

2021年全球脑科学发展报告



中国电子学会

众诚智库咨询顾问（北京）有限公司

伏羲九针智能科技（北京）有限公司

2021年5月

前 言

近年来，以人工智能、量子信息、集成电路、生命健康、脑科学、生物育种、空天科技、深地深海等为代表的新一轮科技革命和产业变革深入发展，正在重构全球创新版图、重塑全球经济结构。

在众多极具“颠覆性”的科技领域中，脑科学无疑是最尖端、最前沿的一个，被称为生命科学的“终极疆域”。正因如此，脑科学早已成为世界各主要经济体科技角逐的主要赛道之一。但应该看到，当前脑科学正处于关键发展阶段，许多领域需要研究，许多技术需要突破。

为深刻把握脑科学的发展态势与动向，特编纂本报告，希望能为脑科学领域研究者，以及感兴趣的读者，提供有益的借鉴与启示。

研究方法

本报告采用定性与定量相结合的研究方法,通过文献研究、专家访谈、数据计量、案例研究等方式,对脑科学进行现状分析、路径总结和趋势研判。

1. 定性研究法。通过研究全球范围内脑科学领域的相关科研成果、主要经济体相关政策规划与布局、全球性合作与交流动态等,系统性分析脑科学的发展现状、聚焦领域、发展方向和创新趋势。通过专家访谈,结合文献研读,对脑科学领域的相关国内外进展、发展趋势进行预判。

2. 定量研究法。本报告中的文献数据以国际科学网(Web of Science)数据库为主要来源,以主题检索词为主编写检索式¹,论文出版时间限定为2016~2020年,文献限定为“文章”(Article)和“报告”(Review)。专利数据基于佰腾(Baiten)全球专利信息库,根据标题、摘要、关键词和国际专利分类号分别编写检索式²、检索式³(台湾地区专利申请数)、检索式⁴(我国除台湾地区的专利申请数),专利公开时间限定为2016~2020年。

3. 分析方法。文献分析利用国际科学网(Web of Science)数据库在线分析完成,统计《科学引文索引》(Science Citation Index,简称SCI)文献量最多的国家、国际机构、国内机构的发文情况,具体指标包括论文数量、总被引频次、篇均被引频次、《自然》《细胞》《科学》(Nature、Cell、Science)杂志及子刊论文数量、基本科学指标数据库(Essential Science Indicators,简称ESI)高水平论文数量。专利分析利用佰腾(Baiten)国际专利共享数据库在线分析功能完成,统计专利最多的国际机构和国内机构,具体包括:从专利申

【1】brain* OR Hindbrain* OR myelencephalon* OR metencephalon* OR * OR Midbrain* OR mesencephalon* OR Forebrain* OR Telencephalon* OR "Cerebral Cortex"* OR "Frontal Lobe"* OR "Temporal Lobe"* OR "Parietal Lobe"* OR "Occipital Lobe"* OR "Subcortical Structure"* OR "Basal Ganglia"* OR Hippocampus* OR Amygdala* OR "Limbic System"* OR "Corpus Collosum"* OR Diencephalon* OR Thalamus* OR Hypothalamus* OR brainstem*

【2】数据检索时间为2021年2~3月,2021年部分研究成果虽已发布,但为了突出研究成果的阶段性特点,以及上期跟踪研究对2016年研究成果收录的不完整性,本次研究时段选取为2016~2020年共5年的数据。

【3】i,ab,clm:(brain* OR Hindbrain* OR myelencephalon* OR metencephalon* OR Cerebellum* OR Midbrain* OR mesencephalon* OR Forebrain* OR Telencephalon* OR Hippocampus* OR Amygdala* OR Diencephalon* OR Thalamus* OR Hypothalamus* OR brainstem*) AND ic1,ic2:(A01H or A01K or A61K or A01P or A02F or C07G or C07H or C07K or C12M or C012N or C12P or C12Q or C12S or G01N) AND (pd:[20160101 TO 20201231])

【4】ti,ab,clm:(脑科学 or 神经科学 or 类脑科学 or 脑成像 or 脑机接口 or 神经医学 or 后脑 or 脑脊髓 or 小脑 or 中脑 or 前脑 or 端脑 or 大脑皮层 or 额叶 or 颞叶 or 顶叶 or 枕叶 or 皮质下结构 or 基底神经节 or 海马体 or 杏仁体 or 边缘系统 or 间脑 or 丘脑 or 下丘脑 or 脑干) AND ic1, ic2:(A01H or A01K or A61K or A01P or A02F or C07G or C07H or C07K or C12M or C012N or C12P or C12Q or C12S or G01N) AND (pd:[20160101 TO 20201231])

请量、团队分析等指标对国际专利在线分析。在 SCI 论文量、《自然》《细胞》《科学》（Nature、Cell、Science）杂志及子刊论文量、ESI 高水平论文量最多的国际和国内机构中筛选 SCI 论文量最多的研究团体，筛选方法为使用“第一作者单位”（Author Affiliations (1st)）条目筛选论文量最多的前 10~20 个团体，国际团体精确至“部门”，国内团体精确至“系”或“部门”。

目 录

一、 概述.....	1
(一) 内涵与外延.....	1
(二) 发展历程.....	2
1. 混沌阶段 (16 世纪之前)	2
2. 萌芽阶段 (16 世纪初至 19 世纪初)	2
3. 开拓阶段 (19 世纪初至 20 世纪 60 年代)	2
4. 大发展阶段 (20 世纪 60 年代至今)	3
(三) 研究方法.....	6
1. 生物解剖学.....	6
2. 电生理学.....	6
3. 生理学及生物化学.....	7
4. 细胞分子学.....	8
5. 脑成像.....	9
(四) 主要经济体发展战略.....	10
1. 美国.....	10
2. 欧盟.....	10
3. 日本.....	11
4. 中国.....	11
二、 研究现状.....	13
(一) 发展综述.....	13
(二) 研究现状.....	14
1. 全球.....	14
2. 中国.....	15
(三) 研究机构.....	17
1. 全球.....	17
2. 中国.....	19
三、 应用现状.....	23

（一）应用现状综述.....	23
（二）脑科学主要应用领域.....	23
1. 脑机接口.....	23
2. 仿生科学.....	24
3. 人工智能.....	24
4. 医疗领域.....	24
5. 教育领域.....	25
6. 军事领域.....	25
四、发展趋势.....	26
（一）绘制高分辨率脑图谱将是脑科学研究的重要方向.....	26
（二）类脑芯片将成为信息技术的重要发展方向.....	26
（三）治疗脑疾病的新方法将受到资本市场的青睐.....	26
（四）加强国际合作是推动脑科学健康发展的重要途径.....	26
附表 1 脑科学、类脑科学、神经科学、生命科学的辨析.....	28
附表 2 脑科学的主要研究方法.....	30
附表 3 美国“BRAIN 2.0”主要内容.....	32
版权所有.....	34
关于我们.....	35

一、概述

当前,全球有超过 5000 万阿尔茨海默病患者、3.5 亿抑郁症患者,近 10% 的儿童患有多动症。据世界卫生组织的统计,包括各种神经类和精神类疾病在内的脑相关疾病,已经超过心血管病、癌症成为人类健康最大的威胁。虽然人类已经可以“上九天揽月”“下五洋捉鳖”,但对大脑这个由上千亿神经细胞组成的 3 磅重的器官,仍知之甚少。因此,越来越多的科研机构 and 科学家正在投入到脑科学的研究中。

(一) 内涵与外延

脑科学有狭义和广义之分。狭义的脑科学一般指神经科学,是为了了解神经系统内分子水平、细胞水平、细胞间的变化过程,以及这些过程在中枢功能控制系统内的综合作用而进行的研究,主要包括神经发生、神经解剖学、神经生理学、神经通讯与生物物理学、神经化学与神经内分泌学、神经药理学、记忆与行为、知觉和神经障碍等九个领域⁵。

广义的脑科学是研究脑结构和脑功能的科学,主要包括脑形态及结构、脑部分区及功能、脑细胞及工作原理、脑神经与网络系统、脑的进化与发育等领域研究,以及对脑生理机能的研究,如脑是如何产生感觉、意识、动机和情绪的,如何学习和记忆的,如何传递信息的,如何控制行为的,如何进行自我修复和功能代偿的。总的来说,广义脑科学是从生物脑的角度探究大脑的物理构成、生物机理和工作机能,是一个认识脑的过程。

脑科学的研究范围不仅仅局限于认识脑,如绘制人脑发育图谱、探究嗅觉工作机理等,还包括如何更好地保护脑、开发脑、创造脑。保护脑主要包括促进脑发育、预防脑损伤、治疗脑疾病、延缓脑衰老等方面;开发脑是指开发脑的未知功能、提高脑的运用效率,以及通过类脑研究,模拟脑的功能和工作原理,尤其是模拟人脑的信息处理机制;创造脑是指通过构建大脑仿真系统,开发脑型计算机,打造以数值计算为基础的虚拟超级大脑。

目前,以新一代脑科学研究为核心,以类脑智能研究、神经性疾病与治疗、脑科学技术与方法、脑科学信息与服务为中间层,以大脑控制、脑机接口、大脑模拟、人工智能、新药研发、脑控仿生科技、新型教育教学等为应用层的脑

⁵ 萧静宁.脑科学概要.武汉:武汉大学出版社,1986: p.1.

科学发展图谱业已形成，并呈现出三大特征⁶：一是神经科学与计算机、微电子、化学、材料、工程学、物理、数学等学科的交叉融合为脑科学的突破提供了契机；二是人造大脑成为主要研究目标，包括以模仿计算为主的虚拟超级脑，以及虚拟大脑与生物大脑一体化的融合超级脑两个研究方向；三是利用信息技术认识脑、了解脑、开发脑、模拟脑、创造脑、融合脑。

脑科学、类脑科学、神经科学、生命科学的辨析参见附表 1。

（二）发展历程

脑科学的发展历程可划分为混沌阶段、萌芽阶段、开拓阶段、大发展阶段。

1. 混沌阶段（16 世纪之前）

早在古希腊时期，著名医生阿尔克迈翁（Alcmaeon）发现眼睛后部与大脑相连，从而发现了视神经，但其对脑的认识仍以主观想象为主。另一位医生希波克拉底认为，人的情绪和感觉均源自于脑，大脑是人类神智的载体。与希波克拉底相反，亚里士多德则认为神智在心而不在脑。此后，关于神智、灵魂、精神及元气的争论长达数世纪之久，人们对脑的认知一直停留在感性层面。

2. 萌芽阶段（16 世纪初至 19 世纪初）

文艺复兴时期，达·芬奇（L.da Vinci, 1452~1519）通过人体解剖绘制出了大脑的 4 个脑室。1543 年，维萨留斯（A.Vesalius, 1514~1564）编著出版的《人体构造》对脑室进行了完整的描述。1664 年，英国医师托马斯·威利斯（Thomas Willis, 1621~1675）出版《脑的解剖学，兼述神经及其功能》，其中插图与现在神经解剖学教科书上的解剖结构图基本相同。

进入 18 世纪，生理学研究方法被应用到脑科学研究中。脑的兴奋性与肌肉反应之间的关系、信息传递工作原理成为研究热点。但在蒙昧、迷信的时代环境下，人们对脑的研究主要还是以零散的、偶然的发现为主，主动的、有意识的脑科学研究异常艰难，科学成果自然也寥若晨星。

3. 开拓阶段（19 世纪初至 20 世纪 60 年代）

19 世纪，脑科学进入快速发展阶段，取得了一系列开拓性成就，如生物电的发现、神经元学说的创立、脑功能的定位、神经网络学说的创立等。

20 世纪前后，人们对脑功能的研究取得突破性进展，尤其是乙酰胆碱的发

⁶ 吴朝晖，潘纲. 类脑研究：概念，内容及挑战[J].中国计算机学会通讯.2020（4）：p.43-49.

现，加快了脑信息传递机理研究的进程。英国分子生物学家查尔斯·斯科特·谢灵顿（Charles Scott Sherrington）将神经元之间的结构命名为“突触”，认为突触是神经元之间信息沟通的“桥梁”。随后，约翰·艾克尔斯（John Eccle）与理查德·克里德（Richard Stephen Creed）证实了抑制性突触的存在。

20 世纪 50 年代至 60 年代，科学家发现大脑皮层内和皮层下的边缘系统，组成了一个复杂的神经网络，来控制情绪的生成和表达，以及情绪记忆的形成、存贮和提取，从而建立起了相对完整的脑功能图谱。

4. 大发展阶段（20 世纪 60 年代至今）

20 世纪 60 年代，脑科学正式成为一门独立学科，其研究范围几乎涉及到生命科学的所有领域。例如，1961 年，贝克西（Békésy, Georg von）因发现耳蜗内部刺激的物理机制而获得诺贝尔生理学或医学奖；1970 年和 1977 年的诺贝尔生理学或医学奖分别颁给了脑信息传递功能与情绪产生机理的发现者和研究者，他们发现神经元之间并不直接接触，而是以电脉冲的方式进行信息传递。

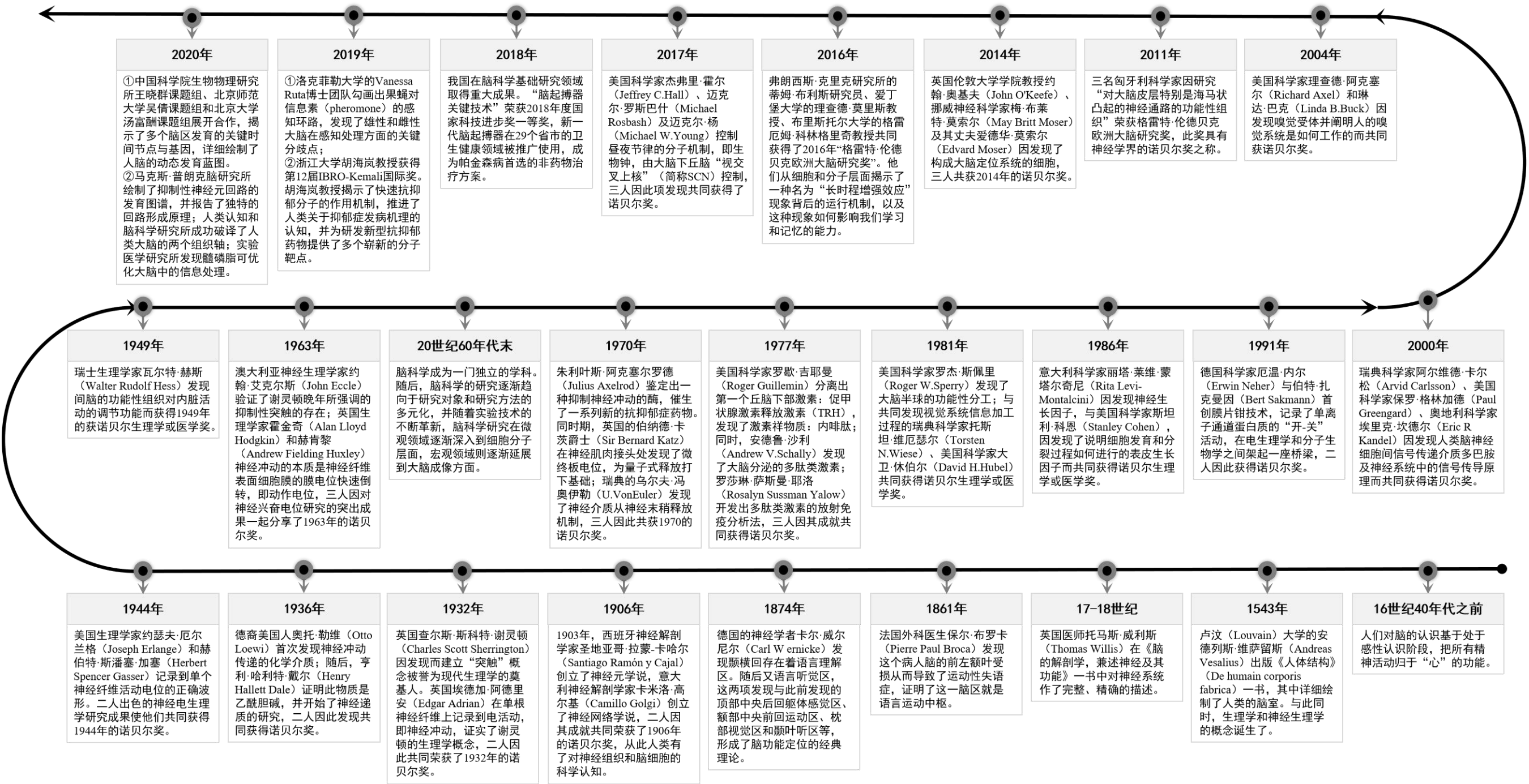
20 世纪 80 年代至 90 年代，脑科学在微观领域的细胞分子学研究、宏观领域的大脑皮层功能研究成就卓然。1981 年，美国科学家斯佩里（Roger W. Sperry）因证明大脑左右两半球的功能存在显著差异而获得诺贝尔生理学或医学奖；1986 年，意大利科学家利瓦伊·蒙塔尔奇尼（Rita Levi Montalcini）因发现神经生长因子而获得诺贝尔生理学或医学奖；1991 年，德国科学家内尔（Erwin Neher）因发现细胞内离子通道、发明膜片钳技术而获得诺贝尔生理学或医学奖，其在神经突触传递和可塑性领域也非常权威。

此外，脑科学在视觉、听觉、嗅觉、脑损伤等方面的研究，以及在学习、记忆、语言、睡眠、觉醒等高级功能方面的研究，也取得较大进展。其中，瑞典科学家维瑟尔（Torsten N. Wiesel）与美国科学家休伯尔（David H. Hubel）因阐明视觉系统形成的机理而共同获得 1981 年的诺贝尔生理学或医学奖。

进入 21 世纪，脑科学研究呈现百花齐放、百家争鸣的局面。科学家们不但揭开了五觉（视觉、嗅觉、味觉、听觉、感觉）的工作原理、脑信息传递和优化处理的机制，揭示出精神疾病（如抑郁症、帕金森症、癫痫等）的产生机理，还成功绘制出大脑的动态发育蓝图，破译了人类大脑的两个组织轴，以及脑神经网络结构适应环境的动态机制等。全球脑科学研究的发展历程如图 1-1 所

示。脑科学研究历程具体见图 1.1。

图 1.1 脑科学研究发展历程



图片来源：中国电子学会、众诚智库、伏羲九针共同绘制，2021 年 2 月

（三）研究方法

如今，随着基因技术、遗传学技术、光学技术、电信号检测技术、超高分辨显微成像技术、工程技术、纳米技术等新兴技术逐渐应用于脑科学领域，生物解剖学、电生理学、生物化学、分子生物学、脑成像学已成为脑科学的主要研究方法（参见附表 2）。这些研究方法极大拓展了脑科学研究的疆界，也将脑科学研究热潮推向了前所未有的高度。

1. 生物解剖学

人类对大脑的科学认识是由解剖学开始的。古希腊著名医生阿尔克迈翁（Alcmaeon）通过解剖发现眼部后方与大脑相连，随后得出“感觉器官把感觉送往大脑，通过思考的过程，我们就在那里解释它们并从中得出概念”的结论。尽管他已经发现了视神经，但无法解释感觉是如何送往大脑的，对大脑的工作原理也是一无所知。随后，古希腊著名医生劳迪亚斯·盖伦（Claudius Galenus, 129~199）通过解剖发现了脊髓，认识到神经起源于脊髓，发现肌肉运动是由脑和脊髓的神经运动控制的。

解剖学在脑科学研究中最具标志性的事件是比利时学者安德列斯·维萨留斯（Andreas Vesalius, 1514~1564）于 1543 年出版了《人体结构》一书，书中详细绘制出了脑室⁷。

17 世纪，英国医师托马斯·威利斯（Thomas Willis, 1621~1675）出版《脑的解剖学，兼述神经及其功能》一书，对神经系统做了完整、精确的描述。此后不久，法国解剖学家维克达居尔等人通过实验观察，画出了脑的解剖轮廓。

19 世纪，对大脑大规模的解剖研究已成为常态。1861 年，法国外科医生保尔·布罗卡通过尸检证明了大脑左前叶受损即丧失语言能力，从而发现大脑语言中枢。1874 年，德国的神经学者卡尔·威尔尼尔（Carl Wernicke, 1848~1905）发现语言理解能力干扰区与语言听觉区。

此后，大多数脑科学研究都是建立在生物解剖学的基础上，综合运用多种研究工具和方法开展研究。

2. 电生理学

电生理学在脑科学研究中的应用最早可追溯到 1870 年。这一年，古斯塔

⁷ 贝内特，哈克.神经科学的哲学基础[M].张立等译.杭州：浙江大学出版社，2008：p.22-23.

夫·弗里茨希(Gustav Fritsch, 1838-1927)和埃多乌阿尔德·希茨希(Eduard Hitzig, 1838~1907)发表了一篇具有里程碑意义的论文——《论大脑的电兴奋性》，他们用电流刺激狗的大脑，通过实验观察证明用电刺激大脑皮层可以产生“对侧脑半球”的肢体运动。

1875 年，英国生理学家理查德·卡顿(Richard Caton, 1842~1926)从兔脑和猴脑的皮层中记录到微弱的电流。这是科学家第一次直接从活体动物的大脑皮层记录下电脉冲。

1925 年，澳大利亚生理学家约翰·艾克尔斯(John Carew Eccles, 1903~1997)把微电极插入猫的脊髓前角细胞内记录电活动，证实了抑制性突触的存在，揭开神经细胞之间信息传递的秘密。随后，英国生理学家霍奇金(A.L.Hodgkin)与赫胥黎(A.F.Huxley)将微电子技术应用于脑科学研究，完整地探明神经细胞轴突质膜表面发生的电兴奋，共同证明了神经冲动的本质是神经纤维表面细胞膜的膜电位快速倒转，即动作电位。

1929 年，德国精神病学家汉斯·贝格尔(Hans Berger, 1873~1941)首次展示了人类脑电图(EEG)。

1938 年，英国生理学家伯纳德·卡茨(Bernard Katz)认为单根神经末梢自发释放出单个囊泡中的乙酰胆碱，可以引起一个极微小的终板电位，当神经冲动到来时，许多神经末梢同时释放出大量乙酰胆碱，可引起终板电位。这些研究为神经末梢的量子式释放理论打下了基础。

1952 年，英国生理学家霍金奇(Alan Lloyd Hodgkin)和赫肯黎(Andrew Fielding Huxley)利用电压钳技术观察神经纤维上的电脉冲，阐明了神经脉冲产生和传播的基本规律，为彻底揭开脑信号处理机制的秘密打下了基础。

此后，电生理学逐渐与新方法相结合，在脑成像、大脑动态图谱绘制等研究中发挥着越发重要的作用，成为脑科学最重要的研究方法之一。

3. 生理学及生物化学

生理学在 17 世纪初期成为一门独立的科学，直到 18 世纪初期才被应用于脑科学研究领域。例如，1757 年，瑞士生理学家阿尔勃莱希特·冯·哈勒(Albrecht von Haller, 1708~1777)撰写的《人体生理学原理》中指出，感受性是神经的特性，因为它们在脑髓中有一个共同的回合点。

光学显微镜发明以后，在综合运用解剖学、生理学及生物化学研究方法的基础上，人们第一次观察到了神经元细胞。1873 年，米洛·高尔基（Camillo Golgi, 1844~1926）在光学显微镜下观察一块偶然放进硝酸银溶液中浸泡了几个星期的脑切片时，清晰地看到网状结节中悬浮着黑色斑点，这便是脑组织最基本的构成单元——神经元细胞。随后，西班牙神经解剖学家圣地亚哥·拉蒙·卡哈尔（Santiago Ramón y Cajal, 1852~1934）证实了“神经元是整个神经活动的最基本单位”这一论断。

1897 年，英国生理学家查尔斯·斯科特·谢灵顿（Charles Scott Sherrington, 1857~1952）观察到了神经元之间的接触部位，并命名为“突触”，信息传递的关键部位被发现。

1914 年，英国生理学家亨利·哈利特·戴尔（Henry Hallett Dale, 1875~1968），发现了神经系统中的化学传递物质，特别是神经末端可释放乙酰胆碱，并从制备的生物材料中分离出乙酰胆碱。

19 世纪末，反射实验方法成为生理学最主要的研究方法之一，被大量应用于脑科学研究中，而生物化学则逐渐在脑科学研究的微观领域——细胞分子学中大放异彩。

4. 细胞分子学

细胞分子学主要研究神经元细胞的形态和功能，以及神经细胞的生物构成及作用。在神经元细胞的形态和功能研究方面，主要运用神经化学的研究方法，通过观察并记录分子活动，证实了神经元是由细胞体、树突和轴突组成的。其中，细胞体是神经元的代谢活动中心，树突是神经元信号传入的主要部位，轴突是神经元信号传出的主要部位，突触是实现神经元间或神经元与效应器间信息传递的部位。在神经细胞的生物构成及作用研究方面，1970 年，美国生物化学家朱利叶斯·阿克塞尔罗德（Julius Axelrod）在奥塞勒发现去甲肾上腺素的基础上，分离出能灭活去甲肾上腺素的酶，为新型抗抑郁药物的研发做出了巨大贡献。1977 年，美国医学物理学家罗歇·吉耶曼（Roger Charles Louis Guillemin）、安德鲁·沙利（Andrew V. Schally）和罗莎琳·萨斯曼·耶洛（Rosalyn Sussman Yalow）因发现了大脑分泌的肽类激素，并开发出肽类激素的放射免疫分析法，而获得诺贝尔生理学或医学奖。

但脑科学在细胞分子学领域的突飞猛进是在 20 世纪末期，这得益于激光显微镜、现代神经化学、药理学等研究方法的进步。1991 年，德国科学家内尔(Erwin Neher)发明了膜片钳技术。该技术主要用于记录单个或多个离子通道的电流，以此来研究神经元细胞的功能。这也是当今在神经元细胞研究领域最常用的一种方法，尤其是在突触的信号传递研究方面，可以通过突触前刺激，记录引起突触后神经元的反应，结合药理学方法，调控所记录细胞的内外液成分，准确而有效地进行突触传递功能的分析⁸。

2000 年，科学家发现了人类脑神经细胞间信号传递的介质“多巴胺”及神经系统中的信号传导原理，使人们认识到帕金森症和精神分裂症的起因是由于病人脑部缺乏多巴胺，并据此可以为研制新型靶向治疗药物提供新的途径。

2014 年，三位欧洲科学家因发现了构成大脑定位系统的细胞而获得诺贝尔生理学或医学奖。

由此可见，近代以来细胞分子学的突飞猛进，不但翻开了脑科学研究进程中最光辉灿烂的一页，也为攻克困扰人类已久的脑疾病和精神疾病提供了可能。

5. 脑成像

早期的脑成像研究方法主要是通过光学显微技术结合化学染色来检测和观察脑的形态与功能。尤其是荧光染料、荧光蛋白和荧光显微成像技术的出现，使脑科学研究在细胞和分子水平上迈上了一个新台阶。

20 世纪 80 年代，在荧光显微成像技术的基础上，激光共聚焦及双光子激光扫描显微镜成像技术开始应用到脑科学研究中来，实现了对活体大脑深层组织的高分辨率动态观察。

20 世纪 90 年代初，功能性磁共振成像技术诞生并被广泛应用于神经科学领域。该技术可以帮助科学家们在不用外加造影剂的情况下，依据大脑工作时的血氧依赖性，无损伤地对活体大脑的神经元活动区域进行成像，从而成为活体无创性脑成像研究的重要手段。功能性磁共振成像技术加深了人们对脑感知等初级脑功能的认识，并为运动、学习、记忆等高级脑功能的深入研究提供了强有力的工具。

同期诞生的脑磁图技术是一种无创伤探测大脑电磁生理信号的检测方法，集

⁸ 韩济生.神经科学（第三版）[M]. 北京大学医学出版社, 2009.1: 48-62

低温超导、生物工程、电子工程、医学工程等技术于一体，使人们研究大脑功能、治疗脑部疾病的能力达到了前所未有的高度。因神经元的活动是以电活动的形式体现的，同时也伴随着局部电场和磁场的改变，这就为在头皮检测和记录脑电与脑磁信号提供了条件，也为脑机接口技术的研发和应用提供了可能。

随后，在脑磁图技术的基础上，穿颅磁刺激技术在脑科学研究的实验模拟中应用开来。该技术通过多个电容同时放电，电流流过被试者头皮上的线圈使感应磁场进入头皮和颅内，干扰特定的皮质功能。脑磁图技术虽然不会给被试者带来伤害，但社会上依然对此心存疑虑。

总体而言，光学显微成像、功能性磁共振成像和脑磁图技术仍具有一定的局限性。它们对脑结构的功能定位是很有效的，但对更为复杂的交互功能却作用有限。要想探究复杂脑功能的奥秘，就需要相关技术手段的发展和创新了。

（四）主要经济体发展战略

目前，全球各主要经济体均高度重视脑科学的发展，推出了各自的脑计划。总体来看，在脑科学研究领域，美国独领风骚，欧洲、加拿大、澳大利亚、俄罗斯、日韩等为第二梯队，以色列、中国等新兴力量已崭露头角。全球主要经济体的脑科学相关政策及推进历程如图 1-2 所示。

1. 美国

2014 年，美国国立卫生研究院（NIH）启动了“通过推动创新型神经技术开展大脑研究（BRAIN）计划”，开启了“BRAIN 1.0 时代”。2018 年 4 月，NIH 成立脑科学技术 2.0 工作组，并于 2019 年 6 月将《美国脑科学计划 2.0》报告提交给美国国立卫生研究院咨询委员会。这标志着美国正式进入“BRAIN 2.0 时代”。“BRAIN 2.0”的规划期限为 2020 年至 2026 年，其主要内容参见附表 3。

2. 欧盟

2013 年，欧盟启动了为期 10 年的人脑计划（Human Brain Project, HBP），旨在通过计算机技术模拟大脑，建立一套全新的、革命性的生成、分析、整合、模拟数据的信息通信技术平台，并促进相应研究成果的应用性转化。但在 2015 年，欧盟人脑计划放弃了在十年内实现人脑计算机仿真的研究目标，转而主攻认知神经科学和仿脑计算。该计划也进而转变成一个拥有 6 大信息及技术平台、12 个子项目的国际组织。这 6 大信息及技术平台包括：神经信息平台，用于登记、

搜索、分析神经科学数据；大脑模拟平台，用于重建并模拟大脑；高性能计算平台，用计算和储存设备去运行复杂的仿真计算并分析大量数据集；医学信息平台，用于搜索真实的病人数据，从而理解不同大脑疾病的异同；神经形态计算平台，借助计算机系统，模仿大脑微回路并应用类似于大脑学习方式的原则；神经机器人平台，通过将大脑模型与仿真机器人体和周围环境连接起来，并对其进行测试。在此基础上，该计划成功举办了第 10~12 届欧洲神经科学学会联盟（FENS）的神经科学大会（FENS 论坛 2016、2018、2020）。

3. 日本

2014 年，日本科学家发起神经科学研究计划，即日本脑计划（Brain/MINDS），旨在通过研究灵长类动物（狨猴）建立脑发育及疾病发生的动物模型。该计划受到日本文部科学省、日本医学研究与发展委员会为期 10 年共 400 亿日元（约合 3.65 亿美元）的资助。2018 年，日本成功绘制出了狨猴大脑的 3D 图谱。

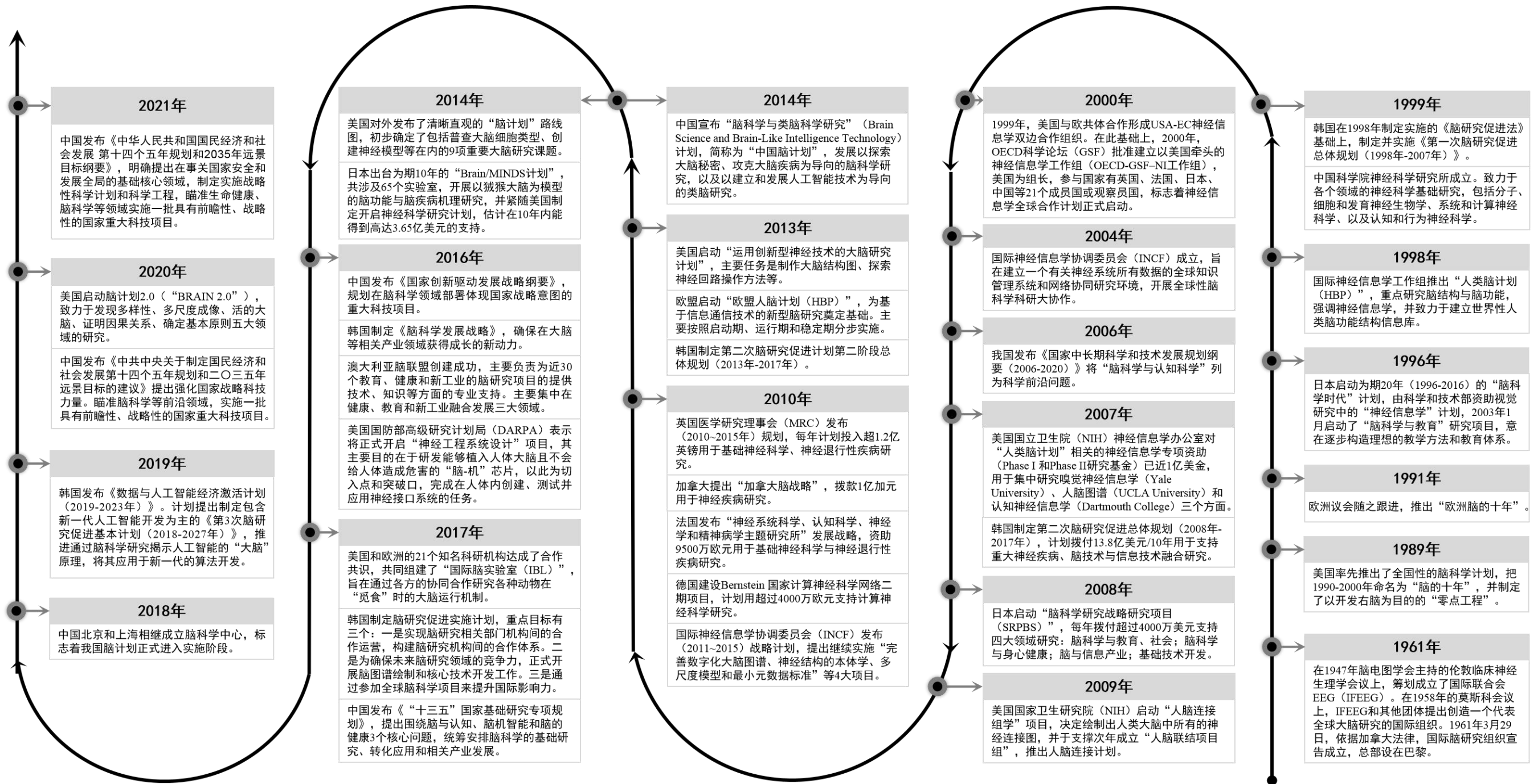
同年 9 月，日本正式启动人脑计划（Brain/MINDS Beyond），研究对象从狨猴大脑拓展到人类大脑，主攻以下 5 个方向：发现和干预初期的神经疾病，分析从健康状态到患病状态的大脑图像，开发基于人工智能的脑科学技术，比较研究人类和灵长类动物的神经环路，划分脑结构功能区域并开展同源性研究。

2019 年，日本通过对 2973 个个体进行分析发现，精神分裂症、躁郁症、自闭症谱系障碍、重度抑郁症患者的胼胝体白质结构存在相似变异，并且与正常个体差别显著。这为疾病分类提供了新的理论支持，在脑科学研究进程中具有重大意义。

4. 中国

2016 年，旨在探索大脑秘密、攻克大脑疾病、开展类脑研究的中国脑计划正式启动。该计划以阐释人类认知的神经基础（认识脑）为“主体”，以研发重大脑疾病诊治新手段和脑机智能新技术为“两翼”，主要解决大脑三个层面的认知问题：一是大脑对外界环境的感官认知，如注意力、学习、记忆以及决策制定等；二是对人类及灵长类动物自我意识的认知，即通过动物模型研究人类及灵长类动物的自我意识、同情心及意识的形成；三是对语言的认知，探究语法及广泛的句式结构，用以研究人工智能技术。

图 2.2 全球各国脑科学相关政策与布局发展历程



图片来源：中国电子学会、众诚智库、伏羲九针共同绘制，2021 年 2 月

二、研究现状

当前，全球脑科学研究主要集中在基础研究、应用研究、研究技术开发三个方面。在基础研究方面，全球每年发表约 10 万篇脑科学相关科研论文，研究阵营也逐渐由美欧两极向美欧亚三极转变，其中中日韩已成为亚洲地区最具实力的脑科学高地。在应用研究方面，全球每年脑科学相关专利申请量不足 5000 份，且呈逐年下降趋势，这说明当前脑科学仍以基础研究为主，还没有进入广泛应用阶段。在研究技术开发方面，主要以神经医学和脑图谱、脑成像等为主。

（一）发展综述

近五年来，全球脑科学在学科建设、技术创新、研究机构建设、资金投入等方面均取得了重大进展。

一是学科建设硕果累累。哈佛大学、斯坦福大学、伦敦大学学院、加州大学旧金山分校、麻省理工学院、哥伦比亚大学、牛津大学、宾夕法尼亚大学、圣路易斯华盛顿大学、约翰霍普金斯大学位列世界神经科学本科教育前十，专业教育水平遥遥领先。中国开设神经科学本科专业的院校已逾百所，北京大学、清华大学、上海交通大学、中国农业大学、南京大学、中国科学技术大学、武汉大学走在世界前列。

二是研究成果缤纷纷呈。五年来，全球公开发表的论文总量超 45 万篇，申请的专利总量近 2 万份。美国以 15 万篇科研论文、8000 余份专利申请量位居全球首位。中国的脑科学研究虽处于起步阶段，但北京、上海已具有在全球脑科学尖端领域竞争的能力。

三是研究机构规模庞大。美国是神经科学领域的超级大国，其神经科学实验室数量已达到惊人的 6000 余个，是中国类似实验室数量的 10 倍。欧洲的英国、德国、荷兰、瑞士、法国，北美的加拿大，亚洲的以色列、日本、韩国，也是神经科学领域研究机构的聚集地。

四是资金投入持续加码。世界各主要经济体对脑科学发展的扶持力度不断加码。进入 21 世纪以来，美国对神经科学（脑科学）的扶持资金超 20 亿美元/年⁹，欧盟、英国、法国、加拿大、日本和韩国也加大了投资力度。上述几个经济体每

⁹ 中国神经科学学会“神经科学方向预测及技术路线图研究”项目组.脑科学发展态势及技术预见.科技导报 2018, 36 (10)

年支持神经科学的资金规模超 30 亿美元/年，十分可观。

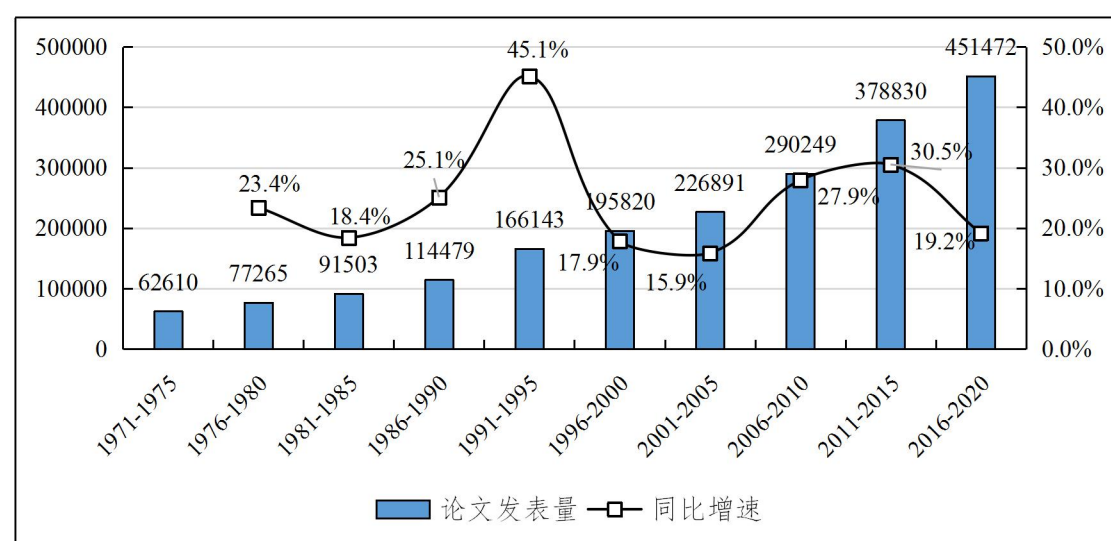
（二）研究现状

目前，中国脑科学研究发展迅速，但与发达国家相比，在论文发表、专利申请等领域仍然有较大差距。这从中美两国在脑科学领域的学术交流情况便可见一斑：2019 年，参加第 49 届美国神经科学学会年会（SFN）的嘉宾有 3 万余名，来自全球 80 多个国家，而参加中国神经科学学会年会的嘉宾仅有 3000 多人。

1. 全球

全球在脑科学领域发表论文数量的增长率，在 1991~1995 年、2011~2015 年出现过两个峰值；在 2015~2020 年虽有下滑，但仍达到了 19.2%，说明该领域研究热度始终不减，如图 2-1 所示。

图 2-1 1970~2020 年全球在脑科学领域发表论文的数量及增长情况



数据来源：Web of Science，2021 年 2 月

2016~2020 年，全球脑科学领域相关论文发表量超过 45 万篇。其中，美国在论文发表量、总被引频次、CNS 及其子刊论文数、ESI 高水平论文数、专利申请量等指标上均远超德国、加拿大、日本、意大利、法国、澳大利亚、英国和中国，居于世界霸主地位，如表 2-1 所示。而在高质量论文方面，美国则逊色于其他国家。

表 2-1 2016~2020 年主要国家在脑科学领域的论文发表和专利申请情况

国家	发表量	总被引频次	篇均被引频次	CNS 及其子刊论文数	CNS 论文数量占比	ESI 高水平论文数	ESI 论文数量占比	专利申请量
美国	149978	1080279	7.20	5802	3.87%	1781	1.19%	8675
德国	36010	471966	13.11	1627	4.52%	479	1.33%	7
加拿大	25790	334719	12.98	3096	12.00%	334	1.30%	634
日本	23912	204348	8.55	4631	19.37%	126	0.53%	362
意大利	23847	288939	12.12	3363	14.10%	251	1.05%	0
法国	19442	261242	13.44	689	3.54%	240	1.23%	2
澳大利亚	17455	243044	13.92	286	1.64%	259	1.48%	729
英国	13740	197768	14.39	605	4.40%	613	4.46%	28
中国	9861	72142	7.32	214	2.17%	225	2.28%	1730

数据来源：Web of Science 和佰腾（baiten），2021 年 2 月

2. 中国

目前，中国脑计划已经取得多项世界级的重大研究成果。

2017 年，北京大学研制成功重量仅为 2.2 克的新一代微型化双光子荧光显微镜，该显微镜可佩戴在动物的头部颅窗上，实时记录数十个神经元、上千个神经突触的动态信号，性能优于美国脑科学计划核心团队研发的微型化宽场显微镜。同年，华中科技大学的骆清铭教授带领团队成功研发出高通量双色精确成像技术，实现以细胞水平的高分辨率对整个小鼠脑进行 3D 成像和重建。

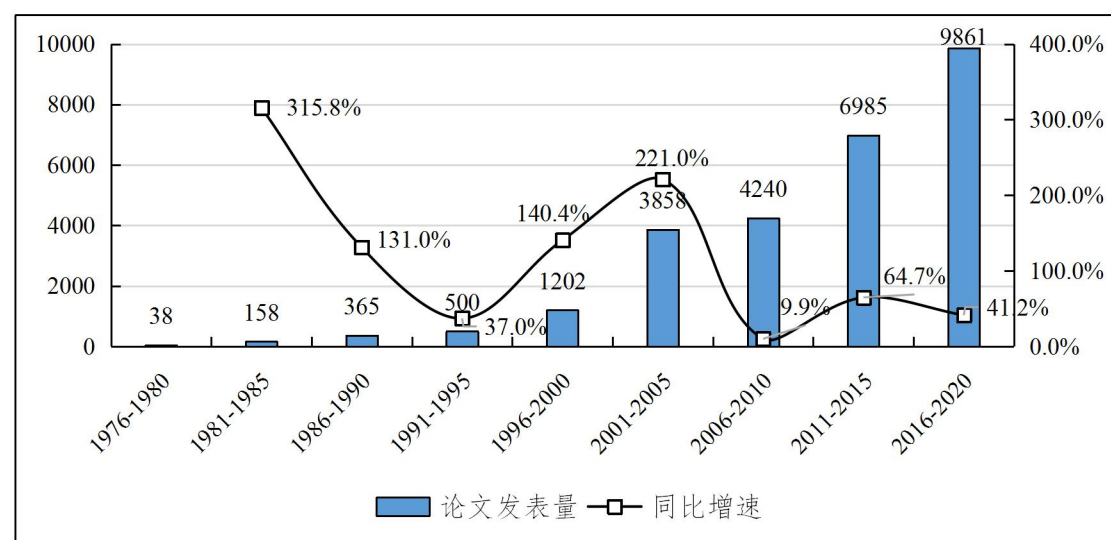
2018 年，清华大学戴琼海院士领衔的科研团队研制出新型超宽视场、高分辨率实时显微成像仪器（RUSH），具有 1 厘米×1.2 厘米宽视场、800 纳米高分辨率、30 帧/秒高帧率、1.69 亿像素/帧的高时空分辨率多维连续成像能力，可将活体动物脑神经观测数据通量由 1000 万像素/秒提升至 50 亿像素/秒，实现了兼顾“全局形态”和“细节特征”的多尺度观测。

2019 年，华中科技大学的骆清铭教授团队将单突触狂犬病病毒示踪剂与荧光微光学切片断层扫描相结合，生成了对雄性小鼠 mPFC 中 GABA 能中间神经元的直接远程输入的全脑图谱。该研究成果发表在国际顶尖杂志《Nature Neuroscience》上¹⁰。

¹⁰ Sun Q, Li X, Ren M, et al. A whole-brain map of long-range inputs to GABAergic interneurons in the mouse medial prefrontal cortex[J]. Nat Neurosci, 2019, 22 (8): 1357-1370.

中国在脑科学领域发表论文数量的增长率，在 2001~2005 年、2011~2015 年出现过两个峰值，在 2016~2020 年仍达到了 41.2%，远超同期全球 19.2%的水平，说明最近五年中国脑科学研究一直处于朝气蓬勃阶段，如图 2-2 所示。

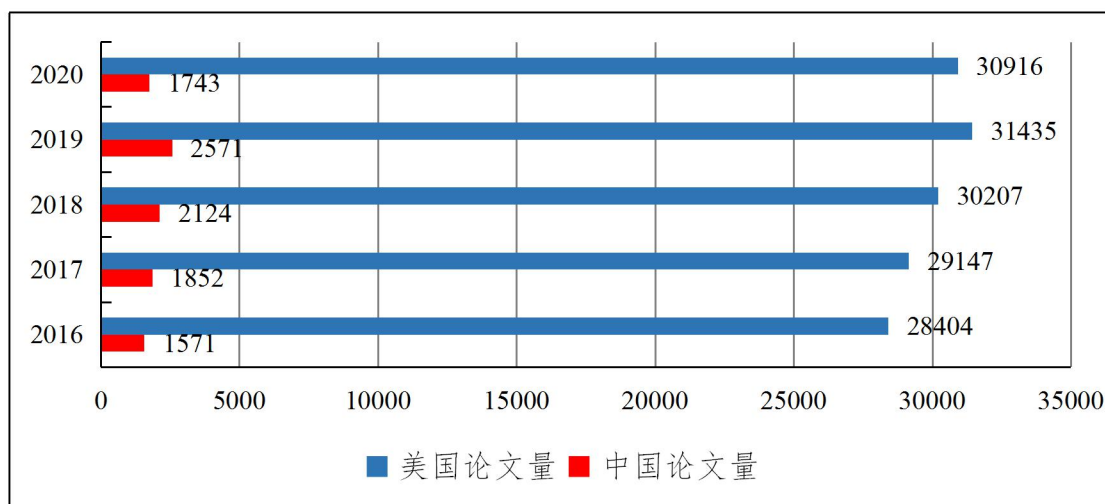
图 2-2 1976~2020 年中国在脑科学领域发表论文的数量及增长情况



数据来源：Web of Science，2021 年 2 月

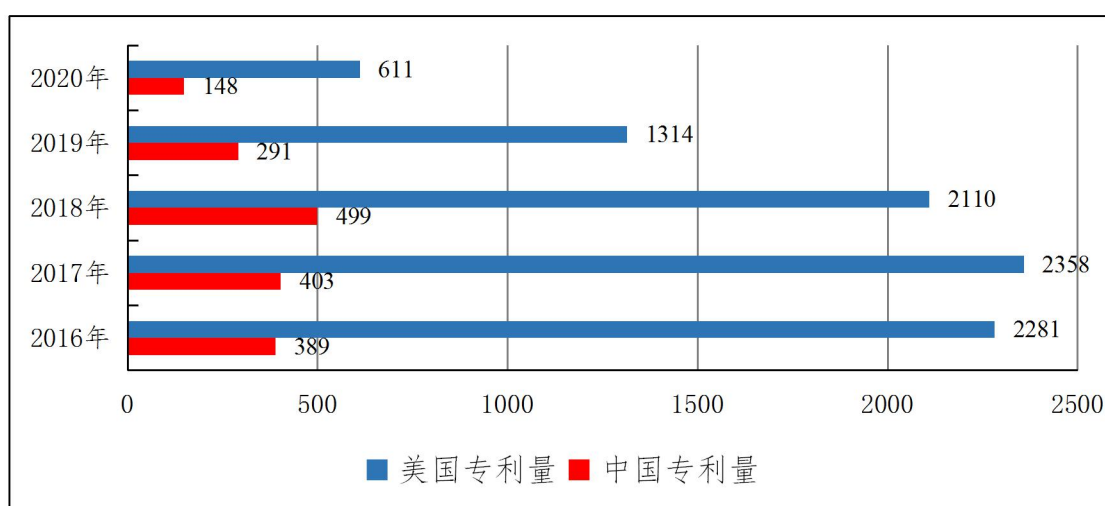
2016~2020 年，中国在脑科学领域共发表论文 9861 篇，远低于同期美国的近 15 万篇，如图 2-3 所示；申请专利 1730 项，也远低于同期美国的 8675 项，如图 2-4。这说明从论文发表和专利申请的角度，中国在脑科学领域与美国的差距十分巨大。2020 年，受新冠肺炎疫情影响，中美两国在脑科学领域发表文章和申请专利的数量均出现了下滑。

图 2-3 2016~2020 年中美两国在脑科学领域发表论文数量的对比



数据来源：Web of Science，2021 年 2 月

图 2-4 2016~2020 年中美两国在脑科学领域申请专利数量的对比



数据来源：佰腾（baiten），2021 年 2 月

（三）研究机构

从 2006~2020 年全球脑科学领域“发表论文量排行”与“专利申请量排行”两个指标，便可窥得当前全球脑科学领域的主要研究机构。

1. 全球

2016~2020 年，全球前 11 大脑科学领域论文发表机构主要分布在美国、加拿大、英国和中国。其中，美国有 7 家，分别是哈佛大学、约翰霍普金斯大学、宾夕法尼亚大学、加州大学旧金山分校、加州大学洛杉矶分校、加州大学圣地亚

哥分校、斯坦福大学；加拿大有 2 家，分别是多伦多大学和麦吉尔大学；英国的伦敦大学学院和中国的中国科学院也已上榜，如表 2-2 所示。

表 2-2 2016~2020 年全球脑科学领域主要文章发表机构 (Top11)

序号	机构名称	发表量	总被引 频次	篇均被引 频次	ESI 高水 平论文数
1	哈佛大学	14641	153029	10.45	360
2	多伦多大学	7483	61611	8.23	115
3	伦敦大学学院	7239	95806	13.23	236
4	约翰霍普金斯大学	6030	64848	10.75	156
5	中国科学院	5378	21409	3.98	32
6	宾夕法尼亚大学	5282	57067	10.80	136
7	加州大学旧金山分校	4835	68500	14.17	173
8	加州大学洛杉矶分校	4280	43738	10.22	96
9	加州大学圣地亚哥分校	4047	44540	11.01	104
10	麦吉尔大学	4009	41590	10.37	101
11	斯坦福大学	3648	51320	14.07	135

数据来源：Web of Science，2021 年 2 月

2016~2020 年，全球脑科学领域主要专利申请人以高校、生物医药企业为主，高校有加州大学、约翰霍普金斯大学、德克萨斯大学、利兰·斯坦福初级大学，生物医药企业有 IMMATICS 生物、诺华公司、霍夫曼罗氏公司、布里斯托尔·迈尔斯·斯奎布公司、基因泰克公司和艾伯维公司，如表 2-3 所示。其中，企业专利申请量是高校专利申请量的 1.4 倍，可见企业是脑科学领域专利申请的主力军。

表 2-3 2016~2020 年全球脑科学领域主要专利申请人 (Top12)

序号	申请人	专利申请量	占比
1	IMMATICS 生物技术有限公司	431	2.46%
2	加州大学董事会	283	1.61%
3	雀巢公司	164	0.93%
4	诺华公司	153	0.87%
5	约翰霍普金斯大学	144	0.82%
6	德克萨斯大学系统董事会	133	0.76%
7	利兰·斯坦福初级大学董事会	126	0.72%
8	霍夫曼罗氏公司	120	0.68%

9	公济医院	97	0.55%
10	布里斯托尔·迈尔斯·斯奎布公司	79	0.45%
11	基因泰克公司	69	0.39%
12	艾伯维公司	55	0.31%

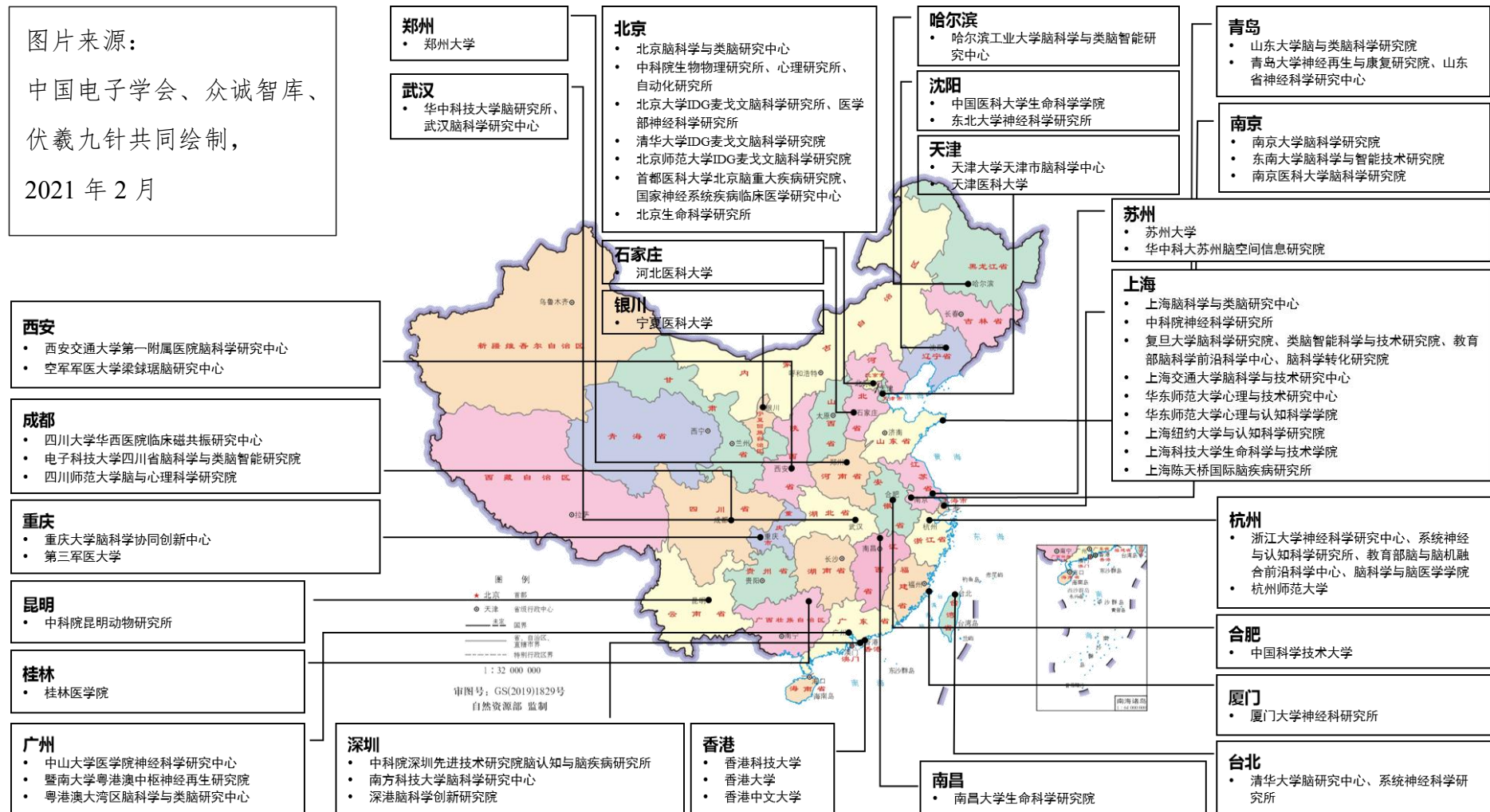
数据来源：佰腾（baiten），2021 年 2 月

2. 中国

目前，中国在脑科学领域已经形成了三大类研究主体。一是以上海脑科学与类脑研究中心、北京脑科学与类脑研究中心为代表的中国脑计划南北两个中心；二是以复旦大学脑科学前沿科学中心、浙江大学脑与脑机融合前沿科学中心为代表的教育部前沿科学中心¹¹；三是国内高校和科研院所成立的各类研究机构，如清华大学、北京大学、北京师范大学、中科院深圳先进技术研究院与 IDG 共建的麦戈文脑科学研究院。这些研究单位每年吸引大批海外脑科学人才回国，促进了中国脑科学研究的大发展。中国脑科学研究机构分布参见图 2-5。

¹¹截至 2020 年底，教育部已批准建设 14 个前沿科学中心，他们分别是：清华大学的量子信息前沿科学中心、同济大学的细胞干性与命运编辑前沿科学中心、天津大学的合成生物学前沿科学中心、四川大学的疾病分子网络前沿科学中心、浙江大学的脑与脑机事例前沿科学中心、北京大学的纳光电子前沿科学中心、复旦大学的脑科学前沿科学中心、武汉大学的免疫与代谢前沿科学中心、中国海洋大学的深海圈层与地球系统前沿科学中心、北京理工大学的高能量物质前沿科学中心、华东理工大学材料生物学与动态化学前沿科学中心、上海交通大学的变革性分子前沿科学中心、北京航空航天大学超循环气动势力前沿科学中心、东南大学的移动信息通信与安全前沿科学中心。

图 2-5 中国脑科学研究机构分布图



2016~2020 年，中国在脑科学领域的主要论文发表机构以医学院为主，高校和科研院所的论文发表量偏少，如表 2-4 所示。

表 2-4 2016~2020 年中国脑科学领域主要文章发表机构（Top 12）

序号	机构	发表量
1	北京大学第一医院儿科	25
2	四川大学华西第二医院儿科	25
3	北京中医药大学针灸推拿学院	16
4	湖北中医药大学针灸骨伤学院	15
5	中国中医科学院针灸研究所	14
6	中国科学院生物物理研究所	13
7	安徽中医药大学研究生院	13
8	中国中医科学院中医临床基础医学研究所	11
9	中国医学科学院北京协和医学院药物研究所	11
10	山西医科大学生理学系	11
11	首都医科大学宣武医院神经内科	11
12	首都医科大学附属北京天坛医院神经外科	11

数据来源：Web of Science，2021 年 2 月

2016~2020 年，中国在脑科学领域的专利申请量总体偏少，与美欧发达国家相比尚有很大差距。在前 15 名（Top15）专利申请机构或个人中，科研机构为中国贡献了 71.8%的专利量，企业贡献了 21.4%的专利量，个人贡献了 6.8%的专利量，这充分说明中国在脑科学领域的研究仍以基础研究为主，且部分领域已进入产业化应用阶段。如表 2-5 所示。

表 2-5 2016~2020 年中国脑科学领域主要专利申请人（Top15）

序号	申请人	申请人专利量
1	诺华股份有限公司	16
2	中国医学科学院药物研究所	15
3	苏州大学	10
4	复旦大学	10
5	中国科学院	8
6	温州医科大学	8
7	台湾中央研究院	8
8	深圳市老年医学研究所	4
9	吴正治	4

10	中国医科大学	4
11	台湾马凯纪念医院	4
12	台湾大江生医股份有限公司	3
13	北京韩美药品	3
14	陆志伟	3
15	台湾布里恩研究所	3

数据来源：佰腾（baiten），2021 年 5 月

三、应用现状

（一）应用现状综述

脑科学的重要性毋庸置疑，其研究成果的应用推广对全人类来说意义非凡。但目前其应用领域还十分有限，主要有两大方面，一是在脑科学促进学科融合发展方面，脑科学与其他学科之间不断交叉拓展、向纵深融合，催生了新兴学科、新兴科技的诞生和繁荣，如神经教育学、脑机接口的兴起；二是研究成果直接应用于其他领域，如仿生科技、人工智能、医疗、军事等。

（二）脑科学主要应用领域

1. 脑机接口

脑机接口是指在人或动物大脑与外部设备之间创建的直接连接，从而实现脑与设备的信息交换。脑机接口技术主要应用于人机交互、革命性假肢（神经控制假肢）、神经预测与新兴疗法、恢复主动记忆和 RAM 重播、神经工程系统设计、下一代非侵入性神经技术等领域。

在人机交互领域，主要应用包括语音交互、智能操控、真人与虚拟影像互动等。神经科学家菲尔·肯尼迪（Phil Kennedy）曾研发“侵入式”脑机接口，让一位严重瘫痪的病人用大脑控制电脑光标以打字“发声”，通过回答“是”或“否”实现人机交流沟通。

在革命性假肢（神经控制假肢）领域，美国国防部高级研究计划署（DARPA）“革命性假肢”计划已经改造多款世界上最先进的假肢。这些假肢可以通过线路对手指和脚趾的动作产生反应。下一步，这些假肢将会与佩戴者的神经系统整合在一起，完全能够对各种神经信号作出反应。

在神经预测与新兴疗法领域，研究人员把个体大脑信息与其他数据融合，进行大数据分析，并实现个性化的神经预测，主要包括智力测验、认知障碍分析、脑疾病诊断等，甚至包括犯罪倾向预测等。通过对眼窝前额皮质进行开环的神经刺激，来调节与抑郁相关的大脑子网，从而缓解中度和重度抑郁。

在恢复主动记忆和 RAM 重播领域，主要是开发和测试用于人类临床的无线、完全可植入的闭环神经接口系统。该接口能够感知由损伤引起的记忆缺陷，并提供针对性的神经刺激以恢复正常的记忆功能，从而帮助因疾病或创伤导致记忆力减退的患者恢复记忆。

在神经工程系统设计领域，通过开发一款可植入的神经接口，能够在大脑和计算机之间建立超过 100 万个神经元级别的双向通信系统，并提供空前的信号分辨率和数据传输带宽。

在下一代非侵入性神经技术领域，通过开发新一代的高分辨率非侵入式双向脑机接口，可同时写入和读取多个脑位点的信息，提高士兵与武器装备的高水平交互能力，以及士兵的超级认知、快速决策和脑控武器装备等超脑和脑控能力。

2. 仿生科学

仿生学就是在工程上实现并有效地应用生物功能的一门学科，例如信息接受（感觉功能）、信息传递（神经功能）、自动控制系统等。仿生学与神经科学交叉融合，诞生了许多新兴科研领域和科技成果，如疏通血栓的微型机器人即将进入临床应用，能够杀死癌细胞的微型机器人也已研发成功等。

3. 人工智能

脑科学与类脑科学（智能）是人工智能发展的基础。目前，全球人工智能研究正向机器智能进化，但仍有很多技术难题需要克服，如机器人还不够灵活，仿真模拟仍没有达到人类那样的协调性和灵活性，还需要大规模的高质量数据样本进行更加精确的计算。人工智能仍缺乏高级认知能力和深度学习能力，尤其在可解释性、推理、举一反三等方面，与人脑的学习能力相比还有巨大的差距。现有算法与期望结果之间的差距，迫切需要对脑科学进行更加深入和精准的研究。

4. 医疗领域

目前，包括各种神经类和精神类疾病在内的脑相关疾病，已经超过心血管病和癌症成为人类健康最大的威胁。例如，婴幼儿脑发育障碍所导致的癫痫、中风、自闭症，青壮年人群中的抑郁症、躁狂症，老年人神经退行性疾病，颅脑创伤后的应激综合征、植物人状态、神经损伤修复等。

脑科学的快速发展，为科学家研制新的治疗药物和治疗策略提供了可能。例如，依据抑郁症病理机制，研发出抗抑郁有效药物——谷氨酸受体（NMDAR）抑制剂氯胺酮；通过靶向大脑中的小胶质细胞，实现神经保护和再生，帮助修复和减轻因脑损伤引起的认知缺陷；通过运动诱导 AHN、提高脑源性神经营养因子（BDNF）水平，可以预防阿尔茨海默病；使用神经营养因子或结合辅助药物治疗帕金森病。

5. 教育领域

脑科学领域的大脑神经突触生长呈倒 U 状模型学说、智力可塑性学说、多元智能理论和“情感智力”理论等，激发了人们对传统教育的反思。一方面，脑科学的发展推动着教育观、教育方式和教育体系的转变¹²。教学过程就是学生脑智力开发的过程。教育必须适应学生身心特点和规律，教学活动必须根据青少年智力发展情况来开展。科学地进行早期教育和学校教育，才能更好地促进学生脑发育，达到更好的教学效果。另一方面，脑科学的研究成果也推动着教育评价体系的转变。不同类型的脑智能是学生个性化发展的基础，不能用单一的标准对学生进行评价。新型教育评价方式和评价体系的创建，既有助于学生素质的全面发展，又能使学生的特长得到充分挖掘和发展，并使学生保持良好的心态和进取精神，最大限度地预防、减少和精准干预学生的心理障碍和心理疾病。

6. 军事领域

脑科学在军事领域的应用直接关系到国家安全。其在军事领域的应用主要包括四个方面¹³：研制类脑军用机器人，以提升军事实力，并有效降低军事投入中的人员损耗；研发脑控武器装备，以更加智能的方式操控武器；云控制敌方大脑，扰乱敌方大脑功能，甚至反指导敌方的军事行动；开发军事智联网和脑联网，通过脑机接口技术实现大脑与外界的信息交流和控制，开启人机、人人、物物、人物互通有无的智联时代。

美国国防部在以杜克大学神经工程中心为代表的全美 6 个实验室中开展了“思维控制机器人”研究，美国国防部高级研究计划局（DARPA）则开展了名为“阿凡达”的尖端军事科研项目，旨在扩展人类机能，控制进攻性武器。此外，“仿脑”技术的问世将大幅提高无人系统的智能化水平，为包括“作战云”服务、军用机器人在内的多个领域带来颠覆性变革。

未来，人们或可开发出基于脑联网的脑脑协同作战平台，实现战场感知、后勤保障、武器装备与指挥系统的高度优化与集成。从而使各作战环节和指挥效能得以最大限度地发挥，在瞬息万变的战场态势中捕获稍纵即逝的先机，实现出奇制胜。

¹² 丁峻,张义芳.神经教育学的教育观:思想启示与现实应用[N].青岛大学师范学院学报.2011.1:17-24

¹³ 季自力,王文华.加快推进脑科学在军事领域的应用[J].中国人民防空.2020.1:66-69

四、发展趋势

随着脑科学的快速发展，全球需在信息共享、风险防范和道德伦理等方面加强合作，为脑科学创造更加健康有序、和谐稳定的发展环境。

（一）绘制高分辨率脑图谱将是脑科学研究的重要方向

脑图谱绘制将向微观和宏观两个方向延伸。在微观层面，通过绘制人脑细胞结构图谱，已从人类大脑皮层“颞中回”鉴定出 75 种兴奋性和抑制性神经元；通过重建 1000 多个神经元并追踪其在大脑中的分支路径，构建了最大的神经元数字集合。在宏观层面，模拟出完整的小鼠脑图谱，建立了脑细胞分子、解剖和生理注释的 3D 通用脑细胞图集，构建了小鼠大脑综合神经环路图；已绘制出人类小脑的高分辨率图谱。除此之外，脑科学与人工智能技术融合，为建立从机器感知、机器学习到机器思维、机器决策的颠覆性模型和工作方式提供了可能。

（二）类脑芯片将成为信息技术的重要发展方向

信息技术的快速发展为脑科学研究提供了强大的支撑工具，脑科学的进步反过来又会推动相关信息技术的发展。例如，近年来类脑计算成为信息技术的重要发展方向，以人脑为原型的类脑芯片逐渐成为研究热点。这就需要研发基于非常规计算的芯片架构，使芯片具备类脑功能，以满足新型智能体的脑机融合需求。构建类脑计算机不仅有助于更加高效地处理、利用海量脑数据，从而更好地实现脑机融合，进一步完善类脑芯片的设计与实现，研发基于非常规计算架构、具备类脑功能的、新型的智能体与机器人。

（三）治疗脑疾病的新方法将受到资本市场的青睐

目前，脑科学的产业化应用主要有三个方向，一是神经监测与成像检测，二是神经疾病治疗与调节，三是脑控制与模拟。其中，治疗脑疾病的新型药物无疑将极大造福人类，因而受到资本市场的青睐。近十年来，脑科学领域的融资活动主要集中在脑疾病治疗与药物研发、脑信息监测与检查两大方向。如美国蒙特利医疗公司（Monteris Medical）开发了可帮助外科医生消融脑肿瘤或脑部病变组织的 NeuroBlate®系统，因而受到资本市场的追捧，融资金额已超过 1.2 亿美元。

（四）加强国际合作是推动脑科学健康发展的重要途径

为推动各国脑计划协同合作，美国、欧盟、日本、中国、加拿大、澳大利亚、韩国于 2017 年组建了国际脑科学计划（International Brain Initiative, IBI）组织。

2019 年 3 月，中国科技部在上海主办了 IBI 的国际脑科学计划协调会议。与会各国研讨了 IBI 的发展方向、运行模式和实施路径，就推动脑科学国际合作、促进脑科学新发现与技术进步、提升人类福祉等问题进行了探讨。未来，IBI 将建立有利于研究成果转化应用的创新合作机制，重视人脑与认知相关的数据隐私及多方数据共享，建立符合科学伦理的监管机制，推动脑科学领域成果的教育与普及。

附表 1 脑科学、神经科学、类脑科学、认知科学、生命科学概念辨析

序号	名称	概念	出处	辨析
1	脑科学	狭义的脑科学一般指神经科学，是为了了解神经系统内分子水平、细胞水平、细胞间的变化过程，以及这些过程在中枢功能控制系统内的综合作用而进行的研究。	美国神经科学学会	脑科学过去一般被认为就是神经科学。但随着脑科学外延的不断拓展，神经科学已不能囊括脑科学的全部要义，而仅仅被认为是狭义的脑科学。广义的脑科学主要研究人和动物大脑的结构和功能，防治神经和精神疾患，发展模拟人脑部分功能的神经计算机。
2	神经科学	神经科学是研究人与动物神经系统（主要是脑）的结构与功能，在分子水平、细胞水平、系（复杂的神经回路或神经网络）水平、行为水平以至认知水平（自我感识、想象、思维）阐明神经系统特别是脑的活动规律的学科群。 ¹⁴	《神经科学（第三版）》	为了了解脑的工作原理，神经学家们主要从分子神经科学、细胞神经科学、系统神经科学、行为神经科学、认知神经科学 5 个层次进行研究。广义而言，神经科学研究与神经科学家分为两大类：临床类和实验类。临床类主要由医生（医学博士）来进行。研究领域主要包括神经内科学、精神病学、神经外科学和神经病理学。
3	类脑科学（类脑智能）	类脑研究是以“人造超级大脑”为目标，借鉴人脑的信息处理方式，模拟大脑神经系统，构建以数值计算为基础的虚拟超级脑，或通过脑机交互，将计算与生命体融合，构建以虚拟脑与生物脑为物质基础的脑机一体化的超级大脑，最终	中国计算机学会	脑科学和类脑智能是两个重要的前沿科技领域，二者相互借鉴、相互融合。脑科学研究对大脑认知神经原理的认识，提升了人类对自身的理解和脑重大疾病的诊治水平，也为发展类脑计算系统和器件、突破传统计算机架构的束缚提供了重要的依据。 ¹⁵

¹⁴ 韩济生.神经科学（第三版）[M].北京大学医学出版社, 2009.1: 3¹⁵ 蒲慕明,徐波,谭铁牛.脑科学与类脑研究概述[J].中国科学院院刊, 2016,31(7): 725-736

		建立新型的计算结构与智能形态。 ¹⁶		
4	认知科学	认知科学是探究人脑或心智工作机制的前沿性尖端学科。而心智是脑和神经的功能，脑与心智之间的桥梁就是认识。	百度百科：认知科学	脑与认知科学是研究脑结构与功能、认知与智能的本质与规律的科学，主要包括神经生物学、认知神经科学和心理学等分支学科。 ¹⁷
5	生命科学	生命科学是生物学的一个分支，是研究生物（包括植物、动物和微生物）结构、功能、发生和发展规律的科学。	百度百科：生物学	脑科学被称为生命科学的终极疆域，是现代认知科学乃至整个生命科学面临的最大挑战。脑科学研究对提高人们的健康水平、生活质量具有重要的现实意义。

¹⁶ 吴朝晖,潘纲.类脑研究：概念、内容及挑战[J].中国计算机学会通讯, 2020 年 4 月,16(4): 44-49

¹⁷ 信息来源于《国家自然科学基金“十二五”发展规划》

附表 2 脑科学的主要研究方法

序号	技术流派	技术路线	现状
1	生物解剖学	①通过医疗手术发现人体器官与大脑之间的连接关系；②大脑解剖，研究其形态、构成及各部分功能，初步认识脑；③脑切片研究，发现神经元细胞与神经网络；④神经元细胞分子结构、元素构成和功能原理研究；⑤大脑皮层及分区功能研究。	生物解剖学是早期脑科学的研究方法。今天，生物解剖学对活体动态脑活动的研究已不再适用，但在细胞分子研究层面还有一定作用。
2	电生理学	①大脑外部电刺激，结合反射生理学初步研究大脑皮层的功能；②对脑内部器官进行电刺激，通过电活动记录研究脑器官各部位的功能；③发现生物电，通过外部电刺激结合内部生物电活动的记录深入研究脑功能。④通过细胞分子电活动记录研究脑信号传递（如发现钠离子通道）的工作原理。⑤通过膜片钳技术的应用，记录单个或多个离子通道电流，研究脑信号传递的原理；⑥结合计算机硬件与软件，主要有微电极阵列及其接口、神经信号数字化与分检系统、动物行为控制与记录系统等，实现对清醒动物神经元单位放电多通道同步记录，从而为绘制脑电图打基础。	电生理学几乎贯穿于脑科学研究的全过程。如今，对脑电信号传递的研究始终离不开电生理学的应用。
3	生理学及生物化学	①运用光学显微镜与化学溶液浸泡观察脑切片，发现神经元及神经网络系统；②运用电子显微镜发现神经系统中化学传递物质乙酰胆碱；③结合生理学研究神经元及其突触等的信息传递功能。	生理学和生物化学已成为脑科学研究的基本方法之一，在学科教育中已全面普及。
4	细胞分子学	①在解剖学、电生理学、生理及生物化学等基础上，通过细胞外电极、放大器、示波器与计算机等对神经细胞进行引导与记录；②通过突触前刺激，记录引起的突触后神经元的反应，结合药理学方法，调控所记录的细胞的内外液成分，准确而有效地进行突触传递功能的分析；③结合电生理学，对神经元细胞体、树突、轴突等的信号传递工作机理进行研究；④对细胞体、树突、轴突等内的核糖体、内质网、离尔基复体、线粒体、溶酶、蛋白酶体、分泌泡和吞噬体等的作用进行研究，以及 RNA、蛋白质合成、核糖体和 mRNA	细胞分子学是脑科学微观领域的主要研究方法，也是目前研究最深入的方法之一。其在预防脑部损伤与疾病、大脑潜在功能开发（智力开发）、脑相关疾病治疗、脑发育等领域发挥着至关重要的作用。

	在信号传入、钠离子通道与钾离子通道和其他分子通道、化学性突触与电突触和混合性突触在信号输入、输出、信号传递等方面的研究。	
5 脑成像技术	①光学显微技术结合化学染色来检测和观察脑的形态与功能，发明了荧光显微成像技术；②激光共聚焦及双光子激光扫描显微镜成像技术应用到脑科学研究中来，可以高分辨率观察脑细胞与分子活动；③功能性磁共振成像技术在神经科学领域被广泛应用，成为无创性脑成像的重要手段；④集低温超导、生物工程、电子工程、医学工程等 21 世纪尖端科学技术于一体的脑磁图技术诞生，实现无创伤性地探测大脑电磁生理信号，使研究大脑的复杂功能、治疗脑部疾病的能力达到了前所未有的境界；⑤穿颅磁刺激技术被用于脑科学研究的实验模拟中，通过电流流过被试者头皮上的线圈，干扰特定的皮质功能，捕捉高清动态的神经元细胞活动影响进行脑科学研究。	脑成像技术是脑科学宏观领域的主要研究方法，是目前最复杂、最前沿、难度最高的研究方法，对绘制完整详细的脑图谱至关重要，也是脑机接口、仿生技术、人工智能等领域的关键支撑技术。21 世纪之所以成为脑的世纪，主要也得益于脑成像技术的成熟与应用。

资料来源：中国电子学会、众诚智库、伏羲九针共同总结，2021 年 2 月

附表 3 美国 “BRAIN 2.0” 主要内容

序号	发展方向	主要内容
1	发现大脑多样性	(1) 短期目标: 为细胞类型建立数据生态系统; 建立统一的脑细胞类型分类; 实现对多物种细胞类型的遗传和非遗传操作; 利用细胞普查数据更新和测试神经回路功能的模型和理论; 开发蛋白质标签, 尤其是具有跨物种适用性的蛋白质标签; 在保留细胞类型信息的同时, 创建多尺度的细胞重建、连接和功能映射; 将单细胞多模态分析扩展到其他物种, 包括 NHP 和人类大脑。 (2) 长期目标: 整合建立细胞类型数据平台以进行理论研发; 在 6 到 10 个物种中, 用高粒度以及遗传和非遗传的途径, 进行全脑解剖解析普查; 支持开发模拟人脑的三维细胞系统 (有机体/组装体)。
2	大脑多尺度影像	(1) 短期目标: 提高清除和标记方法的通量; 继续开展和扩展神经调节作用的研究, 包括微观、中观及宏观尺度的研究; 改进活细胞中的跨突触逆行病毒追踪; 在啮齿动物和 NHP 的大脑研究中, 将光学成像和电生理学与功能磁共振 (fMRI) 方法相结合; 继续努力绘制个体动物大脑的结构和功能图; 通过使用核磁共振、其他电磁方法或者聚对苯二甲酸乙二醇酯, 从而加深对大脑微观结构的无创测量的理解; 从结构和功能测量中可重复性地描述个体大脑差异 (包含整个生命周期)。 (2) 长期目标: 在电磁水平整体评估全小鼠大脑连接体; 从功能特征明显的个体动物的大脑中获取完整的灵长类动物 (NHP, 然后是人类) 大脑投射图; 实现全脑、高分辨率 (时空)、不受快速梯度切换和高场射频线圈生物学限制的功能性磁共振; 应用机器学习方法比较小鼠及人类大脑的同源区域。使用改进的高通量清除和标记方法, 以及快速连续切片电磁工具研究人类皮层和皮下结构; 建立高通量模式, 为关键的分子靶点 (如神经调节受体、突触) 开发和应用新型 PET 示踪剂; 结合载体和离体数据, 建立人体大脑结构和功能之间的基本联系, 包括自然变异的作用。
3	活的大脑	(1) 短期目标: 探索短期和长期行为期间不同细胞类型、神经调节剂和神经活动之间的实时相互作用; 将超声方法与直接感知神经活动相结合; 开发新的 NHP 大脑记录和成像技术; 开发新的工具用来分析原始的和后天训练过的行为; 开发新的工具用来连接某种行为, 以及大脑对应这种行为的数据记录; 整合在模型系统之间的技术开发和信息传递; 继续推进电生理技术; 继续研发光学记录技术; 开发更好的记录细胞活动的光学仪器; 建立动态方法, 实时检测特定神经肽在体内的释放; 开发标记活跃神经元的方法; 在人类大脑回路分析的研究中, 将神经伦理学的讨论和建议贯穿到整个实验和研究过程。

		(2) 长期目标: 测量必须同时记录的细胞数量, 在给定的精度水平上解释特定的行为; 开发分析工具, 建立大规模神经群体活动和复杂行为之间的因果关系; 人脑中高速神经活动的成像。
4	证明因果关系	(1) 短期目标: 建立在移动动物和深层神经结构中进行精确单细胞光遗传学控制的方法; 测量以可检测的方式改变行为所需的最少神经元数量; 测量特定的不适应行为障碍的因果回路; 扩展能够在模型生物(啮齿动物和果蝇)中进行复杂行为分析的机器学习算法; 制定策略, 对特定回路动态进行定量的、可调的实时扰动; 校准扰动与自然发生的信号, 以测量时间和环境变化对行为的影响; 预测和控制扰动的行为后果; 确定感兴趣的关键适应性行为的因果路径; 解决遗传扰动工具在灵长类动物身上的挑战; 通过实时的神经系统整合分析, 使神经回路操作和活动记录之间直接关联; 将新兴的扰动工具应用于目前难以通过既定技术研究的回路; 整合扰动技术与 BRAIN 计划的其他关键技术; 支持神经伦理学研究(概念性和经验性的); 确保公平参与研究; 阐明更接近人类生理的 NHP 模型的伦理含义。 (2) 长期目标: 绘制相应的生理和行为图谱; 将基于纳米材料的技术应用于神经回路研究; 开发新的神经精神疾病诊断和治疗设计方法; 每年将多个单细胞扰动的规模提高大约一个数量级; 开发并应用声学 and 磁性方法来进行扰动和读出大脑深处的区域。
5	确定基本原则	继续开发分析大型复杂数据库的技术; 建立多尺度的联系; 识别一般原则; 加速理论、建模、计算、统计理念和技术在神经科学部门和项目中的结合。
6	人类神经科学	(1) 短期目标: 开发更好的方法来获取、保存和研究来自外科手术和死后样本的活体人体组织, 使对人类大脑和周围和自主神经系统的研究成为可能; 增加对临床前和临床模型中深脑刺激和闭环调节机制的理解; 将研究扩展到侵入性设备之外; 继续投资于非侵入性成像仪器的物理/工程; 为开发人类神经科学使用的工具的团队建立标准; 支持跨学科研究; 支持神经生物学以外的以神经科学为导向的科学家培训; 改善数据访问路径; 为人类的神经刺激和神经调节制定一套可操作的神经伦理指南。 (2) 长期目标: 开发更好的针对人类神经元和神经胶质的技术和检测系统; 发现并验证新型 PET 示踪剂, 以监测人类突触中的神经活动和分子标记; 改善电生理源定位; 开发多尺度方法和工具用来结合使用不同实验方法得到的数据; 开发合适的模型来探索疾病状态和治疗机制。
7	其他	(1) 科学组织: 推进数据共享; 吸引更多人力资本, 创建并扩大支持机制, 增加创业基金支持; 分享和使用 BRAIN 计划技术和成果; 公众参与; 脑病患者惠及计划。 (2) 融合发展: 促进上述六项融合发展。

版权所有

欢迎您提出问题与建议

王洁瑶

中国电子学会国际合作中心项目主管

+86 10 68600707

ciewangjieyao@163.com

徐 英

众诚智库高级研究员

+86 10 53605040

service@uthinktank.com

鲁远航

伏羲九针研究员

+86 10 13522277082

luyuanhang@fuxijiuzhen.com

本报告仅为一般性建议参考。

读者不应在缺乏具体专业建议的情况下，擅自根据报告中的任何信息采取行动。

中国电子学会、众诚智库、伏羲九针将不对任何因采用报告信息而导致的损失负责。

© 2021 中国电子学会、众诚智库咨询顾问（北京）有限公司、伏羲九针智能科技（北京）有限公司 版权所有

关于我们

中国电子学会（以下简称“学会”）是由国内电子信息领域科技工作者和有关企事业单位自愿结成并依法登记成立的学术性、公益性、非营利性法人社团，是党和国家联系电子信息领域科技工作者的桥梁和纽带，是发展我国电子信息事业的重要社会力量。学会成立于 1962 年，目前设有 9 个工作委员会、46 个专业分会、1 个编辑委员会，覆盖了半导体、计算机、通信、雷达、导航、微波、广播电视、电子测量、信号处理、电磁兼容、电子元件、电子材料等电子信息科学技术的所有领域。

众诚智库咨询顾问（北京）有限公司（简称众诚智库）是专注于“政府决策支撑”和“新型智慧城市建设”国家高新技术企业，也是首家在“国家双创板”挂牌的咨询公司（股权代码：E00286）。凭借在政府资源、专业技术能力、产业生态等方面的独特优势，众诚智库致力于为政府提供高质量发展、产业转型升级、智慧城市规划设计及招商引资服务。

伏羲九针智能科技（北京）有限公司，是专注于“智能穿刺输液机器人”研发和生产的高科技公司，产品在医院、养老院、手术室、病房、航天空间站等场景应用广泛，极大提高穿刺精度和效率，降低病人痛苦，减少护士工作，保护医护人员健康。伏羲九针院士、国千等高层次人才数量众多，具有自主知识产权 10 余项。目前 FUXI 机器人已进行万余例活体动物试验和百余例人体临床试验，理念全球首创，技术世界领先，市场空间极为广阔。

