

China's Trajectories beyond Efficiency: CO2 Implications of Maximizing Electrification and Renewable Resources through 2050

Authors:

Nina Khanna, David Fridley, Nan Zhou, Nihan Karali, Jingjing Zhang, Wei Feng

**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



This work was supported by Energy Foundation China through the U.S. Department of Energy under Contract No. DE-AC02-05CH11231.

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.

中国超越能效的发展轨迹： 到 2050 年最大限度实现电气化和使用可再生资源对 二氧化碳减排的影响

Nina Zheng Khanna
Lawrence Berkeley National Laboratory
One Cyclotron Road, MS90R2121
Berkeley, CA 94720, USA
Email: xzheng@lbl.gov

Nihan Karali
Lawrence Berkeley National Laboratory
One Cyclotron Road, MS90R2121
Berkeley, CA 94720, USA
Email: nkarali@lbl.gov

David Fridley
Lawrence Berkeley National Laboratory
One Cyclotron Road, MS90R2121
Berkeley, CA 94720, USA
Email: dgfridley@lbl.gov

Jingjing Zhang
Lawrence Berkeley National Laboratory
One Cyclotron Road, MS90R2121
Berkeley, CA 94720, USA
Email: jingjingzhang@lbl.gov

Nan Zhou
Lawrence Berkeley National Laboratory
One Cyclotron Road, MS90R2121
Berkeley, CA 94720, USA
Email: nzhou@lbl.gov

Wei Feng
Lawrence Berkeley National Laboratory
One Cyclotron Road, MS90R2121
Berkeley, CA 94720, USA
Email: weifeng@lbl.gov

摘要

为支持《巴黎协定》，中国承诺在 2030 年左右达到二氧化碳排放峰值并争取提前达峰，并且 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%。为了将全球平均气温增幅限制在 1.5°C 以内，在能效继续发挥主要作用的同时，中国需要采取除能效以外的其他重大行动。本研究采用自下而上的全国终端用能模型评估了中国的二氧化碳排放路径。这些路径除了包括成本有效的能效技术外，还包括最大限度地实现终端电气化和采用新的可再生资源等策略，以实现更低的二氧化碳排放量。近期的相关模型研究只关注可再生能源发电，并采用简化后的方法对未来电力需求增长进行预测。与上述研究不同，本研究评估了具体终端用能部门最大限度实现电气化对二氧化碳减排的影响，还评估了需求侧使用非常规可再生资源的影响。

本文采用情景分析法来评估中国在不同技术选项下潜在的二氧化碳减排量。这些技术选项包括电力部门迅速脱碳、各部门最大限度地实现电气化、工业部门最大限度地利用生物质能和低温可再生热能以及建筑部门最大限度地利用太阳能采暖、制冷和水暖技术。虽然这些非常规技术已经在一些欧洲国家得到广泛应用，但中国仍缺少大规模采用这些技术的规划。研究表明，最大限度地利用非常规电力和可再生能源技术可以使中国提前至 2023 年达到二氧化碳排放峰值，并且在 2050 年前能进一步大幅减少二氧化碳排放量。除能效技术之外，最大的额外二氧化碳减排潜力来自于工业部门的化石燃料被可再生热能所替代。上述结果表明，加快非常规电力和可再生能源技术的利用，可以为中国带来额外的二氧化碳减排机遇，但仍需新的政策和策略来改变需求部门对技术的选择。

引言

为支持《巴黎协定》，中国承诺在 2030 年左右达到二氧化碳排放峰值并争取提前达峰，并且 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%。在此之前，中国已在 2014 年 11 月的《中美气候变化联合声明》中承诺，到 2030 年中国的非化石能源比重将提高到 20% 左右。此外，中国还在“十三五”（2016-2020）规划中提出，到 2020 年单位国内生产总值能耗降低 15% 以及单位国内生产总值二氧化碳排放降低 18%。上述目标是在中国政府多年来推动相关工作的基础上提出的，这些工作包括在所有需求侧部门提高能效以及尝试对电力部门进行脱碳。虽然 2005 年至 2014 年中国的单位国内生产总值能耗下降了 30%，但一次能源消费总量增加了 163%，并且 2014 年煤炭仍占一次能源消费的 66%。

因此，除能效措施外，中国还需采取其他重大行动来实现其 2020 年和 2030 年的节能减排目标，同时这些行动也有助于将全球平均气温增幅控制在 1.5°C 以内。本文主要研究通过采用额外的技术来进一步降低中国未来二氧化碳排放量的可行性，相关技术选项包括最大限度地提高电气化水平、电力部门脱碳以及在需求侧利用可再生能源技术等。

近期的一些模型研究分析了在高比例可再生能源发展情景下中国二氧化碳排放的可能轨迹，相关研究包括《中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究》（ERI 2015）及《可再生能源前景：中国——REmap 2030 分析》（IRENA 2014）。不过，本文作者尚未发现同时考虑到能效、电气化及非常规可再生资源利用（如可再生热能）等措施对中国 2050 年前二氧化碳排放综合影响的近期研究。此外，可再生能源技术已在一些欧洲国家的需求侧部门得到广泛应用，如低温可再生热能技术以及太阳能采暖和制冷技术，但这些技术尚未在中国未来的二氧化碳排放展望中予以考虑。此外，整个经济体的最大可能电气化率通常通过历史趋势外推或者人均用电量达到发达国家水平的方法来估计，但这种方法通常导致预测的电气化率过高，从终端用能部门角度来看可能不具有可行性。

本研究采用自下而上的全国终端用能模型评估了中国的二氧化碳排放路径。这些路径除了包括成本有效的能效技术和燃料替换策略外，还包括最大限度地实现终端电气化和在需求侧部门采用新的可再生资源等策略，因此具有更低的二氧化碳排放量。本文采用情景分析法来评估中国在下述技术选项中潜在的二氧化碳减排量，即电力部门迅速脱碳、各终端用能部门最大限度地实现电气化、工业部门最大限度地利用生物质能和低温可再生热能以及建筑部门最大限度地利用太阳能采暖、制冷和水暖技术。

本文第一部分概述了自下而上的终端用能建模方法。第二部分探讨了在本研究四种不同情景中使用的具体假设，包括对中国最大限度地实现电气化和采用需求侧可再生能源技术的潜力进行评估。第三部分展示了每种情景下各部门的能源和二氧化碳排放结果以及二氧化碳排放总量的变化趋势，第四部分基于主要结果给出了研究结论和政策建议。

建模方法

本研究采用中国 2050 年“需求资源能源分析模型”（DREAM）来评估中国未来的能源和二氧化碳排放轨迹，并通过该模型分析除了成本有效的能效技术之外其他的策略对二氧化碳排放的潜在影响。中国 2050 DREAM 模型的基础是一套针对中国能源和经济结构构建的核算框架，该框架依托于斯德哥尔摩环境研究所开发的 LEAP（长期能源替代规划）软件平台。LEAP 是一个中长期综合建模平台，可用于追踪一个经济体各个部门的能源消费、生产和资源开采活动，也可用于长期情景分析。LEAP 允许对深入至终端使用层面的技术发展进行综合的、基于情景的建模和表征，并已被全球 190 多个国家和地区采纳并使用（Heaps 2016）¹。中国 2050 DREAM 模型是由劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）中国能源研究室于 2005 年使用 LEAP 开发的。作为“重塑能源：中国”研究项目的一部分，研究团队近期对该模型进行了完善和更新。上述研究项目由 LBNL 与美国落基山研究所和中国能源研究所（ERI）经历三年合作完成（ERI, LBNL and RMI 2016）。其中，ERI 是能源领域领先的政府智库，为中国的关键政策和规划制定部门——国家发展和改革委员会提供咨询。

中国 2050 DREAM 模型包括一个由四个²子部门组成的需求模块以及一个由能源生产、输送及分配子部门组成的转换模块。基于 LEAP 平台，中国 2050 DREAM 模型描述了能源系统的不同方面，包括终端用能技术的扩散、宏观经济整体和具体部门的能源需求驱动因素、开采化石燃料和生产能源所需的能源投入以及有着不同发电调度算法的电力部门等。基于同 Kaya 恒等式相关的“影响=人口×富裕×技术”

（IPAT）框架，本模型描述了能源使用活动的宏观经济和物理驱动因素，并详细考虑了终端使用层面的技术发展。在此基础上，使用该模型评估从基年到 2050 年中国的发展对能源和二氧化碳排放的总体影响。

中国 2050 DREAM 模型的需求模块包括居住建筑、公共建筑、工业和交通等四个主要的经济部门。对于推动能源使用活动的关键宏观经济参数（如经济增长、人口和城市化），基于国际上及中国的权威研究报告确定其情景值，如联合国《世界人口展望》报告以及中国能源研究所的报告。对于居住建筑部门而言，城镇化和家庭收入的增加将推动能源消费。这是因为城镇家庭通常比农村家庭消费更多商品能源，同时家庭收入的增加也带动了住房面积（以及相应的采暖、制冷和照明负荷）和家电拥有量的增长。类似地，公共建筑部门的能源需求由两个关键因素驱动，包括不同建筑类型的建筑面积（占地面积）以及

¹ 关于 LEAP 及其应用的更多信息请见以下网页：

<https://www.energycommunity.org/default.asp?action=introduction>

² 本模型也包括了农业，但由于农业占中国能源消费总量的比重很小且持续下降，因此本文未对农业进行专门讨论。

诸如采暖、制冷和照明（MJ/m²）等活动的终端用能强度。建筑部门也可从以下角度进行区分，包括三个主要气候区、新建与既有建筑以及五个建筑效率类别等。

对于工业部门，该模型包括了 12 个以物质生产为特征的能源密集型工业子行业，包括水泥、钢铁、铝、氨和乙烯等关键重工业行业。这些行业的能耗主要由以下几个重要的物理驱动因素驱动，包括为了容纳不断增长的城市人口而新建的建成环境、农作物播种面积、肥料施用强度以及人均塑料需求等。另外，还有 18 个以附加值生产为特征的轻工业子行业，例如食品业、饮料和烟草制品业、纺织业、医药制品业以及金属制品业等各种制造业。这些行业的活动水平完全由宏观经济因素驱动，其预测值来自 ERI 针对中国构建的可计算一般均衡模型。交通需求由货运和客运需求驱动，其中货运量是经济活动（以工业部门生产增加值衡量）的函数，而客运量则是基于各类运输方式（如公共汽车、火车及私家车）的平均车辆行驶里程计算。在能源需求模块中，本模型能够从终端用能、技术和燃料结构以及技术变革等角度描述各部门的能源消费模式。其中，技术和燃料结构包括了用能设备的市场饱和趋势及使用趋势，而技术变革包括了能效的提高以及存在于经济增长、城市发展与能源需求之间的复杂联系。

情景分析

本研究构建了四种情景来评估中国潜在的二氧化碳减排量，在情景中考虑了电力部门迅速脱碳、各部门最大限度地实现电气化以及工业部门和建筑部门最大限度地利用生物质能和新兴的可再生能源技术。

“参考情景”以及“成本有效的能效和可再生能源情景”是作为“重塑能源：中国”研究项目的一部分而构建的。在此基础上，本研究构建了两种新的情景，用来评估除了成本有效的措施之外其他措施的最大技术减排潜力。这些措施包括将所有终端用能部门电气化（含电力部门脱碳）以及在需求侧最大限度地使用可再生能源技术。新增的这两个情景旨在评估电气化和在需求侧采用可再生能源技术的最大技术可行潜力，以便与“成本有效的能效和可再生能源情景”进行对比。

四种情景都具有相同的宏观经济驱动因素，例如人口、城市化和国内生产总值增速等。然而，由于工业内部结构的调整，参考情景下工业子行业的活动水平与其他三种“替代”情景不同。与参考情景相比，替代情景下的行业结构将从能源密集型的重工业转移到高附加值的轻工业，因此替代情景下的轻工业增长较快，而重工业增长较慢。三种替代情景具有相同的工业总体和工业子行业的活动水平（包括实物生产和附加值生产）。类似地，发电技术的装机容量在参考情景和其他三种替代情景之间也存在差异，这反映了各情景下电力部门脱碳步伐的不同。在参考情景中，为了达到中国公布的非化石能源占比目标，非化石能源（包括核能）的装机容量将会不断增长，到 2050 年 62% 的发电装机容量将来自非化石能源。在三个替代情景中，到 2050 年电力系统将新增 2940GW 以上的太阳能和风能装机容量，非化石能源将占总发电装机容量的 83%。

参考情景

将参考情景作为基线情景，假设到 2010 年为止所有仍在实施的政策在未来依然有效，并将继续对所有能源需求、供应和转换部门产生影响。这些政策不仅包括到 2010 年为止中国已采用的关于能源和二氧化碳排放强度的全部减排目标，还包括已公布的电力部门非化石能源发电装机容量目标。作为一个与事实相悖的基线情景，参考情景假定在 2010 年之后将不再引入额外的政策，但在 2050 年之前技术将持续自主改进。

成本有效的能效和可再生能源情景

该情景假设到 2050 年中国最大限度地采用当前已经商业化的、具有成本效益的能效技术与可再生能源供应。例如，对于建筑部门，假设最节能又具有成本效益³的电器和设备到 2050 年时将达到 100% 的市场饱和度。对于所有终端用能部门以及电力和热力生产部门，假设高效能和更清洁（例如非化石能源）的技术将随着时间的推移而得到加速采用。此外，该情景也考虑了终端用能电气化水平的提高。本研究对于具体技术的相关信息进行了详细分析，包括各项技术的投资、运营成本、能源使用、国际经验、各部门利益相关方的意见以及专家意见等。在此基础上，确定该情景下的电气化水平提高程度，确保其具有成本有效性。

由于字数限制，有关“参考情景”和“成本有效的能效和可再生能源情景”中各部门技术采纳和燃料替换的具体假设，请参考《〈重塑能源：中国〉执行摘要》（ERI, LBNL 和 RMI, 2016）的相关讨论。此

³ 成本效益的定义为在技术或生产工艺中节能成本低于当前的能源价格带来的成本。换言之，因节能而产生的成本节省大于为提高能效而投入的增量成本。

外，另一篇编号为 1-242-17 的“2017 年 ECEEE 夏季研讨会”论文(Price et al. 2017)也对这两个情景的假设做了重点讨论。

最大限度实现电气化情景

构建“最大限度实现电气化情景”是为了评估除了成本有效的能效和可再生能源技术之外的、来自需求部门最大限度实现电气化的额外二氧化碳减排量。该情景基于“成本有效的能效和可再生能源情景”构建，但对所有终端用能部门进行了额外的电气化。针对国际上相关技术的采用率和政策趋势进行了评估和分析，并在此基础上对有代表性的建筑终端用能、运输方式和工业生产过程提出了有关假设。

交通

对于客运部门，假设到 2050 年出租车和非个人用车完全实现电气化，即电动汽车（EV）的使用率为 100%。近 40 个中国城市已经制定了电动汽车占市政用车的比重在 2015 年达到 30% 的目标，而且随着补贴政策的持续实施，预计这一比重在 2020 年前将进一步提高（MIT 2013）。为了使私人电动汽车的使用量迅速增加，从当前至 2050 年需要为此提供政策支持并建设基础设施。目前，40 个城市中的 21 个同时采用了货币和非货币的电动汽车激励政策，包括在国家补贴的基础上给与地方配套补贴以及免除在当地办理车牌的限制（Shi et al. 2015）。对于货运部门中卡车车队的插电式混合动力柴油车，本研究基于轻型和中型卡车的预期行驶里程来确定其基年到 2050 年的最大技术可行普及率。

工业

对于玻璃业、食品和饮料业以及纸浆和造纸业的工业生产过程，由于没有中国或亚洲的具体信息，因此基于英国政府的工业脱碳和能效路线图确定上述工业生产过程的电气化水平。此处考虑了三个具体应用，包括：

- 在玻璃业用电熔替代化石燃料熔融；
- 在食品和饮料业用电力点火替代燃煤点火；
- 在纸浆和造纸业用电力干燥机替代热力干燥机。

目前，以上应用均未实现商业化。根据英国政府发布的《迈向 2050 年的工业脱碳和能源效率路线图——玻璃业》报告，玻璃业的电熔技术可能在 2030 年以后实现商业化（UK 2015a）。基于上述信息，假设中国玻璃业从 2030 年开始引入电熔技术，且到 2050 年市场份额达到 30%。此外，还假设中国食品和饮料业的电力点火技术和中国纸浆和造纸业的电力干燥机将从 2035 年开始实现商业化（UK 2015b, UK 2015c），且到 2050 年市场份额分别达到 10% 和 5%。鉴于这些技术目前仍处于研究阶段且缺少增量成本的信息，因此本文对未来市场份额普及率的假设相对保守。

建筑

对于公共建筑，由于目前的空气源热泵技术不能在较冷的温度下有效地工作，所以在技术层面上最大限度地采用空气源和地源热泵分别进行采暖和制冷时，需要考虑地理局限性和气候条件的不同。需特别指出的是，华北、过渡区与华南气候区的热泵特性与应用分别是基于挪威和瑞典、法国以及意大利的基准确定的（见表 1）。

表 1 总结了“最大限度实现电气化情景”下各行业的假设。

表 1. 情景分析中各部门技术采用的关键假设

	2010 年	2050 年参考情景	2050 年最大限度实现电气化情景
运输			
客车	电动汽车占比为 0%	电动汽车占私家车市场的 10%， 电动汽车占出租车和非个人用车市场的 30%	电动汽车占私家车市场的 75%， 电动车占出租车和非个人用车市场的 100%
卡车	插电式混合动力柴油车占比为 0%	插电式混合动力柴油车占比为 0%	插电式混合动力柴油车占中型卡车市场的 18%， 插电式混合动力柴油车占轻型卡车市场的 50%
工业			
玻璃业	电熔占比为 0%	电熔占比为 0%	电熔取代 30% 的化石燃料熔融
食品和饮料业	电力点火占比为 0%	电力点火占比为 0%	电力点火取代 10% 的燃煤点火
纸浆和造纸业	电力干燥机占比为 0%	电力干燥机占比为 0%	电力干燥机取代 5% 的热力干燥机

公共建筑			
采暖	空气源热泵占比为 1.5%	根据气候区的不同, 空气源热泵占比为 10%-25%	根据气候区的不同, 空气源热泵占比为 40%-90%
制冷	地源热泵占比为 0.5%	地源热泵占比为 0%	根据气候区的不同, 地源热泵占比为 20%-25%
水暖	热泵热水器占比为 0%	热泵热水器占比为 0%	热泵热水器占比为 48%
居住建筑			
采暖	空气源热泵占比为 1.5%	根据气候区的不同, 空气源热泵占比为 10%-80%	根据气候区的不同, 空气源热泵占比为 40-100%

需求侧最大限度使用可再生能源情景

除了在交通、特定工业子行业和公共建筑部门最大限度地使用技术上可行的电气化技术以外, “需求侧最大限度使用可再生能源情景”还在“最大限度实现电气化情景”的基础上额外考虑了可再生能源的使用。具体而言, 在工业部门采用非常规可再生热能和生物质能技术, 并在公共建筑部门采用太阳能热技术。基于国际上相关技术的已有应用, 本情景假定了基年至 2050 年中国需求部门对非常规可再生能源的额外使用量。本情景未考虑供应侧(包括电力部门)对可再生能源的额外使用, 且发电燃料结构与“成本有效的能效和可再生能源情景”相同。

工业部门可再生热能利用

本研究仅关注温度低于 100° C 的低位热能。可再生热源包括太阳能、常规地热能和生物质能。在工业部门中, 低位热能需求来自工艺物流、工艺冷却和暖通空调系统, 其中工艺物流是低位热能需求的主要来源(USEPA 2016)。部分工业生产过程需要用到工艺热能, 例如热水或蒸汽需求过程、干燥和脱水过程、预热、巴氏消毒和灭菌、洗涤和清洁以及化学反应等(Mekhilef, Saidur, & Safari 2011)。据估计, 在全球范围内可再生能源占工业热能利用总量的 10%, 而其中 99%是以生物能源为基础的(Eisentraut & Brown 2014)。对于使用生物质来生产工艺热能而言, 在某些子行业中(如纸浆和造纸业和食品业), 生物质过程残渣的可用性一直是主要驱动因素(Eisentraut & Brown 2014)。与 OECD 国家广泛使用天然气不同的是, 煤炭在中国工业热源中占据主导地位, 占 2011 年工业热源的 85%(Eisentraut & Brown 2014)。

欧洲的一项研究显示, 温度低于 100° C 的热能占欧洲工业热能需求总量的 30%, 温度低于 400° C 的热能占工业热能需求总量的 57%(Caludia, Battisti, & Drigo 2008)。使用上述低温热能的主要行业有食品业、纸浆和造纸业、纺织业、化工业、机械制造业、运输设备制造业、采矿业和采石业等。虽然其中许多行业的能源密集程度较低, 但是这些行业对温度低于 100° C 的低位热能有着较高的需求(见图 1)。尽管上述数据来自欧洲, 但对于世界各地相应的工业子行业而言, 这些占比数据是具有代表性的, 因此本文假定这些数据同样适用于中国的工业部门。本研究还假定, 到 2050 年工业的低温热能需求将完全由生物质能、太阳能和地热能等各种可再生能源按照一定的比例进行供应。在缺少详细预测数据的情况下, 根据国际可再生能源机构(IRENA)研究中的“AmbD 2030 情景”(IRENA 2015), 假定各种可再生能源的比例从基年到 2050 年保持不变, 即生物质能占 63%、太阳能占 30%以及地热能占 7%。

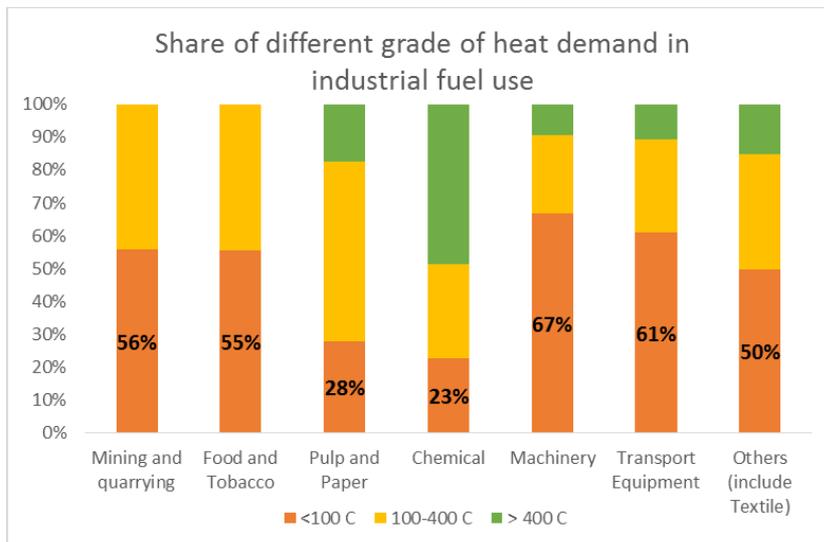


图 1. 关键工业子行业的低位热能需求占相应行业燃料使用量的比重

数据取自 *Caludia, Battisti, and Drigo, 2008*。

为提供高温热能而进行的生物质能利用

目前，生物质能是唯一能为工业部门提供高温热能的可再生能源。由于铁和水泥生产过程需要用到高于 400° C 的热能，因此“需求侧最大限度使用可再生能源情景”考虑了生物质能在上述过程中的应用。

通过以下两项技术升级，生物质能在一体化炼钢流程的高炉中得到了应用：

1. 为生产生物焦炭而在炼焦过程中混入生物质

现有文献已经对在炼焦过程中混入生物质的做法进行了广泛讨论 (MacPhee et al. 2009; Wei et al. 2013; Suopajarvi and Fabritius 2013)。为保持焦炭的特性且不降低其机械强度，在混合过程中最多可以加入 5% 的生物质。针对中国用于炼焦的配煤，假定其中生物质的比重不超过 5%。此外，还假定焦炭/生物质的替代率为 1/0.67 (Wei et al. 2013)。

2. 通过生物质喷吹技术使生物质部分或完全替代粉煤

生物质可以完全替代高炉中的粉煤 (Wei et al. 2013)。在巴西的钢铁行业中，在高炉中加入木炭而非粉煤是常见的做法。在“需求侧最大限度使用可再生能源情景”中，假设生物质/粉煤的替代率为 1/1，则到 2050 年生物质的最大部署率为 75%。

在荷兰和芬兰，生物质在水泥生产流程的窑炉中也用作替代燃料 (EUBionet 3 2009a&b)。根据荷兰和芬兰的试点工厂，将生物质在中国窑炉燃烧环节中的最大部署率设定为 50%。

用于商业采暖、制冷和水暖的太阳热能技术

根据英国建筑部门对供热的脱碳经验 (UK 2015d)，假定到 2050 年中国太阳能采暖技术的采用率为 8%。基于瑞典的案例 (Gustavsson et al. 2011)，假定到 2050 年建筑太阳能制冷技术在中国华北气候区和过渡气候区的普及率分别为 15% 和 20%；假定该技术在华南气候区的普及率为 30%。此外，根据 Faninger (2010) 的研究，假定到 2050 年太阳能热水器技术占公共建筑水暖市场的 30%。目前，该技术已在居住建筑部门广泛使用。

结果

最大限度实现电气化的结果

图 2 显示了四个需求部门在基年 2010 年和三种情景下 2050 年的电气化率。其中，电气化率的定义为电力占终端能源需求总量的比重。居住建筑部门和公共建筑部门的电气化水平较高，2010 年的电气化率分别为 22% 和 44%；而工业部门和交通部门的电气化水平较低，2010 年的电气化率分别只有 19% 和 1%。在未来四十年内，这四个部门拥有巨大的电气化增长潜力。在多数情景下，自主技术变革是电气化水平提高的主要原因。例如，由于城市化和家庭收入的增长，居住建筑中电器的使用率不断提高。不过，若在电力部门脱碳的基础上对需求部门实施燃料替换（将特定终端用能技术所用的燃料切换为更清洁的燃料，如表 1 所示），则四个部门均能实现不同程度的电气化，且具有额外的成本效益。与此同时，需加速采用成本有效的能效措施和技术，这有助于降低中国的能源需求总量。因此，在“成本有效的能效和可再生能源情景”下，各部门在 2050 年都拥有较高的电气化率。其中，居住建筑和公共建筑的增幅最大，其次是交通部门和工业部门。

在“最大限度实现电气化情景”下，工业部门能提供的额外电气化潜力十分有限。这是由于电气化在工业部门的适用性不高，仅能用于纸浆和造纸业、食品和饮料业以及玻璃业。类似地，居住建筑能提供的额外电气化潜力也很有限，这主要有以下三方面原因：一是为满足华北的采暖需求而持续广泛地使用集中供热；二是 100% 依靠空调进行制冷；三是农村家庭持续使用除电力以外的其他燃料。然而，对于公共建筑部门和交通部门而言，电力占终端能源需求总量的比重还有很大的提升空间，如图 2 所示。

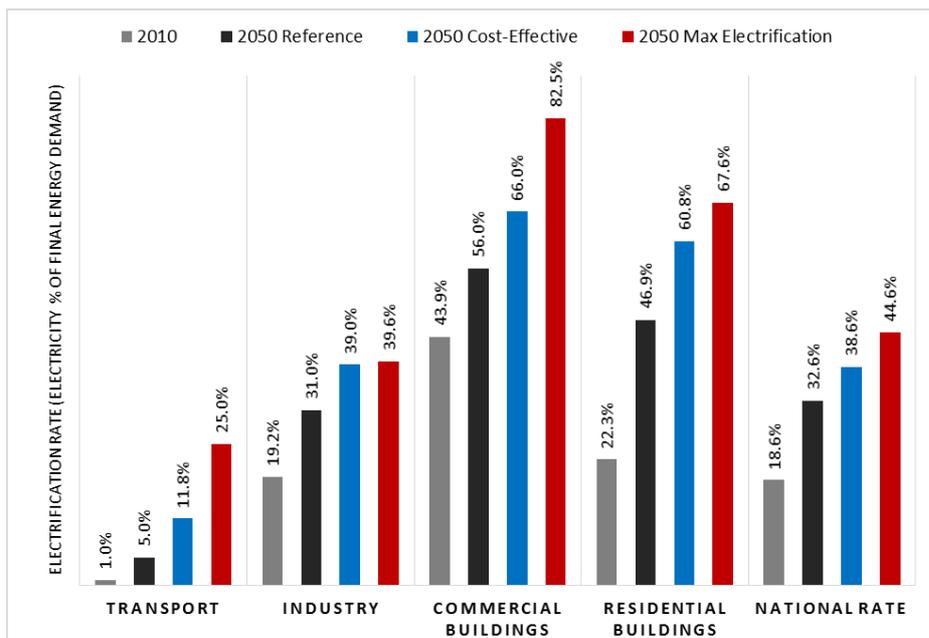


图 2. 2010 年和 2050 年不同情景下的分部门电气化率

注：电气化率为电力占终端能源需求总量的比重。

尽管 2050 年全国电气化率从参考情景的 33% 提高至“成本有效的能效和可再生能源情景”的 39%，但图 3 显示中国的电力需求总量出现了显著下降，2050 年的降幅达到 21% (2,380 TWh)。在参考情景和“最大限度实现电气化情景”下比较中国 2050 年的电气化率时，这种反差情况更为明显。在参考情景下，2050 年全国电气化率相对较低，仅为 32%，而电力需求总量则相对较高，达到 11320 TWh。在“最大限度实现电气化情景”下，全国电气化率高达 45%，但电力需求总量与参考情景相比却下降了 13%。

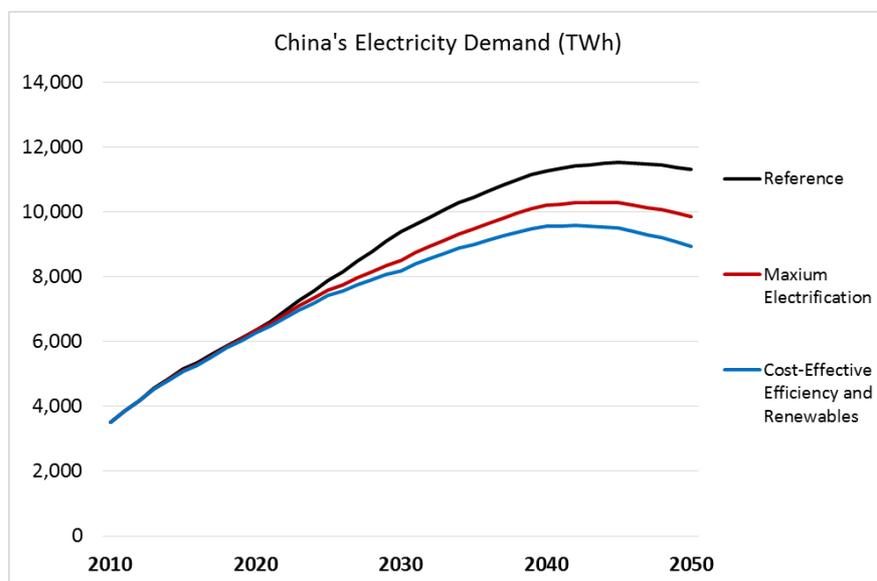


图 3. 2010 年至 2050 年不同情景下的中国电力需求总量

图 3 中两个替代情景与参考情景的关键区别在于，前者的终端能源需求总量较低。其中，一方面的原因是在替代情景中采取了更积极的能效提升策略，另一方面的原因是在替代情景中对各部门实施了燃料替换策略（见图 4），使得煤炭、焦炭和石油制品的需求大幅降低。由于在“最大限度实现电气化情景”下额外采用了能效更高的电气设备，因此该情景下的能源需求总量最低，2050 年仅为 2718 百万吨标煤

(Mtce⁴)。相比之下，参考情景下的能源需求总量高达 4266 Mtce，而“成本有效的能效和可再生能源情景”下也达到 2850 Mtce。上述结果表明，只有先通过能效提高、再通过额外的燃料替换来降低能源需求总量，才能实现与最大限度电气化相关的二氧化碳减排，并继而实现与电力部门增加可再生能源利用相关的二氧化碳减排。换言之，如果仅在供应侧全面部署可再生能源，而并未同时在需求侧实施能效提高策略，那么电气化和利用清洁电力的减排潜力将受到限制。

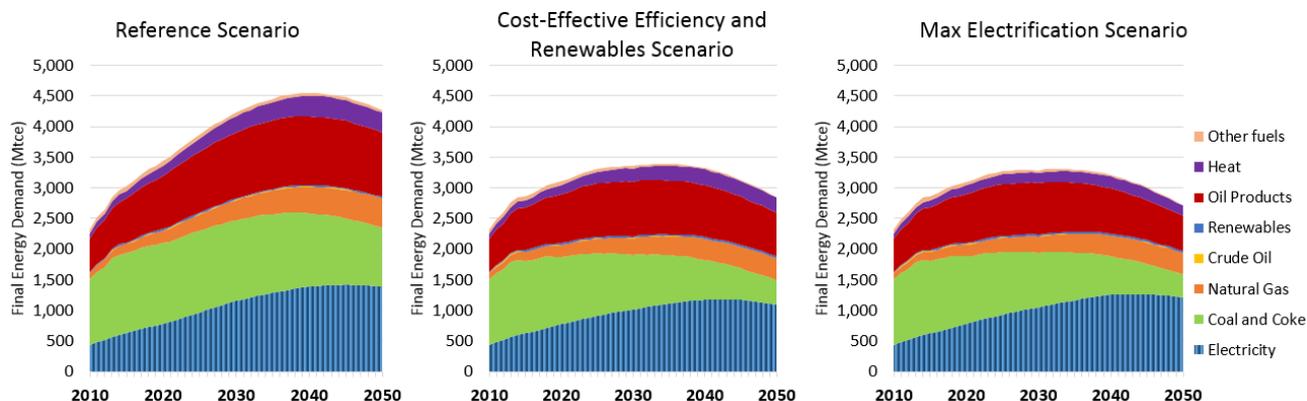


图 4. 2010 年至 2050 年不同情景下分燃料类型的终端能源需求

需求侧最大限度使用可再生能源的结果

在“成本有效的能效和可再生能源情景”基础上，通过在公共建筑部门和工业部门最大限度地部署需求侧可再生能源技术，可再生能源的使用量到 2050 年将额外增加 216 Mtce。在“需求侧最大限度使用可再生能源情景”下，2010 年至 2050 年中国可以利用图 5 所示的各类可再生能源来进一步降低二氧化碳排放量。在各需求部门额外使用的可再生能源中，工业部门的可再生热能使用量在 2025 年成为最大的来源，一举超越公共建筑部门稳步增长的太阳能使用量。可再生热能使用量的大幅增长主要由以下两个因素引起：一是工业部门在中国终端能源消费中的占比具有主导地位，该比重虽然呈下降趋势，但 2050 年仍达到 47%；二是能够利用可再生热能的轻工业持续快速增长。

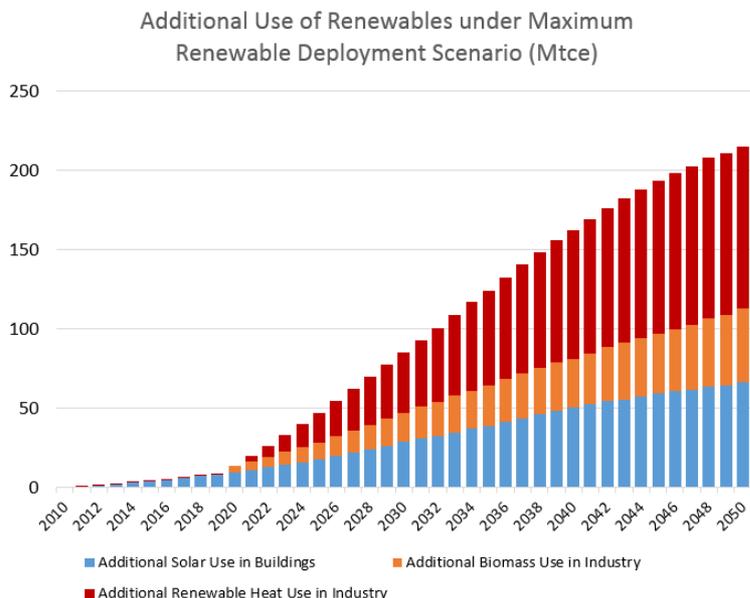


图 5. 2010 年至 2050 年“需求侧最大限度使用可再生能源情景”下的可再生能源额外使用量

图 5 还间接显示了需求侧的建筑部门和工业部门对可再生能源的额外使用潜力。在 2022 年及其之前，公共建筑部门具有更大的可再生能源额外使用潜力，这是因为该部门使用的新型太阳热能技术已经实现了商业化。不过，由于工业部门对可再生热能技术和生物质能技术的使用持续快速增长，其增速超过了

⁴ 标煤是中国的能源计量单位，1 百万吨标煤 = 29.27 百万吉焦耳（1 Mtce = 29.27 million gigajoules）。

公共建筑部门对太阳热能技术的部署增速，因此在 2022 年之后工业部门的可再生能源额外使用潜力超过了公共建筑部门。到 2050 年，工业部门占中国可再生能源额外使用潜力的 69%，而公共建筑部门仅占 31%。

在“需求侧最大限度使用可再生能源情景”下，如果中国对可再生能源进行额外的利用，那么能够被替代的可排放二氧化碳的燃料见表 2。可再生能源额外使用量中的大部分用于替代煤炭、焦炭和天然气，小部分用于替代电力和热力。对于被需求侧可再生能源利用所替代的燃料，其能源结构十分重要，因为该结构直接影响到额外使用可再生能源这一策略的二氧化碳减排潜力。到 2050 年，87 Mtce 的煤炭、54 Mtce 的天然气、45 Mtce 的热力、26 Mtce 的电力和 4 Mtce 的石油制品可以被 216 Mtce 的太阳热能、生物质能和可再生热能所替代。与“成本有效的能效和可再生能源情景”相比，这意味着 2050 年将减排 634 百万吨二氧化碳，减排率为 13%。

表 2. 被替代的可排放二氧化碳的燃料（被需求侧额外使用的可再生能源替代）

单位: Mtce	2020	2030	2040	2050
煤炭和焦炭	4.12	43.78	65.36	86.98
天然气	2.65	15.93	36.94	54.06
石油制品	-	2.63	4.62	4.25
热力	1.01	12.59	30.37	44.99
电力	2.99	8.62	20.49	26.17
替代总量	10.76	83.55	157.78	216.45

对二氧化碳减排的影响

图 6 显示了四种情景下中国与能源相关的二氧化碳排放总量的预测值。在参考情景下，中国的二氧化碳排放将从 2010 年的 83.5 亿吨（Gt）增长到 2050 年的 115.7 亿吨，并在 2036 年达到排放峰值 115.7 亿吨。“成本有效的能效和可再生能源情景”和“最大限度实现电气化情景”具有十分相似的排放轨迹，两者均在 2023 年达峰，峰值水平分别为 104.3 亿吨和 103.9 亿吨。到 2050 年，上述两种替代情景中的二氧化碳排放量均会出现大幅下降，其中“成本有效的能效和可再生能源情景”将降至 47.9 亿吨，而“最大限度实现电气化情景”则降至 47.2 亿吨。在上述两种情景下，中国 2050 年的二氧化碳排放量将比参考情景下的排放量降低大约 60%。尽管这两种情景下的二氧化碳排放轨迹类似，但两者在 2010 年至 2050 年之间的累积二氧化碳排放量存在较大差异。其中，“最大限度实现电气化情景”的累积排放量将比“成本有效的能效和可再生能源情景”减少 39.8 亿吨。即使电力部门没有进一步脱碳，上述累积减排仍有可能实现。这表明，在电力部门进一步脱碳的情况下（进一步采取超出成本效益范围之外的措施，即采取不具有成本效益的措施），最大限度提升电气化水平可以使中国实现额外的二氧化碳减排。

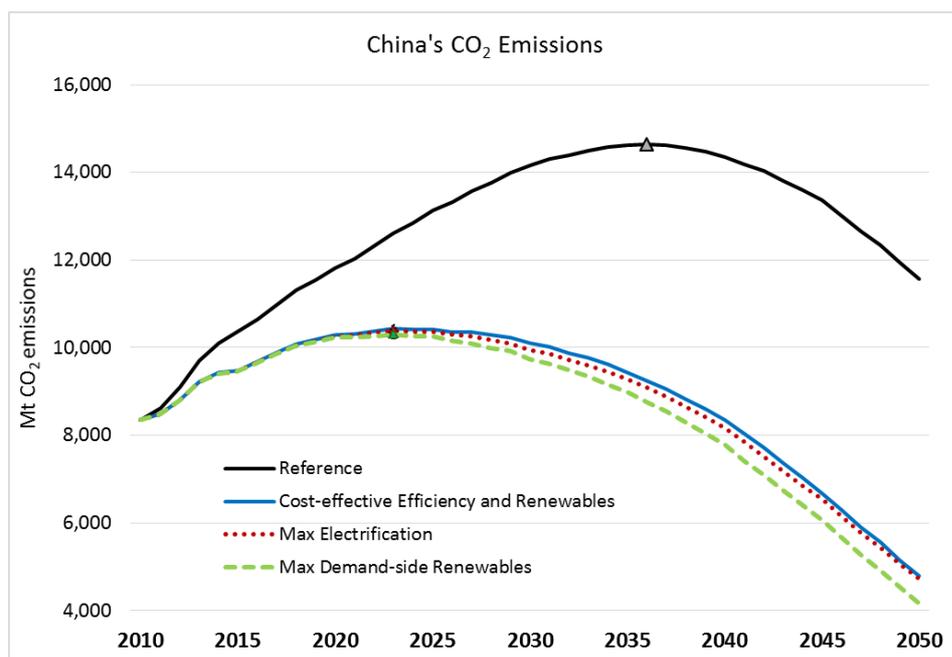


图 6. 2010 年至 2050 年不同情景下中国二氧化碳排放量的预测值

注：Y 轴原点不为 0。

尽管在“需求侧最大限度使用可再生能源情景”下中国也于 2023 年达到二氧化碳排放峰值（103.0 亿吨），但该情景 2025 年之后的二氧化碳排放量将显著低于其他三种情景。到 2050 年，该情景下的中国二氧化碳排放总量为 41.6 亿吨，比“成本有效的能效和可再生能源情景”低 13%，比参考情景低 64%。换言之，在“成本有效的能效和可再生能源情景”已经取得的减排成效基础上，通过在需求侧最大限度地使用可再生能源，中国将在 2050 年进一步减少 6.34 亿吨二氧化碳排放。这也意味着，2010 年至 2050 年中国将累积实现 133.0 亿吨额外的二氧化碳减排潜力。

结论和政策建议

本研究的结果表明，中国在 2030 年之前实现二氧化碳排放达峰的目标是可行的，且存在多种实现路径。同时，与不引入新政策的参考情景相比，上述达峰路径下的中国二氧化碳排放量将显著下降，到 2050 年减排率将高达 60%。即使仅实施成本有效的能效措施及燃料替换策略，中国也可提前至 2023 年达到二氧化碳排放峰值。在此基础上，如果继而在需求侧实施最大限度电气化以及使用非常规可再生能源的策略，那么可以进一步大幅减少二氧化碳排放量。不过，为了实现每种替代情景下的二氧化碳减排量，仍需要克服一些重大的障碍。即使是“成本有效的能效和可再生能源情景”也存在诸多障碍，包括缺乏用于提高能效的资源和知识、缺乏针对能效标准的协调和执行、扭曲的关税和能源价格、对地区失业问题的顾虑以及一些部门缺少燃料替换的途径等。针对不同情景下的全国电气化率进行对比，结果显示提高能效在降低中国能源需求总量方面扮演了重要角色。上述结果也表明，能效的提高使得电气化水平的提高变得更具有可行性。由于一些部门（如交通部门和工业部门）的终端用能很难被电力取代，因此如果不减少所有部门的终端能源需求总量，那么电力占终端能源需求的比重将很难进一步提高。有限的全国电气化水平反过来又将限制清洁电力的利用和对化石燃料的替代。

在成本有效地提升电气化水平方面，所有四个需求部门都存在巨大的潜力。同时，在技术可行的范围内，各部门也都存在最大限度提升电气化水平的额外潜力，并能据此实现额外的二氧化碳减排量。不过，各替代情景下的电气化均面临重大挑战。尽管目前已在交通部门采取一些政策来提升电气化水平，但仍需更大的政策支持力度来提升建筑部门和工业部门的电气化水平。具体而言，尤其需要在建筑部门提升电暖、制冷和水暖技术的采用力度，并提升工业生产过程的电气化水平。此外，最大的障碍之一就是电气化与电力部门脱碳之间的相互依存关系，而克服该障碍需要先解决现存于新能源发电并网之中的挑战以及火力发电持续增长带来的挑战。为了在需求侧最大限度地使用可再生能源，需要对既有政策进行调整。调整后的政策不仅要在供给侧扩大可再生能源的利用，还要在需求侧提升分布式可再生能源的接入和利用，例如公共建筑部门的太阳能采暖、制冷和水暖技术等。为了推广新的电气化技术（如热泵和电动汽车）和需求侧可再生能源，还需要相应的支撑性政策、项目和措施，如补贴和试点示范项目。此外，对于低温可再生热能在部分工业子行业的潜在应用，需要提高认识并进行相应的能力建设。这对于工业部门进一步大幅降低二氧化碳排放十分关键。不过，鉴于中国工业规模大、相对分散的特点，完全实现低温可再生热能的应用潜力可能需要较长的时间，因此应当尽快开始推广该技术。尽管从全球来看，工业部门低温可再生热能的发展仍然十分缓慢，但是冰岛、瑞典和奥地利等欧洲国家已经在建筑部门取得了一些使用低温可再生热能的经验，这对于中国在工业部门部署低温可再生热能而言仍然是具有价值的。

本研究涉及的四种情景代表了中国未来能源和二氧化碳排放变化的四种可能路径。不过，这些情景没有明确地量化和比较不同策略的单一影响，如能效提高、需求侧和供给侧的可再生能源利用以及终端电气化等策略。因此，对于“成本有效的能效和可再生能源情景”目前包含的二氧化碳减排量，如果需要将其进一步分解为“成本有效的能效提升”和“燃料替换”两类减排量，那么需要开展新的研究并进行额外的情景分析。为了有助于政策制定者对减排政策进行优先级排序，还需要对以下两方面内容进行额外的建模和分析：一是单独分析“电力部门脱碳”对“最大限度实现电气化”的二氧化碳减排影响；二是比较需求侧和供给侧提升可再生能源使用量对二氧化碳减排的影响。

参考文献

Caludia, V., Battisti, R., & Drigo, S., 2008. Potential for solar heat in industrial processes. CIEMAT. Rome, Italy.

- Eisentraut, A., & Brown, A., 2014. Heating without global warming: market developments and policy considerations for renewable heat.
- Energy Research Institute of China (ERI), 2015, “China 2050 High Renewable Energy Penetration Scenario and Roadmap Study.” <http://www.efchina.org/Attachments/Report/report-20150420/China-2050-High-Renewable-Energy-Penetration-Scenario-and-Roadmap-Study-Executive-Summary.pdf>
- 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
- EUBionet3, 2009a. Biomass to replace fossil fuels in cement industry Finnsementti Oy, Parainen, Finland Biomass in cement industry.
- EUBionet3, 2009b. Biomass use in the Dutch cement industry ENCI, Maastricht, The Netherlands.
- Heaps, C.G., 2016. *Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system*. [Software version: 2017.0.5] Stockholm Environment Institute. Somerville, MA, USA. <https://www.energycommunity.org>
- International Renewable Energy Agency (IRENA), 2014, “Renewable Energy Prospects: China, REmap 2030 analysis.” http://www.irena.org/remap/IRENA_REmap_China_report_2014.pdf
- IRENA (2015), A background paper to “Renewable Energy in Manufacturing”, March 2015. IRENA, Abu Dhabi.
- MacPhee, J.A., Gransden, J.F., Giroux, L., Price, J.T. 2009. Possible CO2 mitigation via addition of charcoal to coking coal blends. *Fuel Processing Technology*. 90(1): p. 16-20.
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A., 2011. A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1777–1790. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.018>
- Ministry of Industry and Information Technology (MIIT), 2013, “Notice on the Efforts to Continue Promoting New Energy Vehicles Deployment and Use (in Chinese).” <http://zbs.miit.gov.cn/n11293472/n11295142/n11299183/15628903.html>
- Shi, H., Wang H., Ouyang M., Jiang F., 2015, “Analysis of Response of China New Energy Vehicle Markets to Government Policies.” Presented at the 28th International Electric Vehicle Symposium & Exhibition. Seoul, Korea: 3 – 6 May 2015. http://www.evs28.org/event_file/event_file/1/pfile/EVS28-Analysis%20of%20Response%20of%20China%20New%20Energy%20Vehicle%20Markets%20to%20Government%20Policies_2.pdf.
- Suopajärvi, H., Fabritius, T., 2013. Towards More Sustainable Ironmaking—An Analysis of Energy Wood Availability in Finland and the Economics of Charcoal Production. *Sustainability* 2013, 5, 1188-1207; doi:10.3390/su5031188
- Thomas, S., McKnight, S.J., Serrano, E.J., Mašlejová, A., Želinský, R., Tomáš, J., Vlašič, P., 2011. Laboratory evaluation of biomass usage for coke and sinter production. *Proceedings of METEC InSteelCon*, Düsseldorf (Germany).
- United Kingdom (UK) Department of Energy and Climate Change and Department of Business, Innovation and Skills. 2015a. “Industrial Decarbonisation and Energy Efficiency Roadmaps to 2050: Glass Sector.” https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/416675/Glass_Report.pdf
- UK Department of Energy and Climate Change and Department of Business, Innovation and Skills. 2015b. “Industrial Decarbonisation and Energy Efficiency Roadmaps to 2050: Food and Drink Sector.” https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/416672/Food_and_Drink_Report.pdf
- UK Department of Energy and Climate Change and Department of Business, Innovation and Skills. 2015c. “Industrial Decarbonisation and Energy Efficiency Roadmaps to 2050: Pulp and Paper Sector.” <https://connect.innovateuk.org/documents/17009435/29075831/Paper+and+pulp/a756a257-f2bb-4648-b748-a03a32ef73b7>
- UK Department of Energy and Climate Change and Department of Business, Innovation and Skills. 2015d. “Decarbonizing Heat in Buildings: 2030-2050: Summary Report.” <https://www.theccc.org.uk/archive/aws/IA&S/Element%20Energy%20-%20Decarbonising%20heat%20to%202050%20-%20Report.pdf>
- United Nations (UN), 2016, *World Population Prospects: 2015 Revision*. <https://esa.un.org/unpd/wpp/>

United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2016. Renewable industrial process heat. Retrieved April 1, 2016, from <https://www.epa.gov/rhc/renewable-industrial-process-heat#Footnotes>
Wei, W., Mellin, P., Yang, W., Wang, C., Hultgren, A., Salman, H., 2013. Utilization of biomass for blast furnace in Sweden - Report I: Biomass availability and upgrading technologies. KTH 35819-1.

致口

本项工作由能源基金会（美国）北京办事处通过加州大学与美国能源部编号 DE-AC02-05CH11231 的合同进行支持