

能源经济预测与展望研究报告

FORECASTING AND PROSPECTS RESEARCH REPORT

CEEP-BIT-2021-006 (总第 54 期)



# 碳中和背景下煤炭制氢的低碳发展

2021 年 1 月 10 日

北京理工大学能源与环境政策研究中心

<http://ceep.bit.edu.cn>

## 特别声明

本报告是由北京理工大学能源与环境政策研究中心、能源经济与环境管理北京市重点实验室、北京经济社会可持续发展研究基地、北京理工大学管理与经济学院、中国“双法”研究会能源经济与管理研究分会和中国能源研究会能源经济专业委员会联合出版的系列研究报告之一。如果需要转载，须事先征得本中心同意并且注明“转载自北京理工大学能源与环境政策研究中心系列研究报告”字样。

## 碳中和背景下煤炭制氢的低碳发展

执笔人：魏一鸣 李家全 刘兰翠 康佳宁

作者单位：北京理工大学能源与环境政策研究中心

联系人：魏一鸣

研究资助：国家重点研发计划项目（2016YFA0602603），国家自然科学基金项目（71521002）。



北京理工大学能源与环境政策研究中心

北京市海淀区中关村南大街5号

邮编：100081

电话：010-68918551

传真：010-68918651

E-mail: [wei@bit.edu.cn](mailto:wei@bit.edu.cn)

网址： <http://ceep.bit.edu.cn>

Center for Energy and Environmental Policy Research

Beijing Institute of Technology

5 Zhongguancun South Street, Haidian District

Beijing 100081, China

Tel: 86-10-68918551

Fax: 86-10-68918651

E-mail: [wei@bit.edu.cn](mailto:wei@bit.edu.cn)

Website: <http://ceep.bit.edu.cn>

# 碳中和背景下煤炭制氢的低碳发展

全球经济正处于绿色低碳转型期，近年来，我国提出了分别于2030年和2060年实现“碳达峰”和“碳中和”的目标。氢气是推动全球经济绿色低碳转型和我国“碳中和”目标实现的潜在支撑，其将为交通、电力、钢铁、建筑等行业低碳转型提供助力。为此，世界各国积极出台氢能发展规划，推动氢能产业发展。

氢气助力我国“碳中和”目标实现，要求氢能产业绿色低碳发展。受资源禀赋、成本等约束，煤炭制氢在未来一段时期内仍是我国氢气的主要来源。然而，煤炭制氢过程伴有大量CO<sub>2</sub>排放，被称为“灰（高碳）氢”技术，不满足低碳制氢要求。碳捕集与封存（CCS）技术是当前唯一能够大幅减少化石燃料电厂、工业过程等终端CO<sub>2</sub>排放的低碳技术。煤炭制氢结合CCS技术，可将“灰氢”转变为“蓝（低碳）氢”。本研究着重评估了我国煤炭制氢及其结合CCS技术后的碳足迹和成本，并将其与当前（及未来潜在）其他主要制氢技术碳足迹和成本进行了对比，分析了其发展竞争力，提出了我国煤炭制氢技术低碳可持续发展的政策建议。

## 一、全球氢能发展迎新需求 中国氢能发展更迫切

在未来全球经济绿色低碳转型的进程中，氢气将发挥重要作用，全球氢能发展迎来新的需求，各国陆续出台相关战略规划推动氢能产业发展。由于石油对外依存度高、能源结构高碳化等原因，致使我国氢能发展需求相比全球其他国家更为迫切。

## （一）2050 年全球纯氢需求增长 3 倍 中国氢气需求增长 1 倍以上

氢气作为工业原料和燃料，已广泛应用于工业生产、制热等领域。截至 2018 年，全球氢气（纯氢和混合氢<sup>1</sup>）消费量已增至 1.15 亿吨，其中纯氢 7300 万吨，如图 1 所示。从氢气供给侧看，全球氢气主要来自于天然气、工业副产气和煤炭，占比分别为 44.8%、41.0%和 13.6%。从需求侧看，全球纯氢主要用于石油精炼和氨生产，消费量分别为 3800 万吨和 3100 万吨；混合氢主要用于甲醇生产、热能生产等。

我国是全球最大的氢气生产和消费国，消费量现已超过 2500 万吨。受煤炭供给充裕，和煤炭制氢成本低等因素影响，我国煤炭制氢产量在氢气供给系统中的占比高达 60%以上，远高于世界平均水平。在需求侧，氢气同样主要用于石油精炼、氨生产、甲醇生产和热能生产等。

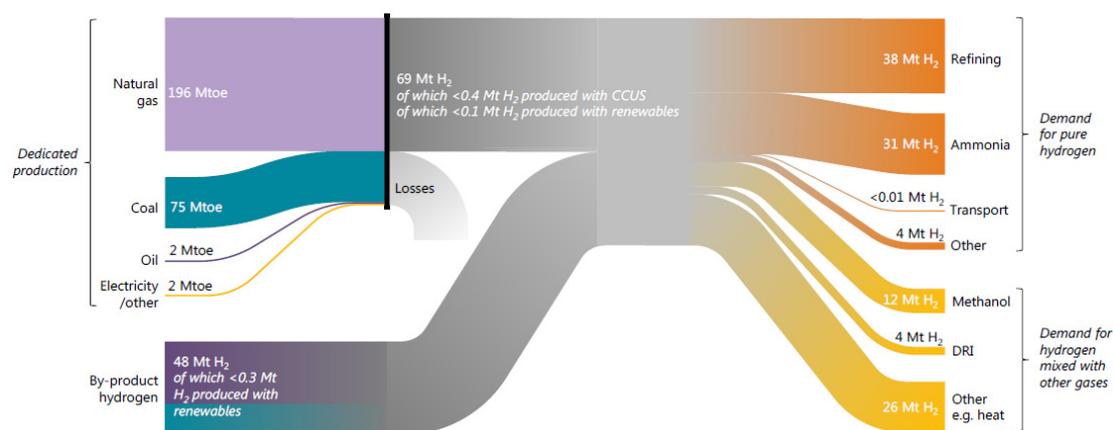


图 1 全球氢能流向图

图片来源：IEA, 2019.

经济绿色低碳转型是实现经济可持续、高质量发展的重要方面。

<sup>1</sup> 混合氢：与其他气体混合在一起，且未分离出来的氢气。

在全球经济推进绿色低碳转型的进程中，未来交通、电力、钢铁、建筑等部门的氢气潜在需求量巨大。预计在可持续发展情景<sup>2</sup>下，至 2050 年全球纯氢需求将增长至 2.9 亿吨/年，2070 年将进一步增至 5.2 亿吨/年，占全球终端能源消费量的 13%，如图 2 所示。我国是当前全球最大的能源消费国和温室气体排放国，且能源结构以煤炭为主，经济绿色低碳转型更加迫切。另外，我国石油对外依存度较高，已经超过 70%，能源安全潜在威胁较大，对石油替代品需求更加紧迫。在此背景下，我国氢能产业发展更为迫切。预计 2050 年我国氢气需求将增至近 6000 万吨，占我国终端能源消费量的 10%左右。

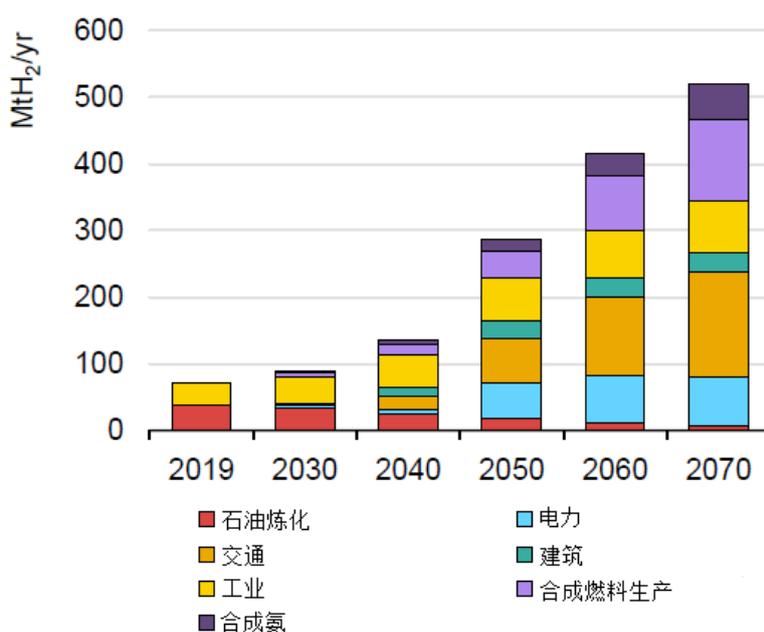


图 2 2019-2070 年全球纯氢需求及应用领域

图片来源：IEA, 2020.

## （二）全球各国出台氢能发展规划 中国将其写入政府工作报告

由于氢能在未来全球经济绿色低碳转型中将扮演重要的角色，具

<sup>2</sup> 可持续发展情景：全球能源系统实现净零排放。

有大量的潜在需求，全球主要国家已积极布局氢能产业，并发布了发展路线图和相关规划，如表 1 所示。国外现有规划内容可总结为 4 点。首先，各国家/组织在氢能发展路线图和规划中，明确了氢能在推动各行业绿色低碳转型的定位和需求。其中，欧盟认为没有氢能，欧盟将难以实现其脱碳目标。明确氢能定位，有助于从顶层设计层面引导氢能产业持续健康发展。其次，各国针对氢能发展各环节，制定了中长期的量化目标，如制氢产能产量、加氢站建设、氢能汽车数量等，有助于推动各行业氢能生产和需求端的设施、设备等发展。再者，各国计划通过投入资金，支持氢能技术研发、设施设备建设等，增加社会资本进入积极性。此外，各国认识到氢能产业的绿色低碳发展，是其参与并支撑全球经济绿色低碳发展的重要前提。各国在氢能产业规划中亦提出推动可再生氢能发展、化石燃料制氢需结合 CCS 技术等要求。

对比国内外氢能发展政策和相关规划，发现我国仍缺乏国家层面的氢能定位、中长期发展指导规划和目标。我国仅在“2020 年度国民经济和社会发展规划”中，提出了制定国家氢能产业发展战略规划的要求。

表 1 近年各国氢能发展路线图和规划（部分）

国家/组织	发展路线图和规划	时间	主要目标/表述
中国	中国政府工作报告	2019	• 推动充电、加氢设施建设。
	年度国民经济和社会发展规划	2020	• 制定国家氢能产业发展战略规划。
欧盟	欧洲氢能路线图： 欧洲能源转型的可持续发展路径	2019	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 如果没有氢能，欧盟将难以实现其脱碳目标；</li> <li>• 到 2050 年生产大约 2250 TWh 的氢气；</li> <li>• 到 2050 年，将给欧盟企业的燃料和燃料行业相关领域创造 8200 亿欧元的工业产值。</li> </ul>

西班牙	氢能路线图	2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 未来 10 年，向氢能领域投入 89 亿欧元；</li> <li>• 25% 的绿氢用于工业领域；</li> <li>• 安装 4 吉瓦容量的电解槽；</li> <li>• 到 2030 年，至少有 150 辆氢能公交车，5000 辆轻型，重型汽车及 2 条氢能动力火车线路，并建设至少 100 座加氢站。</li> </ul>
英国	能源白皮书	2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 投资 10 亿英镑促进氢能等清洁能源技术的研发。</li> </ul>
德国	国家氢能战略	2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 支持“绿色氢能”扩大市场；</li> <li>• 2020-2023 年，为德国氢能源国内市场打好基础；</li> <li>• 2024-2030 年，稳固国内市场，塑造欧洲与国际市场，服务德国经济；</li> <li>• 再投入 70 亿欧元用于氢能市场推广，20 亿欧元用于相关国际合作。</li> </ul>
法国	国家氢能源计划	2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 在未来 10 年内投资 72 亿欧元推动氢能源生产与应用。</li> </ul>
美国	氢能经济路线图	2019	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 到 2030 年，氢需求量将突破 1700 万吨，到 2050 年将达到 6300 万吨；</li> <li>• 到 2030 年，530 万辆燃料电池汽车，建设 5600 个加氢站。</li> </ul>
日本	氢能利用进度表	2019	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 到 2025 年，使氢燃料电池汽车价格降至与混合动力汽车持平；</li> <li>• 到 2030 年，建成 900 座加氢站，实现氢能发电商业化，并持续降低氢气供应成本，使其不高于传统能源。</li> </ul>
韩国	氢能经济活性化路线图	2019	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2040 年氢燃料电池汽车累计产量增至 620 万辆，加氢站增至 1200 座；</li> <li>• 氢气年供应量达到 526 万吨。</li> </ul>

### （三）中短期内煤炭制氢是中国主要氢气来源 但发展受碳约束影响

当前氢气制取技术主要有煤炭制氢、甲烷（天然气）重整制氢、工业副产气提纯制氢等；未来潜在的大规模应用技术为电解水技术。目前，对部分工业副产气进行提纯生产氢气是我国重要的氢气来源。短期内，我国工业副产气的制氢规模可进一步提高，但受生产工业副产气的产业规模限制，未来产量提高有限。电解水制氢技术的产能具有巨大提升潜力，但制氢成本较高（图 3），短期内不具大规模发展可能性。且我国天然气资源相对贫乏且价格较高，制氢成本不具优势。

我国煤炭资源丰富，煤炭制氢技术目前具有明显的成本优势（图3）。因此，从资源禀赋、制氢成本来看，在未来一段时期内煤炭制氢仍将主导供氢结构，且其制氢规模将会进一步增加。

然而，煤炭制氢未来发展也面临阻碍。全球经济绿色低碳转型和我国“碳中和”目标的实现，要求氢气生产符合低碳发展要求。煤炭制氢技术制氢过程排放大量 CO<sub>2</sub>，将制约自身发展，这就要求结合 CCS 技术，为其碳约束“松绑”。

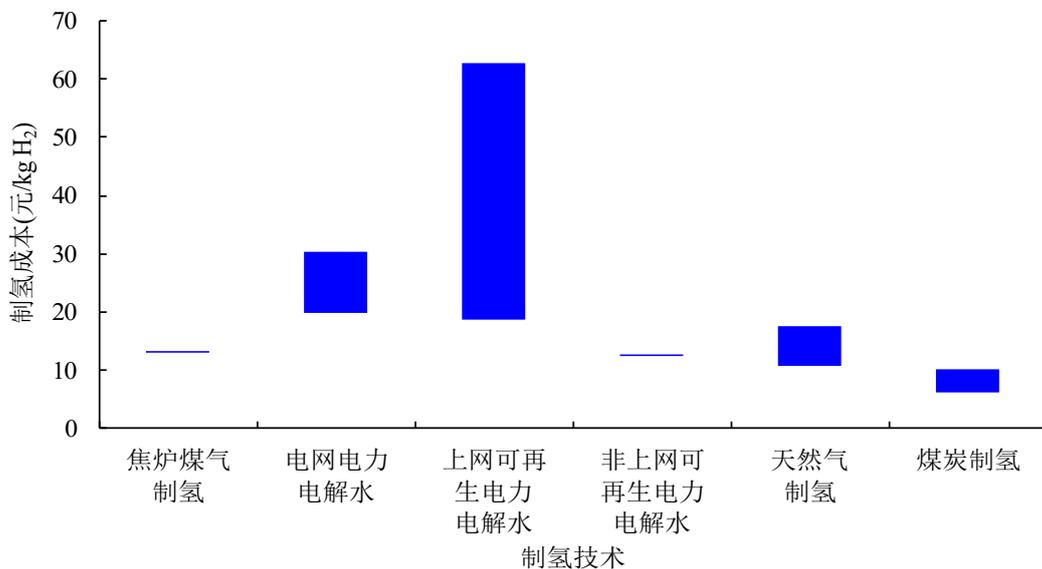


图3 中国当前及未来潜在主要制氢技术的制氢成本（考虑能源成本区域差异）

## 二、结合 CCS 技术的煤炭制氢具有一定发展优势

结合 CCS 技术后，煤炭制氢碳足迹显著下降，虽然成本有所增加，短期内相比其他制氢技术仍具有一定的竞争优势。

### （一）结合 CCS 技术后煤炭制氢碳足迹可下降 53%

本研究核算的碳足迹包括煤炭制氢及结合 CCS 技术后的直接和间接 GHGs 排放量<sup>3</sup>。未结合 CCS 技术的煤炭制氢碳足迹高达 22.65 kg

<sup>3</sup> 将结合 CCS 技术前后的煤炭制氢全生命周期直接和间接 GHGs 排放转化为二氧化碳当量测算碳足迹。

CO<sub>2</sub> 当量(CO<sub>2</sub>e)/kg H<sub>2</sub>。从碳足迹构成来看，煤炭制氢环节排放贡献最大，为 20.90 kg CO<sub>2</sub>e/kg H<sub>2</sub>，占比为 92.3%；其次为煤炭开采和洗选环节，排放占比 7.5%，煤炭运输环节排放可近似忽略不计。结合 CCS 技术后，煤炭制氢的生命周期碳足迹显著下降，为 10.59 kg CO<sub>2</sub>e/kg H<sub>2</sub>，降幅 53.3%，有利于煤炭制氢低碳发展。但其排放水平与结合 CCS 技术前的天然气制氢碳足迹相当，长期发展的碳约束依然存在。

## **(二) 结合 CCS 技术后煤炭制氢成本增加 但仍具有一定成本优势**

由于煤炭制氢厂捕集的 CO<sub>2</sub> 浓度在 80%以上，相应的 CO<sub>2</sub> 捕集成本较低。在当前的设备、原材料、能源与人工成本水平下，我国煤炭制氢的 CCS 项目成本为 292 元/吨 CO<sub>2</sub>，其中捕集成本，运输成本（以 200 千米为例）和封存成本分别为 194、65 和 33 元/吨 CO<sub>2</sub>。结合 CCS 技术将使煤炭制氢成本增加 51.5%，达 13.13 元/kg H<sub>2</sub>。与其他当前及未来潜在主要制氢技术的制氢成本对比分析发现，结合 CCS 技术的煤炭制氢仍有一定的成本优势，特别是相对于电解水制氢技术。

## **(三) 结合 CCS 技术后煤炭制氢规模中短期内将有所提升**

从我国提出实现 2030 年“碳达峰”和 2060 年“碳中和”目标来看，未来碳减排目标和要求越来越高，意味着煤炭制氢的碳约束也会逐步增强。结合 CCS 技术后煤炭制氢的碳足迹将大幅下降，成本仍具有竞争优势。因此，中短期内，我国氢气需求增量仍将主要由煤炭制氢技术供给。而从长期来看，我国低碳发展诉求逐步增强，“碳中

和”目标对我国气候治理提出更高要求，提高“绿氢”比重或将成为氢能产业发展的未来趋势。

### 三、我国煤炭制氢低碳发展建议

着眼于未来，氢气将在我国经济的绿色低碳转型进程中发挥重要作用。受资源禀赋、成本等约束，煤炭制氢在未来一段时期内仍是我国氢气的主要来源，但其长期发展受高碳排放制约。为助推“碳中和”目标实现，我国的氢源结构亟需由“灰氢”向“蓝氢”、“绿氢”转变。

报告发现，作为主要的制氢方式，煤炭制氢结合 CCS 技术后，碳足迹显著下降，虽成本有所增加，短期内相比其他制氢技术仍具有一定竞争优势。基于以上分析，为统筹煤炭制氢和其他（当前与未来潜在）主要制氢技术低碳发展潜力和经济性，推动氢能产业低碳可持续发展，本报告提出以下四方面政策建议：

一是制定与 CCS 技术规划相匹配的煤炭制氢发展战略。从国家层面做好涉及项目布局时间、地域、对象等的 CCS 技术规划，是实现我国“碳中和”目标的重要措施。未来煤炭制氢发展需结合 CCS 技术。在制定煤炭制氢行业发展规划时，需结合国家 CCS 技术规划内容，注重未来两类技术时空维度层面的发展匹配，进而更合理地指导未来煤炭制氢行业低碳发展。

二是部署结合 CCS 技术的煤炭制氢规模化示范项目。我国已有小规模结合 CCS 技术的煤炭制氢示范项目，但仍需要进行规模化示范，以更科学全面地验证技术可行性和经济性、发现并改进项目实施中存在的技术与管理问题、积累技术与管理经验。规模化示范项目资

金可通过企业自筹、合作企业、国家补贴、国际合作等多渠道获取。

**三是出台财税支持政策。**CCS 技术的配套将显著增加煤炭制氢成本。我国尚未出台强制煤炭制氢配套 CCS 技术政策，使得企业通过 CCS 技术减排的主动性差。未来，可依托现有财税法律法规，出台支持煤炭制氢结合 CCS 技术的相关政策法规，通过减免现有税费、给予财政补贴的方式，提高煤炭制氢企业配套 CCS 技术的积极性。

**四是建立健全纳入煤炭制氢行业的碳交易或碳税机制。**长期来看，煤炭制氢结合 CCS 技术是发展的必然选择。短期内通过财税支持政策可提高煤炭制氢企业部署 CCS 技术的积极性，推动示范项目开展，但不适用于大规模推广。建立健全纳入煤炭制氢行业的碳交易或碳税机制，通过碳交易或碳税机制倒逼煤炭制氢企业部署 CCS 技术，是实现煤炭制氢技术低碳可持续发展的关键。

## 主要参考文献

- [1] 陈毕杨, 曹尚峰. 焦炉煤气制氢方法的比较及成本分析 [J]. 低温与特气, 2017, 35(01): 28-30.
- [2] 刘百强. 炼钢焦炉煤气提纯氢气与天然气转化制氢经济性对比 [J]. 炼油技术与工程, 2014, 44(05): 61-64.
- [3] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书 [R]. 北京: 中国氢能及燃料电池产业创新战略联盟, 2019.
- [4] 中国政府网. 关于 2019 年国民经济和社会发展计划执行情况与 2020 年国民经济和社会发展计划草案的报告 [EB/OL]. (2020-05-30) [2020-11-06]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-05/30/content\\_5516227.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-05/30/content_5516227.htm).
- [5] 中国政府网. 政府工作报告 [EB/OL]. (2019-03-16) [2020-11-06]. [http://www.gov.cn/premier/2019-03/16/content\\_5374314.htm](http://www.gov.cn/premier/2019-03/16/content_5374314.htm).
- [6] Blasio N D, Pflugmann F. Is China's Hydrogen Economy Coming? A Game-Changing Opportunity [R]. Harvard University, 2020.
- [7] Burmistrz P, Chmielniak T, Czepirski L, et al. Carbon footprint of the hydrogen

- production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,139: 858-65.
- [8] Cetinkaya E, Dincer I, Naterer G F. Life cycle assessment of various hydrogen production methods [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(3): 2071-2080.
- [9] Dufour J, Serrano D P, Gálvez J L, et al. Life cycle assessment of alternatives for hydrogen production from renewable and fossil sources [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(2): 1173-1183.
- [10] Hajjaji N, Pons M N, Renaudin V, et al. Comparative life cycle assessment of eight alternatives for hydrogen production from renewable and fossil feedstock [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 44: 177-189.
- [11] IEA. *Energy Technology Perspectives 2020* [R]. International Energy Agency, Paris, France, 2020.
- [12] IEA. *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities* [R]. Paris, France: International Energy Agency, 2019.
- [13] NRC. *The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R&D Needs* [M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2004.
- [14] Ozbilen A, Dincer I, Rosen M A. A comparative life cycle analysis of hydrogen production via thermochemical water splitting using a Cu–Cl cycle [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(17): 11321-11327.
- [15] Siddiqui O, Dincer I. A well to pump life cycle environmental impact assessment of some hydrogen production routes [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(12): 5773-5786.
- [16] Utgikar V, Thiesen T. Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2006, 31(7): 939-944.
- [17] Van Acht S C J, Laycock C, Carr S J W, et al. Simulation of integrated novel PSA/EHP/C process for high-pressure hydrogen recovery from Coke Oven Gas [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(30): 15196-15212.

## 北京理工大学能源与环境政策研究中心简介

北京理工大学能源与环境政策研究中心是 2009 年经学校批准成立的研究机构，挂靠在管理与经济学院。能源与环境政策中心大部分研究人员来自魏一鸣教授 2006 年在中科院创建的能源与环境政策研究中心。

北京理工大学能源与环境政策研究中心（CEEP-BIT）面向国家能源与应对气候变化领域的重大战略需求，针对能源经济与气候政策中的关键科学问题开展系统研究，旨在增进对能源、气候与经济社会发展关系的科学认识，并为政府制定能源气候战略、规划和政策提供科学依据、为能源企业发展提供决策支持、为社会培养高水平专门人才。

### 中心近期部分出版物

Yi-Ming Wei et al. Energy Economics: Understanding Energy Security in China. Emerald Publishing Limited, 2019.

Yi-Ming Wei et al. Energy Economics: Understanding and Interpreting Energy Poverty in China. Emerald Publishing Limited, 2018.

魏一鸣，廖华等. 能源经济学（第三版）. 北京：中国人民大学出版社，2019.

魏一鸣. 中国能源经济数字图解 2014-2018. 北京：经济管理出版社，2019.

魏一鸣，廖华，余碧莹，唐葆君等. 中国能源报告（2018）：能源密集型部门绿色转型研究. 北京：科学出版社，2018.

# 中心近年“能源经济预测与展望”报告

总期次	报告题目	总期次	报告题目
1	“十二五”中国能源和碳排放预测与展望	29	2017 年我国碳市场预测与展望
2	2011 年国际原油价格分析与走势预测	30	新时代能源经济预测与展望
3	2012 年国际原油价格分析与趋势预测	31	2018 年国际原油价格分析与趋势预测
4	我国中长期节能潜力展望	32	2018 年石化产业前景预测与展望
5	我国省际能源效率指数分析与展望	33	新能源汽车新时代新征程:2017 回顾及未来展望
6	2013 年国际原油价格分析与趋势预测	34	我国电动汽车动力电池回收处置现状、趋势及对策
7	2013 年我国电力需求分析与趋势预测	35	我国碳交易市场回顾与展望
8	国家能源安全指数分析与展望	36	新贸易形势下中国能源经济预测与展望
9	中国能源需求预测展望	37	2019 年国际原油价格分析与趋势预测
10	2014 年国际原油价格分析与趋势预测	38	我国农村居民生活用能现状与展望
11	我国区域能源贫困指数	39	高耗能行业污染的健康效应评估与展望
12	国家能源安全分析与展望	40	我国社会公众对雾霾关注的热点与展望
13	经济“新常态”下的中国能源展望	41	我国新能源汽车行业发展水平分析及展望
14	2015 年国际原油价格分析与趋势预测	42	2019 年光伏及风电产业前景预测与展望
15	我国新能源汽车产业发展展望	43	经济承压背景下中国能源经济发展与展望
16	我国区域碳排放权交易的潜在收益展望	44	2020 年光伏及风电产业前景预测与展望
17	“十三五”及 2030 年能源经济展望	45	砥砺前行中的新能源汽车产业
18	能源需求预测误差历史回顾与启示	46	2020 年国际原油价格分析与趋势预测
19	2016 年国际原油价格分析与趋势预测	47	二氧化碳捕集利用与封存项目进展与布局展望
20	2016 年石油产业前景预测与展望	48	2020 年碳市场预测与展望
21	海外油气资源国投资风险评价指数	49	我国“十四五”能源需求预测与展望
22	“十三五”北京市新能源汽车节能减排潜力分析	50	基于行业视角的能源经济指数研究
23	“十三五”碳排放权交易对工业部门减排成本的影响	51	全球气候保护评估报告
24	“供给侧改革”背景下中国能源经济形势展望	52	全球气候治理策略及中国碳中和路径展望
25	2017 年国际原油价格分析与趋势预测	53	新能源汽车产业 2020 年度回顾与未来展望
26	新能源汽车推广应用：2016 回顾与 2017 展望	54	碳中和背景下煤炭制氢的低碳发展
27	我国共享出行节能减排现状及潜力展望	55	2021 年国际原油价格分析与趋势预测
28	我国电子废弃物回收处置现状及发展趋势展望	56	中国省际能源效率指数（2010-2018）