

未来科技系列报告 (第一期)

2021年03月

新能源技术 研究的机遇 与挑战



中国科学院科技战略咨询研究院
Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences



中国科学院武汉文献情报中心
WUHAN DOCUMENTATION & INFORMATION CENTRE, CAS



中国科学院广州能源研究所
Guangzhou Institute of Energy Conversion Chinese Academy of Sciences

In partnership with
nature research
custom media

DIGITAL
science

相关贡献说明

本报告由中国科学院下属的三家单位和施普林格·自然旗下的自然科研定制化服务团队合作完成。中国科学院科技战略咨询研究院负责系列报告策划、报告整体框架设计及具体内容撰写，提供数据检索策略等；自然科研定制化服务团队负责系列报告设计、部分编辑工作以及出版等；中国科学院武汉文献情报中心负责编制新能源技术分类清单、提供文献检索关键词和专利分类号，并基于 Digital Science 旗下的 Dimensions 数据库的文献计量数据撰写文献分析、产业转化和国家竞争力比较分析内容；中国科学院广州能源研究所组织并综述了专家访谈的观点，支持了对新能源技术发展热点和态势的分析；施普林格·自然的姊妹公司 Digital Science 负责提供全球和中国新能源领域的各类计量数据。

编委会主任：潘教峰

编委会副主任：张凤 郭剑锋

编委成员（按贡献顺序）：陈伟 谭显春 赵黛青 姬强 樊杰 郭楷模 顾佰和 蔡国田 王光辉 漆小玲 岳芳 汤匀 王文军 李岚春 陈稳 黄龙光 王海名 Nature Research Custom Media 相关人员

报告工作人员：曹琪、闫文娟、祁子洸

访谈与评议专家：欧阳明高院士（氢能、电池），李灿院士（太阳能燃料），金红光院士（分布式能源系统、太阳能燃料），陈勇院士（新能源战略、资源循环利用），汪集旻院士（地热能），Joël Ruet 教授（能源战略），Jari Kuusisto 教授（能源战略），姜克隽研究员（能源战略），马隆龙研究员（生物质能），蒋方明研究员（电池储能技术），蔡睿研究员（新能源战略，催化材料），高峰教授（能源互联网），陈皓勇教授（智能电网）等。在此向所有参加报告研究工作的专家表示诚挚的感谢！

摘要

低碳 / 零碳能源转型和现代能源体系重塑是实现联合国可持续发展目标、应对全球气候变化危机以及推动后疫情时代全球经济“绿色复苏”的必然选择。当前，世界主要国家或地区均将发展新能源技术视为引领新一轮能源革命以及科技创新的重要突破口。新能源技术正以前所未有的速度加快迭代。

本研究基于 Digital Science 的 Dimensions 数据库，采用文献计量、专利分析与权威专家访谈相结合的方法，对全球 2000-2019 年间（尤其是 2015-2019 年间）太阳能、风能、生物质能、地热能、核能、氢能、储能、能源互联网等八个不同新能源技术领域整体及其 20 项代表性技术主题进行系统分析，以求客观反映全球新能源技术研究的热点领域、产业转化潜力和未来发展趋势。同时，本研究从全球尺度重点关注了中国新能源技术的发展和特点，并与其他主要国家或地区的研究竞争力进行了比较分析。

研究结果显示：

- 1) 全球新能源领域研究正进入加速发展期，太阳能、储能和氢能三个领域受到全球广泛的关注；
- 2) 中国在新能源研究领域贡献总量较大，头部高质量研究贡献量也较高，但与美国、德国、日本等发达国家相比，中国大部分领域论文篇均被引频次排名相对靠后，研究整体效率仍需提升；
- 3) 全球新能源领域研究成果技术转化率整体较低，产学研结合有待加强。相对而言，储能、生物质能和太阳能的研究成果转化率相对较高，锂离子电池和有机太阳能电池是科研界和产业界共同关注的技术热点；
- 4) 定性分析显示，储能技术的快速进步将成为可再生能源电力和电动汽车大规模发展的有力支撑，氢能将是打造未来能源体系、实现能源变革的重要媒介，太阳能燃料技术的突破及其成本降低或将摆脱对化石燃料的依赖，而能源互联网将发挥“互联网+”智慧能源双重优势，实现能源统筹优化配置。

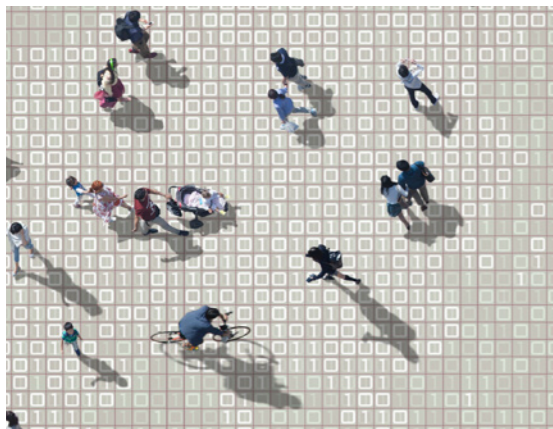
目录



第二章 08

新能源研究进展文献分析

2.1 全球发展态势分析	09
2.2 中国发展态势分析	12
2.3 有前景技术主题识别	16
2.4 本章小结	17



摘要 01

第一章 04

引言

1.1 背景意义	04
1.2 数据与数据	05
1.3 主要结论	06
1.4 报告结构	07



第三章 18

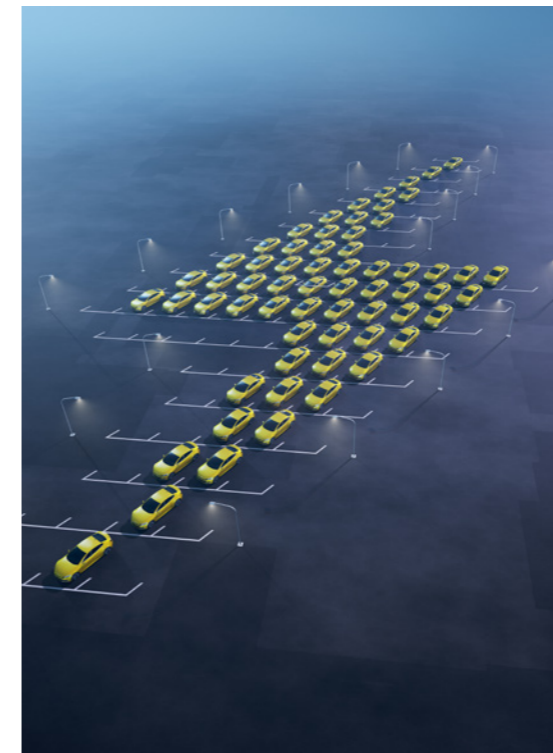
新能源技术的产业转化分析

3.1 新能源研究的专利引用分析	20
3.2 产研共同关注的新能源技术热点	22
3.3 本章小结	25

第四章 26

新能源科研产出国家比较分析

4.1 不同技术领域国家对比分析	27
4.2 不同技术领域国家整体对比	32
4.3 本章小结	33



第五章 34

重点研究领域访谈分析

5.1 储能技术的快速进步成为可再生能源电力和电动汽车大规模发展的有力支撑	35
5.2 全球关注度最高的氢能是未来能源体系的重要组成部分	36
5.3 太阳能燃料为排名前位的技术主题研究热点	37
5.4 能源互联网融合了智慧能源、大数据及物联网等跨界新技术	38
5.5 本章小结	39

第六章 40

结论与启示

附录 42



第1章 引言

1.1 背景意义

能源清洁低碳转型是实现联合国可持续发展目标、应对全球气候变化危机的最重要途径之一。目前，全球共有120多个国家和地区已经或准备提出碳中和目标承诺¹。为实现全社会经济体系的净零排放，能源生产、运输、存储、消费方式需要进行根本性变革。推进绿色低碳技术创新、发展以新能源和可再生能源为主的现代能源体系已成为国际社会共识，具体包括太阳能、风能、生物质能、地热能等可再生能源，以及先进核能、氢能、储能和能源互联网等新型能源系统技术。

随着新一轮低碳技术革命孕育兴起，新能源技术正以前所未有的速度加快迭代，可再生能源发电、先进储能技术、氢能技术、能源互联网等具有重大产业变革前景的颠覆性技术应运而生。新能源技术的

进步将深刻改变能源发展前景和世界能源格局。其中，风能、太阳能等技术在各国的迅猛发展证明新能源技术具有变革能源结构、降低排放总量的巨大潜力和现实可行性。

世界主要国家和地区对新能源的认识各有侧重，正基于其能源资源禀赋特点，从国家能源战略的高度分别制定各种新能源技术发展规划，采取行动加快新能源科技创新，以增强国际竞争力。尤其当前新冠疫情对全球经济造成巨大冲击，新能源技术和产业发展将成为后疫情时代各国经济“绿色复苏”的重要组成部分。

本报告从2000年到2019年近20年的时间尺度出发，对全球及中国新能源技术研究的进展和趋势进行科学分析，放眼全球，立足中国，旨在揭示中国新能源技术研究的优势与不足，提出未来产业界和学术界共同关注的新能源领域热点技术，为全球和中国新能源技术的研发和部署提供科学依据。

1.2 方法与数据

本报告遵循“收集数据—揭示信息—综合研判—形成方案”的研究思路和路线，文献调研和专家咨询并重，选择太阳能、风能、生物质能、地热能、核能、氢能、储能、能源互联网八个不同新能源技术领域及其20项技术主题（附录表1.1）作为分析对象。基于Digital Science的Dimensions数据库的文献计量和专利分析数据，定量分析新能源领域的研究现状、研究热点、发展趋势、产业转化潜力、技术关注度等。同时，以线上和线下相结合的方式，对国内外不同能源技术领域的资深专家学者进行深度

访谈，从领域专家视角提出新能源技术国内外发展态势、关键科学和技术问题、发展预期和政策研判。最后经课题组综合研判，形成报告结论。

本报告重点关注2015-2019年新能源技术研究进展，利用关键词检索的方式，获取全球不同新能源技术领域共388416篇文献，并对2000-2014年的新能源技术研究进行回溯，以满足从长时间尺度对技术发展趋势进行分析。本研究从全球数据切入，着重关注中国新能源技术的研究特点，通过分析技术发展趋势以及中国与主要国家/地区的对比，提出全球和中国未来新能源领域应重点关注的技术趋势和建议。



© AAAA IMAGES/GETTY IMAGES

1.3 主要结论

1. 全球新能源技术研究正进入加速发展期，太阳能、储能和氢能三个领域受到更广泛的关注，电池储能技术、太阳能光伏技术、太阳能燃料技术、制氢技术、能源互联网架构和核心装备技术是全球前五位最具发展前景的技术主题。
2. 中国在新能源领域具有较强的研究活跃度，近五年发文量在全球占比超过 1/4，且各技术领域的影响力均高于全球平均水平，并在太阳能和氢能领域表现尤为突出。与美国、德国、日本等发达国家相比，中国在大部分领域论文篇均被引频次排名仍相对靠后，研究成果整体影响力有待进一步提升。

3. 全球新能源研究成果转化率整体偏低，产学研结合有待加强。相对而言，储能、生物质能和太阳能的研究成果转化率相对较高，锂离子电池和有机太阳能电池是学术界和产业界共同关注的技术热点。
4. 重点技术领域专家访谈认为，储能技术的快速进步将成为可再生能源电力和电动汽车大规模发展的有力支撑；氢能将是打造未来能源体系、实现能源变革的重要媒介；太阳能燃料技术的突破及其成本降低或将有利于摆脱对化石燃料的依赖；能源互联网将发挥“互联网+”和智慧能源双重优势，实现能源统筹优化配置。



© XINZHENG/GETTY IMAGES

1.4 报告结构

本报告共分六章。第一章是引言；第二章对国内外新能源研究文献进行计量分析，通过逐年科研产出变化趋势，总结新能源技术发展规律；第三章关注新能源技术的产业转化与应用，主要利用专利数据，分析科研产出与专利间的转化，识别市场关注度和转化度普遍较高的新能源技术；第四章基于文献计量数据，分析主要国家在新能源领域的研究竞争力，探寻各国新能源发展规律和相对技术优势；第五章根据媒体对新能源不同领域论文的关注度和定量分析结果，选取新能源热点技术，开展专家访谈，分析其发展态势和机遇挑战；第六章是结论与启示，主要预判新能源技术发展前景，并结合可持续发展目标的实现给出简要政策建议。

注 1: 数据来源: <https://eciu.net/netzerotracker>

第 2 章

新能源研究 进展文献分析

鉴于科研论文能够从一定程度上反映科学研究的客观事实，本章利用文献计量分析方法，通过对 Dimensions 数据库收录的 2000-2019 年新能源领域学术论文进行分析，以期从文献计量角度揭示新能源研发现状、特征和发展趋势。



© SUTTHIPONG KONGTRAKOOL/GETTY IMAGES

2.1 全球发展态势分析

本研究以五年为一个时间窗口，统计了全球 2000-2019 年新能源领域的发文情况（表 2.1）。研究发现，新能源技术正处于加速发展期，2015-2019 年间除核能外的 7 个技术领域发文量均超过近 20 年总量的 40%，其中 5 个领域超过一半以上。从发文体量来看，太阳能、氢能、能源互联网、储能 4 个领域 20 年间发文量均超过 10 万篇。从发文增速来看，生物质能是发文量增速最快的技术领域，四个五年期平均复合增长率（CAGR 值）² 达到 236.3%，风能 CAGR 值达到 212.8%。此外，储能和太阳能两个体量较大领域发文量的 CAGR 值也都超过了 100%，反映出这两个领域在较长时间尺度上受到科研界持续、广泛关注。

进一步聚焦 2015-2019 年发文情况发现，全球对新能源的关注度持续升温（图 2.1），五年期间在新能源领域共发表了 388,416 篇论文，从 2015 年的 65,381 篇增长到 2019 年的 95,474 篇，年均复合增长率达到 9.9%。其中，太阳能技术领域发文量超过 10 万篇；储能、氢能和能源互联网领域发文量也均超过 5 万篇。从增速来看，在发文量超过 1 万篇的技术领域中，过去五年年均发文量增长最快的是储能领域，CAGR 值高达 15.9%，而氢能和能源互联网领域的 CAGR 值也均超过 10%。

注 2:

$$CAGR(t_0,t_n) = \left(\frac{V(t_n)}{V(t_0)} \right)^{\frac{1}{n-t_0}} - 1$$

其中 t_0 指初始期，此段落为 2000-2004 年第一个五年期； t_n 是结束期，此段落为 2015-2019 年第四个五年期； $V(t_0)$ 是 2000-2004 年论文发文量， $V(t_n)$ 是 2015-2019 年论文发文量。本报告的 CAGR 值均按照上述公式进行核算。

表 2.1

2000-2019 年全球新能源研究各技术领域发文量及增长情况

技术领域	2000-2019 合计	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015-2019	2015-2019 年占比 (%)	四个五年期平均复合增长率 (%)
● 太阳能	185,996	7,194	16,400	59,379	103,023	55.4	142.8
● 氢能	173,937	12,923	33,463	52,736	74,815	43.0	79.6
● 能源互联网	131,716	9,807	17,279	40,232	64,398	48.9	87.5
● 储能	125,017	4,110	8,796	31,578	80,533	64.4	169.6
● 核能	94,668	12,140	17,721	29,317	35,490	37.5	43.0
● 生物质能	77,963	1,067	7,684	28,615	40,597	52.1	236.3
● 风能	8,721	168	636	2,777	5,140	58.9	212.8
● 地热能	4,009	383	528	1,084	2,014	50.2	73.9

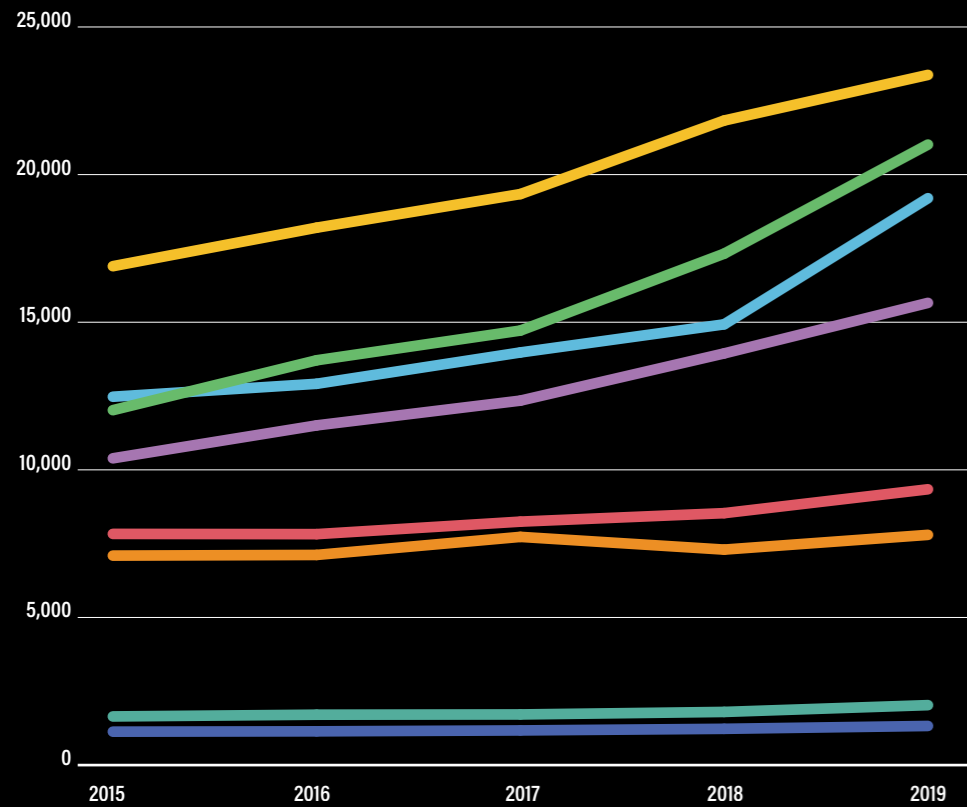


图 2.1

2015-2019 年全球新能源研究各技术领域发文量及增长情况

技术领域	合计
太阳能	103,023
储能	80,533
氢能	74,815
能源互联网	64,398
生物质能	40,597
核能	35,490
风能	5,140
地热能	2,014

中国对全球新能源领域的研究贡献正在逐步扩大。本报告统计近五年除中国外的全球新能源领域发文量（表 2.2）发现，扣除中国论文数量后全球新能源领域发文总量、单个技术领域发文量和年均复合增长率都出现了明显降低，表明中国在全球新能源研究中发挥着举足轻重的作用。

统计被引频次最高的前 10 篇论文可以揭示全球不同新能源技术领域关注和聚焦的研究方向（附录表 1.2）：

- 生物质能研究主要关注木质素热解、催化剂、预处理、微藻生物燃料、生物精炼等方向；
- 储能研究主要聚焦锂离子电池、钠离子电池、锂硫电池、正负极材料、快充技术等方向；
- 地热能研究热点方向包括增强型地热系统（EGS）、地热系统数值模拟、地热钻井技术等；
- 氢能研究主要关注非贵金属催化剂、金属有机框架材料、钴基催化剂、双功能催化剂等领域；
- 核能研究主要的关注点包括核废料处理技术、核电站安全技术、耐辐照材料、磁约束核聚变、惯性约束核聚变等；
- 太阳能研究重点关注方向包括钙钛矿太阳能电池、叠层太阳能电池、太阳能光催化制氢、催化剂、半导体电极等；
- 能源互联网研究重点关注智慧能源系统、大数据、智慧家居能源管理系统、需求响应等方向；
- 风能研究的主要热点方向包括高功率能量转换器、风力涡轮机、风电数值模拟、风电高比例稳定并网等。

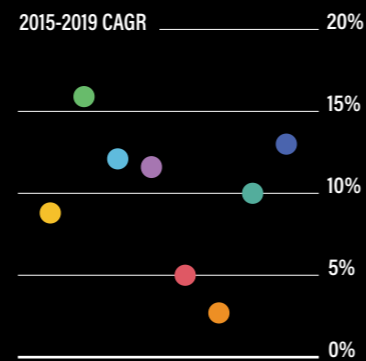


表 2.2

2015-2019 年全球（除中国外）新能源研究各技术领域发文量及增长情况

技术领域	合计	2015	2016	2017	2018	2019	2015-2019 CAGR (%)
太阳能	84,529	14,689	15,806	16,482	18,256	19,296	7.1
氢能	58,489	10,449	10,600	11,063	11,380	14,997	9.5
能源互联网	55,100	9,206	10,069	10,685	11,934	13,206	9.4
储能	52,617	8,260	9,691	9,916	11,242	13,508	13.1
生物质能	37,285	6,988	6,938	7,364	7,633	8,362	4.6
核能	31,487	6,246	6,144	6,496	6,008	6,593	1.4
风能	4,706	845	894	887	939	1,141	7.8
地热能	1,747	303	311	330	359	444	10.0
合计³	313,207	55,032	58,247	60,748	64,991	74,169	7.7

注 3：由于一篇论文可能会涉及多个技术领域，因此新能源领域发文量合计值会小于各技术领域相加之和。

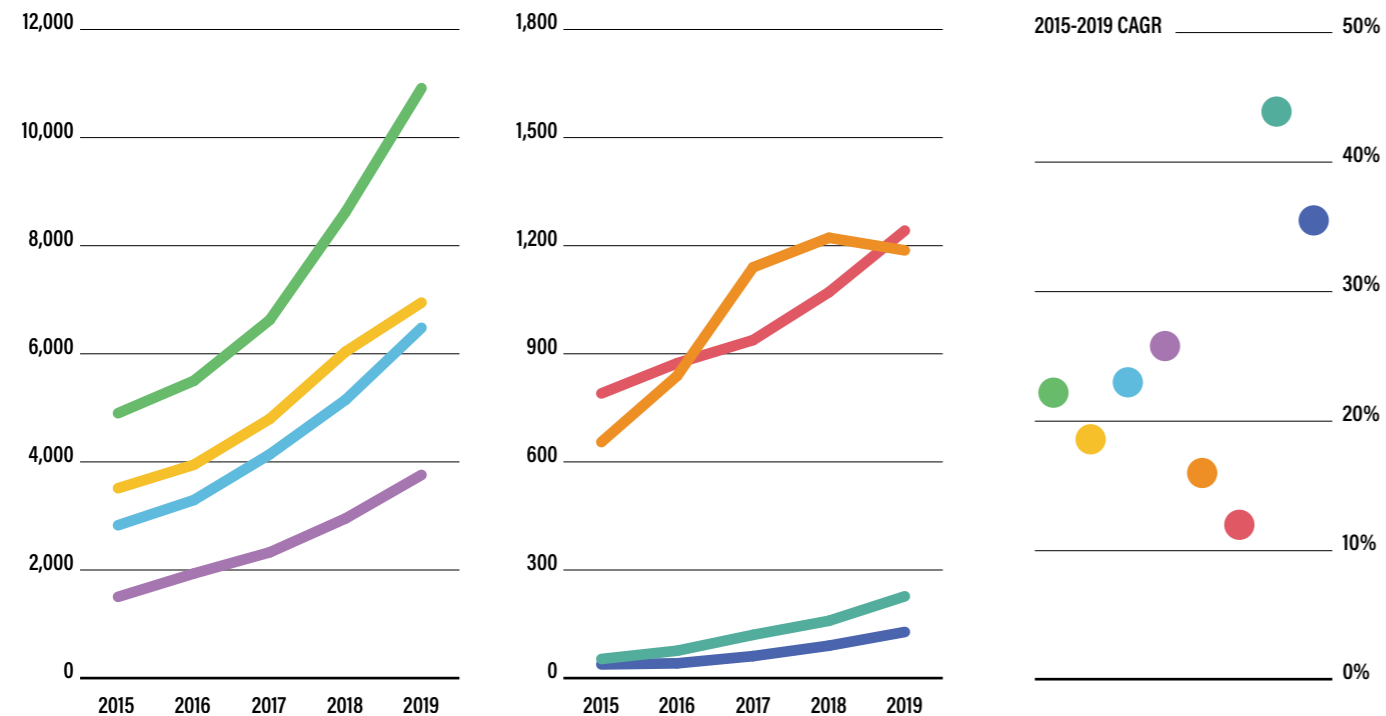
2.2 中国发展态势分析

2.2.1 研究活跃度分析

2015-2019年，中国在新能源领域共发表了100,528篇学术论文，占同期全球发文总量近四分之一。其中，储能是新能源研究中最高产的技术领域，发文量达36,569篇；其次是太阳能，发文量为25,244篇；排名第三是氢能，发文量为21,892篇。从增长速度来看，在发文量超过5,000篇的技术领域中，过去五年能源互联网领域发文量增长最快，年均复合增长率（CAGR）超过25%；氢能和储能研究的CAGR值也均超过了20%（图2.2）。通过分析各技术领域发文量年度发展趋势发现，由于发文量基数较小，风能和地热能的年均增速更快；而核能和生物质能两个领域增长相对较慢。

图 2.2

2015-2019年中国新能源研究各技术领域发文量及增长情况



从不同技术领域中国新能源研究发文量⁴在全球的占比情况来看（表2.3），中国发文量占比均超过10%。其中，储能领域占比最高，接近全球总量的一半（45.4%），反映出中国的储能技术研究达到了相当高的活跃度；氢能（29.3%）和太阳能（24.5%）领域发文量在全球占比均超过20%；能源互联网领域发文量占比接近20%；而地热能、核能等其余4个领域发文量在全球占比相对较低。

注4：论文作者中至少有一位隶属于中国机构的论文统计为中国发表的论文。

表 2.3

2015-2019年中国新能源研究各技术领域发文量在全球占比情况

技术领域	中国	全球	中国在全球的占比 (%)
储能	36,569	80,533	45.4
氢能	21,892	74,815	29.3
太阳能	25,244	103,023	24.5
能源互联网	12,478	64,398	19.4
地热能	358	2,014	17.8
核能	5,043	35,490	14.2
风能	635	5,140	12.4
生物质能	4,915	40,597	12.1



技术领域	中国发文量	中国篇均被引频次	全球发文量	全球篇均被引频次	RACR (%)
太阳能	25,244	20.8	103,023	13.0	1.6
氢能	21,892	17.9	74,815	11.7	1.5
生物质能	4,915	14.6	40,597	10.5	1.4
地热能	358	9.0	2,014	7.0	1.3
储能	36,569	20.5	80,533	17.3	1.2
能源互联网	12,478	8.4	64,398	7.2	1.2
核能	5,043	4.3	35,490	3.7	1.2
风能	635	5.8	5,140	5.5	1.0

2.2.2 研究影响力分析

从中国新能源研究各技术领域论文的篇均被引频次来看（表 2.4）：太阳能领域表现最优，篇均被引频次高达 20.8 次；储能领域表现次之，篇均被引频次为 20.5 次；氢能和生物质能领域的影响力也较高，篇均被引频次分别为 17.9 次和 14.6 次；其余领域篇均被引频次均低于 10 次。进一步分析中国新能源研究各技术领域的“论文相对篇均被引率（RACR）⁵”发现，八个技术领域的 RACR 值均大于 1，说明中国在新能源研究各个领域的论文影响力均高于全球平均水平。其中，中国在太阳能领域的研究影响力表现最好，RACR 值为 1.6；氢能领域研究影响力表现次之，RACR 值为 1.5。相比于新能源研究其他领域，中国太阳能和氢能领域的研究在全球影响力相对较高。

注 5：论文相对篇均被引率（RACR）即将中国论文篇均被引频次除以全球论文篇均被引频次，反映中国论文相对于全球平均水平的影响力。

表 2.4

2015-2019 年中国新能源研究各技术领域论文篇均被引频次和相对篇均被引率情况

技术领域	发文量	入选全球 TOP10% 优质论文数量	入选全球 TOP10% 优质论文占比 (%)
太阳能	25,244	4,437	17.6
氢能	21,892	3,762	17.2
生物质能	4,915	744	15.1
储能	36,569	4,860	13.3
能源互联网	12,478	1,518	12.2
地热能	358	43	12.0
核能	5,043	559	11.1
风能	635	68	10.7

对比中国新能源研究不同领域入选全球 TOP 10% 优质论文⁶的情况发现（表 2.5），储能和太阳能领域表现最好，入选全球 TOP 10% 优质论文数分别为 4,860 篇和 4,437 篇。从中国入选论文的占比来看，各个领域均超过了全球平均水平，其中太阳能领域表现优异，中国该领域 17.6% 的文献入选全球 TOP 10% 优质论文。此外，中国在氢能、生物质能领域入选全球 TOP 10% 的优质论文占比也较高，分别占相应领域发文总量的 17.2% 和 15.1%。

注 6：TOP 10% 优质论文是指被引频次排名前 10% 的文献。

表 2.5

中国新能源研究各技术领域入选全球 TOP10% 优质论文数量及占比情况

围绕 8 个技术领域 20 项技术主题，分析中国入选全球 TOP 1% 顶尖论文⁷的情况来看（表 2.6），中国在 14 项技术主题中有论文入选全球 TOP 1%。其中，8 项技术主题顶尖论文数量占比超过了全球平均水平，分别为：太阳能燃料技术、制氢技术、电池储能技术、太阳能光伏技术、能源互联网系统集成基础技术、生物质发电技术、燃料电池技术以及能源互联网管理技术。

注 7：TOP 1% 顶尖论文是指被引频次排名前 1% 的文献。

表 2.6

中国新能源研究 14 项技术主题入选全球 TOP 1% 顶尖论文数量及占比情况

技术领域	技术主题	发文量	入选全球 TOP1% 顶尖论文数量	入选全球 TOP1% 顶尖论文占比 (%)
太阳能	太阳能燃料技术	7,167	325	4.5
氢能	制氢技术	11,583	363	3.1
储能	电池储能技术	36,569	835	2.3
太阳能	太阳能光伏技术	17,731	391	2.2
能源互联网	能源互联网系统集成基础技术	138	3	2.2
生物质能	生物质发电技术	323	5	1.5
氢能	燃料电池技术	8,971	114	1.3
能源互联网	能源互联网管理技术	2,599	26	1.0
生物质能	生物燃料技术	4,603	29	0.6
能源互联网	能源互联网架构和核心装备技术	10,164	51	0.5
氢能	储氢技术	1,732	9	0.5
太阳能	太阳能热发电技术	563	3	0.5
核能	核裂变能技术	2,965	3	0.1
核能	核聚变能技术	2,084	2	0.1

2.3 有前景技术主题识别

从文献计量角度来看，未来最具发展前景的技术主题通常表现出一定的论文体量和较高的发文增速，且有一定规模文献能够入选全球 TOP 1% 顶尖论文。本报告综合评估 2015-2019 年新能源 8 个技术领域 20 项技术主题在发文量 (P_i)、年均复合增长率 (G_i) 以及入选全球新能源 TOP 1% 顶尖论文数量 (T_i) 三项计量指标上的表现⁸，初步识别排名前 5 位最具发展前景的技术主题 (表 2.7)。它们分别为：电池储能技术、太阳能光伏技术、太阳能燃料技术、制氢技术、以及能源互联网架构和核心装备技术，主要集中在储能、太阳能、氢能和能源互联网领域。

注 8：综合表现得分计算公式

$$\text{Score}_i = \frac{P_i - \min\{P_j\}}{\max\{P_j\} - \min\{P_j\}} \times \frac{1}{3} + \frac{G_i - \min\{G_j\}}{\max\{G_j\} - \min\{G_j\}} \times \frac{1}{3} + \frac{T_i - \min\{T_j\}}{\max\{T_j\} - \min\{T_j\}} \times \frac{1}{3}$$

表 2.7

2015-2019 年全球新能源研究 20 项技术主题在发文量、增长率和头部高质量研究上的综合表现

技术领域	技术主题	2015	2016	2017	2018	2019	发文量合计	年均复合增长率 (%)	TOP1% 顶尖论文数量	综合表现得分
储能	电池储能技术	12,074	13,897	14,992	17,792	21,778	80,533	12.5	1,482	0.9
太阳能	太阳能光伏技术	15,082	15,911	16,610	18,358	19,274	85,235	5	991	0.7
太阳能	太阳能燃料技术	1,743	2,302	2,718	3,562	4,290	14,615	19.7	533	0.6
氢能	制氢技术	3,785	4,410	5,062	6,112	7,538	26,907	14.8	608	0.5
能源互联网	能源互联网架构和核心装备技术	8,256	9,104	9,534	10,595	11,697	49,186	7.2	200	0.4
氢能	燃料电池技术	7,803	7,621	8,146	8,011	11,278	42,859	7.6	262	0.4
能源互联网	能源互联网管理技术	2,312	2,638	3,129	3,856	4,650	16,585	15	105	0.3
能源互联网	能源互联网系统集成基础技术	185	228	271	371	414	1,469	17.5	15	0.3
生物质能	生物燃料技术	7,236	7,239	7,689	7,971	8,725	38,860	3.8	203	0.3
地热能	干热岩技术	205	236	236	274	387	1,338	13.6	3	0.2
核能	核裂变能技术	4,122	4,214	4,825	4,717	5,116	22,994	4.4	21	0.2
风能	陆上风能技术	67	71	77	99	108	422	10	1	0.2
地热能	水热型地热技术	223	211	260	284	347	1,325	9.2	1	0.2
太阳能	太阳能热发电技术	627	670	796	901	930	3,924	8.2	19	0.2
风能	海上风能技术	839	892	898	976	1,220	4,825	7.8	6	0.2
生物质能	生物质发电技术	335	329	346	367	488	1,865	7.8	14	0.2
氢能	输运氢技术	237	276	289	314	341	1,457	7.5	2	0.1
能源互联网	能源与信息深度融合技术	94	100	114	143	127	578	6.2	6	0.1
氢能	储氢技术	1,217	1,272	1,243	1,382	1,471	6,585	3.9	32	0.1
核能	核聚变能技术	2,659	2,590	2,643	2,290	2,422	12,604	-1.8	13	0.1

2.4 本章小结

本章利用文献计量方法对全球和中国新能源领域科研论文的发文情况进行分析，揭示新能源领域科学研究发展态势：

(1) 通过研究活跃度分析发现，全球新能源技术正处于加速发展期，科研界对新能源的关注度持续升温，除核能外的 7 个领域最近五年 (2015-2019 年) 发文量均超过近 20 年总量的 40%，其中太阳能、储能和氢能领域发文量位列前三。从 20 年时间尺度看，储能和太阳能领域受到更广泛、持续的关注。在发文量超过 1 万篇的领域中，年均增长最快的是储能、氢能和能源互联网。

(2) 在全球新能源研究方面，中国发挥着举足轻重的作用，近五年发文量占到同期全球发文总量的近四分之一，其中储能、太阳能和氢能是中国新能源研究最高产的领域。在发文量超过 5 000 篇的领域中，能源互联网、氢能和储能年均增速最快。本研究相对篇均被引率和全球 TOP 10% 优质论文占比表征的论文影响力分析显示，中国在新能源研究 8 个领域的影响力均高于全球平均水平，且太阳能和氢能领域的研究在全球影响力相对较高。从全球 TOP 1% 顶尖论文占比来看，中国新能源领域有 8 项技术主题的表现超过了全球平均水平，包括太阳能燃料技术、制氢技术、电池储能技术、太阳能光伏技术、能源互联网系统集成基础技术、生物质发电技术、燃料电池技术以及能源互联网管理技术。

(3) 综合评估 2015-2019 年新能源 8 个技术领域 20 项技术主题的发文总量、年均复合增长率以及头部高质量研究量三项指标的表现发现，电池储能技术、太阳能光伏技术、太阳能燃料技术、制氢技术、能源互联网架构和核心装备技术等显示出较好的发展前景，主要集中在储能、太阳能、氢能和能源互联网领域。

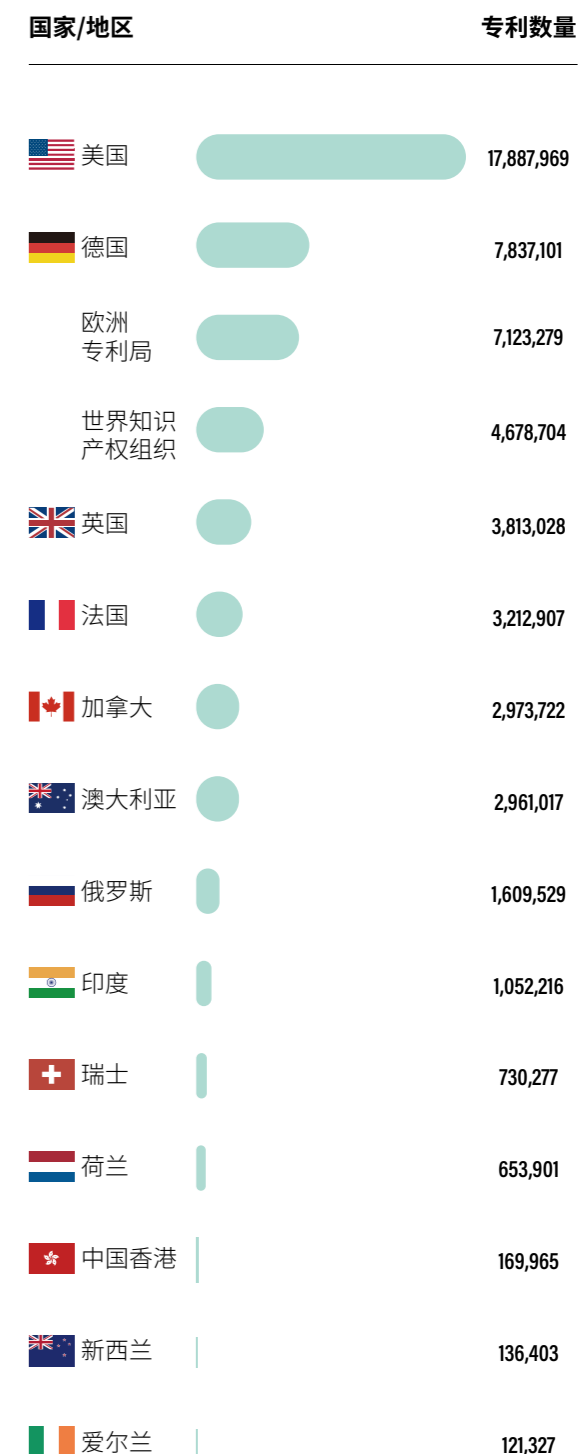
第3章

新能源技术的 产业转化分析

专利申请通常会参考学术文献，其引用情况一定程度上反映了学术研究的产业转化情况。本章基于 Dimensions 数据库从全球 15 个专利受理国家 / 地区（图 3.1）采集专利数据，分析了新能源研究不同技术领域专利引用学术文献的情况，以期从专利计量角度开展新能源技术的产业转化分析。鉴于 Dimensions 数据库尚未收录中国大陆和日本受理的专利数据，国别分析中涉及中国和日本的情况仅供参考。

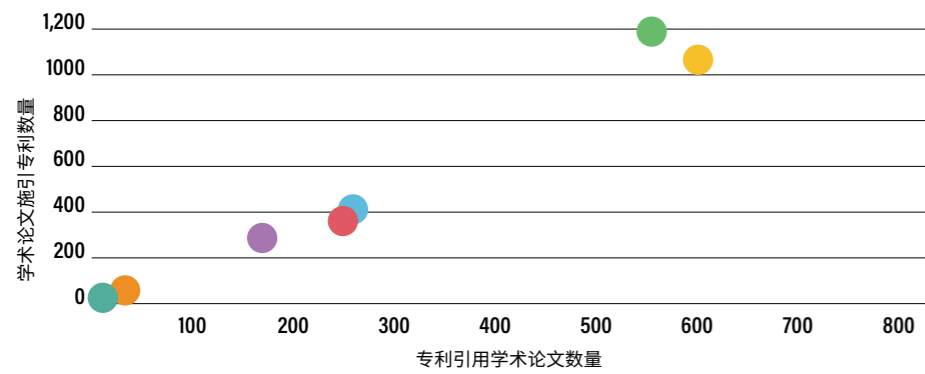
图 3.1

Dimensions 数据库收录的
全球 15 个专利受理国家 / 地区
专利数据



3.1 新能源研究的专利引用分析

从新能源研究不同技术领域学术论文施引专利数量（即引用了本报告第2章分析的学术论文的专利数量）及被专利引用的学术论文数量来看（图3.2），全球范围内储能、太阳能和氢能领域学术论文施引专利数量和引用学术论文数量均位居前三，表明上述新能源技术研究的产业关注度较高。从被专利引用的学术论文在全球新能源学术论文占比来看，储能、生物质能和太阳能领域论文占比较高，表明这些新能源技术的研究成果产业转化的比例相对较大。



中国学术论文施引专利数量排名前三的技术领域同样为储能、太阳能和氢能，而被专利引用的学术论文数量排名前三的为储能、太阳能和能源互联网（图3.3），这在一定程度上表明中国能源产业对于能源互联网技术的较高关注度。从被专利引用的学术论文在中国新能源学术论文占比来看，太阳能、储能和生物质能领域比例较高，这主要受近年来中国对这三类技术加大扶持力度的影响，科研和产业的结合度较高。但与全球的相应比例比较，中国的学术论文与专利的结合度相对较低，虽然这可能受中国专利数据统计不全的影响。综合比较国内外情况可知，国内外市场新能源专利技术布局最为关注的热点领域为储能、太阳能和氢能，而产业化度相对较高的领域是储能、生物质能和太阳能。

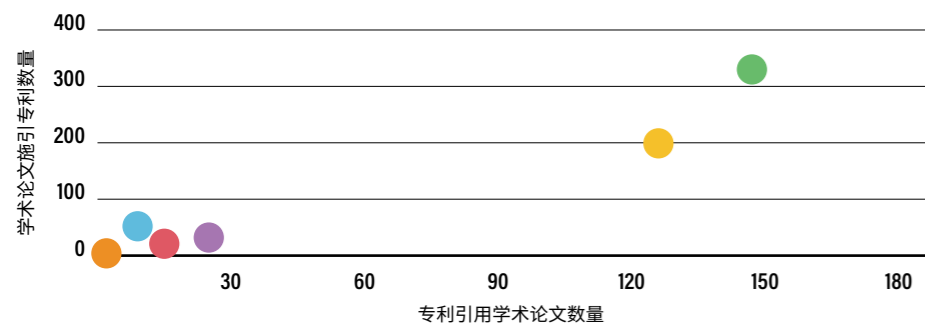


图 3.2

全球新能源技术领域学术论文施引专利数量及专利引用学术论文数量情况

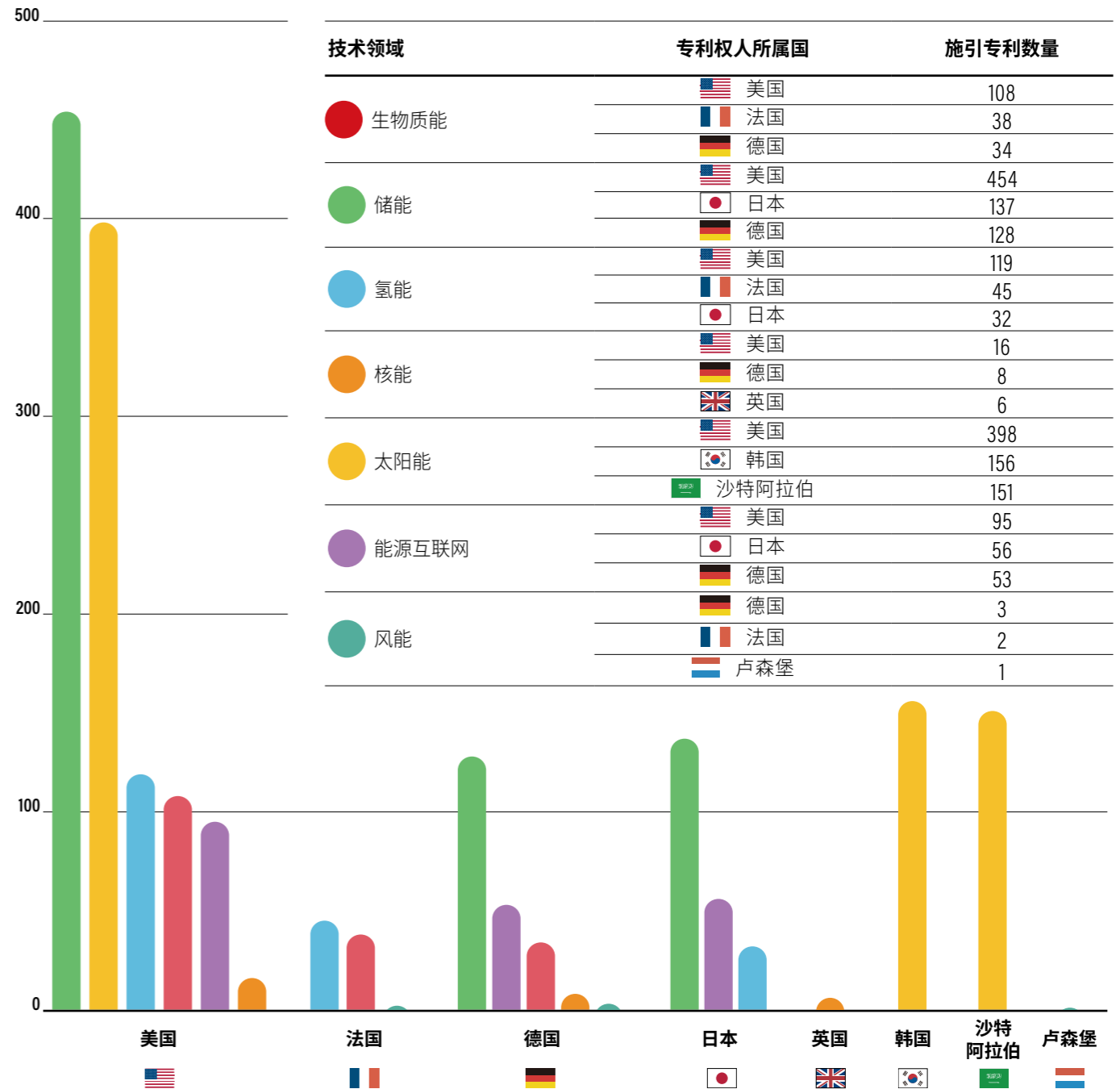
图 3.3

中国新能源技术领域学术论文施引专利数量及专利引用学术论文数量情况

新能源不同技术领域学术论文施引专利权人所属国分析发现，各技术领域排名前三的国家及其施引专利数量如表 3.1 所示。美国在大多数新能源技术领域的施引专利数量均排名靠前，表明其相对更重视新能源研究成果的技术转化。尤其在生物质能、储能、氢能、核能、太阳能等技术领域，美国施引专利数量在 Top 3 国家总数中占比均超过 50%。此外，全球新能源技术施引专利申请整体表现突出的国家或地区还有德国、法国、日本等。综合考虑专利数量和占比情况，法国致力于推动生物质能、氢能技术的转化，日本更关注储能、能源互联网和氢能的技术转化，德国则较为重视核能和风能技术。

表 3.1

新能源研究不同技术领域学术论文施引专利权人所属国（Top 3 国家）施引专利数量



3.2 产研共同关注的新能源技术热点

联合专利分类 (CPC) 是由欧洲专利局 (EPO) 和美国专利商标局 (USPTO) 共同开发的专利分类体系, 包含了专利的技术信息, 能够了解专利主要涉及的技术领域和技术重点等。基于 CPC 分类, 本报告对全球和中国新能源领域 20 项技术主题的学术论文施引专利细分技术方向进行分析, 总体排名前五位的技术方向详见表 3.2 和 3.3。全球论文施引专利排名前五的技术方向主要为电池储能、太阳能光伏和燃料电池等, 而中国论文施引专利的技术热点主要为电池储能和太阳能光伏等。总体而言, 锂离子电池和有机太阳能电池是国内外产业转化共同关注的技术热点。

在新能源领域 20 项技术主题中, 学术论文施引专利数量居前三位的技术分别为电池储能、生物燃料和燃料电池。基于 CPC 分类, 对上述 3 项技术的学术论文施引专利细分技术方向进行分析, 排名前五位的技术方向详见表 3.4-3.6。

表 3.2

基于 CPC 的全球新能源学术论文施引专利前 5 位技术热点

专利分类号	名称	施引专利数
Y02E60/10	储能	593
H01M10/0525	摇椅电池, 基于锂嵌入和脱嵌的锂电池电极, 锂离子电池	278
Y02E10/549	有机光伏电池	239
H01M10/052	锂聚合物	210
Y02E60/50	燃料电池	203



© ZHILIAO/EYEEM/GETTY IMAGES

对于电池储能技术, 施引专利技术热点聚焦于锂离子电池、电极和电解质材料方面。其中“锂聚合物” (H01M10/052) 为锂离子电池电解质的一种形态, 而“碳或石墨” (H01M4/625) 和“基于混合氧化物或氢氧化物的电极” (H01M4/131) 分别是典型的电池负极材料和正极材料。锂离子电池作为近年来商业化最为成功的电池技术, 在动力和电力储能等领域均有应用, 而电解质、电极材料等为该技术的重点方向, 因此相关施引专利数在电池储能中排名靠前。

对于生物燃料技术, 排名前五位的技术热点大部分与纤维素有关, 表明纤维素生物燃料是技术转化的热点方向。当前第二代生物燃料技术通常以纤维素为原料, 用于生产生物乙醇等。由表 3.5 可知, 含纤维素材料的基质、单糖、α 淀粉酶等生物催化剂、纤维素预处理等为纤维素生物燃料科研成果转化的热点方向。

对于燃料电池技术, 排名前五位的技术热点主要与催化剂、电解质等有关。在催化剂方面, 催化剂金属微晶尺寸的特征 (B01J35/006)、含配位聚合物的催化剂 (B01J31/1691) 以及催化剂的浸渍制备方法 (B01J37/0201) 为研究成果转化热点方向; 在电解质方面, 高分子化合物 (C08J5/2256) 和聚合物电解质材料 (H01M8/1018) 为主要热点方向 (表 3.6)。上述结论与近年来以质子交换膜燃料电池为主的聚合物电解质燃料电池的日益商业化有关。

表 3.3

基于 CPC 的中国新能源学术论文施引专利前 5 位技术热点

专利分类号	名称	施引专利数
Y02E60/10	储能	198
H01M10/0525	摇椅电池, 基于锂嵌入和脱嵌的锂电池电极, 锂离子电池	104
Y02E10/549	有机光伏电池	91
H01M10/052	锂聚合物	60
H01M4/625	碳或石墨	59

表 3.4 基于 CPC 的全球电池储能技术学术论文施引专利前 5 位技术热点

专利分类号	名称	施引专利数
Y02E60/10	储能	192
H01M10/0525	摇椅电池, 基于锂嵌入和脱嵌的锂电池电极, 锂离子电池	100
H01M4/625	碳或石墨	58
H01M10/052	锂聚合物	57
H01M4/131	基于混合氧化物或者氢氧化物的电极	50

表 3.5 基于 CPC 的全球生物燃料技术学术论文施引专利前 5 位技术热点

专利分类号	名称	施引专利数
Y02E50/10	生物燃料	8
C12P7/10	含纤维素材料的基质	8
C12P19/02	单糖 (2- 酮戊二酸入 C12P7/60)	6
C12P19/14	通过碳水化合物作用产生 (EC 3.2.x), 例如通过 α 淀粉酶 (如纤维素酶、半纤维素酶)	6
C12P2201/00	纤维素或木质纤维材料的预处理, 用于酶处理或水解	6

表 3.6 基于 CPC 的全球燃料电池技术学术论文施引专利前 5 位技术热点

专利分类号	名称	施引专利数
B01J35/006	金属微晶尺寸	4
C08J5/2256	基于通过除涉及碳 - 碳键以外反应获得的高分子化合物, 例如通过缩聚反应获得	3
B01J31/1691	配位聚合物, 例如金属有机框架 [MOF] (含羧酸部分的金属配合物的制备入 C07C51/418; MOF 本身入 C07F)	3
B01J37/0201	浸渍	3
H01M8/1018	聚合物电解质材料	3



3.3 本章小结

本章利用专利计量方法对新能源学术论文施引专利进行量化分析, 侧面揭示了新能源技术的产业转化情况。

(1) 施引专利的引用分析显示, 储能、太阳能和氢能技术研究的国内外市场关注度最高, 而产业转化度相对较高的技术为储能、生物质能和太阳能技术。此外, 从施引专利权人所属国别角度分析, 美国相对更为重视新能源学术研究成果的技术转化。

(2) 基于 CPC 分类分析新能源技术热点方向发现, 全球及中国产研共同关注的新能源技术热点集中在电池储能和太阳能光伏领域, 尤其是锂离子电池和有机太阳能电池。施引专利数量排名前三的新能源技术热点方向分析发现, 电池储能技术产研关注热点聚焦于锂离子电池以及电极、电解质材料; 生物燃料技术热点方向为含纤维素材料的基质、单糖、α 淀粉酶等生物催化酶、纤维素预处理等; 燃料电池技术的产研关注热点与催化剂的表征和制备, 以及聚合物电解质材料有关。

第4章

新能源科研产出 国家比较分析

© 522280476/GETTY IMAGES

4.1 不同技术领域 国家对比分析

本章统计分析了 2015-2019 年新能源研究 8 个技术领域发文量排名前 5 的国家 (除中国之外) 及中国的情况, 具体对比分析了不同技术领域各国论文总量、论文篇均被引频次和 TOP 10% 优质论文数量。

4.1.1 太阳能

中国 (25,244 篇) 是太阳能领域发表论文数量最多的国家, 美国 (11,789 篇) 和印度 (7,551 篇) 分别位于第二名和第三名 (表 4.1)。从论文篇均被引频次来看, 美国以篇均被引 35 次高居榜首, 而中国篇均被引仅为 20.8 次, 位居第五, 排名次于德国 (26.8 次)、日本 (24.2 次) 和韩国 (23.0 次)。从 TOP 10% 优质论文数量来看, 中国以 3,968 篇成为太阳能领域全球 TOP 10% 优质论文最多的国家, 其次是美国 (1,943 篇) 和韩国 (626 篇)。综上可知, 中国在太阳能领域开展了大量研究工作, 产出了丰硕的研究成果, 并且部分成果具有一定影响, 但研究成果的整体影响力仍有较大的提升空间。



















表 4.1 太阳能领域国家发文量、篇均被引频次和入选全球 TOP10% 优质论文数量排名

排名	国家	发文量
1	 中国	25,244
2	 美国	11,789
3	 印度	7,551
4	 韩国	5,377
5	 德国	4,764
6	 日本	4,631
篇均被引频次		
1	 美国	35.0
2	 德国	26.8
3	 日本	24.2
4	 韩国	23.0
5	 中国	20.8
6	 印度	16.2
TOP10% 优质论文数量		
1	 中国	3,968
2	 美国	1,943
3	 韩国	626
4	 英国	565
5	 德国	551
6	 日本	441

4.1.2 风能

中国、英国和美国是风能领域发文量排名前三的国家, 其中中国以 635 篇论文领跑发文量的榜单, 表明中国在该研究领域具有较强的活跃度。然而, 在篇均被引频次和全球 TOP 10% 优质论文数量排名方面, 中国分别仅排第六名和第三名, 表明研究成果整体影响力有待提升 (表 4.2)。

表 4.2 风能领域国家发文量、篇均被引频次和入选全球 TOP10% 优质论文数量排名

排名	国家	发文量
1	 中国	635
2	 英国	610
3	 美国	475
4	 德国	364
5	 挪威	312
6	 丹麦	284
篇均被引频次		
1	 英国	10.9
2	 丹麦	9.0
3	 美国	9.0
4	 挪威	7.5
5	 德国	6.1
6	 中国	5.8
TOP10% 优质论文数量		
1	 英国	104
2	 美国	72
3	 中国	68
4	 丹麦	43
5	 挪威	34
6	 德国	31

4.1.3 地热能

在地热能领域, 中国也是发表论文数量最多的国家 (358 篇), 其次是美国 (305 篇)、德国 (189 篇)、日本 (140 篇)、英国 (104 篇) 和意大利 (94 篇)。而在论文篇均被引频次排名方面, 中国仅位列第五名。在 TOP 10% 优质论文数量国家排名方面, 中国 (43 篇) 排名第一, 美国 (41 篇) 和德国 (20 篇) 分列第二、第三 (表 4.3)。综合来看, 中国在地热能领域发文量和 TOP 10% 优质论文数量均略微领先于美国, 但研究成果的整体影响力却落后较多。

表 4.3 地热能领域国家发文量、篇均被引频次和入选全球 TOP10% 优质论文数量排名

排名	国家	发文量
1	 中国	358
2	 美国	305
3	 德国	189
4	 日本	140
5	 英国	104
6	 意大利	94
篇均被引频次		
1	 美国	12.4
2	 英国	12.2
3	 意大利	11.9
4	 德国	9.8
5	 中国	9.0
6	 日本	7.0
TOP10% 优质论文数量		
1	 中国	43
2	 美国	41
3	 德国	20
4	 英国	15
5	 意大利	13
6	 法国	12

4.1.4 生物质能

中国在生物质能领域发文量位居全球第二 (4,915 篇), 而美国 (5,580 篇) 排名第一, 第三名到第六名分别是印度 (3,792 篇)、巴西 (2,513 篇)、英国 (1,407 篇) 和德国 (1,279 篇)。从论文篇均被引频次来看, 中国 (14.6 次) 位列全球第四名, 前三名依次是英国 (17.6 次)、美国 (16.4 次) 和德国 (14.7 次) (表 4.4)。在优质论文数量方面, 中国 TOP 10% 优质论文成果数量最多 (743 篇), 其次是美国 (677 篇)。综上, 中国在生物质能领域具有较高的研究活跃度, 优秀研究成果数量产出较为丰硕, 但研究成果整体影响力还有待进一步增强。

表 4.4 生物质能领域国家发文量、篇均被引频次和入选全球 TOP10% 优质论文数量排名

排名	国家	发文量
1	 美国	5,580
2	 中国	4,915
3	 印度	3,792
4	 巴西	2,513
5	 英国	1,407
6	 德国	1,279
篇均被引频次		
1	 英国	17.6
2	 美国	16.4
3	 德国	14.7
4	 中国	14.6
5	 印度	14.3
6	 巴西	9.9
TOP10% 优质论文数量		
1	 中国	743
2	 美国	677
3	 印度	428
4	 英国	193
5	 韩国	152
6	 意大利	142

4.1.5 核能

中国在核能领域发表论文数量全球第二 (5,043 篇)，美国 (5,129 篇) 以微弱的优势排名第一；第三到第六名依次是日本 (3,441 篇)、法国 (2,050 篇)、德国 (2,018 篇) 和俄罗斯 (1,813 篇)。在 TOP 10% 优质论文数量的国家排名中，美国 (824 篇) 依旧高居榜首，中国以 559 篇位列第二名。在论文篇均被引频次排名中，中国 (4.3 次) 仅排第五名，排名前四的依次是美国 (7.8 次)、德国 (7.7 次)、法国 (6.1 次) 和日本 (5.5 次) (表 4.5)。综上，中国在核能领域总发文量和 TOP 10% 优质论文数量较多，但整体影响力还相对不足。

表 4.5 核能领域国家发文量、篇均被引频次和入选全球 TOP10% 优质论文数量排名

排名	国家	发文量
1	美国	5,129
2	中国	5,043
3	日本	3,441
4	法国	2,050
5	德国	2,018
6	俄罗斯	1,813

篇均被引频次		
1	美国	7.8
2	德国	7.7
3	法国	6.1
4	日本	5.5
5	中国	4.3
6	俄罗斯	3.3

TOP10% 优质论文数量		
1	美国	824
2	中国	559
3	日本	411
4	德国	334
5	英国	266
6	法国	256

4.1.6 氢能

中国在氢能领域发表论文数量具有绝对优势，为 21,892 篇，随后是美国 (8,413 篇)、日本 (4,317 篇)、印度 (3,635 篇)、韩国 (3,469 篇) 和德国 (3,105 篇)。在篇均被引频次排名中，美国以 19.8 次排名第一，随后五名依次是中国 (17.9 次)、德国 (15.7 次)、韩国 (14.7 次)、印度 (12.2 次) 和日本 (10.8 次)。在 TOP 10% 优质论文数量国家排名中，中国 (3,762 篇) 排名第一，美国 (1,264 篇) 位列第二，英国 (341 篇)、韩国 (329 篇)、德国 (320 篇) 和印度 (291 篇) 分列排名第三到第六名 (表 4.6)。综上，无论在研究活跃度还是在成果影响力方面，中美两国都具有一定的领先优势。

表 4.6 氢能领域国家发文量、篇均被引频次和入选全球 TOP10% 优质论文数量排名

排名	国家	发文量
1	中国	21,892
2	美国	8,413
3	日本	4,317
4	印度	3,635
5	韩国	3,469
6	德国	3,105

篇均被引频次		
1	美国	19.8
2	中国	17.9
3	德国	15.7
4	韩国	14.7
5	印度	12.2
6	日本	10.8

TOP10% 优质论文数量		
1	中国	3,762
2	美国	1,264
3	英国	341
4	韩国	329
5	德国	320
6	印度	291

4.1.7 储能

在储能领域，中国发表论文数量同样优势明显，为 36,569 篇居首，随后是美国 (11,119 篇)、韩国 (5,448 篇)、德国 (3,402 篇)、印度 (3,380 篇) 和日本 (2,821 篇)。在论文篇均被引频次方面，中国 (20.5 次) 仅位列全球第四名，前三名依次是美国 (32.2 次)、德国 (23.8 次) 和韩国 (21.3 次)。在全球 TOP 10% 优质论文数量国家排名方面，中国以 4,860 篇排名第一，随后是美国 (1,672 篇)、韩国 (469 篇)、德国 (317 篇)、英国 (205 篇) 和日本 (177 篇) (表 4.7)。综上，中国在储能领域具有较强研究活跃度，且产出了大量的优秀研究成果，但研究成果整体影响力仍落后于美国、德国和韩国等储能技术领先国家。

表 4.7 储能领域国家发文量、篇均被引频次和入选全球 TOP10% 优质论文数量排名

排名	国家	发文量
1	中国	36,569
2	美国	11,119
3	韩国	5,448
4	德国	3,402
5	印度	3,380
6	日本	2,821

篇均被引频次		
1	美国	32.2
2	德国	23.8
3	韩国	21.3
4	中国	20.5
5	日本	17.0
6	印度	12.9

TOP10% 优质论文数量		
1	中国	4,860
2	美国	1,672
3	韩国	469
4	德国	317
5	英国	205
6	日本	177

4.1.8 能源互联网

中国是能源互联网领域发表论文数量最多的国家，发文量为 12,478 篇，随后是美国 (8,908 篇)、英国 (3,321 篇)、印度 (3,253 篇)、德国 (2,772 篇) 和意大利 (2,191 篇)。从论文篇均被引频次排名来看，中国位于全球第五名，前四名依次是英国 (14.1 次)、美国 (13.5 次)、意大利 (10.9 次) 和德国 (9.3 次)。在 TOP 10% 优质论文数量国家排名中，中国以 1,521 篇排名第一，美国和英国分别以 1,287 篇和 527 篇，位列二、三名 (表 4.8)。综上，中国在全球能源互联网领域研究成果数量丰富，且优秀研究成果较多，但研究成果整体影响力不足。

表 4.8 能源互联网领域国家发文量、篇均被引频次和入选全球 TOP10% 优质论文数量排名

排名	国家	发文量
1	中国	12,478
2	美国	8,908
3	英国	3,321
4	印度	3,253
5	德国	2,772
6	意大利	2,191

篇均被引频次		
1	英国	14.1
2	美国	13.5
3	意大利	10.9
4	德国	9.3
5	中国	8.4
6	印度	7.0

TOP10% 优质论文数量		
1	中国	1,521
2	美国	1,287
3	英国	527
4	印度	249
5	意大利	247
6	德国	221

4.2 不同技术领域国家整体对比

综合新能源 8 个技术领域的活跃度（发文量）和影响力（篇均被引频次）国家排名来看（图 4.1），美国、中国和德国在所有技术领域中都入围了前六名榜单，反映出这些国家在新能源领域的全面布局和强劲研究实力。从研究活跃度来看，中国在 6 个技术领域排名领先，尤其在储能、太阳能和氢能领域优势明显；美国在生物质能和核能领域领先。从研究成果影响力来看，美国具有明显优势，所有 8 个技术领域的篇均被引频次排名均位居前三位，尤其在储能、太阳能、核能领域领先中国较为明显。

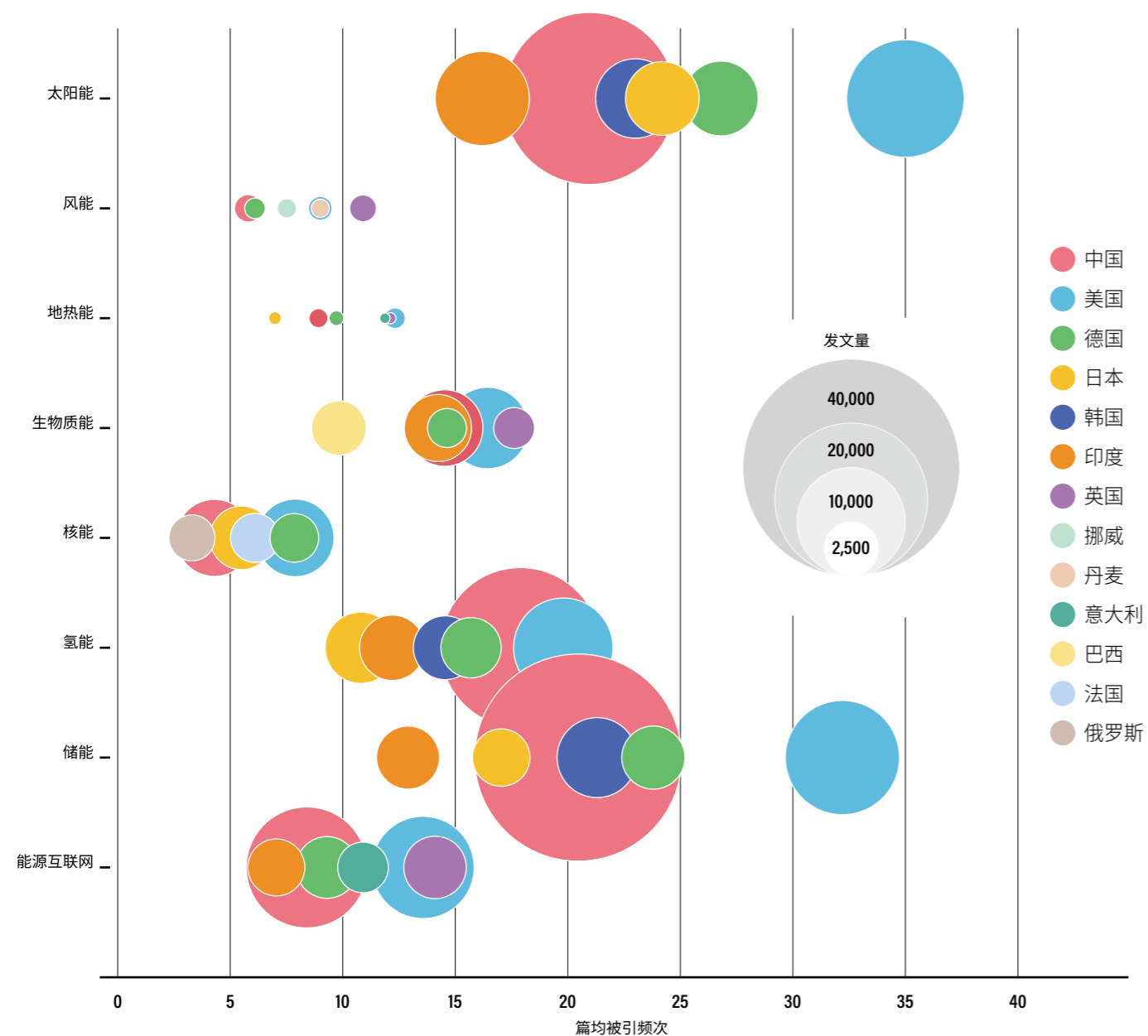


图 4.1

中国与全球排名前 5 位的国家在新能源 8 个技术领域发文量和篇均被引频次情况



4.3 本章小结

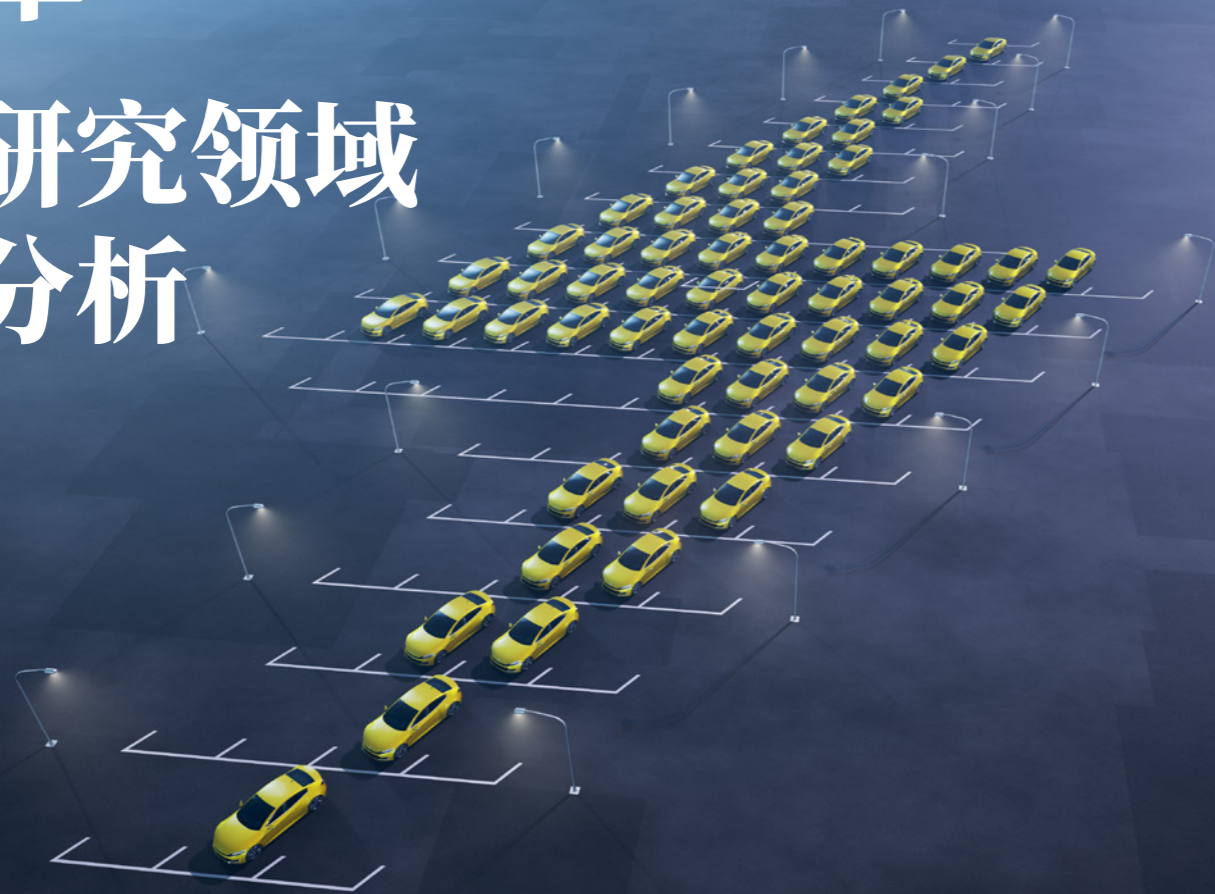
本章统计分析各国论文数量、论文篇均被引频次和入选全球 TOP 10% 优质论文数量，开展了国家竞争力比较研究。

(1) 综合新能源研究 8 个技术领域的活跃度（发文量）和影响力（篇均被引频次），美国、中国和德国在所有技术领域都入围了前六名榜单，反映出这些国家在新能源领域的全面布局和强劲研究实力。此外，美国在所有 8 个领域的篇均被引频次排名均位居前三位，表明其研究成果整体影响力较高。

(2) 中国在所有 8 个领域的发文量排名均位居前两位，表明中国新能源领域研究成果丰硕，具有较强的研究活跃度。综合分析论文篇均被引频次和入选全球 TOP 10% 优质论文数量显示，中国在所有领域的高被引论文数量均处于前列，但大部分领域论文篇均被引频次排名相对靠后，表明研究成果整体影响力有待进一步提升。

第 5 章

重点研究领域 访谈分析



人类社会已经步入第四次工业革命，数字技术、网络信息技术和新能源与可再生能源技术的加快突破带动了新兴产业快速发展，推动着人类社会走向高效、绿色、智慧、生态的可持续发展道路。本报告对全球新能源研究态势的全面分析显示，全球论文数量和质量增长均充分体现了科研界对该领域基础理论研究、关键科学问题突破的高度关注和研发投入。

在可再生能源领域，继太阳能光伏发电、风力发电技术进步和成本快速下降支持了全球发电装机规模大幅增长之后，太阳能燃料、生物质利用、海上风电、地热能研究和研发的速度明显加快，体现了社会希望各种可再生能源资源潜力都能得到大规模利

用。在新能源领域，近年氢能作为零碳二次能源成为全球性研究热点，不仅有利于改变交通能源结构，也有望在消纳可再生能源电力、增加能源系统灵活性和灵活性方面发挥重要作用。储能、能源互联网技术也表现出较高的研究活跃度，表明未来能源系统必将面临的多能耦合、数字化转型、智能调控以及需求侧响应等风险要素和重要环节已成为新的研究热点。

总之，气候变化风险的日益加剧迫切需要能源转型，各国都在竭力提高能源科技创新竞争力和新兴能源产业竞争力。这将成为新能源科学研究持续活跃、多点爆发的强劲驱动力。

5.1 储能技术的快速进步成为可再生能源电力和电动汽车大规模发展的有力支撑

储能技术成为现代能源体系建设重要组成。在 20 年较长时间尺度上，储能受到科研界持续、广泛关注。在全球新能源研究 20 项技术主题中，储能领域的电池储能技术发文量及其增长率的表现得分位居第一。

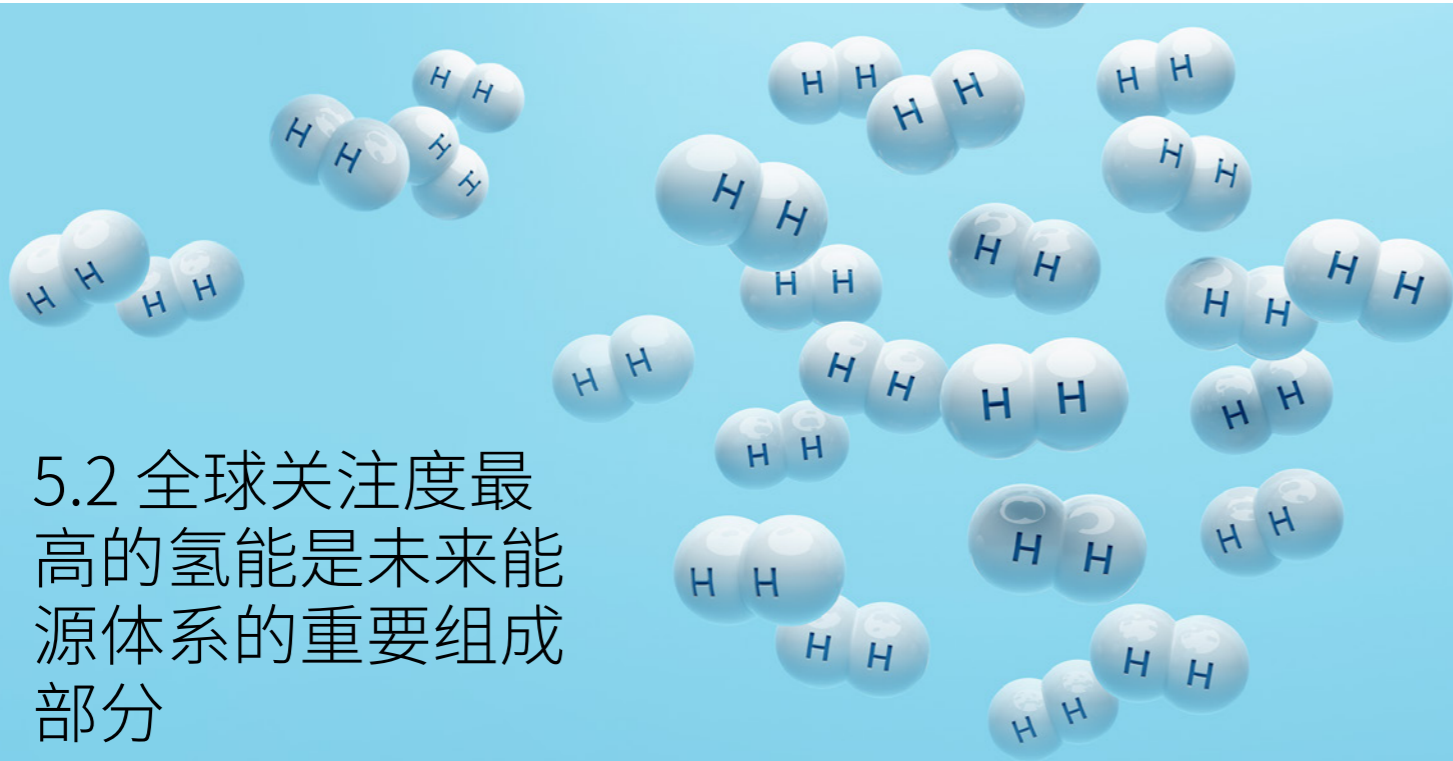
可再生能源发电、智能电网和分布式多能互补系统、电动汽车均为各国电力系统低碳转型的重点方向，而储能技术是实现上述领域变革必不可少的技术支持，是未来能源系统具备柔性、包容性和平衡功能的软链接关键节点。在电力供应端，大容量、大规模储能技术的突破和应用将在很大程度上解决可再生能源利用的随机性和波动性问题，大幅减少弃风弃光以及电力系统对基荷电源的依赖；在电力需求端，储能技术可以突破供需两侧时间上、空间上的匹配限制，移峰填谷，调频调幅，达成高效、灵活、低成本的系统运行。此外，储能技术进步更为突出的贡献是推动了动力电池的发展，以解决交通能源的燃油替代难题，突破交通部门的高碳能源锁定，发展电动汽车产业。

中国储能产业发展迅速成为全球后起之秀。中国能源研究会储能专委会等联合发布的《储能产业研究白皮书 2020》显示，2019 年全球电池储能累计装机规模为 9,520.5 MW，其中锂离子电池储能累计装机规模占比 88.6%。中国的储能产业虽然起步较晚，但近几年发展速度令人瞩目，已投运电池储能累计装机规模达到 1,709.6 MW，其中锂离子电池储能累

计装机规模占比 60%，在 2015-2019 年间锂电池储能累计装机年均增长超过 100%。作为“十二五”和“十三五”期间重点发展的新能源、新能源汽车和新材料三大产业中的交叉支撑性产业，储能电池产业发展得到了国家一系列相关政策支持，其相关核心技术的研发被列为科技攻关重点方向，尤其是电动汽车产业的迅速发展，带动了中国储能电池市场保持高速增长态势。

电池储能核心技术快速发展取得创新突破。随着储能技术在能源生产、消费以及低碳智慧转型中的广泛应用，提高储能电池的安全性、能量密度、容量规模、续航能力、服役寿命以及降低电池成本的需求越来越迫切。本报告的论文和专利分析表明，电极材料、电解液等电池材料是提高电池性能的研究热点。领域相关专家认为，磷酸铁锂电池和三元锂电池已相继成为动力电池材料创新的主要技术方向。电池性能突破路线主要包括储能电池系统结构创新、电池包空间利用优化、电池能量密度及安全性提升、电池成本大幅降低等。例如，宁德时代推出的 CTP 技术，以及比亚迪发布的刀片电池。此外，由于光伏和风力发电成本的大幅降低，除集中式可再生能源发电规模将继续扩大外，分布式可再生能源发电潜力也将进一步释放，配置在绿电生产基地、工业园区、建筑组团的分布式多能互补系统以及独立可再生能源系统中的储能电池装机预计将会迎来加速增长，亟需电池储能核心技术的持续突破。此外，电动车电池的衰减和废弃物处理问题也亟待应对。

© VIAFRAME/GETTY IMAGES



5.2 全球关注度最高的氢能是未来能源体系的重要组成部分

在未来能源体系中，氢能是重要的零碳二次能源，制氢、储氢以及氢能的输送和利用研究热度都在快速增长。其中，最先受到关注的氢燃料电池或氢发动机可以变革传统交通工具，解决交通燃油消费带来的城市大气污染和脱碳问题。随着可再生能源发电规模的快速增加，电网消纳能力成为瓶颈，而通过电解水制氢可以灵活消纳弃风、弃光，解决光伏和风电规模受到消费侧需求和电网消纳能力的限制，同时可再生能源制氢也将成为未来可持续的绿氢来源。

氢能是助推能源体系深度脱碳重要切入点。自《巴黎协定》签署之后，世界各国面临节能减排的巨大压力，发展氢能成为助力交通和工业深度脱碳的重要切入点。2018年至今，包括日本、韩国、澳大利亚、英国、法国在内的诸多国家发布了氢能领域最新规划。日本明确提出，到2025年将全面普及氢能交通，扩大氢能发电、工业和家庭中的应用，到2030年，氢能使用成本将不高于传统能源。欧盟2020年7月发布的《欧盟氢能战略》提出了欧洲构建“氢能生态系统2050年战略路线图”，2030年前的目标是迅速减少氢气生产过程中的碳排放，开发其他形式的低碳氢，以支持向可再生能源制氢过渡。此外，欧盟评估了氢

能对实现气候中性航空的促进作用，认为氢动力航空有潜力成为未来航空技术组合的重要部分。

中国在氢能关键技术研发方面表现较活跃。中国最早的氢能发展部署是将氢燃料电池汽车列为新能源汽车发展方向之一。但由于制氢技术和氢燃料电池的高成本以及加氢站的布局等问题制约产业发展，与纯电动汽车和混合动力汽车相比，氢燃料电池汽车还处于示范运营阶段。在2019年《政府工作报告》中，我国首次将氢能纳入国家能源体系，有条件发展氢能的地方政府也将氢能产业链打造和氢能利用示范列入了“十四五”能源发展规划。

与此相呼应，中国在制氢、储氢、加氢等关键环节的研究活跃度也排在新能源领域前列。为完成国家2060年前实现碳中和的目标，未来氢能不仅是用于公路物流、水上运输和航空的清洁、零碳动力，还可以改变部分高碳工业难以电替代的耗能工艺过程。此外，中国可再生能源资源禀赋与能源负荷重心在空间上不一致，而氢能在可再生能源转化为电力、燃料以及大宗化学品方面都将发挥能量储存、能量载体和材料中间体的重要作用，促使中国加快能源体系低碳转型。

5.3 太阳能燃料为排名前位的技术主题研究热点

科研界高度关注零碳太阳能燃料技术研发。太阳能燃料包括光催化制氢、光催化还原CO₂制备碳基燃料和高价值化学品、人工光合系统等。太阳能燃料研究的发文量和关注度都位居前列，表明人类持续追求利用可持续的自然资源(水、CO₂)和能源(太阳能)，以求通过更为生态、高效的转化机制获得绿色燃料。光解水制氢，即利用太阳能光催化直接分解水制氢是最早开始研究的太阳能燃料制备路线，但当前全球光催化制氢仍处于实验室研发阶段。从达到1,000立方米/小时的产氢量才具有实用价值的目标看，光解水制氢走向实际应用还尚需时日，尤其是高效光催化剂仍是新能源领域的技术研发瓶颈。

电催化技术加快了太阳能燃料的研发进程。太阳能发电、风力发电的技术进步促使发电成本快速下降，从而具备了市场竞争力。全球光伏发电和风力发电装机大幅增长，带动了利用可再生能源发电的电解水制氢迅速成为绿色、可持续的太阳能燃料生产线。此外，氢和二氧化碳通过催化反应转化为甲醇

等碳氢燃料，作为氢的载体，可以降低氢储运的安全风险，同时也可以将二氧化碳还原进入化学品。例如，中国科学院提出的低碳化多能融合制备液体燃料和化学品技术路径，突破了高效、廉价、稳定的分解水(光)电催化剂技术和廉价、高选择性的二氧化碳加氢制甲醇催化剂，利用风电和光伏发电电解水制氢为中间步骤，将氢和二氧化碳合成得到甲醇。此外，近年来，利用聚光太阳能制备燃料也逐渐成为前沿基础研究热点。例如，通过太阳能热化学分解二氧化碳和水得到碳氢化合物，以及聚光太阳能驱动甲烷化学链制氢等。

太阳能燃料制备成本降低是产业化的关键。氢是石油化工工业的基础原料。可再生能源发电能够实现电力平价化生产和供应，可以促使通过电解水制氢间接获取太阳能，并通过不同工艺路线获得氢基化学品和碳氢燃料。本研究文献分析发现，如何降低电解水制氢的成本，以及氢能存储、输送和利用的安全风险是全球氢能领域研究的热点。



5.4 能源互联网融合了智慧能源、大数据及物联网等跨界新技术

能源互联网是现代能源系统的新型基础设施。随着能源需求不断增加和电气化趋势的显现，未来全球将加快形成以石油、天然气、煤炭、可再生能源为主的多元化能源结构，并在本世纪中叶完成向以非化石能源为主的能源结构转型。因此，虽然分能源品种的能源技术创新依然重要，但多种能源融合的集成组合、融合匹配、智慧运维、供需双向互动、多网互动等系统技术的突破也显得尤为重要和迫切。同时，现代能源系统必然需要大数据挖掘、信息流管理、检测和网络泛在、决策优化等跨界科学技术交叉融合的支撑。本报告论文和专利分析发现，能源互联网的架构和核心装备技术、管理技术以及系统集成基础技术均进入排名前 10 位最具发展前景的技术主题，充分表明以能源互联网为特征的现代能源系统研究的重要性。

中国能源互联网关键核心技术攻关仍需加强。在 2015-2019 年中国新能源领域总发文量中，能源互联网技术发文量排名第四，其中“能源互联网系统集成的基础技术”和“能源互联网的管理技术”主题发文量增长迅速。此外，在国别对比中，中国能源互联网领域发表论文数量最多，且优质论文数量也处于领先，表明中国科研界对能源互联网的理论前沿研究高度关注，在能源互联网领域研究具有一定竞争力。然而，从论文篇均被引频次国家排名来看，中国仅位居全球第五名，表明中国的论文质量和影响力与英国、美国比还有一定差距，仍需加强关键核心技术攻关，提高能源互联网领域研究水平。

应用基础研究以及技术研发将持续受到关注。在全球实现碳中和情景下，能源系统将具有多元、智慧、安全、柔韧的基本属性，这意味着能源互联网技术、智慧能源系统技术等研究的重要性凸显，应用基础研究、应用性技术研发将持续受到关注。但目前能源互联网研究仍需关注如下问题：一是关注能源互联网架构和核心装备技术研究，在能源生产消费的智能化、能源互联网系统规划、多能流能源交换与路由技术、能源智能传输技术、智能网络的协同控制技术等方面取得突破；二是关注能源系统大数据采集、挖掘和利用技术研究，在能源互联网通信、能量信息化与信息物理融合、能源大数据应用技术、能源互联网管理技术等方面取得突破；三是关注能源互联网技术落地转化，在多学科交叉、信息网络基础设施和能源基础设施链接的研究设计、示范应用、落地实施等方面取得突破。



5.5 本章小结

目前，全球 120 多个国家和地区准备或已经提出了在本世纪中叶实现碳中和目标。作为实现碳中和的必选路径，新能源与可再生能源势必加快进入能源体系主流，而这种变革性的能源转型将引导能源知识和技术体系的重大创新，促进基础理论、技术链条和产业形态等突破。本报告根据论文和专利信息分析很难准确反映技术研发和产业发展的未来空间，但研判结果刻画了当前全球新能源领域高成长性和高关注度的基础研究和应用基础研究热点。在新能源技术领域方面，中国学者的研究实力和水平不断提升，尤其在储能、太阳能、氢能、生物质能等方面表现突出。此外，中国新能源产业发展规模和速度已走在世界前列，当前亟待把握新能源发展的最好时机，针对学术领域的国际前沿和国内能源体系绿色低碳转型的重大科技需求，加强理论和技术的原始创新、颠覆性创新和集成重构创新，同时立足于中国新能源产业发展的巨大市场空间，加快技术转移转化及其成本降低，形成科技创新竞争力和市场开拓竞争力。

第 6 章 结论与启示

© OXGEN/GETTY IMAGES

新能源技术创新与颠覆性能源技术突破已经成为持续改变世界能源格局、开启全球各国碳中和行动的关键手段。在全球新一轮能源革命竞速赛中，世界主要国家和地区均将发展新能源技术视为引领新一轮能源科技革命的突破口。在各种能源技术规划和研发资金的大力支持下，全球能源科技创新不断涌现，各国科研人员对新能源技术的理论与应用研究热情空前高涨。

本研究基于 Digital Science 的 Dimensions 数据库，通过对 2000-2019 年全球 8 大新能源领域的 20 项技术主题进行前沿文献梳理，采用文献计量分析与权威专家访谈相结合的科学方法，客观反映了全球视域下新能源技术研究的发展趋势和热点领域，以期对指引全球能源相关科学研究方向和支撑中国能源战略布局具有启示意义。

在把握全球能源学科研究方面：

一是全球新能源领域研究正进入快速爆发期，中国科研人员的贡献凸显。2015-2019 年，全球科研人员在太阳能、氢能、能源互联网、储能、核能、生物质能、风能、地热能等 8 大新能源领域发文近 39 万篇，平均复合增长率 9.9%，反映了全球新能源技术研究持续升温。其中，中国科研人员在这八个领域的发文贡献率高达 25.9%，且影响力（篇均被引频次）均高于全球平均水平，这充分反映了中国在新能源领域研究的快速崛起。此外，太阳能、储能和氢能成为近五年全球发文量最大的新能源领域，电池储能技术、太阳能光伏技术、太阳能燃料技术则是全球前三位最具发展前景的技术主题。**从新能源技术研究的趋势来看，政府应进一步加大对新能源技术研发创新的资金投入，积极引导和支持科研界和产业界共同参与，对新能源技术进行联合创新，推动新**

能源技术快速突破。从全球来看，中国可以作为推动该领域合作研究的重要支点和纽带。

二是全球新能源技术研究成果转化比例整体较低，新能源技术产学研结合仍需加强。从新能源领域被专利引用的学术论文在所有相关学术论文中的占比来看，储能、生物质能和太阳能技术转化度相对较高，锂离子电池和有机太阳能电池是全球共同关注的技术热点。从国别来看，中国新能源技术研究成果转化情况与世界水平相近，但美国研究成果转化情况整体水平较高，德国、法国、日本的部分研究成果转化情况表现突出。**未来如何进一步发挥产学研结合在突破关键技术瓶颈方面的重要作用，是全球新能源技术“落地”成生产力的关键。中国从依靠规模增长转向高质量发展的过程中，亟需率先行动、做出表率，探索以新能源产业科技成果质量和实际贡献为导向的评价、激励机制，鼓励新能源相关企业直接参与创新过程，坚持领域研究问题导向，促进科技成果转化。**

三是新能源研究头部国家对领域发展做出主要贡献，但研究效率存在差异。中国在新能源 8 个领域的发文量均位居世界前两位，表明其在新能源研究各主要方向具有较强的活跃度。综合分析 8 个技术领域的研究影响力（篇均被引频次和优质研究论文数量），中国在所有技术领域的优质论文数量均排名前六，但大部分领域论文篇均被引频次排名相对靠后，表明中国在新能源技术领域的研究效率仍需进一步提升。对比来看，美国和德国在新能源技术领域的研究效率更高，其发文量和影响力较为均衡，均位居世界前列。**在过去新能源技术快速发展的 20 年，各国的研究成果数量、高质量研究成果总量对推动领域发展起到重要作用。下一阶段，各国必须在保持总量态势的情况下，注重孵化高质量研究成果的效率，提升或保持该领域的科技竞争优势。**

在支撑中国能源战略布局方面：

一是大规模储能技术的突破和普及是发展可再生能源的有力支撑。风能、太阳能等可再生能源以及智能电网产业的迅速崛起，使得储能技术成为全球各国亟需攻克的技术壁垒。大规模高效储能技术是实现可再生能源普及应用的关键技术，可以解决发电与用电的时差矛盾以及间歇式可再生能源发电直接并网对电网的冲击，是未来能源系统具备柔性、包容性和平衡功能的软链接关键节点。**中国应进一步完善促进储能产**

业发展的政策机制，通过金融和市场化手段引导长期资金投入，构建储能科技创新与技术储备体系，加强新能源与储能集成应用研究，推动大规模储能技术突破和商业化应用。

二是氢能将成为打造未来能源体系、实现能源变革的重要媒介。随着人类社会的低碳化、无碳化转型，氢能技术的突破利用成为能源清洁化发展的重要方向。全球多个国家和地区已经出台了氢能发展战略路线图，将氢能规划上升到国家战略高度。作为多种能源网络互联互通和协同优化的重要能源媒介，氢能能够提高可再生能源利用率，实现电网和气管的耦合，增加电力系统的灵活性，同时具备储能功能，通过可再生能源电解水制氢，实现能源消纳与储存。**因此，要强化氢能的顶层设计，明确规模化应用场景，合理提出不同场景下氢能发展路线图，并制定相应的标准规范，加速绿氢制取、储运和应用等产业链发展。**

三是太阳能燃料技术突破及其成本降低将助力减少石油依赖。太阳能燃料技术正逐步从基础科学研究发展成为工业可行技术，有望从根本上改变能源和化工领域过度依赖化石资源的现状。太阳能发电技术、风力发电技术的进步将会进一步降低发电成本，带动可再生能源电解水制氢迅速成为绿色、可持续的太阳能燃料生产路线。而利用太阳能将水和二氧化碳高效转变为燃料或化学品的关键是如何降低成本、提高效率。**中国应继续加大太阳能燃料技术的研发力度，强化太阳能发电技术与建筑等基础设施一体化应用技术的研发和应用，选择阳光资源丰富的地区开展典型示范工程，推进太阳能技术的工业化生产进程。**

四是能源互联网将发挥“互联网+”和智慧能源双重优势，实现能源统筹优化配置。能源互联网可以实现能源生产和消费秩序重构，将能源生产、输送、存储、消费以及市场运营等环节与信息通信技术深度融合，创造新的商业模式，实现能源共享的新能源生态系统。能源互联网建设需要加强移动互联网、云计算、大数据和物联网等技术在智能电网中的融合应用，构建金融支持平台，强化共享能源基础设施建设管理体系，实现能源互联网市场化，构建安全、高效、可持续的智慧能源系统。**中国要积极推动能源互联网关键技术研发，加强不同能源网络间的互联互通，推进综合能源网络基础设施建设，完善能源互联网服务和管理运行机制。**

附录

表 1.1 新能源各技术领域 20 项技术主题

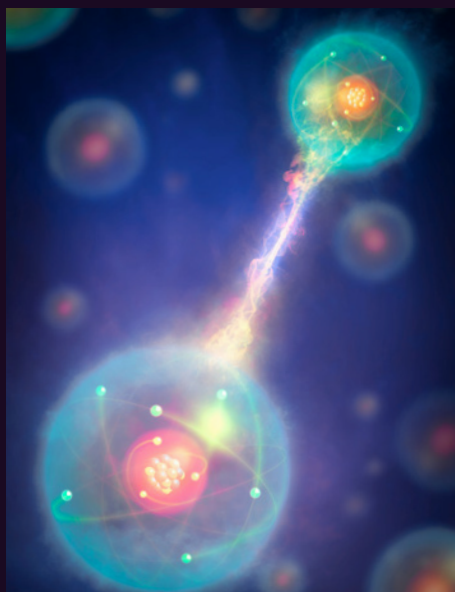
技术领域	技术主题
太阳能	太阳能光伏技术
	太阳能热发电技术
	太阳能燃料技术
风能	陆上风能技术
	海上风能技术
地热能	干热岩技术
	水热型地热技术
生物质能	生物质发电技术
	生物燃料技术
核能	核裂变能技术
	核聚变能技术
氢能	制氢技术
	储氢技术
	输运氢技术
	燃料电池技术
储能	电池储能技术
	能源互联网架构和核心装备技术
能源互联网	能源与信息深度融合技术
	能源互联网系统集成基础技术
	能源互联网管理技术

表 1.2 新能源各技术领域被引频次最高的前 10 篇论文

技术领域	技术主题	被引频次
生物质能	Occurrence of the potent mutagens 2- nitrobenzanthrone and 3- nitrobenzanthrone in fine airborne particles	2,262
	Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review	1,048
	Pretreatment of lignocellulose: Formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects	724
	Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach	723
	Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability	657
	Microalgae biorefinery: High value products perspectives	638
	Paving the Way for Lignin Valorisation: Recent Advances in Bioengineering, Biorefining and Catalysis	628
	Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective	622
	Cell disruption for microalgae biorefineries	576
	Waste biorefinery models towards sustainable circular bioeconomy:Critical review and future perspectives	568
储能	Li-ion battery materials: present and future	8,552
	Sodium-ion batteries: present and future	6,048
	Hierarchical porous nitrogen-doped carbon nanosheets derived from silk for ultrahigh-capacity battery anodes and supercapacitors	4,716
	Electrochemical capacitors: mechanism, materials, systems, characterization and applications	3,585
	Metallic 1T phase MoS2 nanosheets as supercapacitor electrode materials	3,357
	Advances in lithium-sulfur batteries based on multifunctional cathodes and electrolytes	3,260
	Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes	3,092
	30 Years of Lithium-Ion Batteries	2,940
	A phosphorene-graphene hybrid material as a high-capacity anode for sodium-ion batteries	2,828
	Laboratory simulation of binary and triple well EGS in large granite blocks using AE events for drilling guidance	912
地热能	A global review of enhanced geothermal system (EGS)	744
	Enhanced geothermal systems (EGS): A review	393
	A review of geothermal energy resources, development, and applications in China: Current status and prospects	320
	A simplified coupled hydro-thermal model for enhanced geothermal systems	304

● 地热能	Numerical simulation of the heat extraction in EGS with thermalhydraulic-mechanical coupling method based on discrete fractures model	300
	Assessing whether the 2017 Mw 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event	285
	Numerical simulation of heat extraction performance in enhanced geothermal system with multilateral wells	280
	A review of developments in carbon dioxide storage	256
	Designing multi-well layout for enhanced geothermal system to better exploit hot dry rock geothermal energy	252
● 氢能	Recent Advances in Electrocatalysts for Oxygen Reduction Reaction.	7,125
	Noble metal-free hydrogen evolution catalysts for water splitting	4,122
	An efficient molybdenum disulfide/cobalt diselenide hybrid catalyst for electrochemical hydrogen generation	2,720
	A review on g-C3N4-based photocatalysts	2,490
	Recent advances in transition metal phosphide nanomaterials: synthesis and applications in hydrogen evolution reaction	2,190
	Recent Progress in Cobalt-Based Heterogeneous Catalysts for Electrochemical Water Splitting	2,098
	A metal-organic framework-derived bifunctional oxygen electrocatalyst	1,970
	Recent advancements in Pt and Pt-free catalysts for oxygen reduction reaction	1,954
	Design of electrocatalysts for oxygen- and hydrogen-involving energy conversion reactions	1,803
	Efficient hydrogen evolution catalysis using ternary pyrite-type cobalt phosphosulphide	1,800
● 核能	Magnetospheric Multiscale Overview and Science Objectives	523
	Inertial-confinement fusion with lasers	510
	NB-CNN: Deep Learning-Based Crack Detection Using Convolutional Neural Network and Nave Bayes Data Fusion	412
	Long-term storage of spent nuclear fuel	372
	Umbellate distortions of the uranyl coordination environment result in a stable and porous polycatenated framework that can effectively remove cesium from aqueous solutions	358
	Managing the Risks of Organizational Accidents	346
	Research progress of perovskite materials in photocatalysis- and photovoltaics-related energy conversion and environmental treatment	342
	Review of supercritical CO2 power cycle technology and current status of research and development	325
	In-situ TEM observation of the response of ultrafine- and nanocrystalline-grained tungsten to extreme irradiation environments	312
	Magnetic-confinement fusion	310
● 太阳能	Compositional engineering of perovskite materials for highperformance solar cells	6,442
	Graphitic Carbon Nitride (g-C3N4)-Based Photocatalysts for Artificial Photosynthesis and Environmental Remediation: Are We a Step Closer To Achieving Sustainability?	6,042

● 太阳能	Noble metal-free hydrogen evolution catalysts for water splitting	4,122
	Benchmarking hydrogen evolving reaction and oxygen evolving reaction electrocatalysts for solar water splitting devices	4,005
	Metal-free efficient photocatalyst for stable visible water splitting via a two-electron pathway	3,970
	A mixed-cation lead mixed-halide perovskite absorber for tandem solar cells	3,765
	Efficient luminescent solar cells based on tailored mixed-cation perovskites	3,417
● 能源互联网	Engineering heterogeneous semiconductors for solar water splitting	3,308
	Polymeric Photocatalysts Based on Graphitic Carbon Nitride	2,998
	The path towards sustainable energy	2,955
	Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation	1,369
	Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions	1,326
	Big data driven smart energy management: From big data to big insights	1,108
	Sodium-ion batteries: present and future	1,008
	Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies	843
	A Survey on Demand Response Programs in Smart Grids: Pricing Methods and Optimization Algorithms	830
	The global distribution of the arbovirus vectors Aedes aegypti and Ae. albopictus	808
● 风能	A Survey on Demand Response in Smart Grids: Mathematical Models and Approaches	804
	A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations	800
	A review of combined wave and offshore wind energy	434
	High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies	324
	Advances in Converter Control and Innovative Exploitation of Additional Degrees of Freedom for Multiphase Machines	276
	An opportunistic condition-based maintenance policy for offshore wind turbine blades subjected to degradation and environmental shocks	264
	Study of decision framework of offshore wind power station site selection based on ELECTRE-III under intuitionistic fuzzy environment: A case of China	188
	Validation of a lumped-mass mooring line model with DeepCwind semisubmersible model test data	186
	Maintenance logistics organization for offshore wind energy: Current progress and future perspectives	170
	Novel structural modeling and mesh moving techniques for advanced fluid-structure interaction simulation of wind turbines	168
Review of performance optimization techniques applied to wind turbines	153	
Inertial Response From Offshore Wind Farms Connected Through DC Grids	150	



© MARK GARLICK/SCIENCE PHOTO LIBRARY/GETTY IMAGES



中国科学院科技战略咨询研究院
Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences

中国科学院科技战略咨询研究院

Phone: +86 (0)10 59358602

Email: guojf@casisd.cn

Website: www.casisd.cn



中国科学院武汉文献情报中心
WUHAN DOCUMENTATION & INFORMATION CENTRE, CAS

中国科学院武汉文献情报中心

Phone: +86 (0)27 87199180

Email: chenw@whlib.ac.cn

Website: www.whlib.ac.cn



中国科学院广州能源研究所
Guangzhou Institute of Energy Conversion Chinese Academy of Sciences

中国科学院广州能源研究所

Phone: +86 (0)20 87057639;

+86 (0)20 87057637

Email: web@ms.giec.ac.cn

Website: www.giec.ac.cn