LBNL-1003860

ERNEST ORLANDO LAWRENCE
BERKELEY NATIONAL LABORATORY

减少中国工业燃煤锅炉的大气污染和温室气体排放

以宁波和西安为案例的工业燃煤锅炉的能效提升和燃料替代的方案分析及实施路线图

美方研究团队：
沈波、蒲思琳（LYNN PRICE）、鲁虹佑、刘栩
劳伦斯伯克利国家实验室

KATHERINE TSEN
加州大学伯克利分校

中方专家团队：
魏向阳、张云鹏（国家节能中心）
管坚（中国特种设备检验检测研究院）
侯睿（中国机械工业技术发展基金会）
张俊峰（中国海洋石油总公司）
禚玉群（清华大学）
夏淑貌（中国节能环保集团公司）

项目技术支撑:
韩亚峰（西安交通大学）
刘满芝（中国矿业大学）

2015 年 10 月

Disclaimer

This document was prepared as an account of work sponsored by the United States Government. While this document is believed to contain correct information, neither the United States Government nor any agency thereof, nor The Regents of the University of California, nor any of their employees, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. Reference herein to any specific commercial product, process, or service by its trade name, trademark, manufacturer, or otherwise, does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States Government or any agency thereof, or The Regents of the University of California. The views and opinions of authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States Government or any agency thereof, or The Regents of the University of California.

Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory is an equal opportunity employer.

前言

中国的工业锅炉系统每年消耗约 7 亿吨标煤，占全国煤炭总消耗的 18% 。这些燃煤的消耗成为大气污染的主要来源。中国工业锅炉产生的大气污染占全国烟尘排放的 33% 以及二氧化硫排放的 27% (MIIT, 2014)。同时这些燃煤锅炉也成为中国温室气体排放的重要来源， 每年约排放 13 亿吨的二氧化碳。中国从中央到地方，正在采取措施减少因大量使用燃煤工业锅炉带来的环境影响和温室气体排放。美国和中国政府在中美气候变化工作组的合作框架下，启动了有关中国燃煤锅炉能效提升及燃料替代的方案分析和实施路径的研究。选定了两个城市 - 西安和宁波 - 进行评估。这两个城市分别代表了依赖跨省天然气输送管道的内陆城市和临近液化天然气进口的沿海城市。

此项目主要执行单位是美国能源部劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)。在项目进行过程中，LBNL 团队得到了宁波和西安两地相关政府部门和有关研究机构和企业的大力支持和协助。中方还为此项目专门成立了由国家节能中心、中国特种设备检验检测研究院、中国机械工业技术发展基金会、清华大学、中国海洋石油总公司及中国节能环保集团公司等单位专家组成的专家组，积极配合 LBNL 团队的调研和分析工作，保证了项目的顺利完成。

此项目包括几个方面的工作。一），项目包含一个综合的技术经济分析，以评估包括提升燃煤锅炉能效、利用替代能源、以及发展分布式能源和热电联产在内的多种解决燃煤锅炉方案的经济性。二），分析目前存在的阻碍燃煤锅炉能效提升和燃料替代各种政策、体制、市场及技术上的障碍。三)，提出解决这些障碍的建议。四，因为解决工业燃煤锅炉可成为中美携手应对气候变化的一个有效合作领域， 此项目提出中美具体合作的若干建议。

中国工业燃煤锅炉的概览，煤炭替代的潜在资源，以及相关政策

2012 年底，中国共有 46.7 万登记在案的工业燃煤锅炉，总容量达 178 万蒸吨 (MIIT, 2014) 。中国的工业锅炉具有较鲜明特点，容量偏小，单台平均容量仅为 3.8 吨／小时，绝大部分采用原煤，且运行效率较低，缺乏系统自动控制和先进环保设施 (MIIT, 2014)。国家发改委能源研究所的数据表明，燃煤锅炉占中国工业锅炉总数的 80%， 燃油占 15%，天然气和生物质锅炉占比很小。图 1 显示了中国燃煤锅炉的关键特征。

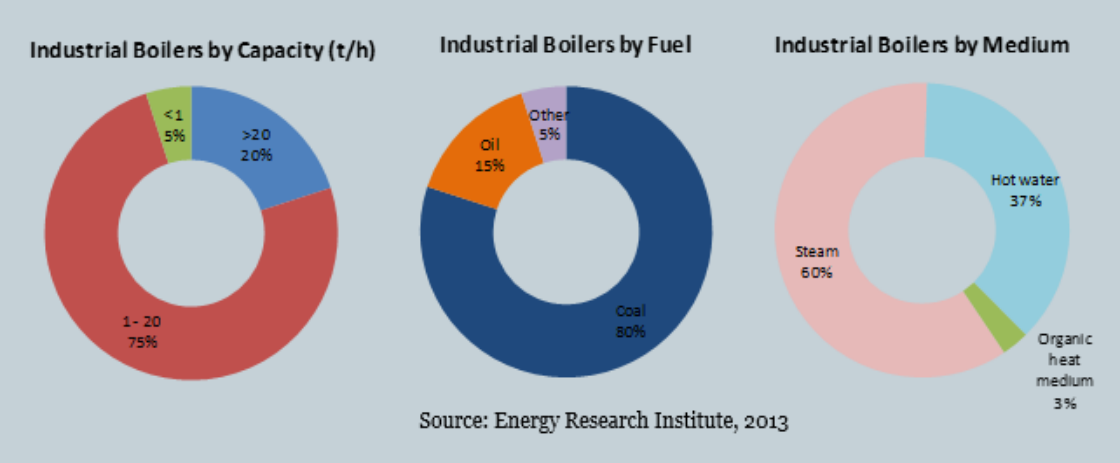


图 1 中国工业锅炉的关键特征

中国工业锅炉的运行效率低于最优水平， 很多锅炉依赖手工操作，运行中少有自动和智能控制。据中国专家测算，中国工业燃煤锅炉平均能效比世界先进水平低 15% (Gao, 2013)。

虽然中国锅炉大部分采用原煤来进行工业供热和蒸汽生产，中国具有更清洁的资源，即天然气和生物质能，取代煤炭。天然气是主要的可选资源。中国政府正在通过增加天然气供应和修建更多的输送管道，提高天然气用量， 目标是将天然气在全国总用能的占比从 2013 年的 6%，提高到 2015 的 8%， 到 2020 年进而提高到 10％ (State Council, 2014)。中国目前进行了一些显见的政策调整，以扩大天然气的利用。

政策的调整体现在下面几个方面。中国政府正在着手改革工业天然气价格机制。国家发展和改革委鼓励大型用气企业直接与天然气供应商协商燃气供应价格。针对非居民用户，国家发展和改革委宣布对天然气价格双轨制实行并轨，即提高存量气价格并显著降低与国际石油价格直接相连的增量气价。该举的影响是非居民用户的天然气价格降低大约 5%。同时，中国正在建立全国的天然气交易枢纽，促进天然气现货市场的发展。此外，国际液化天然气价格的降低、国内较高的天然气价格以及进口液化天然气接驳站目前较低使用率，正吸引中国民营机构进入天然气市场。他们或要求国有企业代他们进口液化天然气，或经营独立的液化天然气航运， 或要求国有液化天然气接驳站开放给第三方。

生物质能是另一个可考虑的可替代资源。2010 年，全国使用了折合 2400 万吨标煤的生物质能， 占全国总用能的 1% (NEA, 2012)。虽然中国政府开展了生物质锅炉供热系统示范项目，中国生物质能的利用主要集中在提高全国生物质发电的装机容量。目标是到 2015 年，生物质发电装机容量从 2010 年的 550 万千瓦提高 1300 万千瓦 (State Council, 2013) 。

在过去几年中，中国政府多个部委发布了一系列关于工业锅炉的政策文件，其中包括大气污染行动计划、修订的的大气污染防治法、七个部委联合发布的开展工业燃煤锅炉能效提升环保综合工程 等。这些政策为燃煤工业锅炉减少能耗和控制污染排放制定了具体的目标和要求。这些政策同时也鼓励替代燃煤锅炉的解决方案，如燃料替代，发展基于天然气的分布式能源和热电联产系统。

工业燃煤锅炉能效提升及燃料替代不同解决方案的技术经济分析

本项目的一项重要任务就是对工业燃煤锅炉不同解决方案进行综合的技术经济分析，评估燃煤工业锅炉的几种不同解决方案的成本效益。本项目利用宁波和西安的案例信息，重点分析了三种方案。根据国家和地方政府的要求，小于 20 吨／小时（蒸汽生产能力）的燃煤锅炉将被淘汰，20 吨／时或以上规模的锅炉需要进行节能环保改造，以达到污染排放要求。依据这些政策，本研究项目分析了下列三种方案。（1）以燃气、燃油、生物质及电锅炉替代 10 吨/小时规模的燃煤锅炉；（2）对 20 吨/小时燃煤锅炉实施节能技改措施；（3）以高效大锅炉取代企业自建的分散的小锅炉，整合企业对热/气的需求，为企业提供集约式服务。表 1 列出技术经济分析所用的重要参数。

表 1 经济技术分析的主要参数

参数	宁波	西安
煤炭价格*	400 元/吨	371 元/吨
天然气价格*	3.04 元/立方米	2.28 元/立方米
电价*	0.90 元/度电	0.85 元/度电
燃油价格*	4,250 元/吨	
生物质燃料价格*	1,000 元/吨	
折现率	10%	
锅炉运行平均寿命**	15 年	
热电联产系统运行平均寿命**	25 年	
企业排污合规成本***	CO_2: 34.94 元/吨, SO_2: 2.5 元/千克, NOx: 5.0 元/千克, Flue Dust: 0.05 元/千克	

*煤价基于 2014 年 12 月到 2015 年 5 月的燃煤价格的加权平均数。考虑了由于不同季节对燃煤需求的不同而产生的价格波动。燃气价格基于公开的各门站价格。 作为对比，2014 年 9 月到 2015 年 2 月，美国工业天然气平均价格折合成人民币为 1.08 元／立方米。重油和生物质燃料价格来源于 LBNL 访谈中国行业专家。 电价基于宁波西安两地公布的 1-10 千伏工业用户的平均价格。
**锅炉和热电联产寿命系各系统平均寿命，由 LBNL 团队访谈中方专家获得。
***二氧化碳价格是 7 个碳交易试点在 2014 年 6 月-2015 年 5 月一年的平均交易价格；其他污染物达规成本由 LBNL 访谈西安企业获得。

方案 1： 燃料替代，用天然气、生物质能、重油、电锅炉替代燃煤锅炉

不同燃料锅炉的投资成本

在调研的过程中，样本城市使用的小型燃煤锅炉中链条排炉锅炉占比较大，因此本方案聚焦分析燃油锅炉、燃气锅炉、生物质锅炉和电锅炉替代小型链条排炉锅炉（10 吨／小时的容量）的经济可行性。此分析根据企业锅炉运行情况，设定锅炉年产 3 万吨压力为 1.0 兆帕的饱和蒸汽。表 2 列举 5 种不同燃料锅炉的投资成本。

表 2 锅炉投资成本比较　　万元人民币

锅炉类型	设计费	基建投资	设备投资	热控电气投资	安装调试费	合计	备　注
链条炉排锅炉	10	50	80	15	20	175	1、基建包括：锅炉房、桩基础、烟囱等； 2、设备投资：主机、安装、除尘系统、水泵、风机、水处理、脱硫塔、输煤带、出渣机、筑炉保温等； 3、热控电气投资：热力、电气和自控系统； 4、安装调试费：安装费、水电费、燃料费等；
重油锅炉	10	40	85	10	20	165	1、基建包括：锅炉房、桩基础、烟囱等； 2、设备投资：主机、安装、水泵、风机、水处理、脱硫塔、筑炉保温等； 3、热控电气投资：热力、电气和自控系统； 4、安装调试费：安装费、水电费、燃料费等；
燃气锅炉	10	40	80	10	15	155	1、基建包括：锅炉房工程； 2、设备投资：主机、安装、水泵、风机、水处理、筑炉保温等； 3、热控电气投资：热力、电气和自控系统； 4、安装调试费：安装费、水电费、燃料费等；
生物质锅炉	10	50	75	15	20	170	1、基建包括：锅炉房、桩基础、烟囱等； 2、设备投资：主机、安装、除尘系统、水泵、风机、水处理、给料带、出渣机、筑炉保温等； 3、热控电气投资：热力、电气和自控系统； 4、安装调试费：安装费、水电费、燃料费等；
电锅炉	10	30	80	10	15	145	1、基建包括：锅炉房工程； 2、设备投资：主机、安装、水泵、水处理、筑炉保温等； 3、热控电气投资：热力、电力和自控系统； 4、安装调试费：安装费、水电费；

表 2 可以看出，五种燃料锅炉中，电锅炉投资成本相对最低。链条炉排燃煤锅炉、生物质锅炉、燃油锅炉、燃气锅炉四种锅炉和电锅炉的设备固定投资额比例分别为：1.21：1.17：1.14：1.06：1。从投资额度来看，不同燃料锅炉之间的投资额差别并不大，采用不同燃料锅炉对投资影响有限，差别主要在以燃料为主的运行成本上。

不同燃料锅炉的运行成本

表 3 包含工业锅炉运行相关参数，表 4 展示了不同燃料锅炉的运行成本。生产吨蒸汽运行成本由低到高排列依次是链条炉排锅炉、天然气锅炉、生物质锅炉、燃油锅炉和电锅炉，比例为 1:2.38:2.92:3.95:8.09.。可见与燃煤锅炉相比，使用替代燃料锅炉的运行成本差异较大。

表 3　西安工业锅炉的运行相关参数

锅炉运行成本参数	链条连排锅炉	重油锅炉	燃气锅炉	生物质锅炉	电锅炉
锅炉设计热效率%	82	92	95	88	95
锅炉运行热效率%	70	85	88	80	90
燃料低位热值 天然气/(MJ·m^{-3})；煤、重油、生物质/（MJ·kg^{-1})；电/（MJ·kWh^{-1}）	22.53	40.19	34.47	13.98	3.60
非电锅炉吨蒸汽耗电量(kWh)	15.3	5	3	10.45	0
锅炉工人数（含管理、运行、维修等）	6	3	2	4	2
年人工成本（按人均 4 万元计）	24	12	8	16	8
燃料价格 天然气（元/m^3)；煤、油、生物质（元/t^{-1})；电（元/kWh^{-1})（含税）	371	4250	2.28	1000	0.85
生产吨蒸汽燃料消耗量： 天然气（m^3/蒸吨)；煤、油、生物质（kg/蒸吨)；电（kWh/蒸吨）	148.61	68.61	77.27	209.56	724.18

Note: 生产吨蒸汽热焓（表压 1.0MPa，温度 184℃，饱和蒸汽）: 2,779.7 MJ; 吨给水热焓（给水温度：104℃）: 435.95 MJ; 蒸汽热焓—给水热焓: 2,343.75 MJ; 生产吨蒸汽耗水量: 1.2 tonnes

表 4 西安锅炉运行成本， 单位：元

锅炉运行成本参数	链条连排锅炉	重油锅炉	燃气锅炉	生物质锅炉	电锅炉
生产吨蒸汽的燃料消耗成本（含税）	55.13	291.58	176.17	209.56	615.56
非电锅炉生产吨蒸汽耗电成本（按 0.85 元/度电计算）	13.0	4.3	2.6	8.9	0
生产吨蒸汽耗水成本（按 1.8 元/吨水价计算）	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16
生产吨蒸汽脱硫成本	1.8	2.1	0	0	0
生产吨蒸汽人工成本	3.44	1.66	1.09	2.29	1.14
生产吨蒸汽维修管理成本	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
生产吨蒸汽成本（扣除除氧器自耗气前）	76.63	302.90	183.12	224.0	619.96
生产吨蒸汽成本（扣除除氧器自耗气后）	80.66	318.85	192.76	235.78	652.59
年锅炉运行总成本 （万元）（设定年产蒸汽 3 万吨）	241.99	956.54	578.28	707.35	1957.76

不同燃料锅炉的成本综合比较

由上述分析可以看出，燃煤锅炉的建设投资成本较高，但运行成本较低；燃气、燃油、电锅炉等投资成本较低，但运行成本较高。为了便于比较，本分析采用年化成本 equivalent annual cost (EAC)[1]的方法，综合比较不同燃料锅炉的年化成本。锅炉的成本包括锅炉年化投资成本和年运行成本两部分，其中：

年化投资成本 F 的计算公式如下：

$$F = 投资成本 \times \frac{d}{1-(1+d)^{-n}}$$

其中，d 表示折现率；n 表示锅炉房及其设备的使用年限。本文设定锅炉设备的使用年限为 15 年，贴现率为 10%[2]。

运行成本 O 的计算公式如下：

O = 燃料+水耗+电耗+人工成本+维修成本+污控成本

图 2 对比了不同燃料锅炉的固定成本和运营成本，其中显示了宁波和西安两地因煤炭、天然气及电的价格的差异产生的燃煤、燃气及电锅炉的成本差异。

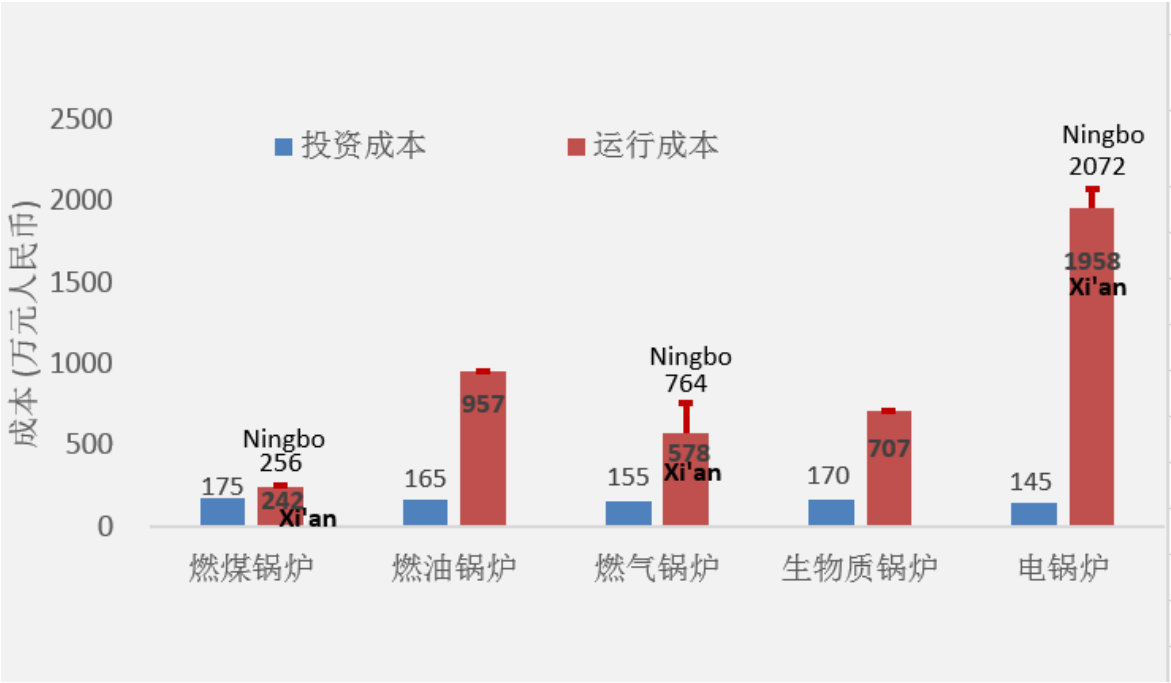


图 2 不同燃料选项下的锅炉成本比较

[1] Equivalent annual cost (EAC) 为设备生命周期内拥有并运行该设备的年成本

[2] 折现率 10% 系根据世界银行类似项目所采用的折现率确定

图 2 可得出下列结论：

- 在燃料替代选项中，不同燃料的锅炉的固定投资成本差别不大，但是运行成本差异较大，主要是因为燃料价格造成运营成本远高于设备成本。这说明只有提高能效、降低运营成本才能使企业的效益最大化。
- 天然气是燃料替代的可行选项，但其经济性取决于价格是否保持竞争力（见图 2 中西安宁波对比）。如果将现有的链条燃煤锅炉置换成燃气锅炉，西安和宁波锅炉的运行成本将分别增加 139%和 198% 。显见， 现行的较高天然气价格是制约小型燃煤锅炉置换的关键障碍。
- 所有替代选项中，电锅炉是最昂贵的选择。这主要是因为大量的能源转换损耗（从热能到电力再到热能），以及中国工业企业面临的高电价。
- 虽然电锅炉对完全替代燃煤锅炉不具备经济性，但它或可成为储能的可考虑选项，即在用电低谷时段使用电锅炉提供或储存热力。 低谷时段往往是电价最低且风能电力过剩的时段。此时使用电锅炉一是其经济性有所提高，二是可消纳过剩的风能发电。然而，电价需要降得足够低，才能使电锅炉成为可与其它燃料竞争的选项。表 5 显示了电锅炉可与其它燃料竞争的电价水平。
- 生物质能是进行燃料替代的较经济性的燃料，但是中国政府的生物质能源发展目标侧重于生物质发电，因此难以使工业用的生物质加热锅炉形成规模。

表 5 电锅炉可与其它燃料竞争的电价水平
单位: (元/度电)

城市	链条燃煤锅炉	重油锅炉	燃气锅炉	生物质锅炉
宁波	0.11	0.41	0.33	0.30
西安	0.10	0.41	0.25	0.30

使用不同燃料锅炉的环保效益

此项目也同时分析了使用其他燃料锅炉替换燃煤锅炉所具有的环保效益。净减排量作为衡量使用替代燃料的环保效应，其数值为替换燃煤锅炉减少用煤而产生的污染减排与使用替代燃料所产生的排放之间的差额。比如， 燃气锅炉的净减排量为所替换的燃煤锅炉的排放量（减少的排放）减去燃气锅炉排放量（产生的排放）；而电锅炉的净减排量则为所替代的燃煤锅炉的排放量（因从用户角度，使用电锅炉本身不产生污染）。替代燃料锅炉的成本（投资成本加运行成本）除以净减排量得到不同替代手段的减排成本效益（cost efficiency of pollution reduction），亦即单位污染减排量的成本（万元人民币/每千克或吨污染减排量）。成本越低，效益越高。图 3 展示了以西安为例的用其它燃料锅炉替代燃煤锅炉的减排成本效益。由于宁波和西安天然气和电价格差异较大，因此图 3 也就两地燃气锅炉及电锅炉替换燃煤锅炉的减排成本效益做了比较。

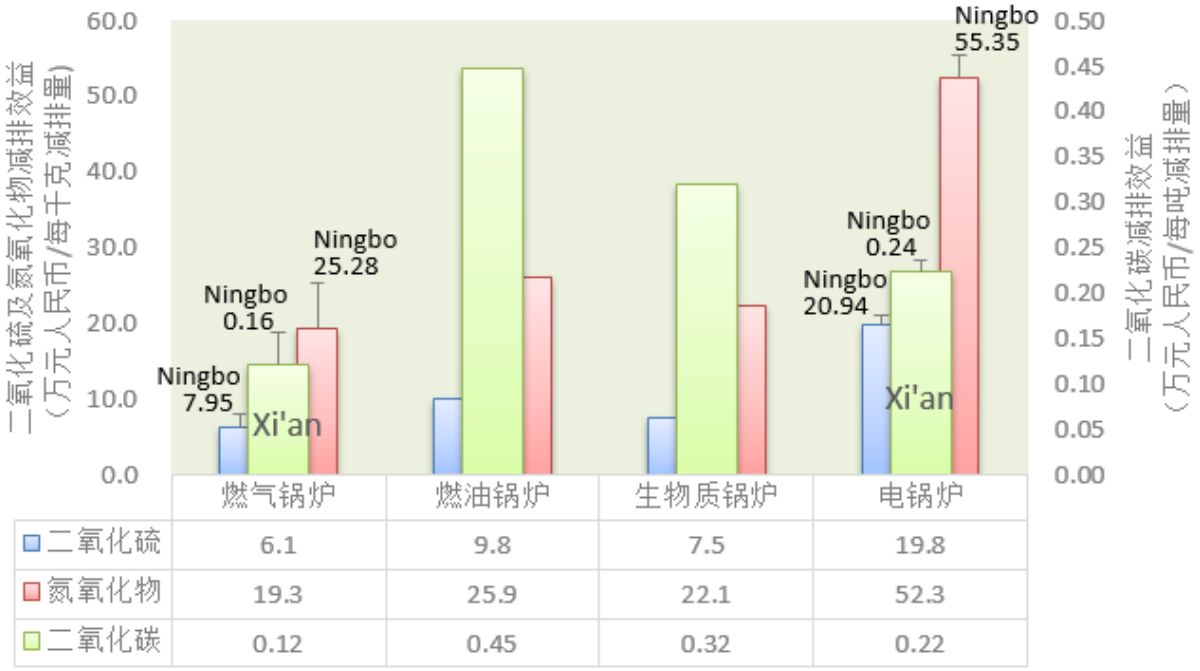


图 3 不同燃料锅炉替代燃煤锅炉的减排成本效益

如图 3 所示，从污染减排成本效益而言，与燃煤锅炉相比，投资燃气和生物质能锅炉优于投资燃油或电锅炉，因为前者会带来更大的单位成本净减排量[3]。就同一种燃料而言，低燃料价格会带来更大的减排成本效益。例如，西安因燃气价格低于宁波，燃气锅炉替代燃煤锅炉的减排成本效益远好于宁波的减排成本效益 （宁波如图 3 中单线条所示）。由此可见，除低天然气价格，有利于推广天然气锅炉，不仅减少大气污染，也有利于减少温室气体的排放。图 3 还表明，电锅炉尽管本身不产生污染[4]，但因为其较高的运行成本，其减排成本效益较其它替代选项而言较低，特别是二氧化硫和氮氧化物。

煤和天然气价格比

以上分析显示出燃料价格的重要性。有必要确立不同燃料价格平衡点。在这个点，分别使用两种燃料生产一单位蒸汽的成本是一样的。燃煤和燃气锅炉的价格平衡点的计算公式如下:

$$q_{col} \times h_{col} \times r_{col} = q_{gas} \times h_{gas} \times r_{gas}$$
$$q_{col} \times p_{col} = q_{gas} \times p_{gas}$$

[3] 净减排量：由于燃料替代减少用煤而产生的减排与采用替代燃料而产生的排放之间的差额。
[4] 不考虑发电产生的源头污染，只考虑用户端排放。

其中：q_{col}: 产出单位蒸汽的耗煤量(kg); h_{col}: 煤的低位热值 (MJ/kg); r_{col}: 燃煤锅炉热效率; p_{col}: 燃煤价格; q_{gas}: 产出单位蒸汽的耗气量 (m^3); h_{gas}: 天然气的低位热值(MJ/ m^3); r_{gas}: 天然气锅炉热效率; p_{gas}: 天然气价格。

图 4 展示了由各个价格平衡点构成的平衡线。线上的每一个点代表了产生一单位蒸汽相同成本对应的煤价和气价，其比值为 0.5199。当煤价和气价比值大于 0.5199 （图中的红线区域）， 天然气锅炉经济性将好于燃煤锅炉。而当比值小于 0.5199 （图中灰色区域），则燃煤锅炉经济性高于燃气锅炉。图 4 所示的两个点分别是西安和宁波的比值，两者都小于 0.5199，表明现有的燃料价格使得使用燃煤锅炉更具经济性。两个城市比较，西安的比值更接近价格平衡线。这意味着在西安使用这两种燃料的成本互相更接近。

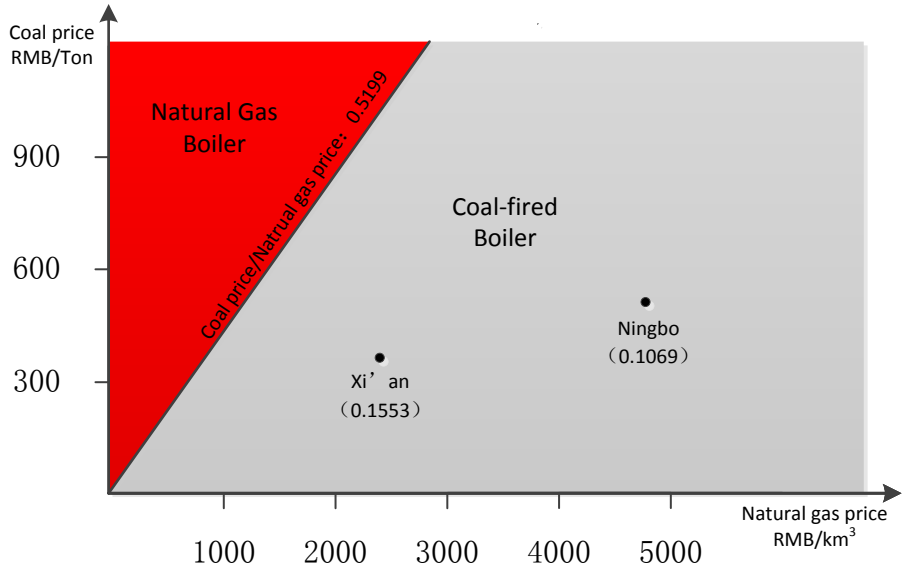


图 4 燃煤和燃气锅炉的价格平衡线

方案 2： 提高既有锅炉的能效

中国多个文件要求在关闭小型锅炉同时，企业对未在淘汰之列的既有锅炉进行节能改造，提高其能效和环保成效。因此，方案 2 分析对 20 吨 / 小时的锅炉采用不同的节能改造措施的技术经济性。

20 蒸吨工业锅炉热工性能标准

GB/T 15317—2009《燃煤工业锅炉节能监测》国家标准适用于额定蒸发量介于容量 0.7MW（1t/h）和 24.5MW（35t/h）之间的工业蒸汽锅炉及额定供热量不小于 2.5GJ/h 的工业热水锅炉。工业锅炉节能监测合格具体指标见表 6-9。

表 6 工业锅炉节能监测热效率考核指标

额定热功率 Q/MW[蒸发量 D/(GJ/h)]	热效率 η /%
0.7 ≤Q＜1.4（2.5≤D＜5）	≥65
1.4 ≤Q＜2.8（5≤D＜10）	≥68
2.8 ≤Q＜4.2（10≤D＜15）	≥70
4.2 ≤Q＜7（15≤D＜25）	≥73
7 ≤Q＜14（25≤D＜50）	≥76
Q≥14（D≥50）	≥78

表 7 工业锅炉节能监测排烟温度考核指标表

额定热功率 Q/MW [蒸发量 D/(GJ/h)]	0.7≤Q＜1.4（2.5≤D＜5）	1.4≤Q＜2.8（5≤D＜10）	2.8≤Q＜4.2（10≤D＜15）	4.2≤Q＜7（15≤D＜25）	Q≥14（D≥50）
排烟温度/℃	≤230	≤200	≤180	≤170	≤150

表 8 工业锅炉节能监测空气系数考核指标表

额定热功率 Q/MW [蒸发量 D/(GJ/h)]	0.7≤Q＜1.4（2.5≤D＜5）	1.4≤Q＜2.8（5≤D＜10）	2.8≤Q＜4.2（10≤D＜15）	4.2≤Q＜7（15≤D＜25）	Q≥14（D≥50）
排烟处空气系数	≤2.2	≤2.2	≤2.2	≤2.0	≤2.0

表 9 工业锅炉节能监测炉渣含碳量考核指标含碳系数表

额定热功率 Q/MW [蒸发量 D/(GJ/h)]	0.7≤Q＜1.4（2.5≤D＜5）	1.4≤Q＜2.8（5≤D＜10）	2.8≤Q＜4.2（10≤D＜15）	4.2≤Q＜7（15≤D＜25）	Q≥14（D≥50）
允许炉渣含碳量/%	≤15	≤15	≤15	≤12	≤12
注：燃用无烟煤时，可放宽 20%					

工业锅炉热工性能测试

基于西安特种设备检验检测院在 2014 年针对西安 72 台锅炉出具的《锅炉运行工况能效测试报告》，20 t/h 工业锅炉运行工况和节能装置安装情况差异并不大。基于此，本部分以西安市某啤酒厂锅炉 2014 年检测结果为例，分析西安市工业锅炉工况运行现状，并对已经采用的节能和潜在的节能措施进行经济性分析，为工业锅炉能效提升提供一定的借鉴。表 10 列出样本锅炉基本情况。表 11 展示锅炉运行测试结果。

表 10 样本锅炉的基本情况

锅炉出口介质	饱和蒸汽	设计热效率	77.70%
额定出力	20000.00kg/h	设计燃料	烟煤
额定压力	1.25 MPa	出口介质温度	饱和
设计排烟温度	175.00℃	省煤器	有
燃烧方式	层状燃烧	空气预热器	有
燃烧设备	燃煤链条炉排	进口介质温度	105℃

表 11 锅炉运行测试综合结果

名称	单位	数据来源	测试数据	西安样本企业使用同煤种时最优值
排烟处过量空气系数		试验数据	3.02	1.88
锅炉排烟温度	℃	试验数据	210.31	工业锅炉节能监测排烟温度考核指标 150℃
排烟处 O_2 含量	%	试验数据	14.04	
排烟处 CO 含量	%	试验数据	0.0142	
入炉冷空气温度	℃	试验数据	32.41	
飞灰可燃物含量	%	试验数据	11.25	
漏煤可燃物含量	%	化验数据	39.46	
炉渣可燃物含量	%	化验数据	12.25	
燃料低位发热量	kJ/kg	试验数据	21300.00	
燃料灰分	%	试验数据	20.93	
锅炉运行出力	kg/h	试验数据	13000.00	
炉渣占总灰量重量百分比	%	试验数据	80.00	
排烟热损失	%	计算数据	19.00	12.68%
化学未完全燃烧热损失	%	计算数据	0.20	0.2%
未完全燃烧热损失	%	计算数据	5.27	3.82%
散热损失	%	计算数据	2.00	1.3%
灰渣物理热损失	%	计算数据	0.50	0.31%
简单测试效率	%	计算数据	73.03	工业锅炉节能监测热效率合格指标 78%

注：测试结果基于额定出力的 65%的工况。

通过上述结果对比分析可以看出，西安市 20t/h 样本企业工业锅炉热损失主要集中在排烟处过量空气系数偏大、排烟温度过高、固体未完全燃烧热损失和散热损失四个方面。如果对工业锅炉进行技术改造，能效提升的空间比较大。

20t/h 工业锅炉节能改造技术

本项目所评估的节能措施为国家发展和改革委发布的“国家重点节能技术推广目录”中推广的技术或根据专家推荐的技术中选出 9 项节能措施。表 12 介绍这些技改措施。

表 12　20t/h 工业链条锅炉的节能技术改造措施

技术名称	技术描述	备注
烟气余热回收技术	利用空气预热器或者省煤器将废气加热进入锅炉的空气温度或者锅炉给水温度，提高燃烧效率一般排烟温度（在保证排烟温度在烟气露点温度以上时）每降低 10℃，锅炉效率可提高 0.5%～0.6%。	
冷凝水回收技术	利用冷凝水回收装置对热力系统的冷凝水的蒸汽热能进行回收，有利于锅炉排污量减少，降低排污热损失，提高锅炉热效率。有减少软化水处理量，节省软化水处理费用。	
锅炉水处理防腐阻垢节能技术	对锅炉和管道内壁的碳酸盐污垢进行及时处理，提高循环水的流速和热的传导，保证锅炉安全运行。	中国节能目录第一批第 45 项（2008 年颁布）
锅炉智能吹灰优化与在线结焦预警系统技术	在锅炉各受热面污染在线监测的基础上，实现系统开环运行操作指导与闭环反馈监测控制相结合的智能吹灰运行模式，从而减少吹灰蒸汽用量，降低排烟温度，提高锅炉效率。	《国家重点节能推广目录》第二批第 5 项（2009 年颁布）
链条炉复合燃烧技术	将链条炉排和煤粉这两种不同的燃烧方式有机结合，在燃烧过程中，煤粉靠炉排上火焰点燃，煤粉燃烧形成的高温火焰提高了炉膛温度，为链条炉排上的煤层着火提供了丰富的热源，使难以着火的煤着火燃烧顺利。	
优化保温蒸汽管道、阀门、配件和容器	在锅炉运行中通过对炉表温度、排温温度监测的数据来分析判断锅炉各部位的炉墙的密封情况以及炉体外保温层的隔热效果，及时修复墙体密封不良与保温层损坏的部位；加强辅属管道、给水系统和排污系统的定期巡查，降低锅炉燃烧热量损失，节约燃料。	
过量空气管理	当过量空气系数过大时，会造成燃煤与空气混合不均匀，致使炉膛平均温度降低，影响了燃烧工况，排烟量增大，带出热量增加，也就是排烟热损失增加。过量空气系数	

	过小时，燃料不能充分燃烧，能源没有得到最好的利用。过量空气管理保证燃料得到充足的氧气而完全燃烧的前提下，过量空气系数愈低，燃烧愈经济。	
排污治理与热量回收	将锅炉排污的热量，通过表面式加热，从锅炉给水侧进行回收，提高给水温度，节省燃料费用，强化锅炉出力。	
闪蒸汽回收	利用闪蒸罐对锅炉排污水降压闪蒸压力下的饱和水进行热量回收	

表 13 列举了分析这些措施技术经济性的有关参数。分析设定：（1）20t/h 工业锅炉运行基线效率按 73.03%热效率；（2）锅炉产出按年产 1MPa 的饱和蒸汽 5 万吨计算；（3）技术经济分析只就各单个技术之间进行对比，而不考虑同时采用多项节能措施的综合效果。因为西安数据较为全面系统，技改分析主要以前文中西安某啤酒厂的工业锅炉的运行工况进行分析。

表 13　不同节能技术改造措施经济性分析

技术措施	主要设备	热效率提升状况（%）	设备使用年限（年）	设备投资成本（万元）	设备年运行成本（万元）	西安采用情况	备注
烟气余热回收技术	省煤器、空气预热器	4－5%	15	70	-	已采用	将排烟温度从 200℃降低到 130℃左右。
冷凝水回收技术	冷凝水回收利用装置	5－6%	12	50	6	已采用	冷凝水与给水温度相差 60℃计算
锅炉水处理防腐阻垢节能技术	碱煮加酸洗	1.2－3%	2.5	7	-	未采用	水垢厚度按 1mm 计算
智能吹灰优化与在线结焦预警系统技术	吹灰器、控制监测设备	2－3%	12	35	5	未采用	灰垢厚度按 1mm 计算
链条炉复合燃烧技术	风扇磨煤机制粉系统	6%-8%	15	50	10	未采用	按 20%的煤制粉率以及 26.47 KW·h/t 的系统单耗计算
优化保温蒸汽管道、阀门、配件和容器	管道、阀门、配件和容器	0.75-1.5%	10	20	-	未采用	—

过量空气管理	—	1.5-3%	0.5	0.8	-	未采用	—
排污治理与热量回收	热交换器	1.9%	10	35	-	未采用	—
闪蒸汽回收	闪蒸罐换热器	2.2%	10	45	5	未采用	—

将技术改造措施投资成本进行年化处理，具体计算方法为：

$$F = 投资成本 \times \frac{d}{1-(1+d)^{-n}}$$

其中，d 表示折现率，n 表示节能设施的使用年限。采用每项节能技术的节省每吨标煤净成本[5]（cost of saved energy，CSE）为：

$$CSE = \frac{F + O - p \times \Delta E - S}{\Delta E}$$

其中，F 代表技改措施年化投资成本；

O 代表技改措施/设备的年运行费用；

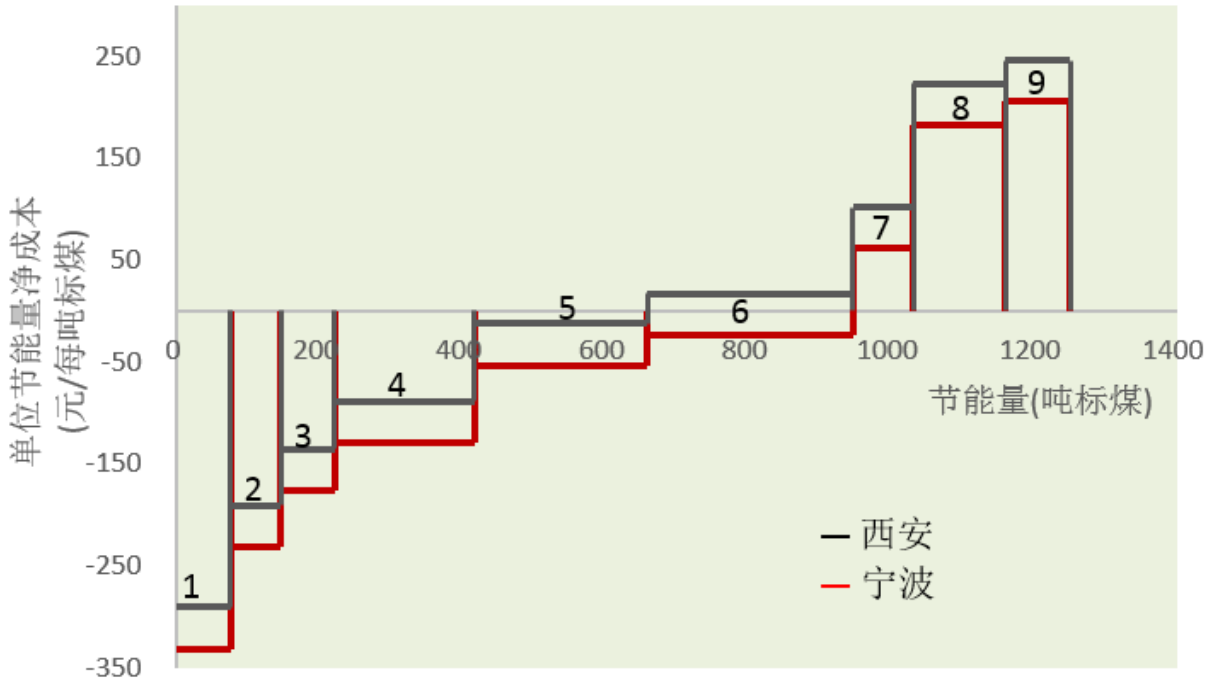
S 表示技术改造财政补贴额（年化）；

ΔE 表示技改前后燃煤消耗节省量

P 表示燃煤价格。

本项分析通过计算节能措施的单位节能净成本（y 轴）和节能潜力（x 轴），构画由不同节能措施组成的节能成本曲线，以此确定并比较这些节能措施的技术经济性。为了解燃料价格对这些措施经济性的影响，本项分析采用了宁波和西安的煤炭价格，构建两条反映两地不同价格的节能成本曲线（见图 5）。图中 x 轴以下的区域代表经济收益大于成本，即技改措施带来的成本节省超过投资，而 x 轴以上的区域代表收益小于技改投资。如图 5 所示，所分析的九种节能措施在西安和宁波分别五种和六种是经济合算的。两个城市相比，由于宁波的煤炭价格相对偏高，节能措施可为宁波带来更大的成本节省（图中红线所示）。

[5] 净成本：节能措施年化投资成本减去因提高能效得到的年收益（即节省的燃料成本）和锅炉改造获得的财政补贴（年化）。



注：技术措施：1、过量空气管理；2、锅炉水处理防腐阻垢节能技术；3、优化保温蒸汽管道、阀门、配件和容器；4、烟气余热回收技术；5、冷凝水回收技术；6、链条炉复合燃烧技术；7、排污治理与热量回收；8、智能吹灰优化与在线结焦预警系统技术；9、闪蒸汽回收

图 5 锅炉能效改造措施节能成本曲线

分析显明，实施节能措施是一种成本有效的手段。但是现实中，众多技术、信息、资金及市场上的障碍阻碍这些成本有效的节能措施得以广泛应用。此外，这里评估的 9 项措施只是众多节能措施的一部分。锅炉用户还可以采用其他的未纳入本评估范围的节能手段。这些手段包括：完善锅炉运行管理，采用高效燃烧器、自动化燃烧控制系统、带有感应器和软件的智能锅炉清洁系统、锅炉成像和温度测量技术等等。这些措施未纳入此项目评估范围的原因是缺乏有效数据或在中国这些措施还没有实现大规模商业化。

方案 3 建立大型高效锅炉，整合个体需求，取代企业自建的分散小锅炉

试点城市淘汰小型燃煤锅炉的工作为城市综合规划、优化配备资源、有效达到能源环境双控目标提供了契机。小型燃煤锅炉必须淘汰，但企业供热供气的需求仍须满足。采取什么样的应对手段对包括宁波西安在内的广大城市是一个重要的挑战。是沿用传统的做法，粗放地让企业各自换装小型替代锅炉（燃气或其他燃料锅炉），还是利用淘汰小锅炉的契机，敢于采取创新的手段，整合个体需求，建立局部化集中供热供气服务，使用先进

微燃气轮机进行热电联产等资源高效利用的创新方式，替代企业独立的自建锅炉？探索有关答案是此分析的目标。

局部化集中供热供气服务是一种新的战略，满足数个相邻企业所需的供热和蒸汽负荷要求， 取代企业独立分散的小锅炉的创新模式。在城市供热领域，中国政府号召取消各单位自建锅炉，换以集中供热，以减少大气污染、提高能源使用效率。然而，在工业领域，由于企业对供热和蒸汽负荷需求的差异化，很难实现大规模、集中式统一服务。在工业领域，局部集中的能源中心既能满足用户各异的需求，又能取得独立分散锅炉所达不到的较高的资源利用效率。这种能源中心因具有一定的规模，可以采用更节能的技术，分散或小型设备使用这些技术可能不具有经济性。采用能源中心取代分散的锅炉也可以显著降低空气污染监测和控制的成本。同时，热电联产为基础的分布式能源中心可成为调峰系统，在满足企业热/气需求的同时，灵活运行，提供高附加值的服务。以美国食品医药管理署（FDA）White Oak 研究中心与私营部门共建的的能源服务中心为例，由微型燃气轮机组成的柔性气/热/冷/电四联供系统不仅满足 White Oak 的各种能源需求，还在电网高电价时，适时增加热电联产机组发电比例，为电网提供高附加值的调峰服务，使该机组投资收益最大化。

本分析选取企业地理位置较为集中的（在 10 公里范围内[6]）西安临潼五家企业作为研究对象，研究建立以高效大锅炉构成的能源中心以满足企业分散锅炉所需的蒸汽和热力负荷的经济可行性。上述五家企业的锅炉安装情况及蒸汽/热水需求情况如表 14 所示：

表 14 五家企业锅炉类型及运行情况

	标准股份	银桥乳业	伊利	邦淇制油	陕鼓动力	
锅炉类型	燃气锅炉	燃气锅炉	燃煤链条炉	燃煤链条炉	燃气锅炉	燃气锅炉
锅炉容量及数量（蒸吨×数量）	10×2	10×3	20×1	20×3	6×2	20×1
锅炉运行热效率	88	88	75	75	86	90
企业需求的热介质	热水	蒸汽	热水	蒸汽	热水	热水
单位蒸汽热焓（MJ/吨）（表压 1.0MPa，温度 184° C，饱和蒸汽)；单位热水热焓(MJ/吨）(表压<1.0MPa,温度 120° C)	504.09	2779.7	504.09	2779.7	504.09	504.09

[6]分布式能源中心需要有效的供热距离，以最大限度避免由于输送蒸汽 / 热力而产生热损失。

给水热焓(MJ/吨)（蒸汽给水温度 104° C；热水给水温度 60° C）	251.67	435.95	251.67	435.95	251.67	251.67
年蒸汽/热水需求量/万吨	1	10	2	25	0.8	2
燃料低位热值 天然气/(MJ·m^{-3})；煤（MJ·kg^{-1}）	34.469	34.469	22.53	22.53	34.469	34.469
年蒸汽/热水需求热焓值 GJ	2524.20	234375.00	5048.40	585937.50	2019.36	5048.40
燃料消费量天然气/(km^3)；煤/（t）	83.22	7726.80	298.77	34675.99	68.12	162.74

本分析选择三种不同类型的能源中心，即：燃气热电联产、大型高效燃煤锅炉及大型燃气锅炉[7]，并将它们与五家企业各自独立运行燃气锅炉[8]进行对比。根据可产出同等热量，使用 3 台 35 t/h 锅炉（燃煤或者燃气）或者两台 SolarTurbine 金牛 60（Taurus 60）燃气轮机配一个 30t/h 的天然气锅炉的热电联产系统，取代五家企业独立的锅炉。为了便于比较，本文采用年化成本的比较方法，综合比较评价不同方案的经济性。锅炉的运行成本包括年化锅炉投资成本和日常运行成本两部分，其中：

年化投资成本 F 的计算公式如下：

$$F = \text{投资成本} \times \frac{d}{1-(1+d)^{-n}}$$

其中，d 为折现率；n 为锅炉房及其设备的使用年限。本分析设定燃气热电联产系统使用寿命为 25 年，燃煤、燃气锅炉使用年限为 15 年，折现率为 10%。

表 15　不同供热方式的经济评价分析参数

因素	燃气热电联产中心	大型燃煤锅炉	大型燃气锅炉	企业自备燃气锅炉
设备总投资成本（万元）	14,000	2,400	2,100	3,600
年化投资成本 （万元）	1542.4	315.5	276.1	473.3

[7] 由于政府对小于 200MW 的燃煤热电厂建设有限制，本分析未考虑分布式燃煤热电联产系统。
[8]之所以选择燃气锅炉是因为政策禁止使用小型燃煤锅炉

燃料低位热值 天然气/(MJ·m^{-3})；煤/（MJ·kg^{-1}）	34.47	22.53	34.47	34.47
热效率	发电 35% 供热 90%	供热 77%	供热 90%	供热 88%
年发电量(kW •h)	6953.4×10^4	—	—	—
年自耗电量(kW •h)	328.7×10^4	510×10^4	100×10^4	306.9×10^4
电价（元/kW •h）	0.85	0.85	0.85	0.85
燃料价格（天然气/(元/m^3)；煤（元/t））	2.28	371	2.28	2.28
发电燃料消耗量 天然气/(km^3)；煤/（t）	20749.34	—	—	—
供热/气燃料消耗量 天然气/(km^3)；煤/（t）	26914.78	49129.35	26914.78	27526.48
用水量（吨）	35×10^4	40×10^4	35×10^4	38.5×10^4
水价（元/吨）	1.8	1.8	1.8	1.8
其它费用（万元）*	135	200	120	436
总成本（万元）	6976.78	2552.64	6697.66	7515.51

*其它费用包括人工费、维修费用、日常维护费用等

本分析在比较燃煤设备的时候考虑其污染治理成本,使用研究对象企业实际的烟尘、氮氧化物、二氧化硫等污染物处理成本。由于中国正计划实施全国范围的碳排放权交易制度，故分析中也考虑了燃煤锅炉碳排放的成本，其价格参考了中国 7 个碳交易试点在 2014 年 6 月至 2015 年 5 月一年的平均交易价格。

最近的新闻报道提到中国的非民用天然气价格有望在今年底得到进一步调整，每平方米下调 0.40 至 1 元。天然气价格的进一步下降无疑会减少使用天然气系统和燃煤系统的成本差距。因此，对四种供热方式的分析也加入了天然气价格进一步走低情形下各个系统的比较。此处设定天然气价格每平方米下降 0.50 元。

根据西安这五家企业对蒸汽和热水的需求情况，并考虑不同的成本因素，测算得出四种不同供热方式的成本。表 16 列出不同方案下指标对比情况。其中对于热电联产系统而言，成本为净成本 = 设备年化投资成本+年燃料成本-热电联产系统发电收益。非热电联产系统成本=设备年化投资成本+年燃料成本。

表 16 四种主要供热方式的综合指标对比

类别	指标/方案	1．天然气热电联产中心 热电比 3.5：1	2．大型燃煤锅炉	3．大型天然气锅炉	4．企业分散自建天然气锅炉
燃料	年消耗煤炭/天然气量（吨、千立方米）	47664.12	48129.4	26914.8	27526.48
主要污染物排放量	烟尘（吨/年）	13.63	1925.17	7.70	7.87
	一氧化碳（吨/年）	3.96	88.08	2.23	2.28
	二氧化硫（吨/年）	30.03	866.33	16.96	17.34
	氮氧化物（吨/年）	162.06	437.01	91.51	93.59
成本及对比	成本 （不考虑污染控制）（单位：万元）	6976.78	2552.64	6697.66	7515.51
	成本对比（以方案 4-企业自建天然气锅炉为 100%）	92.8%	33.96%	89.12%	100%
	成本（+污染控制）（单位：万元）	7293.74	3435.33	6876.65	7698.56
	成本对比（以方案 4-企业自建天然气锅炉为 100%）	94.74%	44.62%	89.32%	100%
	成本（+污染控制+天然气每立方米降价 0.5 元）（单位：万元）	4910.54	3435.33	5530.91	6322.23
	成本对比（以方案 4-企业自建天然气锅炉为 100%）	77.67%	54.34%	87.48%	100%

由表 16 可以得出下列结论：

- 三种能源中心之间尽管成本差异加大，但均比企业自建和运行独立锅炉更经济合算。从这点来说，以能源中心代替企业分散式自建锅炉，可为一个成本有效的解决方案。
- 大型燃煤锅炉在四种比对的供热方式中似乎是最合算的选择。不考虑污染控制成本时，大型燃煤锅炉、大型天然气锅炉、燃气热电联产、及分散式天然气锅炉的成本比为 1：2.62： 2.73： 2.94；考虑环保成本时，大型燃煤锅炉、大型天然气锅炉、燃气热电联产、及分散天然气锅炉的成本比则变为 1：2.00：2.12：2.24。中国正实施的煤炭总量控制及对大气污染更严格的规制会大大增加使用燃煤的成本，因此集中式燃煤锅炉将

缩小其与其它系统相比的成本优势。

- 由于作为天然气热电联产主要部件的微型燃气轮机目前在中国的应用有限，其投资成本尚高，再加上天然气的高价格，都使燃气热电联产系统的成本接近于企业分散建设锅炉的成本。但是，随着设备成本的降低、天然气价格的进一步下降以及中国在天然气分布式能源的政策推动，燃气分布式热电联产系统的经济效益将会有较大提升。如表 16 所示，若天然气价格在现有水平上每平方米下调 0.50 元，四种供热方式的成本由低到高的顺序则变为：大型燃煤锅炉，燃气热电联产，大型天然气锅炉，分散式天然气锅炉；其成本比为 1:1.43:1.61:1.84。

实施工业锅炉能效提升及燃料替代面临的挑战

技术经济分析结果显示，改造既有燃煤锅炉、用天然气替代煤炭、利用分布式热电联产有效利用资源，均为经济有效的工业燃煤锅炉解决方案。但是，我们对宁波和西安的实地考察以及文献调研表明，目前还有不少障碍使中国无法完全实现这些潜力。下表列举了有关提高能效、使用更多的天然气、以及推广分布式能源和热电联产方面的关键障碍。

表 17. 实施经济有效的工业燃煤锅炉解决方案的关键挑战

提升能效的挑战	燃料替代的挑战	推广分布式能源和热电联产的挑战
缺少适当的标准规范 • 工业锅炉产品能效指标中缺少生物质锅炉、小型电锅炉、煤粉锅炉热效率指标，使得低性能的锅炉在替换燃煤锅炉时进入市场 • 缺少反映工业锅炉系统运行水平的能效指标 • 缺乏锅炉运行操作、设备调整、锅炉水处理等规范，造成效率低下 缺乏适当的技术和系统化的解决方案	缺乏有效的规划 • 缺少有效的战略、全面的规划、及强大的技术支持，为关闭燃煤锅炉后的行动留下空白，此会遗失以锅炉为抓手，推广全面解决方案的良机 市场不确定性和缺乏竞争 • 政府对使用天然气的工业项目的前置审批可能增加燃气投资项目的不确定性 • 地方燃气公司的市场垄断地位限制了市场竞争和第三方供给商的参与，使得工业企业在选择燃气供给方和协商燃气价格时缺少选择的余地。	法规和行政管理障碍 • 无法连接到电网和热力输送系统，使得分布式热电联产系统以“孤岛方式运行”，使分布式热电联产项目的投资经济性受到影响 • 分布式或热电联产系统审批程序拉长投资者投资周期 • 对分布式能源和热电联产系统尚缺少全面的规划和协调，导致布局分散，无法实现规模效应 体制障碍

• 高效节能技术（如流化床锅炉）的市场占比低（仅 3-5%） • 锅炉设计关注承压多于关注燃烧部件，难保最优燃烧效率 • 由于担心高的燃料价格，采用价廉质低天然气或生物质锅炉，导致运行效率低下 • 没有发掘蒸汽全系统的节能潜力（如泵和风机的规格不恰当，隔热不好，开口过大以及较高的热损失，蒸汽系统整体设计缺乏最优化） • 锅炉监测及运行控制自动化程度欠缺，导致无法实现优化运行 <u>管理和运行能力弱</u> • 采用低质燃煤并缺乏对购买的煤炭进行成分测试，导致能源效率偏低 • 锅炉操作人员教育和培训水平较低，技术能力薄弱 • 缺少工业锅炉经济运行诊断、评价技术机构和技术人员，及相应评价工具包、最佳实践案例、技术应用指南等技术支撑资源 <u>监管尚薄弱</u>	• 民企缺乏与国外液化天然气供给商签订的长期供给合同，因此难以获得政府批准进口或修建接收液化天然气的接收站 • 进口液化天然气的高额资本投入以及液化天然气和天然气的价格波动加大民企参与天然气供给的投资风险 • 民企租用国有油气公司的液化天然气接驳设施时通常面对信息不透明， 无法知道码头是否有空位也不知道获得批准所需要的时间 • 生物质锅炉在政府生物质能源未来发展规划中的份量和力度的不明朗，削弱市场投资生物质锅炉的积极性 <u>天然气资源有限，价格偏高</u> • 优先保民用天然气使得工业用天然气供给面临挑战 • 由于需求高于供给，工业用天然气价格偏高 • 缺乏有效金融杠杆和风险规避机制使得工业用户面对燃料价格变动无有效应对手段 • 投资进口液化天然气项目、修建或租用码头和接驳站需高额的投资，拉高液化天然气的价格	• 热力生产单位和热力输送系统可能隶属不同部门，协调较弱 <u>市场和融资障碍</u> • 由于融资途径有限，缺乏第三方（如能源服务公司）的积极参与，导致分布式能源及热电联产市场扩展缓慢 • 分布式能源及热电联产系统的投资成本可能没有完全反应在电力和热力的价格中，影响对分布式能源及热电联产的投资回报 • 商业和民用建筑中通常按照面积平摊供热费用，而没有安装量表按实际用热收费的做法，可能抑制私人资金投入供热服务 • 投资成本较高，缺乏融资渠道，使得热电联产和分布式能源推广缓慢 • 热电联产和分布式能源的投资尚缺少有效的税收财政激励和其他的激励政策 <u>技术障碍</u> • 缺乏实际经验和有效支撑工具限制了热电联产和分布式能源优化设计能力

• 缺乏对锅炉能耗和排放情况的监测和上报 • 对实施已制定的锅炉能效目标和排放标准的监管依然薄弱		• 热电联产和分布式能源系统的设计未采用柔性设计，无法提供高附加值服务（比如变为调峰机组），失去获得最大收益的机会

解决工业燃煤锅炉的路线图

中国正实施工业燃煤锅炉节能减排综合提升工程，需要有效的策略。同时中国有必要排除本次评估中所讨论的障碍，以深挖富有经济性的潜力。以下是关于解决工业燃煤锅炉路线图的一些建议。

采用综合系统的方法应对燃煤工业锅炉的挑战

中国应采取系统的行动来有效解决锅炉所带来的挑战。图 6 展示这种全系统的架构。核心策略是将工业锅炉作为一个抓手，把淘汰锅炉作为契机，有效促动政策的改进和整体的行动。采取这个系统工程无疑需要政府部门之间的协调与配合。

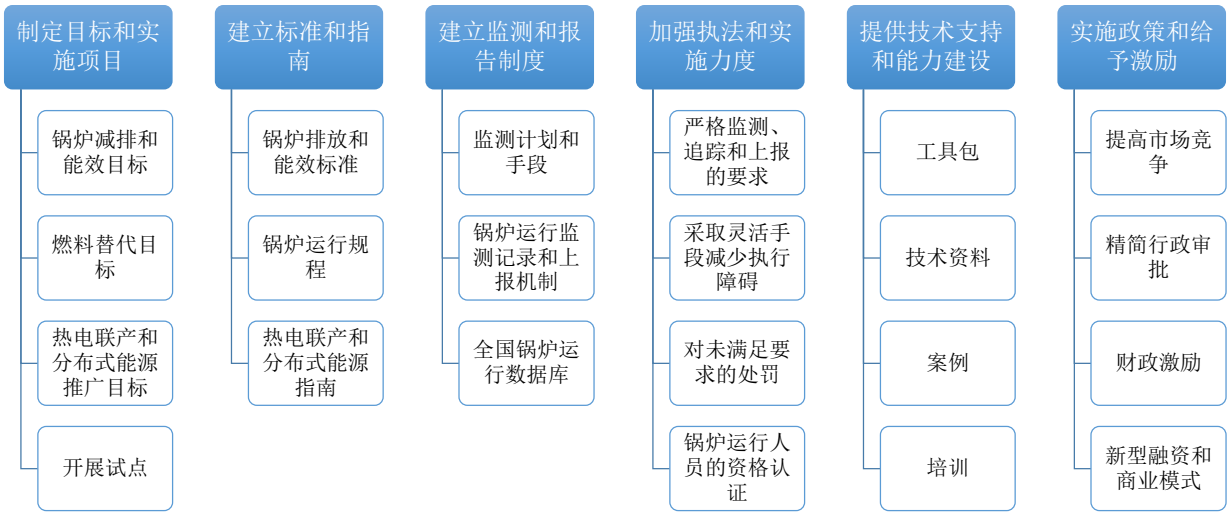


图 6　　锅炉系统工程示意图

制定并实施成本效益好的锅炉淘汰战略

为数众多的小型工业燃煤锅炉面临淘汰，但企业对蒸汽热力需求仍在。如何最环保、最绿色的满足企业的需求，是工业燃煤锅炉淘汰后要实施的重大战略，也是提升工业系统能效，改善环境，并发展热电联产和分布式能源的最佳机会。地方政府需要提供必要的资源，支持工业企业采用成本有效的锅炉淘汰战略。地方政府也应利用这个契机，进行综合全面规划，加快推进并协调燃料替代和采用热电联产和分布式能源的战略。

政策改进

实施综合有效的淘汰战略需要改进提升现有政策。这些政策改进可在多方面进行。首先，政府需要考虑增加市场竞争性，打断地方燃气公司对市场的垄断，减少行政管理带来的“软成本”，并消除行政障碍以鼓励私人投资和第三方的参与。其次，地方政府可以通过 PPP（政府-社会合作伙伴），有效激励私人领域参与到燃气供给的基础设施建设和扩展燃气的输送管网。第三，对燃气价格持续的改革，减少工业部门的燃气价格和其他部门之间的差距。第四，去除工业热电联产和分布式系统接入城市电网和热力输送系统的障碍，提高这些系统的投资回报率。

通过激励政策加快先进技术开发和应用

技术进步对解决中国的锅炉问题非常重要。 在中国可见的未来，煤炭仍将是重要的能源，因此有必要把重点放在如何更高效更清洁地利用煤炭。但与此同时也需要对可替代性的解决方案的研发、技术应用和市场推广进行战略的规划，从而避免造成基础建设和技术体系只适合于煤炭的“煤炭锁定效应”。政府通过税收和财政激励可以加速锅炉系统优化、清洁燃料替代（如天然气、页岩气、生物质能、太阳能）和能源综合利用（如余热利用、热电联产和分布式能源）等的技术开发和市场推广。

建立有效的标准和规范

中国可制定更严格的燃煤及燃气工业锅炉能效标准和能效水平测试规范。在燃煤锅炉标准基础上，制定生物质锅炉、电锅炉等能效标准，并使其成为和其他要素（如安全）一体化的指标。中国也应开发有关锅炉的运行管理、调试、水处理等方面的规范及蒸汽系统的能效评价标准。此外，制定有关热电联产和分布式能源系统的技术标准、操作及设计指南对这些技术的更广泛应用至关重要。同时，中国有必要为热电联产系统和分布式能源的并网上网及系统互联制定相应规则和标准。

通过实施城市试点项目推广先进技术和整体解决方案

政府可考虑在宁波和西安实施燃煤工业锅炉节能减排综合提升工程试点项目，以验证和示范新解决方案。试点城市可制定综合性试点计划，侧重于整体解决方案。在城市试点中，可开展具体的技术示范，用于展现不同的技术手段，如清洁燃料处理技术、高效低排放燃烧器、锅炉自动化监测控制技术、智能化炉膛清污技术、锅炉温度影像技术、蒸汽系统优化、建立热电联产能源中心，以及利用太阳能进行锅炉预热等等创新技术和手段。

开发创新性的商业模式和融资机制

商业和融资模式的创新对中国促进先进技术和整体解决方案的社会投资十分关键。中国可以考虑在城市试点中体验创新的模式。例如，将锅炉生产商从设备供应商角色转变为蒸汽 / 热力服务商。从宏观层面，这种转变不单单是锅炉生产商角色的转变，也是经济结构调整发展服务业，扩展产业链的重要转变，因而意义重大。在微观层面，锅炉生产商变服务商将使工业锅炉用户将精力从他们不擅长的运行锅炉转移到他们擅长的专业生产经营上，减少不必要的运行管理和成本。

商业模式转变的同时，需采用创新的融资模式。这些模式包括采用为工业企业提供蒸汽 / 热力/电力联供服务并收费的服务机制，或者与企业建立长期的购买服务合同，如美国广泛采用的能源购买合同（PPA），并以这种费率服务机制或长期购买合同质押获得融资，并以服务收费归还贷款。中国还可以在城市试点中以政府社会合作伙伴（PPP）模式，由地方工业园区的管委会整合园内企业对热/蒸气的需求，招标购买所需要的企业服务。

加大执法灵活度提高执法有效性

中国有必要继续加强法规和标准的实施力度。因此，中国需要加强在监测、上报和减排结果核查方面的能力。为了提高中国实施这些法规和标准的有效性，也需要灵活的机制。例如，中国可以考虑参考美国锅炉执法的经验，即对企业节能的举措授予“节能积分”，允许企业使用积分冲抵一定的减排要求。避免一刀切的执法模式，可使工业企业能够找到最具有经济性的方法，灵活地实现节能减排目标，使执法与企业利益相向而行，确保执法的效果。

加强技术支撑和能力建设

中国需要建立技术支撑项目帮助节能技术的实施，热电联产和分布式能源的推广，以及最佳实践的使用。技术支撑项目应该包括提供评估工具包、培训、技术指南和最佳实践案例。

能力建设是获得项目相关方支持并帮助项目相关方认可解决方案的关键一步。中国需要针对不同的项目相关方开展有效的能力建设项目， 包括工业企业、政府机构、服务商、制造商以及投资机构。这些项目可以涉及法规、标准，也可涵盖锅炉改造技术、提高运行和维护、燃料替代、可再生能源、合同和融资等内容。培训可以用更经济省时的方式，如网络培训和在线视频课程等形式。

中美实施路线图的合作领域

中美两国都在实施各自的锅炉行动计划，两国在应对燃煤工业锅炉带来的能源和环境挑战方面进一步合作非常重要。重要性包括：

- 这是中美合作的最具体的领域，可以向全世界昭示世界两个最大温室气体排放国共同合作，起领导作用，以应对气候变化的决心和行动。共同的行动将对减少温室气体排放产生具体和重要的影响。
- 美国正努力使锅炉的减排成为实现其温室气体减排目标的主要力量，并采取了一系列措施。美国正实施一个系统化的全国锅炉“最大限度使用可达到的污染控制技术（Maximum Achievable Control Technology）”，简称“锅炉 MACT”

项目。该项目集法规、技术、市场战略、标准和执法为一体。中国目前正在全面推进工业锅炉节能减排综合提升工程。中美两国因此有许多地方可以互相借鉴和合作。

- 考虑到中国中央和地方政府在这一领域都有巨大兴趣，合作可以创造自下而上和自上而下的多重机会。
- 中美合作可撬动美国（如美国能源部、美国环保署、贸易发展署、国家实验室、工业协会以及私人企业）的多种资源，以产生更大的影响。合作也可充分利用中国政府、世界银行以及亚洲开发银行的资金支持。

以下是对中美合作的具体领域的建议：

1．支持城市试点项目和应用美国先进解决方案

中国国家发展和改革委以及宁波和西安的地方政府都表示希望将宁波和西安作为试点城市，实施工业燃煤锅炉节能减排综合提升工程，并且试点作为中美锅炉合作的第二阶段行动的主要内容。试点中获得的经验和教训以及采用的解决方案将作为其他城市实施工业锅炉综合提升工程的参照模式。试点项目将带来创新的融资机制，更有效的商业模式，以及侧重于温室气体减排的城市规划，这些创新的使用，将为两国产品和解决方案供应商及投资者创造机会。

2．分享政策经验，完善政策机制

美国联邦政府以及州政府层面在制定有效政策法规解决污染问题、提高能源效率并推广热电联产和分布式能源等领域有丰富的经验。政策法规的制定往往以能够使企业和政府的利益相向而行作为考量因素，使政策法规的执行成本最小化。中美双方在政策经验上的合作可以使中国受益，使中国更多掌握市场化机制，减少政策不当而产生的市场障碍。

3．开发适合本地的工具和资源包

美国在开发和使用工具以及资源包来有效识别工业锅炉系统中的潜力方面有很多可分享的经验。美国能源部开发了一系列软件工具和资源包，包括 MACT 决策树工具（用于识别最佳的锅炉合规战略），热力和蒸汽系统评估工具如 PHAST（工艺系统加热和评估工具）, SSAT（蒸汽系统分析和评估工具）等用于分析全系统的改造潜力。美国能源部和美国环保署也制定了一系列技术指南，包括锅炉调试、蒸汽系统优化，和热电联产 / 分布式能源系统设计和运行指南。这些工具及资源包经过本地化可有效帮助中国试点城市抓住可能错过的机会。

4．加强在标准制定和分享执法手段方面的合作

中国对进行中美能效标准合作充满兴趣。两国可以分享双方在建立相关标准或规范的经验。美国还可以侧重于分享他们在控制污染排放特别是锅炉污染排放方面的经验。此外，美国还可以分享有效执法手段的经验，提高中国城市的执法实施力度和效果。

5．拓宽能力建设合作

美国能源部启动的中美工业节能培训合作项目[9]体现了通过有针对性的培训可以提高中国工业企业的能效。类似这样成功的合作可以通过中美在锅炉项目的合作进一步扩大，使合作内容延伸至较宽广领域，并与目前由世界银行支持的中国工业节能培训相衔接，同时使培训项目内容构建更合理，更符合需要。

中美实施路线图的具体活动建议：

1. *政策对话和交流*

- 中国主要的相关方，包括国家发展和改革委（NDRC）、国家质量监督检验检疫总局（AQSIQ）、环境保护部（MEP）、国家能源局（NEA）、工业和信息化部（MIIT）以及试点城市，赴美国与相关部门交流、考察及对话。交流的内容可包括：（1）了解美国环保署的"锅炉 MACT 规制"（即最大可实现的污染控制技术规制）以及美国能源部的锅炉 MACT 合规实施和规划项目；（2）在制定灵活的法规设计，将污染的末端控制转变为污染防治（如节能减排协同设计、基于产出的排放限额、以绩效为主的规制）等方面双方开展交流和分享经验；（3）政策设计和政策执行（如美国"清洁空气法案"的规定和执行，加州政府 AB32 法规的设计和执行等）等方面开展交流；（4）清除市场障碍和市场改革；私营部门的参与；价格改革；政府社会合作伙伴关系（PPP）等方面开展有效交流。
- 在中国举办侧重于政策设计及实施最佳实践和经验教训的专题研讨会。
- 相关标准化合作。
- 与中美气候变化工作组（CCWG）的新启动的气候-智能／低碳城市项目进行连接，从而两个试点城市（宁波和西安）可作为 CCWG 城市项目的示范点，双边合作推动气候-智能/低碳城市发展并同时解决工业锅炉。

2. *在试点城市开展技术和商业模式的创新试点示范项目*

组织助贸代表团（Reverse trade missions）

美国贸易发展署通过支持组织中国赴美国访问的助贸代表团，促进美国商业企业的国际合作和贸易。助贸代表团内容可包含：锅炉系统清洁燃烧、蒸汽系统能效、锅炉系统监测和自动控制等，也可以包括其它与锅炉能效工作配套的热电联产、空气污染监测和控制等。此活动参与方可包括中国国家发展和改革委，国家能源局、工业和信息化部、环境保护部、宁波和西安的地方政府以及中国制造企业、工业客户、投资方和能源服务公司。

技术推介会

由两个试点城市主办与锅炉能效、燃料替代及资源综合利用相关的技术圆桌会议，使中美设备生产企业、投资机构及工业用户有机会分享产品/技术信息，了解地方市场需求，以确定最适合用户需求的解决方案。

[9] 由美国能源部支持的"国际工业能效培训和推广（IIEETD）"项目，由包括美国伯克利国家实验室和美国橡树岭国家实验室在内的多家机构组织实施。同时，美国的多家企业也参与到项目中。该项目共培训了超过 300 名中国政府官员和技术人员，主要内容是美国能源部的工艺加热和蒸汽系统评估工具。项目持续 2 年，许多受培训人员成了培训师。

在试点城市示范试点先进的技术和解决方案

国家发展改革委将可将宁波和西安作为中美锅炉合作的两个试点城市，并将这两个试点城市应对工业锅炉的经验推广到其他城市。这个以试点城市为基础的技术推广，将为优秀的技术提供一个良好的示范平台和推广机遇。

国家发展和改革委的资源节约和环境保护司是中美锅炉合作的牵头方。同时环资司负责制定并公布国家推荐节能技术目录。政府通过对用能单位和政府采购使用目录中的产品和技术有激励措施。环资司可将锅炉试点示范表现佳的技术融入到技术推荐目录中，也可考虑推出中美两国的锅炉系统双十佳（即最佳技术、最佳实践），以此大力推广绩优的技术。此外，推广成功的美国技术的另一途径是国家发展改革委和中国商务部一道推动，在试点项目上降低试点城市使用美国产品的进口关税。

美国贸易发展署（TDA）可支持美国公司开展此项目所建议的试点示范项目。具体由国家发展改革委请求美国贸易发展署提供支持，两个试点城市将作为试点示范项目的中方项目承办方。具体示范项目取决于国家发展改革委以及两个试点城市的安排。两个试点可以试点示范不同的项目。美国贸易发展署、美国商务部（U.S. Commerce）、美国能源部热电联产技术支持伙伴项目（DOE CHP Technical Assistance Partnerships）、美国国家实验室以及美国商业促进机构（如中美能源合作项目- ECP、美国机械工程师学会-ASME、美国锅炉制造协会、热电联产协会等）可以协力参与帮助识别并推荐适合中国市场的美国技术。

试点示范创新型的融资和商业模式

试点示范项目既是展示先进技术方案的平台，也是开发和测试创新融资和商业模式的一个最佳机会。高能效低排放的技术在整个技术的生命周期中有较大的节能减排效果，但往往需要比常规技术较高的前期投入。解决融资是清除推广先进技术市场障碍的一个关键点。

具体活动可包括创立 PPP 和建立创新的商业模式。美国贸易发展署所支持的示范项目，可在西安或宁波选择一家工业园区，以工业园区管委会（政府）和社会资本建立 PPP，将园区内相近企业的蒸汽/热/电等需求整合起来，建立热电联产系统中心。项目可采用创新的服务购买合同模式（PPA），利用第三方融资。在这个模式下，成立由锅炉制造企业参与的特殊目的公司，负责设计、开发、融资并实施热电联产项目，使用先进的技术（如微型燃气轮机、锅炉系统自动化、低氮氧化物排放的燃烧技术等）。特殊目的公司在合同期内负责运行维护热电联产中心，为邻近企业提供冷/热/蒸汽/电的服务，并向用户定期收取服务费用。 项目以服务收入为支撑的合同做质押获取融资，以服务帐单应收款支付融资。

美国食品医药监管署（FDA）White Oak 研发中心的社区级热电联产系统就是利用这种商业模式的一个范例。该项目由霍尼韦尔公司与美国联邦政府公共事务署签署为 FDA White Oak 研究中心提供长达 20 年的蒸汽/热/冷/电的服务合同，并通过第三方融资，以合同能源管理形式开展。中国正在开展的电力市场改革，打破国家电网在供电上的垄断，鼓励像工业园区这样的大用户自己选择供电商。 这种变化为上述的以特殊服务公司形式与工业园区合作的模式带来机会。建立这种创新的商业及融资模式有巨大的意义，它将帮助锅炉制造企业从单一的产品提供商转型为综合服务提供商，从而能够产生更多更

长远的效益。这种模式不仅可在节能环保上做出突出贡献，也符合中国政府制定的发展新兴战略产业的战略，即推动 PPP 以及大力发展服务业。

这种热电联产中心和试点的其他示范工作的融资可考虑与世界银行、全球环境基金和亚洲开发银行在中国的现有项目对接。同时也可利用两国开发银行（即，中国国家开发银行及美国进出口银行）的资源分别支持中国国内项目的开展及美国技术的出口。

此外，项目还可以采用额外的创新机制，比如介入保险公司， 近一步降低潜在的投资风险。例如，在上述建议的热电联产能源中心的运行中如遇到特殊情况（例如天然气供应受影响或锅炉设备出现故障）影响能源服务时，服务中断保险可使保险公司对特殊目的公司未能兑现的能源服务进行理赔，以此增强对工业园区用户提供能源服务的可靠性，确保用户利益。

3. 技术资源及能力建设

- 引入美国能源部锅炉决策树分析工具并进行本地化，帮助中国试点城市识别最佳实施战略（具体内容请见图 6；图片来自美国能源部 MACT 决策树分析工具）。

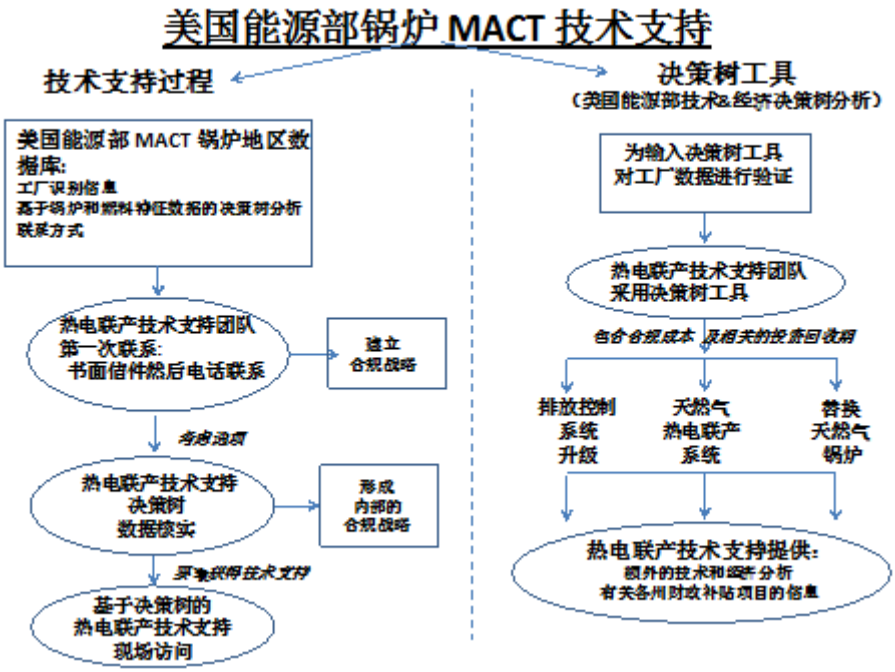


图 6 MACT 决策树工具

- 引进美国能源部的能源系统优化工具（如蒸汽系统建模工具和工艺加热评估工具）以及工厂层面的能源快速剖析工具包，以识别遗失的节能减排的机会。
- 利用美国贸易发展署国际商业伙伴项目开展相关培训和技术研讨会，以加强相关领域的能力建设。内容可包括：锅炉能效技术、评估工具的应用、热电联产技术应用、分布式能源技术和系统设计等。

致谢

此项目美方团队由美国国务院能源资源局通过美国能源部与加利福尼亚大学的合同 DE-AC02-05CH11231 提供资助， 特此感谢。报告作者感谢美国国务院的 Julie Kim、Sandra Oudkirk、David Vance Wagner 以及中国国家发展和改革委的蒋静靖浩博士对项目的指导。此外，报告作者感谢西安和宁波发展和改革委的有关部门提供有关两个城市锅炉使用情况及相关政策和规划的信息。报告作者特别鸣谢下列提供信息，解答问题并审阅此报告的中美专家。他们是：索拉透平公司的李临军，劳伦斯伯克利实验室 Ali Hasanbeigi 博士，康明斯公司的 Nimrod Hou，北京大学的苗培，中国东北大学的张琦教授，中国节能环保集团公司的许明超博士，西安锅炉检验所的李德彪博士，西安交通大学的车得福教授以及西安银桥生物技术公司的仵闫良。

参考文献

Abdelaziz, E. A., R. Saidur, and S. Mekhilef. 2011. "A review on energy saving strategies in industrial sector." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 150.

Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China (AQSIQ) and the Standardization Administration of China (SAC), 2010. "Monitoring and testing for energy saving of coal-fired industrial boilers", October 30. [Chinese text]

Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China (AQSIQ) and the Standardization Administration of China (SAC), 2009. "The minimum allowable values of energy efficiency and energy efficiency grades of industrial boilers (GB 24500-2009)", October 30. [Chinese text]

Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate (APP), 2006. "RDG-06-07: Facilitate Deployment of Highly Efficient CHP Applications, Including Fossil and Biomass Fueled Industrial, Institutional and District Energy CHP Projects in Partner Countries". http://www.asiapacificpartnership.org/pdf/Projects/REDGTF/CPD/RDG-06-07.pdf

Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate (APP), 2009. "Project Status Report Form". http://www.asiapacificpartnership.org/pdf/Projects/REDGTF/PSU/RDG-06-07-PSU.pdf

Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate (APP), 2010a. "Project Registration Form". http://www.asiapacificpartnership.org/pdf/Projects/REDGTF/CPD/RDG-09-38.pdf

Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate (APP), 2010b. "Project Status Update". http://www.asiapacificpartnership.org/pdf/Projects/REDGTF/PSU/REDG-09-38.pdf

Asian Development Bank (ADB), 2012. "44011-013: Heilongjiang Energy Efficient District Heating Project", September.

Aunan, Kristin, Jinghua Fang, Haakon Vennemo, Kenneth Oye, and Hans M. Seip. 2004. "Co-benefits of climate policy—lessons learned from a study in Shanxi, China." *Energy Policy* 33: 567.

Boiler Inspection Institute (BII) of Xi'an. 2014. *Xi'an Boiler Information and Statistics*

Carbon Trading Portal, 2015. http://tanpaifang.com/ (accessed on June 2, 2015)

China Coal Market Portal, 2015. http://portal.cctd.com.cn/datacenternew.jsp?path=010101&id=21&name=%C9%C2%CE%F7%CA%A1 and http://portal.cctd.com.cn/datacenternew.jsp?path=01020101&id=C015&name=%C4%FE%B2%A8%B8%DB

China Electricity Council (CEC), 2011. "Summary statistics report on China's power sector (2010)." http://tj.cec.org.cn/tongji/niandushuju/2011-02-23/44236.html

China Energy Newspaper (sponsored by People.com), 2012. "Urban Combined Heat and Power Systems Face Three Main Obstacles", December 10th. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2012-12/10/content_1156995.htm

China Energy Newspaper (sponsored by People.com), 2013. "Heat and Power Sector Welcomes Favorable Governmental Policies", July 8th. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2013-07/08/content_1266150.htm

China LNG International Summit. 2015. "Focus: Private Companies Enter LNG Market in China", April 17. http://www.chinalng.cc/hangyexinwen/2015/0417/598.html

China News, 2015. "Beijing to increase non-residential natural gas; residential natural gas price will stay the same", April 1. http://news.qq.com/a/20150401/014226.htm

Coria, Jessica. 2009. "Environmental policy, fuel prices and the switching to natural gas in Santiago, Chile." *Ecological Economics* 68: 2877.

Dechert, Sandy. 2015. "China Coal Consumption & CO_2 Emissions Drop In 2014." http://cleantechnica.com/2015/03/13/china-coal-consumption-co2-emissions-drop-2014/

Demirbas, Ayhan. 2005. "Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues." *Progress in Energy and Combustion Science* 31: 171.

Deng, SH, Aifang Cao, Xiuya Shi. 2011. "Ningbo Combustion Prohibition Zone Completed in Three Year," *China Environmental Newspaper*. P5. April 18, 2011.

Du, KJ. 2012. "The Improvement and Application of Pulverized Coal Compound Combustion Technology in Chain-grate Stoker Industrial Boiler." *Industrial Boiler Magazine*. 2012(6)

Editorial Board of the China Electric Power Yearbook. 2003-2011. China Electric Power Yearbook, 2003-2011 editions. Beijing: China Electric Power Press.

Energy Research Institute of China (ERI). 2013. *Roadmap Study on Achieving Technical Energy Conservation Potential in China's Industrial Sector by 2020* (2020 年中国工业部门实现节能潜力的技术路线图研究), Beijing: China Scientific Technology Press.

Fang, Jinghua, Guanghai Li, Kristin Aunan, Haakon Vennemo, Hans M. Seip, Kenneth Oye, and Janos M. Beer. 2002. "A proposed industrial-boiler efficiency program in Shanxi: Potential CO_2-mitigation, health benefits and associated costs." *Applied Energy* 71: 275.

Fang, Jinghua, Taofang Zeng, Lynn I. Shen Yang, Kenneth Oye, Adel F. Sarofim, and Janos M. Beer. 1999. "Coal utilization in industrial boilers in China: a prospect for mitigating CO_2 emissions." *Applied Energy* 63: 35.

Freihaut, Jim. 2014. "DOE Mid-Atlantic CHP Technical Assistance Project: Boiler MACT Activities." A presentation made for the Chinese Boiler Study Tour to the U.S. Philadelphia, PA. November 18, 2014.

Gao JJ. 2013. "Research on China High Energy Consuming Equipment Operation Status and Energy Saving Solutions", the final report of the Research Project on China High Energy Consuming Equipment Operation Status and Energy Saving Solutions commissioned by the Chinese Academy of Engineering. Beijing, China: China Science Press. March 2013.

Habib, M. A., M. Elshafei, and M. Dajani. 2008. "Influence of combustion parameters on NOx production in an industrial boiler." *Computers & Fluids* 37: 12.

He, K., Y. Lei, X. Pan, Y. Zhang, Q. Zhang, and D. Chen. 2010. "Co-benefits from energy policies in China." *Energy* 35: 4265.

Heilongjiang Provincial Government, 2012. "PRC: Heilongjiang Energy Efficient District Heating Project", May. http://www.aecen.org/sites/default/files/china_iee_report_heilongjiangenergyefficientdistrictheatingproj_2012.pdf

Honeywell. 2012. "Project Profile: Federal Research Center at White Oak." https://buildingsolutions.honeywell.com/en-US/newsevents/resources/Publications/honeywell-hbs-white%20oak-case%20study.pdf

ICIS and C1 Energy. 2014. "China Gas Markets. August 25, 2014." http://www.icis.com/globalassets/ias/global/pdfs/lng-assets/china-pricing-sample-1.pdf

Industrial Policy and Regulation Division (IPRD) 产业政策与法规处. (2014). "Xi'an's Industrial Transformation and Improvement Status (西安市工业转型升级工作情况)". 30 July, 2014.

Industry and Information Technology Department of Shaanxi Province (IITDSP). 2012. "Shaanxi Province Industry and Information Technology Department's Notice on the Launch of Industrial Boiler Energy Conservation and Retrofit Demonstration Promotion (陕西省工业和信息化厅关于组织开展工业锅炉窑炉节能改造示范推广活动的通知)." 18 October 2012.

Laursen, K., and J. R. Grace. 2002. "Some implications of co-combustion of biomass and coal in a fluidized bed boiler." *Fuel Processing Technology* 76: 77.

Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), 2014. "Key China Energy Statistics 2014". https://china.lbl.gov/sites/all/files/key_china_energy_stattistics_2014_online.final_.pdf

Li, Jun, Artur Brzdekiewicz, Weihong Yang, and Wlodzimierz Blasiak. 2012a. "Co-firing based on biomass torrefaction in a pulverized coal boiler with aim of 100% fuel switching." *Applied Energy* 99: 344.

Li, Jun, Weihong Yang, Wlodzimierz Blasiak, and Anna Ponzio. 2012b. "Volumetric combustion of biomass for CO_2 and NOx reduction in coal-fired boilers." *Fuel*: 624.

Liu, Manzhi. (2015). *City Survey and Pilot City Industrial Boiler Survey- Xi'an.* (城市调查和试点城市的锅炉调查-西安).

Mao, Xianqiang, Xiurui Guo, Yongguan Chang, and Yingdeng Peng. 2005. "Improving air quality in large cities by substituting natural gas for coal in China: Changing idea and incentive policy implications." *Energy Policy* 33: 307.

Ministry of Environmental Performance (MEP), 2014. "Emission Standard of Air Pollutants for Boilers (GB 13271-2014)". May 16, 2014. http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/dqhjbh/dqgdwrywrwpfbz/201405/W020140530580815383678.pdf

Ministry of Environmental Protection (MEP). 2013. "Soliciting Public Feedback on 'Emission standard of air pollutants for boilers'", August 2. [Chinese text] http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201308/t20130805_256939.htm

Ministry of Environmental Protection of China (MEP). 2012. "Notice on Releasing 'Twelfth Five-Year Plan on Air Pollution Prevention and Control in Key Regions'", October 29. [Chinese Text]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201212/t20121205_243271.htm

Ministry of Finance (MOF). 2011. "Guiding Opinions on the Development of Natural Gas-Based Distributed Energy", October 9. [Chinese text]. http://www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201110/t20111018_600273.htm

Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). 2014. "Seven governmental agencies jointly releasing the Comprehensive Implementation Plan of Improving Coal-Fired Boiler Energy-Saving and Environmental Protection Performance", October 29. [Chinese text]. http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11293907/n11368223/16241288.html

Morgenstern, Richard, Alan Krupnick, and Xuehua Zhang. 2004. "The ancillary carbon benefits of SO2 reductions from a small-boiler policy in Taiyuan, PRC." *Journal of Environment & Development* 13 (2): 140.

National Bureau of Statistics of China (NBS). (2011, 2012, 2013, 2014). *China Statistical Yearbook*. 2011, 2012, 2013, 2014.

National Business Daily, 2013. "National Development and Reform Commission: Non-Residential Natural Gas Price Increases, Mixed Impacts to Industries", June 29th. http://www.nbd.com.cn/articles/2013-06-29/753898.html

National Development and Reform Commission (NDRC), Ministry of Housing and Urban-Rural Development (MOHURD), and National Energy Administration (NEA). 2014. "Implementation Guidelines of Demonstration Projects on Natural Gas-Based Distributed Energy". October 23. http://www.chinade.org.cn/upload/accessory/201411/20141151536383771275.pdf

National Energy Administration (NEA) and the Ministry of Environmental Protection (MEP), 2014. "Notice on Biomass Boiler Demonstration Projects". June 18. [Chinese text] http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201407/t20140708_1818.htm

National Energy Administration (NEA). 2012a. "White Paper: China Energy Policy (2012)". [Chinese text]. http://www.nea.gov.cn/2012-10/24/c_131927804.htm

National Energy Administration (NEA). 2012b. "Biomass Energy Development Plan of the 12th Five-Year", July 24. [Chinese text]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201212/t20121228_1568.htm

National Energy Administration (NEA). 2012c. “Biomass Energy Development Plan of the 12th Five-Year”, July 24. [Chinese text]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201212/t20121228_1568.htm

Ningbo City Government (NCG). 2011a. “Notice regarding areas prohibiting the sale and usage of highly polluting fuels (关于划定禁止销售使用高污染燃料区域的通告).” 15 April 2011.

Ningbo City Government (NCG). 2011b. “Notice regarding increasing areas prohibiting the sale and usage of highly polluting fuels (关于增加划定禁止销售使用高污染燃料区域的通告).” 19 December 2011.

Ningbo City Government (NCG). 2013. “Notice regarding increasing areas prohibiting the sale and usage of highly polluting fuels(关于增加划定禁止销售使用高污染燃料区域的通告).” 19 March 2013.

Ningbo City Government (NCG). 2014a. *Ningbo Air Pollution Prevention Action Plan (2014 - 2017) 宁波市大气污染防治行动计划 (2014～2017 年).* 30 May 2014.

Ningbo City Government (NCG). 2014b. “Ningbo City Government Notice on the Issuance of Ningbo City Air Pollution Control Action Plan (2014-2017) (宁波市人民政府关于印发宁波市大气污染防治行动计划（2014～2017 年）的通知).” 3 June 2014.

Ningbo City Quality and Technical Supervision Bureau (NCQTSB). 2014. *Ningbo City Industrial Boilers and Overall Structural Condition (宁波市城市工业锅炉使用总体及结构状况).* 24 October 2014.
Ningbo Development & Reform Commission (NBDRC). 2015c. http://www.nbdpc.gov.cn/SiteModules/ExpandMan/GuestBook/View.aspx?GBId=2171&num

Ningbo Development and Reform Commission (NBDRC). 2012. *Ningbo Energy Development “Twelfth Five Year Plan” (宁波市能源发展“十二五”规划).* December 2012.

Ningbo Development Reform Commission (NBDRC). 2015a. *Ningbo city economy and industry structure (城市经济发展和产业结构)*

Ningbo Development Reform Commission (NBDRC). 2015b. *Ningbo boiler operation status and future development plans (宁波锅炉运行情况及未来发展计划).* 23 Jan 2015.

Ningbo Economic and Information Technology Commission (NEITC), Ningbo Bureau of Statistics, Ningbo Development and Reform Commission. 2014a. *Ningbo’s Industrial Energy Efficiency 2013 Annual Report 宁波工业产业能效 2013 年度报告*. September 2014.

Ningbo Economic and Information Technology Commission (NEITC). 2014b. *City Summary of Industry Sector in 2013. (2013 年全市工业经济运行情况综述).* January 2014.

Ningbo Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau (NEEIQB). 2014. “LNG Imports Creates Explosive Growth for Zhejiang Province (浙江省 LNG 进口量爆发式增长).” 24 January 2014. http://www.nbciq.gov.cn/xwbd/ywjx/201401/t20140124_95150.html.

Ningbo Key Development Areas Leading Group Office (NKDALGO). 2014. “Notice on the Issuance of ‘Ningbo City Key Development Areas and Industries’ Misplacement Improvement and Development Guiding Opinions’ 关于印发《宁波市重点开发区域产业错位提升发展指导意见》的通知.” 8 May 2014.

Ningbo People's Government Office (NPGO). 2012. "Ningbo Municipal People's Government Office's Notice on the Issuance of Ningbo City's 'Twelfth Five Year Plan' Energy Saving, Emission Reduction Comprehensive Implementation Program (宁波市人民政府办公厅关于印发宁波市"十二五"节能减排综合性工作实施方案的通知)." 3 August 2012.

Ningbo's Municipal Finance Bureau (NMFB). 2011. "Management Plan of Special Subsidies for Eliminating Coal-fired boilers in Ningbo (关于印发《宁波市淘汰燃煤锅炉专项补助资金使用管理办法》的通知)." 11 April 2011. http://qyzc.ningbo.gov.cn/art/2011/4/11/art_18030_84.html.

Personal Communication, 2014a. Personal communication with Linjun Li of Solarturbine via email correspondence.

Personal Communication, 2014b. Personal communication with Wendi Tao of ECP in Beijing.

Personal Communication, 2015. Personal communication with Zhang Dianjun of International Financing Corporation via correspondence.

Platts. 2015. "China cuts non-residential gas prices, merges existing two-tier system," http://www.platts.com/latest-news/natural-gas/singapore/china-cuts-non-residential-gas-prices-merges-26027761

Qianjiang Evening News. 2015. "Ningbo's energy intensity reduced by 5.8% last year, well achieving the double-control target." June 5, 215. http://finance.sina.com.cn/china/dfjj/20150625/110322514695.shtml

Reynolds, Conor C., and Milind Kandlikar. 2008. "Climate impacts of air quality policy: Switching to a natural gas-fueled public transportation system in New Delhi." *Environmental Science and Technology* 42 (16): 5860.

Saidur, R., E. A. Abdelaziz, Ayhan Demirbas, M. S. Hossain, and S. Mekhilef. 2011. "A review on biomass as a fuel for boilers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 2260.

Shan'xi Provincial Pricing Bureau (SPPB). 2015. "Announcement on Adjusting Shan'xi Grid Tariff." http://www.spic.gov.cn/newstyle/pub_newsshow.asp?id=1012912&chid=100173

Sims, Ralph E. H., Hans-Holger Rogner, and Ken Gregory. 2003. "Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation." *Energy Policy* 31: 1315.

Sina News. 2013. "First Private-Owned LNG Station in Construction: will be difficult for ENG to break the oil & gas market monopoly", August 17. http://finance.sina.com.cn/chanjing/gsnews/20130817/100616479941.shtml

Sina News. 2015. "Natural Gas Price Adjustment Is Coming and Adjustment could be larger than 0.40 RMB/m^3," August 6. http://finance.sina.com.cn/chanjing/cyxw/20150806/214722897550.shtml

Song, W.Ch.1999. "Development strategy of natural gas for 21 century in China." *Natural Gas Industry*. 19 (4), 23–27.

State Council. 2013. "China's Energy Development Plan of the 12th Five-Year Plan (能源发展"十二五"规划)", January 1. http://www.gov.cn/zwgk/2013-01/23/content_2318554.htm

State Council. 2014. “Energy Development Strategy Action Plan (2014-2020) 能源发展战略行动计划（2014-2020 年）”, June 7. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm

Streets, D. G., and S. T. Waldhoff. 2000. “Present and future emissions of air pollutants in china: SO_2, NOx, and CO.” *Atmospheric Environment* 34: 363.

Suramaythangkoor, Tritib, and Shabbir H. Gheewala. 2010. “Potential alternatives of heat and power technology application using rice straw in Thailand.” *Applied Energy* 87: 128.

U.S. Energy Information Administration (U.S. EIA), 2015. “China: International energy data and analysis”. http://www.eia.gov/beta/international/analysis.cfm?iso=CHN

U.S. Energy Information Administration (U.S. EIA), 2015. “Natural Gas Prices.” http://www.eia.gov/dnav/ng/ng_pri_sum_dcu_nus_m.htm (accessed on May 20, 215)

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 2013a. “Industrial/Commercial/Institutional Boilers and Process Heaters”. http://www.epa.gov/airtoxics/boiler/boilerpg.html

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 2013b. “Summary of Regulations”. http://www.epa.gov/airtoxics/boiler/imptools/areaboilerbrochure.pdf

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 2014. Central Data Exchange. http://www.epa.gov/cdx/

U.S. Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership and Asia Pacific Partnership on Clean Development and Climate (U.S. EPA and APP), 2008. *Facilitating Deployment of Highly Efficient Combined Heat and Power Applications in China: Analysis and Recommendations*. March. http://www.asiapacificpartnership.org/pdf/REDGTF/USEPACHPP_APP_ChinaCHP_FINAL.pdf

U.S. Federal Business Opportunities (U.S. FBO), 2010. “China - Distributed Energy Combined Cooling, Heat and Power Tri-generation Model Projects”, August. https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=1327196a7be42f868d3583cf6068f6c1&tab=core&tabmode=list&

United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). 2014. *Energy Efficiency Potentials in Industrial Steam Systems in China: Development of a steam systems energy efficiency cost curve.* Vienna, 2014. http://www.unido.org/fileadmin/user_media_upgrade/What_we_do/Topics/Energy_access/EE_Potentials_Steam_Systems_China_.pdf

United Nations, 2013. *United Nations Commodity Trade Statistics Database*. New York: United Nations.

Wang, Zhenming, 2007. “The latest developments of China's distributed energy: CHP.” Presentation by Wang Zhenming. June 2007.

World Alliance for Decentralized Energy (WADE), 2010. “Executive Summary: The Potential of Clean DE and CHP in China”. http://www.localpower.org/WADE-APP-Summary.doc

World Alliance for Decentralized Energy (WADE), 2010. “Executive Summary: The Potential of Clean DE and CHP in China”. http://www.localpower.org/WADE-APP-Summary.doc

World Bank. 2004. *China - Heat Reform and Building Energy Efficiency (GEF) Project*. Washington, DC: World Bank. http://documents.worldbank.org/curated/en/2004/03/5457864/china-heat-reform-building-energy-efficiency-gef-project

World Bank. 2014. *China - Heat Reform and Building Energy Efficiency Project*. Washington DC; World Bank Group. http://documents.worldbank.org/curated/en/2014/04/19459764/china-heat-reform-building-energy-efficiency-project

Xi'an Academy of Special Equipment Inspection and Testing - Testing Center (XASEIT- TC) 西安特种设备检验检测院- 检测中心. 2015. "Xi'an industrial boiler energy consumption and energy efficiency test (西安市工业锅炉能耗现状及其能效测试的开展)." 23 January, 2015.

Xi'an Development and Reform Commission (XDRC). 2014. *Xi'an economic and social development environment, energy and industrial boiler overview. (西安市经济社会发展环境、能源及工业锅炉总体情况介绍)*. 15 October 2014.

Xi'an Evening News (XEN). 2008. "Xi'an Municipal People's Government Executive Meeting on Cogeneration Planning (西安市政府常务会议审议通过《热电联产规划》)". 9 May 2008.

Xianyang Development and Reform Commission (XYDRC). 2014. *Energy Saving Low-Carbon Development Plan (陕西省 2014-2015 年节能减排低碳发展行动实施方案)*. 9 September 2014.

Yang, Ming, and Robert K. Dixon. 2012. "Investing in efficient industrial boiler systems in China and Vietnam." *Energy Policy* 40: 432.

Zhang, Qinglin. 2005. "Improve China's Industrial Coal-Fired Boilers Operation Efficiency and Research on Energy-Saving Measures," *Clean Coal Technologies*, 11(2). [Chinese text]

Zhang, Yimin, Jon Mckechnie, Denis Cormier, Robert Lyng, Warren Mabee, Akifumi Ogino, and Heather L. Maclean. 2010. "Life cycle emissions and cost of producing electricity from coal, natural gas, and wood pellets in Ontario, Canada." *Environmental Science and Technology* (44): 538.