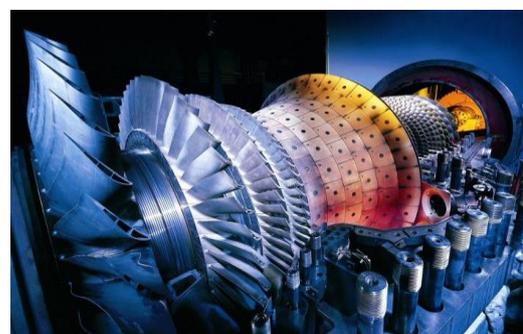


中国科学院武汉文献情报中心

中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心

2016年第20期（总第274期）

# 先进能源科技动态监测快报



## 本期重点

- 美国三举措推进清洁能源前沿创新
- WEC 提出推动波动性可再生能源并网集成建议
- 经合组织核能署指出小型模块化反应堆市场潜力巨大
- 牛津学者发布专题研究报告《中俄能源关系：与龙博弈》
- 美科学家研发能量转换和存储一体化光电化学系统
- EIA：页岩气生产带动全球天然气产量增长

# 目 录

## 决策参考

- 美国三举措推进清洁能源前沿创新 .....1
- WEC 提出推动波动性可再生能源并网集成政策和技术建议 .....3
- 经合组织核能署指出小型模块化反应堆市场潜力巨大 .....4

## 中国研究

- 牛津学者发表专题研究报告分析中俄两国能源关系 .....6

## 项目计划

- DOE 资助 2800 万美元开发低排放化石燃料发电技术 .....7
- DOE 资助 2000 万美元开展波浪能和潮汐能研究 .....8

## 前沿与装备

- 美科学家研发能量转换和存储一体化光电化学系统 .....9
- 杂化钙钛矿结晶液体能够动态保护高能载流子 .....10
- 混合型生物光电化学电池同时实现光解水制氢和发电 .....10
- 韩科学家研发新型纳米多孔双层异质结锂离子电池隔膜 .....11

## 能源资源

- EIA: 页岩气生产带动全球天然气产量增长 .....12



我中心现已开通微信公众号 (CASEnergy), 欢迎扫码关注

## 本期概要

**美国召开白宫前沿大会，探讨个人、地区、国家、全球以及星系五个层面未来 50 年面临的科技前沿挑战：**其中，清洁能源是全球挑战的重要议题。会议总结到，美国必须将清洁能源技术的研发投入翻番，以进一步加速清洁能源技术的研发创新，实现到低碳经济的过渡，为此白宫还归纳了美国推进清洁能源前沿创新的三大举措：（1）资助高影响力研究，如 ARPA-E；（2）激发国家实验室的创新创业活力，举措包括实验室嵌入式创业计划、实验室联盟、小型商业资助金、实验室桥和技术商业化基金等；（3）繁荣国家清洁能源创新生态，举措包括设置清洁技术大学奖金、设立扩大制造规模项目和清洁能源国家级孵化器倡议等。

**世界能源理事会（WEC）发布《波动性可再生能源并网集成》报告，指出未来能否实现可再生能源更高比例的并网集成需要克服技术和政策瓶颈，并对政策和技术挑战给出建议如下：**（1）政策及市场设计。做好电力市场整体和长远规划是可再生能源并网集成的关键，决策者必须重新设计市场规则以确保可持续能源系统符合预期目标，引入备用容量市场可以帮助确保电力供应安全，调整现有的市场设计能够发挥积极效果。（2）技术。提高天气预报能力，引入优化传统电力备用容量和灵活性的先进操作流程，发展需求侧响应和储能技术，扩张输配电网。

**经合组织核能署发布了《小型模块化反应堆：核能市场近期部署潜力》报告，指出小型模块化反应堆（SMR）不仅可以减少核电站的投资成本，也可作为分布式能源系统用于区域供电，具有广阔的市场前景：**SMR 与大型反应堆的主要区别是输出功率小（ $\leq 300$  MW）和模块化特性。就经济性而言，SMR 成本位于燃煤电站和大型核电站之间。报告情景预测显示，在低比例情景中，到 2035 年 SMR 装机容量为 9 GW；而在高比例情景中，到 2035 年 SMR 的装机容量将达到 21 GW，占全球新增核电容量的 3%。SMR 面临的主要挑战包括制造厂的生产能力和核监管。为了实现 SMR 发展的宏伟目标，报告给出了如下建议：政府和核电行业应该共同努力，加快建设 SMR 原型并示范这项技术所带来的益处；供应商、潜在用户与核监管机构应该密切合作，以尽早解决 SMR 发展和工厂组装的各种相关问题（包括创新安全指标和审批许可流程）；供应商和用户应共同评估小型核电站的经济性，重视 SMR 在新能源系统中能起到的关键作用，尤其是在高比例集成可再生能源的情况下。

**英国牛津大学能源研究所研究人员发表《中俄能源关系：与龙博弈》报告，从中俄两国政治和商贸关系历史背景出发研究分析中俄两国之间不断演变的能源关系：**中俄两国未来关系走向完全取决于双方的动机和目标。中国能源需要进口，可灵活利用俄罗斯的经济制裁问题，但需要注意维持和美国的重要关系。同时俄罗斯需要为能源出口寻找新的市场，不愿过多依赖中国。然而，中俄双方相互依赖是明显的事实，随着中国继续发展，它的能源需求将会持续增长同时发生转变，今后数十年将会打破现有的平衡关系。如果俄罗斯能在中国石油和天然气的进口组合中找到一个有竞争力的位置，那么两国会继续发展互利的关系。如果有一方失衡（很有可能是俄罗斯而不是中国），将使双方能源贸易关系遭受严重影响。

# 美国三举措推进清洁能源前沿创新

10月13日，美国总统奥巴马在匹兹堡主持召开白宫前沿大会<sup>1</sup>，探讨个人、地区、国家、全球以及星系五个层面未来50年面临的科技前沿挑战，以及在科学技术创新的持续推动下，美国和世界在未来50年及之后的发展变化，目的是推动科技发展，保持美国“最创新国家”的地位。其中，清洁能源是全球挑战的重要议题。

会议指出，得益美国过去多年对清洁能源技术研发的持续性投资，很多清洁能源技术在美国已实现了大规模的部署，有助于美国实现巴黎协定中的近期承诺。美国的电力构成已发生翻天覆地的变化：2015年，风能和太阳能占到全美新增发电量的三分之二，全美屋顶光伏系统的安装数量超过一百万套；自奥巴马总统上任以来，电池成本下降了73%，全美电动汽车销量超过50万辆；LED节能灯的成本大幅下降94%，销售额是去年的2倍多。

为了在未来50年内实现繁荣的低碳经济，必须加大对新一代清洁能源技术研发的资助。为此，奥巴马和其他国家领导人于去年共同发起了全球清洁能源创新使命计划（Mission Innovation），致力于在未来五年内将政府清洁能源研发投入提高2倍，到2021年达到近300亿美元/年，重振和加速全球清洁能源技术创新。美国在清洁能源研发的资助力度全球第一，并且奥巴马在2017财年预算里建议在未来五年将清洁能源技术的资助金额翻番，即从2016财年的64亿美元提升至2021财年的128亿美元。

当然，想要获得清洁能源创新所带来的经济和国家利益只关注投入多少是不够的，更应当关注如何实现有效投资，即要提高技术成果转化率，支持研发成熟的新技术“走出”实验室，进入市场。

会议总结到，美国必须将清洁能源技术的研发投入翻番，以进一步加速清洁能源技术的研发创新，实现到低碳经济的过渡，为此白宫还归纳了美国推进清洁能源前沿创新的三大举措：

### 一、资助高影响力研究

自2009年以来，美国能源部先进能源研究计划署（ARPA-E）已资助了500多个研究项目，在公共投入的撬动下这些项目已争取了私营企业和其他机构累计超过12.5亿美元后续资助资金。与此同时，美国能源部还持续资助了众多的基础研究和应用研究，以解决21世纪清洁能源发展所面临的重大挑战，包括：太阳能制燃料，与传统汽车同样便利廉价的电动汽车，开发利用波浪能，提高太阳能发电成本竞争

---

<sup>1</sup> Advancing the Frontiers of Clean Energy Innovation. <https://www.whitehouse.gov/blog/2016/10/12/advancing-frontiers-clean-energy-innovation>

力等。

## 二、激发国家实验室创新创业活力

为了最大限度地发挥旗下 17 个国家实验室的经济效益，美国能源部正在从事着前所未有的推动成果转移转化活动：

- **实验室嵌入式创业计划**正在招募世界顶级企业的研究人员，旨在把来自能源部旗下的各个实验室的创新能源技术更加快速和高效地推向市场。

- **实验室联盟**旨在通过强化用户导向的培训计划，帮助国家实验室的研究人员来实现他们的创业潜力。

- **小型商业资助金**允许创新型可再生能源、能效以及核能中小企业接触、参与国家实验室的研究工作。通过该活动，第一年有 76 家小型企业获得了 1500 万美元用以支持其公司实验室设备更新维护和研究工作。美国能源部还宣布将通过未来几轮融资再为小型企业提供高达 1200 万美元经费。

- **实验室桥（Lab-Bridge）**正在测试新的方法，以进一步减少国家实验室和私营部门的合作障碍，包括努力简化知识产权许可，让学生能够围绕实验室开发的技术推出相应的商业计划。

- **技术商业化基金**让国家实验室竞争美国能源部的 2000 万美元资金，以开展最有前景的公私合作，推动能源技术走向市场。

## 三、繁荣国家清洁能源创新生态

国家实验室是美国能源创新生态系统的关键构成，同时能源部也全力支持公私合作，为新兴清洁能源技术打造高效的商业化途径。需要新一代优秀的企业家推动清洁能源技术创新和新的支持机制，以帮助他们将新兴清洁能源技术推向市场。

- **设置清洁技术大学奖金**让全国各地的尖子生参与区域和国家清洁能源商业计划竞赛，迄今培训了近 400 支研究团队，其中产生了超过 70 次风险投资，并带来了超过 6000 万美元的后续资助经费。

- **扩大制造规模（Build4Scale）项目**，为清洁能源企业提供基础制造业技术培训，这是从实验室项目转化为商业产品的必要环节。

- **清洁能源国家级孵化器倡议**支持组建清洁能源联盟，关注全美的创业孵化器，目前已为超过 350 家初创公司提供帮助，并为上述公司带来额外的 10 亿美元后续投资。

联合上述举措，将扩大私营部门投资尖端清洁能源技术的范围。此外，通过奥巴马政府的清洁能源投资倡议，已有大批基金会、机构投资者等承诺将为这些有前景的技术商业化发展投入超过 40 亿美元。

（郭楷模）

## WEC 提出推动波动性可再生能源并网集成政策和技术建议

9月21日，世界能源理事会（WEC）发布了《波动性可再生能源并网集成》报告<sup>2</sup>，通过研究和分析5大洲32个国家（这些国家的太阳能和风电装机量占全球的90%）可再生能源发展案例，对全球可再生能源并网集成现状和未来发展所面临的技术和政策挑战进行了分析评述。报告强调，虽然在过去二十年里全球以风能和太阳能为主的波动性可再生能源高速增长，但此类能源未来能否实现更高比例的并网集成需要克服技术和政策瓶颈。为了确保可再生能源可持续发展，实现更高比例的电力贡献，报告针对政策和技術挑战给出了如下建议：

### （1）政策及市场设计

- 做好电力市场整体和长远规划是可再生能源并网集成的关键。由于每个国家能源资源禀赋不同，其相应的电力系统都是独一无二的，包括电厂选址和规模、输配电系统、成本和消费者行为等。

- 决策者必须重新设计市场规则以确保可持续能源系统符合预期目标，包括明确的碳排放法规。

- 引入备用容量市场可以帮助确保电力供应安全，在可再生能源高比例并网的情况下，仅依靠发电量市场不足以保障可靠的电力供应。

- 调整现有的市场设计能够发挥积极效果，包括：分享更广泛的地区波动性和负荷预测误差的影响；聚合不同电力市场降低预测误差和系统平衡的需求；采用新的逆变器技术；实现更快速的调度；合理进行可再生能源发电厂选址；进行全面的技术经济分析与综合评价。

### （2）技术

- 提高天气预报能力：改善天气预报方法来提高准确度。

- 将优化传统电力备用容量和灵活性的先进操作流程引入管理可再生能源的间歇性和波动性问题。

- 需求侧响应，调节短期需求量解决可再生能源电力的临时性短缺或过剩问题。

- 发展储能技术解决可再生能源的间歇性挑战。

- 扩张输配电网，包括跨国电网，甚至有必要在输电商和配电商之间增加一个最优的合作运营方案。

（郭楷模）

---

<sup>2</sup> Variable renewable energy sources integration in electricity systems 2016 - How to get it right. [http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/09/Variable-Renewables-Integration-in-Electricity-Systems-2016-How-to-get-it-right\\_-Full-Report-1.pdf](http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/09/Variable-Renewables-Integration-in-Electricity-Systems-2016-How-to-get-it-right_-Full-Report-1.pdf)

## 经合组织核能署指出小型模块化反应堆市场潜力巨大

经合组织核能署（NEA）于 10 月上旬发布了《小型模块化反应堆：核能市场近期部署潜力》报告<sup>3</sup>，指出小型模块化反应堆（SMR）不仅可以减少核电站的投资成本，也可作为分布式能源系统用于区域供电，具有广阔的市场前景。在过去几年中，世界诸多国家都在积极开展 SMR 研发和商业化应用项目，并取得了一定的成果。核能署专门通过调查问卷以及采访 SMR 供应商和潜在客户来收集和分析 SMR 经济性和市场数据，对 SMR 经济性和市场潜力进行了详细的评估，还采用了两种情景模型对 SMR 短中期市场发展（2020-2035）进行预测。报告关键性结论包括：

### （1）经济性和市场潜力

SMR 与大型反应堆的主要区别是输出功率小（ $\leq 300$  MW）和模块化特性，SMR 的优点包括：

- SMR 设计增强了反应堆安全性，并采用非能动安全系统。
- 系统和组件数量减少、电力转换系统简化大大缩短了 SMR 建造周期，降低进度风险。
- 由于单机组前期投资总额明显低于大型堆，SMR 电站将更容易获得融资。
- 多机组 SMR 电站能够提高消纳高比例可再生能源电力的灵活性、可靠性。多数 SMR 设计可作为基本负荷电源，有些甚至可以负荷跟踪模式运行。
- 因为输出功率小，SMR 输电基础设施需求比大型堆要低，提高了选址灵活度。
- SMR 多机组构造允许其采用单独维护和加燃料方式，有助于避免长期停机。
- SMR 能量输出与现有的热力和水分布网络匹配度更好，具有更高的热电联产潜力，如海水淡化和区域集中供热。
- 模块化建造和小型单元结构也简化了 SMR 的退役工作。

报告指出，虽然 SMR 的可变成本（运营管理和燃料成本）可能会比大型先进轻水堆更高，但如果能够通过优化供应链和较低的融资成本进行大批量生产，那么将 SMR 单位容量总建造成本降到低于大型先进轻水堆是完全可能的。就经济性而言，SMR 成本位于燃煤电站和大型核电站之间。

报告采用两种情景模型（高比例情景和低比例情景）对到 2035 年 SMR 在核电新增总量中的份额进行了预测。在低比例情景中，到 2035 年 SMR 装机容量为 9 GW；而在高比例情景中，到 2035 年 SMR 的装机容量将达到 21 GW，占全球新增核电容量的 3%（图 1）。

---

<sup>3</sup> Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment. <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7213-smrs.pdf>

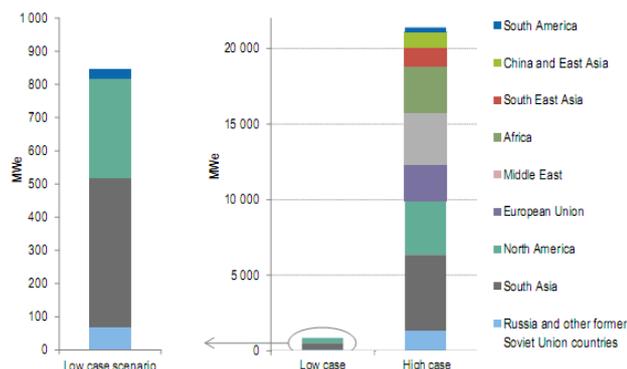


图 1 经合组织核能署对到 2035 年世界主要地区 SMR 装机容量预测

## (2) SMR 发展面临的挑战

制造厂的生产能力是决定 SMR 经济竞争力的一个关键因素。SMR 独有的装配模式要求对现有核能供应链做出大幅调整，要求组装的流程具备更高的灵活性和可扩展性。SMR 的初始产量将较低，但随着产品的成熟和市场信心的增加，供应链设计能够以更高的组装效率进行 SMR 制造。

SMR 组装厂面临的另一个严峻挑战是核监管。尽管 SMR 的安全问题可以使用现有的监管框架予以应对，但仍有一些问题有待解决。如当前的管理实践可能与 SMR 工厂组装模式不完全匹配，特别是自动化组装模式。监管机构必须调整其工作方法以让监管框架与 SMR 组装模式实现最大限度的匹配。其他重要的监管问题还包括增强的非能动安全系统的验证和多模块部署、应急计划区规模和操作以及安全运营的人员配备条件等。更为理想的情况是，为了 SMR 的成功部署，应该开发新的许可审查流程，监管机构必须与 SMR 供应商紧密合作来研究各种方法及可能性。

报告最后总结指出，尽管目前对 SMR 的经济性还不完全清楚，但毫无疑问该技术拥有巨大的发展潜力，代表核电未来发展的一种方向。为了实现 SMR 发展的宏伟目标，报告给出了如下建议：

**政府和核电行业应该共同努力，加快建设 SMR 原型并示范这项技术所带来的益处。**政府开发核能的意愿应该考虑支持国际合作和共同研发 SMR，并为小型核电站建立国家和国际许可框架。

**供应商、潜在用户与核监管机构应该密切合作，以尽早解决 SMR 发展和工厂组装的各种相关问题**（包括创新安全指标和审批许可流程）。在海外 SMR 部署方面，核能和非核监管机构（例如出口管制机构），应该围绕 SMR 开展协同合作。

**供应商和用户应共同评估小型核电站的经济性，重视 SMR 在新能源系统中能起到的关键作用，尤其是在高比例集成可再生能源的情况下。**SMR 市场评估应该重点考虑 SMR 现实经济性和供应链能力，这些结果必须详细提供给决策者和公众。

（吴勤）

### 牛津学者发表专题研究报告分析中俄两国能源关系

英国牛津大学能源研究所高级研究员 James Henderson 和 Tatiana Mitrova 于 8 月联名发表了《中俄能源关系：与龙博弈》的报告<sup>4</sup>，从中俄两国政治和商贸关系历史背景出发研究分析中俄两国之间不断演变的能源关系。报告评估了后苏联时代两国能源合作的发展变化历程，但重点集中在俄罗斯受到美国和欧盟制裁的过去两年。报告通过对中俄两国过去各种能源（石油、天然气、煤炭和电力行业）贸易关系开展研究，分析两国在能源议价方面的角力，同时分析俄罗斯重心转向亚洲的战略是否进展顺利，还深入分析了俄罗斯政治和商业野心，以此来分析俄罗斯未来与全球能源经济的关系。

报告指出，就历史角度而言，中俄两国的关系长久但始终不稳定，在友好与敌对之间交替变化，尤其是在苏联时代，苏联在两国关系中扮演“大哥”的角色，为中国提供新技术和管理保障。1991 年以后，两国合作更多建立在能源贸易基础上。在 2014 年乌克兰危机引发美国和欧盟对俄罗斯进行经济制裁后，中国成为两国合作的主导力量，能源议价能力的天平明显向中国倾斜，主要原因是两国之间的能源合作是由中国能源需求决定。在中国成为石油净进口国后，东西伯利亚的石油出口很快就开始了，并随着中国能源需求上升和供应多样化增强而逐步增加。煤炭出口遵循同样的趋势，随着中国需求的上升而迅速增加，又随着中国实施绿色能源经济而下降。

此外，美国和欧洲制裁让俄罗斯寻求新的政治和商业盟友，尤其是在亚洲，这种策略的明显变化为中国提供了另一个议价工具。美国和欧盟的经济制裁使俄罗斯加速对中国贷款的依赖，尤其是在低油价环境导致俄罗斯能源企业面临巨大财政压力。在天然气行业，如果没有中国机构的融资，亚马尔半岛的液化天然气项目将无法进行，这充分说明了中俄两国关系间日益增加的金融依赖性。

报告强调，俄罗斯战略重心返回亚洲毫无疑问确实发生了（仅石油行业的证据就可以充分证明），中俄两国动态发展中的能源关系可类比为“与龙博弈”。随着中国经济日益繁荣，来自俄罗斯的财政力量和地缘政治优势逐渐减弱，中国开始主导两国之间的能源关系。然而，俄罗斯也有自己的影响力，比如中国确实需要俄罗斯的石油，并希望有权进入俄罗斯的北极圈，假以时日（可能十年）中国同样可能需要更多的俄罗斯天然气。不管怎样，随着石油和天然气市场本质上更加全球化，俄罗斯更可能会利用这些竞争优势带来的机遇。现实是俄罗斯的能源资产一定程度上

<sup>4</sup> Energy Relations between Russia and China: Playing Chess with the Dragon. <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2016/08/Energy-Relations-between-Russia-and-China-Playing-Chess-with-the-Dragon-WPM-67.pdf>

在东部陷入困境，由于中国是它的主要市场，而且还有其他替代选择，俄罗斯不可能通过控制产量获取高价。因此，为从与中国的能源贸易关系中充分获利，俄罗斯公司需要建立自己的出口多样化选择，建立一个更强大的跨国贸易，这将产生十分重要的地缘政治和全球经济影响。

报告最后总结道，中俄两国未来关系走向完全取决于中俄两国的动机和目标。目前一些微妙的平衡点提供了行动催化剂，但同样也是行动需要谨慎的理由。中国能源需要进口，可灵活利用俄罗斯的经济制裁问题，但同样需要注意维持和美国的重要关系。同时俄罗斯需要为能源出口寻找新的市场，不愿过多依赖中国。然而，中俄双方相互依赖是明显的事实，随着中国继续发展，它的能源需求将会持续增长同时发生转变，今后数十年将会打破现有的平衡关系。如果俄罗斯能在中国石油和天然气的进口组合中找到一个有竞争力的位置，那么两国会继续发展互利的关系。如果有一方失衡（很有可能是俄罗斯而不是中国），将使双方能源贸易关系遭受严重影响。

（张凡）

## 项目计划

### DOE 资助 2800 万美元开发低排放化石燃料发电技术

美国能源部（DOE）8 月底宣布为遴选的 14 个研发项目提供 2800 万美元经费资助<sup>5</sup>，以支持开发有成本竞争力的零排放（或低排放）化石燃料发电系统，加速煤基先进燃烧发电系统、先进煤气化工艺的规模化应用，改善固体氧化物燃料电池的成本、可靠性和持久性，实现 CO<sub>2</sub> 减排目标，帮助美国实现化石能源的安全和可持续利用。项目承担机构还匹配了 840 万美元资金投入。14 个研发项目涵盖了三大技术主题，包括先进的燃烧中试电厂、化石能源气化系统中的模块化产氧以及固体氧化物燃料电池，参见表 1。

表 1 低排放化石燃料发电技术开发项目三大主题

技术主题	项目内容	资助金额/百万美元
先进燃烧中试电厂	开展基于先进燃烧系统的中试电厂初期设计工作。加速煤基先进燃烧发电技术的规模化，实现 90% 的 CO <sub>2</sub> 捕集率；开展 10 MW 煤炭直接化学链燃烧循环大型中试电厂的工程设计研究；开展商业规模的技术和经济分析，评估实现能源部目标性能所需的成本；规划无焰增压有氧燃烧中试电厂前瞻性项目	9.8

<sup>5</sup> Energy Department Invests \$28 Million to Advance Cleaner Fossil Fuel-Based Power Generation. <http://www.energy.gov/fe/articles/energy-department-invests-28-million-advance-cleaner-fossil-fuel-based-power-generation>

化石能源气化系统中的模块化产氧	开发独立产氧技术，用于煤炭气化工艺。开发新技术，制造纯度 95% 及以上的氧气，用于小规模（500kW 到 5MW）的模块化电厂，使其成本低于目前商业上最先进的产氧技术，提高合成气生产效率	4
固体氧化物燃料电池（SOFC）	改善 SOFC 成本、可靠性和寿命。为增强 SOFC 运行鲁棒性和可靠性开发高选择性和稳定性多变量气体传感器；采用高性价比的氧化铝基奥氏体钢将电厂配套设施组件的铬蒸发降至最低；开发适用于可负担、可靠的分布式发电系统的高鲁棒性 SOFC 电堆；研发基于金属支撑的二氧化铈电解液的 SOFC 电堆，用于可扩展、低成本、高效率的电力系统。开发新技术，提高低温管式 SOFC 的性能和可靠性	14.2

（张凡）

## DOE 资助 2000 万美元开展波浪能和潮汐能研究

8 月 30 日，美国能源部（DOE）宣布资助 2000 万美元支持 10 个研究机构开展海洋与流体动力学（MHK）能源系统的新型研发和示范项目<sup>6</sup>，旨在改善 MHK 系统的性能，实现高效环保利用波浪能和潮汐能发电的商业化。项目涉及两个主题：

（1）MHK 能源系统示范，将新一代 MHK 硬件和软件技术集成到系统设计当中，并对其有效性开展为期一年的全规模开放式水域测试。

- 整合一个 1 MW 空气涡轮动力系统到振荡水柱波浪能设备中，将输出功率翻倍，在俄勒冈州海岸边进行一年的性能演示和验证。

- 整合几个先进组件技术提高潮汐能涡轮系统的性能，包括设计新型漂浮装置，同时将涡轮机移动到表面以捕捉更高的流体速度，降低安装和水上作业成本，在缅因州海岸对涡轮机的性能进行论证和监测。

- 整合低成本技术并集成到 Triton 波浪能转换器中。将表面漂浮物与水下垂荡板栓在一起，以多重自由度获取能量，降低波浪能成本，在美国海军夏威夷波浪能试验区进行测试。

（2）MHK 能源系统环境影响评估，提高海洋环境监测水平，降低海洋资源开发过程中可能带来的负面环境影响。

- 开发一个声学自动监控系统，探测和定位海下 200-300 米的海洋生物，监控系统将追踪靠近 MHK 设备的海洋生物并建立三维成像。

- 改善现有光学成像、测距和空间探测工具的能力，观测海洋生物与 MHK 设

<sup>6</sup> Energy Department Awards More Than \$20 Million for Wave and Tidal Energy Projects. <http://energy.gov/ee/re/articles/energy-department-awards-more-20-million-wave-and-tidal-energy-projects>

备的相互作用，尤其是在黑暗或低光条件下。

- 利用一个已有浮动平台开发一个经济紧凑的传感器阵列，减少对设备噪音长期测量的时间和成本；开发和测试一个标准绘图工具集和协议，用于评估海床栖息环境；开发新的软硬件工具用于绘制这些栖息地的地图，界定海床基线条件，为施工前的研究提供信息。

- 优化一个水下流动麦克风系统用来捕捉声音；通过简化部署和降低噪音污染，降低大空间尺度测试 MHK 设备噪音的时间和成本；进一步开发一套集成设备，监控海洋生物与 MHK 设备的相互作用。

- 改进现有的电磁场传感器，应用到 MHK 设备上；改善靠近运行设备的水体稳定性，提供了解 MHK 设备附近电磁场对环境潜在影响的必要数据。

(张凡)

## 前沿与装备

### 美科学家研发能量转换和存储一体化光电化学系统

威斯康辛大学麦迪逊分校 Song Jin 教授研究团队将太阳电池和大容量液流电池进行集成，构建了集成能量转换和存储功能的一体化光电化学系统（定义为 PEC-RFB），以克服太阳能发电间歇性问题。p 型和 n 型硅（Si）分别作为太阳电池正负极；2 个石墨毡作为液流电池负极，正极为 Li 金属；醌类有机氧化还原电对 AQDS 作为正极电解液，BQDSH<sub>2</sub> 作为负极电解液（浓度均为 0.1M）。PEC-RFB 工作机理为：在光照下，太阳电池吸收光能产生光生载流子，进而传输到液流电池电解液，给液流电池充电，引发氧化还原反应，即 AQDS 还原为 AQDSH<sub>2</sub>，BQDSH<sub>2</sub> 氧化为 BQDS，从而将光能以化学能形式储存起来。而当外界需要电力时，直接将负载连接到液流电池电极即可实现放电。通过电流电压曲线测试，PEC-RFB 电流密度最大可以达到 16.4 mA cm<sup>-2</sup>；进一步循环充放电测试显示，在 10 mA cm<sup>-2</sup> 放电电流下，PEC-RFB 系统呈现出极其稳定的循环特性，电流效率达到 91%，最大放电电压达到 0.41V，放电比容量达到 3.5Ah L<sup>-1</sup>。在没有经过任何优化的情况下，该原型器件光能到电能的总体转换效率（有效输出电量和器件接收的太阳能比例）达到了 1.7%。该项研究创新性地将能量转换系统和存储系统耦合集成，为制备能量转换和存储一体化系统提供了新思路。相关研究成果发表在《*Angewandte Chemie International Edition*》<sup>7</sup>。

(郭楷模)

<sup>7</sup> Wenjie Li, Hui-Chun Fu, Linsen Li, et al. Integrated Photoelectrochemical Solar Energy Conversion and Organic Redox Flow Battery Devices. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, DOI: 10.1002/anie.201606986.

## 杂化钙钛矿结晶液体能够动态保护高能载流子

通过溶液处理方法制备的有机无机杂化钙钛矿存在高密度的缺陷态，但其载流子却呈现出与无缺陷、非极性的半导体类似的性质（如长载流子寿命），这意味着杂化钙钛矿中的载流子得到了保护，但其保护机制却一直不甚明了。美国哥伦比亚大学 X. Y. Zhu 教授课题组采用溶液处理方法制备了三种铅溴钙钛矿材料  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 、 $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbBr}_3$  和  $\text{CsPbBr}_3$ ，并利用时间分辨光致发光谱（TR-PL）和时间分辨光克尔效应（TR-OKE）系统地研究上述三种杂化钙钛矿载流子动力学和分子结构特性。通过 TR-PL 测试，研究人员发现  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  和  $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbBr}_3$  中热荧光发射高能载流子冷却速度较慢，其弛豫时间达到了 100 皮秒数量级，但  $\text{CsPbBr}_3$  却没有，表明了前两者拥有较长的热载流子寿命。进一步的 TR-OKE 测试发现，杂化钙钛矿  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  和  $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbBr}_3$  的阳离子  $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$  和  $\text{CH}(\text{NH}_2)^+$  出现了类似液体的定向移动；相反， $\text{CsPbBr}_3$  却没有观察到离子的定向移动。基于上述研究结果，研究人员指出  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$  和  $\text{CH}(\text{NH}_2)_2\text{PbBr}_3$  之所以拥有长热载流子寿命，是因为溶剂化作用带来大尺寸有机阳离子（ $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$  和  $\text{CH}(\text{NH}_2)^+$ ）的定向移动，从而产生了大极化子，与快速冷却在时间上产生竞争，避免了热载流子与光声子产生碰撞散色，即对热载流子形成了动态的保护，从而延长了其寿命。而长的热载流子寿命可以使得更多的载流子被收集，从而进一步提高电池性能。该项研究从微观尺度系统地研究了杂化钙钛矿晶体中热载流子的动力学行为，揭露了有机无机杂化钙钛矿载流子寿命长的内因，为制备高性能的钙钛矿太阳能电池提供了重要的理论参考。相关研究成果发表在《*Science*》<sup>8</sup>。 (郭楷模)

## 混合型生物光电化学电池同时实现光解水制氢和发电

以色列理工学院 Avner Rothschild 教授研究团队从菠菜中提取出具有光合作用功能的类囊体，并将其集成到一种全新设计的生物光电化学电池（BPEC）当中。BPEC 正极为负载类囊体的透明导电玻璃 FTO，负极为 Pt 电极，两电极之间填充着含有氰化铁/氰化亚铁（ $\text{Fe}(\text{III})\text{CN}/(\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6)$ ）氧化还原电对的缓冲液（作为电子的传输媒介）。研究人员采用三电极模式测试了混合型 BPEC 的光电流，在模拟太阳光照射下，类囊体通过光合作用产生电子，电子通过铁/亚铁氰化物氧化还原对从类囊体膜转移到透明正极并通过外电路被收集。结果显示，产生光电流密度为  $0.5 \text{ mA cm}^{-2}$ ，同时正极处电解液中的水由于失去电子发生氧化；研究人员进一步给上述混合型 BPEC 外加偏压处理，发现在 0.8V 的低偏压下，负极处发生了析氢反应，

<sup>8</sup> H Zhu, K Miyata, Y Fu, et al. Screening in crystalline liquids protects energetic carriers in hybrid perovskites. *Science*, 2016; 353 (6306): 1409.

通过气体色谱分析可知，析氢的速率在  $3.4\sim 3.5 \mu\text{mmol}(\text{mgChl h})^{-1}$ 。研究人员最后将混合型 BPEC 与硅基太阳能电池进行串联集成，形成无需外加偏压的自驱动生物光电化学系统 BPEC-PV，最终实现了 0.3% 的太阳能到氢能转换效率，产生了约  $300\mu\text{A cm}^{-2}$  光电流。该项研究创造性地将自然光合作用系统和光电化学系统进行耦合集成，实现了太阳能到氢能和电能的同时转换，为利用和解决太阳能间歇性问题提供了新的解决方案。相关研究成果发表在《*Nature Communications*》<sup>9</sup>。

(郭楷模)

## 韩科学家研发新型纳米多孔双层异质结锂离子电池隔膜

韩国蔚山国家科学技术研究所 Sang-Young Lee 教授课题组设计合成了一种全新的非对称纳米多孔双层异质结薄膜（定义为 c-mat）作为电池隔膜，其中三联吡啶纤维素纳米纤丝网（TPY-CNF）做为顶层以防止电极之间的短路，介孔的聚乙烯吡咯烷酮/聚丙烯腈（PVP/PAN）做为底部的支撑层提供离子扩散传输的快速通道，两者通过真空过滤结合在一起。研究人员同时制备了 PVP/PAN 隔膜和 TPY-CNF 隔膜用以对比研究。孔径形貌和孔径尺寸分布表征结果显示：PVP/PAN 隔膜的孔径平均尺寸为~1000nm，为微孔结构；相反，TPY-CNF 隔膜的孔径平均尺寸为~10nm，为纳米结构。为了对比研究上述三种隔膜的性能，研究人员系统测试了基于上述隔膜的电池开路电压衰减（OCV）和倍率性能。研究结果表明，基于微孔 PVP/PAN 隔膜的电池开路电压衰减严重，表明 PVP/PAN 隔膜的自放电极严重；相反，基于 c-mat 的电池无明显电压衰减现象，表明了顶层的 TPY-CNF 隔膜很好地抑制了自放电。研究人员进一步对基于 c-mat 隔膜和传统的 PP/PE/PP 隔膜的电池做了电化学性能测试。60℃ 下充放电循环测试结果显示，c-mat 电池的循环稳定性要明显优于 PP/PE/PP，经过 100 次充放电循环后，前者的电池容量保持率达到了 80%，而后者则出现了明显的衰减，100 次充放电循环后容量保持率只剩下了 5%。交流阻抗测试显示，c-mat 电池的阻抗为 17 欧姆，远小于 PP/PE/PP 电池的 175 欧姆，这主要是得益于 c-mat 隔膜 PVP/PAN 支撑层微孔结构给锂离子的传输提供了快速通道；此外，从锂金属正极以及隔膜上 Mn 离子的分布图结果可以观察到，c-mat 电池中隔膜处的 Mn 离子浓度远高于 PP/PE/PP 电池隔膜处的 Mn 离子浓度，表明了 c-mat 薄膜能够有效抑制 Mn 离子缀合，减少了 Mn 离子的游离渗透，消除了电解质中 Mn 离子对电池容量的负面影响。正是上述优势，使得 c-mat 电池的性能超越了 PP/PE/PP 隔膜电池。该项研究巧妙地将不同孔径结构的纳米薄膜整合，将具有高离子导电性和抑制副反应的化学功能薄膜集成在一起，改善了锂离子电池的隔膜性能，增强了电池的

<sup>9</sup> Roy I Pinhassi, Dan Kallmann, Gadiel Saper, et al. Hybrid bio-photo-electro-chemical cells for solar water splitting. *Nature Communications*, 2016, 7: 12552.

循环稳定性,为制备高性能的锂离子电池提供了新思路。相关研究成果发表在《*Nano Letters*》<sup>10</sup>。 (郭楷模)

## 能源资源

### EIA：页岩气生产带动全球天然气产量增长

依据美国能源信息署（EIA）的《国际能源展望 2016》和《年度能源展望 2016》报告分析<sup>11</sup>，全球天然气产量预计将从 2015 年的 3420 亿立方英尺/天增长至 2040 年的 5540 亿立方英尺/天。这一期间页岩气产量增长最大，将从 420 亿立方英尺/天增长至 1680 亿立方英尺/天，届时将占世界天然气总产量的 30%。

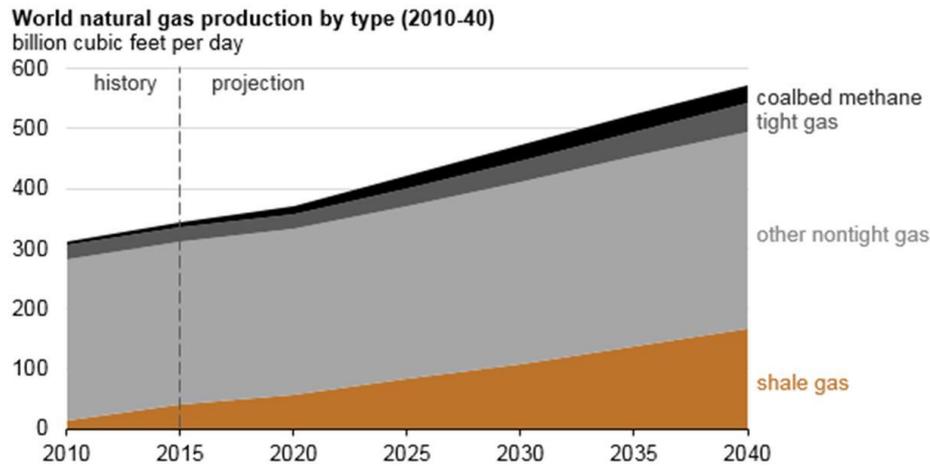


图 1 2010-2040 全球不同类型天然气产量变化趋势

EIA《年度能源展望 2016》报告还分析了技术进步对成本和产量的影响：到 2040 年，在高油气情景和高技术情景下，美国页岩气产量预计将上涨超过 50%，达到 1120 亿立方英尺/天；而在低油气情景和低技术情景下，产量预计将比参考情景少 50%，为 410 亿立方英尺/天。

虽然目前只有四个国家（美国、加拿大、中国和阿根廷）实现了页岩气商业化生产，但在预测期内，墨西哥和阿尔及利亚有望通过技术进步实现页岩资源商业化生产。预计到 2040 年，这六个国家的页岩气产量将占到全球页岩气产量的 70%。

美国 2015 年的页岩气产量占全美天然气总产量的一半以上，依据《年度能源展望 2016》中的参考情景，预计到 2040 年，美国页岩气产量有望翻倍，从当前的 370 亿立方英尺/天增加到 790 亿立方英尺/天，届时页岩气将占美国天然气总产量的

<sup>10</sup> Jung-Hwan Kim, Minsu Gu, Do Hyun Lee, et al. Functionalized Nanocellulose-Integrated Heterolayered Nanomats toward Smart Battery Separators. *Nano Letters*, 2016, 16 (19): 5533-5541.

<sup>11</sup> Shale gas production drives world natural gas production growth. <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=27512>

70%。

加拿大自 2008 年开始进行页岩气商业化开采，其产量在 2015 年达到 41 亿立方英尺/天。加拿大页岩气产量预计将继续增加，到 2040 年约占天然气总产量的 30%。

中国是除北美以外的首批商业开采页岩气的国家。在过去的五年里，中国已钻探了超过 600 口页岩气井，其页岩气产量在 2015 年达到 5 亿立方英尺/天；预计到 2040 年，页岩气产量在全国天然气总产量的占比将超过 40%，届时中国将成为仅次于美国的全球第二大页岩气生产国。

阿根廷国内商业化开采页岩气产量在 2015 年底仅为 0.7 亿立方英尺/天，但国外投资的页岩气产量有所增加。尽管阿根廷现有的天然气管道基础设施足以满足当前页岩气的生产水平，但仍需要扩大以应对日益增加的产量。当前专业钻井和压裂设备的短缺问题将得到解决，预计到 2040 年页岩气产量将占到阿根廷天然气总产量的 75%。

阿尔及利亚石油和天然气的产量在过去十年中一直呈下降趋势，促使政府开始修订投资法来提供优惠待遇，以激励国家石油公司与国际公司合作开发页岩气。阿尔及利亚已经开始一个页岩气钻井试点项目，制定了一个 20 年的投资计划，以到 2020 年实现页岩气商业化生产。预计到 2040 年，阿尔及利亚页岩气产量将占其全国天然气总产量的三分之一。

墨西哥在最近对外国投资者开放上游部门以后，有望对页岩资源盆地地实现逐步开发。目前，墨西哥正扩大其天然气管道运输能力以便从美国进口低价天然气。墨西哥预计 2030 年之后开始页岩气商业化生产，到 2040 年页岩气将占该国天然气总产量的 75% 以上。

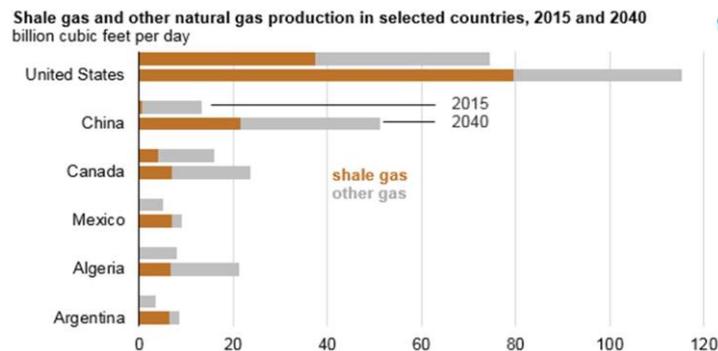


图 2 2015-2040 年美国、中国、加拿大、墨西哥、阿根廷和阿尔及利亚页岩气和天然气产量预测  
(吴勘)

## 中国科学院武汉先进能源科技战略情报研究中心简介

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：[jjance@whlib.ac.cn](mailto:jjance@whlib.ac.cn)

微信公众号：CASEnergy

