

面向未来的中国科学院脑科学与类脑智能研究

——强化基础研究，推进深度融合*



王力为¹ 许丽² 徐萍² 于汉超¹ 孔明辉¹ 沈毅¹ 张永清¹

1 中国科学院前沿科学与教育局 北京 100864

2 中国科学院上海生命科学信息中心 上海 200031

摘要 脑科学与类脑智能技术相互借鉴、相互融合代表了未来脑科学与类脑智能研究的新趋势。中科院在脑科学研究上具有深厚积累和特色优势，率先启动了“脑功能联结图谱”战略性先导科技专项（B类），选择感知觉、学习记忆等几种重要大脑功能，绘制其神经环路图谱，解析其信息处理加工规律；率先在脑科学和智能技术两大领域进行实质性融合，在先导专项中扩充了类脑智能研究内容，成立了中科院脑科学与智能技术卓越创新中心，全面推进脑科学与类脑智能研究深度融合，为我国智能产业的发展提供科技引领与支撑。在分析国际脑科学与类脑智能发展态势的基础上，文章阐述了中科院在脑科学与类脑智能研究方面的部署，提出了进一步加强脑科学与智能技术融合的举措与建议。

关键词 脑科学，类脑智能，融合，中国科学院

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2016.07.003

1 脑科学是生命科学的研究前沿，是社会经济发展的需求

脑科学是以脑为研究对象的多学科汇聚的新兴研究领域，是研究人、动物和机器的认知与智能的本质与规律的科学。脑科学研究的核心问题是人类认知、智能和创造性的本质以及意识的起源：包括从较为初级的感觉、知觉，到较为高级的学习、记忆、注意、语言、抉择、情绪、思维与意识等各个认知层面的脑高级认知功能。人类大脑是自然界中最为复杂的系统之一，其复杂性表现在，它由1000亿个神经元细胞组成，含有100万亿以上的突触连

*修改稿收到日期：2016年6月3日

接，具有非凡的信息处理与决策能力，它是一切人类智力产生的基础（图1）。正是因为有了极为复杂的大脑，智力才能产生，人类才能不断地认识自然、改造自然，创造出多姿多彩的文明。同样由于大脑的高度复杂性，对大脑工作原理的理解是人类认识自然和自身的终极挑战。脑科学是21世纪最重要的前沿学科之一。脑科学研究不但可以绘制“人类智力蓝图”，还可推动人工智能、信息技术等的发展。因而，脑科学和类脑智能领域研究近几年受到广泛关注，相关技术开发、脑联结图谱绘制、记忆操控，以及类脑智能的发展等重大突破多次被列入*Science*、*Nature*等权威杂志的年度十大突破中。

与此同时，随着社会生产、生活节奏的加快和人口老龄化的加剧，青少年神经发育性疾病、中青年情绪精神类疾病、帕金森病和阿尔兹海默症等退行性神经系统疾病所带来的社会经济负担已超过心血管病和癌症，加强脑科学研究，对脑疾病的诊断治疗将有关键性的贡献。另一方面，对人脑认知神经机制的理解可能为新一代人工智能算法和器件的研发带来新启发，为信息智能领域的产业升级带来颠覆性的变革突破。

2 世界各国争相布局，脑科学研究迈入跨学科多层次时代

神经科学和计算科学的突飞猛进，推动了许多雄心

勃勃的大脑研究计划浮出水面。2013年，欧盟与美国两项脑科学重大计划的提出，将该领域的研究热潮推向一个新高度。欧盟“人脑计划（HBP）”^[1]侧重于以超级计算机技术来模拟脑功能，为人工智能的开发建立新研究平台，进一步带动仿生的发展；美国“通过推动创新型神经技术开展大脑研究（BRAIN）”计划^[2]则更加重视脑科学研究新工具和新技术的开发，从而带动基于基础性研究的新学科和新产业的发展；此外，日本于2014年出台的为期10年的“Brain/MINDS计划”^[3]，则聚焦于以猕猴大脑为模型研究脑功能和脑疾病的机理。尽管各国脑计划不完全相同，但最终目标均是了解大脑，并将研究成果用于脑部疾病治疗^[4]和人工智能开发。因而，国际脑科学研究逐渐从基于脑部结构和功能研究相关疾病转变为更加注重学科的交叉和融合，通过与高技术开发和产业的结合，进一步刺激经济的增长。德国、法国等国也纷纷部署脑科学相关研究计划，进入抢占科技战略制高点的行列。2016年，多个国家的60余名神经科学家齐聚美国，讨论开展脑科学的全球合作，力图推动“国际大脑空间站”的建设。

脑科学研究是具有综合交叉和科学前沿双重特点的重大科学问题，在政策的强力支持和技术推动下，脑科学研究开始迈入分子—细胞—脑—行为，直至社会的跨学科、多层次研究。信号记录及监测技术、脑图谱绘

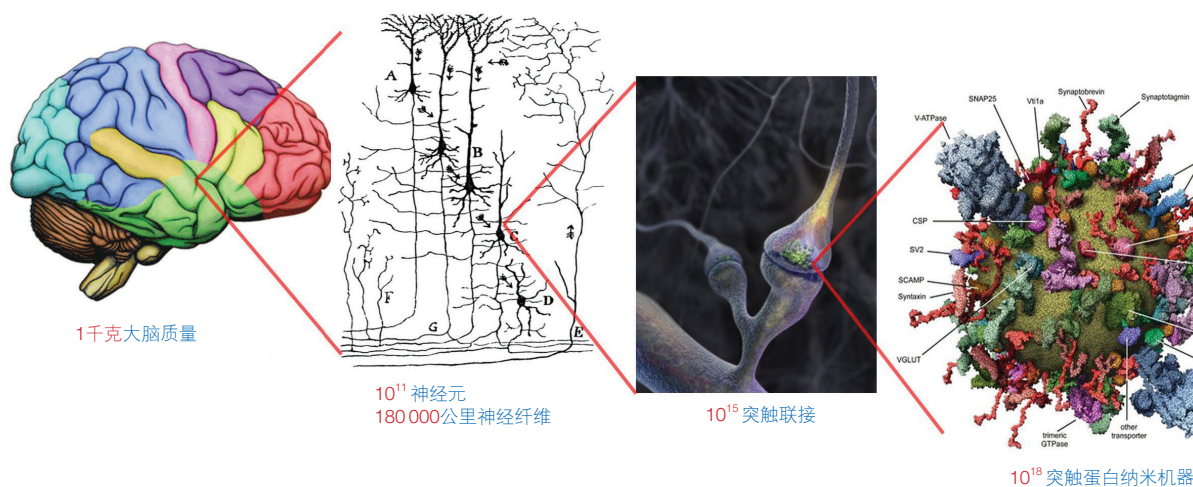


图1 脑——生物体系最复杂的结构

制技术、数据解析技术是大脑研究需重点突破的技术问题，尤其是 CLARITY 技术^[5]的开发，为脑科学研究提供了新的研究思路和方法；大脑中淋巴管的发现，颠覆了过去认为大脑是免疫豁免器官的概念^[6]；小鼠大脑神经联结图谱^[7]、胚胎期人脑转录图谱^[8]、哺乳动物大脑新皮层数字立体超微结构图谱^[9]等大脑联结图谱绘制取得了重要进展；删除或激活记忆^[10]，控制记忆与正面或负面情感关联^[11]等记忆操纵进一步实现；利用脑-机接口逐步实现猴子之间^[12]、人与人之间^[13]的意念控制等多项进展改善了人类用户的动作和触觉反馈，且首例受大脑控制的假肢 Deka 于 2014 年 5 月获美国食品药品监督管理局（FDA）批准上市。同时，模拟人脑芯片（syN-APSE）^[14]、高输入数模拟神经网络（HICANN）、“神经网络”电路板、深度神经网络、神经网络芯片^[15]等人脑模拟设备的成功开发，以及大鼠躯体感觉皮层部分神经回路的数字模型^[16]和人工小型啮齿动物大脑^[17]的成功构建等系列进展推动了类脑计算的发展，标志着人工智能正在实现。

3 我国“十二五”期间积极部署脑科学研究，酝酿国家级脑科学计划抢占科技战略制高点

我国对脑科学研究领域一直给予高度支持，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》《国家“十二五”科学和技术发展规划》《“十二五”生物技术的发展规划》和《国家自然科学基金“十二五”发展规划》均对其进行布局，科技部、国家自然科学基金委等也资助了一系列脑科学研究项目。“十二五”期间，“973”计划共资助脑科学相关项目 50 项，投入近 10 亿元，主要资助脑功能、脑发育分子机理，脑疾病发生机制，以及认知过程等方向；国家自然科学基金委也发布了“情感和记忆的神经环路基础”重大研究计划，并持续资助“视听觉信息的认知计算”重大研究计划。中科院于 2012 年启动“脑功能联结图谱”先导科技专项（B

类），计划在 10 年中投入 5 个亿，在介观层面研究重要脑功能的神经环路工作原理。

目前，脑科学研究已被列为“事关我国未来发展的重大科技项目”之一。上海市已将脑科学与人工智能列为市重大科技项目，作为建设具有全球影响力的科技创新中心的一个重要举措，成立了“脑科学协同创新中心”，推进脑科学研究和转化应用；北京市也启动了“脑科学研究”专项，重点布局“脑认知与脑医学”和“脑认知与类脑计算”两个任务。具有中国特色的中国脑计划“脑科学与类脑科学研究”也在“十二五”期间酝酿，计划在“十三五”初正式启动，重点关注以探索大脑秘密、攻克大脑疾病为导向的脑科学研究，以及以建立和发展人工智能技术为导向的类脑研究。

4 中科院脑科学研究的深厚基础与特色优势

长期以来，我国脑科学研究的主力队伍中，中科院占有核心地位。目前中科院从事脑、认知、心理和行为研究及相关技术开发的研究人员近 200 人，初步形成了一支由优秀科学家领衔、优秀青年科学家为主体的研究团队，已经成为我国脑科学研究的主力军和核心力量，在国际上有重要影响。

中科院发挥基础研究实力雄厚和多学科交叉的优势，在脑科学研究布局上做了大量部署，已建设有脑与认知科学和神经科学两个国家重点实验室，并设立了脑功能和脑疾病、灵长类神经生物学、心理健康、行为科学、动物模型与人类疾病机理等院重点实验室，建立脑成像研究、非人灵长类动物研究、脑疾病研究、心理和行为科学研究等科学设施和平台，在北京、上海、合肥、昆明和武汉形成了各具特色但又相互融合、交叉的脑科学研究格局，进一步促进了神经生物学、心理学、物理学、计算科学、信息科学的学科交叉和发展；同时推动面向转化研究的临床基地建设。

非人灵长类动物研究是中科院脑科学研究极具特色之处。非人灵长类动物大脑的组织和结构与人脑非常相

似，是脑科学研究很好的模型，只有非人灵长类动物才具有一些与人类相似的高级脑认知功能，如自我意识、语音功能等，对这样的脑高级认知功能的研究只能在非人灵长类动物上开展。非人灵长类动物研究在中科院有悠久历史，中科院昆明动物所于1959年率先开展灵长类动物饲养繁殖工作，建立了我国第一个灵长类动物人工驯养繁殖中心，是国内饲养繁殖灵长类动物种类最多、研究历史最长、研究力量最雄厚的机构之一。2016年初，国家发改委正式批复《模式动物表型与遗传研究国家重大科技基础设施项目建议书》，其中，国家投资3.66亿元，由中科院昆明动物所承担建设灵长类表型与遗传研究设施。近年来，中科院还在上海、深圳等地建立了一批灵长类研究设施，并取得了重要科研成果，首次建立了稳定遗传的转基因自闭症食蟹猴模型^[18]，此研究是世界首个自闭症非人灵长类模型，为深入研究自闭症的病理与探索可能的治疗干预方法提供了重要基础。以中科院为代表的我国非人灵长类研究引起了国际科学界的高度关注，《Nature》杂志以《猿猴王国》为题专门报道了中国非人灵长类研究^[19]。

5 中科院加强脑科学基础前沿研究，推进脑科学与智能技术深度融合

5.1 中科院率先启动“脑功能联结图谱”研究计划

自“十一五”末期，中科院开始研究脑科学未来的发展方向与突破点，经过多次全院规模的研讨，达成如下共识：“脑功能联结图谱研究极有可能成为新的神经科学战略制高点，是探索脑如何工作，揭示脑如何生病的必由之路，脑科学极有可能在这个方向上取得重大突破”。

中科院于2012年启动“脑功能联结图谱”战略性先导科技专项（B类），有所选择地描述几种重要脑功能的神经网络联结的构造和运作机制，通过感知觉联结图

谱、学习记忆与老年痴呆联结图谱、情绪与抑郁症联结图谱、抉择与成瘾联结图谱、脑功能联结图谱研究关键技术5个项目实施，在脑功能联结图谱研究中取得重大原创性理论突破，阐明感知觉、学习与记忆、抉择等脑功能联结的组织构架规律；揭示脑功能联结异常与感知觉疾病、脑发育及退行性病变、成瘾等疾病的关系，研发基于脑功能联结图谱的相关疾病诊断与治疗新策略；研发一批先进的高时空分辨率的显微技术和设备，以及神经示踪等技术；建立脑功能联结数字文库、脑功能联结图谱和公共信息中心（图2）。从脑功能联结层面上，认识和理解脑，保护和促进脑，开发和创造脑。专项启动以来，取得了一系列进展，共发表了116篇研究论文，其中包括46篇高影响力论文^①，提出了“脑网络组学（Brainnetome）”概念^[20]，探索了自我意识起源这样的根本科学问题^[21]。

5.2 中科院脑科学卓越创新中心

2014年，以中科院上海生科院神经科学所为牵头单位，由院内外20余家单位参加的中科院脑科学卓越创新中心正式成立。卓越中心将发挥中科院建制化集群优势，凝聚并稳定支持脑科学领域最具创新活力的优秀人才和创新团队，通过建立符合未来脑科学研究发展的组织管理和运行机制，力争成为我国脑科学研究领域杰出人才的聚集和培育基地，以及国际一流的脑科学研究中心；将围绕脑科学基础与应用研究，聚焦重要前沿方向，在大脑工作机制研究领域，以先导科技专项（B类）“脑功能联结图谱”为牵引，关注感知觉、学习与记忆、情绪、抉择等重要脑功能，解析实现大脑特定功能的各种神经环路，包括各类神经元在各脑区之间的长程环路和在各脑区之内的局部环路，绘制它们的联结图谱，分析大脑对信息处理加工的规律；在脑疾病研究领域，针对社会紧迫需求，重点研究发育性脑疾病、精神性脑疾病和退行性脑疾病3类重大脑疾病的发病机

① 发表在影响因子大于或等于 PNAS 的期刊上的论文

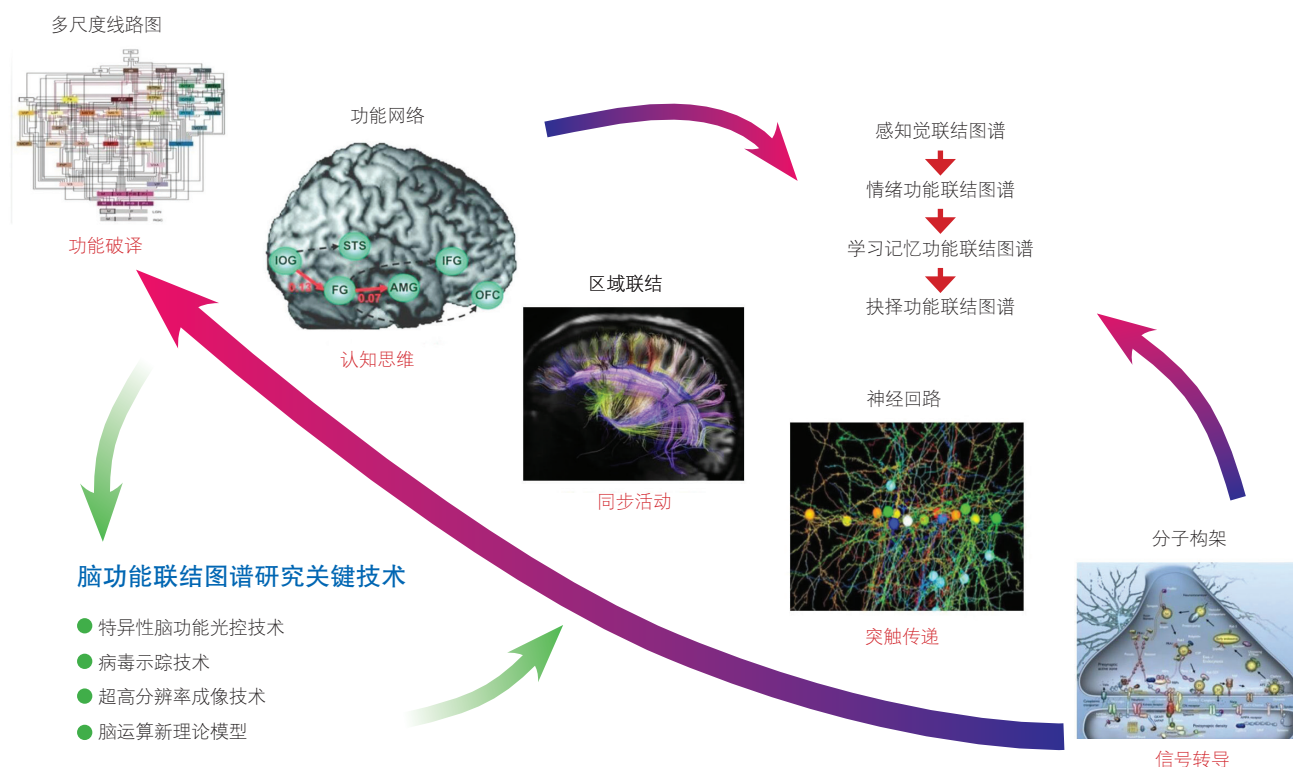


图2 中科院脑功能联结图谱整体技术路线图

理，确定疾病早期诊断指标和干预靶点，为缓解脑疾病所带来的社会负担作出重大贡献。

5.3 加强多学科交叉助推脑科学前沿研究

脑的各种高级功能是由极端复杂和高度动态的神经联结体系执行和实现的，对这一系统的深入解析有赖于生物、物理、化学、材料、电子、信息等多学科最前沿技术的交汇融合。

中科院发挥多学科交叉的优势，通过多个院所研究的紧密合作，协同攻关，针对脑功能联结研究的特点开展技术研发与自主创新，包括：（1）新型神经电极阵列制备技术。即在硅基金属电极和石墨烯纳米传感器的基础上，设计并研制具有高分辨率、高信噪比和生物亲和性的微电极阵列和石墨烯电极阵列，用于神经元集群活动的记录。（2）神经活性物质电化学检测方法和系统。从发展高灵敏、高选择、抗污染和高稳定的电化学活体传感，研发双模双向记录检测，对电化学、电生理和光遗传技术3个方面进行耦合，开展神经递质信息检测方法和系统的研究。（3）用于生物光学成像的多波长

超快激光技术。采用飞秒钛宝石激光器、参量振荡器并结合腔内倍频，通过优化设计和自动调节获得适用于神经生物学成像的宽调谐、大功率的飞秒激光系统。（4）面向神经生物学研究的研制超高速图像采集存储系统。结合硬件压缩、新型图像处理架构、高速模数混合系统建模仿真和高速数据接口等新型技术手段，开发集成实时压缩、高带宽大存储的图像采集存储系统。

这些新技术的开发和应用将突破脑功能研究的若干技术瓶颈，推动神经科学领域的原创性发现。

5.4 全面推进脑科学与类脑智能深度融合

脑科学和智能技术是科学界研究的热点，近年来分别取得了很大成就，但是相互之间借鉴和交叉仍然较少。人工智能发展面临新的瓶颈，亟需从脑科学和神经科学获得启发，发展新的理论与方法，提高机器的智能水平；同时，智能技术发展也有助于脑科学取得进一步突破，类脑智能研究将为脑功能联结图谱研究提供仿真手段，以仿真系统与平台的方式支持脑功能联结图谱研究的科学假设验证，并为脑功能联结图谱的研究成果提

供广泛的应用前景。

基于脑科学研究的重要性和我国智能技术发展的现状，中科院率先在脑科学和智能技术两大领域进行实质性深度融合。“脑功能联结图谱”先导专项（B类）在保持原有脑科学研究内容基础上，新增类脑智能研究方向，项目数从5个扩大至9个，同时专项更名为“脑功能联结图谱与类脑智能研究”。脑科学卓越创新中心也增加了“类脑模型与智能信息处理”与“类脑器件与系统”2个研究方向，扩容后的中心更名为脑科学与智能技术卓越创新中心。自动化所、计算技术所、半导体所等一大批智能研究领域的研究所加入卓越中心。脑科学与智能技术卓越创新中心以脑认知功能的神经基础、类脑智能计算模型为核心科学问题，通过脑科学与智能技术的交叉融合，将在脑智领域取得重要突破；中心将研发脑研究新技术，针对国家重大需求，开展脑疾病机理研究与早期诊断和干预手段研发等有应用前景的前沿工作，充分发挥学科交叉优势和非人灵长类动物模型的优势，在脑科学前沿领域，取得国际领先的地位；中心研究并借鉴脑信息处理机制，通过类脑器件、芯片和类脑机器人等系统的突破，研发类脑智能软硬件系统，引领我国智能产业的发展，增强国际竞争力。

5.5 举措建议

（1）持续加强脑科学与类脑智能研究稳定支持。

“脑功能联结图谱”先导专项（B类）于2015年6月完成了与智能技术研究的融合，更名为“脑功能联结图谱与类脑智能研究”先导专项（B类）。脑科学与类脑智能研究的融合才开始不久，需要相对稳定的支持，以促成两个方向更加紧密地融为一体。专项在2017年年中就要完成第一个五年资助期，建议对脑科学研究与类脑智能研究持续滚动支持，继续以B类先导专项的模式支持两个前沿领域方向的发展和交叉融合。

（2）发挥脑科学与智能技术卓越中心核心作用。

脑科学与智能技术卓越中心成立以来，为满足脑科学与类脑研究深度融合的要求，在研究生培养、促进交叉

融合、遴选晋升等体制机制创新上做了大胆的探索和尝试。建议发挥中心在中科院脑科学研究与类脑智能研究两个领域上的核心地位，在经费、队伍建设和平台建设方面，按照两个重要研究领域给予倾斜支持。

（3）加强非人灵长类动物模型研究及相关人才、技术积累。我国非人灵长类研究在国际上具有独特优势，有望成为非人灵长类研究的领跑者。中科院在非人灵长类动物研究方面历史悠久，具有先发优势，创建了世界首个非人灵长类自闭症模型。建议加强对非人灵长类动物模型研究的支持，先期启动专门项目，支持语音识别技术、基因编辑技术、先进繁殖技术等前沿信息、生物技术在灵长类动物上的开发利用。

（4）加强科教融合，培养脑科学与智能技术复合型人才。脑科学与智能技术两大前沿领域相互学习、相互借鉴、相互渗透是未来科技发展的大趋势，为了应对日趋激烈的国际竞争，建议加强脑科学与智能技术复合型人才培养。在中国科学院大学设立脑科学与智能技术专业方向，从相关专业选拔培养本科3—4年级学生，招收脑科学与智能技术专业研究生。在中国科学院大学未来技术学院下，设立脑科学与智能技术教研室，聘请脑科学与智能技术领域前沿科学家讲授脑科学领域和智能技术领域的专业核心课程与前沿研讨课程。在脑科学与智能技术专业研究生培养上，设立双导师制，对每一名研究生由分别来自脑科学与智能技术两个领域的两位导师共同指导科研工作，共同完成研究生培养任务。

（5）推动脑科学与智能技术国家实验室建设。党的十八届五中全会强调，实现“十三五”时期发展目标，必须深入实施创新驱动发展战略，发挥科技创新在全面创新中的引领作用，实施一批国家重大科技项目，在重大创新领域组建一批国家实验室。基于脑科学和类脑智能交叉研究的重要性，面对西方国家在脑研究方面的强势出击，我国应该从创新型国家建设的长远目标出发，筹建“脑科学与类脑智能国家实验室”，借助这一国家创新体系下的科研基地，统筹安排脑科学研究，聚焦基

基础研究的重点突破方向, 强调脑科学成果面向重大需求的转化应用, 实现脑科学和类脑智能技术的协同发展。通过“脑科学与类脑智能国家实验室”建设, 打造脑科学与类脑智能的学科创新基地, 高层次、复合型、创新性人才培养基地, 和国际交流与合作基地, 为推动脑科学与智能技术产业进一步发展和提升我国智能产业国际竞争力提供强有力的科技支撑。

参考文献

- European Union. Human Brain Project. [2016-05-06]. <http://www.humanbrainproject.eu/>.
- The White House. BRAIN Initiative. [2016-05-02]. <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/04/02/fact-sheet-brain-initiative>.
- MEXT. Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies. [2016-05-02]. <http://brainminds.jp/en/>.
- Abbott A. Neuroscience: Solving the brain. *Nature*, 2013, 499(7458): 272-274.
- Chung K, Deisseroth K. CLARITY for mapping the nervous system. *Nature Methods*, 2013, 10(6): 508-513.
- Louveau A, Smirnov I, Keyes T J, et al. Structural and functional features of central nervous system lymphatic vessels. *Nature*, 2015, 523(7560): 337-341.
- Oh S W, Harris J A, Ng L, et al. A mesoscale connectome of the mouse brain. *Nature*, 2014, 508(7495): 207-214.
- Miller J A, Ding S L, Sunkin S M, et al. Transcriptional landscape of the prenatal human brain. *Nature*, 2014, 508(7495): 199-206.
- Kasthuri N, Hayworth K J, Berger D R, et al. Saturated reconstruction of a volume of neocortex. *Cell*, 2015, 162(3): 648-661.
- Nabavi S, Fox R, Proulx C D, et al. Engineering a memory with LTD and LTP. *Nature*, 2014, 511(7509): 348-352.
- Redondo R L, Kim J, Arons A L, et al. Bidirectional switch of the valence associated with a hippocampal contextual memory engram. *Nature*, 2014, 513(7518): 426-430.
- Shanechi M M, Hu R C, Williams Z M. A cortical-spinal prosthesis for targeted limb movement in paralysed primate avatars. *Nature Communications*, 2014, 5:3237.
- Rao R P N, Stocco A, Bryan M, et al. A direct brain-to-brain interface in humans. *PLoS ONE*, 2014, 9(11): e111332.
- Merolla P A, Arthur J V, Alvarez-Icaza R, et al. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface. *Science*, 2014, 345(6197): 668-673.
- Prezioso M, Merrih-Bayat F, Hoskins B D, et al. Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors. *Nature*, 2015, 521(7550): 61-64.
- Markram H, Muller E, Ramaswamy S, et al. Reconstruction and simulation of neocortical microcircuitry. *Cell*, 2015, 163(2): 456-492.
- Merolla P A, Arthur J V, Alvarez-Icaza R, et al. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface. *Science*, 2014, 345(6197): 668-673.
- Liu Z, Li X, Zhang J T, et al. Autism-like behaviours and germline transmission in transgenic monkeys overexpressing MeCP2. *Nature*, 2016, 530(7588): 98-102.
- Cyranoski D. Monkey kingdom. *Nature*, 2016, 532(7599): 300-302.
- Jiang T. Brainnetome: A new-ome to understand the brain and its disorders. *Neuroimage*, 2013, 80: 263-272.
- Chang L, Fang Q, Zhang S, et al. Mirror-induced self-directed behaviors in rhesus monkeys after visual-somatosensory training. *Current Biology*, 2015, 25(2): 212-217.

Brain Science and Brain-like Intelligence Research in Chinese Academy of Sciences

Wang Liwei¹ Xu Li² Xu Ping² Yu Hanchao¹ Kong Minghui¹ Shen Yi¹ Zhang Yongqing¹

(1 Bureau of Frontier Sciences & Education, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;

2 Shanghai Information Center for Life Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China)

Abstract Brain science is the ultimate territory for human being to understand nature and himself, as well as the most important scientific frontier in the 21st century. Inspired from the working mechanism of human brain, brain-like intelligence will be the future of artificial intelligence. Imitation and integration between brain science and brain-like intelligence are the inevitable trends. With profound accumulations and unique advantages, Chinese Academy of Sciences (CAS) launched the “Mapping of Brain-functional Connections” Strategic Priority Research Programme (B), investigating the neural network connections and their processing mechanisms of several important brain functions, such as sense, perception, learning, memory, etc. In order to promote the comprehensive integration of brain science and brain-like intelligence, CAS integrated brain-like intelligence studies into the “Mapping of Brain-functional Connections” Programme, and established the Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology. Through the substantial integration of brain science and brain-like intelligence, CAS will provide scientific and technological support to advancing the intelligence industry in China.

Keywords brain science, brain-like intelligence, integration, Chinese Academy of Sciences (CAS)

王力为 中科院前沿科学与教育局生命科学处副处长，理学博士。研究领域为分子生物学与生物化学，现主要从事科研项目管理与生命科学领域战略研究。E-mail: lwwang@cashq.ac.cn

Wang Liwei Ph.D. and deputy chief of Division of Life Science, Bureau of Frontier Sciences & Education, Chinese Academy of Sciences. His major research fields are molecular biology and biochemistry. His current research focuses on scientific project management and strategic studies on life science. E-mail: lwwang@cashq.ac.cn