

中国可再生能源展望

2018

国家发展和改革委员会 / 中国宏观经济研究院能源研究所
国家可再生能源中心

执行摘要

“推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的能源体系。”

“生态文明建设功在当代、利在千秋。我们要牢固树立社会主义生态文明观，推动形成人与自然和谐发展现代化建设新格局，为保护生态环境作出我们这代人的努力。”

国家主席习近平

在 2017 年 10 月 18 日中国共产党
第十九次代表大会上的演讲

实施机构



资助机构



技术支持



国内支持机构

北京大学环境科学与工程学院

国网河北省电力公司经济技术研究院

华北电力大学

Foreword

中国正处于能源转型的初期，其目标是建立一个面向未来的可持续能源系统。2017年10月，党的十九大明确并坚定了到2020年全面建成小康社会，到2035年基本实现现代化，到2050年建成富强、民主、文明、和谐的社会主义现代化国家的方向和决心。中国着力在经济发展方面从高速度向高质量转型，能源部门也将顺应这一转变。中国将发展“清洁、低碳、安全、高效的能源系统”确定为一项基本政策，未来的2020年、2035年和2050年是三个重要的里程碑。

2018年《中国可再生能源展望》（CREO）以十九大报告展现的战略目标为出发点，在确保未来经济连续发展与生态文明建设的前提下，清晰勾勒2050年能源系统的发展愿景，精准设定目标年的能源与环境目标；同时从未来的目标出发，回溯倒逼出目前所需的能源发展路线图，并与当前政策下的顺势发展路径做出比较分析。报告中也提出了为确保能源顺利转型，短期内为促进可再生能源消纳所需要采取的措施和行动。

我坚信，对未来充满愿景是能源转型进程中的一个必要环节。若缺乏对能源系统的强烈愿景，转型进程则会过于缓慢，无法实现长期目标。同时前景分析必须植根于对能源系统的深入了解和完善的量化分析之上，只有这样才能精准部署为实现远景而需要的政策手段。

能源转型之路，艰难复杂，存在着多方博弈与利益冲突。我们希望《中国可再生能源展望2018》（CREO2018）能为能源政策的制定提供强有力的研究基础和参考平台，为中国能源顺利转型，如期实现十九大的总体目标做出应有的贡献。

同往期报告一样，《中国可再生能源展望2018》是由国家发展和改革委员会能源研究所（ERI）和国家可再生能源中心（CNREC）联合国内外合作伙伴共同撰写，儿童投资基金会（CIFF）、丹麦政府以及德国政府共同出资支持。本报告受益于来自各方的不断支持以及宝贵的指导和建议。在此，谨向参与报告的专家同仁以及出资各方致以诚挚谢意。

王仲颖

中国宏观经济研究院、国家发展和改革委员会能源研究所，副所长（主持工作）
国家可再生能源中心，主任

概要和主要建议

简介

当前能源系统依然依赖煤炭

在 2000 年至 2015 年的三个五年计划（十五 - 十二五）中，煤炭和石油被推为中国经济发展的主力能源。因有利的调度规则和廉价的成本，燃煤电厂有着得天独厚的优势，受到了国有企业以及地方政府的大力支持。工业部门的煤炭消耗量大幅增长，而交通部门的能源增长使得我国三分之二的石油消费来自进口。

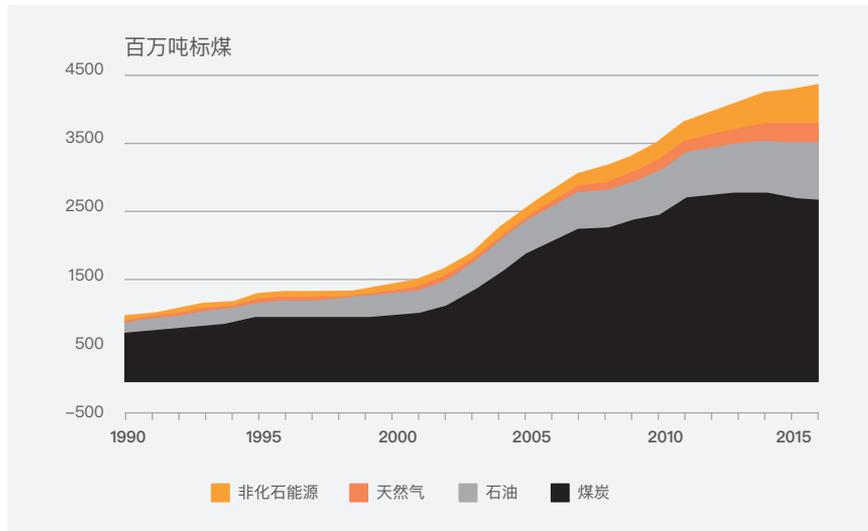


图 1

1978 年至 2017 年中国一次能源需求总量 (百万吨标煤)

这一能源系统的建立推动了经济的快速增长，但也造成了严重的空气、水和土壤污染。现行能源系统能源效率水平低，化石燃料依赖进口。可再生能源得到规模化推广，但仅仅作为对现有系统的补充。

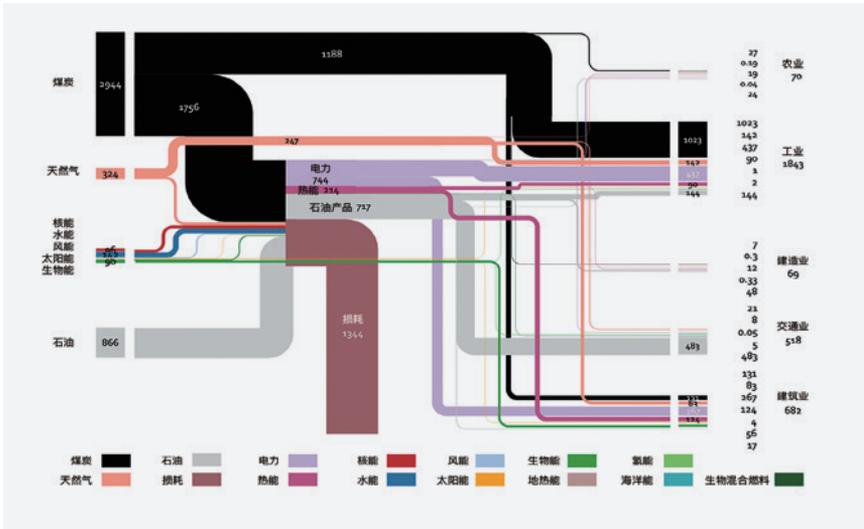


图 2
2017年中国的能源平衡
(百万吨标煤)

面向低碳高效的能源转型

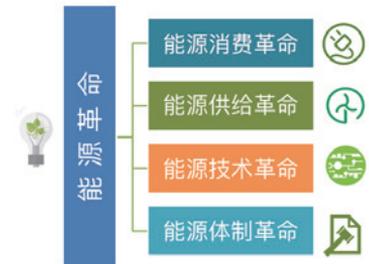
“十三五”规划提出了未来能源系统发展的宏伟目标，即“建设清洁、低碳、安全、高效的能源系统和保障能源安全”。对于新建电厂而言，燃煤发电的有利条件已经减弱，停止或推迟了拟定和批准的燃煤发电项目，启动了能够更好地推进可再生能源发展的措施，更多地关注电动汽车的开发，作为长期解决方案，解决交通部门日益增长的对外依赖石油问题。重新启动了电力部门改革，作为区域和国家试点启动了二氧化碳 ETS 系统。中国推出“中国 2025”计划，重点在于推动质量提升（而不是数量）和新技术，包括可再生能源技术和电动汽车（作为战略性新兴产业，成为未来中国经济的支柱）。

2017年，中国政府推出了《能源生产和消费革命战略（2016-2030）》，其中包括四个部分：推动能源消费革命，从根本上抑制不合理消费并遏制一次能源（特别是煤炭）增长；能源供给革命，实习能源体系的去碳化，并逐步和大力发展包括核能和可再生能源在内的替代能源；能源技术革命，以提升能源自主创新能力为核心，为建设清洁低碳、安全高效现代能源体系提供技术支撑；能源体制革命，构建有效竞争的市场结构和市场体系。

党的十九大标志着一个新时代的开始

党的十九大标志着中国发展战略新时代的开始，不仅明确了长期（2050）和中期（2035）的发展愿景，更确认了要以生态文明建设推动经济发展转型的发展路线，要着力解决空气、水、土壤等突出环境问题，正确处理经济发展和生态环境保护的关系，坚持绿色发展理念，实现经济社会发展与人口、资源、环境相协调，最终实现社会和环境的可持续性发展。

图 3
能源革命战略的四大支柱



中国可再生能源展望研究进一步量化并具体化了党的十九大提出的以上目标愿景，同时制定了为实现 2050 年能源系统的可行性方案，并探讨了为实现这一愿景短中期内需要采纳措施和行动。

全球背景

“我们呼吁，各国人民同心协力，构建人类命运共同体，建设持久和平、普遍安全、共同繁荣、开放包容、清洁美丽的世界。”

——习近平在中国共产党第十九次全国代表大会上的报告

在能源结构转型和全球能源合作的大背景下，每个国家的能源发展趋势和政策措施势必相互影响，因此我们不能孤立地看待中国的能源转型，而应将其放在在全球背景下综合分析。

在全球范围内，气候问题已成为能源转型的主要推动力。巴黎协定为缓解全球气候变化制定了减排目标，但由于种种原因，巴黎协定的执行目前仍困难重重，世界并未步入实现巴黎目标的轨道。

欧盟及其成员国：致力于实现 NDC 承诺

欧盟为二氧化碳减排制定了长期目标，即到 2050 年将温室气体排放量在 1990 年的水平上减少 80–95%，同时制定了 2030 年关于可再生能源排放量和份额的具体目标。同时作为能源转型措施的一部分，欧盟已经启动了《全欧洲人共享清洁能源》的一揽子计划，包括有关能源目标、加强和谐能源市场和市场监管以及提高能源效率的措施等方面的内容。德国和丹麦在欧洲能源转型中处于领先地位，两国都有能源转型的长期计划。在德国，旨在解决增长、结构经济变革和就业问题的特别煤炭委员会正在针对煤炭出口的最后期限以及如何应对结构性变革的详细计划，努力使各利益相关方达成共识。在丹麦，一项新的能源协议计划在 2030 年之前消除丹麦电力部门的煤炭消耗，用风能和太阳能取代煤炭，同时利用生物质和沼气发电。

美国能源转型：在挫折中前进

在过去两年中，美国出现了一些影响其能源转型的发展动态，包括联邦一级的政策变化——废除了一些与气候变化有关的、推广可再生能源使用的州政策；减缓了鼓励电网灵活性以及分布能源的市场改革；以及与可

再生能源相结合的储能政策都有相应的变化。有一些州和城市在不依赖于联邦政府的情况下已经组成了美国气候联盟，以实施美国 NDC 的政策措施，到 2025 年，州一级的温室气体排量将比 2005 年低 26% 至 28%。实现这一目标的关键政策工具是“可再生能源组合标准”，29 个州已颁布了该标准。从 2000 年到目前为止，RPS 政策已经累计部署了美国 56% 的可再生资源。自 2015 年以来，10 个州已提出或扩展其 RPS，预计未来几年可能有更多的州会加入此计划。

墨西哥能源重塑：复杂但可行

墨西哥的案例说明了一个高度依赖化石燃料的发展中国家，其能源部门的快速和全面转变，无论是在制度还是机制方面，都可以通过政治承诺来实现。墨西哥电力市场改革仅在三年前启动，但预计将在 2018 年全面实施电力市场。墨西哥的案例还阐明了技术中立拍卖成功地降低了新的清洁发电容量的成本并吸引到合格的投资者的经验。因此墨西哥有可能在清洁能源方面树立更加远大的志向，而且很可能会以高于预期的速度实现其清洁能源目标。墨西哥的经验表明改革可以在相对较短的时间内进行，中国很可能比预期中更快地实现其清洁能源目标。

中国：引领可再生能源革命

国际经验向中国明示了能源转型之路。近年来，中国可再生技术和产业发展迅速，已在多项指标上居世界领先地位，技术实力凸显。同时，将经济发展和生态文明建设相结合的前瞻性行动纲领，中国政府能源革命的坚定决心和强大的施政能力，都使得中国具有令人瞩目的优势，也为践行清洁低碳能源发展路线提供了不竭动力。积极参与气候变化，进一步强化气候目标，努力超越 NDC 承诺，不仅是中国实现可持续发展的内在要求，也可以带来经济红利，本报告将在以后章节对收益做进一步分析和阐述。此外，美国的例子表明，尽管在变革过程中会有反对意见，但能源转型这一过程并不会因党争掣肘而停滞不前。同时，德国和美国的前车之鉴也说明了在转型过程中能够需要平衡各方利益，尤其是既得利益者的势力，同时也需要充分考虑并保障受到能源转型严重影响领域，确保获得最大限度的支持。墨西哥的案例也说明，各方合力，共同推低新能源技术和并网成本，可以使能源和市场监管框架和机制快速现代化，从而最低成本的实现高效转型。

中国 2050 年的能源系统愿景

2050 年：清洁、低碳、安全、高效的能源系统。

2050 年，中国的能源系统应符合十三五计划所提出的所有总体质量标准以及党的十九大所提出的生态文明愿景。

- 清洁的能源系统能够确保空气、水或土壤不会因整个能源供应链（从采矿到废物处理）中的活动产生污染。需要大幅度减少电力部门外的煤炭使用、减少采煤量、有效地利用清洁电力部门剩余煤炭的烟道气。
- 低碳的能源系统要求从化石燃料向非化石燃料全面转型。尽管煤炭是单位能源中碳含量最高的，但在低碳能源系统中也应该限制石油和天然气。
- 安全的能源系统是一个可靠的系统，该系统对燃料进口依存度的敏感性有限。因此，由于内陆资源有限，应该减少石油和天然气的使用。
- 高效的能源系统在能源使用方面是有效的，这意味着减少浪费，进一步降低转化损耗，并提高终端用能部门的能源效率。该系统也是一个高性价比的能源系统，电力系统的调度建立在边际成本优化的基础上，将整个系统的总成本降到最低。此外，新一代的规划和投资以及其他能源基础设施创造了一个成本效益型资产组合，有助于减少总成本；选择以市场机制作为经济转型基础，增加了市场在能源系统中的决定性作用。

结合这些目标，中国 2050 年能源系统的发展策略应包括：

- 尽可能降低化石燃料，特别是煤炭的消费占比，并在所有部门中用非化石燃料代替化石燃料。
- 通过在终端用能部门严格推行可再生能源，特别是太阳能和风能代替转换损失较大的热电站；在终端消费（主要是工业和交通部门）进一步提高能效；大力部署推广分布式能源，进一步减少系统总损耗。
- 通过高效的电力市场，以及反映能源供应直接和间接成本的激励和税收制度来确保能源系统的经济效率。将二氧化碳排放和其他污染物纳入有效成本核算。

《中国可再生能源展望》 模型和情景

CNREC 建模平台

《中国可再生能源展望》的分析是建立在中国能源系统综合建模平台上的。该平台由基于 LEAP 软件的终端能源模型、基于 Balmorel 软件的电力和区域供热模型（EDO）和基于国家投入产出表的经济模型共同组成。

终端能源模型利用现有的统计和预测数据，对工业、建筑、交通和农业等各部门中不同技术转换、能源产品生产以及终端用能特性进行分析，推演并预估不同的部门和行业的终端能源消费。EDO 模型是一个混合整数 / 线性规划省级调度模型，在设定好的约束条件下，能够优化混合电力和区域供热系统，同时进行电力调度预测和未来电力系统的投资分析。

《中国可再生能源展望》情景

《中国可再生能源展望 2018》分析了两种能源发展情景。既定政策情景以完全实现十三五规划和十九大报告中的相关能源目标为预期，展现了坚决执行现有政策时的能源发展预测。“低于 2 °C”低情景则更进一步，以达到《巴黎协议》的碳约束为蓝图远景，回溯倒逼所需的能源发展路径。通过对两种情景结果进行比较分析，很容易识别出现有政策到实现巴黎协定的差距，同时也方便设计加速弥合差距的目标方案和政策措施。

关键假设

以下是主要情景边界和情景假设：

情景边界条件

长期能源和经济发展边界为各种能源技术部署设置了制约因素：

- 可再生能源资源在省级层面设定了约束, 并且风能和太阳能按照成本、类型和质量进行划分；
- 根据资源和环境可持续建设条件, 水电站容量累计装机容量限制在 532 GW 以内；
- 沿海地区的核电容量限制在 120 GW 以内。
- CCS 技术没有被作为可选择技术, 因为缺乏清晰的成本及性能数据资料

情景假设

- 既定政策情景设定为全面贯彻执行“十九大”和“十三五”规划所确定的能源部门现行和明确的政策。这包括电力市场改革和国家碳市场计划
- 经济发展目标： GDP 实际增加 4 倍, 从 2017 年的 82 万亿元增加到 2050 年的 324 万亿元；
- 两个情景都积极支持战略性新兴产业发展, 为电动汽车、数据中心和 IT 服务等高耗能行业创造市场空间。
- 预计 2050 年人口将达到 13.8 亿, 保持当前水平；
- “十三五”能源计划的短期目标、“蓝天保卫战三年作战计划”、“十三五环境保护规划”以及华北清洁供暖计划将在 2020 年实现；
- 能源效率大幅降低终端能源需求, 例如：在“低于 2 °C”情景下, 到 2050 年, 终端能源消费只有能效冻结情况下的 56%, 这一数值在 “既定政策” 情景中略高
- 终端用能的高电气化, 目标是终端用能部门电气化水平达到 60% 。

- 重视能源供应安全，包括减少石油和天然气的对外依存度。
- 到 2020 年，中国实现天然气占一次能耗总量的 10% 的目标，在既定政策情景中，天然气占比达到 15%；低于 2 °C 情景中没有设定相应目标。
- 实现能源消费革命战略的 50% 非化石发电目标；
- 既定政策情景的碳强度到 2020 年降低 40–45%，到 2030 年为 60–65%。电力行业的碳价从 2020 年的 50 元 / 吨上升到 2040 年的 100 元 / 吨；
- 在“低于 2 °C”情景中，2017 年~2050 年累计的能源部门排放量保持在 2300 亿吨以下。这是基于 IPCC AR5 数据库的几种不同模拟结果，其保持在 2 °C 以下的置信概率超过 66%；
- 在 2020 年之后，基于 LCOE 的大多数风能和太阳能装置实现了上网侧平价，到 2050 年，大多数主流可再生能源的成本明显低于化石能源成本；
- 煤炭和天然气价格遵循国际能源署新政策情景以及国际能源署在 2 °C 以下可持续发展情景中的指数发展。
- 2050 年煤炭消费约束为 10 亿吨 / 年。

2050 年能源系统的简要概述

基于上述标准，按照“低于 2 °C”情景，2050 年能源系统简要概述如下。更多详细信息将在本概要及第 2 部分展望章节中作出说明。

工业及交通部门终端能源消费降低，电力消耗增加

由于中国经济处在转型期，国家高度重视工业和交通部门的能源效率和电气化。2050 年的终端能源消费比 2017 年低，能源结构也显著不同，确保可变再生能源的有效系统整合是电力系统发展的首要挑战。

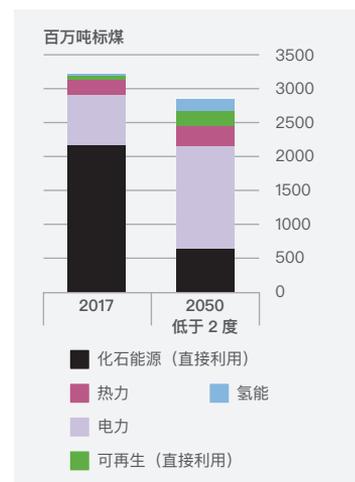
可再生能源替代化石燃料

2050 年能源供应以可再生能源为主导，主要是电力部门中的风能和太阳能。煤炭消耗量降至最低。尽管到 2050 年交通量将大大增加，但石油主要局限于交通部门，并且通过电气化减少石油的使用。天然气在

图 4
2017 年和 2050 年不同部门的终端能源消费



图 5
不同能源在终端能源需求中的份额



2050 年的能源供应中未发挥较大作用。水电和核电能够保证稳定的发电量，尽管这两种能源在潜力和选址方面有局限性。

如图 2 和图 7 所示，由于终端使用部门和供应系统的转型以及能源效率措施的实行，2050 年的能源平衡状况与 2016 年相比，大有不同。转型损耗大大减少，可再生能源和电力在供应中占主要地位。

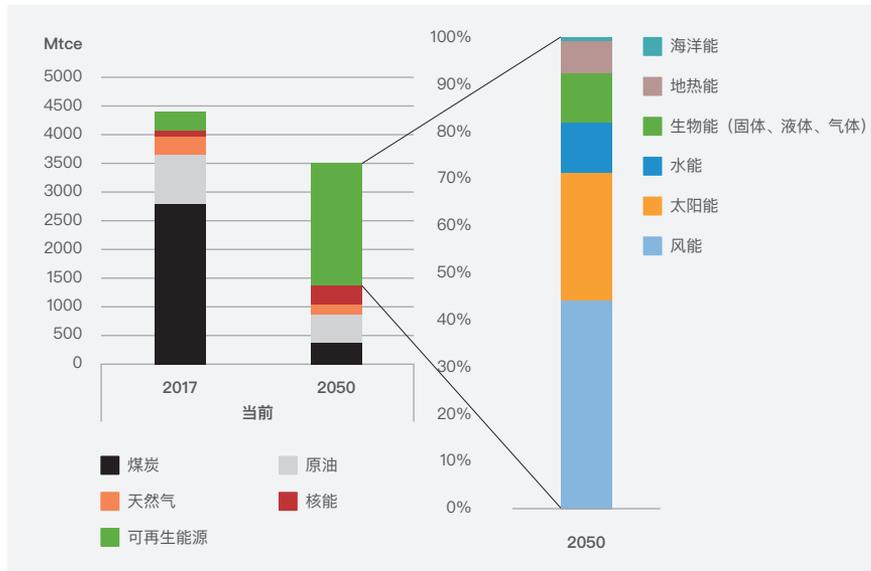


图 6
与 2017 年相比，2050 年的一次能耗（左图）和 2050 年的可再生能源构成，以风能和太阳能为主要来源

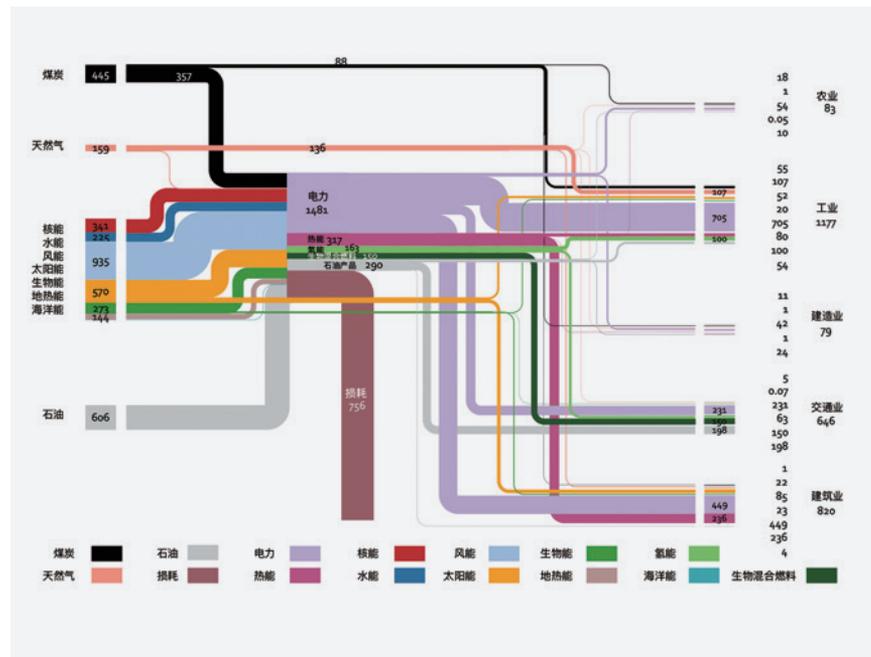


图 7
2050 年中国能源平衡（百万吨标煤）

2050 年可再生能源成为最为经济的电力来源

到 2050 年，风能和太阳能将成为最廉价和最丰富的电力来源——实际上，考虑到外部成本，它们很可能已经是最廉价和最丰富的电力来源——而且将采取基础设施和政策措施，以确保它们能够构成电力系统的核心。

确保可变可再生能源的有效系统集成是电力系统发展的首要挑战。

风能和太阳能主导未来的发电投资

煤炭必须在短期或中期内达到峰值，以满足空气质量和气候目标。天然气的价格以及对进口天然气的依赖限制了天然气的发展。从长远来看，天然气的相关碳排放也会面临相同的问题。由于环境影响和投资成本增加，水电开发速度正在放缓。生物质资源稀缺，其他几种应用比发电具有更高的价值。地热资源和开发成本尚不确定，海洋能源还处于起步阶段。

2050 年的电力系统是动态的，与目前的电力系统大不相同

资产组合、可调度性、运营范式、成本结构、运营时标和拓扑结构等方面的特征将发生变化。不能根据当前的原则，也不能利用当前的灵活性来源或监管范式来运行该系统。电力行业的各个方面都将发生彻底的变化，从市场设计和监管机构，到产品和服务定义，再到利益相关者角色，都将发生变化。要汇聚到 2050 年的电力系统中，除了硬件之外，还需要对新软件进行大量投资。电力系统规划、创新和改革必须向前看，并且要能够管理不确定性、可变性和日益增加的复杂性。

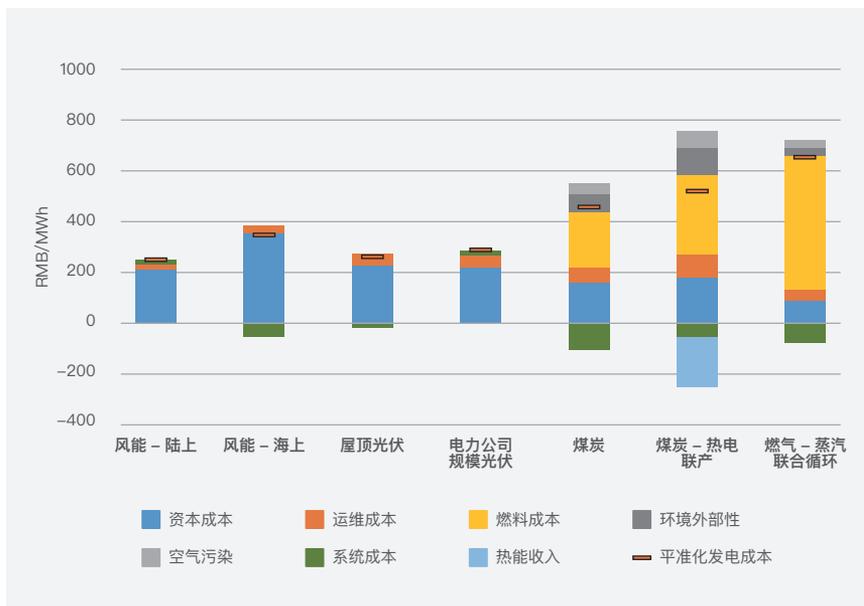


图 8
2050 年发电的平准化成本
(平准化发电成本, 单位:
RMB/MWh)

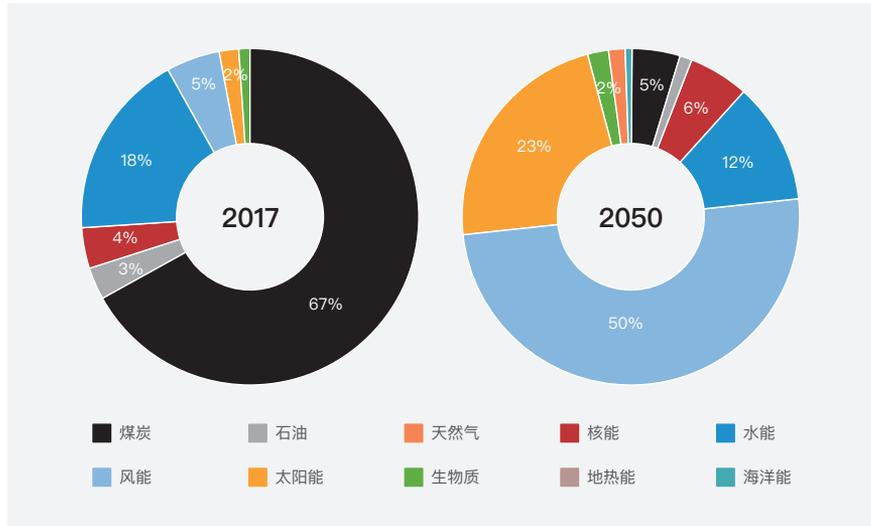


图 9
2017 年和 2050 年中国的发电量构成

在 2050 年平衡这一系统需要合理利用灵活资源

可靠性取决于各区域之间更大程度的资源共享，这一资源共享可通过强大的电网和电网之间的高度协调来实现。可靠性还取决于引入不同类型的电力来源，可减少因天气相关的技术故障以及资源和燃料短缺而发生故障的风险。

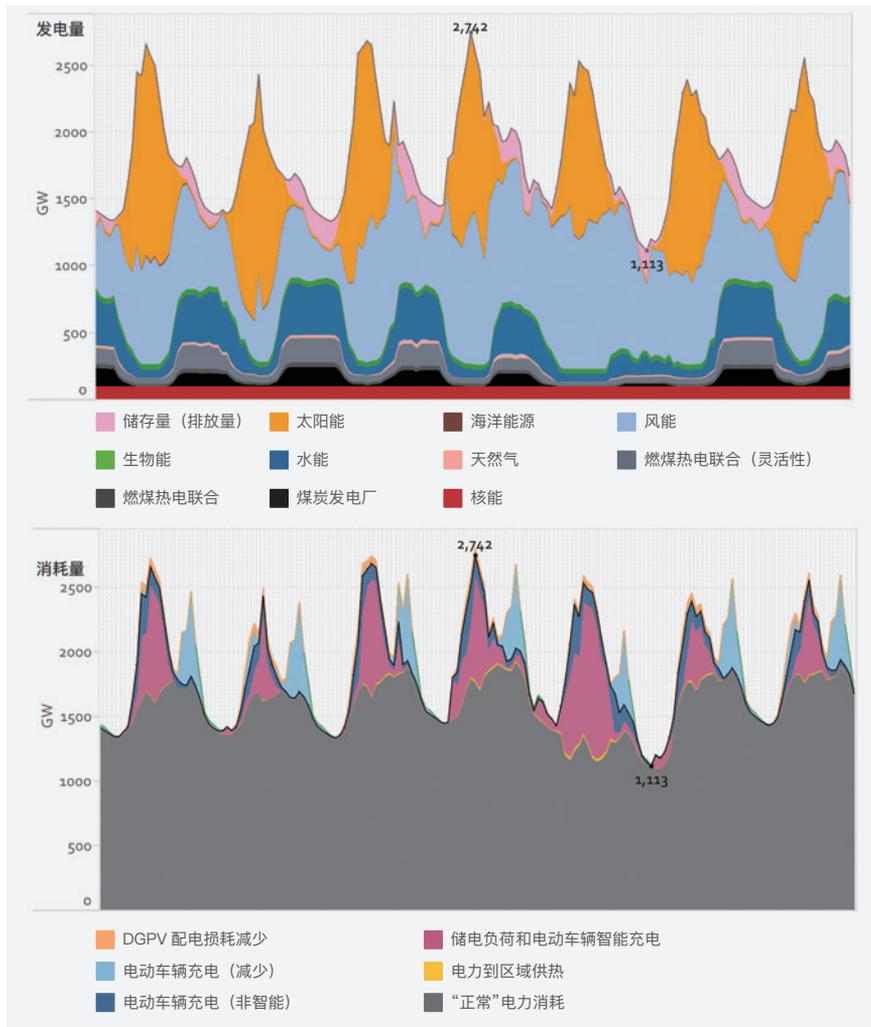


图 10
2050 年一周内每小时电力平衡

发展路径

要实现 2050 年的愿景，能源系统在今后几年内必须快速转型。在“低于 2 °C”情景中，从现在起，煤炭将逐步从终端使用部门淘汰，电力消耗量从 2025 年左右开始迅速增长，石油（包括与生物燃料混合的石油产品）的使用量在整个期间都有所减少，氢能（用电力生产）作为一种新的二次燃料被引入工业和交通部门。

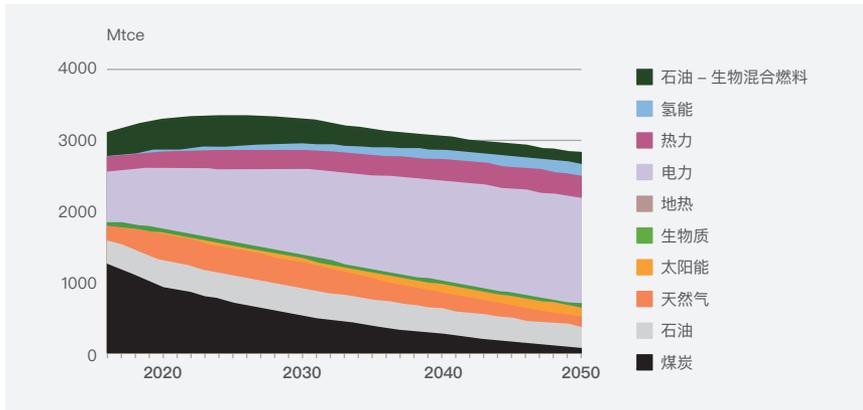


图 11

“低于 2 °C”情景中，2016 年至 2050 年的终端能源需求总量（百万吨标煤）

一次能源需求量将在 2025 年前达峰，风能和太阳能将逐渐成为能源系统中的主导能源（见图 12）。煤炭消费量在整个期间都有所减少，自 21 世纪 20 年代开始将加速淘汰。虽然天然气在短期内有所增加，但它并没有在煤炭和可再生能源之间起主要的桥梁作用，因为在电力部门中，就其经济性而言，可再生能源比天然气更具有吸引力。

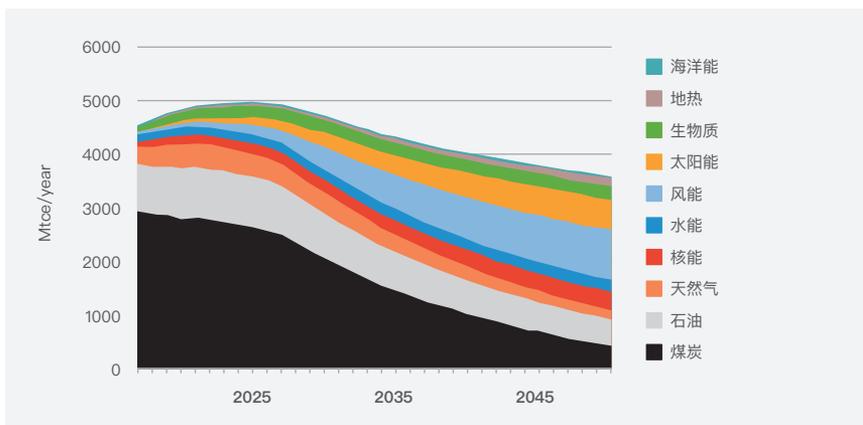


图 12

在“低于 2 °C”情景中，2016 年至 2050 年的一次能源需求总量（百万吨标煤）

如图 13 所示，在整个期间内部署了可再生能源，特别是风能和太阳能，部署最迅速的时期是 21 世纪 20 年代末。

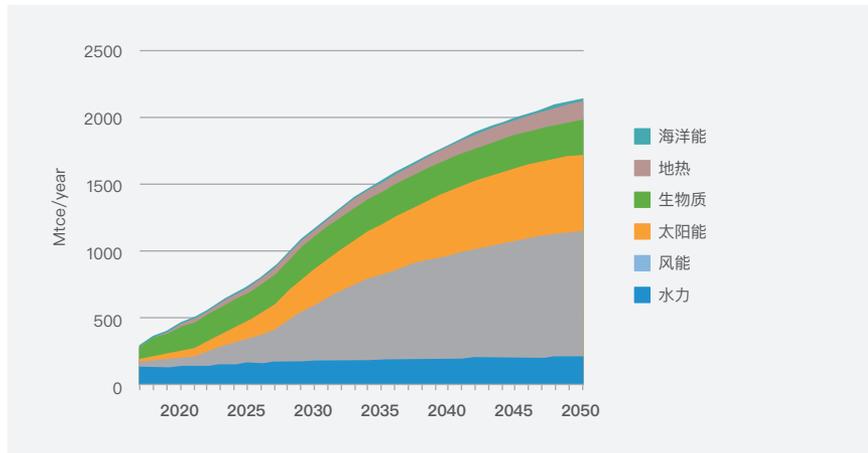


图 13

在“低于 2°C”情景中，2016 年至 2050 年可再生能源产量（百万吨标煤）

里程碑年份的关键数据如表 1 和表 2 所示。

		当前	“低于 2°C”情景		
单位		2017	2020	2035	2050
一次能源需求总量	百万吨标煤	4 360	4 640	4 167	3 483
煤炭	百万吨标煤	2 806	2 648	1 351	387
原油	百万吨标煤	864	939	716	487
天然气	百万吨标煤	306	441	334	164
核能	百万吨标煤	96	165	274	341
可再生能源	百万吨标煤	288	448	1 492	2 105
水能	百万吨标煤	142	153	199	225
风能	百万吨标煤	40	61	634	935
太阳能	百万吨标煤	22	47	378	570
生物能（固体、液体、气体）	百万吨标煤	83	165	206	218
地热能	百万吨标煤	0	22	72	144
海洋能	百万吨标煤	-	0	3	12
终端能源需求总量	百万吨标煤	3 178	3 283	3 134	2 805
煤炭	百万吨标煤	1 192	945	391	88
石油产品	百万吨标煤	340	356	367	290
天然气	百万吨标煤	242	385	299	136
太阳能	百万吨标煤	4	11	73	137
生物能（固体、液体、气体）	百万吨标煤	58	65	63	44
地热能	百万吨标煤	-	-	-	-
电力	百万吨标煤	748	852	1 315	1 496
热能	百万吨标煤	213	238	288	317
氢能	百万吨标煤	3	10	107	164
生物混合燃料	百万吨标煤	381	434	262	160

表 1

2017 年、2020 年、2035 年和 2050 年“低于 2°C”情景中的一次能源需求总量和终端能源需求总量的关键数据

	单位	当前	“低于 2 °C”情景		
		2017	2020	2035	2050
总装机发电容量	GW	1 746	2 108	5 366	6 814
可再生能源	GW	621	842	4 362	6 159
水能	GW	313	343	454	532
风能	GW	163	221	1 826	2 664
生物能（固体、液体、气体）	GW	15	48	64	57
太阳能	GW	130	224	1 962	2 803
太阳能 CSP	GW	0	5	38	33
地热能	GW	0	1	5	20
海洋能	GW	–	0	13	50
核能	GW	36	58	96	120
化石燃料	GW	1 088	1 208	907	536
总发电量	TWh	6 313	7 859	13 324	15 324
可再生能源	TWh	1 676	2 186	9 545	13 488
水能	TWh	1 153	1 249	1 622	1 831
风能	TWh	328	496	5 159	7 612
生物能（固体、液体、气体）	TWh	44	146	221	268
太阳能	TWh	151	277	2 380	3 439
太阳能 CSP	TWh	0	14	100	86
地热能	TWh	0	4	38	153
海洋能	TWh	–	0	26	100
核能	TWh	257	442	735	915
化石燃料	TWh	4 381	5 231	3 044	920

表 2

2017 年、2020 年、2035 年和 2050 年“低于 2 °C”情景中的装机发电容量和总发电量

既定政策情景

既定政策情景是以能源转型、环境政策和环境政策相关的现有和既定政策为基础的。相比于“低于 2 °C”情景，假设和目标设定的主要区别是：

- 在“低于 2 °C”情景中，二氧化碳减排的目标更强，确保符合全球温度增长低于 2°C 的要求。
- 在既定政策情景中，要在 2030 年前实现使用天然气的目标，而在“低于 2 °C”情景中，未设定 2020 年后的目标。

- 更加重视终端使用消费的电气化。

因此，相比于“低于 2 °C”情景，在既定政策情景中，2020 年后部署的可再生能源数量较少，而煤炭、石油和天然气的消费量较高，如图 14 所示，且终端使用消费的电气化程度也较低。

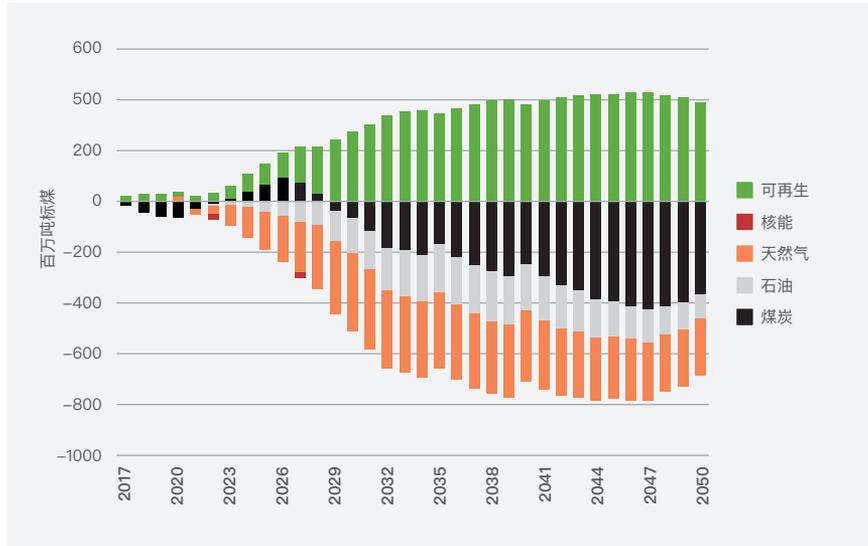


图 14
到 2050 年“低于 2 °C”情景和既定政策情景下一次能源需求量（百万吨标煤）的差异

符合美丽中国能源系统的愿景

这两种情景的质量取决于它们实现 2050 年能源系统政策愿景——建立一个清洁、低碳、安全和高效的能源系统——的能力。

两种情景都旨在建立 2050 清洁系统，但“低于 2 °C”情景要求的是更清洁的发展之路

在“低于 2 °C”情景和既定政策情景中，到 2050 年，能源系统的空气污染水平显著减少，除氨气 (NH₃) 外，所有空气污染参数都大幅下降。但是，相比于既定政策情景，“低于 2 °C”情景中，空气污染物将快速减少。在“低于 2 °C”情景中，黑碳 (BC)、有机碳 (OC)、氮氧化物 (NO_x)、二氧化硫 (SO₂)、一氧化碳 (CO) 和非甲烷挥发性有机化合物 (NMVOC) 的排放量在 2030 年后出现大幅下降，原因是在情景中提前减少了煤炭和石油的使用。这导致与污染相关的严重疾病和过早死亡病例相对减少，从而产生了显著的社会经济效益。

在《中国可再生能源展望》提出的两种情景中，尽管由于技术改进导致电力生产加倍，但是能源的总耗水量仍在下降。在“低于 2°C”情景中，能源部门用水量远远低于既定政策情景的用水量。“低于 2°C”情景中，用水量从 2020 年开始减少，然而既定政策情景的用水量预计将会增加直到 2030 年，并且在此之后有所下降。

两种情景中二氧化碳均显著降低

“低于 2°C”情景对 2017 年至 2050 年二氧化碳排放总量设定限值为 2280 亿吨，旨在为中国实现巴黎协议目标做出重大贡献。基于允许的累积排放量建立年度二氧化碳预算，从而确保二氧化碳排放量从当前水平平稳减少到 2050 年的水平。由于大规模的电气化，二氧化碳排放量减少最多的是工业部门。尽管电力消耗加倍，但电力和区域供热部门也实现了显著的碳减排。

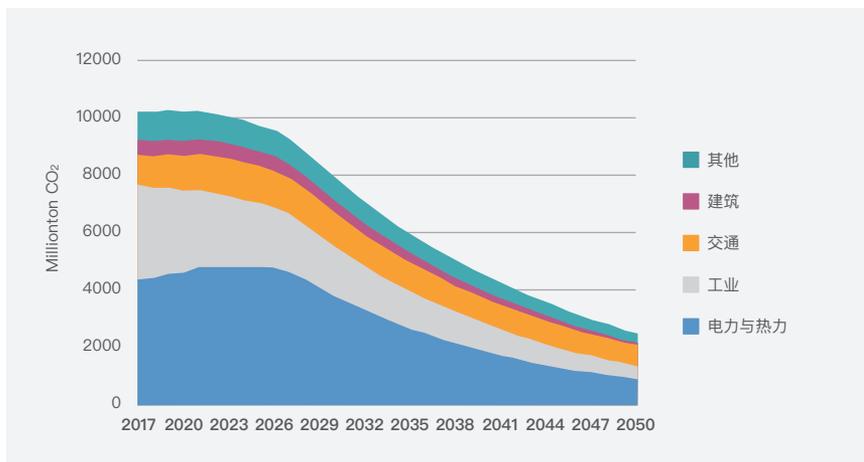


图 15

各部门 2017 年至 2050 年在“低于 2°C”情景中二氧化碳排放量（百万吨 CO₂）

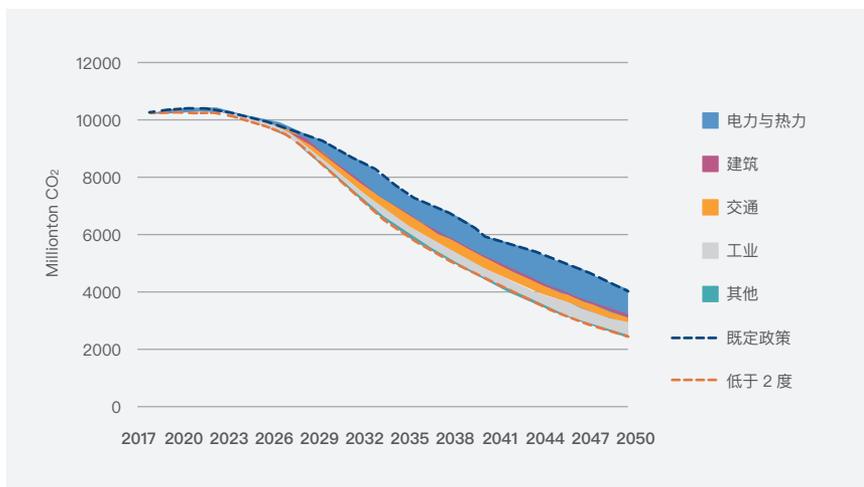


Figure 16

2017 年至 2050 年“低于 2°C”情景和既定情景碳排放量（百万吨 CO₂）

能源进口依赖度显著降低

与当前情况相比，2050年的能源系统在不同能源组合方面更加多样化。在“低于2℃”情景中，对化石燃料的依赖性降低至40%，既定情景中，其依赖性降低至50%。在“低于2℃”情景中石油和天然气的进口减少，降低了对进口燃料的依赖。

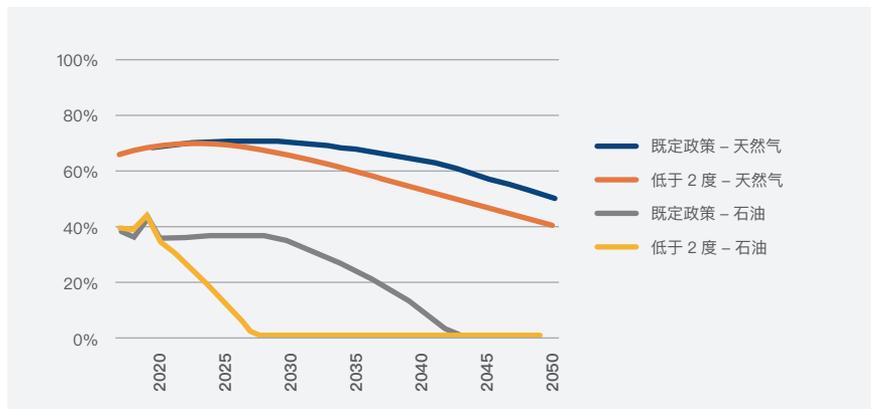


图 17 “低于2℃”情景和既定政策情景中石油和天然气的进口份额

高效利用能源

到2050年，在“低于2℃”情景中，中国的一次能源消耗仅为2017年消耗量的80%。同时，国内经济生产总值（GDP）将翻两番，并且能源效率大幅提升。

提高效率可以减轻建筑和交通的能源消耗增长，并放缓2017年至2050年间终端能源消耗的上升趋势。从供方角度来看，在没有重大转换损失的情况下，从具有高损耗的燃煤火电厂向可再生能源的转变提高了整个能源系统的能源效率。

未来电价更加便宜

由于可再生能源技术的成本持续降低以及存量项目逐步退出，将实现比现在更低的成本供电。在两种情景中，2050年电力供应成本较低。在“低于2℃”情景中，对二氧化碳减排的关注更加严格，这促进了更快转型为基于可再生能源的能源系统。因此，社会在燃料方面的支出减少，而在基础设施和系统相关成本上的支出则相对较多。

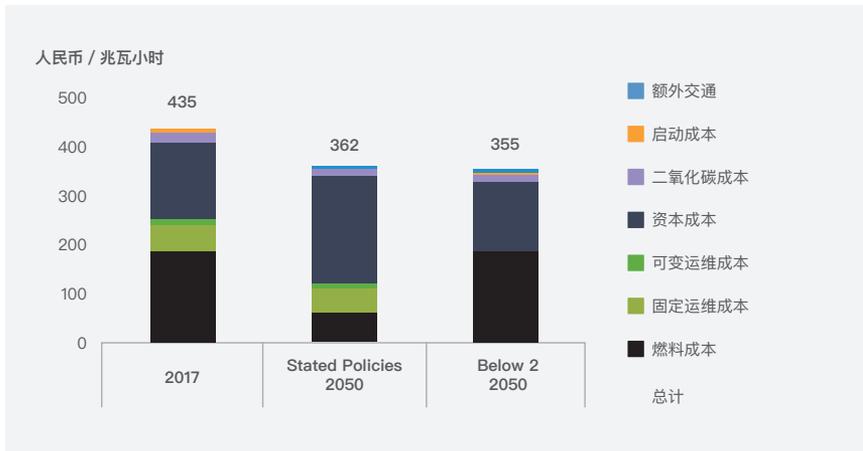


图 18
“低于 2 °C”情景和既定政策情景中从 2017 年至 2050 年的电力系统成本（人民币 / 兆瓦小时）

创造就业机会和 GDP 影响

可再生能源产业的快速发展将对宏观经济起到积极促进作用。2025 到 2035 年，可再生能源产业规模的快速扩大将推动与其相关部门直接或间接的就业需求，新增的就业机会将远多于传统能源行业如火电厂的失业人数。

可再生能源产业的发展促进产业经济结构调整。由于可再生能源产业链涵盖多个行业，如电子元件、信息和通信、计算机、技术服务等，其发展壮大将带动一系列具有高附加值行业，满足可持续发展的要求。

可再生能源技术成本下降将提高能源产业的运营效率，为一系列能源相关的高附加值服务创造发展空间，如基于基础能源服务的能源数据处理、分布式能源、能源生产和消费、储能和电动汽车充电等。

既定政策情景中的重大进展和“低于 2 °C”情景中的额外利益

总之，未来能源系统的所有标准在既定政策情景和“低于 2 °C”情景都得到了极大改善。然而，从综合角度来看，考虑到能源安全、环境影响和能源系统成本，将能源转型从当前和既定政策框架给出的途径进一步推进是值得的。因此，“低于 2 °C”情景可能是未来一年制定政策的可行愿景和基础。

推动能源转型的政策措施

在《中国可再生能源展望 2018》报告第 3 部分中，讨论了若干项政策措施和跨领域议题。以下是第 3 部分不同章节中主要调查结果的简介：

RE 激励措施

中国的目标是改变支持风能和太阳能的政策，从基于上网电价的固定支持机制转向更灵活的、以市场为导向的方法，包括拍卖和可再生能源配额义务，包括：

- 根据可再生能源发展现状、可再生能源潜力和地方电力需求特征，制定各省可再生配额义务政策。
- 可再生能源补贴政策改革，其中包括陆上风能和太阳能光伏的拍卖，以及尚未达到规模的生物质和海洋能源等相对固定的电价。价格竞争将是确保逐步取消补贴同时继续促进风能和太阳能发展的核心要素。
- 对于使可再生能源在无需补贴的情况下进行竞争，其他市场改革措施至关重要，其中包括改变输电定价以防止跨省输电费和交叉补贴阻碍可再生能源输出，采用有利于发展分布式可再生能源的配电网改革措施，改革税收结构（包括碳税和地税），以反映各种能源的外部成本来源，使可再生能源（包括分布式能源）参与现货市场以及中长期电力市场，并促进绿色金融，以支持清洁能源的发展，并取代化石燃料。

在这方面，研究可再生能源拍卖的国际经验尤为重要，特别是德国的风能和太阳能拍卖。德国拍卖的特点是参与度高、项目实现率高且中标价格稳步下降。德国成功的关键因素包括透明的程序步骤、定期进行拍卖的时间表、确保投标人和项目融资者保持信心的监管稳定性，相关规则仍将保留，并强调针对具体技术的投标，以确保稳定的工业发展。本章最后描述了中国现行拍卖政策的特点及其未来发展。

碳定价

自去年 CREO 以来，作为起点，已为电力部门建立了排放交易系统的中国国家试点。

本章首先回顾了我国 ETS 现状，总结了欧洲在 ETS 与 RE 支持政策关系方面的经验，并概述了欧洲 ETS 政策设置的最新变化。

一般情况下，欧洲的情况不涉及可再生能源的支持和目标与碳市场的直接协调。相反，欧洲的经验表明，稳定的储备机制，加上超额津贴的退休，有可能避免出现超额津贴的情况。

本章最后从 RE 促销政策的角度对中国 ETS 的下一步发展提出了建议

互连：传输

本章首先概述了中国电网的发展：

近几十年来，中国电网迅速发展，以满足需求增长，实现可再生能源一体化。然而，中国电网的发展一直集中于大容量、长距离特高压输电，许多现有 500kV 和 750kV 的省际和地区间输电线路利用率较低。

中国的系统还着重于将电力从发送地区单向传输至高需求地区，导致系统灵活性降低。与此同时，各省之间的电力贸易壁垒依然很高。

借鉴国际经验，本章介绍了欧洲国家如何在通过投资解决瓶颈和限制的原则下努力优化跨区域联系，同时能够实现积极的净社会经济利益。欧洲可能会发展成一个高度网状交流电网，点对点连接到北部和南部的几个国家，并安装高度灵活的区域间直流联网。

考虑到欧洲的情况，本章分析了中国互连线路的灵活使用，表明中国电网灵活运行的增加促进了电力成本显著降低、二氧化碳排放减少、可再生能源渗透率提高且削减量降低。

需求侧响应

由于 RE 发电的波动性，电力系统需要更大的灵活性，以更好地整合可再生能源，并确保电力系统的稳定性。通过灵活的过程，能源消费者可以为可再生能源的系统集成做出贡献。本章介绍了德国和法国在市场环境下使用 DR 的国际案例，描述了当前中国的需求侧灵活性使用框架，并就进一步行动提出了建议。

需求响应的成功实施取决于中国现行电力市场改革的全面实施，包括在批发电力市场和零售市场建立现货市场。

需求响应也取决于长期和短期价格信号，以及是否所有有关各方能够从调节需求来反映这些价格信号的补偿效益。分类计价电网运行和零售销售可能有助于解决利益冲突，目前防止批发价格信号有效传输至零售用户。

鉴于 DR 的复杂性，利益相关者的参与也是至关重要的。利益相关者，如大型工业客户、整合者、电网公司和发电厂都需要了解 DR 框架以及谁可以受益和参与。可能需要通过营销活动、教育和工业客户试点，以获得和分享经验。

供暖

由于许多大城市人口密集且供应商和消费者产生的潜在废热种类繁多，中国可采纳调热规划办法，包括基于环境和气候效益的热规划。燃煤供暖在偏远地区仍十分常见，热泵和太阳能供暖是这一问题的最佳解决方案。对于城市而言，包括中小城市，集中供暖是最佳选择。目前，许多电力和工业生产过程中的废热浪费在冷却塔中。中国计划扩大热电联供的规模时，中国能超越热电联合且创造热电一体化市场。我们尤其建议：

- 供暖和供热需采用多种批发零售价，以避免市场失灵，如在冬季减少使用可再生能源。由于市场激励机制，集中供暖可成为一种有效的储热“电池”以备不时之需。
- 在寒冷、酷寒和气候温和的区域，集中供暖应该进行测量和输送，以确保全年供热和自来水供应。
- 在夏季酷热、冬季酷寒的区域和夏季酷热的区域，大型建筑物应配备通风系统，进而在冬季可通过集中供暖加热且在夏季可通过吸收式热泵降温，其热量通过集中供暖提供。
- 确保能源和环境税在排放和燃料单位水平上得到有效应用，以避免热能电能用户环境属性和有效价格信号外部成本的重复计算。

海上风电

中国有充足的海上风电潜势，但海上风电开发已落后向岸风能和太阳能开发数年。中国海上风电项目已显示比预计给定可用的风力资源较低的产出，但中国海上风电选址过程和项目开发商似乎十分繁琐且缺乏透明性。这些缺点导致海上风电电价抬高，进一步拖慢该资源的开发进程。

本章节吸取国际经验，尤其是丹麦的经验，以呈现各种关于如何改进中国海上风电开发现状的建议，包括以下建议：

- 指定海上风力发电机区域前开展全面筛选和实施规划；说明风况、海水深度、电网连接选项、海底状况以及海洋生物。监管部门应该基于给定条件和限制条件下的预期经济绩效为潜在项目排名。
- 开放商应该能自由设计风力发电场和选择基础、涡轮机和其它部件，且不受能影响创新或限制价格竞争的当地条件限制，以获得部件和服务。
- 规划开始时所有在政府层面与海洋有利害关系的受影响各方应避免未来的利益冲突。考虑澄清利益冲突，如航线、环境敏感地带、渔业区、资源和提前提取的资源。
- 进行所需的昂贵且费时的分析前，将公共领域中关于环境影响的现有研究作为环境影响评估要求的一部分。若该资源不可获得，制定环境影响评估一般方案且确保其结果是公开的，以便于制定未来海上风电规划。

关键建议

基于 2018 年 CREO 分析，建议采取以下行动。

煤炭和石油消耗减少措施

目前，最重要的一步是减少中国的煤炭消耗。建议采取以下措施：

通过严格控制将煤炭消耗减少作为重中之重

必须严格执行减少煤炭消耗的决定和目标，从而避免搁浅投资，并在持续高煤耗的情况下减少既得利益。

目前停止新建燃煤发电厂

不需要投资新建燃煤电厂，并且这种投资具有较高的无利可图风险。新建燃煤电厂的建设降低了现有发电厂的利用率和维持风能以及太阳能的弃风弃光，降低了存量投资的盈利能力。应立即暂停建设新建煤电厂。

通过部门调整和电气化减少工业用煤

未来几年，应推动削减重工业过剩产能并弃风弃光产业库存，从而确保工业用煤需求减少。此外，应促进电气炼钢和绿色水泥生产技术，从而进一步停止大部分剩余煤炭需求。

通过鼓励在交通部门雄心勃勃地部署电动汽车来约束石油消耗增长

通过继续努力在交通部门部署电动汽车，应该停止增加对石油的进口依赖性。

在短期内提升碳价

为了建立低碳能源系统，需要对能源部门设定严格的二氧化碳最高限额。有效的碳定价方法可能将电力价格中二氧化碳排放成本包括在内，从而在基于化石燃料的电力和可再生能源之间创造更公平的竞争环境。目前电力行业宣布的国家二氧化碳排放试点似乎不足以确保足够高的碳价格。包括碳排放税和 / 或碳市场内的最低价格等的进一步措施应视为短期解决方案。另外，碳定价和碳市场必须包括电力部门以外的其它部门，特别是煤炭消费量也较大的工业部门。

未来十年内将可再生能源的部署提高到一个新的水平

根据已有分析，第 14 和第 15 个五年计划期间，太阳能和风能部署水平应显著高于第 13 个五年计划期间。与化石燃料技术相比，这将进一步加速可再生能源的经济可行性。然而，可再生能源仍然容易受到政策选择的影响，集中消除可再生能源部署障碍并制定激励措施，从而鼓励投资者和开发商加快巨大努力较为重要。以下短期措施将有助于朝这个方向发展：

明确的电力系统开发指南

在暂停建设新的煤炭发电厂之后，应发出明确的信号，以促进可再生能源的发展。如果缺乏坚定的电力部门改革，将阻碍必要的可再生能源规模的扩大。实施电力市场改革，包括扩大可再生能源使用的现货市场、现有煤炭电厂的全面技术灵活性、可再生能源装置转移到弃风弃光量较低地区以及完成规划输电通道，应能够在 2020 年之前解决弃风弃光问题，并与政府目标保持一致。这对于第 14 个五年计划期间的可再生能源发展至关重要，并且任何削减恶化情况都有可能对导致可再生能源成本降低，并危及中国的长期清洁能源目标。为了达到实现巴黎协议的途径，“低于 2 °C”情景中，预计到 2025 年非化石电力将达到 44%。在第 14 个五年计划期间，每年太阳能光伏安装量应达到 70–85 GW 每年，且风能安装量平均每年可达 40–70GW。

到 2035 年，中国的目标为非化石能源发电应大约占 77%，并且供应的可再生能源发电应至少占 67%。因此，2030 年非化石能源发电目标应增加 50%。

灵活性服务应进行估价、定价并商业化。供需双方均提供各种灵活服务，且对电力市场提供有效信号。根据系统的迫切需求，电网和电力市场之间的联系应日益紧密并进行动态运行。多样化的灵活性资源将允许更高效地整合可再生能源并更快地减少二氧化碳排放量。随着存储成本的降低，到 2035 年，系统中可能会有 400–600 GW 的累积存储容量。随着电气化程度的提高，需求方可以提供越来越多的灵活性，而电动汽车的智能充电可以在确保系统平衡方面发挥核心作用。

电力部门转型的关键角色必须是可再生能源部署的驱动力。大型电力生产商的战略应适应未来，电网公司的输电规划应适应新时代，并且地方政府应在从煤炭到可再生能源的转型中发挥积极作用。电力部门实施改革将对为所有利益相关者创造适当的激励措施发挥决定性作用。

消除分布式发电和海上风力发电障碍

应通过制定更流畅的审批程序促进能源负荷中心附近的可再生能源部署。这需要各部门之间以及中央和地方政府之间加强协调，从而消除可再生能源的制度障碍。通过政府部门之间更好的协调，还应使海上风力发电规划和审批程序合理化。

逐步转移补贴制度，从而避免应变经济情况

用于转变可再生能源补贴制度的坚定明确途径将有助于开发商进行项

中国可再生能源展望

2018