

引用格式: 宋姗姗, 钟永恒, 刘佳, 等. 量子信息领域的国家战略布局与研发态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2024, 46(1): 21-35.

量子信息领域的国家战略布局与 研发态势分析*

宋姗姗^{1,2,3} 钟永恒^{*,1,2,3} 刘佳^{1,2,3} 刘盼盼^{1,2,3}

- (1. 中国科学院武汉文献情报中心, 武汉 430071;
2. 中国科学院大学经济与管理学院信息资源管理系, 北京 100049;
3. 科技大数据湖北省重点实验室, 武汉 430071)

摘要:近年来,以量子计算、量子通信和量子测量为代表的量子信息领域持续活跃,已经成为基础研究探索、颠覆性技术创新以及未来产业变革的重要发展方向,因此明晰量子信息领域的发展态势,对于我国建设世界科技强国具有重要价值。本文首先介绍了量子信息领域的相关概念与研究现状,其次分析了美国、欧盟、英国、日本、中国的量子战略布局,最后结合论文与专利的多维度计量分析,展示了量子信息领域的研发态势。研究发现:当前量子信息领域正处于迅猛发展阶段,国际科技强国都高度重视在该领域的政策布局、资金投入、人才引育和国际合作等,其中美国最具优势;中国在量子通信及量子计算领域基本跻身核心位置,未来还需要加速实施量子信息领域战略部署、积极引聚育留量子信息科技人才、深度推进量子领域产学研协同创新等。

关键词:量子信息; 国家战略; 研发态势; 基础研究; 产学研合作

DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.2023.06.001

Analysis on National Strategy Layout and R&D Trend of Quantum Information Field*

SONG Shanshan^{1,2,3} ZHONG Yongheng^{*,1,2,3} LIU Jia^{1,2,3} LIU Panpan^{1,2,3}

- (1. National Science Library(Wuhan), Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
2. Department of Information Resources Management, School of Economics and Management,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hubei Key Laboratory of
Big Data in Science and Technology, Wuhan 430071, China)

Abstract: Recently, the quantum information field represented by quantum computing, quantum communication, and quantum measurement has continued to be active. It has become an important trend in basic research exploration, disruptive technology innovation and future industry transformation. Therefore, clarifying the development trend of quantum information field is of great value for China to build a world's science and technology power. Firstly, this paper introduces

* 湖北省技术创新专项软科学研究类重大项目“湖北省重大科技创新平台建设若干重点问题研究”(2021EDA036),湖北省软科学研究类项目“湖北省根技术识别及其培育发展研究”(2022EDA043)

** E-mail:zyh@mail.whlib.ac.cn

the relevant concepts and research in the quantum information field, then analyzes the quantum strategy layout of the United States, the European Union, the United Kingdom, Japan and China. Finally, it shows the research and development trend through the multi-dimensional bibliometric analysis of papers and patents in the quantum information field. At present, the quantum information field is in a rapid development stage, and international scientific and technological powers attach great importance to policy layout, capital investment, talent introduction and international cooperation in the field, among which the United States has the most advantage. China has entered the core position in the fields of quantum communication and quantum computing. In the future, it is necessary for China to accelerate the strategic deployment, actively attract and retain quantum information talents, and deeply promote the industry-university-research cooperation innovation in the quantum information field.

Keywords: Quantum Information; National Strategy; Research and Development Trend; Basic Research; Industry-university-research Cooperation

当今世界百年未有之大变局加速演进,新一轮科技革命与产业变革正在重构全球创新版图,前沿科技领域学科交叉与技术融合的发展趋势愈加明显。作为量子物理与信息科学相结合的量子信息领域迅猛发展,直接推动了量子力学理论与信息技术创新体系的突破性演进、颠覆式创新以及变革式应用,也在一定程度上成为了新科技革命引领方向与技术竞争的制高点^[1]。由此,美国、英国、日本等世界主要科技强国已将发展量子信息科技上升到国家战略高度,并就量子信息技术广阔的应用前景和蕴含的巨大社会经济价值形成共识,系统部署了一系列重要科技战略规划和研发项目来抢夺“量子优势”。相关领域资金与人员投入也呈现加速增长趋势,由量子信息引发的新一轮“科技竞赛”与“大国博弈”已经拉开帷幕。

我国同样高度重视量子信息领域的科技创新,“十四五”规划将“量子信息”列为“事关国家安全和全局的基础核心领域”,并在该领域组织了具有相当体量和规模的研究创新队伍,突破了一系列重要科学问题和关键核心技术,基础研究、应用探索和产业培育的体系化布局加速发轫。2016 年发射升空世界首颗量子科学实验卫星“墨子”号,2017 年正式开通世界首条量子保密通信“京沪干线”,此后,量子计算原型机“九章”与“祖冲之号”相继问世,这一突破使我国成功实现“量

子优越性”。

2022 年党的二十大报告总结指出,我国已经在量子信息等战略新兴产业领域实现了一些关键核心技术的突破,进入创新型国家行列。为了更加明晰我国在量子信息领域的发展现状以及在全球竞争中的地位,本文重点梳理了美国、欧盟、英国、日本以及中国推进量子信息领域发展的国家/地区战略部署,并基于论文和专利的计量分析,对全球量子信息领域的基础研究和应用研究的发展态势进行梳理,据此提出我国进一步发展量子信息的对策建议。

1 量子信息领域概况与研究现状

1.1 领域概况

从 20 世纪 80 年代开始,科学家将量子力学理论引入到信息科学与计算机科学领域,量子信息科学这个前沿交叉学科应运而生。继创建了量子理论与催生了晶体管、激光、核磁共振等技术的“第一次量子革命”之后,以“量子纠缠”为典型特征的量子信息技术的发展直接引发了“第二次量子革命”^[2],被公认为是 21 世纪最重要的前沿科技之一,有望实现对信息处理能力的革命性突破,其科学价值和战略意义备受国内外关注。

量子信息技术涉及量子计算、量子通信和量子测量三大应用领域,分别可以提升计算处理速

表 1 量子信息领域概况

Tab. 1 Introduction of Quantum Information Field

	概念释义	功能特点	应用场景	典型研发产品
量子计算 ^[8]	遵循量子力学规律来调控量子信息单元进行计算的新型计算模式	能够实现 0 和 1 同时存在的计算状态叠加,具有远超传统计算的强大并行计算和模拟能力	在生物制药、材料研发、分子化学、资源勘探等领域,通过量子处理器来模拟量子系统运行状态;在人工智能、量化金融、密码解析、交通优化等大规模计算领域,加速机器学习和大数据处理能力等	D-Wave 量子退火机、“悬铃木”量子计算机、光量子计算原型机“九章”与“九章二号”、超导量子计算原型机“祖冲之”与“祖冲之二号”
量子通信 ^[6]	利用量子力学原理,通过移动量子态来实现信号、信息和量子态的转移和传输	利用量子叠加态或量子纠缠效应等进行信息的编码或密钥的安全传输	主要是量子密钥分发和量子隐形传态技术的应用,提供军事国防、国家政务、金融交易、互联网云服务、电力系统等领域的信息安全保障服务	美国量子通信网络、欧盟光纤 QT 实验网络、东京高速量子通信网络、中国科学实验卫星“墨子号”、微纳量子卫星“济南一号”、保密通信骨干线路“京沪干线”
量子测量 ^[7]	基于量子体系纠缠、压缩、高阶关联等特性,实现对量子态的操控和测量	量子测量的精度更高、探测距离更远、测量设备体积更小、测量手段和维度更丰富	集中于量子时频同步、量子重力测量、量子磁场测量、量子定位导航、量子目标识别等五大领域,覆盖军事国防、航空航天、生物医药、能源勘探、交通运输、灾害预警等行业	时钟源、原子干涉磁力仪、量子干涉器件磁力计、原子干涉加速度计、原子干涉陀螺仪、原子干涉重力仪、原子干涉重力梯度仪、量子雷达

度、增强信息传输安全保障能力、改善测量精度和灵敏度^[3](表 1)。量子计算是一种远超传统通用计算的新型计算模式,具有所谓的“量子优越性”或“量子霸权”^[4],其理论模型是通用图灵机,主要研发目标是实现通用可编程的量子计算机,并不断探索超导量子计算技术和光量子计算技术,现已进入技术验证与应用场景探索阶段。量子通信是一种以量子态为载体来传递信息的新通信手段,主要涉及量子密码调制、量子远程传态和量子密集编码等^[5],典型应用形式包括量子密钥分发和量子隐形传态,前者是目前该领域最为成熟和实用化程度最高的技术,量子通信与量子计算融合形成的量子通信网络是未来量子信息领域发展的主要目标^[6]。量子测量是利用磁、光与原子的相互作用,实现对各种物理量超高精度和高灵敏度的测量,甚至可以突破经典测量的散粒噪声极限^[7],其实用化产品是量子传感器,目前在各学科和行业领域都拥有广泛应用场景,但商业化应用和产业化规模较为有限,仍处于初级发展阶段。

1.2 研究现状

准确把握全球主要国家在量子信息领域的战略部署与项目布局,分析推动量子信息技术快速发展的关键举措,对于我国制定量子科技政策、促进量子信息技术应用探索和相关产业培育具有重要意义。吕凤先等^[9]研究了美国近 20 年对量子信息科学基础研究的政策部署,发现经费投入与融合发展是促进量子科技发展的关键举措;Yamamoto 等^[10]梳理了日本近 30 年量子信息科技的发展历程与国家项目,指出大力开展产学研的协同创新至关重要;高芳等^[11]梳理了代表性国家的量子信息技术发展战略,并从加强顶层设计、多层次协同攻关、提高公众参与度、参与国际标准制定等方面提出对我国的启示。

近年来,量子信息领域科研加速发展,技术创新高度活跃。中国信息通信研究院从 2018 年开始连续五年发布《量子信息技术发展与应用研究报告》,持续对量子信息技术发展态势及应用进展跟踪研判,其统计数据显示,截至 2022 年 9 月,全球在量子信息领域的投资总额已达 160 亿美

元^[12]。相关研究运用文献计量方法展现了量子领域研发现状: Seskir 等^[13]基于关键词将量子技术相关论文归纳为三组,分别是量子通信/密码学、量子计算以及量子系统的物理实现; Winiarczyk 等^[14]对量子信息处理领域的专利活动进行分析,并采用时间序列模型预测了未来专利申请数量的变化趋势; 张志强等^[15]以 SCI 论文产出情况研究量子信息领域的全球研发与竞争态势,发现美国和中国科学院分别在国家和机构层面具有明显发文优势; 储节旺等^[16]基于专利进行量子信息领域的颠覆性技术演化与预测分析,认为量子通信网络与量子加密算法是未来重要发展趋势。

2 量子信息领域国家/地区战略布局

2.1 美国: 前瞻布局, 领跑全球

美国作为世界科技头号强国,对量子信息领域长期高度关注,是最早将量子信息列为国防与安全研发计划的国家,并以法案形式将量子科技上升到国家战略层面,早在 2002 年就制定了《量子信息科学和技术发展规划》。美国国防部高级研究计划局于 2007 年将量子科技作为核心技术基础列入其战略规划;2018 年,美国通过《国家量子计划法案》,发起了十年“国家量子行动计划”,这是美国量子领域发展的一个里程碑事件^[17],预计在 2019—2023 年为量子研究提供 12.75 亿美元资助,同年还发布了《量子信息科学国家战略概述》,进一步巩固美国在该领域的全球领导地位;2022 年美国通过《芯片与科学法案》,推进对量子计算领域的关键技术研发和商业化。从财政投入来看,美国政府对量子信息领域的研发投入在 2019—2022 四年间,每个财年分别拨款了 4.35 亿(实拨)、5.79 亿(实拨)、6.99 亿(预算额)以及 8.77 亿(申请额)美元^[18],年度增长率高达 25% 以上。

为了支撑和管理国家量子计划,美国成立了国家量子协调办公室、国家量子计划咨询委员会、量子信息科学小组委会等机构,同时联合国家实验室、科技巨头企业、高等科研机构、国际盟友等共同组建顶尖科研综合体,结成了芝加哥量子联盟、量子信息边缘联盟、马里兰量子联盟等,设立了下一代量子科学与工程中心、量子优势联合设计中心、量子系统加速器等科学中心^[19]。此外,美国多措并举强化量子人才培养,发布了《量子信息科技劳动力发展国家战略规划》,美国国家科学基金会还大力推进量子技术素质教育,牵头启动了“美国 Q-12 教育合作伙伴计划”,旨在将量子相关课程融入 K-12 教育(基础教育)体系。

2.2 欧盟: 集中优势, 统筹规划

欧洲作为量子理论与技术标准的主要发源地,早在 20 世纪 90 年代就意识到量子信息的巨大潜力,从 1998 年欧盟第五框架计划开始,就致力于促进量子信息领域的战略部署和区域合作,将量子通信视为引领下一代技术革命的关键领域。欧盟于 2008 年发布的《量子信息处理与通信战略报告》明确了量子通信领域发展愿景,还联合来自 12 个欧盟国家的 41 个伙伴小组成立了“基于量子密码的安全通信”工程,开展量子通信技术标准的前瞻研究。2016 年发布的《量子宣言》作为欧盟科技创新研发计划“地平线 2020”的组成部分,计划 10 年投资 10 亿欧元逐步实施“量子旗舰计划”^[20],成立了由国际顶尖科学家和产业专家组成的“旗舰战略咨询委员会”^[21]。此后,旗舰计划在 2020 年宣布“全力推动量子通信互联网建设”,在 2022 年提出“全面统筹量子技术工业和研发计划”,概述了量子计算、量子模拟、量子通信等领域在未来十年的发展路线图^[22];同时,旗舰计划还指出培训具有交叉学科背景的“量子工程师”

或是更普遍的具备量子意识的劳动力应成为量子信息领域发展的重大目标之一,提倡在全欧推广覆盖高中教育、大学教育和产业工人培训的量子教育项目。

2.3 英国:产研合作,阶段推进

英国致力于建设可持续的量子信息领域研发生态体系,重点支持将本国的量子研究转化为实践应用和新兴产业。2013 年英国宣布实施分两个阶段的“国家量子技术计划”,被广泛认为是世界上第一个国家级的量子技术计划,预计通过英国研究与创新基金会投资 10 亿余英镑。该计划的第一阶段(2014—2018 年)投资 2.7 亿英镑,设立了 4 所由多个高校联合的量子技术研发中心,分别主攻量子计算、量子通信、量子传感和计量、量子增强成像四大领域^[23]。2015 年,英国技术战略委员会发布《国家量子技术发展战略》和《英国量子技术路线图》,目标建立横跨政产学研多个领域的量子技术合作集群,并详细描绘了未来 30 年量子技术商业化应用的初步路线图^[24]。2019 年,英国进入了量子计划的第二阶段,预计投资 3.15 亿英镑重点推进量子技术的产业化应用,并宣布投资 3500 万英镑成立“国家量子计算中心”,目标是在 2025 年之前交付 100+ 的量子位机。2023 年 3 月,英国科技、创新与技术部发布《2023 国家量子战略》,计划在未来 10 年将英国打造为一个领先的量子经济体,以量子技术促进国家繁荣与安全^[25]。此外,英国尤其重视量子领域的企业培育,通过设立“产业战略挑战基金”和举办“量子挑战赛”等方式,支持企业深度参与项目投资和技术研发,以最大程度实现量子技术的潜在商业价值转化。

2.4 日本:合作联盟,追赶提速

近年来,日本多次为其在量子研发方面的国际落后地位表示担忧,并将深化量子信息领域的

融合创新与国际合作视为战略重心^[26]。2013 年,日本成立了“量子信息和通信研究促进会”与“量子科学技术研究开发机构”,计划未来 10 年投入 400 亿日元加速量子信息技术研发步伐;2014 年推出了与美国各大研发机构合作的“革新性研究开发推进计划”,用来资助“量子人工脑”项目的应用研究;2018 年启动了未来十年投资 200 亿日元的“光量子跃迁旗舰计划”;2019 年规划了以量子技术研究开发战略为支柱的“登月型”研发体系;2020 年发布《量子技术创新战略》,提出了技术发展、国际合作、产业创新、知识产权、国际标准化 5 个具体实施战略^[27];2022 年公布《量子未来社会愿景》,提议创建量子技术国际合作中心,推动量子技术充分融入整个经济社会体系^[28]。此外,日本还成立了管理协调量子领域发展的推进委员会,设立了 4 个量子技术创新委员会和 10 个量子技术创新基地。日本产业界成立了“量子技术新产业创造协议会”,东京大学与美国 IBM 公司共同打造了“量子创新计划联盟”,日本国家信息和通信技术研究所启动了为期 10 年的“量子原住民”培养项目。

2.5 中国:集中发力,多方并进

我国虽然在量子信息领域的研究和应用起步较晚,但近年来在“新型举国体制”下,伴随着对量子领域战略规划密集部署,现已跻身量子信息领域国际领先地位。2016 年,“十三五”规划将“量子通信”与“量子计算机”纳入体现国家战略意图的重大科技项目;2020 年,习近平总书记作出“要充分认识推动量子科技发展的重要性和紧迫性,加强量子科技发展战略谋划和系统布局,把握大趋势,下好先手棋”的重要指示;2021 年,“十四五”规划明确提出我国要聚焦在量子信息领域组建国家实验室、实施重大科技项目、前瞻谋划

未来产业等。

与此同时,我国部分省市结合自身特色也相继发布了相关科技创新政策,着力加大对量子信息领域的资源投入力度,其中代表性省市有安徽省、山东省、北京市和上海市等。安徽省 2017 年开始筹建量子信息科学国家实验室,还专设 100 亿元的“量子科学产业发展基金”支持科技成果转化,并于 2022 年投入 20.2 亿元新设“实施量子信息领域省科技重大专项”,开展量子领域理论研究和前沿攻关。山东省 2011 年成立济南量子技术研究所,并于 2018 年发布《山东省量子技术创新发展规划(2018—2025 年)》,提出到 2025 年成为全球量子技术及产业发展的战略高地之一。此外,我国也开始以交叉学科的方式培养相关领域人才,例如中国科学技术大学在 2020 和 2021 年分别获批设立“量子科学与技术”博士学位点和“量子信息科学”本科专业,清华大学于 2021 年成立了量子信息班等。

3 量子信息领域研发态势

3.1 数据检索策略

本文主要基于论文与专利的计量分析,对量子信息领域的研发态势展开研究。首先依据前文所述量子信息领域概况,将检索目标分为量子计算、量子通信和量子测量三个模块,并根据相关研究报告与政策文件梳理每个领域下的技术点及具有检索意义的关键词;其次进行同位和上下位概念的扩展,以及领域关键词的英文匹配,组配得到初步检索结果,检索时间范围不限,检索日期为 2023 年 1 月 1 日;最后经过人工清洗与去重合并,得到用于分析的有效检索结果(表 2)。

3.2 论文计量分析

学术论文是重要的科技情报源,承载了学科

表 2 量子信息领域数据检索概览

Tab. 2 Data Retrieval Results of Quantum Information Field

检索模块	检索关键词	检索结果	
		发文量/篇	专利申请量/件
#1 量子计算	量子计算、量子比特、量子算法、量子机器学习、量子编码、量子模拟、量子纠错、量子退火、量子神经网络、量子存储、量子成像、量子逻辑、量子向量机、量子相位估计	55532	16554
#2 量子通信	量子通信、量子协议、量子网络、量子密钥、量子隐形传态、量子密码、量子纠缠、量子叠加、量子卫星、量子容量	16937	11004
#3 量子测量	量子精准测量、量子传感、量子纠缠、量子相干叠加、量子关联、量子压缩、量子定位、量子纠错、量子目标识别、量子重力测量、量子磁场测量、量子时频同步	3546	1624
量子信息领域	#1 OR #2 OR #3	72974	27559

领域的基础研究成果。本文以科睿唯安公司 Web of Science 核心合集集中的 SCIE 数据库为数据源,依据上文所遴选的关键词进行主题检索,并以可视化方式呈现量子信息领域研究的产出规模、年度趋势、国家与机构分布状况等。

1) 产出规模分析。量子信息领域共产出科研论文 72974 篇。本文重点选取了该领域 2000 年至今的论文产出进行年度趋势分析(图 1)。21 世纪量子信息研究发展大致可以分为三个阶段,前十年(2000—2010 年)是平稳发展期,每年论文数量均在 3000 篇以下;2011—2017 年进入快速发展期,发文量持续上升;近五年(2018 年至今)研究高度活跃,这期间的发文量占总发文量的近 40%,进入了研究爆发期。此外,量子信息三大领域的论文产出数量变化趋势基本一致,其中量子计算和量子通信的研究创新活动异常活跃,在数量和增速方面的优势尤为明显,量子测量领域研究论

文相对较少。

2) 发文国家分析。量子信息领域研究论文主要来自全球范围的 146 个国家。整体来看,该领域论文产出数量较多的地区主要集中在北美洲、欧洲和部分亚洲地区,并以美国、中国、德国、英国和意大利等国家为代表,可见这些国家在量子信息领域的基础研究实力较强。图 2 为发文量排名前 15 位的国家在三个研究方向的发文情况,分析可知,美国在量子计算方向处于绝对优势地位,发文量遥遥领先于其它国家,中国和德国紧随其后;

在量子通信方向,中国的基础研究优势十分明显,发文量位居全球第一,美国也是该领域研究创新成果的主要来源;全球量子测量领域的研究论文虽然普遍偏少,但各国在该领域也有不同程度的布局,其中美国、中国和德国的发文量居于前列。

3) 发文机构分析。量子信息领域发文数量排名前 15 位机构的科研影响力及产出效率如表 3 所示。从主要机构科研影响力来看,论文总被引频次最高的为美国的加州大学,其次为美国能源部、法国研究型大学联盟协会、法国国家科学研究

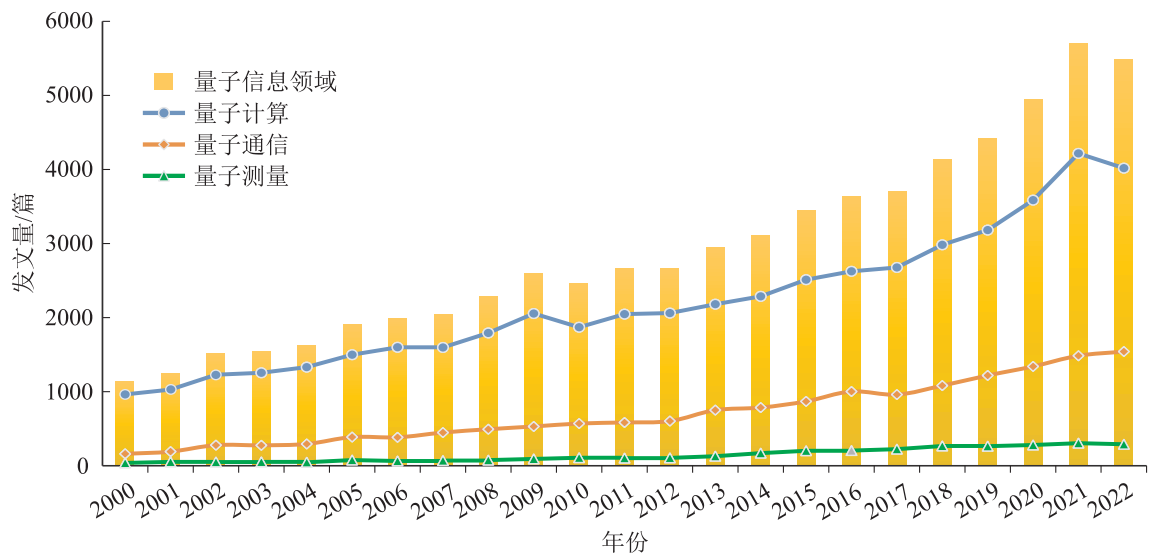


图 1 量子信息领域发文量变化趋势

Fig. 1 Publications Quantity Trend in Quantum Information Field

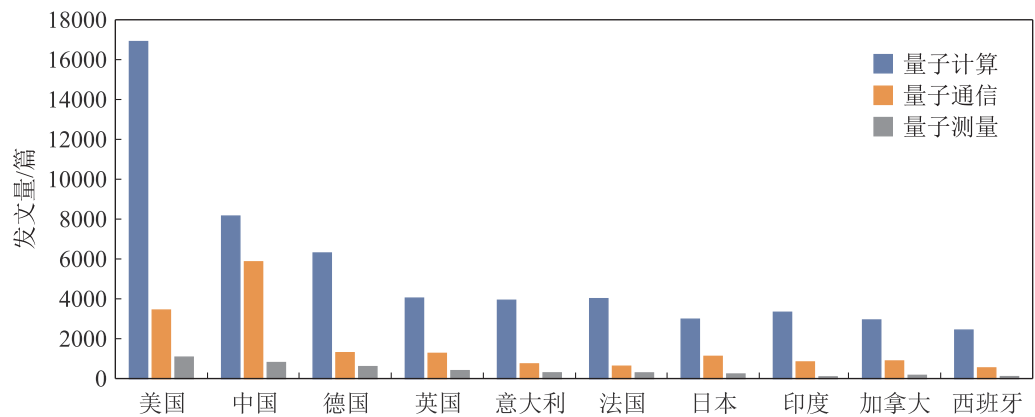


图 2 量子信息领域主要国家发文量分布

Fig. 2 Publications Quantity Distribution of Major Countries in Quantum Information Field

表 3 量子信息领域主要机构发文量及影响力分布

Tab. 3 Publications Quantity and Influence Distribution of Major Institutions in Quantum Information Field

序号	机构	国别	发文量/篇	总被引频次	篇均被引频次	H 指数
1	法国国家科学研究中心	法国	3355	119013	35. 47	137
2	中国科学院	中国	3256	98404	30. 22	139
3	法国研究型大学联盟协会	法国	3053	126210	41. 34	143
4	加州大学	美国	2523	202034	80. 08	190
5	美国能源部	美国	2367	144371	60. 99	161
6	马普学会	德国	1698	105409	62. 08	137
7	意大利国家研究会	意大利	1337	59481	44. 49	99
8	意大利国家核物理研究院	意大利	1307	43590	33. 35	82
9	俄罗斯国家科学院	俄罗斯	1281	36358	28. 38	76
10	麻省理工学院	美国	1177	96190	81. 72	144
11	巴黎萨克雷大学	法国	1058	41963	39. 66	89
12	瑞士联邦理工学院	瑞士	1046	50285	48. 07	104
13	牛津大学	英国	942	69001	73. 25	123
14	亥姆霍兹联合会	德国	937	46123	49. 22	104
15	索邦大学	法国	893	34459	38. 59	82

中心和马普学会,都在 10 万次以上。论文篇均被引频次最高的为美国的麻省理工学院,其次为加州大学、牛津大学、马普学会和美国能源部,均在 50 次以上。综合量子信息三大方向的主要机构论文产出数量及影响力来看(图 3),虽然中国的科研机构在发文量方面具有突出优势,但科研影响力与国际先进国家相比,还具有一定的差距,最主要的表现是论文篇均被引频次较低。

3.3 专利计量分析

专利文献是科技创新成果的重要载体,能够有效反映目标领域的技术研发进展和研究机构的

技术创新水平。本文采用北京合享智慧科技有限公司开发的 IncoPat 专利数据库,针对量子信息领域的专利文献进行检索分析,以揭示全球该领域的技术布局和竞争格局。

1) 申请趋势分析。全球量子信息领域的专利申请数量为 27559 件。量子信息技术的专利申请量在 21 世纪呈现先平稳后爆发的增长趋势(图 4),大致也可分为技术萌芽期(2000—2011 年)、缓慢发展期(2012—2017 年)和高速增长期(2018 年至今)三个阶段。量子计算、量子通信和量子测量三大方向的全球专利申请量趋势表现较为一致,其中量子计算方向的关注度最高,量子通信方向专利申请量呈现平稳增长趋势,量子测量方向的专利申请量还存在一定不足。

2) 国家布局分析。全球量子信息技术的专利申请主要集中在美国、中国、日本、英国和加拿大等国家,其中中国和美国的申请量遥遥领先,占全球申请量的 70%,专利数量优势尤为明显;法国、美国、德国和中国的技术研发活动较为活跃,近些年专利申请数量加速增长,近 3 年的专利申请量占比相对较高。通过分领域对主要国家的专利申请情况分析可知(表 4、图 5),在量子计算方向,美国的专利申请总量具有突出优势,较为活跃的国家有法国、英国和美国;在量子通信方向,中国的表现极为突出,后发优势明显,较为活跃的国家有中国、韩国和德国;在量子测量方向,中美日的创新能力表现较强。

3) 机构布局分析。量子信息技术相关专利申请代表性机构有美国的 IBM 公司、Google 公司和 Microsoft 公司,中国的合肥本源公司、如殷量子公司、科大国盾公司,加拿大的 D-Wave 公司等。中美两国机构是量子信息领域的主要创新力量,其中美国的科技巨头企业基于长期技术积累与大量

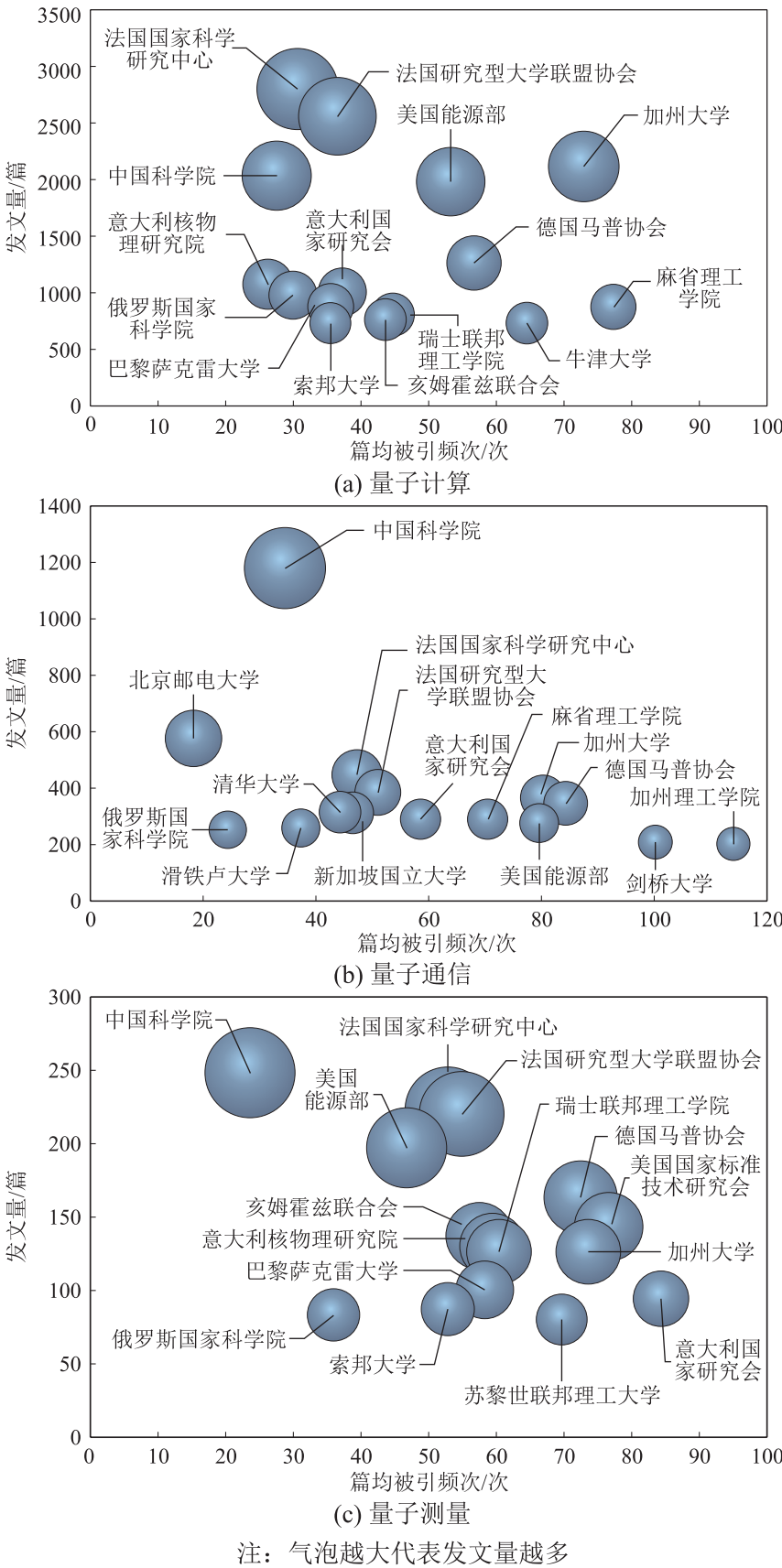
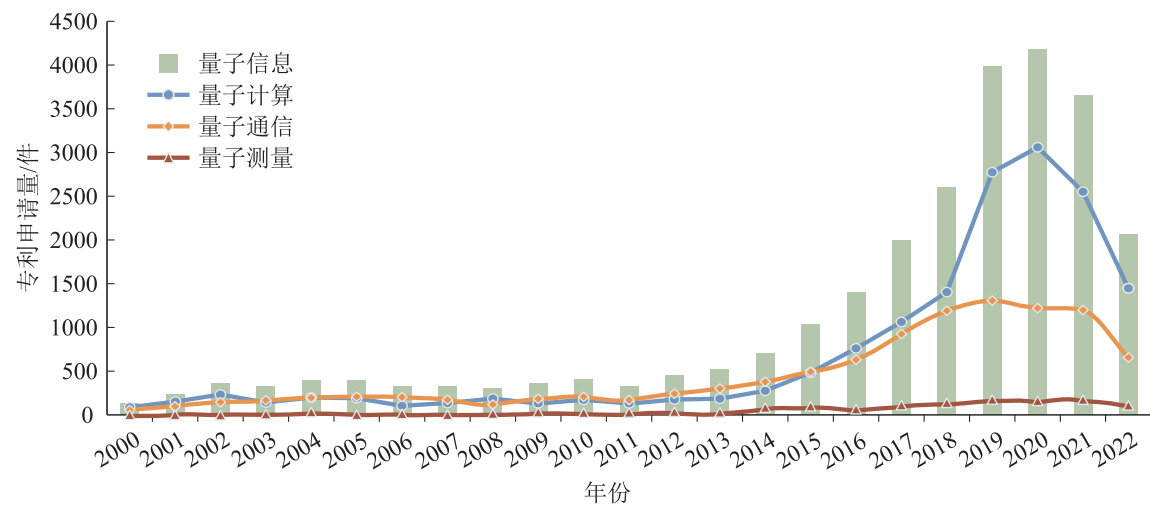


图 3 量子信息领域主要机构发文量及影响力分布

Fig. 3 Publications Quantity Distribution of Major Institutions in Quantum Information Field



注：由于专利申请和公开日期通常有18个月的时滞，所以2021、2022年的数据仅供参考

图 4 量子信息领域专利申请量变化趋势

Fig. 4 Patents Application Quantity Trend in Quantum Information Field

表 4 量子信息领域主要国家专利申请量分布¹⁾

Tab. 4 Patents Application Quantity Distribution of Major Countries in Quantum Information Field¹⁾

序号	国别	全领域		量子计算		量子通信		量子测量	
		专利申请量	近 3 年占比	专利申请量	近 3 年占比	专利申请量	近 3 年占比	专利申请量	近 3 年占比
1	中国	10637	39.82%	4422	37.52%	5884	42.76%	1204	36.63%
2	美国	8692	47.65%	7362	51.74%	1592	31.53%	164	13.41%
3	日本	2552	16.85%	1181	28.96%	1390	6.98%	83	8.43%
4	英国	1057	36.99%	513	54.58%	568	20.77%	6	66.67%
5	加拿大	921	30.51%	833	32.41%	103	14.56%	3	33.33%
6	韩国	731	38.03%	318	40.88%	431	36.89%	19	31.58%
7	德国	601	40.43%	475	43.37%	131	34.35%	19	10.53%
8	澳大利亚	360	26.67%	327	29.05%	40	7.50%	2	50.00%
9	法国	307	48.21%	205	60.98%	112	26.79%	4	25.00%
10	俄罗斯	293	32.42%	139	40.29%	150	32.00%	33	18.18%

1)专利申请量单位:件;由于2021、2022 年数据不完整,因此近3 年的数据选取时间段为2018—2020 年。

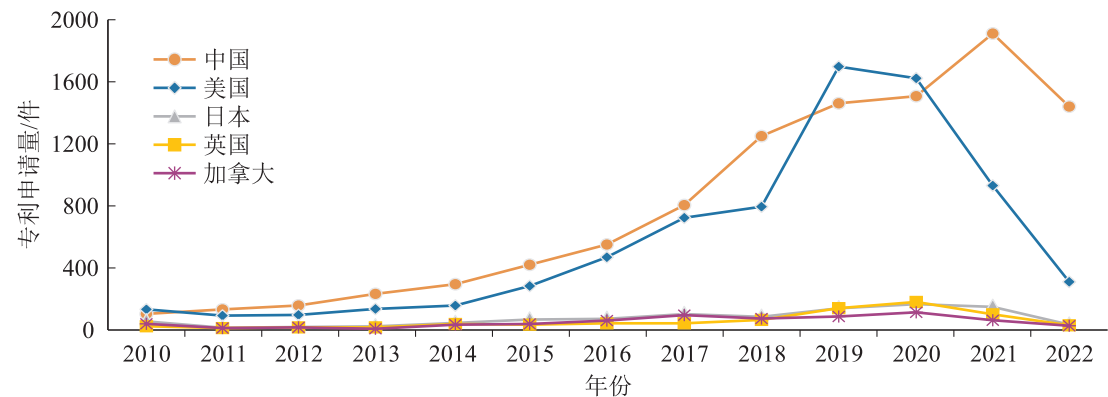


图 5 量子信息领域主要国家专利申请量年度趋势

Fig. 5 Patents Application Quantity Trend of Major Countries in Quantum Information Field

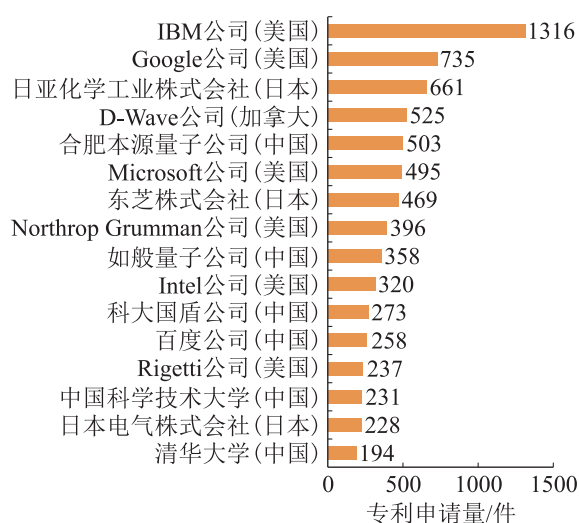


图 6 量子信息领域主要机构专利申请量分布

Fig. 6 Patents Application Quantity Distribution of Major Institutions in Quantum Information Field

资源投入在该领域表现尤为突出。我国高校和科研院所也有较强的研发实力,中国科学技术大学、清华大学等的专利申请量较为领先(图 6)。

4 针对我国量子信息发展的对策建议

当前,我国在量子信息这一前沿科技领域已经拥有了一定的基础研究积累、技术创新实力和产业先发优势,产出了一大批具有重要国际影响力的基础研究和产业化成果,基本进入跟跑、并跑和领跑的并存阶段。我国“量子之父”潘建伟院士曾总结“中国在量子通信的研究和应用方面处于国际领先地位,在量子计算方面与发达国家处于同一水平线,在量子精密测量方面发展迅速”^[3]。随着量子信息领域国际科技竞争的日益激烈,为进一步巩固和提高“量子优势地位”,借鉴国外战略布局先进经验,我国还需在国家战略部署、专业人才引育、产学研协同创新体系构建等方面集中发力。

1) 加速战略规划部署,重视基础研究资源投入。量子科技关乎国家战略已经成为国际共识。我国虽然在顶层设计上高度关注了这一前沿科技和战略新兴产业的发展,但与其它科技强国相比,对关键研究领域的规划指导和投入力度还稍显不足,相关技术研发和应用探索的战略布局尚未形成有机整体。值得一提的是,在量子信息领域,美国致力于通过加大出口管制、交易审查、国际禁运等制裁手段力度,对中国实施供应链的“精准脱钩”和针对性打压,以此遏制我国量子技术的研发创新能力,对我国取得的局部领先优势发起强烈冲击^[29]。

对此,我国务须加强量子信息领域的政策储备与资源支撑,有效整合领域研发资源、突破关键核心技术并提升产业链的自主创新能力。首先是在国家层面上继续保持高度重视和战略研判,充分发挥新型举国体制在关键核心技术攻关上的制度优势,系统制定国家量子战略规划和阶段目标,以国家战略需求为导向推进领域科技力量的统筹建设和优化配置,加快量子领域的国家实验室建设^[30]。其次要发布明确的量子信息发展路线图,科学研判该领域急需攻克的关键核心技术和共性问题瓶颈,客观分析各细分领域的技术创新预期目标与产业化时间^[11],并结合国家已有的技术研发基础,在自然科学基金、科技重大专项、重点研发计划、战略性先导科技专项中对基础共性关键问题的突破给予针对性的资助倾斜。最后是要重点关注量子信息领域基础研究的战略部署,未来我国应让更多的资源向基础研究领域倾斜,力求改变传统的“引进—吸收”技术创新模式,提高自主创新能力,大力打造量子信息领域的原始创新策源地。此外,也可以通过加强与欧盟、金砖国家、“一带一路”沿线国家的国际合作,建立科学家联

盟,打造无国界实验室,开展科技创新合作等方式,提升我国的“量子”国际地位与话语权。

2) 积极参与顶尖人才争夺,引聚育留科技人才。量子信息领域的前沿性和交叉性,决定了其发展需要一支强大的科技人才队伍支撑,2022 年的诺贝尔物理学奖就颁发给了三位量子信息科学领域的科学家。近年来,高水平科研人员和工程研发人才供应不足已经成为制约量子信息领域发展的重要因素,因而美英日等发达国家大力支持量子信息人才的引进与培育,构筑涵盖产业界的量子研究生态体系,持续抢占国际量子人才制高点。

鉴于此,我国也应把人才的“引聚育留”放在重要位置,在量子科技创新链各环节大力加强技术研发人才的培养储备,优化面向量子信息领域领军人才的招引评价机制^[31]。(1)“引才”方面需要不断拓展国际合作与人员交流,在全球范围内引进高水平的学术带头人,加快汇聚量子信息领域的基础研究人才队伍;并重点支持顶尖科学家领衔建设新型研发机构,带动吸引一批高精尖人才开展相关基础研究和成果转化探索。(2)“聚才”上要充分发挥国家及省级各类实验室、新型研发机构、大型科学基础设施等高能级科技创新平台以及重大科技项目的牵引汇聚作用,围绕量子信息领域前沿方向进行基础研究人才布局;同时通过出台引导性优惠政策,让高新技术企业深度参与到量子信息技术的研发活动,建设产研结合的量子科技服务平台。(3)“育才”方面要鼓励相关高校加强量子学科和课程体系建设,促进学科专业教育的交叉融合,尤其是要鼓励学术界与产业界以联盟的方式培养人才,遵循“基本理论+技术原理+创新实践”的教育设计思路,形成贯穿“产学研用”全链条、具有国际竞争力的量子人才梯

队,培养一批具有创新活力的青年科学家。(4)“留才”上“固巢养凤”,为量子人才发展提供有竞争力的薪酬待遇和保障条件,健全“基本工资+多种绩效激励”的长效人才激励机制,出台完善人才创新创造、职称评定、人才使用管理等方面的实施细则或配套措施,并形成试错机制,鼓励科研人才创新,最大限度提升我国在量子人才政策上的长期吸引力与竞争力。

3) 健全技术创新体系,推动产学研协同创新。量子信息领域目前总体处于从“科学”到“技术”转化的早期阶段,其技术演进和产业化应用推广仍具有长期性和众多的不确定性。从我国在量子信息领域的研发态势来看,现阶段高校和科研院所是国内科研的“主力军”,学术界开放探索和研究合作仍是主流。虽然我国在关键核心技术上不断突破,但产业创新平台支撑以及与产业界的融合都相对有限。而且由于科技金融体系的缺乏,科技企业的研发参与和投入热情明显不足,在技术方向选择、领域前瞻性等方面都较为薄弱,尚不能与现有技术研发攻关能力相匹配。

因而,我国应借鉴美国和欧盟的量子产学研联盟、产学研社区等建设经验,使学术界的技术研发充分考虑产业界的现实需求,形成更多以量子信息技术创新赋能产业发展的典型案例。一是整合高校和科研院所的量子科教资源,建设量子信息的国家级、省级实验室和工程技术研究中心等创新平台,同时发挥企业在科技创新中的主体作用,依托领军企业组建一批技术创新联合体,打通产学研合作的制度壁垒和信息壁垒。二是充分发挥企业在量子信息技术突破和产业化推进过程中的作用,将国内行业龙头企业与优势科研机构联合起来,通过共建云平台和开源社区、联合开展产学研联合研发项目、组织技术交流论坛与创新竞赛、

成立产业联盟和新型研发机构等方式,开展深度合作,实现优势互补与应用探索^[32];并鼓励科研人员携带科技成果创办公司,大量孵化催生量子信息企业。三是完善产学研合作资金支持体系,带动地方、企业、高校加大对成果转化关键环节的投入力度,支持高校开展科研成果商业化技能培训,并聘请专业团队辅助完善创新成果转化,使科研人员能够对“新思想”进行初步的商业化探索,提高我国在量子信息技术应用层面的主动性。四是支持有条件的区域建设量子信息技术产业园,集技术研发、样机研制、企业孵化、产品产业化于一体,并注重引入咨询类、法务类、财务类等非技术研发类公司,促进资金、技术、应用、市场等要素对接,贯通创新链、产业链和价值链,有效解决科技经济“两张皮”困境。

参考文献

- [1] 新华社. 习近平主持中央政治局第二十四次集体学习并讲话(Xinhua News Agency. XI Jinping: Speech at the 24th Collective Study of the Political Bureau of the CPC Central Committee) [EB/OL]. [2022-10-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-10/17/content_5552011.htm.
- [2] DOWLING J P, MILBURN G J. Quantum Technology: the Second Quantum Revolution [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2003, 361(1809): 1655-1674.
- [3] 潘建伟. 更好推进我国量子科技发展[J]. 红旗文稿, 2020(23): 9-12. (PAN Jianwei. Better Promote the Development of Quantum Science and Technology in China [J]. HongQi WenGao, 2020(23): 9-12.)
- [4] 王晋岚. 中国科学家实现“量子计算优越性”里程碑式突破[J]. 科学, 2021, 73(1): 43, 2. (WANG Jinlan. Chinese Scientists Achieved Milestone Breakthroughs in Quantum Computing Superiority [J]. Science, 2021, 73(1): 43, 2)
- [5] 彭承志, 潘建伟. 量子科学实验卫星——“墨子号”[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(9): 1096-1104. (PENG Chengzhi, PAN Jianwei. Quantum Science Experimental Satellite “Micius” [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(9): 1096-1104.)
- [6] 吴华, 王向斌, 潘建伟. 量子通信现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(3): 296-311. (WU Hua, WANG Xiangbin, PAN Jianwei. Quantum Communication: Status and Prospects [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2014, 44(3): 296-311.)
- [7] 张萌, 赖俊森. 量子测量技术进展及应用趋势分析[J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(9): 72-78. (ZHANG Meng, LAI Junsen. Research Progress and Application Analysis of Quantum Sensing [J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021, 47(9): 72-78.)
- [8] OLIVER W D. Quantum Computing Takes Flight [J]. Nature, 2019, 574(7779): 487-488.
- [9] 吕凤先, 刘小平, 贾夏利. 近二十年美国量子信息科学战略中基础研究的政策部署和重要进展[J]. 世界科技研究与发展, 2022, 44(1): 12-24. (LV Fengxian, LIU Xiaoping, JIA Xiali. Policy Deployment and Important Progress of Basic Research in American Quantum Information Science Strategy in Recent Two Decades [J]. WORLD SCI-TECH R & D, 2022, 44(1): 12-24.)
- [10] YAMAMOTO Y, SASAKI M, TAKESUE H. Quantum Information Science and Technology in Japan [J]. Quantum Science and Technology, 2019, 4(2): 020502.
- [11] 高芳, 徐峰. 全球量子信息技术最新进展及对中国的启示[J]. 中国科技论坛, 2017(6): 164-170. (GAO Fang, XU Feng. The Latest Development of Global Quantum Information Technology and Its Implications to China [J].

- Forum on Science and Technology in China, 2017(6): 164-170.)
- [12] 中国信息通信研究院. 量子信息技术发展与应用报告 2022(China Academy of Information and Communications Technology. Quantum Information Technology Development and Application Report 2022) [EB/OL]. [2023-1-12]. http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202301/t20230107_413790.htm.
- [13] SESKIR Z C, AYDINOGLU A U. The Landscape of Academic Literature in Quantum Technologies [J]. International Journal of Quantum Information, 2021, 19(2), 2150012.
- [14] WINIARCZYK R, GAWRON P, MISZCZAK J A, et al. Analysis of Patent Activity in the Field of Quantum Information Processing [J]. International Journal of Quantum Information, 2013, 11(1), 1350007.
- [15] 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. (ZHANG Zhiqiang, CHEN Yunwei, TAO Cheng, et al. Bibliometric Analysis on International Competitive Situation of Quantum Information Research [J]. WORLD SCI-TECH R & D, 2018, 40(1): 37-49.)
- [16] 储节旺, 李佳轩, 安怡然. 基于专利分析的颠覆性技术演化与预测研究——以量子信息技术为例[J]. 科技进步与对策, 2023, 40(22): 130-140. (CHU Jiewang, LI Jiaxuan, AN Yiran. The Evolution and Prediction of Disruptive Technologies Based on Patent Analysis: An Example of Quantum Information Technology [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2023, 40(22): 130-140.)
- [17] U. S. Senate Committee on Commerce, Science, and Transportation. Congressional Science Committee Leaders Introduce Bills to Advance Quantum Science [EB/OL]. [2022-12-10]. <https://www.commerce.senate.gov/2018/6/congressional-science-committee-leaders-introduce-bills-to-advance-quantum-science>.
- [18] 谷峻战, 王滨勇. 美国联邦政府推动量子信息科技的政策和布局[J]. 全球科技经济瞭望, 2022, 37(5): 14-22, 50. (GU Junzhan, WANG Binyong. The Policy and Deployment by the US Federal Government to Advance Quantum Information Science and Technology [J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2022, 37(5): 14-22, 50.)
- [19] 秦庆, 汤书昆. 国外典型量子产学研联盟案例研究及对中国的启示[J]. 世界科技研究与发展, 2023, 45(2): 243-253. (QIN Qing, TANG Shukun. Case Study of Typical Foreign Quantum Industry-university-research Institute Alliance and Its Enlightenment to China [J]. WORLD SCI-TECH R & D, 2023, 45(2): 243-253.)
- [20] QUROPE. Quantum Manifesto: A New Era of Technology [EB/OL]. [2022-11-14]. [http://qurope.eu/system/files/u7/93056_Quantum %20Manifesto_WEB.pdf](http://qurope.eu/system/files/u7/93056_Quantum%20Manifesto_WEB.pdf).
- [21] 宋海刚. 欧盟量子技术旗舰计划的部署及组织管理研究[J]. 全球科技经济瞭望, 2017, 32(Z1): 5-10. (SONG Haigang. Research on EU's Deployment and Management of Quantum Technology Flagship Project [J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2017, 32(Z1): 5-10.)
- [22] 邹丽雪, 刘艳丽. 欧盟量子技术战略研究及启示[J]. 世界科技研究与发展, 2022, 44(1): 25-34. (ZOU Lixue, LIU Yanli. Strategic Research on EU Quantum Technologies and Its Enlightenments [J]. WORLD SCI-TECH R & D, 2022, 44(1): 25-34.)
- [23] 于笑潇, 吴根, 沈连成. 英国国家量子技术计划的特点和启示[J]. 中国基础科学, 2020, 22(4): 51-55. (YU Xiaoxiao, WU Gen, SHEN Lianchen. UK National Quantum Technology Programme and Implication for China [J]. China

- Basic Science, 2020, 22(4): 51-55.)
- [24] Innovate UK. National Strategy for Quantum Technologies: A New Era for the UK. [EB/OL]. [2022-12-16]. <https://www.gov.uk/government/publications/national-strategy-for-quantum-technologies>.
- [25] Department for Science, Innovation and Technology. National Quantum Strategy [EB/OL]. [2022-05-15]. <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-science-innovation-and-technology>
- [26] 邹丽雪, 刘艳丽. 日本量子技术科技战略研究[J]. 全球科技经济瞭望, 2022, 37(5): 7-13. (ZOU Lixue, LIU Yanli. Research on Science and Technology Plans and Strategies of Japanese Quantum Technologies [J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2022, 37(5): 7-13.)
- [27] 中国科学院科技战略咨询研究院. 日本发布《量子技术创新战略(最终报告)》(Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences. Japan Released Quantum Technology Innovation Strategy (Final Report)) [EB/OL]. [2022-12-06]. http://www.casisd.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2020/202003/202006/t20200616_5607408.html.
- [28] 中国科学院科技战略咨询研究院. 日本制定新量子技术战略 (Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences. Japan Formulated A New Quantum Technology Strategy) [EB/OL]. [2022-05-15]. http://www.casisd.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2022/202206/202209/t20220927_6517669.html.
- [29] 周磊, 杨威, 余玲珑, 等. 美国对华技术出口管制的实体清单分析及其启示[J]. 情报杂志, 2020, 39(7): 23-28. (ZHOU Lei, YANG Wei, YU Linglong, et al. Research on the U. S. Technology Export Control Entity List Against China and Its Implications [J]. Journal of Intelligence, 2020, 39(7): 23-28.)
- [30] 陈劲, 阳镇, 朱子钦. 新型举国体制的理论逻辑、落地模式与应用场景[J]. 改革, 2021(5): 1-17. (CHEN Jin, YANG Zhen, ZHU Ziqin. The Theoretical Logic, Implementation Mode and Application Scenario of the New Type of National System [J]. Reform, 2021(5): 1-17.)
- [31] 瞭望周刊社. 《瞭望》专访中国科学院院士 南方科技大学校长薛其坤: 如何让量子科技创新链人才辈出? (OutlookWeekly Press. Interview with XUE Qikun, Academician of Chinese Academy of Sciences, President of Southern University of Science and Technology: How to Make Quantum Science and Technology Innovation Chain Talented?) [EB/OL]. [2022-12-06]. http://lw.news.cn/2021-12/21/c_1310385318.htm.
- [32] 周君璧, 董瑜. 美国量子研发布局对我国的启示[J]. 世界科技研究与发展, 2023, 45(6): 661-669. (ZHOU Junbi, DONG Yu. Enlightenment of U. S. Quantum R&D Layout to China [J]. WORLD SCI-TECH R & D, 2023, 45(6): 661-669.)

作者贡献说明

宋姗姗: 设计论文框架, 撰写与修改论文;
钟永恒: 设计论文题目, 参与论文内容修改;
刘 佳: 参与论文内容修改;
刘盼盼: 参与论文内容修改。