IEA SERIES IN SUPPORT OF IEA–CHINA ENERGY CO-OPERATION

中国区域清洁供暖发展研究报告

优化和多元的选择方案

Originally published as:

DISTRICT ENERGY SYSTEMS in CHINA

Options for optimisation and diversification

清華大學
Tsinghua University

International Energy Agency
Secure Sustainable Together

IEA SERIES IN SUPPORT OF IEA–CHINA ENERGY CO-OPERATION

中国区域清洁供暖发展研究报告

优化和多元的选择方案

Originally published as:

DISTRICT ENERGY SYSTEMS in CHINA

Options for optimisation and diversification

Tsinghua University

International Energy Agency
Secure Sustainable Together

国际能源署

国际能源署是一个自治机构，创立于1974年11月。其在过去和现在都具有两重使命：通过对石油供应的实际中断做出集体响应来促进其成员国的能源安全；为其29个成员国及其他国家提供确保可靠、廉价的清洁能源供应方法的权威研究和分析。 国际能源署在其成员国之间开展全面的能源合作计划，每个成员国都有义务持有相当于其90天净进口的石油库存。国际能源署的目标是：

- 确保成员国获得可靠、充足的各种形式能源供应；特别是，在石油供应中断时要通过维持有效的应急响应能力来实现。
- 促进在全球范围内推动经济增长和环境保护的可持续能源政策，尤其是要减少导致气候变化的温室气体的排放。
- 通过采集和分析能源数据改善国际市场的透明度。
- 支持全球能源技术协作，保障未来能源供应并减轻其环境影响，包括通过改善能源效率以及开发和推广低碳技术。
- 通过和非成员国、产业界、国际组织及其他利益相关者进行接触和对话找到全球能源挑战的解决方案。

国际能源署的成员国包括:

澳大利亚
奥地利
比利时
加拿大
捷克
丹麦
爱沙尼亚
芬兰
法国
德国
希腊
匈牙利
爱尔兰
意大利
日本
韩国
卢森堡
荷兰
新西兰
挪威
波兰
葡萄牙
斯洛伐克
西班牙
瑞典
瑞士
土耳其
英国
美国

International Energy Agency
Secure
Sustainable
Together

International Energy Agency
Website: *www.iea.org*

欧洲委员会也参与了国际能源署的工作.

清华大学建筑节能研究中心（BERC）成立于 2005 年，致力于根据国家和国际能源环境发展目标，包括建筑研究和创新成果，开发高效节能、对环境负责的建筑能源系统。

其主要研究活动包括：

- 对中国当前建筑能耗状况进行评价，对建筑能耗和节能进行战略展望。
- 开展使用者行为和建筑模拟研究。
- 研究和开发创新型节能建筑有关技术和系统。
- 开展细分行业节能应用研究，包括：中国北方室内采暖；农村居民建筑和城镇居民建筑；公共建筑和商业建筑。

建筑节能研究中心广泛参与国际交流合作项目，包括与国际能源署的持续合作。建筑节能研究中心还负责发布《中国建筑节能年度发展研究报告》，该报告自 2007 年以来每年发布一次。

前言

国际能源署

中华人民共和国具有世界上最大的区域供暖系统，管网长度超过 20 万公里，供暖面积将近 90 亿平方米，相当于美国四分之一以上的建筑面积。随着中国城镇化快速发展和热舒适需求不断增加，未来几十年供暖和供冷系统的能源消费必将大幅增加，这会给能源供应和环境造成重大压力。

煤炭依然是热力生产的主要燃料，但正在快速向其他燃料转变，例如，天然气、地热或余热。释放清洁集中供暖系统的潜力是中国城市发展战略的关键所在。现代区域能源系统在提高能源效率和减少温室气体排放的同时，可以提供可靠的供暖和供冷服务，是实现能源行业转型的灵活、高效的媒介。

本报告以中国的城镇化和政策框架为背景，重点介绍了能够实现区域能源供应系统低碳化、效率最大化的各种经济有效的可选方案和商业模式。通过清洁能源措施，中国可以继续转型，摆脱煤炭，改善空气质量。

国际能源署（IEA）与中国在能源安全、能源统计和能源市场等多个领域有 20 多年的深入双边合作。中国在 2015 年以联盟国身份加入国际能源署。2017 年 2 月，在国际能源署位于北京的中国联络办公室的支持下，双方达成了一项为期三年的工作方案。2017 年 12 月，本人很荣幸与中国国务院副总理张高丽在北京会晤，共同商讨在中国经济和能源转型的大背景下进一步加强双方合作的议题。

本报告从国际能源署与中国之间不断加强的关系中获益良多。本报告以国际能源署在清洁集中供暖和供冷技术方面的专有技能为基础，得到了清华大学建筑节能研究中心和中华人民共和国国家发展和改革委员会的支持。

中国已经进入了一个新时代，环境方面的考量备受重视，例如减少空气污染和二氧化碳排放。清洁高效的集中供暖和供冷可以为缓解气候变化和空气污染做出重大贡献，同时也可以为家庭和企业在成本和舒适方面提供诸多好处。

2017 年 11 月国际能源署部长级会议期间，与会者认识到供暖和供冷在发展经济、安全和可持续能源行业方面的重要性。中国也参加了此次会议。我希望本报告能够在中国和世界范围内推动现代区域能源系统的发展。

法提赫·比罗尔博士

国际能源署署长

前言

清华大学建筑节能研究中心

国际能源署这份报告的出版恰逢其时——中国正在推进冬季清洁采暖行动。在城市周边地区，大量散煤被用作大小锅炉燃料进行取暖，这是中国北方地区空气污染的主要来源之一。尽管该地区小锅炉燃煤采暖的用煤量低于燃煤发电的用煤总量，前者产生的 PM2.5 至少是燃煤电厂的 7 倍。为了治理空气污染，中国政府采取了强硬的政策措施，淘汰民用和工业领域的中小型燃煤锅炉，推进更为清洁的煤改气或煤改电项目。然而，天然气供应不足，以及改造后供暖费用的上涨，都给政府推行的清洁采暖行动带来了困难。

对中国而言，哪些可持续、可负担的清洁取暖方案能够替代低效、高污染的燃煤锅炉？这份开创性的出版物对这一问题做出了回答，提出了能够充分利用潜在能源资源、发挥区域协同作用的取暖方案，来减少空气污染，实现区域能源系统的低碳化。报告中的案例充分展示了现代区域能源系统如何实现多元化的能源利用和科技手段来提高节能增效。

清华大学和国际能源署在能源议题方面有着长期稳定的合作关系。2015 年，清华大学与国际能源署签订了深化合作的协议书。这份中国区域能源系统的研究报告是双方合作的重要成果。

目前在建筑领域已经存在一些能够同时降低能耗和空气污染的高效方案。正如本报告所指出的，要实现经济有效的热源多元化，发展可再生能源供暖，需要清晰的政策框架指引以及规范合理的市场环境加以支持。与此同时，为了避免改革出现偏差，需要因地制宜地制定方案。我希望本报告能够对中国清洁采暖的政策和有关项目的评估提供参考。

江亿

清华大学建筑学院教授、中国工程院院士

致谢

本报告是一个合作项目，是根据国际能源署与中国国家能源局之间的三年工作计划以及国际能源署与清华大学之间的合作意向函编写的。

本报告由国际能源署全球能源关系办公室，可持续发展、技术和展望司，能源市场和安全司，协同清华大学建筑节能研究中心共同编写，得到了中华人民共和国国家发展和改革委员会的支持。

作者包括国际能源署的 David BÉNAZÉRAF、Ute COLLIER、Brian DEAN、John DULAC、Volker KRAAYVANGER、 Pharoah LE FEUVRE、清华大学建筑节能研究中心的夏建军教授和李叶茂和哈尔滨工业大学的刘杨。国际能源署首席经济学家 Laszlo VARRO 给予了专业指导。国际能源署中国合作部主任涂建军提供了全面的指导意见。

国际能源署的其他专家为本报告提出了宝贵的意见、建议和支持，特别是 Thibaut ABERGEL、Simon BENNETT、BI Yunqing、Amos BROMHEAD、Jean-Baptiste DUBREUIL、LYU Zhong、Kevin TU、YANG Lei、Aya YOSHIDA 和 ZHOU Ruiyu，以及国际能源署中国联络办公室的 LI Xiang 和 WANG Shuli 。Lisa-Marie GRENIER 和 Andrew LALLY 提供了大力协助。

Andrew JOHNSTON 对本报告进行了编辑。国际能源署宣传和信息办公室的同事在报告的设计、翻译和出版本方面发挥了重要作用，包括 Rebecca GAGHEN、Muriel CUSTODIO、Astrid DUMOND、Therese WALSH、Katie RUSSELL 和 Bertrand SADIN。

本研究为收集必要的信息组织了两次研讨会。来自能源企业、研究机构和政府部门的中国专家和其他国际专家也为本报告提供了支持、专业知识、意见和建议，尤其是中国城镇供暖协会的郑立均和綦京峰，中国电力企业联合会的刘伟涛，中国节能协会的李军，中国国家可再生能源中心的赵勇强和窦克军，Danfoss 的于泳溟和 Alfred Che，住房和城乡建设部的梁传志，国家发改委的任树本，王善成、赵怀勇、蒋靖浩和熊华文，Procede Biomass BV 的 Jaap KOPPEJAN，清华大学建筑节能研究中心的罗奥和江亿教授，联合国环境规划署哥本哈根能源效率中心的陈卓伦，威立雅的 Ragnhei GUDMUND，以及集中供暖和供冷技术合作计划（DHC TCP）的成员，使本报告获益良多。

目录

图目录

地图目录

表目录

文本框目录

执行概要

为建设可持续性更强的未来能源格局，中国出台了多项鼓励政策。能源资源稀缺性与安全性可能是抑制未来几十年能源需求增长的主要动力。空气质量是影响中国承诺减少低效污染性化石燃料消费的另一关键因素，政府还出台了限制二氧化碳（CO_2）和其他温室气体（GHG）排放的政策。

中国的集中供暖管网是世界上规模最大的。2015 年中国热力管网消费的能源比整个英国的能源消费总量都多。区域集中供暖所消耗的能源依然有大约 90%来自煤炭，自 2010 年以来，区域集中供暖所产生的碳排放增加了 30%。城郊地区供暖燃烧的散煤是空气污染的主要来源之一，相比之下，随着余热的利用率的提高，利用包括清洁高效的燃煤热电联产在内的方法提高区域供暖系统的效率，能够更好地降低对环境的负面影响。尽管已经取得进步，但集中供暖和集中供冷的能源利用及其产生的排放对中国经济、地方空气质量和人民健康、中国人民福祉所产生的总体影响却是巨大的。

中国很有潜力降低集中供暖和供冷系统的能源足迹。尽管中国在近年来采取了果断的公共政策决策，但依然有必要把建设更清洁高效的集中供暖和供冷系统提升为行动重点，以便可以加快政策制定和落实的步伐。

就本报告提出的建议而言，中国在其中很多方面已经取得了重大进步。然而，还需采取进一步行动，推动制定关键政策，开发关键技术，降低集中供暖和供冷系统的能源强度和排放足迹。本报告的主要调研结果如下：

- 2015 年时中国已建成世界上最大的集中供暖系统，热水管网总长度达到 19.2721 万公里，蒸汽管网总长度达到 1.1692 万公里。
- 中国集中供暖在 2015 年消费了 1.85 亿吨标准煤，高于英国全国的能源消费总量。
- 中国的集中供暖管网目前覆盖的建筑面积达到约 85 亿平方米（m^2），自 2005 年以来已经增加了将近两倍，还在继续增加。
- 过去十年，中国北方的集中供暖管网覆盖的总建筑面积增加了两倍，基本上接近 2005 年以来北方采暖地区建筑面积增长的总量。
- 随着城镇化的持续发展，预计到 2050 年时，中国的建筑面积还会再增加 40%，总面积将超过 800 亿平方米（目前的总建筑面积为 573 亿平方米）。北方采暖地区集中供暖所覆盖的建筑面积增速比城市人口增速要快很多，但是各省之间差距很大。
- 中国政府非常重视发展更加清洁高效的集中供暖系统。
- 严重的空气污染已经促使一些城市采取了煤改气政策，特别是人口稠密的京津冀地区。
- 中国在通过余热回收提高集中供暖管网总体效率方面具有很大潜力。
- 节能措施，从持续改进新建建筑能效和对现有建筑物进行深度能源改造到加大热计量的推广和改善热分配的水力平衡，可以发挥重要作用，降低建筑采暖和制冷需求能源强度。
- 中国可以利用其丰富的可再生资源，特别是地热资源和生物质，实现集中供暖（和供冷）的能源多元化，降低煤炭消费。可再生能源占到 2015 年欧盟集中供暖所用能源的 28%，但在中国的占比只有 1%。
- 实现区域集中能源供应系统的优化和多元化需要因地制宜的定制解决方案，价格公平的商业模式，以及合理的政府监管。

本报告分析了在中国国情下实现区域集中能源供应系统低碳化、优化、多元化的路径。其目的是为政策制定者和区域能源利益相关者提供改善中国区域能源系统和供暖系统所需的信息。如果落实得当，本报告之建议在支持中国向能效更高、可持续性更强的区域集中能源供应系统转型的同时，也可以支持经济增长，降低能源消费总量，减少排放，改善环境。

引言

中华人民共和国（以下简称“中国”）在建设更加清洁、规模更大的区域集中能源供应系统方面具有巨大潜力。清洁高效的区域集中能源供应系统是缓解气候变化和空气污染的重要途径，同时又可以降低家庭和企业的成本，改善舒适度。

区域集中能源供应系统是供暖（包括热水）和供冷服务的成熟解决方案。传统上被称为集中供暖和供冷，现代区域集中能源供应系统是一种内生的多元化系统，通过保温管道组成的管网把各类热能用户与高效或可再生的能源联系起来，例如，热电联产、工业余热、城市垃圾、生物燃料、地热、太阳能和风能。因为集中能源供应系统可以利用多种能源，包括本地可用资源，因此灵活性强，可以实现规模经济效益，提供可靠的供暖和供冷服务，无需依赖单一的能源供应。

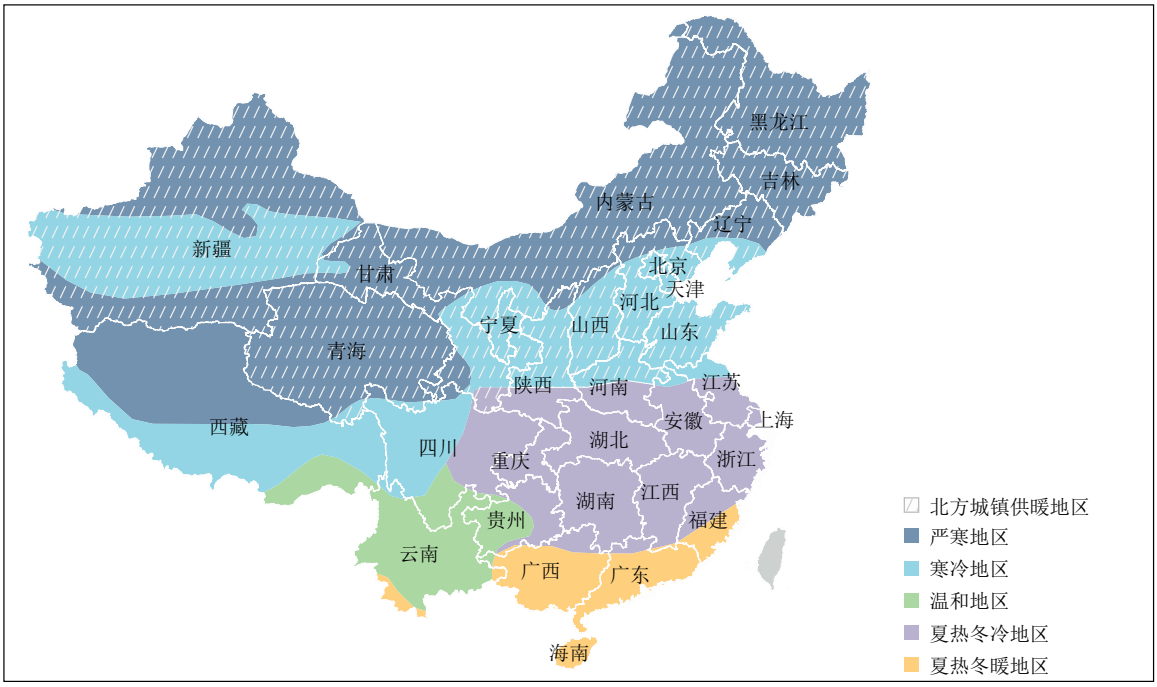
区域集中能源供应系统已经在中国很多地方发挥了重大作用，特别在供暖方面。中国城镇化快速发展，人民生活水平不断提高，在两者的共同作用下，建筑物数量持续快速增长，供暖和供冷需求也随之快速增长。在中国北方城市，热力主要由供住宅使用的集中供暖管网提供，而全国的供冷系统多数是非集中式的，一般采用小型分体式空调。已经有一些集中供冷网络，最大的系统之一位于中国南方的广州，覆盖面积将近 500 万平方米。

中国目前的总建筑面积为 573 亿平方米左右，包括北方城市采暖地区大约 130 亿平方米的面积（清华大学建筑节能研究中心，2017）（地图 1）。北方采暖地区集中供暖管网覆盖的建筑面积为大约 67 亿平方米，较小的县级和村级管网覆盖的面积估计还有 18 亿平方米（住建部，2015）。随着城镇化的继续发展，预计到 2050 年时，中国的总建筑面积会再增加 40%，达到超过 800 亿平方米（IEA，2017a）。预计建筑供暖和供冷（不包括卫生热水）还会占到建筑能源需求的大约 40%，按照国际能源署参考技术情景（RTS），其代表的最终能源需求在 2050 年为大约 9 艾焦（EJ，1 EJ= 10^{18} 焦耳）或大约 3.1 亿吨标准煤。

按照国际能源署参考技术情景的估算，考虑到中国在落实和执行建筑能效规范以及提高既有建筑物和集中供暖管网能效方面取得的巨大进步，到 2030 年时，中国室内采暖最终能源需求预计会增加约 15%，随后到 2050 年时，会逐渐降低至 2015 年的水平。但这并不代表能源需求会有大幅增加，室内采暖依然占到当今建筑最终能源消费总量的大约 35%，如果排除生物质的传统利用，则会占到建筑最终能源需求的 40%。提高中国集中供暖能效依然有巨大的潜力尚待挖掘。单北方采暖地区建筑物供暖的一次能源消费（大约 1.85 亿吨标准煤，约 5.4 艾焦）就占到中国一次能源供应总量的 4%以上。

与室内采暖相比，到 2050 年时，随着人们收入的增加和对热舒适的需求越来越高，建筑室内制冷能源需求会达到现在的三倍，尤其是在中国南方和夏热冬冷地区。2010 年以来，建筑室内制冷需求每年增速为大约 9%，目前销售的绝大多数小型分体式空调比中国现有的性能最好的型号效率要低很多（IEA，2017b）。集中供冷是一种可行的能源解决方案，可以为建筑物提供灵活的供冷服务。然而，应当以当地能源系统为背景，对集中供冷解决方案进行适当的规划和结构设计。

地图 1• 中国能源消费的气候区划和北方采暖地区



本地图不损害任何领土之地位或主权，不损害国际边界和界限的划界，不损害任何领土、城市或地区的名称。

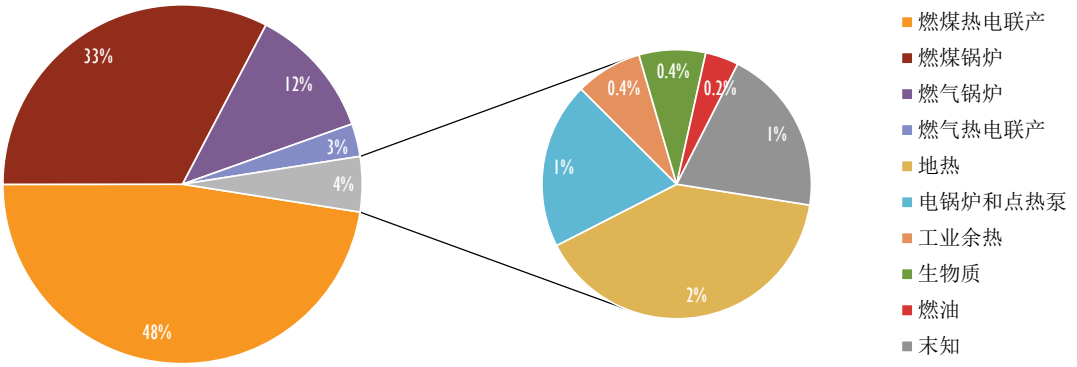
资料来源：改编自中国国家标准（1993），《民用建筑热工设计规范》（GB 50176-93）。

关键信息• 中国的气候区划对建筑能源需求有很大影响，特别是对室内采暖和制冷。现代化的高效集中能源供应系统有助于满足这一需求，利用多种能源机会和协同效应，建立更加清洁的能源供应体系。

作为对空气污染宣战的一部分，中国政府非常重视建设清洁高效的集中能源供应系统。2014 年 3 月，李克强总理在一次重要讲话中宣布“向污染宣战”。2014 年 6 月，习近平主席呼吁“能源革命”，改革能源生产、消费和创新，加速实现过期的能源法规的现代化，进一步推进国际合作。2016 年 12 月，习近平主席还强调了集中供暖系统对北方地区的重要性。2017 年 10 月，在其向中国共产党第十九次全国代表大会所做的报告中，习近平主席还承诺建设环境优美的“美丽中国”。这一概念已经融入到建设“伟大的社会主义现代化国家”的两步走发展规划中。

改善中国的集中能源供应系统面临几项挑战，包括目前对化石燃料的依赖。燃煤锅炉提供的商业热力所覆盖的建筑面积占总供暖面积的 33%，热电联产（多数燃料为煤炭）占到 51%，燃气锅炉占 12%，其余为其他来源。过度取暖和管网损失占热力生产总量的大约 20%，其中管网损失约占热力生产总量的 3-5%（清华大学建筑节能研究中心，2017）（图 1）。集中供暖煤炭燃烧产生的二氧化硫达到了 1074 吨，氮氧化物达到了 652 吨，PM2.5 达 279 吨，分别占能源相关的污染总排放量的 5%、3%和 4%。（IEA，2016a）。上述比重是全国范围内的年度数据，因此冬季污染排放占比更高。本世纪初以来所进行的热力改革对建筑性能影响不一（按每平方米采暖需求计算）。虽然中国的建筑改造项目取得了成功，截止到 2015 年，中国北方建筑改造的面积达到大约 10 亿平方米（Liang et al.，2015），但热计量改造方案一直不太成功，一些地方拒绝使用热量表。

图 1• 中国集中供暖各类热源覆盖面积占比（2016 年）



资料来源：清华大学建筑节能研究中心（2017）。

关键信息• **随着燃煤锅炉逐渐被淘汰，中国集中供暖的燃料构成正在不断变化。**

虽然已经取得进展，但降低中国现有和未来区域集中能源供应系统的能源强度依然充满潜力。对建筑物进行更好的保温和温度监测（包括改造现有建筑）可以限制能源需求。扩大热量表的使用可以增加消费者对于热力消费的认识，实现更好的需求响应（例如，通过推广智能热量表），降低能源强度。就供应侧而言，热力生产的效率和碳强度依然可以改善，热力交付效率也可以提高，例如通过改造供暖管网。水力平衡（例如，利用压差控制系统优化热力输配）也可以带来很大的能源节约，同时可以确保更精确的温度控制。

在空气污染和气候变化的背景下，中国政府已经制定了更严格的政策和新目标，凸显了中国热力行业低碳化和清洁化的需求。现在也会根据环境目标的达成情况对中国地方政府部门进行政绩评价。因此，改善集中供暖系统是政府的工作重点。

本报告分析了在中国国情下实现区域集中能源供应系统低碳化、优化和多元化的发展路径。本报告从技术、政策和市场角度出发，分析了改善中国北方集中供暖管网的可选方案，以及中国其他可适用的地方的集中能源供应网络发展潜力。本报告由国际能源署与清华大学建筑节能研究中心共同撰写，得到了来自国际能源署中国联络办公室的帮助，报告提出了几种针对中国城市的定制化方案，包括提供能源系统现代化的最佳实践和技术实例，探讨了提高能效和增加余热和可再生能源利用的作用、获益和挑战，并对某些人口稠密的农村地区的发展前景进行了展望。

本报告分为四个主要部分：

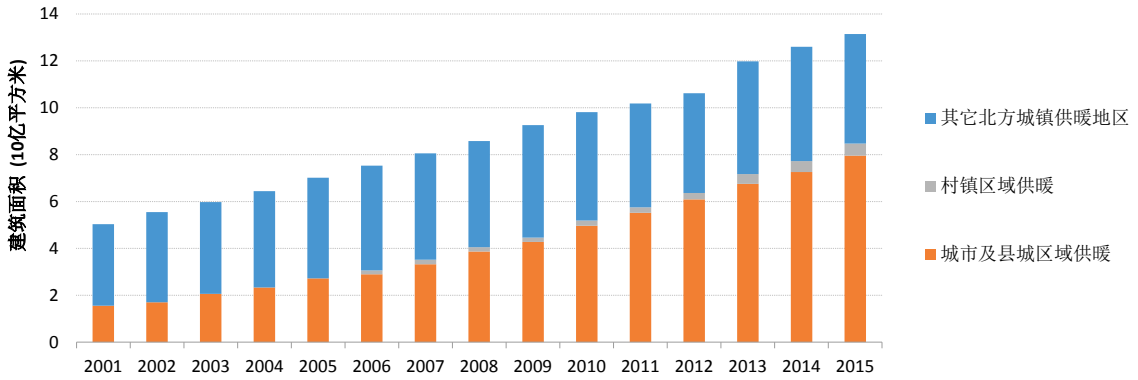
- 当前形势和政策框架评价
- 建设更加清洁的集中能源供应系统的发展机遇和解决方案
- 商业模式和定价方案
- 中国国情下的政策建议。

选择合适的能源技术和政策对于减少中国当前集中供暖系统中的能源消费、排放和其他负面影响具有重要意义。本报告着重考察了采取什么样的政策和工作重点有助于中国实现向效率更高、可持续性更强的集中能源供应系统转型，而同时又能满足中国的经济社会发展目标，包括保持经济持续增长和改善居住条件。

集中能源供应系统可以在中国发挥关键作用

中国拥有世界上最大的、发展最快的集中能源供应系统（EHP，2017；EHP，2015）。主要由中国北方的众多集中供暖管网组成，冬季为城区提供室内采暖[1]，集中供暖占到北方采暖地区建筑面积的大约三分之二（约 85 亿平方米）和中国城市建筑面积总量的大约四分之一（清华大学建筑节能研究中心，2016；IEA-BERC，2015）。2005 年时集中供暖管网所覆盖的面积仅占北方采暖地区建筑面积的大约 40%。从那时起，北方采暖地区新增建筑面积的将近 95%已经被新增集中供暖管网所覆盖（图 2）。

图 2•中国北方城市集中供暖管网所覆盖的室内采暖建筑面积



说明：其他北方采暖地区代表未与集中供暖管网连接的北方采暖地区供暖建筑面积。总计，北方采暖地区建筑面积占到中国建筑物建筑面积的大约十分之一，占到城市建筑面积的将近 40%。

资料来源：住建部（2015），《城乡建设统计年鉴》，中国；清华大学建筑节能研究中心（2017），《中国建筑节能年度发展研究报告 2017》，清华大学，北京。

关键信息•中国北方集中供暖管网覆盖的总建筑面积在过去十年增加了两倍，相当于中国北方采暖地区自 2005 年以来的几乎所有新增建筑面积。

截止 2015 年，中国的集中供暖系统覆盖的热水管网总长度达到 19.2721 万公里，蒸汽管网总长度达到 1.1692 万公里。这代表着大约 650 吉瓦热力装机容量（GWth），其中 14%用于蒸汽生产。大约 49%的集中供暖装机使用了热电联产，在 2015 年生产了大约 481 太瓦时（TWh，1 TWh=10^{12} 瓦时）的热力。中国的集中供暖管网在 2015 年总计生产了 977 太瓦时的热力（住建部， 2015）。

尽管集中供冷远没有集中供暖普遍，但其在中国南方覆盖的建筑面积已经相当可观。广州市的两大管网总长度为大约 130 公里，制冷建筑面积达到 600 万 平方米，是世界上最大的集中供冷管网之一。[2]中国南方地区的其他城市和夏热冬冷地区也在考虑新建集中供冷或集中冷热联供管网。

[1]中国的集中供暖很少覆盖卫生热水需求。

[2]中国的集中供冷管网统计数据并不完整，但清华大学建筑节能研究中心对某些管网进行了研究，包括广州最大的两个供冷网络，有助于更好了解当前中国的供冷管网发展情况。作为对比，美国芝加哥的 Enwave 集中供冷系统覆盖大约 420 万平方米的建筑面积，管线长度约 12 公里（IDEA, 2012）。新加坡最近启动的集中供冷管网覆盖大约 125 万平方米的建筑面积，管线长度 5 公里（Othman, 2016）。

快速城镇化推动集中能源供应增长

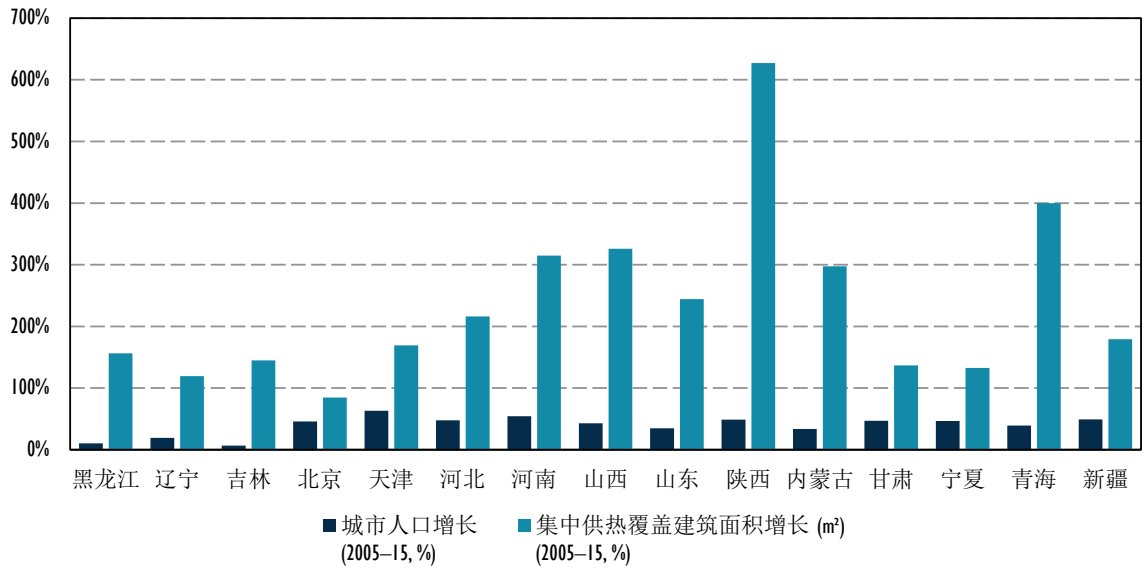
中国城镇化快速发展，特别是在北方城市地区，推动了过去二十年中国集中供暖消费的增长。自 2000 年以来，中国的城市人口已经增长了 3.1 亿人，其中 1.25 亿人迁徙到了北方采暖地区的城区，包括北京、天津、河北、山西、辽宁、吉林、黑龙江、山东、河南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆的大城市地区。中国的城市人口有 40%以上（大约 3.22 亿人）生活在北方采暖地区。在居民数量超过 20 万人的 295 个城市中，有 132 个位于比较寒冷的北方采暖地区。

快速发展的城镇化推动了较寒冷的北方采暖地区的室内采暖能源需求和能源消费。在这些地区，采暖期可从十月或十一月持续到来年三月或四月，在一些地区可以长达六个月。例如，北京的采暖季节一般是从 11 月 15 日到 3 月 15 日。严寒地区冬季采暖季最冷的温度通常低于-10℃，寒冷地区在 0℃至 5℃以下。因此，法律要求在两个北方最寒冷的地区提供室内供暖，而在比较暖和的南方和夏热冬冷地区则没有。

城镇化有利于集中能源供应系统的发展

城镇化和中国中产阶级的同步崛起，激发了人们对更高生活水平的追求。越来越多的人不仅期望人均建筑面积更大，也期待提高热舒适度——提高冬季室内温度，降低夏季室内温度。北方采暖地区的人均建筑面积（包括公共和商业空间）从 2000 年到 2015 年翻了将近一番，达到大约人均 41 平方米。同时，每户城市家庭平均人数从大约 3.1 降低到将近 2.8（清华大学建筑节能研究中心，2017）。结果，北方采暖地区的集中供暖建筑面积的增长速度达到城市人口增长速度的两倍。在一些北方采暖地区城市，集中供暖覆盖的建筑面积增长更快（图 3）。

图 3 •2005-15 年城市人口增长和集中供暖建筑面积增长情况



资料来源：国家统计局，2017。

关键信息•**北方集中供暖覆盖的建筑面积增速比城市人口增速还快，但是各省之间差距明显。**

城市居民购买力不断增加也推动了对热舒适的需求。城区冬季室内平均温度一般在 18℃到 22.5℃之间，而农村地区则低于 18℃（Gong 和 Werner，2014）。制冷需求已经启动，通常是城市建筑物中的制冷需求。据测算，2010 年以来制冷需求年增速达到了 9%（IEA，

2017a）。尽管有几个集中供冷网络，但一般而言，单个的、适合于房间大小的空调机（例如小型分体式空调）就可满足制冷需求。

到 2022 年时，上层中产阶级会占到城市家庭数量的 54%，普通中产阶级会占到 22%（Barton et al.，2013）。虽然中产阶级以前主要集中在沿海大城市，但小城市日益繁荣，特别是在较为寒冷的北方和西部地区。这将刺激建筑供暖服务需求的进一步增加，中国各地的制冷需求也会增加，尤其是城镇居民对热舒适的期望增加。

20 世纪 50 年代以来，政府在集中供暖方面的投资推动了中国集中供暖管网的增长。然而，北方采暖地区的集中供暖也具有技术经济意义，因为中国城市人口、建筑物和能源需求密度都很高，为利用集中式热力生产和输配提供更高效的热力供应创造了条件。集中供暖已经被证实是一种灵活的能源供应形式，可以对城市热力输配进行更好的规划和管控，同时也可以利用在单体建筑上不太可能实现的技术方案，例如热电联产和工业余热回收利用。

尽管北方采暖地区很多老旧建筑物建筑围护结构能效差，尤其是 2000 年以前建造的建筑，但能效更高的新建建筑发展速度很快，特别是自 21 世纪 10 年代中期以来，北方采暖地区建筑总体热效率得到了改善（IEA-BERC，2015）。21 世纪 10 年代引入的供暖改革和热量表市场的不断扩大也降低了北方采暖地区建筑物的热力需求强度。供暖改革包括建筑改造方案，2011 年到 2014 年期间对中国北方超过 7.1 亿 平方米的建筑进行了现代化改造。到 2015 年底时，中国北方已经安装了将近 3200 万台热量表（RIC，2016）。这一进步为中国广袤的北方采暖地区管网进一步提高供暖效率，向更加优化、更加先进的集中供暖系统转型提供了重要机遇。

综合考虑能源规划与城市和区域规划可以促进集中能源供应的发展

随着人口不断增长，经济日趋繁荣，必将推动建筑面积继续增长，在未来十年，城镇化将会继续增加对集中能源供应的需求。中国建筑物的建筑面积在未来 15 年可达到 720 亿平方米以上，2015 年到 2030 年期间，北方采暖地区建筑面积会增加高达 55%，达到 200 亿平方米（表 1）（IEA，2017a；清华大学建筑节能研究中心，2016）。

表 1•中国建筑面积活动数据和 2030 年展望（十亿平方米）

	2015	2030	
		清华大学建筑节能研究中心	IEA
总计	57.3	72.0	74.1
城市	33.5	54.1	55.4
北方采暖地区	*13.2*	*20.0*	--
农村	23.8	17.9	18.7

资料来源：清华大学建筑节能研究中心，2016；IEA，2017a。

关键信息• 城镇化将会激发到 2030 年的建筑面积和集中供暖需求增长。

尽管中国城市新建建筑的能效大幅提高，但北方采暖地区供暖强度（按每平方米最终能源需求计算）的改善依然不可能跟上年均建筑面积增长，预计到 2030 年之前年均增长为 3%。在国际能源署参考技术情景中，到 2030 年时，集中供暖需求会增加大约 10%，最终能源需求会达到 4800 万吨标准煤（1.4 艾焦），要实现节能和地方空气污染治理的目标，将会给北方采暖地区集中供暖管网带来更大负担（IEA，2017a）。为了稳定甚至减少建筑物集中供暖最终能源需求总量（例如，IEA 2℃情景中所描述的[2DS；IEA，2017a]），需要

进一步努力，在一个综合程度更高的集中能源供应系统中，把北方采暖地区建筑存量的能效提高到一个新水平。这包括提高建筑围护结构的性能（例如，老旧建筑物的深度能源改造和建设高性能的新建建筑），通过适当的系统平衡提高供暖安装效率，进行适当的能源规划。

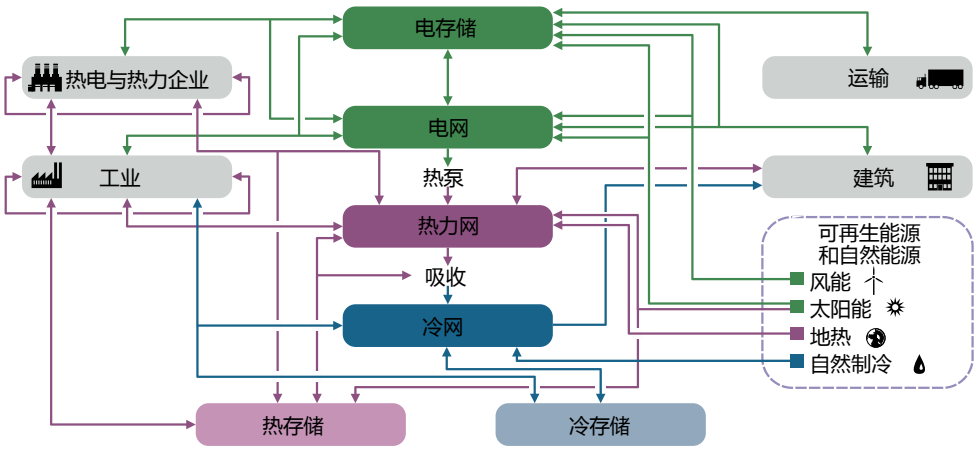
在中国共产党十八届三中全会之后，在习近平主席于 2013 年 12 月主持的一次重要中央城镇化工作会议上，中国政府指明了中国城市发展的主要方向。这一旨在实现城市增长再平衡的规划包括，落实新的城市规划与土地管理政策，在限制大型城市（100 万到 500 万居民）和特大型城市（超过 500 万居民）发展的同时，有利中小型城市（不到 100 万居民）的发展。该计划还力求限制城市扩张，增加城市供暖管网密度（新华社，2013）。

这一新的城市发展战略有可能扩大较小城区的集中供暖系统。历史上，集中供暖管网最要是在较大的城市和区县推广，而生物质和热泵则在位于严寒地区和寒冷地区的小城市和农村地区受到青睐。然而，人口较少的城镇和村庄（属于小到中等城市类别）已经开始出现规模较小的集中供暖系统。自 2006 年以来，北方采暖地区乡镇和农村集中供暖覆盖的建筑面积增长超过了 3.5 亿平方米，其增速与同期市县管网的增速一样快，而总的管网规模增加了 15 倍。

通过改善城区规划，增加管网密度，提高分布式（即非集中式）能源潜力，包括升级改造北方采暖地区现有集中供暖管网，可以大幅提升中国的集中供暖管网。中国政府最近开展的工作，包括国家发改委在 2015 年发布的《余热暖民工程实施方案》，都是寻找适当方法，改善中国集中供暖系统的积极举措。这包括绘制热力需求和潜在的热力供应地图，例如，由清华大学在河北省开展的工业余热研究，结论可用于制定具有针对性的地方或地区规划，改进集中供暖系统。

城市和/或地区能源规划和发展战略除了发现满足供暖和制冷需求的潜在能源来源之外，还应确立实现这一潜力所需的政策和市场机制。这需要有关建筑参与者、规划主管部门和能源利益相关者（例如工业热力供应企业）之间进行协调，支持在城区建立经济效益好、能源效率高的综合能源系统（文本框 1）。城市/地区规划和政策策略还需加强灵活能源系统的优化和经济可行性研究，这可能是复杂的，涉及多个参与者，包括解决存在的障碍或约束（例如，不利于工业余热销售的市场环境）。

图 4 •综合能源系统内的互联互通和潜在的能源协同



资料来源：IEA （2014），*Linking Heat and Electricity Systems: Co-generation and District Heating and Cooling Solutions for a Clean Energy Future*，OECD/IEA，巴黎。

关键信息• **电力与热能系统之间的能源协同为深度融合提供了众多机遇，但要制定适当的规划和政策框架。**

文本框 1 • 适用于地方规划部门的集中供暖评价工具

丹麦能源署（DEA）最近发布了一种集中供暖评价工具（DHAT），地方规划部门可以利用该工具，并利用技术数据和应用可调整的价格预测，对集中供暖解决方案的经济可行性进行评价（DEA，2017）。该评价工具将会用于“中丹区域能源及节能改造综合示范项目”，丹麦能源署与中国国家节能中心、陕西省发展和改革委员会、铜川市人民政府已经就此签署协议。示范项目将就提高集中供暖能源效率的潜力进行示范，并评估这些措施可能实现的污染减少。该示范项目的工作重点之一是，解决工业生产余热利用问题，应对工业余热利用面临的相关挑战。

集中能源供应管网有望扩大

中国城市快速发展，持续重视集中供暖，特别是在城区集中供暖优先于单体燃煤锅炉，意味着在未来十年集中供暖管网将会扩大。虽然没有集中供暖覆盖建筑面积的官方数据，但清华大学建筑节能研究中心的估算表明，到 2030 年时，集中供暖面积可能达到 200 亿平方米。虽然市级集中供冷网络并不常见，但在建筑较为稠密的地区，例如产业园和高校校园，有可能也会出现大幅增长。

对北方采暖地区省级集中供暖数据的分析表明，中国正在按计划进行，到 2030 年时达到清华大学建筑节能研究中心的估算值。到 2020 年时，北方采暖地区的城市人口会增加 3500 万或更多（城镇化目标）。如果管网密度（每位城市居民的平均面积）保持不变，那么到 2020 年时，集中供暖管网有可能会增加到将近 73 亿平方米（增加约 10%）（表 2）。如果管网密度同时增加，比如峰值时达到每位城市居民人均大约 30 平方米，如北京和天津，那么到 2020 年时，集中供暖管网覆盖面积会增加到将近 130 亿平方米，达到 2015 年时覆盖建筑面积的将近两倍。

那些潜在的增长情景尽管不能提供准确的展望，但与历史趋势还是一致的，根据历史数据，2005 年以来北方采暖地区城市供暖管网年均增长 10%。自 2005 年以来，县级管网（这包括增长较大的地级市之外的郊区的增长）年均增长达到 20%，但自 2013 年以来，这一增速已经放缓到约每年 11%，类似于市级管网的增长速度。若考虑所有管网，有可能北方采暖地区集中供暖管网（包括市、县、乡（镇）和村）的总面积到 2020 年时会增加 135 亿平方米，比 2015 年高将近 60%。

表 2 •北方采暖地区重点省份集中供暖覆盖建筑面积现状和未来发展潜力

	2015			2020		
	城镇居民（百万）	城镇化率（%）	集中供暖管网（百万平方米）	目标城镇化率（%）	按目标人口计算的集中供暖管网覆盖面积（百万平方米）	达到峰值密度的集中供暖管网覆盖面积（百万平方米）
黑龙江	22.4	59%	625	63%	667	847
辽宁	29.5	67%	1，045	72%	1 123	1 123
吉林	15.2	55%	480	60%	524	588
北京	18.8	86%	585	86%	585	664
天津	12.8	83%	377	84%	382	458
河北	38.1	51%	588	60%	692	1 587
河南	44.4	47%	224	56%	267	1 873

山西	20.2	55%	541	60%	590	779
山东	56.1	57%	902	62%	981	2 162
陕西	20.5	54%	240	62%	276	831
内蒙古	15.1	60%	449	65%	486	581
甘肃	11.2	43%	161	50%	187	462
宁夏	3.7	55%	100	60%	109	143
青海	3.0	50%	5	60%	6	126
新疆	11.2	47%	307	58%	379	487
北方采暖地区	**322.2**	**57%**	**6629**	**64%**	**7254**	**12710**

关键信息•**尽管没有集中供暖覆盖面积的官方目标，但北方采暖地区集中供暖网络依然很有可能保持持续增长，这与历史趋势是吻合的。**

供暖需求将会持续增加

2013 年时，中国北方接入集中供暖管网的建筑平均室内采暖能源强度（按每平方米最终能源消耗计算）是大约 130 千瓦时（kWh）每平方米。根据建筑年龄、设计和居住者的行为不同，能源强度变化很大。例如，城市管网中的建筑物（通常密度大、楼层高、单元多）平均能效比县级管网中的建筑物（通常密度低、楼层为中低高度，单位面积用热量更大）高出大约 15%。

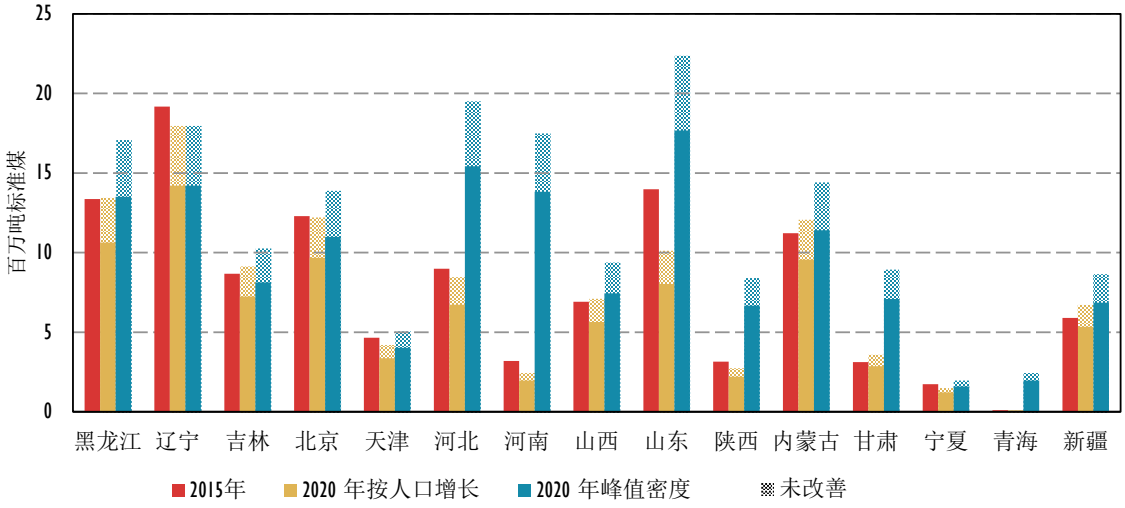
相对于这些省份的平均采暖度日数（HDD），集中供暖能源强度变化也很大。例如，黑龙江和吉林的人均单位采暖度日数平均能源强度为大约 1.0 千瓦时，而山西和山东比较接近 0.5 千瓦时。从建筑面积角度考虑，山西的集中供暖能源强度实际上与黑龙江和吉林相似（大约 0.033 kWh/m^2/HDD），而山东的能源强度高出将近 60%（0.050 kWh/m^2/HDD）。

多个因素都会影响北方采暖地区建筑集中供暖的总体能源强度，从建筑类型和性能到感受到的热舒适度和家庭购买力。汇总统计数据并未能准确描述建筑能效和集中供暖能源强度，但测算显示，集中供暖管网的平均能源强度（按每平方米交付的能量计算）自 2005 年以来降低了大约 4%。

尽管过去十年单位建筑面积的总体能耗已经下降，但总建筑面积大幅增长（自 2005 年以来每年增长大约 11%），致使热力需求绝对量持续增加。可能一直到 2030 年都会如此：国际能源署在参考技术情景中估算，到 2020 年时，区域热力需求会再增加 10%；到 2030 年时，会在 2020 年的基础上再增加 5%（IEA，2017a）。

在北方采暖地区的主要城市管网中（表 2），考虑到预期的人口增长和地方集中供暖管网密度的潜在增加，按人均覆盖面积（平方米）总量计算，到 2020 年时，集中供暖需求会增加多达 50%（图 5）。然而，鉴于北方采暖地区供暖管网中平均每平方米集中供暖能耗的历史改进率，这一情景是不太可能的。如果历史改进率继续保持到 2020 年，相对于预期的城市人口增长，集中供暖能耗会保持稳定。同时，即使建筑性能得到改善，如果管网密度达到每位城市居民人均 30 平方米，即当前北京和天津的水平，那么集中供暖能源需求总量依然会增加大约 20%到 25%。

图 5 •2015 年北方采暖地区（城市供暖管网）能源消费情况和 2020 年潜在需求增长



说明：人口增长代表的是省级到 2020 年的城镇化目标，不包括城市人口增加后扩大集中供暖管网的密度。峰值密度代表的是相对于城市人口增长的集中供暖能源需求增长，进一步增加了集中供暖管网的密度（每人大约 30 平方米）。这些改进情景说明了到 2020 年之前建筑能效年均提高约 4%会产生的影响。

关键信息•**由于人口增长和增加管网密度的策略，在一些北方采暖地区省份，集中供暖能源需求会大幅增加。**

主要城市管网之间的差异（不算迅速增长的县、乡（镇）、村管网）为了解加大北方采暖地区某些省份的管网密度可能产生的潜在影响提供了有用信息。在一些管网密度高的最为寒冷的省份（例如，黑龙江、辽宁、吉林和北京），集中供暖能源需求大幅增长不太可能，因为其目前的管网密度高，建筑接入集中供暖管网的程度也高。根据增加集中供暖连接和管网密度的规划和政策策略的具体情况，其他省份的集中供暖能源需求可能会大幅增加，比如河北、河南和山东。

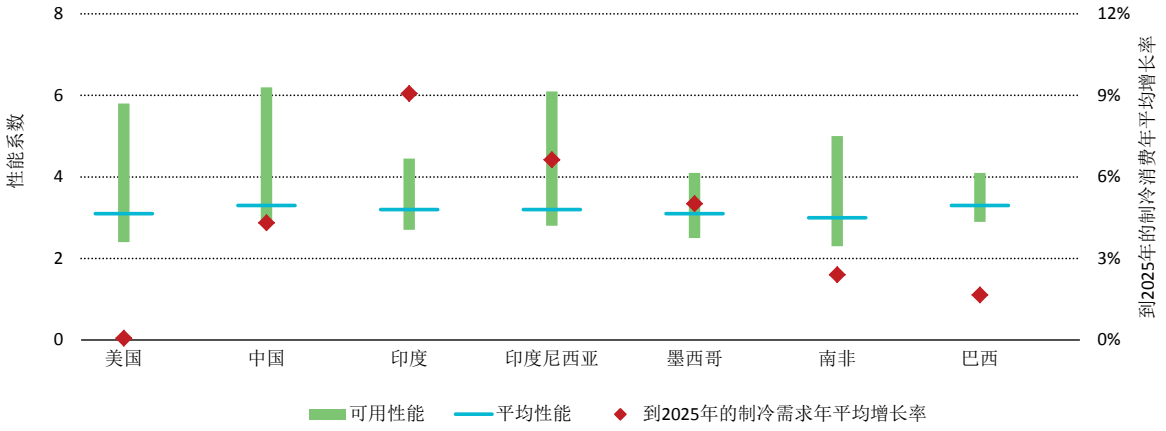
由于中国北方城区的集中供暖燃料以煤炭为主导，需求增长会给供应链和环境带来很大压力。若不下定决心降低建筑热力需求能源强度，实现热力生产的清洁化，中国北方到 2030 年时供暖的一次能源消费总量将会达到 2.5 亿吨标准煤（7.3 艾焦）（清华大学建筑节能研究中心，2015），比 2015 年高大约 35%。这距离清华大学建筑节能研究中心提出的大约 1.4 亿吨标准煤（4.1 艾焦）的目标差距甚大（清华大学建筑节能研究中心，2016），这一目标考虑了 2016 年公布的《能源生产和消费革命战略》当中设定的中国到 2030 年时限制能源消费总量的目标（国家发改委， 2016a）。

制冷需求增长迅速

城镇化和人们对热舒适的需求不断增加，推动了过去十年来中国室内制冷需求的发展。自 2005 年以来，中国的室内制冷能源消费增加了将近三倍，据测算，在 2015 年时达到了 3000 万吨标准煤（0.9 艾焦），超过了当年澳大利亚和新西兰全部电力消费总和（IEA，2017a）。人均制冷能源消费年均增长将近 10%，这一需求增长与 2005 年以来国民总收入年均增长 8.5% 的速度保持一致。

中国建筑制冷需求到 2030 年可能会翻一番，这与到 2030 年时预期收入增长会翻一番是一致的（IEA，2017a）。虽然购买力和热舒适需求是这一预期增长背后的主要因素，但制冷设备效率则是另一影响因素。中国目前典型的分体式空调（例如小型分体式空调）的性能系数（COP）为大约 3.3，这比最低可用性能系数 2.9 没有高出多少，但比性能系数高于 6.0 的市场上的最佳可用技术相差甚远（图 6）。

图 6 • 2015 年分体式空调的典型能效比



说明：性能系数（COP）代表的是能效比（每瓦电力消费的制冷瓦数当量）：性能系数越高，能源效率越高。室内制冷需求年均增长代表的是参考技术情景下 2015 到 2025 年期间有用的制冷能源需求的预期变化。

关键信息• **未来十年制冷需求可能会延续过去快速增长的态势，但是改善中国制冷设备的典型性能的潜力依然巨大。**

集中供冷网络可以部分满足中国迅速增长的制冷需求，与先进高效的集中供暖系统一样，可以利用不同地方系统之间的协同效应。这些协同效应包括利用非高峰制冷生产（例如，使用配备冰蓄系统的波动性可再生能源）以及其他本地可获得的能源机会（例如，江河自然冷却或利用吸附式制冷机组的余热制冷）。

然而，同现代集中供暖解决方案一样，集中供冷解决方案应放在统一的综合能源系统规划框架中进行考虑，确保集中供冷的总体性能和优势超过高性能独立式制冷设备的效益。例如，尽管巴黎的集中供冷网络的自然制冷在某些时期的运行性能系数曾高达 20，但年度总体性能系数依然只有约 4.0 （IEA，2014）。

同样，对新加坡一个采用高效制冷机的集中供冷厂进行的测试表明，在使用冰蓄冷的情况下，性能系数为大约 4.2（Hida et al.， 2008）。这些性能系数与中效分体式空调基本一样，但单看效率并不一定能反映其他运行效益，例如，非峰值时期的制冷生产带来的经济节约。总之，为确保符合当地情况，应从更广泛的视角审视中国的集中供冷投资。

政策框架正在培育进一步的发展

2005 年以来，中国已经颁布了 20 多项有关集中能源供应的政策文件、法规和配套措施，主要是支持集中供暖的发展（表 3）。集中能源供应政策一般涉及七个政府部门：国务院、国家发改委、财政部、住建部、环保部、国土资源部、国家能源局。

中国的几个五年计划都提到了集中能源供应系统的发展，特别是集中供暖。“十一五”规划设定了到 2010 年实现集中供暖达到 40% 的目标（国家发改委，2007），还确定了新建热电联产的节能目标，鼓励在大中型城市开展热计量。《节能减排“十二五”规划》进一步推动了热量表的安装，制定了要在北方采暖地区为至少 4 亿平方米建筑安装热量表的目标（国务院，2012）。《“十二五”建筑节能专项规划》呼应了改善热计量、加速集中供暖管网升级改造的需求（住建部，2012），而《能源发展“十二五”规划》则重点关注天然气热电联产的发展（国家发改委，2012a）。《能源发展“十三五”规划》（2016–2020）更加强调清洁热源，例如生物质热电联产或地热，以及低品位余热和冷热电三联供（能源局， 2016）。2016 年发布的首份地热能开发利用五年规划设定了到 2020 年实现地

热供暖面积达到 16 亿平方米的发展目标（国家发改委、国土资源部和国家能源局，2016），《建筑节能与绿色建筑发展“十三五”规划》计划到 2020 年时，北方采暖地区单位面积的能耗要下降 15% 。到 2020 年时，浅层地热热力覆盖的新增建筑面积要达到 2 亿平方米（住建部，2016）（表 3）。

在技术方面，中国的监管框架在推动清洁能源发展的同时，也在不断提高燃煤热力的标准。2006 年以来，财政部已经发布了支持利用可再生能源发展供暖和供冷技术的措施，包括地表水、地下水和废水热泵。2010 年时，热力管网开始向生物质热力开放；2016 年发布的地热能开发利用五年规划提到向地热企业开放热力市场（国家发改委、国土资源部和国家能源局，2016）。财政部、住建部、国土资源部和国家能源局在 2013 年联合发文，促进城市地热能源的发展，在有条件的地区用于供暖。环保部在 2010 年发文，禁止在城市建设除热电联产以外的火电厂，针对现有锅炉采取大气污染治理措施。

集中供暖的发展也被视为是拆除燃煤锅炉战略的一部分。国家发改委在 2014 年制定了 300 兆瓦以上燃煤机组的排放标准。到 2020 年时，燃煤热电联产应达到燃煤发电装机容量的 28%。国家发改委还发布了余热利用通知，替代 20 亿 平方米的燃煤锅炉（相当于 5000 万吨标准煤，约 1.5 艾焦）（国家发改委，2015）。财政部在 2017 年制定了北方采暖地区城镇清洁供暖的补贴方案，有利于清洁煤炭利用、燃气锅炉或电力锅炉的发展。2017 年 5 月，财政部推出进一步的补贴，鼓励地方政府吸引更多民营资本的参与。地方政府也已经采取措施，例如，北京在 2015 年决定建设四个大型天然气热电联产厂（北京市政府，2015）2017 年 12 月，国家发改委、国家能源局、环保部、住建部等十部委共同编制了《北方地区冬季清洁取暖规划 (2017-2021)》，该规划将系统组织北方地区实施未来五年的清洁供暖改造工作，三年以后实现替代散煤 7400 万吨，五年之后替代散煤 1.5 亿吨，集中供暖和清洁供暖比例达到 50%以上。

表 3• 主要集中能源供应政策文件、法规和配套框架

年份	部委	名称	主要集中能源供应相关内容
2005	国家发改委	《节能中长期专项规划》	按热表计量收费（大中型城市）
2006	国务院	《国务院关于加强节能工作的决定》	供暖商品化，按用热量计量收费
2006	财政部	《可再生能源建筑应用专项资金管理暂行办法》	支持利用可再生能源进行采暖制冷，包括利用热泵技术
2007	国家发改委	能源发展“十一五”规划	从分布式锅炉变为集中供暖；新建热电联产节能标准
2007	国家发改委，住建部	《城市供暖价格管理暂行办法》	允许非公有资本参与供暖设施的投资；价格由地方政府制定，但可以由热力企业（单位）与用户协商确定
2010	环保部	《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》	市区禁止建设除热电联产以外的火电厂；不断提高城市集中供暖面积；针对锅炉采取大气污染治理措施
2010	中央政府	可再生能源法	对生物质热力开放供暖管网
2012	国家发改委	《能源发展“十二五”规划》	发展天然气热电联产；热力网建设
2012	国家发改委	《关于开展燃煤电厂综合升级改造工作的通知》	煤电机组升级改造标准（单台机组供暖能力达到工业热负荷 70 吨/小时或采暖热负荷 240 万平方米以上）
2012	住建部	《“十二五”建筑节能专项规划》	重点关注供暖计量及节能改造
2012	国务院	《节能减排“十二五”规划》	利用工业余热进行集中供暖和供冷；北方采暖地区既有居住建筑供暖计量达到 4 亿平方米以上
2013	能源局，住建部，财政部，国土资源部	《关于促进地热能开发利用的指导意见》	在资源条件具备的地区，在城市能源和供暖规划中优先利用地热能

2013	国务院	《大气污染防治行动计划》	把发展集中供暖作为整治小锅炉工作的一部分
2014	国家发改委	《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020 年)》	制定 30 万千瓦以上燃煤机组的排放标准；采用集中供暖替代分散燃煤小锅炉；余热利用
2015	国家发改委	《余热暖民工程实施方案》	通过集中回收利用低品位余热资源，替代燃煤供暖 20 亿平方米以上，减少供暖用原煤 5000 万吨以上
2016	国家发改委	《热电联产管理办法》	应根据城市规模确定热电联产机组规格
2016	能源局	《能源发展“十三五”规划》	推广热电冷三联供和生物质热电联产；地热能供暖；低品位余热
2016	国家发改委，国土资源部，能源局	《地热能开发利用“十三五”规划》	向地热能开发利用企业开放热力市场；把地热能供暖（制冷）发展作为目标
2016	国家发改委	《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》	发展区域能源网络和生物质供暖
2017	财政部	《关于推进北方采暖地区城镇清洁供暖的指导意见》	根据城市类型的不同，为北方采暖地区的清洁取暖试点城市提供 5 亿元到 10 亿元的补贴
2017	住建部	《建筑节能与绿色建筑发展"十三五"规划》	到 2020 年时，北方城镇居住建筑单位面积平均采暖能耗强度下降 15%；全国城镇新增浅层地热能建筑应用面积 2 亿平方米以上。
2017	国家发改委、能源局、环保部、住建部	《北方地区冬季清洁取暖规划（2017-2021 年）》	三年以后实现替代散煤 7400 万吨，五年之后替代散煤 1.5 亿吨。

关键信息•这些措施和法规涉及了中国集中供暖和供冷的大部分内容。

中国建设更加清洁的集中能源供应系统的机会

中国不同气候带、建筑类型和资源可用性之间存在巨大差异。这些差异都会对提高中国庞大的集中供暖管网的能源效率、减少二氧化碳排放和地方空气污染的技术方案产生重要影响。为确保这一网络能够利用清洁能源技术，以廉价的价格提供暖舒适，政策要考虑的不仅有能源、空气污染和气候策略，还有其他同样重要的发展目标。

对于北方采暖地区集中供暖管网中的老旧系统，替换或改善现有资产的策略将需要考虑对于建筑物能源需求和性能的影响，例如，对于老旧没有热恒温控制的低效建筑物的影响。这可能要求进行供应侧投资（例如，水力平衡和地方工业余热回收），大大降低总体能源强度，提高集中供暖管网的能效，尤其是对于短期而言。新近的系统或考虑进行扩建或新建的系统，可能会为选择高性能、低碳、可再生的技术建设先进的现代化集中供暖和供冷系统提供机会（文本框 2）。这可能包括示范项目，如第四代低温集中供暖系统（例如 50-55°C 或更低，如果使用增压热泵）和现代化的冷热电三联供集中能源供应网络。

文本框 2• 利用先进集中供暖解决方案，建设节能低碳社区

现代集中能源供应网络能够在推动建设高效、低碳能源社区方面发挥重要作用。它们可以接受来自不同来源的热量，包括工业余热和波动的可再生能源，利用短期和长期储存以及先进的集中能源供应解决方案，例如低温热。先进集中能源供应系统也可以利用不同能源网络之间的协同效应，例如多个建筑物之间的制冷服务和热水供应之间的热交换，提高净效率和可靠性。

包括热电联产在内的国际能源署集中供暖和供冷技术合作计划（DHC TCP）是一个由来自欧洲、北美和亚洲的十个国家参与的合作平台。集中供暖和供冷技术合作计划致力于推进集中能源供应解决方案和技术的创新，改善其经济性能，包括探索集中供暖和供冷和热电联产如何能够有助于建立可持续能源社区研究、开发和示范项目（称为附件）。

集中供暖和供冷技术合作计划的很多工作都是集中于实现能源供需之间的优化匹配。附件 X 关注的是把可再生能源和余热并入集中能源供应系统的经济优化和设计优化。附件 TS1 关注的是未来能源系统低温集中供暖，延续了这一工作，寻找全面、创新的方法把节能建筑和相关能源供应作为一个完整的系统，在社区层面实现协同效应最大化。附件 XI 有一个转型路线图倡议，同样可以通过较低温度的操作改善现有集中能源供应系统。

集中供暖和供冷技术合作计划 2020 工作方案考虑了先进集中能源供应解决方案，包括系统运行与资产管理工作，以及制冷技术工作。如需关于该技术合作计划的进一步信息，可以访问 www.iea-dhc.org。

本部分探讨的是能效提高、余热、可再生热力和天然气如何能够改进中国的集中能源供应网络。这些清洁能源措施能够推动中国的能源转型，摆脱会造成地方空气污染和大量碳排放的能源密集型供暖系统和电力系统。

提高能效的作用

最干净通常也是最便宜的能源是通过提高能效节约出来的能源。三类能源效率能够改善集中能源供应系统：（1）能源需求效率，（2）能源输配效率，（3）能源供应效率。

能源需求效率

在集中能源供应系统中，通过能效措施降低供暖和供冷（有可能包括卫生热水）能源需求能够对集中能源输配和供应系统的规模以及所需投资总量产生重大影响。

在建筑层面，可以通过提高建筑围护结构（例如，保温、低 U 值窗户、减少空气渗透）和热力输配系统能源效率的措施（例如，套管保温、管道密封和管道保温）以及通过供暖管理措施（例如，传感器、室内温度控制、动态平衡和由建筑物使用者或经营者付费的能源计量）减少室内采暖需求。

现场供暖系统，例如小型燃气发动机，也能够影响建筑物可用热力类型和能效。例如，蒸汽供暖系统要求高温热力，而地暖系统或现场换热器可以利用低温集中供暖。

同样，也可以通过采取措施提高建筑围护结构能效（例如，采用保温、较低的太阳能热增益系数的窗户、屋檐或其他建筑遮阳措施）和制冷系统能效（例如，采用通风机、导管保温密封、管道保温），以及改善制冷管理（例如传感器，控制系统和能源计量），减少室内制冷需求。湿度控制也会影响制冷能源需求。湿度（潜热）和显热的同步处理可以大大提高制冷设备的操作性能。

现场制冷系统能够影响建筑物制冷系统的效率。低温制冷系统需要利用再加热降低湿度，要求采用高级制冷，而地暖系统或现场换热器可以实现对高温集中供冷的利用。这也有助于利用免费的（即天然的）制冷资源。也可以利用具有高 ΔT（温差）值（供水和回水之间的温差高）的系统把能源从系统中高效地传输到建筑物内，大幅提高制冷系统的效率。为在潮湿气候环境中实现高温集中供冷，建筑内部系统需要除湿和/或进行能量回收通风。

虽然采用集中供暖提供卫生热水在中国并不常见，但也可以通过建筑节能措施进行改进。通过使用更高效的水龙头、淋浴喷头和其他更高效的设备（例如，水耗低、效率高的洗衣机和洗碗机），通过采取能源管理措施（例如，传感器、控制系统和由建筑物使用者或经营者付费的能源计量）减少热水需求。

能源输配效率

能源输配是指区域能源网络的物理设施，一般包括管线、控制系统和资源管理（例如管网运营商）。主要通过采用保温、传感器和控制系统，以及改善能源管理来提高能源输配效率。影响总体能源输配效率的关键因素有两个：输配管线的长度和输配热力的温度。中国目前的热网损失是热力生产的 3%到 5%（清华大学建筑节能研究中心，2017）。

由于热损耗和泵送需要耗费能源，输送管道的长度会增加集中供暖管网的能耗。可以通过精心的管线设计、适当的平衡以及采用变速泵实现压降最小化，从而显著减少泵送的能耗。

输配温度也会影响管网能量损耗。高温热力（或低温冷冻水）比低温热力（或高温冷冻水）的热损要高，因为热输配和管线外部存在温差。可以通过增加管线保温，利用低温热和高温冷冻水增加 ΔT 值降低输送热损。

能源供应效率

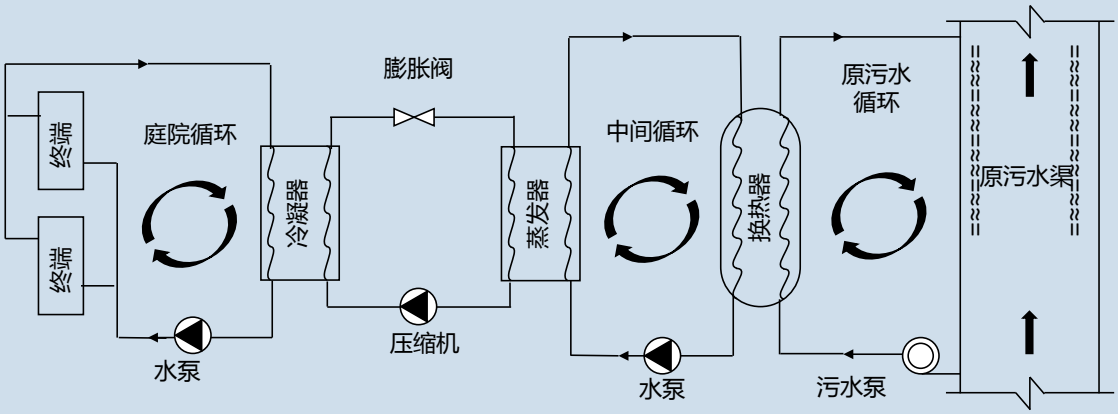
主要通过利用更好的技术或燃料类型、提高技术效率（例如，通过优化运行条件）、在可能的情况下捕获“免费”热冷或冷能来提高能源供应效率。“免费”热能和冷能包括几种能源，例如工业或污水余热回收（文本框 3），一般来说在单体建筑层面是不可行的。也可以包括更好的利用现场热力，例如，利用热电联产技术回收电力生产中的热力。

集中能源供应系统的总体成本效益，在很大程度上取决于其能源供应是否比单个建筑的供暖和制冷系统更加高效。一般来说，集中能源供应系统要比单个供暖或制冷系统更加经济有效，就需要能够从系统规模中获益，因效率提高从热电联产或冷热电三联供中获益，从在建筑层面不可实现的多种能源组合中获益（例如，垃圾焚烧或余热回收），从捕获免费热能或免费冷能中获益。

文本框 3• 案例研究：辽宁沈阳的污水余热利用

在沈阳市，从废水中回收的余热可以为大约 28 万平方米的住宅建筑供暖。沈阳的采暖季一般在十月份到来年四月份，平均室外温度大约为-11℃。废水的平均温度在16℃左右，比地下水的温度还要高，被认为是一种具有竞争力的热源。

在沈阳中心管网中，城市污水从距离采暖区 600 米的运河中泵送到热力站。在废水循环系统和热泵中间安装了中间水环路，用以保护蒸发器不被堵塞，防止接触废水造成腐蚀。



地暖采暖系统被用来提高供暖系统的效率，从而可以利用低温供水，提高热泵性能系数。数据监测显示，在采暖季，（根据热力需求）供水温度在 25℃到 40℃之间，而废水温度通常在 12℃到 15℃之间。

在 2016 年采暖季开始和结束阶段，系统的性能系数（考虑热泵、水泵和废水泵的整个电力消耗）达到了 4 的高值，在最冷的日子，性能系数最低只有 2。整个 2016 年采暖季（共计 151 天）的平均性能系数是 3.2，系统的电力消耗为 25 千瓦时/平方米左右，按人民币 0.65 元（0.10 美元）每千瓦时的电价计算，能源成本为 16.3 元（2.50 美元）每平方米。每个供暖季，废水供暖系统节省的一次能源消费达到了 6000 吨标准煤，减少二氧化碳排放 17800 吨、二氧化硫（SO_2）排放 58 吨、氮氧化物（NOx）排放 50 吨。

废水供暖系统已经安全运行了四年，验证了热源的稳定性和污水供暖技术的可靠性。由于多数城市都有污水处理的公共基础设施，可以在中国北方采暖地区进一步推进废

水供暖。虽然废水供暖能力大大低于多数城市的需求，但是废水可以丰富城市集中供暖的热源多样性。

资料来源：清华大学建筑节能研究中心。

技术选择、燃料选择和运行效率发挥着关键作用

技术选择与燃料选择会大大影响集中能源供应网络对现场实际利用能源（最终能源）、初始能源（一次能源）和相关排放可能产生的影响。成本是选择技术和燃料的主要标准，但这些选择也会受到政策（例如，最低能效性能标准或当地污染物治理措施）和市场框架（例如，合同义务或市场交换机制）的影响。在选定的技术和燃料中，也可以通过优化运行、定期维护和进行其他技术改进（例如，水力平衡，更高效的水泵和电机，传感器和网络管理软件）提高单个系统和部件的效率。

在确定供暖和制冷系统的技术效率时，应分析效率对系统规模可能会产生的影响。在已经使用大型系统的大型建筑中，区域集中系统可能不会提供规模效益。如果管理不当，所产生的节约就可能在输配过程中损失掉。具有较小规模供暖和制冷系统的小型建筑自然可以从区域集中系统的规模中获益，而同时也可以利用其他节能机会，例如，使用波动性可再生能源和工业余热。

高效捕捉“免费”热能或冷能

高效捕捉“免费”热能或冷能是实现集中能源供应系统经济有效运行的第三种关键路径（还有技术和燃料选择及技术效率），对地理位置依赖程度很高（图 7）。具体包括自然资源，例如江湖和地热能，以及源自本地可用资源（例如工业余热）的“免费”热能，这些热能若不利用，便会浪费掉。虽然捕捉这些热源和冷源（例如，设备、运输和泵送）的过程并不“免费”，但其利用却可以大幅提高集中能源供应网络的总体效率。而且，如果采用的商业模式（见“商业模式”部分）得当，“免费”热源和冷源还可以转变成具有价格的能源，增加集中能源供应网络的吸引力和可行性。

图 7 • “免费”热源和冷源

- 气温（N）
- 水温（N）
- 地温（N）
- 地热（N）
- 太阳能（N）

- 工业余热（W）
- 农业废物（W）
- 污水或其他废物（W）

- 气温（N）
- 水温（N）
- 地温（N）
- 太阳能（N）

- 地热（N）*
- 工业余热（W）*
- 农业废物（W）*
- 污水或其他废物（W）*

说明：（N）表示可以捕捉用于供暖或供冷的天然能源。（W）表示可以捕捉用于供暖或供冷的废弃或多余能源，若不利用，便会废弃。（*）表示虽不常见但也可以用于集中供冷的能源，采用吸收式制冷机。

关键信息• **用于供暖和供冷的自然资源和废弃资源对位置依赖度很高，但能大幅提高区域集中能源供应网络的总体效率。**

天然能源：空气、水和地面温度皆可利用，可以采用换热器或热泵把热能从空气、水或地面传输到集中能源供应系统中。地热和太阳能（见“可再生能源”部分）可以被集中能源供应系统直接利用，但可能要采用泵送或其他方式输送能源。

废能：余热（见“余热”部分）一般会具有不同的温度，来自各种生产工艺，最常见的是工业或发电余热。多余的木材/生物质（见“可再生能源”部分）和其他废弃物可用于在集中供暖热力厂转化成热力，通常是成本较低的能源品种。然而，多余生物质（例如，农业废物）和其他废弃物的利用效率取决于这些物料的运输和热转换效率。

几个因素会影响天然能源或废弃能源的捕捉效率。温度和获取“免费”热源和冷源是主要问题，环境关切也是主要问题，例如，把热排入水体对当地鱼类和野生动物造成的影响。在有能源可用但是获取成本高昂的地方（例如，进行深层钻井获取地热资源），成本也是一个主要因素。

捕捉免费热能和冷能可能还需要对集中供暖和供冷管网中的运行或输配体系进行调整。例如，太阳热通常具有较低的温度，这可能要求采用热泵进行增温，用于高温输配管网。如果在较低的温度下使用太阳能，则需要更好的建筑性能（例如，改进隔热以减少采暖需求）。同样，对于制冷而言，最终用户可能会转换成较高温度的制冷，以增加从空气、水或地面捕捉免费冷能的能力。

余热的作用

对于不会额外增加热力生产（例如，使用燃煤锅炉）的集中供暖系统而言，通过热力管网提供余热可能会是宝贵的能源利用机会。余热回收在技术经济上的可行性取决于资源特点（例如，清洁程度、温度水平和供应的间歇性），以及特定最终用途的现实性。

几项研究采用不同方法对全国和地区工业余热存量进行了测算。结果差异很大，显示工业余热存量占全国最终工业能源消费的 20%到 70%。虽然各国能源密集型行业在全国工业能源消费总量中的比重差异不大，但这些估值范围较大，凸显了方法选择的重要性。

利用热电联产进行余热回收：供暖前景和可选方案

随着中国供暖和工业热力需求的不断扩大，热电联产的潜力和可选方案经历了飞速的发展。2014 年，北方采暖地区热电联产机组装机容量达到 211 吉瓦，占全国火电装机容量的 30%，占北方采暖地区火电装机容量的 43%(中电联，2015)。热电联产占热力市场一半以上的份额，市场份额还将随着燃煤锅炉装机容量的削减继续扩大。

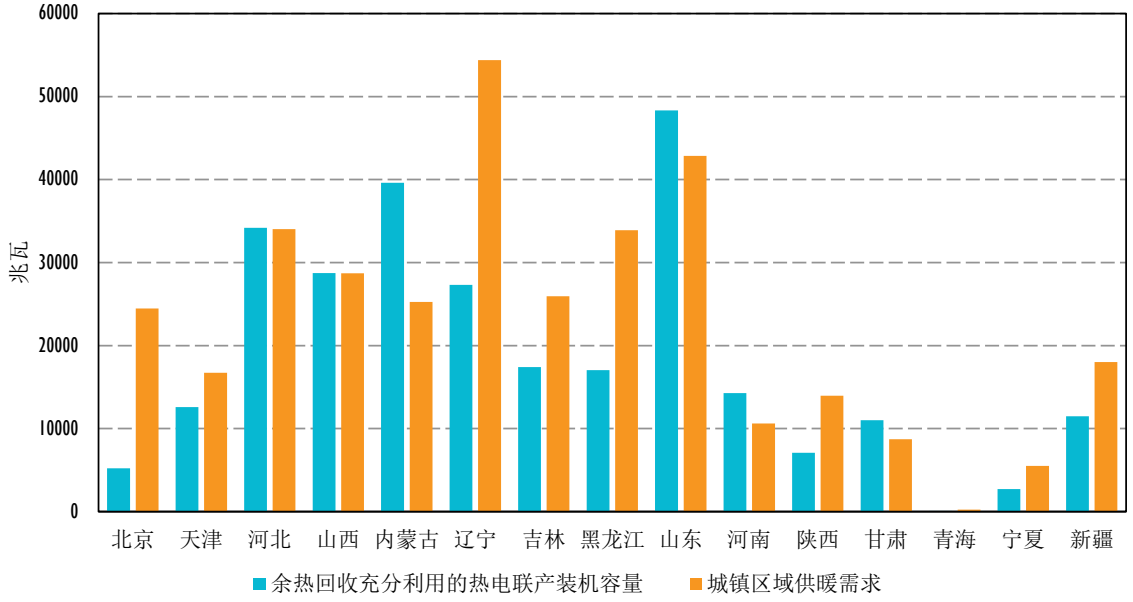
2009 年至 2014 年，热电联产总装机容量增加了 96%，而热电联产实际供暖量仅增加了 23%。造成装机容量和实际供暖量差异的原因很多，例如为满足不断上升的电力需求，电力生产往往具有优先地位，另外由于电厂通常远离市区，长距离供暖会导致效率低下。然而近期电力供应过剩使得热力供应的问题受到关注，随着技术的不断发展，有经济效益的供暖半径已经达到了 100 公里以上。因此，提升热电联产的热力生产和回收正在受到更高关注（清华大学建筑节能研究中心，2015）。

先进的燃煤发电技术能够使发电效率提高 45%，剩余 55%能量通过余热排出。这为利用余热满足区域供暖需求提供了极佳的机遇，例如使用热电联产技术供暖。热电联产机组最常用的技术是在进入低压涡轮机之前抽取蒸汽，用蒸汽 - 水热交换器将热量传递给区域供暖。采用蒸汽加热的提取技术可以回收汽轮机 70％左右的余热，剩余的 30％可以通过背压或热泵的方式利用，但也会带来灵活性降低和投资增加的问题。这两种充分利用余热的方式都能够提高供暖能力，同时还能提升热电联产机组的能效。热电联产生产每吉焦的热量所消耗的煤炭量能够降至 20 千克标准煤以下，因此比单独的燃煤锅炉更具优势（清华大学建筑节能研究中心，2015）。

根据北方采暖地区已建成并区域供暖网的热电联产机组的运行情况来看，如果余热得到充分的回收利用，增加的供暖产能预计将达到 277 亿千瓦时（图 8）。这相当于 2015 年

北方采暖地区热网 80%左右的供暖需求。在此基础上，如果传统的纯凝燃煤发电机组和核电机组能够被改造成为热电联产机组，即使区域供暖需求继续增长也能被满足，无需再新建热电联产机组。

图 8 • 热电联产供装机容量和城镇区域供暖需求



关键信息• **如果充分回收利用余热，热电联产的供暖产能可以满足 2015 年北方采暖地区热网 80%左右的供暖需求。**

工业余热利用潜力与供暖和供冷选择方案

中国的工业部门在能源利用方面依然发挥着巨大作用，占到终端用能行业能源消费的一半以上，消费量达到 17 亿吨标准煤（50 艾焦），交通运输业、居民生活和服务业远居其后（IEA，2017a）。中国的工业能源需求占到 2000 年以来最终能源消费增长的将近 60%，主要是因为钢铁、水泥和化工生产的能源需求迅速增长，还有其他能源密集型行业。

能源密集型工业部门[3]的余热也更加丰富，前提是所涉及的工艺过程具有更高的比能量要求，运行温度更高。挖掘其丰富的余热资源，不管是通过提高工业能源利用效率还是用于其他用途，例如集中供暖，都将为中国降低其能源行业总体能源强度提供真正的机会，并可收获随之而来的经济和环境效益。

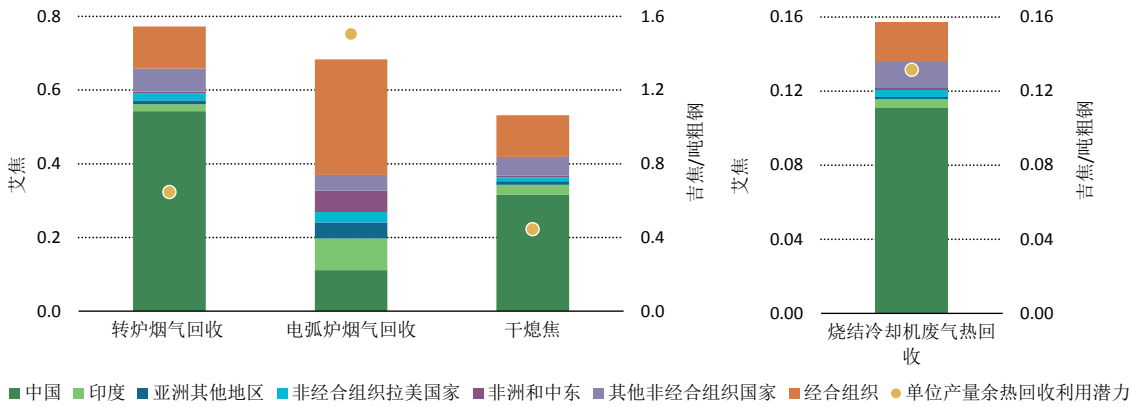
根据国际能源署在 Energy Technology Perspectives 2017（《能源技术展望 2017》）中的估算，全球钢铁行业的余热回收潜力是 7170 万吨标准煤（2.1 艾焦），[4]这相当于全球钢铁行业最终能源消费的 7%（图 9）。[5]其中大约 74%的潜力是在非经合组织经济体，这些经济体占到全球粗钢产量的大约 70%。中国占到这一全球技术节能潜力的一半（IEA，2017a）。

[3] 能源密集型行业涉及钢铁、非金属矿产、化工和石化、纸浆和造纸、有色金属等行业。

[4]未包括热风炉烟气的显热回收。氧气顶吹转炉烟气回收潜力包括来自烟气的显性能量和化学能。

[5] 2013 年钢铁行业的最终能源消费是 11.226 亿吨标准煤（32.9 艾焦），包括高炉和焦炉。

图 9 • 全球钢铁行业主要生产环节工业余热技术回收潜力



说明：工业余热技术回收潜力是 2013 年工业存量。单位产量余热回收潜力用吉焦/吨粗钢表示，是指其在占全球粗钢产量的相对份额：高炉粗钢生产，氧气顶吹转炉干熄焦，氧气顶吹转炉烟气回收和烧结冷却机废气热回收，电弧炉粗钢生产烟气热回收。由于缺乏各地区落实的具体信息，全球技术回收潜力评价中未包括热风炉废气的热能回收。

资料来源：IEA 根据各地区工业余热回收技术落实情况所做的分析(IEA, 2017a)：Lu, H. (2015), *Capturing the Invisible Resource: Analysis of Waste Heat Potential in Chinese Industry and Policy Options for Waste Heat to Power Generation*；Rock, M. and M. Taman, (2015), *China´s Technological Catch-up Strategy: Industrial Development, Energy Efficiency and CO_2 Emissions*；IEA 估算。

关键信息•中国钢铁行业余热技术可回收潜力超过 3410 万吨标准煤（1 艾焦），每吨粗钢可回收 1.3 吉焦热量。

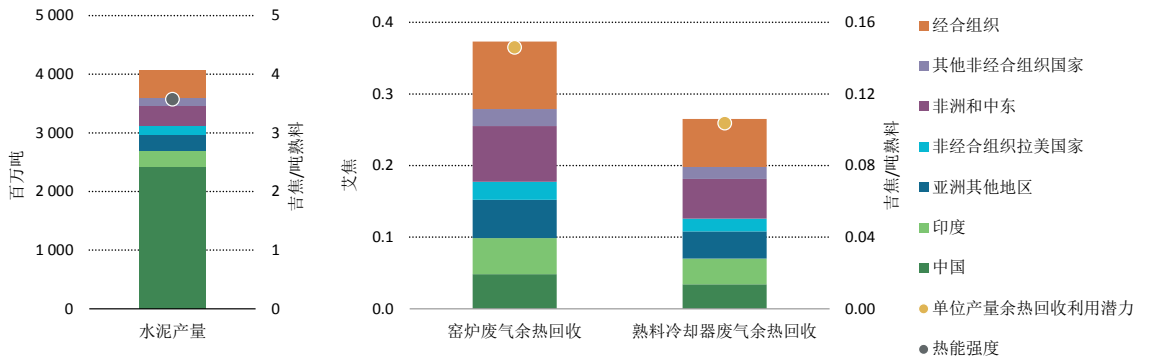
在水泥工业中，在窑炉中把石灰石煅烧成石灰用于制备熟料是能耗最多的生产环节，为工业余热回收提供了巨大的潜力。原材料含水率的不同会导致熟料生产的能耗差异很大：湿法能耗达到将近 5.9-6.7 吉焦（GJ，1 GJ=10^9 焦耳）每吨熟料，干法为 2.9-4.6 吉焦每吨熟料[6]（IEA， 2007）。

最先进的干法窑炉系统已经包括工业余热回收利用技术，可以利用部分窑炉烟气的热能预热原料[7]，并可利用空气冷却熟料，生成二次燃烧空气。根据原材料含水率的不同，干法熟料生产工艺中可以发现回收热能的进一步机会。例如，当原材料含水率为 2-6%并采用五级预热器旋风分离器和预分解窑配置时，全球窑炉和烧结冷却机烟气余热的技术可回收潜力为 2050 万吨标准煤（0.6 艾焦）。中国占全球水泥生产的 60%，其技术可回收潜力占全球总量的将近 15%，回收效率为 0.06 吉焦/吨干法熟料（图 10）。

[6]与干法熟料生产相关的热能源强度覆盖从干法工艺到六级预热器和预分解回转窑等环节。

[7] 干法回转窑旋风分离器的数量由原材料的含水率决定。每增加一级预热都会增加热回收的水平。

图 10 • 水泥行业主要生产环节工业余热全球技术回收潜力



说明：工业余热技术回收潜力是指 2013 年工业存量。单位产量余热回收潜力（吉焦/吨水泥）是指全球干法熟料生产。
资料来源：IEA 根据各地区工业余热回收技术落实情况所做的分析(IEA, 2017a)：Lu, H. (2015), *Capturing the Invisible Resource: Analysis of Waste Heat Potential in Chinese Industry and Policy Options for Waste Heat to Power Generation*；BCS Incorporated (2008), *Industrial Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U. S. Industry*；IIP (Institute for Industrial Productivity)和 IFC (Internal Finance Corporation) (2014), *Waste Heat Recovery for the Cement Sector: Market and Supplier Analysis*；Izumi, Y. (2014), *Role of the Japanese Cement Industry in the Establishment of a Sustainable Society*；Italcementi (2015a), *Solar Power and New Concrete Applications: A Pilot Plant in Morocco*；IEA 估算。

关键信息•**中国水泥产量占到全球水泥产量的 60%，中国水泥行业工业余热技术可回收潜力为 270 万吨标准煤（0.08 艾焦），回收效率为 0.2 吉焦/吨干法熟料。**

在利用工业余热回收进行供暖和供冷方面，还存在其他机会。例如，铝业中高温工业余热回收机会巨大（IEA，2017a）。回收低温余热也是可能的，但是因为需要更大的传热面积，通常会带来更多挑战，这会转化为更高的资本投资成本，在工业设施中更有可能出现空间制约。为低温回收余热找到配套的终端用途，在一些工业活动中也会具有局限性。在此情况下，需要探讨工厂外的终端用途或引入升级技术（例如热泵）（Kumar 和 Karimi，2014）。

鉴于潜在热源数量庞大，各工厂具体特点和环境条件的影响更大，评价低温工业余热回收的潜力尤为复杂。工厂级工艺集成对于发现低温热源节能机会更加重要。例如，工艺集成技术，包括 pinch[8]分析，与石化和化工部门的最佳实践能源性能相比，可以再增加 5% 的能源节约（Saygin et al.，2011）。

虽然评估中国工业余热可回收热力总量比较困难，但利用余热回收进行集中供暖的机会巨大。清华大学建筑节能研究中心在 2016 年开展的一项工业余热研究发现，北方采暖地区采暖季期间利用低品位工业余热可以回收高达 1 亿吨标准煤（将近 3 艾焦）（Luo et al.，2017）。余热还有其他益处，包括节约用水，可实现热力生产节约用水 30 亿立方米以上。

利用吸收式制冷机，工业余热还可以满足制冷需求。如同集中供暖一样，采用此类技术用于集中供冷实现的能源和排放净收益可以与在建筑内采用高性能制冷设备获得的收益相比。结合各种技术解决方案（例如，工业余热与吸收式制冷机和冰蓄冷结合，提高管网效率与利用本地可用资源进行自然制冷结合）可以为集中供冷提供高性能的技术方案，但前期投资成本要求高。

集中供暖系统的另一余热回收方案是核能热电联产，这在中国尚未进行充分探索。核电生产产生的热（蒸汽）可用于集中供暖，生产氢气和合成燃料，甚至还可用于海水淡化。世界各地大约 74 台核反应堆数十年的经验证明了核能非电应用的可行性（占世界当前核反

[8] Pinch 分析是要生成不同的复合曲线，汇总热流代表系统的供暖需求总量，汇总冷流代表供冷需求总量。曲线闭合点称为 *pinch*，两条曲线之间的面积代表最大的热力回收量（为温度的函数）。

应堆总量的约 17%）（IAEA，2009）。然而，只有核能热电联产比其所替代的技术解决方案经济性更好的时候，核能的非电应用才能得以发展。核能发电设施通常远离城市，热传输距离也可能是挖掘这一技术潜力的障碍。一些中国智库和企业正在调研小城市核能供暖的潜力，然而，小城市目前主要还是只依靠燃煤供暖（文本框 4）。

文本框 4 • 中国核能供暖发展潜力

理论上，100 兆瓦到 400 兆瓦的小型核反应堆可以替代居民少于 30 万人的城市的燃煤锅炉，因为其可以生产低于 100°C的热力，采用非加压技术，也更加安全。这种反应堆供暖面积可以达到 200 万至 1000 万平米。

核能热电联产可见于西欧和俄罗斯，但是可以开发专用反应堆，仅用于集中供暖。反应堆被浸没在深水池，防止堆芯融化。循环水把热从反应堆传输到集中供暖系统，把城市管网中的水加热到 60°C到 90°C。内部两个封闭的水环路可以防止辐射暴露。

反应堆的成本可分为初始投资成本和运行成本。建造 400 兆瓦供暖系统的成本为大约 10 亿元（1.53 亿美元），寿命 50 年。目前，将近一半的投资用于研发支出，所以，当达到商业化阶段时，成本有望下降。运营成本主要用于核燃料。一批核燃料的成本将近 2.9 亿元（4400 万美元），可以提供为期六年、每年五个月的供暖服务。所以，每吉焦的能源成本只有人民币 9.3 元（1.42 美元），比燃煤锅炉的成本还要低。

各种余热方案的发展障碍和市场框架

余热为满足中国巨大的集中供暖需求提供了宝贵的潜力。例如，大型工业余热示范项目已经在迁西县落实，该县来自余热回收的总供暖容量预计会达到 225 兆瓦，投资大约 2.5 亿元（4000 万美元）（Li et al.，2016）。

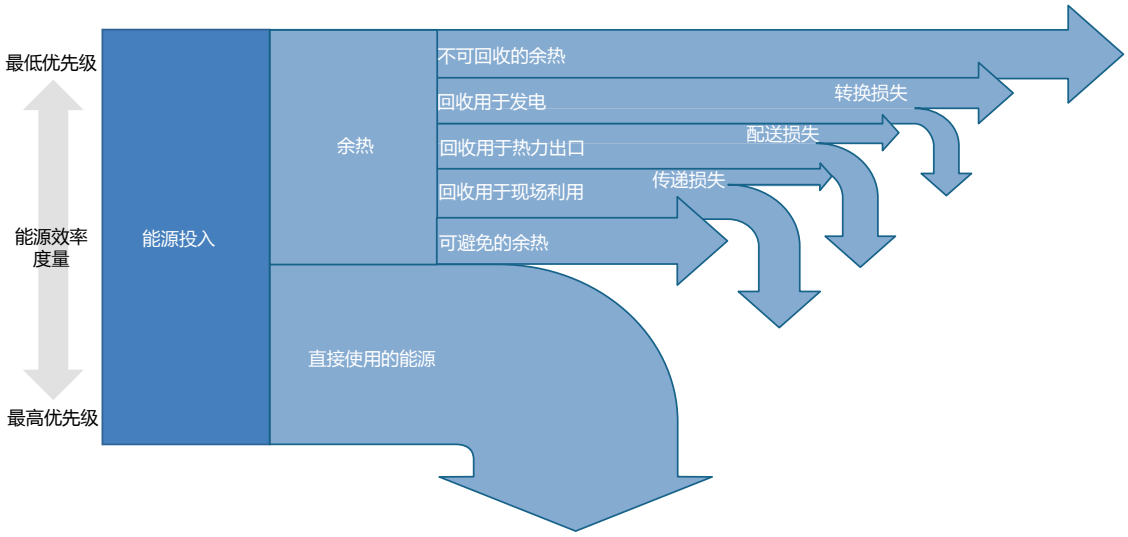
实际上，推广工业余热回收技术往往受到非技术因素的限制，包括：每个地方的特点，例如，当地是否有配套的终端用途适用于回收的热力；当地或区域的经济要素如何，例如资本投资要求，能源价格；是否存在节能项目的配套经济和财政机制。与生命周期较长的工业基础设施相比，投资者希望回收期短，这些都是在确定工业余热回收项目是否具有经济可行性时需要考虑的因素。

其他问题也会限制工业余热在集中供暖和供冷中的应用。例如，迁西县的可行性研究发现，余热不一定会为集中供暖需求做出贡献（Luo et al.，2017）。

此类障碍需要以更广泛的、综合的能源系统视角对用于集中供暖的工业余热回收进行规划，以便保障建筑内的能源供应和热舒适度。还需要向工业余热供应企业保证用于集中供暖和供冷的工业余热回收不会影响其正常的工业生产过程。

从能源效率的角度看，应首先通过限制工艺温度，改善过程控制与维护，加强设备保温，限制工业余热的产生。在过程优化达到了经济有效的水平之后（即工业过程能效），可以考虑回收工业余热的多元化应用，包括：现场直接利用，出售给地方为城区或附近工业设施或电力生产服务的集中供暖和供冷管网（图 11）。

图 11 • 工业能源产业链中的余热管理和可能用途



说明：这是工业生产过程的示意简图，非按比例绘制。直接利用能源的水平因工艺类型和每个工厂具体实践和局限因素的不同而存在差异。不可回收的余热是指回收不具备合理经济基础的余热。与输配或转换损失相比，热传递损失一般是可以忽略不计的。
资料来源：以 Forni，D.，D. Di Santo F. 和 Campana （2015）编写的 *Innovative System for Electricity Generation from Waste Heat Recovery* 为基础。

关键信息•**旨在实现能源效率最大化的政策将会改善余热管理，包括用于中国的集中能源供应网络。**

最终用户和供应商之间的距离是最关键的因素之一，决定了运输回收热能的切实可行性，因为会直接增加输配热损失和要求的资本投资。最近的一项研究发现，工业余热回收利用与最终用户需求所处位置之间的 10 公里的热力管线的热损失会达到 50%（Hammond 和 Norman，2013）。然而，根据输送距离、输送温度和系统物理配置（例如，热管直径、绝缘特性和维护规程）的不同，热输配损失差异很大。

在热输配管网中使用工业余热的另一障碍是供应安全风险。如果工业余热为供暖管网做出重大贡献而热存储能力并非针对这一情况而设计，不可预见的或计划的工业活动中断可能会影响热力交付。如果工业工厂需要保证一定的供暖量，就不一定能看到为集中供暖管网提供余热的价值。

当评估回收工业余热的配套终端用途时，包括集中供暖管网，长期的视角可以拓宽机遇范围。支持有效落实工业余热的政策策略也可以改善热回收项目的商业可行性。这包括制定政策，确保为热力供应商和买家建设透明的市场环境，而同时要确保市场价格反映电力和热力生产的真实成本（IEA，2014）。政策可以为地方工业企业提供额外激励，通过认可工业余热在集中能源供应网络中高效利用的协同效益，例如，通过给予污染积分，使余热可用于集中供暖和供冷管网。

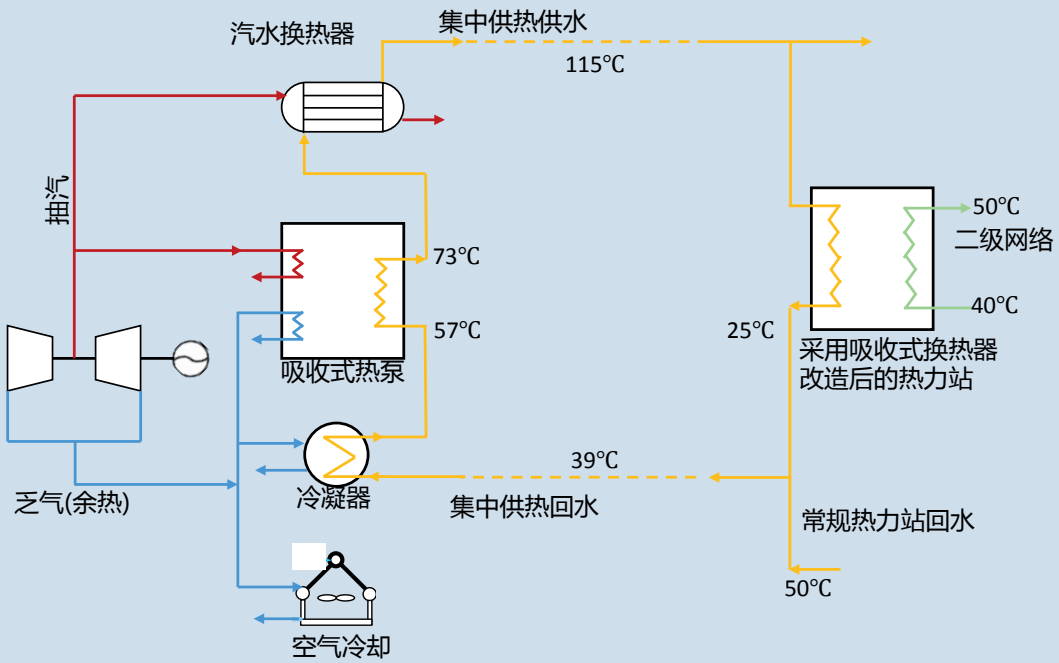
相对于区域能源需求和集中供暖和供冷管网规划，还需进一步努力绘制中国工业余热潜力分部地图（文本框 5）。地方、区域、甚至是全国性的供暖和供冷规划策略可以利用此类地图信息发现工业余热回收的经济、有效的机会，而同时可以识别实现该潜力需要解决的其他障碍或具体的市场环境（见“商业模式”部分）。

文本框 5• 案例研究：山西大同热电联产工厂余热利用

多数常规热电联产电站使用汽轮机抽汽作为热源用于集中供暖，但是会释放冷却塔中排出的蒸汽所携带的热量。如果对余热进行回收，供暖容量可以提高 30%以上。中国北方热电联产产生的余热潜力巨大，可以满足迅速增长的城市供暖需求，满足发展清洁热力的迫切要求。

云冈电厂热电联产是大同市的示范项目，由两台 220 兆瓦和两台 300 兆瓦的直接空冷机组组成。改造前，该电厂可为 1600 万平方米的建筑面积提供室内采暖，但 2015 年的需求达到了 2500 万平方米，所以，电厂准备通过回收自身余热来弥补这一差距。

两台 300 兆瓦机组的改造工作于 2012 年开始。吸收式热泵安装在热电联产电厂和热力站，集中供暖管网的供暖温度为 115°C。在电厂，集中供暖用水由冷凝器、吸收式热泵和汽水换热器进行串级加热。在热力站层面，42%具有充分空间的热力站都改造安装了吸收式换热器。几乎所有的余热现在都得到了循环利用，防冻空气制冷设备要求的最低热量除外。供暖容量已经达到 885.7 兆瓦，其中 40%以上是余热。新系统也可以通过降低传热过程中的能量损失提高电力生产效率。随着更多余热被回收用于集中供暖系统，所需抽汽也会减少，发电量会比以前增加将近 7%（见示意图）。



该热电联产企业投资了 1.4 亿元（2140 万美元）用于改造热电联产机组，投资了 1.7 亿元（2600 万美元）用于建设热力站。理想的情况是，这家供暖企业本来也可以投资热力站的吸收式换热器。但只要热力价格保持不变，就不会盈利。即便是这家热电联产企业接手了热力站的改造工作，但负责设备运行的供暖企业并无意愿减少回水温度。如果采用适当的商业模式，就可以提高系统的效率。

从经济效益看，回收的余热为 3.1 拍焦（PJ，1PJ=1015 焦耳）每年，热力以 20 元（3 美元）每吉焦的价格出售给供暖企业。回收余热的销售收入达到人民币 6200 万元（USD 8.9 million）每年，投资回收期只有五年。

资料来源：清华大学建筑节能研究中心。

可再生能源的作用

使用可再生能源供暖和供冷具有众多好处，例如，减少二氧化碳和空气污染物排放，处置有机废物，例如农业废弃物和市政固体垃圾。然而，全球范围内可再生能源在供暖行业的作用依然很小，只占到 2015 年全球热力消费的 9%。本节探讨集中供暖系统利用可再生能源的可选方案，可再生能源的竞争力，以及高比重可再生热力的最佳国际实践案例。

集中供暖管网可以促进可再生能源的部署，因为其规模经济效益可以凸显由于建筑规模而受局限的可再生热力装机的成本优势，因为并入网络比将可再生能源技术并入单个建筑更加容易。然而，多数集中供暖管网依然使用化石燃料。2015 年全球集中供暖能源消费为 3.856 亿吨标准煤（11.3 艾焦），其中仅有 2730 万吨标准煤（0.8 艾焦）（7%）源自可再生能源。当年欧盟可再生能源在集中供暖中的占比达到 28%，而中国只有 1%。不管是在中国还是在全球范围而言，增加可再生能源占比的潜力都是巨大的。到 2030 年时，中国把集中供暖生产中的可再生能源占比提高到 24%是可行的（IRENA，2017）。

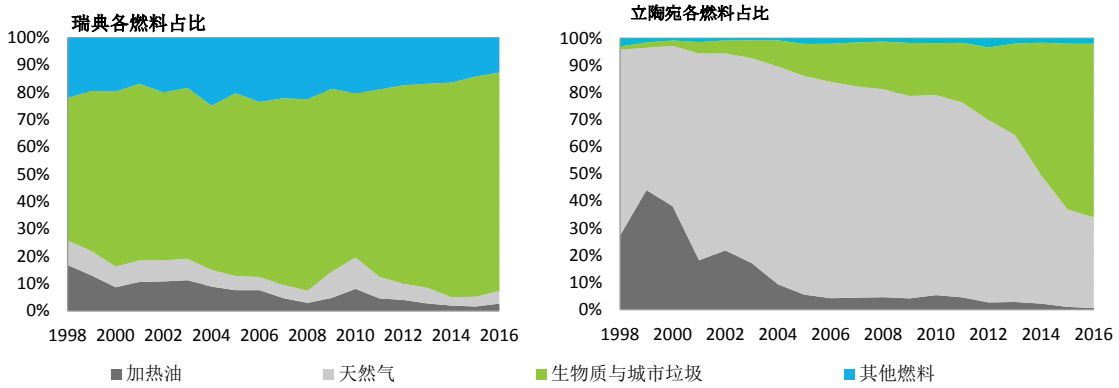
集中供暖的可再生热力解决方案在很大程度上取决于当地的资源条件。在具有极为丰富的地热资源（例如冰岛）或生物质（例如北欧和波罗的海国家）的国家，已经实现了最大程度的可再生热力渗透。尽管这些国家的集中供暖管网一般要比中国的规模要小很多，但其中一些激励措施、政策和商业模式依然可以为中国提供借鉴，特别是对于某些地方而言。

例如，瑞典的集中供暖系统已经进行了长期的转变，从煤炭和石油转变为可再生燃料，尤其是来自林业废弃物的生物质和市政垃圾（图 12）。数十年来，逐步转型的主要动力首先是能源安全担忧，后期是低碳化的政策。尽管在 20 世纪 70 年代末，石油占到集中供暖燃料消费的 90%，但到 2015 年时，其所占份额跌到仅有 2%，生物质和市政垃圾占到 70%。执行碳税加速了这一转变：比如 2016 年的碳税价格是每吨二氧化碳 131 美元（人民币 905 元），是取暖油价格的两倍。

这一转变在立陶宛发展的更快，2010 年到 2016 年期间，立陶宛生物质对集中供暖的贡献增加了两倍多，占比达到 64%（图 12）。这一转型的主要推动因素是需要实现供暖燃料多元化，从而减少对进口天然气的依赖。

丹麦的激励政策，比如生物质补贴和对化石燃料征税，稳步提高了可再生能源的比重，占集中供暖的 50%以上。丹麦在利用家庭农业废弃物方面也很有名，例如，把秸秆用于集中供暖。在其他国家，集中供暖系统中可再生能源的部署覆盖范围较小。然而，在地方层面，例如巴黎和慕尼黑这样的城市，正在采取措施，将供暖燃料部分转换为可再生能源（文本框 6）。

图 12 •瑞典（左）和立陶宛（右）集中供暖工厂中各种燃料占比（1998-2015）



资料来源：瑞典统计局（2016）和立陶宛集中供暖协会（2017）

关键信息• **在瑞典和立陶宛，强有力的政策和当地丰富的生物质资源推动了从化石燃料向可再生能源的剧烈转变。**

文本框 6• 案例研究：巴黎和慕尼黑的地热集中供暖

就地热能在集中供暖管网中的应用而言，欧盟具有全球最具活力的市场。在 2012 年到 2016 年期间，新建的 51 个地热厂开始运行，还有另外 200 个项目在规划中。预计到 2020 年时，装机容量会从 1.7 GWth 增加到 6.5 GWth，主要市场在法国、德国、匈牙利和荷兰。

大巴黎地区与集中供暖管网相连的深层地热井的密度是世界上最大的。其中多数利用 Dogger 含水层的热水（55°C到 85°C），深度为 1500 到 2000 米。巴黎地区的地热热力是在上世纪 60 年代开始利用的，70 年代受石油价格冲击，利用规模进一步扩大。地热热力最近的火热发展包括利用较低温度水源的工厂。最新的工厂位于 Clichy-Batignolles 地区，于 2017 年初投入使用，可以满足一处占地 54 公顷、容量 7500 人的住房开发项目的 83%的热力需求。该工厂采取 650 米深的 Albien 含水层的 30°C 的水，然后利用热泵提高温度（Engie，2017）。

巴黎的集中供暖管网由巴黎市所有，由 Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain（简称 CPCU）采用公共服务特许经营的方式进行经营，CPCU 由巴黎市和能源企业 Engie 共同所有。可再生能源利用目标已经写入了特许经营合同，目前的目标是，到 2020 年时实现可再生能源或回收能源占 75%。地热热力发展受惠于增值税税率的降低，从 20%降低到 5%。此外，法国政府的热力基金（Fonds chaleur）项目提供了财政支持。例如，Clichy-Batignolles 热力厂接收到来自该基金和其他公共基金超过 250 万美元（人民币 1660 万）的资金支持，为其总额 1330 万美元（人民币 8840 万）的投资提供支持。此外，投资可再生热力可以赚取碳税免除积分，法国政府计划把碳税从 2017 年的 24.3 美元（人民币 161 元）逐步增加到 2022 年的 61.2 美元（人民币 407 元）。

在德国，慕尼黑当地的公用企业 Stadtwerke München（简称 SWM）已经承诺，到 2040 年时百分之百使用可再生能源满足其不断增长的集中供暖需求。目前，慕尼黑的大多数集中供暖是由煤炭和天然气热电联产提供的。SWM 把地热热力视为实现其可再生能源利用目标的主要可选方案，因为位于南部的 Bavarian Molasse 盆地，所以具有良好的发展潜力。SWM 在 2004 年建成第一个地热厂，目前有五座热电厂在运

行。为实现其雄心勃勃的 2040 目标，SWM 正在开展可行性研究，再增加 400 MWth 的深层地热热力供应，预期到 2025 年时还会再建设四个地热厂。向地热热力转变也需要对慕尼黑的集中供暖管网进行改造，例如，在内城区从供应蒸汽变为供应热水（Stadtwerke München，2016）。

SWM 是一个有限责任公司，由慕尼黑市全资所有。所以，其经营是商业性的，地热热力也被认为是有利可图的。然而，该企业的确是从长远着眼，可以接受比民营企业更长的投资回收期。SWM 收到联邦政府 330 万欧元的财政支持，用于对市区的地热资源进行勘察绘图，但建设和经营地热厂没有补贴。SWM 是德国最大的公用企业之一，可以以低廉的成本募集资金。规模较小的公用企业可以申请来自国有银行 KfW Bank 的补贴贷款。

巴黎和慕尼黑在集中供暖方案中都使用了市政垃圾和生物质。例如，CPCU 在 2016 年将其位于巴黎地区的 Saint-Ouen 的锅炉从燃煤锅炉换成了生物质锅炉，2016 年 CPCU 有大约 8%的能源来自固体生物质和生物液体燃料，此外，还有 43%来自市政固废（CPCU，2017）。

用于供暖和供冷的可再生能源选择方案

全球可再生热力供应以生物质为主导，生物质占 2015 年可再生能源集中供暖的 95%，但其他几种可再生能源方案也是合适的。集中能源供应网络的一大好处是，可以并入多种不同的可再生能源方案。可再生燃料的选择一般要看本地的资源条件。可选方案包括：

- **生物质**：以木屑、木质颗粒、农业废弃物成型燃料、市政固废的有机组分或其他固体生物质作为燃料的专门用来供暖的锅炉或热电联产机组。9通过高水分含量的有机废物厌氧消化产生的沼气和液态生物燃料，也可以小规模利用。
- **太阳热能**：大规模太阳能热利用设施，包括屋顶型或独立式系统。通常需要与季节性储能系统相结合，以便在供暖高峰季时依然可用。
- **地热**：根据可利用的资源情况，可以分为浅层和深层地热井（例如从含水层提取热水）。低温资源可能需要与热泵结合使用。
- **热泵**：利用电力从空气源、地源或水源采取可再生的环境热。热泵也可利用工业余热热源，是一种既节能又可再生的可选方案。

多数可再生能源比重较高的集中供暖管网会并入多种不同的热源，包括一些余热和一些化石燃料（例如，峰值热力需求的时期）。此外，热泵和电锅炉也可以发挥作用，帮助平衡波动性可再生能源电力占比较高的电力网络。

可再生供冷解决方案包括利用可再生能源电力，特别是太阳能光伏系统——高辐射水平与峰值制冷需求正好契合，以及使用太阳热能或其他可再生热源的热泵和吸收式制冷机。许多集中能源供应系统会把供暖、供冷和发电结合起来，通常使用三联供。其中一些会使用可再生燃料，例如沼气。

这些可选方案中国都具备，但每个城市最适合的组合结构各不相同。一些城市的地热集中供暖已经非常先进。河北省雄县（具有 39 万人口，部分区域最近被划入雄安新区）所有的热力都来自地热。“十三五”规划里设定了几个可再生热力发展目标，部署必将大幅增加，特别是地热和生物质的利用。

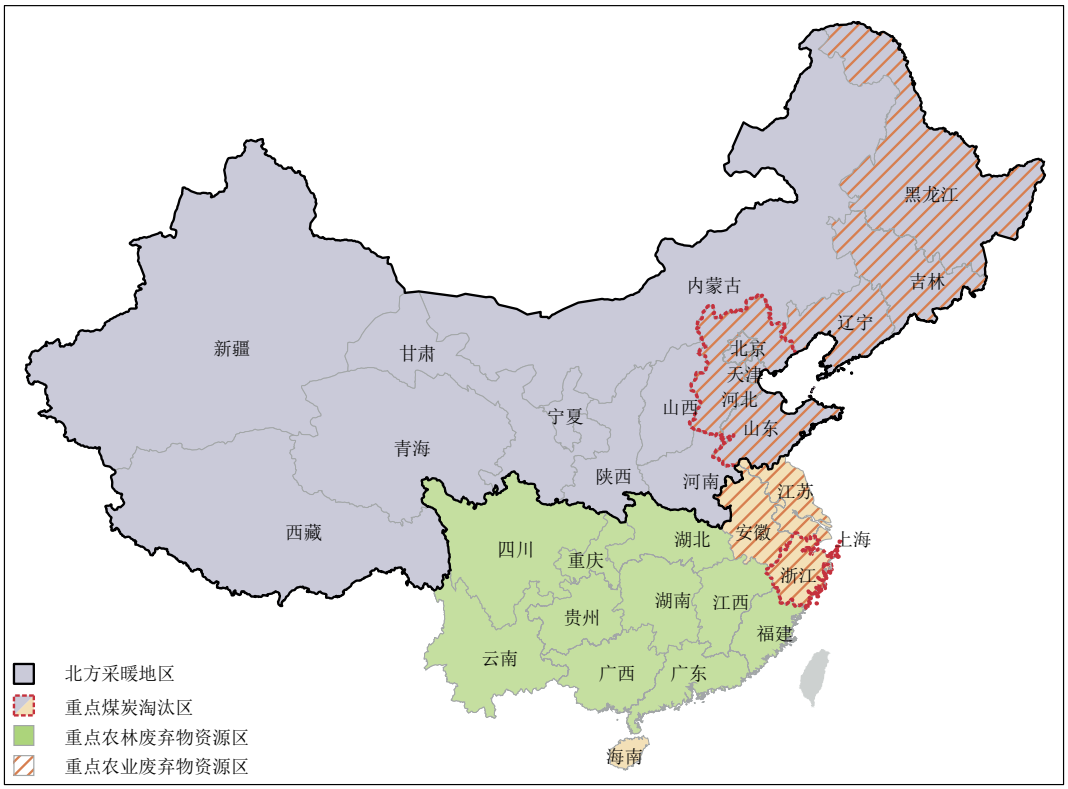
[9] 一般而言，大约半数的城市固废中的能量含量都可归因于生物质。

扩大中国固体生物质集中供暖

中国拥有丰富的生物质资源，并且已经建立了各种形式（例如，颗粒和压捆）的固体生物质供暖燃料的市场。然而，当前需求主要来自工业部门。生物质燃料的选择因地域而不同（地图 2），颗粒主要以来自生活中的林业废料、花生壳和秸秆为原料进行生产。压捆主要采用各种农业废弃物进行生产。煤改生物质能够减少二氧化碳、二氧化硫和氮氧化物的排放，预测同时，开发这些资源也可以支持农村发展。

北方采暖地区省份可用农业废弃物资源更多，意味着农业废弃物比林业废料可以更广泛地用于集中供暖。中国拥有大量农业废弃物，其能源潜力超过 4.09 亿吨标准煤（12 艾焦）（Gao et al.，2016）。然而，这些资源并未得到充分利用，主要是因为难以建立燃料供应链，把这些分散的资源运输到消费的地方。在某些情况下，这会导致野外燃烧，会导致丢失资源价值，大量排放颗粒物。相对于林业废料，农业废弃物要用于集中供暖一般挑战更大，因为其组成更加不稳定，有些时候还会包含杂物，但可以通过适当的工厂设计和燃料预处理来克服这些障碍。

地图 2• 中国生物质资源和煤炭淘汰重点地区

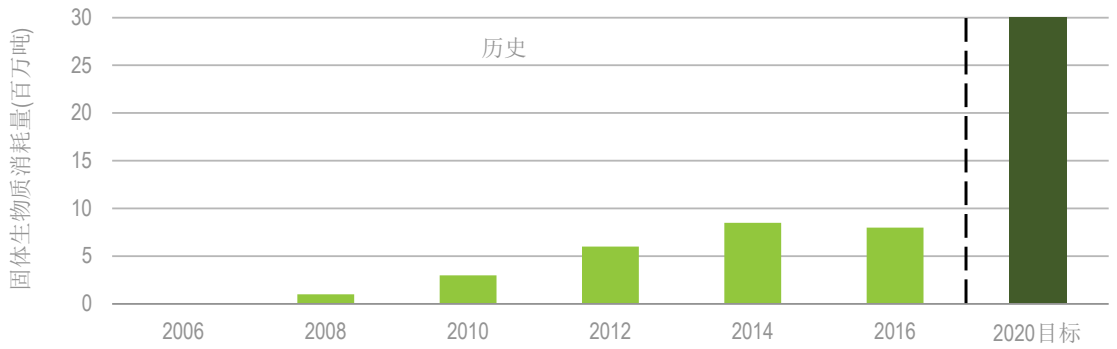


本地图不损害任何领土之地位或主权，不损害国际边界和界限的划界，不损害任何领土、城市或地区的名称。

关键信息•中国集中供暖生物质资源利用潜力巨大，但由于需要使用分散的资源建立燃料供应链，生物质集中供暖尚未得到充分利用。

中国的“十三五”规划制定了雄心勃勃的发展目标，要扩大供暖行业固体生物质消费规模，从 2016 年的大约 800 万吨增加到 2020 年的 3000 万吨（图 13）。该目标并未对利用这一燃料的技术作出具体规定（例如，供暖专用锅炉或热电联产系统）。目标也未规定各种最终用途的消费量，比如，集中供暖应该利用多少生物质，工业该利用多少。虽然有足够的农林废弃物资源支持这一增加，但要实现这一目标仍存在一定挑战，因为 2016 年度全球木质颗粒消费量只有 2850 万吨左右。

图 13 • 2006-16 年中国用于供暖的固体生物质消费量和 2020 年发展目标



说明：中国没有报告把生物能用于工业热力的情况。考虑到中国纸浆和造纸工业规模庞大，很有可能利用生物质废料进行热力生产，但是未在提交给国际能源署的官方统计中进行报告。结果，上图中反映的消费没有反映在国际能源署的统计中。

资料来源：中国国家可再生能源中心（2017 年 3 月），与作者电邮通信。

关键信息• 如果能够实现"十三五"规划中的生物质发展目标，生物质对区域供暖系统的贡献会大幅提高，但在规划中并未明确提及其在区域集中供暖系统中的利用目标。

即便是实现了利用 3000 万吨生物质的发展目标，所有固体生物质都用于集中供暖，其对北方采暖地区的大量能源需求贡献依然很小：到 2020 年时达到 5%到 8%，这取决于所使用的生物质燃料包含的能量和能效目标实现的程度。同时，固体生物质燃料将会继续用于工业部门。因此，生物质应被视为集中供暖煤炭替代的低碳燃料组合中的其中一种。

中国固体生物质用于供暖的最佳机会初期会在工业部门和附近具有生物质资源的乡镇和农村的集中供暖系统。在煤炭或天然气本地供应有限的地方，部署潜力会进一步增加。在具有生物质资源和淘汰煤炭要求最强烈的北方采暖地区的各省市中间，扩大集中供暖生物质利用规模潜力最大的地区是北京、天津、河北、山东和河南。其他热力需求与生物质资源丰富程度相匹配的省份可以使用更多的生物质，取决于生物质与其他集中供暖燃料相比是否具有更高的经济性，供暖，例如天然气（文本框 7）。

文本框 7 •中国固体生物质和天然气供暖燃料经济评价

中国供暖行业限制煤炭消费的政策为北方采暖地区集中供暖省份的替代燃料开启了大门。如果有适当的热源定价结构，固体生物质和天然气都是可行的煤炭替代品。

目前，门站[10]天然气价格由国家发改委确定，各省情况有所不同。2015 年的价格是从上海和广东的人民币 85 元（11.3 美元）每吉焦到新疆的人民币 55 元（8.3 美元）每吉焦不等。地方政府制定居民和非居民消费者以及集中供暖企业的天然气价格。一般而言，居民天然气价格最低，其次是集中供暖企业价格，对非住宅用户收取的燃气费最高。相反，固体生物质价格由市场根据燃料热值决定，燃料热值则与所用原料相关。

如果不考虑外部成本，例如环境和健康影响，煤炭是最廉价的供暖燃料（表 4）。在空气质量和低碳化关切促使政策要求供暖燃料多元化的情况下，中国许多省份的生物质都比天然气便宜。如果能源需求要求进口替代煤炭的燃料，按 2015-16 年进口价格、以单位能量价格计算，市场价格 90 美元（人民币 595 元）至 130 美元（人民币 860 元）每吨的木质颗粒比液化天然气花费更少。木质颗粒和液化天然气进口都要进

[10]门站是指天然气输配企业连接到输送系统的地方或测量站。

行前期投资，建立物流基础设施，这不在本分析的范围内。然而，进口木质颗粒在中国供暖市场可能不会发挥什么作用，预计将会重点发展国内的生物质。

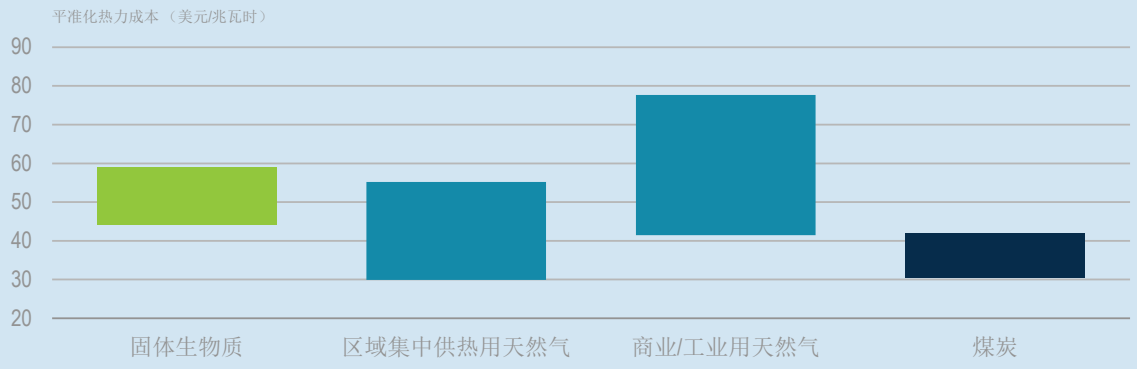
表 4 • 中国最终用户供暖燃料价格对比

燃料	热值（吉焦/吨）	燃料成本（美元/吉焦）	假定锅炉效率（%）	交付的热力燃料成本（美元/吉焦）
天然气（非居民）	0.036*	8.4 – 19.2	92%	9.1 – 20.9
天然气（集中供暖企业）	0.036*	6.7 – 13.4	92%	7.3 – 14.5
取暖油	41.9	16.5	88%	18.8
煤炭	20.9	3.6 – 5.0	65%	5.5 – 7.8
生物质颗粒	12.6	7.2	80%	9.0
木质颗粒	18.0	9.2	85%	10.8

说明：*天然气热值按吉焦/立方米计算。非居民天然气价格的范围是基于 24 个省市的最低值和最高值。集中供暖企业的价格是基于 7 个省市的最低值和最高值。把天然气价格转换成 MBtu（百万英热单位），用每吉焦的价格除以 0.947。
资料来源：IEA 基于 CNREC 提供的信息所做的分析（2017 年 4 月），与作者电邮通信；Hong，H. （2017）。

能源定价并不是唯一的考量；在完全成本比较中，需要考虑更广泛的参数。例如，中国兆瓦级天然气供暖锅炉的每千瓦投资成本为大约 100 美元（人民币 660 元），低于全球生物质锅炉的成本估算，全球成本从约 300 美元（人民币 2200）开始。然而，对平准化热力成本的评价表明，固体生物质可以以类似于商业和工业用户天然气价格的较低的价格提供暖力。与用于集中供暖的天然气相比，生物质的平准化热力成本只有在天然气燃料价格大于 12 美元（人民币 80 元）每吉焦的时候才具有竞争力。在 2015 年，有 12 个省份的门站天然气价格属于这一类别，包括北方采暖地区的河南、北京、天津、河北、辽宁和山东。鉴于表 4 中的成本假设，生物质燃料的平准化热力成本将无法与煤炭形成竞争。只有在燃料成本低于 10.5 美元（人民币 70 元）每吉焦的时候，天然气集中供暖的平准化热力成本才能具有成本竞争力（图 14）。

图 14 • 固体生物质、天然气和煤炭的平准化热力成本对比



说明：平准化热力成本范围的计算是基于表 4 中展示的数据和其他假设。投资成本假设是，生物质 300-500 美元/kWth 装机容量，天然气 100 美元/kWth 装机容量，煤炭 75 美元/kWth 装机容量。成本范围仅适用于专门供暖的锅炉，而不适用于热电联产系统。

燃料成本是固体生物质、天然气和煤炭平准化热力成本最大的总体影响因素。然而，对于固体生物质而言，初始投资成本占供暖总体成本的比例要远高于其他两种燃料。

这表明，如果国内制造企业能降低固体生物质锅炉投资成本，生物质可以具有更好的竞争力。化石供暖燃料（天然气和煤炭）的碳税也将会让生物质更具吸引力。

还需要考虑热力需求附近是否有足够的生物质资源，只能在 100 公里半径之内采购，以及随后扩大燃料生产和供应链的可能性。虽然扩大以生物质资源为原料的燃料生产可能充满挑战，但也可以为农村经济发展提供机会（例如，生物质制粒和燃料供应业）。对于天然气，可用资源的位置也是一个关键考虑因素，包括气田、液化天然气进口码头、管道和储存设施。

市政府按照每平方米的价格制定热力价格，集中供暖企业可以针对民用建筑和公共建筑进行收费。符合新能效标准的建筑所支付的单位热量的费用要比老建筑高。在北京、太原和西安等城市开展的一项评价显示，按照当前的热力价格，集中供暖企业利用生物质或天然气向现有建筑存量供暖将不会盈利。在北京和西安能效更高的新建建筑中，按照允许的热力费计算，两种替代燃料都可以盈利，但是在太原不能盈利。

当前的热力价格是以煤炭和工业废热较低的燃料成本为基础。因此，从煤炭改为使用天然气和生物质将需要重新评估热力收费，继续努力提高建筑能效。在某些城市，环境法规需要修改，允许使用配备排放治理的生物质技术，实现能源生产低碳化，提高空气质量。

要以空气质量为理由用固体生物质燃料取代煤炭，生物质燃烧系统必须提供高效燃烧，拥有排放控制设备，大幅度降低颗粒物排放。这将需要增加专用生物质热力和热电联产系统，以及提高燃料生产技术（例如造粒厂）的制造产能。可以预见，生物质供暖增长初期将会来自供暖专用锅炉，然后逐渐转变为融入热电联产系统。需要在以下领域采取行动：

- 制定和落实生物质燃料标准，确保燃料质量一致；
- 增加自动化程度更高、技术更先进的中小型生物质锅炉的供应；[11]
- 建立并强制执行生物质锅炉排放质量标准。

此外，还需要加大政策支持力度。国家能源局在 2016 年发布的生物质发展五年规划分配了 25 亿美元资金用于培育固体生物质燃料消费，简要介绍了为民营企业在该领域进行投资提供支持。然而，并未明确这一资金将如何使用。固体生物质供暖燃料生产的补贴已经终止，但可能会重新启动。或者，可以引入利用生物质取代煤炭的经济激励，比如针对天然气的鼓励政策。也可能需要政策干预，帮助建立农业废弃物供应链，以便增加以这些资源为基础的燃料生产。

固体生物质与空气质量

中国供暖行业逐步淘汰煤炭消费的政策为替代燃料开启了大门，例如，固体生物质燃料。生物质燃料一般比煤炭含硫量和含氮量都低，所以排放的二氧化硫和氮氧化物也较少。然而，固体生物质的不完全燃烧可以导致大量颗粒物排放（沼气或液体生物燃料的颗粒物排放量不大）。要减少这些排放，实现空气质量获益，生物质系统必须能够高效燃烧，并配备排放控制设备。现代排放控制设备可以把颗粒物排放降低 99%以上（Biomass Energy Resource Centre，2011）。在欧洲，先进的生物质炉具和锅炉是标配，这会增加锅炉投资成本，所以在集中供暖系统中比单个建筑物中更加经济有效。

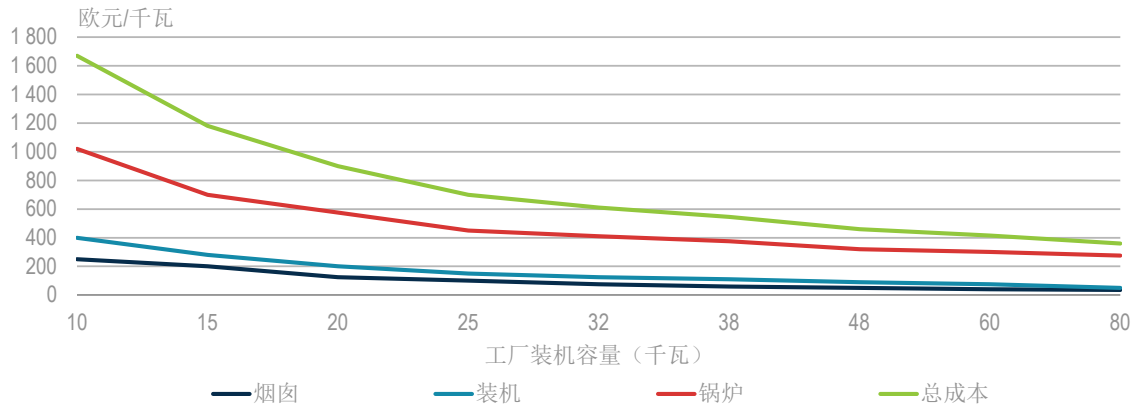
[11] 中国目前使用的很多生物质燃烧系统都是利用燃煤锅炉改造的。

各种可再生能源方案的经济性

可再生热力方案的成本范围很宽，即便是在同一行业和同一国家也是如此。成本取决于多项因素，例如，投资成本、当地气候因素、建设条件（例如日照水平）、当地资源条件（例如生物质）和能源征税。一般而言，在集中供暖系统中的应用比单体建筑中的应用要便宜很多。一些主要的可再生热源的国际对标数据如下：

- 地热集中供暖系统与化石燃料相比通常很有竞争力，成本范围在 45 美元（人民币 295 元）/热兆瓦时（MWhth）到 85 美元（人民币 560 元）/热兆瓦时（IEA， 2011）之间。中国最近的一些项目甚至还有更低的成本（文本框 8）。
- 用于集中供暖的大型太阳热能系统比小型屋顶系统要便宜很多。丹麦是太阳热能集中供暖的全球领袖，装机容量超过 900 MWth，带季节性存储的大型系统（>10000 平方米）平均成本是 54 美元（人民币 355 元）/热兆瓦时，但是典型的小型家用系统成本是 134 美元（人民币 885 元）到 205 美元（人民币 1350 元）/热兆瓦时。然而，是否能实现费用最低的系统要看是否有廉价的城市用地可供使用，比如一些丹麦小镇上有这样的土地。
- 对于用于集中供暖的较大型生物质锅炉，热力交付成本是 30 美元（人民币 200 元）到 80 美元（人民币 530 元）/热兆瓦时。生物燃料成本会影响这些结果。例如，木质颗粒的价格为每吨 110 美元（人民币 660 元）到每吨 145 美元（人民币 960 元），燃料成本会是 23 美元（人民币 150 元）到 31 美元（人民币 205 元）/热兆瓦时。如果通过工业工艺现场生产，生物质废料的成本一般较低，有些时候是零成本。
- 与单体建筑中容量较低的装机相比，用于集中供暖的生物质供暖和生物质热电联产机组的投资成本会从规模经济效益中获益（图 15）。欧洲大型生物质集中供暖系统（例如，几兆瓦）的典型投资成本一般在 530 美元（人民币 3500 元）到 1200 美元（人民币 7500 元）每千瓦之间。

图 15 • 生物质锅炉投资成本（按装机容量计算）



资料来源：复制自 Rakos，C.（2017）。

关键信息• **生物质锅炉的成本很大程度上取决于工厂的装机容量，因为规模经济效益可以使区域集中供暖系统的成本相对而言低于较小的局部应用（例如，单体建筑物）。**

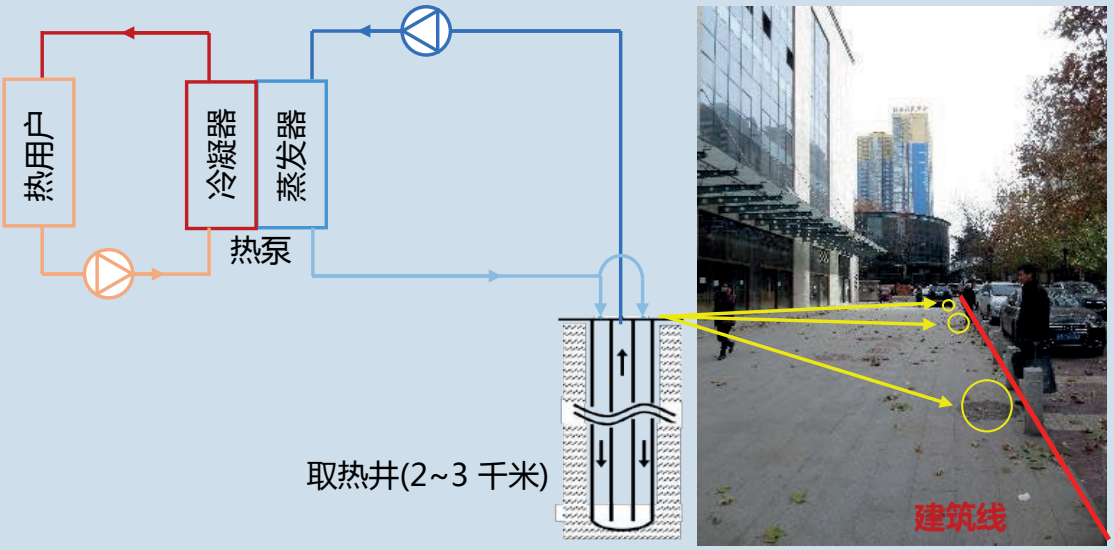
尽管可再生热力方案在规模较大时价格具有竞争力，但在中国依然难以与化石燃料进行竞争，尤其是煤炭。现有以煤炭成本为基础的热力定价费率可能是发展可再生能源的一大障碍（文本框 8）。政策框架还应考虑热力定价费率和市场环境是鼓励还是阻挠并入可再生能源。可再生能源可能不一定会提供所有的热力生产，但却能在综合化、多元化的能源生产组合中发挥关键作用（文本框 9）。

文本框 8 • 案例研究：陕西沣西深层地热供暖系统

地热供暖被中国主管部门认为是一种可以避免空气污染的方法。地热储量丰富、分布广泛，使得地热热力具有很大吸引力。在陕西省西安市附近的沣西新城，有四个用于商业建筑的地热项目，供暖面积达到 7 万平方米。地热能源温度大约 70°C，取自深 2000 米的含水层（见示意图）。传统的地热井是先从其中抽水，然后在采取热量之后再重新注入，而沣西的热转移是在地下完成的，不需要从含水层抽水。每一口井都有装在套管里的管线。该技术对地下水利用的地质和环境风险进行了有效控制，但管线长度会造成传热效率低，从而产生一些热损。

地热井的水温不超过 30°C。需要采用热泵增温，把温度提升到满足室内采暖要求（45°C）。根据一月份寒冷天气的试验数据，平均性能系数是 4.4。*

开发利用地热热力的主要障碍是初期成本，尤其是深层地热热力。沣西的地热井成本是将近 153 美元（人民币 1000 元）每米，或大约 306000 美元（人民币 200 万元）每口井。每口井的供暖容量为 250 千瓦到 400 千瓦，这要看循环水流的情况和进水与出水的温差。假定寿命为 30 年，地热热源的成本是大约 8.24 美元（人民币 54 元）/热兆瓦时。考虑供暖系统的电力消费是大约 63 千瓦时/吉焦，**热力生产的价格就是 36 美元（人民币 234 元）/热兆瓦时。因此，深层地热热力可以与天然气锅炉进行竞争。



* 包括热泵和循环水泵的电耗，但不包括集中供暖循环水泵的电耗。
** 陕西的工业和商业电价是 0.7934 元/千瓦时。
资料来源：清华大学建筑节能研究中心

文本框 9 • 案例研究：江苏省苏州工业园区多能源系统

江苏省苏州工业园区是一个国家级经济技术开发区，占地面积 288 平方公里，人口大约 81 万。苏州工业园区是 1994 年作为中国——新加坡合作项目建立的，园区里有企业和居民区。最近也成为多能源补偿和分布式系统的一个旗舰项目，提供电力、供暖和制冷。该区域的能源供应由两座 360 兆瓦的燃气电厂，40.8 兆瓦的分布式太阳能光伏发电，一台 1.65 兆瓦的分布式燃气机组和冷加工中心提供，燃气电厂通

过 62 公里长的管网向 270 户居民提供暖力。

已经规划了进一步的开发项目，包括新增一台 3 兆瓦分布式燃气机组，25.75 兆瓦的分布式太阳能光伏发电，与太阳能光伏系统相连的 22.3 兆瓦时的储能系统，5 兆瓦的地源热泵，150 千瓦的分布式风电，以及 200 个电动汽车充电桩和 100 个企业的需求侧管理系统。到 2020 年时，将会建成 20 公里的供暖管网。通过需求侧管理和金融交易平台，把不同的能源品种整合在一起。还规划了 10 万平方米的微电网示范项目，涵盖太阳能光伏、燃气三联供、热电联产、风电、余热和储能。

鼓励推广可再生热力的政策

一般而言，可再生热力占比较高的国家会出台政策激励或制定强制要求，支持在集中供暖系统中采用可再生能源方案。需要此类干预，因为在很多国家市场价格不会考虑与化石燃料相关的外部性，例如，空气污染物和二氧化碳的排放。而且可再生能源方案比化石燃料替代品的资本成本更高，风险更大。例如，地热钻探风险大，不一定总能成功找到足够的资源。来自五个国家的例子说明了重大政策干预如何能够帮助客服这些障碍（表 5）。

表 5•支持在集中供暖系统中采用可再生能源的几个典型国家的主要政策干预措施

	可再生能源在集中供暖中的比重	主要政策干预
丹麦	51%	到 2035 年时，实现百分之百非化石燃料供暖 不允许集中供暖管网中的家庭采用取暖油供暖 对化石燃料征收高额能源税，生物质除外 对生物质热电联产实行上网电价 通过招标为集中供暖系统中的大型热泵系统提供投资补贴 制定地方热力发展规划
瑞典	80%	征收非常高的碳税，生物质除外 为某些生物质热电联产发放电力证书 禁止填埋可燃烧废料
芬兰	37%	征收碳税，生物质除外 地方政府提出要求（例如，赫尔辛基决定关闭煤炭热电联产机组，并用可再生能源进行替代） 在上网电价之外，为沼气和生物质热电联产机组提供暖“奖金” 为可再生能源提供投资补助
德国	12%	在 KFW 可再生能源计划下为可再生热力厂（固体生物质锅炉或热电联产，太阳热能，地热，热泵）以及集中供暖管网提供投资补助，前提是要满足最低的可再生热力供应要求 制定市级目标，由通常由市政府全资所有的集中供暖企业负责落实（*Stadtwerke*）
法国	15%	Fond Chaleur（热力基金）：为采用可再生能源或废料的集中供暖项目提供补贴，其目的是把可再生能源集中供暖的成本降低到至少比化石燃料热力的成本低 5%的水平 巴黎市政府在进行集中供暖管网经营权招标时就提出了可再生能源占比要求

关键信息•需要进行一系列政策干预，克服阻碍集中供暖市场中可再生能源大规模推广的障碍。.

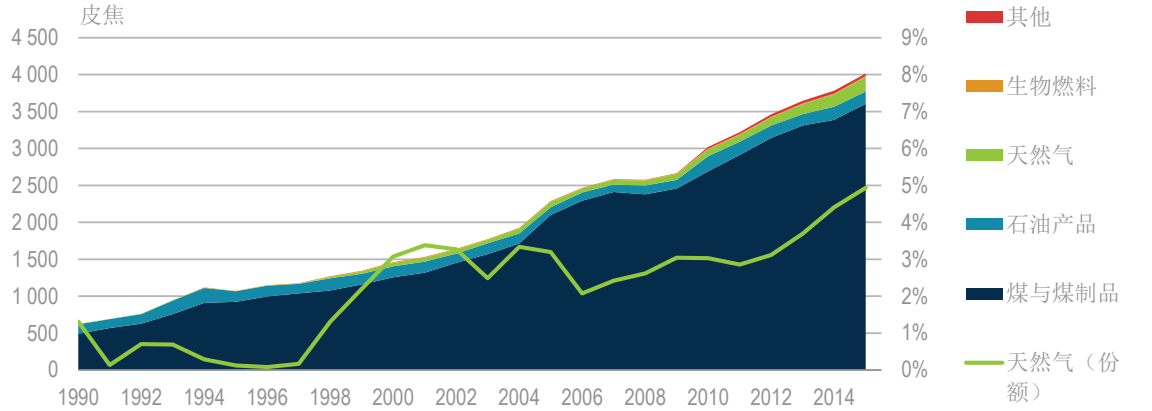
天然气的作用

中国集中供暖系统中，天然气作为燃料的用量在增加，在抵消中国北方采暖地区管网中效率低下、污染严重的燃煤热力方面可以发挥更大的作用。政治上大力支持改进空气质量，这促使来自燃气锅炉和热电联产的热力生产越来越多。

煤炭成本相对较低，使其能够继续在中国的热力生产燃料结构中发挥主导作用。但近期中国政府推行的“煤改气”提高了天然气供暖所占的份额。2016 年，“煤改气”成效显现：天然气供暖所占比重达到 12%，天然气热电联产比重达到 3%。预计“十三五”规划中改善空气质量的目标会减少燃煤热力的比重，增加燃气热力的份额。

北方采暖地区现有煤基集中供暖系统已经逐渐转变为天然气和其他替代燃料。2015 年，区域集中供暖消费的天然气大约为 110 亿立方米。集中供暖所用天然气的大约 80%集中在六个省，其中北京占比最大，达到 35% （地图 3）。严重的空气污染，特别是在人口稠密的京津冀地区，推动了“煤改气”。北京市区的热力现在完全由四个大型热电联产厂提供。

图 16•1990-2015 年天然气在中国热力生产中的比重

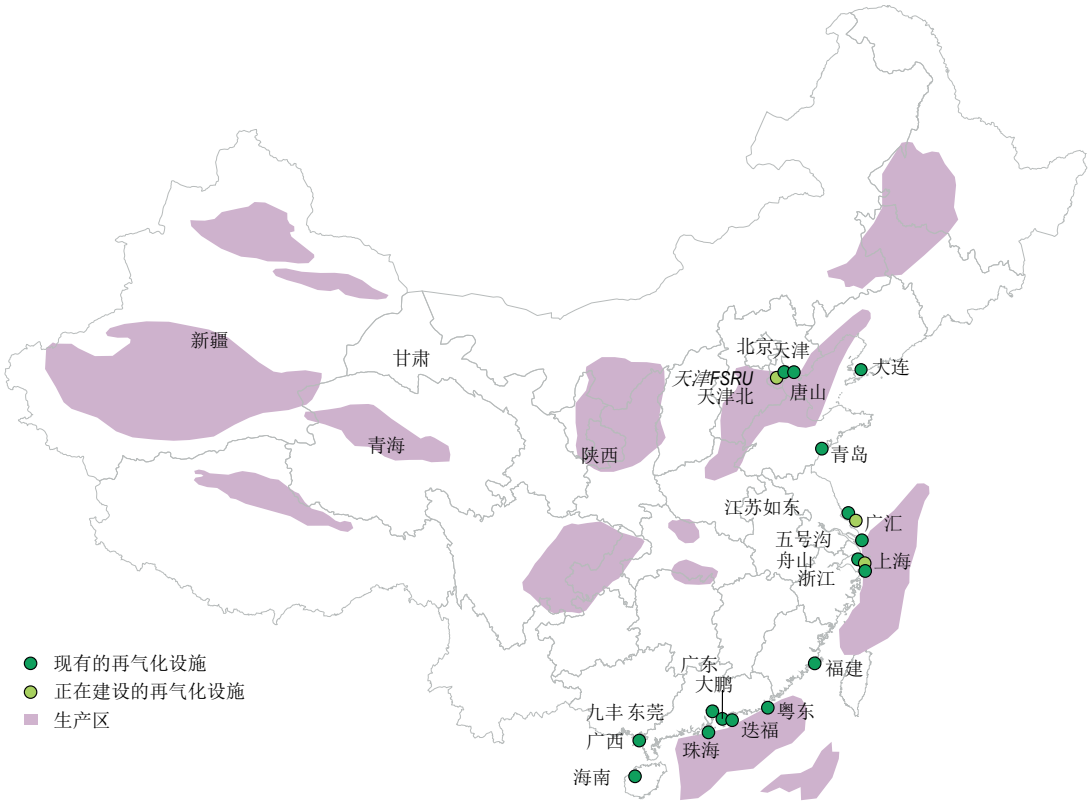


资料来源：IEA（2017c），*Natural Gas Information*（数据库），www.iea.org/statistics。

关键信息•近年来，天然气在集中供暖生产中的比重不断增加，这一趋势在未来十年很可能还会继续保持。

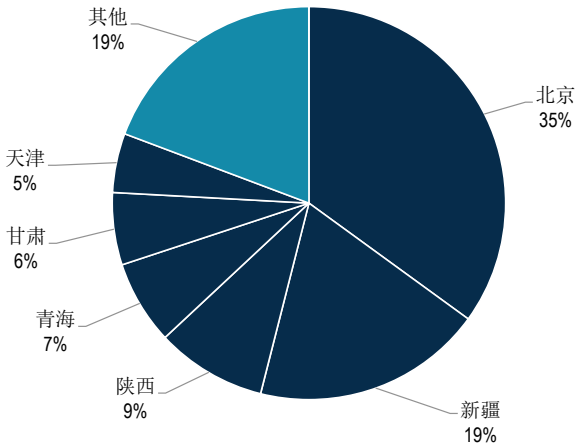
除了政治和财政上的支持，煤改气工作还包括加快天然气供应安全方面的工作。例如，在京津冀地区，唐山和天津的再气化码头通过液化天然气为实现该地区天然气供应的多元化提供了机会，但冬季会面临基础设施方面的挑战。其他省份，例如新疆，要么可以自产天然气，要么位于里海地区输气管道进口路线上，可以获得多种天然气气源。

地图 3•2015 年各省天然气在城乡集中供暖消费中的占比



本地图不损害任何领土之地位或主权，不损害国际边界和界限的划界，不损害任何领土、城市或地区的名称。

图 17• 市县区域供暖天然气使用量



资料来源：住建部（2015），《中国城乡建设统计年鉴》。

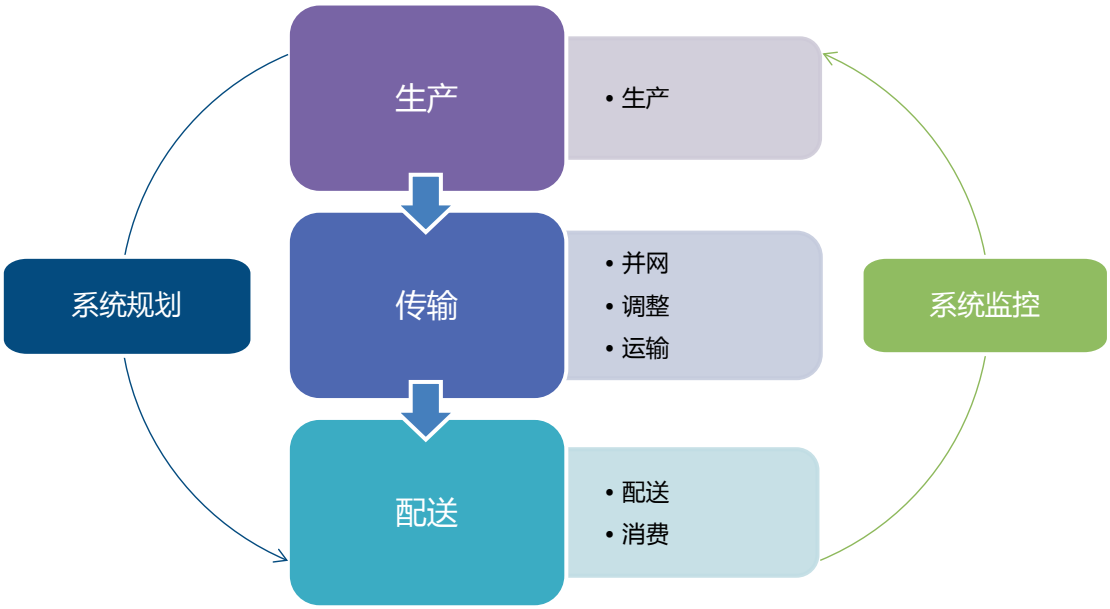
关键信息• 中国提升空气质量的政策将会推动天然气在集中供暖生产中作为燃料应用的增长潜力。

天然气（或液化天然气）也可用于燃气吸收式制冷机和来自再气化工厂的废弃冷能。例如，可用于夏热冬冷地区的热电联产或冷热电三联供生产，或者夏季制冷需求大的城市中心内或周边地区。

商业模式

区域集中能源供应系统商业模式包括能源服务产业链上一系列的所有权、融资和收入选择，从生产到输送、输配和消费（图 18）。系统监控与系统规划对于确保有效的定价、投资和管理商业模式决策都是至关重要的。可以通过分析改变产品、服务和定价对满足客户需求所产生的影响，实现集中能源供应系统商业模式的创新。

图 18• 把集中供暖市场放在更广泛的能源系统框架中进行考虑



关键信息• **商业模式和市场框架应考虑集中供暖系统在更广泛的能源市场中的作用，以及是否切实可行。**

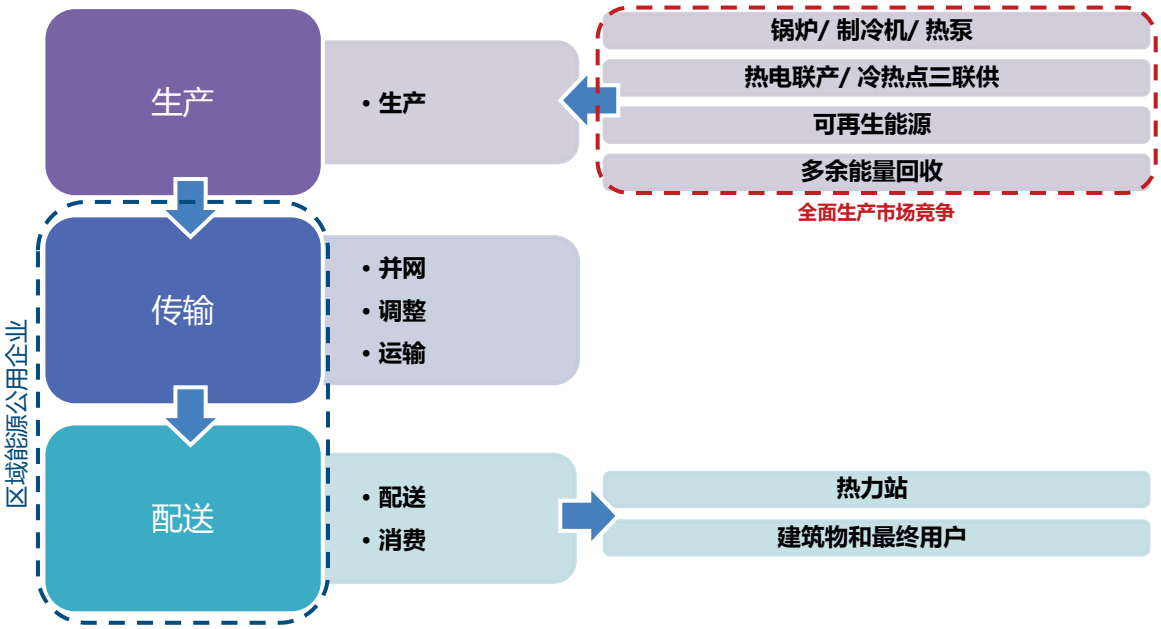
集中能源供应商业模式在中国的应用

本节对三种具有不同市场结构的商业模式进行了概念探讨，具体包括：（1）能源生产竞争模型；（2）带有第三方准入的公用企业主导模型；（3）节能服务公司综合模型。

能源生产竞争商业模式

能源生产竞争商业模式为区域集中能源供应网络中的供暖和供冷创造了充分的市场竞争（图 19）。多个能源供应企业充分竞争的好处之一是，可以通过创新和提高效率降低能源市场定价。然而，能源公用企业完全把控能源生产、输送和输配的这种典型垄断会阻断充分竞争。此外，需要适当的系统规划和监测，确保充分市场竞争不会导致不利的能源定价（例如，如果短期生产过剩影响主要集中能源供应企业的长期资本成本）。

图 19• 能源生产竞争商业模式



关键信息• 全面的能源生产竞争会把能源生产从提供集中能源供应的公用企业手中剥离，使得多个单位和多种能源生产类型可以彼此进行竞争。

建立充分的市场竞争有助于确保以经济有效的方式实现向可持续性更强、效率更高的集中能源供应系统的转型。幸运的是，中国已经在电力市场自由化方面积累了大量经验。从中汲取的教训可用于竞争性的热力市场（文本框 10）。中国集中供暖管网的改进（例如，配备监测和控制的热计量）也为市场竞争开辟了道路（文本框 11）。

文本框 10•中国电力市场的自由化进程

2002 年的中国电力工业结构调整把一家单一的国有企业拆分为七家企业。国家电网和中国南方电网是其中的两家，这两家是“超级电网”输电企业，不会面临竞争。如同国外市场的同行一样，中国电网运营商面临的电力市场自由化压力越来越大。中国政府已经落实相关规定，要求电网企业开放输配电统计数字，为网络系统成本提供市场信息。

垂直整合的电网垄断通常具有经济动力，歧视分布式能源生产企业，青睐传统发电企业。例如，天然气供应基础设施和高气价对燃气热电联产和三联供市场的推广形成了制约，造成其发展缓慢。向电网出售过多的电力会引发第三方非歧视性接入输电网络的问题，这会增加热电联产和三联供技术投资的成本效益。受到监管的天然气和电力价格正在慢慢被推翻，已经在几个产业园区、数据中心和公共设施建立了成功的试点项目。

中国还在开发有竞争力的电力批发市场，包括一个省级试点能源交易平台。许多电力零售商正在进入这一新兴批发市场。中国政府已经计划在 2015 到 2020 年期间投资人民币 2 万亿元（3150 亿美元），改善电网基础设施。能源监管部门最近决定，只有 75%的电网资产成本可以分配到配电环节，限制输配电的过度投资。

文本框 11• 案例研究：定制化热力公用企业

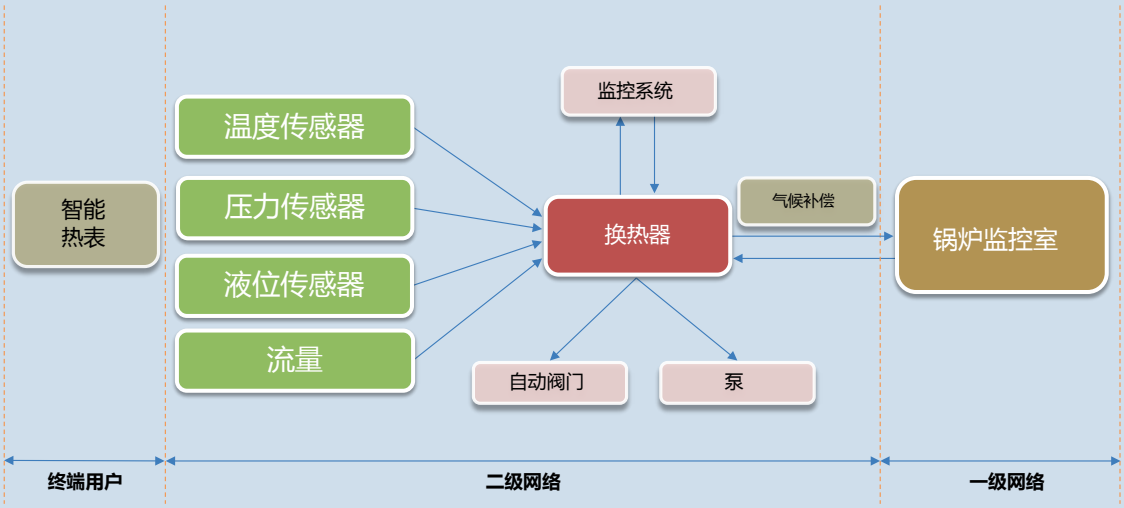
为确保建筑最低室内温度，中国的供暖系统通常采用计划性热力生产。中国现行的集中供暖系统会把位于距热力站不同距离、不同类型的建筑物连接起来。热力企业通常依靠手动平衡阀限制热力消费者对供暖的控制权，或使其没有控制权。

为了提高总体系统的效率，需要针对需求对供暖温度和供暖量做出及时、可调节的调整。恒定的热流和手动平衡管网不能满足最终用户的个性化热力需求，不能优化系统。要以尽可能经济有效的方式供应适当的热量，整个系统都需要从以供应为导向转变为以需求为导向。这就意味着，需要对供应系统进行调整，在使系统保持水力平衡的情况下，满足变动的需求。

变动需求法加强了热力市场新参与企业的竞争能力。盾安是中国的一家大型企业集团，是这一传统上垄断的市场的新挑战者之一。盾安在河南省长垣县的集中供暖项目中进行了多项技术创新试点，以提高能源效率，改善最终用户的热舒适度。对于最终用户而言，这种可以定制供暖的方法包括能够根据居住者需求调节室内温度的控制系统。建筑内的智能热量表能够把热力需求告知给供暖管网，从而优化二级管网分配到建筑物的供暖温度和供暖量（见示意图）。

在添加采用自动阀门和传感器控制换热器的远程监测和控制系统后，二级管网可以实现变热供暖方法。采用气候补偿器根据室外实时温度调节热流温度。电子传感器跟踪液位、流量、管道温度和压力的变化，这样系统就可以对变动的需求做出响应。采用这种方法，可以对数据进行收集和分析，了解整个管网上的热力生产、输送、输配和消费情况。

总之，这使得一级管网可以以较低流量和较高温差运行，大大减少了热量损耗和泵送能耗，既为集中供暖企业也为消费者节约了资金。在这些措施的帮助下，长垣县的这个项目已经实现了 0.26 吉焦/平方米的能源效率——比当前行业水平提高了 19% 。

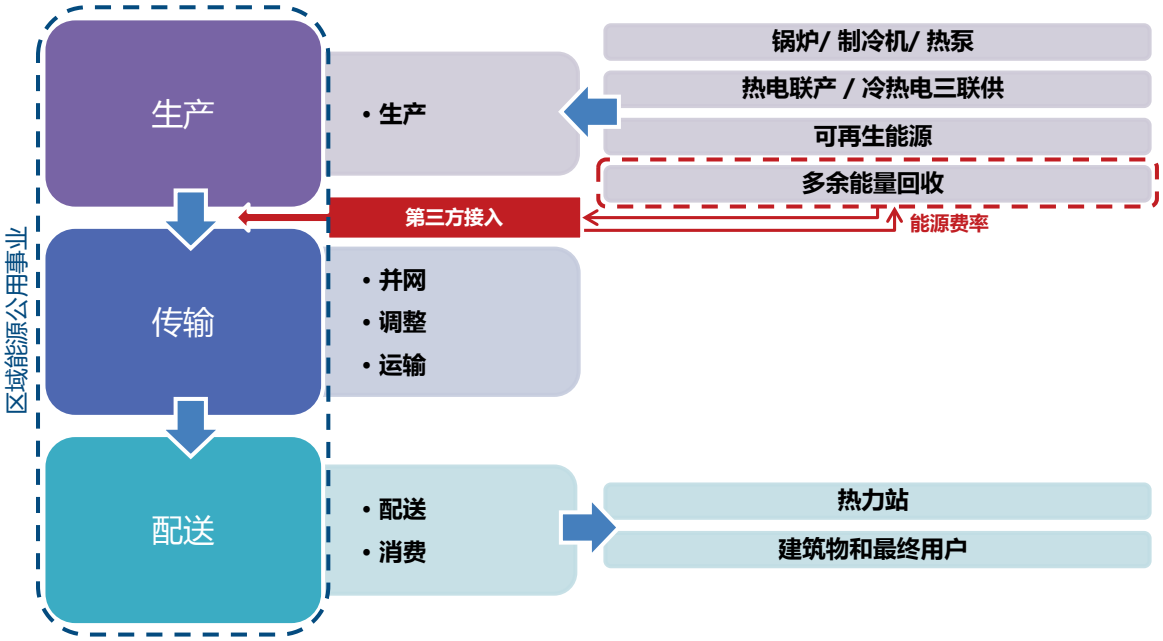


公用企业牵头、第三方接入的商业模式

公用企业牵头、第三方接入的商业模式使得负责集中供暖的公用企业能够从第三方采购能源（图 20）。这种方法允许公用企业将最经济有效的能源并入网络，同时还可以实现

若不利用便会废弃的能源的商品化，比如工业余热。这一方法也可以根据环境影响情况（例如，适当的激励机制，价格信号或征税方案）选择能源品种，鼓励第三方能源供应企业帮助该公用企业满足更广泛的可持续性目标。

图 20 •用于余热回收的公用企业牵头、第三方接入能源的商业模式



关键信息• 第三方接入有助于能源生产竞争，会通过能源费支付第三方，而主要的能源生产还是在负责集中能源供应的公用企业里。

在集中能源供应市场上已经存在公用企业主导、第三方接入的商业模式实例，包括中国的例子（文本框 12）。如充分市场竞争一样，政策框架和市场环境需要确保有吸引力的能源价格，以鼓励第三方能源供应企业参与到市场中。这也包括，保证适当的条件和市场稳定性（例如，通过合同约定和确定费率），解决第三方企业的关切，例如，工业余热供应企业，如果不断变化的能源需求和生产会影响到它们的经营活动，它们可能不会对提供最低能源服务（即热力）感兴趣。

文本框 12 •案例研究：山东青岛热力市场综合商业模式

青岛市致力于建设一个非煤能源系统，采用低温热力输配管网。青岛不是使用煤炭，而是使用天然气、太阳热能、浅层地热和从工业工厂回收的余热为其集中供暖、供冷、电力生产和输配系统提供动力。

为实现这一转型，青岛实行零采购价格，允许把余热用于集中供暖服务。在政策的支持下，因为节约了燃料成本，总体项目的财务内部收益率为 10%。如果没有免费余热，该项目在经济上将是不可行的（表 6）。

该项目会安装小型天然气锅炉、利用来自污水厂和工业工厂的余热回收系统、热泵系统、太阳能采暖系统、储热系统和低温管道，分布在八个地方。这些措施将会帮助该市减少二氧化碳和污染物的排放，通过改善空气质量和降低家庭采暖开支，直接惠及 42 万人。

表 6•青岛热力项目各种热源的财务内部收益率

热源	财务内部收益率
1.天然气	- 1.5%
2. 浅层地热	负值
3. 太阳热能	负值
4. 余热利用	24%
总体	10%

该项目由青岛市政府全资所有的青岛能源集团负责落实。地方政府已经向亚洲开发银行的普通资本资源申请了 1.3 亿美元（人民币 8.6 亿元）的贷款，帮助为该项目提供融资。贷款期限 25 年，包括 5 年的宽限期。青岛能源集团通过股权方式融资 1.336 亿美元（人民币 8.85 亿元）。

资料来源：亚洲开发银行（2017）

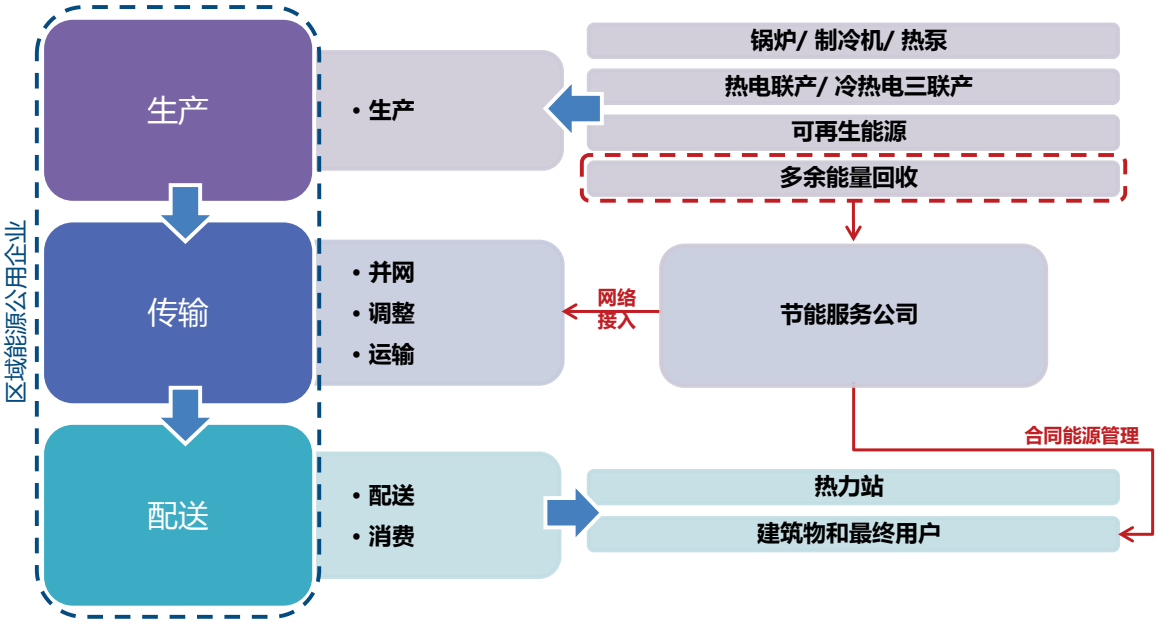
节能服务公司综合商业模式

与节能服务公司整合可以简化公用企业与第三方之间的协议，使能源能够进入集中能源供应网络，改善需求侧管理。节能服务公司对能源供应（生产）和消费都有影响。就能源供应而言，节能服务公司可以成为能源生产者与批发市场之间的中间商，因为节能服务公司可以代表不能参与电力市场的小规模能源供应企业进行能源交易（图 21）。

就消费而言，节能服务公司一般会通过共享节约或保证节约合同与消费者达成协议。在共享节约合同下，按照提前约定的分成比例分享节约的成本，在保证节约合同下，节能服务公司保证一定程度的能源节约。

得益于先进的信息和通信技术，例如虚拟电厂，节能服务公司可以通过汇集和管理各种能源资源成为综合能源服务供应企业。这种方法让节能服务公司可以成为智能电网中不可分割的一部分，并结合分布式能源、储能和能源需求（商业、工业、住宅和电动车辆）优化集中能源供应网络。

图 21•节能服务公司综合商业模式



关键信息• **在节能服务公司综合模式下，与节能服务公司签署一份协议就可以实现几份允许多余能源回收（或其他能源类型）进入集中能源供应系统的较小规模的协议。**

中国的节能服务公司市场是世界上最大的，并且已经有能力在集中能源供应系统中发挥关键作用（文本框 13）。中国节能服务公司市场 2015 年的收入达到了 540 亿美元（人民币 3710 亿元），每年帮助实现节能 3600 拍焦（1.24 亿吨标准煤）。自 2010 年以来，节能服务公司的数量已经增加了六倍，到 2015 年时已经超过 5400 家，累计创造了 60 万 7000 个就业岗位。管理集中能源供应系统中的能源供应和消费对于节能服务公司的市场增长具有重要意义。

文本框 13 • **案例研究：河北唐山节能服务公司综合商业模式**

迁西县位于唐山市东部，是一个拥有大约 39 万人口的行政区域。以燃煤锅炉为主的集中供暖历史上一直是室内采暖的主要来源。建筑面积和区域热力需求的迅速增长，还有对煤炭消费的限制，给实现迁西的能源和环境目标带来了挑战。

2014 年，迁西建立了一个示范项目，回收附近两个新建钢厂的余热，目的是循环利用三类工业余热，用于集中供暖管网：高炉冷却水、高炉渣冲洗水、氧气顶吹转炉和轧钢加热炉混合蒸汽。利用这种热力回收，估计供暖潜力为 217.5 兆瓦，一直到 2030 年都可以为该地区的基本热力负荷提供服务。

节能服务公司迁西和然节能科技有限责任公司已经与当地政府建立了一家从事集中供暖的合资企业。该集中供暖企业与地方政府达成了一项特许经营权协议，与本地钢厂达成了一项余热利用长期合同。然后，节能服务公司按照共享节约的原则，与这家特许集中供暖企业签订了工程、采购和建设合同。节能服务公司负责为项目投资提供第三方融资。

集中供暖企业从地方政府手中购买服务集中供暖管网的特许经营权，从钢厂回收的余热价格是人民币 4.5 元（0.69 美元）每吉焦。当地用户支付的热力价格是人民币 23

元（3.53 美元）每平方米。

该项目分为三期。项目一期总投资为人民币大约 2.83 亿元（4300 万美元），包括运输管道、工厂内的管道、热回收设备和一个新的供暖站。二期预计还要投资人民币 5100 万元（770 万美元），三期再投入人民币 1.1 亿元（1700 万美元）。完工后，预计该项目在 2016 年可以把每年的热力生产成本减少将近人民币 3000 万元（450 万美元），2030 年时可以达到人民币 6300 万元（USD 950 万美元）。整个项目的投资回收期约为七年，横跨三个阶段（表 7）。

表 7•迁西余热利用项目三期累计投资和回报

百万人民币	2016	2020	2030
长输管道	170	170	170
工厂内的设备和管道	113	113	128
热力站	*20*	*20*	*20*
钢厂内的管线	*45*	*45*	*55*
换热器	*30*	*30*	*35*
吸收式热泵	*18*	*18*	*18*
先进热力站	-	46	146
总投资	**283**	**334**	**444**
每年的成本降低	**28**	**41**	**63**
回收期（年）	**10.1**	**8.1**	**7.0**

资料来源：IEA ETP （2016）

行业耦合对商业模式的影响

电力、热力、制冷市场的耦合给集中能源供应系统商业模式带来了挑战和机遇，这会影响需求管理和网络优化。

集中能源供应网络需要管理占比越来越大的波动性电力供应来源，比如太阳能光伏发电或风电，以及变动的能源需求。由于波动性电力供应占比增大，加强管理电网间歇性的能力，实时维护电能质量，就变得越来越重要。

与邻居共享能源资源或过剩能源，可以帮助实现未能在区域能源公用企业内进行管理的能源的货币化。通过把同伴相互连接起来，这种合作经济商业模式可以把利用不足的资产变废为宝。共享经济的兴起正在催生能源需求和储能管理的业务创新需求。建筑物所有者可以通过屋顶租赁的分布式太阳能光伏市场分享电力，这也可以转化为区域热能分享的商业模式。

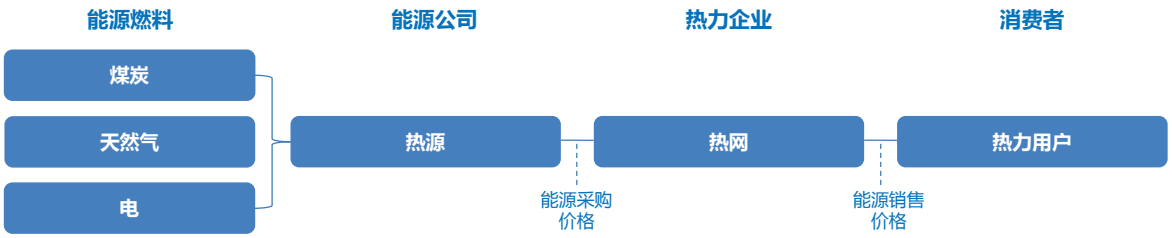
通过允许能源消费者从作为整合企业的零售商那里购买能源或向其销售节约出来的能源，可以改进需求管理。这种商业模式可以通过利用非峰值时存储的价格较低的能源，减少区域能源网络中的高峰负荷。中国有将近 70%的电力需求来自大型工业消费者，不管有没有中间的整合企业，这些消费者之间的电力交易潜力都很大。

定价方案

集中能源供应价格由省市主管部门进行监管。国务院在 2006 年下令逐步推进热力市场化，把其作为商业产品，以供暖量定价格（国务院，2006）。这一原则体现在 2007 年修改后的节能法中（中央政府，1998），在一项允许非公有资本投资供暖设施的行政措施中也得到反映。虽然价格由地方政府制定，但生产者和消费者在协商之后可以直接决定价格。价格分为三部分：热力生产成本、输送成本和最终用户价格（按最终用户类型分类）。最终价格由热力成本（燃料成本、资本、运营及相关维护费用）、税费和不超过总成本 3%的利润组成（国家发改委，住建部，2007）。国家发改委最近建议在某些地区进行进一步的市场化价格改革（国家发改委，2017a）。

理论上，这种三元定价结构可以统筹热力生产效率和管网投资回报。然而，实际上热力账单在很大程度上是按照单位面积计算的一个固定费用，不管消费多少热力（图 22）。热力价格作为社会福利的一部分，受到严格监管，从而确保低收入消费者能够享受供暖服务。大多数雇主为员工支付采暖费。虽然中国政府的确有鼓励以消费为基础的计费方式，但只要热力没有完全商品化，消费者就不会受到定价激励。

图 22 •中国热力定价结构



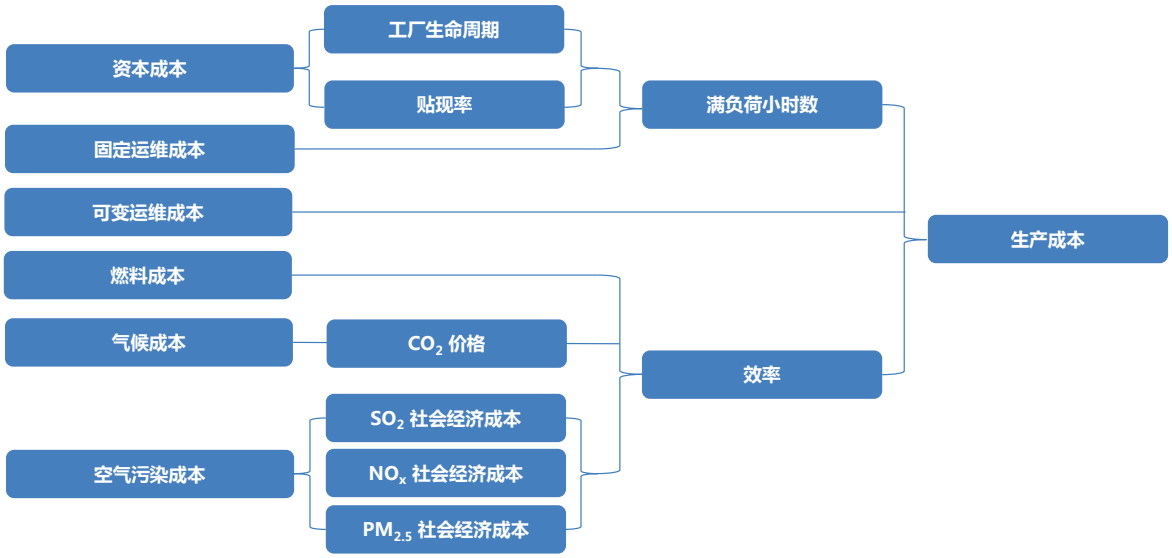
关键信息• 三元定价结构反映了热力生产、输配和消费的真实成本，可以提高能效，允许结构更广泛的能源投入组合，但是需要战略转变，取消中国目前的固定费率定价结构。

虽然中国的煤炭市场在进行自由化，但供暖企业不能把燃料成本的变动转嫁给受到监管的热力价格。煤炭价格攀升已经导致多家企业抱怨目前的供暖收入让它们无法维持和改善供暖服务。热力市场传统上竞争有限，大的垄断供暖企业有强烈的动力夸大由于监管部门的政策而造成的业务损失，以为其生产和输配活动争取交叉补贴。在第三方可以向集中供暖管网供应余热或可再生热力的情况下，由于现有资产的利用率较低，对能源公用企业的激励可能进一步夸大。

余热定价的系统分析

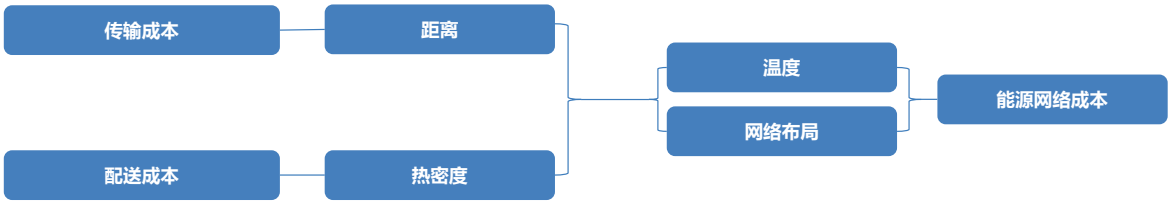
系统化定价方法旨在将总体系统成本和效益分配给相应的市场参与者。理想的情况是，监管部门需要以对整个社会的成本和效益为基础，调研每一种供暖方案的“社会经济效益”潜力。特别值得注意的是，生产成本要反映投资成本、燃料成本、运营和维护成本以及间接成本和与环境外部性相关的征税，包括空气质量损害成本（SO_2、NO_X 和 PM 2.5）和二氧化碳排放成本。一般来说，这种系统化方法要考虑需求和供应一体化方案，建立基线，提供参考情景，发现和评估基线的高效替代方案，比较各种方案的长期成本和收益（图 23，图 24，图 25）。

图 23•集中供暖系统的生产成本结构



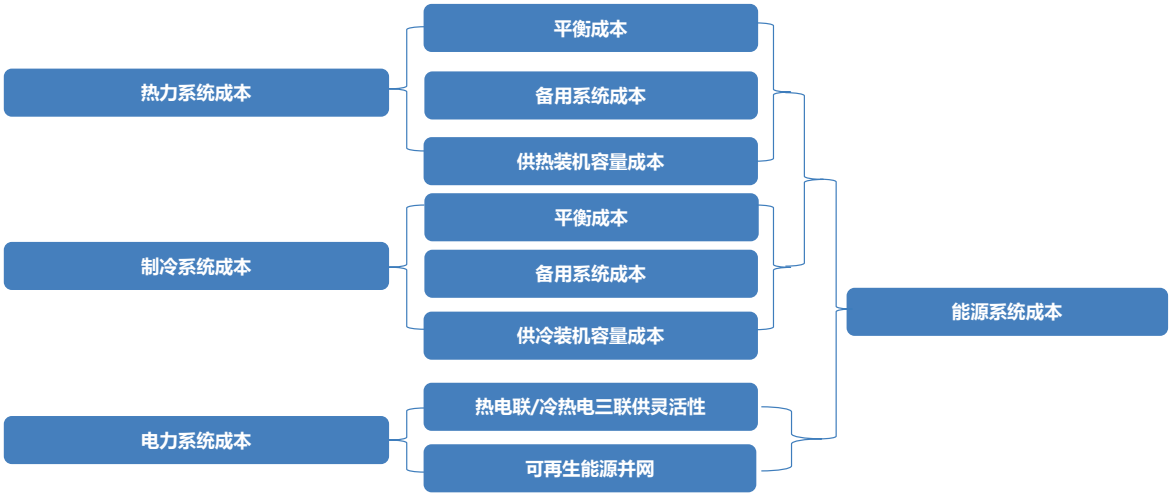
关键信息•能源生产成本是生产系统、燃料和环境影响的成本总合。

图 24• 集中供暖管网成本结构



关键信息•集中供暖管网成本是输送和输配成本之和。

图 25 •综合集中能源供应系统成本结构



关键信息• 综合集中能源供应系统成本是热力、供冷和电力成本的总合。

零成本余热

如果政府尚未做好准备，或不能从系统化和社会化视角对成本和效益进行量化，可以通过鼓励热力企业利用余热落实免费余热政策。鉴于输配基础设施的资本成本高，集中供暖公用企业可以利用零成本余热源把更多清洁热力并入整个系统。政府需要发挥重要作用，建立节能义务，或制定清洁能源发展目标或减排目标。此方案以非盈利为目标，允许分享为消费者提供低成本余热产生的财务收益。

制定清洁热力目标，确定清洁热力义务

政府通过建立清洁能源义务创建市场，要求供暖企业实现热源多元化。这将鼓励企业寻找最划算的热源，可以对比替代方案对可再生热力和余热进行直接定价。中国已经设定目标，有 23 个省市承诺确保在 2020 年或 2025 年左右达到排放峰值，这比中国的国家目标（到 2030 年达到峰值）提前了 5 到 10 年。这些城市已经建立了中国达峰先锋城市联盟，这些城市占到中国城市碳排放的四分之一。提高集中能源供应效率是履行期气候变化承诺的主要政策要求。在此背景下，政府可以对集中供暖企业施加节能或减排义务。环境税和排放税有助于实现向更加清洁的燃料转型，热力企业会使用财务分析优化其燃料结构。

以次优替代方案为基础进行指数化定价

可以对照集中供暖生产中的替代方案确定清洁热力的价值。新的热源通常用来代替更贵的燃料。这一替代燃料的热力价格可以提供一种良好的价格度量，清洁热力会与其进行对标。为应用此定价模型，热力市场将需要对不同热源的价格进行定期监测，以便建立基准。

作为一种替代方法，监管部门也可以以最廉价的热力生产价格为基础，取一定百分比的折扣，确定清洁热力的价格。如果指数化方法会造成清洁热力价格过度波动的风险，监管部门可以设定价格上限，低于上限的价格设定可以更加市场化，减少对监管的依赖。

中国国情下的建议

政策和规划：以灵活的地方解决方案为先

- 需要因地制宜、有针对性的解决方案实现区域集中供暖管网的优化和多元化。
- 需要制定全国性、区域性和地方性供暖和供冷策略，绘制热力需求和潜在供暖地图，寻找热电联产、可再生能源、余热和其他选择方案的经济有效的机会。
- 因地制宜的灵活方法，包括考虑热力需求和各种热源，优于完全自上而下的方法。
- 可以要求地方政府绘制热力地图，对需求和资源进行评估，以便选择最合适的方案。
- 通过制定增加管网密度、增加分布式（即非集中式）能源潜力的城市规划，可以大大提升集中供暖管网的水平。
- 长期规划应系统化，并与余热产业发展规划同步进行。
- 提高供暖统计数据将有助于制定更好的政策。

政策和市场：在政府的支持下，逐步促进价格公平

- 需要建立清晰的政策框架和可预测的市场环境，为经济有效的热源多元化提供支撑，包括可再生能源和工业余热。
- 政策需要确保市场环境促进透明公平的价格，反映电力和热力生产的实际成本，为余热和其他燃料投入提供公平竞争的机会。
- 商业模式需要更多以服务和需求为导向。
- 清洁能源需要积极的价格信号，以便与煤炭形成竞争，例如，对新建煤炭供暖系统进行征税。
- 经济或财政激励对于缓解市场失效（例如，电力和热力的不公平定价）而言可能是必要的，包括融入环境效益，反应集中供暖系统中热力生产的“真实”成本。
- 可能需要政策干预支持建立生物质或废弃物燃料的供应链，引入燃料质量标准；考虑到北方采暖地区农业废弃物资源丰富，此类政策干预尤为必要。
- 将集中供暖纳入国家排放交易系统将有助于减少来自该行业的二氧化碳排放。

需求侧：基于需求评估制定完善的解决方案

- 为选择更好匹配供应和需求的能源路径，有必要进行需求侧分析。
- 建设新的集中能源供应系统应以需求为基础（首先评估需求），实现系统平衡。
- 为确保集中供暖和供冷的可持续发展，改善建筑围护结构降低热力需求至关重要，包括通过改造建筑物和限制建筑室内温度过高来实现（例如，通过使用仪表、传感器和控制系统）。
- 绘制热力地图还应考虑建筑节能性能，要搞明白节能措施（例如，建筑围护结构的改进）在哪些地方对于改善热力需求和集中供暖管网性能是最有效的。
- 降低建筑热力需求强度，改善热力生产，生产清洁热力，将需要能够促进能效提高的更灵活的市场结构（例如，节能服务公司）和政策框架。
- 行为和节能教育能够为改善需求侧管理提供支撑。

供应侧：逐步发展更为清洁的能源

- 供暖应以本地可用热源和集中供暖管网的规模为基础。
- 为限制空气污染，在大城市应避免建设燃煤锅炉，在中型城市应把燃煤锅炉数量降到最低或转换为清洁煤。
- 应根据本地可用资源促进余热和可再生资源的发展，包括地热和生物质。
- 热源多种多样，可以采用热电联产、燃气锅炉热回收、工业余热、数据中心余热、可再生能源，但是需要适当的定价信号和市场框架。
- 只有在环境影响评价允许的情况下，才可把地热作为一个可选方案。
- 鉴于中国余热回收潜力巨大，因此，应考虑利用余热，但支持适当商业模式的政策和市场框架是实现这一潜力的关键所在。
- 应对天然气热电联产相对于煤炭热电联产产生的多余电力进行有效地预测和管理，包括采用鼓励合理热电比的定价结构。
- 要并入更高比例的可再生能源，就需要各种各样的供应来源，通常需要建立允许可变热力生产的商业模式（例如，第三方接入）。
- 在具有本地生物质资源的地方，生物质也是集中供暖系统中替代煤炭的一种方案。
  - 预计初期固体生物质利用的最佳机会是在工业部门，乡镇和农村的集中供暖管网可以采用附近的生物质资源。
  - 与其他替代方案相比，比如很多省份的天然气，生物质燃料成本更低。
  - 虽然固体生物质燃料排放的二氧化硫和氮氧化物比煤炭要少，但要以空气质量为由为生物质燃料提供合理依据，生物质锅炉必须提供有效的燃烧和过程排放控制设备，大大缓解颗粒物排放。

国际能源署热电联产与集中供暖和供冷合作及技术合作项目

IEA CHP and DHC Collaborative（国际能源署热电联产与集中供暖和供冷合作项目）创建于 2007 年，其目的是加速经济有效、清洁干净的热电联产和集中供暖和供冷技术的全球部署。其目标广泛，包括增加可再生能源的利用，减少温室气体排放，提高能源系统的总体效率。该合作项目还致力于为利益相关者提供一个平台，分享最佳实践、政策、经验和技术解决方案。合作方包括政府、国际组织、地区行业协会和私营部门，其中包括了设备供应商和公用企业。

国际能源署热电联产与集中供暖和供冷合作项目已经出版了多份报告，为热电联产与集中供暖和供冷潜力提供了发展愿景，还概述了最佳政策实践，提出了落实这些政策时要考虑的建议。合作项目 2014 年的报告 *Linking Heat and Electricity Systems: Co-generation and District Heating and Cooling Solutions for a Clean Energy Future*（《连接热力和电力系统：建设清洁能源未来的热电联产与集中供暖和供冷解决方案》）里面有一个案例研究汇编，汇总了工业热电联产以及将热电联产与集中供暖和供冷融合的思路。本报告从诸多案例中汇总浓缩出经验教训，为分析增加热电联产与高效集中供暖和供冷技术渗透率所面临的障碍提供了有用信息，同时也发现了展示热电联产与集中供暖和供冷对于实现可持续能源系统之应用价值的各种机会。

国际能源署 *Energy Technology Perspectives 2016*（简称 ETP 2016，中文译名《能源技术展望 2016》）对可用来加速向可持续的城市能源系统转型的技术和政策机会进行了考察，包括热电联产与高效集中供暖和供冷。还对综合的先进集中供暖和供冷解决方案进行了深入的案例研究，用于建设经济、高效和低碳的地方社区。

国际能源署热电联产与集中供暖和供冷合作项目的国家积分卡（Country Scorecards）包括最近关于美国（2014）和瑞典（2016）的报告，对各国政策背景下的热电联产与集中供暖和供冷发展状况进行了回顾。报告概述了最近的政策努力，找出了项目和市场中存在的优势和劣势；评估了进一步部署的潜力；阐明了各国在发展热电联产与集中供暖和供冷时面临的挑战。每个报告都提供了一套克服市场和政策障碍的策略。

国际能源署热电联产与集中供暖和供冷合作项目得益于国际能源署集中供暖和供冷技术合作项目（简称 DHC TCP）的专业技术。自 1983 年以来，国际能源署集中供暖和供冷技术合作项目一直在开展输配系统和消费者装机设计、性能和运行的应用研究，包括热电联产。国际能源署集中供暖和供冷技术合作项目已经玩成了 80 多个研究项目，专门致力于帮助把集中供暖和供冷与热电联产发展成为节约能源和减少供暖环境影响的有力工具。研究既解决技术问，也解决政策相关问题。目前开展的项目包括：高温系统向低温系统转型的路线图，优化城镇集中供暖和供冷管网，采取以用户为中心的方法进行系统运行和管理，治理模式和部署热力管网的流程，与其他技术合作项目就未来能源系统中的低温集中供暖进行联合研究。

缩略语、缩写和计量单位

缩略语、缩写

BERC	清华大学建筑节能研究中心
BF	高炉
BOF	氧气顶吹转炉
CDQ	干熄焦
CHP	热电联产
CNREC	中国国家可再生能源中心
CNY	人民币元
CO_2	二氧化碳
COP	（制冷）性能系数
CPCU	*Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain*
DEA	丹麦能源署
DES	区域能源系统
DH	集中供暖
DHAT	集中供暖评价工具
DHC	集中供暖和供冷
EAF	电弧炉
EE	能源效率
EH	余热
ESCO	节能服务公司
ETS	排放交易计划
FYP	五年计划
GHG	温室气体
GNI	国民总收入
HDD	采暖度日数
HSCW	夏热冬冷地区
IEA	国际能源署
IEH	工业余热
IFC	国际金融公司
IIP	工业生产力研究所
IRENA	国际可再生能源机构

LCOH	平准化热力成本
LNG	液化天然气
m^2	平方米
环保部	中华人民共和国环境保护部
国土资源部	中华人民共和国国土资源部
财政部	中华人民共和国财政部
住建部	中华人民共和国住房和城乡建设部
NBS	国家统计局
国家发改委	国国家发展和改革委员会
NEA	国家能源局
NO_x	氮氧化物
NUH	北方采暖地区
ORC	有机朗肯循环
PM	颗粒物
研发	研究和开发
RTS	参考技术情景
SC	国务院
SWN	*Stadtwerke München*
TCP	技术合作项目
UNEP	联合国环境规划署

度量单位

bcm	十亿立方米
°C	摄氏度
EJ	艾焦
GJ	吉焦
GW	吉瓦
Mtce	百万吨标准煤
t	吨

参考文献

Asian Development Bank (2017), *District Cooling in the People's Republic of China: Status and Development Potential,* Mandaluyong City, Philippines.

Barton D. et al. (2013), "Mapping China's middle class", *McKinsey Quarterly*, June 2013, www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/mapping-chinas-middle-class.

BCS Incorporated (2008), *Industrial Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U. S. Industry*, prepared for United States Department of Energy, Washington, DC.

Beijing Municipal Government (2015), *Circular of Beijing Municipal Government on Printing and Issuing the Work Plan for Clean Energy and Construction Reducing Coal in Beijing in 2015* (北京市压减燃煤工作领导小组办公室关于印发北京市 2015 年压减燃煤和清洁能源建设工作计划的通知), http://zhengce.beijing.gov.cn/library/192/33/50/45/438656/60865/index.html.

BERC (Building Energy Research Centre of Tsinghua University) (2017), *China Building Energy Use* 2017, Tsinghua University, Beijing.

BERC (2016), *China Building Energy Use* 2016, Tsinghua University, Beijing.

BERC (2015), *Annual Report on China Building Energy Efficiency 2015*, Tsinghua University, Beijing.

Biomass Energy Resource Centre (2011), *Particulate Matter Emissions-Control Options for Wood Boiler Systems,* Biomass Energy Resource Centre, Montpelier, Vermont.

Central Government (1998), *Energy Saving Law* (中华人民共和国节约能源法), revised in 2007, China.

Central Government of the People's Republic of China (2010), *Renewable Energy Law* (可再生能源法), China.

CPCU (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain) (2017), *Bouquet énergétique*, www.cpcu.fr/Qui-sommes-nous/Nos-references, accessed 15 September 2017.

DEA (Danish Energy Agency) (2017), *Sino-Danish Pilot Project on District Heating and Energy Efficiency Improvements in China*, Copenhagen, https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/necc_04102017.pdf.

European Geothermal Energy Council (2017), *Geothermal Market Report 2016*, Brussels.

Euroheat and Power (EHP) (2015), *Country by Country 2015,* Brussels, www.euroheat.org/publications/country-country-2015/.

EHP (2017), *Country by Country 2017*, Brussels, www.euroheat.org/publications/country-country-2017/.

Engie (2017), *La géothermie au cœur d'un éco-quartier parisien*, www.engie.fr/actualites/geothermie-clichy-batignolles accessed 6.7.2017.

Forni, D., D. Di Santo and F. Campana (2015*), Innovative System for Electricity Generation from Waste Heat Recovery*, Italian Federation for the Rational Use of Energy, Roma and Brescia, Italy.

Gao, J. et al. (2016), "An Integrated Assessment of the Potential of Agricultural and Forestry Residues for Energy Production in China", *Bioenergy,* Vol. 8/5, Wiley, Hoboken, pp. 880–893.

GB (China National Building Code) (1993), Thermal design code for civil buildings (GB 50176-93), China.

Gong, M. and S. Werner (2014), *District heating research in China,* Svensk Fjärrvärme AB, https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/18781/district-heating-in-china.pdf

Hammond, G.P. and J.B. Norman (2013), *Heat Recovery Opportunities in UK Industry*, Bath University, Bath, United Kingdom.

Hida, Y., et al. (2008), "District Cooling Plant with High Efficiency Chiller and Ice Storage System", *Mitsubishi Heavy Industries Ltd. Technical Review,* Vol. 45/2, Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Tokyo,www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e452/e452037.pdf.

Hong, H. (2017), "The development of biomass heating in China", presentation at the 5th Central European Biomass Conference, Graz, Austria, 18 January 2017.

IAEA (International Atomic Energy Agency) (2009), *Non-electric applications of nuclear power: seawater desalination, hydrogen production and other industrial applications*, Proceedings of an international conference, Oarai, Japan, April 2007.

IDEA (International District Energy Association) (2012), *District Energy,* Second Quarter 2012, Westborough, Massachusetts, http://enwavechicago.com/files/enwavechicago/ckfinder/files/DistrictEnergyMagThermalChicago2Q12%20Cover%20Story.pdf.

IEA (International Energy Agency) (2017a), *Energy Technology Perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations*, OECD/IEA, Paris.

IEA (2017b), *Tracking Clean Energy Progress 2017*, OECD/IEA, Paris.

IEA (2017c), *Natural Gas Information* (database), OECD/IEA, Paris, www.iea.org/statistics.

IEA (2016a), *World Energy Outlook 2016, Special Report Energy and Air Pollution*, OECD/IEA, Paris.

IEA (2016b), *Energy Technology Perspectives 2016*, OECD/IEA, Paris.

IEA (2014), *Linking Heat and Electricity Systems: Co-generation and District Heating and Cooling Solutions for a Clean Energy Future*, OECD/IEA, Paris.

IEA (2011), *Technology Roadmap: Geothermal Heat and Power*, OECD/IEA, Paris.

IEA (2007), *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO_2 Emissions*, OECD/IEA, Paris.

IEA-BERC (2015), *Building Energy Use in China: Transforming Construction and Influencing Consumption to 2050*, OECD/IEA, Paris, www.iea.org/publications/freepublications/publication/PARTNERCOUNTRYSERIESBuildingEnergy_WEB_FINAL.pdf.

IIP (Institute for Industrial Productivity) and IFC (International Finance Corporation) (2014), *Waste Heat Recovery for the Cement Sector: Market and Supplier Analysis,* IFP and IFC, Washington, DC.

IRENA (International Renewable Energy Agency) (2017), *Renewable energy in district heating and cooling*, IRENA, Abu Dhabi.

Italcementi (2015), *Solar Power and New Concrete Applications: A Pilot Plant in Morocco*, Italcementi, Bergamo, Italy.

Izumi, Y. (2014), *Role of the Japanese Cement Industry in the Establishment of a Sustainable Society*, Japanese Cement Association, Tokyo.

Kumar, U. and M.N. Karimi (2014), *Low Grade Waste Heat Recovery for Optimized Energy Efficiencies and Enhanced Sustainability in Process Industries: A Comprehensive Review*, Jamia Millia Islamia, New Delhi.

Li, Y. et al. (2016), "Case study on industrial surplus heat of steel plants for district heating in Northern China", *Energy*, Vol. 102, Elsevier, Amsterdam, pp. 397–405, https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.105.

Liang, C. et al. (2015), "Progress and thinking on heat metering reform and energy saving renovation in North China", *Building Technology Journal* (建设科技), Issue 9, pp. 12-16.

Lithuanian District Heating Association (2017) "RES and natural gas inputs for DH production in total fuel balance (2000-2020)", presentation by Rimantas Germanas at IEA EU4Energy Policy Forum, Kiev, 25 September 2017.

Lu, H. (2015), *Capturing the Invisible Resource: Analysis of Waste Heat Potential in Chinese Industry and Policy Options for Waste Heat to Power Generation*, University of California, Berkeley.

Luo, A. et al. (2017), "Mapping potentials of low-grade industrial waste heat in Northern China", *Resources, Conservation and Recycling,* Vol. 25, Elsevier, Amsterdam, pp. 335-348, http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.018.

MEP (Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China) (2010), Opinions on air quality (关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量指导意见), China.

MoF (Ministry of Finance of the People's Republic of China) (2017), Notification on support to pilot clean heat project in Northern China (关于开展中央财政支持北方地区冬季清洁取暖试点工作的通知), China.

MoF (2006), Administrative measure on support to RE in buildings (可再生能源建筑应用专项资金管理暂行办法), China.

MOHURD (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China) (2017), 13th FYP on building energy saving and green buildings (建筑节能与绿色建筑发展"十三五"规划), China.

MOHURD (2015), Statistical Yearbook of Urban and Rural Construction (城乡建设统计年鉴), China.

MOHURD (2012), 12th FYP on building energy saving ("十二五"建筑节能专项规划), China.

NDRC (National Development and Reform Commission of the People's Republic of China) (2017a), Circular of NDRC's opinion on clean heating price policy (关于印发北京地区清洁供暖价格政策意见的通知),China.

NDRC (2017b), Plan on Clean Winter Heating in NHU (2017-2021), (北方地区冬季清洁取暖规划 2017-2021 年), China.

NDRC (2016a), *Strategy of Energy Production and Consumption Revolution (2016-2030), (*能源生产和消费革命战略),China, www.ndrc.gov.cn/gzdt/201704/t20170425_845304.html.

NDRC (2016b), Administrative measure on CHP plants (热电联产管理办法), China.

NDRC (2015), Notification on waste heat utilization (余热暖民工程实施方案), China.

NDRC (2014), Action Plan on Upgrading and Reforming Energy Saving and Emission Reduction of Coal-fired Electricity Generation (2014-2020) (煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020 年), China.

NDRC (2012a), 12th FYP on energy development (能源发展"十二五"规划), China.

NDRC (2012b), Notice on coal-fired plant rehabilitation (关于开展燃煤电厂综合升级改造工作的通知), China.

NDRC (2007), 11th FYP on energy development (能源发展"十一五"规划), China.

NDRC (2005), Medium-long term special plan on energy saving (节能中长期专项规划), China.

NDRC and MOHURD (2007), Administrative measure on urban heat pricing (城市供热价格管理暂行办法), China.

NDRC, MLR (Ministry of Land and Resources), NEA (2016), 13th FYP on geothermal energy (地热能开发利用"十三五"规划), China.

NEA (National Energy Administration of the People's Republic of China) (2016), 13th FYP on energy development (能源发展"十三五"规划), China.

NEA, MOHURD, MoF and MLR (2013), Opinion on geothermal energy development (关于促进地热能开发利用的指导意见), China.

Othman, L. (2016), "World's biggest underground district cooling network now at Marina Bay", *Today Online*, accessed 21 July 2017, www.todayonline.com/singapore/plant-underground-district-cooling-network-marina-bay-commissioned.

Rakos, C. (2017), "Pellet boiler markets – perspectives for the future", presentation at the 5th Central European Biomass Conferenced Nordic Baltic Bioenergy Conference, Graz, Austria, 18 January 2017.

RIC (Research in China) (2016), *China Heat Meter Industry Report, 2016-2020*, Research in China, Beijing, www.researchinchina.com/UpLoads/ArticleFreePartPath/20161129103001.pdf.

Rock, M. and M. Taman (2015), *China´s Technological Catch-up Strategy: Industrial Development, Energy Efficiency and CO_2 Emissions*, Oxford University Press, New York.

Saygin, D. et al. (2011), *Potential of Best Practice Technology to Improve Energy Efficiency in the Global Chemical and Petrochemical Sector*, Utrecht University, IEA and IRENA (International Renewable Energy Agency), Utrecht, Paris and Bonn.

SC (State Council of the People's Republic of China) (2013), Action plan on fighting air pollution (大气污染防治行动计划), China.

SC (2012), 12th FYP on energy saving and emission reduction (节能减排"十二五"规划), China.

SC (2006), Decision on energy saving improvement (关于加强节能工作的决定), China.

Stadtwerke München (2016), "SWM Strategie ist der richtige Weg" (SWM's strategy is the right way), Stadtwerke München, Munich, www.swm.de/dam/swm/pressemitteilungen/2016/11/allgemein20161122-swm-fernwareme-version-der-richtige-weg.pdf.

Statistic Sweden (2017), "Consumption of fuels for steam and hot water production, by type of fuel and type of production type. Yearly 1990 – 2016".

United Nations Environment Programme (2015), *District Energy in Cities*, Paris.

Xinhua (2013), Central Urbanisation Work Conference: Urbanisation Should Be Green and Human-Centered (中央城镇化会议：慎砍树少拆房 让居民记得住乡愁), http://news.xinhuanet.com/politics/2013-12/14/c_118558975.htm.

词汇表

生物燃料	以生物质或废弃物为原料生产的燃料，包括乙醇与生物柴油。
生物质	源于存活的（或最近存活的）动植物的可再生能源，例如木屑、农作物和排泄物。
性能系数（COP）	也称制冷性能系数，表示能效比（是指单位功耗所能获得的冷量）。性能系数越高，能源利用效率越高。
热电联产	利用同一燃料同时既能生产有用的电力，也能生产有用的热力。燃料种类很多，包括煤炭、生物质、天然气、核材料、太阳能或地球中存储的热量。冷热电三联供是指同时生产电能、热能和冷能。
能源效率	如果能源投入相同但可以提供的服务更多，或者提供同样的服务消耗的能源更少，则能效更高。
能源强度	是指单位国内生产总值的一次能源消耗总量。
余热	在某一特定时刻从某一工业生产过程中排出的所有气液流中包含的热量。热量可以利用技术以经济有效的方式回收的程度取决于热源的特点和是否有配套的最终用途。
地热	从地壳中释放出来的可用作热能的能源，通常以热水或蒸汽形式存在。
热力	在国际能源署的能源统计中，热力仅指生产用于销售的热能。该类别中包含的多数热都源自燃料的燃烧，但也有少量源于地热源、电驱热泵和锅炉。
低碳技术	在运行时不排放温室气体或排放温室气体较少的技术。电力行业的低碳技术包括装配二氧化碳捕集与封存技术的化石燃料电厂、核电厂和基于可再生能源的发电技术。
低热值	假定所产生的水保持为蒸汽状态且热量不能回收时，单位燃料完全燃烧时释放出的热量。
小型分体式空调	分体式空调系统一般由两部分组成，室内机组负责分配制冷（或加热）后的空气，室外机组内有一个带有换热器和风扇的热泵压缩机。小型分体式空调系统类似于普通的分体式系统，只是容量较小，其优势是无管，一般只能对目标空间（或房间）提供制冷。
发电	电厂、热力厂和热电联产厂的燃料利用，包括大型电厂和发电自用的小厂（自用发电）。
浅层地热	以热能形式存在于地表到地下 400–500 米深度的能源，位于

没有特定地热异常的区域。中低温热可见于上部地层，可用浅层地热系统进行利用，并可作为热泵类应用的热源。也可直接用于供暖，尤其是在较为寒冷的气候区。

智能电网

利用数字技术和其他先进技术对从电力生产到满足各类最终用户的不同电力需求进行监测和管理的电力网络。智能电网会对所有发电企业、电网经营企业、最终用户和电力市场利益相关者的需求和能力进行统筹协调，尽可能实现系统各个环节的高效运行，在实现系统可靠性、柔韧性和稳定性最大化的同时，尽量降低成本，减小对环境的影响。

补贴

按照国际能源署的监测，是指任何主要针对能源行业，用于降低能源生产成本，提高源生产者所接收到的价格或降低能源消费者所支付的价格的政府行动。

传统生物质

非常低效地在炉子中燃烧薪柴、木炭、动物排泄物和农业废弃物。

地源热泵

一种在冬季从地下采取热量并将热量传输到建筑物内的中央供暖和/或制冷系统。同样，在夏季时，该系统可以高效机制让热量从建筑物逃逸到地下。地源热泵适合于多种建筑，尤其适合于环境影响较低的项目。

此执行摘要原文用英语发表。虽然国际能源署尽力确保中文译 忠实于英文原文，但仍难免略有差异。此中文译文仅供参考。

IEA/OECD possible corrigenda on: www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm

IEA Publications
International Energy Agency
Website: www.iea.org
Contact information: www.iea.org/about/contact
Typset in France by IEA - January 2018
Cover design: IEA; Photo credits: © Shutterstock

IEA SERIES IN SUPPORT OF IEA–CHINA ENERGY CO-OPERATION