



中国低碳技术创新需求评估

—以储能行业为例

2021.5





碳信托是一家全球领先的独立专业咨询公司，以推动低碳经济转型为使命。我们的商业活动遍布世界各地，来自30多个国家的300余名员工分布在英国、中国、新加坡、墨西哥、南非、巴西和美国。我们为知名品牌设计减少碳排放和提升资源效率的发展战略，为政府规划并实施节能低碳创新项目，并协助跨国公司在低碳创新及清洁技术领域进行投资。碳信托于2009年成立了中国办公室。



中关村储能产业技术联盟是中国第一个专注在储能领域的非营利性国际行业组织。储能联盟致力于通过影响政府政策的制定和储能应用的推广促进储能产业的健康有序可持续发展。

储能联盟聚集了优秀的储能技术厂商、新能源产业公司、电力系统以及相关领域的科研院所和高校，覆盖储能全产业链各参与方，共有国内、国际200+成员单位。储能联盟在协同政府主管部门研究制定中国储能产业发展战略、倡导产业发展模式、确定中远期产业发展重点方向、整合产业力量推动建立产业机制等工作中，发挥着举足轻重的先锋作用。

作者:

张楠 碳信托中国办公室高级分析师
赵立建 碳信托中国办公室首席代表
岳芬 中关村储能产业技术联盟副秘书长/研究总监
孟海星 中关村储能产业技术联盟研究经理

特别感谢:

钟丽锦 能源基金会总裁办公室主任
辛嘉楠 能源基金会气候变化国际事务主管
董钺 能源基金会气候变化国际事务研究员
张笑寒 能源基金会总裁办公室项目经理
俞振华 中关村储能产业技术联盟创始人兼副理事长



感谢能源基金会中国为本报告提供资金支持，同时也诚挚地感谢为本报告提出宝贵意见与建议的业内专家与同事。

本报告由能源基金会资助。报告内容不代表能源基金会观点。

目录

1. 项目背景	1
1.1 背景	1
1.2 技术创新需求评估的必要性	2
1.3 英国低碳能源技术创新	2
1.4 中国低碳技术创新	3
1.5 报告结构	5
2. 技术创新需求评估 (TINA)	6
2.1 TINA 背景	6
2.2 评估方法	9
2.3 产出与影响	15
2.4 TINA 在墨西哥的应用	19
3. 能源创新需求评估 (EINA)	22
3.1 简介	22
3.2 评估方法	23
3.3 产出与影响	27
4. 经验与建议	31
4.1 英国经验总结	31
4.2 对中国的建议	32
5. 中国低碳技术创新需求评估方法学框架	34
5.1 重点技术领域识别	34
5.2 重点技术领域创新需求识别和评估	36
6. 储能在未来能源系统中的作用与应用规模	39
6.1 中国清洁电力发展及温室气体排放趋势	40
6.2 储能在电力系统中的作用	41
6.3 储能应用规模预测	43
7. 储能技术创新的价值评估	45
7.1 储能技术创新对成本降低的影响	48
7.2 储能技术经济价值潜力	51
8. 储能技术创新和发展的市场障碍	54

8.1	市场壁垒和挑战分析	54
8.2	储能行业技术创新障碍	54
8.3	国际合作机会	55
9.	不同储能技术创新机会.....	56
9.1	锂离子电池	56
9.2	钠离子电池	56
9.3	铅碳电池	56
9.4	全钒液流电池	57
9.5	压缩空气储能	57
9.6	钠硫电池	57
9.7	飞轮储能	58
9.8	超级电容器	58
10.	其它因素影响评估.....	59
10.1	安全性因素评估	59
10.2	原材料可获得性与成本	59
11.	技术优选和政策建议	61
11.1	技术优选建议	61
11.2	储能技术创新机会建议	62
11.3	加速储能技术创新的政策建议	63
12.	低碳技术创新政策建议.....	65

1. 项目背景

1.1 背景

工业化革命以来，由于化石燃料的大量燃烧导致的全球气候变化为人类社会带来了一系列环境和社会问题。气候变化已经成为全球各国所面临的共同挑战。2015年，各国在巴黎气候变化大会上签订《巴黎协定》，提出将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在2摄氏度以内，并努力将温度上升幅度限制在1.5摄氏度以内的长期目标。

低碳技术创新对于全球各国实现低碳经济转型以及《巴黎协定》2°C 甚至 1.5°C 的目标至关重要。目前，我们距离实现《巴黎协定》中提出的全球平均温度不超过 2°C 的目标仍有很大差距（见

图 1）。联合国气候变化框架公约（UNFCCC）的分析表明，在基准情景下（不采取额外减排行动），全球温度将上升 3.8°C；而即使各个国家的气候承诺都得到落实，全球气温仍将上升 2.7°C。因此，要实现《巴黎协定》中的 2°C 目标必须加快低碳技术的创新和大规模应用。事实上，创新技术和解决方案的研发和应用已经成为以相对较低的成本实现全球应对气候变化目标最重要的机会。

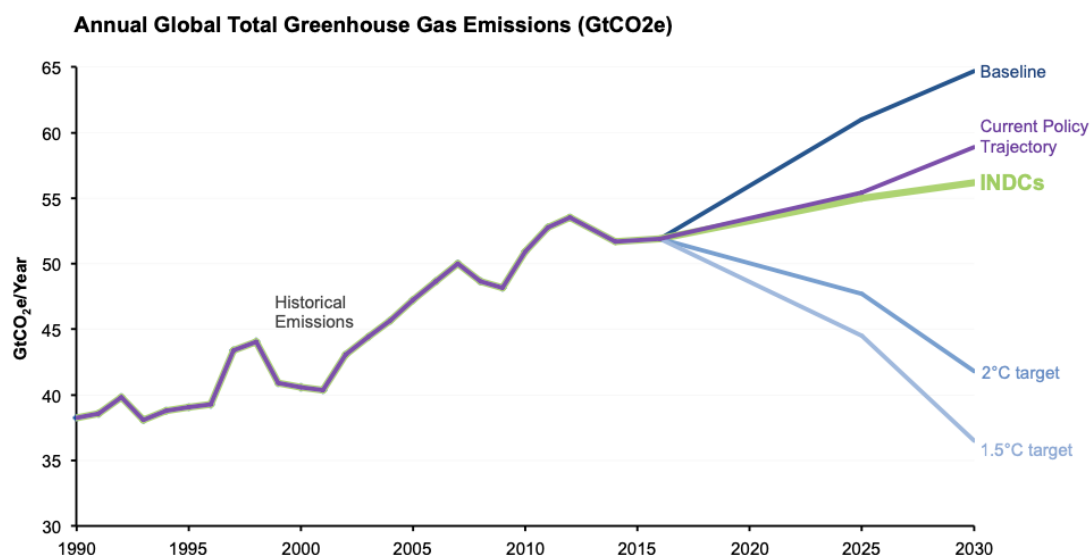


图 1 全球年温室气体排放量（单位：十亿吨）¹

¹ World Economy Forum, 2018. Accelerating Sustainable Energy Innovation.

能源生产和消耗约占全球温室气体排放的三分之二以上，同时造成了严重的区域空气污染。根据 BP 的研究报告，在渐进转型情景下，能源使用造成的碳排在展望大部分期间仍然逐渐上升，到 2040 年增长约 7%；同时报告认为电力行业将成为碳排放增长最多的行业，到 2040 年，电力行业碳排放占全球能源系统的约 40%²。未来电力行业碳减排的潜力巨大。通过加快创新步伐和大规模部署可再生能源技术，可以实现能源领域的减排潜力，大大减少温室气体排放并减缓全球气候变化。因此，能源技术创新已成为低碳技术创新最重要的领域。

技术创新已经开始重塑全球的能源格局。得益于成本的快速降低，包括太阳能光伏和风能在内的可再生能源大规模部署已经显著降低了电力部门的碳排放强度。电动汽车的普及也为交通运输行业的去碳化提供了技术路线。然而，根据国际能源署(IEA)的研究，只有少数能源技术的发展速度能够匹配全球的可持续发展目标。高风险、低回报、系统惯性以及较长的研发和商业化周期使私营公司的技术创新较为困难。为应对这些挑战，更加有力和高效的政策支持以及公共研发投入是必不可少的。

1.2 技术创新需求评估的必要性

技术的发展一般遵循从概念到商业化的路径，技术创新过程通常包括以下几个阶段：研发、示范和应用。在研发初期，公共资金通常具有关键作用。当技术进入具有商业化机会的应用研究和示范阶段时，私人投资将成为关键驱动因素，但仍然需要直接或间接的公共资金支持政策作为激励并降低投资风险，从而帮助企业克服市场障碍，例如较高的前期成本、有限的融资渠道以及系统转型惰性等。

为了加快技术应用、降低成本和推进商业化进程，公共部门需要在低碳技术的研发过程中投入大量资金。然而将有限的公共资金分配给所有重要的低碳技术是非常困难且无法实现的，而公共部门投资应该聚焦于那些对实现碳排放目标和经济增长目标影响最大的技术领域。因此，对技术创新进行评估和优先级排序分类是十分有必要的。

1.3 英国低碳能源技术创新

2008 年《气候变化法案》为英国设定了雄心勃勃的目标，即到 2050 年将其温室气体排放量与 1990 年的水平相比至少减少 80%。2019 年 6 月，新修订的《气候变化法案》生效，正式确立英国到 2050 年实现温室气体“净零排放”的目标。2020 年底，英国发布了最新减排目标，到 2030 年温室气体排放量与 1990 年相比，至少降低 68%。为实现其中长期气候目标，并保障安全、清洁和经济的能源供应，英国政府致力于支持和促进低碳技术创新。

为了协调政府部门和其他公共资助机构的低碳技术创新支持资金，英国成立了低碳创新协调小组(LCICG)，召集了英国提供低碳技术创新资金支持的公共部门，包括政策制定者、监管机构、公共预算利益相关方，以及公共资金支持的机构和项目。LCICG 的成员通过一系列的项目

² BP p.l.c. 2019. BP Energy Outlook 2019 edition.

和机制，为英国技术创新需求评估（Technology Innovation Needs Assessment, TINA）所识别的创新需求以及其他能源技术体系中创新需求提供支持。2016 年，能源创新委员会（Energy Innovation Board）取代 LCICG，为英国能源创新公共资金的使用提供战略层面的监督和建议。

根据《清洁增长战略》，英国已经大幅增加了对低碳创新的投资。从 2015 年到 2021 年，预计将有超过 25 亿英镑投资于低碳能源、交通、农业和废弃物领域的研发和示范，包括：

- 来自英国商业、能源和产业战略部（BEIS）能源创新项目的 5.05 亿英镑，旨在加速创新清洁能源技术和工艺的商业化
- 来自英国研究委员会和“创新英国”联合投资的 12 亿英镑，现在成立了“英国研究与创新”组织（UKRI），主要投资于能源系统和海上风电
- 为法拉第挑战赛提供的 2.46 亿英镑的资金，旨在在动力电池的设计、开发和制造领域建立英国的优势和领先地位
- 其他来自多个部门的 6.2 亿英镑资金，包括 BEIS，运输部（DfT），国际发展署（DfID）和环境、食品及农村事务部（Defra）

为了给英国技术发展计划提供科学依据并优化公共资金投入，LCICG 领导了英国技术创新需求评估（TINA）项目（2010-2016），该评估已经成功建立了对技术创新需求的共识，并影响了公共资金的研发投资决策。2018 年，为支持和优选能源系统的低碳创新，英国商业、能源和产业战略部（BEIS）启动了能源创新需求评估（Energy Innovation Needs Assessments, EINA）项目，以确定在英国能源系统中的关键创新需求。在本报告中，我们将主要关注这两个创新技术需求评估项目，包括其方法学和项目结果，为中国的低碳技术创新提供借鉴。

1.4 中国低碳技术创新

自上世纪 70 年代以来，我国经济一直保持较快的发展速度，对各类能源，尤其是化石能源的需求量持续增加。目前，中国是全球最大的能源消费国和温室气体排放国。按照当前的发展趋势，到 2050 年能源消费预计高达 66.6 亿吨，届时二氧化碳排放将高达 128 亿吨³。中国已经做出承诺并持续开展气候行动。2020 年 9 月 22 日，习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布，“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”。这是中国首次在国际社会上提出碳中和目标。12 月 12 日，习近平总书记在《巴黎协定》五周年“气候雄心峰会”上进一步细化了 2030 年碳排放强度、减排幅度、非化石能源占比等目标细则。

低碳技术创新是中国发挥创新潜力并履行气候承诺的重要路径。在《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》中明确提出了低碳技术创新，特别是在能效提升、可再生能源、核能和碳捕集与封存（CCUS）等领域。2016 年，中国发布《国家创新驱动发展战略纲要》，提出到 2020 年进入创新型国家行列，基本建成中国特色国家创新体系；科技进步贡献率提高到 60%以上，研究与试验发展（R&D）经费支出占国内生产总值比重达到 2.5%。2017 年，科技部发布

³ 中国石油经济技术研究院，2018。2050 年世界与中国能源展望。

《“十三五”应对气候变化科技创新专项规划》，明确应对气候变化的根本出路在于科技创新。在 2020 年发布的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中，“关键核心技术实现重大突破，进入创新型国家前列”被设定为 2035 年远景目标之一；“坚持创新驱动发展，全面塑造发展新优势”被列为“十四五”重点工作领域之一。

在能源技术领域，绿色低碳被列为能源技术创新的主要方向。例如《能源技术革命创新行动计划（2016-2030 年）》要求通过能源技术创新，加快构建绿色、低碳的能源技术体系，并提出了包括“先进储能技术创新”的 15 个重点任务。2020 年底，中国发布《新时代的中国能源发展》白皮书，明确提出发挥科技创新第一动力作用，在能源领域大力实施创新驱动发展战略，增强能源科技创新能力，通过技术进步解决能源资源约束、生态环境保护、应对气候变化等重大问题和挑战。

“十三五”期间，我国全社会研发（R&D）经费支出从 1.42 万亿元增长到 2.21 万亿元，研发投入强度从 2.06% 增长到 2.23%。2019 年，全国共投入研发经费 22143.6 亿元，比上年增长 12.5%；其中国家财政科学技术支出 10717.4 亿元，比上年增长 12.6%。⁴ 根据世界知识产权组织（WIPO）评估，中国创新指数位居世界第 14 位，整体创新能力大幅提升。

2015 年以来，科技部联合环保部和工信部联合发布了两批次《节能减排与低碳技术成果转化推广清单》，供工业企业、财政投资或产业技术资金、各类绿色低碳领域的公益、私募基金及风险投资机构等用户在进行节能和减少温室气体排放技术升级改造和投资时参考。自 2008 年起，国家发改委开始发布《国家重点节能技术推广目录》，以鼓励能源密集型企业采用先进的节能技术和新设备，提高能源利用效率，截至 2017 年底，已从 4000 多项技术中筛选出 260 项高能效技术。自 2014 年起，已经发布三批《国家重点推广的低碳技术目录》。清单和目录内容主要由相关地方和行业协会推荐，通过行业专家评估评审后确定。为支撑国家科技规划和政策制定，科技部已经开展了 6 次国家技术预测，目前第六次国家技术预测已经完成。

中国科技创新工作主要由科技部统筹负责，包括制定科技创新政策和战略方针，推动国家创新体系建设，负责科研项目资金协调、评估、监管，编制国家重大科技规划等。2015 年，建立了国家科技计划⁵（专项、基金等）管理部际联席会议制度，对中央财政科技计划进行统筹协调；联席会议由科技部牵头，财政部、发展改革委等与国家科技计划管理密切相关的 31 个部门和单位组成。在低碳发展和应对气候变化领域，技术创新也主要由科技部统筹，生态环境部、工信部、发改委、国家能源局等各部门共同参与。目前，中国正在组织编制面向未来 15 年的科技发展规划和“十四五”科技创新规划。

⁴ 国家统计局。2019 年全国科技经费投入统计公报。

http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202008/t20200827_1786198.html

⁵ 国家科技计划主要包括国家科技重大专项、国家重点研发计划、国家自然科学基金、技术创新引导（专项）基金、基地和人才专项。

1.5 报告结构

本项目针对低碳能源技术，旨在借鉴英国在低碳技术创新需求评估领域的经验，帮助中国政策制定者探索更有效的低碳技术创新评估方法和战略，推动中国加快实现温室气体减排和低碳发展目标。

报告由三部分组成：英国低碳创新需求评估案例分析，中国低碳技术创新需求评估方法学框架，中国储能技术创新需求评估。

首先，项目梳理和总结了英国低碳技术创新的经验，重点聚焦于技术创新需求评估（TINA）和能源创新需求评估（EINA）两个项目，分别介绍了项目背景、方法学、评估结果及影响。基于此，我们总结了英国技术创新需求评估的关键成功因素，以及对中国的借鉴（第 2-4 章）。

根据英国低碳技术创新需求评估，报告第 5 章初步提出了中国低碳技术创新需求评估的方法学框架，将定量评估与定性分析相结合，并纳入了可能适用于不同技术的特定考量因素。

最后，以储能行业为试点对方法学进行了测试，项目对七种储能技术的创新价值和经济价值进行了定量评估，并结合专家研讨和打分，识别了不同技术的关键创新需求（第 6-11 章）。

2. 技术创新需求评估（TINA）

2.1 TINA 背景

2.1.1 政策背景

英国将支持创新作为其政府计划的重要组成部分，认为低碳创新将有助于确保英国安全、清洁和经济的能源供应，实现相关的应对气候变化目标，同时有助于刺激新的商业机会和就业机会。

- 《欧盟可再生能源指令》（2009）：可再生能源在能源消费总量中的比重从2005年的1.3%增加到2020年的15%；
- 2008年《气候变化法案》：到2050年，温室气体排放量与1990年的水平相比至少减少80%。

在2011年11月发布的“碳计划”⁶中，英国政府进一步明确了创新对实现2050年碳减排目标的重要性。此外，英国还提出在应对气候变化和维护能源安全的同时，需要最大限度地降低成本并为英国带来经济利益。政府希望通过技术之间的竞争实现最经济高效地能源供给。实现这一目标的能源情景将取决于可再生技术、核能、碳捕集与封存，能源需求侧以及能效方面的创新成果。因此，英国政府明确提出支持：产业链合作以推动成本降低，创新低碳发电技术的研发和示范，以及减少能源需求相关的创新。

英国技术创新评估和优选主要由政策驱动。考虑到有限的公共研发资金，英国需要对低碳技术创新需求进行评估，筛选最具创新价值和经济价值的技术领域，提高公共资金支持创新的效率。此外，也需要通过科学坚实的评估方法使多个提供研发支持的公共部门之间达成一致。

2.1.2 英国创新生态系统

2010年，英国国家审计署（NAO）在审查可再生能源技术创新的公共资金执行情况和绩效时，发现在不同公共部门之间存在较大的协调挑战。由于缺乏统一的执行框架和一致的方法学来评估和报告公共资金的绩效，无法评估政府公共资金的投入是否实现了其既定目标。因此，国家审计署提出了八项步骤，建议通过一种规范的方法来规划和管理对可再生能源技术创新的直接资金支持（图2）。

⁶ The Carbon Plan: Delivering our low carbon future.

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/47613/3702-the-carbon-plan-delivering-our-low-carbon-future.pdf

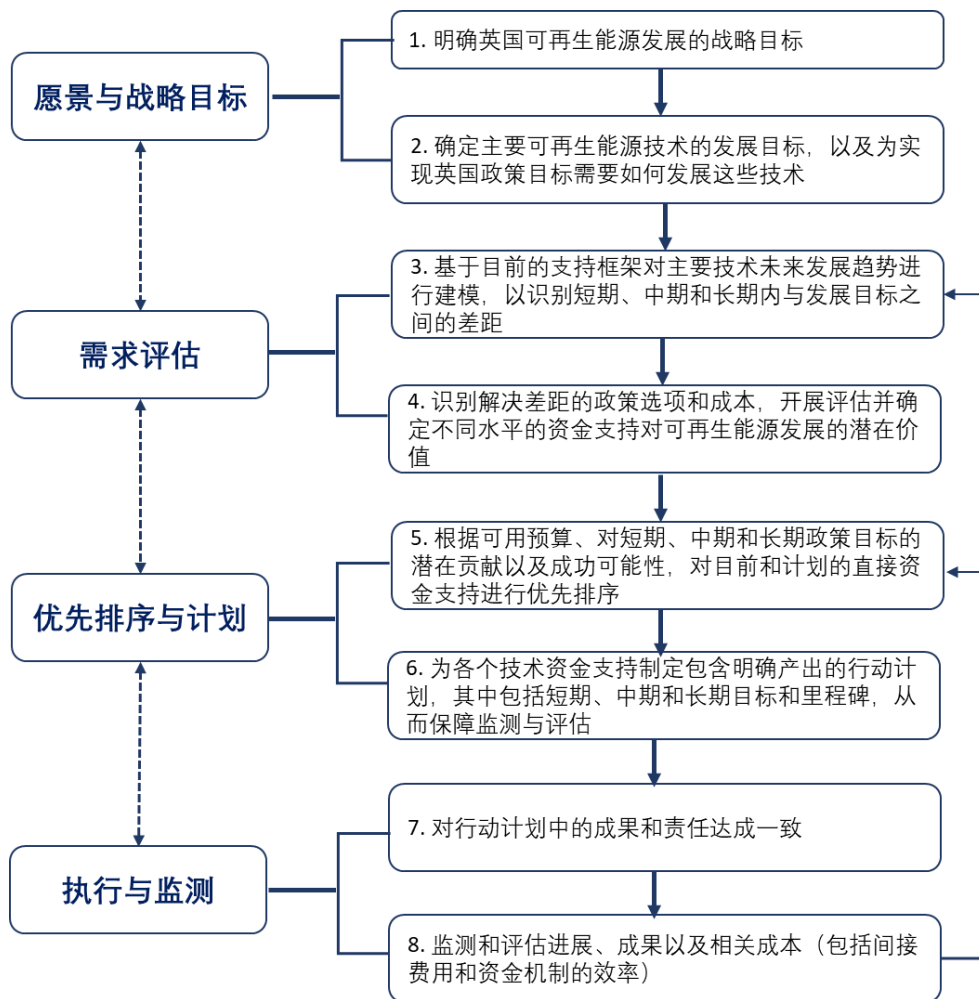


图2 规划和管理可再生能源技术公共投资的规范方法（8个步骤）

对低碳创新公共资金的审查发现，除英国气候变化与能源部（DECC）以外，英国至少有八个公共机构提供低碳创新资金支持，其中包括商业创新与技能部（BIS）、能源技术机构（ETI）、技术战略委员会（TSB）、工程和物理科学研究委员会（EPSRC）、苏格兰商贸投资（Scottish Enterprise）和苏格兰政府。由于技术创新的资金支持机构较多，潜在的创新者可能难以充分了解并参与其中。而且各个机构采用不同的方法学筛选支持项目，可能会导致资金缺口和重复支持。

因此，能源与气候变化部（DECC）引入了更规范的新方法来规划和管理对低碳创新的直接公共支持。英国成立了低碳创新协调小组（LCICG），以加强提供低碳技术创新支持的不同公共部门之间的协调。表1列出了LCICG的核心成员及其作用。通过合作与协调，这些机构可以提升创新支持的广度和深度，避免重复并提高资金效率。

表 1 低碳创新协调小组（LCICG）核心成员及其职责

LCICG 成员	职责
能源与气候变化部（DECC）	英国政府部门，领导英国能源与气候变化政策；其低碳创新重点是确保安全、清洁、经济的能源供应。
能源与气候变化部-创新项目	由英国政府部门直接执行的项目；聚焦于能源政策引导的技术创新的研发和示范，目标是提供安全、清洁、经济的能源。
商业、创新与技能部（BIS）	英国政府部门，负责英国工业、技能和创新政策；其低碳创新重点是推动经济持续增长。
工程与物理科学研究委员会	代表研究委员会的英国能源项目，其低碳创新重点是支持英国的能源政策目标。委员会支持各类领先的研究、研究生培训和活动，以对英国经济和社会产生积极影响。
技术战略委员会	英国创新机构，非政府部门的公共机构；致力于是通过刺激和支持从概念到商业化的企业创新来加速经济增长。
能源技术机构（ETI）	公私合作伙伴关系；其重点是能源系统分析以及对重大工程和技术示范项目的投资，致力于以最低的成本实现能源目标。
碳信托（Carbon Trust）	非股息公司；提供有关低碳创新需求分析、开发和应用方面的专业技术支持；与不同机构合作来加速低碳技术的商业化。
苏格兰政府	苏格兰政府的行政部门；领导苏格兰的能源政策；其低碳创新重点是确保创新有益于苏格兰经济。
苏格兰商贸投资	苏格兰政府支持的非政府部门的公共机构；刺激经济增长、产业创新和投资，以促进苏格兰经济发展。

低碳创新协调小组（LCICG）的支持重点是“低碳技术创新”，即具有低碳特征的技术：

- 防止或减少温室气体排放的技术；
- 以可持续的方式提供能源，且温室气体排放量显著低于目前技术的平均水平；
- 保障低碳技术应用的支持性技术，例如输配电技术或系统平衡技术；
- 减少能源的消耗量；
- 帮助消费者减少能源消费量，例如智能电表和需求侧管理技术；
- 减少其他过程（例如工业或农业）排放的温室气体。

2.1.3 TINA 目标

由于很多低碳技术都可以帮助英国实现其能源和减排目标，但考虑到有限的公共资金，必须对低碳技术的创新需求进行评估和优选。因此，在2010年，低碳创新协调小组（LCICG）成员共同发起了技术创新需求评估项目（TINA），旨在识别和评估特定低碳技术领域的关键创新需求，为公共部门低碳创新投资的优先级提供依据。

2.2 评估方法

TINA 方法学从两个层面对技术进行优选：宏观层面，对各个技术类别进行评估以确定重点技术类别；微观层面，对识别的重点技术领域进行详细分析。

英国 TINA 项目基于政府、行业和学术界已有的研究和经验，采用了一致的方法来识别和评估给定技术领域内的创新潜力。对于每个选定的技术领域，都考虑了该技术领域内的细分技术和主要组件，并识别实现英国长期减排目标所需要的关键创新需求。

2.2.1 技术领域筛选和识别

宏观层面的研究主要从两个维度对技术进行评估：碳减排潜力和经济价值潜力。图3为TINA宏观层面技术领域筛选方法的示意图。



图 3 TINA 宏观层面技术领域筛选方法 (示意图)

基于 2010 年所进行的宏观层面的研究以及低碳创新协调小组成员机构的意见，TINA 项目框架筛选和识别了以下低碳技术领域：生物能源、碳捕集与封存、住宅建筑、电网和储能、供热、工业部门、非住宅建筑、核裂变、海上风电、太阳能光伏、海洋（波浪和潮汐）、交通领域氢燃料。

宏观层面的技术类别筛选识别了要深入研究的重点技术领域（例如，生物能源、海上风电、核能等）。微观层面需要对每个技术领域中的具体技术进行详细分析。在进行技术范围界定和应用情景定义时，通常需要有一位协调员统筹所有技术领域的研究，以避免各个领域之间出现技术的重叠。

2.2.2 特定技术领域评估框架⁷

针对特定技术领域，TINA 项目框架包括建立技术和市场应用情景、评估对英国的潜在价值、评估公共部门资金支持的需求以及提出潜在解决方案。TINA 项目在各个技术领域采用了一致的的方法学。

⁷ Carbon Trust. 2015. Technology Innovation Needs Assessment (TINA) Critical Assessment.

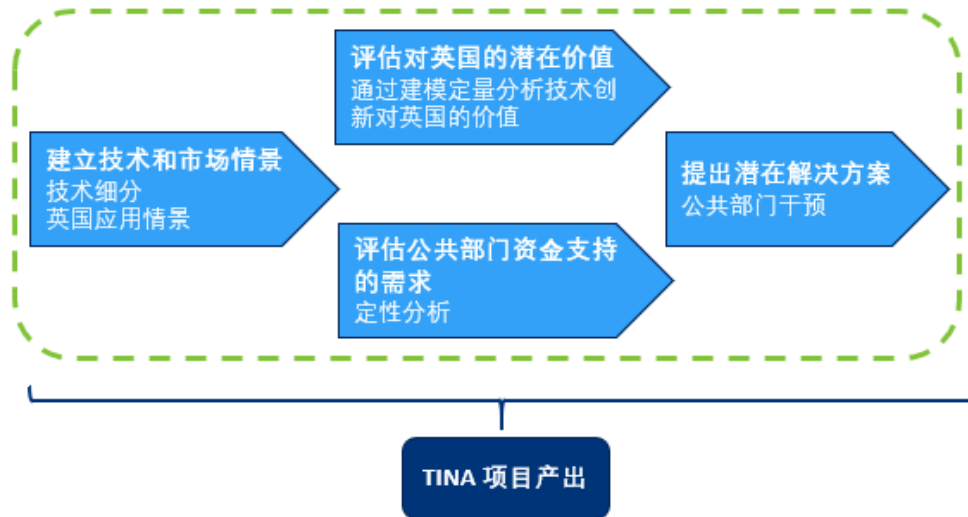


图 4 TINA 项目的主要组成部分

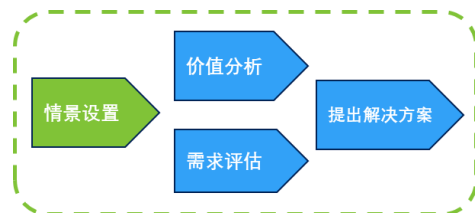
基于一致的方法学，TINA 不仅可以对比特定技术领域内创新机会的价值，也可以对比不同技术领域之间创新机会的相对价值。TINA 项目的分析框架由碳信托（Carbon Trust）开发和实施，并得到了 LCICG 所有核心成员的贡献以及其他专家和机构的意见与建议。

针对每个选定的技术领域，创新需求评估主要内容包括：

- 分析技术在英国能源系统中的潜在作用（应用情景预测）
- 估算通过创新降低技术成本可以给英国带来的价值
- 估算通过出口给英国带来的商业机会（经济价值潜力）
- 评估英国公共部门干预创新的现状
- 识别能为英国带来最大收益的潜在创新重点

2.2.3 英国技术应用情景

英国技术应用情景采用了能源技术机构（ETI）能源系统建模环境（ESME）中的一组模型，TINA 项目从中选择了不同的模型来分析不同技术领域的潜力。这种方法既保证了基本假设和参数的一致性（例如碳目标、能源系统约束等），也可以对每种技术领域进行深入分析。考虑到不同技术在政府能源和减排战略中潜在作用的不确定性，该方法的



价值在于它可以充分探索成本降低的潜力。

但是，这种针对每个技术领域单独开发技术应用情景的方法，可能会导致在不同技术领域模型中所设置的不同技术的应用水平不同，进而导致不同领域之间技术的对比较为困难。

情景差异：

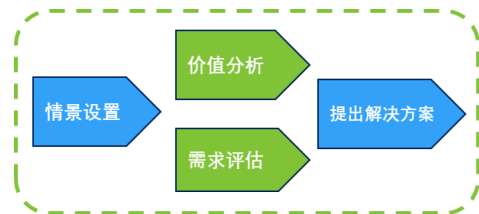
到 2025 年左右，不同技术领域模型中的技术应用情景都非常相似。但随着技术重要性的变化，情景设定开始出现差异。例如，到 2050 年，在核裂变技术领域模型中，中心情景将部署约 20GW 的海上风电；而在海上风电技术领域模型，约部署了 30GW 海上风电。在电力行业 CCS 模型中，中心情景 CCS 的部署水平显著高于太阳能技术模型中的情景设定。

根据对 TINA 项目的一项评估，建议在不同技术领域采用统一的英国技术应用情景。这将提高技术之间的可比性，有助于评估不同技术的系统优势，也便于理解和沟通。

2.2.4 技术评估

TINA 项目框架通过以下维度进行具体技术评估：

- 创新价值
- 创新带来的经济价值（GVA）和就业机会
- 英国市场壁垒/市场失灵
- 多大程度上可以依赖进口或海外创新



针对不同的技术领域，TINA 项目框架采用了相同的评估指标，因而可以在各技术领域内以及技术领域之间进行技术优选。项目通过定量分析评估了支持特定技术创新对英国的价值，随后从定性角度评估了政府干预和公共资金支持的必要性。该框架为政策决策提供了关键证据，同时尽量简化了指标。

创新价值

TINA 项目采用单位产品成本度量创新的价值（公式如下），创新将降低技术成本，从而降低部署成本。

$$\text{创新价值} = \text{没有技术创新的应用成本} - \text{技术创新后的应用成本}$$

在各类降低成本的措施中（例如供应链改进、标准化、融资创新等），研发创新是一个重要的成本降低驱动因素。TINA 项目将创新推动成本降低归类为两个驱动因素：研发（Learning by Research & Development, LbR&D）和“边做边学”（Learning by Doing, LbD）。LbD 被认为是除技术研发外的一系列创新活动的汇总。在某些情况下，LbD 带来的成本降低潜力可能大于技术研发。例如，海上风电约 50% 的成本降低来自于供应链和融资方面的机会。

对创新带来的成本下降进行建模是一个较为复杂的过程。TINA 采用自下而上的建模过程评估了技术组件水平可能的成本降低，进而分析了技术领域整体的成本降低潜力。项目利用学习曲线来评估创新的成本降低：假设全球技术应用每提高一倍，技术成本就会降低一定数值。项目使用了研发成本降低与“边做边学”成本降低的比例，将创新成本降低拆分为研发带来的成本降低和“边做边学”的降低成本。该比例根据技术的成熟度而随时间变化。

参数设定在很大程度上基于技术专家的意见。参数的选择通过对一系列专家访谈进行数据收集，其中学习曲线的确定需要对该技术领域以及相似技术领域有非常深入的了解。学习曲线更适用于相对成熟的技术。对于应用水平较低的新生或早期技术，技术成本可能并不会随着应用的增加而稳定下降，其学习曲线可能更像阶跃函数而非线性曲线。因此，在分析成本降低的建模过程中需要注意所涉及的技术细节。

然而，这种方法在评估非电源侧技术时存在一定的困难，它无法评估某些技术（例如需求侧响应或储能技术）所带来的巨大的潜在系统收益。因此，针对不同技术领域，TINA 项目采用了单位成本或系统收益指标来衡量技术的创新价值。

经济价值（GVA）和就业机会

TINA 项目采用以下方法计算创新所能带来的经济价值（GVA）和就业机会：

- 1) 确定技术的应用情景：
 - 预测技术在英国国内的应用情况（使用 ESME 模型）；
 - 预测技术在全球范围内的应用水平（IEA《能源技术展望》报告⁸）；
- 2) 基于技术组件的应用水平和成本下降路径预测技术在英国国内和全球的市场规模；
- 3) 确定可交易市场规模和不可交易市场规模的比例；
- 4) 评估英国的竞争优势：英国能够获得的全球可交易规模的比例；假设英国企业能够获得 100% 的国内不可交易市场规模；
- 5) 基于经济价值与市场规模的比例系数计算经济价值（GVA）；
- 6) 采用替代系数来评估技术应用替代原有技术后的经济增加值；
- 7) 基于就业与经济增加值的比例系数对就业机会进行估算。

在步骤（2）中，TINA 项目采用了一个“全球技术成本”的简化假设，即假设技术成本在全球范围内是相同的，不考虑地区差异。在步骤（3）中，需要评估市场中可交易和不可交易市场规模的比例。该参数一般通过专家访谈或与类似技术进行对比进行估算。在步骤（4）中，如果缺乏可靠的研究数据，一般也基于专家访谈和/或与类似技术的比较进行评估。在 TINA 项目中，假设到 2050 年，英国占全球市场份额的比例保持不变。在研究过程中，由于部分数据缺失，具体参数的选择很大程度上取决于一系列的专家判断。

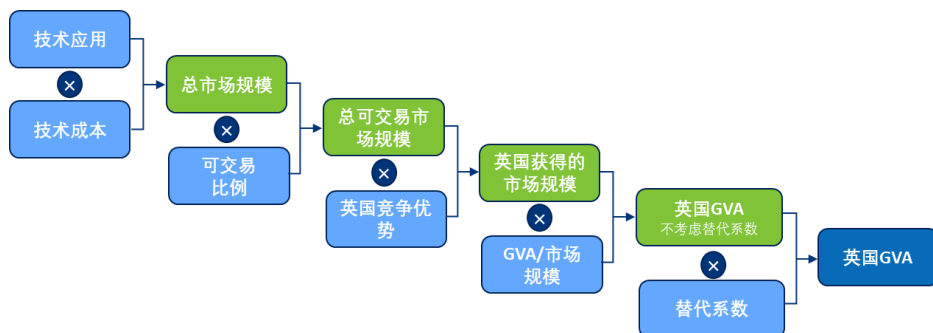


图 5 计算步骤：经济价值（GVA）和就业机会

⁸ IEA. 2017. Energy Technology Perspectives report.

市场壁垒及海外创新

在 TINA 项目中，市场壁垒和障碍的识别与评估通常通过价值链利益相关方研讨会进行，例如需求的不确定性、供应链的挑战、缺少价格信号、缺乏标准体系、市场需求受政策影响较大等。表 2 展示了针对电网和储能领域的部分市场壁垒和障碍分析。能否依赖进口或海外创新主要根据国际贸易前景、技术应用的特点以及英国的需求情况进行分析。

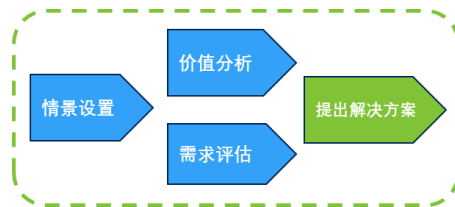
表 2 电网和储能领域市场壁垒和障碍分析（部分）⁹

细分技术领域	市场壁垒和障碍	评估
储能	<p>各方（包括监管机构、电网运营商和技术提供商）都不确定储能在未来能源系统中将发挥的价值和作用，为储能技术的创新和部署带来了障碍；</p> <p>在目前的电力市场机制下，无法体现存储所能提供的部分服务的价值，例如电压支持或减少输配电投资；</p> <p>缺乏清晰的基础设施规划，没有给各方以足够的信心投资储能技术研发或部署。</p>	关键障碍

2.2.5 公共部门支持建议

为优化和提高公共资金支持效率，项目为公共部门的创新支持提出了建议，主要基于以下三个要素：

- 技术创新的益处以及实现创新所需要的支持；
- 梳理目前英国和全球已有的技术创新支持项目；
- 分析潜在的干预措施



对这些要素的分析以及综合考量都需要技术专家以及产业界的广泛参与。对较为成熟的技术，TINA 为创新项目计划提供了更明确的建议和时间表；对其他技术，TINA 则提供了更广泛的建议。

⁹ Low Carbon Innovation Coordination Group. 2012. Technology Innovation Needs Assessment (TINA), Electricity Networks & Storage (EN&S) Summary Report.

2.3 产出与影响

2.3.1 主要产出与发现

表3总结了TINA项目的主要结果，包括技术应用情况、创新成本降低潜力以及经济价值潜力。需要注意的是，技术应用的数值主要基于情景分析，为创新需求的评估提供参数，它们并不是实际预测值或目标值。创新在不同技术领域的成本降低潜力如图6所示。

表3 各个技术领域到2050年的创新潜力汇总（累计）

技术领域	全球技术应用	英国技术应用	英国成本降低潜力	英国商业价值潜力
生物能源	61 EJ (14-87 EJ)	963 PJ (278-2586 PJ)	£42bn (£6-101bn)	£19bn (£6-33bn)
碳捕集和封存 (CCS)	431 GW (202-1011 GW)	30 GW (11-60 GW)	£22bn (£10-45bn)	£8bn (£3-16bn)
住宅建筑	-	-	£16bn (£4.5-37.5bn)	£1.7bn (£0.6-3.7bn)
电力网络	-	-	£4.4bn (£2-8.6bn)	£5.1bn (£3-7.9bn)
储能	-	27.4 GW (7.2-59.2 GW) 128 GWh (31-286 GWh)	£4.6bn (£1.9-10.1bn)	£11.5bn (£3.4-25.7bn)
供热	-	-	£30bn (£14-66bn)	£6bn (£2-12bn)
交通领域氢燃料	12% of LDVs (0-26% of LDVs)	20% of LDVs (0-50% of LDVs)	£35.7bn (£0-88.7bn)	£20.2bn (£0-48.1bn)
工业部门	-	-	£20.3bn (£14.4-26.9bn)	£3.9bn (£1.5-6.5bn)
海洋-潮汐能	13 GW (0-52 GW)	2.5 GW (0-5 GW)	£1.2bn (£0-2bn)	£0.3bn (£0-1.3bn)
海洋-波浪能	46 GW (0-188 GW)	4 GW (0-8 GW)	£1.6bn (£0-3bn)	£0.9bn (£0-£3bn)
非住宅建筑	-	-	£12.6bn (£3.9-23.8bn)	£1.7bn (£0.5-3bn)
核裂变	1223 GW (482-1973 GW)	40 GW (16-75 GW)	£5.7bn (£2-14.5bn)	£7.2bn (£1.5-13bn)
海上风电	439 GW (119-1142 GW)	45 GW (20-100 GW)	£45bn (£18-89bn)	£18bn (£7-35bn)

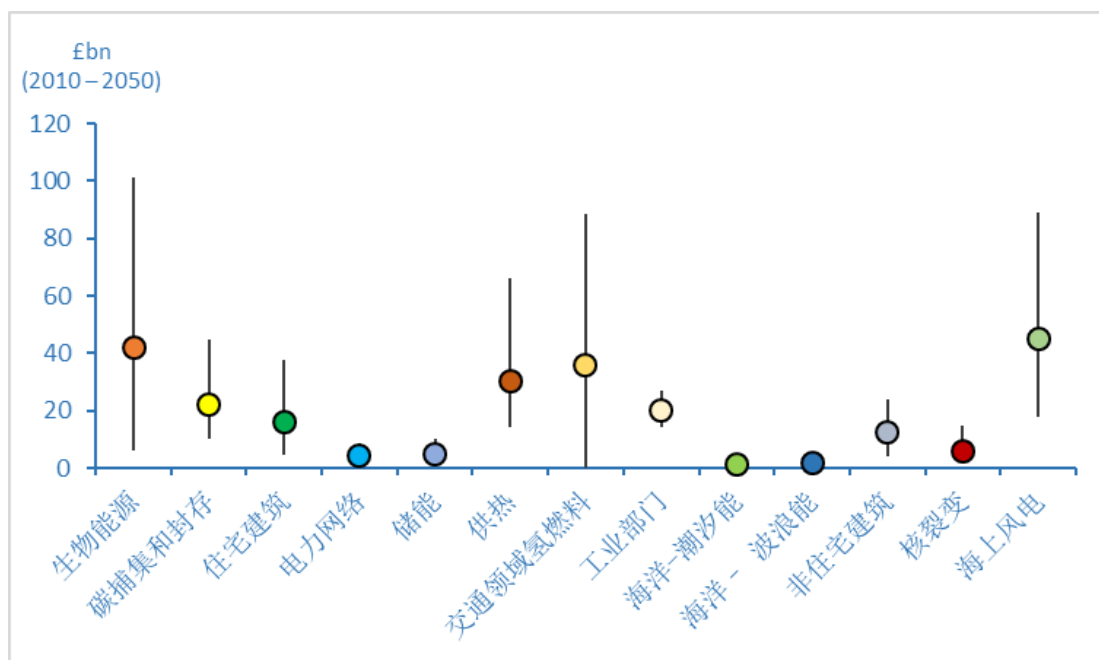


图 6 创新带来的英国成本降低潜力 (2010-2050)

TINA 项目在不同技术领域识别了 135 个创新项目，总投资额超过 28 亿英镑，涉及基础研究、试点示范、加速商业化等不同技术发展阶段。



图 7 TINA 在各技术领域识别的创新优选项目投资

2.3.2 LCICG 战略框架

基于 TINA 项目的研究以及广泛的利益相关方讨论，LCICG 在 2014 年制定了未来协调英国公共部门低碳技术创新支持的战略框架，确定了 44 个优先创新需求（表 4）。在进行项目开发时，这 44 个创新领域成为 LCICG 的支持重点。

表 4 各个技术领域到 2020 年的创新重点汇总

技术领域	公共资金支持重点	所需资金规模参考 (£)
生物能源	<ul style="list-style-type: none"> 提高边缘土地作物产量的研发 改进的合成气合成、净化和柔性反应器的示范 基于可持续作物的先进生物燃料技术研发和示范 支持接近商业化的转换技术的效率提升和组件升级 生物质CCS研究项目 测量和监控可持续标准合规性的研发 	<ul style="list-style-type: none"> 千万级（高） 千万级（高） 千万级（低） 千万级（高） 千万级（高） 百万级（低）
碳捕集和封存（CCS）	<ul style="list-style-type: none"> 海底储存、测量、监测和验证 高级捕集技术开发 CCS 匀速和储存网络配置 	<ul style="list-style-type: none"> 几亿级（低） 千万级（高） 百万级（低）
住宅和非住宅建筑	<ul style="list-style-type: none"> 缩小预测和实际运行效果的研发 识别和推动建筑高效运行的研发和示范 建立一个制造商平台，使他们可以合作组合测试其产品 公开传播LCICG成员的各类项目结果 	<ul style="list-style-type: none"> 千万级（高） 百万级（高） 千万级（高） 千万级（低）
电力网络	<ul style="list-style-type: none"> 技术集成平台的示范 增强知识共享和协调 电动汽车集成技术和安装方法的研发 	<ul style="list-style-type: none"> 几亿级（低） 百万级（低） 千万级（高）
储能	<ul style="list-style-type: none"> 适合网格的储能技术路线图 网格级存储概念的研发 技术集成平台的示范 	<ul style="list-style-type: none"> 十万级（低） 千万级（高） 千万级（高）
供热	<ul style="list-style-type: none"> 可再生能源供热技术的系统集成和涉及解决方案 热泵的组件、设计和安装的研发和示范 热/冷存储的设计、运行和继承的研发和示范 	<ul style="list-style-type: none"> 千万级（低） 千万级（低） 千万级（低）
交通领域氢燃料	<ul style="list-style-type: none"> 汽车及组件生产的产业化 低碳氢能生产的研发和示范 加氢基础设施的研发和示范 	<ul style="list-style-type: none"> 千万级（低） 百万级（高） 千万级（低）
工业部门	<ul style="list-style-type: none"> 低碳替代品利用的研发和示范 识别和试点替代工艺流程的项目 工业CCS 	<ul style="list-style-type: none"> 千万级（高） 千万级（高） 千万级（高）
海洋 - 波浪和潮汐能	<ul style="list-style-type: none"> 波浪设备的示范 第一个波浪能阵列的初步部署 应对第一个阵列中所识别的挑战的研发工作 运行优化：健康与安全、资源特征、标准化 第二代潮汐流技术和新型波浪装置项目的研发。 争取部署第一个商业规模的农场 	<ul style="list-style-type: none"> 百万级（高） 千万级（高） 千万级（低） 百万级（低） 百万级（高） 千万级（高）
核聚变	<ul style="list-style-type: none"> 未来核能技术 先进组件制造 燃料循环技术 废弃物管理和设备退役 建造、安装和调试 小型模块化反应堆 	<ul style="list-style-type: none"> 千万级（高） 千万级（高） 千万级（高） 千万级（高） 千万级（低） 千万级（低） 几亿级（低）

技术领域	公共资金支持重点	所需资金规模参考 (£)
海上风电	<ul style="list-style-type: none"> 海上风电场示范项目以及项目推进 远海风场输电 减少每个风机安装时间 提高风电厂发电量和风机可靠性的研发 具有成本效益的基础的批量生产和制造 	<ul style="list-style-type: none"> 千万级（高） 百万级（低） 千万级（高） 千万级（高） 千万级（低）

针对每个创新重点，LCICG 还估计了充分满足创新需求所需的公共部门投资水平。据估计，要完成已确定的所有创新活动，英国政府需要在 5-7 年内投入 30~40 亿英镑。目前的投资水平与所需要的资金量之间存在明显差距，即使将其他资金来源考虑在内，例如私营部门投资，仍需要进一步对项目进行筛选。LCICG 成员还通过了一套筛选项目的通用标准：

- **对能源政策目标的影响：**加速和提高能源安全、推动低碳能源的供应、运输分配或使用的项目，以及能够降低能源系统成本的项目。
- **对经济增长目标的影响：**帮助英国建立和维持强大的供应链；帮助英国公司获得更大的能源市场份额；促进国内投资，并有助于英国公司增加出口。
- **对知识、技能和能力的影响：**针对优选的技术在英国建立世界一流的研究与创新中心，并培养创新人才。
- **其他考虑因素：**政府资金的额外性、项目的时间周期和可行性、项目风险、杠杆作用和重要性、后续商业化的可能性等。

2.3.3 影响及改进潜力

TINA 项目已经成功实现了其目标，并在确定和优选政府研发项目方面产生了较大的影响力。在既定目标之外，TINA 项目还为更广泛的政策制定和其他研究提供了参考和依据。

项目影响

TINA 项目成功建立了强大的共享知识库，指导政府的研发投资决策。对 LCICG 所支持的研发项目的分析表明，从 2012 年开始，超过 85% 的低碳技术研发项目聚焦于 TINA 确定的技术创新需求。公共资金支持不同技术领域的优先级也与 TINA 建议的优先级相一致。例如，TINA 在能源网络和储能技术领域的研究为创新英国（Innovate UK）的储能研发竞赛提供了参考和依据。

TINA 为支持低碳创新领域的主要公共部门提供了一种协调机制，对创新支持的优先级达成一致。TINA 的主要作用和价值是建立证据基础和科学依据，以保证政府对创新项目的投资是合理的。实际上，开展 TINA 项目的过程，也促进了 LCICG 成员之间广泛和密切的讨论。TINA 框架将讨论的重点聚焦于对证据的科学分析，并基于此得到低碳技术创新重点。

TINA 提供了在技术领域内和技术领域之间的交叉比较和投资需求优先排序的可能性。2014 年，碳信托与英国能源与气候变化部合作开展了不同技术领域创新需求对比分析，该分析汇总了 TINA 不同技术领域的发现，并在 TINA 总体框架下对所有细分技术进行了比较。需要注意的是由于技术进步和政府重点方向的变化，TINA 需要每 2-3 年更新一次，以保证其有效性。

除了为政府提供必要的科学依据，TINA 也向企业和技术研发机构传递英国技术发展重点的明确信号。在整个研究过程中，为收集数据和建立行业共识，在访谈和研讨会中都纳入了行业专家。TINA 研讨会通常会邀请行业的所有主要参与方共同讨论。

TINA 也被其他学术研究参考和引用。到 2015 年，TINA 已经至少被各类学术出版物引用 49 次，其中超过 50% 是以英国为重点的研究。这表明 TINA 不仅对英国的学术研究和行业研发创新产生了影响，同时也并为国际研究机构提供了参考信息。此外，也有其他政策报告引用 TINA 研究成果作为其参考资料。

此外，TINA 也为英国减排和技术战略开发提供了关键的科学依据，例如 LCICG 战略框架、目标驱动创新计划（ODIPs）、2015 年综合支出审核报告，以及其他临时政策等。

改进潜力

TINA 项目的影响评估报告提出了一系列改进和提高的意见。

扩大 TINA 的研究范围，考虑研发以外的创新需求和成本降低潜力。目前，TINA 对研发、设计和示范创新进行了详细分析。但通过研发进行创新只是推动成本降低的驱动因素之一；经济规模和供应链改善，标准化程度的提高以及创新金融产品都可以推动技术成本的降低。

进一步分析技术应用、创新和成本降低之间的关系。技术应用是创新和成本降低的关键驱动力，甚至可以说是决定创新投资水平的根本驱动因素。可以将技术应用水平纳入 TINA 分析中，以便对降低技术成本的可能性有更实际的认识。增加对技术应用水平的分析可以提高 TINA 作为政策依据的可信度。

设置一组对各个技术领域通用的中心部署情景。目前，一致性的 TINA 方法学可以实现技术之间的相互比较，但是每个 TINA 中技术的部署情况不同。随着政府对未来英国潜在的能源部署方案越来越有信心，TINA 可能会开始体现出更大的确定性。TINA 可以假设一组中心情景，这些情景能够体现可能的能源发展情景，同时也需要足够多样化以体现所有技术的应用情况。

在进行技术评估时转向能源系统视角。目前，TINA 仅考虑单个技术的成本降低。根据英国的经验，目前不断变化的能源结构（包括大量的间歇性低碳电源）表明，有必要整体考虑英国的能源系统。系统角度的研究也将使可再生能源发电等供给侧技术与低碳建筑或低碳交通等需求侧技术之间的比较更加容易。

2.4 TINA 在墨西哥的应用

2.4.1 背景和简介

为减缓全球气候变化，墨西哥政府设定了雄心勃勃的减排目标。而低碳技术的创新和应用对目标的实现至关重要。考虑到有限的公共资金，需要对技术创新重点进行优选。基于此，碳信托与墨西哥国家生态与气候变化研究院（INECC），全球绿色增长研究所（GGGI）和英国外交部（FCO）合作，将英国技术创新需求评估（TINA）框架应用于墨西哥，希望将创新作为驱动力，通过一系列政策和干预措施帮助墨西哥实现其气候和绿色增长承诺。

该项目包括了两个层次的分析：初步技术领域优选（宏观层面），主要基于技术领域的二氧化碳减排潜力和经济价值进行评估；以及对特定技术领域的详细分析（微观层面）。

2.4.2 评估方法

项目选择了交通和电力供应的 13 个低碳能源技术领域进行评估：

交通：生物燃料，压缩天然气汽车（CNG）和液态天然气汽车（LPG），电动汽车

电力供应：陆上风电、水电、生物质和垃圾发电、聚光太阳能发电、地热能、核能、太阳能光伏、燃气发电碳捕集与封存、海洋、热电联产

技术领域优选采用两个主要指标对 13 个技术领域进行优先级评估：碳减排潜力和对墨西哥的经济价值潜力。主要评估过程包括：

- 针对每个技术领域，设定国内和全球技术部署情景
- 估算每个技术领域的成本和减排潜力
- 针对每个技术领域和价值链的各个部分，分析墨西哥的竞争力
- 基于以上分析，量化每个技术领域的减排潜力和创造经济价值的潜力，并基于这两个指标对技术进行优先级排序

在对技术领域进行初步评估后，选择了太阳能光伏作为试点技术领域，应用 TINA 方法在组件级别对创新需求进行详细评估。主要评估过程包括：

墨西哥光伏技术应用情景 —— 定量分析

根据墨西哥《气候变化基本法》中规定的目标以及其国家自主贡献（NDC），项目考虑了三种太阳能光伏应用情景，反映了墨西哥电力部门的三种（低、中、高）不同光伏应用水平的发展路径。

成本降低潜力 —— 定量分析

项目对全球层面技术创新的成本降低潜力进行了分析，太阳能光伏技术的成本下降潜力主要来自“边做边学”（通过技术应用增加实现）以及研发和示范。例如，作为一种较为成熟的技术，晶体硅的成本降低主要归因于“边做边学”，而研发在薄膜技术成本降低上起着更重要的作用。基于成本降低潜力和技术应用情景，项目估算了墨西哥到 2050 年通过太阳能光伏技术的研发可以实现多少应用成本的降低。

经济价值潜力 —— 定性分析和定量分析

根据国际能源署（IEA）《能源技术展望》中的三种情景来设置了 2050 年太阳能光伏的全球应用情景。墨西哥在全球太阳能市场中的竞争力主要基于专家访谈和文献综述获得。随后基于 TINA 方法学对其国内和出口经济价值潜力进行了建模分析。

市场壁垒和创新障碍 —— 定性分析

基于专家访谈和文献研究，定性分析了墨西哥在太阳能光伏技术发展中的市场壁垒和创新障碍。

2.4.3 产出与影响

基于初步评估，项目识别了墨西哥最重要的技术创新领域为电动汽车、生物能源、太阳能光伏和陆上风电（图 8）。针对技术领域的初步评估确定了重点技术，为下一步组件级别的详细分析提供了基础。

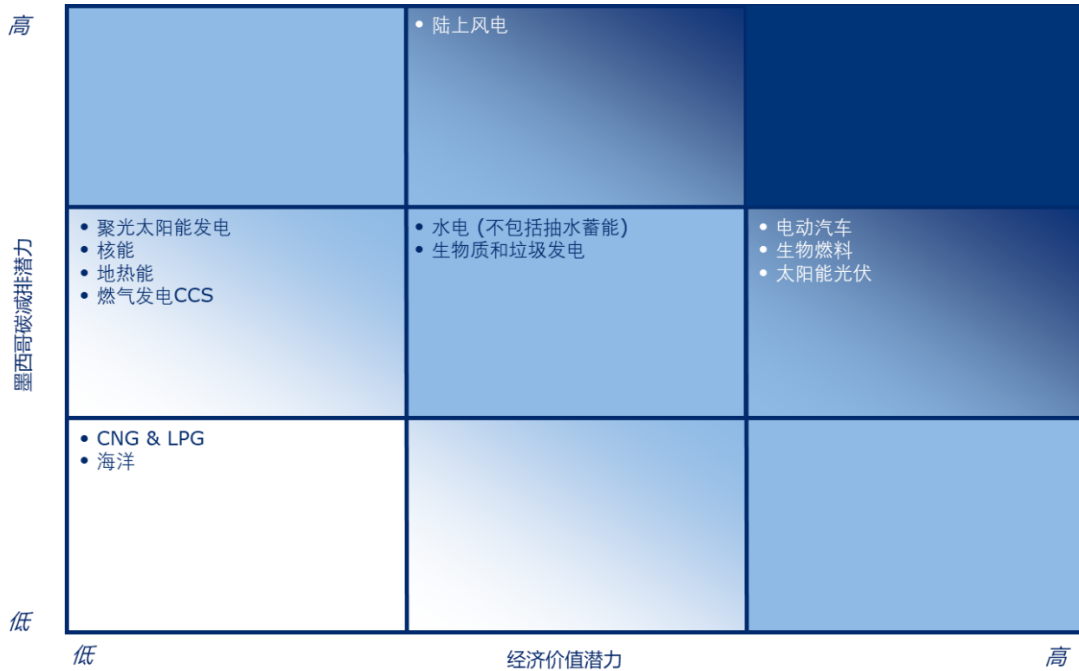


图 8 技术领域评估矩阵

针对太阳能光伏领域的具体分析为该领域技术创新提供了初步的优先次序，但仍需要与公共和私营部门的关键利益相关方进行更广泛的交流与协商以达成共识。根据 TINA 分析结果，尽管大部分创新可能发生在墨西哥以外的其他国家，但墨西哥对技术创新的支持仍可能带来大幅成本下降，从 2016 年到 2050 年可累计节约 11.9（5.0 - 15.6）亿美元。创新可能有助于墨西哥成为重要的太阳能装备制造商，从而促进国内应用和供应海外市场（主要为美国）。从 2016 到 2050 年，可为墨西哥贡献累计 134 亿美元的经济价值。

3. 能源创新需求评估（EINA）

3.1 简介

3.1.1 EINA 背景

与 TINA 项目开展时相比，英国的低碳技术创新生态更为简化，英国商业、能源和产业战略部（BEIS）成为提供能源创新资金支持的主要公共部门。该部门 2016 年由原来的英国气候变化与能源部（DECC）与商业创新和技能部（BIS）合并而成。作为实现长期减排目标的关键，英国制定了雄心勃勃的能源创新计划，致力于实现到 2021 年清洁能源创新公共投资翻番的目标。英国商业、能源和产业战略部的“能源创新项目”是英国能源创新计划（2015-2021）的一部分。

基于 TINA 的研究框架并纳入相关改进意见，英国商业、能源和产业战略部在 2018 年启动了能源创新需求评估项目（EINA），旨在识别不同技术在英国未来能源系统中的作用，并优选对英国未来发展贡献最大的能源创新领域。

3.1.2 EINA 目标

能源创新需求评估项目（EINA）的目标是为识别英国能源系统的关键创新需求提供证据，并为公共部门优选低碳创新投资提供参考，尤其是 BEIS“能源创新项目”的投资。该项目旨在加速创新清洁能源技术在未来 10 年间的商业化。目前，其在 2015 年至 2021 年预算为 5.05 亿英镑，包括六个主题：智能系统、工业和 CCS、建筑环境（能效和供热）、核能、可再生能源、以及对能源企业家和绿色融资的支持。

EINA 项目由 Vivid Economics 牵头执行，协调一个包括各个重点领域技术专家的团队共同完成。项目开展了一系列研讨会，共有超过 180 多位技术专家参与讨论；同时进行了能源系统建模和详细的技术分析。项目合作伙伴包括碳信托（Carbon Trust），E4tech，伦敦帝国理工学院和 Fraser-Nash。Energy Systems Catapult（ESC）为项目前期重点技术领域的筛选提供了技术支持。

3.2 评估方法

3.2.1 框架与流程¹⁰

EINA 项目的研究范围是整个能源系统相关技术，包括电力、供热和运输行业。研究技术领域则聚焦于能够提供清洁能源或减少能源需求的技术，以及可以促进清洁能源利用的跨领域技术。项目分析了 12 个重点技术领域，包括核裂变、海上风电、潮汐能、二氧化碳捕集、利用和存储（CCUS）、供热与制冷、建筑构件、工业、智能系统、突破性技术、生物质和生物能源、氢能和燃料电池，以及交通运输。

EINA 项目以 TINA 的方法学为基础并从能源系统角度进行了调整，其分析和评估流程包括三个部分（如 图 9 所示）：

- 1) 能源系统建模和重点技术领域选择：使用能源系统建模环境（ESME）对各个重点技术领域创新所带来的能源系统收益进行量化估算。
- 2) 技术评估：
 - 创新需求评估，包括对每个重点技术领域内创新机会的详细评估，与行业、政府和学术专家的研讨会以及有针对性的跟进访谈。
 - 商业机会评估，评估提高英国竞争力的潜力、总经济增加值（GVA）和就业机会。
 - 市场壁垒评估，识别为释放创新潜力而需要解决的市场障碍。
- 3) 优先排序：汇总并梳理各个重点技术领域的关键创新机会。



图 9 能源创新需求评估（EINA）分析和评估流程

¹⁰ Energy Innovation Needs Assessment: overview report. 2019.

EINA 项目聚焦于能够实现整个能源系统效益的创新。在不同的重点技术领域采用了 一致的方法学，以识别具有最大能源系统收益、较高经济和商业潜力，并需要政府提供支持的创新技术。

3.2.2 能源系统模型与重点技术领域选择

能源系统建模环境（ESME）用于评估各个技术领域创新的能源系统收益。模型结果主要用于为筛选重点技术领域提供参考。EINA项目选择的重点技术领域列表也经过了其他英国能源模型研究专家和能源系统专家的验证。

ESME 是一个经过同行评审的能源系统模型（涵盖电力、热力和交通运输部门以及能源基础设施），该模型模拟了英国到 2050 年满足用户需求的成本最优能源系统路径。本项目采用了一个中心情景，假设到 2050 年英国温室气体排放量减少 80%，与英国当时的长期减排目标相一致（当时英国尚未提出“净零排放”的目标）。

在评估技术创新所带来的能源系统价值时，模型设置了在不进行技术创新情况下的能源系统转型基线情景，随后模拟每个技术领域的创新将对能源系统转型成本带来怎样的影响。技术成本和性能参数来自标准的 ESME 数据集：

- 在能源系统转型基线情景中，假设从 2020 年到 2050 年，所有技术的成本和性能都将保持在 2020 年的水平。
- 假设到 2050 年所有技术领域的创新技术成本和性能都遵循标准 ESME 数据集的增强路径（较为乐观和积极的技术路径）。

基于能源系统模型，EINA 项目估算了不同技术领域创新为能源系统带来的成本节约收益：

- 生物能源、交通运输、以及智能系统的创新机会是最有价值的。这些技术领域的创新价值超过 500 亿英镑。
- 其次，海上风电、核能、建筑构件以及供热和制冷方面的创新机会是较有价值的创新组别。这些技术领域的创新价值约为 100 亿英镑。
- 氢能和 CCUS 创新的机会也较大，其创新价值至少为数十亿英镑。
- 潮汐能和工业（非 CCS）的创新价值较低。

3.2.3 技术评估

创新需求评估

创新需求评估致力于在每个重点技术领域内识别最有潜力的创新机会，在各个重点创新领域分别开展。评估主要包括包括创新机会的详细分析、利益相关方研讨会以及专家访谈，创新机会的识别和评估很大程度上基于专家意见。在研讨会之前，基于文献调研和专家访谈初步梳理创新机会，随后通过研讨会和跟进访谈等进一步修改和补充。主要流程如下：

- 初步信息收集和创新机会梳理。通过广泛的文献调研和专家咨询，收集关键技术和组件的创新潜力和需求信息，为专家研讨会做准备。

- 组织利益相关方研讨会。
 - 技术专家研讨会，主要包括来自政府、企业和学术界的技术专家。讨论内容主要包括三个部分：回顾和验证技术成本和部署情况假设；讨论技术创新机会清单，包括技术创新对能源系统的贡献以及可能的突破性技术进展；探索如何解锁创新机会，包括创新的必要步骤、时间表、其他关键因素，以及技术创新是否能够通过创新基金或示范项目和市场推广来实现。
 - 供应链研讨会，重点讨论国内和出口商业机会，以及实现这些商业机会面临的市场障碍。
 - 研讨会结束后，项目将最终确定的技术创新机会清单提供给专家确认。
- 如有需要，开展有针对性的后续访谈，以收集信息补充评估内容。

商业机会评估

商业机会评估的主要目的是提供比较不同能源技术的潜在商业机会（经济价值潜力），包括分析英国竞争优势、总经济增加值（GVA）和就业机会。项目估算了出口商业机会和英国国内商业机会，但考虑到出口商业机会与英国技术创新联系更紧密，因此在优选创新技术时重点关注了出口商业机会。

出口商业机会分析方法学

在识别英国的出口商业机会时，EINA 项目在不同技术领域使用了一套通用方法以保证结果的可比性：

- 基于技术应用规模和价格预测确定到 2050 年的全球和区域市场规模，其中技术规模预测主要来自国际能源署（IEA）。例如，核能每年的市场规模通过技术应用规模乘以价格得到。
- 根据目前的贸易数据和专家意见估算市场规模中可交易的部分。这决定了英国出口进入全球市场的上限，得到可交易市场规模。
- 在高创新情景下英国可获得的市场份额根据目前的贸易数据、文献调研和专家咨询估算。具体而言，英国未来的竞争力可以基于英国目前的市场份额、竞争对手的市场份额、行业趋势以及研讨会专家意见来进行评估。
- 将可交易市场规模乘以英国市场份额，得到英国可获得的出口市场规模。
- 利用英国可获得的出口市场规模乘以总经济增加值与市场规模的比值，即可得到总经济增加值（GVA）。GVA 值除以该部门的生产效率即可估算出就业机会。

国内商业机会分析方法学

国内商业机会的分析在很大程度上借鉴了出口商业机会的分析方法，例如估算英国的竞争力以及英国企业能够获得的国内市场规模。具体方法如下：

- 基于技术应用规模和价格预测确定到 2050 年的国内市场规模。技术部署规模的估算基于 ESME 模型，价格估算主要依据各个重点技术领域的分析。

- 根据目前的贸易数据和专家意见估算市场规模中可交易的部分。这决定了外国公司可能进入英国市场的比例（例如电动汽车），以及多少市场规模只对英国公司开放（例如热泵安装）。
- 对于英国市场中的可交易市场规模，英国公司的市场份额根据目前的贸易数据、文献调研和专家咨询估算。具体而言，英国公司在国内的竞争力可以基于英国目前的市场份额、竞争对手的市场份额、行业趋势以及研讨会专家意见进行评估。
- 为估计英国企业获得的国内市场规模，需要将可交易市场和不可交易市场相加。
 - 将可交易市场规模乘以英国的市场份额，即可估算出英国在国内可交易市场中获得的市场规模。
 - 英国在不可交易市场中的市场规模即等于不可交易市场的规模。
- 利用英国获得的国内市场规模乘以总经济增加值与市场规模的比值，即可得到总经济增加值（GVA）。GVA 值除以该部门的生产效率即可得到就业机会。

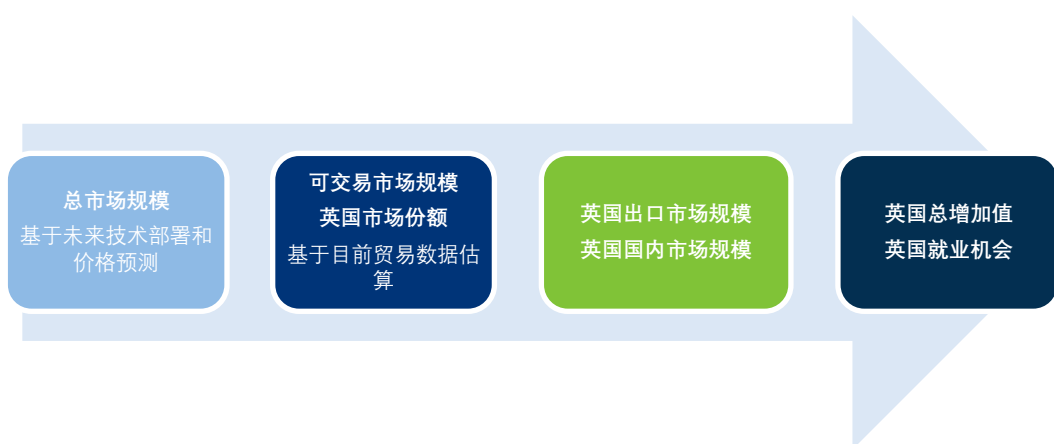


图 10 评估出口和国内商业机会的方法学

市场壁垒评估

市场壁垒阻碍了企业在对英国能源系统具有重大潜在价值或蕴含大量商业机会的领域进行创新。一方面，市场壁垒可能会导致较高的创新成本阻碍私营部门开展技术创新，另一方面也可能限制私营部门的创新收益，降低其创新的动力。当面对较大的市场壁垒而私营部门无法克服时，就需要政府的干预和支持。市场壁垒评估致力于识别为释放创新潜力而需要解决的市场障碍，主要基于专家意见进行评估。

- 确定市场障碍和潜在支持领域。识别是否存在与所评估的技术相关的市场壁垒，并通过利益相关方研讨会来验证已识别的障碍并评估其严重性。基于此，简要分析政府干预和公共资金支持的机会。
- 考虑与国际创新格局的互动。通过文献调研和一些有针对性的访谈，分析在各个重点技术领域的国际创新情况，以及主要国际项目（例如创新使命 Mission Innovation）在这些领域的创新。

3.2.4 技术优选

技术优选过程总结和整合了每个重点技术领域的关键创新机会，优选结果见产出和影响部分。为设计公共资金能源创新项目，可能需要对不同领域的创新机会进行进一步的优先级排名，EINA 项目提供的能源系统价值以及商业机会评估可以为后续讨论提供数据支撑。

3.3 产出与影响

3.3.1 主要产出和发现

通过上述方法，能源创新需求评估项目（EINA）确定了技术创新的优先级（如表 5 所示）。细分领域的 EINA 报告中详细介绍了各个技术类别的创新需求评估细节。

此外，项目强调了实现低碳转型所需要的基础设施的创新。政府在提供系统创新所需要的基础设施方面具有独特的协调作用。尽管此类创新机会在量化模型中并未获得很高的评分，但它们是低碳转型过程中所必须的。

表 5 优先技术创新领域¹¹

优先创新领域	主要类别	次要类别
在核电和海上风电设计以及工业领域，利用数字优化、设计和人工智能优化电力系统	智能系统	海上风电，核能
基于气化技术路线利用生物质生产气体或液体燃料的早期商业化示范项目，包括与CCUS的结合	生物能源	二氧化碳捕集、利用与封存（CCUS）
针对不同原料，试点预处理和水解步骤并开发工艺流程	生物能源	
开发芒草植物品种及其在能源生产中的应用	生物能源	
存储领域的创新，包括大容量储能，先进锂离子电池生产链和材料，以及2030年后市场上的其他储能电池技术	智能系统	建筑，交通
预燃烧CCUS与重整制氢炉相结合的示范项目	氢能	CCUS
自动化和机器人技术，在核电，工业和海上风电领域的应用	智能系统	核能, 海上风电
核模块化（SMR）和简化（Gen III和AMR），以及热量利用	核能	供热和供冷
制氢电解槽：先进的材料和低成本制造	氢能	
燃料电池：先进的材料和低成本制造	氢能	

¹¹ Energy Innovation Needs Assessment: overview report. 2019.

优先创新领域	主要类别	次要类别
海上风电创新，例如新型叶片技术和风机组件	海上风电	
开发漂浮式或者延长型基础使海上风电进入更深的水域	海上风电	
热泵技术创新，包括吸附，新压缩机和膨胀机	供热和供冷	
燃烧后CCUS，新溶剂和吸收过程	CCUS	
支持性基础设施创新		
<ol style="list-style-type: none"> 1. CCUS 存储：重新分析旧井特性、监控、压力管理和技术。 2. 工业CCUS示范和集群：完整的全流程CCUS示范项目，包括运输、存储、参与机构及商业模式。 3. 供热网络：低温供热网络以及供热网络优化技术的改进 4. 供气网络：验证改造供气网络输送氢气的可行性 5. 建筑物能效：改善建筑能效措施的监测和效果 		

表 6 总结了对各技术创新领域商业机会的定量评估结果。这项评估并不是对未来的准确预测，而是为了对比不同创新领域的未来潜在商业价值规模。为估算创新为英国带来的商业机会，在估算英国的市场份额时，我们假设英国具有较强的竞争力和创新能力。出口市场规模基于全球 2°C 气候情景，而国内市场基于较高程度的技术创新和 80% 的脱碳目标。

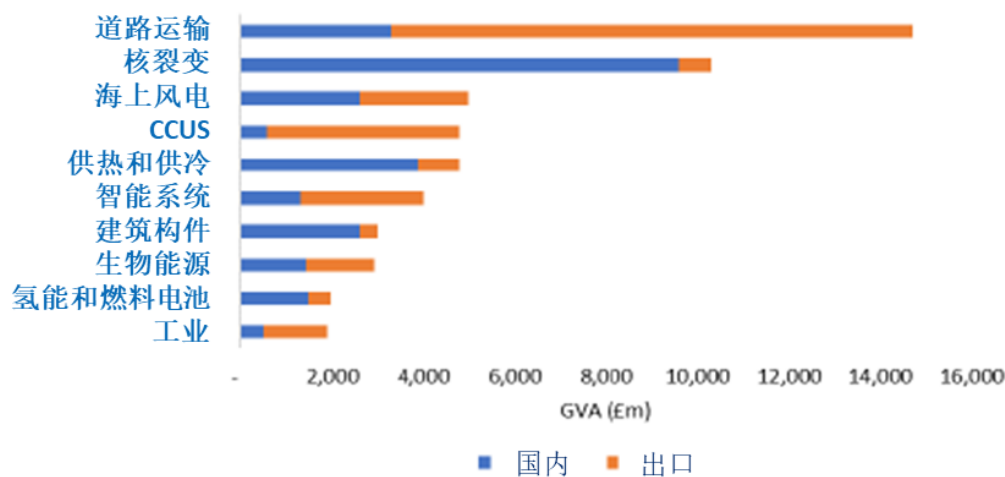
表 6 各技术领域商业价值和驱动力

EINAs 技术领域	出口机会 (£m GVA)	国内机会 (£m GVA)	关键驱动因素
道路运输	2050: 11,000 2030: 2,500	2050: 3,300 2030: 390	<ul style="list-style-type: none"> • 汽车市场规模，尤其是英国和欧洲的电动汽车市场 • 英国目前的汽车行业发展现状表明，英国有能力和机会获得一个较大的市场份额。
海上风电	2050: 2,300 2030: 1,000	2050: 2,600 2030: 1,400	<ul style="list-style-type: none"> • 对英国国内和出口市场，都将在北海部署海上风电。 • 对出口和国内商业机会，运维都占一半以上。
CCUS	2050: 4,300 2030: 3,600	2050: 600 2030: 310	<ul style="list-style-type: none"> • 全球CCS的部署将提供巨大的潜在市场。 • 考虑油气领域的实力，工程、采购、建设和管理服务 (EPCm) 将贡献一半的商业机会。
智能系统	2050: >2,000 2030: 200	2050: 1,320 2030: 80	<ul style="list-style-type: none"> • 智能系统的商业机会较为分散，跨多个市场领域。 • 英国在数字服务方面的优势以及与聚合相关的价值表明，聚合服务是关键商业机会，占评估的智能系统商业机会的50%。
生物质和生物能源	2050: 1,500 2030: 760	2050: 1,400 2030: 930	<ul style="list-style-type: none"> • EPCm 服务出口占出口商业机会的50%，其中气化技术路线有望成为最大的市场。 • 国内商业机会规模与出口相似，主要由运维驱动（超过国内商业机会的40%）。

EINAs 技术领域	出口机会 (£m GVA)	国内机会 (£m GVA)	关键驱动因素
工业	2050: 1,400 2030: 420	2050: 520 2030: 270	<ul style="list-style-type: none"> 英国在工业机械领域的竞争优势有限，不太可能在设备和服务出口中占据主要市场份额。 英国国内可能会进口专用设备和安装。
供热和供冷	2050: 900 2030: 280	2050: 3,900 2030: 460	<ul style="list-style-type: none"> 由于规模化供热和制冷设备制造的国际竞争激烈，英国出口机会可能较为有限。 国内商业机会较大，主要来自于安装和运维。然而，此类商业机会很大一部分可能来自取代传统燃气锅炉的安装和运维。
核裂变	2050: 700 2030: 1,300	2050: 9,600 2030: 4,700	<ul style="list-style-type: none"> 由于核工业与国家政府联系紧密，整体市场的很大一部分无法参与市场交易。此外，英国面临较强的国际竞争，例如中国，核能在中国国内的大规模应用已经创造了较强的规模经济。 国内商业机会在核能中占主导地位，主要在运维，退役和废物管理方面。
潮汐能	2050: 540 2030: 35	NA	<ul style="list-style-type: none"> 尽管英国拥有丰富的专业知识，但国际潮汐能市场很小，限制了出口机会。
建筑构件	2050: 390 2030: 720	2050: 2,600 2030: 6,000	<ul style="list-style-type: none"> 由于大部分服务和产品不参与交易，所以出口规模有限。 与其他产品相比，英国在此类产品（例如预制件）上相对劣势，出口市场份额预计较低。 国内商业机会占主导地位，因为较低的国际贸易水平意味着英国企业很可能会占领大部分国内市场。
氢能和燃料电池	2050: 500 2030: 24	2050: 1,500 2030: 200	<ul style="list-style-type: none"> 全球制氢和燃料电池设备预计将是一个相对较小的市场，因而出口商业机会有限。 国内商业机会主要来自于发电和配电基础设施的运维、建设/安装，通常不进行交易。 需要注意的是，氢能商业机会是跨领域的。这里仅关注制氢设备和燃料电池。所有氢能相关的商业机会加在一起，总价值约为50亿英镑。

资料来源: Vivid Economics

总体而言，研究估算到 2050 年将有 270 亿英镑的国内商业机会和 260 亿英镑的出口商业机会。道路运输、CCUS 和海上风电具有最大的出口商业机会。针对不同技术领域，英国国内和出口的商业机会各不相同。对核能、供冷和供热、建筑构件、海上风能、生物能源、氢能等技术类别，国内商业机会占 50% 或更多。由于 EINA 优先考虑英国创新竞争力带来的出口商业机会，因此公路运输、CCUS、海上风能和智能系统成为优先考虑的技术领域，而氢能、核能、建筑构件以及供热和制冷则相对次要。



注意：GVA 估算基于2019年年度未折现英镑。
资料来源: Vivid Economics

图 11 2050 年英国技术创新商业机会

根据 EINA 的分析，这些商业机会到 2050 年将为英国提供约 500,000 个就业机会。尽管国内和出口市场的总产值几乎相等，但预计国内市场将提供比出口市场更多的就业机会（国内市场：299,000；出口市场：208,000）。

3.3.2 项目影响

能源创新需求评估（EINA）项目为确定英国能源系统的关键创新需求提供了证据，并为公共部门优化低碳创新投资提供了技术支撑，尤其是英国商业、能源与工业战略部（BEIS）的能源创新计划。由于综述报告和分技术领域报告 2019 年 10 月刚刚发布，EINA 项目的影响仍有待评估。

4. 经验与建议

4.1 英国经验总结

EINA 项目和 EINA 项目采用了相似的方法学框架，但 EINA 在 TINA 的基础上对方法进行了完善和更新。表 7 总结了 TINA 和 EINA 评估的技术领域、方法学和主要产出。

表 7 TINA 和 EINA 总结

	技术创新需求评估(TINA)	能源创新需求评估 (EINA)
技术领域	生物能源 碳捕集与封存 住宅建筑 电网和储能 供热 交通领域氢燃料 工业部门 非住宅建筑 核裂变 海上风电 太阳能光伏 海洋（波浪和潮汐）	核裂变 海上风电 潮汐能 二氧化碳捕集利用和存（CCUS） 供热与制冷 建筑构件 工业 智能系统 突破性技术 生物质与生物能源 氢能和燃料电池 交通运输
方法学 技术领域 筛选	TINA重点技术领域的筛选主要基于两个指标： <ul style="list-style-type: none"> • 碳减排潜力 • 经济价值潜力 	EINA 采用能源系统建模环境 (ESME) 评估各个技术领域创新的能源系统收益。重点技术领域的筛选参考模型结果。
方法学 英国技术 应用情景	英国技术应用情景采用了能源系统建模环境（ESME）中的一组模型，其中不同技术领域的潜力采用了不同的模型情景。	EINA 项目采用了一个中心情景，假设到 2050 年英国温室气体排放量减少 80%，与英国当时的长期减排目标相一致。
方法学 技术评估	技术评估流程包括： <ul style="list-style-type: none"> • 创新的价值（定量） • 创新带来的经济价值（GVA）和就业机会（定量） • 英国市场壁垒以及多大程度上可以依赖进口或海外创新（定性） 	技术评估流程包括： <ul style="list-style-type: none"> • 创新需求评估（主要基于专家访谈和研讨会） • 商业机会评估（定量） • 市场壁垒评估（定性）
方法学 政策建议	基于创新需求、创新价值、英国和全球已有项目以及对政策支持的分析，TINA 为公共资金支持创新提供了政策建议。	EINA 更聚焦于识别需要政策支持的创新领域，并未提出具体的政策建议。
主要产出	TINA 建立了强大的共享知识库，为政府研发投资和相关政策提供参考。	EINA 项目识别了需要公共资金投入的重点创新领域。

从 TINA 到 EINA，英国更新了低碳技术优选的方法学，以反映创新带来的系统收益，同时 EINA 更多地依赖与不同利益相关方的研讨和咨询进行具体创新机会的识别与评估：

- EINA 采用了能源系统建模环境（ESME）来评估技术创新的系统收益；同时针对不同技术领域，模型采用了一致的中心情景，可以对不同技术领域进行对比。
- 基于利益相关方和专家意见来补充模型不足之处。为了充分收集数据并评估创新机会，EINA 组织了多次利益相关方参与活动，包括与行业和学术专家的研讨会、针对性的专家访谈、与政府创新相关部门的会议、广泛咨询学术专家。

基于对英国低碳和能源技术创新需求评估项目（TINA 和 EINA）的系统梳理，我们总结了项目成功的经验，希望为中国低碳技术创新优选提供借鉴。

- 技术创新评估方法学基于科学的证据，结合定量计算与定性分析，为低碳技术重点创新方向和研发投资决策提供了有说服力的科学基础。
- 针对不同技术领域采用了一致的方法学框架，可以在技术内部和技术之间进行比较和优选。
- EINA 项目评估了技术创新的能源系统收益，这种方法有助于评估储能以及需求侧技术的系统收益。
- TINA 和 EINA 项目由负责公共资金分配的主要政府部门领导和支持，并在项目过程中充分参与，以保障研究内容能够为政策决策提供支撑。
- 不同利益相关方（包括政府部门、研究机构和产业链企业等）广泛参与到项目中，为技术应用情景、成本预测以及竞争等关键参数的确定提供专家意见，并共同讨论创新机会和市场壁垒，这也有助于在不同利益相关方之间形成共识。

4.2 对中国的建议

技术创新需求评估项目（TINA）和能源创新需求评估项目（EINA）基于科学的方法学对英国低碳技术创新需求进行了定量评估，为公共部门低碳创新投资的优先级提供了依据。本文梳理了 TINA 和 EINA 项目的目标、方法、产出以及影响，并总结了项目成功的经验。

目前，中国正在编制新一轮国家中长期科技发展规划（2021-2035）以及“十四五”科技创新规划。为配合国家中长期科技发展规划的制定工作，中国开展了第六次国家技术预测，围绕信息、新材料、能源、交通等多个重点领域，预测未来影响经济社会发展的核心关键技术。中国的技术预测以及技术创新评估主要采用专家打分法，该方法可以充分考虑行业专家的专业意见、直观便捷、可操作性强，但较少采用定量计算和分析方法。此外，目前的技术创新评估工作一般针对各领域分别开展，很难在不同技术领域之间进行对比，例如能源技术与应对气候变化技术分别由不同部门负责。

基于英国技术创新需求评估的经验，结合中国的创新与技术评估现状，我们为中国低碳技术创新需求评估方法学提出了初步的建议。

- 开发适用于不同领域的技术创新评估方法学框架，以便不同技术领域可采用统一的方法学进行技术创新需求评估。
- 将定量分析与专家意见相结合，提供更为客观和具有说服力的评估结果。
- 技术的碳减排潜力、创新带来的成本降低（创新价值）、以及潜在的商业机会（经济价值）可以作为技术优选的主要指标。
- 从能源系统的角度考量技术创新所可能带来的系统收益，尤其是对储能技术的评估。
- 基于本土化的假设和参数，开发适合中国经济社会发展现状的评估模型和评估方法。针对经济价值和就业机会的分析将有助于评估低碳技术创新和发展的潜在经济价值和社会价值。
- 广泛听取不同利益相关方的意见，不仅包括政府部门、专家学者，也需要纳入产业链各个环节的企业。模型参数设置、技术应用情景选择以及模型结果，都需要进行深入地专家论证，以保证定量分析结果反映技术创新价值，以便为专家评估提供有力支撑和补充。
- 开展技术创新需求评估需要与关键政府部门保持密切沟通，确保技术创新需求评估方法学能够为未来的技术评估工作或政策决策提供借鉴和参考。
- 充分研究低碳技术创新和应用的市场和政策障碍，识别政策干预的重点，为低碳技术的商业化应用提供更好的政策和市场环境。

5. 中国低碳技术创新需求评估方法学框架

为实现中国 2060 碳中和目标，科技创新至关重要。目前已有技术很难支撑以较低成本实现中国的气候目标，亟需加快科技创新，推动低碳技术的研发、推广和应用。基于英国低碳技术创新需求评估（TINA）和能源技术创新评估（EINA）项目经验，结合中国技术创新现状，本项目初步提出了中国低碳技术创新需求评估方法学框架，将定量分析引入创新需求评估过程，为传统的专家打分法提供量化支撑和补充。

技术优选过程主要分为两个阶段：

- 重点技术领域识别（宏观层面）：针对各个技术领域进行评估，确定具有较高减排潜力和经济价值的重点技术领域。
- 创新需求识别与评估（微观层面）：针对识别的重点技术领域，详细评估和识别细分技术的创新价值、经济价值与创新需求，从而优选技术创新需求。针对不同技术领域，建议采用一致的方法学进行创新需求评估，以便开展跨领域的对比。

5.1 重点技术领域识别

重点领域识别是开展低碳技术创新需求评估的第一步，主要通过对各个技术领域的初步分析识别中国实现低碳发展以及减排目标需要关注的重点技术领域。针对能源以及气候变化相关的科技创新，中国在“十三五”期间已经提出了一系列创新方向（见表 8）。结合新一轮国家中长期科技发展规划（2021-2035）以及“十四五”科技创新规划的编制，可以考虑对支撑 2060 碳中和的重点技术创新领域进行识别和更新。

表 8 “十三五”能源和应对气候变化重点技术领域

政策	能源技术革命创新行动计划 (2016–2030 年)	“十三五”应对气候变化科技创新专项规划	国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006–2020 年)
重点领域	<ul style="list-style-type: none"> • 煤炭无害化开采技术 • 非常规油气和深层、深海油气开发技术 • 煤炭清洁高效利用技术 • 二氧化碳捕集、利用与封存技术 • 先进核能技术 • 乏燃料后处理与高放废物安全处理处置技术 	<ul style="list-style-type: none"> • 能源、电力、工业、建筑、交通、农业等重点行业全生命周期的减排技术 • 非 CO2 温室气体减排关键技术 	<ul style="list-style-type: none"> • 工业节能 • 煤的清洁高效开发利用、液化及多联产 • 复杂地质油气资源勘探开发利用 • 可再生能源低成本规模化开发利用

政策	能源技术革命创新行动计划 (2016-2030 年)	“十三五”应对气候变化科技创新专项规划	国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006-2020 年)
	<ul style="list-style-type: none"> • 高效太阳能利用技术 • 大型风电技术 • 氢能与燃料电池技术 • 生物质、海洋、地热能利用技术 • 高效燃气轮机技术 • 先进储能技术 • 现代电网关键技术 • 能源互联网技术创新节能与能效提升技术 	<ul style="list-style-type: none"> • 大规模低成本碳捕集、利用与封存 (CCUS) 关键技术 • 生态系统固碳增汇技术 	<ul style="list-style-type: none"> • 超大规模输配电和电网安全保障

首先，基于目前工作基础和专家意见，对我国能源/电力、工业、建筑、交通等重点行业低碳技术领域进行分类和初步筛选，提出参与评估的技术领域。随后，通过文献调研和专家咨询等收集技术参数，计算评估指标，从而识别重点技术领域。

为实现中国 2030 碳排放达峰目标以及碳中和愿景，重点技术领域的识别主要考虑碳减排潜力和经济价值潜力两个指标。将不同技术领域的减排潜力和经济价值划分为低、中、高三类，建立优选矩阵。优先选择碳减排潜力和经济价值潜力表现双高的技术领域作为低碳技术创新重点，开展具体创新需求的识别与评估。

碳减排潜力主要基于中国技术部署情景预测以及技术的碳排放强度进行评估。针对电源侧技术，可直接通过新技术相对于传统技术的减排潜力进行估算；而针对储能等需求侧技术，我们建议从能源系统角度对减排潜力进行估算，即评估新技术的应用为能源系统带来的减排效益。其中，技术部署情况以及碳排放强度等关键参数的选择主要基于文献调研以及行业专家咨询。

经济价值潜力旨在评估技术未来能够帮助中国实现的经济价值，主要基于全球技术部署情景预测、不同部署情景的技术成本预测以及中国未来在该技术领域的竞争力进行计算。较高的竞争力有助于中国在全球市场中获得较高的市场份额。其中关键参数的确定，尤其是技术成本预测，需要广泛征求技术专家以及行业企业的意见。

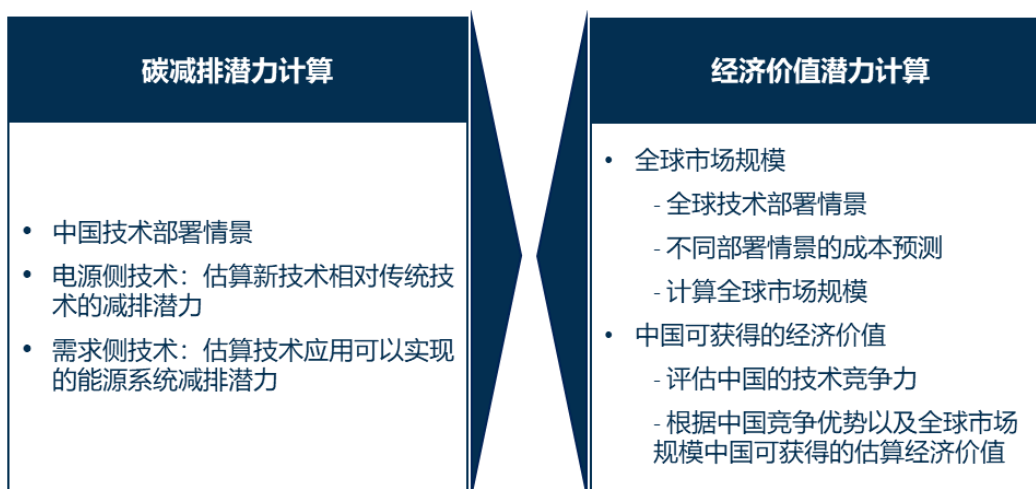


图 12 重点技术领域识别计算方法

5.2 重点技术领域创新需求识别和评估

针对重点技术领域，有必要对其细分技术进行深入分析，识别具体创新机会和创新需求。基于英国经验和中国技术创新现状，项目将模型分析与专家评估相结合，提出了开展评估的方法和流程：

- **应用情景预测：**分析技术在未来能源系统低碳转型中的作用，对具体细分技术未来的应用情景进行预测
- **创新价值评估：**评估创新能够实现的成本降低（技术本身/能源系统角度）
- **经济价值潜力：**评估技术能够帮助中国实现的经济价值以及社会价值
- **创新机会识别：**通过专家研讨和访谈，识别针对具体技术的创新需求和机会
- **市场障碍与国际合作机会：**识别技术创新和发展的市场障碍以及国际合作潜力
- **其他因素**（例如安全性、原材料成本和可获得性等）
- **技术优选：**基于定量分析和定性分析结果优选创新技术和机会



图 13 重点技术领域创新需求评估流程

重点领域创新需求评估考虑了一系列定量和定性指标，定量指标包括创新价值（创新实现的成本节约）和经济价值，定性分析则考虑了不同技术的具体创新机会、市场障碍、国际合作潜力，以及其他因素。需要注意的是，对技术创新价值和经济价值的计算主要用于不同技术之间进行对比，而非对未来的准确预测；此外，模型假设和参数的选择很大程度上需要依赖专家意见，因此在定量和定性分析过程中，都需要广泛纳入政府、行业和企业专家，对关键假设、参数和结果进行深入论证。

技术应用情景 - 定量分析

首先，分析技术在未来能源系统中的作用，尤其是在能源系统低碳转型中的作用，并基于能源系统模型预测技术在中国和全球的部署情况。技术情景的预测可以考虑不同情景，例如基准情景、与中国国家自主贡献目标相一致的 NDC 情景、2060 碳中和情景（高比例可再生能源）等。全球部署情景可以参考相关国际机构的研究结果，例如国际能源署（IEA）的相关研究。

创新价值 - 定量分析

创新价值是指创新带来的成本降低，即未发生技术创新时的应用成本减去技术创新后的应用成本。为了评估技术的创新价值，我们建议对电源侧技术和需求侧技术采用不同的计算方法。对于电源侧技术，可以直接评估创新为技术本身带来的成本下降；针对需求侧技术，则建议评估该技术的应用为整个能源系统带来的成本下降。

通常，技术成本的下降来自两种因素，研发（Learning by Research & Development, LbR&D）和“边做边学”（Learning by Doing, LbD）。对于较为成熟的技术，其成本降低主要来自于技术的大规模应用；而研发在新技术的成本降低上起着更大的作用。具体而言，首先基于文献调研和专家意见，预测不同技术成本降低的学习曲线，以及研发与“边做边学”在不同技术发展阶段对成本降低的贡献；随后结合技术在中国的部署情况，估算研发创新能够带来的成本节约。

经济价值 (商业机会) - 定量分析

经济价值评估包括对中国的竞争力、经济增加值以及就业机会有分析，其中包括出口市场和国内市场经济价值。经济价值评估可以遵循以下步骤：

- 基于不同发展情景预测技术在中国和全球的应用情况。
- 根据技术的应用情况和成本预测估算技术未来的市场规模。
- 基于当前的贸易数据以及专家意见确定市场规模的可交易比例，即中国可以在全球市场中获得的市场规模上限。
- 结合中国现有市场占有率、主要竞争对手的市场份额、行业发展趋势以及相关专家意见，分析中国未来的竞争优势。
- 基于可交易的全球市场规模以及中国的竞争优势估算中国未来能够获得的出口市场规模和国内市场规模。
- 基于中国可获得的市场规模估算技术能够帮助中国实现的经济增加值和创造的就业机会。

创新需求识别 – 定性分析

创新需求识别针对每个重点领域的不同技术，识别具体的创新机会，主要采用专家研讨和打分法。首先，基于文献调研和专家访谈，初步梳理创新机会清单；随后组织专家研讨会，邀请行业领域技术专家识别针对不同技术的具体创新机会。一般而言，创新需求识别需要组织开展多轮利益相关方的讨论和访谈，邀请政府部门、科研机构以及产业链企业共同参与讨论。除创新机会识别外，也可以通过研讨会和专家访谈针对技术应用情况、成本下降趋势、市场障碍等收集专家的意见。

市场障碍和国际合作潜力– 定性分析

市场障碍和创新挑战的分析主要基于行业专家访谈和文献调研，分析目前技术创新和发展所面临的挑战，为创新激励政策的制定提供依据。国际合作潜力分析则需基于技术应用特征、目前的国际合作情况，以及中国中长期发展战略进行评估。

其他因素 - 定性分析

针对特定技术类别，可能需要考虑其他特定因素。例如，技术的安全性是评估储能技术的重要因素，因此储能技术创新需求评估应将安全性纳入。此类因素可以通过文献调研和专家访谈等形式进行分析。

下文以储能行业为例对上述方法学进行了测试。储能行业创新需求评估主要聚焦在微观层面，结合模型分析和专家评估识别了不同技术的关键创新需求。受数据可获得性的限制，项目对模型进行了简化，创新价值的评估仅考虑了技术本身的成本降低，暂时未考虑能源系统的成本降低。

6. 储能在未来能源系统中的作用与应用规模

现阶段我国发电结构仍以化石燃料发电为主。为实现温室气体减排目标，推动电力系统的低碳发展，同时考虑到化石能源日益枯竭的现状，以及核能生产运行中的不安全因素，低成本、清洁的可再生能源（太阳能、风能、水能、生物质能等）在电力系统中所占比例需逐渐升高。根据全球能源互联网合作组织测算，到2025年，中国发电结构中，煤炭占比将从67%下降至49%，风光发电占比将从8%上升至20%，气电、水电、核电等次优能源占比从25%微升至28%；到2050年，煤炭发电占比大幅下降至6%，风光发电上升为主力，合计占比66%，气电、水电、核电等次优能源占比维持在28%左右，此外生物质发电占比约6%。¹²整体趋势可概括为，未来煤炭发电持续削减、风光发电持续扩张、次优能源稳定支持、生物质作为补充力量。

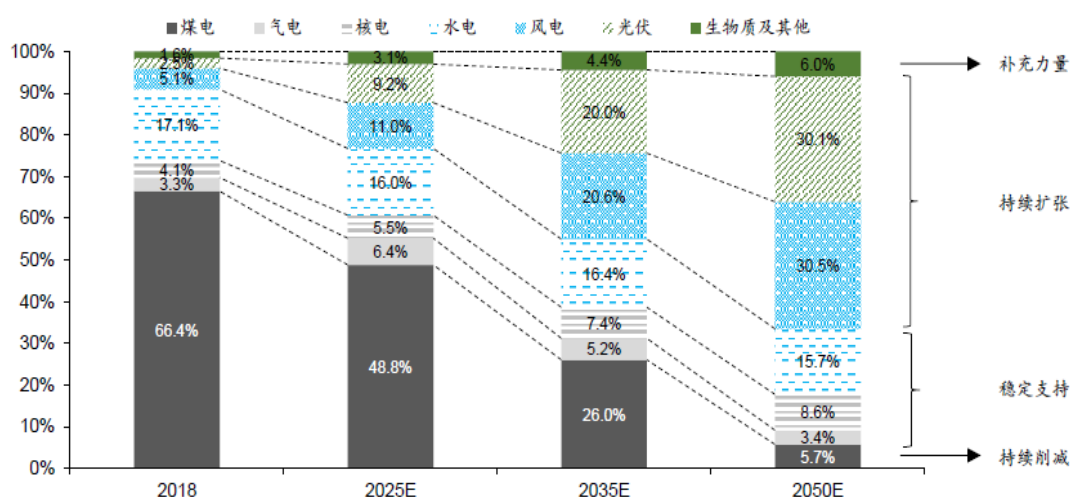


图 14 中国电力结构发展趋势（全球能源互联网合作组织）

由于风光出力具有较强的间歇性与随机性，为了实现出力与负荷实时平衡，当前主要通过调节相对可控的发电能源——水电与火电来适应用户端实时负荷的变化。因此，风光发电想要深度取代火电，实现电力脱碳，需要其出力保持相对稳定，而这一关卡的突破则依赖储能技术。在美欧日等发达市场化化石燃料发电的度电成本较高，部分地区已实现“光伏+储能平价”（光储平价），国内较低的火电度电成本下，储能系统尚未达到经济型拐点，需要进一步研究并支持储能发展。

¹² 周孝信。新一代电力系统与能源互联网。2018 国家能源互联网大会。

6.1 中国清洁电力发展及温室气体排放趋势

根据中国发展改革委员会能源研究所《中国2050高比例可再生能源发展情景暨途径研究》研究报告¹³，在高比例可再生能源情景下，至2050年，全国总发电量为15.2万亿千瓦时，其中煤电10380亿千瓦时、天然气发电4660亿千瓦时、核电6490亿千瓦时、水电21870亿千瓦时、风电53500亿千瓦时、太阳能发电43100亿千瓦时、生物质能发电11000亿千瓦时。可再生能源发电量占总发电量达到85.8%，非化石能源发电占比达到91%，其中风电和太阳能发电合计为9.66万亿千瓦时，占全部发电量的64%，风电、太阳能发电成为未来绿色电力系统的主要电力供应来源。

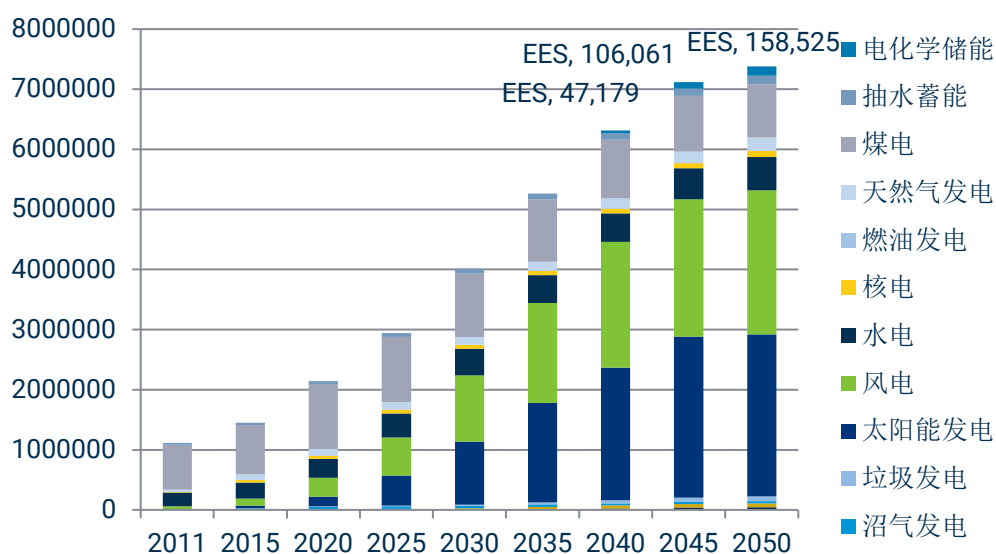


图 15 中国 2050 年高比例可再生能源发展情景

同时报告指出，在高比例可再生能源发展情景下，煤炭消费得到有效控制，煤炭消耗峰值在 2020 年左右即可达到，进而化石能源消费峰值在 2025 年左右实现。可再生能源发电对燃煤发电进行全面替代，最大限度的降低了煤炭用量。电力、炼焦（钢铁）、制造业是中国煤炭消耗最大的三个部门，高比例情景下，可再生能源发电替代燃煤发电，使电力结构中可再生能源发电占到 86%，大大降低了煤炭用量，煤电用煤在 2020 年达到高峰 14.5 亿吨标煤，随后逐年降低，到 2050 用于发电的煤炭仅 2.8 亿吨标煤。与参考情景相比，高比例可再生能源情景碳排放峰值更低，在 2025 年左右达峰（92.3 亿吨），随后不断降低，2050 年二氧化碳排放量降至 30 亿吨，占全球排放量从 1/3 降到 20% 以下。

2020 年，习近平主席提出二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和，从国家层面进一步明确了中国中长期碳减排目标。为实现碳中和，需要快速大规模推广低碳能源，电力行业需要加速深度脱碳。根据能源基金会近期发布的《中国碳中和综合报告 2020》，到 2050 年，电力行业排放应降至零或负，可再生能源发电成为主要电力来源，占总

¹³ 能源研究所，2018。中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究。

发电量的 70%左右；此外，通过灵活发电、改进电网基础设施、需求侧响应以及部署储能技术提高电网灵活性。¹⁴高比例可再生能源是中国实现碳中和及 1.5°C温控目标的关键策略。

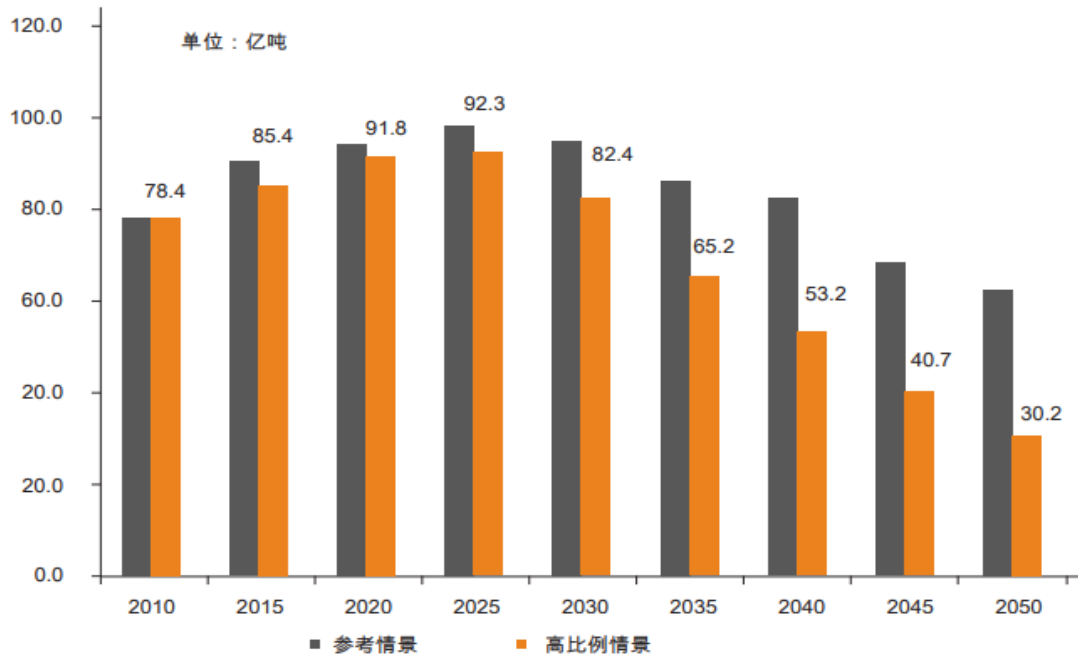


图 16 2010-2050 年高比例可再生能源情景下的碳排放

6.2 储能在电力系统中的作用

储能在电力系统中将发挥重要作用，主要有以下几个方面：

一、推动电力系统的低碳清洁化发展。储能技术是可再生能源装机规模发展的重要支撑，是电力系统低碳发展的保障，在高比例可再生能源场景下储能价值及重要性将进一步凸显。根据国网能源研究院的一项研究，电池储能系统有助于促进可再生能源消纳并降低电力系统的碳排放；在中国安装 8 GW/32GWh 电池储能系统每年将增加 46.2 亿千瓦时可再生能源电力消纳，并减少 380 万吨二氧化碳排放。¹⁵

目前，全球范围内的可再生能源发电处于飞速增长的阶段，利用可再生能源发电供暖、制氢均是能源互联网中可再生能源利用的重要形式。然而，可再生能源出力具有强随机性和波动性，其大规模并网将显著提高电力系统功率不平衡的风险性，对电网的功率输送以及安全稳定运行带来较大的挑战。储能技术在推动新能源发电的发展方面具体起到如下的作用：

¹⁴ 能源基金会（2020）。“中国碳中和综合报告 2020：中国现代化的新征程：‘十四五’到碳中和的新增长故事”。能源基金会，北京，中国。 <https://www.efchina.org/Reports-en/report-lceg-20201210-en>.

¹⁵ The World Bank. 2019. China Renewable Energy and Battery Storage Promotion Project.

- 1) 储能技术与可再生能源发电的联合，能够平滑可再生能源功率输出波动，减少随机性、提高可调度性，从而降低可再生能源对电力系统的冲击力度，提高跟踪计划出力的能力。
- 2) 通过电网级的储能应用可增强电网对可再生能源发电的适应性，提高可再生能源的接入能力，在此应用下，储能作为电网的可调度资源，具有更大的应用价值和应用空间。
- 3) 对于高比例新能源发电电网，为提高综合能源利用效率，储氢、储热等单向的大规模储能技术，为冗余的新能源发电提供了其他能源形式转移的途径，同时在长时间尺度，为广域能源互联网的运行提供支持。储能技术在能源互联网中的应用极大程度地推动了可再生能源的发展，为建设以可再生能源为主导的电力系统建立坚实的技术基础，有力的推动电力系统低碳化发展。

二、提高能源互联网的灵活性和稳定性。在能源互联网中，具有良好的经济性和长寿命的大容量储能技术主要通过以下几个方面提高多元能源系统的灵活性和稳定性。

- 1) 储能技术有利于电网调峰调频。储能技术在提升电网调峰能力方面，根据电源和负荷的动态变化情况，储能系统可以及时可靠地响应调度指令，并根据指令改变其出力水平；在提高电网调频能力方面，可以减小因频繁切换而造成传统调频电源的损耗。目前，电网领域迫切需要低成本、大容量储能技术解决调峰调频的问题，以提高其供电可靠性及电能质量。
- 2) 储能技术能够改善供电质量和可靠性。当电网出现故障时，储能系统可以作为备用电源持续为用户供电，以提高电网的供电可靠性；储能系统还可作为可控电源对电网的电能质量进行治理，消除电压暂降、谐波等问题，同时降低主干网络扩容投入，节约扩容资金。例如电池储能、飞轮储能、超级电容器储能技术以及氢储能均可广泛应用于电网领域。
- 3) 储能技术可以提高社会应急能力。储能技术的应用能够对电网的电能质量做出快速的判断和处理，美国作为应急服务项目的储能技术中多采用电池储能来实现。作为应急电源，储能系统的装机容量一般为10 kW~1 MW，充放电时间为3~5 h，对抗灾性能和环境适应能力有很高要求。电池储能技术非常适合应用于应急电源领域。随着能源互联网的发展，可以考虑为可能遭受灾害袭击的区域和重要用电场所配置应急电源，减少次生灾害发生，提高社会的整体应急能力。例如，在美国东西海岸、尤其是东海岸地区，电网公司正在积极投资建设储能设施。因为这些地区容易受到飓风影响，储能设施可以让电网更有弹性，在对抗飓风时更稳定。

三、为多元能源系统能量管理和路径优化提供支持。对于局域多元能源系统，管理者可根据价格信息合理安排各能源的生产、转换、存储及消费，使得系统运行成本最低，并保证系统可靠和高效运行。储能和释能管理是系统运行决策的重要对象。

系统可依据储能状态的动态变化，确定储能的功率方向和大小，维持系统内供需平衡。同时，系统中各转换元件的功率分配即系统潮流的分布将影响系统运行经济性和效率。储能的功率流向和大小是系统潮流优化的重要控制变量，可使系统获得最优的能量流路径。另外，根据能量在储能单元的滞留，还可判断系统中能量流拥塞情况，及时调整运行计划。储能的安装位置、容量大小和储能释能过程的优化对局域能源系统的经济高效运行起到重要作用。要求储能具有动态响应系统运行状态的能力、较高的转换效率以及便利的安装条件。

四、提高电网运行经济性和推动能源交易模式变革。能源互联网系统通过引入储能环节后，可以有效地实现需求侧管理，消除昼夜间峰谷差，平滑负荷，从而提高电力设备的利用效率，降低供电成本。例如，大规模储热技术在解决风电、光伏等新能源发电的弃风弃光问题中可起到重要的作用，以东北地区为例，冬季供热期间，为满足供热负荷，火电机组的调峰能力骤减，电网接纳风电空间能力不足，引发高比例的弃风现象，在可再生能源发电位置就近接入电锅炉供热、蓄热装置或在热电厂处配置储热装置，可以改善可再生能源发电的利用形式、提高热电厂运行灵活性和调峰能力，减少弃风/光现象，提高电网运行的经济性。

6.3 储能应用规模预测

目前，多家机构对储能市场规模进行过预测：

国家发改委能源研究所于 2015 年发布的《中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究》¹⁶预测，通过已实现商业化的发电技术，非化石能源发电比重大幅提高，至 2050 年可再生能源发电比重从参考情景的 46% 上升到高比例可再生能源情景的 85% 以上，非化石能源发电量占到全国总发电量 91%，煤电发电量占比从基年的 75% 下降到高比例情景中的 7% 以下，同时满足全国每小时的用电需求。全国总装机容量达到 71 亿千瓦，其中煤电 8.8 亿千瓦、天然气发电 2.2 亿千瓦、核电 1 亿千瓦、水电 5.5 亿千瓦、风电 24 亿千瓦、太阳能发电 27 亿千瓦、生物质能发电 2.1 亿千瓦、抽水蓄能 1.4 亿千瓦、化学储能 1.6 亿千瓦。风电、太阳能发电成为实现高比例可再生能源情景的支柱性技术。

中国投资协会联合落基山研究所于 2020 年发布的《零碳中国·绿色投资：以实现碳中和为目标的投资机遇》¹⁷报告预测，在碳中和目标下，中国 2050 年的一次能源需求总量将从目前的 45 亿吨标煤下降到 2050 年的 25 亿吨标煤，且化石燃料需求降幅超过 90%，可再生能源将成为主要能源。从供给侧看，2050 年，中国 67% 的终端能源需求将来自于电，发电量将在当前的水平上翻倍。绝大部分装机来自零碳电力能源，其中光伏和风电将占到总装机量的 70%，是 2016 年的 22 倍。相应地，电化学储能将由 2016 年的 189MW 增长到 510GW，年均增长率达 26%。

中关村储能产业联盟（CNESA），在国家发改委能源所、国际能源署、落基山研究所等权威机构预测的基础上，将储能市场分为低、中、高三种不同发展情景，对中国储能市场未来发展趋势进行了预测。

其中，在“低”情形下，考虑了未来经济发展状况以及国内外疫情对产业的影响，具体包括企业投融资受限、优质客户的选择难度加大、盈利性问题难以解决以及国内电力市场改革不及预期等负面因素对储能项目布局的影响，在具体预测中增加产业面临困难的权重，这种情形下，国内 2050 年储能需求为 160GW。

¹⁶ 国家发改委能源研究所，《中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路径研究》。

¹⁷ 中国投资协会，落基山研究所《零碳中国·绿色投资：以实现碳中和为目标的投资机遇》，2020。

在“高”情形下，即理想场景中，充分考虑了电力市场改革和可再生能源发展对储能的推动作用，通过积极分析电网企业、生产型用户对储能价值认同所带来的项目机会，乐观的考量储能未来市场需求，在这种情形下，预测国内2050年储能需求为510GW。

其中“中”等情形下，储能市场条件及应用规模介于“高”、“低”两种情景之间，预测国内2050年储能需求为336GW。

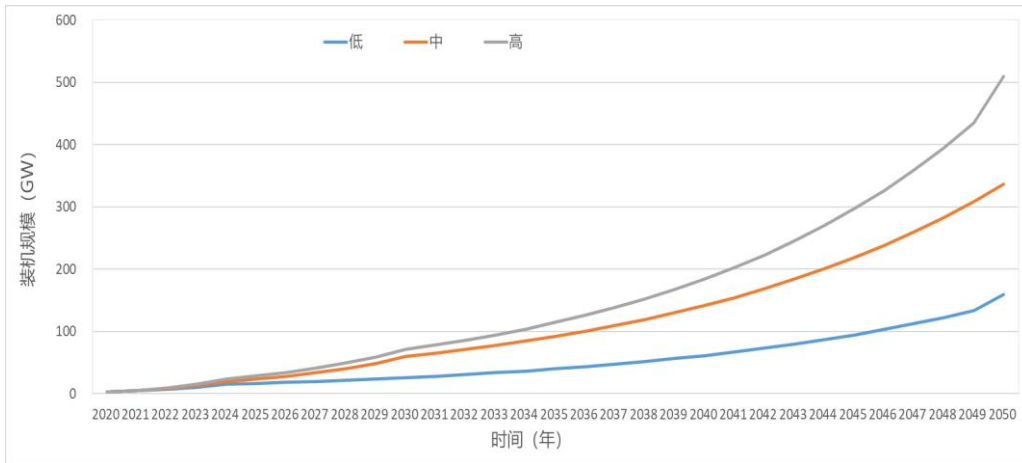


图 17 不同情景下 2021-2050 年中国储能装机规模预测

此外，在国际能源署以及彭博财经等对全球储能市场的预测的基础上，中关村储能产业联盟根据“高、中、低”三种不同发展情景，对全球储能市场未来发展趋势进行了预测。在“低”情形下，主要考虑世界格局变化及疫情对全球经济冲击给储能产业带来的影响，包括逆全球化发展、储能企业全球投融资限制、部分地区储能产业链重塑面临的挑战等，在具体预测中增加产业面临困难的权重，全球2050年储能需求为1008GW；在“高”情形，即理想场景下，充分考虑在人类命运共同体以及全球低碳发展愿景下，能源结构重构对储能的推动作用，全球储能市场需求到2050年将达到2440GW；在“中”等情景下，储能市场条件及应用规模介于“高”、“低”两种情景之间。

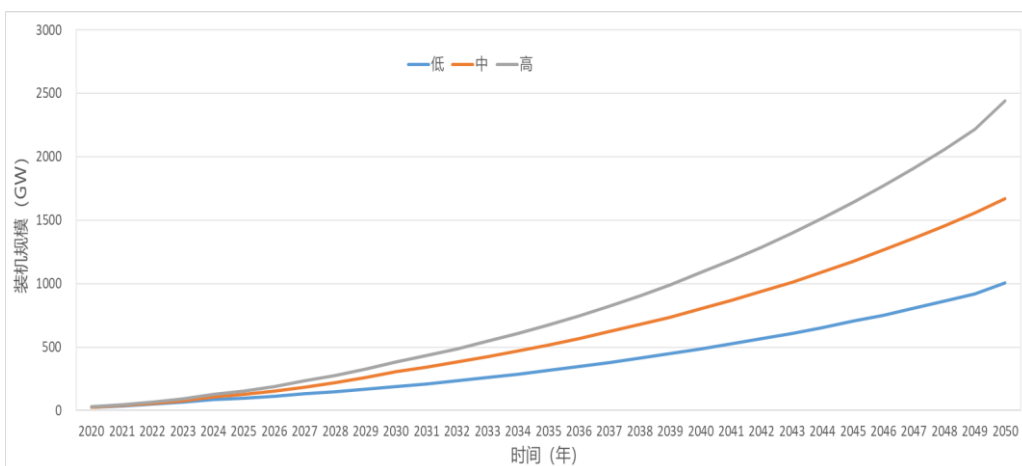


图 18 不同情景下2021-2050年全球储能装机规模预测

7. 储能技术创新的价值评估

储能技术是通过特定的装置或物理介质将不同形式的能量通过不同方式储存起来，以便以后在需要时再次利用的技术。目前主要指电能和热能的存储。广义的电力储能技术是指为实现电力与化学能、机械能等其它形式的能量之间的单向或双向存储的技术。这些电力储能技术被广泛应用于提升电网输出与负荷匹配度，降低电网输出波动，减少电能损耗，以提升能源利用效率，为支持可再生能源大规模发展提供保障。

经过了十几年发展，中国储能行业走过了技术研发、示范应用和商业化初期三个阶段，总体而言目前我国在储能技术应用方面处于世界前列。目前储能行业还处于各项技术并驾齐驱的阶段，没有一种储能技术在市场上形成绝对优势，如**抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、超级电容等物理储能技术**，也包括**锂离子电池、铅碳电池、液流电池、钠硫电池**等电化学储能技术，各种储能技术各具优点，也各有其局限性，见**表 9**。各种储能技术特性存在较为显著的差别，适用范围也有较大的区别，例如飞轮与超级电容器储能主要应用于工业生产中对电压波动较为敏感的精密制造与电力调频领域；抽水蓄能以及压缩空气储能技术等主要应用于大电网的输配电环节，而化学储能则更多运用于光、风发电等波动较大的可再生能源发电侧、中小型智能变电站和用电侧。

市场上如此众多的储能技术，有必要利用科学的方法从成本下降、商业潜力、技术障碍以及应用障碍等方面对储能技术进行筛选，筛选出最具创新投资价值的储能技术，并提出加速储能技术创新和解决应用障碍的政策建议。本项目利用英国 TINA 模型主要针对锂离子电池、铅碳电池、液流电池、钠硫电池、压缩空气储能、飞轮储能、超级电容等七种储能进行具体分析。

表 9 不同储能技术参数及特点

项目	电化学储能技术						物理储能				电磁储能
	铅碳电池	磷酸铁锂电池	钛酸锂电池	三元锂电池	钠硫电池	全钒液流电池	抽水蓄能	飞轮储能	压缩空气储能	超级电容储能	超导储能
容量应用规模	百 MWh	百 MWh			百 MWh	百 MWh	GWh	MWh	GWh	MWh	-
功率应用规模	几十 MW	百 MW			几十 MW	几十 MW	GW	几十 MW	百 MW	几十 MW	10-100MJ
能量密度 /Wh.Kg ⁻¹	40-80	80-170	60-100	120-300	150-300	12-40	0.5-2Wh/L	20-80	3-6Wh/L	2.5-15	1.1
功率密度 /W.Kg ⁻¹	150-500	1500-2500	>3000	3000	22	50-100	0.1-0.3W/L	>4000	0.5-2.0W/L	1000-10000	5000
响应时间	ms	ms			ms	ms	min.	ms	min.	ms	ms
循环次数	500-3000	2000-10000	>10000	1000-5000	4500	>10000	>10000	百万次	>10000	百万次	---
寿命	5-8 年	10 年			15 年	>10 年	40-60 年	20 年	30 年	15 年	30 年
充放电效率	70-90%	>90%	>90%	>90%	75%-90%	75%-85%	71%-80%	85%-95%	40%-75%	>90%	>95%
单位投资成本/元.KWh ⁻¹	800-1300	800-2200	4500	1200-2400	~2200	2500-3900	500-2000	5000-15000	1000-1500	9500-13500	90000
应用领域	用户侧	用户侧、电网侧、电源侧等			电网侧、电源侧	电网侧、电源侧	电网侧	电源侧、用户侧	电网侧、电源侧	电源侧	---

项目	电化学储能技术						物理储能				电磁储能
	铅碳电池	磷酸铁锂电池	钛酸锂电池	三元锂电池	钠硫电池	全钒液流电池	抽水蓄能	飞轮储能	压缩空气储能	超级电容储能	超导储能
优势	成本低，可回收含量高，安全性好，响应时间快	效率高、能量密度高、响应快			效率高、能量密度高、响应快	循环寿命高、安全性好	容量规模大、寿命长	功率密度高、响应快、寿命长、免维护	容量规模大、寿命长	功率密度高、响应快、寿命长、安全性高	响应快效率高
劣势	能量密度低、寿命短、受放电深度影响大	安全性较差、成本与铅碳电池相比较高			需要高温条件，安全性较差	能量密度低、效率低	受地理环境限制、对生态环境有一定影响	成本高、自放电严重	效率低、受地理环境约束	成本高、能量密度低	成本高、能量密度低

7.1 储能技术创新对成本降低的影响

7.1.1 储能技术市场阶段及创新对成本的贡献

从我国的情况看，作为全球最大的发展中国家，因低廉的土地成本、人工成本和原材料成本被誉为“世界制造中心”，低成本一直是我国最重要的竞争优势。当前由于资源的稀缺与环境污染的压力使得仅仅依靠资源消耗来获取发展变得越来越困难，加大技术创新的投入促进发展已经成为当下的新趋势。技术创新作为成本领先战略的重要驱动因素已经在实业界获得广泛认同。首先，技术创新是国家在某产业获得成本优势的内在方式，可以弱化本产业对外部生产要素成本的依赖；其次，通过技术创新形成的成本优势具有可持续性。

当前技术创新对于储能技术成本降低的影响显得尤为重要。由于不同的储能技术处于市场化的不同阶段，对创新需求不同。因此首先对各种储能技术处于何种市场阶段进行了访谈调研。根据行业内专家访谈结果，其中处于成长Ⅱ期的储能技术主要有锂离子电池、铅碳电池，介于Ⅰ期—Ⅱ期的储能技术主要有全钒液流电池，处于成长Ⅰ期的技术主要有压缩空气储能、飞轮储能、超级电容器储能技术等，孕育期—发展Ⅰ期的储能技术主要有钠硫电池，处于孕育期的技术主要有钠离子电池；通过专家打分的方式给出了技术创新对不同技术成本的贡献程度并列于表 10 中。

表 10 不同储能技术市场发展阶段及技术进步对成本降低的贡献

技术分类	市场发展阶段	技术创新对成本降低的贡献(1-5)
锂离子电池	市场成长Ⅱ期	4.7
钠离子电池	市场孕育期	--
铅碳电池	市场成长Ⅱ期	4.3
全钒液流电池	市场成长Ⅰ期--市场成长Ⅱ期	4
压缩空气储能	成长Ⅰ期	5
钠硫电池	市场孕育期--市场成长Ⅰ期	4.7
飞轮储能	市场孕育期--市场成长Ⅰ期	5
超级电容器	市场成长Ⅰ期	5

注：萌芽期：小试并取得专利；孕育期：中试且效果良好；成长Ⅰ期：局部示范推广，商业化运作前期；成长Ⅱ期：较大范围应用，仍有改进潜力和空间；成熟期：市场广泛应用，接近饱和

7.1.2 不同储能技术的创新价值分析

基于模型估算了不同储能技术的创新价值，即创新能够带来的成本节约。根据测算，从 2018 到 2050 年，研发创新能够为中国储能领域最高实现 2500 亿的成本节约。在中等情景下，化学储能研发创新价值累计可达到 1511 亿（图 19），物理储能研发创新价值可达到 221 亿（图 19）。

从模型输出结果来看，不论在低、中、高哪种场景下锂离子电池储能系统因创新带来的成本节约远超过其它储能技术，其次是全钒液流电池以及压缩空气储能技术。未来锂离子电池储能技术仍可以通过技术

创新等方式，进一步降低其成本，除锂离子电池外，根据技术特性，全钒液流电池和压缩空气储能技术同样可以通过技术创新等方式大幅降低其成本，有望在未来得到大规模应用。

表 11 2018-2050 年不同储能技术通过研发创新带来的累计成本节约（百万元）

储能系统	低	中	高
锂离子电池储能系统	46,092	104,644	147,626
全钒液流电池储能系统	14,697	35,792	53,529
铅碳电池储能系统	4,060	10,453	14,365
钠硫电池储能系统	85	204	336
压缩空气储能系统	8,185	20,287	31,582
飞轮储能系统	359	1,049	1,689
超级电容器储能系统	323	807	1,230
总计	73,802	173,236	250,356

注：折现到 2018 年



图 19 电化学储能技术创新的累计成本节约（十亿元，折现到 2018 年）



图 20 物理储能技术创新的累计成本节约（十亿元，折现到 2018 年）

锂离子电池

锂离子电池当前蓬勃发展，在多个应用领域得到广泛应用，电力领域本身特殊性，对电力储能技术性能要求有别于其它领域，需要锂离子电池做出创新，首先在性能上需要满足场景的需求，比如安全、寿命等，进而通过创新实现成本的不断降低。目前电力储能领域内锂离子电池的创新主要集中在产品创新和工艺创新两方面，产业中通过不断降低原材料生产成本、产品制造成本、提升产品的性能等创新方式进而降低产品成本。例如国内推出循环寿命超过 10000 余次的储能用锂离子电池产品，与常规的锂离子电池相比，寿命提升了 1 倍有余，大大提升了产品的使用寿命，降低了储能系统使用过程中的度电成本。

钠离子电池

钠离子电池是电力储能领域的新生产品，处于市场孕育阶段，相比于锂离子电池而言，应该属于根本性创新，彻底改变了电池化学体系，且有望摆脱锂离子电池对稀有金属元素的依赖。由于钠离子电池中原材料来源广泛，且材料价格低廉，经过计算在材料层面与现有磷酸铁锂锂离子电池体系相比成本将降低 30%左右。



图 21 钠离子电池与锂离子电池材料组成及成本对比

铅碳电池

铅碳电池作为铅酸电池的一种，处于市场成长 II 期，相对制造工艺成熟，原材料供应稳定，电池工艺创新空间有限，且创新难度较大，与铅酸电池相比，铅碳电池中尽管负极中添加碳材料的比例超过 4%，甚至达到 10%-20%左右。但对于铅碳电池而言通过优化电池结构、碳材料技术的进步等创新方式对成本的影响有限。对于铅碳电池进一步革新电池的寿命（单体寿命大于 1 万次，系统寿命 4000 次以上）及性能（荷电放电深度从目前的 40%-60%提升到 40%-80%）将对电池的成本下降有较大影响，除此之外，实现铅碳电池用高性能碳材料的国产化，将对成本产生一定的影响。

全钒液流电池

全钒液流电池技术成熟，在市场中占有一定规模，处于成长 I 期向成长 II 期过渡阶段。国内全钒液流电池产业规模较小，制造水平不高，进一步完善产业链，扩大全钒液流电池关键部件生产制造水平有利于进一步降低全钒液流电池成本。如实现全氟磺酸树脂膜及树脂的国产化及规模化生产，批量化生产电极材料、双极板等电堆关键部件。在长时间（>4h）电能量存储领域，全钒液流电池电解液成本占比较高，尽管进一步提升电堆的功率性能在一定程度上降低整个储能系统的成本，但要大幅度降低全钒液流电池

储能系统的成本，依赖于电解液成本的下降，当前国内钒资源集中程度较高，具有较强的垄断性，不利于电池成本的下降。

压缩空气储能

行业普遍认为当前压缩空气储能处于市场规模化应用 I 期，国内在新型压缩空气储能项目研发示范处于领先地位，并率先开展了百兆瓦级压缩空储能示范项目。对于压缩空气储能系统，随着装机容量，存储能量时间的延长成本快速下降，根据中科院工程热物理所研究，目前 4h 系统成本为 1700 元/KWh，储能时长达到 8h 后，成本降至 1250 元/KWh。通过优化百兆瓦级系统及部件优化设计，实现系统模块化、标准化生产将能够极大的降低压缩空气储能系统成本。

钠硫电池

钠硫电池我国起步较晚，国内钠硫电池技术积累及市场应用较为薄弱，市场阶段处于孕育期-市场成长 I 期之间。钠硫电池对企业生产制造水平要求较高，且技术垄断性较高，我国处于关键技术突破阶段。在中国钠硫电池关键技术的突破，如电极材料、 β 三氧化二铝陶瓷管生产技术，将有利于钠硫电池成本的下降，同时未来如果能进一步完善钠硫电池产业链，提升钠硫电池制造技术，能极大的推动钠硫电池成本的下降。

飞轮储能

飞轮储能国内起步较晚，但市场应用及技术进步较快，技术基本实现国有自主，在国内处于市场孕育-市场成长 I 期阶段。飞轮储能成本依赖于高速飞轮转子材料的突破，如碳纤维；加速高性能轴承及高速电机的开发，降低自放电，提高能量密度；加快变流系统的研发,当生产规模扩大到 100MW/20MWh 未来成本有望低于 1225 万元/MWh。

超级电容器

除隔膜纸、高性能活性炭材料外超级电容器储能器件产业基本实现了国产化，且中国本土拥有一大批技术领先的超级电容器储能器件开发企业，目前超级电容器作为电力储能器件处于市场成长 I 期。对于超级电容器推动关键材料的国产化及规模化生产具有十分重要的现实意义，同时超级电容器能量密度的提升，发展混合电容也将极大的降低超级电容器的能量成本。超级电容器成本对关键材料国产化程度及技术研究有极大的依赖性。

7.2 储能技术经济价值潜力

伴随新能源蓬勃发展、全球气候变化带来的环境压力和政治压力,中国的太阳能光伏发电和风能发电装机规模未来仍将呈快速增长。新能源产业的发展也为储能行业带来全新的机遇，根据中关村储能产业技术联盟储能项目库数据表明，中国储能产业也正以惊人的速度迅速成长。然而新兴产业的诞生总是伴随着技术方向的分歧、技术标准的缺失以及市场的整体混乱等问题。当前，我国储能产业的技术研发人员、投资者、经营者、购买者和政策制定者亟需深入了解该产业形成过程中所产生的技术经济问题，作为决策的依据。本小节借鉴英国 TINA 模型对国内不同类型储能技术进行了经济潜力分析。分析过程中先后

访谈了储能产业相关供应商、产品客户、行业协会和政府主管部门等相关领域的管理者或专家。模型及分析过程中的数据均为行业内第一手数据。

根据模型输出结果，在“高”即理想场景下全球储能市场在 2050 年全年的规模将超过 2700 亿，其中锂离子电池市场规模将占据绝对优势地位，铅碳电池和钠硫电池位居第二、第三。其次是全钒和压缩空气储能技术。整体上物理储能技术由于能量效率或能量密度等因素限制市场规模较小。

表 12 2050 年全球储能市场规模（2050 年 百万元）

技术种类	情景					
	低		中		高	
	规模	占比(%)	规模	占比(%)	规模	占比(%)
锂离子电池	111,285	76.9%	144,864	78.1%	207,603	76.6%
钒液流电池	3,341	2.3%	3,039	1.6%	6,147	2.3%
铅碳电池	12,192	8.4%	16,667	9.0%	27,630	10.2%
钠硫电池	14,601	10.1%	18,057	9.7%	24,217	8.9%
压缩空气储能	1,912	1.3%	1,305	0.7%	2,621	1.0%
飞轮储能	906	0.6%	1,131	0.6%	1,973	0.7%
超级电容器	424	0.3%	410	0.2%	865	0.3%
总规模	144,659		185,474		271,057	

根据模型输出结果在乐观的形势下中国储能市场在 2050 年全年的规模将超过千亿，与全球市场一致锂离子电池市场规模将占据绝对优势地位，铅碳电池位居第二，其次为全钒液流电池和压缩空气储能技术，其他储能技术市场规模总体较小。在物理储能技术中，压缩空气在乐观场景下具有一定的市场空间，同样飞轮储能技术作为一种新型的电力储能技术由于其功率密度高，未来在特定的场景中如电力调频领域有一定的应用，但总体市场规模较小。

表 13 2050 年中国储能市场规模（2050 年 百万元）

技术种类	情景					
	低		中		高	
	规模	占比(%)	规模	占比(%)	规模	占比(%)
锂离子电池	27,602	64.1%	36,249	66.2%	67,169	66.4%
钒液流电池	3,144	7.3%	2,812	5.1%	5,873	5.8%
铅碳电池	9,320	21.6%	13,312	24.3%	23,185	22.9%
钠硫电池	72	0.2%	78	0.1%	154	0.2%
压缩空气储能	1,883	4.4%	1,277	2.3%	2,592	2.6%
飞轮储能	649	1.5%	690	1.3%	1,405	1.4%
超级电容器	410	1.0%	374	0.7%	803	0.8%
总规模	43,080		54,792		101,181	

基于全球和国内市场规模，模型对不同储能技术发展能够给中国带来的商业价值进行了评估，包括了国内市场和出口市场经济价值。从输出结果来看，电化学储能技术的经济价值潜力明显高于物理储能技术。其中，电化学储能技术中锂离子电池的商业价值最高，其次是铅碳电池和全钒液流电池储能技术，物理

储能技术中压缩空气储能技术具有一定的商业价值，飞轮储能技术和超级电容器储能技术的商业价值较小。

表 14 2018-2050 年储能技术给中国带来的累计经济增加值（十亿元）

技术种类	情景
锂离子电池	31.6 (18.6 - 38.4)
钒液流电池	1.1 (0.7 - 1.3)
铅碳电池	5.9 (3.1 - 7.3)
钠硫电池	0.01 (0.00 - 0.01)
压缩空气储能	0.5 (0.3 - 0.6)
飞轮储能	0.0 (0.0 - 0.1)
超级电容器	0.0 (0.0 - 0.0)

注：折现到 2018 年

另外储能市场的发展也将为中国创造更多的就业机会，在理想场景下将创造超过 90 万个工作岗位，其中电化学储能产业将带来绝大多数的就业机会。从商业机会和就业机会两方面可知未来电化学储能技术产生巨大的经济价值以及社会效益，其中锂离子电池更加值得关注，同时全钒液流电池、压缩空气储能技术也将具有较大的成长空间。

表 15 储能技术发展为中国创造的就业机会（2050 年人）

地区	技术种类	场景		
		低	中	高
中国	电化学储能	365423	477663	877597
	物理储能	26682	21220	43516
创造就业机会总数		392105	498883	921113

8. 储能技术创新和发展的市场障碍

8.1 市场壁垒和挑战分析

中国储能市场经过多年发展已经初具规模，根据中关村储能产业技术联盟市场跟踪显示截至 2019 年除抽水蓄能外，国内储能项目累计装机规模超过 4GWh，随着未来可再生能源装机规模的不断增长，行业内普遍认为对电力储能技术的需求将不断增加。尽管市场对储能行业未来的发展持乐观态度，但仍然面临较大市场壁垒和挑战，主要集中在以下三个方面：

一是市场机制不健全。中国储能产业虽然起步晚，但最近几年内国家对储能产业愈发重视。全球范围内以北美、日本为例，在 20 年前就有了储能方面的产业政策，也都已经形成了各自的运行机制。与这些国家相比，我国从国家部门层面已经出台了一系列纲领性文件，指导储能产业发展，例如《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》；同时不同地区也已经出台了一些规定，为储能的发展提供了一定的机会和商业模式。但整体而言，中国国内政策机制和价格机制并不健全，离保障储能产业持续健康发展还有很大距离。未来需要从政策上保障储能可以获得长期稳定的收益，并真正纳入到电力体制改革，从而提高投资方参与的积极性，并尽量减少投资风险。

二是国内电力市场改革较为缓慢，在一定程度上也制约了储能的发展。在开放的电力市场中，储能系统可参与日前能量市场、实时能量市场、调频市场和旋转备用服务市场等多个电力市场并获取收益，其中获取收益最大的应用领域为调频辅助服务市场。此外，储能系统还可以通过参与需求响应服务获取收益，随着长效机制的完善，该应用领域也将成为储能技术获取增值的关键平台。开放的电力市场是储能商业化的重要前提，储能系统在市场应用中会获得更高的基础价值。随着国内电力市场改革的步伐的不断推进，辅助服务市场和现货市场的建立和完善将逐步体现储能的价值。以电力辅助服务为例，目前国内山东、新疆、宁夏、广东、山西、重庆、华北、华东、西北、江苏、蒙西等区域的电力调峰、调频辅助服务市场都已经启动模拟运行或试运行，在这些区域中部分火储联合调频项目取得了很好的运行效果，储能项目收益良好，能够在短时间内收回投资成本。

三是技术前景尚不明朗。如何把技术直接变成实际的商业模式，最终能否支持储能企业真正实现盈利，也存在风险。目前哪种储能技术最具经济性、最有竞争力尚不清楚，即从商业角度来看最有前景的储能技术还不确定，对一些正计划进入储能行业的企业而言具有较大的不确定性。

四是储能设备还需要提高寿命及其可靠性。目前储能系统寿命与风电、光伏等可再生能源场站寿命不匹配，光伏电站、风电场寿命基本上可达 20 年以上，而当前以锂离子电池为主的储能系统寿命一般在 10 年左右，远低于可再生能源场站的寿命。另外还存在储能系统可靠性差，实际应用效果不理想等问题，也在一定程度上限制了储能的应用。

8.2 储能行业技术创新障碍

技术的创新会为一个国家经济发展提供强大的动力，储能技术作为向清洁能源转型的重要支撑技术，其重要性不言而喻。随着市场规模的不断扩大，应用领域不断明晰，能源行业对储能的创新需求将不断加

大。政府层面已经通过重大专项支持等方式支持储能产业创新发展，中国在储能领域取得了较大成功，引领全球储能行业发展。然而，在储能产业基础研究环节仍面临一些挑战。

整体上影响国内储能技术创新的障碍主要有：一方面企业没有形成有效和完善的技术创新机制，储能技术供应商中工程技术人员居多，不具备完备的研究开发基础条件；另外一方面在技术创新中存在技术问题，储能行业作为一个新型领域主要的表现有，技术成果不成熟，技术水平不高，技术协作攻关不力；最后，国内技术市场发育不完全，也在一定程度上制约储能行业的技术创新。正是由于以上几方面因素的存在，导致我国储能产业基础研究环节严重不足和缺位问题。

当前国内主流的储能技术主要在国外发达国家的基础上发展而来，缺乏属于本土原创性的储能技术，应尽快摆脱“师夷长技以制夷”的状态。另外部分储能技术如钠硫电池、铅碳电池、超级电容器、锂离子电池等部分材料对进口有严重的依赖性，这些都表现在基础研究和原始创新能力体系不足这个关键短板。

8.3 国际合作机会

从技术层面，目前中国作为储能技术研究及应用最为重要的区域之一，包括锂离子电池、铅碳电池、压缩空气储能技术、钠离子电池在内的多种储能技术已经处于世界领先地位，对外依赖程度不高。但部分储能技术落后于国外水平，主要包括钠硫电池、飞轮储能技术等，其中钠硫电池对外依赖程度较大，包括高性能碳毡、 β - Al_2O_3 陶瓷管技术等，短期内难以实现自主技术的突破，存在较大的国内外合作空间。对于全钒液流电池、超级电容、铅碳电池这些储能技术部分原材料对外具有较强的依赖性，主要包括全钒液流电池用全氟磺酸树脂质子交换膜、超级电容器用纤维素纸以及高性能活性炭原材料等，存在较大的国内外合作空间。

从储能政策机制和市场培育层面，储能行业发展初期阶段，中国可借鉴国外储能发展支持政策，包括给予一定的项目补贴、税收优惠等政策。目前，现有的监管框架下没有为国内储能行业发展提供适当的激励措施和机会，无法充分发挥储能资源在电力系统中的作用。因此，我国可以借鉴国外监管框架和市场体系，保障储能市场持续健康发展。另一方面，电网企业缺乏足够精确的手段来激发和充分发挥储能资源的灵活性。另外，当前国内储能领域标准化尚不完善，标准化能够进一步提升行业整体的经济效益，并为大规模商业化生产创造了先决条件，有助于加快技术知识和创新成果的传播，这方面中国可以进一步借鉴国外经验。

9. 不同储能技术创新机会

9.1 锂离子电池

锂离子电池进入电力储能领域中比较晚，在交通工具电动化浪潮的影响下，技术进步较快，成本下降显著，至 2012 年以来，成本下降超过 75%。目前已经成为电力储能领域中应用最为广泛的储能技术之一，在电力系统发输配用各个环节均实现了应用。目前锂离子电池储能系统仍面临安全性问题、系统可靠性、寿命以及本体回收等一系列问题，将是锂离子电池在储能领域中应用所面临的重大挑战也是未来锂离子电池储能系统重点攻关研究的方向。

总体来看，锂离子电池的创新机会/创新需求主要围绕技术本体、系统集成、部件选型等几方面展开。开发高安全、长寿命、高效率的电池储能系统产品以及开发具有本征安全的锂离子电池成为行业新趋势，如固态锂离子电池的开发；同时随着锂离子电池规模化发展，未来退役的锂离子电池的规模越来越大，通过电池回收将形成产业资源闭环，高效的电池回收技术也将是该行业新的机会。

9.2 钠离子电池

钠离子电池与锂离子电池几乎同期发展，但商业化发展较慢，近几年因交通工具电动化发展，对锂离子电池需求量急剧上升，引发了产业界对原材料供应的担忧，行业将目光转向原材料易于获得且几乎没有资源限制的钠锂离子电池。当前从事钠离子电池研究开发的团队越来越多，但仍然处于研究阶段，技术尚未取得重大突破。当前钠离子电池产业链不完善、技术体系不成熟、技术发展路线不清晰，是该类技术在未来储能领域应用的重大挑战。钠离子电池技术研发进度我国与国外相比相差不大，国内已经出现了一批从事钠离子电池商业化开发的企业，但整体而言在循环寿命、电池倍率充放电性能等方面仍然与锂离子电池存在较大差距。钠离子电池储能技术创新技术/创新需求主要围绕钠离子电池关键低成本材料批量化生产，还包括电池技术制作技术的不断突破等。

9.3 铅碳电池

铅碳电池与传统铅酸电池相比在充电速度，循环寿命等方面都有大幅度提升，成为国内外电力储能领域中应用最为广泛的储能技术之一。铅碳电池与锂离子电池相比具有回收产业链成熟，安全性高，不存在资源限制等优点，但铅碳电池的使用寿命随荷电状态的变化比较大，随着电池充放电深度的增加，电池寿命衰退较为严重，30%DOD，寿命超过 3000 次，当 DOD 为 80%时，寿命低于 2000 次。寿命在未来仍将是铅碳电池应用的主要挑战，提升铅碳电池循环寿命将是行业重点发展方向。目前国内通过自主研发以及国外技术消化吸收的方式，目前已经完全掌握了铅碳电池生产制造技术，但对于碳材料如何提升铅碳电池充放电性能的机理仍缺乏清晰的认识，同时对相关碳材料筛选机理的研究不足，另外国内铅碳电池用活性炭对外依赖程度较高，具有一定限制性，高性能碳材料的国产化也将是国内铅碳电池重点关注的环节。

总体来看，铅碳电池创新机会/创新需求主要围绕技术本体展开其中进一步提升铅碳电池循环寿命、拓宽运行荷电状态等，提升铅回收技术，进一步提升电池制造水平展开，同时加速高性能活性碳材料国产化也将是国内亟需关注的发展机会。

9.4 全钒液流电池

全钒液流电池作为商业化最为成熟的一种液流电池，在电力储能领域中具备了一定的应用规模，国际上实际运行的全钒液流电池储能项目已经经过 10 多年的实践验证。与锂离子电池相比具有使用寿命更长（10000+）、安全性更高等优点，在结构上能量存储单元与功率单元（反应场所）相分离，且零自放电使得其在大规模长时间电能存储应用具备一定优势。国内全钒液流电池主要面临的问题有，产业链不完整，部分关键技术对外依赖程度较高，电堆自动化生产能力偏弱，资源垄断性较高，系统成本较高，这些问题在一定程度上限制了全钒液流电池技术的应用。对于全钒液流电池技术而言，未来加强关键材料国产化、进一步提升制造水平、突破资源垄断性限制是整个行业的重点工作。

总体来看，全钒液流电池创新机会/创新需求主要围绕液流电池产业链展开，进一步完善产业链关键技术，包括膜材料、电极材料等，进一步扩大产品生产规模，同时进行新的低成本的化学体系液流电池的布局。

9.5 压缩空气储能

传统的压缩空气储能技术作为一种成熟的储能技术已经实现了商业化应用，国际上传统的压缩空气储能电站已经运行 40 余年。实践证明压缩空气储能技术规模可与抽水蓄能相媲美，被认为是最具竞争力的大规模储能技术。但传统的压缩空气储能效率偏低仅为 40%左右，极大的限制了压缩空气储能技术的应用，除此之外，传统压缩空气储能技术对化石能源有较强的依赖。近几年，新型压缩空气储能技术完全摒弃了传统压缩空气的缺点，摆脱了对化石能源的依赖，且极大的提升了能量效率，引起了储能行业的重视。国内在新型压缩空气储能技术的研究处于世界领先地位，并有相关验证项目，国内产业链相对完整，具备压缩空气储能系统关键部件制造、设计、系统安装能力，目前国内已经开始实施百兆瓦级新型压缩空气储能项目。尽管新型压缩空气储能技术尽管在效率方面有了极大提升，但仍然低于抽水蓄能的能量效率，且采用地下储气库的压缩空气储能系统受地理环境的影响较大，这两方面因素在一定程度上限制了压缩空气储能的应用。未来压缩空气储能仍然需要进一步提升其能量转化效率，且进一步提升压缩空气储能的安装灵活性。

总体来看，压缩空气储能技术创新机会/创新需求主要围绕百兆瓦级甚至更大规模系统集成技术展开，替代抽水蓄能，并推动系统模块化标准化生产。

9.6 钠硫电池

钠硫电池是电力储能领域中应用最为广泛的一类储能技术，全球范围钠硫电池储能项目的部署超过 300 个。较为早期的钠硫电池储能电站运行时间已经超过 10 年。经过多年的实践应用，充分验证了钠硫电池电力储能领域应用的可行性，是目前最为成熟的电力储能技术之一。对于钠硫电池技术本身而言，需要在高温（300℃~350℃）的环境下工作，且熔融状态下的钠和硫活性极大，存在较大的安全隐患，

日本 NGK 提供的钠硫电池在 2011 年出现着火事故，也直接反映了电池存在较大安全隐患；另外，由于其制造困难，制造费用较高，导致成本一直居高不下。同时与国外相比，我国在钠硫电池领域的研究与国外存在较大的差距，当前我国在钠硫电池关键技术方面尚未完全突破，钠硫电池制造技术未能取得关键突破。

总体来看，钠硫电池储能技术创新机会/创新需求空间较大国内产业链及关键技术仍处于突破中，其中包括陶瓷管、高性能碳毡等技术突破，并实现批量化生产。

9.7 飞轮储能

飞轮储能作为功率储能器件，在电力调频、电能质量管理、备用等领域具有成熟的应用案例，目前飞轮储能正向高能量密度、长时间能量存储方向发展。飞轮储能技术美国处于领先地位，中国近年来出现了一批飞轮储能技术开发商，其中技术来源包括引进国外先进飞轮储能技术，也包括由科研院所转化而来的具有自主知识产权的飞轮储能技术，目前国内已经成为飞轮储能技术以及飞轮产品开发最为活跃的地区之一，基本掌握了飞轮储能的核心技术。中国未来将进一步突破飞轮储能的能量密度，开发碳纤维飞轮转子、高速电机以及突破磁悬浮飞轮支撑技术。对于飞轮储能成本和能量密度是限制其在电力系统广泛应用的主要因素。

总体来看，飞轮储能技术创新机会/创新需求主要围绕高性能飞轮储能技术展开，包括高性能飞轮转子用碳纤维技术，高速轴承和高速电机的开发，大容量低成本飞轮单体开发等。

9.8 超级电容器

超级电容器是近年发展起来的一种新型储能器件，具有功率密度高、寿命长、无需维护及充放电速度快等特性，是一种功率型储能器件。目前超级电容器储能技术在电力储能领域中应用一般与其它能量型储能器件进行复合应用，用于提升储能系统整体的功率输出特性，有助于提升系统整体的使用寿命。国内超级电容器制造技术与国外相差较小，但产业链薄弱，关键原材料对外依存度较大，其中超级电容器用活性炭材料、纤维素隔膜纸主要依赖于日韩企业。限制超级电容器在电力储能领域应用的主要因素是成本较高、能量密度偏低。未来超级电容器将借鉴电池技术，向混合电容方向发展，进一步提升电容器能量密度，弥补其短板。

总体来看，超级电容器储能技术创新技术/创新需求主要围绕国内关键技术进一步突破，产业链进一步完善展开，具体包括纤维素纸隔膜、超级电容器专用活性炭材料国产化，另外超级电容器和电池技术进一步融合的混合电容的开发等。

10. 其它因素影响评估

10.1 安全性因素评估

作为影响未来能源大格局的前沿技术和新兴产业，储能不能忽视安全问题，尤其是对于当前以锂离子电池为主的电池储能技术安全问题突出。截至 2019 年 6 月，仅在韩国，电池储能电站发生火灾事故已经高达 23 起，火灾给快速升温的韩国储能市场泼了一盆冷水，并引起了全球广泛关注。事故发生后韩国对所有已经安装的电池储能系统进行安全检查，强制关闭了 342 个公共事业侧的储能系统，一度使韩国本土电池储能市场处于停滞状态。

在国内，尽管鲜有储能项目着火事故诉诸媒体，但不可否认也出现过不同程度的火灾事故，电池储能尤其是锂离子电池储能安全问题一直是行业内关注的重点之一。安全已经成为锂离子电池储能产业面临的瓶颈之一。电池储能系统作为一个系统性的产品，安全理应是一个系统工程，包括储能技术本体的选择和设计，以及系统层面从硬件选型到软件控制策略。此外，目前我国关于电池储能系统安全规范评价体系尚不完善，亟需建立和完善安全评价规范和标准体系。

除此之外，从安全因素考虑，可以支持开发具有较高本体安全性能的储能技术，从根本上降低或解决储能系统安全问题，如开发钠离子电池技术、液流电池、水系电池以及先进的物理储能技术等。

10.2 原材料可获得性与成本

随着消费电子产品需求不断增长，电动汽车的普及以及可再生能源规模的不断增长，锂离子电池的需求预计将快速增加。中国是全球最重要的锂离子电池产品生产地，同时也是锂离子电池研究最为活跃的地区之一。快速上涨的市场需求将为中国锂离子电池生产整个供应链带来极大的压力。

锂离子电池的原材料，主要包含锂原料、钴、镍、铜等稀有金属矿产资源，各种资源在全球分布见下图¹⁸。其中锂资源的供应地点，主要包括是我国青海、西藏、江西以及澳大利亚、智利等地；镍资源主要来源于东南亚地区；金属钴对锂离子电池供应的威胁最大，其产地主要来源于刚果（金），据统计 2019 年刚果（金）钴原料产量约占全球产量的 67%。

我国锂离子电池产业链原材料对外依赖程度较高，其中国内用于电力储能市场的主要为磷酸铁锂电池，锂资源是该类锂离子电池主要限制因素，根据分析认为我们国内锂资源虽然长远来看并不缺乏，但短期内开发成本较高，对外依存度较高¹⁹。因此，降低本土锂资源开采成本具有十分重要的意义，目前也面临较大的技术挑战。如果整体原材料供应不存在问题，锂离子电池在未来仍然有较大幅度的成本下降空间，根据《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》未来国内能量型动力电池成本将下降至 0.35 元/KWh，在新一轮电动汽车高速发展的情况下，未来储能电池成本也将快速下降，将远低于目前成本。

¹⁸ 中国电动汽车百人会，2018。锂电池产业发展报告。

¹⁹ 郑人瑞，唐金荣，周平，杨利亚。我国锂资源供应风险评估[J]。中国矿业, 2016, 25(12): 30-37。

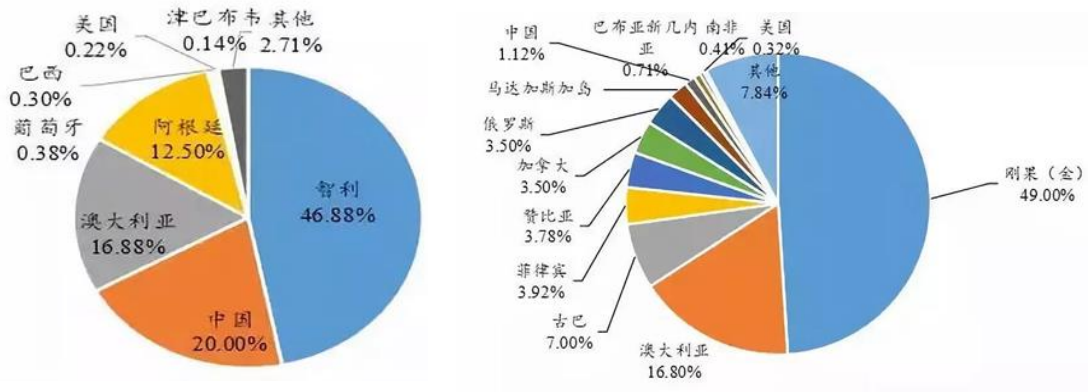


图 22 全球锂、钴资源分布 (左图: 锂资源分布; 右图: 钴资源分布)

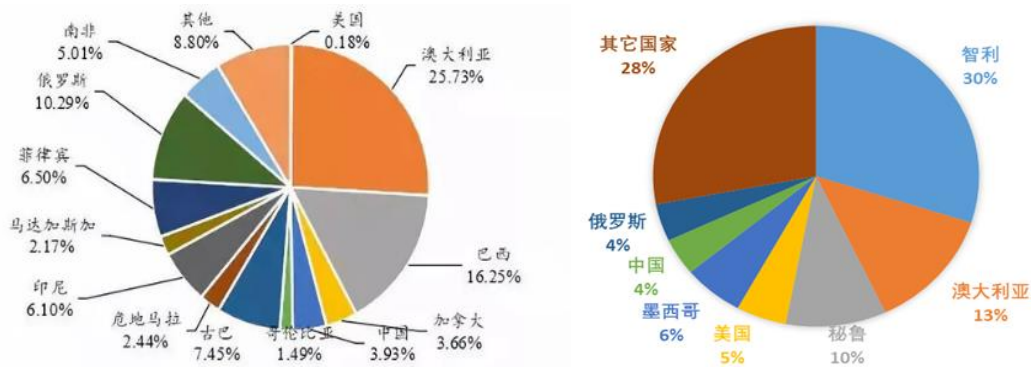


图 23 全球镍、铜资源分布 (左图: 镍资源分布; 右图: 铜资源分布)

对于其它储能技术包括铅碳电池、钠硫电池、钠离子电池、全钒液流电池、压缩空气储能技术、超级电容器以及飞轮储能技术,理论上不存在资源限制。部分储能技术所需原材料一定程度上依赖进口,主要包括铅碳电池和超级电容器用高性能活性炭材料、钠硫电池用高性能氧化铝陶瓷管技术以及碳毡、全钒液流电池用全氟磺酸树脂膜等。除铅碳电池外,这些储能技术目前成本较高,但本身资源不受限制未来随着储能市场规模以及应用场景的不断出现未来成本下降空间巨大。

11. 技术优选和政策建议

11.1 技术优选建议

本项目基于英国低碳技术创新需求评估方法学，结合针对中国储能行业的文献调研及专家访谈，对不同储能技术的创新价值、经济价值、市场障碍以及安全和原材料可获得性等因素进行了分析评估，希望对未来中国储能技术创新方向提供参考与借鉴。

表 16 不同储能技术模型及专家评价结果

类别	技术	市场发展阶段	创新价值 (十亿元)	经济价值 (十亿元)	技术障碍	安全性/原料可获得性	创新需求	优选等级
电化学储能	锂离子电池	市场成长II期	104.6 (46.1 - 147.6)	31.6 (18.6 - 38.4)	低	中/中	高	1
	钒液流电池	市场成长I期-- 市场成长II期	35.8 (14.7 - 53.5)	1.1 (0.7 - 1.3)	中	高/高	高	2
	铅碳电池	市场成长II期	10.5 (4.1 - 14.4)	5.9 (3.1 - 7.3)	低	高/高	中	4
	钠硫电池	市场孕育期-- 市场成长I期	0.20 (0.08 - 0.34)	0.01 (0.00 - 0.01)	高	中/高	高	4
物理储能	压缩空气储能	成长I期	20.3 (8.2 - 31.6)	0.5 (0.3 - 0.6)	低	高/高	高	2
	飞轮储能	市场孕育期-- 市场成长I期	1.05 (0.36 - 1.69)	0.0 (0.0 - 0.1)	低	高/高	高	3
	超级电容器	市场成长I期	0.81 (0.32 - 1.23)	0.0 (0.0 - 0.0)	中	高/中	高	3
总计		173.2 (73.8 - 250.4)	39.2 (22.8 - 47.7)	--	--	--		

通过前文分析评估得到的结论，即中国储能技术的重点创新和发展方向应该重点注电化学储能技术中的锂离子电池、全钒液流电池以及物理储能技术中的压缩空气储能技术。从应用角度来讲，对于现有的储能技术（锂离子电池、钠离子电池、铅碳电池、全钒液流电池、压缩空气储能、钠硫电池、飞轮储能、超级电容器等），一方面还没有一种储能方案能够解决所有应用需求；另一方面部分储能技术存在资源限制，或技术突破难度较大。在选择储能技术路线时，除了考虑投资成本、运行维护费用、经济价值等经济因素以及安全和环境因素外，必须衡量的技术指标包括能量密度、功率密度、响应时间、充放电效率、使用寿命以及与之相匹配的应用场景。

具体而言，铅碳电池因具有更高的安全性和更低的成本优势，一直是电能存储领域的主流技术，在数据中心、偏远地区应急供电、用户侧等领域得到广泛应用。而锂电池具有能量密度高、循环寿命长、自放电率小、无记忆效应和绿色环保等优点，在通信基站、用户侧、电网侧、发电侧等领域替代铅酸电池的趋势日益明显，市场规模逐渐增大，被认为是最具市场前景的储能技术。液流电池、钠硫电池、压缩空气储能技术被认为是大规模长时间储能技术，主要应用于大规模电能存储，实现调峰、备用等。另外，飞轮储能和超级电容器作为功率型储能器件主要应用于电网调频或与能量型储能技术形成混合储能实现系统高功率放电并延长系统整体使用寿命。在小倍率应用场景方面铅碳电池因成本较低具有优势，大倍率应用场景方面锂电池比较有优势，不同的储能应用场景和需求，决定了电池选型及技术种类。

因此除锂离子电池、全钒液流电池以及压缩空气储能外，同时以超级电容器、飞轮储能为代表的功率型储能器件以及一些具有创新价值的储能技术如钠离子电池等也同样值得关注。

表 17 储能场景对技术需求分析²⁰

序号	应用	规模/MW	释能(时间)	循环次数	响应时间
1	季节储能	500-2000	30-180d	(1-5)/a	1d
2	峰谷电价获利	100-2000	8-24h	(0.25-1)/d	1h
3	调频	1-2000	1-15min	(20-40)/d	小于 1min
4	负荷跟踪、爬坡控制	1-2000	15min-1d	(1-29)/d	小于 15min
5	电压支撑	1-40	1-60s	(10-100)/d	1ms-1s
6	黑启动	0.1-400	1-4h	1/a	小于 1h
7	缓解输配网电力堵塞	10-500	2-4h	(0.14-1.25)/d	大于 1h
8	延缓电力建设	1-500	2-5h	(0.75-1.5)/d	大于 1h
9	削峰填谷	0.001-1	1min-8h	(1-2)/d	小于 15min
10	离网系统	0.001-0.01	3-5h	(0.75-1.5)/d	小于 1h
11	可再生能源发电	1-400	1min-8h	(0.5-2)/d	小于 15min

11.2 储能技术创新机会建议

通过学术文献调研和专家访谈梳理了不同储能技术的具体创新机会和创新需求，主要总结如下表所示：

²⁰ 荆平，徐桂芝，赵波，杨岑玉，王乐，金翼，肖宇。面向全球能源互联网的大容量储能技术[J]。智能电网，2015，3(6): 486-492。

表 18 不同储能技术创新需求

技术分类	创新机会/创新需求
锂离子电池	系统由小规模向大规模发展，开发大规模高安全的锂电集成技术
	提高电池及系统可靠性（高效率，高安全、长寿命），如高安全的固态锂离子电池的开发
	加快锂电储能系统部件选型标准的确定
钠离子电池	加快低成本钠离子电池正、负极材料的产业化，如，不含贵金属或稀有金属的正极材料，以及低成本的碳材料
	关键性能指标的提升，如倍率性能、循环性能
铅碳电池	提高铅碳电池的寿命（单体寿命大于 1 万次，系统寿命 4000 次以上）及性能（荷电放电深度从目前的 40%-60%提升到 40%-80%）
	通过优化电池结构、碳材料技术的进步等，提高铅碳电池的倍率性能
	提高生产制造自动化及智能化水平
	提高铅回收技术
全钒液流电池	批量化生产电极等关键材料，提高膜的寿命，提升电堆的功率密度
	提升液流电池的装备制造水平，规模化生产以推动价格降低
	开发低成本的、新的液流电池化学体系
	加强液流电池系统集成技术的研究，开发与之配套的 PCS，提升系统效率
压缩空气储能	提升整个系统的能量转换效率
	大于 100MW 级压缩空气储能系统的总体设计、部件设计、系统集成等技术的突破，推动系统模块化和标准化
钠硫电池	β -Al ₂ O ₃ 陶瓷管生产技术的突破，高性能碳毡材料的性能突破及批量化生产
	进一步突破钠硫电池的研发制造技术
	构建国内完整产业链，如石墨毡等等
飞轮储能	高速飞轮转子材料的突破，如碳纤维；加速高性能轴承及高速电机的开发，降低自放电，提高能量密度；加快变流系统的研发
	加快大容量低成本飞轮单体的开发
	提高飞轮阵列的应用设计与集成
超级电容器	隔膜及活性炭的大规模及国产化生产
	高能量密度混合电容关键技术的开发与突破

11.3 加速储能技术创新的政策建议

第一，制定储能长期发展战略，明确储能在电力系统中的作用及价值，出台保障储能产业发展政策。尽管当前新能源侧储能发展如火如荼，带动储能市场艰难发展，但储能几乎沦为电网和发电集团之间的“零和博弈”的工具，本身并没有商业模式可言。储能除了可以平滑可再生能源上网，还有调峰调频、黑

启动、备用等多重功效，如果只是将其作为新能源并网的工具，将给产业带来较大的风险。电力储能作为一个新兴产业其重要意义已经达成广泛共识，但目前对于整个电网或者是电力系统而言，储能究竟扮演一个什么样的角色，其价值和商业模式需要政府部门进一步认定和理顺，政府部门应该建立完善的支持储能发展的政策和价格机制并加强监管，保障储能产业持续健康发展。同时国家层面应该积极探索推动将储能纳入国家“十四五”相关规划和能源领域中长期发展战略的可能性，明确储能行业发展目标、重点任务及实施路径，科学指导储能产业健康有序发展。

第二，政府部门制定储能技术发展路线，针对当前热点及前沿技术给与重点支持，突破关键技术的研发，鼓励储能技术创新；另外通过政策引导为较为成熟的储能技术提供市场空间。建议政府部门制定技术发展路线，加强先进储能技术基础研发的投入，并超前于需求开展基础研究，切实鼓励技术创新，掌握自主知识产权，如对钠离子电池、固态锂离子电池等前沿储能技术关键材料给与重点支持。应将大规模储能技术研究及其产业化应用列入国家科技重大专项，如液流电池、压缩空气等储能技术。通过国家重点研发支持计划等支持方式突破储能技术关键材料国产化，如液流电池膜材料、钠硫电池碳毡、铅碳电池及超级电容器高性能活性碳、钠硫电池氧化铝高性能陶瓷管等技术的突破，完善国内储能技术产业链；政府通过电价政策、现货市场等市场调节等手段，为锂离子电池、全钒液流电池、铅碳电池、压缩空气储能技术、超级电容器、飞轮储能技术等较为成熟的储能技术提供一定的市场空间，对现有储能技术进行应用验证，推动这些技术应用，并给与项目补贴，提高项目当前运行的经济性等。

第三，加强校企、院企共建实验平台的建设，推进储能关键技术国产化发展、促进创新型储能技术产业化发展。高等院校、科研院所等单位作为国内创新主体，尤其在储能领域引领全球储能创新发展的趋势；但国内创新技术转化程度较低，缺乏对创新型储能技术长效市场化发展机制。通过建立试验平台，科研单位可与企业建立良好的技术转化平台，通过市场化手段引导技术创新，为企业持续不断的输出创新型储能技术，支持企业发展，提升市场竞争力。

第四，加强储能专业人才培养。储能系统涉及学科众多，与电气、机械、IT、物理、化学等学科相关联，不仅对人才综合素质较高，且由于储能产业链较长，涉及多个环节，对不同层次人才需求量较大。当前储能行业人才结构，不足以支撑储能技术长效创新发展，国内目前已经在高等院校积极的开展储能学科的建设，还应加强储能系统生产制造技术型人才的培养，将储能技术创新机制引入储能产业链各个环节，保障储能技术不断创新发展，实现储能技术长效发展。

此外，完善行业标准规范。提升电力储能相关国家标准、行业标准、团体标准的建设工作力度，尤其要发挥行业组织力量，根据行业需求，积极高效的推进储能安全相关团体标准，规范和引领我国电力储能行业的健康有序发展。**加强储能回收体系建设。**参照电动汽车动力电池回收和再利用管理办法，提前建立储能系统的回收和再利用工作机制，环节原材料供应稀缺性问题，形成产业链闭环。

12. 低碳技术创新政策建议

增加低碳技术创新投入。增加应对气候变化和低碳技术领域研发创新的整体投资。欧盟计划在新一期“地平线欧洲”项目下，在 2021-2027 年投资 1000 亿欧元支持研发和创新，其中 35%将用于气候变化技术创新。此外，增加清洁低碳技术的研发创新投入不仅有助于应对气候变化，也对推动经济增长和复苏有重要作用。

识别重点技术创新领域，优选投入方向。建议科技部牵头，联合生态环境部、发改委、工信部、财政部等涉及低碳技术创新和资金支持政策相关的部门联合成立低碳技术创新协调小组，开展实现“碳中和”的科技研发和创新需求评估，积极推进“碳中和”科技专项，基于碳减排潜力、创新价值、经济社会价值等关键指标，对重点技术创新领域以及关键技术进行优选和排序，作为科研经费分配的参照依据。

采取多元化创新激励和资金投入方式。根据技术的不同发展阶段和成熟度，设计有针对性的创新支持政策和资金扶持方式。

- 针对基础研究，加大财政投入力度，利用国家科技重大专项、国家重点研发计划等直接支持重点技术创新，以政府投入为主，引导企业和金融机构加大支持。
- 针对应用研究以及市场孕育期的技术，一方面通过政府引导基金、奖励基金等提供直接财政支持，另一方面可以通过提供低息贷款、风险投资税收激励等方式引导金融机构加大对创新的支持力度，降低企业创新成本。
- 对于进入市场化推广和商业化阶段的技术，可以通过政策和标准引领，扩大新技术的市场需求，例如提升技术/产品标准、例如健全政府绿色采购政策以及税收抵扣政策。
- 此外，新技术的研发、示范和推广需要良好的市场环境，应营造有利于创新的市场环境，解决技术创新所面临的体制/市场障碍，例如不断完善知识产权保护体系、加快审批流程、健全监管体系等。

加强跨部门协调。加强低碳技术创新的跨部门合作，充分利用和整合不同部门的资源及技术优势，共同识别重点低碳技术创新领域和创新需求，并协调发布并实施相关政策对低碳技术研发、示范、推广和应用进行支持。例如，整合相关绿色低碳技术引导或推广目录，由各相关部委共同发布并进行推广。

激励企业研发投入和产学研协作。鼓励和支持企业开展清洁低碳技术创新，撬动企业对低碳技术创新的研发投入。

鼓励金融投资机构参与低碳技术创新投资。引导银行、私募股权和风险投资（PE/VC）等金融投资机构开展金融创新，为低碳技术创新研发、试点示范、以及商业化应用提供融资支持。

加强国际合作。一方面加强对“卡脖子”技术领域的科研攻关，另一方面也不能泛化“卡脖子”因素，导致重复研发和资金浪费。建议对“卡脖子”风险进行评估（如该项技术是否多个国家拥有、拥有技术国家与中国的合作中断风险等），基于风险高低确认资金投入力度。同时呼吁科技创新的国际合作和“多边主义”，加强国际应对气候变化和低碳领域的技术转移和科技成果共享，减少技术封锁，避免重复研发，将资金投入更需要技术突破的领域。