

Reinventing Fire: China – the Role of Energy Efficiency in China’s Roadmap to 2050

Authors:

Lynn Price, Nina Khanna, Nan Zhou, David Fridley, Ali Hasanbeigi, Hongyou Lu, Wei Feng, et al

Energy Analysis and Environmental Impacts Division Lawrence Berkeley National Laboratory

China Energy Group

Preprint version of conference paper of the European Council for an Energy Efficient Economy’s 2017 Summer Study, held in Presqu’île de Giens, Hyeres, France, on 29 May – 3 June 2017

May 2017- Chinese Version



Lawrence Berkeley National Laboratory was supported by Energy Foundation China through the U.S. Department of Energy under Contract No. DE-AC02-05CH11231. Energy Foundation China supported this work by contributing both guidance and funding to the initiative. Support also came from an additional 36 foundations and individuals who gave directed funds for the research freely and without condition, in addition to general supporting funds from RMI’s contributors. The Chinese government gave in kind to the research through the direct contribution of resources, analysis and support.

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.

重塑能源-中国:能效在中国面向 2050 年路线图中的作用

Lynn Price, Nina Khanna, Nan Zhou, David Fridley, Ali Hasanbeigi, Hongyou Lu, and Feng Wei
劳伦斯伯克利国家实验室, 美国加州伯克利市

邮箱: lkprice@lbl.gov, xzheng@lbl.gov, nzhou@lbl.gov, dgfridley@lbl.gov,
ahasanbeigi@lbl.gov,
hylu@lbl.gov, weifeng@lbl.gov

戴彦德, 田智宇, 杨宏伟, 白泉, 朱跃中, 熊华文, 张建国

国家发展和改革委员会能源研究所, 中国北京市

邮箱: tianzy@eri.org.cn, hyang@eri.org.cn, baiquan@eri.org.cn, zhuyuezhong@eri.org.cn,
xionghuawen@eri.org.cn, zhangjg@eri.org.cn

Jon Creyts, Kate Chrisman, Ellen Franconi, Josh Agenbroad, Michael Bendewald, Yi Ke, Robert McIntosh, David Mullaney, Clay Stranger, Daniel Wetzel, and Cyril Yee

落基山研究所, 美国

邮箱: jcreyts@rmi.org, kchrisman@rmi.org, efranconi@rmi.org, jagenbroad@rmi.org,
mbendewald@rmi.org, yke@rmi.org, rmcintosh@rmi.org, dmullaney@rmi.org, cstranger@rmi.org,
dwetzel@rmi.org, cye@rmi.org

摘要

作为《巴黎协定》承诺的一部分, 中国计划在 2030 年左右达到二氧化碳 (CO₂) 排放峰值并争取尽早达峰, 并且到 2030 年非化石能源占一次能源消费总量比重达到 20% 左右。截至 2014 年底, 中国能源相关二氧化碳排放量占全球的 28%, 其中 79% 来自煤炭使用。在实现上述减排承诺的前提下, 如何成本有效地重塑中国的能源经济是“重塑能源: 中国”联合研究项目的研究重点。该项目历时三年, 于 2016 年 9 月份完成。

由中美研究人员组成的团队构建了一个自下而上的中国能源供需综合模型。基于该模型对比分析了两种情景的差异, 即沿着当前趋势发展的参考路径情景以及“重塑能源”替代路径情景。“重塑能源”替代路径是指为满足国家需求, 在 2050 年前最大程度地应用当前成本有效的能源效率策略和可再生能源。结果表明, 如果中国走更积极的重塑能源路径, 那么其二氧化碳排放量可比参考路径提前 11 年达峰。

本文重点分析了在更积极的路径下能源效率策略对于二氧化碳减排的作用。本研究采用了广义的能源效率定义, 相关策略中既包括通过改善材料使用 (例如更长的产品寿命)、优化能源强度来减少能源需求的任何行动, 也包括从能源密集型产业活动转向服务导向型产业活动的结构性转变, 还包括城市化、工业化、交通运输、社会消费和意识的过程和模式转变。除能源效率外, 本研究还分析了燃料替换 (从碳密集型燃料转向其他燃料) 的减排作用。结果表明, 对于重塑能源情景, 能源效率提高及相关策略贡献了中国 2050 年二氧化碳总减排潜力的 75%, 而燃料替换仅占 25%。为在中国实现上述具有显著成本效益的能效潜力, 本文还讨论了需要克服的障碍和需要实施的附加政策。

前言

1980年至2012年，中国一次能源消费增长了六倍（年均增长率为6%），远高于同期全球一次能源消费增速（增长1.8倍，年均增长率为2%）（ERI，2016）。经过几十年主要由化石燃料驱动的快速经济增长，至2014年底中国能源相关二氧化碳排放量占全球的28%，其中79%来自于煤炭使用（根据NBS（2016）数据计算）。为解决中国国内的环境问题，同时支持后巴黎时代的全球气候变化行动，中国以煤炭为主的能源体系亟需快速转型。2014年6月，中国国家主席习近平在号召推进“能源生产和消费革命”时就强调了能源体系转型的必要性。作为对《巴黎协定》承诺的一部分，中国随后制定了控制二氧化碳排放的国家目标，即二氧化碳排放量在2030年左右达到峰值并争取尽早达峰，以及2030年单位国内生产总值二氧化碳排放量比2005年下降60%至65%。为了实现上述减排目标以及应对国内环境挑战，中国需要走出一条能源消费和能源生产转型的崭新道路，从而支撑持续的经济增长和快速的城市化进程。

本文分析了中国如何在显著改善环境和提升能源安全的前提下以成本有效的方式进行节能。为实现显著的二氧化碳减排，重点关注能源效率策略在未来的建筑、工业和交通运输部门中所起的核心作用。本研究采用了广义的能源效率定义，相关策略中既包括通过改善材料使用（例如更长的产品寿命）、优化能源强度来减少能源需求的任何行动，也包括从能源密集型产业活动转向服务导向型产业活动的结构性转变，还包括城市化、工业化、交通运输、社会消费和意识的过程和模式转变。除能源效率外，本研究还分析了燃料替换（从碳密集型燃料转向其他燃料）的减排作用。本文是在“重塑能源：中国”研究项目成果的基础上形成的。该项目由中国国家发展和改革委员会能源研究所、美国劳伦斯伯克利国家实验室中国能源研究室和美国落基山研究所经历三年合作于2016年9月完成（ERI, LBNL and RMI, 2016）。

本文首先介绍了建模和分析方法以及相关情景，为下文构建从当前至2050年的中国能源体系转型路线图奠定方法学基础。其次，分析了重塑能源情景下能源效率和燃料切换策略对中国2050年二氧化碳减排的贡献。再次，详细讨论了建筑、工业和交通运输等部门的能源效率和燃料切换策略。重点介绍了2050年不同能效策略在部门层面对节能和二氧化碳减排的潜在影响，并展望了在这些策略影响下中国煤炭、能源利用和二氧化碳达峰的前景。最后，讨论了为在中国实现上述具有显著成本效益的能效潜力需要克服的障碍和需要实施的附加政策。

研究方法

模型和分析框架

本研究基于人口、经济和技术驱动因素，采用不同的建模工具、分析方法和情景分析方法对中国未来能源需求进行详细的自下而上的评估。本研究整合了三方面内容，包括基于中国能源供需部门的建模、针对技术和措施的成本效益计算以及最小成本电力调度模式。此外，为了给建模假设的提出和校准提供参考信息，在分析过程中引入了超过75个实际的国际案例研究。

长期能源替代规划（LEAP）¹模型框架建立在自下而上的核算框架之上，包含物理和宏观经济活动驱动因素，能够在终端用途层面详细表征主要的能源需求部门。将特定终端用途技术和措施的成本效益计算结果作为LEAP模型的输入，从而为关键建模参数提供信息，例如最高的成本效益效率和技术采用率。本研究基于省级最小成本电力调度优化（EDO）模型预测了发电装机容量，并将按照燃料类型和运行时间分类的发电装机容量信息纳入LEAP模型的电力部门模块。图1概述了本研究的总体建模框架。

除了综合建模框架外，为了获取分析方法的相关信息、检验假设以及评价结论，在整个研究期间还对来自中国主要智库、学术机构和行业协会的专家进行了访谈和咨询。由中国高级能源政策制定者和顾问组成的专家指导委员会也就中国的最新发展情况和未来的政策考虑提供了反馈。

¹ LEAP <https://www.sei-international.org/leap> 减缓 <https://www.sei-international.org/leap>

<https://www.sei-international.org/leap>

结论：能源效率的关键作用

图 2 显示了中国的二氧化碳排放量在重塑能源情景下于 2025 年达峰，比参考情景的 2036 年提前了 11 年。在重塑能源情景下，二氧化碳排放峰值水平为 95.9 亿吨，比参考情景的 146 亿吨低 34%。

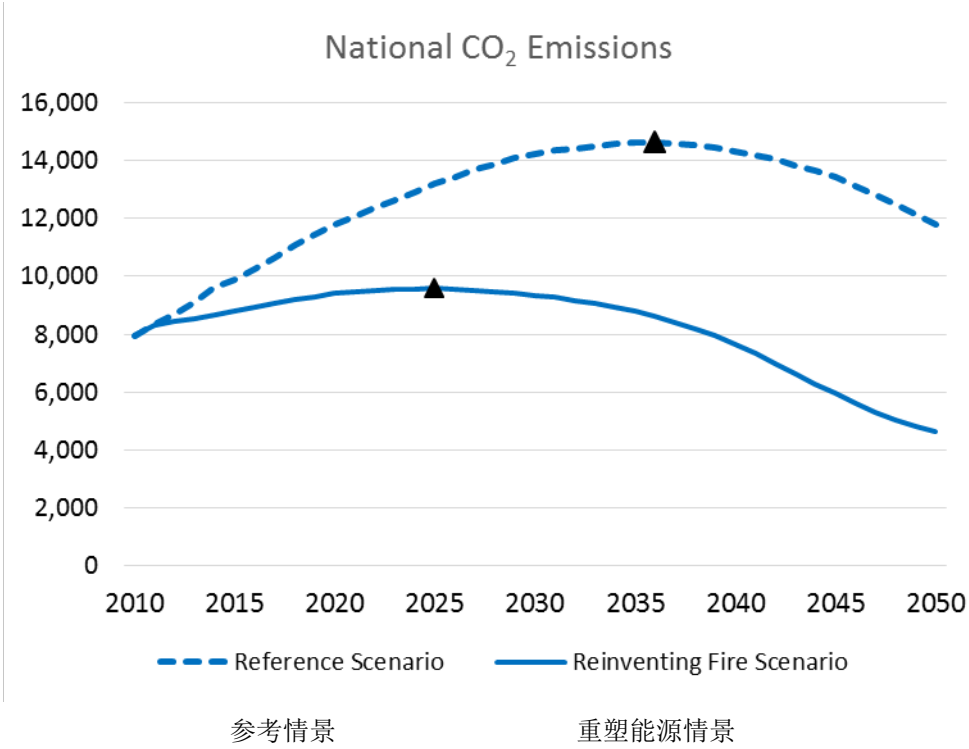


图 2. 参考情景和重塑能源情景下 2010 年-2050 年中国二氧化碳排放总量

图 3 显示，参考情景中 2050 年二氧化碳排放量达到 118 亿吨，通过建筑、交通运输和工业部门的能效提高和燃料替换，重塑能源情景中二氧化碳排放量减至 46.2 亿吨。针对两种情景下 2050 年二氧化碳减排量的因素分析显示，与燃料替换策略相比，能源效率策略（包括减少能源需求策略）对每个终端用能部门的二氧化碳减排做出了主要贡献（图 3）。综合考虑三个部门，能源效率和相关策略占 2050 年二氧化碳年度减排量的 75%，而燃料替换策略则为 25%。这充分表明，为了使中国能够在 2030 年之前达到二氧化碳排放峰值，并在实现《巴黎协定》目标过程中将二氧化碳排放维持在较低水平，通过终端用能部门的各种策略持续提高能源效率具有迫切的必要性。

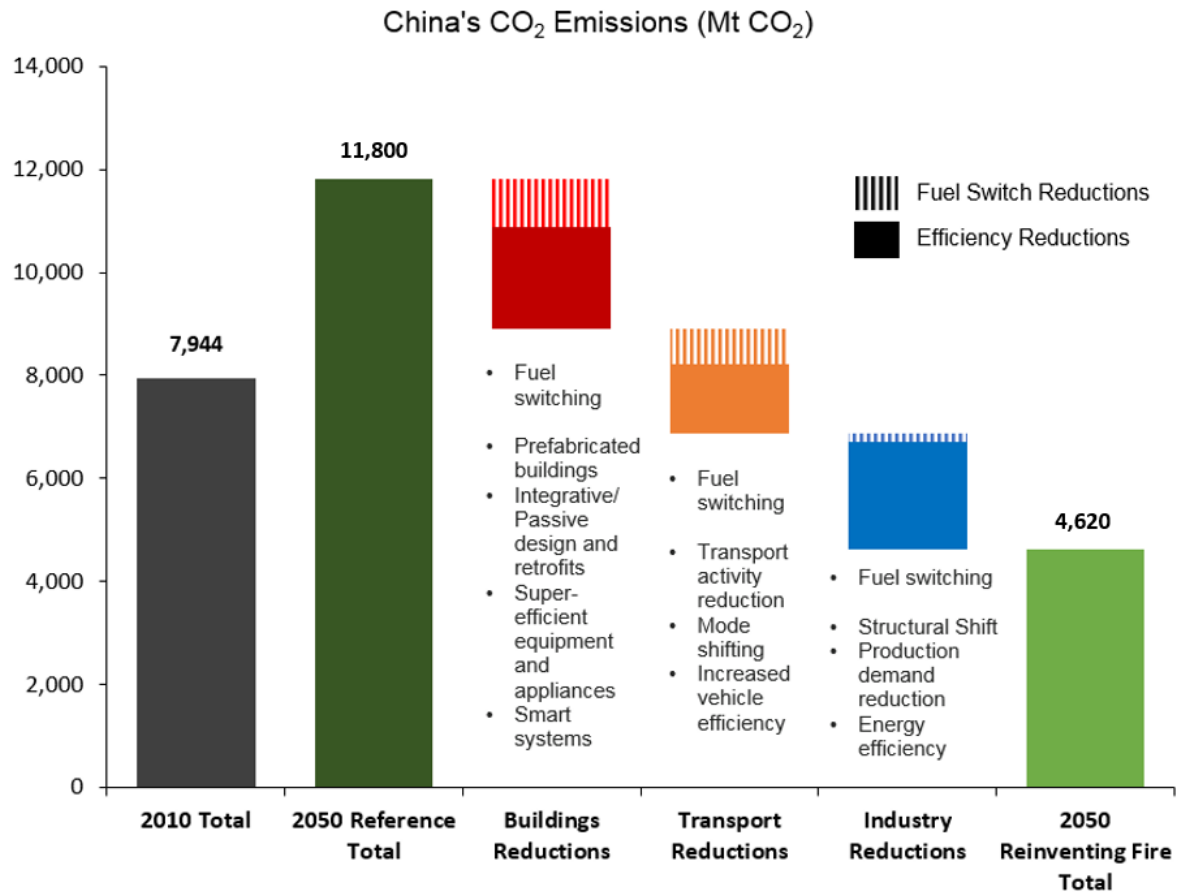


图 3. 2050 年各部门及其各类能源策略的二氧化碳减排潜力
注：已将能源转换（包括电力）的二氧化碳减排量分配至终端部门。

中国 2050 部门战略蓝图

居民和公共建筑

2010 年，中国建筑一次能源消费量约为 7.7 亿吨标煤³，即 26.3 EJ，根据本文模型，约占中国总能耗的 24%⁴。当前，中国人均能耗远低于发达国家人均水平，但是随着城市化的推进、家庭收入的提高以及经济增长点由重工业逐渐转向服务业，这一数字将进一步提高。在参考情景下，因中国居住建筑与公共建筑库存的增长以及对能源服务需求的增加，2010 年至 2050 年与建筑相关的一次能耗将增长近三倍，到 2050 年接近 22.7 亿吨标煤。

在重塑能源情景中，有五种策略能够以成本有效的方式降低中国建筑部门的能耗，包括采用当前能效最高的建筑设计和建造方法、超高效节能设备、智能建筑系统以及清洁能源。在这五种策略中，前四种强调直接或间接地提高能源效率。例如，直接手段有建筑一体化与被动式设计和改造，以及使用高效设备；间接手段有预制建筑与智能系统。最后一项策略强调推广应用那些可利用清洁能源的相关技术。另

³ 1 Mtce = 2927 万吨标煤。

⁴ 统计报告中 2010 年建筑部门的能耗为 6.68 EJ，根据本文模型数据。这是根据 IPCC 方法，建筑能耗为 26.3 EJ，而本文模型值则为 26.3 EJ。Fridley et al. (2007)。

外，本文还指出了使用这五种策略所要面对的主要挑战。

1. 采用预制建筑与其他先进的建造方法

在本策略中，更好的建筑材料与建造方法有助于延长新建筑的生命周期，使得重塑能源情景的新建建筑面积比参考情景减少 13%。除此之外，使用预制结构的新建筑具有耐久性与可适应性的特点。使用预制结构可以减少废弃物和现场建造时间，并提高建筑的质量和耐久性。更高的建筑质量同时保证了整体建筑的保温特性和更好的建筑能效。

实现上述策略主要面临以下两个障碍。一是部分城市为刺激经济增长，拆除一些尚未到达使用年限的既有建筑；二是使用劣质材料在短时间内快速建成建筑，这些建筑会在达到国际标准使用年限前发生损毁，并导致其被拆除。

2. 通过一体化和被动式的设计与改造减少建筑能源需求

与传统建筑相比，被动式设计的建筑和那些融入整体系统理念的、遵循一体化设计过程的建筑，其能源负荷显著降低。这是由于采用了被动节能策略，如墙体保温、高性能窗户、渗透控制、自然通风和采光等。最小化建筑能源负荷能够使加热、制冷和照明系统更简单、更小和更便宜。在新建和既有的公共和居住建筑中，更多地使用一体化和被动式设计有助于显著降低加热和制冷负荷。同时，对既有建筑进行大范围的节能改造，也可以改善建筑运行、降低运营成本并提高舒适度。通过遵循一体化的设计过程以及在能效提升过程中有计划地通过融资进行技术改造，可成本有效地实现深度节能，将能源消耗降低 30% 或更多。

实现上述策略的障碍包括不合理的能源和电力价格、缺乏信息和意识、非支持性建筑法规（例如，描述性法规而不是基于全建筑能耗的法规）、缺乏熟练的劳动力以及前期投资成本。

3. 安装超高效节能设备和电器

通过在新建和既有建筑中安装超高效节能设备和电器，在重塑能源情景下积极采用当今全球一流的技术。对于所有与建筑终端用途有关的超高效节能设备和电器，重塑能源情景假定其在 2050 年之前的市场渗透率均达到 100%，而参考情景下其在 2050 年前的渗透率仅有 40%。

实现上述策略的障碍包括因平均关税结构导致的财务收益有限、前期投资成本以及意识和全面合规信息的缺乏。

4. 使用智能系统

建筑智能系统技术包括以下两方面内容：一是用于执行故障检测和诊断的传感器、控制器、数据访问和分析方法，二是用于提高效率、可靠性和可维护性的跨系统优化运行。智能系统的使用不但能够为节能改造服务提供商和其他愿意节能的相关方提供改善能效的良机，还能够为国家监测建筑能源使用强度这一指标提供有效的途径。

实现上述策略的障碍包括需要为安装系统进行额外培训、用户缺乏运用相关技术的经验以及财务收益有限。财务收益有限是因为当前的能源定价结构无法支撑高效的终端能源使用。

5. 改用清洁能源技术

在重塑能源情景下，通过改用清洁能源来减少建筑碳排放，相关措施包括将现场设备的用能转向更清洁的能源、安装屋顶太阳能光伏系统、购买由低污染燃料发出的电力以及尽可能利用余热等。改用清洁能源可基本消除煤锅炉和煤炉在北方气候区的使用，并能显著减少其在过渡气候区中的使用。相关措施包括在北方气候区使用更清洁的区域供热，并在北方和过渡气候区更多地使用电加热这一供热方式，特别是空气源和地源热泵。

实现上述策略的障碍包括现有政策尚不支持自发电和可再生能源的整合、前期投资成本以及扭曲的电力和能源价格。

交通运输

2010年，交通运输部门占中国一次能源消费总量的9%（3.6亿吨标煤⁵），这一比例在未来仍将进一步增加。随着经济的增长，货运需求将持续增加，同时城镇化和中产阶级收入的提高将加速推动城市和城际客运量的增长。交通运输部门几乎完全依赖于石油（占2010年该部门一次能源供应的87%），交通运输占2010年中国石油消费量的65%。在重塑能源情景下，通过实施四大关键策略，中国的交通运输系统将在2050年提供更多的移动和出行能力，但效率更高、排放更少及成本更低。前三个策略（减少运输活动、转换运输方式和提高交通工具能效）侧重于提高运输能源效率，而最后一项策略则侧重于改用二氧化碳排放较低的燃料。

1. 减少运输活动

可以通过以下措施减少客运和货运运输需求：一是调整经济结构，从而减少货运需求；二是完善城市和产业布局，从而缩短运输距离；三是建立先进的物流体系和推广远程办公或电话会议，从而减少货运和城市交通需求。

减少运输活动主要包括两方面障碍：一是国家级、省级与地市级交通规划部门之间的协调不足；二是物流和卡车货运公司的规模经济较差。这些障碍限制了现代物流实践和信息技术系统的应用。

2. 转换运输方式

推进从高能源强度的运输方式转向低能源强度的运输方式，这将有助于减少机动车的能耗。例如，在客运交通中，高速铁路、城市公共交通与非机动车交通都可以取代私家车的使用。类似地，在货运交通中，铁路与水路运输可以取代卡车运输，卡车在某些情况下可以替代航空运输。

实现运输方式的转换仍面临一些障碍，包括铁路货运能力的极度缺乏、多模式联运物流枢纽的规划不完善以及中国高铁的便利性与用户体验有待提高。

3. 提高交通工具能效

技术和设计上的改进有助于提高各种运输方式中的交通工具能效，尤其是机动车辆的能效。关键技术改进包括改进空气动力性能、降低轮胎摩擦阻力、采用混合动力传动系统、改进发动机热效率以及采用更

⁵ 统计报告中2010年交通运输部门的能源消费量为2.60亿吨标煤，低于本文分析中使用的数据。这是因为根据中国的统计方法，燃料使用都归到终端用能部门（例如，工业车辆的燃料使用被视为工业消费而不是交通运输消费），而本文的估计值则包括所有与运输相关的能源消耗。关于交通运输部门统计数据调整的更多信息，参见Fridley et al. (2007)。

高效的变速器。

大幅提高交通工具能效主要包括三方面障碍：一是当前基于车重的能效标准无法激励相关方推进车辆轻量化；二是货运车辆经常超载并采用低质燃料；三是卡车货运公司缺少获得投资的途径。

4. 替换燃料

交通运输部门对石油燃料的依赖以及二氧化碳排放量可以通过以下两种方式降低。一是把在城市中运营的客运机动车、铁路和部分轻型卡车的燃料替换为电力；二是把重型卡车的燃料替换为天然气和生物燃料。

交通运输部门燃料替换的障碍主要包括两方面。一是电动车地方保护主义，这会导致汽车质量下降与充电装置不足；二是天然气配送基础设施缺乏和生物燃料供应不足，这将阻碍卡车的燃料替换。

工业

工业是中国经济的主导部门，自 20 世纪 70 年代末以来其占全国国内生产总值的 45% 左右。在大多数工业产品的产出方面，中国目前在世界范围内处于主导地位。这是由于快速城市化、与城市化相关的国内商品消费的增长以及出口的增加等三个因素推动了对能源密集型原材料和产品的巨大需求。尽管过去十年中国的工业能效逐步提高，但中国主要工业子行业的能源强度仍落后于国际先进水平。因此，工业部门能耗仍占全国一次能源消费量的 66% 以上 (NBS, 2016)。在参考情景下，工业一次能源消费量将从 2010 年的 22.36 亿吨标煤⁶增长到 2050 年的 24 亿吨标煤。

在重塑能源情景中，确定了调整结构、减少生产需求、提高能源效率与替换燃料等四种策略。到 2050 年，上述策略的实施将有助于减少中国工业部门的能源消费总量及其相关的二氧化碳排放量。

1. 向服务业与高附加值行业调整结构

行业结构调整体现在以下两种占比的变化之中：一是对于附加值高、能源密集程度相对较低的行业，其在重塑能源情景中的占比相对于参考情景增大；二是对于附加值低、能源强度高的行业，其在重塑能源情景中的占比相对于参考情景减小。

工业部门结构调整的障碍包括失业问题、对能源密集型产品持续的国内需求、因新建能源密集型工厂导致的资产搁浅以及缺乏针对高附加值产品的国内市场开发。

2. 减少生产需求

在重塑能源情景中，通过改变生产和施工技术，从而使产品的使用寿命更长、所需的投入更少，进而降低中国对制造某些材料的需求。在诸如铝、钢和造纸等行业，更多地使用再生材料不但能降低对原材料的需求，还能有助于减少工业生产需求。此外，对于附加值低、能源密集型产品而言，减少其不必要的出口也有助于减少工业生产需求。

⁶ 2010 年中国一次能源消费量 24.23 亿吨标煤，本文数据是根据国家统计局的统计方法，将工业部门的能源消费量折算为标煤，而本文值则仅与生产过程相关的能源消费量。关于能源折算系数，参见 Fridley et al. (2007)。

减少工业生产需求主要包括三个方面的障碍。一是对于高质量和低材料强度的产品，缺乏标准且标准执行力度不足；二是在持续快速城市化过程中，建筑寿命短且建筑材料质量低；三是缺乏全面且一体化的废物规划与管理系统。

3. 提高能源效率

通过能效提高、系统优化和一体化设计，所有工业子行业均可降低生产单位产品所需的能耗。与参考情景相比，在重塑能源情景下所有行业均能更早地实现当前国际上最佳实践的能源强度。

提高工业能效主要包括四个方面的障碍。一是缺乏财政支持、信息与知识，特别是在中小企业中；二是缺乏相关企业最高管理层的承诺、理解或愿景；三是政府法规的执行力度不足；四是不同政府机构间的协调不足。

4. 改用二氧化碳排放较低的燃料以及电气化

通过增加二氧化碳排放较低燃料的利用率、提升电气化水平与现场发电规模以及回收热量，工业部门可减少与能源消费相关的二氧化碳排放。

推进工业燃料替换和电气化的障碍包括地区失业问题以及国内天然气等清洁能源资源的不足。

各部门能源和二氧化碳排放量

建筑

在重塑能源情景下，2050年居住和公共建筑的一次能源消费总量为10亿吨标煤，比参考情景下2050年的值下降了56%。一次能源消费量将在2031年达到峰值，即13.70亿吨标煤，其后开始下降。在能源相关二氧化碳排放方面，参考情景下建筑的二氧化碳排放量将从2010年的18.80亿吨增长到2050年的39亿吨。若考虑材料行业和电力转换部门的相关节约，则通过预制建筑、一体化和被动式的设计与改造、超高效节能设备和电器、智能系统以及改用清洁能源技术等五大策略的实施，重塑能源情景下建筑部门2050年的二氧化碳排放量将比参考情景减少28.8亿吨（74%）。

建筑部门的二氧化碳减排量主要来自一体化和被动式设计（6.9亿吨）、超高效节能设备和电器（6.7亿吨）、建筑节能改造（2.7亿吨）和智能系统（2.45亿吨）等关键能效策略。同一次能源消费减少的情况类似，一体化和被动式设计、超高效节能设备和电器是两项二氧化碳减排潜力最大的策略，共占建筑部门总减排潜力的47%。预制建筑可在建筑部门减少1亿吨二氧化碳排放，并可在工业部门额外再减少1.3亿吨二氧化碳排放。现场终端设备改用清洁能源（6亿吨二氧化碳）以及采用清洁能源发电（3.15亿吨二氧化碳）两项策略共占建筑部门总减排量的近三分之一。在提升电气化水平以及电力部门大幅脱碳的共同影响下，燃料替换对于建筑部门的二氧化碳减排也有相对较大的影响。

交通运输

在重塑能源情景下，到2050年石油占交通运输部门一次能源供应的比重会降至45%，而在参考情景下仅降至73%。在不牺牲成本、便利性或可靠性的前提下，重塑能源情景可以减少交通拥堵并能提供可公平获取的运输服务。通过减少运输活动、转换运输方式、提高交通工具能效以及替换燃料等四大策略的应用，重塑能源情景下交通运输部门2050年的二氧化碳排放总量将比参考情景减少61%，减排近20.40亿

吨。

在重塑能源情景下，减少运输活动占交通运输部门二氧化碳减排量的比重最大，每年可减排 7 亿吨二氧化碳（34%）。由于公路和铁路运输部门电气化水平的提升，电力部门脱碳可在 2050 年为交通运输部门贡献 4.5 亿吨二氧化碳减排量（22%），而改用天然气和生物燃料会额外贡献 2.4 亿吨二氧化碳减排量（12%）。转换运输方式和提高交通工具能效可在 2050 年分别减排 3.5 亿吨二氧化碳（17%）和 3 亿吨二氧化碳（15%）。

对于交通运输部门而言，在提升电气化水平以及电力部门大幅脱碳的共同影响下，燃料替换对于二氧化碳减排具有较大影响，其减排量占重塑能源情景下 2050 年交通运输部门总减排量的三分之一左右。

工业

在重塑能源情景中，中国的工业部门将经历剧烈转型，并在能源利用和二氧化碳排放方面先于交通运输部门和建筑部门达峰。主要在高附加值子行业的推动下，工业部门将在重塑能源情景下增长 55 万亿元人民币（比 2010 年增长五倍）。与参考情景相比，2030 年工业一次能源消费量减少 9.9 亿吨标煤（30%），2050 年减少 8.4 亿吨标煤（35%）。在重塑能源情景下，2050 年工业一次能源消费量的绝对水平将比 2010 年下降 30%。中国 2050 年的节能量将大于 2012 年美国整个工业部门的能源消费量。

与参考情景相比，重塑能源情景下工业二氧化碳排放量也显著下降，2050 年的下降率达到 48%。到 2050 年，重塑能源情景下的工业二氧化碳排放总量为 21.5 亿吨，比 2010 年减少 58%。

工业部门最大的二氧化碳减排量来自能源效率提高，2050 年占总减排量的 54%（10.8 亿吨二氧化碳），其次是结构调整和生产需求减少，分别占总减排量的 25%（5 亿吨二氧化碳）和 13%（2.6 亿吨二氧化碳）。上述三个与能源效率相关的策略共同贡献了 2050 年工业部门二氧化碳减排量的 92%，而燃料替换和电力部门脱碳的减排贡献较小，2050 年仅占 8%。

图 4 总结了 2050 年各部门及其策略在重塑能源情景下相对于参考情景的二氧化碳年减排量。纯色部分表示能源效率提高策略的减排量，而虚色部分表示燃料替换策略的减排量。

2050 Annual CO₂ Emissions Reductions by Strategy

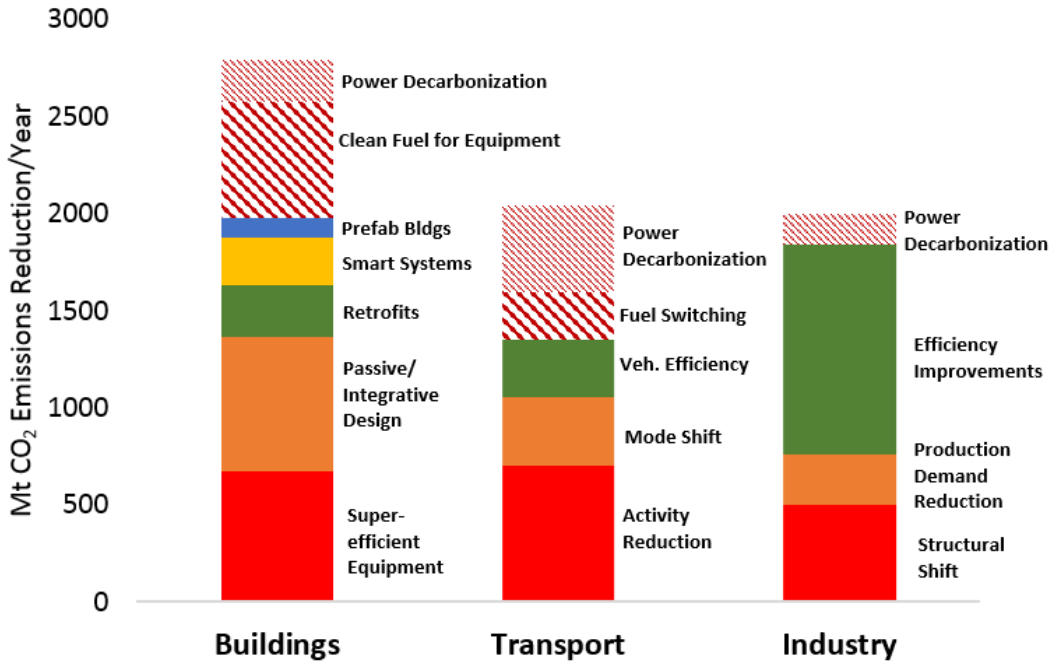


图4 2050年各部门及其具体能源策略的二氧化碳年减排潜力对比

结论和政策启示

本研究的情景分析表明，通过全面部署当前成本有效的节能技术和可再生能源供应方案，中国可以完成国内的能源及二氧化碳排放控制目标，并实现对国际社会的相关承诺。建筑、工业和交通运输部门中旨在减少能源需求的各项策略（包括众多侧重于提高能源效率的策略）能够支撑未来中国经济的大幅增长。若采用 IPCC 直接等效法计算一次电力消耗，则中国 2050 年的能源消费总量与 2010 年水平相当。在减少能源需求的基础上，结合电力部门持续的脱碳以及能源需求部门的燃料替换，中国能够在 2050 年前大幅提高非化石能源在一次能源消费总量中所占的比重。由于上述能源需求和能源供应转变的共同影响，重塑能源情景下中国的二氧化碳排放量能够提前至 2025 年达到峰值，并且峰值水平与参考情景下 2036 年的二氧化碳排放峰值相比减少 34%。可降低能源需求的能源效率策略贡献了 2050 年各需求部门大部分的二氧化碳减排量。

在重塑能源情景下，为了实现能耗降低和二氧化碳减排，需要克服建筑、工业和交通运输部门存在的众多障碍，以便全面部署能源效率和燃料替换策略。此外，还需要中国政府、企业和整个社会持续且有针对性的支持，出台推动具有广泛性的行动的政策措施，包括：

- 使得政府政策和企业商业利益与重塑能源战略的策略目标保持一致；
- 优先将减少能源需求和提高能源效率作为降低能源转型成本的关键驱动因素；
- 促进电气化和电力部门改革，从而支持清洁和低碳能源供应；
- 推动技术创新和一体化设计，从而最大程度地减少智能和共享基础设施的投资；
- 推动能够促进新产业、技术和商业模式发展的制度和结构改革，从而促进生产力提高。

如果能成功克服障碍并实施重塑能源情景中提出的策略，那么中国可以让能源效率策略在未来的建筑、

工业和交通运输等部门中发挥核心作用，实现积极且成本有效的节能和二氧化碳减排。

致谢

劳伦斯伯克利国家实验室以美国能源部编号为 DE-AC02-05CH11231 的合同获得能源基金会（美国）北京办事处（简称“能源基金会”）的支持。能源基金会为本项工作提供了指导和资金支持。本项工作同时也受到了落基山研究所以及另外 36 个基金会和个人的资助。中国政府也通过提供资源、分析和资助等形式对本研究给予了实质的帮助。

参考文献

- Energy Research Institute (ERI), Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), and Rocky Mountain Institute (RMI), 2016, “Reinventing Fire: China - A Roadmap for China’s Revolution in Energy Consumption and Production to 2050, Executive Summary.”
http://www.rmi.org/energy_roadmap_china
- Fridley, D., Aden N., Zhou N., 2007, “China’s Building Energy Use.” Berkeley: Lawrence Berkeley National Lab. <https://china.lbl.gov/sites/all/files/lbl-506e-building-energyoct-2007.pdf>
- International Energy Agency (IEA), 2016, “Key World Energy Statistics.”
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics.html>
- National Bureau of Statistics, 2016, “China Energy Statistical Yearbook 2015.” Beijing: China Statistics Press.