

· 科学论坛 ·

量子科技领域研究影响力及 资助状况国际对比分析

Phill Jones¹ 周鸣昕² 董超^{3*} Nicko Goncharoff¹ 郑永和³

(1. Digital Science, London EC2A4EG;

2. Springer Nature, 上海 200031;

3. 国家自然科学基金委员会政策局, 北京 100085)

[摘要] 本文基于 Web of Science 数据库和 Dimensions 数据库, 分析了七国集团国家、部分金砖国家和韩国在量子科技领域的国际科技论文产出总体状况, 并从量子钟、量子感知、量子通信、量子计算四个方面研究了各自的相对产出、相对引用影响力和国际合作情况。同时, 还对七国集团国家和中国在上述领域获得项目资助的情况进行了对比, 并对美国科学基金会和中国国家自然科学基金委员会在该领域资助所产出的国际科技论文情况开展了比较分析。

[关键词] 量子钟; 量子感知; 量子通信; 量子计算

近年来, 量子科技领域的研究突飞猛进, 在众多学科领域有广泛应用, 取得了显著进展。在全球竞争背景下, 量子科技领域的研究成果将给政府、商业以及社会的各方面带来潜在变革, 基于量子科技所研发的新产品可能会带来广泛的收益。今天我们所知晓的量子科技很多来源于量子物理学, 而未来的量子科技则可能基于量子力学中更为精细且不为人们熟悉的方面。对比分析量子科技领域的论文产出与资助情况, 将有助于全面了解量子科技的发展, 有利于识别未来的机遇与挑战。

1 数据来源与研究方法

考虑到当一个学术术语(如“量子”)变成“热点话题”时, 看似与之相关的研究往往超过实际数量, 因此会导致分析结果失真。我们通过缩小检索范围的方式, 应对和消除上述风险。文献的检索策略根据关键专家组, 特别是《自然》杂志的编辑所给出的信息来设定。

本文主要涉及两方面数据。一是文献计量数

据, 主要源于 Web of Science (WoS) 数据库。我们采集了 1991 至 2014 年与“量子”有关的所有出版物的文献数据。国别包括: 美国、英国、德国、法国、日本、意大利、加拿大, 以及中国、俄罗斯、印度、巴西和韩国。七国集团和中国进行比较的国别数据, 时间范围为 2004—2013 年。二是科研资助数据, 七国集团国家的数据主要来源于 Digital Science 旗下的 Dimensions 数据库, 中国科研资助的数据主要源于“科学基金共享服务网”的公开信息以及 Dimensions 中所包含的 100 多万条获得过中国国家自然科学基金资助的出版物数据(该数据由系统从出版物和致谢部分自动提取, 来源包括 CrossRef 数据库以及 Digital Science 签约出版商)。

针对以上数据, 我们通过文献计量分析, 考察了量子科技领域国际科技论文产出和相对引用影响力, 以及主要国家之间合作情况, 进而选取量子科技领域的四大主题进行论文产出和资助情况分析, 最后对美国和中国的相关资助情况进行对比研究。

2 总体产出情况分析

2010 年以来,全球每年发表量子相关的论文为 3.0—3.5 万篇。2000 年以来,七国集团国家增速放缓,而金砖国家(如,巴西、俄罗斯、印度、中国)和韩国持续增长。在很长一段时间内,美国作者发表的论文数占全球比重达四分之一,但近年来其份额不断下降。美国目前每年的产出论文为 7—8 千篇,大约是上世纪 90 年代初的两倍,这和美国科研的总体发展状况相符。在此期间,德国在量子方面的论文产出增长超过 3 倍,2014 年发表成果 3 600 篇。中国在这一时期虽然仅占世界份额的 12%,但论文产出增长迅猛,目前在量子科技领域发表的论文数量已超过美国。(见图 1)

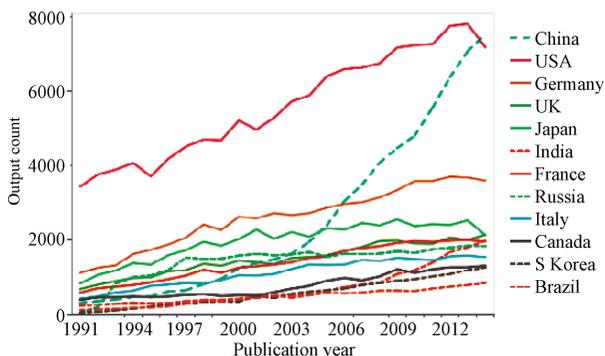


图 1 1991—2014 年七国集团及相关国家量子科技领域的论文产出情况

增长 25 倍,而韩国增长则高达 33 倍。中国、韩国等国家在量子科技领域的科研产出增长率显著高于七国集团国家。从增长的绝对数量来看,中国在本文涉及的国家中是最高的。鉴于科研产出数量和增长速率位列前茅,中国在量子科技领域已占据重要位置,具有显著的影响力。

2004—2013 年,WoS 数据库收录的量子相关论文共 219 264 篇,中国占 15.4%,其中发表于物理学领域期刊的论文有 185 739 篇,中国占 13.5%。该数据表明,量子相关研究主要集中在物理学领域,此外也涉及化学、光学、材料科学等学科。从论文的类型来看,中国发表的研究论文相对较多,而会议论文和研究综述比重略低于全球平均水平。中国发表的量子相关论文中有 63.4% 为研究论文,而在物理学领域期刊中发表的量子相关研究论文比重为 88.7%,这或许表明中国物理学领域产出了更多经同行评议的原创性研究。总体来看,在 WoS 定义的物理学领域中,中国在各期刊大类中的产出情况与世界平均水平类似,中国的论文产出在多学科物理学、多学科材料科学、粒子场物理学三个方面超过美国和世界平均水平,在物理化学、纳米科技两个方面超过世界平均水平,而在数学物理学领域大幅低于美国和世界平均水平(见表 1)。这或许表明,中国在交叉学科研究方面拥有更多优势,有能力针对特定挑战给出实际应用解决方案。

自 1991 年来,中国在量子科技领域的论文产出

表 1 基于期刊类别的量子科技相关研究论文产出情况(2004—2013)

WoS 期刊分类	量子相关论文数		在 WoS 定义的物理学领域论文占比		
	数量	占比(%)	全球(%)	中国(%)	美国(%)
应用物理学	48 633	16.9	26.2	24.2	28.4
多学科物理学	47 122	16.4	25.4	37.6	20.2
凝聚态物理学	43 089	15.0	23.2	19.0	23.2
光学	41 390	14.4	13.5	12.7	14.9
原子分子化学物理学	34 257	11.9	18.4	17.6	20.6
物理化学	32 099	11.1	9.0	9.8	15.2
多学科材料科学	30 084	10.4	9.3	11.1	9.2
数学物理学	17 622	6.1	6.1	3.0	8.1
粒子场物理学	16 493	5.7	2.6	3.7	3.5
纳米科学纳米技术	21 019	7.3	6.8	7.5	7.6

3 分领域研究情况分析

通过利用自然出版集团旗下期刊专业编辑推荐的关键词进行检索和聚类,我们将主题领域划分为量子钟、量子感知、量子通信和量子计算,将分析所涉及的论文进行分类并形成数据集。总体来看,2004—2013年中国所有学科领域的论文产出占全球的比重为11%,而量子钟领域为15.03%,量子感知领域为14.95%,量子通信领域为33.73%,量子计算领域为22.28%。由此可看出,中国在量子科技领域的研究较为突出,尤其是量子通信和量子计算两个方向。下面将围绕上述四个领域作出具体分析,主要是将量子科技领域论文产出最多的几个国家(七国集团国家和中国)在相对产出(占全世界论文产出的百分比)和相对引用影响力(以世界平均值为基准)方面进行比较,同时对这些国家之间的国际合作情况进行分析。

3.1 量子钟领域

2004—2013年量子钟领域全球论文产出数量为2202篇,10年中的前期呈现明显上升趋势,到2007年数量翻倍,此后每年的数量在250到300篇之间。七国集团国家表现各不相同,没有明显趋势。除中国外,另一个学术产出绝对数量持续增加的国家是法国。而中国科研产出的爆发式增长,导致法国的相对份额也呈下降趋势。目前,中国发表论文数量已经超过美国,而美国所占份额已经减半(见图2a)。中国论文产出的相对引用影响力在量子钟领域比较低,表明中国发表了数量较多但影响力偏低的文章。(见图2b)

从该领域国家层面的合作情况看,合作产出数量相当低。七国集团国家发表的量子相关论文有50%是国际合作产出,但在量子钟领域合作程度较低。这或许表明,该领域的研究本质上是一种应用研究,倾向于服务国家战略,而不是全球性的合作主题。目前,与中国合作最多的国家是美国,其次是法国、德国、意大利,再次是英国。机构间的合作网络错综复杂,合作大多在国家计量学研究机构之间而不是在大学之间开展。

3.2 量子感知领域

2004—2013年量子感知领域全球论文产出数量为19119篇。10年中的前几年上升明显,到2008年实现翻番,随后缓慢上升到每年3000篇左右。中国论文相对产出增长明显,发表的文章数量已经和美国相当(见图3a)。中国在量子感知领域的相对引用影响力很高,表明中国在该领域有大量高质量的工作(见图3b)。在研究机构层面,主要贡献者是

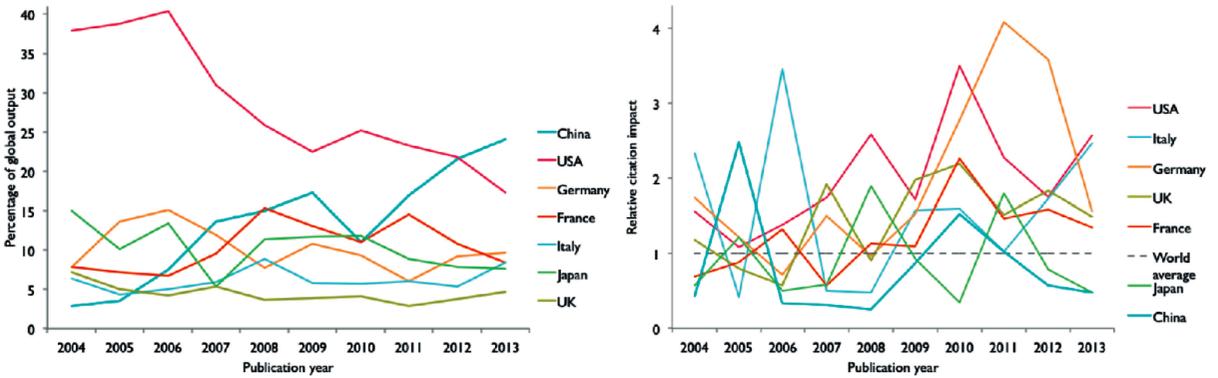


图2 七国集团国家和中国在量子钟领域论文相对产出(a)和相对引用影响力(b)

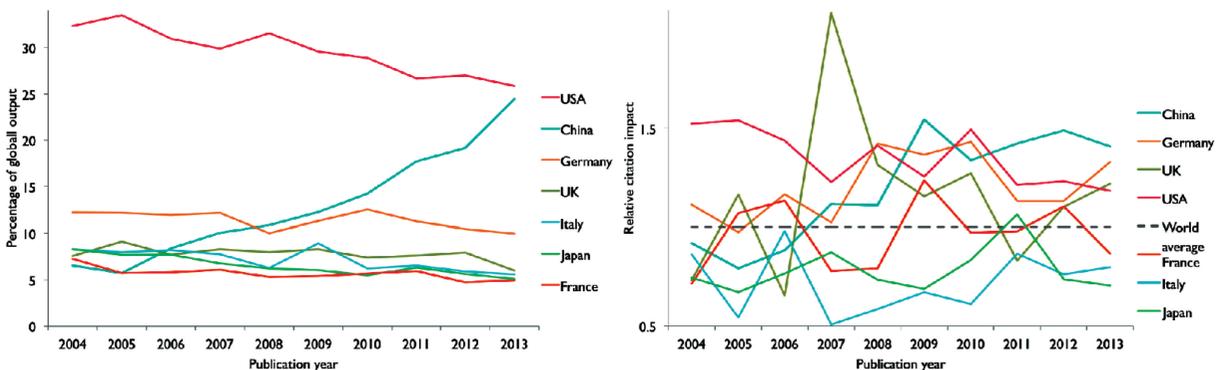


图3 七国集团国家和中国在量子感知领域论文相对产出(a)和相对引用影响力(b)

大型研究机构而不是大学。法国 CNRS 和中国科学院名列前茅,美国能源部和德国的马克斯·普朗克学会也较出色。在量子感知领域与中国合作最多的仍是美国,其次是英国、德国、日本,再次是意大利和法国。研究机构之间的合作网络错综复杂,机构之间有很多程度不高的互动。

3.3 量子通信领域

2004—2013 量子通信领域全球论文产出数量为 8402 篇。全球科研产出数量在这 10 年的初期呈上升趋势,在 2008 年实现翻番,随后每年产出在 1000 篇左右。与其他领域不同的是,中国并没有保持持续增长。中国在 2004 年的产出数量和美国近似,随后快速上升,到 2008 年达到美国两倍,此后一直保持这种水平(见图 4a)。这表明中国在量子通信领域的主导位置与其在该领域的重点布局相契合。中国在量子通信领域的相对引用影响力较低,和量子钟领域一样,表明中国产出的大量文章只有相对较低的影响力(见图 4b)。产出较多的科研机构中占主导的是中国科学院和中国科学技术大学等机构。中国在量子通信领域巨大的科研产出只有极

少是合作产生的。机构合作网络则由中国科研机构占据主导,但其中大量是内部合作。

3.4 量子计算领域

2004—2013 量子计算领域全球论文产出数量为 18999 篇。全球科研产出在这 10 年的初期显著上升,到 2009 年实现翻番,此后每年发表数量在 2200 到 2400 篇之间。中国在 2004 年产出数量和英国接近,现已经达到当时的 3 倍,超过美国。而美国论文产出随时间的增长呈现分散、不连续的特征(见图 5a)。尽管中国论文产出数量持续增加,但相对引用影响力和七国集团国家相比较低,表明有大量低影响力的成果发表(见图 5b)。中国科研机构开展合作的程度相对较低,美国是中国最大的合作伙伴。和前几个领域一样,加大合作力度应能帮助提升中国研究知名度,增加被引用的可能性。在各研究机构中,联系最多的是奥地利的因斯布鲁克大学和同样位于因斯布鲁克的量子光学与量子信息研究所。新加坡国立大学和另外 32 家研究机构有合作成果产出,它和中国、英国都有大量联系,是国际合作网络中一个明显的枢纽性节点。

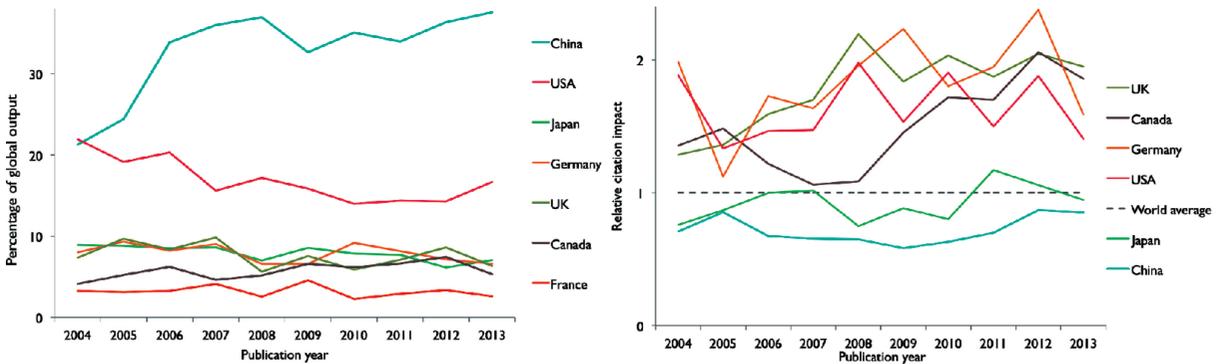


图 4 七国集团国家和中国在量子通信领域论文相对产出 (a) 和相对引用影响力 (b)

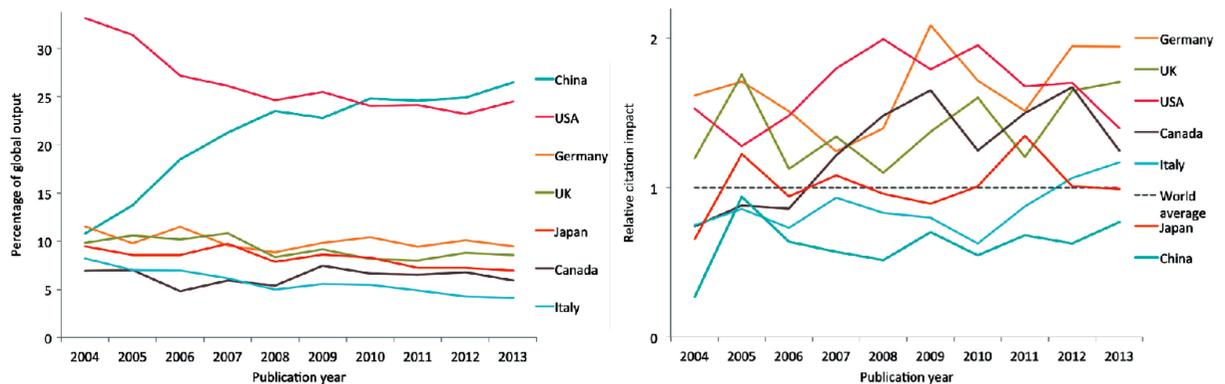


图 5 七国集团国家和中国在量子计算领域论文相对产出 (a) 和相对引用影响力 (b)

4 量子科技领域研究资助情况分析

4.1 总体情况

科研资助情况分析主要使用 Dimensions 数据库。该数据库覆盖面不能达到精确的水准,且由于元数据的完整性、货币兑换率以及地区消费力的不同,会给科研资助情况的比较分析带来挑战。为使分析结果更接近实际情况,我们特意将分析的时间窗口缩小至 1995—2011 年这一时间段,因为数据库在该时间段的数据较全。量子科技领域科研资助项目总数量在 2000 年左右呈现迅猛增长态势,资助项目和资金在 2015 年以后显著下降(见图 6)。比较七国集团国家和中国资助项目的总数量可以看到,美国科研机构得到的资助项目数量超过其他国家,但增长速度正在减缓。中国科研机构获得资助项目的数量增长速度最快,尤其是在最近几年(见图 7)。

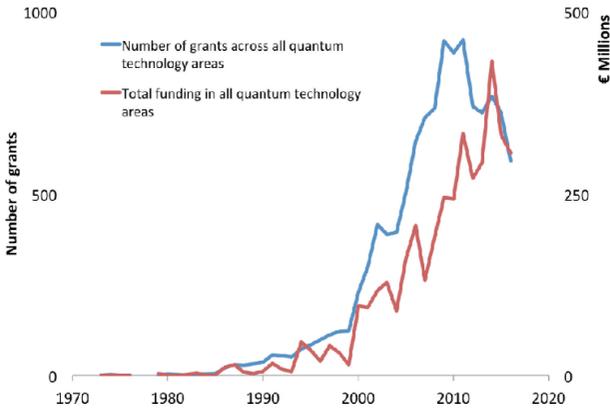


图 6 Dimensions 中量子科技领域资助项目数量和资金总额

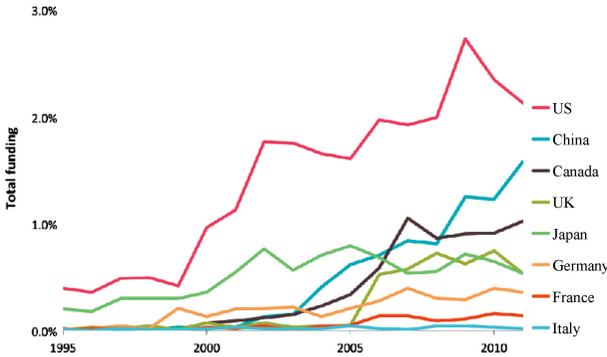


图 7 七国集团国家和中国量子科技领域项目数占 Dimensions 收录数的比重

4.2 分领域资助情况

中国在量子钟领域获得资助项目数量占世界份额的 8.86%。中国获得资助占世界份额最少的是

量子感知,占世界份额的 4.04%,然而中国在这一领域的相对引用影响力却世界领先(见图 3b)。中国在量子通信领域获得的资助项目数量占世界份额最大,达 12.17%。这也符合中国科研机构在量子通信科研产出方面占主导的情况。中国在量子计算领域获得的资助项目数量占世界份额为 6.96%。

在量子钟领域,美国的科研机构获得的资助项目数量最多,但中美之间差距不大。量子钟是四个领域中唯一一个各个国家资助水平都在持续上升的领域(见图 8a)。将该数据与量子钟的科研产出(图 2a)相比较可以看到,中国的产出率不断上升,而其他国家的产出率,尤其是美国,却在下降,这表明中国的研究者的研究效率正在提升。

在量子感知领域,资助趋势和前述相同。美国科研机构获得的资助项目数量差不多是其他国家的 2 倍。七国集团国家的资助项目数量变化不大,而中国在持续增加,特别是在这一时期的后半段(见图 8b)。同时可以看到,中国正快速成长为这一领域的领军者。重要的是,只有在这个领域,中国科研的相对引用影响力(见图 3b)超过七国集团国家,显示出中国在该领域具备战略优势。

在量子通信领域,七国集团国家获得的科研资助项目在这一时期的后半段保持平稳或有所下降,中国却一直处于上升趋势(图 8c)。中国科研资助的上升表明,量子通信或许是中国许多投资方的一个战略性目标。与论文产出作比较可以看出(图 4a),中国的科研成果发表数量持续上升,七国集团国家却保持平稳或有所下降。相对引用影响力偏低(图 4b),有可能是因为合作成果有限,世界对中国在这一领域所做工作了解不深。

在量子计算领域,资助项目的情形与其他领域稍有不同。中国量子计算方向的资助项目在最近几年基本持平,和七国集团国家的情况一样(图 8d)。然而,论文产出数据表明中国目前在该领域的产出已超过美国,并在领先中保持缓慢上升。(图 5a)

4.3 中美对比分析

在 Dimensions 数据库中,美国量子相关科研的主要资助方为美国科学基金会(NSF)和国防部(DoD)。NSF 是美国该领域的首要资助方,资助 70% 的科研项目。但近五年来其科研项目资助总数和资金总量占比显著降低。DoD 自 2015 年来加大了对量子相关领域科研的投入。2016 年所有开题相关科研项目中有 17% 受到 DoD 资助。美国能源部(DoE)是另一个值得注意的资助

方,其资助项目数量在 2012 至 2016 年间年平均增长率高达 12%。2016 年所有开题相关项目中有 7% 受到 DoE 资助。

中国国家自然科学基金委员会(NSFC)是推动中国量子相关科研的重要力量。2012 至 2016 年间,基于 NSFC 资助项目所产出的量子相关科研论文占全国 72%。而同时期美国 NSF 资助项目产出的科研论文仅占全美量子相关科研论文的 34%。近五年来,中国和美国在量子科技领域产出的论文各占全球该领域产出的 22%。NSFC 资助产出的增

长率高达两位数,而美国 NSF 资助所产出的论文长期维持稳定水平(图 9)。

从高被引论文(引用数在相关领域位列前 1%)情况看,全球所有量子相关高被引论文中,美国占 40%,中国占 28%。尽管中国整体与美国仍有差距,但 NSFC 资助所产出量子相关高被引论文近年来已超过 NSF。2012 至 2016 年间,NSFC 资助产出的量子相关高被引论文占中国的 76%。而同时期 NSF 资助产出的高被引论文仅占全美的 46%(见图 10)。



图 8 七国集团国家和中国量子钟 (a)、量子感知 (b)、量子通信 (c)、量子计算 (d) 领域的项目数占 Dimensions 收录数的比重



图 9 NSF 和 NSFC 在量子科技领域资助产出论文数量对比

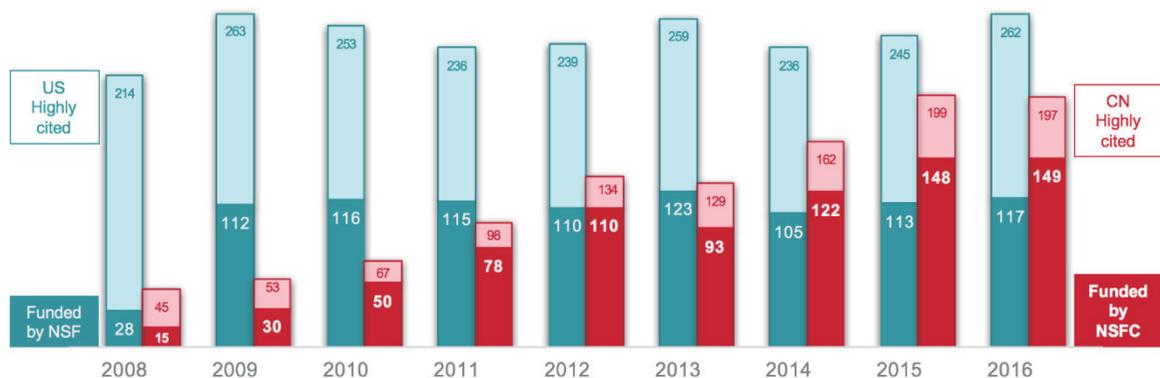


图 10 NSF 和 NSFC 在量子科技领域资助产出高被引论文(各学科前 1%)数量对比

5 小结

近年来,全球在量子科技领域的论文产出增长主要源自中国和其他亚太国家,这些国家在该领域投资巨大。中国在量子科技领域发表的国际科技论文增长迅猛,在过去约 20 年来所产出的论文经历了爆发式增长。1991 年,中国发表的论文比七国集团的任何一个国家都少。随着 2000 年以来资助力度的不断加大,到 2014 年中国在量子科技领域发表的论文数量已经超越了包括美国在内的所有七国集团国家。中国在量子相关科研领域的研究优势集中体

现在跨学科应用研究,在基础物理层面工作相对较少。本文所关注的四大主题领域中,中国在量子感知方向的科研成果影响力最高,尽管这一领域所获得的资助和科研产出在上述四个方面占比最低。尽管量子科技领域的研究呈现高度合作化特征,但大多是在各个国家内部进行。由于缺乏国际合作,在一定程度上导致中国在该领域科研成果的知名度和引用率偏低。尽管中国在该领域的整体水平与美国仍有差距,但 NSFC 资助所产出量子相关论文数量和高被引论文数量在本国占比均明显超过 NSF,资助绩效显著。

Quantum technology: global research impact and funding trends

Phill Jones¹

Zhou Mingxin²

Dong Chao³

Nicko Goncharoff¹

Zheng Yonghe³

(1. *Digital Science, London EC2A4EG*; 2. *Springer Nature, Shanghai 200031*;

3. *National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*)

Abstract This article compares research publications and funding for four major areas of quantum technology research in the G7, some BRICS countries and South Korea. Using data from Web of Science and the Digital Science Dimensions database, we look at publications, impact, funding and international cooperation trends across the field as a whole well as for four sub-fields: quantum clocks, quantum sensing, quantum communications and quantum computing. The analysis highlights China's performance relative to this group of countries and concludes with a direct comparison of publications and funding between the US National Science Foundation and the National Natural Science Foundation of China.

Key words quantum clocks; quantum sensing; quantum communications; quantum computing