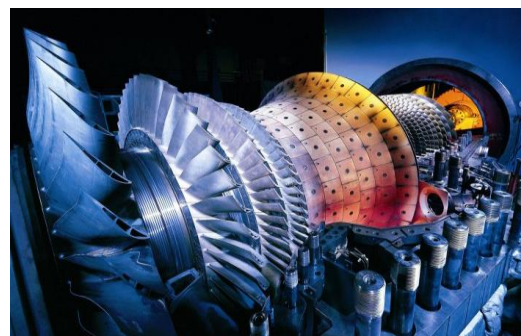


先进能源科技动态监测快报



本期重点

- IEA 发布成员国能源技术公共研发示范投入简析报告
- 欧盟提出风能研究与创新五大优先领域
- DOE 报告指出清洁能源技术成本已显著下降
- NSF 开展粮食、能源和水系统关联研究
- EIA：到 2040 年全球致密油产量将翻番

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 发布成员国能源技术公共研发示范投入简析报告	2
欧盟提出风能研究与创新五大优先主题领域	6
DOE 报告指出清洁能源技术成本已显著下降	8

项目计划

NSF 资助超 7200 万美元开展粮食、能源和水系统关联研究	10
ARPA-E 资助 3700 万美元支持高性能电化学器件研究	12

前沿与装备

MIT 托卡马克聚变堆创造等离子体压强世界纪录	13
英美科学家联合开发全球首个全钙钛矿串联太阳电池	14
MIT 开发首个无碳超级电容器	15
新型太阳能热电系统热电转换峰值效率高达 7.4%	15

能源资源

EIA: 到 2040 年全球致密油产量将翻番	16
-------------------------------	----



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: 2016 年 11 月 1 日

本期概要

国际能源署（IEA）发布《IEA 成员国能源技术公共研发示范投入简析》报告，对成员国能源技术研究、试验开发和示范（RD&D）的公共投入变化及结构调整态势进行了详细分析：2015 年 IEA 成员国能源技术公共研发示范投入总额约为 173 亿美元，略低于 2014 年的水平。总体而言，在过去几年里（自 2011 年始）成员国能源技术公共研发示范投入总额一直呈现下降趋势（2011 年约 190 亿美元），但仍高于 1983-2008 年间的投入水平。此外，在过去 40 年里，IEA 成员国能源技术 RD&D 领域方向变得日益多样化。1974 年，核能在能源技术公共研发示范投入总额中占比最高，达到 74%，此后由于刺激支出的衰减而下降，于 2015 年降至 21%。同期，能源效率、可再生能源技术和交叉技术的研发示范投入额已增长到与核能差不多的水平。

欧洲风能技术创新平台（ETIPWind）发布了《风能战略研究与创新议程》报告，明确提出了五大主题领域的优先行动计划：（1）改善电力系统、基础设施和并网集成方案，包括实施能源管理以确保集成风能电力系统的稳定性；设计和管理风力涡轮机和风电场以增强辅助服务的能力；改善输电系统，包括操作和维护；发展储能技术。（2）风电系统的运营和维护，包括为性能测试和环境监测开发标准化的验证传感器系统；开发实时测试技术、自适应交互式大数据控制技术以改善能量输出；开发数据分析、诊断技术和运维策略改善故障预警；风力涡轮机寿命优化。（3）推进风电产业化进程，包括风电行业标准化；统一市场标准；价值链开发。（4）促进海上风电的发展，包括创新的运输和安装系统；创新的风电塔筒和基础结构；浮动式海上风电场；创新的海上变电站和电缆。（5）研发新一代的风电技术，包括开发颠覆性技术；新一代的测量技术和测试手段；智能转子；改善风电预报能力；优化材料和结构；风电场控制系统。

美国能源部发布《能源革命进行时 2016》报告：指出得益于 DOE 对清洁能源技术研发多年持续的投入支持，五种主要清洁能源技术（包括风力涡轮机、公用事业规模光伏、分布式光伏、电动汽车和 LED）的成本已大幅下降（自 2008 年以来成本降幅最高达到 94%，最低也达到了 41%），且在全美部署规模急剧扩大。

美国国家科学基金会（NSF）宣布资助 7200 万美元用于开展粮食、能源和水系统关联主题下的一系列研究项目：以集成所有科学和工程领域知识，综合考虑自然、社会和人类因素的跨学科研究，来理解、设计、模拟的粮食、能源和水系统相互关联性，确保人类在城市化、迁徙和应对气候变化过程中能够科学合理的利用粮食、能源和水，提升资源效率、减少浪费，同时保护生态环境和谐。其中：（1）超 4000 万美元用于促进研究机构合作，旨在寻求创新的方法来理解粮食-能源-水系统关联问题；（2）300 万美元用于推进氮和磷循环的基础知识、以及节能型生产和食品生产用途的化肥的可持续利用研究；（3）3000 万美元用于改善全美的科学和工程研究能力；（4）900 万美元用于 FEW 科学研究培训项目。

IEA 发布成员国能源技术公共研发示范投入简析报告

国际能源署（IEA）10 月份发布了《IEA 成员国能源技术公共研发示范投入简析》报告¹，对成员国能源技术研究、试验开发和示范（RD&D）的公共投入变化及结构调整态势进行了详细分析。

1 能源技术公共研发示范投入整体情况

报告指出，2015 年 IEA 成员国能源技术公共研发示范投入总额约为 173 亿美元，略低于 2014 年的水平。总体而言，在过去几年里（自 2011 年始）成员国能源技术公共研发示范投入总额一直呈现下降趋势（2011 年约 190 亿美元），但仍高于 1983-2008 年间的投入水平。2009 年，成员国能源技术公共研发示范投入额达到峰值，主因是 2009 年《美国复苏与再投资法案》出台，刺激了政府投入大幅上涨（图 1）。

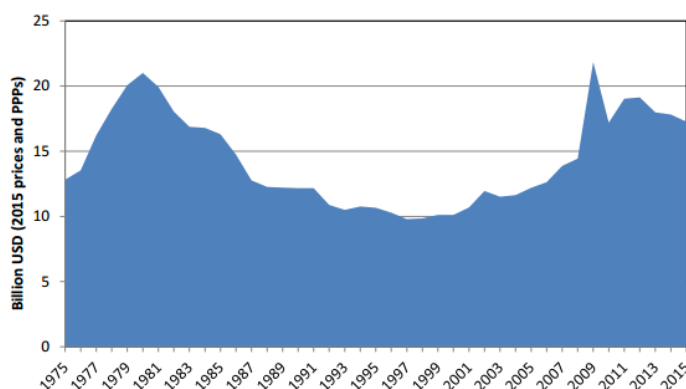


图 1 1975-2015 年 IEA 成员国能源技术公共研发示范投入总额变化趋势（单位：十亿美元）

在过去 40 年里，IEA 成员国能源技术 RD&D 领域方向变得日益多样化。1974 年，核能在能源技术公共研发示范投入总额中占比最高，达到 74%，此后由于刺激支出的衰减而下降，于 2015 年降至 21%。而在此期间，能源效率、可再生能源技术和交叉技术的研发示范投入额已增长到与核能差不多的水平：其中，可再生能源技术占比从 1974 年的 3% 增长到了 2015 年的 21%；能源效率占比从 4% 增长到了 20%；另一方面，化石燃料投入占比在 20 世纪 80 年代到 90 年代之间达到顶峰，并在 2009 年之后稳定在 11%~13% 之间（图 2）。

¹ Key trends in IEA public energy technology RD&D budgets 2016 edition. http://www.iea.org/media/statistics/topics/IEA_RDD_Factsheet_2016.pdf

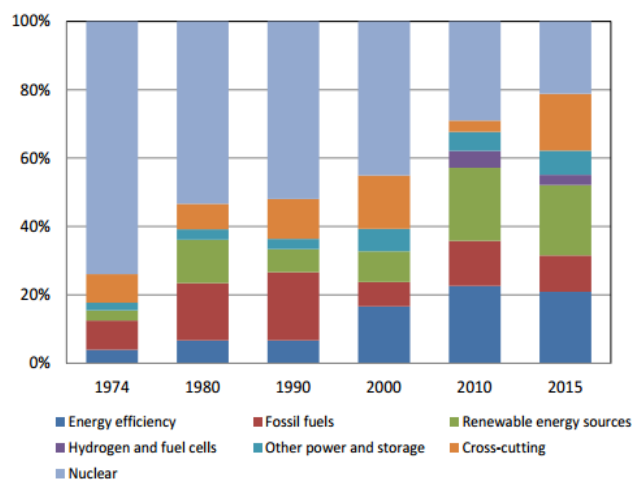


图 2 1974-2015 年 IEA 成员国不同能源技术公共研发示范投入占比变化态势

尽管 2005-2014 年间，美国和日本的能源技术公共研发示范投入在 IEA 成员国投入总额中的占比发生了变化（其中日本占比从 31%减少到 19%，而美国从 33%增加到 36%），但美国和日本仍是 IEA 所有成员国中投入最多的两个国家（图 3）；同期，法国、德国、加拿大和韩国则保持各自投入水平，而 IEA 其他成员国投入额则显著增加。

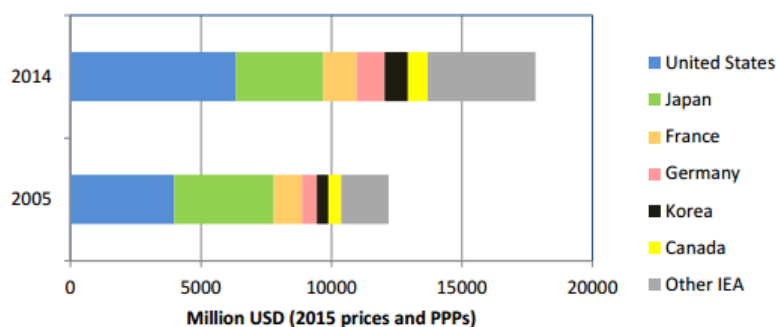


图 3 2005 年和 2014 年 IEA 各成员国能源技术公共研发示范投入额（单位：百万美元）

日本 2015 年核能技术公共研发示范投入占其能源技术投入总额的 39%，低于 2011 年之前的水平，但仍是成员国中核能投入额最高的国家；欧盟在能效和可再生能源技术领域的公共投入额最大；而美国则在交叉技术领域公共投入额最大，在 2015 年达到了 37%（图 4）。

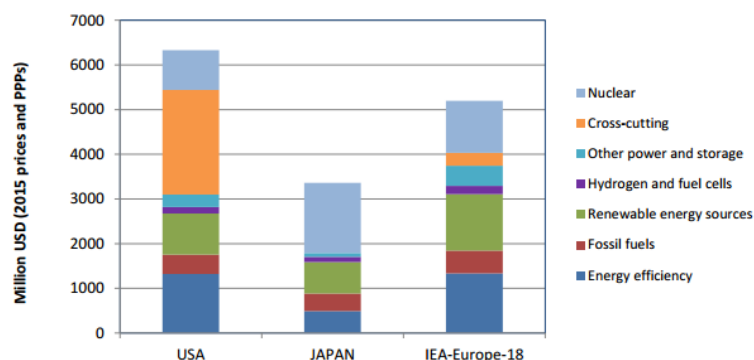


图 4 2014 年美日欧不同能源技术公共研发示范投入情况（单位：百万美元）

2 能源技术公共研发示范投入占比情况

总体而言，2015 年 IEA 成员国能源技术公共研发示范投入额占公共研发示范投入总额的比例略高于 4%，但较 1981 年的 11% 已有大幅下滑，并在 2005-2006 年间出现了历史最低值（3.5%），此后稳定在 4% 左右。在 21 世纪初期，IEA 美洲地区国家和欧洲地区国家的能源技术公共研发示范投入占比出现了历史最低值，在最近几年才略微增加；IEA 亚太地区国家在 2015 年则表现出了不同的变化趋势，其能源技术公共研发示范投入占比缓慢下降到了 9%，主因是日本投入额从 33 亿美元下降到了 28 亿美元（图 5）。

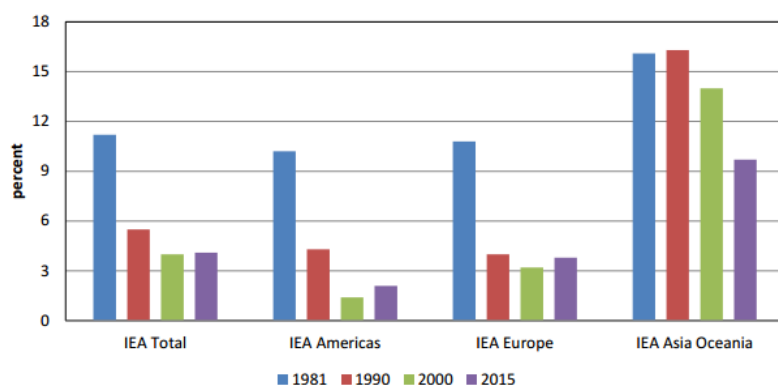


图 5 不同时期 IEA 不同地区成员国能源技术公共研发示范投入在国家研发示范投入总额中的占比（单位：%）

2015 年，日本能源技术公共研发示范投入在其公共研发示范投入总额中的占比仍然是各成员国中最高的，但已从 1990 年的 23% 减少到 2014 年的 12%，2015 年进一步降至 11%。美国是能源技术最大的公共投资国，2015 年总投资额达到 60 亿美元，但在该国公共研发示范投入总额中所占比例低于 2%（图 6）。

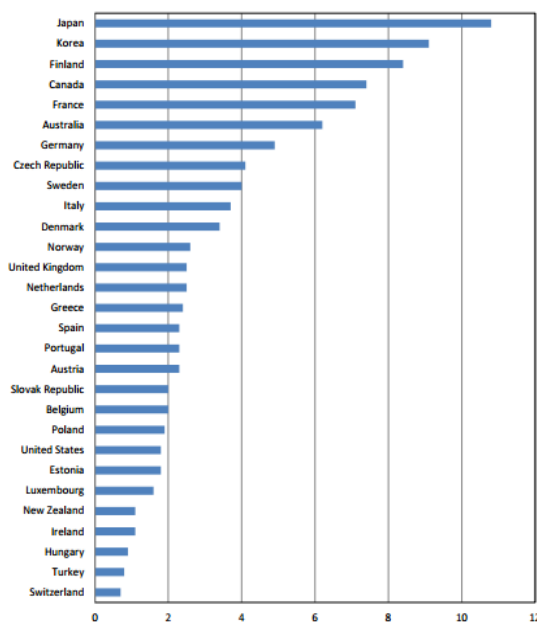


图 6 2015 年 IEA 各成员国能源技术公共研发示范投入在其国家研发示范投入总额中的占比（单位：%）

IEA 各成员国能源技术公共研发示范投入在 GDP 的占比千差万别，从千分之 0.1 到千分之 1.4 之间，其中占比最大为挪威、芬兰和日本，均超过千分之 0.6（图 7）。

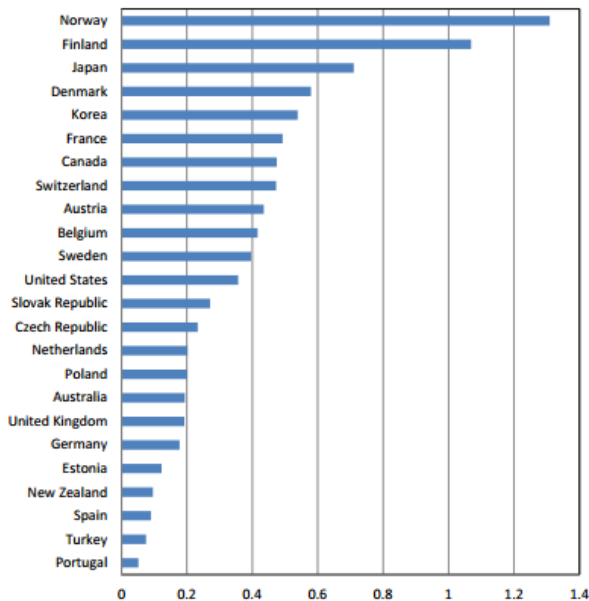


图 7 2014 年 IEA 各成员国能源技术公共研发示范投入在其国家 GDP 的占比（单位：%）

IEA 能源技术公共研发示范投入统计数据库还包括欧盟“地平线 2020”计划 2014-2015 年研发示范资助经费数据。能效和可再生能源技术是欧盟委员会资助最多的两个领域，且在 2015 年分别占到欧盟能源技术公共研发示范投入总额的 23%和 25%；同期，化石燃料占比仅为 6%（图 8）。

图 8 还展示了 2015 年欧盟委员会能源技术公共研发示范投入构成与 IEA 中 15 个欧盟成员国的投入构成对比：在能效和可再生能源技术两个领域，两者占比类似，只是欧盟委员会更注重交叉技术和储能技术的研发投入，而核能研发投入相对少些。

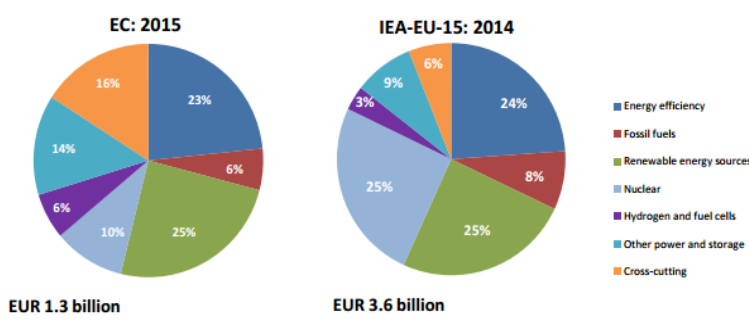


图 8 2015 年欧盟委员会能源技术公共研发示范投入构成（左图）和 IEA 15 个欧盟成员国投入构成（右图）

（郭楷模）

欧盟提出风能研究与创新五大优先主题领域

9月27日，欧洲风能技术创新平台（ETIPWind）发布了《风能战略研究与创新议程》报告²，以加速风能技术的研发创新，进一步降低风电的平准化成本，促进风电的并网集成，维持欧盟风电技术的全球领导地位。为此，战略议程明确提出了五大主题领域的优先行动计划，包括：（1）改善电力系统、基础设施和并网集成方案；（2）风电系统的运营和维护；（3）推进风电产业化进程；（4）促进海上风电的发展；（5）研发新一代的风电技术。主要内容如下：

（1）改善电力系统、基础设施和并网集成方案

- **实施能源管理以确保集成风能电力系统的稳定性。**开发相应的能量管理系统，以解决高比例消纳风能给电力系统带来的波动性影响，确保电力系统供电平稳。开发精度更高的风电预测预报系统，促进风能更高比例的并网集成。同时，发展增强型虚拟电厂和变电站，改善风电场管理。

- **设计和管理风力涡轮机和风电场以增强辅助服务的能力。**在单个风力涡轮机和风电场层面，重点发展风力发电提供电力辅助服务（包括频率保持、电压保持、独立发电和黑启动等）的能力，增强风电场作为独立电站对电力系统的支持能力。

- **改善输电系统，包括操作和维护。**要剔除电网固有的缺陷对风电市场发展的不利影响。增强电缆和其他关键输电组件可靠性，包括其操作和维护。此外，改善电力收集系统以提高风能的并网比例。

- **发展储能技术。**发展更加高效、长寿命低成本的储能技术，解决风电并网给电力系统带来的波动性，提高电网的灵活性和经济性。

（2）改善风电系统运营和维护

- **为性能测试和环境监测开发标准化的验证传感器系统。**提高数据收集传感器的设计质量，并将其安装在风力涡轮机上。提高传感器的准确性和稳定性，实现高质量数据的低成本采集。开发或引进新的数据采集技术，如空中无人机或自动机器人等。

- **开发实时测试技术、自适应交互式大数据控制技术以改善能量输出。**改进数据收集以优化风力涡轮机运营和维护。开发交互式的大数据分析工具可以优化能量输出，同时保护风电设备的结构、机械性能和电气条件。

- **开发数据分析、诊断技术和运维策略改善故障预警。**利用大数据分析来确定导致风电设备故障（如停机事件）的连续性事件根本原因，改善风电维护策略，包括预测性维护，以降低运维成本。

- **风力涡轮机寿命优化。**改进数据聚类分析以更好地理解风力涡轮机性能退化机制；开发性能老化测试技术以获取风力涡轮机性能老化、剩余寿命和失效机制的

² Strategic research and innovation agenda 2016. <https://etipwind.eu/files/reports/ETIPWind-SRIA-2016.pdf>

相关数据，延长设备运行寿命，降低风电涡轮机组件的维护成本。

（3）推进风电产业化

- **风电行业标准化。**制定统一制造、测试、物流和设备质量验收等标准，能够为风电行业的各利益相关方节省大量成本和时间；同时，风电行业产品和概念有效的标准化将促使涡轮机组件设计、制造、安装、施工服务和退役整个过程更加高效流畅。

- **统一市场标准。**需要在全欧层面进行协调，制定一个统一的风电市场标准，规范风电设备市场秩序，促进风电设备制造业持续健康发展

- **价值链开发。**加强项目开发商和关键供应商之间的价值链合作，推进风电产业、劳动力、基础设施标准和信息之间的互联互通，增强欧盟各经济体之间的相互联系，促进资本、技术、管理技能和企业家的跨界合作，以推进欧洲风电产业化。

（4）促进海上风电发展

- **创新的运输和安装系统。**随着海上风力涡轮机、基座、塔筒和叶片等组件尺寸增大，需要开发全新的运输方案，如大型专业作业船；加大浮动式风电系统的研发，提高海上风电场的建造效率；探索全新的海底电缆设计和安装方案，以提高安装效率降低成本。

- **创新的风电塔筒和基础结构。**开发全新的塔筒和基础结构，将海上风电的成本降至与陆上风电项目相当，促进其发展。

- **浮动式海上风电场。**根据海水深度和经济性考虑，加速探索浮动式深海风电场建设和应用。

- **创新的海上变电站和电缆。**创新优化海上风电的电力基础设施（包括变电站、电缆等），如为海底电缆开发万向接头、开发标准的变电站设计和布局方案等，以降低海上风电场的成本。

（5）研发新一代风电技术

- **开发颠覆性技术。**探索研发全新的风电技术，包括：智能转子、发电机、基础结构和电力系统等，以进一步降低风电的平准化成本，推动风电发展。

- **新一代的测量技术和测试手段。**研发全新的风电测量技术和实验测试手段，包括全新的空气动力学、气动弹性力学测试平台等，以改进风力涡轮机性能。

- **智能转子。**采用增强空气动力学和空气声学模型来研究探索全新智能转子设计，以提高风电产率降低发电成本，同时更好地管理疲劳负荷，消减噪声。

- **改善风电预报能力。**提高预测准确度，提高风电场与电力系统协调运行的能力，确保电网稳定安全运行。

- **优化材料和结构。**研发新材料，以制备更加轻质、更高强度、更耐用、更经济的叶片，以延长涡轮机寿命，降低制造成本。

• **风电场控制系统。**利用先进的传感器、大数据分析技术，开发全新的风电场控制系统，实现实时监测风力变化、预测风力变化趋势，以及通过重定向涡轮尾流修改风电场的风力流量等。

（郭楷模）

DOE 报告指出清洁能源技术成本已显著下降

美国能源部于 9 月 28 日发布了《能源革命进行时 2016》报告³，指出得益于 DOE 对清洁能源技术研发多年持续的投入支持，五种主要清洁能源技术（包括风力涡轮机、公用事业规模光伏、分布式光伏、电动汽车和 LED）的成本已大幅下降（自 2008 年以来成本降幅最高达到 94%，最低也达到了 41%），且在全美部署规模急剧扩大。报告要点如下：

（1）陆上风电

在过去近 40 年间（1976-2014 年），DOE 总计资助约 24 亿美元用于风电技术研发，以降低风电成本，促进风电的广泛部署。2015 年美国陆上风电成本较 2008 年已大幅下降近 41%，其中某些州风电成本甚至降至 2 美分/千瓦时，极具竞争力。相比 2014 年，2015 年全美风电装机容量增长了 12%，占全美去年新增电力的 41%，风力发电占到美国发电总量的 5%，风电总装机容量较 2008 年翻了三番；其中公用事业风电装机容量增加了 74000MW，足以满足 1700 万家庭的电力需求。2015 年，得益于风电装机容量的快速增加，全美的碳排放减少了 1.32 亿吨，节约水量 730 亿加仑。

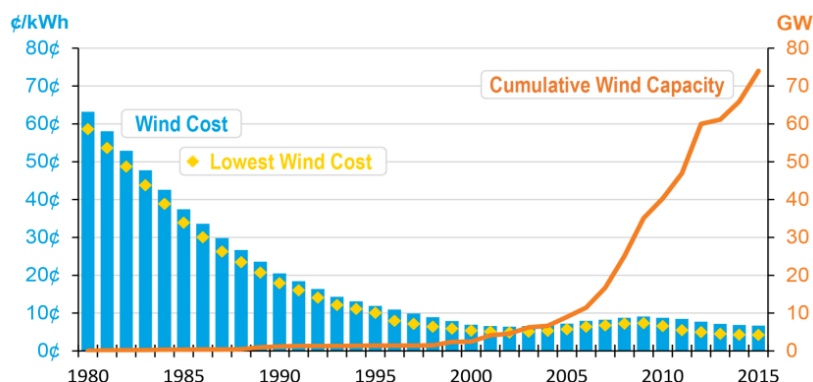


图 1 1980-2015 年美国风电成本与累积装机容量发展态势

（2）大型光伏发电

2008 年以来，美国大型光伏发电装机成本稳步下降，到 2015 年已降至 2.08 美元/瓦，降幅超过 64%，使其在美国某些地区完全可以与传统发电一样，具备强有力的价格竞争优势。受到成本下降的驱动，美国大型光伏发电装机容量呈现爆炸式增长：2015 年全美大型光伏发电装机容量增长了 43%（相比 2014 年），占全美去年新

3 REVOLUTION NOW 2016. http://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/Revolutiona%CC%82%E2%82%ACNow%202016%20Report_2.pdf

增电力的 15%，累积装机容量达到 13900 MW；2015 年全美大型光伏发电量达到 230 亿千瓦时，足以满足 200 万家庭的电力需求；同时，仅 2016 年上半年，大型光伏发电量便达到 150 亿千瓦时，同期增长 34%。得益于大型光伏发电大规模部署，2014 年全美的碳排放减少了 1700 万吨，节约水量 76 亿加仑。

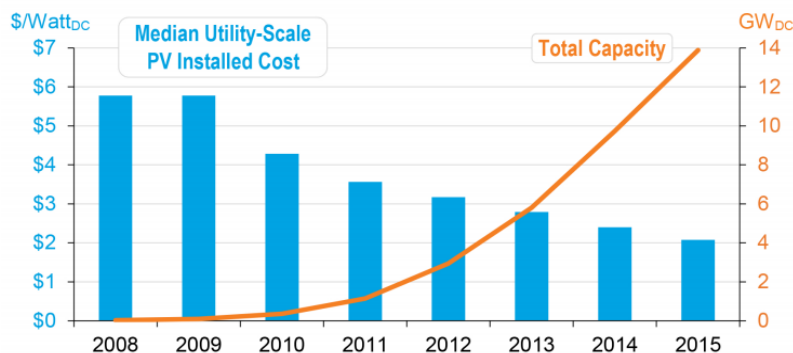


图 2 2008-2015 年美国大型光伏发电成本和累积装机容量发展态势

（3）分布式光伏发电

分布式光伏发电与大型光伏发电采用相同的光伏技术，区别在于分布式光伏发电系统选址更加灵活、不受地域限制、占地面积小，既可家用又可商用。自 2008 年以来，分布式光伏装机成本已大幅下降 54%，达到了 4.5 美元/瓦，使用门槛大大降低。2015 年，全美分布式光伏系统新增装机容量超过 3110 MW，较 2014 年增长了 34%，累积装机容量达到 11638 MW，总计发电量为 120 亿千瓦时，可供 110 万美国家庭的电力需求。分布式光伏能够让传统的电力消费者（个人、家庭和学校等）变成电力生产者，发展潜力巨大。

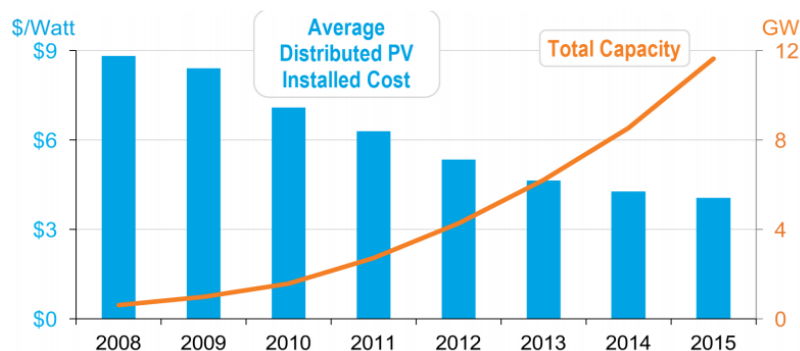


图 3 2008-2015 年美国分布式光伏发电成本和累积装机容量发展态势

（4）LED 照明

随着技术的进步，LED 灯泡安装和使用的成本越来越低，截至 2015 年其成本已下降了 94%，2015 年全美 LED 灯泡的安装量超过 2 亿个，较 2014 年增长了 160%。而且现有的 LED 灯泡经过新技术改良，其能耗比旧产品减少了 85%。据美国能源部预计，到 2035 年 LED 灯具将占有所有照明灯具销量的 85%，将节省 75% 的照明能耗，每年节约能源成本达到 6300 亿美元。

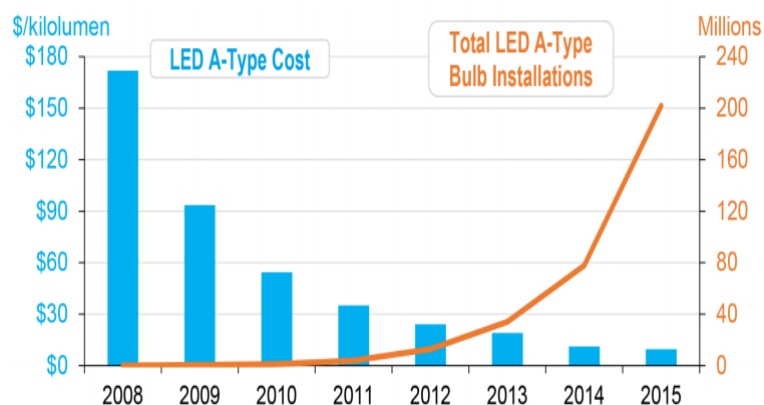


图 4 2008-2015 年美国 LED 灯具成本和累积安装量发展态势

(5) 电动汽车

自 2009 年以来，电动汽车电池模块成本大幅下降 73%；受此影响，电动汽车在美国的销量持续攀升，截止 2016 年 8 月，全美电动汽车累积销量突破 49 万辆，充电桩部署数量超过 3500 个。电池价格曾经一度限制了电动汽车的普及，但现在正在快速下降。过去 20 年，美国能源部累计投入 10 亿美元用于电动汽车电池研发，提升了电池性能，降低了成本，为美国创造了 35 亿美元的经济回报。

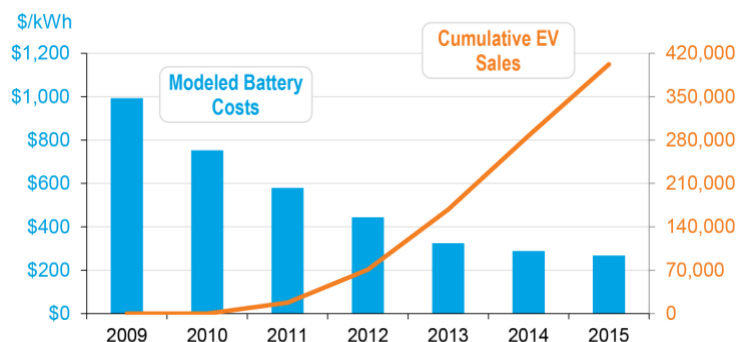


图 5 2009-2015 年美国电动汽车电池模块成本和电动汽车累积销量发展态势

(郭楷模)

项目计划

NSF 资助超 7200 万美元开展粮食、能源和水系统关联研究

9 月 28 日，美国国家科学基金会（NSF）宣布资助 7200 万美元用于开展粮食、能源和水系统关联主题下的一系列研究项目⁴，以集成所有科学和工程领域知识，综合考虑自然、社会和人类因素的跨学科研究，来理解、设计与模拟粮食、能源和水系统相互关联性，确保人类在城市化、迁徙和应对气候变化过程中能够科学合理利

⁴ NSF invests \$72 million in innovations at nexus of food, energy and water systems. https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=189898&org=NSF&from=news

用粮食、能源和水资源。其中：

(1) 4000 万美元用于促进研究机构合作，旨在寻求创新的方法来理解粮食-能源-水系统关联问题：

- **粮食、能源和水系统 (FEW) 模拟：**集成水文、农业、生物地球化学等跨学科知识，结合最先进的计算机仿真模型方法构建 FEW 模型，基于监测的历史数据利用模型来研究地区粮食、能源和水系统相互作用关系，以更好地管理粮食、能源和水资源；同时研究外界环境（如气候变化、极端天气等）和人类行为对粮食、生物能源生产、水量水质的影响，加深理解 FEW 与自然、人类之间的相互耦合作用关系，提高粮食、能源和水系统应对自然灾害的能力。

- **对加州 FEW 进行建模可视化和决策支持：**为加州 FEW 构建开源的系统模型，研究该地区 FEW 相互作用及其与自然环境相互作用关系，包括：气候变化对农业产量、降水时间、降水量和径流量等的影响；让人们能够更好地理解自然环境对加州 FEW 的影响，发展和制定有效对策，提高加州 FEW 耦合系统应对水资源匮乏、商品价格变动和监管变化所带来的冲击。

- **研究启用创新的系统解决方案：**开发一个耦合社会学和生态学的 FEW 技术方案，提高粮食、能源和水资源利用效率和再利用技术，减少浪费；全新的水力资源应用方案，使其能够实现可持续服务电力生产和农产品生产。

- **开展教育和技能培训：**为学生搭建一个完整、可感知的虚拟 FEW 系统环境，同时构建一个 FEW 教育、研究和培训中心，向学生传授能源、粮食和水系统相关的基础科学知识、跨学科知识技能和最新的计算机仿真和大数据分析工具，培养学生跨学科的系统思维以及解决问题的能力，让其将来更好地参与社会重大问题研究工作。

(2) 300 万美元用于推进氮和磷循环基础知识、以及节能型生产和食品生产用途的化肥可持续利用研究：

- **研发先进的催化方法，**以抑制含氮废料中氨态氮硝化分解流失，同时减少肥料生产中的能耗。

- **开发新的传感模式，**以实地部署经济、环保和主动可持续传感器，实时监控以氮肥或磷肥为养分的作物中径流流失量、田面及各级沟渠的氮磷流失浓度和存量。

- **氮磷元素的代谢分析及回收，**对作物所在的田面及各级沟渠的氮磷流失浓度和存量进行高效监测，开发氮磷营养物质快速回收方法，消除氮磷代谢紊乱产生的水体富营养化、大气污染等问题。

(3) 3000 万美元用于改善全美科学和工程研究能力，以更好地开展 FEW 关联研究：

- **推进研究能力发展、培育新知识以增强 NSF 对促进科学探索、创新、学习和**

知识繁荣发展所发挥的作用。

- 建立可持续的科学、技术、工程和数学（STEM）教育、培训和职业发展路径，推进 NSF 管辖区内科学研究领域和员工发展。
- 增加参与 NSF 资助的科学和工程研究和教育项目的个人、机构和组织数量。
- 通过数据分享、交流、推广和传播方式，让项目承担者和合作伙伴建立良好的可持续合作关系，有利于提高研究效率。

（4）900 万美元用于科学研究培训项目：

- 为学生开发创新教育培训模式，培养其全面科学知识和研究能力，促进其与产业界、政府、社区和非营利利益相关方合作开展粮食、能源和水系统研究。
- 开展创新教育培训模式的试点，以验证该新模式的可行性和效果，进而进行全面普及推广。

（郭楷模）

ARPA-E 资助 3700 万美元支持高性能电化学器件研究

美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）9 月 13 日宣布，在新型固态离子导体集成优化（IONICS）主题研究计划下向遴选的 16 个研发项目资助 3700 万美元⁵，旨在开发高性能固态离子导体、研发新型制备工艺和器件集成技术，以提高动力电池、电网规模储能设备和燃料电池的性能，同时降低上述电化学设备的成本，加速促进高性能电化学器件的商业部署。IONICS 研发项目主要包括四大核心技术主题，包括：（1）新型锂离子导体；（2）高选择性、低成本隔膜材料；（3）高化学稳定性、高导电性碱性离子导体；（4）其他交叉技术领域。具体内容参见表 1。

表 1 IONICS 主题研究计划资助四大核心技术主题

技术主题	研究内容	资助金额/ 百万美元
新型锂离子导体	• 开发可卷对卷制造的低成本、自组装单离子导电的有机/无机复合导体材料，用以充当锂金属电极的保护层，抑制锂金属电池枝晶，提高电池能量密度和循环寿命。 • 为锂金属电池开发全新的聚合物固态电解质，抑制电池枝晶形成，提高电池循环寿命。同时利用计算机建模、材料表征和电化学分析优化电池结构，实现电池性能最优化和成本最低化。 • 开发高锂离子导电性、高机械性能和高热力学、化学稳定性的玻璃固态电解质，以提高锂金属电池的循环寿命。 • 利用“冷退火”工艺来制备固态陶瓷和复合电解质，以实现低温（100℃左右）制备固态电解质，提高电解质材料的类型和选择性。“冷退火”工艺也有助于降低电解液阻抗和抑制电池枝晶的形成。	20.4

5 Integration and Optimization of Novel Ion Conducting Solids (IONICS). https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/documents/files/IONICS_Project%20Descriptions_FINAL.pdf

	• 尝试开发柔性锂离子固态电解质涂层保护锂金属电极，将电池的能量密度提高到 1000 瓦时/升。 • 开发全新的固态锂电池，即采用熔融状态的电解质填充电极和隔膜之间的空隙，以克服现有技术容积效率低和制造成本高的缺陷，增加能量密度和提高电池的热稳定性。 • 开发全新的固态锂电池，即采用熔融状态的电解质填充电极和隔膜之间的空隙，以克服现有技术的容积效率低和制造成本高的缺陷，增加能量密度和提高电池的热稳定性。	
高选择性、低成本隔膜材料	• 为氧化还原液流电池开发具有成本效益的混合型多金属氧酸盐隔膜，以低成本方式将液流电池集成到电网，促进间歇性可再生能源高比例并网集成。 • 开发低成本、高选择性聚合物隔膜替代现有的离子交换膜，同时开发廉价的有机分子活性材料，以进一步降低氧化还原液流电池的成本。 • 开发高选择性氯离子导电隔膜，以将铁离子液流电池成本降到 100 美元/千瓦时以下。 • 利用现有的廉价商业聚合物来制备氧化还原液流电池隔膜，通过优化隔膜结构，以提高隔膜的热力学、化学和机械稳定性；同时采用高导电性纳米粉末提高隔膜的导电性和选择性。	9.3
高化学稳定性、高导电性的碱性离子导体	• 采用碳氢化合物替代聚合物骨架中的氟元素，为燃料电池开发低成本、耐碱性的阳离子交换膜。 • 开发基于碳氢化合物骨架的高导电性、高化学稳定性和机械性的氢氧化物离子交换膜，提高氢氧化物离子在电解液中的输运效率。 • 开发一系列具有优良的化学稳定性、高导电性和机械鲁棒性的碱性聚合物交换膜。此外，通过采用廉价的聚合物和回收利用生产中使用的催化剂来降低交换膜的制造成本。	6.3
其他交叉技术	• 开发新型的固态离子导体促进轻质金属（如 Al、Mg）电化学电池的研发，开发高稳定性的金属氧化物导体；开发低成本的空气分离技术，避免空气的 CO₂ 成分参与反应，导致电池性能失效。	1

（郭楷模）

前沿与装备

MIT 托卡马克聚变堆创造等离子体压强世界纪录

要在地球实现可控核聚变，等离子体温度、密度和能量约束时间三者乘积（“聚变三乘积”）必须达到劳逊判据，才会实现能量增值，即聚变反应输出能量大于输入能量。由于压强是密度和温度的乘积，因此压强成为可控核聚变的关键指标之一。麻省理工学院的 Alcator C-Mod 核聚变反应堆装置在最后一次实验中，等离子体压强首次突破 2 个大气压达到了 2.05 个大气压，对应的温度达到 3500 万摄氏度，是太阳核心温度的 2 倍，突破了 2005 年自己创造的 1.77 个大气压世界纪录，向受控核

聚变的实现迈进了一大步⁶。Alcator C-Mod 是利用高强度磁场约束高温等离子体的托卡马克反应堆，是全球所有聚变反应堆中磁场最强、等离子体压强最高的聚变反应堆。Alcator C-Mod 中的等离子体每秒发生 300 万亿次聚变反应，其中心的磁场强度达到 5.7 特斯拉（是地球磁场的 11.5 万倍）。等离子体电流强度达到 140 万安培，核聚变功率高达 400 千瓦。等离子体体积只有 1 立方米，持续时间为 2 整秒。相较于其他体积相仿的非托卡马克磁约束聚变系统，Alcator C-Mod 的磁场强度要大出 50 倍；而对比其他托卡马克装置，它的等离子体压强则至少高出 70%。Alcator C-Mod 于 1993 年投入运行，至今已服役 23 年，按计划在 2016 年 9 月 30 日关闭。唯一有可能打破 Alcator C-Mod 装置记录的是在建中的国际热核聚变实验堆（ITER），容积比 Alcator C-Mod 装置大 800 倍，但磁场却不如 Alcator C-Mod 装置强。ITER 在 2036 年投入使用后，预期能产生 2.6 个大气压压强的等离子体。（陈伟）

英美科学家联合开发全球首个全钙钛矿串联太阳能电池

串联结构太阳能电池长期以来被认为是能够获得更高光电转换效率的电池设计方案。然而传统串联电池都涉及到晶硅电池，导致制备工艺复杂、造价高昂，从而限制了其大规模应用。牛津大学 Henry J. Snaith 教授课题组联合美国斯坦福大学研究人员基于廉价的钙钛矿材料设计制备了全球首个钙钛矿-钙钛矿串联叠层太阳能电池（即全钙钛矿串联电池），经过优化其效率达到创纪录的 20.3%。研究人员首先通过调节甲脒锡铅碘（ $\text{FASn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{I}_3$ ）钙钛矿材料当中 Sn 和 Pb 元素的比例（即 X 数值），调控 $\text{FASn}_x\text{Pb}_{1-x}\text{I}_3$ 带隙宽度；当两者比例为 50% 时（即 $X=0.5$ ）， $\text{FASn}_{0.5}\text{Pb}_{0.5}\text{I}_3$ 获得了 1.2 eV 窄禁带宽度，适合作为底层电池用于吸收低能光子（近红外光谱）。在此基础上，研究人员往 $\text{FASn}_{0.5}\text{Pb}_{0.5}\text{I}_3$ 当中添加微量的铯（Cs）元素部分替代甲脒（FA）阳离子，以增强该材料的电池性能和稳定性，经过优化后基于 $\text{FA}_{0.75}\text{Cs}_{0.25}\text{Sn}_{0.5}\text{Pb}_{0.5}\text{I}_3$ 钙钛矿电池的短路电流密度高达 $26.7 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，获得了 14.8% 的光电转换效率；此外， $\text{FA}_{0.75}\text{Cs}_{0.25}\text{Sn}_{0.5}\text{Pb}_{0.5}\text{I}_3$ 电池没有出现依赖于电流电压扫描方向的回线问题，表现出稳定的输出性能。研究人员进一步制备了带隙宽度为 1.6 eV 的 $\text{FA}_{0.83}\text{Cs}_{0.17}\text{Pb}(\text{I}_{0.5}\text{Br}_{0.5})_3$ ，结合 $\text{FA}_{0.75}\text{Cs}_{0.25}\text{Sn}_{0.5}\text{Pb}_{0.5}\text{I}_3$ 构建了四端点串联电池，其中小面积（ 0.2 cm^2 ）的串联电池转换效率高达 20.3%，大面积（ 1 cm^2 ）的串联电池也获得了 16% 的转换效率。研究人员通过对钙钛矿吸光体元素成分的调控来优化带隙匹配，首次制备出了全钙钛矿串联电池，大幅降低了串联太阳能电池的制造工艺，具有大规模推广的潜力，有望开启全新的串联电池技术方向。相关研究成果发表于《Science》⁷。

（郭楷模）

⁶ New record for fusion. <http://news.mit.edu/2016/alcator-c-mod-tokamak-nuclear-fusion-world-record-1014>

⁷ Giles E Eperon, Tomas Leijtens, Kevin A Bush, et al. Perovskite-perovskite tandem photovoltaics with optimized bandgaps. *Science*, 2016, DOI: 10.1126/science.aaf9717.

MIT 开发首个无碳超级电容器

超级电容器具有存储容量大、功率密度高、寿命长、充放电速度快等优点，近年来引起了全球科研人员的广泛关注。传统电极材料主要采用高比表面积、高导电性的多孔碳材料（如活性炭、碳纳米管和碳纤维等），但制备条件苛刻（需要 800℃ 以上高温和剧烈化学反应试剂），不利于规模化生产。麻省理工学院 Mircea Dinca 教授课题组设计合成了一种 $\pi-\pi$ 共轭的多孔、海绵状结构二维金属有机框架材料（MOF），并以此为电极首次成功开发出无碳的双层超级电容器（EDLCs），有望应用于电网储能和电动汽车等行业，带来重大变革。研究人员对设计合成的 MOF 材料（ $\text{Ni}_3(\text{HITP})_2$ ）进行物理化学表征结果显示，其比表面积远大于活性炭，达到了 $630 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ；同时它还具备了极其优异的导电性，导电率达到了 $5000 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ，近 5 倍于活性炭（ $\sim 1000 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ）。基于 MOF 电极活性材料的 EDLCs 循环伏安和恒电流充放电测试曲线依次呈现出典型的类矩形和三角形。在放电电流 $0.05 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 条件下，质量和体积比电容分别为 $111 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $66 \text{ F} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，与活性炭相当；但其面积比电容高达 $18 \text{ } \mu\text{F} \cdot \text{g}^{-1}$ ，比当前所有碳材料（石墨烯除外）EDLCs 都大。电化学阻抗谱测试结果显示，全 MOF 的 EDLCs 串联电阻仅为 0.47Ω ，远低于目前报道的碳电极 EDLCs（通常为 $3.2 \sim 4.6 \Omega$ ）。该 MOF 电容还具备了高倍率循环稳定性：在 $2 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 放电电流条件下，经过 10000 次循环后，其容量损失仅为 10%，与商业化超级电容器性能相当。研究人员此次研发的无碳纯 MOF 超级电容器充放电性能极其优异，很多关键性能都超越了传统的碳基超容，为制备高性能的电极提供了新的方向；此外，MOF 材料来源丰富，成分容易调控、制造工艺简单，有望开辟全新的电容器电极体系。相关研究成果发表于《*Nature Materials*》⁸。

（郭楷模）

新型太阳能热电系统热电转换峰值效率高达 7.4%

休斯顿大学 Gang Chen 教授研究团队设计了叠层热电材料—碲化铋（ Bi_2Te_3 ）/方钴矿（SKU）（分别负责吸收利用不同温度的热量），并用其作为热电机替换传统太阳能热发电系统中的热机用于热电转换，同时结合太阳能吸收体、聚光器和玻璃真空罩等部件设计组装了全新的太阳能热电系统（STEG）。研究人员同时制备了两种类型的 STEG，其中一种采用高倍数聚光器（聚光倍数 $C_{\text{opt}}=200$ ）和双轴追踪器；另外一种采用低倍数聚光器（ $C_{\text{opt}} \sim 50$ ）和单轴追踪器。上述两种发电系统还同时采用了聚热器（聚热倍数用 C_{th} 表示，为太阳能吸收体面积和热电发电机截面的比值）以减少热能损失。通过热电转换性能测试发现，在太阳能辐照强度 211 kW m^{-2} ， C_{opt}

⁸ Dennis Sheberla, John C Bachman, Joseph S Elias, et al. Conductive MOF electrodes for stable supercapacitors with high areal capacitance. *Nature Materials*, 2016, DOI: 10.1038/nmat4766.

≈ 200 , $C_{th}=1.4$ (太阳能吸收体面积为 $\sim 24.5 \text{ mm}^2$), $CCR \approx 280$ ($CCR=C_{opt} \times C_{th}$ 为联合聚焦倍数) 条件下, 太阳能热电系统的热电转换峰值效率达到了 9.6%, 最大输出功率为 0.5 W; 在低聚光倍数条件下 ($C_{opt} \approx 50$, $C_{th}=5.4$ (太阳能吸收体面积为 $\sim 95 \text{ mm}^2$), $CCR \approx 270$), 太阳能热电发电系统的热电转换效率也达到了 7.6%, 最大输出功率达到 0.3 W。当扣除真空罩 (太阳能热发电系统实际运行条件) 时, 考虑到上述光能和热能损失, 高低聚光倍数下的太阳能热电系统热电转换峰值效率略微下降, 依次为 $\sim 7.4\%$ 和 $\sim 5.9\%$, 但都超过了先前报道的同类型太阳能热电系统最大发电效率 5.2%。该项研究巧妙设计合成了叠层热电材料, 以提高太阳能热量的利用率, 进而将其作为热电机替换传统的热机, 集成到太阳能热发电系统, 获得了创纪录的热电转换效率, 有望开辟全新的太阳能热电系统。相关研究成果发表在《*Nature Energy*》⁹。

(郭楷模)

能源资源

EIA：到 2040 年全球致密油产量将翻番

根据美国能源信息署 (EIA) 的《国际能源展望 2016)》和《年度能源展望 2016》报告分析¹⁰, 全球致密油产量预计将在 2015-2040 年之间增加两倍多, 即从 2015 年的 498 万桶/天至 2040 年达到 1036 万桶/天, 其中大部分产量增长来自美国, 剩下的大部分增长则来自俄罗斯、加拿大和阿根廷等有着丰富致密油资源的发达石油工业国家。报告分别对上述主要石油国家到 2040 年的产油情况作了情景预测。

⁹ Daniel Kraemer, Qing Jie, Kenneth McEnaney, et al. Concentrating solar thermoelectric generators with a peak efficiency of 7.4%. *Nature Energy*, 2016, 1: 16153.

¹⁰ World tight oil production to more than double from 2015 to 2040.
<http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=27492>

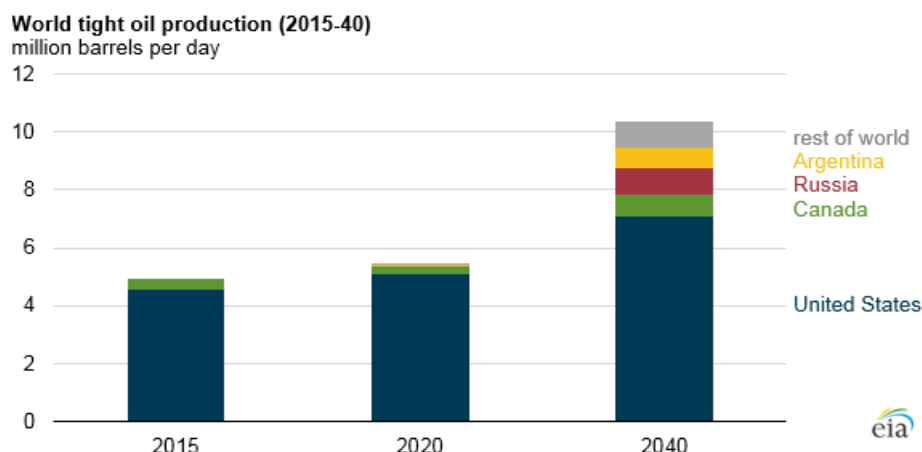


图 1 2015-2040 年全球致密油产量变化趋势（2015 年之后为预测值，单位：百万桶/天）

美国致密油在 2015 年的产量为 460 万桶/天，但受到低油价冲击，其产量在 2016 年 6 月已下降至 410 万桶/天。但依据《年度能源展望 2016》中的参考情景，随着油价的逐渐回暖，美国致密油产量也将恢复增长，预计到 2040 年将达到 710 万桶/天。

加拿大致密油产量平均增幅自 2012 年起便一直呈现下降趋势，2014 年底该国致密油产量为 45 万桶/天，而到 2016 年 1 月则降至 36 万桶/天，主因是资本转向了更具成本竞争力的油砂开发项目。《国际能源展望 2016》报告预计，在 2020 年之前加拿大致密油产量将继续下降，之后由于油价上涨和油砂吸引的资金达到一定程度，产量便恢复增长，预计到 2040 年将反弹至 76 万桶/天。

阿根廷致密油商业化生产仍处于初级阶段。得益于与雪佛龙公司合作在内乌肯盆地开发致密油资源后，阿根廷致密油产量在 2015 年四季度产量达到 3 万桶/天，到 2020 年预计将会翻番，增至 69 万桶/天。

尽管**俄罗斯、墨西哥、哥伦比亚、澳大利亚**及其他拥有丰富致密油资源的国家在 2015 年还没有实现致密油商业化开采，但随着 2020 年之后石油价格的增长，这几个国家将陆续实现致密油商业化生产，预计到 2040 年，它们将为全球贡献 18% 的致密油产量，合计达到 180 万桶/天。

（郭楷模）

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 高端洁净煤电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

