



BP技术展望 2018



技术将如何改变能源生产和消费方式



目录

章节		页码
1	能源与技术	1
1.1	背景	2
1.2	前言—BP集团首席执行官戴德立	4
1.3	挑战与变革	6
1.4	数字技术	12
2	能源生产与消费	17
2.1	一次能源与生产	18
2.2	电力	30
2.3	交通	41
2.4	热力与制冷	50
3	环境视角	55
	可持续能源系统	56
4	见解	63
	延伸思考	64
5	附录	67
	我们的研究方法	68



能源与技术

1

关于BP 技术展望

《BP技术展望》（“《展望》”）旨在探讨至2050年技术改变能源生产与消费方式的潜力。

《展望》汲取了过去三年来由BP和八所大学及研究机构的伙伴所共同开展的一系列研究成果。这些研究运用基础分析和能源系统模型相结合的方法，对长期趋势提供了见解。

《展望》着眼于三个国家和地区，即中国、欧洲和北美，其一次能源消费合计占全世界逾50%的比重，但它们的能源系统却各不相同。

《展望》旨在与商界、政府、学术界和其他领域的人士共同展开思考。

BP向参与制作本出版物的合作伙伴表示感谢：IHS Markit就油气资源基础和建筑物章节提供研究；Ricardo就地面交通进行研究；Marakon就工业用热章节进行研究；剑桥大学Foreseer团队和Resource Efficiency Collective就空气质量和能效进行研究；KanORS-EMR进行了能源系统建模；伦敦帝国理工学院就可再生能源和电网的整合开展研究。



《BP技术展望》探讨了技术对能源系统产生影响的方方面面——从能源生产到能源在电力、交通和热力方面的使用。



洛杉矶的一个高速公路交叉口 ——《BP技术展望》考察了中国、欧洲和北美的能源系统。

为充分利用本《展望》，有必要首先了解其初衷，和那些未纳入其考虑的方面，以及其他有关未来趋势的观点有何区别。

《展望》运用“技术经济”分析，展现了一系列能源相关技术到2050年的发展态势和成本趋势。这一方法考虑了诸如投资、运营和燃料成本、规模、技术进步等因素，其中也考虑了“学习曲线”，即成本将随着经验的积累而降低。

本报告的核心分析未考虑政策的影响，例如那些旨在减少温室气体排放或改善空气质量的政策。不过，在有关电力、交通和热力的研究中，已将碳价纳入了核心计算，以探究其可能带来的不同影响。

通过这一方法，《展望》就全球能源如何在政策或监管之外独立发展提供了见解，因而有

望帮助政策制定者考虑应该引入何种额外的激励和措施。

《展望》因此并不是一系列预测。预测更多是判断社会和政策驱动的变革，进而对结果进行预期，而本《展望》则是运用建模和分析的方法，洞见技术进步和其他因素可能产生的效果，不考虑其他因素。

《展望》以当今已知技术的发展为依据，不试图预测2050年之前可能出现的创新突破。

本出版物为《BP技术展望》第二版；第一版出版于2015年。

本版《展望》的研究开展于2015-2017年*，其范围进一步扩大，涵盖诸多重要领域的更深入研究，包括：

- 为更加低碳的未来建立能源系统模型
- 支持大规模运用风能和太阳能发电所需的成本
- 能量储存的选项，特别是先进电池及其对电动汽车和电网的意义
- 城市空气质量，探究排放源和潜在解决方案

* 研究于2015年发起，对一系列燃料进行了长期价格假设，包括假设布伦特原油为75美元/桶，亨利港天然气为4美元/百万英国热量单位。

风物长宜 放眼量

当今正值投身能源行业的大好时机。热力、电力和出行能力的获得正在继续帮助发展中国家的数百万人脱离贫困，同时也持续支撑着工业化经济体的增长。

然而，随着能源需求的增长，能源供应的方式正在发生变革。可再生能源迈入迅速增长的轨道。油气行业继续增长，油气生产和消费变得更加高效。与此同时，全球煤炭消费趋于平稳，而各个区域的核能前景则各不相同。

尽管变革的速度似乎与日俱增，能源行业仍需要一种长远的眼光，因为该行业当前正在对诸多项目、发展和系统进行投资，而这些投资将持续数十年之久。



戴德立（Bob Dudley）
集团首席执行官

这些投资需要与我们对未来前景的理解相结合，而BP始终将这一主题作为一项重中之重。在我们展望未来之际，我们的技术团队与各业务部门、专家和伙伴密切合作，旨在理解技术方面的趋势和推动力。学术界和其他领域的专家们所开展的研究为本《展望》奠定了坚实的基础，我们对此深表感谢。

在我的职业生涯里，我曾多次目睹能源世界因技术进步而转型。这些进步包括地震成像、页岩开采技术、制造业创新，以及可再生能源成本和电池成本的降低等等。

第二版《BP技术展望》着眼于下一代技术进步，从现在起直至2050年。第二版《展望》重申了2015年第一版《展望》的诸多见解，例如能源资源依然充足等。《展望》强调了各地区之间的能源系统存在差异。它还提醒我们，电力部门降低碳排放的成本要低于交通和热力。另外，它还揭示了数字技术如何促进能源行业的转型。

然而，2018年《展望》还对那些进步比三年前预期更快的技术提供了新的重要见解。例如，电动汽车和自动驾驶汽车的增长潜力得到了更加详细的挖掘，风能和太阳能发电的竞争力与日俱增，而电池的成本正在迅速降低。

模型向我们揭示了技术在未来三十年的潜力。诸如数字化、人工智能、交通电气化、可再生能源的扩大等等，这些潜在的变革激动人心且影响深远。

尽管这些进步有力推动了全世界向低碳经济转型，但是我们的分析表明，仅单独依靠某一种进步是无法实现转型的，还需要进一步提供动力，特别是出台相应政策以提高碳排放成本并鼓励各式各样有助于减排的方

式——无论是提高效率、加大低碳能源投资，还是进一步推广碳抵消项目。

模型所带来的见解始终是估计，与现实发生的情况必然存在差别，但模型所传递的信息是明确的。正如统计学家乔治·伯克斯（George Box）所说，“所有模型都是错误的，但有些是有用的。”

另一个重要见解是，天然气将一如既往地具有重要性。分析表明，在低碳世界中，天然气仍将是能源结构中必不可少的组成部分。天然气既可用于交通领域，也可用于供热和发电。天然气还可与碳捕获、利用与封存（CCUS）一同部署，为可再生能源的大规模利用提供必要的支援。《展望》所提及的研究也表明，CCUS是低碳未来的关键组成部分。

《展望》在为未来能源技术提供见解的同时，还强调了诸多不确定性和未知因素。包括人工智能、机器人和自动化在内的数字技术必然会继续发挥深远影响。

本报告所述及的诸多新兴技术，例如激光钻井和新式太阳能光伏组件等，同样有望颠覆能源系统的趋势和经济格局。

过去几年来，《BP技术展望》及其姐妹出版物《BP世界能源展望》帮助BP做出决策。例如，我们在长期天然气项目上的新增投资反映了我们的预期，即未来数十年天然气将强势增长，诸多潜在技术有望投入使用。数字技术正在帮助我们发现并开采石油资源，而随着车辆技术的日渐发展，石油消费将更为高效。与此同时，我们向众多高科技初创企业提供越来越多的创业投资，这些企业涉及广泛领域，有的将生活垃圾转变为生物航空燃料，有的则致力于人工智能。借此，我们向那些有潜力推动全世界向低碳能源系统转型的新技术提供一臂之力。

我希望2018年《BP技术展望》能够对那些投身于能源世界相关工作或对此感兴趣的人士有所助益。



BP 技术展望
2018



了解更多关于《BP技术展望》的信息：
www.bp.com/technologyoutlook

技术如何有助于提供更多能源以及可持续发展的环境？



亚洲夜景——高能耗的特大城市比其他地区更亮。

为何能源技术至关重要

一直以来，用于能源生产和消费的技术都具有重要意义。不仅如此，当今能源技术对全球经济和环境未来都极为关键。

工业革命依托蒸汽机、机车和电力等能源技术实现了能源转型，进而开启了一段史无前例的人口增长时代。期间，世界人口增长至八倍，人类预期寿命也翻了一倍。

工业化时代既带来了前几代人不敢设想的益处，也促进了全球人口的持续增长。然而，人类随之面临着诸多挑战，如温室气体排放增加、过分拥挤、城市污染等等。

双重挑战

当今社会面临着双重挑战——既要满足日益增长的能源需求，也要同时减少温室气体排放。空气质量和水污染等其他问题也有待解决。

这一困境可通过以下方式加以破解：尽可能高效地利用能源进而减少能源总消费，即节能；向低碳、零碳甚至负碳能源过渡，即能源转型。能源转型包括使用可再生能源或核能，也包括在发电领域用天然气替代煤炭，因为天然气发电的碳排放量仅为燃煤发电的一半。

在以下这两大领域，技术均可扮演关键角色：提高能源使用效率，提升低碳能源的可负担性和可用性。

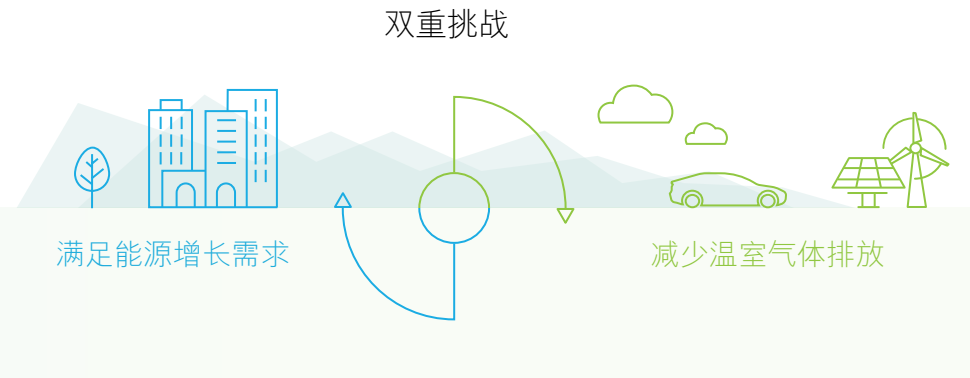
变革性技术

本《展望》以大约130项技术为基础，包括：油气生产、炼油厂和发电厂；可再生能源（风能和太阳能等）；车辆（传统汽车、电动汽车和混合动力汽车）；热能技术（燃气锅炉、电热泵）；能量储存（电池、氢燃料电池）。

许多技术可在解决上述双重挑战方面发挥作用。然而，本报告重点关注五个特定领域，我们的分析表明技术有望在这些领域里扮演变革性角色。

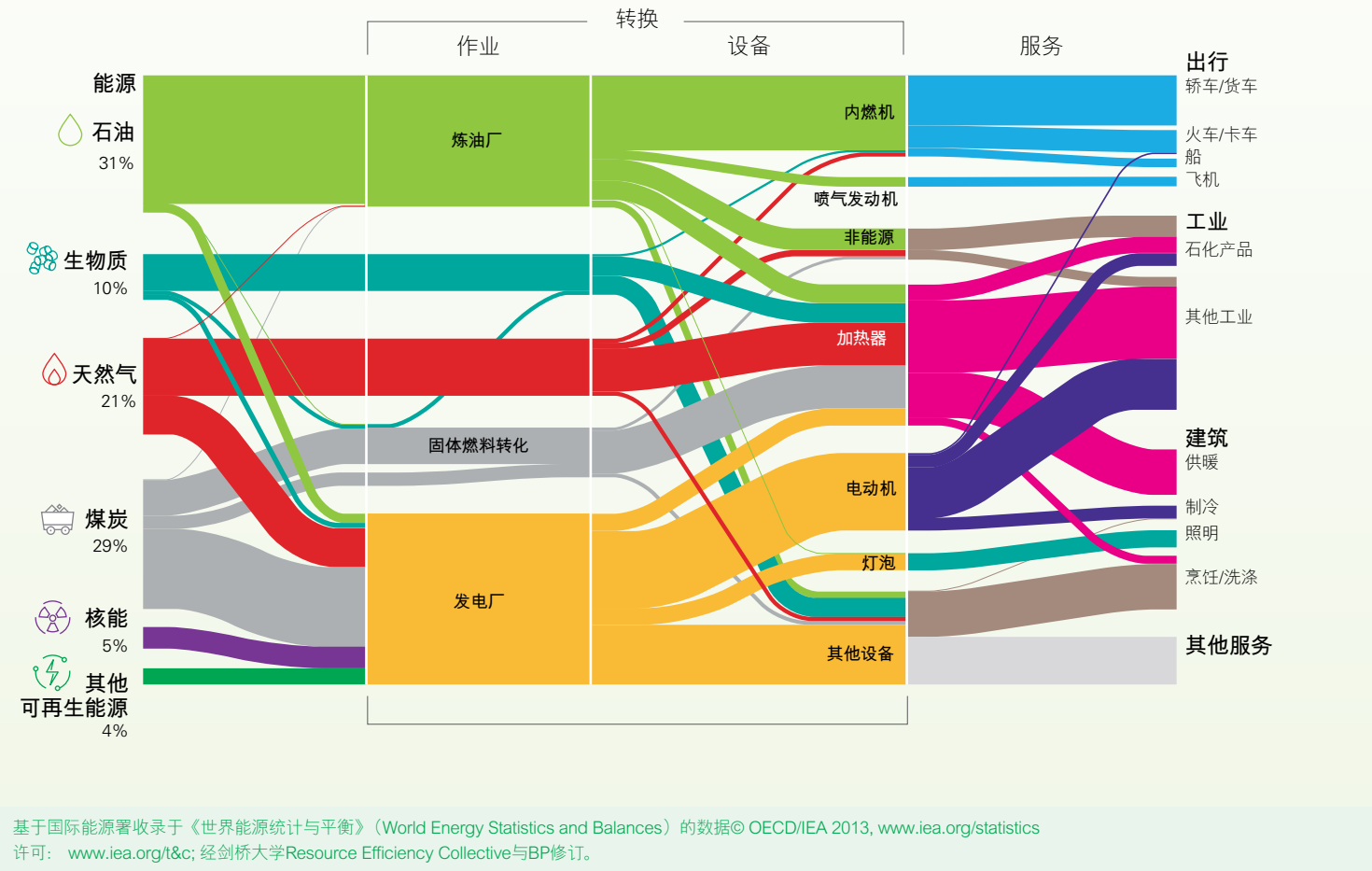


能源需求随人口和经济的不断增长而提升——与此同时，为了实现环境目标，也需减少温室气体的排放。



一个复杂的系统

本图表（即桑基图）显示了能源转换和消费的方式。左侧标注为能够产生能源的自然资源，即一次能源。图表显示了这些资源是如何经工业操作（如炼油厂或发电厂等）被转换，又是如何通过诸如发动机和灯泡等设备被消费进而成为图右侧所示的能源服务（如出行和照明等）。例如，天然气资源既被用于发电，也通过管道直接被送入千家万户用于供暖或烹饪。线条的宽度表示了所涉及能源的数量。尽管本图表未予以展示，各个转换阶段都有发生巨大能量损耗，以及低效使用能源的情况。





一座太阳能“农场”——通过低碳发电满足需求。

能源效率:自19世纪末形成以来，能源系统一直错综复杂。它汇聚了多条供应链，其中诸如石油、天然气、煤炭、铀（用于核能）和可再生资源等一次能源，通过炼制、发电等过程被转换和消费，为人类提供诸如热力、照明和交通出行等服务。在这些过程中，大部分能源在消费者享受其带来的好处之前就已经被损耗了。在第10页和第11页，我们的伙伴——剑桥大学Resource Efficiency Collective团队描述了一些技术可行的措施，通过这些更高效能技术的普及，可节省全球高达40%的一次能源（不计成本因素），而这些技术中有许多目前已经问世了。

数字化:数字化有利于我们实现新的能效方法，达到新的能效水平——从智能电网和电力系统需求管理，到优化车辆使用和降低燃料消耗的自动驾驶汽车和共享出行方案。本《展望》在第1.4节的专题下探讨了数字技术，在关于能源生产、电力和交通的章节中也有所提及。

可再生能源发电:在技术进步和政策支持的共同作用下，可再生能源发电（尤其是风能和太阳能）正在迅速发展。分析表明，2050年以前，可再生能源的增长速度将加速，在条件允许的情况下，风能预计将成为本《展望》覆盖的地区中最低价的新增电力来源，

太阳能也将具有较强的竞争力。我们将在电力（第2.2节）和低碳未来（第3.0节）章节中探讨可再生能源发电。

能量储存:电池是能量储存的选项之一。电池技术在铅酸电池数十年的统治之后，正在经历重大的变革。锂离子电池正迅速发展，鉴于锂离子对于电动汽车的重要作用，预计电动汽车的成本将被拉低。其他新兴技术包括金属空气电池、固态电池和液流电池。电网级电池将为电力系统的能量储存提供更多选项。本《展望》在电力（第2.2节）和交通（第2.3节）章节中谈及了能量储存。

脱碳天然气:应用碳捕获、利用与封存（CCUS）技术可对天然气进行脱碳，也可通过将天然气与氢气或生物气（生物材料产生的气体）混合而实现脱碳。CCUS可捕获发电厂和其他地方天然气或其他燃料燃烧所产生的二氧化碳，之后将其加以增值利用（将CO₂与大气分离，用于提高采收率或其他工业用途），或将其储存在地底。据预计，脱碳天然气的发展速度不及数字创新、可再生能源发电和能量储存技术，但我们仍将其列为一大变革性因素中，因为根据我们的预测，在低碳未来，它将在最有成本效益的能源结构中占据重要地位，而设置碳价将推动脱碳天然气更大规模的部署。关于脱碳

天然气和CCUS的讨论见关于电力（第2.2节）和可持续能源系统（第3.0节）章节。

本研究集分析和建模于一体，着眼于上述技术和其他技术的潜在影响，探究其如何帮助社会解决双重挑战并以可持续的方式满足未来的能源需求。



乔纳森·库伦
(Jonathan Cullen) 博士

剑桥大学工程系Resource Efficiency
Collective 负责人

66

拥有巨大节能潜力的领域包括汽车、供暖、
烹饪、洗涤和电厂。

99



欲了解更多关于 Resource Efficiency
Collective 的信息，请访问：
www.refficiency.org

全球能源系统的效率

全球能源系统由一系列广泛而多样的对能源进行转换和使用的技术组成。然而，拉动能源需求增长的是实现能源服务（如交通出行或供暖），而不是能源本身。这些技术运转得越高效，实现能源服务所需的能源就越少。

尽管人们为开发和改进能源转换技术付出了诸多努力，但是能源系统在整体上仍十分低效。以往关于能源技术效率极限的研究表明，如果所有能源技术都以运用热力学理论和简单工程模型所测算的“最大技术效率极限”运行，则理论上当今全球一次能源需求可降低85%。

早期研究所提出的节能85%的情形是理论上的技术上限，它在目前可以预见的未来是无法完全实现的。这是因为关于效率的研究往往是为各项技术寻找效率平均值，其假设是研究范围内的所有设备在效率方面都实现“最佳发挥”，因而高估了节能的效果。

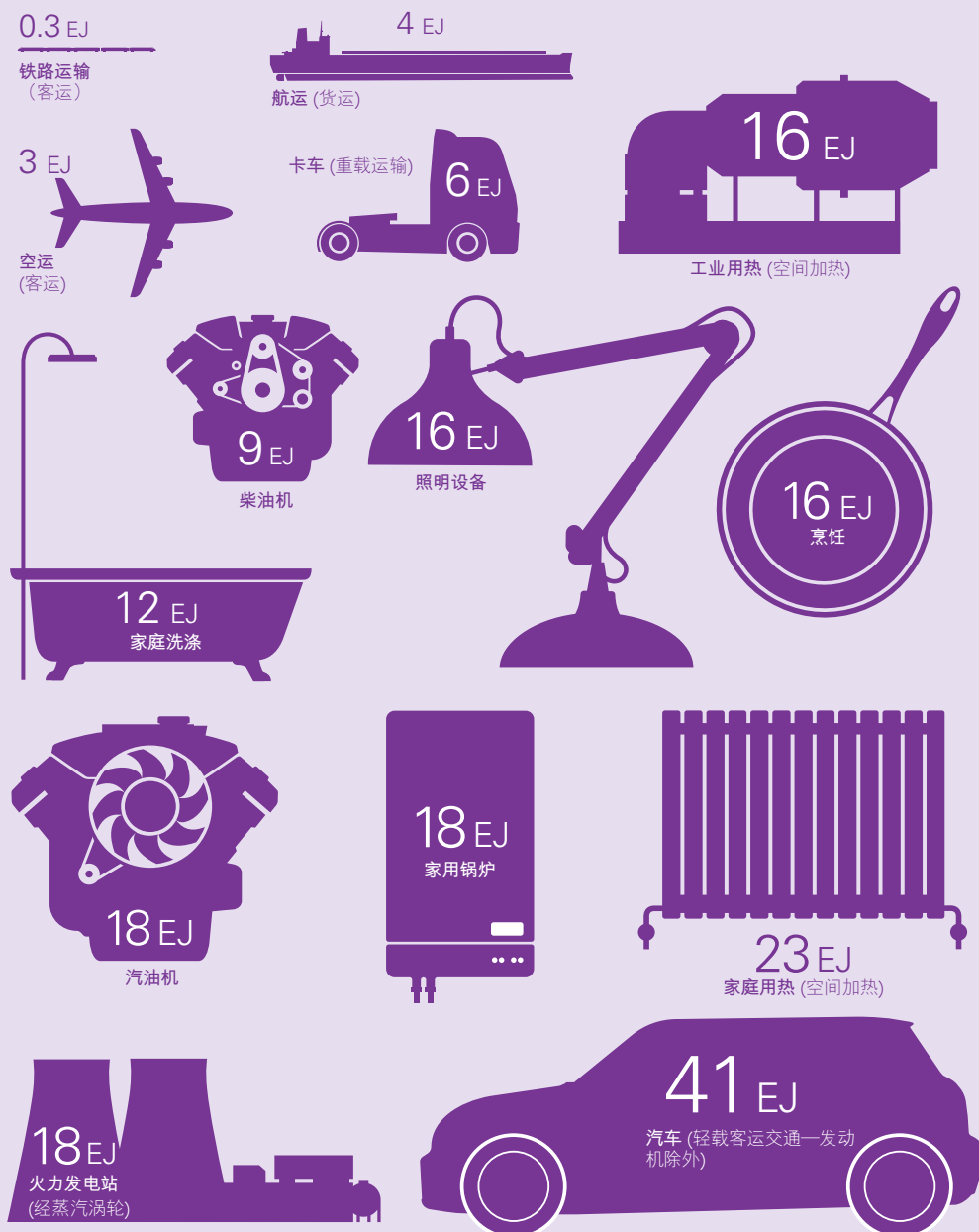
对于许多技术而言，这是不现实的。以汽车为例，这无异于要求所有人都驾驶相同的高效率小型车。

在我们与BP合作开展的最新研究中，我们对当前效率采用了分布法，同时考虑了最大实际效率和某一特定技术类别下潜在的效率降低情形。我们考查了35种技术的全球能源使用情况，列出了技术排行榜。研究表明，我们能够节约的一次能源为217次方焦耳（EJ），相当于当前供应量的40%，也是技术效率极限的一半。拥有巨大节能潜力的领域包括汽车、供暖、烹饪、洗涤和电厂（见图表）。如果想在最大程度上实现节能，则煤炭、石油、天然气和生物质能的需求将分别降低31%、47%、40%和40%，每年能减排135亿吨二氧化碳。若这一节能模式被证实经济可行，其将影响能源供应体系的方方面面，而在做出关乎未来能源供应决策时也需要对此模式引起重视。

更好地使用能源

本研究对35项技术进行了分析——从汽车、发电厂，到家用烹饪和洗涤，列出了目前的能效范围，并对当今到2050年可获得的最佳技术加以评估。

节能改进潜力方面排名前10的技术占预计节能总量的四分之三。



① 图片越大表示节能的潜力越大。

年节能潜力以标准能量单位次方焦耳（EJ）表示。1EJ约等于北美2600万家庭年平均能耗或1.6亿桶石油当量。

（EJ等于 10^{18} 焦耳）

总节能量的计算追溯至一次能源的能量统计，即不再需要使用的石油、天然气、煤炭、生物质能、可再生能源和核能总量。

能源 数字化

数字技术如何改变能源体系？

能源系统的未来将取决于能源生产、电力、交通和供暖等领域的广泛技术变革，但是有一个共同的因素正推动着能源生产、加工和使用领域的转型，而这就是数字创新。

数字技术的影响

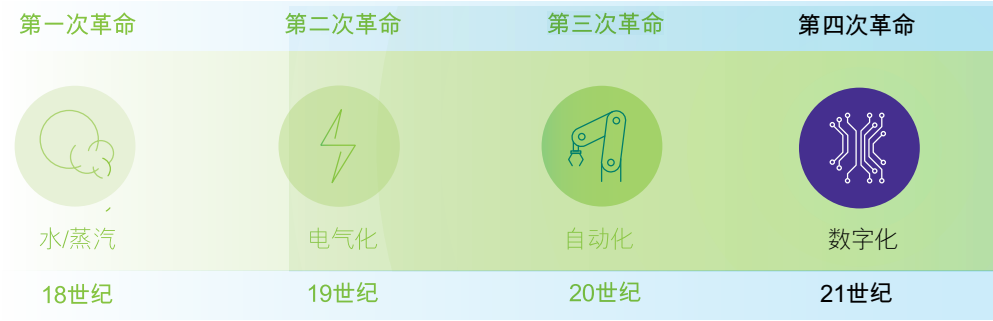
我们预计，随着数字工具（包括传感器、超级计算、数据分析、自动化、人工智能等）依托“云”网络而得到应用，到2050年能源系统内各分支的一次能源需求和成本将降低20-30%。



右图: 增强现实——可穿戴技术，如一名BP员工所使用的“智能眼镜”，是制造业数字化的一部分。

数字化——第四次工业革命

第四次工业革命预计将对众多行业产生深远影响。



第一次工业革命见证了蒸汽机的问世和制造业的机械化。第二次工业革命开启了电气化时代。第三次工业革命依托软件或机器人技术，让制造业的全自动化流程成为现实。第四次工业革命集前三次革命之大成，数字系统将被用于检测和控制物理和生物系统。

能源行业正在经历又一场变革，有人称之为继蒸汽、电气和自动化革命之后的“第四次工业革命”。数字化正与有形资产和系统相融合，形成一个一体化的网络-现实空间，即“物联网”，而应用日益强大且智能的软件，又可对“物联网”加以监测和控制。

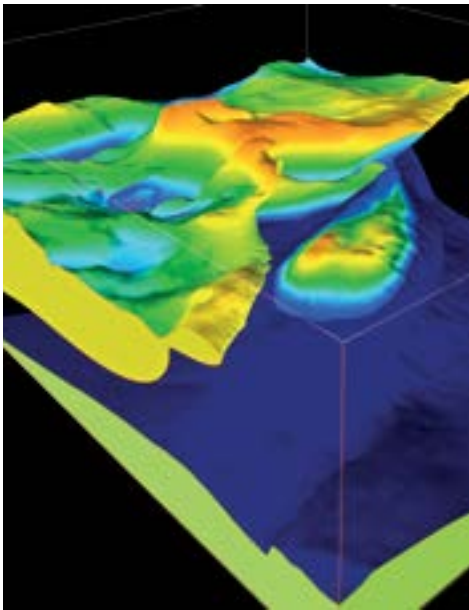
能源行业数字化的构成要素包括了各类传感器，它们收集数据流，通过监测诸如石油钻机、炼油厂、车辆和发电系统等机械系统，为其提供数字化表达。

“大数据”软件对传感器网络所生成的海量数据加以迅速处理和分析，使人们能够在作业前和作业期间进行模拟，进而对结果进行建模和优化。

机器智能的充分潜力是难以估量的。有人甚至预言，在某个所谓的技术“奇点”，计算机将比人类更聪明——至少在某些方面是如此。

数字技术的演化有时被描述为“四个视域”，而每一个视域都对能源行业具有深刻影响。

能源行业已经跨越了第一视域，例如，人们应用机器学习算法建模，进而对系统行为加以描述和预估。这些模型可分析并比较来自传感器的数据集，进而完成各式各样的任务，例如发现潜在的油气储量，或探测某个设备何时需要维护。



石油行业长期使用数字处理技术，结合运用地震技术所得到的数据，最终绘制出油藏的图像。



一个机器人正骑着一辆摩托车，以测试嘉实多润滑油——采用机器人可提高测试的可重复性和安全性。

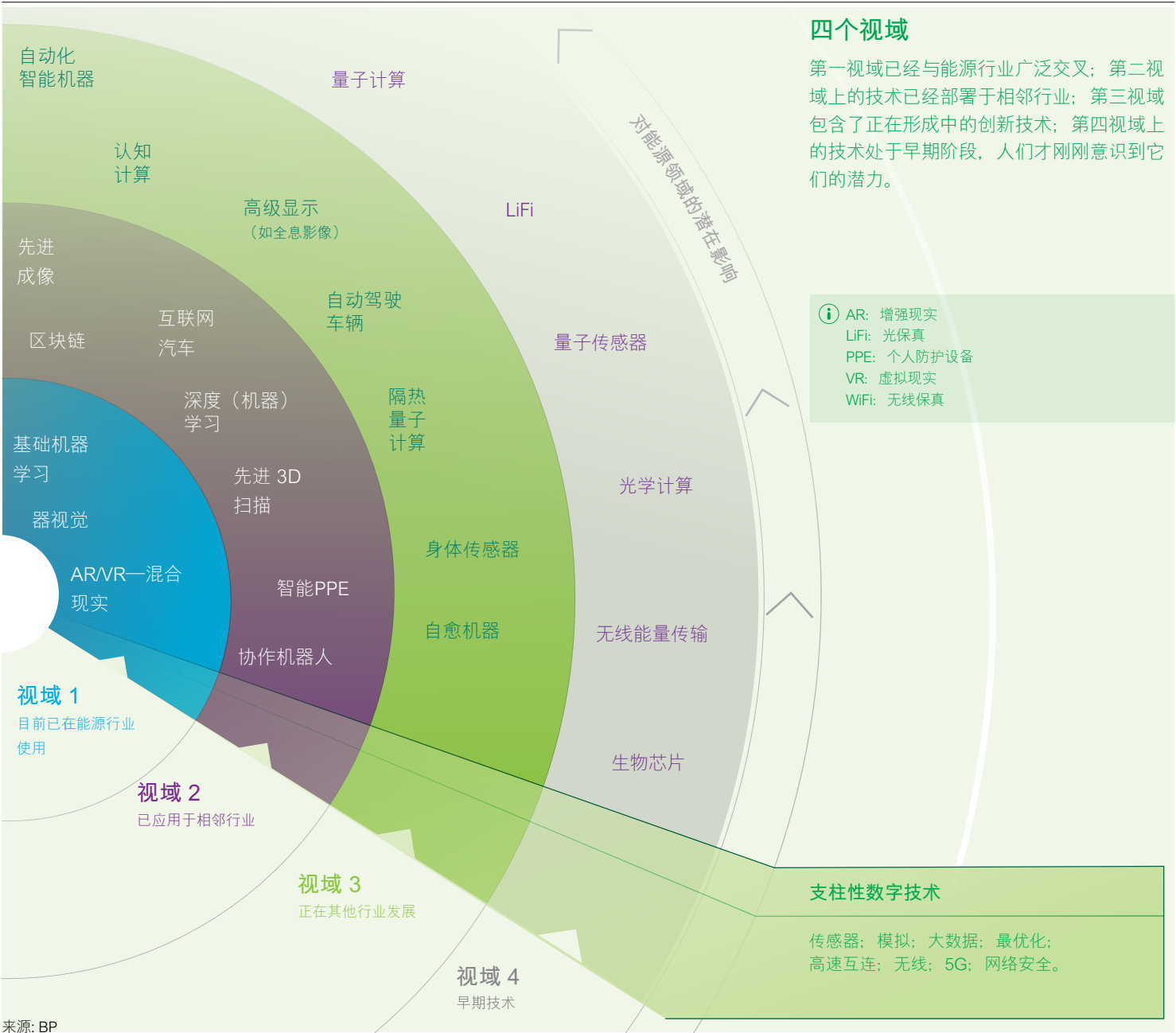
第二视域包含了一些已在某些部门部署的技术，但它们在能源行业的应用更为广泛。相关的系统包括互联网汽车、先进成像和区块链（为交易、追踪和审计提供便利）。

第三视域包括了在某些行业已经形成、并且有潜力应用于能源或其他行业的创新技术。自动化智能机器人和认知计算都属于这一范畴。两者都是人工智能领域的发展趋势，它们不仅限于针对特定问题的机器学习能力，而是通过交互吸收人类知识，能够处理不精确、不一致的信息，并且模仿更加复杂的人类思维过程。

第四视域包含了那些方兴未艾的技术，它们的潜力才刚刚为人所知。此类创新技术之一是量子计算，这是一项正在开发中的处理技术，运用概率分析加快计算时间。另一个此类技术是光保真技术（LiFi），它利用光以超高的速度传输数据。



BP位于美国休斯敦的高性能计算中心，这里拥有全世界最大的商业研究超级计算机之一。



来源: BP



马克·詹姆斯 (Mark James)

Beyond Limits首席技术官

66 智能堪称最强大、最宝贵的现有资源，但是目前仍存在大量尚未开发的潜力，而这些潜力将让世界变得更美好。开发的关键在于获取有可操作性的智能信息——这个万物休戚相关的数字化世界可利用这些信息来生成数据。

99

欲了解更多关于人工智能的信息，
请浏览：www.beyond.ai

能源行业人工智能的前景

智能拥有各式各样的形式。从章鱼神秘的大脑、蚂蚁的群体智能，到Go-playing深度学习机器，再到无人驾驶汽车，智能堪称最强大、最宝贵的现有资源。人工智能（AI）近年来取得了重大进展，但其作用绝不仅限于赢得几场比赛或是驾驶汽车，它带来了数不胜数的机遇，可帮助我们创造一个更加美好的世界。能源就是AI可以发挥作用的领域之一，包括油气行业的现代化。这一领域关乎全球格局，蕴含着丰富的机遇，它对环境保护、高效探索能源资源、工作安全以及可靠的决策诊断都具有重要意义。

我们生活在一个数字世界中，万物皆可存在联系。关键在于获得有可操作性的智能信息——让经过分析的数据帮助人类作出决策。因此，一项重要战略就是植入智能，让决策能依据传感器进行，而非仅仅依赖于向数据总部“回拨”。设想一下，将智能传感器安装在钻头上，它可对钻头的剩余寿命加以管理，这样就不必仅依据平均故障间隔时间（MTBF）就大费周折地把钻头抽回地面进行检查。

下游领域正在使用认知人工智能技术对油轮加以追踪，由此确定油轮何时离港、前往什么目的地、装载多少石油或液化天然气（LNG）。对装运的货物、目的炼厂和抵达时间加以预测，有助于交易员进行更加明智地决策。

消除港口调度运营方面的障碍，离不开一种罕见的机器智能，即认知智能，也就是像人类一样推理思考。这需要有关多主体调度的关键认知能力，与被动补救、资产管理、

合规、诊断学和预测学相结合，确保无缝的自主运营。

最后，我想对一个技术趋势作出预测：我认为将智能植入硅晶片会变得日益重要。世人可能认为AI会在某些庞大的计算机上运作，如某些科幻电影所描绘的那样，但是这种方法已经过时了。在不远的将来，你或许将见证一门技术的兴起——将真正的智能植入几块微小的硅晶片。与电子管向微电子的转型相比，这项技术将更具颠覆性。

在更广泛的意义上，就能源行业的AI前景而言，认知系统将有一席之地。它能够更智能、更流畅地与人类专家互动，并提供明确的解释和答案。总而言之，将来你会看到被赋予珍稀智能的系统，并与之一起工作。



2

能源生产与消费

一次能源 与生产



技术如何改善能源生产和加工？

为满足需求，能源行业利用技术对一次能源资源（包括石油、天然气、煤炭、用于核电的铀、生物质能、太阳能和风能）进行勘探、生产和转换。

从最初的油井到最新的风力发电机，技术进步不断推动着能源发现和生产方式的进步。预计未来数十年将有更多新技术问世。

近年来，油气部门迎来了一场“页岩气革命”，而水平钻井和水力压裂等技术正是这场革命的幕后功臣。与此同时，可再生能源技术也在迅猛发展。

本报告的分析以油气为重点，着眼于技术如何继续增加可利用的一次能源总量并降低生产成本。有关可再生能源的内容在电力章节也有所讨论。

➔ 见第2.2节



上图：在美国的一处陆地钻井，先进的钻井技术释放了致密页岩资源的潜力。

右图：巴西一座工厂的发酵罐，这座工厂利用甘蔗生产生物燃料。

富饶的能源资源

目前全球已发现的油气资源为55万亿桶油当量（Tboe）。据此，我们预计通过当今的技术，可对其中的十分之一进行开采，即4.9 Tboe。

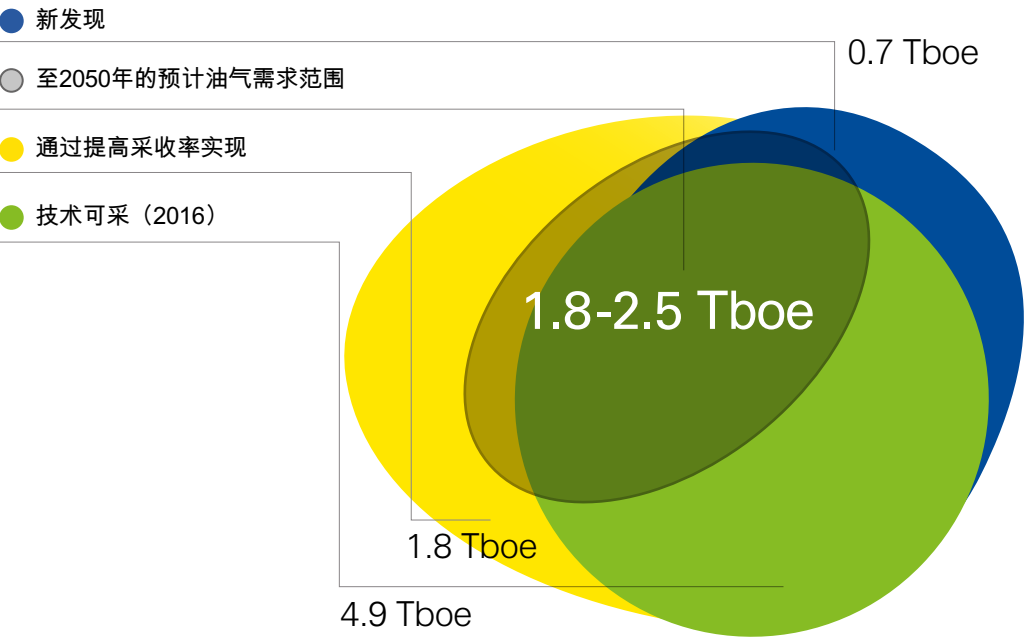
随着技术的不断演进，到2050年，可开采总量将增加约三分之一，达到7.3 Tboe。这一数量足以满足至2050年全世界的预计需求，即1.8至2.5 Tboe。

然而勘探和技术开发仍然具有重要意义，因为它们能够发掘比现有资源更加经济、环境足迹更低的资源选项。在一个油藏的生命周期里，其油气产量呈自然下降的趋势，而我们的分析支持了国际能源署的预测观点，即为了实现足以满足油气需求的产量，全行业每年需要约6000亿美元的投资——这一数字考虑了为实现《巴黎协定》而出台的政策和承诺对油气生产的影响。

尽管到2050年世界经济总量可能翻一番，人口可能由现有的约75亿增至98亿，除了可再生能源、核电和煤炭之外，仍有不少可满足全世界需求的选项。（目前煤炭仍被广泛使用，据预测煤炭消费已趋于稳定。）

满足能源需求的潜在新选项

当前全世界已发现的油气资源足以满足2050年的需求——但是技术发展可能催生一些替代选项来使成本更低和/或降低环境影响。



来源: IHS Markit 和 BP

① 据预测，利用当今技术可开采的油气资源为4.9万亿桶油当量（Tboe）。到2050年，随着技术不断演进，可开采油气总量将达到7.3 Tboe，这为满足1.8至2.5 Tboe的预计需求范围提供了新的可能性。

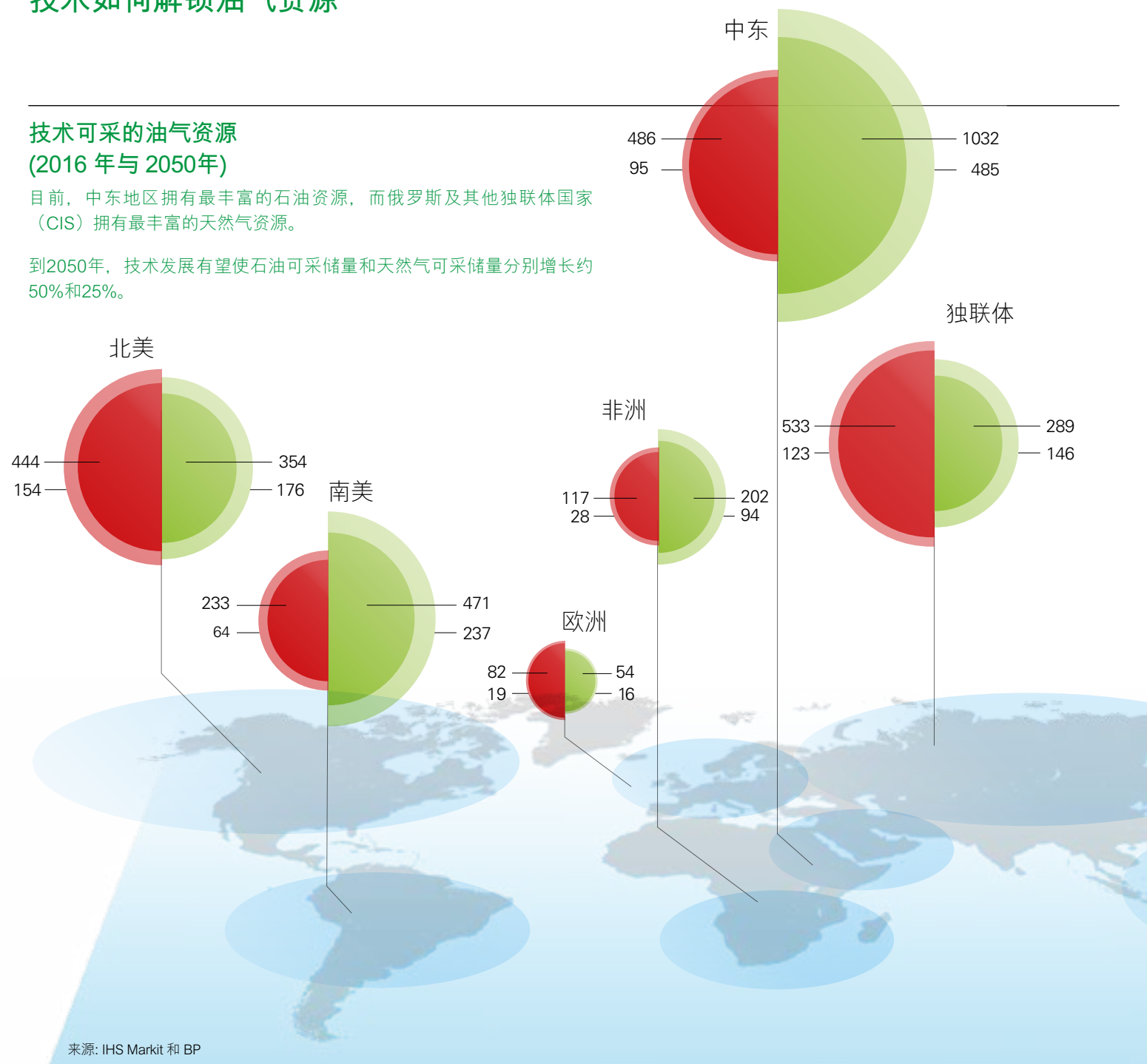
采收率提高、油气新发现和技术可采资源增加三者相结合，有望满足未来的潜在需求。图片仅供参考。

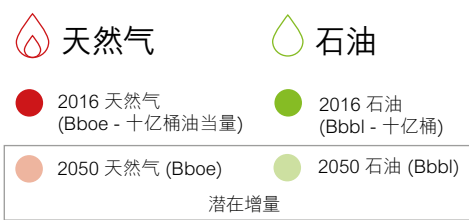
技术如何解锁油气资源

技术可采的油气资源 (2016 年与 2050年)

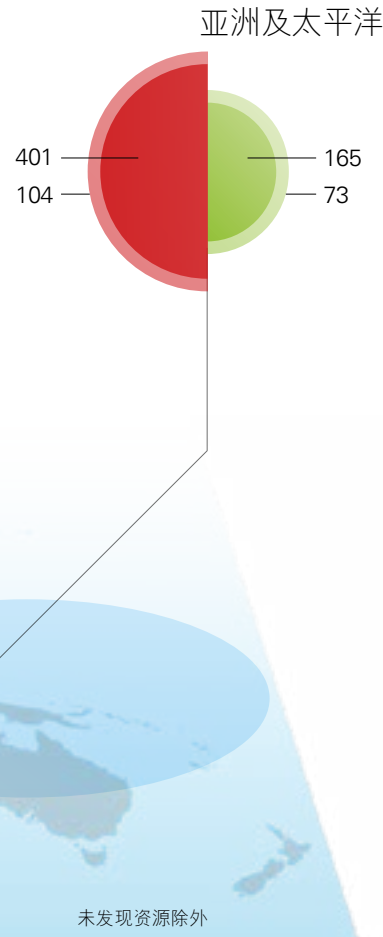
目前，中东地区拥有最丰富的石油资源，而俄罗斯及其他独联体国家（CIS）拥有最丰富的天然气资源。

到2050年，技术发展有望使石油可采储量和天然气可采储量分别增长约50%和25%。





位于阿曼的Khazzan气田 —— 我们的模型显示，在2050年的低碳世界中，天然气需求将依然强劲。



油气资源

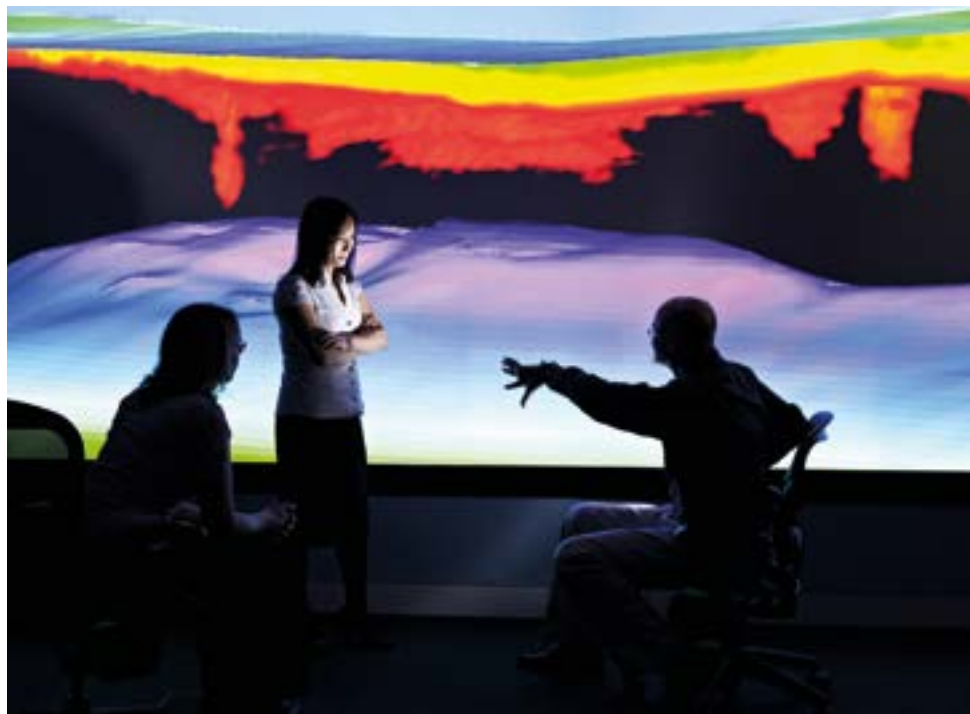
大约三分之二的可开采油气资源为常规油气，这是因为它们借助诸如注水等方法可以自然流向地面。其余的资源则被称为“非常规”油气，需要改变流体或储集岩的物理性质方可开采。

非常规油气资源包括页岩油（在纹理细密的岩层所发现的石油）、致密石油和天然气（在低渗透性和低孔隙度的储集岩所发现的石油和天然气）、油砂（含有稠油的砂子或砂岩），以及油页岩（需加热产油的页岩）。

在2018年《BP世界能源展望》中，BP的经济分析显示，在一个旨在实现《巴黎协定》目标的系统中，到2040年石油和天然气将为世界提供40%以上的能源，正如国际能源署的“可持续发展情景”所述。（《巴黎协定》目标即指将全球平均气温升高限制在前工业化时期水平之上的2摄氏度内。）在政策和技术按照近期态势演化的情景中，BP的分析显示对天然气的需求将持续增长至2040年，而石油需求在经历一段时间的增长后趋于平稳。这反映了交通领域的能效将大幅提高，而电力、交通和供热领域的天然气需求仍然强劲。利用碳捕获、利用与封存（CCUS）技术，可对天然气进行脱碳。

~30%

得益于技术进步，油气平均生命周期*成本有望降低。



在BP的办公场所，地质科学家对依据地震数据制成的地底图像进行检查。

供应成本

不同石油类型和天然气资源的生命周期成本差异显著，这具体取决于多个因素，包括开采的复杂性、油藏的深度和规模，及其地理条件等。

影响成本的因素还包括监管激励、税收、物流等，但它们不在本分析的范围之内。

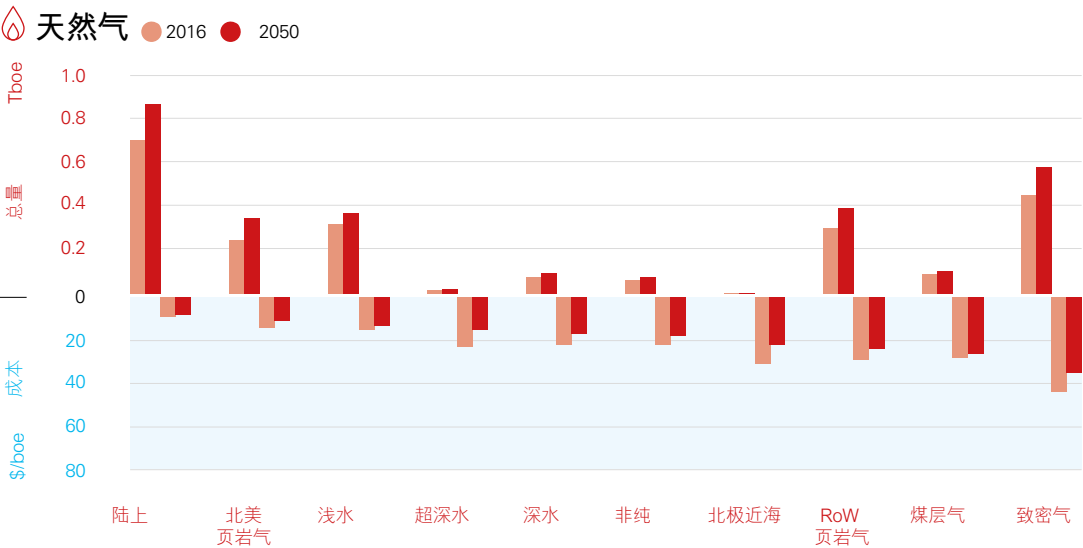
成本范围中的各项资源之间存在着越来越激烈的竞争。

如后文所示，我们的分析表明，技术进步可在改善油气获取和降低生产成本方面扮演重要角色。

*油气田生命周期内开发和运营的总成本。

更低成本，更多能源

2016-2050年因技术进步导致的潜在增量和成本降低。



❗ 此处显示的资源总量不受技术和经济以外的因素影响，如政策因素。

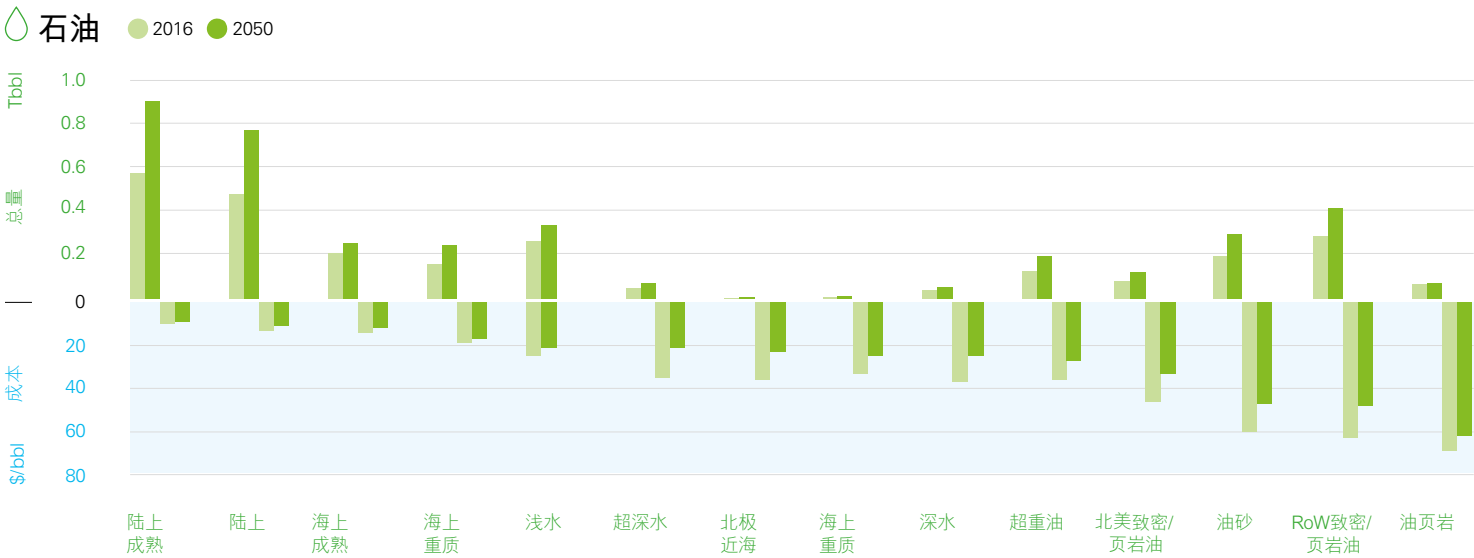
数据不包含未发现的资源。

成本为全生命周期总成本，未折现，即不因资本成本（如通货膨胀）或其他因素而扣减。

NA: 北美地区

RoW: 世界其他地区

来源: IHS Markit 和 BP





詹姆斯·海伍德
(James Haywood)

全球增长战略及战略规划总监

贝克休斯 (Baker Hughes), 通用电气下属公司

66

技术在推动能源行业转型方面仍有广泛潜力, 包括降低资本支出、削减运营成本、增加产量和油藏采收率。

99

2050年的能源生产

尽管近年来取得了技术重大进步, 但通常在一个油田里仅有约35%的石油得到开采, 油气作业中收集的所有数据中也仅有约3%得到应用。由此可见, 技术在推动能源行业转型方面仍有广泛潜力, 包括降低资本支出、削减运营成本、增加产量和油藏采收率。

借助数字技术和实体的发展, 这场转型正在如火如荼地进行。

例如, 通过收集海量数据、将实体和虚拟资产进行数字化组合并实时预测资产参数, 油田可靠性得以优化, 效益也得以提升。此类系统将来自成千上万个传感器的数据加以整合, 提供了实时的可视性和颇有见地的预测分析。

油井正变得愈发复杂化——具备自我调节和感知功能, 可响应油藏, 可自动优化生产, 将干预要求最小化, 降低每桶油的总成本。

自动化和数字化还使检查和维护作业受益。目前, 许多检查任务由人工开展。这一做法不仅耗时、昂贵, 而且充满危险, 经常发生停工检查的情况。

得益于机器人、高性能计算和人工智能等技术, 机器能胜任越来越多的任务, 而且它们干得比人类更出色。近期推出的无人机系统可将检查时间从一个月缩短至几天, 省去了利用绳索和起重机的烦恼。

在基础设施方面, 由复合材料制成的非金属柔性管使得将油气从海上油田输送至地面的“立管”得到了革命性的进步。这种新型的管道重量更轻(减重达30%)、系统更精简、成本更低(成本降低20%), 且风险更小。

在其他方面, 随着可再生能源的产能提升, 预防能源间断的储存系统将迎来越来越大的需求。液态空气储能(LAES)和压缩空气储能(CAES)系统将提供规模更大、时间更长的能量储存选项, 容量可达5-200兆瓦。

以上所列的颠覆性技术仅仅是初露锋芒的新兴技术中的一小部分。其他此类例子还包括增材制造或3D打印、分子及纳米科学、新式的碳捕获技术、以及能量回收领域的进步。这些技术汇集到一起, 将注定推动工作实践现代化, 提高效率, 降低成本, 为能源行业带来新面貌。

欲了解更多有关贝克休斯的信息(BHGE), 请访问: www.bhge.com

提升油气资源可得性

在一些领域，技术对改善油气藏的获取最为有效，这些领域包括地震勘探、提高采收率和油井技术。超级计算机的应用可为地震分析带来益处，它们能够迅速分析结果，并绘制高度详细的油气藏图像。我们预计，地震成像技术将得到进一步发展，对所获取的数据加以处理和解释的能力也将进一步提高。“全波形反演”的应用就是一例。该技术可利用复杂的算法，对储层情况加以精确预测。分析显示，难以获得地震数据的陆上勘探将受益最多，成像的改善将有助于勘探人员更好地优化井位。

改进采收率（IOR）和提高采收率（EOR）技术在继续发展，一些新技法，诸如改变水的盐度、使用纳米粒子等，对既定方法提供了补充。我们的预测显示，到2050年IOR/EOR能够额外带来约5000亿桶石油，使剩余可采资源总量增加约10%。

油井技术的发展为增产、完井和干预带来了新的可能，有望促进资源总量的提升。这将为依靠大量油井进行开发的资源（大多为非常规资源）带来最大的福音。

降低油气生产成本

我们预测，到2050年技术有望将各类油气资源每桶油当量的平均生命周期成本降低30%左右。

资本最密集的资源类型在成本削减方面效果最为显著，例如深水或超深水资源，以及那些需要大量钻井的资源，例如包括致密油和页岩油在内的非常规资源。钻机和平台的设计优化，以及海底和出油管线技术的发展，对深水资源的开发十分有益。

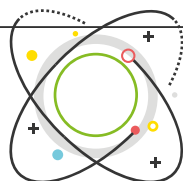
对于陆上油田，如拥有大量井场的页岩油田，一套标准化、可重复使用，具有制造业风格的方法有助于降低成本。生产作业和油田开发的优化也有利于节省成本。

数字化生产

技术改进将促进总量增长和成本削减。据预测，其中有25%的增量和三分之一的成本削减是通过数字化实现的。对此，人工智能有望发挥最重要的作用。



利用数字技术勘探天然气——搭载振动器的卡车在阿曼的沙漠中为BP开展地震勘探作业。



核电在一些地区呈增长趋势（尤其是中国），但在另一些地区则出现下滑，例如欧洲。

整个行业预计还将迎来油井设计施工自动化、设施维护和加工作业，以及产量优化方面的巨大进步。还有一些技术突破目前正处于萌芽阶段，例如各种形式的非机械钻井（利用激光、燃烧器或放电等）。创新的数字技术对防止生产期间的能量损耗也具有关键作用，例如，利用传感器和区块链技术追踪甲烷并减少泄漏。

其他形式的一次能源

一次能源除了石油和天然气之外，还包括煤炭、铀（用于核电）和可再生资源（如水电、风能和太阳能等）。

煤炭仍是目前全球最大的发电燃料来源，并广泛用于住宅和工业用热。煤炭资源充足，分布在50多个国家，全球储量达到1万亿公吨，按照目前的使用速率计算，足够满足未来超过一个世纪的生产需求。但是，煤炭却是所有一次能源中碳含量最高的。当前煤炭在能源中所占的份额呈下滑趋势，这在一定程度上是政策引导和偏好低碳燃料的结果，天然气和可再生能源日益提高的普及度和竞争力也是原因之一。



一艘载有煤炭的驳船航行于上海的黄浦江——截至2016年，中国所消费的煤炭总量是煤炭消费第二大国的四倍以上。



美国爱达荷州的一座水力发电厂——水力发电占该州2016年净发电量的60%。



欧洲最大的漂浮式光伏电站，位于伦敦附近的女王伊丽莎白二世水库，由Lightsource BP修建。

尽管煤炭需求开始趋于平稳，未来数年煤炭消费或仍然十分显著。地下煤气化（UCG）的更广泛应用是煤炭开采领域的潜在趋势。这一过程需要将氧化剂注入煤层，将煤藏转换为气体，再通过生产井采出。

核电站的运行依赖于一种重金属——铀。核电站需要通过链式反应使铀235同位素分裂，从相对少量的铀中释放大量的能量，由此进行发电。现已发现的铀资源较为丰富，足以使用约90年之久。目前，地底和露天开采正逐步被地浸法（ISL）开采所取代。地浸法可将含铀矿的矿石溶解，使铀资源被泵出至地面。将近一半的世界总产量是通过地浸法开采的。核发电会产生有害废料，这些废料在放射性水平降低后通常储存在核电站内或相邻的地区，随后再进行处置，例如，将其置于玻璃箱内并深埋于地底。

许多可再生能源都来自于自然力量，例如风、阳光和水流，这些自然力可直接被转换为电力（见第2.2节）。生物质能则有所不同，它从各种各样的材料中汲取能量，从草木、庄稼到废料。

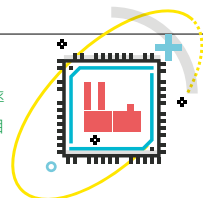
生物材料数千年来就一直是能量的来源，当今的工业化经济体日益将其作为原料，用于生产燃料、电力、润滑油和化学品。当具备低价、充足的原料供应时，生物质可用于发电。随着工业生物技术部门的迅速发展，一些生物性和生物可降解的替代材料已经面世，可取代当今许多油基材料，另外一些全新的材料也应运而生。

➔ 见第2.2节



木屑颗粒——一种用途广泛的生物质能，小至家用锅炉，大至大型发电厂，皆可使用。

数字技术有潜力推动制造工厂效率大幅提高，特别是在运营检测和自动化运行方面。



炼油

大部分原油在开采出来后都会在炼油厂被转换为燃料。主流的炼制流程通常采用成熟技术，它们在未来更可能推动效率提高、流程改进和成本降低，但不会引发转型性的变革（生物产品加工领域可能是一个例外）。预测显示，一般来说追求卓越运营（体现在成本效益、可用炼力、产品优化等方面）比追求新的转换技术更有利于成本下降。

数字技术有望加快上述运营改进的步伐。数字技术有潜力推动工厂效率大幅提高，特别是在运营监测和自动化、维护管理、协调工作安排和增加员工在生产活动中的有效工作时间。

到21世纪20年代中期，能源设施有望使用远程控制开展维护作业，并实现实时流程优化和自动化检查，相关技术包括数据标准化、大数据、可穿戴设备（智能手表、活动追踪器等）、人工智能、机器人以及边缘计算（位于数据源的计算机完成处理功能，同时通过“云”与其他联网计算机实现互动）。

借助这些技术，炼厂将更多地进行预防性维护而非被动维护，进而使停工时间最小化，生产率最大化。这将会带来巨大的益处，因为据预测，机械可用性每提高1%，意味着维护成本降低10%，且安全性也将提高。

旨在将非原油原料（例如天然气、煤炭、生物质、城市固体废物）转换为车辆和航空液体燃料的各项技术，正处于不同的发展阶段。一些天然气制油和煤制油工厂已经投入商业化运营。

面向道路车辆的生物燃料在一些地区已实现规模化生产，例如，美国利用玉米生产乙醇（汽油的替代品），巴西则利用甘蔗生产乙醇，而欧洲成为了生物柴油的最大市场。面向飞机的生物喷气燃料市场虽小，但随着航空业加紧实现到2020年限制温室气体排放的目标，这一市场将有所增长。

➔ 见第2.3节



BP的Whiting炼油厂——相比转型性技术变革，炼油厂将因数字化和促进效率提高的其他进步而获得更多益处。



阿德南·Z·阿明 (Adnan Z Amin)

总干事
国际可再生能源署 (IRENA)

66

可再生能源正在以前所未有的速度推动全球能源系统转型。有一个事实目前日渐明朗：低碳技术不再是能源系统的未来，而是能源系统的当下。

99

技术推动可再生能源的兴起

随着可再生能源成本的下降，全球能源系统正在以前所未有的速度进行转型。自2010年以来，太阳能光伏(PV)和陆上风力发电的成本分别降低了73%和23%，两者正与化石燃料进行着激烈竞争，其中陆上风力发电甚至处在平均成本的下端。

这一不断下滑的成本轨迹有望从根本上重塑全球能源格局。我们相信，到2020年，所有形式的可再生能源——包括聚光太阳能发电(CSP)和海上风力发电——都将在满足新增发电需求方面与化石燃料进行竞争。这一事实让可再生能源在商业上具备了极强的吸引力。

在一系列引人注目的数字背后，持续进步的技术才是故事的真正主角。新的太阳能光伏电池结构提高了效率；更大型的风力发电机扩大了覆盖地区，增加了同一处设施的发电量；高250米的漂浮式风力发电机（如为苏格兰Hywind项目所开发的发电机）为海上技术的未来开辟了新局面。

聚光太阳能发电也不容忽视，2017年的竞拍结果预示在在某些地区，它有能力在价格上与化石燃料相抗衡。例如，位于迪拜的700兆瓦太阳能项目采用熔盐热储能技术，可不分昼夜地发电，每兆瓦小时的成本为70美元左右，足以在无补贴的情况下与化石燃料发电相竞争。该案例表明对全球能源系统而言可调度太阳能是可行且经济的。

发电技术仅仅是能源转型历程中的一小部分。固态储能技术持续进步，而其成本正急剧下降。尽管抽水蓄能系统当前在装机电力储能总容量中占据了主导地位，我们的分析显示到2030年，诸如锂离子电池和液流电池等固定电池的成本有望降低66%，而储能总容量将因此增长17倍。

这一趋势反映了一种新的能源范式——能源生产与消费的方式将变得智能化、灵敏化和低碳化，其技术将变得规模化、分散化和数字化。因此，有一个事实已日渐明朗：低碳技术已经不再是能源系统的未来，而是能源系统的当下。



欲了解更多有关IRENA的信息，请访问：
www.irena.org

技术如何影响未来的发电行业？

当前，电力占一次能源需求的42%。与交通和供热相比，不论在经济层面还是规模层面，电力在降低温室气体排放方面拥有更大的潜力。

发电市场目前拥有非常广泛的选项，煤炭、天然气、水力、核能、石油、陆上和海上风力、生物质、太阳能光伏和其他可再生能源都可用于发电。

不同电力来源之间的竞争态势较为复杂，许多因素在其中发挥作用，包括技术发展、供应链成熟度的区域性差异、系统应对中断的适应力、储能技术的改进、资本成本、风力和太阳能资源的质量、化石原料的相对成本、碳定价，以及其他环境政策。

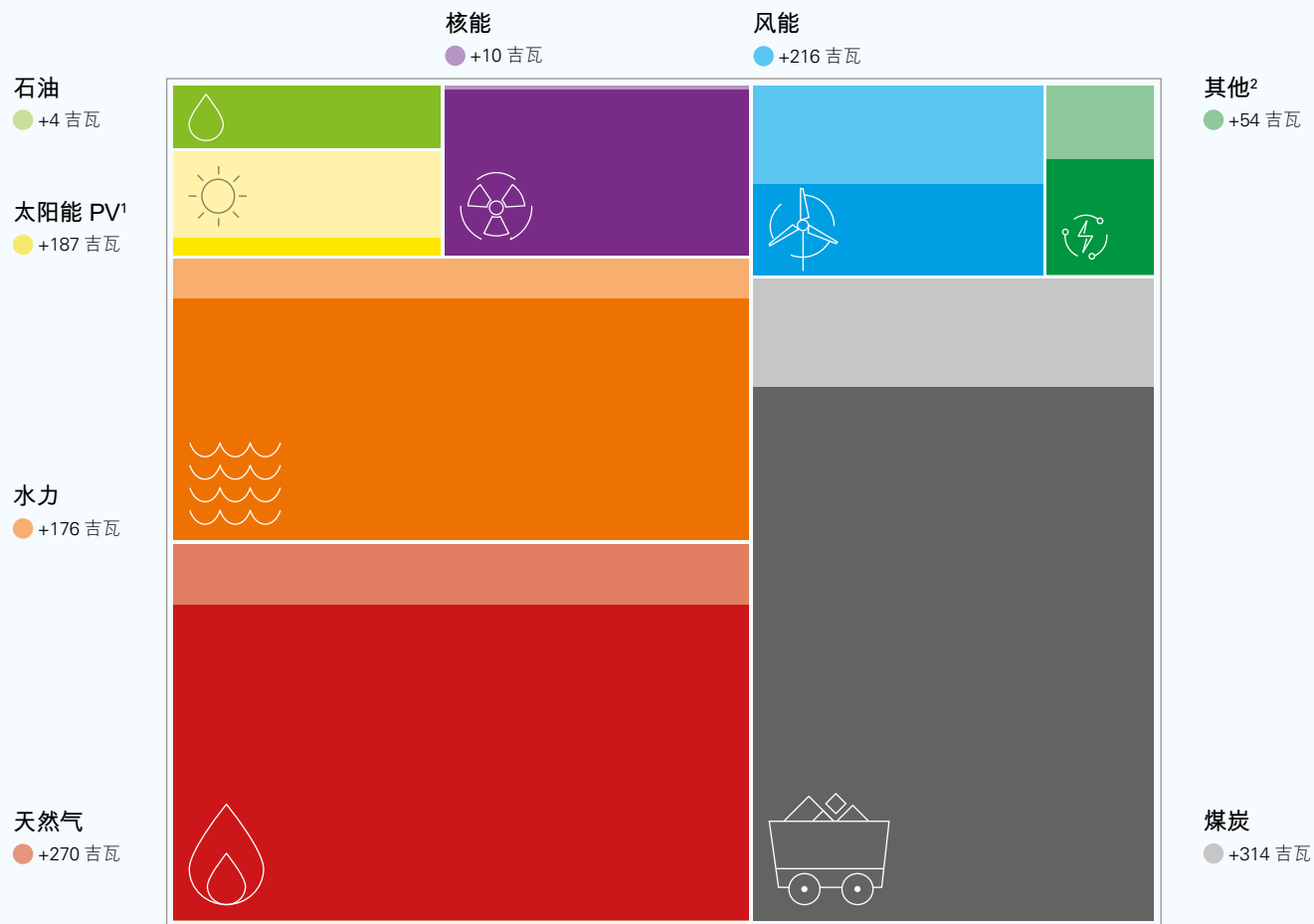
当前趋势

2015年，约39%的世界电力需求依靠燃煤发电满足，23%依靠天然气、16%依靠水力、11%依靠核能、4%依靠石油、3%依靠风力、1%依靠太阳能，余下的份额依靠其他资源提供。

在能源需求持续增长之际，电力部门正在经历一场重大转型，可再生能源份额增长迅速，天然气份额持续扩张，而煤炭消费趋于平稳。在发电方面，增长最快的能源非风能和太阳能莫属：截至2015年（本分析的基线）的五年间，风力发电量增加了一倍，而太阳能装机容量增长至原先的六倍。煤炭仍是全世界最大的电力来源，其在2010至2015年全球新增发电量中占据了最大份额。然而，出于经济和环境因素（包括为了改善空气质量和降低温室气体排放量），煤炭消费量已开始趋于平稳。

世界电力格局的变革

2015年全球装机容量概览，2010-2015年的装机容量变动情况已标示于图中。



2015年总上网容量：6400吉瓦

关键: ● 深色阴影: 2010年 ● 浅色阴影: 2010-2015年

¹ 光伏。

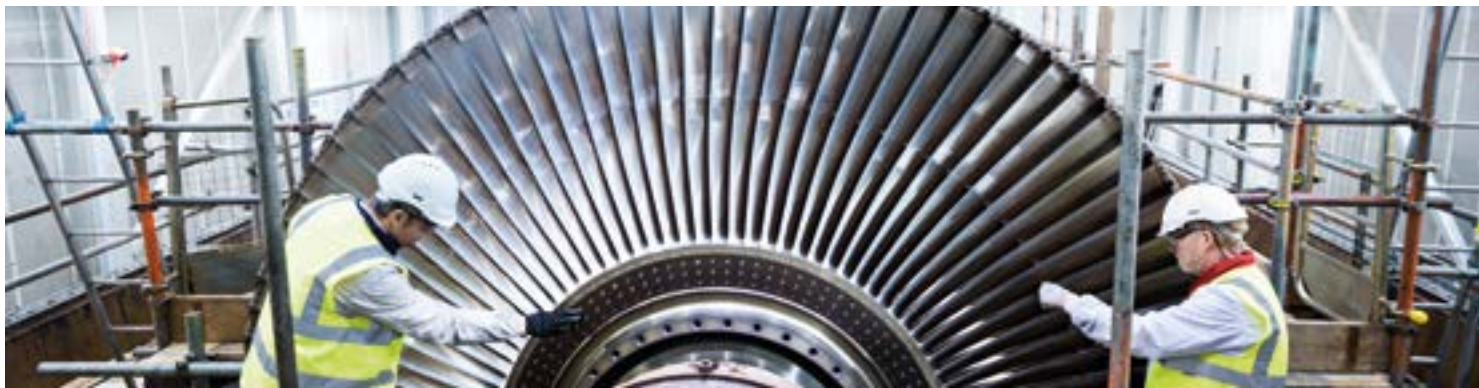
² 生物质、地热、海洋和聚光太阳能。

注意：尺寸大小与装机容量成正比。

基于国际能源署收录于《世界能源统计与平衡》的数据© OECD/IEA

2012&2017, www.iea.org/statistics。许可: www.iea.org/t&c; 经BP修订。

① 2010至2015年间，全世界大多数新增装机容量来自煤炭，紧随其后的是天然气、风能、太阳能和水力。可再生能源新增装机容量大致同煤炭和天然气的合计新增装机容量相当。



在一座燃气发电厂，工程师们对蒸汽轮机进行检查。燃气轮机联合循环发电厂同时利用燃气轮机和蒸汽轮机发电。

天然气发电也有所增长，这是因为其具备经济性和灵活性，且可为可再生能源提供后备支持。水力发电始终稳步增长，而欧洲核电的滑坡被中国核电的大幅扩张所抵消。与此同时，中国还大力投资可再生能源，以满足其不断增长的需求，降低煤炭依赖度。

发电技术

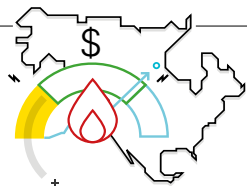
尽管**燃煤**发电的需求已经开始放缓，但它仍是重要的电力来源，而人们正在利用技术寻求改进。如果所有燃煤发电厂都采用现代的超临界蒸汽技术，在超高温高压系统中作业，那么全世界所有燃煤发电厂的平均效率将从33%左右提高至45%，甚至更多。然而，由于煤炭的含碳量较高，燃煤发电的温室气体排放量依然显著高于燃气发电。

燃气发电厂在最近数十年来已变得更加低价、更加灵活，燃气蒸汽联合循环（CCGT）在其中发挥了主要作用。这是一种将燃气轮机和蒸汽轮机相结合的高效能源生产技术。首先利用燃气轮机发电，其产生的余热被用来产生蒸汽，而蒸汽又可驱动另一台汽轮机。燃气和燃煤发电厂可利用碳捕获、利用与封存（CCUS）技术，对二氧化碳排放加以捕捉和储存。尽管CCUS目前尚未得到大规模应用，大多数现已装机的CCUS都将其捕获的二氧化碳用来提高石油采收率。

近年来，**核能**发电量保持大体平稳。有些国家削减了核电投资，有些（特别是中国）则实施了大型核电新项目。

新型核设施包括小型模块化核反应堆（SMRs），其目前还处于示范阶段，但理论上有望在工厂修建并相对迅速地部署。许多国家正在探索核聚变的可能性，该技术将亚原子粒子聚合而非分裂，但是其中的根本性难题尚未被攻克，因此该技术到2050年可能难以大规模部署。

随着可再生能源发电的成本一降再降，其更大规模的部署指日可待。然而，在其大规模部署的同时，仍需要其他资源作为后备补充，这是因为风能和太阳能都具有间歇性。



在美国，天然气已超越煤炭，成为主要发电来源。

我们的预测显示，得益于技术进步（更高的塔架、更长且更轻的风车叶片，以及更为高效的控制系统），**风力发电**的成本将持续下降。这些技术进步将拉低每兆瓦（MW）发电的投资成本，更多的风能因此被捕捉。诸多新兴风能技术有望发挥作用，这其中就包括风筝发电机和无扇叶发电机，它们通过震动而非旋转进行发电。我们的计算表明，风力发电（含陆上和海上）的全球累计产能每翻一番，其平均成本将降低19%。

太阳能光伏（PV）项目的成本也有望持续降低，这是多个因素作用的结果，包括生产成本的降低和电池效率的提高。新兴的太阳能电池板技术包括光热发电（集储能和发电于一体）、新式材料电池（如钙钛矿和锌黄锡矿）以及层叠电池（堆叠两个或多个子电池，从而增大光谱捕获范围）。我们的计算表明，太阳能模块的全球累计产能每翻一番，其平均成本将降低23%。

水力发电的技术已经成熟，其在未来将迎来技术提升，而非技术转型。水电设施通过发电机对河流的力量加以利用。水电设施还可用于储能，这一功能可为具有间歇性的可再生能源提供后备支持，因而其重要性与日俱增。



位于美国科罗拉多州的BP Cedar Creek风电场——在2010-2015年间，风电是全球增长速度最快的三大能源形式之一。

一些可再生能源，诸如**地热能**，有望在特定区域发挥作用；另一些可再生能源，诸如规模更大的**波浪和潮汐能**，目前还处于早期阶段，仍需要大量的投资和技术开发才能继续发展。

燃油发电仍在一些国家使用，例如石油富饶的中东国家，但一般而言其竞争力不及其他替代能源。

2015年的电力成本

不同发电形式的成本在不同区域差异显著，这使得各地发电技术的组成结构也各不相同。

在北美，天然气和煤炭资源都非常充足，因而两者一直激烈争夺着发电份额。

在2015年（本分析的基线），现有燃煤发电厂的平均发电成本稍低于燃气发电厂的成本。但是自2015年起，随着页岩气产量的上升，燃气发电的平均成本进一步降低，天然气也取代煤炭成为在美国使用最多的发电原料。美国发电行业还在经历一场转型，随着燃煤发电厂关停及新型燃气发电厂的效率提升，天然气在美国电力部门中的实力进一步加强。**2015年的数据还表明，天然气发电的平均成本低于风力发电**，但风电成本正在呈迅速下滑的态势，在风力较大的地区（如美国中西部），风电的成本有望低于燃气发电。太阳能发电的成本也在迅速下降，个别地区下降极为显著，尽管平均而言在2015年基线上太阳能的成本要高于风能。核电的平均成本则较其他资源高出几倍。

在欧洲，大体格局较为类似。但是由于缺少有利的资源条件，一般而言欧洲新建燃气发电厂、太阳能发电厂和风电场的平均成本至少比北美高出30%，而其核电的成本也同样高昂。中国则呈现出另一番局面。得益于丰富的煤炭资源，燃煤发电是最经济的发电来源；核电的经济性次之，由于密集的修建计划，中国的核电成本仅为欧洲和北美成本的三分之一。中国的可再生能源同样增长迅速，风能和太阳能产能都高居世界第一。

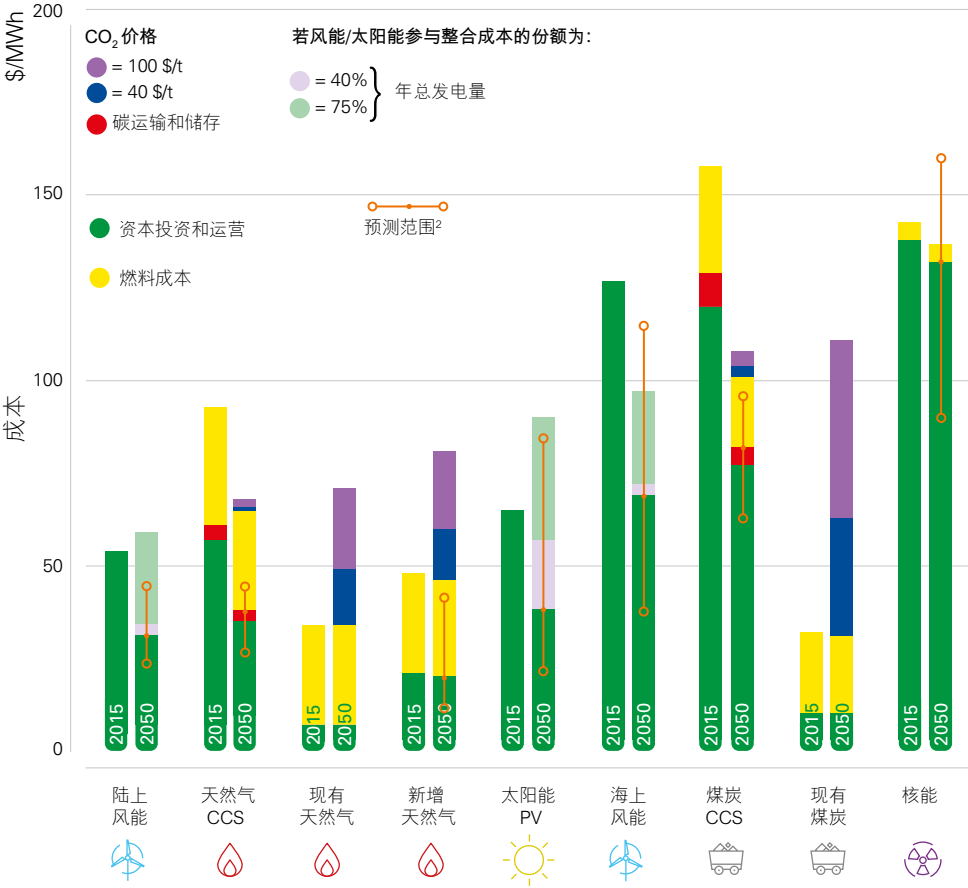
到2050年相对成本的变化

2015到2050年间，技术经济分析表明各地区的发电技术构成将发生改变。其中，随着技术成本下降¹，风能和太阳能发电将会增长迅速。

模型显示到2050年，陆上风电将是中国、欧洲和北美最低价的新增电力来源，太阳能光伏紧随其后。

2015年和2050年的北美发电成本

2015年，天然气和煤炭是最便宜的电力来源，但是在2050年之前，陆上风电的成本有望低于新建的燃气发电厂。太阳能的竞争力不容小觑，但渗透水平较低。脱碳天然气将成为最低价的发电来源，可以灵活发电，并有潜力为可再生能源提供后备支持。



¹ 水电不在本分析的范围，因为剩余的可用水资源已相对有限，尤其是对北美和欧洲来说。

① 假设：煤炭为64 \$/t；天然气为4 \$/mmbtu；加权平均资金成本为7%（碳捕获和储存及核能为10%）；CO₂ 价格仅适用燃烧排放。

图片显示的平均成本代表的是新增设施的平均成本代表。不论是当前还是2050年，成本跨度都较大。有优势的地点和较低的加权平均资金成本（WACC）都是资本计算中尤为重要的因素之一，可使得成本低于平均值，如图所示。

来源: BP

² 包括资本投资和运营的预测范围。

在北美，天然气将为可再生能源发电提供最低价的后备支持，当碳价为100美元/吨二氧化碳时，运用CCUS（碳捕获、利用与封存）对燃气发电厂进行脱碳将具有成本效益。

欧洲的局面与北美类似，但成本略高，这反映出欧洲缺乏有利的资源条件。

中国采取计划性模式，使得其核电成本仅为欧洲和北美的约一半。水力和煤炭是中国可再生能源的后备选项，而就煤炭而言，需要更高的碳价才能使CCUS具有经济性。

应对风能和太阳能的间歇性

风力和阳光不但变化无常，而且具有间歇性，因此如果使用风能和太阳能进行发电，则必须具备可靠的后备支持。其他发电形式、电池中储存的能量以及水电站都可以提供此类支持。利用需求侧的响应制度，降低消费者电力消费，也是应对间歇性的方式之一。

虽然风能和太阳能的资本投资和运营成本预计将会下降，随着越来越多可再生能源得到部署，应对间歇性的成本（即“整合成本”）将有所增加。

我们的模型中所引入的间歇性成本来自伦敦帝国理工学院开展的一项新研究。该研究建模分析了当风能和太阳能合计占发电总量10%、40%和75%时的整合成本。

该研究分析了存在两类可再生能源的情形。第一种情形为“太阳能主导”，此时太阳能占可再生能源构成的80%，风能占20%——这是中东或南欧可能出现的局面。第二种情形为“风能主导”，其中风能占80%，太阳能占20%——此局面可能在美国中西部或北欧出现。

模型显示，太阳能的整合成本上涨尤为显著，因为当渗透水平较高时，太阳能与需求之间的相关性较低——入夜时正值需求高峰，而此时太阳已落山。不过，在气候炎热、光照充足的国家，太阳能在为制冷系统供电方面颇具成本效益。与太阳能相反，风力不论昼夜都会有，虽然强度变化无常，但整合成本仍会较低。

假设在一个北美的电力系统中，可再生能源的

可再生能源的间歇性

太阳能和风能有昼夜之差，因此需要为之提供后备支持。本图表显示了在光照充足情形中的能源系统（如西班牙），其可再生能源构成为太阳能80%，风能20%。图中所展示的是可再生能源占年电力供应10%、40%和75%时的状态。

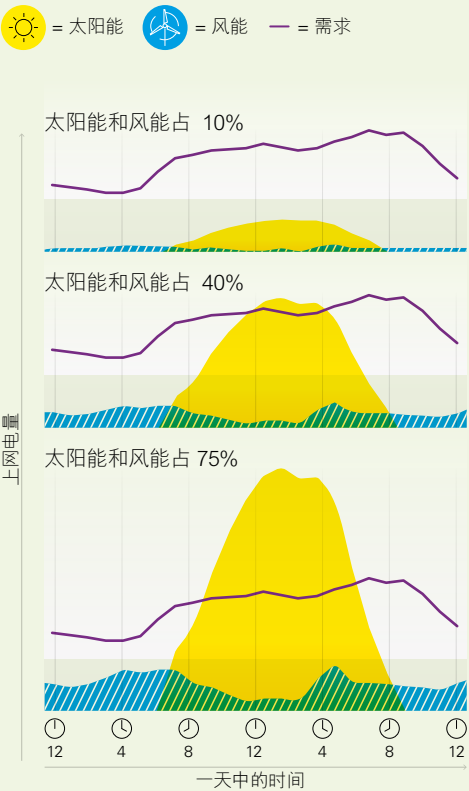
可再生能源除了在一天之内存在差异之外（如本图所示），不同的季度和地理位置也存在差异。

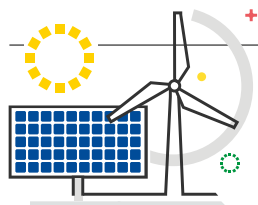
① 紫色线条表示每日电力需求，其在晚上6点至8点左右达到峰值。

当太阳能和风能占据年电力供应40%时，则需要有可观的后备支持。

当这一数值达到75%时，可再生能源所产生的发电量足够白天使用，但不足以满足夜晚的需求量。其中部分需求是不固定的。其他平衡供需的方法包括储存超额供应量待到夜晚使用，或者通过后备支持（如天然气）进行供给。

来源: BP





可再生能源具有间歇性，需要后备支持，就此而言，风能所需的成本低于太阳能。

份额为40%，且由风能主导，则研究预测，每新增1兆瓦时（MWh）电力所需的整合成本不足5美元/MWh。如果此例以太阳能为主导，则整合成本可达到20美元/MWh。当可再生能源占电力总供给的75%时，如果以风能为主导，则整合成本为25美元/MWh，如果以太阳能为主导，则整合成本为55美元/MWh。应用这些成本数据，并考虑到在一个限制碳排放的世界中的其他燃料，我们预测以陆上风能为主导的可再生能源系统在2050年仍将具有竞争力，即使该系统已提供75%甚至更多的电力；以太阳能为主导的可再生能源系统在其占据电力供应大约40%份额时也会具有竞争力。

可再生能源的后备选项

许多方式都可以为可再生能源提供后备支持，选用何种技术具体取决于该技术是否具有灵活性。除了将传统发电方式（如燃气发电或核电）上线之外，还可以释放电池或水电站所储存的能量。借助抽水储能技术，释放的水能还可被抽回大坝中供下次释放。压缩空气储能（CAES）技术可将空气压缩并存入地下洞库，需要时再将其释放，用于驱动涡轮发电机。另外，还可利用需求侧技术来调节需求，进而在间歇性的可再生能源发电中满足峰值需求。电网互联也是方法之一，当有需求时，它能够让电网之间形成互补。

当需求达到顶峰时，需要短暂的“峰值调节”服务。对此，铅酸电池和压缩空气是目前最经济的储能选项，抽水储能也较为经济，不过据预测在2050年前，锂离子电池和液流电池将具备竞争力。目前，电网规模的锂离子电池储能技术已得到初步应用。

持续时间较长的“供需平衡”服务需要在需求较低时储存电力，待需求增长时予以释放。在此方面，抽水储能已得到广泛使用；在具备条件的情况下，燃气发电是最高效的后备支持。许多新型电池将在未来得到愈加广泛的使用。

21世纪电池

过去数十年，电池业一直为铅酸电池所主导，但是新型电池目前正在迅猛发展，在电力储存、电动汽车（见第2.3节）和其他应用领域具有巨大潜力。高能量密度的锂离子电池的成本自2010年以来显著降低，尽管何时才能引发电池业的变革目前仍存在不确定性。其他新技术包括空气金属电池、液流电池和固态电池。空气金属电池利用空气中的氧气对诸如锂、锌等金属进行氧化，并从这些化学反应中发电。液流电池利用一种电化学电池，将带电液体泵出，形成电能，再将这些能量置于装有液体电解质的外部储罐。由于其结构简单，增加液流电池蓄电容量所需的成本相对较低。固态电池以固体材料（如玻璃）代替液体或聚合物电解质。与锂电池相

比，其结构可允许更高的能量密度。固态电池不含可燃电解质，因而具备安全优势。

➔ 见第2.3节

右图：一个假想的电网级电池系统。电池在21世纪不断演化的能源系统中扮演着关键角色，其成本正不断降低，性能则日益强大。电池的作用包括驱动电动汽车、为可再生能源提供后备支持、在电网中蓄能以平衡供需等。



其他选项——氢和分布式系统

氢是一种零排放的能量载体，可用于发电、也可用作交通和供热的燃料，前提是其成本需降低至有竞争力的水平。

氢是可通过电解水的方式利用多余的可再生能源制成，也可通过甲烷水蒸汽重组转化法制成。一旦生成后，氢可在压力作用下储存于地下洞穴、管道或容器中。一些研究表明，氢可按照最高10%的体积比例在天然气管网中与天然气混合，无需进行系统改进即可用于供热（不论工业还是家用）或发电。

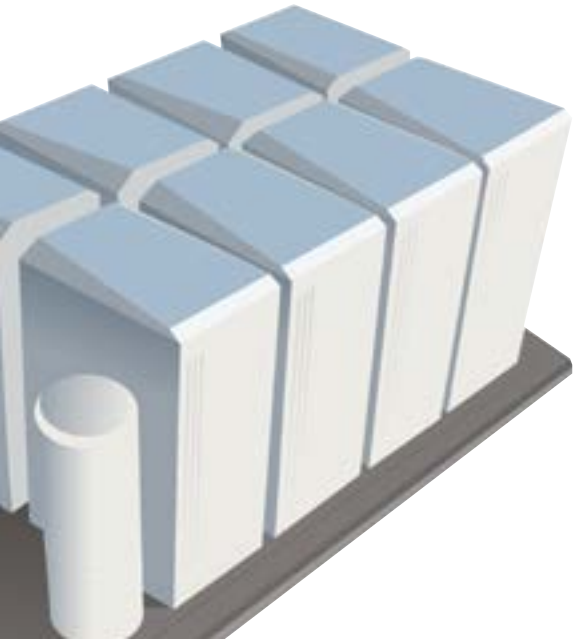
例如，夏季期间利用太阳能产生的多余电能可被转换为氢气存储起来，用于冬季供热和供电。传统发电厂将天然气和氢气共同燃烧用于发电，从而为可再生能源发电提供另一种低碳的后备支持。氢还可用于燃料电池，包括电动汽车所使用的电池。

我们的分析表明，若要使氢气广泛普及并使其有能力与其他燃料竞争，则氢气的生产、压缩、储存和运输成本需要大幅降低，并且还需要对现有的天然气基础设施进行升级。不过，借助技术开发和部署方面的重大投

资，由全球商界牵头建立的氢能委员会（Hydrogen Council）预测到2050年氢能将占据能源总消费量的20%左右。

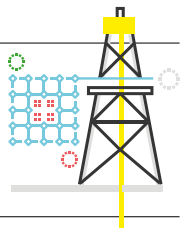
➔ 见第 2.3 节

我们还探讨了分布式电力系统，并发现当存在大规模的互联网络时，集中式的电力供应将比分布式电力供应（例如小规模太阳能光伏和电池结合使用）更低价。



🔥 = 氢来源
— = 管道

法国液化空气公司（Air Liquide）在西欧拥有并运营多条氢气管道和多个氢制造基地，为交通用加氢站和工业设施供应氢气。这些管道有望进一步扩张，大量氢气将得以储存，用于发电或为电池驱动的车辆供电。



到2050年，数字技术可使净电力需求降低25%以上。

碳捕获、利用与封存（CCUS）

人们普遍认为CCUS作为一项具有成本效益的工具，有潜力在减排方面发挥关键作用，并且有助于实现《巴黎协定》目标。CCUS可应用于燃气、燃煤或利用生物质发电的电厂，也可用于能源密集型工业设施，由此捕获的二氧化碳既可用于商业用途，例如用于

提高采收率（EOR），也可安全储存于地表之下的适当地层。

相关技术已得到证实，并准备投入使用。然而，为充分实现CCUS的潜力，打造一个碳氢化合物得到优化利用的低碳能源系统，还需要更快地扩大CCUS的规模。只有获得了相应的政策支持，进而大幅降低成本并对碳排放进行合理定价，CCUS才有望得到更广泛地部署。

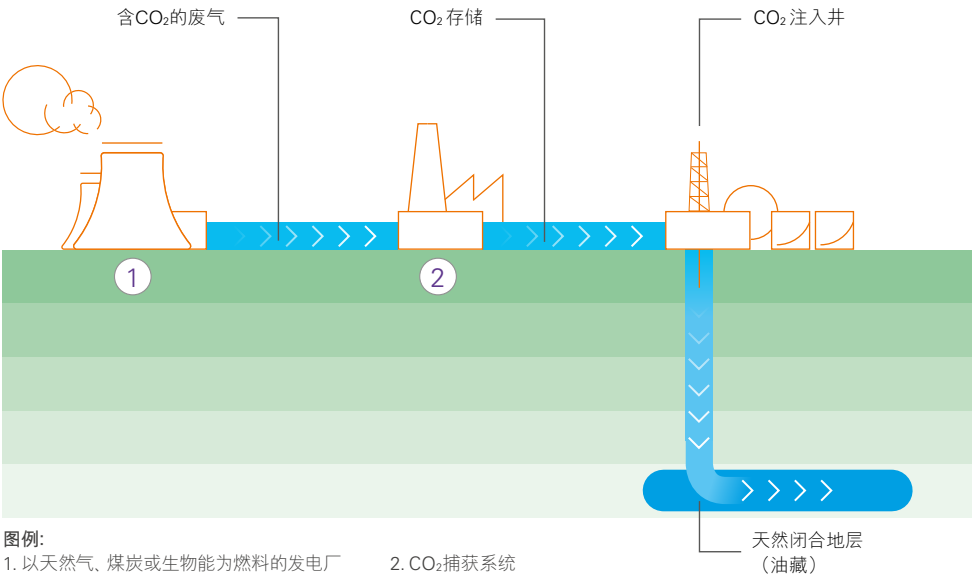
数字电力

据预测，到2050年数字技术可使总电力净需求降低25%或更多。一些数字创新（如建立数据中心和智能化城市）有可能增加电力需求，但这一需求增长将被因数字技术带来的节能所抵消。在预测净节能总量时，已将电动汽车充电的影响考虑在内。预测显示，到2050年电动汽车充电将使全球电力需求总量增长5%至10%。

2025年之前，带动成本下降的主要效率提升将出现在供给侧，这是因为发电厂和作业方将利用数字技术优化运营并减少能量损耗。2025年之后，需求侧将迎来大幅节能，其中一个原因是家庭和企业从利用智能仪表向全面接入数字化网络过渡，借助监测和控制系统使需求最小化。

工厂、办公室和其他工商业设施的节能效果最为显著。这些地方目前的用电量比家庭用电量要多得多。

与此同时，包括人工智能在内的技术进步必将在供给侧掀起一轮节能浪潮，而先进的计算技术将有助于运营商优化其电网运营。

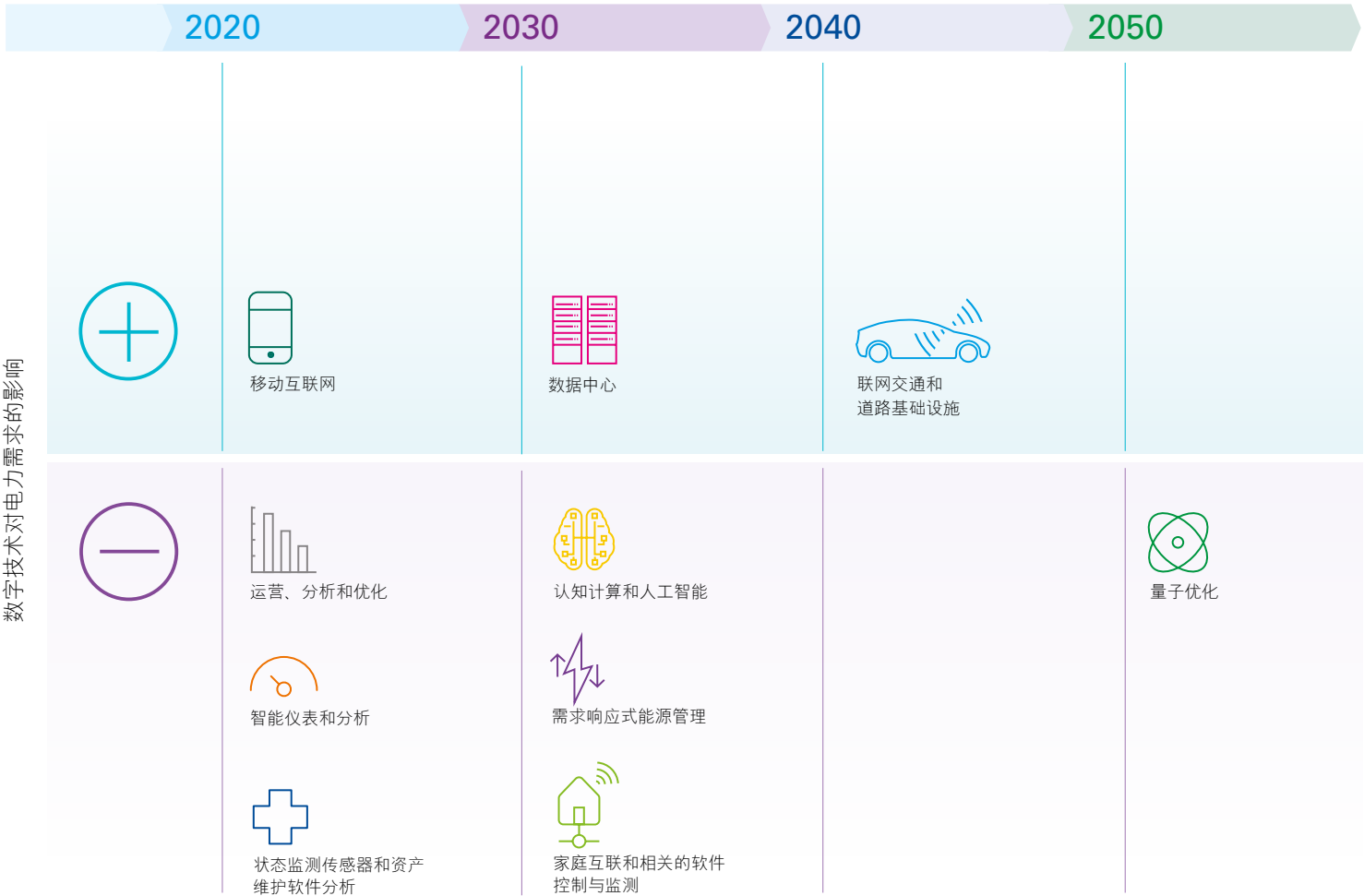


❗ 碳捕获、利用与封存（CCUS）技术将二氧化碳捕获，而非任其排放，从而将来自发电站或其他工业设施的碳排放降至最低水平。已捕获的二氧化碳可加以利用（例如，可注入油田以促进产量提升）或储存（通常储存在地层中）。

来源: BP

数字技术如何影响电力需求

数字技术预计将导致电力需求净减少，原因在于电力需求的增加将被数字技术实现的节能所抵消。



❗ 图标显示了数字电力领域的一些关键数字技术预计何时发挥其最大影响力。

⊕ 技术导致电网需求增加的情形

⊖ 技术带动电网需求降低的情形

来源: BP



菲尔·谢泼德 (Phil Sheppard)

英国国家电网
网络战略负责人

66

随着新型发电方式的使用，燃气发电将为可再生能源发电提供后备支持，我们也在直接向家庭和工业用户提供能源，因此有充分理由将燃气网络和电力网络视为一个整合系统。

99

英国电力网络之变革

英国的电网正在变得更加环保。在2017年，英国30%的电力来自于清洁发电，2012年以来，发电产生的二氧化碳量已经减半，从每千瓦时508克 (gCO_2/KWh) 降至237克。在某个较短时间内，我们的碳排放量曾为73 gCO_2/KWh ，甚至低于2030年100 gCO_2/KWh 的目标。2017年4月21日这一天，我们尝试关停燃煤发电，这是自1882年以来首次实现无煤发电。

这一改变是政策和市场变化的结果。2010年以来，我们的化石燃料发电量已减少超过16吉瓦 (GW)，我们现在有16GW的海上和陆上风电，在过去的几年间，光伏发电装机容量已达12GW。

我们预计变革的步伐将进一步加快。剩余13GW的燃煤发电将在2025年全部被淘汰，间歇性的可再生能源发电配合电池使用将成为大势所趋。这一方法使行业参与者有可能在低价时储能，在高价时再将其销售给系统运营商以维持系统的运行。采取切实行动推动技术进步和提高学习能力的速度，已超过了政策和法规的制定速度。

随着我们越来越多地使用可再生能源发电来应对气候变化，并随着燃煤发电被淘汰，市场将进一步转向燃气发电以平衡风能和太阳能发电的间歇性。

天然气供应充足，存在于天然气输送系统中的能源比电力系统多三倍，冬季甚至高出五倍。然而，随着包括热电联产系统在内的新型发电方式的使用，燃气发电将为可再生能源发电提供后备支持，并且我们也在直接向家庭和工业用户提供供热和烹饪所需的能源，我们有充分理由将燃气网络和电力网络视为一个整合系统。这种方法将使运营商得以理解和管理交易与业务，并使消费者以最低的价格和最便利的方式获取能源。

这些变化要求我们持续创新与合作，将成熟技术与新技术相结合。我们正在探索人工智能 (AI) 的使用，研究如何能够改良数据和优化整个电力系统，而不仅仅是电力传输。我们正在通过我们的“系统需求和产品战略”，探索未来的真实需求。我们致力于合作开发服务以保证所有类型的技术和供应商都能参与市场竞争。

作为国家电网系统运营者，我们必须持续为我们的消费者提供一个稳定和安全的系统，助力建设低碳社会，让消费者的钱花得物有所值。



欲了解更多关于英国国家电网的信息，请访问：www.nationalgrid.com/uk

技术如何改变未来交通？

由于部分或完全由电力驱动的车辆将与使用内燃机的车辆在成本上具有竞争性，技术发展势必将在未来的几十年内促使交通业转型。与此同时，自动或无人驾驶汽车以及共享出行将大幅增长。卡车使用的燃料可能发生变化，有些可能实现电气化，例如在建筑区使用的卡车。飞机和船舶较不适合电气化，但所使用的燃料种类也将发生变化。



随着航空业努力控制其温室气体排放，生物燃料飞机的使用势必大幅增加。



充电——移动快速充电系统，例如由BP的合作伙伴FreeWire提供的产品，将随着电动汽车数量的增长而为人所熟知。

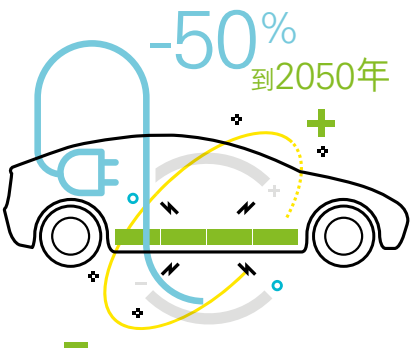
出行需求对整个社会来说不可或缺，交通行业占全球一次能源使用的20%。我们现在的预估显示，全世界汽车、厢式货车和轻型卡车，即全球“轻型车辆”的总量可能从2015年12亿辆增长至2050年的26亿辆。

现今的汽车



让位——内燃机汽车在世界道路上行驶了一个世纪后，无数的电动汽车和混合动力汽车正在加入这一车流大军。

现今，全球的交通工具主要包括基于内燃机（ICE）的汽车，燃料为汽油、柴油、生物燃料、压缩天然气（CNG）和液化石油气（LPG），2015年的轻型汽车中只有1%为电动汽车（EV）或混动汽车。



到2050年，纯电动汽车每公里的行驶成本可能下降50%左右——略微低于混合动力汽车和传统内燃机汽车成本。

现今，电动汽车与其他汽车相比更为昂贵，尽管政策和激励措施使它们对消费者更具吸引力。汽车制造商计划使用一系列技术大规模生产电动汽车，参与市场竞争。

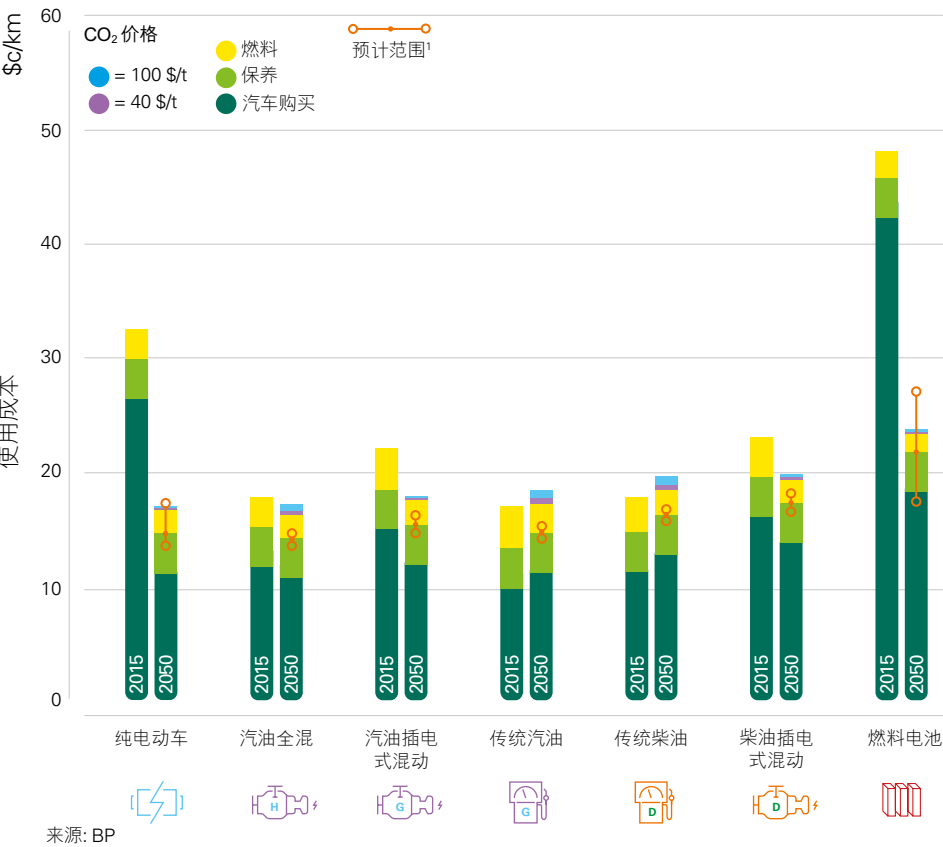
- 混合动力汽车（HEVs）将内燃机和一个或多个电动机及一个电池组组装在一起。它们包括：
 - “轻度”混合，电动机驱动以支持内燃机，但不能独立驱动汽车；
 - “全”混合，内燃机和电动机交互运行或一起运行，电力驱动里程有限。

- 插电式混合动力汽车（PHEVs）使用ICE、电动机和可通过电网充电的蓄电池。
- 纯电动汽车（BEVs）或全电动汽车只使用电动机，完全由可连接电网进行充电的蓄电池进行驱动。

燃料电池汽车（FCVs）为脱碳和提升空气质量提供了另一种选择方案。此类系统在将氢气和氧气转化为水的同时产生电能作为动力。尽管在发电或生产氢气的上游供应链中可能出现温室气体排放，但是BEVs和FCVs的排气管不排放任何温室气体。

2015年和2050年在欧洲使用一辆中型汽车的成本

电动、混动和传统汽车成本有可能在2050年前趋同——不考虑任何政策的影响。



来源: BP

我们的分析设想: 装有一个60kWh电池的蓄电池电动汽车的行驶里程为200英里; 一年的行驶里程为20000公里, 汽车寿命为10年。二氧化碳成本的计算基于从“油井到车轮”的全生命周期排放。

¹ 包括从汽车购买到保养成本的预计范围。

~17 \$/km

预计到2050年, 传统汽车、混合动力汽车和电动汽车的成本将趋同。

成本趋同

根据我们的分析, 在2050年前的欧洲, 购买、驾驶和为电动汽车供能的成本将下降, 并能够与内燃机汽车竞争。这一模型显示, 到2050年, 一辆纯电动汽车在生命周期内的平均成本将下降50%左右, 稍微低于一辆混合动力汽车或传统内燃机汽车的成本。

现今燃料电池汽车的购买价格几乎是内燃机汽车的三倍, 虽然前者的整体成本可能降低一半, 但由于其资本成本相对较高, 与其他类型的中型汽车相比, 仍然不具竞争力。

由于纯电动汽车、插电式混动汽车和内燃机汽车的潜在竞争力非常接近, 因此非技术相关成本因素, 尤其是政府政策, 可能将对2050年的汽车队伍构成发挥决定性作用。事实上, 尾气二氧化碳排放目标已经在促使汽车制造商销售更多的蓄电池和插电式电动汽车, 提升城市空气质量的行动也使电动汽车更受青睐。

电气化的不确定性

交通电气化有诸多不确定性，预计到2050年纯电动汽车的数量将处于几亿辆到十几亿辆之间。造成这种不确定性的因素很多，包括：

- 电池成本
- 行驶距离
- 汽车充电所产生的额外电力需求的影响
- 环境效益范围
- 汽车数量和共享出行增长的影响。

立法目标等政策影响并不是这些技术-经济预测的考虑因素，但会对所有这些领域产生影响。

电池成本

我们的计算考虑了我们对于电池成本下降的最新估计，这在一定程度上基于来自大型汽车生产商的数据。60kWh的纯电动汽车的每千瓦时（kWh）电池成本预计将从目前的超过200美元/kWh降至2050年的50美元/kWh。电池正得到改良，充电时间缩短，蓄电池容量扩大（可扩大里程）、重量下降。我们的计算推测，如果锂离子化学电池、固态或金属空气电池设计相继投入使用，电池

性能将逐步提升。

➔ 见第2.2节

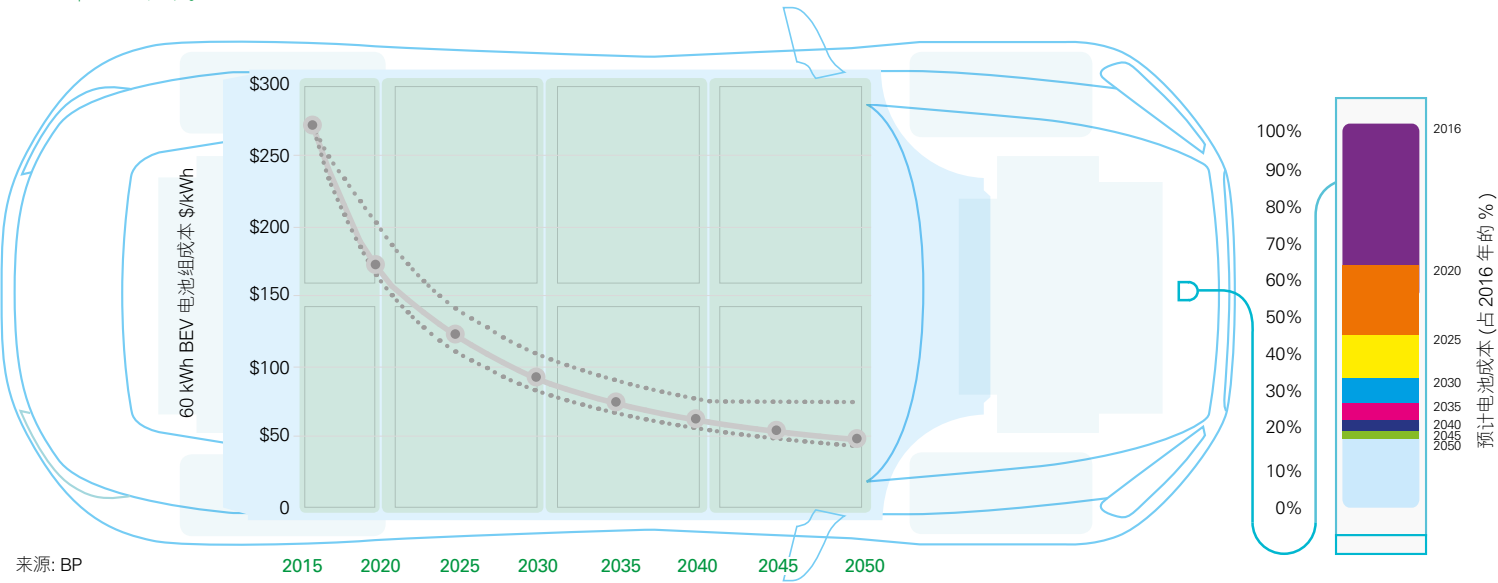
行驶距离

电动汽车更高的购买价格可被它们较低的燃料成本所抵消，也就是说随着电动汽车行驶距离的不断增加，单位公里成本将随之下降。所以，电动汽车低廉的行驶成本使它们适用于共享汽车领域。

2015年至2050年预计电池成本曲线

以目前的发展速度，汽车和小型箱式货车的电池组成本将在2050年降至50 \$/kWh以下。

..... 成本范围
●—— 预计成本



来源: BP

汽车充电

汽车的电气化预计将对能源系统产生重要影响，几百万辆汽车的充电增加了对全球电网的需求，也影响了在电网中应用的基础设施的成本和类型。

例如，在英国，电动汽车充电可能在2030年新增约19太瓦时（TWh）的需求，在2050年新增约70TWh——届时可能占能源需求的5-10%——具体情况根据电动汽车的使用而有所不同。

这类车辆的庞大数目不仅使电网面临更严峻的挑战，而且促使汽车制造商扩展电池容量以增加车辆行驶里程。为了达到500公里左右的行驶里程，电池容量必须达到70-120kWh，使用一个7kW的家用充电器给这样一个电池充电将花费10-17个小时。这类额外负荷可由“智能充电”和其他数字化方法平衡或抵消，从而减少高峰时间的用电需求。其他满足这一额外需求的解决方案包括将电动汽车上淘汰的动力电池二次利用改造成移动充电站、发展超快速充电站或“按目的地”充电等方式。

➞ 见第2.2节



到2050年，乘客汽车总共里程数的一半都有可能来自于自动驾驶。

环境效益

混合动力汽车通常具有较高的燃料经济性，因此排放量低于内燃机汽车。然而，电动车的环境效益在很大程度上与充电电网的环境效益相关。电动汽车技术本身相比传统汽车在效率上有可观的提升，但进一步减少与交通相关的排放量取决于电力系统的脱碳程度。与此同时，混合动力汽车的微粒和氮氧化物排放量低于传统内燃机汽车，并且纯电动汽车的废气排放量为零，这将有助于改善城市地区的空气质量。（第3.0节也讨论了空气质量问题）

➞ 见第2.2节和第3.0节

数字交通

数字技术也将对交通领域产生重要影响，尤其是通过自动或无人驾驶汽车和连接共享出行等多种方式。

现今数百万人正使用卫星导航来引导他们的行程，同时制造数据，存储在移动网络中。连通性更加完备的“联网汽车”包含车到车（V2V）的通讯系统和车到其他（V2X）的系统，这些系统能够与交通基础设施、智能手机和其他设备交互，现已达到较高发展水平，到2020年可实现简单连通性的标准化。

这些系统使得速度、方向、位置、制动和启动车身稳定系统等数据的交互成为可能。带来的利好包括更好的交通管理、在路面状况变化时发出警告、在行程中优化能源使用。

联网汽车在短期内有望进一步发展，现在

一些模型中的特征将得到普及。

然而，21世纪20年代初将迎来更加深刻的变革。自动驾驶汽车（AV）将在下一个十年投放市场并获得一定市场份额。现在的汽车已经实现了一些自动性能，例如防撞、车道保持辅助和泊车辅助。但在未来的三十年，全世界的道路将迎来数百万辆自动驾驶汽车——这里所说的自动驾驶汽车是指具有高度自动化，包括完全无人驾驶模式（或4级和5级——见后文）的汽车。尽管内燃机汽车可以实现自动化，但许多自动驾驶汽车也可能是电动汽车，因为纯电动汽车的动力系统更加简单，适合实现自动化。

研究表明，自动驾驶汽车的普及会面临诸多障碍，包括人们对安全性的担忧、法律责任、以及制定与协调相关管理规则的时间。自动驾驶汽车研发者通过制定标准和展示高配版的汽车模型来表明自动驾驶汽车比人工驾驶汽车能更好地判断距离和速度，从而防止道路事故和伤亡。自动驾驶汽车可使用前瞻性控制系统进行制动和加速，从而使卡车和其他车辆能共同安全前行——称为“结队”，这将有助于降低能耗。

BP预计，到2050年，自动驾驶汽车每年在全球的行驶里程可达近20万亿公里，占总里程的40%。有迹象表明全世界的驾驶员正在接受这一改变，在近期的一项调查中，78%的美国人表示他们相信自动驾驶汽车可使生活变得更加便利。

共享汽车

汽车和出行可通过多种方式进行共享，包括出租车——不论是个人打车或拼车，路边租车或网上约车，以及自驾车短租或长租。所有不同类型的车辆都可实现共享。

我们将“共享汽车”定义为向个人提供移动出行服务的汽车，包括传统出租车和私人出租车以及使用约车软件的汽车。这也包括一群人短期租赁或共享汽车，作为个人拥有汽车的替代方式。通常在城市中，使用该服务的人群可在一个指定区域的任何地点取用和停放汽车。我们预计自动驾驶汽车将作为共享汽车，向个人或小型组织提供租赁或约车服务。随着全世界有几十亿人涌入城市，共享服务的经济效益将得到彰显。

我们估计，在2016年，全球用作共享汽车的车辆已达1000万辆，行驶里程达5000亿公里。

我们目前的预估显示，到2050年，共享汽车的行驶里程将达到10万亿公里，或占总行驶里程40万亿公里的25%。

共享出行对汽车总量和燃料需求的影响并不确定。成本下降和出行便利度的提升将鼓励更多人共享出行，汽车将在使用者间交替提供服务。同时，更高效的汽车和驾驶方法有望优化汽车行驶里程并减少燃料使用。

电气化、自动化和共享出行有可能互为补充，例如通过增加电动汽车利用率可减少运行成本。早期分析表明，自动化有可能将电动汽车的效率提升10%，将内燃机汽车的效率提升20%。

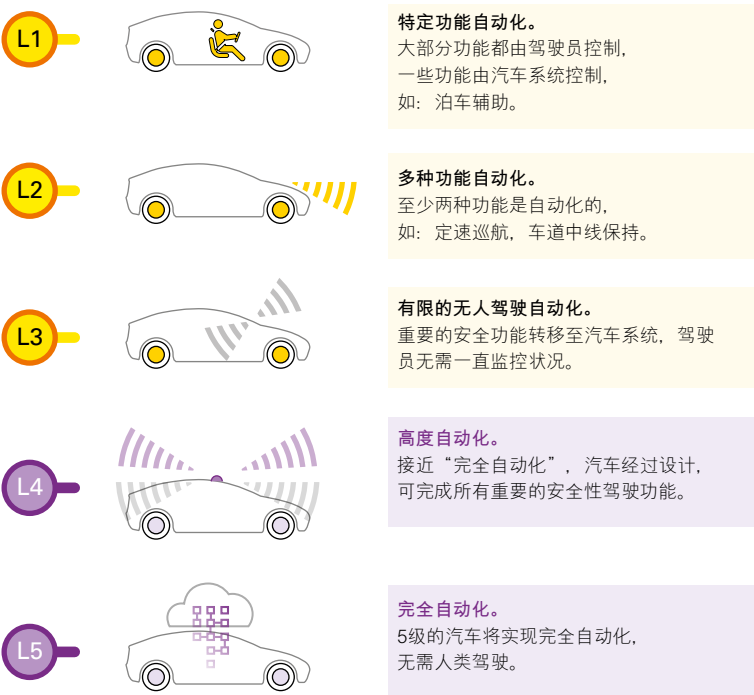
卡车，船舶和飞机

就重型卡车而言，采用液化天然气（LNG）为燃料的比率将会提升，因为它比柴油成本更加低廉，更加低碳。电动汽车技术是另一种选择，一些制造商现在已经在建立示范模型。到2050年，电能也将成为中型卡车最具成本效益的选择。

在下一个十年，全世界的道路上将出现几百万辆无人驾驶汽车

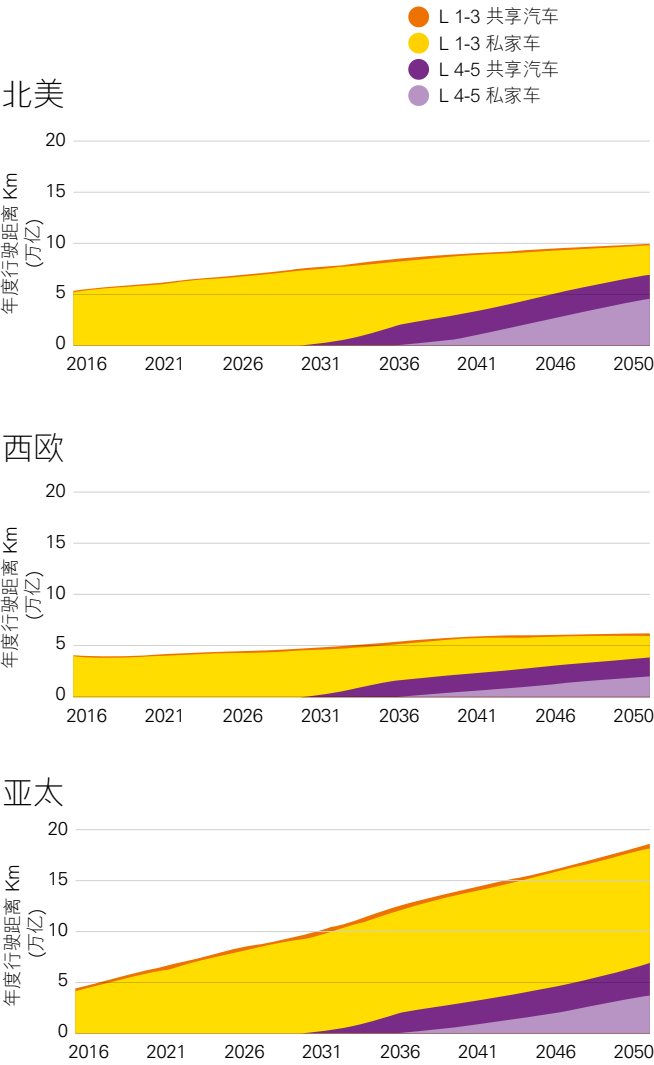
无人驾驶汽车在今天仍然是新生事物，但不同级别的自动化汽车预计将在21世纪20年代初得到广泛使用，并在21世纪30年代普及。共享汽车可以为无人驾驶汽车提供补充——例如汽车共享可增加其使用率进而减少行驶成本。

自动化级别



右图：关于自动驾驶车辆的预测差异较大。本报告中，BP预计表明，在这三个地区，自动驾驶汽车行驶里程到21世纪30年代中期可占总行驶里程的约四分之一，到2050年可达一半。

来源: BP



LNG是一种愈加具有竞争力的船舶运输燃料，尽管以LNG为燃料的船舶现在只占全球船舶总数的0.2%左右。提升船舶能源利用率的方法包括使用新型船帆、改良船体设计、优化螺旋桨和回收余热。

在航空业，很难用廉价而实用的方式取代高能量密度的碳氢化合物。然而，航空业已承诺从2020年起实现碳中和增长，并使其碳排放量在2050年前缩减一半。这些目标鼓励了生物燃料的使用，因为与传统燃料相比，生物燃料是一种可行的低碳燃料。截至2017年11月，超过10万架商业飞机已经承诺使用生物混合燃料。

第3.0节进一步探讨了降低碳排放背景下的交通行业。

➔ 见第3.0节

液体燃料之间的竞争

尽管越来越多的车辆使用电能驱动，但仍有数百万辆混合动力和以内燃机为动力基础的车辆至少需要部分使用液体燃料。效率的提升使得汽车在每升燃料的支持下可行驶更远距离。我们的分析表明，到2050年，用各种生物作物、废物和油脂生产的生物燃料的成本可能会大幅下降。类似于草本植物等多种生物作物制成的生物燃料成本到2050年将下降60%，接近于汽油和柴油的成本。如果对内燃机汽车燃料燃烧产生的碳收取100美元/tCO₂的碳价，生物燃料的成本将比传统燃料更低廉。

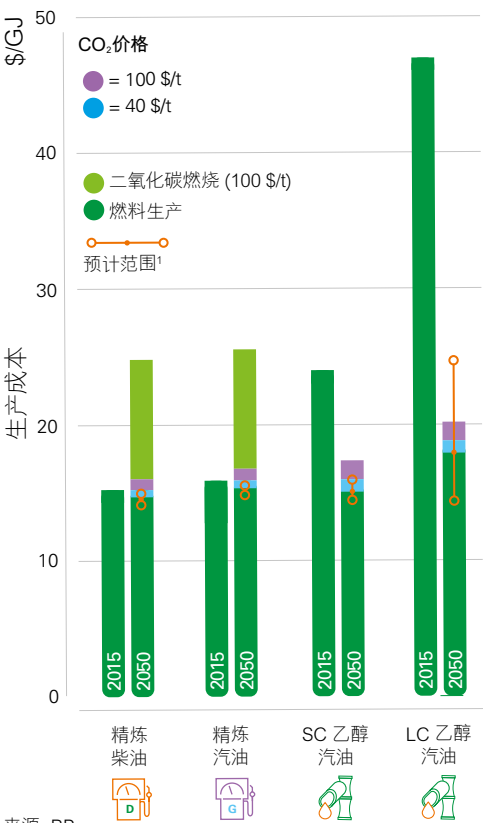
甘蔗燃料乙醇是当前巴西的常用燃料，当碳价为100美元/tCO₂时，甘蔗燃料乙醇到2050年将成为最具经济性的燃料。在巴西，可大面积种植甘蔗。

柴油燃料可被多种生物燃料，即生物柴油替代，其中由植物油制成的燃料与现今的传统产品相比具有同等竞争优势。

现今的生物燃料可在低浓度时（一般可达到10%）与传统燃料混合，从而能够在传统汽车中使用。如果生物燃料的竞争力持续提高，对具有燃料灵活性汽车（混合浓度可达85%）的投资将进一步增长，相应的加油基础设施也将随之发展。

生物燃料的成熟

生物燃料预计将在2050年与原油制成的燃料具备同等竞争优势，特别是在对碳排放定价的条件下。



来源: BP

¹ 包括对燃料生产成本的预计范围。

① 本图表明每焦耳能源的成产成本 (\$/GJ)

SC: 甘蔗

LC: 木质纤维



吉尔斯·诺曼德 (Gilles Normand)

雷诺集团电动汽车，高级副总裁

66

到下一个十年的中期，技术发展将为EVs在广泛使用中遇到的里程、充电次数和成本等担忧提供解决方案。

99

技术如何促进电动汽车的广泛使用

观念改变速度非常之快。当三年前BP首次发布《BP技术展望》报告时，人们只是对电动汽车（EVs）这一技术感到好奇——积极的环保主义者对其兴趣浓厚，而绝大部分驾驶员则无动于衷。

电动汽车在全球汽车市场中所占份额仍然较小（在2017年不及1%），即使对于欧洲电动汽车引领者之一雷诺集团也同样如此。自2009年来，雷诺一直在发展这一技术，对其员工进行培训，并建立电动汽车经销商网络。然而，在过去的几年，人们的观念发生了变革，电动汽车迅速提升的性能突破了公众的想象，由此电动汽车市场迅速增长。

到下一个十年的中期，技术将为电动汽车在广泛使用中遇到的里程、充电次数和成本等担忧提供解决方案。例如，欧洲销量最高的电动汽车雷诺ZOE实际行驶里程已达到300公里。几年内，电动汽车在充电间隔内的行驶里程将达到600公里，从而有效解决了上述担忧。

到2025年，可预见的电池技术的改进和大规模生产的效益将使购买和使用一辆电动汽车的总成本低于一辆等价的内燃机汽车——甚至对于大型汽车也同样如此。

汽车制造商和电池供应商已经着手研究新的解决方案，固态电池就是其中之一。相比今天的锂电池，固态电池可以更低价提供更大的电池容量。

随着能源使用模式的变化以及对可再生能源依赖程度的提升，有必要继续改进储能技术。电动汽车和汽车电池将有助于增加家庭电耗和改善电网管理，从而进一步降低运营成本。

尽管新技术是电动汽车广泛普及的条件，但它并不是唯一条件。我们也需要开发生态系统和基础设施以使它们便于使用，同时也要建立相关意识和信任。在包括能源公司、城市和政府在内的广泛参与者的共同努力下，电动汽车的广泛使用有望在2050前成为现实。



欲了解更多关于雷诺集团的信息，请访问: <https://group.renault.com/>

技术如何能改变供热和制冷？

供热和制冷在能源总需求中占据着显著的份额——例如其占据了欧洲每日能源需求的近一半。家庭和办公室使用多种取暖器和空调设备，工业设施则需要在极高的温度下生产石油、化学品、钢铁和混凝土等材料。



我们对欧洲和美国建筑物的分析表明，供热和制冷将继续由多种设备提供，从我们所熟知的燃气取暖器和电热器到从空气、地面或水中提取热量的热泵等新型技术和热电联产（CHP）系统。我们针对中国、欧洲和北美工业中的热利用的研究表明，如果技术能充分发挥其潜能，有可能节约大量能源。

右图：屋顶空调组件。
美国90%的房屋都安装了空调。

工业供热

在钢铁、混凝土、石化产品和炼油业等能源密集型行业，热量的产生和使用方式对于商业效率和盈利能力有很大影响。本研究表明，这些分支领域都有大幅提高能源利用效率的空间。

工业供热在每个地区各有不同。在中国，煤炭占主导地位，在2013年满足了54%的供热需求。北美天然气所占份额最大（约30%），欧洲电能所占份额最大（27%），其次是天然气（25%）。

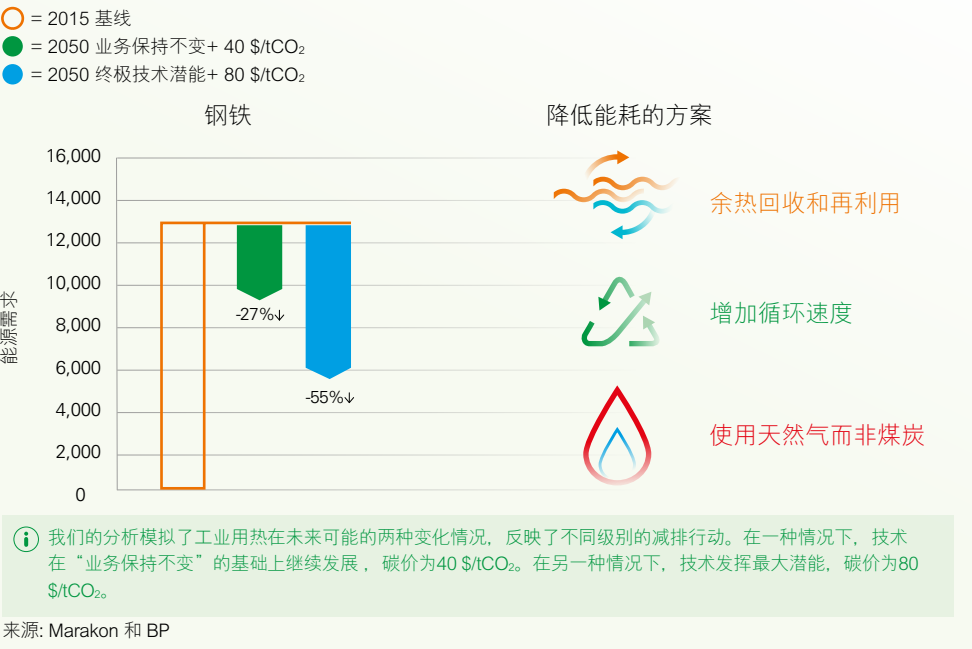
我们的分析表明，到2050年，采用在技术和经济层面可行的方法可将工业能源总需求降低10-20%，大部分可通过改进多个生产流程来实现。

在2050年前，钢铁生产在通过改进生产流程降低能源需求方面的潜力最大，由此可节约当前55%的能耗。这些变化包括在生产铁的过程中，通过直接使用天然气而不是在高炉中使用焦炭冶炼来减少铁矿石的使用量。



工业用热需求的变化

工厂和重工业对热量需求极高。然而，技术和效率的改进有可能在2050年前限制并在某些情况下降低工业用热需求。钢铁行业降低用热需求的潜力最大。



右图: 工业是热量的重要使用者——包括钢铁生产。

目前的供热系统

在现今的欧洲和美国，燃气设备普遍成为最具竞争优势的家庭供暖来源。许多现代的燃气设备使用冷凝换热器，从原本将弃用的废气中回收热量，效率很高，且碳排放量相对较少。

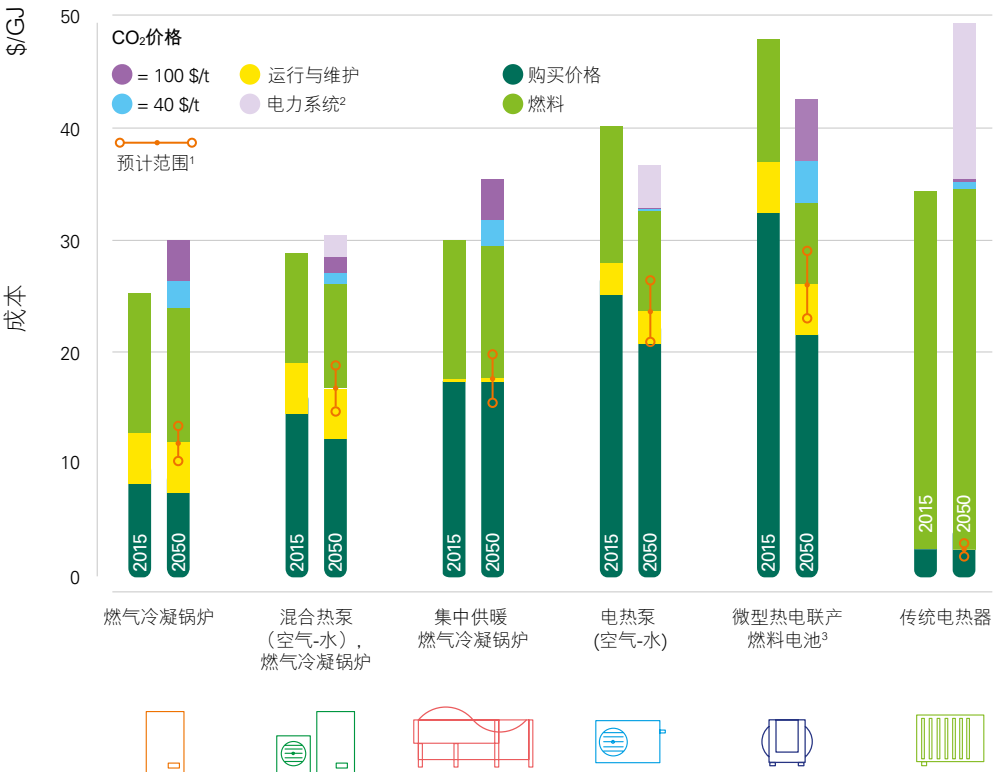
在欧洲，在经济层面上仅次于燃气冷凝锅炉的是结合热泵和燃气锅炉的混合系统，通常在寒冷的天气条件下使用这种系统。其次是电热器和热泵。在欧洲某些地区，使用中央设备为多栋建筑供热的集中供热系统为人们提供经济廉价的供热服务。例如，丹麦、爱沙尼亚、芬兰、拉脱维亚、立陶宛、波兰和瑞典超过一半的人口都在使用集中供热。

美国居民的供热主要是使用燃气炉（利用加热空气而非对水加热的方式供热），其次是电热器和热泵。美国四分之一的大型商业建筑都使用集中供暖系统。美国南方各州需要减少供热增加制冷，最常见的就是用电驱动的空

调设备。

在西欧给一所大房子供热的成本——2015年和2050年

现今燃气冷凝锅炉可能是最廉价的供暖方式，但到2050年，随着碳价达到100美元/吨二氧化碳，燃气冷凝锅炉的成本预计将与混合系统持平，混合系统由空气源热泵和补充性的燃气冷凝锅炉组成。这两种系统的成本都比燃气集中供暖、电热泵和微型热电联产系统更加低廉。由于投资建设低碳电力基础设施导致电价提升，传统电热器的成本预计将相对较高。



① 包括运行与维护 and 购买价格中的不确定性。

② 潜在的额外燃料成本，用于负担电力领域建设低碳基础设施所需的资本开支，假设碳价为100 \$/tCO₂。

③ 如果电价提升，且碳价为100 \$/tCO₂，微型热电联产系统的净燃料成本可能减少5 \$/GJ左右，假设天然气价格处在2015年的水平。

CHP——热电联产 来源: BP

翻新或更换供热系统？

大部分欧洲家庭都配有若干节能装置，但是如果以被动式房屋性能标准为可能达到的最高水平来衡量，这些家庭的平均能源利用率远低于上述水平。到2050年，欧洲一半的建筑预计将具备与今天的房屋类似的隔热性能。其他一半是按照现代标准建设的新建筑或翻新建筑——翻新率预计达到每年1%至1.4%。

在欧洲，我们的模型表明，短期内对大部分现有建筑而言，相比对建筑构造和隔热进行升级，使用高效率组件代替家用锅炉通常更具成本效益，可节约能源并减少供热成本。

相比之下，尽管美国和欧洲存在较大的地理差异，美国的建筑存量在一定程度上比欧洲更新。在过去的几十年内，建在更加温暖的南部和西部的房屋数量远远超过更加寒冷的北部和东部地区的房屋数量。这些新建筑内的热隔离和高效制冷系统配置较高，而北部和东部的老建筑通常与欧洲的建筑存在类似问题。

到2050年的变化

在2050年前，对于欧洲的大型房屋，我们的模型预计当碳价维持在100美元/吨二氧化碳的水平时，使用天然气的供热系统将持续发挥重要作用。燃气冷凝锅炉整体使用成本可能与混合系统的使用成本不相上下——混合系统由从空气中提取热量的电热泵和补充性燃气冷凝锅炉组成。这两种系统的成本预计都将低于燃气集中供暖和电热泵。使用燃料电池通过天然气生产电能和热量的微型热电联产系统的成本预计也将下降。然而，碳价将增加这些热电联产系统的燃料成本。电热器的购买成本预计在2050年前的变化幅度较小，但这些系统的竞争力也取决于电价。由于建设电力领域的低碳基础设施产生了投资成本，电价将上涨。目前，太阳能热水在欧洲南部是具有竞争力的，到2050年，在整个欧洲可能也具有竞争力。

在2050年前的美国，家庭供热预计仍将主要依靠燃气炉实现。在2015-2050年期间，高效燃气冷凝锅炉的竞争力将与传统供热方式持平。微型热电联产系统仍将保持较大竞争力，尤其是对于大型建筑而言。

在美国南部和西部等有夏季制冷需求、小部分冬季供热需求的地区，可灵活供热或制冷的可逆性热泵技术可能更受欢迎。

对空气质量的影响

通过在排气系统中采用氮氧化物（NO_x）排放量较低的燃烧器和选择性地采用催化剂还原脱硝，减少NO_x的排放，可逐步减少商业和家庭供热系统中天然气燃烧排放的NO_x，从而改善空气质量。在许多发展中国家，使用天然气供热（和烹饪等其他家庭活动）也可改善室内空气质量和公众健康。

➔ 见第3.0节



冬天英国的一座小镇——供热需求取决于气候、建筑质量和供热设备的效率。



格雷格·杰克逊 (Greg Jackson)
Octopus Energy 首席执行官

66

由传感器监测个体空间的温度，有针对性地暖，而非集体供暖——这种情景有可能成为现实。

99

欲了解更多关于Octopus Energy的信息，请访问：<https://octopus.energy>

消费者会青睐电力供热吗？

家用供热是政府去碳化项目的一个重点。这一领域正在经历数字化创新——智能恒温器、智能散热器阀、智能锅炉和智能诊断都能帮助消费者在支付较低能源费用的同时享受更加舒适的家庭生活。这些创新足够吗？下一步是什么？

尽管广告宣传声称智能控制系统有许多重要利好，但其在消费者中的市场占有率仍较低。在供热方面，由于与电力相关，户主对于这些“玩意儿”带来的变化不太感兴趣。毕竟，许多人对于通过更换供应商就能节省大约300英镑能源费用这件事儿感到非常便利，但对智能控制系统却不甚了解。因此很多人不会为了节省差不多的费用而安装新设备。

因此只靠消费者驱动的数字变革似乎不太可能产生革命性的效率提高。相反，随着高效率的数字化控制电加热等技术的提升，真正的变革可能由供给侧引发。

目前，在产生同等单位的热量时，用电价格通常是天然气的好几倍，但数字化技术可显著减少成本差异。

在北欧国家，用电的高峰时间是在傍晚。电网需要满足仍在运营的公司的用电需求，而许多人已经回到家，开始用电供热、娱乐、照明和烹饪。

热泵和蓄热式加热器等电加热设备可使用电时间和输电时间分开。随后，智能设备可以对室内温度进行监控并模拟室内的热力需求的动态变化。将这一功能与读取或预测单日电价并可自行购电的技术相结合，可使得电力在供热方面具有较高的竞争力，而碳价可使用电取暖更具成本效益。可对使用中的房

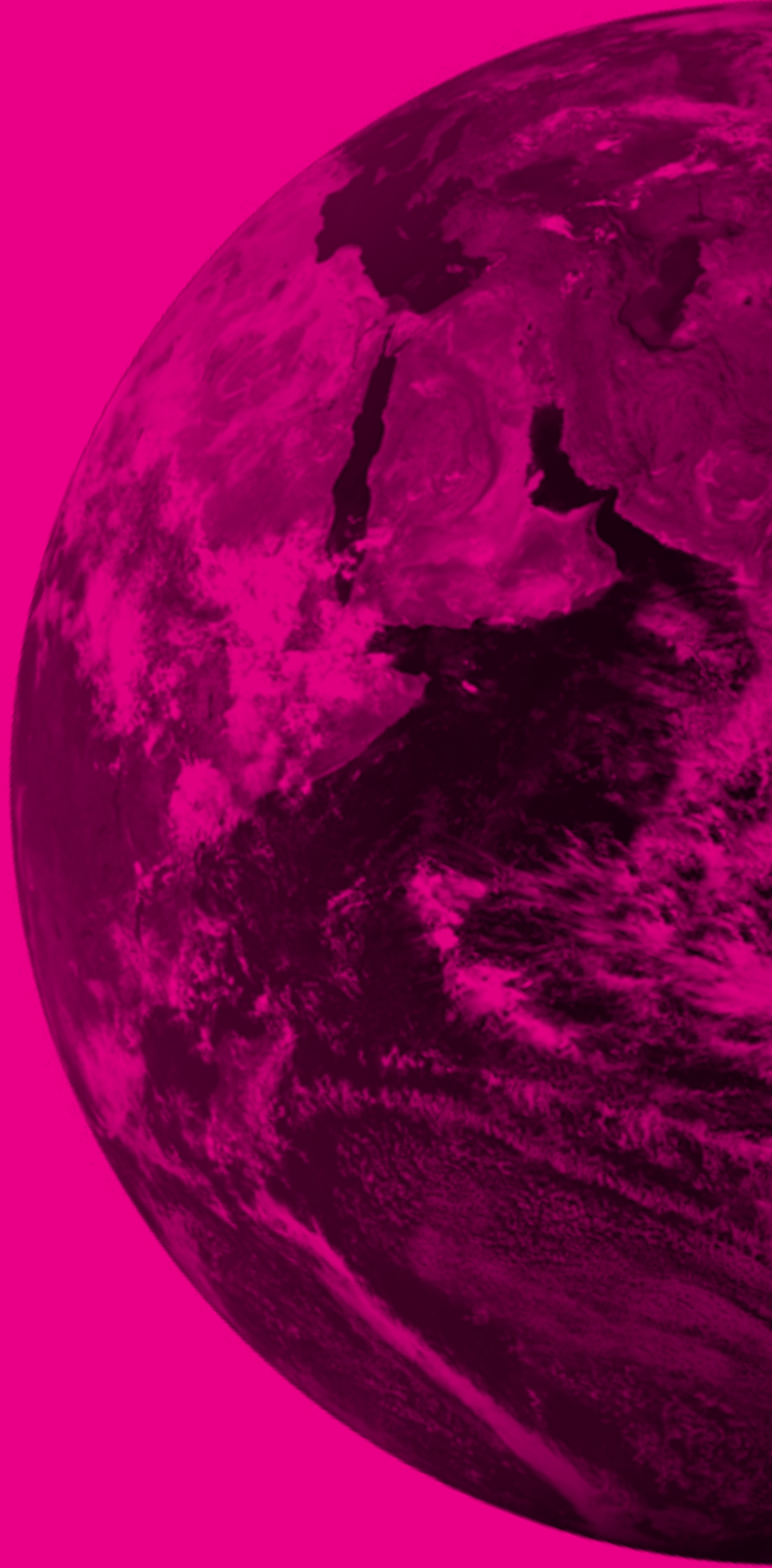
间进行预测和实时监控的设备能够显著提升供热效率——电力供应的灵活性使之有可能比其他燃料更具竞争力。

进一步而言，用传感器监测个体空间的温度，有针对性地暖，而非集体供暖——这种情景有可能成为现实，它可极大地减少能源需求。

新技术的发展将带来许多短期机会，推动新型低碳供热系统的普及；随后端对端、从生产到客户的解决方案将创造长期价值。

3

环境视角



能源系统如何适应环境目标？

到目前为止，本《展望》主要探讨了技术进步如何在未来降低不同能源形式的成本并提高其竞争力。

然而，其他关键问题还包括这些变化能在多大程度上帮助我们向低碳经济转型并进一步解决城市空气污染等环境问题，以及电力、交通、工业和供热这几个领域如何相互影响。



亚马逊河与丛林——一个自然碳汇，可帮助抵消排放的温室气体。

应对气候变化的威胁意味着控制温室气体的排放。2015年《联合国气候变化框架公约》缔约方第21次会议上通过了《巴黎协定》，在协定上签字的世界各国均承诺控制温室气体排放。该协定的目标是以前工业化时期全球平均气温水平为基准，将全球平均气温上升幅度控制在两摄氏度以内。

与此同时，改善空气质量还须减少汽车、工业和其他源头中的氮氧化物、臭氧和微粒物质的排放量。

我们的分析探讨了能源技术在应对所有这些可持续性挑战时能够发挥的作用。



我们的模型探讨了向低碳经济转型所需的关键技术。

模拟低碳未来

为了探讨控制碳排放的方式，我们采用了一个名为“TIAM世界”的成熟模型（见右侧方框），以识别可在不同的环境下供应能源的技术组合。

该模型并不能准确预测，但可通过一般性视角展示在不同环境下最具经济性的技术。

该模型探讨了中国、欧洲和北美三个地区2015年至2050年间在电力、供热和交通领域的概况。这些预测基于技术成本、需求级别、地区价格差异等输入信息，某些情况下还基于碳排放限制。

我们探讨了不同的路径或“案例”，从而了解今后限制碳排放与不限制碳排放时技术组合的差别。

起初，我们模拟了一种“不受限制”的发展路径，在这种情况下技术的竞争力完全取决于成本。

我们也探索了通过多种方式限制碳排放的路径。其中一种路径研究了当世界减少碳排放和将全球气温上升控制在2°C时技术的广泛组合结构。这一评估是基于国际能源署《2016年能源技术展望》的预计。该预计表明，要实现一个“两摄氏度世界”的目标，需要将这三个地区在2050年的二氧化碳排放量在2015年的基础上降低70%。

TIAM

用于探讨未来发展趋势的TIAM-世界模型基于TIMES（The Integrated MARKAL-EFOM System）集成评估模型，这一模型由国际能源署的技术合作项目开发。TIAM-世界独具特色，其可创建跨越电力、交通和供热等能源系统的模型，例如该模型指出如何能在任一领域以最节约成本的方式减少二氧化碳的排放。



2015年《巴黎协定》承诺以前工业化时期全球平均气温水平为基准，将全球平均气温上升幅度控制在两摄氏度以内，已有175个国家签署。

二摄氏度未来模型着眼于实现目标所需的碳排放减量，以及不同技术在减少这些碳排放量中发挥的作用，而并非基于具体政策的设想。这一模型与不受碳排放限制的模型都探讨了技术的可能影响，而不考虑政策和其他因素。

同时，这一模型并未考虑碳抵消的因素，而碳排放可通过植树或减少垃圾填埋场的甲烷排放量等活动得到补偿。关于气候变化的2015年《巴黎协定》列出了促进碳补偿融资和贸易的新机制，而这些新机制正逐渐由航空公司和能源供应商等企业向消费者提供。

中国的技术结构——2015年和“二摄氏度”未来

分析表明，要实现“二摄氏度”未来首先需要实现重大变革。从下图中我们可以看到现今用于提供电力、交通和供热技术。到2050年，这些技术中的一些将继续发展并贡献10%的能源供应总量，而另一些技术所供应的能源则低于这一比例。



来源: BP

三个地区的观察结果

在碳排放不受限制的未来情景中，2015年至2050年北美、欧洲和中国三个地区能源消费产生的碳排放量增长了15%左右，主要取决于技术进步和随之产生的效率提升和成本下降。这一增长量明显低于过去35年（1980-2015年）70%的增长量，但与IEA实现二摄氏度未来所设想的碳排放量下降超过70%的情景相差甚远。

这一模型因此表明，仅依靠当前预期的技术进步将无法实现“二摄氏度世界”所需削减的碳排放量，还需要进一步行动，尤其是碳排放定价等政策措施，以及鼓励消费者做出低碳选择。

该模型对整个能源系统内最低成本的路径进行模拟，结果显示电力部门可实现的碳排放削减幅度最大，因为其脱碳方式成本最低。同其他集成模拟一样，该模型也表明在一个“二摄氏度世界”，通过利用生物质能结合碳捕捉和封存（BECCS）的方法，电力部门将成为负碳部门；交通部门的碳排放将通过电动汽车和混合动力汽车的使用而降低；而在剩余的碳排放量中，供热部门占比最高。

BECCS发电厂更受欢迎，因为它在生命周期内的碳排放可能为负值，在发电时它使用在生长期吸收二氧化碳的原料作物，而在燃烧这些作物时又进行碳捕捉，因此不会排放任何二氧化碳。然而，对于这一技术的担忧包括是否有足够的地来种植这些植物，以及在培育和收获过程中产生的碳排放会影响减碳的效益。

总体而言，这一模型将CCUS视为以最低成本实现“二摄氏度世界”的重要组成部分，但在碳排放不受限制的情景下其经济性并不理想。结合对电力部门的分析（第2.2节），这一结果表明，仅依靠技术进步无法使CCUS具有充分的竞争力以吸引大量投资，因此还需要有针对性的政策支持和有效的碳定价。

相关的天然气价格似乎是塑造能源结构的一个重要因素。天然气在北美广泛使用，价格较低；在中国的使用量却较低，因其价格较高——在今天依然如此。

地区差异

模型表明在我们研究的三个地区之间存在明显差异。

在**中国**，在碳排放不受限制的路径中，煤炭将持续主导发电领域，在2040年左右的“二摄氏度世界”才会被逐步淘汰。在“二摄氏度世界”模型中，核能将在风能、太阳能和其他能源的支持下，从2015年系统中的小份额增长至主导份额。在居民供热层面，二摄氏度情景表明，电热泵将占据较大的市场份额，而非燃气热交换器和燃煤集中供热。

在**欧洲**，可再生能源在我们研究的许多路径中都是电力部门的主导能源（在不受限制的路径中，需要煤炭和天然气的支持；在“二摄氏度世界”情景中则需要BECCS的支持）。在“二摄氏度世界”中，燃气锅炉和电热泵的混用，以及集中供热都将受到青睐。

在**北美**，在“二摄氏度世界”情景中，风能和使用CCUS的脱碳天然气将是电力部门的主导；在不受限制的情景下，不使用CCUS的天然气发电将成为该部门的主导。在两个情景下，天然气都在供热部门占据主导地位。

在所有地区，在不受限制的情景下，大部分车辆将采用混合动力，而在二摄氏度情景下，纯电动汽车将占据较大份额。

从模型中得出的信息

尽管模型只能提供概算，而这些观点也无法用于预测未来，但从中可得出一些关于技术潜力的信息：

- 实现“二摄氏度世界”，需要能源系统实现重大变革。仅依靠技术进步是无法实现这样一个未来的，还需要强有力的政策干预。
- 可再生能源是推动电力部门转型的重要技术——尤其是现今迅速增长的风能和太阳能。
- 相比交通或供热部门，电力部门有望更大规模地实现最低成本的减碳。
- 碳捕获、利用与封存（CCUS）可在以最低成本减少碳排放方面发挥至关重要的作用。
- 不同地区之间以最低成本实现减排的方式有很大的不同。
- 天然气在“二摄氏度世界”中发挥了重要作用，在电力、交通和供热部门均有使用，如果对页岩资源进一步开发，其有望得到更大规模的使用。

空气质量

我们对于空气质量事件的研究主要关注伦敦、洛杉矶和北京，这三个城市在我们所研究的三个地区中的空气污染水平最高。空气质量尤其受到氮氧化物(NO_x)、臭氧和被称为PM_{2.5}的细小颗粒物的影响，这些正是研究重点。*

尽管许多国家的政府实施了改善空气质量的行动，空气质量仍然是一个严峻的挑战。

我们与剑桥大学Foreseer专家团队合作开展分析，研究了空气污染的主要源头，以及可能的应对措施。研究表明空气质量受到多种因素影响，其中许多因素更是跨越了城市边界。

研究发现，在伦敦，三分之二的颗粒物污染来自城市之外——伦敦为山谷地貌，污染不易扩散。

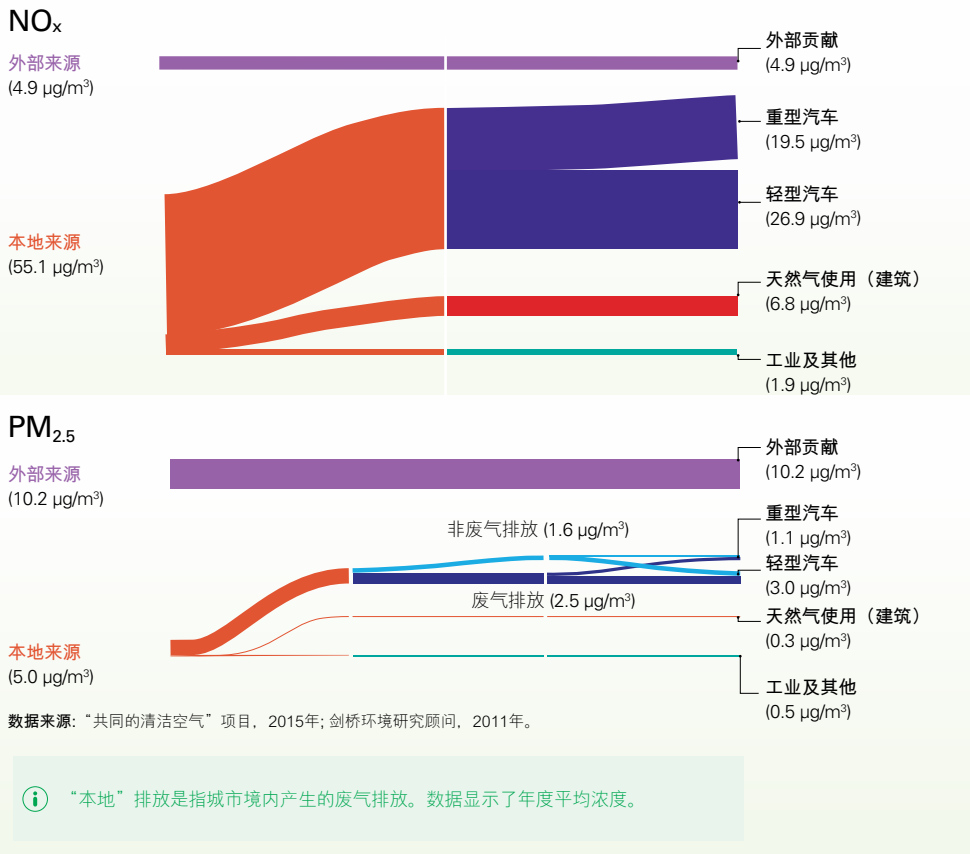
研究发现柴油车的废气排放是最大的氮氧化物源头，其次是建筑物内用于供暖和烹饪的天然气。

在洛杉矶，NO_x和PM_{2.5}排放量的80%来自本地，排放源包括汽车、建筑物，还有土地、灰尘和海盐等。在研究的几个城市中，洛杉矶的臭氧水平最高，臭氧是一种氮氧化物、一氧化碳和挥发性有机化合物在太阳光下反应形成的污染物。

一座城市废气排放采样站，监测氮氧化物、颗粒物和其他物质的排放水平。



伦敦市中心的空气质量受何影响？
氮氧化物和颗粒物从何而来



在北京，颗粒物的浓度是伦敦和洛杉矶的四倍还要多，约一半的颗粒物来自城市之外几百公里远的地区。北京PM_{2.5}的主要来源是工业、发电厂和供热中的煤炭使用，而NO_x的主要源头是交通，其次是工业。

在所有这三个城市中，交通中颗粒物排放的很大一部分来自刹车、轮胎和道路磨损，以及尾气排放。

从空气质量分析中得出的信息

这份针对空气质量的研究表明，同样的挑战在不同城市中有多种多样的起因。因此要实现决定性的解决方案，需要采取一系列措施。

- 需要采取措施解决本地和区域内排放的源头，因为许多城市都受到来自他处的NO_x和PM_{2.5}的影响。
- 需要从多个层面减少废气排放。交通通常是改变的重点，排放NO_x和PM_{2.5}的柴油汽车是重中之重，解决方案包括制定激励措施促进购买和使用电动汽车和混合动力汽车，以及实施更加严格的尾气排放标准。然而，某些地区也需要减少工业和建筑中的废气排放，尤其是颗粒物排放。
- 在交通领域，减少尾气排放中的PM_{2.5}只是解决方案的一部分。虽然尾气排放能产生的细小颗粒物最多，轮胎、刹车和道路磨损等非尾气排放也是重要的源头。

* PM_{2.5}: 尺寸小于2.5微米的颗粒物，可深入呼吸道，引发健康问题。



凯莉·西姆斯·加拉格尔

(Kelly Sims Gallagher)

美国塔夫茨大学佛莱彻学院气候政策实验室主任，能源与环境政策教授

66

新的政府政策和商业操作对于改变游戏规则，对于以更具成本效益和生产力更高的方式向低碳未来转型十分必要。

99

建设一个低碳的未来

如同前辈们所提出的那样，能源是环境挑战的核心，而环境又是能源挑战的核心。燃烧化石燃料产生的二氧化碳排放是温室气体的最大来源，天然气开采中直接排放的甲烷又增加了温室气体的总量。不改变我们的能源生产与消费方式就无法有效应对气候变化的威胁。

同样地，能源行业如果不能推动消费者和社会所需要的低碳能源解决方案，其发展将受到根本威胁。当前由175个国家签署的2015年《巴黎协定》确定了一个清晰目标，即以前工业化时期全球平均气温水平为基准，将全球平均气温上升幅度控制在两摄氏度以内，这意味着全球温室气体排放必须在下一个十年达到峰值并开始下降，并在2050年前实现大幅下降。

应对能源-环境挑战的首要的解决方案是技术创新。可通过清洁能源技术的发展和部署，使经济增长和颗粒物及温室气体排放脱钩。LED灯泡与白炽灯提供同样的照明效果，但其能耗量却是后者的四分之一。此类高能源效率的技术相对较高的预付成本可被很快收回，并在长期内实现成本节约。太阳能、风能和地热能等低碳可再生电力资源在某些市场上与化石燃料具备同等竞争力。随着碳排放定价政策的制定，碳捕捉和封存等目前在市场上不具竞争力的其他技术方案将充满竞争力。

尽管许多清洁能源技术的成本在急剧下降，但它们并未在一个公平的平台竞争。传统的化石燃料现今仍占主导地位，这意味着大部分现有的规则和基础设施都是为了支持化石燃料而非清洁燃料建立的。新的政府政策和商业操作有必要改变游戏规则，为向低碳未来的转变提升成本效益和生产效率。政府必须加强对低碳能源研究、开发和实验项目的支持，采取连贯、一致的政策方法，支持清洁能源技术的商业化，从而令所有人都可平等合理地使用清洁能源。



欲了解更多关于气候政策实验室的信息，请访问：www.climatepolicylab.org

4

见解



《BP技术展望》 核心观点

《BP技术展望》涵盖了能源系统的诸多关键部分——从自然资源的生产，到家庭、工作场所、汽车和供热中的能源使用。研究过程中产生了较多重要主题。一些与能源的特定用途息息相关，例如电力和交通，而另一些主题则能够在许多领域产生影响，例如数字化创新。在最后一节，我们为能源世界以及对能源世界有影响力的政府、商界、学术界和其他领域人士列出了十条重要见解。

1 实现《巴黎协定》的目标在技术上和经济上可行，但需要深刻变革方能实现。

技术进步可贡献将全球气温上升控制在2°C以内所需碳排放减量的逾70%，但分析表明仍需进一步加快减排进程，其速度应比当前预测趋势更快。包括可再生电力资源、混合动力汽车、电动汽车和数字化创新在内的许多必要技术都在继续发展。然而，分析有力地证明如果没有碳排放定价等重要的政策干预，将无法实现这样一个未来。本分析还表明许多潜在技术结构是可以实现的，同时确定了电力部门或将是脱碳成本最低的行业。



中国上海——快速发展的城市处于能源技术变革的前沿。

2 到2050年，风能和太阳能必将快速发展，并在世界范围内成为电力的重要来源。

我们的分析表明，随着发电机技术的进步以及在经济规模效益的驱动下，陆上风能的成本将持续迅速下降。到2050年，陆上风能将成为许多地区最具经济性的电力来源。太阳能的能源效率亦在提升，预计在许多情况下将具备竞争力。

3 当风能和太阳能用于满足较大部分的电网需求时，将产生显著的整合成本。

当风能和太阳能的发电量占发电总量的40%以上时，预计需要利用不菲的成本来应对它们的间歇性。解决方案包括储存和释放能源（例如使用蓄电池）；管理需求；以天然气或煤炭（可能应用CCUS）、或核能作为后备能源。太阳能无法在夜间获取，因而比风能需要更高的整合成本。

4 能源储存方案在迅速发展。

电力储存技术正迅速发展，尤其是高能电池。这些技术必将降低电动汽车的成本，并增加其行驶里程。高能电池和抽水蓄能发电的使用也为电力系统的储能提供了新的选择方案。尽管铅酸电池目前是成本最低的电网级储能方式，到2050年，具有竞争力的方式可能还包括压缩空气储能和锂电池、金属空气电池、固态电池和液流电池。**氢也是一种重要的储能方式。**

5 交通业必将在电动汽车的引领下迎来转型变革。

电动汽车和混合动力汽车预计将在2050年成为车辆构成中的重要组成部分。到2050年，电动汽车蓄电池的成本预计将降至今天的四分之一。大部分车辆预计将实现无人驾驶，而汽车共享和共享出行可能改变汽车购买习惯并有可能改变燃料消费方式。**液化天然气对卡车和部分船舶而言预计将成为一种有吸引力的燃料。**生物燃料和碳抵消对航空业而言仍是切实可行的解决方案，可帮助该行业实现碳排放目标。

6 全世界大部分供热预计仍将由燃气设备提供，尽管旨在削减碳排放的措施可能会有利于使用电力系统供热，以及燃气与热泵相结合的混合供热设备。

燃气热交换器预计在2050年前将持续发挥重要作用。如果按照国际能源署将气温上升控制在二摄氏度的情景减少碳排放，电热泵预计将在中国和北美得到更广泛的运用，而欧洲则更青睐集中供热及混合热泵与燃气锅炉系统。

7 在减少温室气体排放的同时满足能源需求增长这一双重挑战中，脱碳天然气技术变得非常重要。

在基于“全球气温上升控制在二摄氏度以内”这一目标而设立的最具经济效益的能源系统模型中，使用CCUS的脱碳天然气得到大量运用，其重要性可见一斑。在这些模型中，此类天然气利用方式在北美和欧洲的发电领域占据了较大份额。若使用CCUS的天然气未得到该等程度的部署，实现未来低碳系统的代价将更加高昂。

8 数字技术是整个能源系统内效率提升的最重要推动力，尽管其最大潜力仍是未知数。

数字化正通过智能电网和“互联汽车”等创新技术推动着能源行业的转型。石油和天然气生产将因地震和生产优化等领域的进步而变得更具成本效益。人工智能的发展必将进一步带来变革。数字技术将带来诸多新功能，而不是仅仅帮助提升运营速度和效率。

9 天然气和石油必将继续发挥作用。

在全世界向低碳经济转型的过程中，天然气作为一种发电、供热和交通燃料的来源，预计将发挥重要作用。石油也将继续在交通和其他领域得到利用。预计每年需要为新项目投入超过6000亿美元的资金，以抵消油气田产量的下滑并满足不断攀升的需求。到2050年，技术预计可将石油和天然气平均生命周期成本降低30%左右。

10 能源效率在节能减排方面有着巨大潜力。

BP委托的研究发现，通过应用最好的技术，可节约当前约40%的一次能源消费，减少135亿吨二氧化碳排放，但与此同时，许多此类效率提升都需要大量投资。一些顶尖技术可在日常能源消费中得到应用，从而实现节能，这包括提升汽车效率、改进建筑设计、增加热泵的使用和使用LED照明。

这些结论都证明了本《展望》旨在传递的首要信息：技术拥有巨大潜力，可改进世界发现、生产、加工和消费能源的方式。技术不仅有利于提高可持续性，而且为消费者提供了更多选择。然而，能源的潜力可在多大程度上得到释放，目前尚不可知，而本分析中一些模型所勾勒的未来画面也具有鲜明反差。尽管我们无法详细了解未来的格局，但我们相信本分析在揭示潜在的变革方向上具有价值。例如，我们相信可再生能源和电动汽车将大幅增长。分析还表明，要实现CCUS的大规模应用和能源效率的显著提高，可能需要政策制定者提供更加强有力的支持。

尽管许多问题仍然存在，但本《展望》所传递的最鼓舞人心的信息莫过于：如果得到合理利用，能源技术有望创造一个更加可持续的未来。

附录

5

我们的研究方法

2018年版《BP技术展望》探讨了至2050年，技术在电力、交通和供热领域，改变能源生产与消费方式的潜力。

鸣谢

外部视角的贡献者包括:剑桥大学的乔纳森·库伦(Jonathan Cullen)、Beyond Limits的马克·詹姆斯(Mark James)、通用电气旗下贝克休斯公司的詹姆斯·海伍德(James Haywood)、国际可再生能源机构的阿德南·阿明(Adnan Amin)、英国国家电网的菲尔·谢泼德(Phil Sheppard)、雷诺集团的吉尔斯·诺曼德(Gilles Normand)、Octopus Energy的格雷格·杰克逊(Greg Jackson)和塔夫斯大学的凯莉·加拉格尔(Kelly Gallagher)。

我们对向本《展望》提供外部视角的人士表示衷心感谢。外部视角部分中列出的信息和观点均来自其作者，并不一定代表BP的观点或看法。

警戒性声明

本《展望》包含前瞻性声明。前瞻性声明由于与多个事件相关，因而含有风险和不确定性，需取决于具体情况，其在未来可能发生，也可能不发生。实际结果可能有所不同，取决于多种因素，包括:产品供应、需求和定价、政策稳定性、总体经济状况、人口变化、法律法规发展、新技术的可用性、自然灾害和恶劣天气状况、战争和恐怖袭击或破坏，以及在本《展望》中讨论的其他因

素。BP无义务更新本《展望》。BP和任何其子公司(包括其相关主管人员、员工和代理人)对于任何误差或遗漏，或与本《展望》或其中任何信息相关的任何类型的直接、间接、特殊、附带或其他损失均不负有责任。

本报告部分基于国际能源署出版的2017年和2012年的《世界能源展望》和2013年《世界能源统计和平衡》©OECD/IEA 2017，但本报告由BP撰写，并不一定反映国际能源署的观点。

更多信息

《BP世界能源展望》2018 年版

针对世界能源市场的预测，其中考虑了全球经济、人口、政策和技术潜在演变。每年出版。

bp.com/energyoutlook

欲了解有关BP技术的相关信息，请访问：

bp.com/technology

© BP p.l.c. 2018
2018年版《BP技术展望》

本报告引用的IHS Markit报告、数据和信息

（“IHS Markit材料”）是IHS Markit有限公司及其子公司（“IHS Markit”）受版权保护的财产，代表了IHS Markit发表的数据、研究、意见或观点，并不代表实际情况。“IHS Markit材料”反映的是其原始出版日期的数据，并不代表本文档发布日期的数据。“IHS Markit材料”中表达的信息和观点可在不发出通知的情况下更改，IHS Markit无义务或责任对其进行更新。此外，尽管本文引用的IHS Markit 材料来自可靠的来源，但并不能保证材料及基于材料的观点和分析具有精确性和完整性。IHS Markit是IHS Markit公司的商标。出现在IHS Markit材料中的其他商标是IHS Markit或各自所有者的财产。

技术能将我们带至何方？

在未来的数十年，社会将面临双重挑战——既要满足更多的能源需求，又要减少碳排放。

本出版物探讨了技术在应对这一双重挑战中的作用，参考了BP及其合作伙伴对能源生产、电力、交通、供热和未来低碳经济的研究。



www.bp.com.cn