基于产业技术情报的量子科技研发竞争态势分析

张颖岚，刘 静

（北京市科学技术研究院科技情报研究所，北京 100044）

摘要：为了揭示国际量子科技研发竞争态势，基于科学引文索引扩展版（Science Citation Index Expanded，SCI-Expanded）数据库，采用技术情报分析法，对2015—2024年量子计算、量子通信及量子传感领域的文献进行系统分析，涵盖研发趋势、国际竞争格局、科研实力等维度。结果表明，中国在量子通信和量子传感领域优势显著，美国在量子计算领域领先，欧洲国家整体竞争力较强。针对中国发展需求，建议强化政府投入、培育领军企业并完善人才培养体系，以提升国际竞争力。

关键词：量子产业；技术情报；产业研发；竞争态势

中图分类号：G35；TP391 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2026)02－0109－14

量子产业，作为融合量子力学原理与新一代信息技术的未来产业[1]，正在引领一场科技革命。它不仅推动现有产业的转型升级，还将催生全新的产业形态和商业模式。量子计算、量子通信和量子传感构成了量子科技的三大支柱领域，这些领域的技术突破将为解决复杂问题提供前所未有的计算能力，为信息安全带来革命性的保障，并为精密测量和探测开辟新的可能性。

自2018年以来，全球多个国家已经认识到量子科技的重要性，并相继启动了各自的量子科技战略，以推动该领域的发展[2]。美国、欧盟、英国、日本、俄罗斯等国家和地区通过政策支持和资金投入来推动量子科技的发展。此外，谷歌和微软等科技公司也在量子计算领域加大了投资，以应对全球范围内日益激烈的竞争态势[3]。2022年诺贝尔物理学奖颁发给法国物理学家阿兰·阿斯佩（Alain Aspect）、美国物理学家约翰·克劳瑟（John F. Clauser）和奥地利物理学家安东·塞林格（Anton Zeilinger），以表彰他们在量子纠缠研究领域做出的杰出贡献。这一奖项的授予不仅是对量子技术的高度认可，也标志着量子技术在科学界的重要地位及其对未来科技革命可能产生的深远影响。欧洲专利局（EPO）的报告显示，量子计算领域的发明数量在过去十年中成倍增长，增长率高于所有技术领域[4]。科学引文索引（Science Citation Index，SCI）论文统计也表明，量子信息研究已进入快速发展阶段，并在过去二十多年里持续保持高速增长态势[5]。通过情报分析方法对论文和专利数据进行深入分析，人们可以揭示量子科技领域的研究进展和研发趋势。张志强等[5]利用文献计量学方法，针对领先科研单位建立比较指标，用于揭示量子信息研究国际竞争发展态势。李英和刘建明[6]基于专利计量的方法，从专利的申请年度、地域、专利权人和典型机构以及高被引专利等多个维度分析全球量子信息技术发展现状。

基于此，本文采用技术情报分析方法，基于SCI论文数据构建研究框架，深入分析国际上量子产业的研发竞争态势与格局。不仅揭示全球主要科技强国在量子技术领域的研究动态和发展趋势，还针对中国量子产业发展现状，提出切实可行的对策建议。这些建议将有助于促进中国在量子技术领域的快速发展，增强国际竞争力，并在全球科技竞争中占据有利地位。

1 基于产业技术情报的研发竞争态势研究

伴随着国际竞争的日益激烈，针对产业技术情报分析方法的研究也逐渐增加。李伟和陈峰[7]利用竞争情报分析方法研究超级电容器产业的技术竞争态势，杨曦等[8]采用ECIRM（entrepreneur、capital、industry、resource、management的首字母缩写）改进模型分析石墨烯产业竞争格局，崔遵康等[9]通过绘制粮食作物生物育种技术专利地图构建产业竞争情报分析框架。尽管这些研究聚焦于不同

收稿日期：2025-07-07

基金项目：北京市科学技术研究院财政资助项目（25CB005－25）

作者简介：张颖岚（1993—），女，北京人，硕士，助理研究员，研究方向为科技情报；通信作者刘静（1982—），女，河北石家庄人，博士，高级工程师，研究方向为科学计量学与科技评价。

产业和技术领域，但它们在方法论上展现了文献计量学和专利情报分析的普遍适用性和有效性。

专利记录了众多技术特征，并遵循严格的规范性，因此成为技术情报研究的重要数据来源。在进行产业竞争态势分析时，能够从专利信息中提取关键的产业技术发展趋势、技术竞争的主要领域，以及竞争对手的竞争能力等有价值的竞争情报。何隽和张虹颖[10]基于专利数据，从宏观环境、国家竞争力和研究主体三个层次对基因检测产业的全球竞争态势展开分析。琚春华等[11]从国家单体的专利持有情况和国家在合作研发中的合作贡献两个方面评价不同国家在医疗设备产业核心技术领域的竞争实力。王玥等[12]采用专利家族作为分析单元，深入研究干细胞技术领域的竞争格局。刘志迎等[13]从专利数量、合作贡献和市场价值三个维度搭建指标体系，衡量研究主体在关键核心技术领域所具备的竞争实力。张贝贝和李存金[14]通过技术共现网络，进行芯片制造技术国际竞争态势分析。

基于专利的国际竞争态势分析在技术识别[11,15]、竞争预警[16]和战略布局[17]方面发挥关键作用。然而，专利开发往往侧重于竞争性，可能在一定程度上忽略了合作性[17]——这一点在量子产业的发展中至关重要。量子产业的发展是一个多学科融合的全球性进程，它不仅涵盖物理、数学、计算机等多个前沿学科[18]，而且这种跨学科的合作是推动量子技术进步的关键因素[19]。鉴于专利文献可能无法充分捕捉这种合作的深度和广度，基础性研究论文尤其是 SCI 论文，成为评估一个国家在量子技术领域长期竞争力的重要依据。这些学术论文不仅展示学术影响力和研究趋势，还涵盖国际合作和技术成熟度等重要指标，为量子产业研发的竞争态势提供一个全面的评估视角。

2　量子科技研发竞争态势

2.1　数据来源与研究方法

本文聚焦于量子产业的比较分析，选取学术论文作为文献来源，根据兰德公司《中美量子技术产业评估》报告[20]提供的关键词，制定检索式。在 Web of Science 数据库的 SCI-Expanded 核心合集中检索 2015—2024 年的期刊或会议论文，作为文献计量分析的数据基础，检索日期为 2024 年 5 月 24 日。

利用 Python 编程工具对从 Web of Science 数据库获取的数据进行清洗，提取论文出版信息、论文识别信息、论文作者信息、论文主题信息等关键信息，并根据兰德公司《美国-盟国量子科技产业基础评估》报告[21]提供的研究领域关键词标记论文研究子领域。通过文献计量学分析，统计了量子产业相关的期刊或会议论文的数量、被引用次数，以及高被引论文的数量，计算了平均被引次数、H 指数（H 指数是一个用于衡量研究者或国家科研影响力的指标，一个国家的 H 指数是 h，为当且仅当该国家有 h 篇论文每篇至少被引用了 h 次，且其余的论文中每篇被引用次数不超过 h 次）等用于评估研究产出的质量和影响力的指标。进一步地，运用了复杂网络分析方法，构建国家-子领域矩阵、国家-国家合作矩阵以及关键词共现矩阵，还使用 VOSviewer 软件绘制了国家间的合作网络和关键词共现网络，以识别和追踪量子产业研究的前沿趋势和主要参与者。图 1 详细展示了具体步骤和方法。

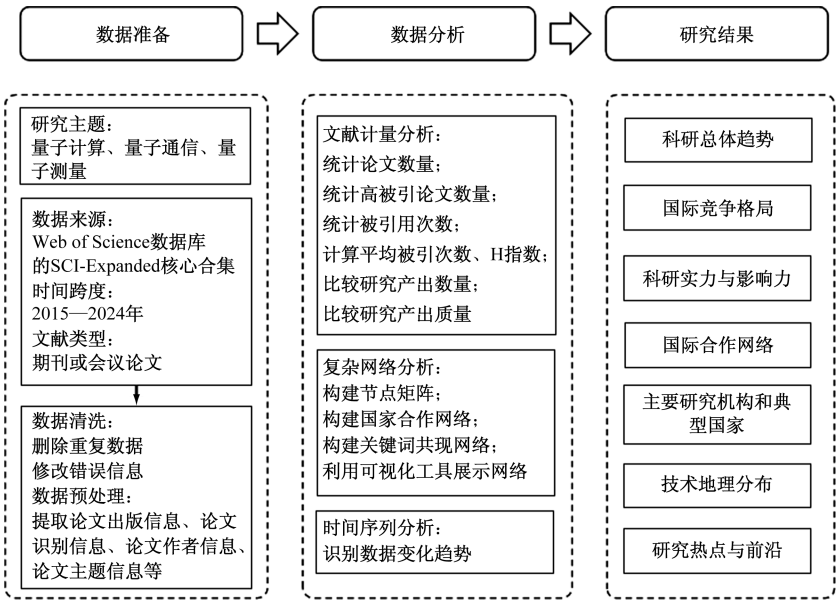


图 1　量子产业国际研发竞争态势分析框架

2.2 结果与分析

2.2.1 总体趋势

图2统计了量子计算、量子通信和量子传感领域在Web of Science数据库中近10年的论文(2024年数据不完整,不用于趋势分析),量子产业研究呈现高速增长态势。从发文量数据来看,量子计算领域论文体量最大,从2015年的2 168篇增长到2023年的5 422篇,复合年增长率约为15.4%。量子通信领域的论文产出量次于量子计算,从2015年的1 330篇增长到2023年的2 174篇,复合年增长率约为10.2%。量子传感的论文产出量虽然相对较少,但其增长速度最快,从2015年的351篇增长到2023年的1 082篇,复合年增长率约为23.3%,显示巨大的潜力。未来,随着技术的进一步成熟和应用的拓展,预计量子产业的研究将继续增长,带来更多的创新和突破。

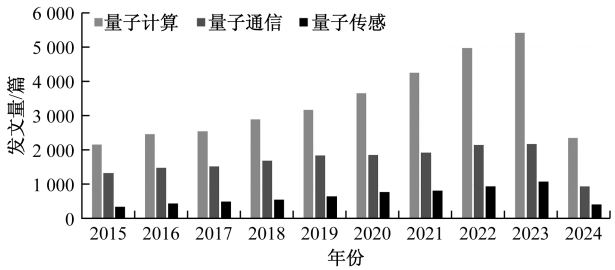


图2 2015—2024年量子产业SCI论文总量

2.2.2 国际竞争格局

量子科技的发展在全球范围内引起了广泛关注,各国在量子计算、量子通信和量子传感领域的科研表现各有特色。图3反映了近10年来量子科技领域SCI论文发表量最多的10个国家的发展态势。量子计算领域,中国和美国在论文发表数量上遥遥领先,德国、日本、英国和印度紧随其后且科研产出相对稳定,加拿大、法国、意大利和西班牙表现出平稳的增长趋势。量子通信领域,中国的研究尤为突出,成功发射了世界首颗量子科学实验卫星“墨子号”,标志着其在全球量子通信研究中的引领地位;美国紧随其后,凭借其坚实的科研基础和成熟的创新生态,在全球研究中占据重要地位;德国、英国、加拿大、日本、意大利、西班牙和法国的科研产出保持稳定,而印度则显示出较快的增长势头。量子传感领域,中国的研究成果最为突出,论文数量从2015年起呈现显著增长,迅速超过其他国家;美国在该领域的研究产出也一直保持稳定且强大;德国、英国、意大利、日本、法国、澳大利亚、加拿大和俄罗斯近年来研究活动也呈现持续上升的趋势。综合来看,中国在量子通信和量子传感领域的研究尤为突出,而美国在量子计算和量子传感领域表现出色。德国和英国在量子计算和量子传感领域也表现出稳定的科研水平。印度在量子通信领域的增长势头显著,显示出较快的发展速度。其他国家如日本、法国、澳大利亚、加拿大和俄罗斯等也在各自的领域内不断进步,共同推动了全球量子科技的发展。

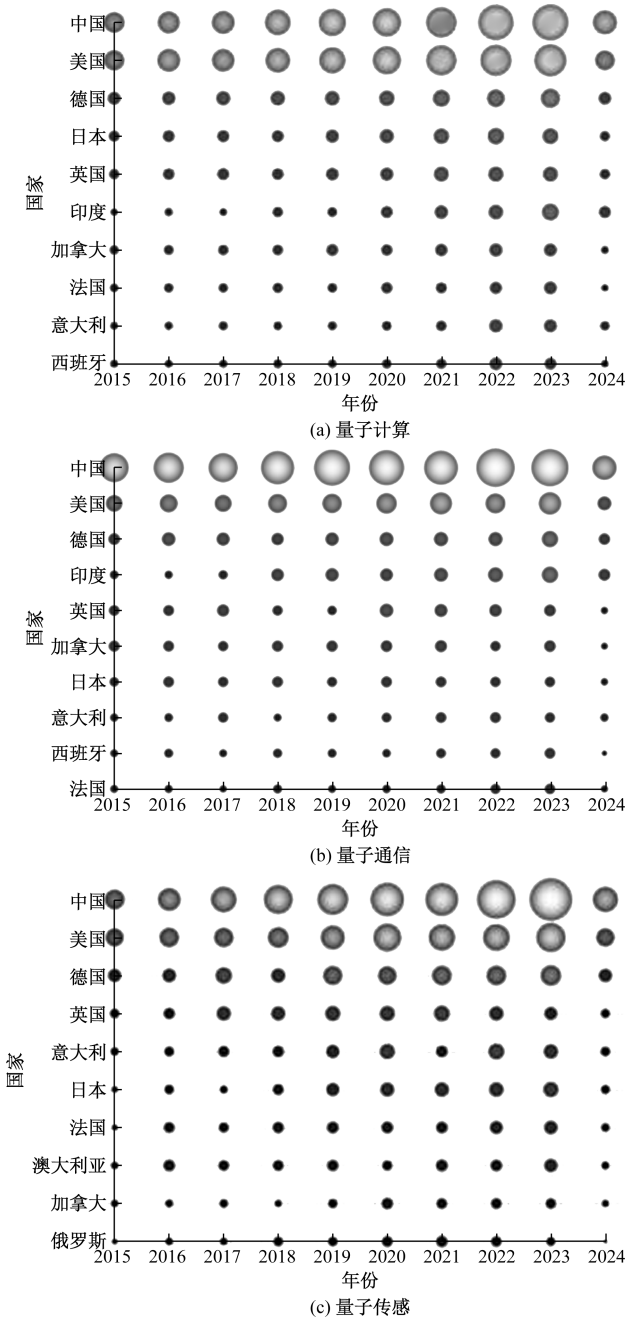


图3 2015—2024年量子产业科研领先国家学术论文数量气泡图

2.2.3　科研实力与影响力

表 1 提供了量子计算领域领先国家的科研论文统计情况。中国论文数量位居榜首。尽管如此，美国在总被引次数、高被引论文数量和 H 指数方面均领先，显示出其研究的影响力和深度。德国、英国和加拿大的总被引次数也相对较高，且拥有一定数量的高被引论文。印度在量子计算领域的论文被引次数和高被引论文数量相对较低，其研究的影响力和认可度偏低。

表 2 提供了量子通信领域领先国家的科研论文统计情况。中国在论文总数和高被引论文数量方面位居榜首，显示了其在该领域的研究活跃度和广泛的科研投入。然而，美国的总被引次数和 H 指数均最高，反映其研究的深度和全球影响力。英国的平均被引次数最高，这表明其研究质量和学术影响力较高。相比之下，印度的高被引论文数量较低，其研究的影响力和认可度不如其他国家。

表 3 提供了量子传感领域领先国家的科研论文统计情况。中国以最多的论文总数领先，但平均被引次数相对较低，显示其研究广度优于深度。美国在总被引次数、高被引论文数量和 H 指数上均表现最佳，显示其研究的高质量和深远影响力。德国的研究同样表现出较高的质量和影响力。意大利虽然论文数量不多，但平均被引次数最高，表明其研究可能集中在高影响力领域。俄罗斯在这些指标上相对较低，显示其在量子传感领域的国际影响力有待提升。

表 1　2015—2024 年量子计算领域领先国家论文统计情况

国家	论文总数	总被引次数	平均被引次数	高被引论文数量	H 指数
中国	10 128	160 121	16	156	140
美国	9 059	333 235	37	432	236
德国	3 239	111 722	34	131	134
日本	2 517	67 757	27	75	113
英国	2 319	84 517	36	108	132
印度	1 932	19 716	10	14	51
加拿大	1 781	66 828	38	87	112
法国	1 560	54 152	35	65	100
意大利	1 485	39 184	26	43	90
西班牙	1 348	37 582	28	43	85

表 2　2015—2024 年量子通信领域领先国家论文统计情况

国家	论文总数	总被引次数	平均被引次数	高被引论文	H 指数
中国	6 539	93 725	14	87	111
美国	2 286	65 311	29	82	115
德国	1 205	29 980	25	42	79
印度	957	7 602	8	4	37
英国	946	32 383	34	47	86
加拿大	791	25 240	32	33	75
日本	710	16 823	24	17	59
意大利	639	13 676	21	10	53
西班牙	552	13 733	25	16	50
法国	525	12 210	23	13	57

表 3　2015—2024 年量子传感领域领先国家论文统计情况

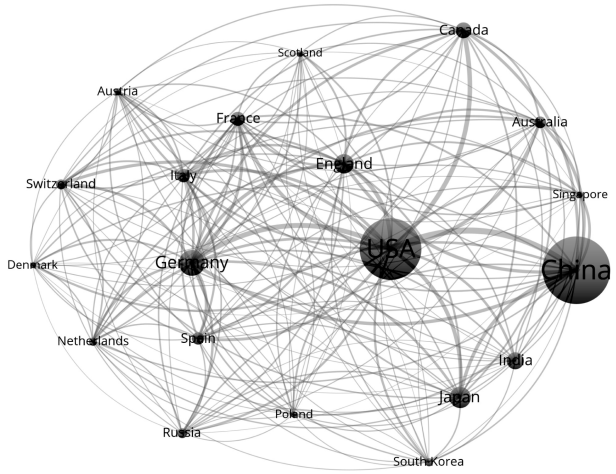
国家	论文总数	总被引次数	平均被引次数	高被引论文数量	H 指数
中国	2 459	32 991	13	24	71
美国	1 441	46 570	32	46	98
德国	790	24 372	31	26	74
意大利	502	17 669	35	13	69
日本	433	12 130	28	10	55
英国	401	9 320	23	21	48
法国	352	10 223	29	13	51
澳大利亚	339	9 326	28	10	51
加拿大	253	9 450	37	16	46
俄罗斯	234	3 912	17	4	29

可见，美国在量子产业研发方面显示出较强的竞争优势，特别是在研究的影响力和深度方面。中国虽然在论文数量上领先，但在研究的影响力和深度方面还有提升空间。德国、英国等欧洲国家也展现较强的竞争力。印度和俄罗斯正在扩大他们在量子科技领域的研究工作。

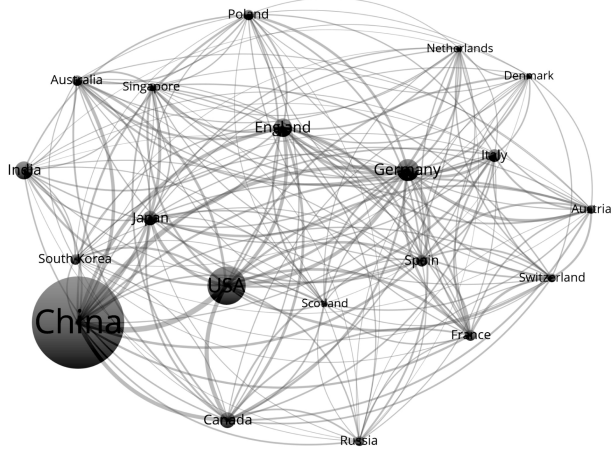
2.2.4　国际合作网络

量子科技的发展和进步是一个全球性的进程，图 4 展示了 2015—2024 年量子科技国家间基于论文合著的学术合作网络。量子计算领域，美国和中国作为两个最大的合作节点，与德国、英国、加拿大等国保持密切的学术交流和研究协作。从区域特征来看，中国与日本、澳大利亚和新加坡等国形成紧密的科研团体，德国、法国、意大利和西班牙等欧洲国家通过论文合著形成一个密集的学术集群。量子通信领域，中国作为最大的合作节点，与美国、加拿大、德国、英国、澳大利亚和日本等国保持了密切的合作关系。美国与德国、英国、法国和日本等国的紧密学术联系同样显著。欧洲内部，尤其是德国与其他欧盟国家的合作非常活跃。量子传感领域，中国、美国和德国作为最大的三个节点，展示了它们在量子传感领域的科研活跃性和广泛的国际合作。中国与美国的合著论文数量显著，与德国和英国等欧洲国家的合作也十分密集。美国的合作网络覆盖全球，而德国在欧洲内部与法国、荷兰等邻国的合作尤为突出。综合来看，美国和中国在全

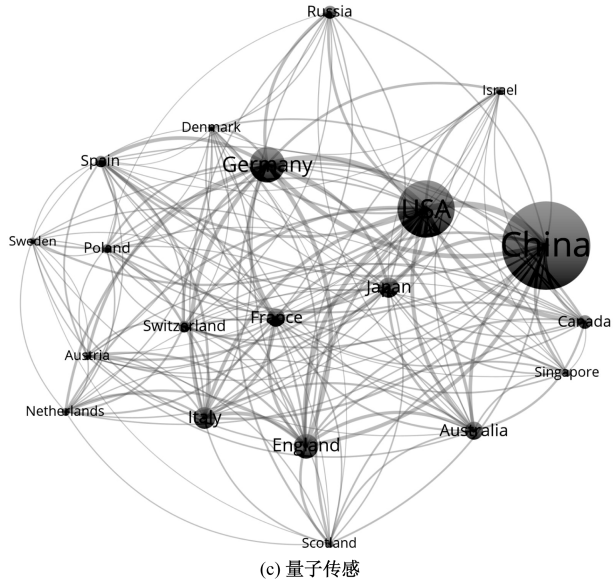
球量子科技领域展现领导地位,与多个国家建立了紧密的学术合作关系。亚洲的中国、日本和新加坡等国家在科研领域紧密相连,而德国、法国、意大利等欧洲国家在欧盟的支持下形成一个密集的学术集群,这进一步促进全球量子科技的发展和创新。



(a) 量子计算



(b) 量子通信



(c) 量子传感

图 4　2015—2024 年量子产业科研领先国家间学术合作网络

2.2.5　主要研究机构

表 4 列出了 2015—2024 年量子计算领域发表论文数全球排名前 20 的研究机构,包括美国 7 家,中国、法国、德国、日本各 2 家,以及瑞士、意大利、俄罗斯、英国、加拿大各 1 家。在这些机构中,中国科学院、美国能源部、法国国家科学研究中心和德国马普学会等国家级科研机构在量子计算研究中占据重要地位。在高校方面,加州大学系统不仅在论文总数上位列前茅,其论文的总被引次数也显示了其在量子计算领域的广泛研究活动和高影响力。麻省理工学院的论文数量不及加州大学系统,但其 H 指数是最高的,表明其研究质量和深度特别突出。同时,清华大学的论文平均被引次数最高,其发表的研究成果在学术界具有较高的认可度和影响力。

表 5 展示了 2015—2024 年在量子通信领域发表论文数全球排名前 20 的研究机构,包括中国机构 7 家,美国 4 家,法国、德国、新加坡、加拿大各有 2 家,以及俄罗斯和意大利各 1 家。与量子计算领域相似,国家科研机构在推动量子通信前沿技术的发展中发挥重要作用,其中,中国科学院的论文总数、总被引次数以及高被引论文数量均位居首位,法国国家科学研究中心、俄罗斯科学院、德国马普学会等研究机构也表现出显著的科研产出。北京邮电大学、山西大学、印度理工学院、滑铁卢大学、中南大学、上海交通大学等教育机构发表了大量研究成果,但其高被引论文数量偏少。

表 6 列出了 2015—2024 年量子传感领域发表论文数全球排名前 20 的研究机构,包括中国 4 家,美国 4 家,德国 3 家,意大利 2 家,法国 5 家,俄罗斯和瑞士各 1 家。国家科研机构在量子传感研究中占据了重要地位,中国科学院、美国能源部、法国国家科学研究中心和德国马普学会等机构的论文数量和高被引论文数量都很高。在高等教育机构方面,加州大学系统发表研究论文最多,麻省理工学院次之,但其 H 指数、平均被引次数和高被引论文数都很高。瑞士联邦理工学院也显示了较高的学术认可度和影响力,其 H 指数和被引频率较高。相比之下,清华大学、北京航空航天大学和山西大学等中国高等教育机构在高被引论文数量上较少。

总体来看,量子科技领域的研究机构主要集中在中国、美国和欧洲的国家级科研机构和知名高校。中国科学院在量子计算、量子通信和量子传感三个子领域的论文总数和高被引论文数量均位居前

表 4 2015—2024 年量子计算领域主要研究机构发文情况

机构	论文总数	总被引次数	平均被引次数	H 指数	高被引论文数量
中国科学院(含中国科技大学、中国科学院大学)	2 155	51 503	24	98	59
美国能源部	1 339	49 800	37	97	69
法国国家科学研究中心	1 165	42 860	37	85	47
加利福尼亚大学	1 060	51 621	49	101	79
麻省理工学院	666	48 041	29	104	76
清华大学	664	18 522	72	63	21
马里兰大学系统	637	28 685	28	86	47
马克斯·普朗克科学促进协会(马普学会)	605	31 873	18	87	46
马里兰大学帕克分校	585	27 838	45	85	46
苏黎世联邦理工学院	573	31 981	28	84	45
亥姆霍兹联合会	531	18 359	53	63	21
意大利国家研究委员会	529	18 132	48	56	14
俄罗斯科学院	485	7 077	56	40	5
马黎西岱大学	485	20 204	35	57	20
哈佛大学	484	33 373	34	87	64
牛津大学	483	26 090	15	71	31
美国国家标准与技术研究院	471	21 698	42	74	33
东京大学	460	19 372	69	66	26
滑铁卢大学	459	15 921	54	59	18
日本理化学研究所	432	21 207	46	70	28

表 5 2015—2024 年量子通信领域主要研究机构发文情况

机构	论文总数	总被引次数	平均被引次数	H 指数	高被引论文数量
中国科学院(含中国科技大学、中国科学院大学)	1 231	32 540	26	81	48
北京邮电大学	497	6 628	31	39	2
法国国家科学研究中心	406	9 687	25	53	8
清华大学	291	10 797	13	51	21
山西大学	286	3 508	24	27	4
俄罗斯科学院	268	3 353	37	28	1
新加坡国立大学	266	7 064	12	39	8
滑铁卢大学	263	6 967	13	46	3
马克斯·普朗克科学促进协会(马普学会)	261	8 157	27	45	11
南京邮电大学	239	4 641	26	34	12
印度理工学院系统	234	1 574	31	19	0
中南大学	220	1 804	19	20	0
美国能源部	220	8 665	7	45	16
麻省理工学院	201	8 822	8	45	12
南京大学	186	2 996	39	28	5
上海交通大学	182	3 504	44	29	2
意大利国家研究委员会	171	3 405	14	31	2
加泰罗尼亚理工大学	169	8 016	16	36	10
华氏度大学联盟	167	2 200	19	25	0
巴塞罗那科学与技术研究院	165	8 118	10	37	10

列。美国能源部和加州大学系统在量子计算和量子传感领域表现突出,并且在量子通信领域也有所贡献。欧洲的国家级科研机构,如法国国家科学研究中心和德国马普学会,在均衡贡献和深入研究方面表现卓越,具有较高的 H 指数和平均被引次数。亚洲其他国家,特别是日本和新加坡,在量子通信领域的研究成果也值得关注。此外,企业研究所和跨学科研究中心等其他类型的研究机构,已经在量子科技的创新和发展中发挥着重要作用,通过跨学科和跨领域的合作,推动了量子科技的快速进步。

2.2.6 技术地理分布

表7详细展示了2015—2024年量子计算领域领先国家在不同子领域的SCI论文发表情况。从数据可见,量子模拟、超导量子比特、保真度和量子

表6 2015—2024年量子传感领域主要研究机构发文情况

机构	论文总数	总被引次数	平均被引次数	H指数	高被引论文数量
中国科学院(含中国科技大学、中国科学院大学)	619	12 881	21	54	13
法国国家科学研究中心	281	7 564	27	46	8
美国能源部	217	5 780	27	40	5
意大利国家研究委员会	180	4 684	26	33	3
加州大学系统	179	7 354	41	46	6
意大利国家核物理研究院	166	3 823	23	32	3
麻省理工学院	153	9 910	65	44	11
美国国家标准与技术研究院	151	5 552	37	40	7
山西大学	147	1 887	13	22	3
马克斯·普朗克科学促进协会(马普学会)	139	5 099	37	36	4
俄罗斯科学院	129	1 423	11	21	1
索邦大学	121	3 208	27	31	2
乌尔姆大学	119	4 243	36	31	4
瑞士联邦理工学院联盟	117	6 688	57	37	10
清华大学	115	2 116	18	24	3
北京航空航天大学	113	1 197	11	18	0
亥姆霍兹联合会	109	2 480	23	27	3
巴黎文理研究大学	109	3 107	29	31	1
巴黎西岱大学	95	2 443	26	26	3
巴黎萨克雷大学	95	3 370	35	30	4

表7 2015—2024年量子计算领域领先国家的子领域发文情况

领域		中国	美国	德国	日本	英国	加拿大	法国	印度	意大利	西班牙
算法和终端用户应用	量子模拟	612	1 010	425	169	225	136	225	102	157	198
	量子机器学习	241	200	60	29	59	57	47	89	54	65
	优化策略	687	758	204	185	155	158	114	176	124	87
	复杂算法	115	108	25	21	29	19	12	23	19	8
	格罗弗算法	127	99	16	13	27	15	14	27	13	15
	舒尔算法	31	30	4	4	8	5	2	17	0	7
	变分量子本征解	54	144	30	37	40	42	20	15	14	15
	爱分量子征求解器(QAOA)	46	108	36	7	15	13	11	4	17	15
基本计算范式	量子退火	60	284	48	171	46	62	20	19	63	26
	族态	312	187	92	119	54	38	40	59	24	17
	绝热量子计算	22	54	11	17	8	6	3	4	6	11
	玻色子采样	67	75	37	17	38	32	14	0	23	7
	噪声中间尺度量子	187	251	72	55	82	44	28	18	32	36
	容错重子计算	267	484	118	110	114	105	52	37	25	35
硬件方法	光学计算	385	244	47	39	50	26	40	90	17	18
	单光子技术	526	362	205	103	110	68	107	38	73	36
	量子点	385	398	184	124	92	66	116	81	46	44
	自换量子比特	107	233	96	90	59	36	49	13	35	32
	超导量子比特	411	643	188	149	90	90	87	42	74	58
	被困量子	94	208	103	18	56	36	24	19	24	45
	理德伯原子	273	209	156	33	78	26	90	23	58	58
	氮空位中心	173	63	49	30	8	5	5	4	3	6
	马约拉纳费籽	154	165	58	47	22	20	21	14	17	16
关键推动因素、特征描述和基准测试	量子纠缠	187	484	143	89	116	96	47	50	29	39
	量子控制	164	146	47	26	21	30	28	9	18	20
	保真度	1 153	927	279	197	190	177	126	103	86	88
	最子存储器	144	145	49	37	34	28	24	15	11	14

优化是各国科研人员普遍关注的主要应用领域，这些领域的研究对于推动量子计算技术的实际应用至关重要。相比之下，量子机器学习、量子算法、绝热量子计算和玻色采样等基础范式的研究相对较少，这些领域的突破有望扩展量子计算的理论和应用边界。具体而言，中国在量子模拟、单光子技术、保真度、簇态、超导量子比特和 Rydberg 原子等领域的研究颇具深度，显示了其在量子信息基础研究和实验物理方面的集中投入。美国则在量子模拟、优化策略、容错量子计算、超导量子比特和量子退火等领域表现出强劲的研究力量，突显了其在量子硬件开发和算法优化上的领导地位。德国和日本则在量子模拟、单光子技术、量子点、容错量子计算和量子退火等技术上有显著贡献，反映这些国家在高精度科学仪器和量子材料研究上的优势。

表 8 详细展示了 2015—2024 年量子通信领域领先国家在不同子领域的 SCI 论文发表情况。全球范围，量子密钥分发、量子纠缠、保真度和量子密码学等领域备受关注和广泛研究，而纠缠浓缩、量子纠错等领域则受到相对较少关注。中国在量子密钥分发、量子纠缠等实现安全量子通信网络基础的子领域明显领先，可见中国在量子通信关键技术领域的研究和开发中的领先地位。美国在量子纠缠、保真度等领域科研产出较多，展示了其在基本量子通信协议和量子状态、运算精度方面的研究实力。

表 9 详细展示了 2015—2024 年量子传感领域领先国家在不同子领域的 SCI 论文发表情况。在全球范围内，氮空位中心和单光子等技术领域备受关注并被广泛研究。相比之下，量子辐射测量、瑞德堡原子、重力仪、暗物质探测和量子雷达等领域的关注程度相对较低。中国在幽灵成像方面的研究量远超其他国家，同时在氮空位中心和量子计量学方面也展示了显著的研发成果。美国在几乎所有子领域都表现出强大的研究能力，尤其是在氮空位中心、单光子、量子计量学等领域。德国和英国等欧洲国家虽然在总体研究量上不及中国和美国，但在诸如氮空位中心和量子计量学等特定技术领域的研究也颇具深度和影响力。

2.2.7　研究热点与前沿

图 5 展示了 2015—2024 年全球量子计算领域研究热点的时间演进。在 2018 年之前，关键词如“量子信息”“量子模拟”“量子通信”显示出较强的连接和突出性，表明量子计算研究主要集中在基础理论和关键概念的探索上。随着技术的成熟和更多实验室及企业的投入，研究焦点开始转向实用化技术和具体算法的开发，特别是“量子机器学习”“量子硬件（如超导量子比特）”“量子错误纠正”等领域逐渐受到更多关注，同时量子计算与人工智能的结合通过“量子机器学习”这一概念的出现，展示了在加速机器学习算法处理和模型训练方面的探索。随着量子技术的进一步成熟，量子计算标准的制定也开始受到关注，这些标准涉及量子硬件的制造、量子软件的编程以及量子信息的安全传输。此外，量子计算的研究开始与其他高科技领域交叉，特别是在数据安全领域，“量子加密”和“后量子密码学”成为研究的热点。总体而言，量子计算的研究已经从基础理论和技术验证转向实际应用和多技术整合，现代量子计算的研究不仅聚焦于算法和硬件的发展，还广泛涉及如何将量子技术与现有技

表 8　2015—2024 年量子通信领域领先国家的子领域发文情况

领域		中国	美国	德国	印度	英国	加拿大	日本	意大利	法国	西班牙
量子保密通信	量子密码学	373	187	62	101	69	54	52	40	45	35
	量子密钥分发	1 979	378	162	166	246	191	174	110	113	120
基于纠缠协议	纠缠态	2 194	826	441	393	301	263	226	246	217	185
	量子隐形传态	407	104	31	96	36	35	34	39	9	17
	量子秘密共享	222	17	7	26	6	9	6	2	4	3
	纠缠交换	245	61	26	22	22	16	17	13	12	9
	纠缠浓缩	97	20	5	9	4	2	12	6	8	4
	测量设备无关协议（MDI 协议）	357	34	5	19	36	31	18	5	11	21
关键推动因素、特性描述和基准测试	保真度	706	292	147	104	88	88	72	61	61	36
	量子存储器	245	148	67	22	46	55	52	13	36	23
	量子中继器	160	118	94	7	48	46	57	18	28	15
	量子保密通信	32	49	14	9	13	16	13	3	3	5

表 9　2015—2024 年量子传感领域领先国家的子领域分布

领域		中国	美国	德国	英国	法国	意大利	日本	澳大利亚	加拿大	俄罗斯
技术方法与应用	原子干涉仪	170	124	78	58	75	45	10	21	6	2
	氮空位中心(NV 中心)	217	184	165	37	33	25	113	63	13	15
	单光子	126	109	61	42	37	64	21	26	24	11
	冷原子	59	32	24	17	39	15	3	5	4	2
	玻色—爱因斯坦凝聚态	25	32	29	8	11	7	2	7	2	7
	量子点	16	26	26	10	10	7	14	5	4	0
	里德伯原子	17	17	5	8	8	2	2	0	3	1
成像应用	幽灵成像	755	70	31	23	27	20	30	33	15	21
	量子雷达	40	17	2	3	4	9	0	2	18	0
	量子成像	176	76	33	21	21	22	5	16	16	8
	量子照明	28	30	5	11	1	9	1	7	10	0
非成像应用	磁力测量	159	103	86	26	12	18	58	35	7	28
	陀螺仪	28	26	6	8	18	6	1	6	1	8
	原子钟	28	44	20	10	8	12	7	8	7	1
	暗物质	7	41	18	14	10	10	9	5	1	1
	重力仪	46	18	15	5	17	9	2	4	2	1
	量子辐射测量	1	0	3	0	1	3	0	1	0	0
量子计量学	量子计量学	459	214	134	140	76	110	79	50	55	33
	自旋压缩	179	102	44	33	19	26	15	24	19	11

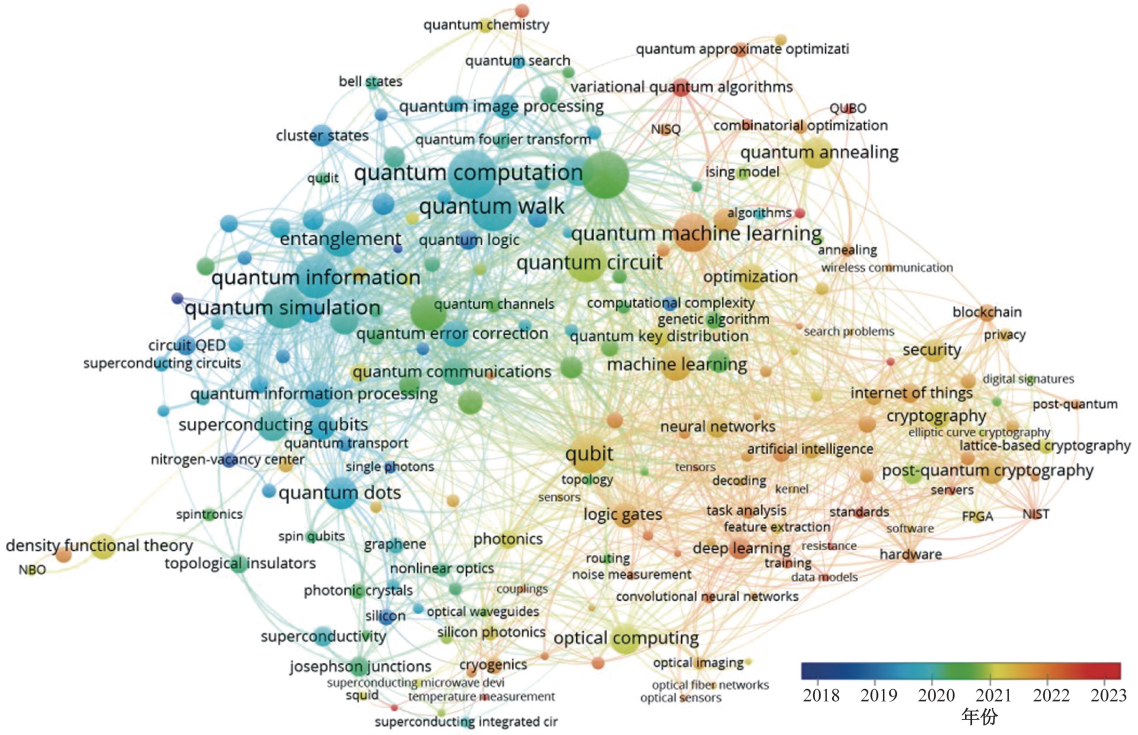


图 5　2015—2024 年量子计算领域论文关键词共现网络

术结合,以解决实际世界问题,如安全通信和高效数据处理,这一过程不仅展示了技术的发展轨迹,还突出了量子计算在未来科技领域中的重要角色。

图 6 展示了 2015—2024 年全球量子通信领域研究热点的时间演进。量子加密、量子密钥分配和量子纠缠是图中最显著的研究领域,这些领域是量子通信研究的核心,其中量子密钥分配是一种利用量子力学原理来实现安全通信的技术,量子纠缠、量子隐形传态等主题在量子通信和量子信息处理中起着关键作用。量子网络作为量子通信的一个关键组成部分,量子网络的构建和优化是目前研究的重点之一,这反映量子通信技术向更广泛应用和集成方向的发展。近年来,随着量子计算能力的提升,后量子密码学成为应对量子计算威胁的重要研

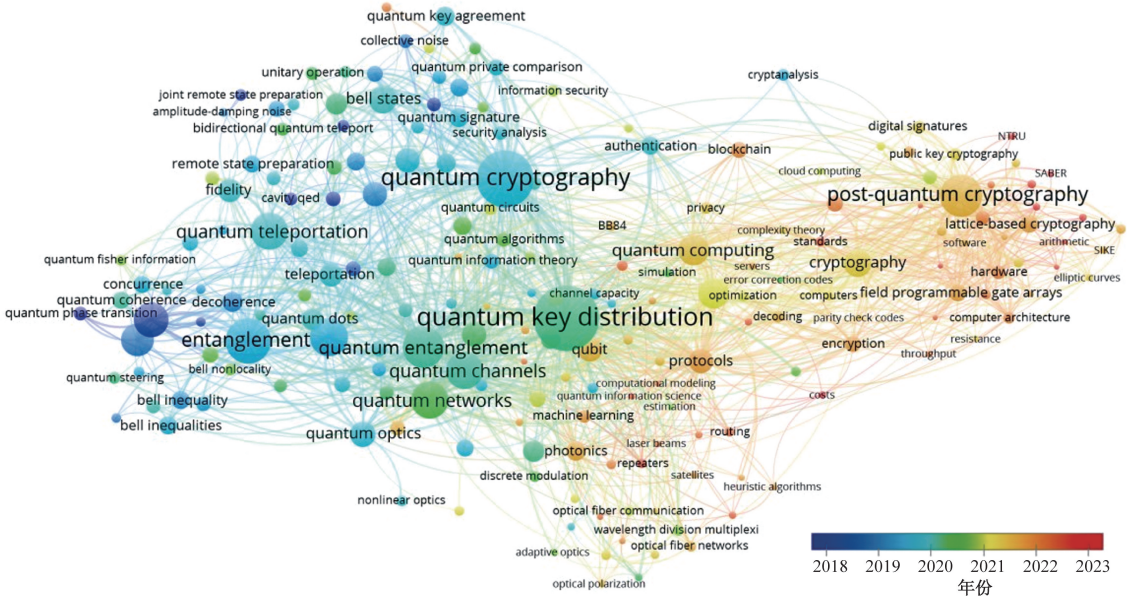


图 6　2015—2024 年量子通信领域论文关键词共现网络

究领域。此外，量子通信的基础设施，如光学纤维和波分复用技术，由于其在实现量子通信中的基础作用，也成为研究的焦点。随着对安全通信需求的增加，国际合作和统一技术标准的制定日益重要。随着技术的成熟，量子通信的实用化和商用化预计将是未来的主要趋势。

图 7 展示了 2015—2024 年全球量子传感领域研究热点的时间演进。其中，量子度量学、幽灵成像和氮空位中心等节点最为突出。量子度量学为量子传感领域提供了新的理论基础和技术手段，它利用量子叠加、纠缠等量子特性，能够突破经典传感器无法达到的精度和灵敏度极限，在导航、环境监测、材料科学和医学成像等多个领域有着重要的应用前景。幽灵成像，作为一种基于量子关联性的成像技术，虽然目前还处于发展阶段，但其超灵敏度、无损成像和独特的成像方式，为量子传感领域带来了新的机遇和挑战。氮空位中心以及如金刚石、碳化硅、氮化硼等新兴量子技术材料，正在迅速扩展其应用领域。这些材料在制造高性能量子传感器中扮演了重要角色，促进了量子传感器在生物成像、网络安全、物质科学等领域的研究快速推进。

2.3　研究结论

从量子科技研发趋势来看，量子三大领域近 10 年呈现高度增长态势，未来仍会持续增长。量子计算研究正从量子信息、量子模拟等基础理论向量子硬件、量子纠错、量子机器学习等实用技术和量子加密、后量子密码、安全通信等标准制定或多领域融合转变，量子通信聚焦密钥分发、纠缠、网络构建、后量子密码和基础设施，量子传感则集中在量子度量学、幽灵成像、NV 中心及新材料应用。从国际竞争格局来看，总体呈现“中美领跑，欧洲整体强劲、日印加速追赶”格局。中国在量子通信领域凭借“墨子号”卫星等成果占据引领地位，量子传感领域论文数量增长迅速并领先，量子计算领域论文数量位居前列；美国在量子计算领域占据明显优势，在量子传感领域保持强大实力，整体科研基础和创新生态坚实；欧洲国家竞争力强，德国、英国等在量子计算和量子传感领域展现稳定的高水平科研产出，形成了强劲的区域协同发展态势。从研究实力来看，中国在量子通信、量子传感及量子计算领域论文总数领先，显示出高活跃度和广泛科研投入，但在研究深度和影响力方面相对较低；美国在三大领域均展现出研究的高质量、深远影响力和深厚底蕴，尤其在研究深度和全球认可度上优势明显；欧洲的德国、英国等国家展现出较强的竞争力和高质量研究，总被引次数较高且拥有一定数量的高被引论文，学术影响力突出。

3　全球量子科技研发竞争特征

3.1　美国量子科技研发竞争特征

美国政府的支持为其量子产业的创新和持续增长奠定了坚实的基础，确保了美国在这场科技革命中的竞争优势。美国已出台《国家量子倡议法案》《美国量子网络战略愿景》和《量子网络基础设施法案》等法案和战略文件，并成立了美国国家量

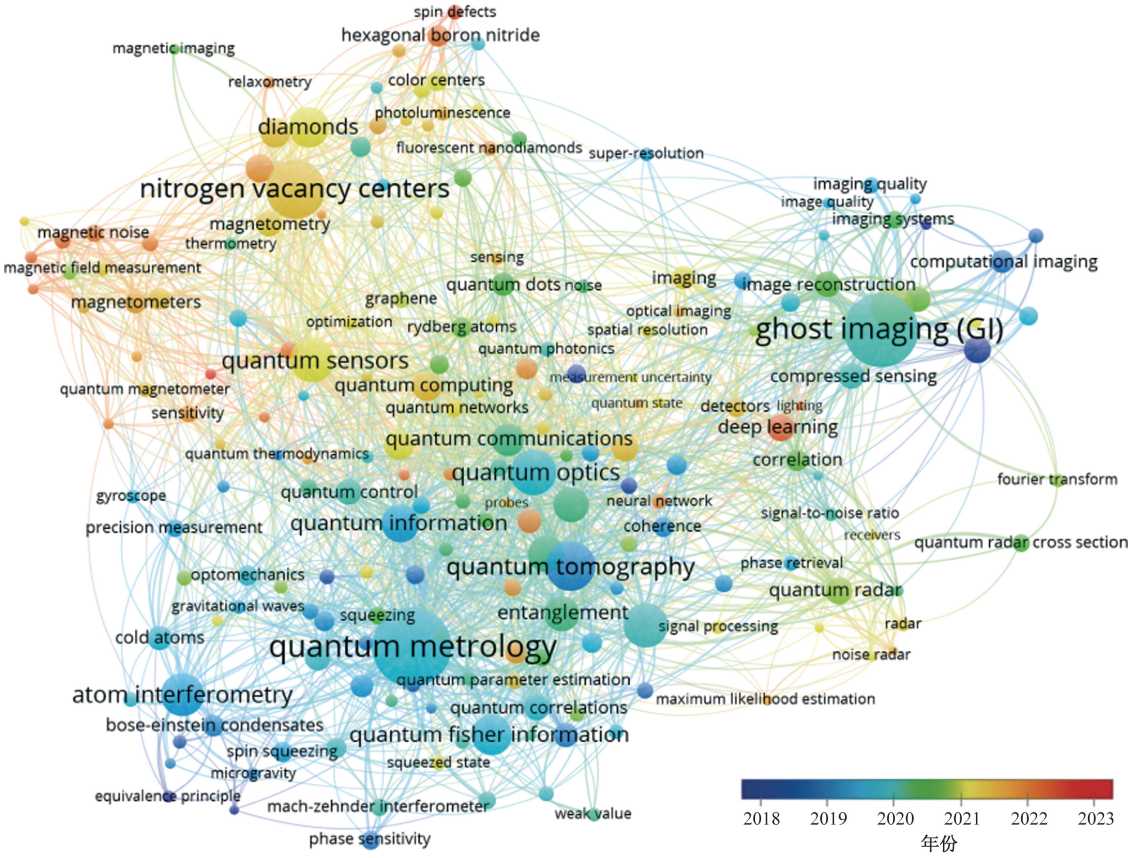


图 7　2015—2024 年量子传感领域论文关键词共现网络

子协调办公室、国家量子倡议咨询委员会等领导机构,从战略层面推动量子技术研发的进步。同时,美国政府对量子科技的研发投入呈稳定增长态势,据 2023 年底发布的《国家量子倡议》补充报告显示,自 2018 年以来美国政府对量子信息科学的研发累计投资已达到 39.40 亿美元,体现了其对量子研发领域的持续投入。

美国资本市场相对成熟,为量子产业技术研发提供了社会资本的保证。企业可以通过债务融资、股权融资、政府资助等多种方式筹集资金。从投资者角度来看,美国企业投资来源具有多样性,不仅包括本土投资机构、政府部门,还有韩国、中国和英国等国家的外国机构。全球前沿科技咨询公司 ICV TAnK 发布的《美国和中国量子产业融资比较分析》报告显示,2019—2023 年,美国在全球量子产业投融资总额中占据了 65%的份额。

美国的大型科技公司在量子产业的研发和商业化方面发挥了关键作用。谷歌、英特尔、微软和 IBM 等公司均已建立了量子科研团队,并致力于研发量子计算硬件。例如,谷歌推出的拥有 53 个量子比特的量子芯片 Sycamore,IBM 发布的代号为“Heron”的 IBM Quantum Heron 量子处理器。这些公司还在各自的云平台上推出了量子计算服务,如微软通过 Azure Quantum 平台提供对量子计算机和软件开发工具的云访问。此外,美国的大型科技公司还通过风险投资支持量子计算初创公司或研究机构,如微软的风险投资部门参与了对量子计算技术研发初创公司 PsiQuantum 融资,IBM、谷歌为芝加哥大学和东京大学的量子计算研究捐赠 1.5 亿美元。

3.2　欧洲量子科技研发竞争特征

欧洲的量子技术合作网络通过整合资源和努力,为该地区的量子产业发展提供了坚实的基础和动力。这一网络涵盖旗舰计划、倡议、研究资助和国家层面的合作项目,并且得到欧洲各国政府和欧盟层面的广泛支持与认可。量子旗舰计划自 2018 年启动,是该网络的核心部分,旨在支持欧洲在量子技术领域的科学研究和产业发展。国际量子技术合作计划(QuantERA)计划作为欧洲量子技术研究资助的领导者,连接了来自 31 个国家的 41 个研究资助组织,致力于推进量子技术领域的高质量研究与创新,并促进跨国界研究人员之间的合作。

2019年,欧洲量子通信基础设施(EuroQCI)倡议启动,目的是建设和部署一个横跨整个欧盟的安全量子通信基础设施,整合基于量子物理的系统到现有通信基础设施中,提供额外的安全层,保护敏感数据和关键基础设施。2023年底,11个欧盟成员国签署了《欧洲量子技术宣言》,标志着成员国之间在量子技术领域的合作进一步加深,共同创建一个横跨欧洲的顶级量子技术网络。

欧洲的量子产业凭借深厚的学科积累和丰富的人力资源,展现出强大的创新能力和持续的竞争力。欧洲拥有众多在量子技术领域领先的高等教育机构。英国、德国、西班牙、荷兰和瑞士等国家拥有提供量子技术硕士学位的高校,这些高校提供了深入的理论知识和实践技能培训,为该领域培养了大量专业人才。根据麦肯锡第三次量子技术监测与产业报告的统计数据,2023年欧洲拥有量子技术硕士学位的高校23所,2023年欧洲增设量子研究项目的高校53所。

此外,欧洲的量子初创企业正在经历快速增长,并且在全球范围内越来越受到关注。根据Sifted的报道,尽管许多风险资本支持的公司在筹集资金方面遇到困难,但欧洲的量子初创公司在2023年的投资较上一年增长了3%,达到7.81亿美元,是北美地区的三倍多,凸显了欧洲在量子技术领域的积极投资趋势和发展潜力。

3.3 中国量子科技研发竞争特征

中央和地方加大投入力度,加快量子产业发展,为中国量子产业的持续创新和保持领先优势奠定了坚实的基础。《"十三五"国家科技创新规划》将量子通信与量子计算机列为重大科技项目,《"十四五"规划纲要和2035年远景目标纲要》进一步明确了量子领域的科技攻关任务。中国的量子科技领域投资规模尤为显著,据前瞻产业研究院报告,2023年的投资总额高达150亿美元,位居全球第一。此外,中国的量子信息企业主要分布在京津冀、长三角等地区,形成了产业协同效应,这为量子产业的创新和应用提供了有力促进。

中国在量子信息技术领域的强大科研实力和多元化的技术路线探索,有效推动了该技术的实用化和产业化发展。经过近30年的发展,中国在量子信息科技领域已实现了从跟踪、并跑到部分领跑的飞跃,整体上展现强大的科研实力。在量子通信研究和应用方面,中国处于国际领先地位,尤其是"墨子号"量子卫星与"京沪干线"结合,构建了天地一体化广域量子保密通信网络的雏形,成为国际量子通信研究的标志性成就。在量子计算领域,中国探索了超导、离子阱、硅量子点等多种技术路线,其中"九章二号"和"祖冲之二号"量子计算原型机的问世,展示了中国在光量子和超导两条技术路线上实现"量子优越性"的突破,使中国成为全球唯一在两种物理体系都达到该里程碑的国家。此外,在量子精密测量领域,中国在多个方向上已达到国际领先或先进水平,进一步巩固了我国在全球量子科技竞争中的地位。

4 中国量子科技发展面临的挑战以及对策建议

整体来看,量子产业正处于从科学研究发展到产品应用的阶段,我国与全球保持同步,在量子领域从基础研究、器件研发到产业布局均具备良好的基础和优势。然而,要推动量子科技创新并引领全球发展,仍面临诸多挑战和不足。

(1)具有技术创新引领能力的科技领军企业不足,产业化发展任重道远。量子产品研发和技术创新属于高技术和人才壁垒行业,限制了企业的进入。中国量子技术研发仍以科研院所和大学为主,技术成果转化机制不成熟、速度较慢,企业前期研发参与程度较低,具有技术创新引领能力的科技领军企业不足。据兰德公司《对美国和中国量子技术产业基础的评估》报告数据,美国目前至少有182家企业开展技术研究和应用,谷歌、IBM、英特尔等大型科技企业已成为量子计算领域业界标杆,IonQ、Quantinuum、PsiQ、AOSense等初创企业创新驱动能力突出。与之相比,中国专利主体主要为科研院所和大学,数字巨头企业的表现相对较弱,百度和阿里巴巴等科技巨头虽曾投入研制量子计算机,但目前都已终止相关研发项目。

(2)政府资金投入带动社会资本投资效应不足,企业融资问题突出。全球范围来看,国家公共研究资金、大型科技企业投资和社会资本投融资是支持和推动量子技术研究和应用发展的三大支柱。政府是量子信息科学研究的主要资助者,而IBM、谷歌、Intel和微软等科技巨头在量子领域的持续投资布局,已成为推动样机研发和应用探索的重要力量。此外,量子产业的社会资本投融资活动也在快速增长。然而,据光子盒的不完全统计,中国企业在量子计算领域的融资额远远落后于美国,大约只有美国的十分之一。在美国,量子产业的外资占比达到33%,而在中国这一比例仅为18%。政府经费

主要投向大学和科研院所的基础设施建设和人才建设,在带动社会资本投资效应方面仍显不足,特别是在美对华量子技术投资限制背景下,使得量子初创企业融资压力较大。

(3)人才培养体系建设处于起步阶段,专业技能型人才不能满足未来需求。中国量子人才培养体系建设处于刚刚起步阶段,高素质人才培养不足。目前国内开设量子信息科学专业的高校13所,而且具备量子科学技术专业知识和技能的教师相对较少,加之量子领域属于高技术、人才壁垒行业,要求具备博士及以上学历高端人才,故而人才储备严重不足。随着量子产业规模的扩大,人才短缺成为产业发展的重大挑战。据麦肯锡研究,每三个量子职位空缺只有一个合格的量子人才候选人,这种情况预计将继续恶化,到2025年,甚至只有不到50%的量子计算工作可以填补,全行业人才抢夺战即将爆发。据世界经济论坛警告,未来20年将需要大量量子人才,人才短缺已经影响到了科技行业。

根据上述情况,提出如下政策建议。

(1)培育壮大科技领军企业,加快量子创新联合体建设。放眼国际,量子计算的研发已步入由龙头企业主导,研发和应用"双向驱动"的格局,新产品、新突破持续迭代。中国目前研发和应用之间"断层"仍然较为明显,迫切需要发挥科技型企业引领作用,加大自主知识产权软硬件推广应用。建议加快对量子产业链整体评估和布局,围绕产业链薄弱环节强化科技领军企业的培育和引进,并针对重点企业实施"一企一策",壮大科技型企业集群。同时,建立以科技领军企业为核心的创新联合体,完善相应机制,促使各方深度参与全链条创新活动,加快技术突破和新场景应用。充分调动市场积极性,对从事相关领域的企业给予更多政策支持,重视知识产权保护,推动并鼓励量子企业参与国际标准制定与国际专利申请。

(2)加大政府科技投入力度,探索多元化资金投入。一是放宽企业申请经费限制。建议借鉴发达国家管理经验,开放企业申请科研基金的限制,以更加贴近实际研发需求的目的做基础科学研究。二是加大资金投放力度。积极支持量子信息科研单位申报国家自然科学基金、国家重点研发计划、科技创新2030和国家科技重大专项等重大科技项目。三是建议设立专门的量子创新投资基金,通过政府引导、专业科研人员论证、社会资本参与,快速推动对具有产业化前景的量子科技前沿成果及时投资和孵化。充分利用科创板、北交所等融资平台对量子科技企业予以倾斜支持。引导和带动金融资本、民间投资和地方政府共同参与量子信息成果转化,强化信贷、保险、担保和融资租赁等对量子信息技术的支持。

(3)完善量子学科人才培育体系,加快高素质科技人才队伍建设。一是完善人才引进机制建设。面向全球发布人才需求,建立全球量子信息顶尖人才库,积极引进高端专业人才,尤其是加强与华裔量子科学家的互动交流,柔性引进。完善科研人员绩效考核评价机制,从注重学术论文数量向注重研发成果的转化引导。二是加强量子信息学科建设和科普。建议借鉴国外先进经验,在义务教育阶段,加强量子信息相关课程教学,在校内可建设科普墙/区域,在校外可带领学生参观量子科教基地,培养青少年对前沿技术的基本认知。三是培养大量具备量子科学素养和适当技能的人才。针对职业教育,探索校企联合培养机制,培养生产制造环节所需技术工人;针对本硕教育,建议高等院校开设与量子信息各应用行业的交叉课程或选修课,培养量子专业研发人才和推动量子产业发展的经营管理或金融人才。四是在重大专项中设立专门的量子投资和量子创业人才培养计划,培养一批既懂量子科技又懂金融投资的复合型人才。

参考文献

[1] 赛迪研究院. 量子产业发展白皮书(2024年)[R/OL]. [2025-06-24]. http://www.ccidthinktank.com/info/1155/39961.htm.

[2] 邹丽雪, 刘艳丽, 董瑜, 等. 量子科技创新战略研究[J]. 世界科技研究与发展, 2022, 44(2): 145-156.

[3] 潘建伟. 量子信息科技的发展现状与展望[J]. 物理学报, 2024, 73(1): 7-14.

[4] EPO. Quantum computing technologies on the rise[EB/OL]. [2025-06-25]. https://www.epo.org/en/news-events/news/quantum-computing-technologies-rise.

[5] 张志强, 陈云伟, 陶诚, 等. 基于文献计量的量子信息研究国际竞争态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2018, 40(1): 37-49.

[6] 李英, 刘建明. 基于专利计量的量子信息技术发展现状[J]. 科技管理研究, 2022, 42(18): 29-35.

[7] 李伟, 陈峰. 从竞争情报视角研究超级电容器产业的技术竞争态势[J]. 高技术通讯, 2016, 26(4): 396-406.

[8] 杨曦, 余翔, 刘鑫. 基于专利情报的石墨烯产业技术竞争态势研究[J]. 情报杂志, 2017, 36(12): 75-81.

[9] 崔遵康, 李丹阳, 徐小婷, 等. 粮食作物生物育种技术全球创新布局与竞争态势研究——基于核心专利数据挖掘

的视角[J]. 中国农业科技导报，2022，24(5)：1-14.
[10] 何隽，张虹颖. 基于专利情报的基因检测产业全球竞争态势分析[J]. 情报杂志，2018，37(11)：47-54.
[11] 琚春华，曹倩雯，宋雪姣. 核心技术发展潜力评价及国际竞争态势研判——基于医疗设备产业的分析[J]. 科学学研究，2024，42(8)：1607-1621.
[12] 王玥，许丽，施慧琳. 从专利角度分析国际干细胞技术研发态势[J]. 竞争情报，2017，13(3)：43-50.
[13] 刘志迎，闫天星，古继宝. 工业软件关键核心技术国际竞争态势研究[J/OL]. 科学学研究，1-10[2025-06-28]. https://doi.org/10.16192/j.cnki.1003-2053.20240628.003.
[14] 张贝贝，李存金. 芯片制造技术的国际竞争态势及企业创新特征——以专利为视角[J]. 科技管理研究，2021，41(22)：24-35.
[15] 张军玲，许鑫. 涉众网络理念下的技术竞争态势分析研究——以区块链领域为例[J]. 情报理论与实践，2023，46(5)：144-153.
[16] 栾春娟，白晶. 基于全球专利布局战略的技术预测方法及实证——以全球辐射能技术为例[J]. 科学与管理，2021，41(1)：39-48.
[17] 龚惠群，黄超. 基于文献计量和专利分析的云计算产业竞争态势研究[J]. 中国科技论坛，2020(10)：17-27.
[18] 安达，龚振炜，陈岩，等. 量子信息技术工程化应用发展初探[J]. 中国电子科学研究院学报，2022，17(8)：809-815.
[19] SAMURAÍ B，RUTE O，RAABE O，et al. A portrait of the collaboration network in quantum information[J]. ArXiv，2022，2112：03403.
[20] PARKER E，GONZALES D，KOCHHAR A，et al. An assessment of the U. S. and Chinese industrial bases in quantum technology[R]. California，USA：RAND Corporation，2022.
[21] PARKER E，SILBERGLITT R，GONZALES D，et al. An assessment of U. S. -allied nations' industrial bases in quantum technology[R]. California，USA：Rand Corporation，2023.

Analysis of the R&D Competitive Landscape of the Quantum Industry from the Perspective of Technology Intelligence

ZHANG Yinglan，LIU Jing

(Institute of Science and Technology Information，Beijing Academy of Science and Technology，Beijing 100044，China)

Abstract：To analyze the global R&D competition in quantum technology and provide strategic recommendations for China's development，literature was systematically examined from 2015 to 2024 in quantum computing，quantum communication and quantum sensing using the SCI-Expanded database. A technical intelligence analysis was conducted to assess research trends，international competition，and scientific capabilities. The results indicate that China excels in quantum communication and sensing，while the U. S. leads in quantum computing. European countries，including Germany and the UK，demonstrate strong overall competitiveness. To address China's challenges in quantum technology development，increasing government funding，fostering leading enterprises and strengthening talent cultivation are recommended to enhance global competitiveness.

Keywords：quantum industry；technology intelligence；industrial R&D；competitive landscape