几种热能供应方式的排放与经济性研究

作者：杨天坤、史海廷、刘锋（联合优发生物质能源徐州有限公司，江苏省丰县221731）

摘要：
散煤燃烧成为大气污染的重要来源，燃煤小炉窑治理成为大气污染治理的重要措施。本文针对《中华人民共和国大气污染防治法》以及各省《大气污染防止条例》列举的几种常见的燃煤锅炉替代方式，包括热电联供、电锅炉、燃气锅炉及生物质成型燃料锅炉四种现今最具推广价值的蒸汽热能供应形式，进行了污染排放及用户成本分析比较，同时考虑到2017年我国即将建立全国碳市场，我们也对四种供热方式的碳排放价值进行了分析。本文引用从一次能源到用户的全周期污染物排放分析和排放控制社会成本分析方法，更加全面、客观地研究了四种方式的排放量和排放控制成本。可以作为政策制定者和法规执行者的科学依据。本文基于当前市场价格水平从热能用户的角度分析了在不同供热方式下的供热成本，包括了取得热能消费权的前期投资和持续的运营成本，为热能用户决策提供参考依据。

0.引言

依据新修订的《中华人民共和国大气污染防治法》第三十八条：城市人民政府可以划定并公布高污染燃料禁燃区，并根据大气环境质量改善要求，逐步扩大高污染燃料禁燃区范围。高污染燃料的目录由国务院环境保护主管部门确定。在禁燃区内，禁止销售、燃用高污染燃料；禁止新建、扩建燃用高污染燃料的设施，已建成的，应当在城市人民政府规定的期限内改用天然气、页岩气、液化石，油气、电或者其他清洁能源。第三十九条规定：城市建设应当统筹规划，在燃煤供热地区，推进热电联产和集中供热。在集中供热管网覆盖地区，禁止新建、扩建分散燃煤供热锅炉；已建成的不能达标排放的燃煤供热锅炉，应当在城市人民政府规定的期限内拆除。[1]

可见，目前蒸汽用户可以选择的热能供应方式有：热电联产、天然气、电或者其他清洁能源。

那么何为清洁能源？根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）的《气候变化2007综合报告》对能源的定义[2]，将能源分为一次能源和可再生能源两大类。一次能源(也称作能源)是自然资源(如煤、原油、天然气、铀)中的能量，这类能源未经过任何人为转换。一次能源需要通过转换和运输而成为可用能源(如：电能)。清洁能源是不排放污染物的能源，它包括核能和“可再生能源”。可再生能源是指原材料可以再生的能源，如水力发电、风力发电、太阳能、生物能、地热能、海潮能这些能源。

何为高污染燃料：根据国家环保总局的通知（环发【2001】37号）[03]，原（散）煤、煤矸石、粉煤、煤泥、燃料油（重油和渣油）、各种可燃废物和直接燃用的生物质燃料（树木、秸杆、锯末、稻壳、蔗渣等）。

其中生物质直接燃用由于能量密度低，燃烧方式不完善，容易造成污染。但是经过加工处理成为生物质成型燃料后可以则变为可再生的清洁燃料。环境保护部办公厅关于生物质成型燃料有关问题的复函(环办函〔2009〕797号)中指出:采用农林废弃物（秸杆、稻壳、木屑、树枝等）为原料，通过专门设备在特定工艺条件下加工制成的棒状、块状或颗粒状等生物质成型燃料，可有效改善农林废弃物的燃烧性能，其硫、氮和灰份含量较低，在配套的专用燃烧设备上应用，可实现清洁、高效燃烧，产生的二氧化硫、氮氧化物和烟尘较少，不属于高污染燃料[4]。

考虑到热能用户对热能的需求方式包括了热水、蒸汽、热风、热处理等方式，本文对仅限于低温热能的供热方式没有列入研究范围，仅就天然气、电能、燃煤热电联产、生物质成型燃料四种方式做了研究对比。

考虑到人类在气候变化和能源危机中面临的挑战，因此我们在鼓励和引导能源消费时，必须把温室气体排放和能源的可再生属性作为重要的战略要素来考虑。因此，在研究中也引用了碳资产的概念。

1.热能需求及其供应方式

1.1 热能需求

热能是最早被人类认识和利用的能源形式之一。人类依赖于太阳的光和热生存繁衍，人类从钻木取火开始主动消费热能。现代生产生活中热能的利用形式包括热水、热风、蒸汽、热处理等，而这些热介质或热处理所需要的热能由一次能源经过一次或多次转换而来的，热能是人类生产生活中最重要的能源消费方式之一。本文研究应用较广泛，可提供持续热能服务的蒸汽热能形式。产蒸汽的能源来自天然气、电能、燃煤热电联产、生物质成型燃料四种方式。

1.2 热电联产与热能供应

火电厂利用大型燃煤锅炉产生的蒸汽，进入蒸汽轮机带动发电机生产电能，同时又利用汽轮机背压蒸汽或抽汽对用户供热的生产方式，叫做热电联产。以热电联产方式运行的火电厂称为热电厂。当然热电厂的燃料可以是燃煤、油、气、生物质、垃圾等。

其对外供热的蒸汽源压力通常分为0.78～1.28 MPa和0.12～0.25MPa两等。前者供工业生产，后者供民用采暖。热电联产的蒸汽没有冷源损失，所以能将热效率提高达85%以上，比大型凝汽式机组(热效率达40%)还要高得多。因此热电联产是受到大力推广的能源利用方式。但是，如果热电比达不到一定的水平，一些以热电联产为名的小型火电机组反而效率比大型火电机组要低，因此关闭小火电也是国家鼓励的方向。

综上所述，发展热电联产的条件是热负荷全年稳定，而且要足够大，足够集中，才应该得到鼓励。目前我国大多数热电联产还是以燃煤为主，建设一个热电厂需要配套各种环保设施，还需要建立庞大的热网设施。燃煤的使用会增加温室气体排放，根据我国2017年即将实施的碳市场有关规定，需要取得温室气体排放权。

热电联产热能供应过程是一个燃煤等传统化石能源高效率多形式应用过程，其主要流程如下图所示：

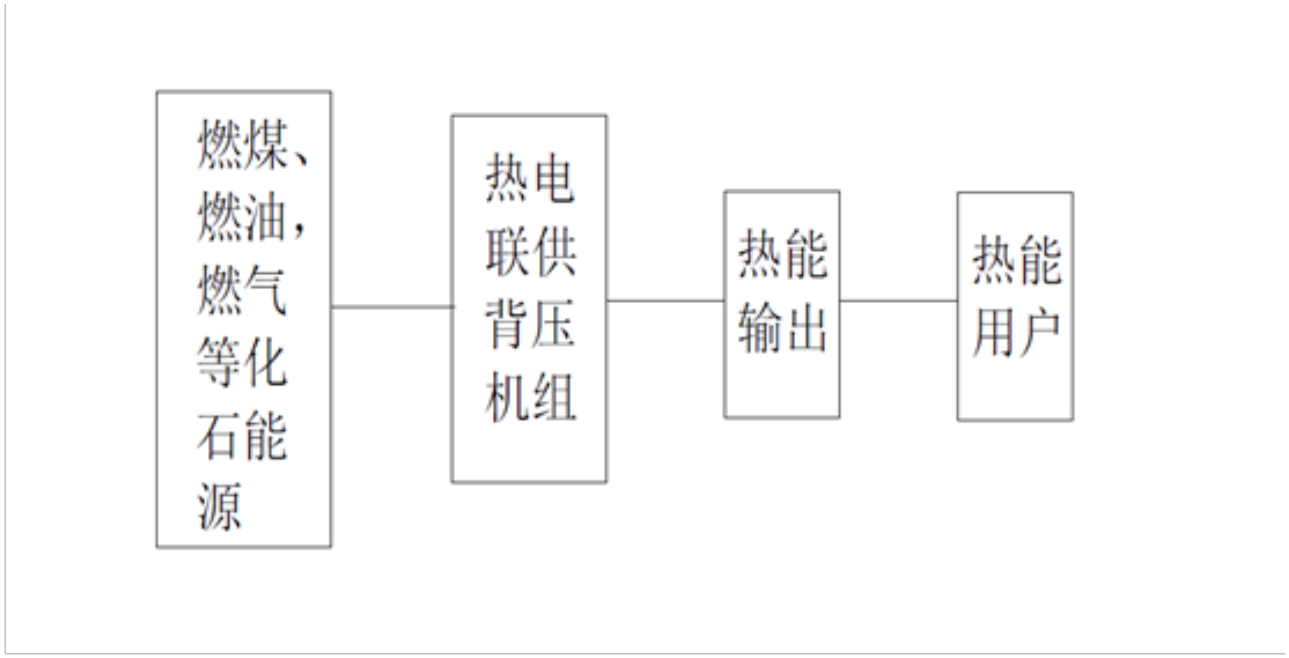

图1-1 热电联供热能供应流程图

在此生产流程中，煤、油、气等化石能源的使用，会产生二氧化硫、氮氧化物、粉尘等污染物和二氧化碳（温室气体）的排放。

1.3 电力生产与热能供应

电锅炉也称电加热锅炉、电热锅炉，是以电力为能源，利用电阻发热或电磁感应发热，通过锅炉的换热部位把热媒水或有机热载体（导热油）加热到一定参数(温度、压力)时，向外输出具有额定工质的一种热能设备。

电锅炉按照用途的不同又可以分为电开水锅炉、电热水锅炉、电蒸汽锅炉、电导热油锅炉和电加热炉等。

电锅炉消耗的能源是电能，这部分电能主要来源于城市电网，追根溯源其来源仍主要是发电厂中燃煤、燃油及燃气等化石能源的为主的电能输出，其主要流程如下图所示：

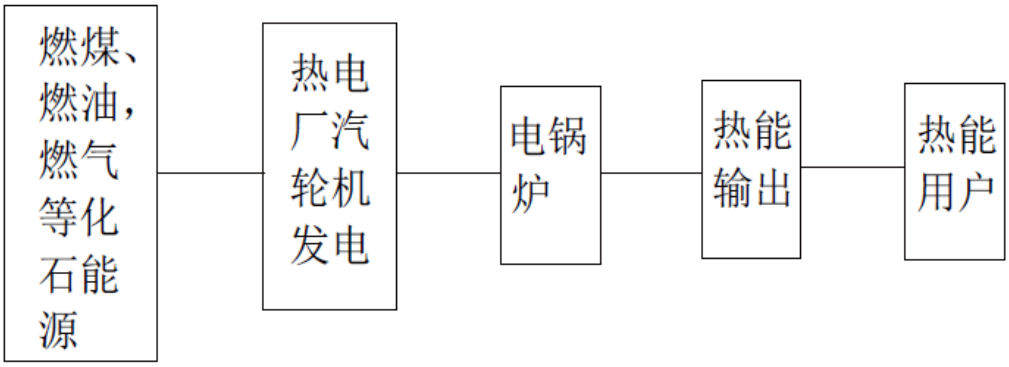

图1-2 电锅炉热能供应流程图

因此，尽管最终用户具有使用电能的环境优势，但电能的生产过程中如果采用的是煤、油、气等化石能源，依然会产生二氧化硫、氮氧化物、粉尘等污染物和二氧化碳的排放。

1.4 天然气生产与热能供应

燃气锅炉是指利用燃气燃烧放热将锅炉中的介质加热到一定的状态参数（热水、热风、蒸汽、热处理等）并对外输出热能以全面满足人们对于工业生产及生活热能需求。

燃气锅炉所使用的燃气主要包括管道天然气和液化天然气等。天然气主要成分为烷烃，其中甲烷占绝大多数，另有少量的乙烷、丙烷和丁烷，此外一般有硫化氢、二氧化碳、氮和水气和少量一氧化碳等。

而天然气由开发到最终在客户端完全燃烧放热，其主要流程如下图所示：

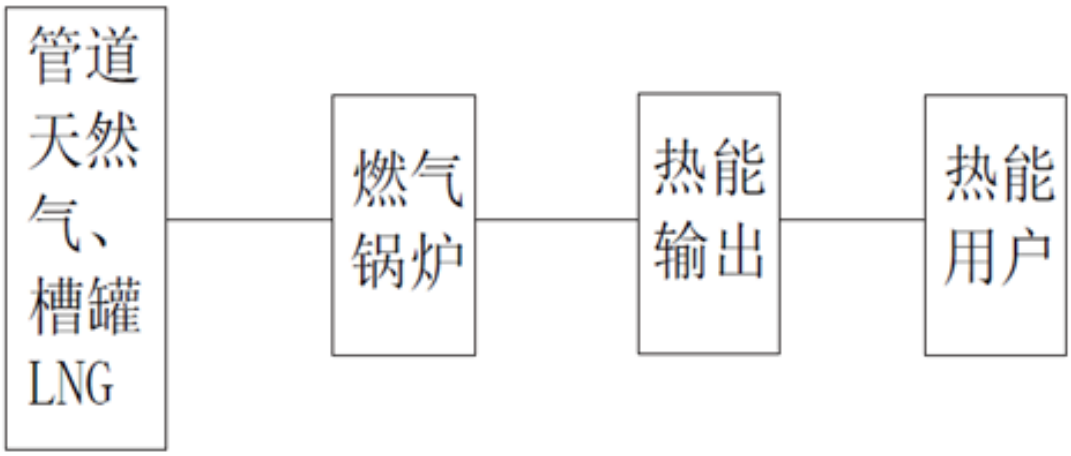

图1-3 燃气锅炉热能供应流程图

由天然气的使用流程可见，天然气的应用，依然会产生二氧化硫、氮氧化物、粉尘等污染物和二氧化碳的排放。

1.5 生物质成型燃料生产与热能供应

生物质成型燃料是指将各种生物质废弃物，如锯末、秸秆、稻壳、树木哑枝等经过破碎、筛选、烘干、成型等工艺使原来松散、细碎、无定形的生物质原料压缩成密度较大的颗粒、棒状、块状等各种成型燃料。

由于生物质原料分布散、质地松散、能量密度小，给采集、储运及使用过程带来诸多不便，所以未经加工转化的生物质原材料，一般只能当作低品味能源用于农村传统炊事供暖，甚至直接废弃在田间地头，不仅没有商业价值，而且也是重要的污染源。而经过加工成型后的生物质成型燃料，质地均匀，密度及强度大幅度加强，储运过程更加方便、安全且快捷，能量密度大大增加，燃烧性能大为改善，可以成为比燃煤更清洁的可再生能源燃料。

我国生物质资源丰富，分布较广，可作为能源化利用的玉米、水稻、小麦、棉花、油料农作物秸秆及农产品加工剩余物资源量每年约2亿吨标煤，薪炭林、林业“三剩物”、木材加工剩余物等林业剩余物约2亿吨标煤，合计每年约4亿吨标煤。保守估算，用生物质成型燃料供热至少能够替代75%的散煤，从资源、技术等条件来看煤改生物质将是煤改天然气的重要替代及补充。

从国际经验来看，欧洲国家生物质能供热比较普遍，芬兰、丹麦、奥地利生物质能热力占全国热力消费总量比重分别达到43%、28%和31%。当前在我国，生物质成型燃料锅炉供热作为低碳清洁环保经济的可再生能源供热方式，还没有得到充分的推广和应用。

与常规的依靠大规模长途输送化石燃料、集中建设大规模供热项目、布局大规模管网等热力生产和利用方式相比，生物质成型燃料锅炉供热是典型的分布式供热，当地收集原料，当地生产，当地利用，直接在终端消费侧替代燃煤供热，布局分散，运行灵活，适应性较强，能满足多元化用热需求，是能源生产和消费方式革命的重要内容。

由松散的原始生物质原料到最后形成高品位、可商业化的生物质成型燃料其主要工艺流程如下图所示：

图1-4 生物质成型燃料生产流程图

同时生物质由成型燃料到最终完全燃烧放热，其主要流程如下图所示：

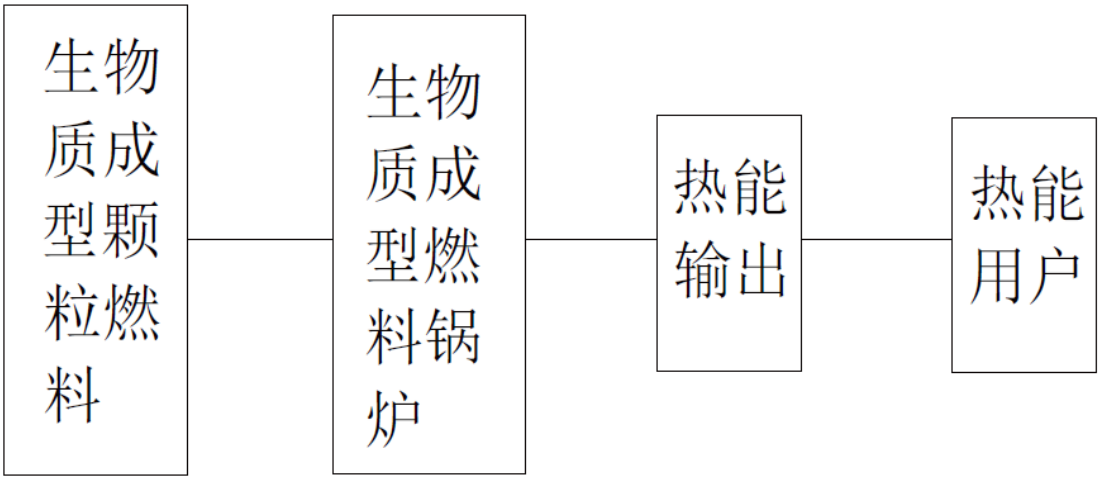

图1-5 生物质成型燃料锅炉热能供应流程图

作为一种低碳环保经济的可再生能源分布式供热方式，生物质成型燃料供热不仅是治理燃煤污染的重要途径，也是用低碳和可持续方式满足热能需要的总要方式。

2.四种热能供应方式的烟气排放量分析

由于涉及电网排放因子，我们在分析研究中选定华北电网。对四种热能供应方式的烟气排放量统一折算至每生产1吨蒸汽的排放，蒸汽热值按工业蒸汽1.2MPa，260°C，焓值2958kJ/kg（相当于70.7万大卡/吨蒸汽）计算。

2.1 热电联产供应热能的烟气排放

根据《热电联产管理办法》的规定，50万人口以下采暖型热电联产原则采用50MW及以下背压热电联产机组。考虑当前热电厂以燃煤为主，本节计算采用能源主要为优质动力煤（低位热值为6000kCal/kg的烟煤）。根据相关资料[7]计算可知，50MW背压机组燃煤热电厂额定工况下的全厂热效率取88%，热电比取650%。依据火电厂大气污染物排放标准[5]，其中规定锅炉排放烟气的指标如下表所示：

表2-1 火电厂燃煤锅炉大气污染物排放限值[5]

序号	参数名称	使用条件	限值
1	烟尘	全部	30mg/m³
2	二氧化硫	新建锅炉	100mg/m³
3		现有锅炉	200mg/m³
4	氮氧化物（NO2 计）	全部	100mg/m³

每吨热值为6000kCal/kg的烟煤完全燃烧理论空气消耗量为6500m ^{3} [6]，为保证燃煤的燃烧消耗充分，需要配给过量的空气，依据火电厂大气污染物排放标准相关规定，电厂燃煤锅炉排放基准氧气含量为6%（折算后选取空气过量系数为1.4），即燃煤锅炉的实际烟气量（假定理论烟气量近似于理论空气量）为9100m ^{3} 。

每吨燃煤的供能输出量为Q热电联产。

Q热电联产热输出=6000kCal/kg×1000kg×88%×（6.5/7.5）=457.6万kCal

相当于输出蒸汽量为Q热电联产蒸汽量=457.6万kCal÷70.7万kCal/t=6.47t

按热电联产的热电比，对蒸汽供热的烟气排放量进行热电分摊：

燃烧1吨煤的烟气量，分摊到供热的烟气量=9100×6.5/7.5=7887 m^3。

分摊至生产每吨蒸汽所产生的烟气量为V热电烟气=7887÷6.47=1219 m^3。

2.2 电热锅炉热能溯源的烟气排放

电热锅炉使用方便，且在使用端清洁性良好，仅消耗电力。但是追根溯源，电热锅炉所消耗的电能依旧主要来源于火电厂的燃煤消耗火力发电，在源头上产生大量的污染排放。其污染物排放目前执行的是火电厂大气污染物排放标准，如表2-2所示：

表2-2：火电厂燃煤锅炉大气污染物排放极限[5]

序号	燃煤设备	参数名称	适用条件	限值
1	燃煤锅炉	烟尘	全部	30mg/m³
		二氧化硫	新建锅炉	100mg/m³
			现有锅炉	200mg/m³
		氮氧化物（NO2 计）	全部	100mg/m³
2	燃油锅炉	烟尘	全部	30mg/m³
		二氧化硫	新建锅炉	100mg/m³
			现有锅炉	200mg/m³
		氮氧化物	新建锅炉	100mg/m³
			现有锅炉	200mg/m³
3	燃气锅炉	烟尘	全部	5mg/m³
		二氧化硫	全部	35mg/m³
		氮氧化物	全部	100mg/m³

表2-3：2014年华北电网电能生产蒸汽在发电厂产生的烟气当量根据国家发改委公布的华北电网排放因子相关文件[8]可知，2014年华北电网煤、油、气的总消耗量及火力发电的总供电量11614亿kWh，核算出单位电能的烟气排放量。再考虑电加热蒸汽锅炉效率95%，从而计算出电加热蒸汽锅炉生产1吨蒸汽，所耗电能在发电厂产生的烟气排放量。依据相关文件 [8]中华北电网计算说明表格可算出如下参数：

燃料	消耗量（万吨/千万 m^3）	总烟气量（亿 m^3）	华北电网总供电量（亿 kWh）	电锅炉生产 1 吨蒸汽的烟气当量（m^3）
固体燃料	60440.45	45085	11614	3358
液体燃料	45.01	48		4
气体燃料	10037.9	1586		118

注：生产1吨蒸汽（热焓2.958GJ），需要耗电=2.958÷95%÷3.6GJ(1MWh=3.6GJ)=0.865MWh

2.3 天然气锅炉供应热能的烟气排放

天然气是一种清洁的化石燃料，虽然由于资源制约、输送管路设施局限及高昂的价格等原因使其全面推广受到了一定阻碍，但是煤改气仍然是人们很容易想到的治理燃煤污染的重要措施。

目前国内小型燃气锅炉执行的是锅炉大气污染物排放标准[9]，其中规定燃气锅炉排放烟气的指标如下表所示：

表2-4：燃气锅炉大气污染物排放限值[9]

序号	参数名称	使用条件	限值
1	烟尘	新建锅炉	20 mg/m³
		现有锅炉	30mg/m³
2	二氧化硫	新建锅炉	50mg/m³
		现有锅炉	100mg/m³
3	氮氧化物（NO2 计）	新建锅炉	200 mg/m³
		现有锅炉	400mg/m³

依据相关数据选取天然气热值为8500kCal/m ^{3} 和工业炉设计手册[10]相关计算公式，可计算出每燃烧一方热值为8500kCal的天然气理论烟气（空气）量为9.4m ^{3} /m ^{3} 燃气，参考锅炉大气污染物排放标准的相关规定，燃气锅炉排放基准氧气含量为3.5%（折算后选取空气过量系数为1.2），即燃煤锅炉的实际烟气量（空气量）为11.28m ^{3} /m ^{3} 燃气。

根据相关调研计算分析结果，天然气蒸汽锅炉综合热效率在85.96-88.26%（未考虑设置节能器），此处选取效率为86%。为便于统一比较，假定天然气蒸汽锅炉生产1.2MPa，260°C的过热蒸汽，由此，生产1吨蒸汽的天然气锅炉产生的烟气量V燃气锅炉烟气为：

V燃气锅炉烟气=2958MJ÷0.86÷8500kCal/m ^{3} ÷4.1816×1000×11.28m ^{3} /m ^{3} 燃气=1092m ^{3} 。

2.4 生物质成型燃料锅炉供应热能烟气排放

查阅相关文献[11]数据可知1000kg生物质燃料完全燃烧产生的烟气量为6552.29m ^{3} /1000kg燃料，氮氧化物含量为1.02kg/1000kg燃料。依据相关标准[09]规定“使用型煤、水煤浆、煤矸石、石油焦、油页岩、生物质成型燃料参照本标准中燃煤锅炉排放控制要求执行”，因此生物质成型燃料在作为锅炉燃料时其锅炉排放烟气的指标如下表所示：

表2-5：生物质成型燃料锅炉大气污染物排放极限[9]

序号	参数名称	使用条件	极限值	监控测量位置
1	烟尘	新建锅炉	50 mg/m³	烟尘或烟道
		现有锅炉	80mg/m³	
2	二氧化硫	新建锅炉	300mg/m³	
		现有锅炉	400mg/m³	
3	氮氧化物（NO2 计）	新建锅炉	300 mg/m³	
		现有锅炉	400mg/m³	

由于生物质成型燃料锅炉效率接近于燃煤锅炉，小型生物质成型燃料锅炉运行效率选取为85%。故使用生物质成型燃料锅炉进行供暖每产生1吨蒸汽量所消耗的生物质燃量及产生的烟气量分别为为m生物质供暖及V生物质烟气。

M生物质供暖=2958MJ÷4.1816×1000÷4300kCal/kg÷0.85=193.5kg

V生物质烟气=6552.29m ^{3} /1000kg÷1000kg×193.5kg=1258 m ^{3} /t蒸汽

3.四种热能供应方式的污染物排放分析

本章节将依据四种热能供应形式烟气量的计算结果展开烟尘、二氧化硫、二氧化氮等污染组分及温室气体二氧化碳的排放的分析。其中热电联供、电锅炉、燃气锅炉三种热能供应形式均有现行国标作为参照，在计算排放极值可直接参照标准限制进行计算；而生物质成型燃料锅炉排放目前虽然按照燃煤锅炉执行，但是其真实排放情况标准相差较大，因此以下将参照生物质成型燃料的真实排放情况进行计算，并将计算结果直接带入后文排放分析。

1）生物质成型燃料锅炉烟尘排放量计算

依据本公司随机送检的成型燃料检测报告，取成型燃料灰分为17.3g/kg燃料，假设燃烧后灰分的30%转化为烟尘排出。可知每燃烧1kg生物质成型燃料的排放烟尘量为m生物质烟尘=17.3×30%=5.19g /kg燃料。

而每产生1吨蒸汽消耗生物质成型燃料193.5kg，产生烟气量1258m ^{3} ，因此每产生1吨蒸汽量产生的烟尘含量为M生物质烟尘=5.19g/kg×193.5kg=1004.3g/t蒸汽。

常规中使用生物质成型燃料锅炉需要添加布袋除尘器，其效率为99%以上，因此除尘器净化过滤后烟尘排放量为M生物质烟尘过滤=1004.3g/t蒸汽×1%=10.04g/t蒸汽。

烟气的平均含尘量为X生物质烟尘过滤=10.04g÷1258m ^{3} =8mg/ m ^{3}

可以看出经布袋除尘器过滤的生物质成型燃料锅炉烟尘排放量远优于燃煤锅炉，达到甚至远超燃气排放标准。

2）生物质成型燃料锅炉二氧化硫排放量计算

依据本公司随机送检的成型燃料检测报告，取成型燃料硫含量（单质硫）为0.3g/kg燃料，假设燃烧后完全转化为二氧化硫0.6g/kg燃料。

因此每产生1吨蒸汽量产生的二氧化硫排放量为M生物质二氧化硫=0.6g/kg×193.5kg=116.1g/t蒸汽。

烟气的平均二氧化硫含量为X生物质二氧化硫=116.1g÷1258m ^{3} =92.3mg/ m ^{3}

可以看出经布袋除尘器过滤的生物质成型燃料锅炉二氧化硫排放量远优于燃煤锅炉，甚至达到了燃气排放标准。

3）生物质成型燃料锅炉二氧化氮排放量计算

相关文献[11]数据可知生物质成型燃料完全燃烧后的产生的二氧化氮含量为1.02 g/kg燃料。

因此每产生1吨蒸汽量产生的二氧化氮排放量为M生物质二氧化氮=1.02g/kg×193.5kg=197.4g/t蒸汽。

烟气的平均二氧化硫含量为X生物质二氧化硫=197.4g÷1258m ^{3} =156.9mg/ m ^{3}

可以看出经布袋除尘器过滤的生物质成型燃料锅炉二氧化氮排放量远优于燃煤锅炉，甚至达到了燃气排放标准。

综上所述，每生产1吨蒸汽，生物质成型燃料完全燃烧释放的污染区排放量量一次为10.04g、116.1g、197.4g。

3.1 四种热能供应方式的SO2排放分析

根据上述分析的不同蒸汽生产方式，在生产过程中对环境排放的烟气量及二氧化硫的排放限值标准，四种热能供应方式下产生的SO2排放如下表和下图所示：

表3-1 四种热能供应方式烟气及SO2排放分析表

供能方式	生产 1 吨蒸汽	烟气量 m^3	排放 SO_2 限值 mg/m^3	SO_2 排放量 g	相对于天然气排放指数
热电联产	1.2MPa,260℃	1219	200	243.8	2.23
电加热锅炉	1.2MPa,260℃	煤：3358	200	676.5	6.15
		油：4	200		
		气：118	35		
天然气锅炉	1.2MPa,260℃	1092	100	109.2	1.00
生物质成型燃料锅炉	1.2MPa,260℃	1258	400	116.1	1.06

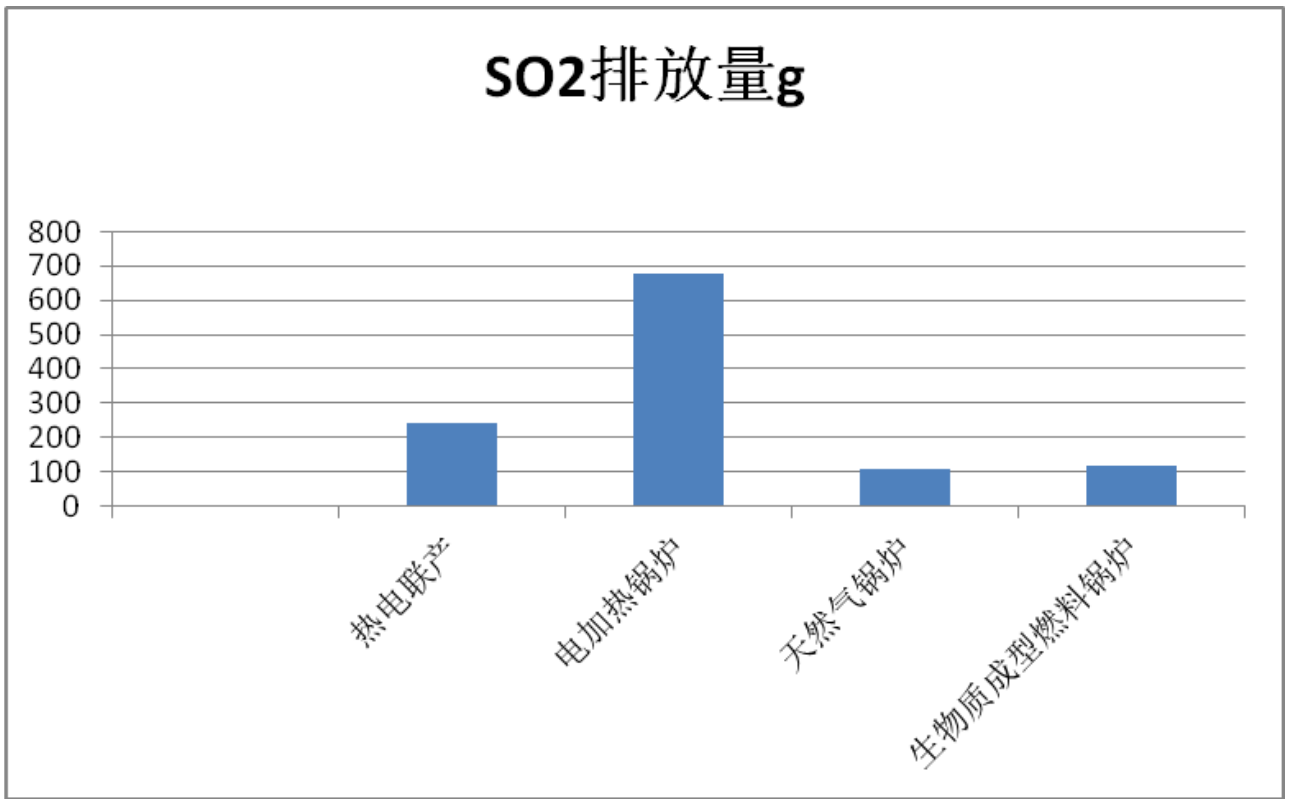

图3.1 四种热能供应形式SO2排放量柱状图

3.2 四种热能供应方式的NO2排放分析

根据上述的四种热能供应方式的烟气量和排放标准计算的不同供能方式产生的二氧化氮排放量如下表和下图：

表3-2 四种热能供应方式烟气及NO2排放分析表

供能方式	生产 1 吨蒸汽	烟气量 m^3	排放 NO_2 限值 mg/m^3	NO_2 排放量 g	相对于天然气排放指数
热电联产	1.2MPa,260℃	1219	100	121.9	0.28
电加热锅炉	1.2MPa,260℃	煤：3358	100	348.4	0.8
		油：4	200		
		气：118	100		
天然气锅炉	1.2MPa,260℃	1092	400	436.8	1.00
生物质成型燃料锅炉	1.2MPa,260℃	1258	400	197.4	0.45

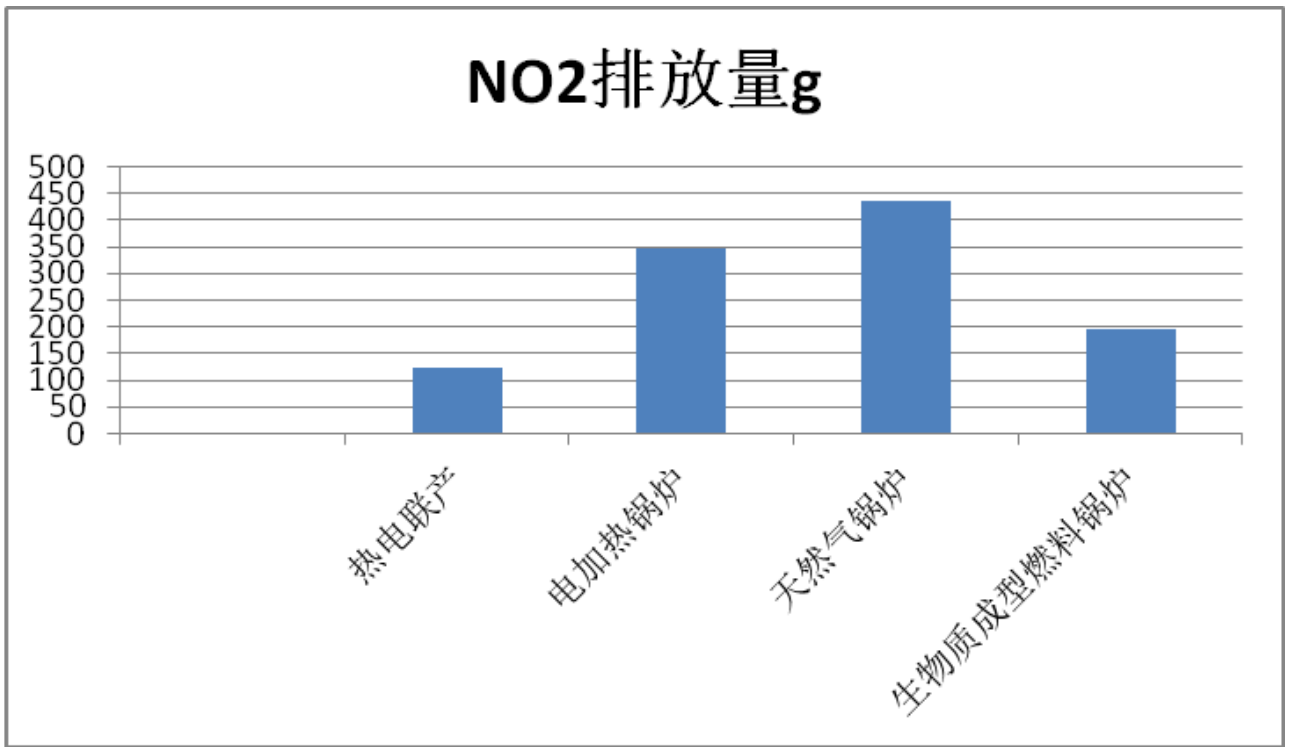

图3.2 四种热能供应形式NO2排放量柱状图

3.3 四种热能供应方式的粉尘排放分析

根据上述的四种热能供应方式的烟气量和排放标准计算的不同供能方式产生的粉尘排放量如下表和下图：

表3-3 四种热能供应方式烟气及烟尘排放分析表

供能方式	生产 1 吨蒸汽	烟气量 m^3	粉尘限值 mg/m^3	粉尘排放量 g	相对于天然气排放指数
热电联产	1.2MPa,260℃	1219	30	36.6	1.1
电加热锅炉	1.2MPa,260℃	煤：3358	30	101.5	3.1
		油：4	30		
		气：118	5		
天然气锅炉	1.2MPa,260℃	1092	30	32.8	1
生物质成型燃料锅炉	1.2MPa,260℃	1258	80	10.04	0.31

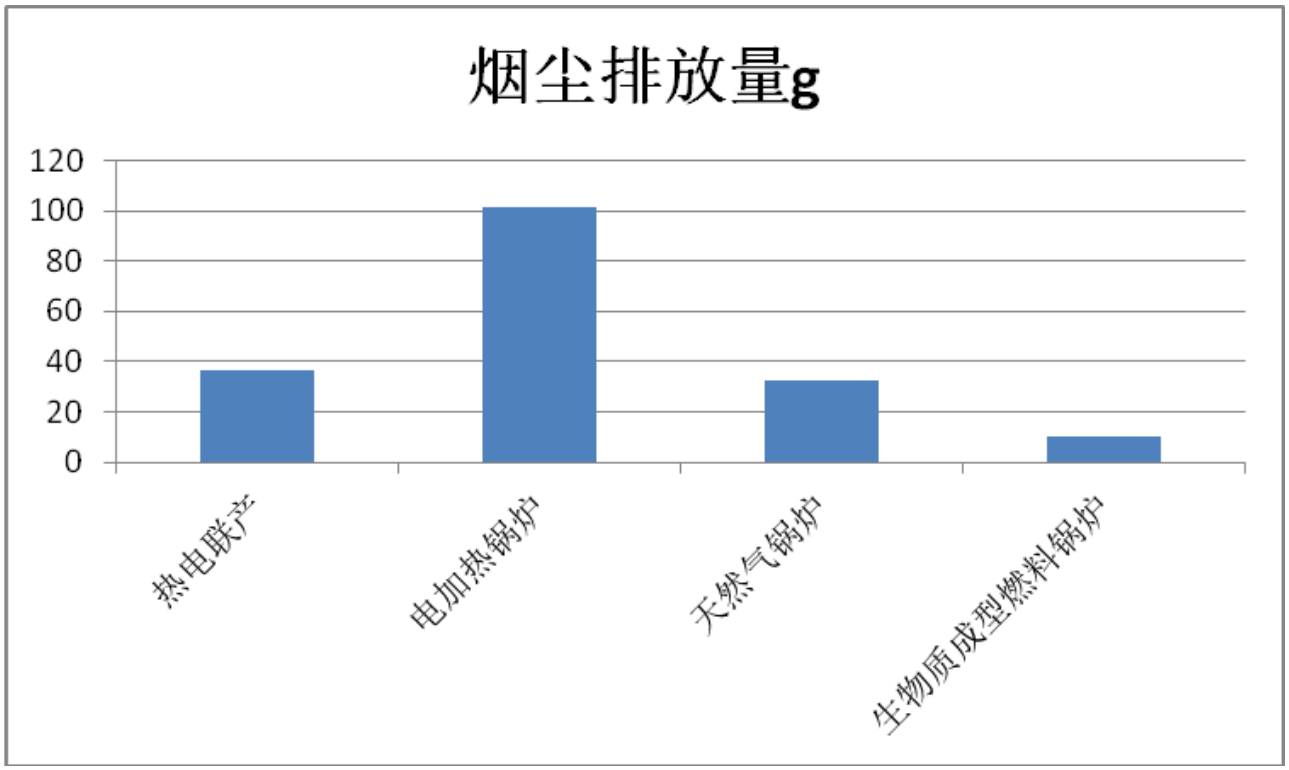

图3.3 四种热能供应形式烟尘排放量柱状图

3.4 四种热能供应方式的CO2排放分析

根据上述的四种热能供应方式的烟气量和排放标准计算的不同供能方式产生的CO2排放量如下表和下图：

表3-4 四种热能供应方式CO2排放分析表

供能方式	生产 1 吨蒸汽所需能量	排放因子	CO_2 排放量	相对于天然气排放指数
	GJ 或 MWh/t 蒸汽	$kgCO_2$/GJ 或 MWh	$kgCO_2$/t 蒸汽	
热电联产	3.36*	87.3**	293	1.57
电加热锅炉	0.865*	991.3**	857	4.59
天然气锅炉	3.44*	54.3**	187	1.00
生物质成型燃料锅炉	3.48*	0	0	0

*说明：根据2.1部分内容，热电联产生产1吨蒸汽按热电分摊需要的燃煤热能=6000kCal×1000/4.1816×6.5/7.5/6.47/1000000=3.36GJ。电加热锅炉生产1吨蒸汽需要0.865MWh电能。天然气锅炉生产1吨蒸汽需要天然气能=2.958GJ(1吨蒸汽热焓)/86%=3.44GJ。生物质成型燃料锅炉生产1吨蒸汽需要生物质热能=2.958GJ(1吨蒸汽热焓)/85%=3.48GJ。

**说明：根据国家发改委公布的华北电网排放因子相关文件[8]可知，燃煤的排放因子为0.0873tCO2/GJ。2014年华北电网火力发电的排放因子为0.9913tCO2/MWh。天然气的排放因子为：0.0543tCO2/GJ。生物质属于碳中性，CO2排放不计。

3.5 污染物排放总结分析

通过上述计算主要针对热电联供、电加热锅炉、燃气锅炉及生物质成型燃料锅炉四种常见蒸汽生产方式，生产1吨蒸汽所产生的烟尘、硫化物、氮氧化物、温室气体二氧化碳排放相关数据，总结统计表如下：

表3-5：几种热能供应方式吨蒸汽排放数据汇总

编号	供热形式	SO_2 排放(g)	NO_2 排放(g)	粉尘(g)	CO_2 排放(t)
1	热电联产	243.8	121.9	36.6	0.293
2	电加热锅炉	676.5	348.4	101.5	0.857
3	天然气锅炉	109.2	436.8	32.8	0.187
4	生物质成型燃料锅炉	116.1	197.4	10.04	0.000

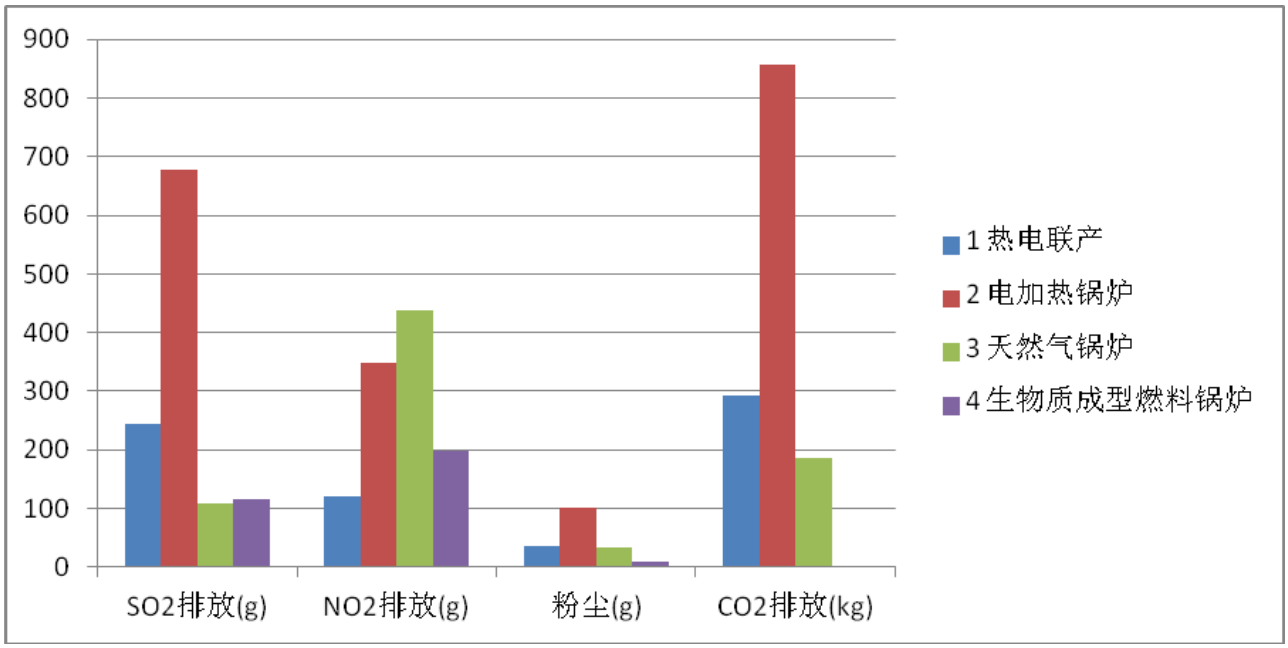

图3.4 四种热能供应形式排放量汇总柱状图

根据以上计算结果，我们不难看出，电加热蒸汽锅炉的温室气体CO2、SO2、粉尘排放最大，对环境的负面影响也最大，分别为天然气锅炉的4.58倍、6.20倍、3.09倍。因此，貌似使用清洁的电能，其实际对环境的影响最大，其本质是将能源从一个空间移至另一个空间，但对大气的污染却是不容忽视的。其次，天然气锅炉生产蒸汽排放的氮氧化物最高；热电联产生产蒸汽排放的CO2和SO2较高，分别为天然气锅炉的1.57倍、2.23倍。

相比较来看，生物质成型燃料的污染物排放都较小，且为碳中性的可再生能源燃料。另外，其他三种能源所消耗的化石燃料都需要进行烟气净化处理或事前净化处理，比如：天然气资源在开采后需要脱硫、除水等净化后，制成合格的天然气商品才能使用；发电厂和热电厂需要进行脱硫、脱硝，上述排放都是在经过净化处理后依据排放限值做的计算；生物质成型燃料锅炉本身产生的粉尘尽管远小于燃煤锅炉，但仍然需要除尘设施。四种生产方式的排放控制成本将在下一节中分析比较。

4. 四种热能生产方式的成本分析

在最终能源用户所在地，用户所使用的蒸汽热能、电能，属于一次能源经转化的二次能源，天然气属于经过加工处理的一次商品能源，这些一次、二次能源在使用过程中，为达到环保要求和生产使用条件会产生相应净化费用，如：根据国家发改委相关文件规定[12][13]“电网企业自验收合格之日起分别支付脱硝、除尘电价每千瓦1分钱和0.2分钱”；脱硫电价加价标准为每千瓦时1.5分钱；参阅相关资料文献[14]可知，成品天然气达到标准的净化处理成本约为0.05元/m^3。本论文将这一部分成本我们称之为烟气除尘“社会治理成本”。由于在蒸汽热能利用中，没有明确蒸汽价格所包含的脱硫、脱氮、除尘治理成本，本论文暂时依据电能和热电厂的热电比核算热电厂蒸汽的社会治理成本。

假定热能用户现有10吨/h燃煤小锅炉，需要进行清洁化改造。本文对比四种选择方式在固定资产投资、能源采购成本、社会治理成本的差别，便于用户在成本、环境方面做综合考虑。也可以供政策制定者考虑不同治理方式的社会成本。用户年运行时间按7000小时计。

4.1 四种热能方式的社会治理成本分析

四种供能方式的社会治理成本对比见下表：

表4-1：几种热能供应方式社会治理成本对比表

编号	供热形式	社会治理单位成本	用户产 1 吨蒸汽所需燃料或热能	每吨蒸汽社会治理成本	相对天然气指数
				元/吨蒸汽	
1	热电联产	0.027 元/kWh	2.958GJ	22.19	4.59
2	电加热锅炉	0.027 元/kWh	0.865MWh	23.36	4.83
3	天然气锅炉	0.05 元/m^3	96.77m^3*	4.84	1
4	生物质成型燃料锅炉		193.54kg*	0	0

*说明：依据第二部分介绍，天然气低位热值取8500kCal/m3，生物质低位热值4300kCal/kg。

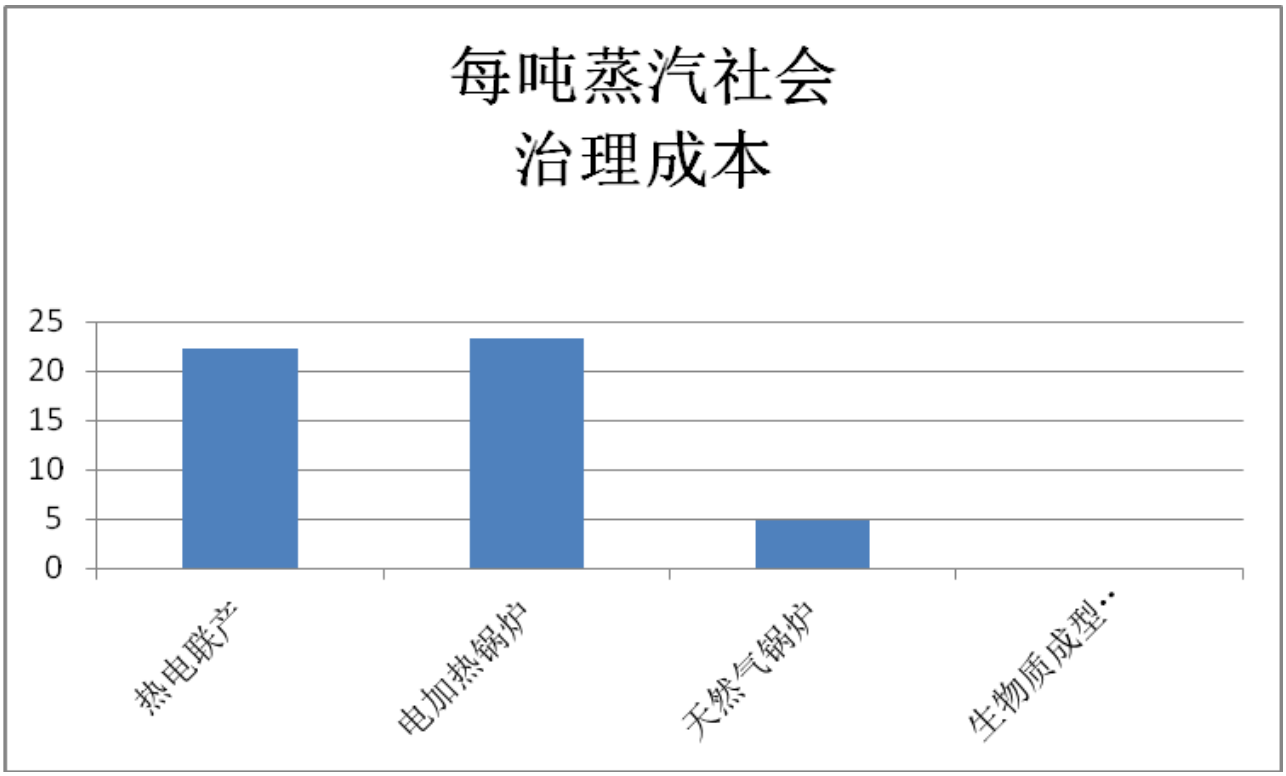

图4.1 四种热能供应形式社会治理成本对比柱状图

由此可见，为能达到环境排放标准，四种供能方式所用于环境治理的成本以电热蒸汽锅炉最高、其次为热电联产供应蒸汽。生物质燃料燃料锅炉的除尘采用布袋除尘，费用计入用户侧。

4.2 四种热能方式的用户投资和能源采购成本分析

4.2.1 用户固定投资估算

取缔原有小型燃煤锅炉，并改造新型热能供应方式后，用户需要一定的初期固定投入成本。用户选用上述四种能源方式时，其所面临的固定投入是不同的：

1、 采用热电联产供热管网蒸汽：增建热源接头及对应热站泵房配套建设费用和热力管网接口费；

2、 采用电加热锅炉供应蒸汽：电力增容费、电锅炉设备购买费用及配套锅炉房建设费用

3、 采用天然气锅炉供应蒸汽：主要体现在燃气增容费、锅炉设备购买费用及配套锅炉房建设费用；

4、 采用生物质成型燃料锅炉供应蒸汽：锅炉设备购买费用及配套锅炉房建设费用，除尘净化设备费用；

表4-2： 四种热能供给形式10吨锅炉投资成本(含除尘)

	电锅炉	燃气锅炉	生物质成型燃料锅炉
锅炉成本	64.8 万元	59.6 万元	58 万元
除尘器	/	/	20 万元
报价	64.8 万元	59.6 万元	78 万元

对于锅炉及其配套建设，除生物质成型燃料锅炉需要配备除尘器（布袋）外，三种形式锅炉房配套较为相似，且热电联供形式也配有对应的热站泵房，因此为简便计算过程，假设四种形式配套建设费用基本相同，在以下忽略计算。

4.2.2 相关能源接入费用

与接入相关的费用有：燃气接入费、电力接入费、热网接入费等。

1）依据相关文件规定[17]“非住宅建设项目和非民用单位（含个体经营户）需使用城市燃气设施，要求供气或增加供气量的，应按已批准的初步设计用气量或申请新增用气量一次性缴纳煤气增容费。其收费标准为天然气每立方米1500元”，以此作为参考，可以认为用户每新增1m^3/h天然用量需承担1500元燃气增容费，经过前文计算可知完全供给10t蒸汽量燃气锅炉的燃气量为968m^3,为留有余量，实际燃气总容量选取为968×（1+10%）≈1065m^3。

因此其燃气增容费为S燃气增容=1065m^3 ×1500元/m^3 =160万元

2）经过前文计算可知完全供给10t蒸汽量电锅炉运行的供电量约为8650 kWh，按75%功率因数考虑，选1250kVA变压器。依据相关调研结果，用户新增用电量时需要添加对应配电系统，包括变压器、配电柜、电缆、安装费等，对于10吨电锅炉的配电系统建造费用约为158万元（估算）。

3）依据市场调研结果可知目前现行的管网接入费用为40-80元/m^2,参考此数据低值，估算1吨蒸汽可供10000m^{2}计算，可得供热接入费为40万元/t蒸汽。因此10t供热量的接入费用为400万元。

4.2.3 综合固定成本计算分析

通过综合上述计算结果，固定费用用户成本组成主要如下表所述：

表4-3：几种热能供应方式的固定费用部分用户成本计算表

编号	参数名称	单位	热电联供供热	电锅炉供热	燃气锅炉供热	生物质成型燃料锅炉供热
1	设备费用	万元	/	64.8	59.6	78
2	能源接入费	万元	400	158	160	0
3	折旧或摊销年限	年	10	10	10	10
4	设备或摊销值	万元/年	40	22.28	21.96	7.8
5	总固定资产投入成本	万元	400	222.8	219.6	78
6	年消耗蒸汽量	吨	70000	70000	70000	70000
7	折合吨蒸汽固定资产折旧（摊销）成本	元/t蒸汽	5.7	3.2	3.1	1.1

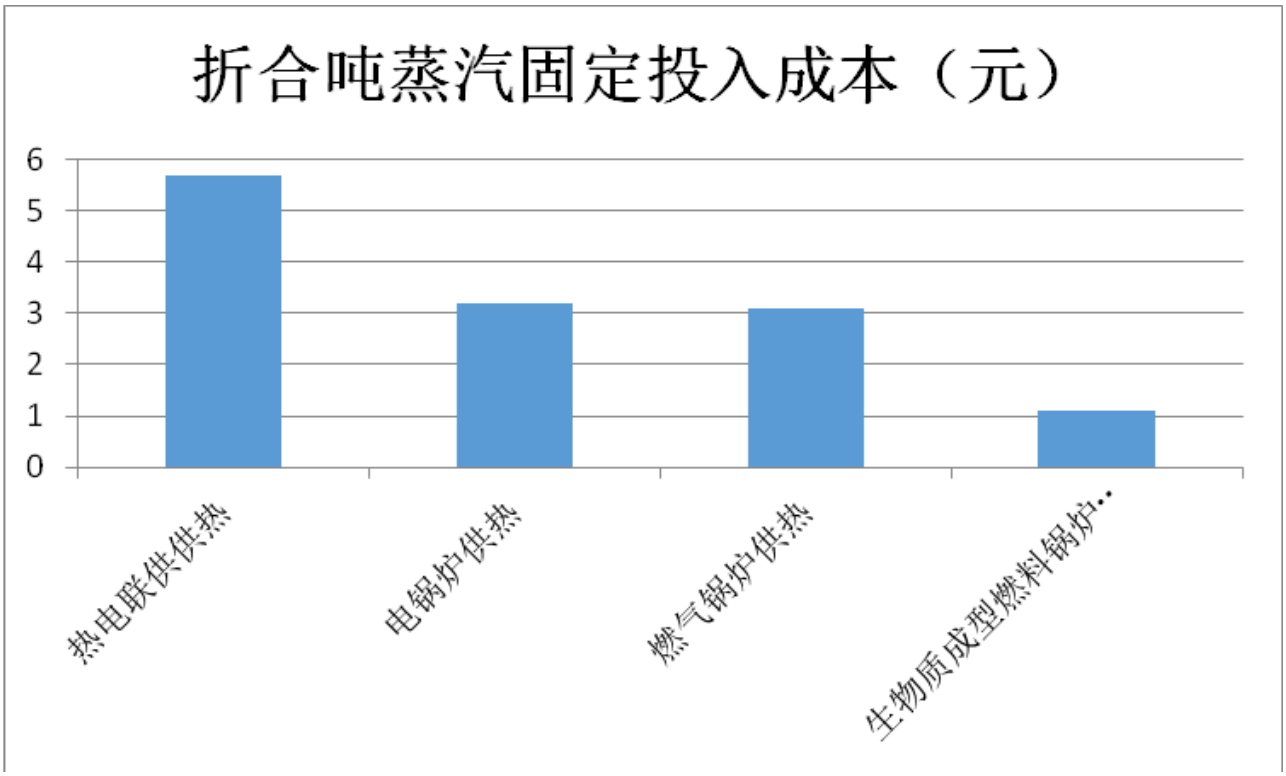

图4.2 四种热能供应形式折合吨蒸汽固定投入成本对比柱状图

4.2.4 四种热能方式用户能源购入成本估算分析

本文只论述运营成本中采购成本，不包含人工和管理成本。最终折算至生产1吨蒸汽所需直接采购或购入的能源成本：

1）通过调研分析可知，北京2011年的工业蒸汽价格已涨至230元/t蒸汽，考虑到各地蒸汽价格差别较大，本文取蒸汽采购单价230元

2）电锅炉耗电成本：按2016年华北电网中河北南网大工业用电平段电价和变压器容量电价计算电价，每度电电价成本为0.5893元。依据本文之前计算生产1吨蒸汽耗电865kWh，因此：W电锅炉耗电=865×0.5893=510元/吨蒸汽。

3）燃气锅炉燃料消耗成本：依据4.1部分计算数据，1吨蒸汽消耗96.77m3天然气，按每方天然气3元估算，W燃气锅炉燃气=3×96.77=290.31元/吨蒸汽。

4）生物质成型燃料锅炉燃料消耗成本：依据4.1部分计算数据，
1吨蒸汽消耗193.54kg生物质燃料，按燃料单价1元估算，W燃气锅炉燃气=1×193.54=193.54元/吨蒸汽。

表4-4：几种热能供应形式生产1吨蒸汽所需外购能源成本

参数名称	单位	热电联供供热	电锅炉供热	燃气锅炉供热	生物质成型燃料锅炉供热
采购能源量		1 吨蒸汽	865kWh	96.77m^3 气	193.54kg 生物质成型燃料
单价	元	230	0.5893	3	1
采购能源成本	元	230	510	290.31	193.54
相对天然气成本系数	万元/年	0.79	1.76	1	0.67

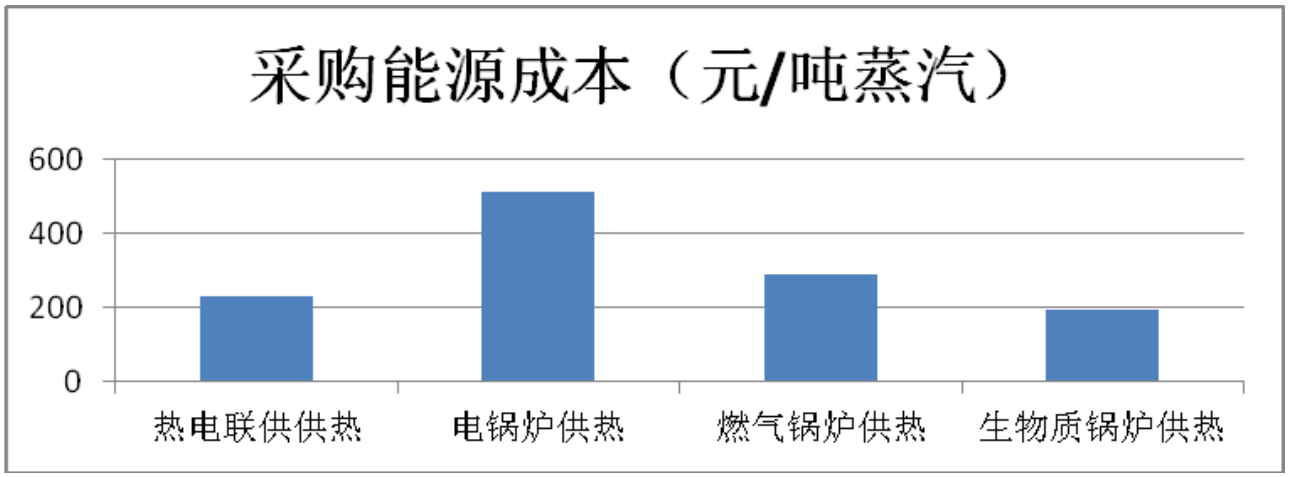

图4.3 四种热能供应形式采购能源成本投入成本对比柱状图

4.3 四种用能方式用户成本比对分析

综合上述表格可知四种热能形式均可为用户提供10t/h蒸汽量的供给，用户固定成本投入较高的是热电联产的供热管网供热（其主要原因为热力管网建设投资），电热锅炉和燃气锅炉的投入接近，但都远高于生物质成型燃料锅炉的固定资产投入。以电热蒸汽锅炉成本最高，燃气锅炉成本次之，都远高于生物质成型燃料生产蒸汽和从热力管网直接采购的蒸汽成本。

因此从用户端考虑，生物质成型燃料锅炉是综合投入最低的供热形式；而电锅炉则是综合投入最高的热能供应形式，客户慎重选取；热电联供及燃气锅炉则用户依据需求酌情选取。

5. 四种蒸汽生产方式消耗的碳资产价值分析

5.1 关于中国碳市场

为了应对全球气候变暖，减缓与控制全球气温过快上升，促进企业走向可持续发展道路，政府正在逐步推进全国统一的碳市场。当前，国内碳市场的建立相关管理政策依据为：2012年6月13日，国家发改委印发《温室气体自愿减排交易管理暂行办法》的通知（发改气候【2012】1668号）[18]，2014年12月10日，国家发改委发布第17号令《碳排放权交易管理暂行办法》[19]，2016年1月19日，国家发展改革委办公厅关于切实做好全国碳排放权交易市场启动重点工作的通知（发改办气候[2016]57号）[20]。这一系列办法和2013年以来北京、上海、天津、重庆、广州、深圳、湖北等7个碳市场试点的运行经验，为2017年建立全国碳市场奠定了基础。

2017年全国统一执行碳交易的政策，基本上所有的省份都要进入这个市场，企业将逐步被纳入碳排放配额管理范围。根据上述相关规定未来中国碳市厂的交易品种包括企业从国家获取（免费或拍卖）的碳排放权和获得国家认证的减排信用，例如中国核证减排量（CCER）。本文对四种热能生产方式的碳排放进行了计算，参照目前试点碳市场的配额价格对四种热能消费方式的碳资产价值进行了评估。在全国碳市场运行之后，能源消费企业会按照相同的基准线取得碳排放权，选择低碳能源消费将通过碳市场交易将节约的配额卖出，其中利用生物质成型燃料不仅不消费配额，还能通过相关认证取得减排信用（CCER）。

5.2 四种蒸汽生产方式消耗的碳资产价值分析

对于一个10吨/h蒸汽消费的用能企业，很有可能被纳入全国碳市场，参与碳交易。对于四种方式生产的蒸汽，企业消耗的碳排放权是不一样的。由于热电联产、电热锅炉、天然气锅炉所供热能，其本质为化石燃料排放CO2，将消耗企业的碳排放权，而生物质成型燃料锅炉由于属于碳中性，不消耗碳排放权，节余的碳排放权可以通过碳市场交易出去。

表5.1 四种热能供应形式排放碳资产价值分析表

蒸汽生产方式	CO_2 排放量	年产蒸汽量	年 CO_2 排放量	每年消耗配额的市场价值	折合每吨蒸汽消耗的配额价值
	$kgCO_2$/t 蒸汽	t/年	tCO_2/年	万元/年	元/t 蒸汽
热电联产	293	70000	20510	82.04	11.72
电加热锅炉	857	70000	59990	239.96	32.28
天然气锅炉	187	70000	13090	52.36	7.48
生物质成型燃料锅炉	0	0	0	0	0

6.结论

本文对热电联供、电锅炉、燃气锅炉及生物质成型燃料锅炉四种成熟的热能生产方式的污染物排放、用户成本进行了研究。主要结论如下：

6.1使用热电联产1吨蒸汽，要排放烟尘36.6克，排放二氧化硫243.8克，排放氮氧化物121.9，排放二氧化碳293kg。达到排放标准的污染控制成本为22.19元。用户固定投资5.7元，用户能源采购成本为230元，消耗的碳资产价值为11.72元；

6.2使用电锅炉生产1吨蒸汽，要排放烟尘101.5克，排放二氧化硫676.5克，排放氮氧化物348.4g，排放二氧化碳857kg。达到排放标准的污染控制成本为23.36元。用户固定投资3.2元，用户能源采购成本为510元，消耗的碳资产价值为32.28元；

6.3 使用天然气锅炉生产1吨蒸汽，要排放烟尘32.8克，排放二氧化硫109.2克，排放氮氧化物436.8g，排放二氧化碳187kg。达到排放标准的污染控制成本为4.84元。用户固定投资3.1元，用户能源采购成本为290.31元，消耗的碳资产价值为7.48元；

6.4 使用生物质成型燃料锅炉生产1吨蒸汽，要排放烟尘10.04克，排放二氧化硫116.1克，排放氮氧化物197.4g，排放二氧化碳0kg（碳中性）。达到排放标准的污染控制成本为0元。用户固定投资1.1元，用户能源采购成本为193.54元，消耗的碳资产价值为0元；

通过研究可以发现生物质成型燃料锅炉各项指标为四种热能形式中最佳，值得推广；而电锅炉供热虽然看似清洁高效，实际上通过各项综合指标分析发现电锅炉供热在四种热能形式中污染排放最高，成本最高，从能源利用角度也最不科学，建议尽量规避；对于热电联供及燃气锅炉供热，客户可依据自身条件合理选择。

引用文献

[01]中华人民共和国大气污染防治法

[02]《气候变化2007综合报告》 政府间气候变化专门委员会（IPCC）

[03]关于印发《关于划分高污染燃料的规定》的通知（环发[2001]37号） 国家环境保护总局

[04]关于生物质成型燃料有关问题的复函（环办函〔2009〕797号） 环境保护部办公厅函

[05]火电厂大气污染物排放标准（GB13223-2011）

[06]小型热电站使用设备手册 水利电力出版社 1988年 洪向道等

[07]中小型热电联产工程设计手册-背压汽轮机参数

[08]国家电网排放因子计算 2015年中国区域电网基准线排放因子 国家发改委

[09]GB 13271-2014 锅炉大气污染物排放标准

[10]工业炉设计手册 王秉铨 2010-4-1机械工业出版社出版

[11]第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册（2010年）

[12] 国家发展改革委关于进一步疏导环保电价矛盾的通知(发改价格[2014]1908号)

[13]燃煤发电机组环保电价及环保设施运行监管办法（发改价格【2014】536号）

[14]国内外天然气开发、利用及发展趋势 中国百科网文献

[17]《关于进一步清理整顿我市有关收费项目的实施意见》（津政发[2007]80号）文件规定

[18]《温室气体自愿减排交易管理暂行办法》的通知（发改气候【2012】1668号

[19]《碳排放权交易管理暂行办法》国家发改委发布第17号令

[20] 国家发展改革委办公厅关于切实做好全国碳排放权交易市场启动重点工作的通知（发改办气候[2016]57号）

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/101054.html