

基于文献计量的量子信息研究国际 竞争态势分析*

张志强¹ 陈云伟^{** 1} 陶 诚² 徐 婧¹ 田倩飞¹

(1. 中国科学院成都文献情报中心, 成都 610041; 2. 中国科学院发展规划局, 北京 100038)

摘 要: 为揭示量子信息领域的国际研发竞争态势, 利用文献计量学方法, 采用高被引科学家占比、研究团队学科专业背景多样性、年龄结构等指标, 从全球量子信息科研竞争态势和4个领先科研单元的比较两个角度开展研究。结果表明, 全球量子信息研究在20世纪90年代开始步入快速发展期, 美国和中国的科研产出优势显著, 中国科学院的论文产出在全球所有科研机构中处于领先地位。4个科研单元各具优势: 中科院量子卓越中心的论文总体影响力水平、高被引科学家占比、学科专业背景多样性等均低于麻省理工学院极限量子信息理论中心和牛津大学量子计算中心; 但是其处于可以做出重大知识创新发现的最佳年龄段的青年科学家占比最高, 竞争潜力优势明显, 且其科研范式以集团军式的联合研究为主, 更利于发挥团队优势, 攻关科研项目。最后, 本文提出了加强学科交叉研究、加强基础理论研究、加强人才队伍建设等方面的建议。

关键词: 量子信息; 量子通信; 量子计算; 文献计量; 竞争态势

中图分类号: G350 文献标识码: A doi: 10.16507/j.issn.1006-6055.2018.03.001

Bibliometric Analysis on International Competitive Situation of Quantum Information Research*

ZHANG Zhiqiang¹ CHEN Yunwei^{** 1} TAO Cheng² XU Jing¹ TIAN Qianfei¹

(1. Chengdu Library and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
2. Bureau of Development and Planning, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on bibliometric analysis, this paper sheds light on international research and development (R&D) competitive situation in the area of quantum information from two perspectives: global R&D competitive situation and comparison among four leading scientific research units. It is concluded that: global quantum information research has stepped into fast developing period since the 1990s; US and China have significant advantages in their research outputs; the paper output quantity of Chinese Academy of Sciences (CAS) is leading the way among the global scientific research institutes. Four scientific units each show its advantages: even though Quantum Study Center of Excellence, CAS, shows lower paper output quantity, share of highly cited scientists, and variety of discipline background than Quantum Theory Center of MIT and Quantum Computing Center of Oxford, it has more young scientists who are at the best age of creation, it has obvious advantage of competitive potential, and shows the type of group and united research in scientific paradigm which is a better way to exploit team superiority and tackle scientific challenges. At

2018-01-05 收稿 2018-01-28 接受 2018-02-25 网络发表
中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项(GHJ-ZLZX-2017-31)资助

** 通讯作者, E-mail: chenyw@clas.ac.cn

last, the paper gives suggestions including reinforcing the interdisciplinary studies, research of basic theories, and talents construction.

Key words: quantum information; quantum communication; quantum computing; bibliometric analysis; competitive situation

1 引言

量子信息是由物理科学与信息科学等多个学科交叉融合而形成的一门新兴前沿学科,是以量子力学基本原理为基础,对量子系统“状态”所带有的物理信息进行计算、编码和信息传输的全新信息方式,主要包括“量子通信”、“量子计算”和“量子精密测量”三大方向,有望在运算速度、信息安全、信道容量等方面突破传统信息系统的极限,具备重大的科学价值和巨大的应用前景^[1]。量子信息技术的研究与应用正是当前和未来的重大突破性领域之一,世界科技先进国家无不高度重视量子信息研发,投入巨资以期抢占量子信息科技制高点。据英国政府2016年底发布的《量子时代的技术机遇》报告,全球有六大国家/地区对量子技术的年度投入预算不低于1亿欧元,分别为欧盟5.5亿欧元、美国3.6亿欧元、中国2.2亿欧元、德国1.2亿欧元、英国1.05亿欧元和加拿大1亿欧元^[2]。

2016年4月,欧盟宣布将于2018年启动总额10亿欧元的“量子技术旗舰计划”,通过通信、模拟器、传感器和计算机这四方面的短中长期发展,实现原子量子时钟、量子传感器、城际量子链接、量子模拟器、量子互联网和泛在量子计算机等重大应用^[3]。2016年7月,美国公布《推进量子信息科学:国家挑战与机遇》报告,建议美国将量子信息科学作为联邦政府投资的优先事项,呼吁政产学研通力合作,确保美国在该领域的领导地位,增强国家安全与经济竞争力。报告指出,美国联邦

政府机构针对量子信息科学基础与应用研究的年度资助额达到2亿美元^[4]。2017年7月,创新英国组织(Innovate UK)与英国工程与自然科学研究理事会(EPSRC)联合投资1380万英镑用于支持开创性的量子技术研究,其中65%的资金用于支持公司活动,35%的资金用于支持学术研究^[5]。

中国的量子通信特别是量子保密通信研究处于全球领先地位,是中国引领全球创新的代表性研究方向之一,相关成果引人注目,尤其是2016年8月发射“墨子号”量子科学实验卫星以来,中国量子通信研究在国际上已居于引领地位。目前,“墨子号”已圆满实现全部三大既定科学目标,包括在国际上率先成功实现千公里级的星地双向量子纠缠分发,直接把此前的百公里级世界纪录提高了一个数量级^[6],以及在国际上首次成功实现从卫星到地面的量子密钥分发^[7]和从地面到卫星的量子隐形传态^[8],为我国在未来继续引领世界量子通信技术和空间尺度量子物理基本问题检验前沿研究奠定了坚实的科学与技术基础。此后,“墨子号”又在中国和奥地利之间首次实现距离达7600公里的洲际量子密钥分发,并利用共享密钥实现加密数据传输和视频通信。该成果标志着“墨子号”已具备实现洲际量子保密通信的能力,为未来构建全球化量子通信网络奠定了坚实基础^[9]。2017年,全长2000多公里的世界首条千公里级量子保密通信干线“京沪干线”正式投入使用,有望使我国的金融、政务信息率先迈入到绝对安全的量子保密传输时代。完成这一系列重大进展的是由潘建伟院士领导的中科院量

子信息与量子科技前沿卓越创新中心(2017年5月已更名为中科院量子信息与量子科技创新研究院,以下简称中科院量子卓越中心),该团队在我国量子通信研究领域做出了开创性的工作。

近年来,国际上量子科技领域的研究人员在包括量子计算、量子模拟、量子通信、量子密码和量子传感等领域不断取得重要研究进展^[10],量子信息领域已发展成为国际研发竞争重要焦点之一。在量子计算机研究方面,新纪录不断被刷新——2017年5月中科院量子卓越中心研发了10比特超导量子线路样品,以及历史上第一台基于单光子的量子模拟机;2017年11月,美国IBM宣布成功搭建20比特量子计算机云服务并研制出50比特原型机;2018年2月,英特尔发布49比特超导量子测试芯片;2018年2月,中科院量子卓越中心成功实现64比特量子计算机的仿真,并与阿里云在量子计算云平台发布11比特超导量子计算服务,打破了2017年由IBM创造的56比特仿真记录,并成为继IBM后全球第二家向公众提供10比特以上量子计算云服务的系统。2018年3月,谷歌发布全球首个72量子比特通用量子计算机,将全球量子霸权竞赛再次推向高潮。也有科技情报研究人员尝试利用文献计量学方法分析相关领域的论文或专利数据来揭示量子信息研究进展和研发热点,例如,高芳等^[11]对量子信息领域的论文和专利数据进行了基本的定量统计;刘小平等^[12]利用共词分析方法对量子信息领域2002—2011年SCI论文的关键词进行分析,挖掘量子信息科学的研究热点。然而,针对量子信息研发全球竞争态势的研究尚不多见。

为了全面揭示国际上量子信息研发竞争态势与格局,本文采用文献计量学方法为主的综合性评价方法,以论文产出情况反映全球研发态势,同

时选择国际领先的代表性科研单元开展比较分析,以反映研究竞争态势。

2 数据与方法

本文借鉴 quope. eu 网站^[13]对量子信息的定义,制定了如下量子信息论文检索策略,并在 ISI-WOS 数据库中检索下载全部年份的所有文献类型的论文数据,作为论文计量分析的数据基础,数据检索时间为2017年4月15日。

量子信息检索式: TS = ((Quantum and ((information) or (eraser) or (Quantum - Classical Transition) or (coherence) or (entanglement) or (measurement) or (network) or (storage) or (memory) or (communication) or (fingerprint) or (processor) or (Cavity QED) or (clock synchronization) or (imag*) or (sensor) or (magnetometry)))) OR ((quantum NEAR/5 comput*) OR (quantum NEAR/15 algorithm*) OR (quantum NEAR/10 simulat*) OR (quantum NEAR/10 error*) OR (“quantum circuit” OR “Quantum cellular automata” OR “Quantum Turing machine” OR “quantum register”) OR (quantum NEAR/10 communication*) OR (quantum NEAR/15 protocol*) OR (quantum NEAR/15 cryptograph*) OR (“quantum key”)))) 。

比较分析对象遴选方案:从论文数居前10的机构中,选择研究领域和组织模式相近、研究方向又各具特色的国际顶尖研究团队(科研单元)开展比较分析。所谓科研单元,是指由几个或多个课题组构成的研究单元,通常是指在科研院所、高校或研发型企业等内部建立的研究中心、重点实验室、卓越创新中心等^[14]。本文选定的分析对象包括在中国处于领先地位的中科院量子卓越中

心、在量子理论研究方面位居国际领军地位的美国麻省理工学院凯克极限量子信息理论中心(简称“麻省理工量子理论中心”),以及在量子计算及应用研究上颇具特色的英国牛津大学量子计算中心(简称“牛津量子计算中心”)。此外,我们还关注到加拿大卡尔加里大学在2013年创建了量子科学与技术研究所(简称“卡尔加里量子科技所”),着眼于量子信息理论和实验主题前沿研究,在利用城市光纤网络实现量子通信研究方向也取得了国际领先成果^[15],因此也将其纳入比较分析。最终选定麻省理工量子理论中心、牛津量子计算中心以及卡尔加里量子科技所,与中科院量子卓越中心开展对标分析。

本文检索各科研单元的全部科学家的论文,再汇总成为各科研单元的论文集合,用于开展论文的计量分析。所采用的各科学家的学科背景、年龄等定性信息均来自于各科研单元官网或各科学家个人主页发布的信息。利用 Derwent Data Analyzer(DDA)软件对论文进行统计分析,利用 Science of Science(Sci2)软件(<http://cns.iu.indiana.edu>)开展科学家合作网络分析。

3 量子信息领域全球研发竞争格局

SCI论文数量增长趋势反映出,量子信息研究从1991年起才真正迈入研发快速发展时期,此后论文数量一直急剧增长(图1)。99%以上的论文均是在1991年以后发表的,这主要得益于 Stephen Barnett、Paul Benioff、Richard P. Feynman 等在20世纪70—80年代相继提出将量子力学应用于信息科学的开创性设想,并与后继者共同奠定了量子通信和量子计算的基础,开启了崭新的发展阶段。

美国、中国、德国、日本、英国、法国、意大利、加拿大、俄罗斯和印度的论文数量位居前十位

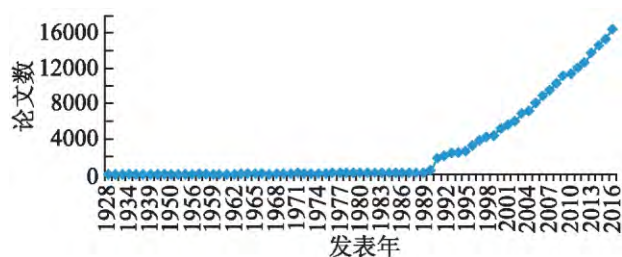


图1 量子信息 SCI 论文数年度发展趋势(基于 WOS 数据库)

Fig.1 Annual Trend of Quantum Information SCI Paper Counts (Based on WOS Database)

(图2)在量子信息领域取得的重大成就大多来自于这些国家。

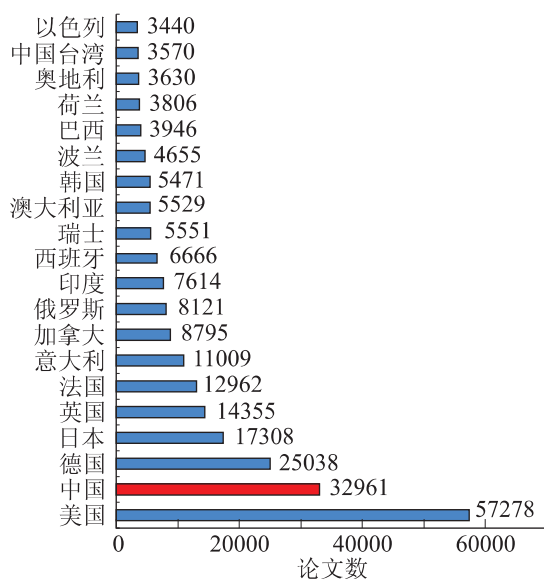


图2 量子信息 SCI 论文数 TOP20 国家/地区(基于 WOS 数据库)

Fig.2 TOP20 Country/Area of Quantum Information SCI Paper Counts (Based on WOS Database)

在论文数量最多的前10个机构中,美国有3家,分别是麻省理工学院、加州大学伯克利分校和加州理工学院;中国和英国各2家;俄罗斯、日本和法国各1家。其中,中国科学院以5756篇论文数位列全球第一,且呈现出高速的增长趋势;中国科学技术大学在2004年以前的论文数在前10机构中处于末位,但得益于之后的高速发展,其在2016年的论文数量跃居第二(图3)。

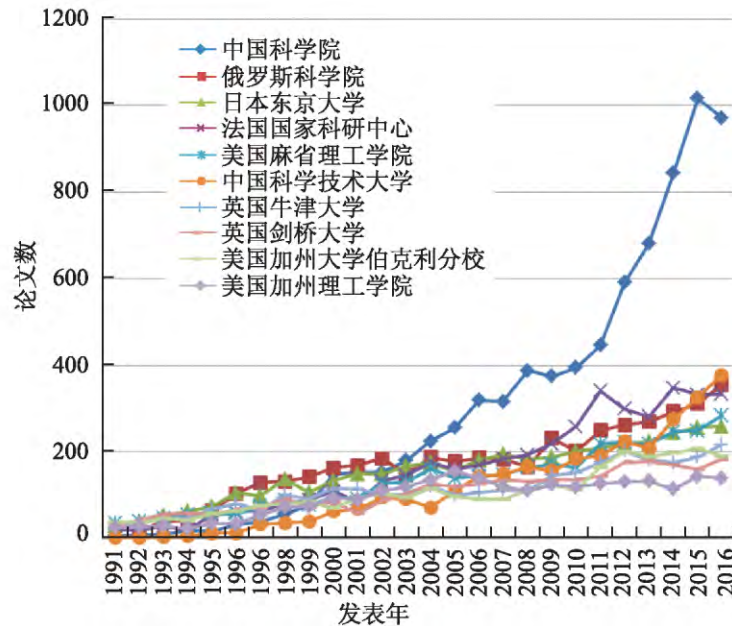


图3 量子信息SCI论文数TOP10机构年度论文数发展趋势(基于WOS数据库)

Fig. 3 Annual Trends of Quantum Information SCI Paper Counts of TOP10 Institutions (Based on WOS Database)

4 国际顶尖科研单元比较分析

在当前量子信息研究步入全球竞赛的背景下,我国的量子信息研究在全球具有领先优势。下面将开展中国的领先科研单元“中科院量子卓越中心”与国际领先科研单元麻省理工量子理论中心、牛津量子计算中心和卡尔加里量子科技所的比较分析,以观察当前在量子通信和量子计算等方向上的国际竞争态势。

4.1 各研究单元战略定位与基本信息

中科院量子卓越中心的定位是为形成完整的国家实验室构架创造条件并奠定基础,重点聚焦于量子通信和量子计算等实验与应用研究;而麻省理工量子理论中心的定位是探索和解决在极端量子信息环境下NP完全问题(世界七大数学难题之一,即多项式复杂程度的非确定性问题)、量子通信编码技术,以及量子传感和控制的基本物理限制这三大理论问题;牛津量子计算中心的定位是利用新一代设备更好地探索量子效用;卡尔

加里量子科技所的定位是开展量子科学与技术领域关键理论和实验主题的前沿研究(表1)。

4.2 论文产出比较

统计各科研单元的SCI论文(截至2017年4月15日)发现(图4),中科院量子卓越中心和牛津量子计算中心的论文数较多,而另外两家科研单元的论文数较少。然而,由于4个科研单元人员数量规模不同,因此,为更加客观地呈现各科研单元科研论文产出能力的差异,本文统计4个科研单元的人均论文产出情况(图5)发现,麻省理工量子理论中心的人均论文数最多,其论文篇均被引频次也最高。

此外,本文还统计了4个科研单元在《科学》和《自然》两大国际顶级期刊上的发文量,中科院量子卓越中心在两刊的发文量总体与麻省理工量子理论中心相当,少于牛津量子计算中心(图6)。

这或许表明,中科院量子卓越中心在以论文产出为表征的基础理论研究方面优势并不显著。

表1 量子信息领域四家国际有影响科研单元的概要对比

Tab. 1 Comparison of four International research units in quantum information

| 科研单元 | 所在国家 | 成立年 | 目标与愿景 | 核心科学家及其研究方向 |
|------------|------|------|--|--|
| 麻省理工量子理论中心 | 美国 | 2007 | 探索 and 解决在极端量子信息环境下三个相互关联的理论问题: 一是解决 NP 完全问题的平均实例; 二是推导量子通信方式的能力; 三是探索量子传感和控制的基本物理限制。 | 9 位核心科学家, 研究领域覆盖量子理论、数学、量子通信、量子计算、算法、软硬件、应用(机器人、航空航天) 等。 |
| 牛津量子计算中心 | 英国 | 1998 | 面向量子技术, 利用新一代设备更好地探索量子效用。 | 45 位核心科学家, 研究领域覆盖量子光学、量子计算、量子通信、光和物质界面的工程量子态、低温原子分子和超导设备、量子光电材料超导体和磁铁等, 同时开展量子信息前沿研究, 覆盖量子数学研究、量子信息的物理基础研究(理论探索与实验) 。 |
| 中科院量子卓越中心 | 中国 | 2014 | 按照“国家急需、世界一流”的总体要求, 大力推动量子信息与量子科技前沿领域科研、人才、学科“三位一体”协同创新能力的提升, 形成该领域国际著名的学术中心, 服务于国家重大战略需求。 | 63 位核心科学家(量子卓越中心始建时数据), 研究领域覆盖量子通信、物理化学领域的分子光子学和单分子尺度量子调控、量子器件和冷原子物理。 |
| 卡尔加里量子科技所 | 加拿大 | 2013 | 开展量子科学与技术领域关键理论和实验主题的前沿研究, 针对该领域提供卓越的教育与培训, 与其他科研院所以及产业伙伴建立合作关系。 | 14 位核心科学家, 四个主要的研究方向分别是: 量子光学、分子建模、纳米技术、量子信息和计算。 |

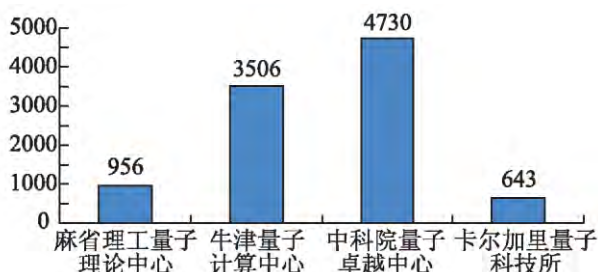


图4 四个科研单元的量子信息论文数比较

Fig. 4 Comparison of quantum information paper counts of the four international research units

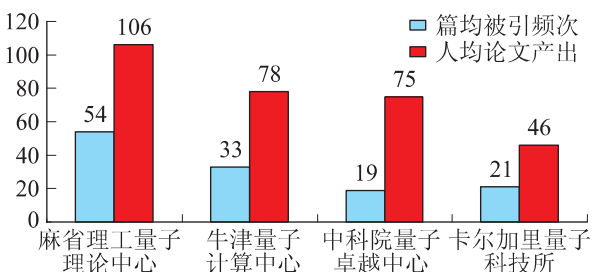


图5 四个科研单元的量子信息论文篇均被引频次比较

Fig. 5 Comparison of quantum information paper citation frequency of the four international research units

但是事实上, 最近几年国际上在量子理论研究方面并无重大突破, 重大进展多来自于应用与实验

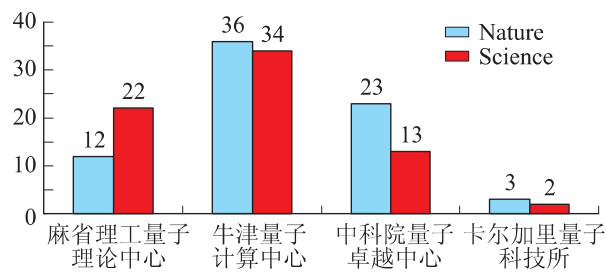


图6 四个科研单元的量子信息顶级期刊发文量比较

Fig. 6 Comparison of quantum information paper counts of the four international research units in top-level journals

研究领域, 中科院量子卓越中心正是这方面的领跑者, 其在量子通信、量子纠缠、量子科学实验卫星、量子计算机等领域的实验和应用研究均已处于国际并跑至领跑地位。

4.3 人才队伍结构比较

本文从各科研单元科学家学术影响力(基于论文篇均被引频次) 分布、年龄结构、学科专业背景等角度揭示其人才队伍结构。

首先, 本文统计了各科研单元所有科学家的论文篇均被引频次, 然后构建基于篇均被引频次区间的分布图(图7), 由图可见: 虽然麻省理工

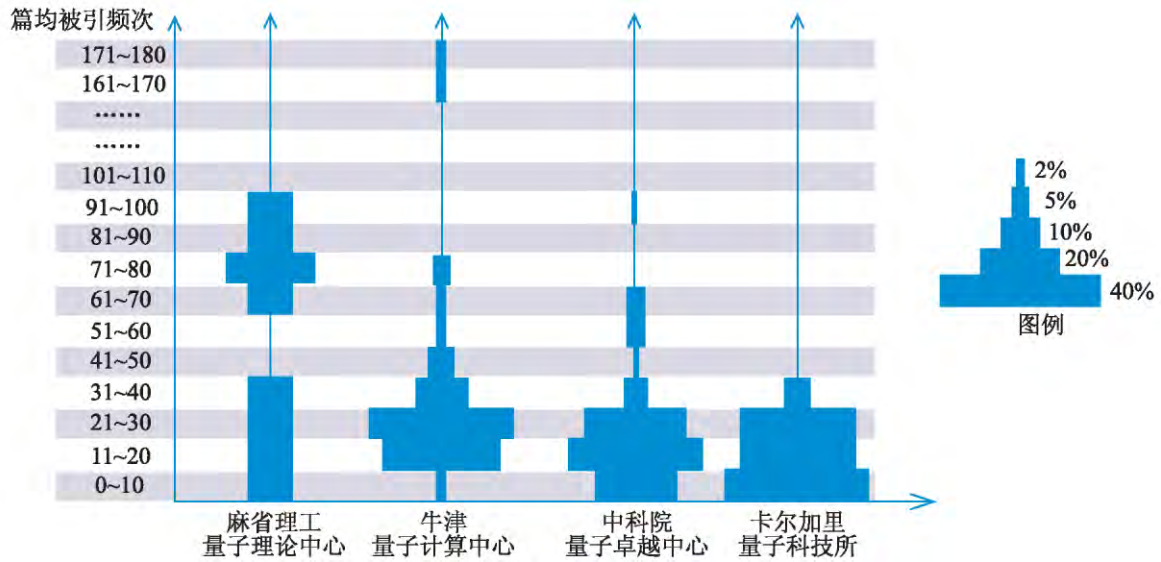


图 7 四个科研单元基于篇均被引频次的科学家分布图

Fig. 7 Distribution of quantum information paper citation frequency per paper of the four international research units

子理论中心仅有 9 位科学家,但其论文篇均被引频次却由高到低均匀分布;而牛津量子计算中心和中科院量子卓越中心多数科学家的篇均被引频次处于分布图下侧。比较而言,卡尔加里量子科技所的论文篇均被引频次总体上最低。

其次,从年龄分布来看,中科院量子卓越中心的人才队伍最年轻,年轻科学家占比最高,而其他三家科研单元均是中年科学家占比最高(图 8)。中科院量子卓越中心的科学家平均年龄为 43.8 岁;而麻省理工量子理论中心、牛津量子计算中心和卡尔加里量子科技所的科学家平均年龄为 62.2 岁、49.9 岁和 49.6 岁。中科院量子卓越中心大部分科学家年龄集中在 30~39(占比 40%)和 40~49(占比 40%);麻省理工量子理论中心的科学家年龄主要集中于 50~59(占比 44%);牛津量子计算中心和卡尔加里量子科技所的科学家年龄主要集中于 40~49 岁,分别占比 41% 和 50%。

从诺奖科学家重大知识创新发现的年龄峰值规律来看^[16],中科院量子卓越中心的人才年龄处于可以做出重大知识创新发现的最佳年龄段。该

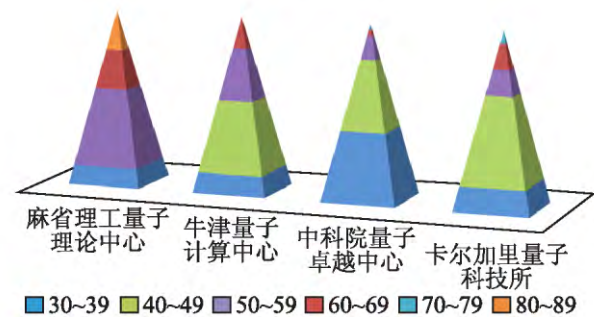


图 8 四个科研单元科学家的年龄分布

Fig. 8 Age distribution of scientists in the four international research units

中心的潘建伟、陈宇翱和陆朝阳是获得菲涅尔奖的仅有的三位中国科学家。此外,陆朝阳在 2016 年还被《自然》杂志评选为中国“十大科学之星”;获 2015 年度国家自然科学奖一等奖的潘建伟院士团队的五位成员均为 70 后或 80 后。

第三,从学科背景来看,中科院量子卓越中心的人才队伍集中于物理学领域,而其他三个科研单元科学家的学科背景则较为多样化,特别是牛津量子计算中心的人员学科专业背景最为丰富,甚至包括哲学和神学背景的科学家(图 9)。

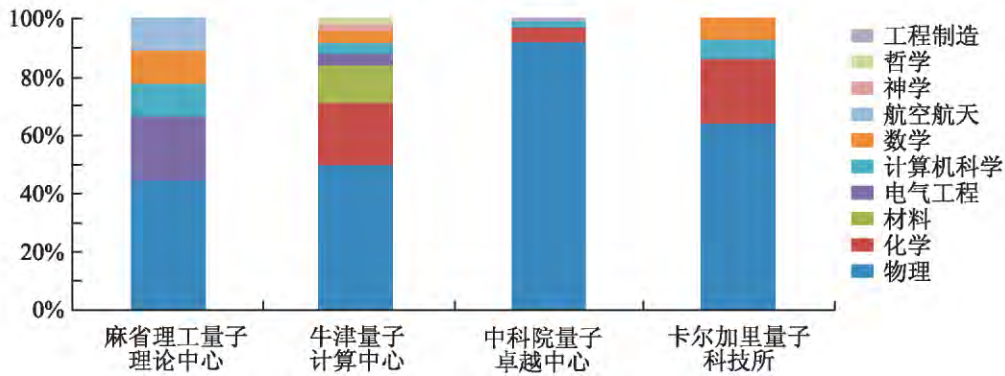


图 9 四个科研单元科学家的学科背景对比

Fig. 9 Comparison of Scientists' Research Background in The Four International Research Units

可见中科院量子卓越中心高被引论文占比低,团体平均年龄最年轻,年轻科学家占比最高,学科专业背景相对单一地集中于物理学领域。而其他三个科研单元平均年龄较大,中年科学家占比较高,学科专业背景相对更加多样化。

研单元的科研模式特点。本文所谓科研模式是指科研单元开展科学研究的学科结构以及研究人员开展科学研究的行 为特征,是区分不同机构或不同类型机构研究特征的一种参考,可利用科学家合作网络和引文网络来揭示^[17]。

4.4 科研模式比较

本文利用科学家合作网络结构来揭示 4 个科

通过构建 4 个科研单元的科学家合作网络发现,中科院量子卓越中心呈现出极强的集团军式

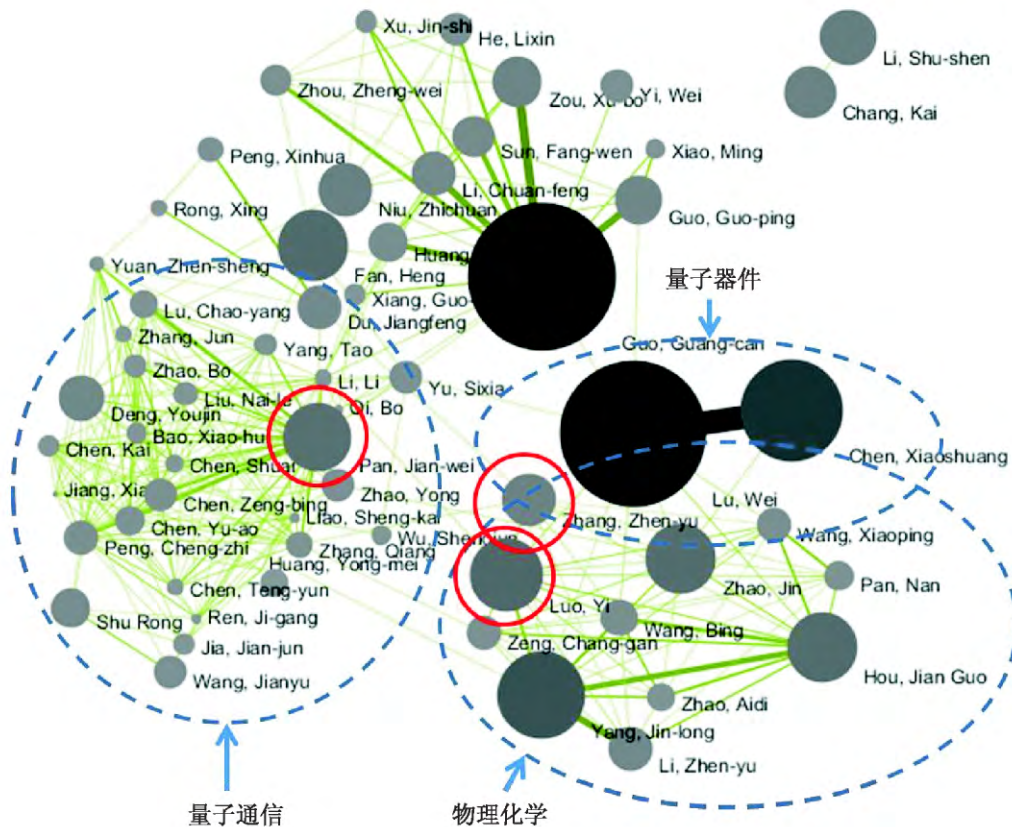


图 10 中科院量子卓越中心 63 位科学家的合作网络图(仅显示 63 位科学家)

Fig. 10 Co-operation network of 63 scientists in quantum excellence center at CAS

的工作模式,具有极强的联合攻关特征;而麻省理工量子理论中心和牛津量子计算中心两家科研单元的科学家相对独立。如图 10 所示,中科院量子卓越中心的科学家形成了几个密集合作团队,以潘建伟院士等为中心的团队,呈现出了极强的合作关系。

而麻省理工量子理论中心的科学家合作网络(图 11)则较为稀疏,9 位科学家之间维持了一定弱强度的合作关系,但更倾向于独立开展研究,各自拥有相对独立的合作网络,合作者多为博士后、访问学者和学生。可见,其在保持独立性的同时又维持着一定水平的合作。9 位核心科学家中,有多位是量子信息领域的领军人物或奠基性人才。例如 Jeffrey Goldstone 在 1962 年提出了 Gol-

dstone 定理^[18],是量子场论的奠基人,证明了希格斯玻色子理论; Peter Shor 是量子分解算法(Shor 算法)的提出者^[19],证明可以用量子计算机来破解现在用的 RSA 加密算法,掀起了研究量子计算机的高潮。Shor 算法是迄今量子计算领域最著名的算法,2008 年由潘建伟院士团队在国际上首次用光子比特实验实现^[20],2016 年又由 MIT 研究人员第一次以可扩展的方式实现^[21]。

牛津量子计算中心的 45 位科学家中,量子材料领域的科学家合作程度相对较高,其他领域的合作以团队内合作为主,团队间合作维持弱关联关系,科学家总体上呈现稀疏的弱合作关系(图 12)。其中,尤为值得一提的是 Jonathan Jones 是跨学科转型并在量子信息领域获得成功的典型案

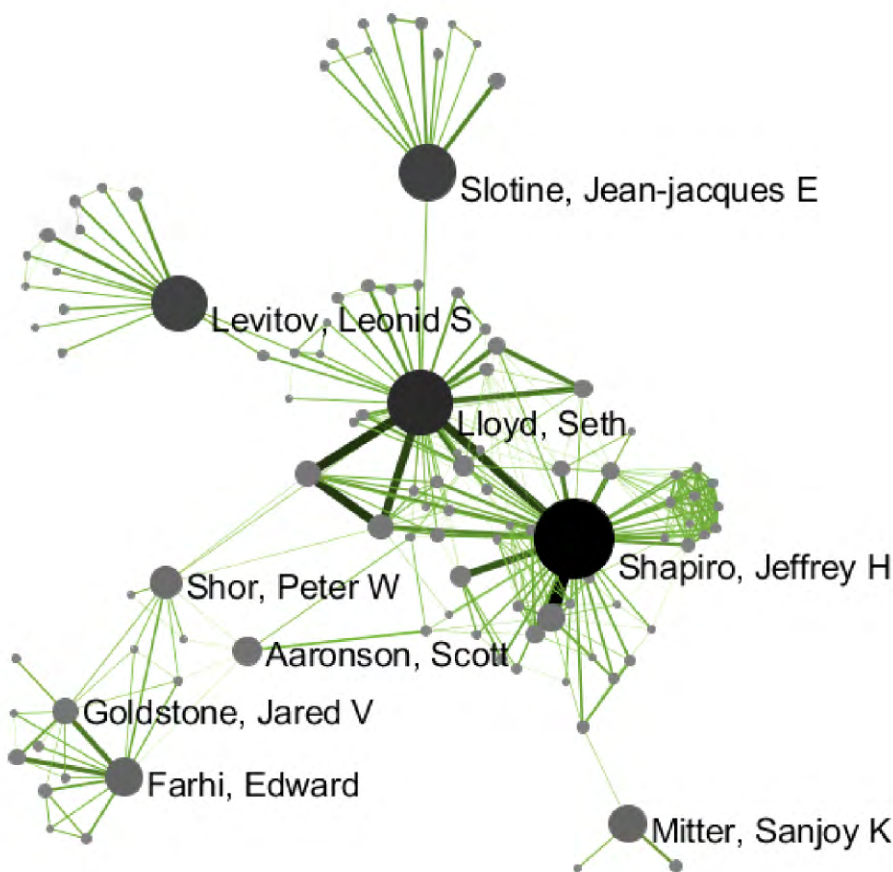


图 11 麻省理工量子理论中心 9 位科学家的合作网络图(仅显示论文数量 ≥5 的合作者)

Fig. 11 Co-operation network of 9 scientists in MIT center for theoretical physics

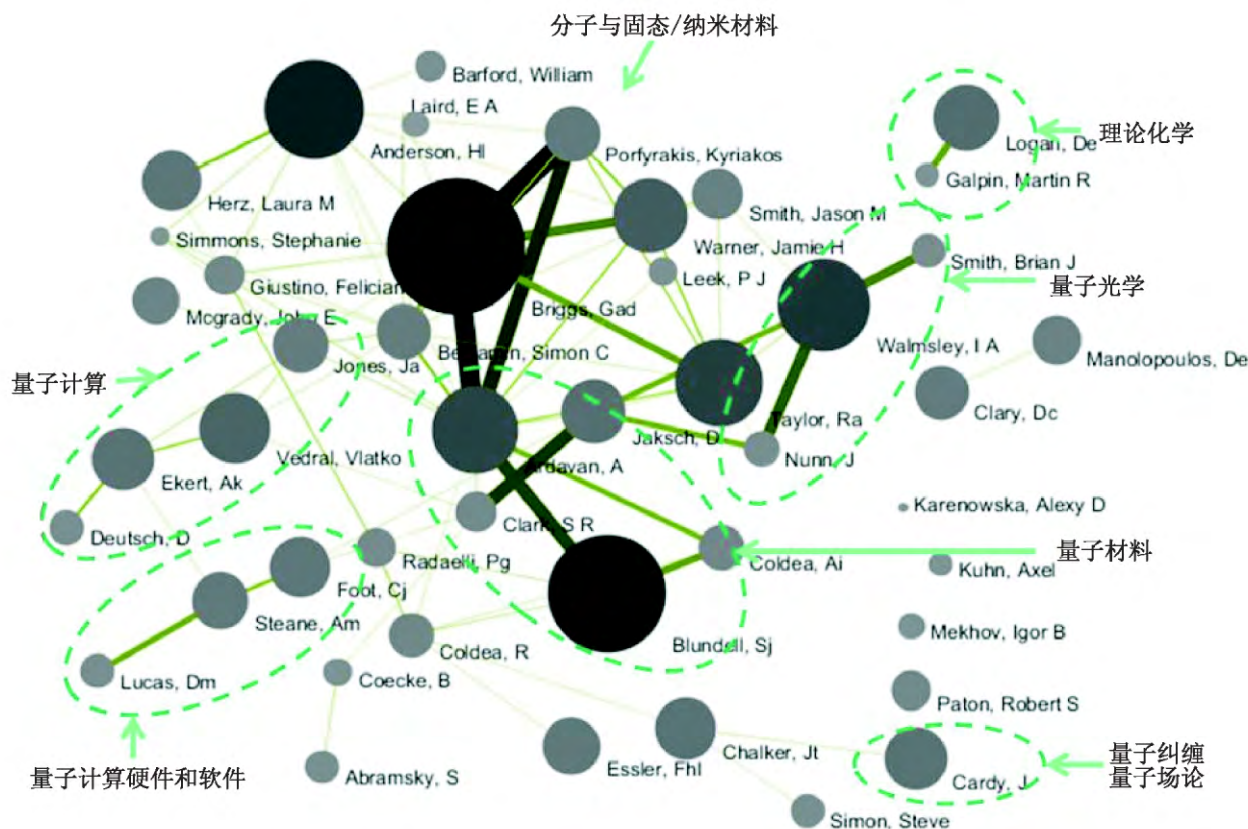


图 12 牛津量子计算中心 45 位科学家的合作网络图(仅显示 45 位科学家)

Fig. 12 Co-operation Network of 45 Scientists in Centre for Quantum Computation at The University of Oxford

例, 他将其在化学领域的核磁共振技术成功用于几何量子计算, 并与牛津大学的几位科学家共同提出了利用核磁共振的几何量子计算范式。Vlatko Vedral 主要从事量子物理的前沿研究, 持续开展量子计算和量子关联的前沿探索, 最近几年持续开展绝热量子计算模式研究。Andrew Steane 主要开展离子阱量子计算研究, 同时在量子计算硬件和软件上持续开展研究并有很多高影响力的论文。

卡尔加里量子科技所的工作模式则既有类似集团军的联合攻关, 也有几位科学家各自独立地开展研究(图 13)。处于网络中心地位的几位研究人员均在量子信息领域做出了卓越的贡献。例如, Barry Sanders 在量子极限下的测量理论、非经典光场理论、实用化的量子密码学和光学实现及

应用等诸多领域做出了原创性工作; Alexander Lvovsky 在实验和理论方面的贡献对量子光学技术领域产生了革命性影响, 在 2010 年获得了国际量子通信奖; Wolfgang Tittel 在量子通信领域进行了很多开创性实验, 包括采用标准电信光纤网络实现量子加密技术。

5 结果与讨论

基于前文的比较分析发现, 自 1991 年起国际上量子信息领域研究进入快速发展时期, 近二十多年来全球量子信息领域的论文数一直保持着高速增长态势, 其中美国、中国和德国的量子信息论文总数位居前三位, 特别是美国的总体领先优势尤为明显, 而在机构层面, 中国科学院则在论文数量上占据了绝对领先的优势。

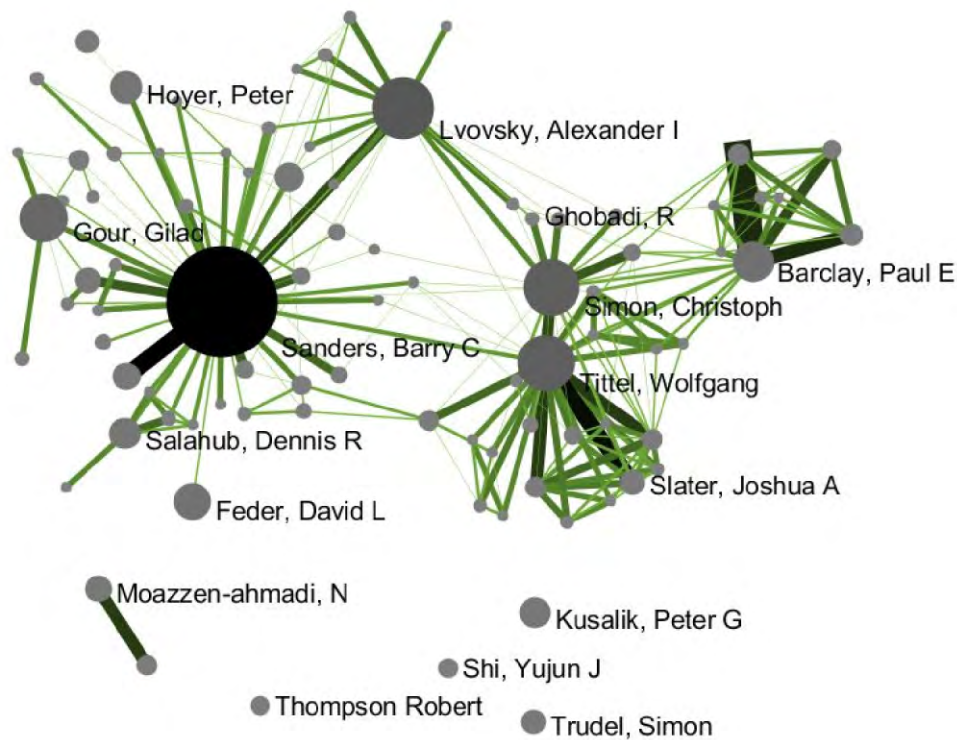


图 13 卡尔加里量子科技所 14 位科学家的合作网络图

Fig. 13 Co-operation network of 14 scientists in institute for quantum science and technology at the university of calgary

正如前文所述,最近几年,中国科学院和中国科学技术大学在量子通信领域不断取得世界领先的重大突破性成果,本文通过比较分析 4 个全球领先的科研单元,揭示了其竞争发展态势。分析发现,中科院量子卓越中心的论文数量多,但论文的总影响力(论文篇均被引频次)低于麻省理工学院和牛津大学的两个科研单元。麻省理工量子理论中心以理论研究优势突出,集聚了多位大师级科学家;而中科院量子卓越中心的实验研究最具优势,针对量子信息领域可能产生革命性突破的重点方向和国际科学前沿热点问题,应加强统筹布局,力争突破一批关键科学问题,取得一批重大原始创新成果,不断提升影响力。

在人才队伍结构方面,中科院量子卓越中心的高被引论文科学家人数占比较低。因此,为满足我国学术界和产业界对量子信息科学领域人才

的需求,确保并保持我国在量子信息科学领域的强劲发展势头,建议我国应继续强化开放的人才理念,强化团队开放意识,重视人才培养、开放交流,加强与国际、国内顶尖研究机构、团队和杰出人才的深入学术交流,引进和稳定国际顶尖创新人才。同时,应充分利用青年科学家占比最高、正处于可以做出重大知识创新发现的最佳年龄段,应为他们提供宽松的创新环境和稳定的支持,以便令其在最佳年龄段潜心进行最具创新性的科学研究。

在学科背景方面,中科院量子卓越中心的人员学科背景相对单一地集中于物理领域,学科多样性不足,而麻省理工量子理论中心和牛津量子计算中心的人员学科背景更具多样性,更有利于学科交叉和融合创新。量子信息科学并非仅涉及物理学,还与计算机科学、应用数学、电气工程、系

统工程等领域息息相关。随着科学的发展,仅凭某一学科领域的研究已很难解决复杂的现实问题。在科技史上,科学前沿的很多重大突破都得益于学科交叉融合。因此,应加强团队成员学科背景的交叉性,注意引进相关重要科学背景的一流人才,促进创新团队人员学科专业背景的多样化,形成学科交叉融合的优势,以有利于学科交叉方向上新知识的发现。

在科研模式方面,中科院量子卓越中心呈现出极强的集团军式的工作模式,具有极强的联合攻关特征,这种优势是麻省理工量子理论中心和牛津量子计算中心两家科研单元所不具备的。卡尔加里量子科技所的科研模式介于上述两类中间,既有相对独立地开展研究的科学家,也有部分采取集团军式的联合研究团队。

截至目前,中国科学院已占据并引领着全球量子通信研究前沿,由其建设的世界第一条量子保密通信骨干线路——中国国家量子保密通信“京沪干线”于2017年9月29日正式开通,“京沪干线”与“墨子号”量子科学实验卫星成功对接,在世界上首次实现了洲际量子保密通信。中科院量子信息与量子科技前沿卓越创新中心也于2017年5月正式更名为中科院量子信息与量子科技创新研究院,我国正以其为核心力量筹备量子信息科学国家实验室的建设工作,这必将进一步极大提升我国在量子信息领域的研发能力和水平,我国或将在未来持续引领全球量子信息科学的发展。

参考文献

- [1] 中国信息通信研究院. 美国科学技术委员会: 推进量子信息科学发展 - 美国的挑战和机遇 [EB/OL]. [2017-05-01]. <http://www.chyxx.com/news/2016/0913/448435.html>.
- [2] UK Government Office of Science. The Quantum Age: technological opportunity [EB/OL]. [2017-01-10]. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/564946/gs-16-18-quantum-technologies-report.pdf.
- [3] Elizabeth Gibney. Europe plans giant billion-euro quantum technologies project [EB/OL]. [2017-04-26] <http://www.nature.com/news/europe-plans-giant-billion-euro-quantum-technologies-project-1.19796>.
- [4] NSTC. Advancing quantum information science: national challenges and opportunities [EB/OL]. [2016-07-24]. https://www.whitehouse.gov/sites/whitehouse.gov/files/images/Quantum_Info_Sci_Report_2016_07_22%20final.pdf.
- [5] Innovate UK. £ 14 million for ground-breaking quantum technologies [EB/OL]. [2017-07-31]. <https://www.gov.uk/government/news/14-million-for-ground-breaking-quantum-technologies>.
- [6] YIN J, CAO Y, LI Y H, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers [J]. *Science* 2017, 356(6343): 1140.
- [7] LIAO S K, CAI W Q, LIU W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution [J]. *Nature*, 2017, 549: 43-47.
- [8] REN J G, XU P, YONG H L, et al. Ground-to-satellite quantum teleportation [J]. *Nature*, 2017, 549: 70-73.
- [9] LIAO S K, CAI W Q, HANDSTEINER J, et al. Sat-

- ellite-Relayed Intercontinental Quantum Network [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(3): 030501.
- [10] 郭光灿, 张昊, 王琴. 量子信息技术发展概况 [J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(3): 1-14.
GUO Guangcan, ZHANG Hao, WANG Qin. Review on development of quantum information technology [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2017, 37(3): 1-14.
- [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, 5(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, 5(6): 164-170.
- [12] 刘小平, 李泽霞. 基于共词分析的量子信息学前沿热点分析 [J]. *科学观察*, 2014, 9(5): 13-22.
LIU Xiaoping, LI Zexia. Co-word Analysis of the Research Frontiers of Quantum Information Science [J]. *Science Focus*, 2014, 9(5): 13-22.
- [13] BINOSI D, CALARCO T. Quantum Information Classification Scheme-QICS. [2017-05-01]. <http://quope.eu/content/qics-book>.
- [14] 陈云伟, 邓勇, 陈方, 等. 科研单元创新力评价模型及实证研究 [J]. *情报杂志*, 2015, 34(5): 59-65.
CHEN Yunwei, DENG Yong, CHEN Fang, et al. Evaluation Model and Empirical Study of Scientific Research Unit of Innovation Capabilities [J]. *Journal of Intelligence*, 2015, 34(5): 59-65.
- [15] 科技日报. 两项实验证明: 通过城市网络进行量子隐形传态技术上可行 [EB/OL]. [2016-09-28]. http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/201609/t20160921_127809.htm.
Science and Technology Daily. Two experiments prove that it is feasible to carry out quantum teleportation through the city network. [EB/OL]. [2016-09-28]. http://www.most.gov.cn/gnwkjdt/201609/t20160921_127809.htm.
- [16] 门伟莉, 张志强. 科研创造峰值年龄变化规律研究——以自然科学领域诺奖得主为例 [J]. *科学学研究*, 2013, 31(8): 1152-1159.
MEN Weili, ZHANG Zhiqiang. On the trend of most creativity age for nobel winners in natural science [J]. *Studies in Science of Science*, 2013, 31(8): 1152-1159.
- [17] 陈云伟, 许轶, 王立娜, 等. 基于网络结构的科研单元的科研范式研究 [J]. *图书情报知识*, 2016(5): 53-61.
CHEN Yunwei, XU Yi, WANG Lina, et al. Network-based Analysis on Scientific Paradigm of Scientific Research Unit [J]. *Document, Information & Knowledge*, 2016(5): 53-61.
- [18] GOLDSTONE J, SALAM A, WEINBERG S. Broken Symmetries [J]. *Physical Review*, 1962, 127: 965-970.
- [19] SHOR P W. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999.
- [20] LU C Y, BROWNE D E, YANG T, et al. Demonstration of a compiled version of Shor's quantum factoring algorithm using photonic qubits [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(25): 250504.
- [21] MONZ T, NIGG D, MARTINEZ E A, et al. Realization of a scalable Shor algorithm [J]. *Science*, 2016, 351(6277): 1068.