燃气蒸气联合循环，为了保证较高的发电效率，燃烧温度高，所以 NO_x 排放强度高于天然气锅炉，燃烧每吨标煤的热量排放 1.2kg NO_x，相当于每立方米烟气排放 50mg NO_x。可以看出，在消耗同样热量的燃料时，燃气热电联产 NO_x 的排放量为常规大型燃煤热电联产的 60%。

5.1.2 不同供热热源为满足供热所需所排放的 NO_x

表格 3 中仅是单位热量燃料的 NO_x 排放强度的情况，但是，不同采暖方式提供同样的采暖供热量（或供应同样的供热面积）时消耗的燃料数量是不一样的。由于在北京的热电厂主要是为了供热所建，所以如果要知道北京市供热采用不同采暖热源的 NO_x 的排放量，需要比较**提供同样的采暖供热量（或供应同样的供热面积）**时，不同热源的 NO_x 排放量，即需要“以热定电”。与燃煤热电联产相比，燃气热电联产的热电比小，也就是说为了提供同样的采暖供热量（或供应同样的供热面积），即“以热定电”时，燃气热电联产需要发更多的电，燃烧更多的燃料。

下面，以供热面积为 1 亿 m² 为例来定量计算供应同样的供热面积时不同采暖热源方式的采暖期 NO_x 排放量。计算参数包括：采暖面积为 1 亿 m²，设计经验热指标为 50W/m²。锅炉直接供热系统根据热负荷延时曲线确定热负荷，进而算得燃料量；而热电联产的电厂是通过调节抽汽量，改变热电比来调节供热量，所以瞬态消耗的燃料量可以认为基本不变，供热期的总燃料量为瞬态燃料消耗量与供暖时间相乘算得。

第一种是采用燃煤热电联产集中供热系统（示意图见图 6），通过背式汽轮机的抽汽进行供热。采用这种热源供热时，设计工况下采暖期燃料消耗量为每小时 1367 吨标煤，NO_x 瞬态排放量为每小时 2.7 吨；采暖期燃料消耗总量为 394 万吨标煤，NO_x 总排放量为 0.8 万吨。

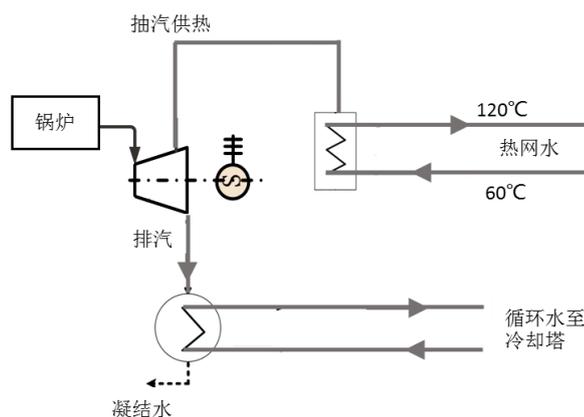


图 6 典型燃煤热电联产集中供热系统图

第二种是燃气锅炉供热（示意图见图 7），该系统通过燃烧天然气直接提供热量采暖。这种采暖方式在设计工况下，采暖期燃料消耗量为 51.4 万 m³ 天然气，NO_x 瞬态排放量为每小时 0.6 吨；采暖期燃料消耗总量为 14.8 亿 m³ 天然气，NO_x 总排放量为 0.2 万吨。



图 7 燃气锅炉供热示意图

第三种是采用燃气热电联产集中供热系统（示意图见图 8），通过燃气蒸气联合循环进行供热。设计工况下，采暖期燃料消耗量为 154 万 m³ 天然气，NO_x 瞬态排放量为每小时 2.3 吨；采暖期燃料消耗总量为 44.4 亿 m³ 天然气，NO_x 总排放量为 0.7 万吨。

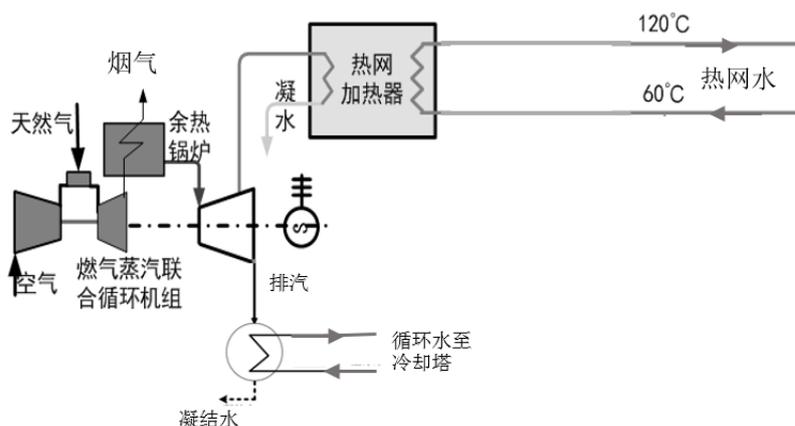


图 8 燃气热电联产集中供热系统图

将以上三种系统的计算结果汇总至表格 4 中，可以看到，将燃煤热电联产改为燃气热电联产后，热电厂采暖期 NO_x 的总排放量为 0.7 万吨，仅稍稍少于燃煤热电联产的采暖期 NO_x 总排放量 0.8 万吨。也就是说，相较于燃煤热电联产，燃气热电联产并没有显著减少 NO_x 的排放量，对于缓解 PM_{2.5} 造成的灰霾天气的效果并不显著。

表格 4 不同采暖方式的能耗和排放综合比较 1^a

编号	供热方式	瞬态燃料消耗量		采暖期总量		发电功率	发电量指标	采暖期 NO _x 瞬态排放量	采暖期总排放 NO _x 量
		tce/h	万 m ³ /h	万 tce	亿 m ³				
1	燃煤热电联产	1367	-	394	-	0.38	38	2.7	0.8
2	燃气锅炉	-	51	-	14.8	-	-	0.6	0.2
3	燃气热电联产	-	154	-	44.4	0.70	70	2.3 (国标 ^b)	0.7 (国标)

^a 供热城市均为北京，供热面积均为 1 亿 m³。

b“国标”指根据国家火电厂大气污染物排放标准。

5.1.3 燃煤可以做得更好

实际上，如果采用先进的清洁煤燃烧技术，燃煤热电联产可以做得更好。上海外高桥第三发电厂即采用了我国自主先进的高效清洁燃煤技术，2台1000MW超超临界机组发电效率高约45%¹⁴。为了实现低污染排放发电，对减少硫化物排放，机组配置了高效率湿法脱硫装置^{15,16}，使SO₂排放仅为0.47kg/tce；对减少烟气氮氧化物排放，机组配置了锅炉低NO_x同轴燃烧系统、增加煤粉细度的制粉系统、SCR脱硝系统，使NO_x排放仅为0.37kg/tce，远低于国家目前环保标准4.5kg/tce，同时还远低于表格3中列举的燃气热电联产单位燃料NO_x排放量（1.2kg/tce）。上海外高桥第三发电厂实现了高效、清洁发电，达到国际先进水平。

在过去，上海外高桥第三发电厂的清洁燃煤技术的推广不太顺利，因为各电力集团都有自己的科研力量，而近来推广取得了突破性进展，申能能源科技有限公司（上海外高桥发电技术拥有方）分别于2013年9月与华润电力控股有限公司、2014年新年伊始与神华集团有限公司签订合同，进行全面技术合作¹⁷，上海外高桥发电技术的推广前景广阔，推广全行业正逐步成为现实。

表格 5 上海外高桥第三发电厂 2013 年上半年运行情况¹²

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 ₂	kg/tce	0.47	国家环保标准：2kg/tce； #7 经检修，0.17kg/tce
NO _x	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 1.2kg/tce
颗粒物	kg/tce	0.12	国家环保标准：0.5kg/tce

若将上海外高桥燃煤电厂的清洁燃煤技术运用到热电联产中，NO_x排放量将会大幅度减少。表格6中的供热方式4就是基于上海外高桥电厂技术的燃煤热电联产，采暖期燃料消耗总量为253万吨标煤，采暖期NO_x总排放量为0.2万吨，已低于燃气热电联产。

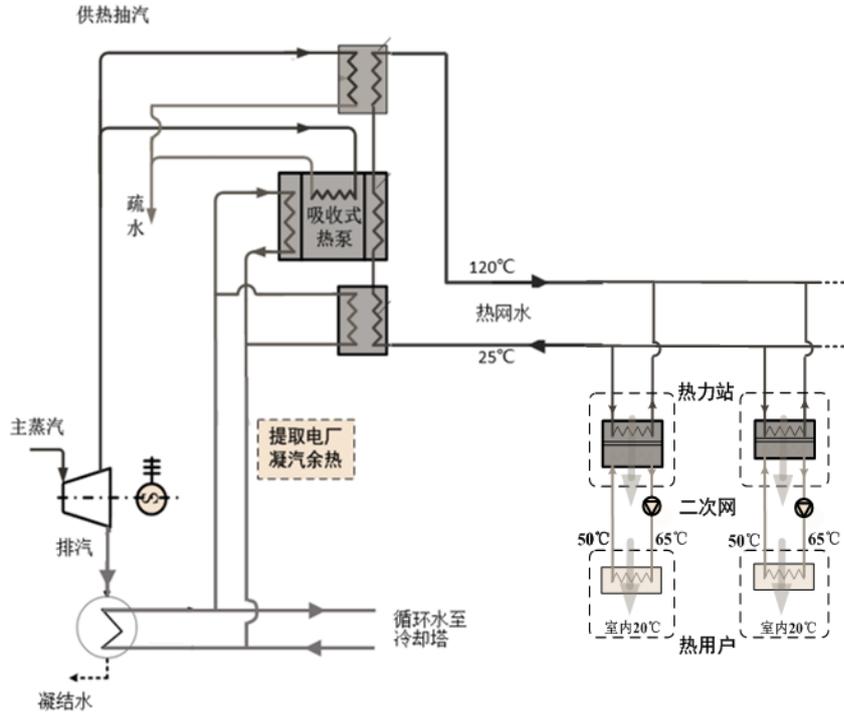


图 8 基于吸收式换热的燃煤热电联产集中供热系统图

表格 6 不同采暖方式的能耗和排放的综合比较

编号	供热方式	瞬态燃料消耗量		采暖期总量		发电功率	发电量指标	采暖期 NO _x 瞬态排放量	采暖期总排放 NO _x 量
		tce/h	万 m ³ /h	万 tce	亿 m ³				
1	燃煤热电联产	1367	-	394	-	0.38	38	2.7	0.8
2	燃气锅炉	-	51	-	14.8	-	-	0.6	0.2
3	燃气热电联产	-	154	-	44.4	0.70	70	2.3 (国标 b)	0.7 (国标)
4	基于上海外高桥技术的燃煤热电联产	1922	-	553	-	0.34	34	0.71	0.2
5	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	16	0.33	0.09

更进一步，在将上海外高桥的清洁煤燃烧技术用于热电联产的基础上，再加上吸收式换热技术¹⁸（图 8 表示了基于吸收式换热的燃煤热电联产集中供热系统），减小整个系统的换热不可逆损失，热网回水温度由传统的 60℃ 降到 20℃，提高了管网的热输送能力，充分回收电厂乏汽余热，从而还可进一步减少为供热所需的燃料消耗量。从表格 4 的供热方式 5 中可看到，在设计工况下，采暖期燃料消耗量为每小时 878 吨标煤，采暖期燃料消耗总量为 553 万吨标煤，NO_x 瞬态排放量为每小时 0.33 吨；NO_x 总排放量为 0.09 万吨。该系统的 NO_x 排放量远低于燃气热电联产，仅为普通燃煤热电联产的 11%，燃气热电联产（燃气蒸汽联合循环）的 13%，燃气锅炉的 45%。

从以上分析可以看出，在提供同样的供热量的前提下，采用上海外高桥的清洁燃煤技术以及吸收式换热技术的热电联产供热方式，产生的 NO_x 排放量约仅为燃气热电联产（燃气蒸汽联合循环）的 13%，甚至低于天然气直接燃烧供热。这样一方面能够高效利用我国供应充足的煤炭资源，符合我国的能源结构；一方面能大幅降低 NO_x 排放量，达到更好的减排和改善大气质量的效果，能够切实减少二次 PM_{2.5} 的生成，缓解严重大气灰霾现象。因此，与其进行热电联产“煤改气”工程，花费巨额的资金，同时大幅增加天然气用量，造成天然气用气矛盾，甚至引起“气荒¹⁹”，影响居民用电和能源安全，为什么不利用高效清洁的燃煤技术来达到更好的减排效果呢？

5.1.4 关于发电量的讨论

从表格 5 中我们可以看出,燃气热电联产之所以 NO_x 排放量比燃煤热电联产要高,一个很重要的原因就是燃气热电联产的热电比小,供应相同的热量,需要生产更多的电,燃气热电联产所产生的电量是基于上海外高桥技术的燃煤热电联产的 2 倍多,从而需要更多的燃料,也就排放了更多的 NO_x 。但是对于北京这样的特大型城市,环境容量已趋饱和,难以承受更多污染物的排放,否则空气质量会继续恶化,因此特大型城市能源利用的核心应是减少污染,而偏远地区的环境容量较充裕,可从远处地区的电厂供电充分利用人口稀疏地区的环境容量。这与政府提出的政策方向也一致。2013 年 9 月国务院颁布的《大气污染防治行动计划》明确指出,京津冀、长三角、珠三角等区域应逐步提高接受外输电比例。北京市政府颁布的《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》也提到要“加快建设外受电力通道”,“增强外调电供应保障能力”。这些措施考虑了大城市环境容量趋饱和的特点,也为大城市的用电安全建设提供了政策保障。

实际上,特大型城市的自备发电能力并不是为了满足用电需求,而是为了保障城市的供电安全,所以,城市的发电量应以满足其供电安全为基础。如果考虑城市自备电源主要满足建筑的用电,那么 $10\text{W}/\text{m}^2$ 备用电源应该能满足城市供电安全需要。而北京市目前的自备发电能力约 $7\text{W}/\text{m}^2$,已经能够基本满足安全需要。从表格 4 供热方式 5 的计算结果可以看出,若采用上海外高桥清洁燃煤技术的热电联产来供热,供电能力为 $16\text{W}/\text{m}^2$,若采用了清洁燃煤技术的热电联产的供热能力占总供热能力的 50%,它也能提供 $8\text{W}/\text{m}^2$ 的电量,高于 $7\text{W}/\text{m}^2$,能够满足城市基本安全需要,所以仅从提高供电安全性的角度,就没有必要通过增加燃气热电联产来提高供电量,可以根据安全用电的需求,适量增加清洁煤的热电联厂,增加燃煤热电联产在供热结构中的比例,既提高北京市冬季供热热源的整体效率,也可以满足供电安全的需要。

另外,有一种观点认为由于天然气仅用于供暖,会造成天然气需求量的季节不平衡,管道利用率低,夏季的大部分天然气管道处于闲置状态,所以可通过大量建设天然气电厂可以实现稳定的天然气消费,从而缓解天然气目前仅用于供暖造成的不平衡,提高管道利用率。但是,目前我国天然气利用面临的最主要问题是供应紧张而非输送问题,如果仅为解决管道利用率低的问题而大量进行“煤改气”,会造成严重的天然气供需矛盾,甚至导致“气荒”,使得国家的能源安全面临严峻挑战。

5.1.5 小结

通过以上计算与分析发现,北京市目前推行的热电联产“煤改气”措施,并不能显著降低 NO_x 排放量,起到减排和缓解灰霾的作用,反而会大幅增加天然气用量,造成用气矛盾。

因为大城市的生态环境容量有限,所以在考虑城市能源优化利用时,不能只看能源的利用效率或者单位燃料的排放强度,更应该关注该燃料的燃烧总量以及在城市中心城区,即生态环境容量已经饱和的区域,所造成的排放量。当城市中心城区的生态环境容量达到饱和时,就应该考虑在城市的外围区域,生态环境还有一定容量的地方进行能源生产(发电),再将电力输送至城市的中心城区,既保证了城市的供暖需求,也保障了

供电安全。而在大城市的远处地区，人口稀少，VOC 的排放量也较小，环境容量富裕，在这样的情况下，对燃料的排放要求就不需要那么高，可以通过燃煤电厂来生产电力，把污染从城市的中心区域转移至远处，充分利用城市以外区域的环境容量。

5.2 北京市农村分散采暖热源对 PM_{2.5} 形成的贡献分析

5.2.1 农村住宅用能是北京市 PM_{2.5} 减排的重要突破点之一

目前北京农村地区分散采暖每年需要消耗燃煤 507 万吨，生物质 101 万吨和电力 5.38 亿 kWh。从消耗能源的总量来看，该数值远低于北京市 2012 年全年燃煤消耗量（共计 2265 万吨⁷）。但是，农村地区目前主要采用土暖气、传统柴灶等分散式热源，在燃料燃烧充分程度、设备热利用效率和污染排放控制等各个方面均大大的落后于大型燃煤锅炉。因此，农村采暖所导致的 PM_{2.5} 排放总量不能忽略。

2013 年至 2014 年采暖季期间，我们对北京农村地区的土暖气和传统柴灶分别进行了一次 PM_{2.5} 排放因子和 NO_x 排放因子的测试，其排放指标以及由此导致的一次 PM_{2.5} 和 NO_x 排放总量详见表格 7。由此可见，虽然农村地区燃煤使用量仅 507 万吨，生物质消耗量仅 102 万吨，但其所造成的一次 PM_{2.5} 排放总量已经高达 5.61 万吨，土暖气的 NO_x 排放量为 235.50 万吨。

表格 7 农村分散采暖热源的一次 PM_{2.5} 和 NO_x 排放量

项目	能源消耗总量	一次 PM _{2.5}		NO _x	
		排放因子	排放量	排放因子	排放量
单位	万 t	g/kg 燃料	万 t	g/kg 燃料	万 t
土暖气	507.0	5.54	2.81	464.5	235.50
传统柴灶	101.0	27.7	2.80	未测试	
合计	—	—	5.61	—	—

据统计，北京市 2012 年燃煤消耗总量为 2265 万吨，电厂、采暖锅炉、工业和民用散煤分别占 54%、17% 和 12%⁷。由于城市地区燃煤锅炉体量大，燃烧充分，烟气除尘易控制，其 PM_{2.5} 排放指标较小。根据相关文献数据，大型燃煤锅炉在除尘前，直接排放的一次 PM_{2.5} 排放量为 430g/kg、790g/kg 和 870g/kg 不等^{20、21}，如按照 800g/kg 计算，其一次 PM_{2.5} 排放总量为 1.84 万吨；经过除尘后，PM_{2.5} 的排放量可控制在 150 g/kg、210g/kg 和 338g/kg 不等，按照 300g/kg 计算^{20、22}，一次 PM_{2.5} 排放总量仅 0.69 万吨。虽然农村地区用于采暖的燃煤和生物质总量仅为 507 万吨和 101 万吨，但其一次 PM_{2.5} 排放总量分别高达 2.81 万吨和 2.80 万吨，远高于城市地区大型锅炉的排放水平。因此，农村应该作为北京市 PM_{2.5} 减排的重要突破点之一，给予相应的重视。

5.2.2 降低农村 PM_{2.5} 排放，可从改善农村采暖用能设备入手

目前，北京农村地区冬季采暖以土暖气和生物质炕灶为主，燃料的低效非充分燃烧，是导致 PM_{2.5} 排放总量居高不下的主要原因。2013 年-2014 年期间，我们建立了多处示

范工程，对以下五种适用于北京地区或已经在北京地区推广使用的新型采暖用能设备进行了运行监测，测试结果经处理后，如表格 8 所示：

表格 8 北京农村地区使用不同类型采暖设备的户均一次 PM_{2.5} 排放量比较

设备类型	土暖气	型煤锅炉	生物质采暖炉
热利用效率	0.40	0.54	0.8
燃料热值 (MJ/kg)	20.90	16.72	16.72
能源消耗量 (t)	2.356	2.181	1.473
折合标煤量 (tce)	1.683	1.247	0.841
节省标煤量 (tce)	—	0.436	0.841
一次 PM _{2.5} 排放指标 (g/kg 燃料)	5.54	3.78	2.77
一次 PM _{2.5} 排放量 (kg)	13.05	8.25	4.08

北京农村地区户均使用燃煤 2.356 吨/年，由此造成的户均 PM_{2.5} 排放总量为 13.05kg/年。由于燃烧效率更高和燃料热值不同，因此当采用型煤锅炉或生物质锅炉替代土暖气后，在满足相同采暖负荷的情况下，与燃烧燃煤相比，型煤锅炉和生物质锅炉造成的户均一次 PM_{2.5} 排放量可分别降低 4.80kg/年和 8.97kg/年，分别降低了 36.8% 和 68.7%。如推广到全市替代全部农村燃煤，一次 PM_{2.5} 总排放可分别降低 1.033 万吨和 1.930 万吨。

因此，从农村采暖设备入手，可以显著降低农村住宅用能所造成的 PM_{2.5} 排放，对改善大气环境具有重要意义。

6 关于合理利用燃煤与天然气与优化供热能源结构的讨论

6.1 燃煤的合理利用

6.1.1 关于“煤制天然气”的讨论

北京由于进行热电联产“煤改气”工程，加剧了天然气的供气、用气矛盾。为了加强天然气供应保障，《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》中提出要建设“煤制天然气”（简称“煤制气”）项目，如在 2013 年，建成内蒙的大唐煤制气一期工程以保证北京全面“煤改气”的需要。但是，煤制天然气是否真的是一种合理利用煤资源的方式呢？这个问题是值得仔细商榷的，而且这个问题最近也引起了各界的关注和热烈讨论。

6.1.1.1 “煤制气”的总工艺流程

煤制天然气是煤经过气化生产合成气，经过净化处理，在催化剂的作用下发生甲烷化反应，生产热值符合规定的代用天然气^{23, 24}。

煤制天然气属于大型煤化工项目，由很多不同单元组成，各单元可供选择的技术很多，因此有多种技术组合，但是总工艺路线基本是一定的。煤制天然气的总工艺路线如图 9。原料煤在备煤系统制成符合气化装置需要的原料，空分装置制得气化所需的氧气，煤和氧气在气化工段反应生成粗合成气，粗合成气通过变换反应调整氢碳比后，经脱硫脱碳脱除 H₂S 和 CO₂ 得到满足甲烷化合成需要的净化气，净化气在甲烷化工段进行甲烷

化反应得到合成天然气，合成天然气最终在压缩、干燥工段经分水、加压、冷冻干燥和复热后得到最终产品天然气²⁵。

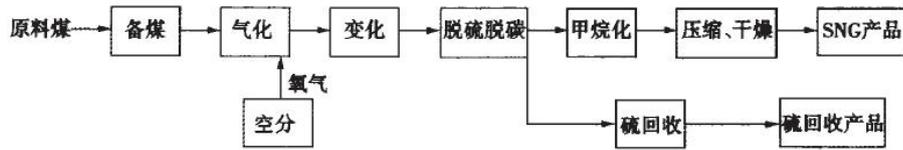


图 9 煤制天然气总工艺路线图²⁵

6.1.1.2 “煤制气”技术

20 世纪 80 年代，我国引进了鲁奇固定床、德士古气流床煤气化技术，近期又形成新一轮引进壳牌技术的热潮，世界上所有类型的煤气化技术在我国几乎都有应用²⁶。

1. 鲁奇碎煤加压气化技术

鲁奇碎煤加压气化技术产生于德国 20 世纪 40 年代，是目前世界上建厂数量最多的煤气化技术，国内鲁奇炉在用厂家包括：云南解放军化肥厂、哈尔滨煤机厂、河南义马煤气厂，在建的厂家：山西潞安矿、新疆广汇、大唐国际等²⁶。

图 10 表示了鲁奇法生产 SNG 的工艺流程。鲁奇法采用的是固定床气化炉，气化剂为氧气和水蒸气，气化温度在 900-1100℃，煤的气化气体中含有 8%-10%的甲烷，经过分离工艺可得到 SNG，剩余气体富含有效合成气（CO+H₂），这部分气体有 1/3 进入气体转换单元提高 H₂/CO 比，再经过低温甲醇洗除去烃类和硫化物，然后合成气进入甲烷化单元，该单元由 2 个绝热固定床反应器组成，CO 转化为 CO₂（转化率>98%），得到的气体产品经压缩、干燥除去 CO₂ 便产出 SNG²⁴。

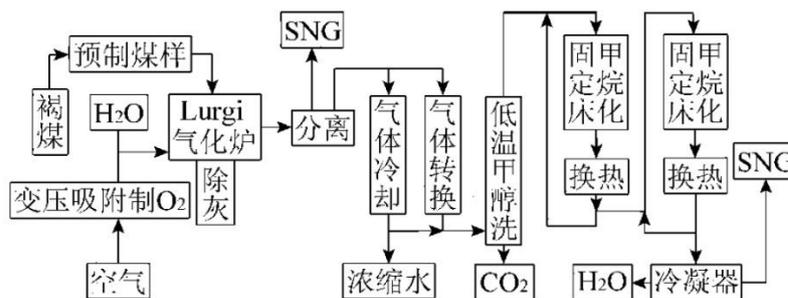


图 10 鲁奇法制备 SNG 工艺流程示意图²⁴

2. 德士古加压水煤浆气化技术

德士古加压水煤浆气化技术是由美国德士古公司开发的，是一种以水煤浆为进料、氧气为气化剂的加压气流床并流气化工序，气化过程包括煤浆制备、煤浆气化、灰水处理等工序，是较成熟的煤气化技术²⁷。目前我国采用该技术的在运行装置有 20 多台：鲁

南化肥厂、上海焦化厂、陕西渭河化肥厂、神华包头煤化工有限公司、山东华鲁恒升化工股份有限公司等²⁷。

图 11 表示了德士古法生产煤气合成气的工艺流程。原料煤送入磨机，同时在磨机中加入水、添加剂、石灰石、氨水，经磨机研磨成具有适当粒度分布的水煤浆，水煤浆由低压煤浆泵送入煤浆槽中；水煤浆经高压煤浆泵加压后与高压氧气经德士古烧嘴混合后呈雾状喷入气化炉燃烧室，在燃烧室中进行复杂的气化反应，生成的煤气和熔渣经激冷环及下降管进入气化炉激冷室冷却，冷却后的煤气经喷嘴洗涤器进入碳洗塔，熔渣落入激冷室地步冷却、固化、定期派出；在碳洗塔中，煤气进一步冷却、除尘、控制水气比（即水汽与干气的摩尔比），然后煤气出碳洗塔进入后工序²⁸。

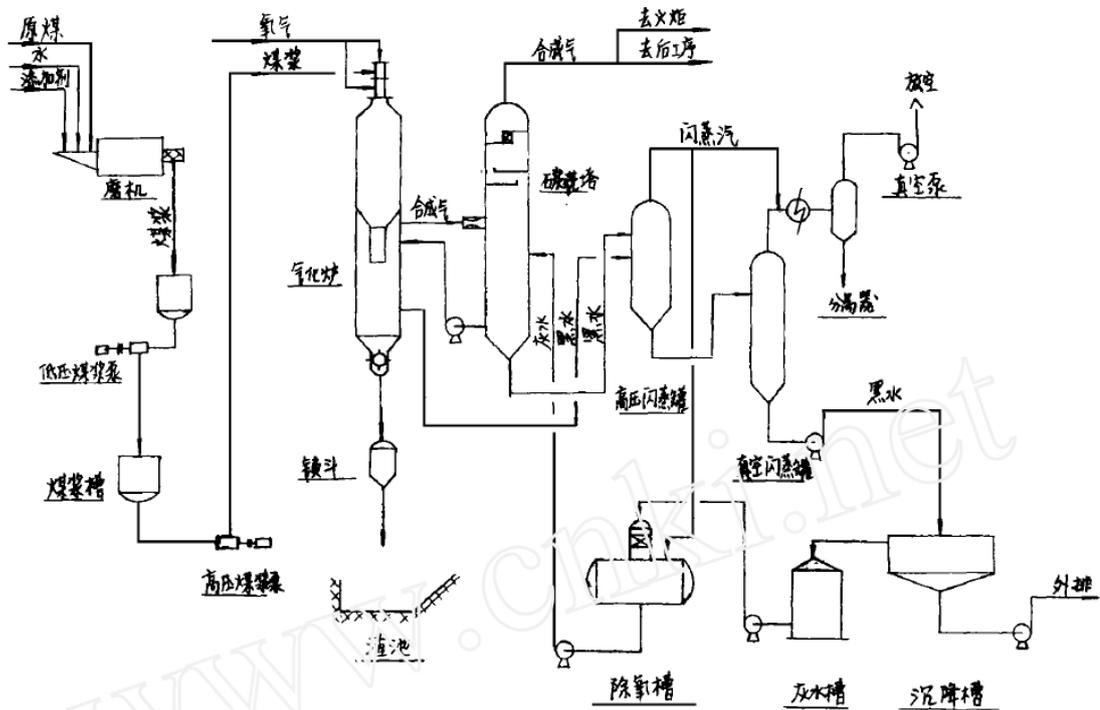


图 11 德士古法制备煤气合成气工艺流程示意图²⁸

3. 壳牌煤粉加压气化技术

图 12 表示了壳牌法生产煤气合成器的工艺流程。壳牌煤粉加压气化工艺大体上可分为煤粉制备、煤粉输送、气化、气体净化 4 个单元。原料煤经破碎后在热风干燥的磨机内磨制成 $<100\ \mu\text{m}$ 的煤粉，由常压料斗进入加压料斗，其加煤方式采用密封料斗法：常压粉煤落入变压煤仓，经充 N_2 升压后落入操作压力略高于气化炉的工作煤仓，由星形加料器或螺旋输送机送出，用 N_2 浓相输送入气化炉。壳牌开发的气化炉为对置式 4 喷嘴，采用下部干粉加压进料。通常气化炉操作温度为 $1500\text{--}1700^\circ\text{C}$ ，炉体内四周均布水冷壁列管，熔渣在水冷壁上形成一定厚度的固体渣层，排渣从炉底锁斗派出，合成气由炉子上部引出，在出口处加入经过降温的返回合成气激冷，然后进入废热锅炉内产生高压蒸汽以回收热量，所夹带的灰渣颗粒经旋风分离返回气化炉²⁹。

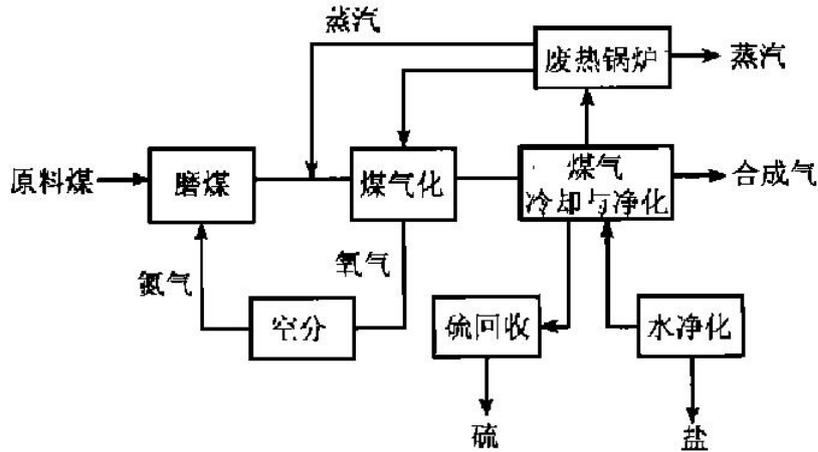


图 12 壳牌法制备煤气合成气工艺流程示意图²⁹

6.1.1.3 “煤制气”应如何利用

“煤制气”的效率较低，约为 50%¹⁸，其生产的天然气可用于居民生活、发电、热电联产等。若将“煤制气”生产的天然气用于居民生活，如壁挂炉，能同时解决采暖和生活热水供应问题，壁挂炉的效率较高，约为 92%⁴⁰，如此总的热效率为 50%×92%=46%，而家庭用煤炉的热效率为 30-50%^{30 40}。若将“煤制气”生产的天然气用于发电，燃气发电的效率约为 55%⁴⁰，如此总的热效率约为 28%，低于直接燃煤发电的效率（一般约为 35%⁴⁰，上海外高桥第三发电厂燃煤发电效率为 45%）。若将“煤制气”生产的天然气用于热电联产，燃气热电联产的发电和供热效率分别约为 45%、35%⁴⁰，如此总的发电与供热效率分别约为 23%、18%，远低于直接燃煤热电联产的发电与供热效率（分别约为 25%、50%⁴⁰）。

由上述分析可见，从能源效率的角度来看，“煤制气”生产的天然气可用于居民生活中，如用燃气壁挂炉替代家庭用蜂窝煤炉，来同时满足居民采暖和生活热水的需求，但是“煤制气”生产的天然气用于发电或热电联产的能源效率远低于直接燃煤发电、直接燃煤热电联产的能源效率，因此，“煤制气”生产的天然气用于发电或热电联产是较不可行的。

另外，“煤制气”的过程中会对环境造成污染，如煤转气阶段的 NO_x 排放因子为 5.6kg/tce³¹，而之前提及的常规大型燃煤热电联产直接燃煤的 NO_x 排放因子仅为 2kg/tce。并且，“煤制气”需要消耗大量水资源，40 亿立方米产能的项目水资源年消耗量为 1600 万吨³²，单位热值水耗为 0.18-0.23t/GJ³³。

6.1.2 小结

由于煤制天然气会损失约 50%的热量，因此从能源效率的角度来考虑，“煤制气”生产的天然气可用于居民生活，如用燃气壁挂炉替代家庭用煤炉，但并不适合用于直接发电或者热电联产。另外，煤制天然气的过程会对环境造成污染，占用缺水的煤矿地区的宝贵水资源。而且，根据第 5.1 节中的分析，把气输送到城市，在城市采用燃气热电

联产的形式来供热，会较基于清洁燃煤技术的燃煤热电联产产生更多的 NO_x，那么，与其采用“煤制气”制取天然气、再将气输送至市区使用燃气热电联产来供热，何不在城市的远处直接用煤发电、把电输送到城市，而城市采暖则采用基于清洁燃煤技术的燃煤热电联产呢？

6.2 天然气的合理利用

6.2.1 从我国的能源结构看天然气的合理利用

对于发达国家，在其能源结构中天然气的比例较高（如表格 9 所示），例如美国和英国的天然气消费量占其能源总消费的比例分别高达 30% 和 35%，与油的比例差不多（油占的比例分别为 37%，34%）。对于他们，优化能源利用的目标就应该是高效利用天然气，那么燃气热电联产就是一种很好的利用方式，能够高效地利用天然气，同时提供电力和建筑的供暖需求。但是我国的能源结构是以煤为主，煤的消费量在能源总消费量中占 68%，而天然气仅约占 5%^{20, 34}。IEA 及 BP 预测未来中国的天然气消耗量占总消费量的比例也不会有很大提高，到 2020 年约为 8%，2035 年约为 10%-12%^{35,36}。因此，对于天然气匮乏的我国而言，天然气是稀缺资源，应该充分发挥天然气清洁能源和快速调节的特点，把有限的天然气用在最能发挥其特点的地方。

表格 9 2012 年各国天然气、油、煤消费量占能源总消费量的百分比³⁷

国家	油	天然气	煤
美国	37%	30%	20%
德国	36%	22%	25%
英国	34%	35%	19%
俄国	21%	54%	14%
日本	46%	22%	26%
中国	18%	4.7%	68%

6.2.2 天然气的合理利用方式

针对各类天然气的应用方式，应从获取最佳的能源利用率和最大的污染物减排效果出发，科学地规划天然气应用范围，把有限的宝贵的天然气资源用在单位天然气替换其他燃料能够发挥出最大减排效果的地方。田贯三等（2009）做了相关的研究，计算了各种能源应用方式中 1m³ 天然气替代煤炭后能减少的烟尘、SO₂ 和 NO_x 的排放量，如表格 10⁴⁰ 所示，这可以作为应将天然气用于替代煤炭的哪种应用方式的参考判断依据：可按照当地具体的减排要求（哪种污染物是最需要减排的），根据表格 6 中的减排因子将各应用方式进行排序，将天然气应用于最需要的地方。

另一方面，天然气电厂作为调峰电厂可以充分发挥其快速调节的特点。北方风电的“弃风”情况严峻，“弃风”率约为 20%³⁸，大量“弃风”的主要原因之一是风电受天气影响明显，具有波动特性，而电网的调节能力不足。水电是最适于风电调峰的方式，但是受地理位置限制，我国的风电多在北方而水电多在南方，因而水电用于风电调峰也受到限制。在我国的北方多为燃煤火电，其惯性较大，无法快启快停以配合风电调峰。相比之下，燃气轮机可快启快停，是很好的调峰手段，从而缓解弃风现象。但一旦使用

天然气热电联产来供热，就需要“以热定电”，这样就彻底丧失了天然气的调峰功能，还会挤压常规燃煤火电的发电运行小时数。目前我国许多大型的高效燃煤电厂均在部分出力的工况下运行，年运行小时数较低（如：全国 60 万千瓦、30 万千瓦机组的年运行小时数分别为 5362 小时、5402 小时³⁹），这是对设备巨大初投资的浪费。而燃气电厂设备初投资成本低、运行成本高，就应该将燃气电厂仅作为调峰的手段，同时还能使得燃煤电厂的年运行小时数增加。

表格 10 1m³ 天然气替代煤炭后的平均城市环境减排量（单位：g）⁴⁰

天然气用户	替代燃煤方式	烟尘	SO ₂	NO _x
家用燃气锅炉（如壁挂炉）	家用小煤炉采暖（原煤）	256.26	63.70	21.61
家用燃气锅炉（如壁挂炉）	家用小型煤炉采暖（型煤）	58.41	60.20	19.47
天然气联合循环热电联产	燃煤热电联产	3.88	41.10	13.09
燃气蒸汽联合循环热电联产	燃煤发电与燃煤锅炉	4.43	15.15	3.74
小型燃气锅炉	立式燃煤锅炉，功率≤1t/h	128.94	46.80	12.24
燃气锅炉	卧式燃煤锅炉,1t/h<功率≤4t/h	14.57	33.82	9.89
燃气锅炉	卧式燃煤锅炉,4t/h<功率≤10t/h	10.25	30.20	8.69
燃气锅炉	燃煤锅炉，功率>10t/h	4.93	23.21	7.78
燃气联合循环冷电联产	燃煤发电与电制冷	-0.4	-0.02	-2.76
楼宇式热电联产	燃煤发电与燃煤锅炉	2.20	23.27	7.15
楼宇式冷电联产	燃煤发电与电制冷	-0.4	-0.02	-2.76
直燃机式吸收机（冷）	燃煤发电与电制冷	-0.4	-0.02	-2.76

注：1. 由于燃煤发电被认为是设在外地发电后再将电输送到城市内，所以这部分的排放不算做城市内环境排放；由于其他燃煤利用方式，如燃煤热电厂等，都是设在城市内，所以其他燃煤利用方式的排放均算作城市内环境排放。

2. 由于燃气联合循环冷电联产、楼宇式冷电联产、直燃机制冷等制冷效率较低，COP 约为 1-1.2，远低于水冷式电制冷的 COP（约为 5），所以对城市内的环境不仅不减排，而且增加了排放量，故减排量为负值，但是对整个大气污染物的减排还是有一定效果的。

6.2.3 小结

与天然气资源丰富的发达国家不同，我国天然气资源匮乏，所以，我国天然气的利用方式需走一条和发达国家不同的路线，要把有限、宝贵的天然气资源用在最能发挥其清洁能源和快速调节的特点的地方。为了发挥天然气“清洁能源”的特点，在进行能源规划的时候，可通过计算单位天然气替换其他燃料后的污染物减排量，然后可以此作为规划天然气用途的判断依据。另一方面，天然气电厂作为调峰电厂可以充分发挥其快速调节的特点，进而还能缓解“弃风”现象，增加燃煤电厂年运行时间。

7 对北京市采暖热源优化与 PM_{2.5} 治理的政策建议

7.1 总体能源结构

我国能源结构是以煤为主，煤的消耗量约占总的能源消费量 68%，而天然气仅占 5%。以煤为主的能源结构在未来较长的一段时间也不会改变。针对我国独特的能源禀赋，我

们应该研发、应用清洁、高效的煤利用方式，将有限的天然气用在最能发挥其清洁能源和快速调节的特点的地方。

7.2 城市采暖

通过计算与分析发现，北京市目前推行的热电联产“煤改气”措施，并不能显著降低NO_x排放量，起到减排和缓解灰霾的作用，反而会大幅增加天然气用量，造成用气矛盾。我国的能源结构是以煤为主，煤的消费量在能源总消费量中占68%，而天然气仅占5%。若全面推广“煤改气”，需要从国外大量进口天然气，国家能源安全受到威胁，能源形势将会变得很严峻。

我国煤资源丰富，清洁、高效的煤燃烧技术是符合我国能源国情的最合适的能源利用方式。我们建议在北京等大城市采暖方式应以采用我国自主的高效清洁煤燃烧技术的燃煤热电联产为主，这种能源利用方式可以以燃煤为燃料，通过热电联产产生同样的热量，而NO_x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，是符合我国国情的能源利用方式，不仅能高效、清洁地利用我国丰富的煤资源，而且能大量减少NO_x的排放量，从而降低二次颗粒物的数量，缓解严重的灰霾天气。

7.3 农村采暖

通过测试与计算分析发现，虽然农村地区用于采暖的燃煤和生物质总量较小，但其一次PM_{2.5}排放总量远高于城市地区大型锅炉的排放水平。因此，农村应该作为北京市PM_{2.5}减排的重要突破点之一，给予相应的重视。

目前，北京农村地区冬季采暖以土暖气和生物质炕灶为主，燃料的低效非充分燃烧，是导致一次PM_{2.5}排放总量居高不下的主要原因。当采用型煤锅炉或生物质锅炉替代土暖气后，在满足相同采暖负荷的情况下，与燃烧燃煤相比，型煤锅炉和生物质锅炉造成的户均一次PM_{2.5}排放可分别降低36.8%和68.7%。由此可见，从农村采暖设备入手，可以显著降低农村住宅用能所造成的一次PM_{2.5}排放，对改善大气环境具有重要意义。

参考文献

- 1 中国环境监测总站网站数据
- 2 环境空气质量标准. 中华人民共和国国家标准 GB 3095-2012
- 3 中华人民共和国中央人民政府网:
http://www.gov.cn/jrzq/2013-10/21/content_2511454.htm
- 4 于 2013 年 3 月 28 日清华大学建筑节能周论坛唐孝炎院士发言 ppt
- 5 胡倩, 张世秋, 吴丹. 美国和欧洲氮氧化物控制政策对中国的借鉴意义. 环境保护, 2007 (10)
- 6 http://www.ycwb.com/epaper/ycwb/html/2013-03/30/content_1556700.htm
- 7 北京市统计年鉴 2013. 中国统计出版社
- 8 <http://zhengwu.beijing.gov.cn/ghxx/qtgh/t1321733.htm>
- 9 http://news.xinhuanet.com/politics/2013-10/31/c_125629878.htm
- 10 <http://finance.qq.com/a/20101026/000025.htm>
- 11 岳光溪院士提供数据
- 12 火电厂大气污染物排放标准. 中华人民共和国国家标准 GB 13223-2011
- 13 固定式燃气轮机大气污染物排放标准. 北京市地方标准 DB11/ 847-2011
- 14 上海外高桥第三发电厂 2013 年 1-6 月报告
- 15 张建中, 陈成生. 外高桥第三发电厂 2×1000MW 超超临界机组工程建设中的重大技术创新和项目优化. 电力建设, 2008, 29 (8): 69-73
- 16 陈仁杰. 上海外高桥第三发电厂工程设计特点. 电力勘测设计, 2010 (6): 34-38
- 17 <http://www.csitf.cn/cn/EnewsTRLetter.aspx?id=19&cid=113>
- 18 付林, 江亿, 张世刚. 基于 Co-ah 循环的热电联产集中供热方法. 清华大学学报 (自然科学版), 2008, 48 (9)
- 19 “煤改气”遇气荒尴尬
<http://finance.sina.com.cn/money/future/futuresnyzx/20131111/085717282334.shtml>
- 20 郝吉明, 段雷, 易红宏, 等. 燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008:233

-
- 21 Su Ge, Zhipeng Bai, Weili Liu, et al. Boiler Briquette Coal versus Raw Coal: Part I—Stack Gas Emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2001, 51(4) :524-533
 - 22 耿春梅, 陈建华, 王歆华, 等. 生物质锅炉与燃煤锅炉颗粒物排放特征比较[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(6) :666-671
 - 23 杨舒鸿, 丁艳军. 煤制天然气技术路线的全生命周期分析. *现代化工*, 2012, 32(9): 4-7
 - 24 钱卫、黄于益等. 煤制天然气 (SNG) 技术现状. 转化利用, 2011.
 - 25 王平. 新疆某 40 亿立方/年煤制天然气项目用水合理性分析. *水利科技与经济*, 2013, 19(8): 74-76.
 - 26 张震. 几种煤制气方法的技术现状及工艺比较. *河北化工*, 2009, 32(6):41-43
 - 27 高丽. 德士古水煤浆加压气化技术的应用. *煤炭技术*, 2010, 29(67):161-162
 - 28 黎军. 德士古水煤浆气化工艺概况. *安徽化工*, 2001, 109:46-49
 - 29 李志远, 张大晶等. 壳牌煤粉加压气化技术. *化工进展*, 2003, 22(9):998-1000
 - 30 郭前辉. 炉灶热性能测试系统设计. 河南农业大学硕士论文, 2009
 - 31 唐玉婷等. (2013). 煤制取天然气全生命周期评价分析. *环境工程*, 31(5)
 - 32 张明. 煤制天然气示范对我国能源结构调整的意义及启示. *中国石油和化工*, 2011.08
 - 33 罗佐县, 张礼貌. 我国煤制气产业发展进入新阶段. *中国石化*, 2013.01
 - 34 中国统计年鉴 2012. 中国人民共和国国家统计局
 - 35 IEA. *World Energy Outlook 2013*
 - 36 BP. *Energy Outlook 2035*
 - 37 BP *Statistical Review of World Energy June 2013*.
 - 38 李俊峰等. 2012 中国风电发展报告. 中国环境科学出版社, 2012 年 9 月第一版
 - 39 2011 年度发电机组并网运行情况监管报告. 国家电力监管委员会
 - 40 田贯三, 付林. “西气东输”中天然气合理应用方式研究. 中国建筑工业出版社, 2009 年 4 月第一版