

关于我国建设基础科学研究强国的 若干思考*

陶 诚¹ 张志强^{** ,2,3} 陈云伟^{2,3}

(1. 中国科学院发展规划局,北京 100864;

2. 中国科学院成都文献情报中心科学计量与科技评价研究中心,成都 610041;

3. 中国科学院大学经济与管理学院图书情报与档案管理系,北京 100190)

摘 要:基础研究是所有科学技术的理论和知识源头,是科技、技术、产业和社会发展的源动力。一个国家基础研究能力的强弱决定着其科技水平的高低和国际竞争力的强弱。英、德、法、美、日等科技强国都是高度重视基础研究的基础科学研究强国。我国当前多项科技指标位居世界前列,但对现代人类知识体系的基础科学贡献仍不多见,领先技术屈指可数。在我国建设世界科技强国的进程中,首要任务就是加强基础科学研究。本文在阐述基础研究的重大意义、科技强国加强基础研究的有益经验启示、我国建设基础科学研究强国的有利条件和时机的基础上,提出了加强我国基础科学研究的以下建议:制定长期稳定的支持基础科学研究发展的政策体系;立法确定长期稳定的基础研究经费投入机制;遵循基础研究规律,支持新型基础科学研究卓越创新机构建设;面向重大问题和需求寻求在重点领域实现引领和突破;推动基础研究机构与应用研发机构之间的研发合作;建立符合基础科学创新规律特征的考核评价机制;创造与国际一流卓越科学创新机构的良好开放合作模式。在未来三十年建设科技强国的征程中,我国必须为满足国家某些特定目标的需要,积极布局相关领域的基础科学研究工作,强调创新自信,勇于挑战最前沿的科学问题,提出更多原创性科学理论,作出更多原创性科学发现,以便有力支撑我国现代化强国建设,更多掌握新一轮全球科技竞争的主动权。

关键词:基础研究;基础科学研究;基础科学研究强国;科技强国;科技竞争

中图分类号:G322 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2019.02.001

Few Opinions on Building the Basic Science Research Power of China*

TAO Cheng¹ ZHANG Zhiqiang^{** ,2,3} CHEN Yunwei^{2,3}

(1. Bureau of Development Planning, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;

2. Scientometrics & Evaluation Research Center, Chengdu Library and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. Department of Library Information and Archives

Management, School of Economics and Management, UCAS, Beijing 100190, China)

Abstract: Basic research is the origin of theories and knowledges of all science and technology (S&T), and the source of

* 中科院战略研究与决策支持系统建设专项(GHJ-ZLZX-2019-31),中科院政策调研课题(ZYS-2019-03)资助

** 通讯作者, E-mail: zhangzq@clas.ac.cn

science, technology, industry and social development. The strength of a country's basic research ability determines its S&T level and its international competitiveness. The U. K. , Germany, France, the United States, Japan and other scientific and technological powers all pay much attention to basic science research. China has achieved great S&T achievements and many S&T indicators rank top in the world. However, China's basic science contribution to the human knowledge system is still rare, and there are few leading technologies. In the process of building a world-leading scientific and technology power, the primary task of China is to strengthen basic research. On the basis of expounding the significance of basic science research, relevant beneficial experiences, and China's favorable conditions and timing, this paper puts forward the following suggestions to strengthen basic science research in China. It is necessary to formulate a long-term and stable policy system to support basic science research and development, to determine long-term and stable basic research funding, to support the construction of basic science research excellence innovation institutions at the state level, to achieve leading and breakthrough in key areas, to promote R&D cooperation between basic research institutions and application-oriented research institutions, to construct reasonable assessment and evaluation methods in accordance with basic science innovation rules, to create an open cooperation model with the world's first-class centers of excellence. In the process of building a powerful country in science and technology in the next 30 years, China should actively lay out basic science research work in relevant fields to meet the needs of certain national goals, improve the self-confidence of original innovation, bravely challenge the cutting-edge scientific issues, actively propose original theories and discoveries, keep up with the new directions of world science and technology development, and gain initiative in the new round of global science and technology competition.

Key words: basic research; basic science research; basic science research power; science and technology power; technology competition

基础研究是旨在创造新的科学发现、增加新的原理性科学知识的创造性科学研究活动,基础研究的科学发现成果是所有科学技术的理论和知识源头。

基础研究能力的强弱,决定着一个国家科技水平的高低、国际科技竞争力的大小,并最终决定国家综合竞争能力的强弱。纵观世界科技发展史,科技强国无一例外是基础研究强国,没有强大的基础研究支撑,科技强国是不可能实现的。我国已经确立了2035年跻身创新型国家前列、至2050年建成世界科技强国的宏伟目标。为实现此战略科技目标,必须直面我国科技创新发展方面存在的各种短板和不足,科学规划科技强国建设长远路径,前瞻布局并不断优化科技未来竞争基础和关键领域,推进国家重大战略性科技部署,切实改善制约科技创新的体制机制,加速提升科技创新能力,产出一大批重大基础性创新成果,为经济社会发展、科技进步和国家安全提供长远的基础性战略支撑。在此过程中,我国基础研究是

相对最为薄弱的一环,至今没有产生过世界科学发展中必不可少的基础理论和原创的科学思想,在更新人类知识体系的重大基础研究领域的贡献乏善可陈,中华民族仍需要不断努力为世界文明做出独特的贡献。郝柏林^[1]在2004年就指出,“技术引进,可以加速起步。然而,邯郸学步、履人后尘,总难以真正技超群雄,‘领导世界新潮流’。只有深厚、广泛而持续的基础研究才能孕育出异军突起的技术革命,建立起自己的支柱产业。”

进入21世纪,特别是进入新世纪第二个十年以来,世界科学技术发展正呈现出前所未有的系统化突破性发展态势,新一轮科技革命和产业变革正孕育来临,信息科技、能源科技、生命科技、材料科技、空间科技等众多科技领域呈现创新迸发、科技突破群发涌现和汇聚融合等发展特点,全球创新的新格局加速形成,世界已经进入以创新为主题和主导的发展新时代^[2,3],进入科技发达国家高度重视争夺科技与产业主导权的新时代,科

技强国间争夺核心技术与关键科技产业的“科技战”将更加频繁甚至激烈。与此同时,随着中国经济数量型持续增长的惯性减弱,经济的质量型增长成为大势所趋,我国经济发展必须进入科技引领、科技驱动的高质量发展新阶段。而经济的高质量发展必须有强大的科技创新能力作为支撑,这就对我国自主创新能力和高质量科技成果提出更高要求和更迫切需求,并使得我国长期依靠西方科技强国供给基础科学理论知识的时代窗口快速收缩,除了强化自身的基础科学理论知识供给能力别无选择。在此背景下,我国比历史上任何时期都更需要基础研究对高质量科技创新的源头理论知识支撑。除此经济发展的功利性目的外,中华民族要永远屹立于世界民族之林,也必须是一个富有思想创造力、知识创造力、文化创造力的民族,这一切都离不开对世界未知领域和未知知识的发现和创造。因此,开展长远战略性布局,长期持续支持和加强基础研究的工作刻不容缓。下面就我国加强发展基础研究提出一些思考。

1 基础科学研究是科技进步的基石和技术创新的源头

美国万尼瓦尔·布什(Vannevar Bush)1945年在《科学:无止境的前沿》报告中指出,基础研究是在没有考虑实际目的情况下开展的,产生的结果是关于自然及其规律的一般知识和理解^[4]。基础研究产生新的知识,是技术进步的铺路石,就其即时效用而言,基础研究是一种机会游戏,是一项投资。经济合作与发展组织(OECD)对基础研究的定义也类似,即基础研究是实验和理论研究工作,其主要目的是为了获得关于自然现象和观察结果背后的新知识,但事先并没有计划任何特定的应用和使用目的^[5]。司托克斯(D. E.

Stokes)在其提出的科学研究“四象限模型”中,又将基础研究分为纯基础研究和应用基础研究,其中,“波尔象限”主要是好奇心驱动的基础研究,研究中并不考虑研究结果的实际用途,如:波尔对原子结构的探索、爱因斯坦提出的相对论、孟德斯鸠的遗传学理论等;而“巴斯德象限”则是应用引发的应用基础研究^[6]。

从近现代科学发展进步历程来观察基础研究会发现,牛顿的力学三大定律,使力学最早成为系统科学的自然科学^[7];力学和热力学的理论发展,推动了蒸汽机和内燃机的发明,开启了工业革命;电磁学的发展,促进了电动机和发电机的发明,使电力成为各行各业发展不可或缺的必要条件;门捷列夫发现了化学元素周期律,为人类认识物质世界提供了系统的指引;香农在1948年创建了信息论^[8],阐明了通信的基本问题,给出了通信系统的模型,奠定了信息时代的理论基础;图灵在1936年首次阐明了现代电脑原理,从理论上证明了现代通用计算机存在的可能性;孟德尔定律、DNA双螺旋结构的发现等,无不开启了生命科学研究的新范式;钱学森预见到高超声速飞行技术的可能性,为我国高超声速飞行器的研制和发展起了非常重要的作用;美国麻省理工学院肖尔教授提出的量子分解Shor算法,证明了可以用量子计算机来破解RSA加密算法,掀起了研究量子计算机的高潮^[9]。

可见,基础研究为应用技术创新提供理论基础,是技术创新的知识源头,基础研究的进步不断引发应用研究的突破、新产品的研发以及商业化应用,促进人类生产生活方式的不断迭代革命。同时,基础研究的进步不断更新和逐步深化着人类对世界的认知,不断刷新人类对客观物质世界、生命世界的思维和观念。

第三次产业革命以来,随着科技创新与应用速度的不断加快,从基础研究、应用基础研究到应用开发的传统线性模式已经很难完美描述科技创新过程的规律和特点,从基础研究、应用研究到应用开发的时间周期明显缩短,不同研究类型之间的重叠和转化,导致不同类型研究之间的界限日益模糊,转化型研究(translational research)^[10]日益增多,特别是在医学领域,强调在实验室与临床之间建立一个双向转化通道,以便基础研究成果快速临床转化应用于疾病诊断、预防和治疗。这反映了基础研究尽管是追求原理性基本认识,但支持应用发展的目标导向性正在不断强化。

随着科技生产力作用的日益上升,科技创新部门从社会分工的重要部门逐渐发展为主要部门,科学创新活动的“国家化特征”(国家谋求占领基础前沿科技领域战略制高点以实现国家竞争力绝对优势)和“企业化特征”(科技领军型企业追求占领基础前沿科技领域制高点以谋求更大利润空间和市场占有率)日益明显,基础研究又形成了从兴趣驱动的完全自由探索式基础研究,到企业核心技术与利润目标导向、国家战略安全与科技领导力目标导向并存的定向基础研究等不同形式。不管基础研究的阶段如何、形式如何、目标如何,都在追求对人类未知自然疆界终极奥秘的科学突破性认识,为人类当前生存发展与未来高质量幸福生活提供源源不断的科学认知。这样的基础研究永远都不会缺席,这样的基础科学研究强国才有可能扼守科技强国的战略地位。因此,长远战略布局前沿基础科学研究,国家、社会持续支持开展提供原理性科学知识的基础研究,都是国家间科技的源头性重大竞争疆域。不是基础科学研究强国,就不可能成为掌握自己命运的科技强国。

2 世界科技强国无一例外都是基础科学研究强国

自科学革命以来,基础科学领域的一系列重大突破,对人类经济和社会跨越发展产生了巨大的推动作用,在短短的500年时间内,创造了人类发展史上前所未有的巨大财富,支撑了全球人口数量的巨大增长。现在,几乎没有哪个国家没有认识到包括基础研究在内的科技发展的巨大价值。而在此过程中,英、德、法、美、俄、日等科技强国在推动科技发展上都做出了重大贡献,这与它们都高度重视基础研究是分不开的,英、德、法、俄等国先后在科学革命的早期就建立了推动基础科学研究的科学院(或科学学会)组织。这些国家基础研究的繁荣是奠定其科技强国的最关键基石。而美国在二战后快速崛起为世界头号科技强国,与其创立基础研究重要性的科技政策理论、制定支持基础研究的国家科技制度密切相关。重视基础科学研究,才使得了美、英、德、法等成为百年诺奖自然科学奖最多的国家,日本、俄罗斯也都跻身诺奖自然科学奖获奖最多的前9位国家^[11]。可以说,成为基础研究强国是建成科技强国的重要前提,一个没有强大基础研究实力的国家不可能成为科技强国。只有长期重视基础研究,才能有机会取得科技创新“从无到有”的原创性重大突破,才能在科学前沿领域和方向取得突破性、引领性的重大知识发现成果,进而带动技术的原始创新,抢占技术制高点,最终造就强盛的科技新工业。

以美国为例,美国在1945年发布的《科学:无止境的前沿》报告奠定了二战后美国科技体制的理论基础,对美国科技政策产生了重大影响,对推动科研特别是基础和应用基础研究国家化、推动

当代科学发展起到了巨大作用,在科技政策史上具有里程碑意义,为美国后来居上超越英国、德国、法国、俄罗斯,成为世界头号科技强国发挥了决定性作用。在该报告影响下,美国于1950年成立了美国国家科学基金会(National Science Foundation, NSF),其宗旨是促进科学进步,促进国家健康、繁荣,提高福利和国防发展等。NSF对美国而言至关重要的原因是其资助基础研究和人员来创造可改变未来的知识,是美国唯一一家支持除医学科学以外所有基础科学和工程领域自由探索性基础研究的联邦政府机构,其年度预算75亿美元(2017财年数据),美国高校获得的联邦政府支持的基础研究经费有24%来自NSF^[12]。NSF仅作为科研资助部门,其年度预算在美国政府科技部门中虽然比较少,但其支持自由探索性基础科学的明确定位,对促进基础科学研究发挥了至关重要的作用。为在激烈的国际竞争环境中持续保持美国的领导地位,适应国际环境与科技创新趋势的新变化,NSF在2014和2018年连续升级其战略计划,最新战略计划《构建未来:投资发现和战略规划2018—2022》(Building the Future Investing in Discovery and Innovation)重新定义了NSF的使命、愿景和战略目标,以保持美国在研究与创新上的全球领导地位^[13]。除了NSF,美国政府其他科技研发机构重点支持国家目标的定向基础研究,都是以年度预算形式确定支持经费。此外,美国科技领军型企业也在市场导向的基础研究方向大力投资。目前,美国已形成了部门与机构间职能明确、分工有序的科学研究支持体制机制。据《科学》官网报道,美国基础研究投入整体持续上升,其中,美国联邦政府的基础研究投入经费在近年来总体维持在380亿美元上下波动,在全美基础研究投入中的占比逐年下降,而企

业、大学和私人基金会投入的基础研究经费逐年上升。特别是美国企业对基础研究重要性的认识非常高,大幅增加对基础研究的支持,在2014年投入了245亿美元从事基础研究^[14]。美国基础科学研究投入的日益多元化,对美国保持基础科学研究世界强国地位发挥了重要作用。

欧盟在过去十年多的时间里对基础研究的重视空前高涨,作为“地平线2020”计划的核心成就,欧盟于2007年成立了欧洲研究理事会(European Research Council, ERC),其使命是通过竞争性资金鼓励欧洲最高质量的研究,并在科学卓越的基础上灵活支持所有领域的“研究者驱动”(或称为“自下而上”)的前沿研究,其目的主要是为欧洲的基础研究争取更多资助^[15]。欧盟在2018年6月正式提交的“欧洲地平线”(Horizon Europe, 2021-2027)计划,预计科研资助额度达到1000亿欧元,又将基础研究与创新和社会重大问题一起,作为三大重点关注领域,旨在提供基础研究服务、解决社会和提升工业竞争力面临的问题^[16]。

英国是近代科技革命和工业革命的引领者,拥有着深厚的科学积淀,英国皇家学会的成立极大地促进了科学发展及民众对科学的认知,使得科学成为一种文化和信仰。英国政府长期重视基础研究,在高校拥有高水平的研究队伍和实验室,科研活动受到政府双重资助体系的支持。这些条件使得英国更有利于产生基础性、理论性的科学突破,在基础研究领域保持高效率产出和世界领先地位^[17]。从诺贝尔科学奖的产出效率来看,英国在近60年的时间里,一直占据着亿均人口累计诺奖自然科学奖产出最多的国家^[18],是近60年中重大基础科学研究成果产出效率最高的国家。

德国的基础研究在国家层面上由联邦教育研

究部管理,经费来源广,课题多样。从事基础研究的机构包括高校和学会,其中马普学会是中坚力量,而德意志研究联合会主要负责资助大学和公共研究机构的基础研究工作^[19]。德国的基础研究成果在全球处于领先行列,特别是在二战前的近30年里,德国都是亿均人口累计诺奖自然科学奖产出最多的国家^[18]。

法国在数学、物理、化学、生理学或医学等基础研究领域曾取得举世瞩目的重大发现,一度成为世界重要的科学中心。其典型做法是根据国立科研机构的性质和定位实行分类管理,把国立科研机构分为“科技型”和“工贸型”两大类。科技型国立科研机构是“非定向综合型自由探索”的主体力量,主要承担各学科领域或综合学科领域的前沿交叉研究、基础研究和部分应用研究,以法国国家科研中心(CNRS)为代表,目前CNRS是法国最大的科技型国立科研机构,也是欧洲最大的科研机构之一,为法国、欧洲乃至全球科学研究特别是长期性基础研究做出了卓越贡献^[20]。

日本自20世纪70年代以来持续提出新举措提升基础研究地位。首先提出“技术立国”战略,将战略重点从产业技术的引进模仿转变为强化自主基础性研究;1995年提出“科学技术创造立国”战略,从重技术创新转向了科学与技术创新并重;2007年,设立“世界顶级国际研究中心计划”(WPI),致力于形成以高水平研究人员为核心的世界顶级研究基地;2012年,推出了“强强合作计划”(Core-to-Core Program),加强与15个科技发达国家或地区在科学前沿领域的合作^[21]。

这些科技强国为应对未来15~30年、乃至未来50年发展面临的难题和挑战,在积极讨论和研判未来发展趋势的同时,不断完善科技创新制度,完善、升级或制定新的国家科技领域发展战略与

规划,布局未来关键科技领域和方向,强化基础前沿研究支持,谋划科技创新发展道路,应对未来的科技变革挑战,争夺关键科技领域领导地位。例如,英国政府在2018年4月发布《产业战略:人工智能领域行动》政策文件,进一步制定有关人工智能技术的具体行动措施^[22];美国总统特朗普在2018年12月签署《国家量子计划法案》,启动为期10年、投入12亿美元的“国家量子计划”项目,以确保美国在量子信息科学及技术应用领域的领先地位^[23,24];2019年2月,美国正式启动人工智能计划,将集中联邦资源,在投资研发、释放资源、制定治理标准、培训劳动力、确保国际竞争优势等五大重点方向上发展人工智能^[25],誓言要做人工智能领域的世界领导者。在当前及未来全球竞争的关键和前沿科技领域和方向,科技强国之间的竞争态势瞬息万变,必须未雨绸缪。

3 中国建设基础科学研究强国正当其时

改革开放40年来,特别是国家知识创新工程实施近20年来,我国科技事业实现了跨越式发展,成为具有全球影响力的科技大国,多项科技指标已经位居世界前列。据瑞士洛桑管理学院(IMD)2018年公布的《2018年世界竞争力报告》显示,我国竞争力排名已升至全球第13位^[26]。据世界银行(World Bank)的数据显示,我国经济总量稳居全球第二(2017年GDP总量12.24万亿美元)^[27],综合国力、竞争力持续提高。我国经济发展还具有经济韧性足、市场需求大、产业体系全、社会资本储备多等有利于经济发展的优势。我国全社会研究与试验发展(R&D)经费从1988年的90亿元增加到2017年的17606亿元,位居世界第二位。国内发明专利申请数世界第一

(2017年为1381594件)^[28]。科睿唯安公司(Clarivate Analytics)基本科学指标(ESI)数据库显示,2018年中国发表的论文总数约为44.3万篇,位居全球第二,数量约为美国(61.1万篇)的72.5%。科睿唯安公司2018年发布的高被引科学家名单显示,中国(不含港澳台)入选人次(482人次)位居全球第三位,仅次于美国(2639人次)和英国(546人次)^[29]。中国科技的快速数量化增长成就显著,为科技创新从量变到质变奠定了坚实基础,决策界和科技界也已经形成了淡化追求数量化增长、强化追求质量化增长的广泛共识^[30]。

近年来,我国在原创基础研究、关键研究设施平台等方面,也陆续取得了不少位居世界前列的重大科研成果,如:铁基超导材料、量子反常霍尔效应、多光子纠缠、中微子振荡、干细胞、体细胞克隆猕猴、拓扑半金属等重要原创性突破,悟空、墨子、慧眼、鹊桥、碳卫星等科学实验卫星,500米口径球面射电望远镜、上海光源、全超导托卡马克核聚变装置等重大科技基础设施,嫦娥四号探测器实现的人类首次在月球背面登陆等重大技术突破,等等^[28]。然而,我国科技界对现代人类知识体系的原创性重大科学理论贡献仍不多见,迄今的长足发展主要是应用西方现代科学发展的理论成果,主要依靠引进和吸收以往科技和工业革命的成果,基本是在利用国外先进技术,早期长期“跟跑”,近年来一些领域才开始实现“并跑”,科技“领跑”的领域仍屈指可数。

我国要建设世界科技强国,要实现经济高质量发展,急需科技的有力支撑,以便实现科技成果从量变到质变的飞跃,为丰富和拓展人类科技文明知识体系做出应有的“中国贡献”。党的十九大报告指出,我国要强化基础研究、加强应用基础

研究。2018年1月,国务院印发的《关于全面加强基础科学研究的若干意见》也明确了新时期全面加强基础研究的指导思想、基本原则、发展目标和具体举措。这都表明了党中央、国务院对基础研究的高度重视。我们要充分认识到基础研究、应用基础研究在建设科技强国、质量强国、航天强国、网络强国、交通强国、数字中国、智慧社会中发挥的重要作用,高度重视基础研究、应用基础研究,解决科技创新的理论与知识源头供给问题,而其关键是完善国家科技创新政策和制度。这应该成为国家和社会的全面共识,不应议而不决和有所反复。

同时,放眼全球,科技创新的范式变得越来越复杂。首先,“科研国家化”现象日益明显,各国政府不断采用政策引导、加大投入等方式,推动和释放科技创新对经济社会发展的支撑,加快从基础研究到应用研究的转化。其次,基础研究和应用基础研究的投入渠道呈现多元化,以美国为例,在政府宏观政策的引导下,基金会、企业对基础研究的投入急剧增长。比如,美国于1993年提出的信息高速公路计划^[31]、2012年提出的美国大数据研发计划^[32]和2016年推出的联邦大数据研发战略计划^[33]等,政府投入只是引导性投入,撬动的社会投入才是主要投入。第三,科技型企业成为应用基础研究的生力军,随着一些科技型企业发展壮大并布局占领未来产业技术制高点,企业自身也投入经费开展主导产业技术相关的前沿基础研究,特别是应用基础研究,如谷歌、IBM等科技领军型企业持续投资量子计算研究;我国华为公司长期重视研发投入,才能在5G领域领跑全球,也才能在美国禁运芯片的情况下有自主研发的麒麟芯片予以替代。第四,由政府主导的定向基础研究担负着国家战略使命,与自然科学基金类项

目支持的自由探索性基础科学研究不同,这种定向的、目标导向的、带有国家意志的战略性基础科学研究,也成为基础研究取得突破的一种新范式,例如,1958年成立的美国国家航空航天局,在空间科学基础研究领域已创造了多项重大突破,获得了多个诺贝尔奖级别的重大成果。

可见,不论是应对国际科技竞争环境的挑战,还是满足国内科技向引领性发展转变的重大需求,我国已经不能再亦步亦趋地走在科技强国后面全盘吸收借鉴其科学知识创新的成果为我所用,而是必须能够对人类科技文明知识体系的完善做出中国人自己的贡献,在科技史上书写属于中国和国人的知识创造贡献篇章。而且,我国当前已经奠定并已经处于大力加强基础科学研究的重大战略机遇期,着力建设基础科学研究强国,才能筑牢科技强国的深厚根基。

4 中国加强基础科学研究的着力点

长期以来,基础科学研究投入不足、创新能力薄弱,长期依赖西方科技强国的创新知识供给,导致我国对一系列重大核心技术领域没有自主权和话语权,在一些前沿技术和产业领域与美国等科技强国存在较大的差距,包括半导体(材料、设备、芯片等)技术、生物医药和先进医疗设备、先进材料、高端装备(如,大飞机)等,特别是半导体领域的芯片研发,经费需求大、周期长、迭代快、领域广、专业化程度高(分类多)、人才要求高、应用依赖路径强,要在短短数年内取得绝对优势是非常困难的。

这就要求我国必须在基础科学研究领域充分发力,面向国家重大战略需求,面向科技发展重大前沿问题,破解科学技术难题;要前瞻判断科技发展方向,强化基础前沿的战略引领,强化突破性的

优势和路径;全面营造良好的创新生态和政策体系,加强优秀科技人才队伍建设,遴选和长期稳定支持优秀的创新团队。基础研究的科学突破,绝不是一朝一夕之功,最忌急功近利、短期政绩观的干扰。只有长期稳定地持续加强基础科学研究,才能逐渐孕育出重大科学发现与前沿成果,培育出领跑性领域和方向,为重要科技领域的崛起提供坚实的知识体系支撑,不断为我国乃至全世界科技发展与技术创新提供原始的思想、理论和知识供给。

本文对我国加强基础科学研究,提出以下几个方面的建议:

1) 制定长期稳定的支持基础研究发展的政策体系

我国要制定科学有效地反映国家战略意志的基础研究政策体系,一方面旨在满足自由探索的需要,另一方面要集中力量快速有效地解决国家发展中的战略性需求所涉及的重大基础科学问题,包括即将面临和未来的“卡脖子”问题、短板问题,形成有效的资源配置与任务组织体系,力争在2035年将我国的基础研究水平在总体上跻身到国际第二方阵,即与英国、德国、法国和日本处于同一阵营^[11],2050年升至国际领先水平(跻身第一方阵)。首先,优化基础科学研究重点布局领域体系,要致力于在信息科学、生命科学、材料研究、空间科学、能源科学、环境科学等方面完成一批满足国家战略需求、以应用为导向的定向基础性研究成果,突破关键瓶颈并形成理论基础。其次,加强建设完整系统的基础研究优秀科学人才培养和配置体系,形成“以我为主、为我所用”的国际科技合作计划和科技人才交流体系,初步建成优秀基础科学研究人才培养和职业生涯发展体系。第三,完善基础研究稳定经费支持政策体

系,协调好国家顶层设计的竞争性择优支持计划经费、国家战略科技机构针对战略科技领域自主配置的稳定支持机构预算经费、自然科学基金类项目支持的自由探索性高风险基础研究项目经费的相互关系,使国家和机构定向基础研究、个人与团队自由探索性高风险基础研究等竞相迸发。第四,遴选建设和支持一批新型的、以前沿重大挑战性科学问题研究为导向的专业领域卓越创新机构、研究单元及一流人才团队,形成面向重大挑战性科学难题开展持续攻关的国家基础科学研究创新主体体系。

2) 立法确定长期、稳定的基础研究经费投入机制

在国际科技竞争日益激烈的大环境下,择取人类科学皇冠上明珠的基础科学研究领域的竞争也日益白热化。基础科学研究的国家竞争政策和环境,直接决定基础科学研究领域的发展成效。英、德、法、美、日等科技强国地位的取得,是几十上百年重视基础研究、高强度投入的累积性结果和效应。我国基础科学研究投入占研发投入比例长期在5%左右,企业研发经费投入强度(企业研发经费占主营业务收入之比)长期偏低等,导致基础科学研究创新供给不足^[11]。原创性科学发现的基础科学研究,有了高强度的投入也不一定必然有重大科学发现产出,而没有高强度的投入则必然不会有重大科学发现产出。

基础科学研究需要有稳定的队伍和必要的物质条件,更需要长时间的积累。因此,不论是国家顶层设计的定向支持经费、机构自主配置的预算经费、还是自然科学基金类项目经费,都必须强调资助的长期性和稳定性。对基础科学研究的投入政策不能急功近利,不能心浮气躁,不能期待朝种夕割,不能为基础科学研究成果设定短周期的时

间表或军令状。要充分信任广大科学家,要给予大量从事基础科学研究工作的科学家们充足的时间,静下心来踏踏实实地吸取人类社会几千年、特别是近百年的科学思想,自由思考、大胆探索,让成千上万的科学家们可以专心致志地在各自领域深耕细作,而不是长期奔走在寻找项目经费、答辩考核汇报的路途中。这一切的前提都离不开稳定的经费投入,离不开科研管理机制的深入改革。同时,要鼓励基础研究经费投入的多元化发展,对企业投入基础研究的经费,应当以适当的财税政策支持。

3) 遵循基础科学研究规律,支持建设新型基础科学研究卓越创新机构

习近平总书记多次强调指出,要成为世界科技强国,成为世界主要科学中心和创新高地,必须拥有一批世界一流科研机构、研究型大学、创新型企业,能够持续涌现一批重大原创性科学成果。就基础研究而言,我国应基于已有基础和优势,加强顶层设计,在我国当前科研机构体系中凝练和组织研究队伍、重点支持和建设一批卓越创新研究机构。而建设卓越科学创新研究机构,不应该有统一的模式。新型国家实验室、重大科学前沿卓越创新中心等卓越科学创新研究机构,不是从零开始建设,而是在有基础有积累的研究机构基础上遴选、认定、优化和引导建设;也不能按照传统科学研究机构的管理模式,一律要建成所谓的独立法人机构,承担“吃喝拉撒”等一切社会责任,致使卓越创新机构背负沉重的社会责任负担而无法轻装上阵去做“卓越科学创新”的工作。建设新型国家实验室、卓越科学创新机构,应因地制宜,宜大则大、宜小则小,宜法人机构则法人机构、宜非法人机构则非法人机构(隶属于某个法人机构),完全要根据发展需要,不能一刀切。关

键是,如何遴选出这样的基础前沿重大科学问题的创新队伍,“用人不疑”,予以稳定的长期经费支持。

我国要强化支持符合国家战略需求的、面向世界科技前沿的基础前沿领域和方向,培育创新人才和团队。特别是要聚焦于实施半导体技术、脑科学、量子计算与量子通信、纳米科学、基因组学、关键材料技术等重要战略科技领域的研发,提升前沿领域关键科学研究能力,前瞻性开辟科技创新的新领域、新方向,涌现相关科技领域的突破性科技成果,力争在更多领域引领世界科学研究方向和技术创新。

4) 面向重大问题和战略需求,寻求在重点领域实现引领和突破

世界科学技术极有可能在五大科学与技术领域出现重大突破,分别为:数字信息科学与技术、生命科学与技术、物质与能源科学与技术、材料制造科学与技术、深空深海探测科学与技术等^[3]。此外,资源、生态、环境、基础前沿交叉等科学技术领域和部分颠覆性科学技术领域在解决公共性、基础性等科技问题的过程中也将取得局部重大突破。基于我国当前科技现状,要想在这些领域的各个方面全面实现引领和突破显然是不切实际的,即便是美国这个头号世界科技强国,也很难做到全面领先。因此,我国应立足实际,结合自身优势,针对关键领域,优先加强对基础前沿交叉领域的研究,在物质最深层次结构、宇宙起源与演化、核科学技术、量子信息、量子调控、癌症机理与防治、脑科学等领域力争取得重大进展,在信息、能源、材料等领域进行重点布局,寻求在这些重大问题上取得突破。

一是,要聚焦国家战略需求,布局国家重大定

向基础研究。在国家战略安全科技领域、在战略性新兴产业核心关键技术制高点必争领域、在重大民生和社会科技领域等,布局国家竞争性定向基础研究计划和项目;加大对国家战略科研机构的稳定研究经费支持,允许国立战略科研机构自主布局面向国家科技需求、面向世界科技前沿的重大定向基础研究。

二是,国家自然科学基金委员会2018年下半年开启了为期5~10年的深层次重大改革,希望通过资助导向、评审机制和学科布局进行重新梳理,进而建设一个能够支撑21世纪卓越科学研究,理念先进、制度规范、公正高效的科学基金体系^[34]。此次改革方案清晰明了地为占我国基础研究总投入27%的自然科学基金勾勒出未来发展的美好图景。对此,建议我国在国家层面要坚定明确国家自然科学基金支持自由探索性前沿基础研究的国家战略定位,充分放开自由探索性基础研究的“科学家选题机制”(“自下而上选题”而非“自上而下规划”),真正鼓励自由探索性高风险基础研究,适当提高国家自然科学基金面上项目的资助率,支持更多的中青年科研人员进行自由探索性基础前沿研究。同时,《自然》杂志发表的一项大数据分析研究发现,大团队倾向于渐进性中庸发展,而小团队则倾向于做颠覆性创新^[35]。因此,为真正加强对自由探索式高风险研究的支持,建议自然科学基金委取消重大研究计划和团队项目(这些研究事实已被证明基本上都是拼盘性研究),更多地支持经费额度适中的面上基金项目,以提高资助率和覆盖面。另一方面,建议改变科学基金项目的现有评审标准和方式,大幅降低对申请者研究基础、预期研究成果等的标准化要求(这些限定导致大量的“求稳性”

研究,不可能产出突破性成果),提高对原创性思路、破坏性路线的要求,鼓励做颠覆性、原创性的基础研究探索,而原创的、开创的研究通常缺乏有力的研究基础支撑,也很难预见到可期的预期结果。

5) 推动基础研究机构与应用研发机构之间的研发合作

要鼓励基础研究机构与应用研发类机构之间的深度科研合作,合作建立新型研发机构,特别是转化型研发机构。基础研究机构要主动从应用研发机构中寻找科学难题;应用研发机构要主动向基础研究机构提出需要攻关的基础科学问题,双方达成研究优势互补、研究资源共享等,才更有利于促进基础研究与应用基础研究、应用开发的协同转化。

在追求经济发展和美好生活的进程中,人们更容易关注能在更短时间内解决当前实际问题的应用研究,对基础研究的需求就显得不那么紧迫。然而,我们需要清醒地认识到,基础研究与应用研究是相互促进的,不能脱离。一方面,基础研究要面向技术应用,另一方面,从实际问题中提炼的关键科学问题需要在基础研究的层面上加以解决^[7]。只有重视和保护容易被忽视的基础研究,才能为应用研究与产品开发提供原创的理论与技术供给,才能摆脱核心技术受制于人的不利状况。特别是应用导向不鲜明的基础研究,不是企业投入的重点,只能由国家投入、定位明确的国立科研机构长期开展科学攻关,为相关应用研究提供源头知识和共性技术。

6) 建立符合基础科学创新规律特征的考核评价机制

基础前沿科技领域的自主创新,需要科学家持续不断的刻苦钻研,有的基础研究工作甚至需

要投入毕生精力,也未必能取得“功利性”的成就。为此,要为从事基础研究的科学工作者创造一个宽松的考核环境,一个可以“老老实实”做研究的环境和空间。把科学工作者从论证、检查、评估、考核等无休无止的非科学活动类行政事务中解脱出来。事实上,基础研究不适合过度引入竞争机制,不适用短周期的考核评价。对基础研究的评价要坚持“长周期、低频次、少干预、看能力”的原则。基础研究,特别是自然科学基金基础研究始终处于国际竞争当中,能在重要学术刊物上发表论文、在国际重要学术会议上做邀请报告、在国际重要学术组织任职、被国际组织或机构授予领域重要科技奖项,都是研究人员能力的有力体现,利用这些指标、通过同行评议等手段来评估基础研究人员的能力和水平,远胜于仅仅基于SCI论文数、被引情况及期刊影响因子等定量指标的简单评价。

7) 创造与国际一流卓越创新机构的良好开放合作模式

我国要进一步拓展国际科技合作的广度和深度,提升在国际科技界的话语权和竞争力,在基础科学研究领域与科技强国、创新型国家(尤其是在某些科技领域领先的创新型小国)开展“强强合作”或者互补性联合研究。特别是要开展与国际上从事基础研究的一流卓越创新机构、世界一流研究型大学等开展深入的开放合作,要鼓励我国科学家积极参与国际顶尖科研计划和项目,而非只参与外围的辅助工作。对诺贝尔科学奖获奖者的研究表明,获得诺奖的机构、科学家之间,存在着密切的研究合作和师生关系^[36,37]。而且,获得科技领域科学奖项的科学家,更容易获得诺奖^[38]。这里面涉及到深层次的科学传统、科学思想和科学精神的传承关系。因此,与产出过诺奖

自然科学奖的研究机构和团队开展研究合作,是至关重要的。同时,也要积极邀请国外顶尖科学家和团队(特别是获得科技领域权威奖项且年富力强的科学家及其团队)全职来我国开展合作研究和学术任职,关键是传承优秀的科学传统。这里倡导的与国际一流卓越创新机构进行开放合作,并不是跟随他们的研究方向和课题,不是邀请一流专家来做对我们研究进行说教的“导师”,更不是去寻求外国已有的论据和“权威”言论作为对自己研究的肯定和评价,而是将我们的重要研究问题置于国际一流同行中,开展广泛的、实时的深入研讨、课题论证与学术辩论,汲取世界一流科学家的科学思想营养。

5 启示与建议

从前文的论述可以发现,基础研究是科技进步、技术革新、产业变革、社会发展的最根本源动力所在,关键性新技术、新兴技术、颠覆性技术的突破,新产业以及新产品的诞生往往是建立在基础研究突破的基础之上。然而,尽管基础研究如此重要,但由于其专业化与不确定性、高风险性等特点,政府往往无法完全做到对基础科研活动的有效规划和指导。因此,如果政府对基础研究方向和选题的“指导”太多,反而会束缚基础研究的发散性原创突破,政府需要做的是对基础研究给予长期稳定的支持、合理的引导与目标期望、宽松的绩效考核,更多地通过政府与科学家之间一种基于科技体制的社会契约来长效提升基础研究的广度和深度。

政府不做过多的“指导”并不意味着任由基础研究步入完全兴趣驱动的绝对自由模式,而是要在政府主导、国家目标导向的重大定向基础研究与科学家自主决策和自由探索的基础前沿研究

之间取得适当的平衡。在当前国际竞争日益加剧、世界已经进入以创新为主题和主导的发展新时代背景下,世界各国争夺科技与产业主导权的竞争日益激烈,特别是主要科技强国和欧盟都在积极实施创新驱动发展的战略,致力于巩固自身优势领域的固有地位,争夺在新兴领域的主导权和话语权。因此,我国必须为满足某些特定国家目标的需要,积极布局相关领域的战略性基础研究工作。我国建设世界科技强国的战略号角已经吹响,在未来三十年建设科技强国的进程中,我国必须要高度聚焦世界科技最前沿,准确研判全球科技创新发展趋势,扎实推进基础研究,科学规划科技强国建设路径,支撑现代化强国建设。

强化基础研究的重要前提之一是我们要有创新自信。所谓创新自信并非盲目自大,而是要有坚定敢为天下先的志向,在引进和学习世界先进科技成果的同时,更要走前人没有走过的路,在独创独有上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题,敢于和包容失败(失败也是为后人的成功铺路),提出更多原创理论,作出更多原创发现,力争在重要科技领域实现跨越发展,跟上甚至引领世界科技发展新方向,掌握新一轮全球科技竞争的战略主动。

参考文献

- [1] 郝柏林. 对基础研究的一些认识[J]. 中国科学院院刊, 2004, 19(4): 293-295.
HAO B L. Some Understanding of Basic Research [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2004, 19(4): 293-295.
- [2] 张志强. 洞察科技发展趋势, 支撑创新发展决策 [J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39(1): 1-3.
ZHANG Z Q. Understanding the Development

- Trend of Science and Technology and Supporting the Decision-Making of Innovation and Development [J]. *World Sci-Tech R&D*, 2017, 39(1): 1-3.
- [3] 张志强. 聚焦科技创新发展, 服务科技强国建设 [J]. *世界科技研究与发展*, 2018, 40(1): 1-4.
- ZHANG Z Q. Focusing on the Innovation and Development of Science and Technology and Serving the Construction of Science and Technology Power [J]. *World Sci-Tech R&D*, 2018, 40(1): 1-4.
- [4] BUSH V. Science The Endless Frontier [EB/OL]. [2019-01-26]. <https://nsf.gov/od/lpa/nsf50/vbush1945.htm>.
- [5] OECD. Basic Research [EB/OL]. [2019-01-27]. <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=192>.
- [6] 司托克斯. 基础科学与技术创新 巴斯德象限 [M]. 周春彦, 谷春立, 译. 北京: 科学出版社, 1999.
- STOKES D E. Pasteur's Quadrant: Basic Science and Technological Innovation [M]. ZHOU C Y, GU C L, Trans. Beijing: Science Press, 1999.
- [7] 周恒. 加强基础研究的途径 [J]. *科学与社会*, 2017(4): 5-8.
- ZHOU H. Ways to Strengthen Basic Research [J]. *Science and Society*, 2017(4): 5-8.
- [8] SHANNON C E A. Mathematical Theory of Communication [J]. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27: 379-423, 623-656.
- [9] 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.
- [10] RUBIO D M, SCHOENBAUM E E, LEE L S, et al. Defining Translational Research: Implications for Training [J]. *Academic Medicine*, 2010, 85(3): 470-475.
- [11] 张志强, 田倩飞, 陈云伟. 科技强国主要科技指标体系比较研究 [J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(10): 1052-1063.
- ZHANG Z Q, TIAN Q F, CHEN Y W. Research on Main Scientific and Technological Indicators of Science and Technology Power [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(10): 1052-1063.
- [12] NSF. About the National Science Foundation [EB/OL]. [2019-01-27]. <https://www.nsf.gov/about/>.
- [13] NSF. Building the Future Investing in Discovery and Innovation [EB/OL]. 2018-02. <https://www.nsf.gov/pubs/2018/nsf18045/nsf18045.pdf>.
- [14] MERVIS J. Data Check: U. S. Government Share of Basic Research Funding Falls Below 50% [EB/OL]. [2019-02-07]. <http://www.sciencemag.org/news/2017/03/data-check-us-government-share-basic-research-funding-falls-below-50>.
- [15] ERC. Mission [EB/OL]. [2019-02-06]. <https://erc.europa.eu/about-erc/mission>.
- [16] European Commission. The Commission's Proposal for Horizon Europe [EB/OL]. [2019-02-06]. https://ec.europa.eu/info/designing-next-research-and-innovation-framework-programme/what-shapes-next-framework-programme_en.
- [17] 刘云, 陶斯宇. 基础科学优势为创新发展注入新动力——英国成为世界科技强国之路 [J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(5): 484-492.
- LIU Y, TAO S Y. Basic Science Advantage In-

- stills New Power for Innovative Development——Way of United Kingdom Becoming World's Scientific and Technological Power[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(5): 484-492.
- [18] GROS C. An Empirical Study of the Per Capita Yield of Science Nobel Prizes: Is the US Era Coming to an End? [J]. *Royal Society Open Science*, 2018, 5(5): 180167.
- [19] 杜成. 德国基础研究体系揭秘: 经费来源广 课题多样化[N]. *中国科学报*, 2012-04-04(A3)
- DU C. Unveiling the German Basic Research System; Broad Sources of Funds and Diverse Topics [N]. *China Science Daily*, 2012-04-04(A3).
- [20] 邱举良, 方晓东. 建设独立自主的国家科技创新体系——法国成为世界科技强国的路径[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(5): 493-501.
- QIU J L, FANG X D. Construct Independent National S&T Innovation System——French Way to World S&T Power[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(5): 493-501.
- [21] 胡智慧, 王溯. “科技立国”战略与“诺贝尔奖计划”——日本建设世界科技强国之路[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(5): 520-526.
- HU Z H, WANG S. "Constructing Nation via S&T Strategy" and "Nobel Prizes Planning" ——Japanese Way to World S&T Power[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(5): 520-526.
- [22] GOV. UK. Industrial Strategy: Artificial Intelligence Sector Deal [EB/OL]. 2018-04-26. <https://www.gov.uk/government/publications/artificial-intelligence-sector-deal/ai-sector-deal>.
- [23] White House. Bill Announcement. H. R. 6227, the "National Quantum Initiative Act," which Establishes a National Quantum Initiative Program to Accelerate the Development of Quantum Information Science and Its Technology Applications [EB/OL]. 2018-12-21. <https://www.whitehouse.gov/briefings-statements/bill-announcement-10/>.
- [24] Congress. H. R. 6227-National Quantum Initiative Act [EB/OL]. 2018-06-26. <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227>.
- [25] OSTP. Accelerating America's Leadership in Artificial Intelligence [EB/OL]. [2019-02-11]. <https://www.whitehouse.gov/articles/accelerating-americas-leadership-in-artificial-intelligence/>.
- [26] IMD. IMD World Competitiveness Rankings 2018 [EB/OL]. [2019-01-27]. <https://www.imd.org/wcc/world-competitiveness-center-rankings/world-competitiveness-ranking-2018/>.
- [27] The World Bank. GDP Ranking [EB/OL]. [2019-01-27]. <https://datacatalog.worldbank.org/dataset/gdp-ranking>.
- [28] 人民日报. 科技发展40年巨变: 多项指标世界领先重大成果涌现 [EB/OL]. [2019-01-27]. http://www.xinhuanet.com/politics/2018-10/06/c_1123521822.htm.
- People's Daily. Great Changes in the Development of Science and Technology in the Past 40 Years: Major World Leading Achievements Emerge in Multiple Indicators [EB/OL]. [2019-01-27]. http://www.xinhuanet.com/politics/2018-10/06/c_1123521822.htm.
- [29] 科睿唯安. 2018 科睿唯安“高被引科学家”名单出炉 [EB/OL]. [2019-01-27]. <https://clarivate.com.cn/blog/2018-11-27-1/>.
- Clarivate Analytics. Highly Cited Researchers

- 2018 [EB/OL]. [2019-01-27]. <https://clarivate.com.cn/blog/2018-11-27-1/>.
- [30]新华社. 中共中央办公厅 国务院办公厅印发《关于深化项目评审、人才评价、机构评估改革的意见》[EB/OL]. 2018-07-24. http://www.gov.cn/zhengce/2018-07/03/content_5303251.htm.
- Xinhua News Agency. The General Office of the State Council, the Central Office of the Communist Party of China Issued "Opinions on Deepening the Reform of Project Assessment, Talent Assessment and Institutional Assessment" [EB/OL]. 2018-07-24. http://www.gov.cn/zhengce/2018-07/03/content_5303251.htm.
- [31] Congress. H. R. 1757-National Information Infrastructure Act of 1993 [EB/OL]. 1993-07-26. <https://www.congress.gov/bill/103rd-congress/house-bill/1757>.
- [32] NIST. Big Data Research and Development Initiative [EB/OL]. 2012-06. <https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/itl/ssd/is/NIST-BD-Platforms-05-Big-Data-Wactlar-slides.pdf>.
- [33] NITRD. The Federal Big Data Research and Development Strategic Plan [EB/OL]. 2016-05. <https://www.nitrd.gov/PUBS/bigdatardstrategicplan.pdf>.
- [34] 周忠和, 赵维杰. 以基金改革追求卓越科学——专访国家自然科学基金委员会主任李静海院士[J]. 中国科学基金, 2019(1):1-4.
- ZHOU Z H, ZHAO W J. Funding System Reform for Excellence in Science: an Interview with Jinghai Li, the President of NSFC [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019(1):1-4.
- [35] WU L F, WANG D H, EVANS J A. Large Teams Develop and Small Teams Disrupt Science and Technology [J]. Nature, 2019, 566:378-382.
- [36] 张志强, 门伟莉. 诺贝尔物理学奖获得者中师承效应量化研究 [J]. 情报学报, 2014, 33(9):926-935.
- ZHANG Z Q, MENG W L. Quantitative Research on the Effects of Accomplished Teachers on Nobel Prize Winners in Physics [J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2014, 33(9):926-935.
- [37] 门伟莉, 张志强. 诺贝尔科学奖跨学科师承效应定量研究 [J]. 科学学研究, 2015, 33(4):498-506.
- MENG W L, ZHANG Z Q. Quantified Research on the Effects of Interdisciplinary Accomplished Teachers in Nobel Prize Winners in Science [J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(4):498-506.
- [38] MA Y F, UZZI B. Scientific Prize Network Predicts Who Pushes the Boundaries of Science [J]. PNAS, 2018, 115(50):12608-12615.