

## Development and prospects of biomedical imaging

骆清铭\*, 周欣 and 叶朝辉\*

Citation: 中国科学: 生命科学 **50**, 1158 (2020); doi: 10.1360/SSV-2020-0214

View online: <https://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSV-2020-0214>

View Table of Contents: <https://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SSV/50/11>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

---

### Articles you may be interested in

[Turbid medium polarimetry in biomedical imaging and diagnosis](#)

European Physical Journal AP(Applied Physics) **54**, 30001 (2011);

[Applications of gold nanorods in biomedical imaging and related fields](#)

Chinese Science Bulletin **58**, 2530 (2013);

[Study on microscope hyperspectral medical imaging method for biomedical quantitative analysis](#)

Chinese Science Bulletin **53**, 1431 (2008);

[Spectrally distinct near-infrared probes for multiplexed biomedical imaging](#)

SCIENCE CHINA Chemistry **64**, 2057 (2021);

[Blockchain technology: development and prospects](#)

National Science Review **6**, 369 (2019);

---



# 生物医学影像学科发展现状和展望

骆清铭<sup>1,2\*</sup>, 周欣<sup>1,3</sup>, 叶朝辉<sup>1,3\*</sup>

1. 华中科技大学武汉光电国家研究中心, 武汉 430074;
  2. 海南大学生物医学工程学院, 海口 570228;
  3. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430071
- \* 联系人, E-mail: [qluo@hainanu.edu.cn](mailto:qluo@hainanu.edu.cn); [ye@wipm.ac.cn](mailto:ye@wipm.ac.cn)

收稿日期: 2020-06-29; 接受日期: 2020-08-18; 网络版发表日期: 2020-10-09

中国科学院学部学科发展战略研究项目(批准号: 2017SLC)和国家自然科学基金(批准号: L1624029, 81842029)资助

**摘要** 生物医学影像作为一门新兴交叉学科, 建立在物理学、数学、化学、信息科学、工程科学、生命科学、医学的基础上, 是贯穿生物医学基础研究和临床诊疗的必备手段, 推动了生命科学和医学领域的一次又一次飞跃. 生物医学影像不仅是建设健康中国的重要支柱, 也是实施智能制造和国家大数据战略的重要抓手; 不仅能为建设科技强国和人才强国做出贡献, 也是国家安全和社会稳定的重要保障. 本文从梳理生物医学影像的发展规律与发展趋势入手, 重点剖析了有史以来我国对生物医学影像研究的重视程度与投入情况, 归纳了我国生物医学影像研究的产出情况, 总结介绍了一些有代表性的优势研究领域, 进而对我国生物医学影像的发展现状进行竞争态势分析, 最后提出展望和建议.

**关键词** 生物医学影像, 生物影像, 医学影像, 全脑介观神经联接图谱, 学科发展, 战略规划

生物医学影像(Biomedical imaging)是一门新兴交叉学科, 最初起源于放射学, 随着各种成像技术的发展和加入, 逐渐壮大成应用于生物医学领域的影像科学. 生物医学影像以生命体健康状况的检测与评价为目标, 包含生命信息的获取、处理以及显示. 它以数理和生命原理为基础, 以化学为桥梁, 以工程技术为支撑, 运用信息处理技术加以实现. 生物医学影像对疾病的早发现、早诊断和早治疗具有重要战略意义, 同时也是揭示疾病形成、发生和发展机理的可视化手段.

生物医学影像的学科边界模糊、方向分散. 它不是基本科学指数(essential science indicators, ESI)的22个分类学科之一, 但几乎对所有ESI学科都有贡献. 在

ESI学科分类中, 生物医学影像的研究主要分散于物理学、工程学、临床医学、化学、材料科学、生物学等学科, 并没有形成集中的学科方向. 在Web of Science和Scopus的学科分类中, 与生物医学影像最接近的学科亚类是放射学/核医学/医学成像, 但这一亚类不足以囊括生物医学影像的全部范畴, 如光学、声学等相关的成像研究就被归入物理学, 而与生物医学影像相近的生物医学工程又被归入工程学甚至生物化学和分子生物学. 可以说, 至少从文献数据库的划分来看, 作为一个“正名”仅20年的学科, 生物医学影像在学科的进化和演变过程中还没有发展成为独立的分支, 其根基仍然立足于各个基础学科.

引用格式: 骆清铭, 周欣, 叶朝辉. 生物医学影像学科发展现状和展望. 中国科学: 生命科学, 2020, 50: 1158–1175  
Luo Q M, Zhou X, Ye C H. Development and prospects of biomedical imaging (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2020, 50: 1158–1175, doi: [10.1360/SSV-2020-0214](https://doi.org/10.1360/SSV-2020-0214)

我国教育部的学科分类中没有设置“生物医学影像”,但相关课程隐匿于生物医学工程一级学科(可授工学、理学或医学学位)和临床医学下的影像医学与核医学二级学科。无论是中国科学院、中国工程院还是国家自然科学基金委员会,在学科设置上都没有明确的“生物医学影像”的落脚点。除了高等教育可以依托生物医学工程学科开展学科建设和人才培养外,在项目申请中,从事生物医学影像的科研人员不得不在生命科学、医学、信息科学、数学、物理学、化学/材料科学、工程科学这些基础学科中选择落脚点,并接受这些基础学科领域的“同行评审”。这样的大同行评审要么偏向数理化学等基础学科的理论和技术突破,要么偏向生物学或医学的重大发现,但很少能全面而准确地对生物医学影像这一交叉学科的研究给予客观而公正的评价。因此,无论从学科建设还是人才培养方面看,作为交叉学科,生物医学影像的科研人员一直是在“夹缝中求生存”。大约十几年前,一些有识之士就在呼吁医工结合。以美国为例,最好的生物医学交叉研究都是将数理化的科学家和工程师与临床医生吸引到同一个屋檐下合作完成的。我国的生物医学影像领域同样存在“医工脱节”的短板,除了较少具备“同一屋檐下”的深度合作土壤外,缺少专门的评价体系也是一个影响因素。

本文将从生物医学影像的发展规律与发展趋势入手,重点介绍我国生物医学影像的发展现状,进行竞争态势分析,并对生物医学影像学科的发展提出展望和建议。

## 1 生物医学影像的意义、发展规律与趋势

### 1.1 科学意义和战略价值

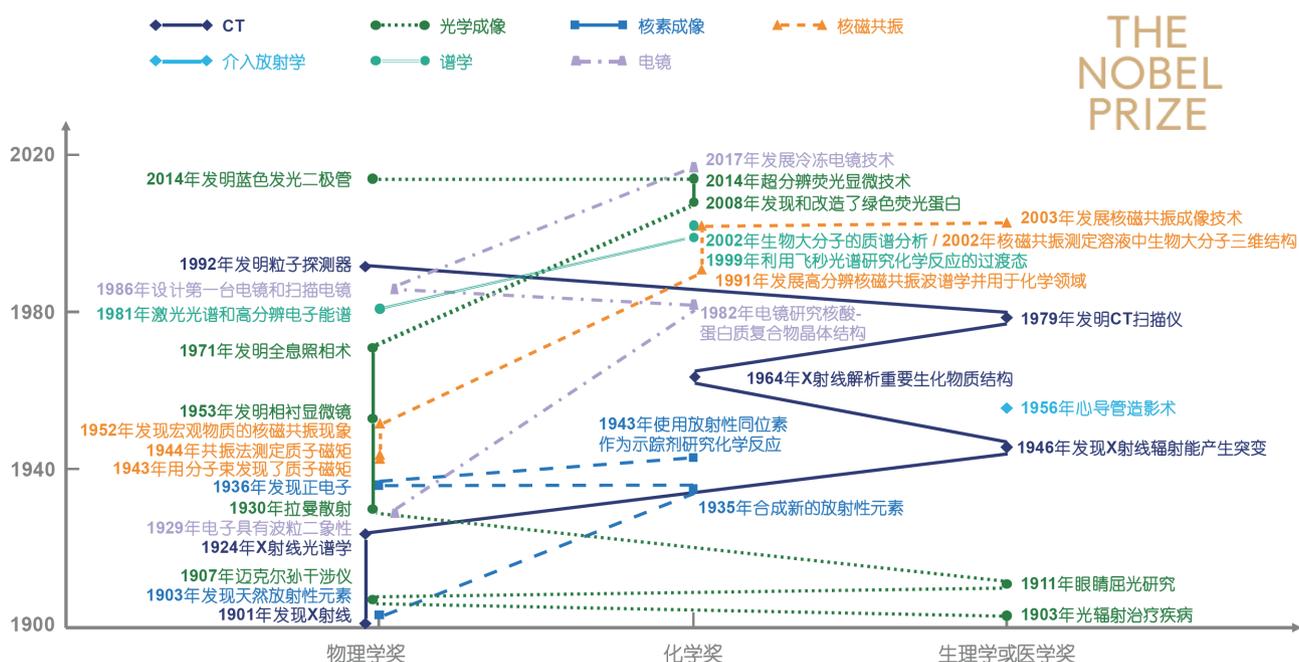
生物医学影像是在放射学和核医学基础上形成的一个新兴交叉学科,其标志性事件是2000年底成立的美国国立生物医学影像和生物工程研究所(National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, NIBIB)<sup>[1]</sup>。为了推动美国国立卫生研究院(National Institutes of Health, NIH)成立这样一个专门从事生物医学影像研究的研究所实体,1991年成立的美国医学与生物工程院(The American Institute for Medical and Biological Engineering, AIMBE)和1995年成立的放射学研究院(The Academy of Radiology Research, 现已更

名为The Academy of Radiology & Biomedical Imaging Research)共同游说美国国会和NIH,经过五年的不懈努力,最终为“生物医学影像和生物工程”学科建立了第一个国家级基地,并筹措到了专项研究经费<sup>[1,2]</sup>。从此,生物医学影像从传统的计算层析成像(computed tomography, CT)和磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)起步,不断囊括其他模态的成像技术,逐渐发展壮大起来。

近半个世纪以来,推动现代科学发展的主要力量已经由创新思想逐渐演变为创新工具<sup>[3]</sup>。可以说,现代生命科学研究的每一次重要发现,医学诊疗手段的每一次革新,无不依赖于生物医学影像技术和仪器的跨越式发展。生物医学影像原理、方法、技术、仪器和应用多次获得诺贝尔物理学奖、化学奖、生理学或医学奖。以核磁共振波谱与成像为例,首先是发现质子磁矩、用共振法测定质子磁矩、发现宏观物质的核磁共振现象等原理上的突破,获得3次诺贝尔物理学奖;继而应用到化学领域,发明傅立叶变换和二维核磁共振波谱学技术,用于测定溶液中生物大分子的三维结构,获得2次诺贝尔化学奖;继而发展出磁共振成像技术,并广泛应用到医学领域,获得1次诺贝尔生理学或医学奖。很多多次获得诺贝尔奖的成像类型(如CT、光学成像、核素成像、电镜等)都遵循这一特征(图1)。光学成像、核磁共振和CT领域都获得了3次及以上的物理学奖。诺贝尔奖是对生物医学影像相关研究工作科学价值的肯定,从某种程度上反映了生物医学影像对物理学、化学、医学等基础学科的贡献。

生物医学影像支撑国家多个重要战略。基础研究是建设科技强国的基石。生物医学影像对于物理、化学、生命科学和医学基础研究的推动作用从诺贝尔奖的授予情况可见一斑。引导和加强生物医学成像的原理创新和技术源头创新,是摆脱“卡脖子”现状的可行方案。在大力发展生物医学影像的过程中,凝聚和培养从事前沿交叉研究的青年人才和下一代科技工作者,也是为人才强国战略做出应有的贡献。

生物医学影像是健康中国战略的重要支撑力量。重大疾病的早诊早治有赖于生物医学成像技术的发展。发展前沿生物医学成像技术,有利于提高具有自主知识产权的医学诊疗设备和医用材料的国际竞争力、推动以生物医学影像为重要支柱的高性能医疗器械的国产化、发展专业的医疗影像中心,从推动健康科技



**图 1** 主要的生物医学影像相关工作多次获得诺贝尔奖。本图展示了1901年以来32项获得诺贝尔奖的工作。纵轴是获奖时间, 横轴按物理学奖、化学奖、生理学或医学奖分开显示。每一种成像类型用特定的色块标记, 并按获奖时间顺序用特定标记的线段连接(见图例)。从中可以看出, CT、光学成像、谱学、核素成像、电镜、核磁共振等类型多次获得诺贝尔奖, 且基本遵循先在物理学领域取得突破, 再逐渐应用到化学和医学领域的发展规律。光学成像、核磁共振和CT都获得了3次及以上的物理学奖

**Figure 1** Biomedical imaging related research won the Nobel Prizes for many times. This figure illustrates 32 prizes since 1901. The Y-axis indicates the year of the prizes, and the X-axis is separated by the prize in Physics, Chemistry and Physiology or Medicine. A certain category of imaging is identified by different color shapes, which are connected by different types of lines (as indicated in the legend) in chronological order of being awarded. Some categories have won several Nobel Prizes, such as CT, optical imaging, spectroscopy, electron microscopy, and nuclear magnetic resonance (NMR). They basically originated from breakthroughs in physics, and developed gradually to the fields of chemistry and medicine. Among those, optical imaging, NMR, and CT have won the Prizes in Physics at least 3 times

创新、促进医药产业发展、发展健康服务新业态等方面推动“健康中国2030”建设。

生物医学影像是智能制造战略和国家大数据战略的重要组成部分。医疗影像设备近年来一直是国内大力促进创新发展的重点领域。随着信息化时代的到来和人工智能的崛起, 生物医学影像正加速数字化、远程化和智能化, 推动未来的数字医疗、远程医疗和智慧医疗的实现。

生物医学影像是国家安全和社会稳定的重要保障。自主研发和制造的小型化、移动式的生物医学影像装备和仪器在国家战时状态的作用不言而喻。2020年初新冠疫情暴发, 正是依靠我国大学科研机构与医疗影像企业前期研发和后期迅速生产, 在武汉多家医院安装了足够多的CT机和超声监测仪, 以及最新的人体肺部气体MRI, 保障了抗疫需求。在民用领域, 小到

指夹式血氧仪, 大到机场安检系统, 都是生物医学影像在为人民群众的生命安全保驾护航。

## 1.2 发展规律与发展趋势

生物医学影像学科是一个大家庭, 拥有很多分支, 各自向前发展。在发展过程中, 分支与分支之间也相互交叉, 相互包含, 难以分清界限。

按照研究对象可大致分为生物成像和医学成像两类。按照成像对象的所处位置, 可分为离体、活体/在体、原位成像等。按成像分辨率可区分为多个层次: 基因水平、分子水平、细胞水平、组织水平、器官水平等。按成像范围可分为局域成像、器官成像、系统成像、整体成像。按照受损程度, 分为有创、微创和无创几种。按照成像所表达的信息类型, 可命名为结构成像/解剖学成像、生理成像、代谢成像、功能成像

等. 生物成像又可细分为细胞成像、组织成像和小动物成像: 细胞和小动物成像以活体为优选, 组织成像有原位、活体和离体之分, 离体组织可以应生物需求作冰冻或包埋等固定处理.

从成像在疾病研究和临床应用的角度来看, 又有脑成像、肿瘤成像、心血管成像、肺部成像、胰腺成像、胆管成像等多种针对器官和生理系统的成像分支.

从构成生物医学影像完整技术体系的三个环节来看, 分为成像仪器、成像标记物和图像信息的分析、处理与呈现. 这三个环节分别立足于物理学/工程科学、化学/材料科学/生物学和数学/信息科学, 体现了生物医学影像的学科交叉特性. 如果要打通生物医学影像的全链条技术体系, 要么需要自己掌握多个学科的专业知识, 要么需要团结不同学科领域的专家协同创新.

根据不同的成像原理, 成像技术可划分为: X射线成像、核素成像、光学成像、质谱成像、超声成像、生物电/磁成像、磁共振成像、电子显微成像等. X射线成像以CT为代表. 核素成像以正电子发射计算机断层成像(positron emission tomography, PET)和单光子发射计算机断层成像(single photon emission computed tomography, SPECT)为代表. 生物电/磁成像以脑电图和脑磁图为代表. 这些技术都是向着提高时空分辨率、灵敏度、信噪比、对比度和降低成像时间的趋势发展. 然而, 单个成像技术不可能包打天下, 也不可能所有指标上都获得满意结果, 总有1~2个指标是弱项. 除了根据成像对象和应用场景选择擅长的成像技术之外, 以取长补短为目的的多模态成像在15年前兴起, 现在仍然是研究热点. 多模态成像对于模态的选择通常在结构成像和功能成像的分类中各取1~2种成像技术相结合, 取各家之所长, 以达到同时获取高时空分辨率、灵敏度、信噪比和对比度的目的. 最早发展的有PET/CT成像、荧光/CT成像等, 现在各种模态都在探索多模态融合或联用, PET/CT, SPECT/CT, PET/SPECT/CT, PET/MRI等多模态的整机都已实现商品化, 既有助于人体全身的, 也有针对某个器官的, 还有用于小动物的, 显著扩大了生物医学成像的应用范围. 结合光学的高分辨率和超声的深穿透力的优势而发展起来的光声成像势头迅猛. 在国际光学工程学会(The International Society for Optics and Photonics, SPIE)每

年2万多人参加的西部光子学会议(Photonics West)中, 光声层析成像年会在短短十年间成长为规模最大的分会, 并持续领先长达十年时间<sup>[4]</sup>. 此外, 人工智能的引入, 在提高信噪比、去除背景噪声、缩短成像时间等方面发挥了优势, 成为成像技术发展的另一个趋势.

为实现特异性成像, 通常需要借助标记技术. 不同的成像技术搭配不同的标记物, 名称各异, 如探针、对比剂、显影剂、核素、放射性药物、纳米颗粒、超声微泡等. 标记物将成像技术带入分子水平, 发展趋势是提高特异性和对比度、降低毒性、提高功能性. 随着多模态成像技术的兴起, 需要相应地开发适合多模态成像的探针. 用于临床的标记物尤其需要降低毒性和体内存留时间. 降低毒性到了一个极端, 就是近年兴起的无标记成像. 无标记成像的最大特点是利用生物体自身的本征特性(或称内源信号)来进行成像, 例如光与生物组织相互作用时, 自发荧光、组织结构和血流血氧变化等对光的散射、偏振以及不同波长的光强度都会产生影响, 并可以与生物体的生理病理状态关联起来, 结构和功能的变化就产生了不同的成像对比度. 提高功能性的一个典型是诊疗一体化(theranostics), 这个词从十年前开始兴起, 近年来每年发表的论文近千篇. 诊疗一体化利用纳米颗粒, 既能与MRI、PET/SPECT、光学成像等一种或多种成像仪器相配合, 靶向到疾病部位并显影, 又能通过输送药物、热疗、化疗、放疗、光动力治疗等手段同时发挥治疗作用<sup>[5]</sup>, 多应用于肿瘤领域, 最近几年拓展到神经疾病领域.

图像信息的分析、处理与呈现(简称图像处理)是生物医学影像的另一个重要环节, 是实现量化分析的保证, 要依靠数学和信息科学特别是计算机科学的支撑. 图像处理的发展从早期的二维图像处理发展到图像的三维重建与可视化, 随着层析成像技术的发展, 三维图像处理发展迅速. 三维活体成像和时间维度的引入, 使如何处理和呈现四维图像(视频)成为新的挑战. 伴随着成像分辨率的提高和成像视野的扩大, 图像处理面临海量数据的传输、存储和处理的难题以及快速处理和实时呈现的需求. 大范围甚至全尺寸(full-scale)的跨层次成像还会带来不同分辨率图像的配准问题. 多模态成像带来多模态融合的需求, 催生了一个新生领域——影像组学(radiomics). 人工智能的引入为海量图像的特征提取带来便利, 基于海量医学影

像数据的机器学习正在为减轻医生的读片工作量做出贡献, 同时也在加速生物医学影像数字化和远程化的发展进程. 未来, 与虚拟现实(virtual reality, VR)、增强现实(augment reality, AR)和混合现实(mix reality, MR)技术的结合将推动可视化结果与研究人员、临床医生、师生的交互, 在疾病诊断、手术导航、介入治疗、教学和科普中有广泛的应用前景.

生物医学影像还有一类是介入影像, 它源自20世纪70年代中期的介入放射学. 超声或CT引导下的各种微创诊疗技术近年来发展迅速. 影像引导可以精准定位病变区域, 成为非手术条件下获取组织病理诊断并进行基因检测或化疗药物筛选的主要手段. 多模态影像引导手术导航技术的应用, 在三维空间精准引导各种消融等微创介入手术中发挥着重要作用. 未来随着5G技术的普及, 介入影像和手术导航都将加速实现远程化.

从成像的尺度来看, 生物医学影像的发展是从宏观(厘米-毫米级, 组织水平)发展到介观(毫米-微米级, 细胞水平)、微观(微米-纳米级, 分子原子水平). 然而, 受限于成像原理, 分辨率的提高带来成像视野的减小. 发展趋势是兼顾大视野和高时空分辨率, 即全尺寸、跨层次成像, 强调多层次信息的系统性整合, 同时追求快速. 随着系统生物学和整合医学概念的提出, 全器官高分辨成像成为未来发展趋势, 典型的标志是世界各国脑计划均以模式动物的全脑高分辨三维图谱获取为重点.

综上所述, 生物医学影像虽然是一个新兴交叉学科, 但相关研究领域有的已经发展了百年时间, 形成了多个分支百花齐放的局面. 未来除了上述提到的分支各自的发展方向外, 总体将向数字化、标准化、智能化的方向发展. 生物医学影像的仪器设备正在向小型化、移动式、便携式、普及化的方向发展, 以适应远程医疗、家庭医疗的需求. 随着组学技术的发展, 生物医学影像也开始与组学技术相融合, 往个性化、预测性方向发展, 支持精准医学目标的早日实现.

## 2 我国生物医学影像的发展现状

### 2.1 我国对生物医学影像研究的重视与投入情况

我国科学界较早就开始重视生物医学影像学科发展. 自1995年起, 香山科学会议召集过25次会议围绕生

物医学影像相关主题进行研讨(表1). 另有十余次生物医学领域主题的香山科学会议涉及到生物医学影像议题. 1999年起, 华中科技大学率先主办生物医学光子学与成像技术国际学术研讨会(The International Conference on Photonics and Imaging in Biology and Medicine, PIBM), 该研讨会是我国主办的生物医学光学成像领域规模最大的系列国际会议. 随着生物医学影像领域专业队伍的壮大, 目前中国科学技术协会中有29个学会/协会成立了65个与生物医学影像相关的分会/专委会(表2).

在国家科技计划的部署方面, 国家重点基础研究发展计划(“973计划”)从“十五”计划后三年设立综合交叉与重要科学前沿领域, 并在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》中提出重点部署蛋白质研究、量子调控研究、纳米研究、发育与生殖研究4个重大科学研究计划. 在“973计划”综合交叉领域, 平均每年对2项生物医学影像方向的项目立项, 一直延续到“973计划”结束.

“十三五”计划开始, 新规划的国家重点研发计划陆续启动了多个重点专项, 支持或部分支持生物医学影像领域的研究, 其中包括2016年启动的“数字诊疗装备研发”专项、“重大科学仪器设备开发”专项、“精准医学研究”专项、“蛋白质机器与生命过程调控”专项和“纳米科技”专项, 以及2017年启动的“变革性技术关键科学问题”专项.

“变革性技术关键科学问题”重点专项部分承袭了原“973计划”的综合交叉与重要科学前沿领域, 曾面向生物医学的精准介观测量列为首批重点支持方向之一.

“数字诊疗装备研发”重点专项围绕医疗器械产业中的高端数字诊疗装备的重大共性关键技术, 以“数字化、网络化、智能化”为主线, 以早期诊断、精确诊断、微创治疗、精准治疗为方向, 以多模态分子成像、新型磁共振成像系统、新型计算机断层成像、低剂量X射线成像、新一代超声成像、复合内窥镜、新型显微成像等十个重大战略性产品为重点, 按照全链条部署、一体化实施的原则, 设置了前沿和共性技术创新、重大装备研发、应用解决方案研究、应用示范和评价研究4项任务, 实施三年来国拨经费数超过22亿元. 其中, 影像项目立项数占比超过80%, 经费占比近70%.

表1 香山科学会议多次组织生物医学影像相关主题研讨

Table 1 Biomedical imaging related themes were discussed in Xiangshan Science Conferences for many times

编号	会议日期	会次	会议主题	地点	执行主席
1	1995年12月15~17日	49	PET与21世纪生命科学	北京	周前、周如玲、王世真
2	1996年5月14~17日	55	核磁共振与应有的现状与未来	北京	唐孝威、叶朝辉
3	2000年11月14~16日	152	生物医学光子学与医学成像若干前沿问题	北京	韦钰、骆清铭、刘颂豪、刘泓
4	2001年9月3~4日	168	人类脑计划和神经信息学	北京	唐孝威、吴建屏、田嘉禾
5	2001年11月5~6日	174	中国数字化虚拟人体的科技问题	北京	钟世镇、李华、罗述谦
6	2002年10月30~11月1日	194	分子影像学	杭州	唐孝威、陈宜张、胡汛
7	2003年9月9~10日	208	中国数字化虚拟人体研究的发展与应用	北京	钟世镇、牛憨笨、罗述谦、李华
8	2003年11月5~7日	217	生物分子光子学	武汉	骆清铭、庞代文
9	2004年3月16~18日	221	医学物理发展	北京	唐孝威、包尚联、胡逸民
10	2004年5月11~13日	224	生命科学中的单个分子与细胞内实施检测问题	北京	陈宜张、林其谁
11	2008年12月18~20日	338	分子影像关键科学技术及其应用	北京	田捷、唐孝威、王威琪、白净、包尚联
12	2009年7月8~10日	355	生物体系中的单分子成像、光谱及操纵	北京	方晓红、谢晓亮、赵新生、庄小威
13	2010年5月13~14日	373	生命系统的电磁特性及电磁对生命的作用	北京	俞梦孙、都有为、董秀珍、商澎
14	2011年4月13~14日	393	脑网络研究及其临床应用的前沿科学问题	北京	蒋田仔、郭爱克、骆清铭
15	2012年11月27~28日	446	我国近红外光谱分析关键技术问题、应用与发展战略	北京	陆婉珍、袁洪福、闫成德、刘文清
16	2013年10月21~23日	472	放射医学及相关学科: 现状与对策	苏州	柴之芳、苏旭、赵宇亮
17	2014年4月8~9日	488	太赫兹波在生物医学应用中的科学问题与前沿技术	北京	姚建铨、杜祥瑞、孔祥复、王正国、刘仓理
18	2014年5月18~19日	496	混合医学成像: 理论、技术及应用	杭州	唐孝威、郭爱克、田捷、刘华锋
19	2015年5月15~17日	528	精准医学与医疗器械产学研用	上海	戴建平、叶朝辉、张玉奎、田捷、薛敏
20	2016年3月2~3日	554	医学分子探针关键技术	北京	樊代明、张玉奎、陈思平、赵宇亮、戴志飞
21	2017年11月21~22日	614	生物医学影像发展战略	北京	叶朝辉、周欣、戴建平、赵继宗、骆清铭
22	2018年5月2~3日	S40	“全脑介观神经联接图谱”国际合作计划	北京	蒲慕明、骆清铭、徐波
23	2018年5月3~4日	624	顺磁共振的科学研究与医学应用	北京	沈剑刚、杜江峰、张志愿、Harold M. Swartz、刘克建、刘扬
24	2018年8月21~22日	629	放射性药物化学发展战略	北京	柴之芳、赵宇亮、彭述明、张宏
25	2018年10月30~31日	640	新型精神疾病诊疗智能化方法及关键技术	北京	陈俊龙、顾瑛、郭雷、胡斌、陆林

“重大科学仪器设备开发”重点专项在继承和发展“十二五”期间国家重大科学仪器设备开发专项成果的基础上,以关键核心技术和部件的自主研发为突破口,聚焦高端通用科学仪器设备和专业重大科学仪器设备的仪器开发、应用开发、工程化开发和产业化开发,构建“仪器原理验证→关键技术研发(软硬件)→系统集成→应用示范→产业化”的国家科学仪器开发链条,共设置了关键核心部件、高端通用科学仪器和专业重

大科学仪器3类任务,下设10个重点方向,布局了源部件、探测器与传感器、分析分离与控制部件等科学仪器核心部件的关键技术,以及基于射线类的显微成像仪、高分辨荧光显微成像仪、小型高灵敏度低能射线纳米尺度三维成像仪器、高分辨共轭激光显微断层成像仪等分析仪器。

“精准医学研究”重点专项部署了新一代临床用生命组学技术研发,大规模人群队列研究,精准医学大数

表 2 中国科学技术协会批准成立的与生物医学影像相关的分会/专委会列表

Table 2 Sub-committees and the associated societies approved by and China Association for Science and Technology

大类	一级学会	二级专委会/分会	大类	一级学会	二级专委会/分会
理科	中国光学学会	生物医学光子学专委会	中华医学会	放射学分会	
		激光医学专业委员会		超声医学分会	
	中国生物物理学会	光生物物理专业委员会		消化内镜学分会	
		分子医学影像专业委员会		激光医学分会	
		生物磁共振专业委员会		影像技术分会	
		单分子生物学分会		数字医学分会	
		冷冻电子显微学分会		断层影像解剖学分会	
	中国感光学会	生物与医学成像专业委员会		中国解剖学会	肿瘤影像专业委员会
	中国物理学会	电子显微镜分会			肿瘤内镜学专业委员会
		质谱分会			肿瘤核医学专业委员会
		波谱专业委员会	内镜与机器人外科分会		
	中国声学学会	生物医学超声工程分会	中国女医师协会		医学影像专家委员会
	中国晶体学会	电子显微学专业委员会	中国卒中学会	医学影像学分会	
	中国化学会	色谱专业委员会	医科	医学物理分会	
		质谱分析专业委员会		医学超声工程分会	
中国动物学会		细胞与分子显微技术学分会		生物电磁分会	
		心理学脑成像专业委员会		医学图像信息与控制分会	
中国心理学会		脑电相关技术专业委员会		中国生物医学工程学会	数字医疗与医疗信息化分会
	神经影像学分会	医学神经工程分会			
中国神经科学学会	神经精神影像专业委员会	精确放疗技术分会			
中国认知科学学会	神经精神影像专业委员会	生物医学光子学分会			
工科	中国计量测试学会	光辐射计量专业委员会		医学人工智能分会	
		生物计量专业委员会		消化内镜分子影像学专业委员会	
		医学计量测试分会		放射学专业委员会	
	中国电子学会	生物医学电子学分会		机器人与腹腔镜外科专业委员会	
		生命电子学分会		肿瘤影像诊断学专业委员会	
	中国体视学学会	生物医学分会		中国研究型医院学会	肿瘤放射生物与多模态诊疗专业委员会
		图像分析分会		心血管影像专业委员会	
	中国生物工程学会	生命科学仪器专业委员会	医学影像与人工智能专业委员会		
	中国图像图形学会	医学影像专委会	肿瘤介入专业委员会		
	中国仪器仪表学会	医疗仪器分会	中国中西医结合学会	医学影像专业委员会	
	中国图学学会	医学图像与设备专委会	中国针灸学会	医学影像专业委员会	
		医疗仿真专业委员会	中国医学救援协会	影像分会	

据的资源整合、存储、利用与共享平台建设, 疾病防治方案的精准化研究, 精准医学集成应用示范体系建设等5个主要任务, 其中包括基于医学分子影像技术的疾病精准诊疗方案研究。

“蛋白质机器与生命过程调控”重点专项在重大基础科学问题研究、重大技术方法研究和重大应用基础研究3个层次进行部署。其中, 重大技术方法研究布局了高分辨率冷冻电镜在结构生物学中应用、磁共振技

术在结构生物学中的应用、依托同步辐射光源的结构生物学新技术和新方法、新一代蛋白质组学分析技术研究、依托大科学装置的新技术和新方法研究等与生物医学影像技术相关的领域。

“纳米科技”专项将纳米生物医药列为7个研究任务之一,布局了恶性肿瘤等重大疾病的纳米检测及体外诊断新方法、心脑血管疾病即时诊断、有效干预的纳米技术、重大疾病的纳米治疗新技术、新型纳米药物研发等与纳米探针和纳米影像相关的研究内容。

国家自然科学基金委员会在“十二五”发展规划中首次将影像技术列入“脑与认知科学”,将超声医学、核医学、放射诊断学、介入医学、生物医学工程、纳米医学、分子影像学等明确列入“医学”学科发展规划;化学科学部将“化学探针与分子探针”列为优先发展领域。国家自然科学基金委员会“十三五”规划提出重视医学与医学物理学、化学医学、定量医学、医学材料学、医学集成成像学等学科的前沿交叉;化学科学部将“化学精准测量与分子成像”列为优先发展领域;信息科学部将“超高分辨、高灵敏光学检测方法与技术”列为优先发展领域;医学科学部将“多尺度多模态影像技术与疾病动物模型研究”和“智能化医学工程的创新诊疗技术研究”列为优先发展领域;而“工业、医学成像与图像处理的基础理论与新方法、新技术”被列为跨科学部优先发展领域。

科学基金对生物医学影像资助最大的一块在医学科学部五处的“影像医学和生物医学工程”(代码H18)。此外,在其他学部还有一些零散分布。例如,生命科学部交叉融合科学处的“生物材料、成像与组织工程学”下的“生物成像与生物电子学”(代码C1004)、“纳米生物学”(代码C1006)和“生物与医学工程新技术新方法”(代码C1007)、“分子生物学与生物技术”下的“生物分子检测技术”(代码C2104)和“生物影像与技术”(代码C2109);化学科学部四处的“化学测量学”下的“谱学方法与理论”(代码B0403)、“化学与生物传感”(代码B0404)、“化学成像”(代码B0405)、“仪器创制”(代码B0407)、“化学生物学”下的“分子探针”(代码B0701);信息科学部的一些二级代码,如“图像信息处理”(F0116)、“生物、医学光学与光子学”(F0511);数理科学部的二级代码“原子和分子物理”(A0403)、“光学”(A0404)、“声学”(A0405)等。

科学基金从1998年开始设立科学仪器基础研究专

款项目,支持创新仪器的研制。自2011年起,设立国家重大科研仪器设备研制专项,支持原创性重大科研仪器设备研制,分为自由申请(直接经费1000万以下)和部门推荐(直接经费1000万以上)两大类型。其中,自由申请类每年支持很多生物医学影像领域的项目,以医学科学部五处为例,约80%的自由申请类仪器项目都集中在生物医学影像方向。作为申请门槛最高的部门推荐类项目,十年间共支持了11项生物医学影像领域的仪器研制工作,占总立项数的1/5,经费总和超过7亿元。在这11个项目中,医学科学部占6项,生命科学部占2项,化学、数理和信息科学部各占1项(表3)。有9个项目在“十二五”期间就已启动,且令人欣慰的是,已有8项顺利按期通过结题验收。

科学基金在重大研究计划部署方面,尽管我国的科学家从2012年开始多次通过“双清论坛”等平台充分研讨,呼吁了很多年,但直到2018年,医学科学部提出的“肿瘤演进与诊疗的分子功能可视化研究”才获批立项,算是真正围绕生物医学影像主题的第一个重大研究计划,由肿瘤学学科(七处)主导。在此之前,有多个重大研究计划涉及到支持生物医学影像的一些技术手段,如2002年生命科学部立项的“生命科学中的单分子行为研究”,2007年由化学科学部联合生命、数理、信息科学部共同组织的“基于化学小分子探针的信号转导过程研究”,2011、2013、2014、2016年分别由医学科学部立项的“情感和记忆的神经环路基础”“血管稳态与重构的调控机制”“组织器官区域免疫特性与疾病”以及“器官衰老与器官退行性变化的机制”等。医学科学部的这些立项说明在这些以攻克重大疾病为目的的研究计划中充分认识到了生物医学影像手段的重要性。

科学基金在重大项目的部署方面,对生物医学影像的支持起步稍早。2009年,生命科学部发布“肿瘤分子成像基础研究”的指南,但是没有立项。2010年又由医学科学部重新发布指南,最终立项,支持1000万元用于“胃癌恶性生物学行为的分子影像基础研究”,于2011年(“十二五”)开始执行。此后,共有9个重大项目支持生物医学影像相关的研究(表3),投入经费超过1.6亿。其中,6个项目从“十三五”开始执行。

在人才培养方面,科学基金自2001年以来支持了10个以生物医学影像为主要研究领域的创新研究群体,其中化学科学部支持了4个,生命科学部支持了3

**表 3** 国家自然科学基金资助的生物医学影像领域的国家重大科研仪器设备研制专项(部门推荐类)项目和重大项目列表<sup>a)</sup>

**Table 3** Projects and programs of Special Fund for Research on National Major Research Instruments (by Recommendation) and Major Program supported by National Natural Science Foundation of China<sup>a)</sup>

立项年度	项目名称	学科	所属科学部	经费(万元)	负责人	依托单位
国家重大科研仪器设备研制专项(部门推荐类)						
2011	光电融合超分辨生物显微成像系统	生命科学基础研究相关的试剂开发与新仪器研制	生命科学部	3000	徐涛	中国科学院生物物理研究所
2011	球形聚焦集声系统的研究	影像医学与生物医学工程	医学科学部	6000	王智彪	重庆医科大学
2012	多波段脉冲单自旋磁共振谱仪研制	物理学	数理科学部	5600	杜江峰	中国科学技术大学
2012	小动物光学多模融合分子影像成像设备	影像医学与生物医学工程	医学科学部	8500	田捷	中国科学院自动化研究所
2012	用于人体肺部重大疾病研究的磁共振成像仪器系统研制	磁共振成像技术与造影剂	医学科学部	4400	周欣	中国科学院武汉物理与数学研究所
2013	单细胞时空分辨分子动态分析系统	仪器创制	化学科学部	6400	陈洪渊	南京大学
2013	超高时空分辨微型化双光子在体显微成像系统	酶学	生命科学部	7200	程和平	北京大学
2013	多维多尺度高分辨率计算摄像仪器	电子学与信息系统	信息科学部	8000	戴琼海	清华大学
2015	基于超声辐射力的深部脑刺激与神经调控仪器研制	医学超声与声学造影剂	医学科学部	7366.5	郑海荣	中国科学院深圳先进技术研究院
2016	多核素同步一体化肿瘤分子成像仪器研制	分子影像与分子探针	医学科学部	7133.77	申宝忠	哈尔滨医科大学
2018	基于形态与组学空间信息的细胞分型全脑测绘系统	医学图像数据处理与分析	医学科学部	7232.47	骆清铭	华中科技大学
重大项目						
2010	胃癌恶性生物学行为的分子影像基础研究	分子影像与分子探针	医学科学部	1000	吴开春	解放军第四军医大学
2011	核酸适配体的分析化学基础研究	可再生与可持续能源化学	化学科学部	1500	王柯敏	湖南大学
2011	微环境诱导细胞极性转换与迁移的新机制及新技术研究	细胞运动	生命科学部	1500	段树民	浙江大学
2013	单细胞多组分时空分析	化学测量学	化学科学部	2000	张新荣	清华大学
2017	帕金森综合症的神经分析化学基础研究	化学测量学	化学科学部	1677.4	毛兰群	中国科学院化学研究所
2017	局域场下的高分辨分子成像及化学精准测量	化学理论与机制	化学科学部	1685.5	罗毅	中国科学技术大学
2017	异常脑功能活动位点与连接的多模态影像学研究	影像医学与生物医学工程	医学科学部	1485.8	高家红	北京大学
2018	肿瘤标志物的精准测量及其分子机制	化学与生物传感	化学科学部	2000	张学记	北京科技大学
2018	脑空间信息中脑连接的高分辨光学成像与可视化研究	生物组织光谱技术及成像	信息科学部	1981.33	李鹏程	华中科技大学
2019	细胞中生物大分子结构与相互作用的谱学测量	化学测量学	化学科学部	1998	刘买利	中国科学院武汉物理与数学研究所

a) 2015年(含)以后为直接经费

个, 医学科学部支持了2个, 信息科学部支持了1个. 有6个群体获得了“三进六”的滚动支持, 2个群体获得了“六进九”的滚动支持(表4). 总体来看, 在2001~2019年19年间支持了18项创新群体项目, 其中“十五”1项, “十一五”5项, “十二五”8项, “十三五”4项.

在重大科技基础设施方面, 科学家从“十二五”开始呼吁建立生物医学影像的基础设施. 2013年2月, 国务院印发的《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012~2030年)》将“适时启动大型成像和精密高效分析研究设施建设, 满足生物学实时、原位研究和多维检测、分析、合成技术开发的需求”写入生命科学领域的总体部署. 2016年12月, 九部委联合发布《国家重大科技基础设施建设“十三五”规划》, 按照“成熟一项、启动一项”的原则, 优先布局10个建设项目. “多模态跨尺度生物医学成像设施”作为生命科学领域唯一的项目, 位列第八. 最终, 在北京市、教育部、中国科学院的共同努力下, 国家发展和改革委员会于2018年4月正式批准北京大学牵头在北京怀柔科学城建设多模态跨尺度生物医学成像国家重大科技基础设施, 项目总投资超17亿元, 建筑面积7.2万平方米, 建设周期5年. 2020年3月, 湖北省发展和改革委员会批准依托华中科技大学建设生物医学成像设施, 建筑面积3万平方米, 估算总投资11.3亿元.

中国科学院从“八五”期间开始设立仪器设备升级改造和自主研发专项经费. 从2010年至今共支持生物医学影像方面的院级科研仪器设备研制项目共计70余项, 支持经费超过1.9亿元. “十三五”以来, 中国科学院成立仪器研制专家委员会, 进一步加强“自上而下”组织部署, 持续推进关键核心技术攻关, 至今共支持生物医学影像方向的院级重大科研仪器设备研制和关键技术研发团队项目共计10余项, 支持经费超过1.3亿元. 院级仪器研制专家委员会多轮研讨, 中国科学院仪器研制工作需要重点发展核磁共振技术、光谱与成像技术、电子显微技术、光学成像技术等共性关键技术, 以及各学科领域关键核心技术, 例如生命医学领域相关的超分辨太赫兹高光谱显微成像技术、光学分子影像手术导航技术、多模态生物医学成像技术等.

地方政府也开始重视生物医学影像的投入. 2016年10月, 苏州市政府、苏州工业园区管理委员会和江苏省产业技术研究院共同出资4.5亿元创建华中科技大学苏州脑空间信息研究院, 从而形成了以显微光学

切片断层成像(micro-optical sectioning tomography, MOST)系列技术为核心, 涵盖全脑样本标记和处理、全脑光学成像、海量脑图像处理和分析等多学科交叉的全脑介观神经联接图谱及可视化完备技术体系, 为获得具有明确时空尺度和位置信息的神经元类型、神经环路和网络、血管网络等三维精细脑结构与功能大数据库, 提取跨层次、多尺度的脑连接时空特征等提供了具有国际领先水平的研究设施. *Nature's News*有专题报道并称之为“脑成像工厂”<sup>[6]</sup>.

综上所述, 我国中央和地方各级财政对生物医学影像的基础研究和应用基础研究的投入从“十五”起步, 到“十二五”“十三五”期间显著提升. 这些研究无论在发展和改革委员会、科学技术部还是国家自然科学基金委的科技计划部署中都已占据一席之地.

## 2.2 我国生物医学影像研究的产出情况

生物医学影像学科的范围太广, 学科交叉性强, 涉及到的技术关键词过多, 在Web of Science和Scopus数据库中都没有明确的学科归属, 很难全面准确地界定和度量相关的论文及专利的产出. 但是, 可以从科技论文总发文量方面与国际上其他国家进行横向对比. 以X射线成像、核素成像、磁共振成像、超声成像、电镜、光学成像、质谱成像、生物电磁成像等技术的相关关键词在2019年2月进行文献检索统计, 我国的发文量(14万篇)排名第二, 约等于排名第一的美国发文量(42万篇)的1/3, 领先排名第3~5的德国(12万篇)、日本(11万篇)、英国(9万篇)的优势不算明显. 在发文量前20名机构榜单中, 美国加州大学以9.7万篇雄踞榜首, 中国科学院作为唯一在榜的中国科研机构以2万篇位列第七. 我国其他排名靠前的机构包括上海交通大学、华中科技大学、中山大学等.

专利方面, 2019年2月对X射线成像、核素成像、磁共振成像、超声成像、电镜、光学成像、质谱成像、生物电磁成像八大成像技术进行了Incopat专利数据库检索. 整体而言, 全球专利申请自2005年进入高速发展阶段, 而我国的专利申请是从2010年进入迸发期, 落后5年. 美国、中国和日本拥有显著的专利申请量优势, 三个国家在各个成像技术领域的专利申请总量超过全球申请总量的60%. 其中, 我国在核素成像和质谱成像领域的专利申请量排名第一, 在光学成像、磁共振成像、超声成像和电镜领域的专利申请量排名第

表 4 国家自然科学基金资助的生物医学影像领域的创新研究群体列表

Table 4 Science Fund for Creative Research Groups in biomedical imaging field supported by National Natural Science Foundation of China

立项年度	群体项目名称	学科	所属科学部	负责人	依托单位
2001	重要细胞活动和生物分子识别的结构生物学基础	生物分子结构测定与功能	生命科学部	施蕴渝	中国科学技术大学
2006/2009	视觉信息的表达及视觉系统的脑功能区成像	分子神经生物学	生命科学部	陈霖	中国科学院生物物理研究所
2006/2009	新型生物医学探针技术基础及应用	材料化学与能源化学	化学科学部	庞代文	武汉大学
2009/2012	生物核磁共振波谱学	磁共振波谱	化学科学部	刘买利	中国科学院武汉物理与数学研究所
2011/2014/2017	生物医学光子学	生物医学光学与光子学	信息科学部	骆清铭	华中科技大学
2012/2015	化学生物传感的分析化学基础研究	化学与生物传感	化学科学部	谭蔚泓	湖南大学
2012/2015/2018	细胞钙信号研究	物质跨膜转运/生物系统的模拟与建模	生命科学部	程和平	北京大学
2014	分子医学影像	分子影像与分子探针	医学科学部	任秋实	北京大学
2016	医学影像学	影像医学与生物医学工程	医学科学部	龚启勇	四川大学
2019	生命波谱与成像	化学生物学	化学科学部	周欣	中国科学院武汉物理与数学研究所

二. 对专利申请人的调研发现, 生物医学影像技术的全球申请人主要集中在飞利浦、西门子、通用电气、东芝、日立等外企手中. 中国国内专利的申请人也以飞利浦、通用电气、西门子、东芝等外企为首, 国内申请人集中在高校、科研院所及少数企业中, 且主要集中在北京、上海、江苏、广东等经济技术发达地区.

据不完全统计, 自2000年以来, 先后有72项生物医学影像相关成果荣获国家三大科技奖. 自2011年以来, 显微光学切片层析成像获取小鼠全脑高分辨率图谱、基于等离激元增强拉曼散射实现单分子化学成像、利用原子力显微镜直接观测到分子间氢键、实现对单个蛋白质分子的磁共振探测、研制出可实现自由状态脑成像的微型显微成像系统、创建出可探测细胞内结构相互作用的纳米和毫秒尺度成像技术、研制出用于肿瘤治疗的智能型DNA纳米机器人等7项成果先后入选“中国科学十大进展”. 而在入选“中国十大科技进展新闻”的成果中, 除了一项是“自主研发的全数字PET/CT装备获准进入市场”(2019), 一项是发展图像处理技术的“领衔绘制全新人类脑图谱”(2016), 其余6项入选成果都是利用各种显微成像技术成功解析了生物分子的三维结构: “首次获得人源葡萄糖转运蛋白结构”(2014), “首次揭示阿尔茨海默病致病蛋白三维结

构”(2014), “剪接体高分辨率三维结构获解析”(2015), “攻克细胞信号传导重大科学难题”(2015), “率先破解光合作用超分子结构之谜”(2016)和“首次揭示水合离子微观结构”(2018).

### 2.3 我国生物医学影像研究的优势领域

部分成像技术国际领先. 在历年来科学技术部和自然科学基金仪器专项的资助下, 我国在影像技术和设备研发方面的一些工作已经达到国际领先水平. 例如, 华中科技大学骆清铭团队研制的显微光学切片断层成像系统能够稳定、规模化地测绘出单神经元分辨的小鼠全脑神经连接图谱<sup>[7]</sup>, 已成为国际上全脑介观神经联接图谱研究的首选. 北京大学程和平团队<sup>[8]</sup>发明的高分辨率微型化双光子显微镜技术, 实现了在自由行为动物上对单个神经突触的高分辨率成像. 中国科学院自动化研究所蒋田仔团队<sup>[9]</sup>研发的光电同步脑活动检测仪(near infrared spectroscopy & electroencephalography, NEG), 实现了脑电生理信号与脑血氧代谢信号的多脑区同步采集, 并应用于临床、科研和安全等领域. 中国科学院武汉物理与数学研究所的周欣团队<sup>[10]</sup>研发的我国首套超极化氙气人体肺部MRI仪器, 也是目前全球首套气体MRI信号增强大于57000的

仪器, 并获得我国首例肺部病人的气体磁共振影像, 对我国开展肺部重大疾病的诊断意义重大, 已应用至武汉金银潭医院和同济医院的新冠肺炎抗疫中. 华中科技大学谢庆国团队研制了全世界首台全数字小动物PET科学仪器、首台临床全数字PET设备, 开发的全数字PET/CT已完成临床试验, 拿到了我国医疗器械注册证([http://digitalpaper.stdaily.com/http\\_www.kjrb.com/kjrb/html/2019-06/20/content\\_423924.htm](http://digitalpaper.stdaily.com/http_www.kjrb.com/kjrb/html/2019-06/20/content_423924.htm)); 设备已安装在芬兰、意大利的科学研究机构(<http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2017/7/325889.shtm>). 中国科学院生物物理研究所徐涛团队<sup>[11]</sup>开发的超分辨光电融合成像系统, 在世界范围内率先实现了冷冻生物样品的高精度三维光电融合成像, 可广泛应用于高精度蛋白定位和导向原位结构解析. 中国科学院深圳先进技术研究院郑海荣团队<sup>[12]</sup>在超声弹性成像领域实现了基于超声剪切波生物组织弹性参数定量成像, 解决了肝纤维化与乳腺肿瘤定量分级, 形成了临床标准, 技术实现了产业化. 中国科学院自动化研究所田捷团队研制的光学多模融合分子影像成像设备, 实现在分子细胞水平对于肿瘤等重大疾病的活体无创影像学观测; 光学分子影像手术导航技术开展规模化临床应用并实现了产业转化, 系列产品获得CE欧盟统一认证和国家医疗器械注册证(<http://www.digipmc.com/about/>). 解放军总医院梁萍团队<sup>[13]</sup>研发了辅助肿瘤消融的多模态影像(MRI/CT/超声)三维可视化软件, 实现了肿瘤消融的精准路径规划、能量计算和疗效评估, 软件产品与消融设备的一体化对接获得欧盟EC认证并销往欧亚17个国家. 上海联影医疗科技有限公司实现了MRI, CT, PET-CT, PET/MRI等高端医学影像设备关键核心技术与整机系统的国产化, 部分产品和技术实现国际引领(<https://www.united-imaging.com/cn/product/product-index/>).

成像标记物的研发有显著优势. 我国在化学和材料学领域的国际排名一直靠前. 从我国近十年发表在*Cell/Nature/Science*上的研究论文的统计来看, 偏化学的研究探针/显影剂/靶向标记的工作占70%以上. 这说明我国从事成像探针方向研究的科研队伍庞大, 研究成果在国际上得到认可, 但我们也必须看到, 这些工作中的大部分还停留在小动物活体或活细胞的水平, 离临床应用还有一定距离. 北京大学王凡团队研制出特异性肿瘤显像剂<sup>99m</sup>Tc-3PRGD2, 解决了通过SPECT

进行多种肿瘤检测的技术瓶颈问题; 这是我国第一个自主研发的用于肿瘤显像诊断的第1类放射性药物, 目前已进入III期临床试验; 在临床上将<sup>99m</sup>Tc-3PRGD2的整合素受体显像与<sup>18</sup>F-FDG/PET显像进行对比是最大的前瞻性研究<sup>[14]</sup>. 东部战区总医院卢光明团队<sup>[15]</sup>研制出肿瘤血管特异性核素探针<sup>18</sup>F阿尔法肽II, 用于临床试验, 成功对乳腺病灶的良恶性进行区分. 我国具有庞大的人口数量优势, 可以提供充足的各类疾病受试者来源. 如果把这一优势和我们在基础研究中的能力相结合, 引导探针/显影剂/靶向标记的领域往临床研究方向发展, 有望取得事半功倍的效果.

在影像应用方面, 我国科学家取得系列标志性成果. 蒋田仔团队<sup>[16]</sup>基于磁共振影像绘制出全新的人类脑网络组图谱, 与人工智能技术融合, 发现了精神分裂症特异性的稳定生物标记, 从而建立精神分裂症的精准诊断与疗效预测模型. 国防科技大学胡德文团队<sup>[17]</sup>提出随机动态因果建模等脑网络分析计算方法, 有效解决了脑功能影像数据维数高及个体差异大等技术问题, 该方法应用于多家医院的脑疾病诊断分析和长期密闭无社交极限环境下的大脑认知功能评估分析, 工作入选《牛津脑功能成像指南》等4部指南. 四川大学华西医院龚启勇团队建立了磁共振的结构-功能-认知行为解析模式, 提出“脑行为偶联”假说, 发现精神疾患脑局部结构和功能网络的影像学表征, 联合机器学习实现了对精神障碍患者的辅助诊断、症状预测和疗效评估, 被国际同行评价为“精神影像学引领者”<sup>[18]</sup>. 东南大学滕皋军团队研发了系列放射性粒子支架与影像导引计划系统, 完成临床病例10万余例, 显著地提升了中晚期食管癌、胆管癌、气道恶性梗阻、肝癌门静脉癌栓的治疗效果, 被国内外临床指南采用(<http://health.people.com.cn/n1/2018/1126/c14739-30420708.html>). 卢光明团队<sup>[19]</sup>研发了影像指导下的乳腺癌保乳术后辅助光热治疗技术, 该技术可以作为辅助放疗的替代手段“零辐射”抑制乳腺癌术后局部复发, 为分子影像诊疗一体化技术向临床转化提供了新途径.

### 3 我国生物医学影像发展的竞争态势分析

生物医学影像的发展源自科学上的目标, 在技术和工程上得以实现, 继而形成仪器、设备和产业, 得

到广泛应用, 由此产生并提出新的科学问题, 周而复始, 推动相关的数学、物理学、化学、信息学、工程学向前发展, 并在生物学、医学、药学、脑科学等领域形成突破. 生物医学影像的发展从基础研究、共性关键技术, 再到应用示范, 符合科技创新的全链条规律. 本文借助优势和劣势、机遇和挑战(strengths weaknesses opportunities threats, SWOT)分析模型, 对基于内外部竞争环境和竞争条件下, 在全链条层面对我国生物医学影像发展的竞争态势进行分析.

### 3.1 优势分析

我国生物医学影像发展的优势主要包括市场优势、制度优势、成本优势、制造优势、硬件优势、人口优势6个方面.

**市场优势:** 生物医学影像对医药产业和健康服务业提供关键支撑. 我国具有世界上其他国家无可比拟的庞大市场, 能吸引更多的企业和投资进入科技创新的全链条. 2017年发布的《医疗影像的市场图谱和行业发展分析》预计我国医学影像市场规模在2020年达到6000~8000亿([https://app.ma.scrmtch.com/resources/ResourcePc/resourcePcInfo?pf\\_uid=14034\\_1634&pf\\_type=3&id=10750&active=3&apply\\_type=pcregister](https://app.ma.scrmtch.com/resources/ResourcePc/resourcePcInfo?pf_uid=14034_1634&pf_type=3&id=10750&active=3&apply_type=pcregister)).

**制度优势:** “集中力量办大事”是我国的制度优势. 前有“两弹一星”、后有新冠疫情科研应急攻关为样板. 一旦我们在生物医学影像领域确定了优先且紧迫的发展方向, 可以充分利用制度优势和成功经验达到预期目标.

**成本优势:** 在经济成本方面, 国内开展实验所需的除进口设备和材料之外的费用都较低, 人力资源成本也相对较低. 开展动物实验和人体临床试验所需的审批手续和流程规范高效, 时间成本较低, 这也是很多国际合作的外方更倾向于在中国开展动物和临床试验的原因之一.

**制造优势:** 影像设备变成产业离不开机械制造. 我国拥有体系完整、规模可观的制造业, 是影像设备工业化、自给自足的良好基础.

**硬件优势:** 随着我国综合国力的提高, 不但基础研究经费的投入不断增加, 高校和科研院所的基础设施和科研平台建设经费也在迅速增长. 国内相当一部分实验室的科研条件已经达到发达国家一流实验室的硬件水平. 以价格昂贵的冷冻电子显微镜为例, 据《财新

周刊》披露, 国内已安装或已采购并预计2020年底前安装的300千伏冷冻电镜就超过40台(单价每台超过4000万元)(<http://weekly.caixin.com/2020-05-09/101551889.html>). 在硬件水平普遍提高的情况下, 我国就有条件能更广泛地开展生物医学影像基础研究和基础应用研究.

**人口优势:** 由我国的人口基数决定. 总体来说, 我国科研人员的基数大, 大学生多, 研究生多, 可培养的下一代科研人员和从业人员多. 有望源源不断地吸引优秀的年轻学子加入进来, 壮大从事生物医学影像的研究人员、教师、工程师、医生、技师队伍. 虽然目前我国研发人员全时当量占总人口的比例远低于美国、英国、日本和韩国(不及美国或英国的1/3、日本的1/4、韩国的1/6)(<https://www.globalinnovationindex.org/analysis-indicator>), 但随着国家对研发投入的重视, 这一比例会逐渐提高. 同时, 我国的临床患者多, 在大数据时代是产生影像数据训练集的源泉, 有助于机器学习和人工智能的精准建模和预测.

### 3.2 劣势分析

我国生物医学影像发展的劣势主要在研究基础弱、学科分散、交叉合作弱、引导力量弱等方面.

我国的基础研究薄弱, 源头创新不多. 由我国发明和主导的方法和技术还没有达到对科学领域产生变革性影响的、诺贝尔奖级别的水平. 多数是在前人的基础上“跟跑”, 少数在指标上能达到国际领先, 超越前人, 但是仍然脱离不了前人开辟的“跑道”. 近年来, 生物医学影像领域的一些变革性技术, 如光声成像、超分辨显微光学成像等都是在国内完成大学教育的华人科学家在美国发明的, 说明人的因素不是阻碍创新的主要问题, 我们需要反思和总结变革性技术和原始创新产生的土壤.

生物医学影像科研人员总体来说有两群, 侧重方法和技术的(如物理学家、化学家、信息学家、工程师等), 以及侧重生物医学应用的(如生物学家和医生). 这两群人必须通过紧密的合作和有效的沟通, 为同一个目标努力. 现阶段我国的合作交叉还不够, 体现在我们发展的技术停留在实验室阶段, 不能及时转化成果; 同时, 生物学家和医生更倾向于使用进口的商用设备和方法, 而不是与技术工作者探讨新的需求. 与美国的很多新技术新方法研究是由临床医生主导相

比,我国虽然也在推进中,但目前这种深度的交叉合作还没有十分普及.在数据共享和标准化方面,我国也才刚刚起步,还有很多标准和规范需要制定,为交叉合作提供坚实基础.

我国现在对于生物医学影像研究领域的投入主要是基于自由探索后成长起来的优势领域进行持续资助.但必须认识到,虽然从“十三五”开始,我国通过设立重点研发计划重点专项以及科学基金的重大研究计划等大型项目进行引导,但我们与国外的差距特别是高端影像装备的差距仍然存在.我国在生物医学领域的总体发展应该如何规划,需要分几步走,科学界和产业界如何形成合力,“卡脖子问题”如何解决,仍然缺乏系统指引.我国目前也没有以“生物医学影像”为主要任务的国家实验室和国家重点实验室.公共科研投入以竞争性经费为主.

### 3.3 机会分析

我国生物医学影像发展的机会可以从内部和外部两个方面来分别探讨.

近年来,我国出台了很多国家级的战略规划,如“健康中国2030”、“中国制造2025”、国家大数据战略、“互联网+”行动计划等.这些国家战略都与生物医学影像息息相关.同时,国家对基础研究的重视程度日益加深,继2018年1月国务院正式发布《关于全面加强基础科学研究的若干意见》(国发〔2018〕4号)后,2020年4月底,科学技术部等六部门办公厅(室)印发《新形势下加强基础研究若干重点举措》.为了给科研人员“松绑”,更好地释放创新活力,我国近几年出台了一系列改革方案和政策,创造了更宽松的科研环境.总之,无论从战略部署还是政策层面,都留给生物医学影像很大的发展空间和潜力.

高校和科研院所越来越重视交叉学科特别是生命科学/医学与理学/工学的交叉学科建设.全国仅开设生物医学工程本科专业的高校就达到161所.

外部环境带来的机会,“贸易战”和“单边主义”在提醒我国政府重视和布局解决当前存在的“卡脖子”问题.相比之下,我国安全稳定的政治社会环境、持续稳定的科技高投入和逐步完善的人才政策正在吸引更多的高水平国际人才流入.这一系列的外部环境变化都为生物医学影像带来前所未有的机遇.

### 3.4 威胁分析

我国生物医学影像面临的威胁主要还是当前竞争激烈的国际科技环境造成的.

发达国家在生物医学影像领域的多年积累使得他们在各个分支领域掌握了强大的话语权.我国主导的研究在国际上“突破重围”、取得国际认可并不容易.很多知名的科学家是在国外功成名就之后回国,开展的延续性工作更容易获得国际同行的认可.而本土的发明,特别是临床医生开发的影像技术,不容易取得高影响力.

除了研究领域的竞争,在产业领域,面临发达国家垄断型企业的技术封锁,我国一直存在“卡脖子”的技术和零部件等问题.“十二五”以来,我国通过重大科学仪器设备开发专项以及后续的多个相关重点研发计划重点专项,加快了对“卡脖子”技术的布局和研发.一批重大产品基于临床实际需求,聚焦解决临床实际问题,研究提出应用解决方案,实现了关键技术的成果转化,做到了“研以致用”,取得了良好的经济效益.

这些阶段性成果令人鼓舞,也坚定了我们继续顶住压力艰苦奋斗的信心.2020年以来,有些国家在学术合作与交流、产业链、贸易往来等方面倾向于“脱钩”,且越来越不按常理出牌,将为我国生物医学影像的常态发展带来很多不确定因素,也提醒我国在进行“十四五”规划时必须要考虑这些不确定的风险和潜在的威胁.

## 4 展望和建议

生物医学影像是生命科学研究和现代医学临床诊疗必备的技术和手段,在“转化医学”中是连接基础研究与临床的桥梁,在“精准医疗”中是不可或缺的工具.它是生物医学领域产生创新的重大源泉,其进步一直推动着现代生物医学研究的发展.

我国的生物医学影像学科起步比美国稍晚,但经过几代人的奋斗,现在部分分支学科已经处于国际领先水平.然而,跟生物医学影像学科的战略地位比起来,我国目前的队伍规模、经费体量、国产化生物医学影像设备的市场占有率等与发达国家相比还有一定距离.以基础研究经费为例,美国NIBIB在2019财年的预算是3.90亿美元(支持700多个项目,约80%以上投给

所外), 而我国与之对标的国家自然科学基金的H18代码下的2019年总经费2.94亿人民币(支持515个项目)。

从我国人民健康福祉出发, 推动生物医学影像的学科发展, 加快“健康中国”的目标实现, 在中国科学院和国家自然科学基金的推动下, 我们从2017年开始广泛征集生物医学影像领域的专家学者意见和建议, 组织了12个学科分支进行系统调研, 陆续召集香山科学会议、科学与技术前沿论坛等高级别的专家研讨会, 反复听取科研、临床、企业、政府等各方代表的建议, 经过综合研判和慎重思考, 现提出如下5个方面的建议。

#### 4.1 加强顶层设计

成立国家级的生物医学影像专家咨询委员会, 主要职责是围绕生物医学影像的学科、产业、政策相关的战略规划、政策制定、标准制定、绩效评估等工作。

生物医学影像作为具有全链条特征的学科领域, 从原理、技术、应用到产品和服务, 和与之相对应的教育、研发、临床、产业、行政管理等板块的支持, 牵一发而动全身。不能割裂地去规划, 而应该通盘考虑、整体布局。当前, 国家自然科学基金委员会和中国科学院已经行动起来, 组织力量对学科进行规划。中国工程院也组织了对相关产业的规划。然而, 相对于一个应用型、全链条的领域来说, 这些从单一视角展开的规划还不够。即便教育部也加入进来组织从教育、课程体系层面进行规划, 但仍然是孤立和片面的。我们需要一个整合各方面都有代表性的优势力量, 能通盘考虑、集体决策的独立的专家咨询委员会, 对我国的生物医学影像发展提出一些纲领性的规划, 并对根据规划而制定的政策、技术/行业/产业标准和科技计划的实施情况进行阶段性考察和评估。

我国在“973计划”、重点研发计划、科学基金重大研发计划等科技计划中都尝试过设立咨询专家组, 取得了很好的效果, 形成了宝贵经验, 但这些专家组仅对当前阶段的某个科技计划负责。每次在国家组织制定五年计划、中长期规划的时候, 科学技术部、教育部、中国科学院、中国工程院、中国科学技术协会等主管部门多头组织, 可能会找到同一批牵头科学家征求到重复的建议, 但少数科学家的关注点、视角和建议都有限。如果收集到的信息由政府管理部门进行汇

总, 很难保证对领域的蓝图规划的专业性和全面性。在我国现行的制度和组织模式下尚无法解决这一弊端。

在美国, 对科技政策产生直接影响的核心科技决策咨询机制由总统科技顾问委员会(President's Council of Advisors on Science and Technology, PCAST)、白宫科技政策办公室(The White House Office of Science and Technology Policy, OSTP)和国家科学技术委员会(National Science and Technology Council, NSTC)共同组成<sup>[20]</sup>。NSTC在1993年11月成立, 由总统担任主席, 成员包括副总统、科技政策办公室主任、内阁秘书和负有重大科技责任的机构负责人以及其他白宫官员。NSTC为联邦科学和技术投资制定明确的国家目标, 负责制定研究和发展战略, 这些战略由联邦机构协调, 形成旨在实现多个国家目标的投资组合。NSTC的工作由五个主要委员会来组织: 环境、自然资源和可持续性, 国土和国家安全, 科学、技术、工程和数学教育, 科学以及技术。每个委员会都下设分委会和工作小组, 侧重于不同方面的科学和技术。美国一些大型科技计划, 如国家纳米技术计划、先进制造国家战略计划、光子学计划等都是由NSTC下设的分委会或工作小组提出的。2017年底, 由NSTC科学委员会指定的医学影像跨部门工作小组(Interagency Working Group on Medical Imaging)发布了《医学影像研究和发​​展路线图》(<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2017/12/Roadmap-for-Medical-Imaging-Research-and-Development-2017.pdf>), 这个路线图包括了医学影像研发的全范围: 基础科学、技术、工程和数学科学和技术创新、医学和转化研究、证据的产生、临床实施、人力资源和培训支持、出口导向的制造业奖励等。

在我国, 科技规划的制定主要还是依靠专家。2015年9月, 中共中央办公厅和国务院办公厅印发《深化科技体制改革实施方案》, 要求“建立国家科技创新决策咨询机制, 发挥好科技界和智库对创新决策的支撑作用, 成立国家科技创新咨询委员会”。我们建议, 未来在这个国家科技创新咨询委员会下设立生物医学影像领域的专家咨询委员会, 除了囊括生物医学影像领域的科研、临床、教育和产业的相关专家外, 也将相关部门的管理专家纳入进来, 形成政产学研用的协同机制, 共同为生物医学影像领域的发展做好顶层设计。

## 4.2 改革科技计划及评价机制

“十三五”以来,我国通过实施科技计划改革,将科技计划重新整合,形成了五个大类,规避了科研经费的重复投入,取得了初步成效。“聚焦重大目标、全链条设计、协同创新”的原则非常适合生物医学影像领域的布局。

从学科发展的角度出发,首先还是建议对生物医学影像领域给予长期稳定的经费支持。特别是在原始创新、源头创新这一块,可能不是一两个科技计划能“计划”出来的,而是依赖于物理学、数学等基础领域长期甘于寂寞的深耕。这就需要由国家队,认准一个领域长期投入。

我们在项目建议、申请和评审上长期养成了“唯发达国家马首是瞻”的习惯。在科技计划的布局方面也习惯于参照发达国家的科技计划。这样势必会形成“跟踪”和“追赶”的落后局面。分析原因,一方面是发达国家在国际学术平台上掌握了话语权的客观形势存在,另一方面是我们从科研人员到政府官员都还不够自信。建议从科技计划上鼓励我国的科研人员从实际研究中、从临床经验中挖掘急需解决的重大科学问题和技术瓶颈,营造有可能孕育出变革性技术的环境,从而有助于培育由我国科学家主导的新的科学发现、技术变革和产业机遇。

此外,我国现有的科研评价体系过于强调论文,如何发挥科学研究对科技创新的源头供给和引领作用,解决科技评价“四唯”问题,依然任重道远。建议提升科研细分评价能力,科研绩效评价要注重创新质量和贡献,生物医学影像领域科研项目的设置要更加重视方法、技术和工艺的原始创新及应用示范。

## 4.3 优化学科设置和加强队伍建设

目前,生物医学影像的高等教育放在教育部一级学科生物医学工程和二级学科影像医学与核医学(属于临床医学)。前者主要侧重于技术方法,后者侧重于临床应用,两者的联系并不紧密。国内部分理工科高校采取与医学院校合作办学的形式,培养医工交叉的学生,生物医学影像仅仅是其中的一部分。这方面的探索还刚起步,期待更多的有益尝试。此外,出于对物理学的重视,建议在物理学一级学科之下设立医学物理二级学科。

近年来,教育部在协同创新教育方面作了一些尝试。由于生物医学影像的全链条特性,也可以尝试将研究生培养与国产生物医学影像设备企业合作,开展订单式培养。根据企业的具体需求培养研究生的基本专业技能。

在人才队伍建设方面,目前医院的职业通道不畅。在美国医院有医学物理师的职业和职称晋升通道,而中国医院只有技师职称,扼制了优秀的工程师人才进入临床领域的欲望,不利于生物医学影像在临床研究的发展。建议国家有关部门设立医学物理师的专业技术人员职业资格,建立与医生职称平齐的职业上升通道,不低于医生职业待遇。

## 4.4 重视国际学术交流平台建设

生物医学影像不同于芯片、能源等竞争性研究,它的应用是生命科学和医学等关系全人类健康福祉的领域。生物医学影像不仅需要各学科的交叉合作,还需要全世界研究人员的共同合作和学术交流。建立一个开放的国际化的学术交流平台对我国的生物医学影像发展至关重要,可以从学会、会议、期刊等多个平台着手构建。

建立一个生物医学影像领域的国际化学会。目前我国国内的相关学会都是依托不同的大学科,如理科、工科、医科,学科交叉有限,也缺少一个总的大学会。这个学会既包括理工科领域的技术研发人员,也包括临床领域的医生和技师;研发人员既有来自高校科研院所的,也来自企业的。为和国际同行接轨,学会可以从吸收海外华人科学家和企业研发人员开始,逐步吸收外国科学家,逐步建立一个国际化的学术交流阵地。

会议和期刊都可以依托国际化的学会展开。例如,每年定期举办国际会议,促成各交叉领域的定期学术交流,尤其是作为技术研发者的科学家与用户端的医生和企业人员之间的交流。为生物医学影像领域转化技术和了解需求提供双向的交流平台。会议的交流成果可以在主办的期刊发表。期刊也可为广大被国外权威话语权压制的新兴技术提供展示和交流的平台。为了满足不同层次的读者需求,期刊可以中文和英文两种语言各办一个。

通过国际学术交流,与世界各国科学家建立密切联系与合作。在当前某些国家政策“排外”而我国正在

推动“外国人永居”这一大背景下, 如果我们利用好国际学术交流的平台, 有望吸引大批生物医学影像的海外高端人才来中国效力。

#### 4.5 强化制度保障

生物医学影像学科的健康发展需要各方面的制度保障。

经费投入方面. 建议围绕重要发展方向与关键科学技术问题投入长期稳定支持。

标准制定方面. 要高度重视和大力支持医学影像行业标准甚至国家标准的建立, 推行数据标准化。

人才队伍建设方面. 呼吁教育部将医学物理列入学科目录. 呼吁人力资源和社会保障部将医学物理师列为医院职业(不低于医生职业待遇)。

医疗保障方面. 建议出台政策, 积极推广国产生物医学影像设备. 将PET等高端医疗影像检测项目纳入医保范围. 建议国家药品监督管理局为人体内已有物质作为标记物的探针审批给予特殊通道。

**致谢** 本文的调研工作得益于2017~2019年期间在中国科学院和国家自然科学基金委员会多个学科战略研究项目的支持下展开的一系列调研和研讨活动. 感谢所有参与我们调研和研讨活动的专家. 感谢香山科学会议、科学与技术前沿论坛为本专题研讨提供的平台支持. 感谢项目总体秘书组中国科学院精密测量科学与技术创新研究院罗凡博士的组织协调、华中科技大学武汉光电国家研究中心施华博士对本文的资料收集整理和图表制作、中国科学院武汉文献情报中心李印结副研究员提供的文献检索数据和武汉光电工业技术研究院徐迪帆提供的专利检索数据。

#### 参考文献

- 1 Hendee W R, Chien S, Maynard C D, et al. The national institute of biomedical imaging and bioengineering: history, status, and potential impact. *Ann Biomed Eng*, 2002, 30: 2–10
- 2 Chien S, Maynard C D. Newest member of the NIH family. *Science*, 2001, 291: 1701c–1702
- 3 Dyson F J. Is science mostly driven by ideas or by tools? *Science*, 2012, 338: 1426–1427
- 4 Wang L V. Exponential path of photoacoustic tomography to the largest conference at photonics west: omniscalar imaging from organelles to organisms (conference presentation). In: Oraevsky A A, Wang L V, eds. *Proceedings SPIE 10878. Photons Plus Ultrasound: Imaging and Sensing 2019*. San Francisco. 2019. Bellingham: SPIE, 2019. 108780W
- 5 Kelkar S S, Reineke T M. Theranostics: combining imaging and therapy. *Bioconjug Chem*, 2011, 22: 1879–1903
- 6 Cyranoski D. China launches brain-imaging factory. *Nature*, 2017, 548: 268–269
- 7 Gundersen B B. Automating brain mapping. *Nat Methods*, 2016, 13: 719
- 8 Zong W, Wu R, Li M, et al. Fast high-resolution miniature two-photon microscopy for brain imaging in freely behaving mice. *Nat Methods*, 2017, 14: 713–719
- 9 Jiang T, Zuo N, Zhang X, et al, inventors. Institute of Automation Chinese Academy of Sciences, assignee. Method for storing data of photoelectrically synchronous brain activity recording. US 20170290524 A1, PCT/CN2014/086904, 2019 Oct 29
- 10 Wuhan Inst Phys Math Chin Acad Sci. MRI instrumental system for the study of major diseases in human lung (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2018, 33: 82–85 [中国科学院武汉物理与数学研究所. 用于人体肺部重大疾病研究的磁共振成像仪器. *中国科学院院刊*, 2018, 33: 82–85]
- 11 Liu B, Xue Y, Zhao W, et al. Three-dimensional super-resolution protein localization correlated with vitrified cellular context. *Sci Rep*, 2015, 5: 13017
- 12 Xiao Y, Yu Y, Niu L, et al. Quantitative evaluation of peripheral tissue elasticity for ultrasound-detected breast lesions. *Clin Rad*, 2016, 71: 896–904
- 13 Li X, Yu J, Liang P, et al. Combination therapy of three-dimensional (3D) visualisation operative treatment planning system and us-guided percutaneous microwave ablation in larger renal cell carcinomas ( $d \geq 4$  cm): preliminary results. *Int J Hypertherm*, 2017, 33: 271–277
- 14 Langsteger W, Beheshti M. Highlights of the 25th anniversary EANM congress Milan 2012: nuclear medicine and molecular imaging at its best. *Eur J Nucl Med Mol Imag*, 2013, 40: 1438–1461

- 15 Wu J, Wang S, Zhang X, et al.  $^{18}\text{F}$ -alfatide II PET/CT for identification of breast cancer: a preliminary clinical study. *J Nucl Med*, 2018, 59: 1809–1816
- 16 Li A, Zalesky A, Yue W, et al. A neuroimaging biomarker for striatal dysfunction in schizophrenia. *Nat Med*, 2020, 26: 558–565
- 17 Zeng L L, Shen H, Liu L, et al. Identifying major depression using whole-brain functional connectivity: a multivariate pattern analysis. *Brain*, 2012, 135: 1498–1507
- 18 Hardy K. A picture of sadness—spotting depression with imaging. *Radiol Today*, 2020, 21: 14–16
- 19 Wang S, Ma X, Hong X, et al. Adjuvant photothermal therapy inhibits local recurrences after breast-conserving surgery with little skin damage. *ACS Nano*, 2018, 12: 662–670
- 20 Huang J Y. The role of federal S&T policy advisory and selected case studies of the United States (in Chinese). *Forum Sci Technol China*, 2018, 2: 163–168 [黄军英. 美国联邦科技决策咨询的作用及典型案例研究. *中国科技论坛*, 2018, 2: 163–168]

## Development and prospects of biomedical imaging

LUO QingMing<sup>1,2</sup>, ZHOU Xin<sup>1,3</sup> & YE ChaoHui<sup>1,3</sup>

*1 Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;*

*2 School of Biomedical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China;*

*3 Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China*

Biomedical imaging is an emerging interdisciplinary area based on physics, mathematics, chemistry, information science, engineering science, life science, and medicine. It is a crucial tool supporting both fundamental research and clinical diagnosis and treatment in biomedical field, and has pushed numerous breakthroughs in life science and medicine. Biomedical imaging is not only one of the pillars of Health China construction, but also a main engine to implement the national strategies of Intelligent Manufacture and National Big Data. Well-developed biomedical imaging will contribute to build China's strength in science, technology, and talents, and ensure national security and social stability. This paper starts with illustrating the development and trends of biomedical imaging, reveals the attention and inputs by China's scientists, communities, and governments, summarizes the outputs and leading areas, presents a SWOT analysis, and finally proposes our prospects and suggestions on this fast-growing field.

**biomedical imaging, bioimaging, medical imaging, mesoscopic brain connectome, discipline development, strategic planning**

doi: [10.1360/SSV-2020-0214](https://doi.org/10.1360/SSV-2020-0214)