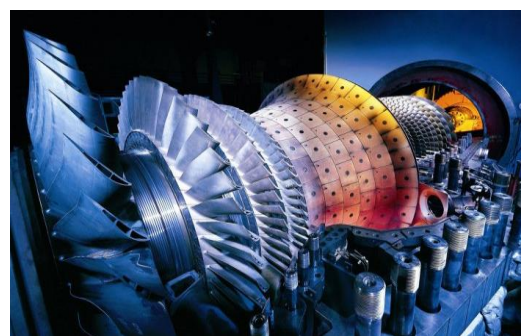


先进能源科技动态监测快报



本期重点

- IEA：全球煤炭需求放缓 印度成为增长龙头
- IEA：低碳转型势不可挡 但面临重重挑战
- ARPA-E 资助 7000 万美元开展可再生燃料和生物固碳研究
- 基于人工智能技术提高固态锂电池研究效率
- IEA：全球天然气市场结构应富有弹性以应对突然变化

主管：中国科学院文献情报系统学科情报服务协调组

主办：中国科学院武汉文献情报中心

中国科学院文献情报系统先进能源情报网简介

中国科学院文献情报系统先进能源情报网是在中国科学院文献情报系统学科情报服务协调组的整体组织和指导下，由中国科学院武汉文献情报中心牵头组建，联合中国科学院文献情报系统能源领域相关研究所，共同搭建的情报研究资源共享及协同服务的非营利性情报研究及服务团体。先进能源情报网将汇聚中科院文献情报系统内与领域相关的战略情报研究人员、学科情报人员、研究所科研管理人员、研究所文献情报人员，以及相关的管理和学科专家，通过“协同开展情报研究服务、组合共建情报产品体系、促进情报资源交流共享、提升整体情报保障能力”的工作方式，创新院所协同的情报研究和服务保障模式，促进情报资源的共享、情报需求和情报供给的对接、情报技术方法的合作开发，实现情报能力的扩散和提升,进而对中国科学院各个层面（院层面、所层面、项目团队层面及科研人员层面）的重要情报需求提供坚实保障。

先进能源情报网成员单位

成员单位	单位名称
组长单位	武汉文献情报中心
副组长单位 (排名不分 先后)	合肥物质科学研究院 大连化学物理研究所 青岛生物能源与过程研究所 广州能源研究所
成员单位 (排名不分 先后)	上海高等研究院 山西煤炭化学研究所 上海应用物理研究所 兰州近代物理研究所 广州地球化学研究所 过程工程研究所 电工研究所 工程热物理研究所

联系人: 赵晏强 zhaoyq@whlib.ac.cn

郭楷模 guokm@whlib.ac.cn

电 话: (027) 87197630

目 录

决策参考

IEA: 全球煤炭需求增速放缓 印度成为增长龙头	2
IEA: 低碳转型势不可挡 但面临重重挑战	5

项目计划

ARPA-E 资助 7000 万美元开展可再生燃料和生物固碳研究	8
DOE 资助 4000 美元建设国家波浪能并网试验中心	10

前沿与装备

双氧化还原电对离子液体增强双电层电容能量密度	11
氧空位提升赝电容电荷存储能力	12
基于人工智能技术提高固态锂电池研究效率	13
新型双功能催化剂实现 CO ₂ 高效捕集与转化	13

能源资源

IEA: 全球天然气市场结构应富有灵活性以应对突然变化	14
-----------------------------------	----



我中心现已开通微信公众号 (CASEnergy), 欢迎扫码关注

专辑主编: 陈 伟
本期责编: 郭楷模

联系邮箱: jiance@whlib.ac.cn
出版日期: 2017 年 1 月 1 日

本期概要

国际能源署（IEA）发布《煤炭市场中期报告 2016》，详细分析了全球煤炭市场发展现状，并对未来中长期煤炭市场供需关系变化、贸易情况和价格变动情况进行了趋势预测：2015 年，全球煤炭消费需求出现了本世纪以来的首次下降，从 2014 年 55.88 亿吨下降至 2015 年 55.44 亿吨。印度的煤炭消费量同比增长 2.7%，超过美国成为全球第二大煤炭消费国。自 2008 年经济危机以来，海运煤炭贸易总量首次出现下降，从 2014 年 12.24 亿吨降至 2015 年 11.58 亿吨。经过短暂的下降后，煤炭海运贸易量将会回升，预计到 2021 年将回升至接近 2014 年水平。当前，全球煤炭消费总量仍处于历史高位，预测期内（2015-2021 年）全球煤炭需求年均增长率为 0.6%，远低于过去十年（2005-2015 年）年均 2.5% 的增速。详见正文。

国际能源署（IEA）发布《能源、气候和环境 2016》报告，指出全球应对气候变化所作出的积极努力正在改变能源行业的发展方式，推动能源系统向低碳转变，而“《巴黎气候协议》则在加速这一转变过程。基于全球的能源和碳排放数据，报告详细分析和探讨了《巴黎气候协议》的进展、在执行过程面临的挑战，提出了保证《巴黎气候协议》顺利实施可采取的解决方案，包括：（1）设定温升 2℃ 以下的目标以应对能源挑战；（2）进一步减少化石燃料设施的温室气体排放；（3）设定适度的碳价格；（4）加强政策支持扩大可再生能源应用范围；（5）提高能效节能减排；（6）定制解决方案以激励国有企业发挥主导作用；（7）保持能源部门的灵活性，确保能源产业持续增长；（8）开发更全面的数据采集分析工具促进能源行业的转型。

美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布资助 7000 万美元用于两个主题研究计划：其一是“可再生能源制液体燃料技术研发”（REFUEL），涵盖两大技术主题：（1）制备氨气和氢气的先进技术开发；（2）可再生能源制碳中性燃料技术和发电技术；其二是“植物根际优化提高固碳能力”（ROOTS），涵盖三大技术主题：（1）提高高通量植物表型平台对植物表型的分析能力；（2）增强植株品种和土壤筛选技术；（3）开发先进的植物根系和土壤成像技术。详见正文。

美国能源部宣布资助 4000 万美元，支持俄勒冈州立大学国家海洋可再生能源中心设计并建造一座位于开放水域的国家波浪能并网试验设施“南太平洋海洋能源试验中心”：旨在促进海洋能和流体动力能源开发研究，现场测试全规模的波浪能转换原型设备，以获取关键的性能数据，识别潜在的技术挑战，加速推进波浪能商业化进程。

国际能源署（IEA）发布了《全球天然气安全审查报告 2016》，详细地评估了天然气市场结构应对潜在风险的能力，着重讨论了影响全球天然气市场安全的数个关键问题：（1）小容量液化天然气液化基础设施的灵活性；（2）美国日益增加的天然气产量将提高目的地灵活性；（2）灵活的电力系统是全球天然气安全的关键贡献者；（4）充足的储气库是天然气系统安全的关键。详见正文。

IEA：全球煤炭需求增速放缓 印度成为增长龙头

12月12日，国际能源署（IEA）发布《煤炭市场中期报告 2016》¹指出，由于中国和美国煤炭消费需求的大幅下降以及可再生能源应用增加，全球煤炭需求增速自2014年起开始减弱，2015年更是迎来了本世纪的首次下降，未来五年全球煤炭需求增长将放缓甚至出现停滞；此外，2015年亚洲煤炭消费需求占到全球煤炭消费总量的近四分之三。报告详细分析了全球煤炭市场发展现状，并对未来五年煤炭市场供需关系变化、贸易和价格变动情况进行了趋势预测，要点如下：

1. 煤炭市场供需现状

- 2015年，全球煤炭消费需求出现了本世纪以来的首次下降，从2014年55.88亿吨下降至2015年55.44亿吨，主因是中美两国煤炭需求大幅下降以及可再生能源应用增加。尽管如此，煤炭仍是全球第二大一次能源来源，占全球能源需求量的29%。

- 2015年，动力煤和炼焦煤的消费量同时下降：其中，动力煤需求量下降3%，主要原因是越来越多的燃煤发电被其他燃料发电形式所替代；炼焦煤需求量比2014年下降1.3%，从10.86亿吨降至10.71亿吨，主要是由于中国的去产能政策导致钢铁和水泥等主要用煤行业的产量下跌。

- 自1981年以来，中国煤炭消费量首次出现两连降。2015年中国的消费量比2014年下降3.4%，从28.96亿吨降至27.97亿吨。2015年中国的燃煤发电量再次下降，原因是电力需求增长疲软以及电力结构多元化政策的推动。

- 2015年，印度的煤炭消费量同比增长2.7%，超过美国成为全球第二大煤炭消费国。但这一增长率远远低于其过去十年7.5%的年均增长率。燃煤发电的增长率比上一年要低，主要原因是总发电量增长率下降。

- 2015年，美国煤炭需求大幅下降了15%，从2014年8.39亿吨降至2015年7.13亿吨，为美国有史以来的最大降幅，主因是2015年的天然气价格低于预期，导致众多燃煤电厂被天然气电厂取代。2015年4月，美国天然气发电量达到93 TWh，首次超过煤炭发电量（89 TWh）。煤炭发电量在美国电力中的占比从2014年39%降低至2015年的34%，创下了美国有史以来的最低值

- 全球煤炭产量已连续两年下降。受到中国（-3.1%）、美国（-11.5%）和印度尼西亚（-3.2%）煤炭产量大幅下降的影响，全球煤炭供应量显著减少。低需求动力和低价格给煤炭公司带来了巨大冲击，导致许多美国煤炭生产商在持续亏损后无法继续营业被迫宣布破产。

¹ Medium-Term Coal Market Report 2016. http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Scenarios-2016_Full-Report.pdf

- 尽管全球煤炭市场不景气，但 2015 年印度和澳大利亚的煤炭产量仍在增加。澳大利亚生产商持续削减成本，在苛刻的市场条件下将产量成功地提高了 4.1%。受政府政策的强力驱动，印度的煤炭产量增加了 5.1%，满足国内需求量的增长。

2. 全球煤炭贸易状况

- 自 2008 年经济危机以来，海运煤炭贸易总量首次出现下降，动力煤和炼焦煤的海运贸易量双双下降。煤炭贸易量下滑了 5.4%，从 2014 年 12.24 亿吨降至 2015 年 11.58 亿吨。海运贸易量占国际煤炭贸易总量的 88%。

- 2015 年，印度成为世界上最大的煤炭进口国，紧随其后是中国和日本。尽管进口量下降 6.7%，印度的进口量仍超过中国，主要原因是中国的进口量大幅下降约 30%。

- 与预期一样，2015 年越南的煤炭出口量从 2014 年 1000 万吨下降至 200 万吨，而同期其进口量却从 300 万吨上升至 600 万吨，为此越南一跃成为煤炭净进口国。

- 德国是欧洲最大的煤炭进口国。尽管 2015 年其煤炭发电量出现微弱下降，但其煤炭进口量却比 2014 年有所增加，主要原因是德国国内煤炭产量下降。

- 澳大利亚仍是全球最大的煤炭出口国，为全球提供超过一半的炼焦煤出口量。2015 年，尽管全球炼焦煤出口量下跌了 3.7%，但澳大利亚炼焦煤出口量仍逆势上升了 4%，使得澳大利亚在全球炼焦煤出口总量中所占比例上升至 63%。

- 煤炭价格经过数年的下跌后于 2016 年出现大幅反弹，其原因为中国去产能政策致使煤炭产量大幅下降及亚太和欧洲地区需求强劲。其中动力煤现货价格显著上涨，从 2016 年 1 月约 45 美元/吨上涨到 2016 年 11 月高于 90 美元/吨，足足翻了一倍；而炼焦煤的价格涨幅甚至更高，2016 年 11 月价格为 300 美元/吨，相比 2016 年 1 月的 77 美元/吨翻了两番。

- 世界主要煤炭出口国的煤炭开采成本大幅降低，主要驱动力是大多数煤炭生产商实施了削减成本策略，如采取了生产率改善措施、降低运营成本等。其中尤以澳大利亚煤炭生产商在削减成本上取得的成绩最为突出，2015 年该国煤炭公司的成本相比 2010 年缩减了一半。

3. 煤炭市场中期供需展望

- 当前，全球煤炭消费总量仍处于历史高位，预测期内（2015-2021 年）煤炭需求增速将会放缓，预计到 2021 年需求量仅回升至略高于 2014 年的水平。预计 2015-2021 年全球煤炭需求年均增长率为 0.6%，远低于过去十年（2005-2015 年）年均 2.5% 的增速，即到 2021 年全球煤炭需求量将增长 1.96 亿吨，总需求量共计将达到 56.36 亿吨。

- 到 2021 年，中国煤炭需求量预计将会小幅下降至 28.16 亿吨，低于 2014 年的水平（28.96 亿吨）。总体而言，受经济增长模式转型和能源结构多元化的推动，

中国的煤炭需求呈现结构性的缓慢下降。

- 全球煤炭需求增长绝对值最大的国家将是印度。预测期内，印度煤炭消费量预计将以年均 5% 的增长率上涨，到 2021 年增加 1.87 亿吨。而全球范围内煤炭需求增幅最大情况则会出现东盟国家（ASEAN），在预测期内预计将以 7.2% 的年均增速上涨，即增加 8500 万吨煤炭消费量。

- 预测期内印度将成为第二大炼钢生产国，之后成为第二大高炉生铁生产国，主要推动力是强劲的经济增长和大规模的基础设施投资。钢铁产量上升催生印度炼焦煤需求上涨，预测期内印度的炼焦煤需求量将增长 2000 万吨，届时将超越日本成为世界上第二大炼焦煤消费国。

- 美国和欧洲的煤炭需求将继续下降，甚至会加速下降。而新的政策（如更严格的气候政策）或技术进步（如可再生能源发电成本的下降）将进一步加速这种下降趋势。到 2021 年，美国煤炭消费量预计将下降至 4.75 亿吨，经合组织国家消费量则预计减少至 3.37 亿吨。

- 煤炭产量的最大增幅预计出现在印度，澳大利亚生产量同样增长，而中国的生产量将保持平稳。受到需求强劲增长和增加国内产量政策的驱动，印度煤炭生产量有望以年均 5.8% 的速率上涨，从 2015 年 3.83 亿吨增长至 2021 年的 5.36 亿吨。

- 受到煤矿公司停产或者关闭的影响，预计美国煤炭行业将做出重新调整，以变得更加灵活和有竞争力，来应对煤炭需求下降的市场环境。尽管煤炭成本走低，但由于受到廉价天然气的冲击，煤炭生产商仍需在萎缩的市场中挣扎竞争。

4. 煤炭海运贸易中期展望

- 经过短暂的下降后，煤炭海运贸易量将会回升，预计到 2021 年将回升至接近 2014 年水平，即从 2015 年 10.21 亿吨增加至 2021 年 10.79 亿吨，其中动力煤海运贸易预计占海运贸易增量的一半以上。海运贸易中心将继续向太平洋地区转移。

- 中国煤炭进口量将下降，预计年均降幅将达到 2.9%，到 2021 年会降至 1.5 亿吨。中国的宏观经济发展和政策塑造了煤炭的需求和供应，进而影响到世界其他区域。

- 受国内产量增长有限和需求的增长，预测期内印度煤炭进口量将会上升，年均涨幅将达到 3%，到 2021 年将增加至 2.05 亿吨。

- 日本和韩国的煤炭进口预计保持稳定。尽管日本燃煤发电容量增加，但可再生能源发电和电力需求疲软使得日本的煤炭进口量保持相对稳定。在韩国，煤炭竞争力因为高额的碳税和低液化天然气价格而下降。

- 尽管展望期内欧洲煤炭产量将会下降，但由于煤炭需求下滑的幅度更加剧烈，欧洲煤炭进口量仍将显著减少，年均降幅预计为 6%。

- 澳大利亚仍将是最大的煤炭出口国，印度尼西亚与其差距将被拉大。印度尼

西亚出口量将因国内需求增长和国内结构性问题而大幅减少。而澳大利亚将继续扮演着较强竞争力出口商的角色。

- 越南、菲律宾、马来西亚和巴基斯坦的煤炭进口量将会增长。在展望期内，预计有将近 25 GW 的新建燃煤发电厂项目将在这些国家上线，从而导致这些国家的煤炭需求上涨，致使进口量增加。

5. 煤炭出口及投资前景展望

- 煤炭开采项目生产率比去年报告中的数值有所增长。然而，这并不意味着投资在增加。相反，这是少数项目近年实现投产的结果，而大多数都在推后。随着时间向前推进，煤矿开采项目也会逐渐增加。

- 更先进的煤矿开采项目的生产率将达到 1 亿吨/年。澳大利亚和俄罗斯合计将占到先进煤矿开采项目总量的 30%，其次是哥伦比亚（20%）和莫桑比克（11%）。

- 相比去年，煤炭额外的港口出口能力计划有所增加，达到 2.53 亿吨，主要原因是俄罗斯新推出港口出口计划和莫桑比克的出口能力增加。

- 尽管在减排方面取得一些进展，但如果没有碳捕集与封存（CCS）技术或者通过技术创新将捕捉的二氧化碳用于商业目的，要实现巴黎气候协定目标，只能通过去煤化，这将给电力行业和工业领域带来很大挑战。因此，CCS 技术推广仍需要非常强的激励措施和政府支持。

（郭楷模）

IEA：低碳转型势不可挡 但面临重重挑战

国际能源署（IEA）近日发布《能源、气候和环境 2016》报告²指出，全球应对气候变化所做出的积极努力正在改变能源行业的发展方式，即能源系统向低碳转型，而“第 21 届联合国气候变化大会”（COP21）上签订的《巴黎气候协定》则在加速这一转变过程。基于全球的能源消费和碳排放数据，报告详细分析和探讨了《巴黎气候协定》的进展、在执行过程面临的挑战，提出了保证《巴黎气候协定》顺利实施可采取的解决方案，要点如下：

（1）《巴黎气候协定》面临的执行挑战

《巴黎气候协定》提出的全球温控 2℃ 的目标意味着全球能源系统必须做出前所未有的转型，而所有协定签署成员国必须完成目前《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）下的国家自主减排贡献（NDCs）设定的目标。然而，IEA 预测发现：按照 NDCs，到 21 世纪末全球温度将升高 2.7℃；并且，随着时间的推移，温升幅度可能达到 3℃ 以上。因此，全球各国正面临着严峻挑战：不仅要完成 NDCs 制定的目标，而且需要做更多努力，以保证全球温升目标低于 2℃。例如，进一步提高

² Energy, Climate Change and Environment 2016 Insights. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ECCE2016.pdf>

能源效率和可再生能源占比对达成 NDCs 至关重要，也有利于全球温升目标。此外，各国在制定气候变化行动规划过程中还需考虑碳捕集与封存（CCS）、核能和终端燃料转换等更广泛的技术和行动。

（2）《巴黎气候协定》顺利实施可采取的解决方案

• 设定温升 2℃ 以下的目标以应对能源挑战

《巴黎气候协定》重构了全球气候的共同目标：从最初将温升最好控制在 2℃ 内的目标转变成现在的“必须要低于 2℃”，甚至更加激进的 1.5℃ 新目标。因此，必须采取进一步减排措施，使能源发展能够满足低于 2℃ 的温升目标要求。为了达到保持温度远低于 2℃ 的目标，需要设定更低更严格的碳排放标准，以及开发新技术以达到更低的排放水平。将温升限制在远低于 2℃ 将促进工业、电力和运输行业进一步减排，这些减排共同占 2DS 情景中碳排放的 85%。在 2DS 情景中，电力部门的碳排放量已经显著减少，到 2050 年二氧化碳排放将减少到低于 14 亿吨（主要措施是可再生能源、能源效率和 CCS），而工业和交通运输业在 2050 年将占排放量的 76%，将成为碳减排的重点关注领域。

• 进一步减少化石燃料设施的温室气体排放

解决燃煤和燃气电厂排放，特别是采取措施以减少现有或正在建设中的燃煤、燃气电厂温室气体排放量，这对减少全球排放至关重要。燃煤和燃气电厂的发电量占当今全球电力供应的 63%，但它们是碳密集型电力资源，约占全球能源部门温室气体排放量的 35%。为此，各种碳减排措施包括退役法规、调度规则、碳定价和其他政策均可应用削减现有电厂的温室气体排放，也可以采用碳捕集与封存技术（CCS）对电厂进行改造。由于天然气是一种较少碳排放的电力来源，将煤转换为天然气有助于减少排放。但到 2030 年，即使没有 CCS 的天然气也将成为一种高碳替代能源，与 2DS 情景的平均排放强度相当。为了实现更加雄心勃勃的“远低于 2℃”目标，更深层次的减排措施将导致化石燃料电力占比大幅下降。

• 设定合适的碳价格有助于电力系统脱碳

合适的碳定价作为气候变化行动方案的一部分，可以激励工厂尽力做到低排放。首先，对于自由化的电力市场，作为短期经营决策的驱动力，适度的碳定价是确定分配结构的重要杠杆。在引导新一代电力的投资时，情况更为复杂：非定价政策（如针对低碳发电的定向投标）可以比有限碳价格更有效地推动投资。然而，上网电价和其他对清洁发电的补贴本身可以通过适度的碳价格来加强，随着时间的推移可以提高价格水平，使其在政治上更具可持续性。最后，虽然适度的碳价格本身不会驱动资产退役以实现化石燃料发电减排，但在一个供过于求的市场上，可能在某些情况下调节煤炭和天然气运营之间的平衡，促使更多的碳密集型工厂首先离线退役。

• 加强政策支持扩大可再生能源应用范围

《巴黎气候协定》为可再生能源投资和部署规模的进一步扩大提供了重大的推动力。该协定促使可再生电力装机增量快速增加，超过了 2015 年预期值。然而，可再生能源投资额仍然低于达到气候目标所需要的投资水平。虽然太阳能光伏和陆上风电已经变得极具成本竞争力，但其他类型的可再生能源电力技术，包括光热发电、海上风电等亟需进一步的政策支持。此外，可再生能源的使用也需要扩大到热能和交通领域：2DS 情景中，到 2050 年工业和运输部门累积产生的温室气体排放量将占全球总排放量的 57%，因此强化工业和运输部门的减排措施对实现温升 2℃ 以下目标至关重要。

• 提高能效是节能减排的重要手段

管理能源需求是减少排放的重要手段，建议主要通过提高能源效率来减少经济持续增长所需要的能源消费。在 2DS 情景中，能效将助力全球减排近 40%，到 2050 年预计将节约超过 3×10^{21} 焦耳的能源消耗（相当于当前全球一次能源五年的供给总量）。在“十三五”期间，中国能源消费需求节约量的三分之二需归功于经济结构的调整。得益于能效提高，自 2000 年以来 IEA 成员国二氧化碳排放量减少 132 亿吨，而经济结构转型则促使二氧化碳排放量减少了 54 亿吨，累计二氧化碳减排总量达 186 亿吨，超过目前中国和美国年度排放量之和。

• 定制解决方案以激励国有企业发挥主导作用

国有企业在应对气候变化中发挥的主导作用往往容易被忽视。因此，建议各国政府针对国有企业提出不同于传统私营部门的解决方案，以激励减排。国有企业提供了超过 40% 的化石燃料发电量，以及超过 60% 的低碳可再生能源和核能发电量。以 50 个电力、工业和其它行业的大型国有企业为一组，每年能源相关的二氧化碳排放总量超过 44 亿吨，超过除中国和美国外的其它任何国家的排放量。国有银行同样给国有企业和私营企业提供大量融资，尤其是在新兴经济体国家，如巴西和中国。作为高碳排放源、低碳供应商、融资者和创新源，国有企业在推动能源系统转型中扮演着关键的角色。因此，想要实现能源系统的低碳转型就需要更充分地解决国有企业的特殊性问题。

• 保持能源部门的灵活性，确保能源产业持续增长

为了确保企业、社区和家庭及时获得能源服务，并在面对气候变化时有更多的能源选择，建议各国政府采取政策措施保持能源部门的灵活性，确保其持续增长。各国政府需要制定政策以促进私营部门的行动，包括传递气候信息、构建应急响应能力、加强能源基础设施抵御恶劣气候的能力。此外，公共和私营部门在调动财政资源用于灵活性投资方面都可以发挥关键作用。政策制定者大多关注于能源的去碳化，而适应气候变化的讨论都集中在非能源行业，能源领域也需要有具体的行动以便继续提供支持经济活动和基本社会服务的能源。有效的抵御计划不仅需要解决当

前能源行业的动态，而且还需要解决未来能源行业向低碳运营转型的动力。

- **开发更全面的数据采集分析工具促进能源行业的转型**

构建更强有力的跟踪框架、部署更好的能源数据采集和分析工具，以获取更全面的能源数据，支持各国能源相关政策的制定和实施，帮助各国了解目前的行动是否符合低碳能源转型的短期和长期目标需求。改进对能源行业投资和业务的跟踪手段将有助于实现《巴黎气候协定》的目标。开发和监测相关能源指标有助于观测能源转型进展：单靠排放指标不足以了解潜在的能源基础设施变化，因此跟踪更广泛的能源指标可为决策者提供更全面的能源数据信息。在有力数据支持的情况下跟踪适当的指标将提高跟踪框架的可信度，促进能源系统的低碳转型。

（张凡）

项目计划

ARPA-E 资助 7000 万美元开展可再生燃料和生物固碳研究

12 月 15 日，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）宣布资助 7000 万美元用于两个主题研究计划³。

1、“可再生能源制液体燃料技术研发”（REFUEL）主题研究计划

旨在开发新技术利用可再生能源驱动电化学反应，以实现将 CO₂、N₂ 和水转换成高能量密度碳中性液体燃料（CNFLs），并还将开发后续制氢燃料和电力转换技术，这一主题计划共资助 16 个项目，包括两个技术领域：

（1）制备氨气和氢气先进技术开发

- 开发低温氨裂解薄膜反应器，利用非金属催化剂，在 450℃ 以下实现一步法氨裂解制氢，且只产生无害的副产品—氮气，提供经济高效氢气生产途径。

- 开发高效催化剂材料，并结合高效的氢氧化物交换膜，以提高对氮气的还原活性，从而实现氮气、水到氨气的高效转化，提高氨气生产率，降低生产成本。

- 利用多孔陶瓷/金属片来构建全新的阴离子交换膜反应器，以在较低的压力和温度下实现催化反应器运行，提高氨气的产率。

- 研发全新的催化剂以构建全新的哈柏法制氨气系统，将现有系统所需的高压值至少降低 20%，提高哈柏法制氨气经济性。

- 开发高压堆栈，以实现产氢、提纯和压缩存储一体化，大幅简化制氢储氢的基础设施结构。

- 基于全新的固态电解质和纳米催化剂开发全新的制氨系统，实现温和条件下（100-300℃）水、氮气到氨气的高效转化。

³ ARPA-E Announces \$70 Million in Funding for New Programs to Power Transportation and Store Carbon in Soil. <https://www.energy.gov/articles/arpa-e-announces-70-million-funding-new-programs-power-transportation-and-store-carbon-soil>

- 在传统哈柏制氨的过程中引入无机吸附材料，以消除蒸汽中的氨气成分，提高哈柏制氨转化率和产率。

- 开发空心纤维薄膜反应器，结合低成本、高催化活性的钌金属催化剂，实现氨气高效裂解制氢。

- 开发全新的微波等离子体制氨气方法，实现低温低压条件下氢气和氮气到氨气的高效转化，将氨气产率提高 5 倍。

- 利用可再生能源电力，结合氢氧根离子交换膜，开发全新的氨气制备方法并开展相关示范工作，以降低氨气制备过程的能耗强度和成本。

(2) 可再生能源制 CNFLs 技术和发电技术

- 基于金属钌催化剂电极，开发可逆的电化学电池，能够以氮气和水（或者氨气）为燃料，实现燃料化学能到电能的高效转化；同时开发新方法将氨气产率提高 100 倍，从而降低燃料制造成本。

- 基于双功能催化剂和高性能产品提纯技术，开发先进的薄膜反应器，利用二氧化碳、氢气和电力资源，实现高效经济生产二甲醚液体燃料，以替代柴油燃料。

- 开发全新的中温固态氧化物燃料电池，在 650℃ 温度下实现燃料（氨气）化学能到电能的高效转化，降低燃料电池成本，提高发电效率。

- 对现有的燃料电池质子交换膜电解槽进行改造，以实现二氧化碳的高效选择性。

- 利用电化学电池，以工业或者化工生产中产生的二氧化碳废气和水作为资源，将其转化为二甲醚液体燃料。

- 基于氢氧化物离子导体薄膜电解质，开发全新的燃料电池，以在约 100℃ 条件下实现氨气燃料化学能到电能的高效转化，产生 500 mW·cm⁻² 的功率。

2、“植物根际优化提高固碳能力”(ROOTS) 主题研究计划

旨在开发新的作物育种方法提高植物根系活力、改良土壤环境，从而增强植物固碳能力和肥料利用率，减少二氧化碳和氮氧化物排放，这一主题计划共资助 10 个项目，包括三个技术领域：

(1) 提高高通量植物表型平台对植物表型的分析能力

- 现场部署集成传感器的植物表型平台，以研究植物根系基因与土壤环境相互作用以及土壤的氮、碳元素循环情况。

- 开发电阻式传导技术，通过探测植物根系电流变化来表征植物根系生长状态。同时，利用先进算法提取上述电流数据将其输入到生态模型中来识别植物表型和基因型的内在关联。

- 开发低成本、综合的植物表型平台系统以识别和筛选具有深层根系的玉米品种；同时，开发根系自动成像技术，以监测植物根系结构特征和形态，结合计算机

模型确认植物根系深度及其周围土壤的微生物量。

(2) 增强植株品种和土壤筛选技术

- 设计全新的植物氮气硅微针传感器和土壤氮气微流传感器，将其应用于植株品种筛选系统，提高作物品种筛选技术的高通量、高分辨率，以加速识别和筛选出具有优秀根系和氮吸收能力的优良作物。

- 利用非弹性中子散射成像技术，来表征和量化土壤中的碳元素分布（深度可达 30cm），并形成土壤碳元素分布的空间分布 3D 影像，以更好地评估和改善土壤，提高筛选优秀根系作物品种的效率。

- 利用微针传感技术，对植物体液和光合作用的产物进行无损测试；此外，还将利用微量气体色谱仪来测试植物根系周围土壤的化学成分。从而将地下土壤碳元素分布情况和地面的光合作用联系起来。最终促进具有优秀根系的高粱品种的筛选。

(3) 开发先进的植物根系和土壤成像技术

- 开发热声子根系成像系统，利用无线广播设备发出超声波信号，同时还具有收集声波信号的传感器阵列。

- 开发低成本、便携式的核磁共振成像系统，用于实地的根系结构和土壤中水分分布成像，以识别出具有优秀土壤养分吸收能力的植物根系和量化植物土壤中可用的水资源。

- 开发微米级分辨率的 X 射线计算机断层扫描 3D 成像系统，用于植物根系结构的详细成像研究。

- 利用 X 射线背散射技术，并结合 X 射线信号接收和排序机器开发全新的便携式根系成像系统，实现对植物根系和土壤的无损观测和成像。

（郭楷模）

DOE 资助 4000 美元建设国家波浪能并网试验中心

12 月 21 日，美国能源部宣布资助 4000 万美元，支持俄勒冈州立大学国家海洋可再生能源中心设计并建造一座位于开放水域的国家波浪能并网试验设施“南太平洋海洋能源试验中心”⁴，旨在促进海洋能和流体动力能源开发研究，现场测试全规模的波浪能转换原型设备，以获取关键的性能数据，识别潜在的技术挑战，加速推进波浪能商业化进程。该中心技术开发和试验工作内容如下：

- **技术开发、测试和部署。**开发海洋能和流体动力能源利用技术、能量转换设备和组件原型，同时在实验室或开放水域开展相关技术、设备原型的测试工作，以评估技术、设备的成熟度，以及识别针对不同水资源所开放的不同类型技术和设备所需要的性能指标和成本，推进原型技术和设备尽快实现商业化。

⁴ Energy Department Announces Investment in Wave Energy Test Facility. <https://www.energy.gov/articles/energy-department-announces-investment-wave-energy-test-facility>

- **开发研究工具和模型。**开发成套的测试工具和计算机模型，用于协助海洋能和流体动力能量转换原型设备设计、开发和优化工作，如通过计算机建模来优化设备性能、改进下锚的设计以及设备的最佳排列组合。

- **技术表征和评估。**评估不同类型海洋能和流体动力能源开发技术和不同设计方案能量转换设备的实证性能；开发一套标准性能指标和分类法，以准确描述和对比设备性能；收集、分析和分享美国以及国际海洋能和流体动力能源开发技术研究案例和经验。

- **环境影响和选址评价。**研究海洋能和流体动力能源开发技术和设备选址对特定的海洋物种及其生态系统的影响；此外，开发成套工具来评估技术对整体环境的影响，以及相关的研究方法监测技术对海洋微生物的影响，从而形成技术环境影响分析的数据库。

- **资源评估。**对海洋波浪、潮汐、洋流、海洋热能资源进行详细的原位测量，并利用远程传感器收集数据，结合先进的计算机模型来量化研究，构建出能量密度图谱，以识别出全美海洋潜在的可利用资源量。

- **经济价值分析和市场开发。**开展海洋能和流体动力能源利用技术的经济潜力评估工作，包括企业的研究和开发需求、政策机制和市场设计的评估，确保评估信息及时传递到潜在的海洋能和流体动力能源企业和各利益相关方，以加速海洋能和流体动力能源开发和技术部署。

（郭楷模）

前沿与装备

双氧化还原电对离子液体增强双电层电容能量密度

超级电容器（超容）具有瞬间释放特大电流、充放电效率高、循环寿命长等优点，在移动通信、消费电子和电动汽车等领域展现出广阔的应用前景。然而较低的能量密度成为了超容实际应用的一大阻碍。奥地利格拉茨技术大学 Olivier Fontaine 教授课题组制备了一种全新的包含双氧化还原电对的离子液体（biredox IL）电解质，其中两种氧化还原电对分别为蒽醌修饰的全氟磺酸酯阴离子（AQ-PFS⁻）和 2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧自由基催化醇修饰的甲基咪唑阳离子（MIm⁺-TEMPO），离子液体为甲基丁基咪唑三氟甲磺酸（BMImTFSI）。研究人员分别将 biredox IL（浓度为 0.5M）和不含有电对的 IL 作为电解液应用到超级电容，以碳为电极制备了对称的双电层超级电容器。循环伏安测试结果显示，扫描速率为 5 mV·s⁻¹ 时，基于 biredox IL 电解液的电容器比电容为 200 F·g⁻¹、放电功率达到了 70 Wh·g⁻¹，均是纯 IL 电解液电容（比电容和放电功率仅为 100 F·g⁻¹ 和 35 Wh·g⁻¹）的 2 倍。在 2.8V、1mA·g⁻¹ 条件

下充电 2 个小时后进行漏电流测试，结果表明采用 biredox IL 电解液的电容器漏电流 ($30 \mu\text{A}\cdot\text{F}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$) 仅为后者 ($100 \mu\text{A}\cdot\text{F}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$) 的三分之一左右。更为关键的是，以 $1.5 \text{ mA}\cdot\text{g}^{-1}$ 电力进行恒电流循环测试，结果显示 biredox IL 电解液的电容器在经过 2000 次循环后，比电容仍可维持初始值的 86%，表现出优秀的循环稳定性。该项研究创新性地将氧化还原电对修饰的正负离子引入离子液体，将上述复合离子液体作为电解液应用于超容，提高了电解液离子的浓度，在不影响其功率性能的前提下，大幅提高了超容的能量密度，促使超容技术向大规模商业化应用迈进了重要一步。相关研究成果发表在《*Nature Materials*》⁵。（郭楷模）

氧空位提升赅电容电荷存储能力

加利福尼亚大学洛杉矶分校 Bruce Dunn 教授课题组利用微薄水热法合成了具有正交晶系结构的二维过渡金属氧化物 $\alpha\text{-MoO}_3$ 纳米带，作为赅电容材料。为了提高 $\alpha\text{-MoO}_3$ 的导电性，研究人员在该材料中引入氧空位，即形成还原态 R-MoO_{3-x} ，通过透射电镜测试显示 R-MoO_{3-x} 纳米带长度为 3-5 微米，宽度为 100-500 nm 之间。进一步通过热重 (TGA) 和 X 射线电子能谱 (XPS) 表征显示，氧空位不仅存在于 R-MoO_{3-x} 材料表面，也存在于材料体内。为了探究氧空位对基于 R-MoO_{3-x} 电极赅电容性能的影响，研究人员详细对比 R-MoO_{3-x} 电极赅电容和基于完全氧化 F-MoO_3 电极的赅电容性能。循环伏安扫描表征结果显示， R-MoO_{3-x} 电极具有更高的电荷比容量和更快的电荷存储动力学过程：在 $100 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速率下，充电 20 秒基于 R-MoO_{3-x} 赅电容可以存储电荷比容量达到约 $550 \text{ C}\cdot\text{g}^{-1}$ ；相反，基于 F-MoO_3 赅电容的存储电荷比容量小于约 $400 \text{ C}\cdot\text{g}^{-1}$ ；表明 R-MoO_{3-x} 电极具有更强的电荷存储能力。并且， R-MoO_{3-x} 赅电容循环稳定性也高于 F-MoO_3 赅电容，经过 50 次循环后，前者的电容量仅减少了 5%，而后者的衰减幅度高达 50%。上述的结果表明，引入氧空位不仅能够增强 MoO_3 赅电容的电荷存储能力，同时还能提高赅电容的循环稳定性。研究人员指出之所以出现上述的增强效应，主要是由于氧空位的引入一方面增大了 MoO_3 层状结构的层间距，从而促进了电荷快速存储的动力学过程；同时， R-MoO_{3-x} 赅电容在电极锂化后形成大量的可逆 Mo^{4+} 离子。该项研究通过往过渡金属氧化物 MoO_3 材料中引入氧空位，从而提高了其电荷存储能力，从而大幅提高了基于该材料的赅电容性能，为提高赅电容储能性能提供了全新的路径；更关键的是，该方法可用于其他种类的过渡金属氧化物材料中，从而制备出更多的高性能赅电容电极材料。相关研究成果发表在《*Nature Materials*》⁶。（郭楷模）

⁵ Eléonore Mourad, Laura Coustan, Pierre Lannelongue, et al. Biredox ionic liquids with solid-like redox density in the liquid state for high-energy supercapacitors. *Nature Materials*, 2016, DOI: 10.1038/nmat4808.

⁶ Hyung-Seok Kim, John B Cook, Hao Lin, et al. Oxygen vacancies enhance pseudocapacitive charge storage properties of MoO_{3-x} . *Nature Materials*, 2016, DOI: 10.1038/nmat4810.

基于人工智能技术提高固态锂电池研究效率

开发高离子导电性、化学性质稳定的固态电解质是锂离子电池研究的前沿热点。但含锂固态化合物数量庞大，采用传统的试错方法（随机测试）来筛选出合适的固体电解质材料耗时、效率低。斯坦福大学 Evan J. Reed 教授课题组基于人工智能技术，通过现有的锂离子电池文献报道的所有实验数据构建了具备深度学习能力的计算机预测模型，并建立了锂离子导电性、结构稳定性、成本和材料来源几个筛选标准，从材料数据库中的 12831 种含锂固态化合物候选材料筛选出了 20 余种有潜力的固态电解质材料，全程仅耗时数分钟，筛选的效率是传统随机测试的百万倍，大幅提高了研究效率。研究人员通过计算机预测模型研究发现，当筛选的标准限定为结构稳定性、化学稳定性和低离子导电性时，12831 种候选材料中只剩下 317 种固态化合物满足条件，剔除掉了 97.5% 的材料；当进一步增加筛选标准高离子导电性和成本时，满足条件的固态化合物数量只剩 21 种，即经过严格的筛选标准后有潜力的固态电解质材料种类为 21 种，剔除率高达 99.8%。相关研究成果发表在《*Energy & Environmental Science*》⁷。

（郭楷模）

新型双功能催化剂实现 CO₂ 高效捕集与转化

二氧化碳（CO₂）催化加氢转化为高附加值化工产品是碳捕集和再利用技术领域研究的热点之一，开发高活性、高选择性、低成本催化剂是关键所在。匹茨堡大学 J. Karl Johnson 教授课题组利用化学工程设计合成了含有多孔金属有机框架和路易斯酸碱对催化剂的双功能复合材料，能够同时实现 CO₂ 吸附捕集与加氢催化转化成甲醇，简化 CO₂ 捕集和转化的工艺。研究人员设计合成了一种三维多孔结构的金属有机框架材料 UiO-67 并对其进行官能化修饰，即将具有催化活性路易斯酸碱对（N-BF₂）通过有机链联苯二甲酸二甲酯（BPDC）与 UiO-67 结合，制备了全新的复合材料 UiO-67-NBF₂ 或 UiO-67-(NBF₂)₄。随后，通过密度泛函理论研究了 UiO-67-NBF₂ 和 UiO-67-(NBF₂)₄ 吸附和催化二氧化碳氢化到甲醇的反应机理，发现两者吸附 CO₂ 能力相似，但两者在后续的 CO₂ 催化加氢转化成甲醇的速度表现出不同，因为决定反应速率的关键步骤是氢分子的活化过程，其中 UiO-67-(NBF₂)₄ 氢分子的解离能为 0.35 eV，低于前者的 0.46 eV；并且 UiO-67-(NBF₂)₄ 可以提供更多的催化活性位点（含有更多的路易斯酸碱对），有利于氢分子的裂解，有助于提高 CO₂ 的催化加氢转化成甲醇速率。相关研究成果发表在《*Catalysis Science & Technology*》⁸。

（郭楷模）

⁷ Austin D. Sendek, Qian Yang, Ekin D. Cubuk, et al. Holistic computational structure screening of more than 12 000 candidates for solid lithium-ion conductor materials. *Energy & Environmental Science*, 2017, Advance Article, DOI: 10.1039/C6EE02697D.

⁸ Jingyun Ye, J. Karl Johnson. Catalytic hydrogenation of CO₂ to methanol in a Lewis pair functionalized MOF. *Catalysis Science & Technology*, 2016, 6 (24): 8392-8405.

IEA：全球天然气市场结构应富有灵活性以应对突然变化

IEA 日前发布了《全球天然气安全审查报告 2016》⁹，详细分析了全球天然气市场的结构和应对潜在风险的能力。报告着重讨论了事关全球天然气市场安全的两个关键问题：液化天然气基础设施（特别是液化部分）有多少冗余能力；以及天然气生产供应的灵活性。报告要点如下：

1. 小容量液化天然气液化基础设施的灵活性

液化天然气出口基础设施的生产灵活性低于通常认为的水平。当前，由于出口基础设施的灵活性问题（包括天然气输送管道缺乏以及技术和安全等问题），导致全球约 15% 的液化天然气出口受限——这相当于马来西亚和印度尼西亚的出口总和，而这两个国家分别是全球第三大和第五大天然气出口国。2011-2016 年期间，无法使用的出口基础设施数量翻了一番，使得 650 亿立方米天然气无法有效出口，而低油气价格将进一步加剧这种情况，意味着天然气市场实际所具有的额外产量比假设的要少。

2. 美国日益增加的天然气产量将提高目的地灵活性

在正常情况下，液化天然气贸易的持续增长不会给市场的灵活性带来额外的增益。因此，从供应的安全性来看，现有和未来供应的灵活性程度是全球天然气系统的重要决定因素。展望未来，大量美国液化天然气的到来将显著提高液化天然气贸易目的地灵活性。预计 2016-2021 年间，液化天然气产量的大约一半将来自美国。此外，随着液化天然气合同结构变得更加宽松，市场流动性将持续增加。在 2014 年，大约 60% 的液化天然气合同具有固定的目的地，而在 2015 年，这一数字已经降至 40%。虽然短期合同更加普遍，但买方也接受长期合同，因此，天然气市场合同结构将越来越灵活，最终目的地选择的灵活性将随之提高，最终天然气市场应对潜在市场风险能力也得到了增强。

3. 灵活的电力系统是全球天然气安全的关键贡献者

日本在应对福岛核事故后的电力供应短缺方面的经验说明了灵活的能源系统对应对能源供应突然中断的至关重要性。除了强劲的电力需求约束能力之外，大量燃料转换潜力（主要是燃油能力）的可用性是日本应对事故所采取措施的关键组成部分。在 2011-2013 年间，天然气替代了大约 1/3 的核能损失，其数量相当于同期石油和煤炭做出的能源贡献度，突出了多样化的需求结构对应对危机的重要性。另一方面，欧洲的天然气需求减少，主要是由于金融危机和充分多样化的发电组合灵活性。

⁹ Global Gas Security Review. How Flexible are LNG Markets in Practice? http://www.iea.org/publications/free_publications/publication/GlobalGasSecurityReview2016.pdf

2010-2013 年，欧洲的燃煤发电量增长了 7%，抵消了燃气发电量下降的 1/3。此外，可再生能源的强劲增长也有助于电力部门天然气需求的减少。因此，燃料转换能力对于危机管理以及更广泛的全球天然气市场安全是至关重要的。

4. 充足的储气库是天然气系统安全的关键

就全球天然气系统安全而言，燃料转换能力的下降将削弱欧洲在全球天然气中断的情况下作为液化天然气的主要灵活供应商的能力。欧洲不断变化的天然气供应结构对更高的进口依赖度也带来了挑战。特别是，欧洲储气库都需要依靠长距离输送管道和来自欧洲以外国家的液化天然气供应。充足的储气库有助于将季节性供应曲线与需求变化相匹配的曲线重建，也是平衡日波动曲线的关键。由于夏季和冬季天然气价格的变化，使欧洲储气设施经营者面临经济压力。然而，随着长期预定措施的推出，经济压力将使储气运营商充分开放进行广泛竞争。从全球安全的角度来看，夏季欧洲地下储气库中注入较少的气体将潜在地提高欧洲在冬季期间灵活进口量的要求。从国内的角度来看，在欧洲需求中心附近没有足够的天然气储气库，一旦长距离天然气输运管道或进口的运输路线发生任何中断，将会引起更高的安全问题。

（吴勘）

中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心

中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心是服务国家和中科院能源决策管理、科技创新、产业发展的专业情报研究机构，历年来承担和参与了多项国家级、中科院、省部级能源科技战略规划和重要科技计划研究。中心的主要产品包括《先进能源发展报告》、《先进能源动态监测快报》（半月刊）、《能源与科技参考》及各类深度能源情报研究分析报告，主要研究方向包括能源科技领域的国际科技战略与规划、科技计划与预算、科技进展与动态、科技前沿与热点、重大成果工程应用、重要科技政策与管理研究。

研究内容		特色产品
战略规划研究	开展科技政策与科研管理、发展战略与规划研究等相关服务，为科技决策机构和管理部门提供信息支撑。	先进能源发展报告：科技引领能源 国际能源战略与新能源技术进展 金融危机背景下的能源战略 世界能源强国能源科技创新体系分析报告 美国能源科技计划管理机制及启示
领域态势分析	开展特定领域或专题的发展动态调研与跟踪、发展趋势研究与分析，为研究机构、企业的科研项目提供情报服务。	核电技术国际发展态势分析报告 太阳能热发电技术国际发展态势分析报告 智能电网国际发展态势分析报告 规模化电力储能技术国际发展态势分析报告 高端洁净发电技术国际发展态势分析报告
技术路线研究	开展产品、成果、专利或标准的情报研究，分析相关行业的现状及发展趋势，为企业发展与决策提供参考。	国际能源领域技术路线图解析 低阶煤热解/气化/循环流化床专利态势分析 新型煤气化技术发展报告 太阳能技术新突破：钙钛矿太阳电池 我国能源互联网发展重要战略问题研究

编辑出版：中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心
联系地址：武汉市武昌区小洪山西 25 号（430071）
联系人：陈伟 郭楷模
电 话：（027）87199180
电子邮件：jiance@whlib.ac.cn
微信公众号：CASEnergy

