

生物成像技术发展态势分析*

丁陈君** 陈方 吴晓燕 陈云伟 郑颖
(中国科学院成都文献情报中心,成都 610041)

摘要:生物成像技术是生物结构和功能研究最直接、最有效的方法,其技术发展和科研基地建设受到多个国家的重视。本文分析生物成像技术的研究现状和发展态势发现:技术的发展不断提升成像性能,开发多模态、多功能的仪器设备是未来的主要方向;信息技术的发展、纳米材料等新材料的应用使得成像技术发挥更大作用。最后,对我国生物成像领域的发展提出了建议。

关键词:生物成像;超分辨率;多模态;信息技术;纳米材料

中图分类号:Q-334 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2018.07.002

Analysis on Development Trend of Biology Imaging Technology*

DING Chenjun** CHEN Fang WU Xiaoyan CHEN Yunwei ZHENG Ying
(Chengdu Library and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Bio-imaging technology is the most direct and effective method for the research of biological structure and function. Many countries attach great importance to the development of bio-imaging technology and the construction of scientific research bases. In this paper, the current situation and development trend of bio-imaging technology were analyzed. The results showed that: with the development of technology, the performance of imaging would be improved; the development of multi-modal and multi-functional equipment was the primary target in the future; and imaging technology would play a greater role with the development of information technology and the application of new materials such as nano-materials. Finally, several suggestions for a sustainable development of bio-imaging technology in China were proposed.

Key words: bio-imaging; super-resolution; multimodal; information technology; nanomaterials

1 引言

生物学的发展和新学科分支的形成离不开研究方法的创新和进步,当代生命科学领域的发展更需要高新技术的支撑和推动,也有许多难题的解密有赖于技术手段的改进,其中生物成像技术凭借其观察生命现象和内在过程并揭示其差异变化的功能越来越受到研究人员的重视。早在 20

世纪初至 20 世纪 30 年代,就有多项诺贝尔奖与显微成像技术相关。近几年来,成像技术发展迅猛,新技术层出不穷。2014 年诺贝尔化学家被授予德国马普学会、美国霍华德休斯医学研究所及斯坦福大学的三位科学家,获奖理由是“研制出超分辨率荧光显微镜”,这项成果将荧光显微成像的分辨率带入到“纳米时代”,极大地推动了生命科学领域的研究工作。超高分辨率成像作为一

2018-03-01 收稿,2018-07-09 接受,2018-07-30 网络发表

* 中国科学院青年创新促进会(2017220)资助

** 通讯作者,E-mail:dingcj@clas.ac.cn;Tel:028-85235075

类很新的技术,突破了光学成像中的衍射极限,把传统成像分辨率提高了10~20倍,是研究细胞结构的利器。2017年诺贝尔化学奖再次落到生物成像领域,被授予三位在冷冻电子显微镜(Cryo-electron Microscopy, cryo-EM)领域的学者,肯定了他们对冷冻电镜技术的发展做出的突出贡献。冷冻电镜在过去几年的迅猛发展,使得其在结构生物学领域生物探索过程中发挥越来越重要的作用,以至于被科学家们称为“诺奖助手”。随着技术的不断改进,对生物大分子结构解析的分辨率和效率得到了显著提升,有关方法学突破和具有里程碑意义的重要结构解析结果也层出不穷,例如中国科学院生物物理研究所章新政研究组与李梅研究组合作,通过单颗粒冷冻电镜技术,在3.2埃分辨率下解析了高等植物(菠菜)光系统II-捕光复合物II超级膜蛋白复合体(PSII-LHCII super-complex)的三维结构^[1];清华大学施一公团队^[2]首次揭示人类 γ -分泌酶(一类与阿尔茨海默症有关的蛋白)近原子分辨率的三维结构,该团队对酵母剪接体近原子分辨率结构的解析,不仅初步解答了这一基础生命科学领域长期以来备受关注的核心问题,又为进一步揭示与剪接体相关疾病的发病机理提供了结构基础和理论指导^[3,4]。

从工程角度来讲,生物系统是最复杂的系统之一。在基础生物研究领域,若想准确了解生物体的内在机制,就需要通过高分辨率、多维度以及多模态的生物成像手段来实时、并行地获取生物系统的动态变化信息。目前,主要的生物成像方法包括X射线、核磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)、生物光学成像、放射性核素成像、超声成像、生物组织质谱成像、电子显微成像等。其中,X射线成像、MRI、超声成像、计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)成像等被应

用到医学领域,在临床诊疗中发挥了巨大作用。近年在这些传统诊断成像过程基础上发展形成的分子成像技术,也是一种医学成像技术,通过设计分子探针和成像方法,对活体状态下的生物过程进行细胞、分子水平的定性、定量研究,主要用于探查基于疾病发生的细胞和分子水平上的差异。根据探针的物理性质不同,可以分为多种成像模式,主要有磁共振成像、放射性核素成像(包括单光子发射计算机断层成像技术(Single-Photon Emission Computed Tomography, SPECT)和正电子发射断层扫描(Positron Emission Tomography, PET)成像技术)、光成像(包括荧光、生物发光、光声成像)。这些成像模式在空间分辨率、组织穿透率和灵敏度上各有优势。多模态分子影像技术应运而生,它融合了不同影像技术的优势,无创、实时、精细、特异性地显示体内复杂的生化过程,提供更加全面和精确的信息。开发多模态、多参数、面向临床诊疗的生物成像方法已成为生物医学领域研究的明确方向。

2 各国大力推进生物成像技术研究和科研基地建设

美国、欧盟、法国、澳大利亚等均已针对影像学技术研究开展大规模、多学科交叉、有明确目标导向的影像学研究中心布局和建设。早在21世纪初,美国政府就已批准国立卫生研究院(NIH)专门成立国家生物医学影像及生物医学工程研究所(NIBIB),其宗旨是促进理化科学、工程技术与生命科学的整合,通过引领、催化生物医学技术的发展和應用,推动生命科学基础研究和医疗事业的进步;美国国立癌症研究院(NCI)于1996年10月开始实施诊断成像计划,2003年更名为肿瘤成像计划,旨在促进各领域科学家的协作从而推进

细胞和分子成像等方向的多学科交叉研究。该计划实施了多项举措,包括启动小动物成像资源计划、建立体内细胞和分子成像中心、建立多个合作研究网络等^[5]。2017年,美国国家科学技术委员会(NSTC)发布《医学成像研究和发展路线图》报告,确定了四个主题,包括标准化的图像采集和存储、将先进的计算和机器学习应用于医学成像领域、加快高价值成像新技术的开发和转化、推进医学成像领域的最佳实践并指导医学成像领域未来的研发活动^[6]。欧盟在2008年制定的研究基础设施路线图中明确提出了欧洲生物医学影像基础设施(Euro-BioImaging)联合平台计划,以提供覆盖生物学和医学应用的全范围成像技术^[7]。法国政府科研机构2005年设立大科学计划,建设大型影像学设备和平台,旨在脑科学研究中取得重大突破^[8]。澳大利亚在2016年发布的《国家研究基础设施路线图》中也对生物成像设施作出了相应布局^[9]。

我国政府十分重视生物成像技术研究和相关科研设施的建设。《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030)》在对生命科学领域的部署中提出了建设大型成像设施的要求。《国家重大科技基础设施建设“十三五”规划》优先布局了“多模态跨尺度生物医学成像设施”建设项目,计划提供革命性的研究手段,进而破解生命与疾病的奥秘。此外,科技部就生物成像技术也进行了布局和项目设计,例如国家重点研发计划重点专项“大视场生物成像分析仪”项目,将通过攻克大视场高分辨离轴反射式光学系统设计技术、大面阵高分辨探测器和大面积单层细胞推片技术三个关键技术,开发新型大视场高分辨生物成像分析仪。

3 生物成像技术的研究现状和发展趋势

3.1 技术发展日新月异,性能不断提升

随着新的应用领域不断应需而生,这些领域对生物成像技术的要求也越来越高。在微观层面探索生命的奥秘时,成像技术的分辨率决定了研究的深度,因此以超分辨率光学成像为代表的单分子成像技术受到普遍关注,对该技术做出贡献的科学家也因此获得诺贝尔化学奖。超分辨率技术打破传统光学衍射的限制,可以将成像分辨率提高10倍以上,令光学显微镜的分辨率达到了纳米级。借助超分辨率技术的仪器设备,生物学家能从分子层面解析生物结构和过程,例如阿尔兹海默症患者脑内蛋白聚集等细胞事件;利用随机光学重建显微镜,科学家首次观察到了神经元轴突的细胞骨架。

随着成像技术时空分辨率的不断提升,科学家可以检测肿瘤和身体深部组织的活动,这就需要在活体状态下进行成像。提到这方面的成像技术不得不提在细胞生物学、神经科学、肿瘤生物学、脑科学等多方面发挥作用的活体荧光显微技术和正电子发射断层成像技术。其中,活体荧光显微镜技术既要有足够观察细胞行为和分子信号的分辨率,又要满足活体实时可视的成像需要,目前还在不断进步中,例如,哈佛大学开发的活细胞超分辨率荧光成像技术,通过分子定位和分子位置重叠重构获得超高分辨率的活体图像^[10];2015年,美国霍华德休斯医学研究所 Eric Betzig 等^[11]发展了长时间活细胞结构光-非线性活细胞超高分辨显微成像技术(PA NL-SIM),将活细胞结构光照明超高分辨成像的空间分辨率从100纳米提高到45~65纳米,同时具有极高的时间分辨率

(0.25 秒);美国科罗拉多州立大学研究人员开发了专门的多光子-空间频率调制成像显微镜,通过荧光和二次谐波同时收集图像信息,产生了纳米级图像,空间分辨率达到 2η ^[12];2017年,Hell 团队^[13]在《科学》上报道了 MINFLUX 超分辨率显微镜,首次达到 1nm 的空间分辨率,此外,该显微镜还能追踪活细胞中的单个分子,速度比其他方法至少快 100 倍。徐平勇等^[14]通过将单分子定位和贝叶斯技术相结合开发的新型活细胞超分辨率显微技术具有适用范围广、时空分辨率高、运行速度快和分析尺度大等优点。北京大学程和平院士团队^[15]在超高时空分辨微型化双光子在体显微成像系统方面取得重大突破,在国际上首次记录悬尾、跳台、社交等自然行为条件下小鼠大脑神经元和神经突触活动的高速高分辨图像,该成果为人类了解大脑神经传导过程提供了更先进的工具,同时也将为可视化研究自闭症、阿尔茨海默病、癫痫等脑疾病的神经机制发挥重要作用。华中科技大学谢庆国教授等提出并发展了全数字 PET 技术,相比于传统模数混合 PET 技术,具有“全数字”和“精确采样”两大特性,并进而带来超高分辨率、超高灵敏度、精确定量等优势,该技术已成功用于阿尔兹海默症^[16]、糖尿病^[17]、神经^[18]、肝肿瘤^[19]和非酒精性脂肪肝^[20]等研究。该团队还研发出世界首台数字正电子发射断层成像仪,可以更早、更灵敏地发现肿瘤、诊断癌症,2017年6月该装置已被送到芬兰国家 PET 中心装机,用于疾病研究和新药研发^[21],有效促进了中国高端医疗装备产业的发展;同时,全数字 PET 技术也在台湾长庚医院用于质子束的在线监测,首次监测到了质子束打到人体组织上产生的氧 15,质子刀 PET 仪器有望实现研发。

此外,由于生物细胞是一个具有三维空间结

构的生命单元,所以要对细胞的超精细结构的全方位观测,目前已向超高分辨率、超快速、超深度三个方向发展形成了三维超分辨成像技术。

3.2 研究手段和方法有机融合,仪器设备向多模态、多功能的方向发展

不同种类的生物成像技术各具特色和功能,在成像原理、性能指标和参数方面表现出各自的优缺点。多模态融合已成为生物成像系统发展的趋势。多模态跨尺度成像是同一研究对象,利用多种成像模态,跨越不同时间和空间尺度,通过硬件和图像数据融合,全景式地呈现生命活动的过程,阐述在分子、细胞、组织和器官水平的跨尺度生物体特征,辅助早期疾病精确诊断、临床决策及治疗方案的选择。目前,PET-CT 及 PET-MRI 成像设备已经被成功应用于临床,可以同时提供更加精确、高分辨率的解剖、功能及生化信息。

在 PET-CT 系统中,PET 作为一种超高灵敏度分子影像设备,能够无创、定量、动态地从分子水平评估生物体内各器官的代谢水平、生化反应和功能活动,在对肿瘤、心血管系统疾病和神经系统疾病等病症的早期诊断、治疗规划、疗效监测与评估,以及新型核医学示踪剂和分子探针研究、新药开发、靶向治疗技术研究等临床前生物学基础研究领域具有独特的应用价值。数字 PET 在全面提升 PET 核心性能(探测灵敏度、空间分辨率等)的同时,具有精确定量、性能优异、使用便捷等优势,应用的广度和深度得到极大扩展:糖尿病、不明原因发热、脂肪肝等疾病的早期检测有望开展。

目前,医学成像模式分为功能成像(SPECT、PET 等)和解剖成像(CT、MRI 等)两类。PET-MRI 是功能成像中双模成像技术的热点。PET 的优势在于敏感性较高、可定量分析和跟踪标记物

在体内的分布,但空间分辨率低、缺乏解剖形态结构信息;MRI 成像敏感性较低,但具有良好的软组织对比度可实现功能磁共振成像。未来 PET-MRI 双模技术还需要解决两者相互干扰和衰减校正的问题。

作为医学影像学研究的重要方法,分子影像技术的发展方向不仅面向临床诊疗,还面向新药开发和人体科学基础研究,PET-SPECT 是目前开展分子水平成像较为合适的成像模式。其优势在于可对多种示踪剂和分子探针进行造影。在生物医学和临床研究中,参与各个组织代谢的标记物示踪剂类型并不相同,因此在研究某一疾病时需要同时标记多个代谢过程。

随着计算机技术、物理学、分子生物学、材料化学等学科的发展,大量用于多模态成像的新型软硬件设备及多功能分子探针被开发出来,为生物成像技术的研发和应用开辟更广阔的新天地。

3.3 新技术、新材料的广泛应用使得成像技术在生命科学研究领域发挥更关键的作用

再完美的超分辨率研究也需要某种形式的计算处理,才能得到高质量的图像,在这方面,信息技术的发展对生物成像技术产生了深远影响,发挥了重要的推动作用,同时也实现了成像信息数字化、数据分析自动智能化和信息传输网络化。结构生物学家 Scheres^[22] 之所以入选《Nature》期刊 2014 年度十大科学人物,就是因为其开发了 RELION 软件包,将 cryo-EM 图像转变为精细的分子结构,让生物学家们更简单更清晰地看到分子机器。计算机图像处理技术的进步不仅弥补了电子显微镜技术固有的缺陷,还较好地解读了以前看似不可能分析的样品。计算机科学、机器学习、人工智能等技术的快速发展也推动医学影像学的进步。计算机辅助检测和计算机辅助诊断的出现可

以提高诊断准确性,大大减少假阳性的产生,为医护人员提供有效的诊断决策支撑。2017 年底,依托腾讯公司建设的医疗影像国家新一代人工智能开放创新平台入选中国科技部公布的首批次新一代人工智能开放创新平台名单,未来将为疾病快速有效的诊断做出重要贡献。

在新材料方面,新兴纳米材料,例如金属纳米结构(金纳米颗粒、银纳米颗粒等)、靶向多肽连接的量子点、稀土上转换纳米材料、磁性纳米材料及碳基纳米材料、硅基纳米材料等具有优良机械、光学或磁学性能的功能性纳米材料为解决传统生物技术难以解决的复杂问题提供了新的机遇。基于纳米材料构建的分子影像探针,已在生命科学基础研究和临床医学应用中表现出诱人的前景,特别是在实时、动态、高灵敏成像方面受到极大关注。复旦大学研究团队用豌豆蛋白作为模板,简单、绿色地合成了发红色荧光的金纳米团簇,制备出了红细胞膜包覆的金纳米团簇/豌豆蛋白复合纳米颗粒(AuNCs/PPI@RBC),克服了常规金纳米材料在体内应用的局限性,并将其成功用于肿瘤部位成像^[23]。王强斌团队开发的新型近红外 II 区荧光 Ag₂S 量子点及小动物活体成像系统可随造影剂进入血管全身循环从而清晰地呈现小鼠心跳、肝部、脾部、动脉等,在活体水平提供原位、实时、动态影像,该技术在肿瘤靶向治疗和基于干细胞的再生医学领域有着强大的应用前景,同时在药物筛选方面也具有不可替代的优势。目前已从实验室走向市场。

4 结论与展望

在过去几十年中,生物成像技术呈现快速发展态势,在多个重要领域中得到了广泛应用。由于其无创性优势,使得影像学方法在临床医学中

具有广阔的应用前景。超分辨率技术打破传统光学衍射的限制,可以将成像分辨率提高10倍以上,由此光学显微镜的分辨率达到了纳米级。分子成像技术通过设计分子探针和成像方法,对活体状态下的生物过程进行细胞、亚细胞及分子水平的定性、定量研究,在重大疾病的早期诊断、药物筛选、个性化治疗等方面与传统成像技术相比更具优势。不同种类的生物成像技术各具特色和功能,在成像原理、性能指标和参数方面表现出各自的优缺点。多模态融合已成为生物成像系统发展的趋势。此外,随着信息技术的发展,成像信息实现了数字化、数据分析自动智能化和信息传输网络化,新的算法使得高端仪器输出的图片更加精美。在新材料方面,新兴纳米材料为解决传统生物技术难以解决的复杂问题提供了新的机遇。基于纳米材料构建的分子影像探针已在实时、动态、高灵敏成像方面受到极大关注。

我国在生物成像技术领域的研发工作起步较晚,关键核心技术匮乏,关键大型仪器设备主要依靠进口,自主研发产品的稳定性和可靠性有待提高,产业化进程缓慢。在人才培养方面,多学科背景的复合型人才缺口较大。近年来我国在前沿生物成像技术研发领域发展迅猛,相关的研究论文数量呈直线增长趋势,高端成像设备研制方面取得了若干重大突破,促进了中国高端医疗装备产业的发展。

我国应紧紧抓住生物成像领域发展机遇,集聚创新要素,优化创新生态环境,统筹项目、人才、基地、平台和示范的布局,将产业发展战略与创新科技发展战略紧密衔接。组建国家生物医学影像研究与产业化协调机构;加快生物成像创新体系构建,完善创新基地建设布局;建设国家级生物成像重大基础设施和利用平台,打造国际一流水平

的基础研究骨干基地。以生物成像领域新兴技术为核心,加强计算机科学、纳米科学、物理学、化学等多学科交叉,实现学科集群化发展,实施创新人才战略,建立生物成像领域多学科背景的一流人才队伍,高效推进生物成像领域的关键技术、核心部件和重大产品创新和产业发展,开发多种新材料并推进其全面走向实际应用,例如具有独特光学性质和良好生物相容性的各种金属纳米材料等,设立生物成像重大专项基金,尤其是在超分辨率成像、冷冻电镜成像等前沿领域加大投资力度,大幅提高影像科学仪器领域的核心竞争力,有效支撑生命科学基础研究、医学影像设备产业发展和医疗卫生服务体系建设,实现我国生物医学影像设备产业的快速发展。

参考文献

- [1] WEI Xuepeng, SU Xiaodong, CAO Peng, et al. Structure of Spinach Photosystem II-LHCII Supercomplex at 3.2 Å [J]. Nature, 2016, 534:69-74.
- [2] LU Peilong, BAI Xiaochen, MA Dan, et al. Three-dimensional Structure of Human γ -secretase [J]. Nature. 2014, 512:166-170.
- [3] WAN Ruixue, YAN Chuangye, BAI Rui, et al. Structure of a Yeast Catalytic Step I Spliceosome at 3.4 Å Resolution [J]. Science, 2016, doi:10.1126/science.aag2235.
- [4] YAN Chuangye, WAN Ruixue, BAI Rui, et al. Structure of a Yeast Catalytically Activated Spliceosome at 3.5 Å Resolution [J]. Science, 2016, doi:10.1126/science.aag0291.
- [5] NATIONAL Cancer Institute. Cancer Imaging Program History [EB/OL]. 2016-12-28. https://imaging.cancer.gov/about_cip/history.htm.

- [6] NSTC. Roadmap for Medical Imaging Research and Development [EB/OL]. 2017-12-01. https://imaging.cancer.gov/news_events/Roadmap-for-Medical-Imaging-Research-and-Development-2017.pdf.
- [7] EUROPEAN Strategy Forum on Research Infrastructures. European Roadmap for Research Infrastructures 2008 [EB/OL]. 2008-09-26. https://ec.europa.eu/research/infrastructures/pdf/esfri/esfri_roadmap/roadmap_2008/esfri_roadmap_update_2008.pdf.
- [8] NEUROSPIN. NEUROSPIN: from Physics to the Human Brain [EB/OL]. 2012-12-10. <http://www.meteoreservice.com/neurospin/>.
- [9] AUSTRALIAN Government. 2016 National Research Infrastructure Roadmap [EB/OL]. 2017-02-21. https://docs.education.gov.au/system/files/doc/other/ed16-0269_national_research_infrastructure_roadmap_report_internals_acc.pdf.
- [10] JONES S, SHIM S, HE Jiang, et al. Fast, Three-dimensional Super-resolution Imaging of Live Cells [J]. *Nature Methods*, 2011, 8:499-505.
- [11] LI Dong, SHAO Lin, CHEN Bichang, et al. Extended-resolution Structured Illumination Imaging of Endocytic and Cytoskeletal Dynamics [J]. *Science*, 2015, 349(6251): aab3500.
- [12] FIELD J, WERNING K, DOMINGUE S, et al. Super-resolved Multiphoton Microscopy with Spatial Frequency-modulated Imaging [J]. *PNAS*, 2016, 113(24): 6605-6610.
- [13] BALZAROTTI F, YVAN E, GWOSCH K, et al. Nanometer Resolution Imaging and Tracking of Fluorescent Molecules with Minimal Photon Fluxes [J]. *Science*, 2017, 355(6325): 606-612.
- [14] XU Fan, ZHANG Mingshu, HE Wenting, et al. Live Cell Single Molecule-guided Bayesian Localization Super Resolution Microscopy [J]. *Cell Research*, 2017, 27(5): 713-716.
- [15] ZONG Weijian, WU Runlong, LI Mingli, et al. Fast High-resolution Miniature Two-photon Microscopy for Brain Imaging in Freely Behaving Mice [J]. *Nature Methods*, 2017, 14(7): 713-719.
- [16] JIN Nan, ZHU Huazhang, LIANG Xiao, et al. Sodium Selenate Activated Wnt/ β -catenin Signaling and Repressed Amyloid- β Formation in a Triple Transgenic Mouse Model of Alzheimer's Disease [J]. *Experimental Neurology*, 2017, 297: 36-49.
- [17] LI Wenjing, YANG Xiaoyan, ZHENG Tao, et al. TNF- α Stimulates Endothelial Palmitic Acid Transcytosis and Promotes Insulin Resistance [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 44659.
- [18] YANG Ying, WANG Zhihao, JIN Sen, et al. Opposite Monosynaptic Scaling of BLP-vCA1 Inputs Governs Hopefulness- and Helplessness-modulated Spatial Learning and Memory [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11935.
- [19] LIU Xu, TAN Xiaolong, XIA Meng, et al. Loss of 11 β HSD1 Enhances Glycolysis, Facilitates Intrahepatic Metastasis, and Indicates Poor Prognosis in Hepatocellular Carcinoma [J]. *Oncotarget*, 2016, 7(2): 2038-2053.
- [20] WANG Pixiao, JI YanXiao, ZHANG XiaoJing, et al. Targeting CASP8 and FADD-like Apoptosis Regulator Ameliorates Nonalcoholic Steatohepatitis in Mice and Nonhuman Primates [J]. *Nature Medicine*, 2017, 23: 439-449.
- [21] 新华社. 我国自主研发数字 PET 成像仪在芬兰装机 [EB/OL]. 2017-06-20. <http://www.xinhuanet.com>

- huanet.com/tech/2017-06/20/c_112117789_9.htm.
- XINHUA News Agency. The Digital PET Imager of Independent Research and Development by Chinese researchers has been installed in Finland [EB/OL]. 2017-06-20. http://www.xinhuanet.com/tech/2017-06/20/c_1121177899.htm
- [22] SCHERES S. RELION: Implementation of a Bayesian Approach to Cryo-EM Structure Determination[J]. Journal of Structural Biology, 2012, 180:519-530.
- [23] LI Zhao, PENG Haibao, LIU Jianlin, et al. Plant Protein-Directed Synthesis of Luminescent Gold Nanocluster Hybrids for Tumor Imaging[J]. ACS Applied Materials & Interfaces. 2018, 10(1):83-90.

美国对量子信息科学发展的政策考量

美国国家科学技术委员会(NSTC)在2016年7月发布的报告《推进量子信息科学:国家挑战与机遇》中指出,制定一项协调一致和有效的国家量子信息科学(QIS)研发政策需要政府、学术界和私营部门的通力合作,尤其需要解决机构壁垒、教育培训、技术转移、材料制造和资金稳定等关键领域的问题。这些关键领域随后又在能源部报告《基础科学、量子信息科学与计算交界处的量子传感器》以及国会听证会中被反复强调。2018年7月2日,美国国会研究服务处(CRS)发布《联邦量子信息科学概况》报告,在概述各国QIS项目部署和研发状况的基础上,提出美国的政策考量。

机构壁垒:美国各科研机构 and 学科领域的QIS研究通常各自为政,缺乏协调与合作。创建多元化、跨领域的团队对成功至关重要,合作将带来更大的进展。

教育与人才培养:目前的学术教育和雇员培训尚不足以支撑QIS研发的持续推进,需要适用于各种应用场景的多元化、跨领域技能和专业知识支撑。应考虑在各所大学和国家实验室设立跨学科的QIS中心。

技术与知识转移:从大学获取的专利、强有力的风险投资环境、合格的毕业生与有经验的科学家,这些都是影响企业成功开发QIS商品的因素。虽然已有部分项目致力于解决此类问题,但依然存在挑战。

材料与制造:改进实现量子材料可信制造所需的工具(例如硬件小型化能力)是推进QIS研发与应用的决定性因素。

资金:政府资助的不稳定性会减缓QIS发展,不利于培养一支完全合格的人才队伍。资助不稳定的部分原因在于各机构间的协调不充分,这导致大学研究项目的不确定,从而导致优秀的研究人员去国外寻求机会,或是加入外国实体。

研发政策:美国目前缺乏统一的QIS国家政策,长期来看可能妨害到美国的QIS研发。然而,究竟应由谁牵头、该投入多少仍不明朗。

张娟(中国科学院成都文献情报中心) 编译自
<https://fas.org/sgp/crs/misc/IF10872.pdf>