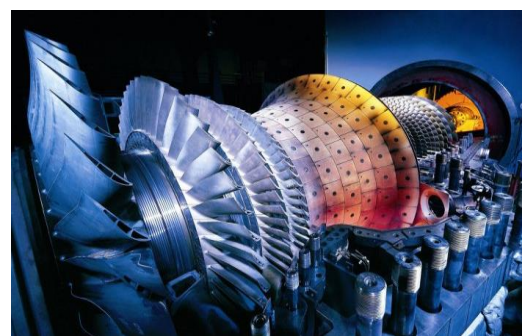


先进能源科技动态监测快报



本期重点

- IEA：2017 年能源需求增长强劲 碳排放强势反弹
- BP：技术决定能源未来 促进全球低碳转型
- DOE 资助 3000 万美元支持小企业创新研发
- 锂-空气电池实现自然空气环境下超 700 次创纪录循环寿命
- IEA：未来 5 年稳定的经济增长将推动石油需求持续上涨

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



中国科学院武汉文献情报中心
Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences
湖北省科学图书馆
Hubei Sciences Library



《先进能源科技动态监测快报》

中国科学院武汉文献情报中心

湖北省武汉市武昌区小洪山西 25 号 (430071)

网址:

<http://www.whlib.ac.cn>

联系人:

赵晏强

zhaoyq@whlib.ac.cn

郭楷模

guokm@whlib.ac.cn

电话:

027-87197630



先进能源情报网

<http://energy.whlib.ac.cn>



先进能源科技战略情报研究中心

微信公众号



先进能源情报网微信公众号

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 武汉岩土力学研究所 武汉物理与数学研究所 苏州纳米技术与纳米仿生研究所 福建物质结构研究所

目录

决策参考

IEA: 2017年能源需求增长强劲 碳排放强势反弹2
BP: 技术决定能源未来 促进全球低碳转型7

项目计划

DOE 资助超3000万美元推进固态氧化物燃料电池技术研发9
DOE 资助3000万美元支持小企业创新研发9

前沿与装备

锂-空气电池实现自然空气环境下超700次创纪录循环寿命10
廉价高效双功能氧电极催化剂显著增强锌-空气电池性能11
铈双原子催化剂有望开辟全新的催化技术方向12
三维柔性有机衬底有效抑制锂枝晶增强锂金属电池性能13

能源资源

IEA: 未来5年稳定的经济增长将推动石油需求持续上涨14

本期概要

国际能源署 (IEA) 在 3 月份发布了首份《全球能源与二氧化碳现状》报告，系统分析了 2017 年度不同能源资源需求变化和相关的 CO₂ 排放情况：2017 年强劲的经济增长推动了全球能源需求增长了 2.1%，是过去 5 年平均水平 (0.9%) 的 2 倍多。其中，全球石油需求增长了 150 万桶/日，同比增长 1.6%，主要原因是交通运输和石化行业需求旺盛。由于供应充足、成本相对低廉以及主要经济体的燃料转换，天然气需求增长了 1200 亿立方米，同比增幅 3%。全球煤炭需求增长约 1% 至 37.9 亿吨，扭转了过去两年连续下降趋势。可再生能源是 2017 年能源消费增幅最大的能源资源，全球能源需求增量约四分之一来自可再生能源。2017 年全球能源效率的改善显著放缓，全球能源强度仅降低 1.7%。受上述能源需求增加和能效提升减缓的影响，全球能源相关的 CO₂ 排放量增长了 1.4% 至 325 亿吨，结束了过去连续三年的停滞态势。详见正文。

英国石油公司 (BP) 发布《能源技术展望 2018》报告指出，能源技术将在应对能源需求增长和气候变化的双重挑战中发挥关键作用，通过现有和新兴技术的应用，将能获得安全和可持续的能源未来，促进全球低碳转型。报告重点探讨了技术进步对未来能源生产消费方式变革的影响：生物燃料将成为减少航空排放潜在替代燃料；低碳气体燃料在平衡电力系统、供暖和重型运输领域具有广泛的应用潜力；能源效率的提高有望节省当前一次能源使用量的 40% 左右；技术可以将石油和天然气生产的平均生命周期成本降低 30% 左右；数字技术将提升整个能源系统效率。

美国能源部 (DOE) 宣布资助 3250 万美元用于“煤基固态氧化物燃料电池技术 (SOFC)”研发项目，旨在加速 SOFC 技术的商业化，解决传统燃煤电厂发电效率低和污染严重问题。本次资助项目涵盖四大技术主题，包括：(1) 固体氧化物燃料电池高温阳极循环鼓风机；(2) 减少电厂配套设施的铬蒸发扩散；(3) 用于分布式发电的兆瓦级 SOFC 发电技术研发和技术经济评估；(4) SOFC 发电装置核心技术研发。详见正文。

美国能源部 (DOE) 宣布在“小企业创新研究与技术转让 (SBIR/STTR)”计划框架下启动价值 3000 万美元的新一轮研发项目，涵盖 4 大主题，包括：高性能计算、基础能源研究、生物环境和核物理，旨在推进美国科学技术的创新和技术成果转化，创造新的就业机会，以增强美国在具有竞争优势领域的领先地位和经济实力。详见正文。

伊利诺伊大学芝加哥分校 Amin Salehi-Khojin 教授课题组牵头的联合研发团队设计开发出可以在自然空气环境中稳定运行的锂空电池，实现了 700 余次充放电循环，创下了该类电池全新的循环记录，为锂空气电池商业化奠定了坚实的技术基础，有望引领电池技术变革。

国际能源署 (IEA) 发布《石油中期市场报告 2018》，对未来 5 年石油市场的走势进行了系统预测分析：2018-2020 年间，全球经济预计增长 3.9%。强劲的经济增长将推动石油需求上涨，预计石油需求年均增速将达到 120 万桶/日。到 2023 年，石油需求量将达到 1.047 亿桶/日，较 2018 年增加 690 万桶/日。全球石油需求增长最快的来源是石化产品，到 2023 年，乙烷和石脑油需求量为 170 万桶/日，占总需求增长的 25%。

IEA：2017 年能源需求增长强劲 碳排放强势反弹

国际能源署（IEA）在 3 月份发布了首份《全球能源与二氧化碳现状》报告¹指出，2017 年强劲的经济增长推动了全球能源需求上涨了 140.5 亿吨油当量，同比增幅 2.1%，是过去 5 年平均水平（0.9%）的 2 倍多。其中，化石能源贡献了其中近 70% 的需求增量，还有 25% 增量来自可再生能源，其余来自核能。同期，全球能效提升速率下降，能源强度仅下降 1.7%，低于过去三年平均水平。受上述能源需求增加和能效提升减缓的影响，全球能源相关的 CO₂ 排放量增长了 1.4% 至 325 亿吨，创历史新高，结束了过去连续三年的停滞态势。报告系统分析了不同能源资源需求变化和相关的 CO₂ 排放情况，主要内容如下：

1、石油

2017 年，全球石油需求增长了 150 万桶/日，同比增长 1.6%，是过去十年平均水平的 2 倍多。其中 60% 的需求增长来自亚洲地区，中国增幅最大，其次是印度。交通运输行业需求强劲是全球石油需求增长的主要原因之一。需求增长强劲的一个原因是石化行业需求旺盛，其中塑料和其他石化产品的需求增长最为迅猛。需要指出的是，尽管需求强劲，但石化行业的石油使用对排放发展趋势影响很小，因为大部分石油并未燃烧，而是转化为其他产品，如塑料。

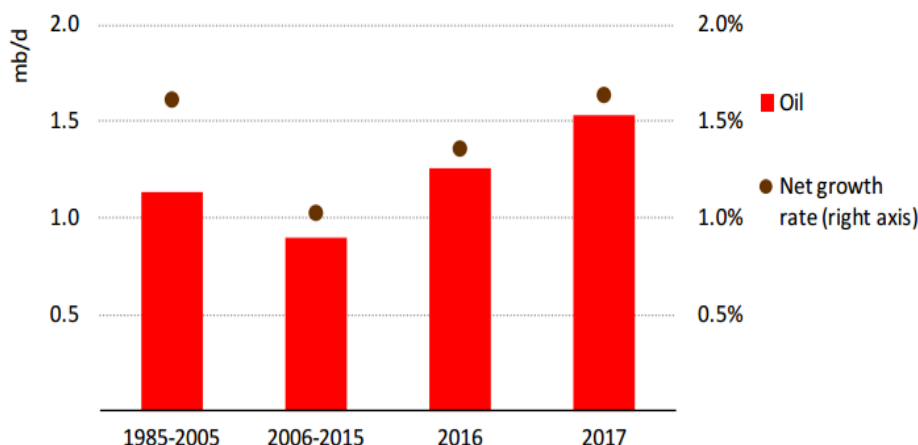


图 1 1985-2017 年全球石油需求增长变化态势（单位：百万桶/日）

2、天然气

由于供应充足、成本相对低廉以及主要经济体的燃料转换，2017 年全球天然气需求增长了 1200 亿立方米，同比增幅 3%，2 倍于过去五年 1.5% 的平均增幅。其中，仅中国就占到了全球增长总量的近 30%，标志着中国经济结构正在向清洁能源转型。此外，中国“打赢蓝天保卫战”政策驱使燃煤锅炉的加速淘汰、煤改气的步伐加快，

¹Global Energy & CO₂ Status Report 2017.
<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GECO2017.pdf>

使得天然气需求增长强劲。

欧盟的天然气需求也显著增长了约 160 亿立方米，主要原因是经济强劲增长驱使行业需求回升。但欧盟的天然气消费量仍比 2010 年的历史峰值低了 10% 以上。在美国，2017 年燃气发电天然气需求量下降 8%，抵消了一大部分世界其他地区增长需求。美国去年的情况凸显了发电燃料相对价格对电力行业排放强度发展趋势的影响：2017 年天然气价格略有上涨，使得燃气发电受到可再生能源和煤炭的挤压。天然气需求增长的构成正在发生变化：在过去的十年中，全球一半的天然气需求增长来自电力部门。而在 2017 年，超过 80% 的增长来自工业和建筑行业，电力部门天然气需求份额可能逐步下降。

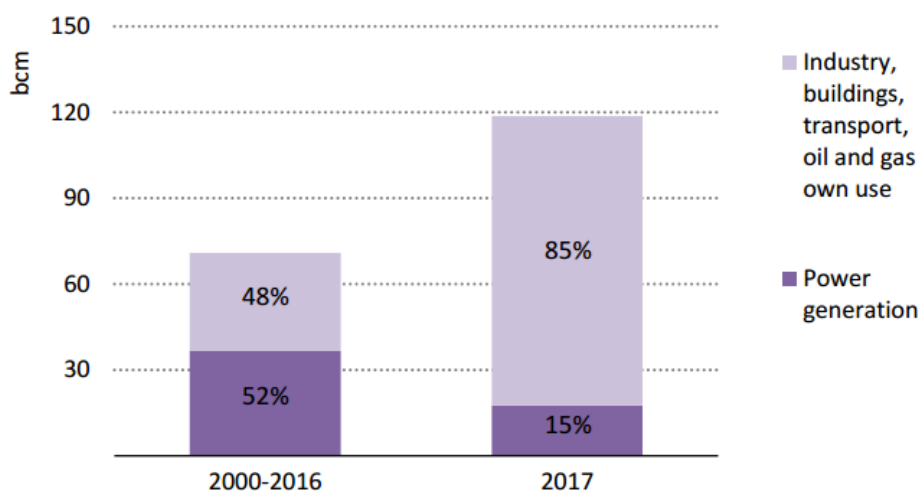


图 2 2000-2017 年间全球天然气需求变化态势（单位：十亿立方米）

3、煤炭

2017 年全球煤炭需求增长约 1% 至 37.9 亿吨，扭转了过去两年连续下降趋势。煤炭需求在 2015、2016 年分别下降了 2.3% 和 2.1%，主要因为中国和美国等主要煤炭市场的电力行业需求下降。而 2017 年煤炭需求的反弹完全是由于燃煤发电量的增加所致，与前一年相比，煤炭的电力需求增长近 3.5%。

亚洲地区的煤炭需求增幅最大，较 2016 年增加了 3500 万吨。其中，中国电力行业煤炭需求同比增长约 15%，主要是在炎热的夏季空调制冷需求旺盛所致。尽管建筑和工业用煤量持续下降，但电力行业的强劲增长还是推动了中国煤炭需求上涨了 0.3%，结束了过去三年需求持续下滑的态势。尽管需求反弹，但中国的煤炭使用量仍低于 2013 年的峰值。在印度，煤炭需求增长速度低于 2016 年。而亚洲其他经济体，如韩国电力行业的煤炭使用量增加。由于燃煤发电需求稳定，美国和欧盟的煤炭需求仅下降 1.6% 和 0.5%，下降幅度不足以抵消其他地区的增长。尽管 2017 年经历了上涨，但全球煤炭需求仍远低于 2014 年 39.27 亿吨的峰值。

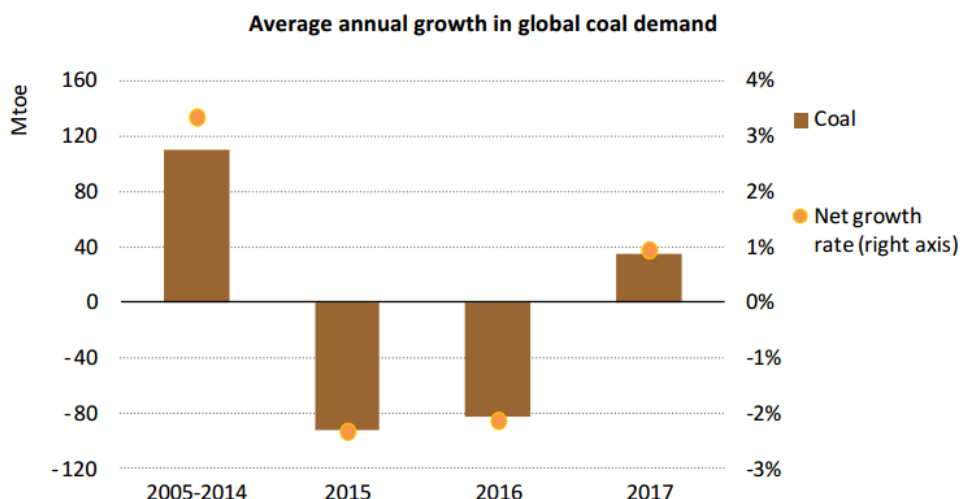


图3 2005-2017 全球煤炭需求变化态势（单位：百万吨）

4、可再生能源

可再生能源是 2017 年能源消费增幅最大的能源资源，全球能源需求增量约四分之一来自可再生能源。电力行业在低碳能源增长中发挥了最重要的作用，2017 年可再生能源发电量增长了 6.3% (+380 TWh)，使得可再生能源占全球装机总量的份额上升到了 25%。其中，中、美两国占到可再生能源电力增量的一半，紧随其后的是欧盟（8%）、日本和印度（各占 6%）。风电在可再生能源增量中的占比最高为 36%，其次是太阳能光伏（27%）、水电（22%）和生物能源（12%）。中国占风电和太阳能光伏发电装机增量之和的 40%。而近 40%的水力发电装机增量来自美国，欧盟的水力发电装机容量则减少了近十分之一。欧盟、中国和日本占全球生物能源增长的 82%。

2017 年，中国超过美国成为可再生能源（不包括水电）发电量第一大国。到 2017 年底，全球太阳能光伏装机容量接近 400 GW。其中，中国太阳能光伏新增装机容量超过 50 GW，超过煤炭、天然气和核能新增装机容量之和。仅 2017 年，中国新增太阳能光伏装机容量就与法国和德国的太阳能光伏装机容量之和相当。同期，美国太阳能光伏新增 10 GW，较 2016 年下降 30%，但仍是历史第二高值。印度新增光伏装机 8 GW，是 2016 年的 2 倍，创历史新高。2017 年，欧盟新增风电装机达创纪录的 15.6 GW，其中海上风电 3.1 GW。得益于风电装机持续增长，2017 年全球风电装机总量达到了 510 GW。

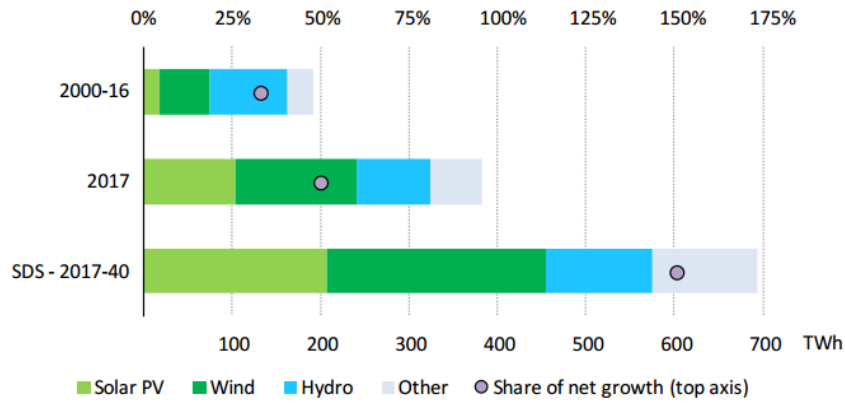


图 4 不同可再生能源电力年度增幅变化态势 (SDS-2017-40 是 IEA 可持续发展情景预测)

5、电力

2017 年，全球电力需求增长 780 TWh，同比增长 3.1%，显著高于同期全球能源需求增幅。新兴经济体的电力需求增长仍旧与其经济发展密切相关。在中国，近 7% 的强劲经济增幅和炎热夏季驱使电力需求增长 6% (+360 TWh)；在印度，电力需求增长超过 12% (+180 TWh)，超过 7% 的经济增速。这两个国家电力需求增量之和占到了全球电力需求增量的 70%，另有 10% 来自亚洲其他新兴经济体。发达经济体占电力需求增长的 10%，平均需求增幅不到 1%。在美国，电力需求较 2016 年水平下降近 80 TWh。在欧盟，电力需求增长 2.3% (+75 TWh)，与预测的 2.3% 经济增幅相当。日本的电力需求也增加了 15 TWh 左右。

2017 年，可再生能源新增发电量 380 TWh，占全球新增发电量的近一半，使其在全球电力构成中的份额达到 25% 的历史新高。2017 年可再生能源新增发电量仅次于煤炭，连续第三年高于天然气。2017 年，全球煤炭发电量增长了 280 TWh（同比增幅 3%），占总增长的三分之一。亚洲是燃煤发电量增长的主要地区，增加了 365 TWh。尽管中国和印度在这一增长中占主导地位，但韩国、日本和印度尼西亚也有显著贡献，而美国、欧盟、俄罗斯、巴西和南非电力用煤的减少仅能部分抵消亚洲煤炭消费的增长。燃气发电新增 95 TWh（同比增幅 1.6%），占新增发电总量约 15%；其中美国下降 7.6% (-110 TWh)，世界其他地区增长 4.6% (+205 TWh)，最重要的贡献来自欧盟、中国和东南亚。

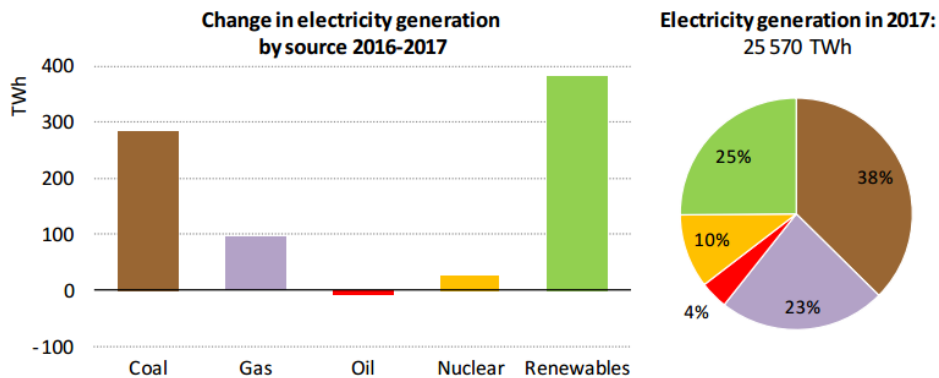


图5 2016/2017 不同电力来源变化态势及其占比（单位：TWh）

6、能效

由于能效政策覆盖面和严格程度降低以及能源价格长期低位的影响，2017 年全球能源效率的改善显著放缓，全球能源强度仅降低 1.7%，不到“巴黎气候协定”承诺设定目标的一半。

2017 年能效政策的覆盖面增加似乎主要是来自现有政策的延伸，而不是以前未覆盖的领域和国家的新政策。另一个重要因素是这些政策的严格性降低。2016 年政策严格性改善程度就开始放缓了，仅增长 0.3%，而 2017 年这一改善放缓的趋势得到了延续。因此，政府需要加倍努力，采取全面战略方式提高能源效率，将其作为长期能源转型计划的基础，并寻求更加完善的法规、标准和市场政策。

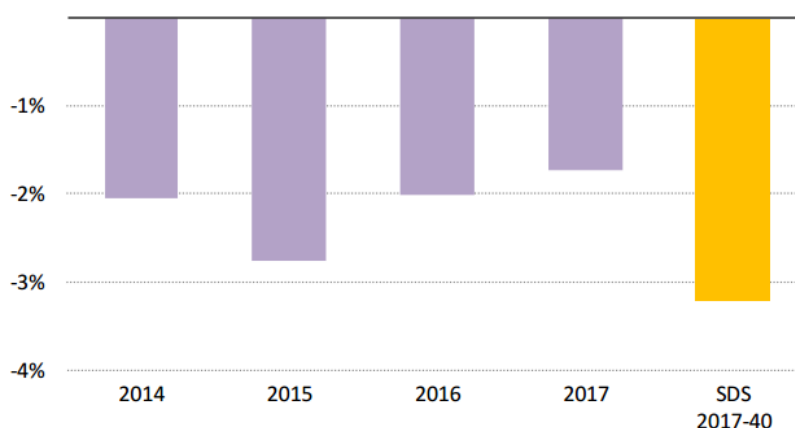


图5 2014-2040 年能效变化态势（SDS-2017-40 是 IEA 可持续发展情景预测）

6、CO₂ 排放

受到能源价格低位徘徊、需求增长和能效改善趋缓的影响，2017 年全球能源相关的 CO₂ 排放增加了 4.6 亿吨，达到创纪录的 325 亿吨，同比增幅 1.4%。增长的排放量相当于 1.7 亿辆汽车尾气。尽管总体排放上涨，但各国情况不一：大多数主要经济体排放都出现上涨，但有少数经济体却出现下滑情况，包括美国、英国、墨西哥和日本。美国下降幅度最大，减少 2500 万吨（-0.5%）至 48.1 亿吨，是连续第三年下滑，主要是因为可再生能源部署增加。在英国，排放量减少 15 万吨（-3.8%）至 3.5 亿吨二氧化碳，是 1960 年以来的最低水平，主要原因是天然气和可再生能源应用增加。在墨西哥，由于石油和煤炭使用量下降、电力系统效率提高，可再生能源发电装机容量强劲增长以及整体天然气使用量增加，排放量下降 4%。在日本，排放量下降 0.5%，因为越来越多的化石燃料发电被可再生能源和核能发电所取代。

亚洲经济体占全球碳排放量增长的三分之二。中国经济去年强劲增长 7%，但由于持续的可再生能源部署和实施“煤改气”措施，排放量仅增长 1.7%（+1.5 亿吨）至 91 亿吨。尽管中国的煤炭需求在 2013 年达到峰值，但由于石油和天然气需求上升，与能源有关的排放量仍然增加。在印度，经济增长推动了能源需求的不断增长，

并继续推动排放量的增加，但增幅只有过去十年间平均增速的一半。东南亚经济体排放量也显著增加，其中印度尼西亚的碳排放增幅最大，为 4.5%。2017 年能源相关二氧化碳排放量的增长是对全球应对气候变化努力的强烈警告，表明目前的努力远不足以实现“巴黎气候协定”承诺中设定的目标。

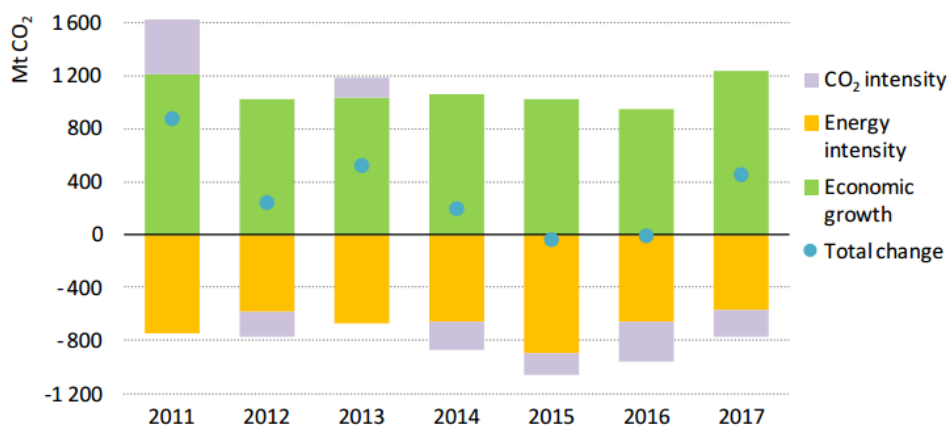


图 6 2011-2017 年碳排放变化态势 (单位: 百万吨)

(郭楷模)

BP：技术决定能源未来 促进全球低碳转型

3 月 15 日，英国石油公司 (BP) 发布《技术展望 2018》报告²指出，在未来几十年全球将会面临严峻的双重挑战，即满足不断增长的能源需求，同时减少温室气体排放以应对气候变化。而能源技术将在解决上述挑战中发挥关键作用，通过现有和新兴技术的应用，将能获得安全和可持续的能源未来，促进全球低碳转型。报告重点探讨了能源效率、数字化、可再生能源、储能和天然气五大领域技术进步对未来能源生产消费方式变革的影响，旨在为决策者今后的能源政策、投资和资源优化选择方面提供科学参考。报告提出的主要结论如下：

(1) 现阶段能源资源丰富

充足的能源资源足以满足未来的长期需求。技术进步具有相当大的潜力能够在增加化石燃料和非化石燃料供应的同时降低成本。政策制定者面临的问题是，在满足需求的同时，优先选择哪些能源资源，同时限制排放和保障能源安全。

(2) 实现《巴黎气候协定》目标需要采取进一步行动

虽然实现《巴黎气候协定》的目标在技术上是可行的，但单靠技术进步无法实现所需的碳减排，需要进一步采取诸如碳排放价格之类的政策措施，以及让消费者做出低碳选择。尽管许多改进措施需要大量的投资，但仅能源效率的提高即有可能节约当前一次能源使用量的 40% 左右。节能领域包括提高车辆效率、改善建筑设计，

²BP Technology Outlook 2018.

<https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/technology/bp-technology-outlook-2018.pdf>

以及在烹饪和洗涤中高效利用能源。

(3) 技术进步将大大降低石油和天然气生产成本

从长期来看，技术进步可以将石油和天然气生产的平均生命周期成本降低 30% 左右，但每年仍需要大约 0.6 万亿美元的上游油气投资来满足预期的需求。从燃烧的天然气中提取碳来获得能量也在经济上可行。虽然较高的碳定价可能有利于混合动力装置以及全电动系统使用热泵补充天然气，但空间加热可能仍主要由燃气设备提供。

(4) 电力行业为减排提供了最大的空间

利用技术提高能源效率通常是比较经济的。在许多地区，制定适度的碳排放价格可以使天然气比现有的煤炭更具竞争力，而且天然气更清洁。在更高的碳价格情景下，风能和太阳能由于能提供备用的电力容量而变得更具竞争力。到 2050 年，陆上风电将成为最经济的电力来源，而电网规模的太阳能发电也将变得更具竞争力。但是，当风能和太阳能实现高比例并网时，就需要额外的资金投入相关技术研发来平抑可再生能源的固有的间歇性问题保障电网运行的稳定性。

(5) 交通运输将变得更加高效

持续改进内燃机汽车的效率将减少排放。制造生物燃料的成本将会下降，特别是由非粮生物质制成的第二代生物燃料。尽管电动汽车或燃料电池汽车的能源效率很高，但要在成本上与内燃机汽车竞争仍然需要重大的技术进步。随着电池的改进，货物和人员的运输方式将会继续发生重大变化，包括但不限于轻型应用的电气化。液化天然气预计将成为重型卡车和一些船舶的竞争燃料，而生物燃料仍然是减少航空排放的唯一可行解决方案。包括碳捕集、利用与封存（CCUS）技术，合成气、生物气和氢在内的低碳气体，在平衡电力系统、供暖和重型运输领域具有广泛的应用潜力。

(6) 新兴技术将改变能源系统

各类新兴技术（先进材料、数字技术等）将对现有的能源市场、商业模式带来颠覆性影响。先进材料的开发可以显著提高电池性能、太阳能转化和氢燃料的使用；数字技术（如传感器、超级计算、人工智能、大数据分析等）具有强大的改革推动力，能够提升整个能源系统效率，使能源供应和消费变得更安全、更可靠和更具成本效益。然而，由于需要大规模的投资，这些技术可能要几十年时间才能在全球范围内应用。数字技术具有推动能源系统深远变革的特殊潜力，因为它提供了多种机会使能源供应和消费更加安全、可靠、高效以及更具成本效益。

（吴勘 郭楷模）

项目计划

DOE 资助超 3000 万美元推进固态氧化物燃料电池技术研发

3月15日，美国能源部（DOE）宣布资助3250万美元用于“煤基固态氧化物燃料电池技术（SOFC）”研发项目³，旨在开发经济、高效的新型SOFC技术，加速SOFC技术的商业化，解决传统燃煤电厂发电效率低和污染严重问题，从而降低能源消耗和减少有害气体的排放。本次资助项目涵盖四大技术主题，包括：（1）固体氧化物燃料电池高温阳极循环鼓风机；（2）利用高成本效益的氧化铝奥氏体钢制造阻挡构件减少电厂配套设施的铬蒸发扩散；（3）用于分布式发电的兆瓦级SOFC发电技术研发和技术经济评估；（4）SOFC发电装置核心技术研发，具体内容参见表1。

表1 煤基SOFC发电技术研发项目具体内容

主题	研究内容	资助金额/万元
固体氧化物燃料电池高温阳极循环鼓风机	开发模块化、低成本、无油阳极循环风机（ARCB）技术，以提升SOFC发电装置的效率和稳定性，并将新技术运用到200千瓦的SOFC原型发电装置上进行1500小时的运行验证	150
利用高成本效益的氧化铝奥氏体钢制造阻挡构件减少电厂配套设施的铬蒸发扩散	定量研究SOFC阴极降解随铬物质数量和运行环境变化的函数关系，综合评估氧化铝奥氏体钢的关键性能指标，随后用氧化铝奥氏体钢制造SOFC发电装置阻挡构件，并进行技术测试，评估其抑制铬蒸发扩散效能	130
用于分布式发电的兆瓦级SOFC发电技术研发和技术经济评估	设计开发用于分布式发电应用的兆瓦级SOFC发电系统原型，进行至少5000小时的示范运行并开展技术经济分析，实现6000美元/千瓦时成本和每1000小时性能衰减0.5%的目标	2300
SOFC发电装置核心技术研发	开发新型的SOFC架构、电池堆架构和配套技术，应用第二代SOFC发电原型系统进行长期运行验证，以改善SOFC的性能、稳定性和寿命，将每1000小时性能衰退速率减小至不到0.5%	950

（郭楷模）

DOE 资助 3000 万美元支持小企业创新研发

2月27日，美国能源部（DOE）宣布在“小企业创新研究与技术转让（SBIR/STTR）”

³ U.S. Department of Energy Announces \$32.5 Million to Advance Solid Oxide Fuel Cell Technologies.
<https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-325-million-advance-solid-oxide-fuel-cell-technologies>

计划框架下启动新一轮研发项目⁴，即向全美 36 个州遴选出的 149 个中小企业资助 3000 万美元开展高性能计算、基础能源研究、生物环境和核物理四个主题领域的研发创新工作，旨在推进美国科学技术的创新和技术成果转化，创造新的就业机会，以增强美国在具有竞争优势领域的领先地位和经济实力。第一阶段资助期限为 6-12 个月，受资助者在项目完成时通过评估考核的将获得 2019 财年第二阶段资金申请资格，以开发相应的技术示范工程来验证其第一阶段的研究结果。本次资助主要的研究内容参见表 1。

表 1 小企业创新研发计划第一阶段主要研究内容

主题	研究内容	资助金额/万美元
高性能计算	<ul style="list-style-type: none"> • 开发光子存储子系统输入/输出接口 • 开发用于制造和工程工作流程的新一代分析和可视化平台 • 安全性分析和监控，以防止对高性能计算环境的滥用 	530
基础能源研究	<ul style="list-style-type: none"> • 从煤中提取石墨烯量子点的新方法 • 利用超临界水从水力压裂中同时清除无机物和有机物 • 使用中子散射材料研究极端温度样品环境 	1460
生物与环境	<ul style="list-style-type: none"> • 监测土壤-微生物相互作用的原位装置 • 生物材料的原子探针层析成像方法 • 紫外/近红外气溶胶吸收监测仪 	560
核物理	<ul style="list-style-type: none"> • 用于加速器应用的高效射频电源 • 辐射硬化红外焦平面阵列 • 用于电子-离子对撞机的高场大孔径四极杆的新设计 	450

(吴勘 郭楷模)

前沿与装备

锂-空气电池实现自然空气环境下超 700 次创纪录循环寿命

锂-空气二次电池因具有超高的理论比能量而成为储能器件领域的研究热点，然而由于其正极复杂的气-液-固共存的三相结构（即锂离子会与空气中的二氧化碳和水蒸气反应，在负极形成沉积物导致电池失效，因此一般需要纯氧环境），及其在循环稳定性、能量效率等方面所存在的问题，使得其实际应用仍然面临很大的挑战。由伊利诺伊大学芝加哥分校 Amin Salehi-Khojin 教授课题组牵头的联合研究团队设计开发出可以在自然空气环境中稳定运行的锂-空气电池，实现了 700 余次充放电循环，创下了该类电池全新的循环记录。研究人员首先在锂正极的表面涂覆一层碳酸锂 ($\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{C}$) 薄膜作为保护层，一方面保护正极避免与空气成分接触发生副反应，

⁴Secretary of Energy Rick Perry Announces \$30 Million for Small Business Research and Development Grants.
<https://www.energy.gov/articles/secretary-energy-rick-perry-announces-30-million-small-business-research-and-development>

同时又可以选择性地让正极中的锂离子通过进入电解质。随后与二硫化钼 (MoS_2) 纳米片负极、以及由离子液体和二甲基亚砷混合制成的电解质组装成完整的锂-空气电池。在 25°C 、模拟的自然空气环境下, 对电池进行电化学性能测试。结果显示, 含有 $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{C}$ 保护层的电池初始放电比容量为 500 mAh g^{-1} , 经过 700 次循环后, 容量基本没有衰减, 展现出极其优异的循环稳定性, 是迄今为止已报道的锂-空气电池循环寿命最长值; 与此相反, 无 $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{C}$ 保护层电池经过 11 次充放电循环后性能便衰退殆尽。研究人员进一步通过密度泛函理论计算研究发现, 新型锂-空气电池之所以能够获得如此优异的循环性能主要有三点原因: 一是创新性地使用了二硫化钼催化剂作为负极, 很好地促进了电池循环过程中过氧化锂生成这一主要电化学反应进行, 提升了电池的效率; 二采用 $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{C}$ 涂层对锂正极进行保护避免其与空气接触, 大大降低了其他副反应的发生, 提升了电池循环稳定性。该项研究通过对锂-空气电池的正极、负极和电解液精心改造, 有效地克服了锂-空气电池电化学循环过程中的副反应, 获得了创纪录的循环寿命, 为锂-空气电池商业化奠定了坚实的技术基础, 有望引领电池技术变革。相关研究工作发表在《*Nature*》⁵。

(郭楷模)

廉价高效双功能氧电极催化剂显著增强锌-空气电池性能

可逆锌-空气电池具备安全、环保、理论能量密度高及低成本等优点, 但该电池的氧还原反应 (ORR) 和析氧反应 (OER) 通常需要在较高的过电位进行, 且动力学过程缓慢和催化剂成本高昂, 严重制约了锌-空气电池的实际应用。由新加坡国立大学材料系 John Wang 教授课题组牵头的联合研究团队通过对钴基金属有机框架的碳化-氧化处理获得了廉价、高效的氮 (N) 掺杂碳包覆空心氧化钴 (Co_3O_4) 纳米球阵列双功能电极催化剂, 显示出高效的 ORR 和 OER 催化活性和化学稳定性。研究人员首先运用溶液法在柔性的碳布上直接生长二维钴基金属有机框架纳米阵列, 通过高温碳化先将其转化为 Co 纳米颗粒负载、N 掺杂的碳纳米管阵列; 随后进行氧化处理, 诱发金属 Co 纳米颗粒氧化膨胀形成 Co_3O_4 空心球, 最终形成 Co_3O_4 空心球嵌入的 N 掺杂碳纳米管阵列 (NC- Co_3O_4)。OER 和 ORR 催化活性研究显示, 达到 10 mA cm^{-2} 电流密度, NC- Co_3O_4 氧电极过电位只需要 350 mV 左右, 低于常规的贵金属 Ir (384 mV), 展现出优异的 OER 活性; 另一方面, NC- Co_3O_4 氧电极的起始电压为 0.87 V (相对可逆氢电极), 与 Pt 催化电极 (0.91 V) 相当, 即也拥有了良好的 ORR 特性。更为关键的其还拥有优异的循环稳定性, 经过 600 多次循环后性能基本无衰退。随后将 NC- Co_3O_4 氧电极应用于锌-空气电池研究其对电池性能影响, 结果显示采用 NC- Co_3O_4 氧电极电池的开路电压可达 1.44 V, 比 Pt 电极 (1.27 V) 和

⁵ Mohammad Asadi, Baharak Sayahpour, Pedram Abbasi, et al. A lithium-oxygen battery with a long cycle life in an air-like atmosphere. *Nature*, 2018, 555 (7697): 502.

Ir/Pt 复合电极 (1.21V) 都高; 此外, 其最大电流密度可达 227 mA cm^{-2} , 峰值功率为 82 mW cm^{-2} , 高于 Ir/Pt 复合电极, 接近商用的 Pt 电极。在 25 mA cm^{-2} 电流密度下, NC-Co₃O₄ 氧电极电池放电比容量为 387.2 mAh g^{-1} , 远高于 Pt 电极 (212.6 mAh g^{-1}) 和 Ir/Pt 复合电极 (132.4 mAh g^{-1})。研究人员指出, NC-Co₃O₄ 氧电极优异的双功能催化活性主要原因在于两方面: 其一是独特的分层级空心结构提供充足的反应活性位点和较短的离子扩散路径; 其二是氮掺杂碳表面包覆进一步改善电子传输和电极稳定性。该项研究通过精心设计制备出了分层级空心球嵌入的纳米管阵列电极催化剂, 具备了优异的 OER 和 ORR 催化活性和稳定性, 为开发廉价、高性能双功能氧电催化剂和锌-空气电池提供了新途径。相关研究成果发表在《*Advanced Materials*》⁶。

(郭楷模)

铱双原子催化剂有望开辟全新的催化技术方向

将负载型金属催化剂以一个个原子锚定于载体上形成分散的原子催化剂, 理论上可以实现贵金属催化性能的最大化, 达到接近 100% 的原子利用效率。但由于高度分散的原子表面能高、热力学不稳定, 因此构建稳定的原子催化剂是催化领域长期追求的最具挑战的目标之一。波士顿学院 Dunwei Wang 研究团队利用光化学方法, 合成了催化位点由两个铱原子通过氧元素桥连组成的双原子非均相催化剂(DHC), 催化位点能够稳定地与载体结合, 表现出卓越的抗分离和聚集稳定性, 以及对水氧化的高活性。研究人员以 α 相氧化铁 ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) 作为载体、铱 (Ir) 原子作为催化活性位点, 以 Ir-O-Ir 形式排列保持两个 Ir 原子固定在载体上。通过像差校正扫描透射电子显微镜 (AC-STEM) 证实了 Ir 原子以 Ir-O-Ir 形式排列负载在 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 载体上形成 Ir 双原子催化剂。为维持 Ir-O-Ir 结构排列, 他们先构建羟基封端的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (001) 表面, 随后生成的 DHC 中的两个 Ir 原子被五个表面 O 原子结合, 每个 Ir 原子占据羟基封端的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 表面上三倍的缺陷位置, 形成 Ir-O-Ir 结构, 通过化学键与底物 O、H₂O 和 -OH 链接从而实现在载体上的稳定锚定。Ir 双原子催化剂对水氧化具有极高的催化活性, 其工作机理是: Ir 双原子催化剂经历三个质子转移耦合电子转移 (PCET) 过程, 建立足够的氧化电势以氧化 H₂O, 并产生 Ir-OOH 中间产物。在没有外加电压时, 三个 PCET 过程的自由能变化分别为 1.06 eV、1.37 eV 和 1.21 eV。底物 H₂O 分子通过与 Ir 原子结合, 自由能增加了 0.44 eV, 然后经历亲核攻击形成 H₂O₂, 自由能增加了 0.36 eV。Ir-OOH 中间体的氧化仅需要 0.75 eV, 易于通过 PCET 进行。随后与底物 H₂O 的结合, 实现裂解水产氢和析氧。通过比较不同施加电位下的自由能变化, 发现只需要 0.14 V 低过电压就足以使催化水裂解产氢和

⁶ Cao Guan, Afriyanti Sumboja, Haijun Wu, et al. Hollow Co₃O₄ Nanosphere Embedded in Carbon Arrays for Stable and Flexible Solid-State Zinc-Air Batteries. *Advanced Materials*, 2017, 29, 1704117.

氧。与 Ir 双原子催化剂不同，Ir 单原子催化剂在经历第三个 PCET 过程之前，必须与底物 H₂O 结合并形成 O-O 键，这是因为在第二个 PCET 过程之后，如果直接进行水分子氧化的话，Ir 单原子催化剂自由能增益极大（大于 1.8 eV，即需要更大的外加电压，消耗更多能量）。因此，双原子催化剂对水氧化活性更高，即 Ir 双原子是水氧化的有效催化剂。该项研究创新性地通过载体锚定形成稳定分散的双 Ir 原子催化剂，具备了高效的催化活性，实现高效地光解水产氢和析氧，有望开辟全新的催化技术方向。相关研究工作发表在《*Proceedings of the National Academy of Sciences*》⁷。

（刘竞 郭楷模）

三维柔性有机衬底有效抑制锂枝晶增强锂金属电池性能

锂金属电池的理论容量高达 3860 mAh/g，近十倍于传统的石墨负极锂电池，被视为是一种极具应用前景的高能量密度电池。然而锂金属电池充放电过程中会产生大量枝晶引起电池短路，导致性能衰退甚至燃烧爆炸，因此亟需研究消除锂枝晶生长的方法。由亚利桑那大学 Hanqing Jiang 教授课题组牵头的联合研究团队制备了全新的三维柔性聚二甲基硅氧烷（PDMS）有机薄膜，作为电池中锂金属负极的衬底材料，有效释放驱动枝晶生长的应力，很好地抑制了锂枝晶的形成，从而显著地增强电池性能和循环寿命。研究人员通过化学方法将三维的柔性 PDMS 与铜（Cu）结合形成 Cu/PDMS 复合膜作为集流体应用于锂金属电极，随后与传统的无 PDMS 的 Cu 膜集流体进行对比研究。光学显微镜显示，在电池充放电循环过程中，Cu 膜集流体形貌发生了显著的变化，从最初的光滑平面变成起伏不平的褶皱形貌，研究人员推测，这可能是由于锂离子在电化学沉积形成枝晶的过程中产生压应力驱使锂金属负极 Cu 衬底发生褶皱形变；与此相反，Cu/PDMS 复合膜集流体只有细微的褶皱。进一步的扫描电镜表征显示，在 Cu 集流体上形成了明显的树枝状锂枝晶，即证实了驱动枝晶产生的锂金属负极内部的压应力是导致 Cu 薄膜发生褶皱形变主要原因；相反，Cu/PDMS 复合膜上只有局域的小斑点，没有产生树枝状的枝晶，即三维柔性的 PDMS 衬底有效地释放了锂金属负极内部的压应力，从而有效地抑制了锂枝晶的形成，能够增强电池性能。循环伏安测试显示，采用 Cu/PDMS 复合膜集流体电池初始放电比容量为 160 mAh g⁻¹，经过 100 次循环后，容量保持率可达 85.6%，库伦效率高达 99.5%，展现出优秀的循环稳定性；相反，采用纯 Cu 集流体电池循环性能较差，100 次循环后，比容量从初始的 150 mAh g⁻¹ 大幅衰减至 83 mAh g⁻¹，容量保持率仅为 55.3%。该项研究设计制备了新型的三维柔性聚二甲基硅氧烷衬底材料，有效地释放了锂金属负极内在的压应力，抑制了锂枝晶的形成，增强了电池性能和

⁷ Yanyan Zhao, Ke R. Yang, Zechao Wang, et al. Stable iridium dinuclear heterogeneous catalysts supported on metal-oxide substrate for solar water oxidation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 201722137

循环寿命。为设计和开发高性能的锂金属电池提供了新的思路。相关研究工作发表在《*Nature Energy*》⁸。

(李明月 郭楷模)

能源资源

IEA：未来 5 年稳定的经济增长将推动石油需求持续上涨

3 月 5 日，国际能源署（IEA）发布《石油中期市场报告 2018》指出⁹，未来三年（2018-2020 年），全球经济预计增长 3.9%，从而推动石油需求上涨，预计石油需求年均增速将达到 120 万桶/日。未来三年，尽管美国、巴西、加拿大和挪威四个国家新增的石油产量就足以保障全球市场增长需求，但由于石油行业尚未从 2015-2016 年间投资低谷中恢复过来，因此还需要更多上游投资来提高产量以满足 2020 年之后持续的石油增长需求。报告对未来 5 年石油市场的走势进行了系统预测分析，主要内容如下：

（1）未来 5 年稳定的经济增长将有力支撑石油需求强劲增长

国际货币基金组织预测，在预测期的早期（2018-2020 年），全球经济预计增长 3.9%。强劲的经济增长将推动石油需求上涨，预计石油需求年均增速将达到 120 万桶/日。到 2023 年，石油需求量将达到 1.047 亿桶/日，较 2018 年增加 690 万桶/日。但石油需求的增速将逐渐放缓，同时面临被其他能源产品替代的境况：随着中国经济变得更加以消费为导向，与 2010-2017 年相比，到 2023 年其石油需求的增长速度将持续放缓。相对而言，印度石油需求增长的速度将略有加快。

尽管石油需求高峰还没出现，但到 2023 年，石油需求增长速度将从 2018 年的 140 万桶/日减缓至 100 万桶/日。各国均有迹象表明石油被其他能源所替代。例如中国认识到迫切需要解决城市空气质量不佳问题，因此正在努力部署石油替代燃料。电动汽车的销量正在增长，天然气汽车的部署也快速增长，尤其是卡车和公共汽车。中国越来越多的电动客车和以天然气为燃料的卡车将显著地减缓石油需求的增长。

（2）石化产品是石油需求增长的主要驱动力

全球石油需求增长最快的来源是石化产品，尤其是在美国和中国。到 2023 年，乙烷和石脑油需求量为 170 万桶/日，占总需求增长的 25%。全球经济增长使更多的发展中国家人口进入中产阶级行列，收入的增加意味着对消费品和服务的需求急剧上升。从石油和天然气中提炼出的大量化学物质，对于满足不断增长需求的许多产

⁸ Xu Wang, Wei Zeng, Liang Hong, et al. Stress-driven lithium dendrite growth mechanism and dendrite mitigation by electroplating on soft substrates. *Nature Energy*, 2018, 3 (3): 227.

⁹Record oil output from US, Brazil, Canada and Norway to keep global markets well supplied.

<http://www.iea.org/newsroom/news/2018/march/record-oil-output-from-us-brazil-canada-and-norway-to-keep-global-markets-well-.html>

品是至关重要的，包括汽车和工业用途的个人护理用品、食品防腐剂、肥料、家具、油漆和润滑油等。最大和最紧迫的问题之一是国际海事组织（IMO）规定的海洋燃料规范的重大改变。新的规则实施日期越来越近，海运和炼油行业面临着巨大的挑战。新的规定将导致高硫船用燃料油需求大量转向低硫船用燃料油或船用轻柴油。石油产品的总需求不会大幅改变，但这种变化对产品组合的影响是主要的不确定因素。

（3）上游领域的投资显示出适度的复苏迹象

随着全球需求稳步上升，供应方的反应至关重要。2017 年的油气上游领域投资是持平的，早期数据显示，2018 年的投资只会小幅增长。自然产量下降速度正在放缓，但需要更多投资。维持现有产量的投资是一项挑战，对未来需求增长的投资是另一项挑战。分析表明，新发现的石油资源在 2017 年降至历史新低，其中原油、凝析油和天然气凝析液不到 40 亿桶。在过去三年中，由于投资减少，中国、墨西哥和委内瑞拉的石油产量下降了 170 万桶/日。在前总统查韦斯上台后的二十年里，石油产量减少了一半以上，降至 160 万桶/日以下，到 2023 年，产能将增加近 70 万桶/日，相比一年前的预期大幅下降。

（4）随着非欧佩克国家在 2020 年实现所有需求增长，美国主导了石油供应增长

随着欧佩克产能的适度增长，更多的关注焦点集中在美国为首的非欧佩克国家。在轻质油（LTO）的推动下，到 2023 年，美国的产量预计增长 370 万桶/日，超过当时预计的全球产能增长总量 640 万桶/日的一半以上。美国液体燃料总产量将达到近 1700 万桶/日，轻松成为全球顶级生产商，几乎与其国内产品需求水平相匹配。如果价格上涨超过本报告中的假设（基于当前的远期价格曲线），那么到 2023 年美国的产量可能会更高。巴西、加拿大和挪威也将为供应增长做出贡献，与美国一起，几乎提供了所有的非欧佩克增长量。2023 年以前，预计不包括美国 LTO 在内的非欧佩克国家常规原油产量将下降。

（5）预计石油市场会在 2023 年收紧，价格波动风险增加

在未来 6 年里，市场可能会经历两个阶段。到 2020 年，非欧佩克国家的石油供应量将超过预期的需求增长。但到 2023 年，如果投资仍然不足，有效的全球闲置产能缓冲将降至需求的 2.2%，为 2007 年以来的最低水平。这就增加了石油价格在新供应出现之前变得更加不稳定的可能性。美国页岩行业在 2010 年和 2017 年均对价格上涨做出了迅速反应，并将在未来继续对价格信号进行调整，但仍会继续依赖欧佩克国家，以获得全球供应的主要份额。在欧佩克内部，沙特阿拉伯的闲置产能超过了 200 万桶/日，凸显了欧佩克最大产油国在为全球石油市场提供稳定方面发挥的关键作用。

（吴勤 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 吴勘

电话：（027）87199180

电子邮件：jjance@whlib.ac.cn

微信公众号：CASEnergy

