



中国石油大学
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

经济管理学院
碳中和与能源创新发展研究院

迈向“双碳” 研究系列报告

(C系列-2021C04)

《双碳目标下高耗能行业转型路径》





双碳目标下高耗能行业转型路径 (摘要性报告)

核心结论

- 预计 2020-2025 年，节能减排技术在六大高耗能产业的推广应用，可节能折 1.23 亿吨标煤，减碳 3.33 亿吨；到 2030 年可进一步节能折 0.79 亿吨标煤，减碳 2.09 亿吨。
- 双碳目标下，节能减排技术推广在中国等发展中国家具有更大的潜力空间和更小的成本代价。
- 综合考虑各高耗能行业的节能减排潜力及成本经济性，火电行业应是未来节能减排工作的关注重点。
- 有色金属行业的节能减排潜力较大，但技术实施的成本相对最高，政府应适当给予补贴。
- 长期来看，能效技术的重要性会略有下降，而设备改造技术将发挥更关键的作用，各高耗能行业节能减排重点关注的技术类型差异将不断扩大。

1. 研究背景与目的

国家统计局数据表明，六大高耗能行业（火电行业、钢铁行业、非金属矿产品行业、炼油焦化行业、化工行业、有色金属行业）的总能耗占我国能源消费总量的 50% 以上，二氧化碳排放占比达到了 79.68%。伴随中国城镇化进程的快速推进、经济的快速发展和消费水平的不断提高，不断扩张的高耗能产业将成为影响碳减排目标实现的重要阻力。在双碳目标下，如何科学规划高耗能行业转型路径，推动高耗能行业走上更清洁、更节能、更低碳排放的发展模式具有重要的现实意义。

节能减排技术推广是高耗能行业低碳转型的重要抓手。过去十年，中国政府发布了一系列高耗能行业节能减排先进技术目录并取得了阶段性成果：2013-2017 年六大高耗能行业产品平均能耗水平每年下降约 4%。但与国际先进水平相比，我国高耗能产业的整体技术水平仍存在显著差距。继续提升高耗能行业的工

艺、技术、管理水平任重道远。

在实践中，节能减排技术在不同行业，甚至同一行业的不同子行业中应用和推广的效果、成本都有很大波动。为制定科学合理的高耗能行业低碳转型技术路线图，需识别出高耗能行业转型中兼顾节能效果、减碳潜力以及成本经济性的关键行业、关键生产工艺和关键节能减排技术。因此，本报告采用自底向上的系统性分析方法评估各节能减排技术在高耗能行业应用中的经济性和有效性，回答以下三个问题：

一是高耗能行业总体可实现的节能减排潜力空间，包括技术可行的节能减排潜力空间和成本可行的节能减排潜力空间，识别未来节能减排工作中的重点行业。

二是在单一高耗能行业内，预测各子行业或各生产工艺的节能减排贡献率，识别关键子行业/生产工艺环节。

三是预测各节能减排方式（能效技术、设备改造技术、末端治理技术、共生技术和管理改进技术）的节能减排效果和技术经济性，识别关键节能减排技术类型。

2. 主要研究思路与方法

2.1 研究边界

行业边界：根据《国民经济和社会发展统计公报》的界定，本报告重点关注中国六大高耗能行业。由于水泥行业的能源消耗占非金属矿产品行业能源消耗总量的三分之二，且非金属矿产品行业覆盖的子行业较为繁杂，因此本报告重点关注水泥行业的低碳转型路径分析。同时，考虑到生产过程的相关性，本报告将石油炼化、焦化行业和化工行业合并归为石油和化工行业进行分析。

时间边界：由于中国在巴黎协定中设定了 2015 年至 2030 年的节能减排目标，本报告重点分析了同期推广节能减排技术的贡献。选择 2015 年为基准年，2030 年为目标年，每五年划分一个研究阶段。

2.2 构建节能供给曲线

本报告采用节能供给曲线（Conservation Supply Curve, CSC）方法来分析高



耗能的节能减排潜力，包括六个主要步骤：

(1) 节能减排技术筛选。参考国家先进节能减排技术目录，并考虑数据可用性，在六大高耗能行业中筛选出 141 项节能减排技术；

(2) 计算每项技术的节能减排潜力与成本费用；

(3) 构建 141 项节能减排技术的节能供给曲线，评估高耗能行业技术可行的节能减排潜力和成本可行的节能减排潜力，识别未来节能减排工作中的重点关注行业；

(4) 根据所属具体生产工艺或子行业，对 141 项节能减排技术进行分类，评估高耗能行业各子行业/生产工艺的节能减排潜力空间，识别关键生产工艺或子行业；

(5) 评估不同节能减排方式的节能减排潜力并识别其中关键节能减排方式。节能减排技术分类依据如表 1 所示。

表 1 节能减排技术的分类

节能减排方式	定义
能效提升技术	可提高燃料利用效率，减少主要生产工序的资源损失，
设备改造技术	推进主要生产工艺装备规模化、高效、低排放的先进技术
末端治理技术	加强污染物末端处理，减少最终排放的技术
共生技术	重新利用一个行业的废物和副产品作为另一行业的替代材料/能源的技术
管理改进技术	通过对生产过程的实时监控和参数调整来提高管理和生产效率的技术

2.3 数据来源

高耗能行业节能技术来自《国家重点节能低碳技术推广目录(2017 年，节能部分》、《钢铁行业节能减排先进适用技术目录》、《水泥行业节能减排先进适用技术目录》、《电力行业节能减排先进适用技术目录》和《石化行业节能减排先进适用技术目录》等行业技术指导政策文件以及大量的文献调研。其他数据来自于统计年鉴及相关文献。

3. 主要研究结果

为分析双碳目标下各高耗能行业转型中的技术改进路线，本报告通过评估

141项行业技术的节能减排潜力和成本费用，进而识别出关键行业以及关键节能减排技术。主要研究结果如下：

3.1 火电行业、石油和化工行业的节能潜力最大

本报告分析了六大高耗能行业的141项节能减排技术，其中节能减排技术火电行业25项、钢铁行业27项、水泥行业22项、石油和化工行业36项、有色金属行业31项。各高耗能行业节能供给曲线结果图1所示。

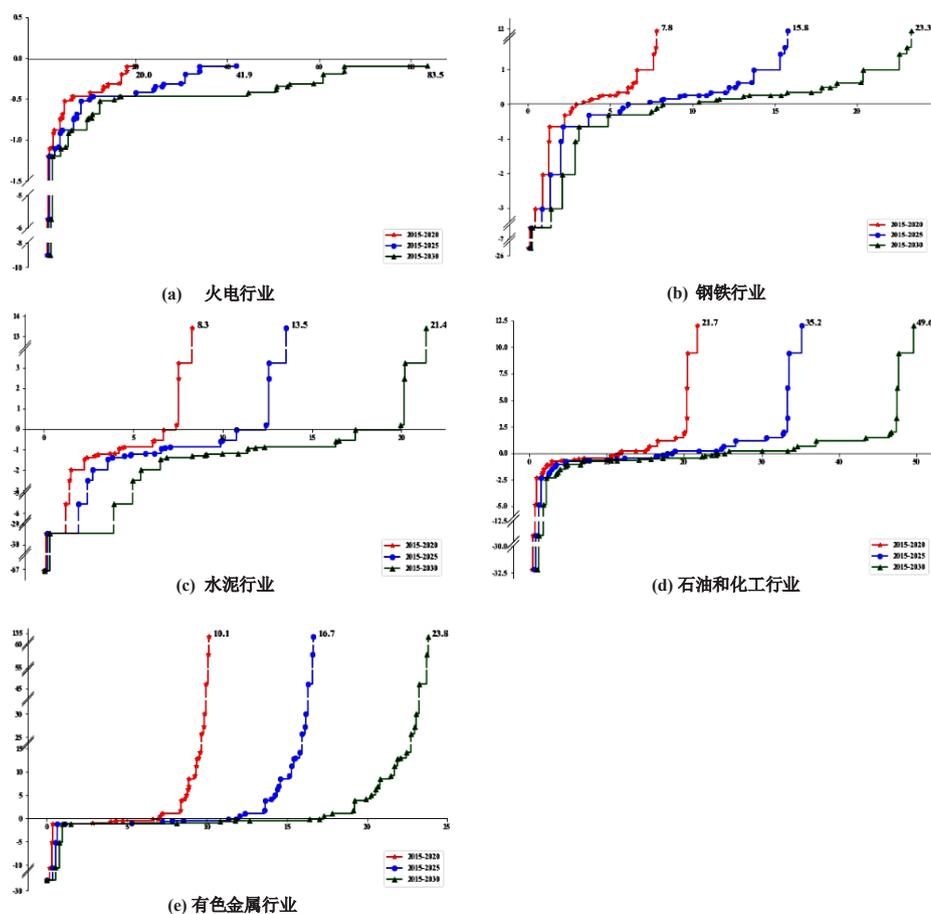


图1 各高耗能行业节能供给曲线

*注：纵坐标表示节能单位成本（元/吨标准煤），横坐标表示累计节能潜力（百万吨标准煤）

如图2所示，火电行业、石油和化工行业的节能潜力空间最大。此外，火电行业的节能成本（-729元/吨标准煤）在六大高耗能行业最低，有色金属行业的节能成本（3140.68元/吨标准煤）是最高的。研究结果表明：1）火电行业、石油和化工行业在实现双碳目标中将发挥重要作用，特别是对远期碳减排目标的实现（2025-2030），火电行业应是重要抓手；2）降低有色金属行业节能降耗成本是



未来行业转型工作的重要任务，政府可对该行业低碳转型进行适当补贴。

钢铁行业 and 水泥行业的节能减排潜力相对较小（图 2）。这是因为经过几十年的结构升级和技术提升，两行业的落后产能基本淘汰，先进节能减排技术在这两个行业中的普及率较高，从长期来看，钢铁和水泥行业在节能减排技术方面难有较大突破。

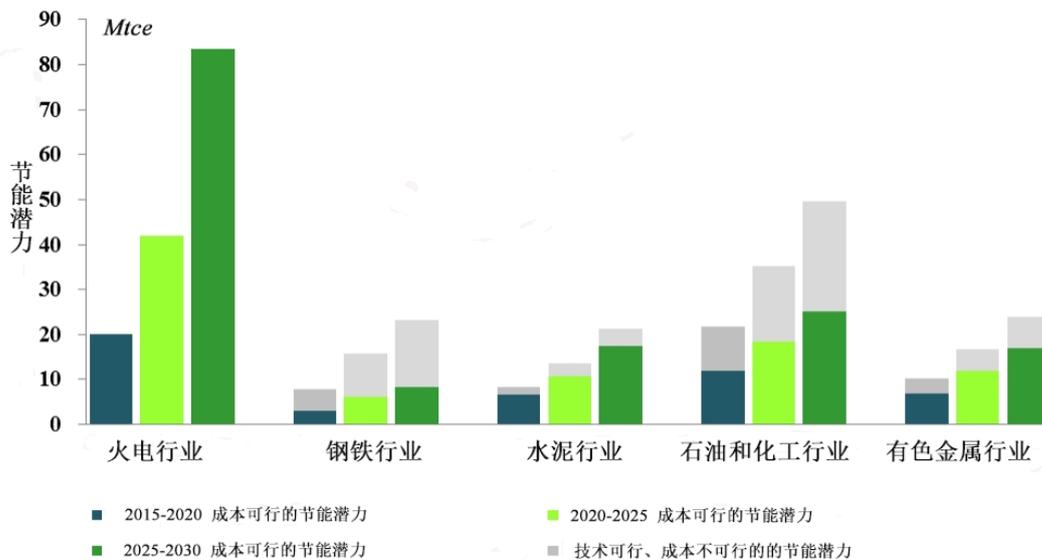


图 2 各能源密集型行业经济有效的节能潜力

3.2 能效提升、设备改造和管理改进技术将是未来节能减排的关键抓手

本报告将 6 大高耗能行业的 141 项节能减排技术分为五类，包括能效提升技术、设备改造技术、末端治理技术、共生技术和管理改进技术。各类节能减排方式在不同时期的贡献率如图 3 所示。能效提升、设备改造和管理改进技术在当前（2015-2020 年）的节能贡献率达到了 83%，CO₂ 减排贡献率达到 94%；远期（2025-2030）三类技术的节能和减排贡献率总体略有下降（节能贡献率 77%，减排贡献率 86%），其中能效技术的贡献率将显著下降，而设备改造技术在高耗能行业的节能减排工作中将发挥更关键的作用。图 4 进一步展示了五类节能减排方式在每个高耗能行业中的节能潜力。

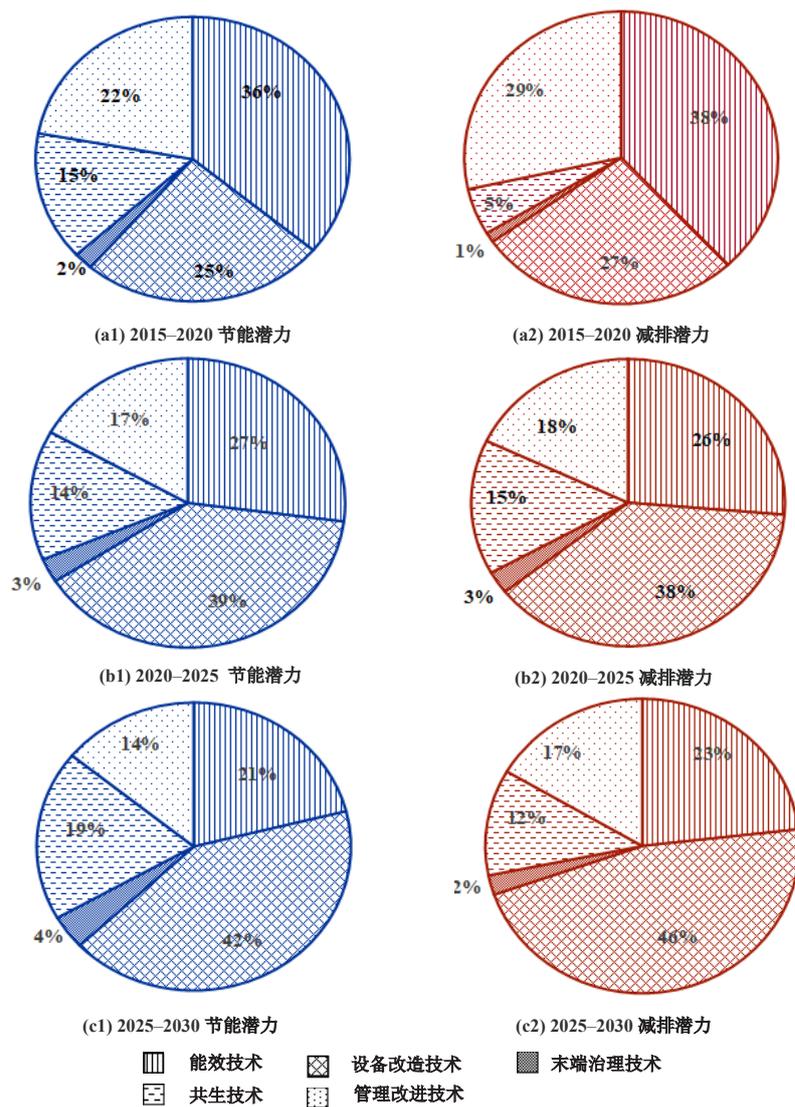


图 3 2015-2030 年各阶段节能减排技术贡献率变化

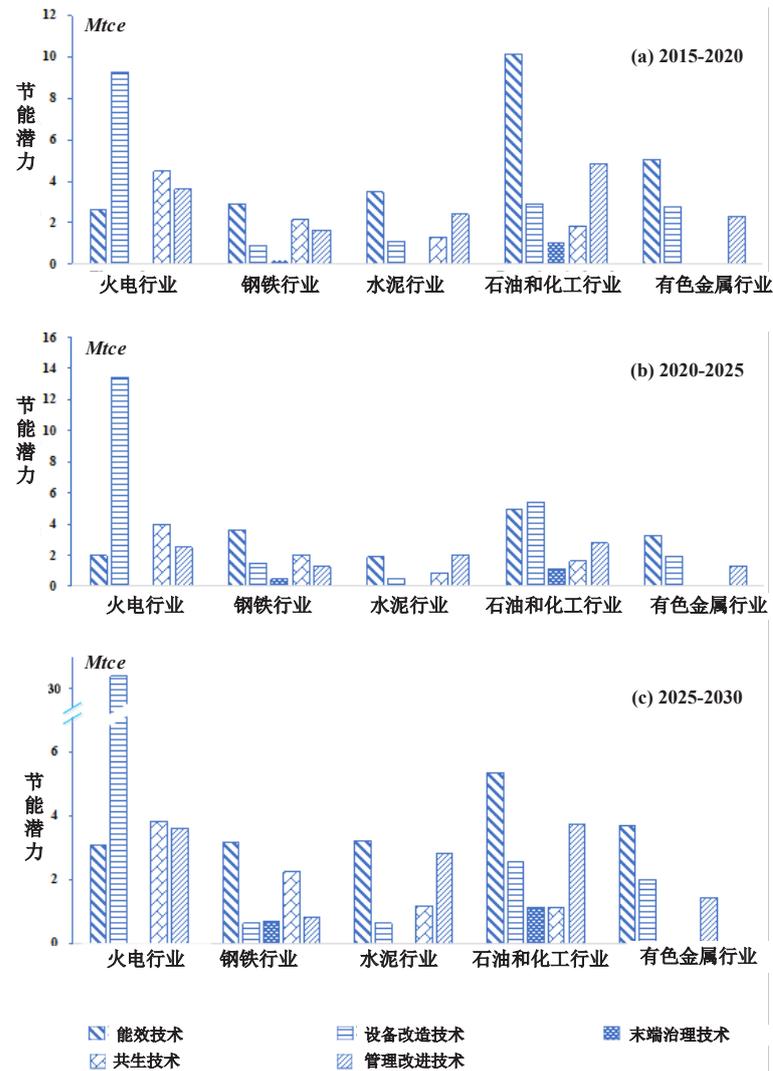


图 4 2015-2030 各类节能减排技术的分行业潜力空间

3.3 节能减排技术推广在中国具有更大的潜力空间和更小的成本代价

本报告的模型结果与其他研究结果较为一致。中国高耗能行业节能减排技术潜力总量远高于欧洲国家、美国和加拿大^①；从技术推广应用成本来看，中国的单位节能减排成本略高于印度，而远低于欧洲国家^②。这表明，在实现双碳目标的过程中，节能减排技术推广在中国等发展中国家具有更大的潜力空间和更小的成本代价。

① 参见相关资料 “The deployment of low carbon technologies in energy intensive industries: a macroeconomic analysis for Europe, China and India”

② 参见相关资料 “Energy system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States”

4. 研究结论与政策建议

为制定中国高耗能产业成本效益技术推广路线图，本报告引入节能供应曲线多角度分析六大高耗能行业 141 项技术的节能减排潜力和经济效益，主要政策建议如下：

(1) 双碳目标下，先进节能减排技术在高耗能行业的推广应用具有广阔潜力空间，是高耗能行业低碳转型的重要抓手。2025 年，高耗能行业推广节能减排技术的节能潜力预计将达到 1.23 亿吨标煤，占当前高耗能行业能源消耗总量的 3.1%；2030 年技术推广应用的潜力空间将进一步扩大到 2.02 亿吨标煤，占当前高耗能行业能源消耗总量的 9.2%。相比发达国家，节能减排技术在中国的推广应用更经济有效。

(2) 先进节能减排技术在高耗能行业推广应用的潜力空间和成本收益差别巨大，针对性、差异性技术推广政策是提高政策效果、效率的关键。火电和石油化工行业节能减排潜力空间最大，考虑成本效益，火电行业应是未来节能减排工作的关注重点。有色金属行业的节能减排潜力客观，但技术应用的成本相对最高，政府应适当给予补贴。从高耗能行业内部来看，火电行业应重点关注水循环系统，钢铁行业应重点关注烧结、球团和炼铁工序，水泥行业的重点工艺环节是水泥粉磨、熟料生产工序，石油和化工行业节能减排工作的重点在于合成氨行业；有色金属行业关键子行业是铝行业。

(3) 各高耗能行业节能减排工作应重点关注的技术类型差异将不断扩大，能效提升技术、管理改进技术和设备改造技术推广应是关注重点。从整体来看，能效技术的重要性会略有下降，而设备改造技术将发挥更关键的作用。从各高耗能行业来看，设备改造技术将成为火电行业节能减排的主要途径，其重要性将进一步凸显。对钢铁行业而言，短期内五种途径的贡献率相近，但长期来看，能效技术和共生技术的贡献率会更高。对于水泥行业，能效技术和管理改进技术将发挥相对更重要的作用。而对于石油和化工行业、有色金属行业，能源效率技术、设备改造技术和管理改进技术将是未来节能减排工作的关键途径。



关于作者

系列报告总协调人：王建良

本报告主笔人：



曹馨(1990.3-),女,清华大学博士,中国石油大学(北京)副教授,硕导,校青年拔尖人才。从事“能源-环境-经济”系统模拟分析研究。主持国家自科、重点研发项目、教育部基金等项目,在JCR1区/2区发表文章10余篇,软件著作权2项。

本报告校对入：王建良、朱金宏

报告引用：曹馨. 双碳目标下高耗能行业转型路径[R]. 中国石油大学(北京)碳中和与能源创新发展研究院, 2021C04, 2021年11月20日.



中国石油大学
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

经济管理学院

碳中和与能源创新发展研究院

Institute of Carbon Neutrality and Innovative Energy Development, China University
of Petroleum, Beijing (ICED-CUPB)

联系电话: 18910556924 邮箱: iced-cupb@cup.edu.cn

微信公众号: ICED-CUPB

地址: 北京市昌平区府学路18号

Add: No. 18, Fuxue Rd., Changping District, Beijing, 102249, China

