

DOI: 10.13376/j.cbls/2017013

文章编号: 1004-0374(2017)02-0097-17

· 特约综述 ·

编者按:2016年,中国神经科学学会承担了中国科学技术协会“神经科学方向预测及技术路线图研究”项目(项目编号:2016XKYL03),旨在以神经科学与未来经济社会发展前景关系的系统性刻画和描绘为重点,以神经科学和人工智能领域专家为基础,在经济社会专家、软科学专家和情报人员帮助下,对神经科学和类脑智能的未来发展需求和方向进行前瞻性预测,为促进我国神经科学前沿布局 and 战略规划、促进相关产业发展和民生建设提供战略决策咨询参考。本文是该项目阶段性研究进展简报之二。



张旭,神经科学家,中国科学院院士,中国科学院上海分院副院长,中国科学院上海生命科学研究院神经科学研究所研究员。1985年在第四军医大学获医学学士学位,1994年7月在瑞典卡罗琳斯卡医学院神经科学系获博士学位。1994年8月—1999年11月先后在第四军医大学神经科学研究所任讲师、副教授和研究员。1999年12月至今在中国科学院上海生命科学研究院神经科学研究所任研究员、感觉系统研究组组长。长期从事神经系统疾病的分子细胞生物学机理研究,包括慢性疼痛和X-连锁智力障碍。已发表论文100余篇,论文被他人引用5000余次,参编疼痛学经典教科书《Textbook of Pain》等专著。担任国际疼痛研究协会第九届研讨会和第四届亚洲疼痛会议主席。应邀在第九届国际脑研究组织世界大会等学术会议作大会报告和专题报告60余次。兼任中国神经科学学会副理事长、中国细胞生物学学会副理事长和上海市神经科学学会理事长等职。曾获何梁何利科学与技术进步奖等。中国科学技术协会“神经科学方向预测及技术路线图研究”项目负责人。

神经科学和类脑人工智能发展: 未来路径与中国布局 ——基于业界百位专家调研访谈

阮梅花¹, 袁天蔚¹, 王慧媛¹, 王超男¹, 傅璐², 陈静²,
韩雪³, 王小理¹, 熊燕¹, 于建荣¹, 张旭^{4,5*}

(1 中国科学院上海生命科学信息中心, 上海 200031; 2 上海市神经科学学会, 上海 200031;
3 中国神经科学学会, 上海 200031; 4 中国科学院上海生命科学研究院神经科学研究所,
上海 200031; 5 中国科学院上海分院, 中国科学院上海交叉学科研究中心, 上海 200031)

摘要:21世纪未来三十年,神经科学和类脑人工智能革命性突破将不断涌现,我国神经科学和类脑人工智能面临前所未有的发展机遇和挑战。现通过访谈调研业界专家和征集反馈意见,对2020—2050年我国经济社会发展面临的战略需求、实施相关重大科技研发计划的必要性和可能组织形式、神经科学和类脑人工智能布局和发展步骤以及具体目标进行了系统展望。建议我国神经科学和类脑人工智能未来规划布局可在国家重大科技项目“脑科学与类脑研究”和“人工智能2.0”主题的基础上,细分为3大重点方向(基础神经生物学、神经精神性疾病、类脑人工智能)和2大支撑性领域(变革性神经科学技术、支撑平台)。同时,加强对神经生物医药及生物医学工程产业和人工智能产业的培育和支持,以在全球创新产业链的建立和人类社会新一轮发展中发挥引领作用。

收稿日期: 2017-02-23

基金项目: 中国科学技术协会“神经科学方向预测及技术路线图研究”项目(2016XKYL03)

*通信作者: E-mail: xu.zhang@ion.ac.cn

关键词：神经科学；类脑人工智能；大科学计划；路线图；专家咨询
中图分类号：Q42；R338；TP18 文献标志码：A

The strategic option of neuroscience and brain-inspired artificial intelligence in China: based on hundred of experts' insights

RUAN Mei-Hua¹, YUAN Tian-Wei¹, WANG Hui-Yuan¹, WANG Chao-Nan¹, FU Lu², CHEN Jing², HAN Xue³,
WANG Xiao-Li¹, XIONG Yan¹, YU Jian-Rong¹, ZHANG Xu^{4,5*}

(1 Shanghai Information Center for Life Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China;

2 The Shanghai Society for Neuroscience, Shanghai 200031, China; 3 The Chinese Neuroscience Society,

Shanghai 200031, China; 4 Institute of Neuroscience, Shanghai Institutes for Biological Sciences,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China; 5 Shanghai Institute for Advanced Studies,

Chinese Academy of Sciences Shanghai Branch, Shanghai 200031, China)

Abstract: The following three decades of 21st century will witness the revolutionary breakthroughs of neuroscience and brain-inspired artificial intelligence, which raise great opportunities for the research and development of neuroscience and artificial intelligence in China. Following the extensive consulting of over a hundred experts and the systematic analysis on their suggestions and advices about “Chinese Roadmap of Neuroscience and Brain-Inspired Artificial Intelligence”, we present the key results for the decision-making institutions and neuroscience communities, including the future scenarios of society and strategic demands of China’s development from 2020 to 2050, the necessity of implementing the scientific and technological programs, and the possible challenge of projects administration. On the bases of two major national programs in preparation, “Brain Science and Brain-Inspired Artificial Intelligence” and “Artificial Intelligence 2.0”, five main fields of the neuroscience and brain-inspired artificial intelligence have been suggested, including the basic neurobiology, the neural diseases and medicine, the brain-inspired artificial intelligence, the disruptive technology, and the supporting research platforms. Furthermore, the development of two related high-tech industries, the neuro-biomedical and bioengineering industry and the artificial intelligence industry, has been considered to lead the great trends of new economy and the dynamics of human society.

Key words: neuroscience; brain-inspired artificial intelligence; big science program; roadmap; expert consulting

神经科学、以神经科学和人工智能的理论与技术为基础的类脑人工智能研发与应用正处于大发展、大变革的前夕，如何从纷纭复杂的科学-技术-产业-经济-社会动态互动关系中，找出关键性科技发展路径，加快整体布局，已经上升为具有全局性影响的重大战略事项。

中国神经科学学会组织研究团队，在前期第一份简报^[1]有关国内外发展现状调研的基础上，依托学会丰富的专家资源优势 and 平台优势，在2016年7月—2017年1月，对我国神经科学与人工智能领域以及部分科技管理、经济社会领域近百位专家（见本文致谢部分）进行了系列访谈、会议座谈，并配合问卷调查、书面征集意见等形式，广泛听取我国科研人员、医生、工程技术人员和企业家等对发展神经科学和类脑人工智能的建议，同时也借鉴吸纳

了部分公开报道中提到的相关意见和建言，进一步梳理我国对神经科学和类脑智能相关科技重大需求、对实施国家相关重大科技项目的组织管理、重大科技方向布局的建言建议，供业界讨论和决策咨询参考。

1 我国未来经济社会发展对神经科学和类脑人工智能的需求：面向2020—2050年

过去几十年，第三次科技革命对人类生产生活方式和思维方式，对全球资源利用方式及全球政治经济格局产生了巨大影响。全球一些知名研究机构纷纷预测未来全球资源、环境、人口、经济发展态势，制定区域战略规划或提出对策建议，以应对未来可能的挑战。其中，比较知名的包括罗马俱乐部的《2052：未来四十年的中国与世界》、美国国家情报

委员会的《全球趋势 2030:变换的世界》、俄罗斯世界经济和国际关系研究所的《2030 全球战略预测》、亚洲开发银行的《亚洲 2050:实现“亚洲世纪”》、《经济学人》杂志出版的《2050 年趋势巨流》等。例如,美国国家情报委员会 2012 年 12 月发布的第五份全球发展趋势研究报告《全球趋势 2030:变换的世界》指出,在未来近 20 年里,将出现“个人能力显著增长”、“权力日益扩散”、“人口统计状况发生巨变”,以及“粮食、水与能源之间关联日甚”等四大趋势。该报告也试图寻找出可能对 2030 年的世界形成决定性影响的六大因素,并以此推演出“大停滞”、“大融合”、“大分化”和“非国家化”等四种可能的未来前景^[2]。

然而,也应当注意到,这些报告并没有充分考虑到正在兴起的神经科学和人工智能革命对人类社会发展趋势的影响。在 21 世纪第二个十年及可预见的未来 30 年,正在兴起的神经科学革命和相关的人工智能正面临前所未有的历史机遇。同时,我国正迎来实现中华民族伟大复兴的中国梦的关键时期,两大趋势形成历史性汇合。因此,有必要进一步梳理神经科学及类脑人工智能技术与社会应用形态变革的关系,系统刻画神经科学及类脑人工智能发展与我国未来经济社会发展需求的必然联系。

1.1 神经科学、人工智能技术演进与基本应用形态总体预测

1.1.1 到2020年,神经科学蓄积变革基础,现有的人工智能技术独领风骚,人类社会全面进入“弱”人工智能时代

目前,人工智能技术和神经科学基本上还属于两个独立的学科领域,在相关领域的融合应用也处于初级阶段,但从长远看,两大领域相互交叉、融合与促进呈现必然之势。

专家预测,到 2020 年,神经科学继续保持高速发展态势,但颠覆性理论成果还不多,与现有信息技术和人工智能技术的发展保持并行态势。在这一时期,人工智能和大数据技术是神经科学发展的“加速器”。

应用方面,现有的人工智能技术独领风骚,神经科学在人类社会领域的应用范围主要是在健康医疗领域。生命健康领域,可穿戴的智能健康检测设备广泛应用,初步实现基于人工智能的健康管理^[3];中国社会负担第一位的疾病——脑卒中将被有效控制,脑卒中导致的死亡率大幅度下降;中国社会负担第三位的疾病——慢性疼痛疗效显著提高。

智能技术应用领域,包括深度学习在内的特征表现学习不断发展^[4],催生新型神经网络技术,开发出同时具备语音识别、图像处理、自然语言处理、机器翻译等能力的通用性人工智能技术。硬件设施缩小甚至隐形,虚拟现实应用领域进一步扩大;实现通过手势、表情及自然语言的双向人机互动,智能系统初步具有人的特性,可定制智能助理将会出现;视觉处理、无人驾驶会有爆发式发展,无人驾驶汽车上路;概念性类脑智能机器人(只有部分功能学习人脑)投入应用,可顺利通过高考。

1.1.2 到2030年,神经科学和类脑人工智能将迎来第一轮重大突破,革新原有人工智能的算法基础,人类社会初步进入“强”人工智能时代

专家预测,到 2030 年,神经科学将迎来第一轮重大突破,在神经感知和神经认知理解方面出现颠覆性成果,从而反哺、革新人工智能的原有算法基础,人类进入实质性类脑人工智能阶段。这一时期,类脑人工智能和神经科学将相互促进。

应用方面,人工智能技术继续独领风骚,神经科学成果的应用范围也将大幅扩展,并深刻嵌入到人类社会的健康医疗、日常生活、学习教育、社会交往等方面。在生命健康领域,医院实现全人工智能化管理;一半以上的老年护理工作由机器人完成,老年陪护机器人普及。孤独症和儿童智障等神经发育疾病被精准诊断;阿尔茨海默症、帕金森症等神经退行性疾病得到有效的早期诊断与干预,发病率大幅下降,发病时间延迟 10~15 年;慢性疼痛被有效控制;植入式芯片等脑机接口初步应用于治疗各类神经精神性疾病。大部分脑区域功能破译并转译成计算模型;直接神经通道能以高速宽带的方式与大脑进行连接;可利用不同的神经植入器,进一步强化其试听的感知、理解、记忆和逻辑能力;虚拟现实广泛应用于科研、实验、临床、手术等工作的模拟训练中,仿生器官普及;计算和信息技术领域,实现基于人脑机制的计算机运算与认知;实现大型模块的大规模应用,如快速准确的图形识别;显示器可植入视觉器官,可进行图像捕捉和分析;“代理战争”出现,机器人替代人类战争,纳米机器人可直接植入人体对特定器官进行修复,军队广泛利用人工智能技术进行“人体增强”,微型人工智能武器出现;全面类人脑的机器人被广泛应用,智能机器人可解读脑复杂信号,拥有综合性人类感觉,成为人类伙伴,35%的工种将被机器人取代;新业态下越来越多的职业消失等。

1.1.3 到2050年,神经科学和类脑人工智能将迎来第二轮重大突破、类脑人工智能进入升级版,人类社会将全面进入强人工智能时代

专家预测,到2050年,神经科学将迎来第二轮重大突破,在情感、意识理解方面出现颠覆性成果,类脑人工智能进入升级版,并将推动人类脑的超生物进化,神经科学和类脑人工智能融为一体。

应用方面,人类社会进入强人工智能时代。生命健康领域,基于人工智能带来的人体机能增强,人类寿命有望显著延长,各类神经精神性疾病发病率显著降低,大部分疾病(包括神经退行性疾病)有望被治愈,各类芯片和刺激设备、脑机接口装置被广泛使用,一半以上的肿瘤得以治愈,可能催生新的“人工智能”疾病;人类疾病所带来的社会负担大幅度降低,“类脑人工智能”的治理(如社群安置、失业、智能垃圾处理等)可能带来新的社会负担。神经网络框架将会变得更加复杂而精密;计算机视觉和自然语言处理变得不可分离^[5];计算机的学习、认知及自适应能力大幅度提高;人类专家编制出具有超大量知识和经验的智能计算机程序系统,可模拟人类进行推理和判断并解决复杂问题;得益于微型智能系统神经植入,人类的感知与认知能力得以大幅度提升^[6];现代社会的大多数职业消失,催生适于机器人工作的新业态。

1.2 我国未来发展对神经科学和人工智能的需求

1.2.1 中华民族脑健康和心理健康需求

实现国民健康长寿是国家富强、民族振兴的重要标志,也是人民群众的共同愿望。脑血管疾病(脑卒中等)和神经精神性疾病影响各个年龄段的大范围人群。近年来,脑卒中已经成为我国居民第一位的死亡原因^[7],并且发病率还在以每年8.7%的速度上升^[8];我国阿尔茨海默症、帕金森症、癫痫、多发性硬化症等神经疾病导致的死亡人数2013年比1990年增加了77.1%^[9]。阿尔茨海默症国际组织预计,2030年全球有超过7470万痴呆患者,2050年将增长到1.3亿^[10];预计我国痴呆症的患病人数2030年将达1811.6万,2050年将增长到3218.4万^[11]。目前,精神分裂症、抑郁症、焦虑等精神疾病患者呈不断增加的趋势。全球范围内有3.5亿人患有抑郁症,我国抑郁症患者约4000万,患病率达3%~5%。全球孤独症患者约6700万,我国保守估计已超百万,其中60%~70%的患儿生活不能自理,受孤独症困扰的人群可能达千万。

神经精神性疾病不仅危害人民健康,还导致巨

大的医疗负担,影响经济社会协调发展的国家战略的实施。脑卒中导致的直接经济负担每年超千亿元^[8]。根据世界卫生组织(WHO)预测,2018年全球痴呆症约产生1万亿美元的成本,2030年将达到2万亿美元^[10]。我国2015年痴呆症花费估计为446.19亿美元,其中,医疗费用为90.55亿美元,非医疗成本为44.83亿美元,非正式照顾的成本达310.81亿美元^[11]。这些巨大的医疗负担严重影响我国经济社会协调发展。

专家意见显示,神经精神性疾病防治是未来生命科学和医学领域最重要最前沿的领域,但科学界对多数神经精神性疾病的病因还不了解,缺乏预防、临床诊断和治疗、干预与康复的技术方法。大力开展对脑认知功能的神经基础研究将有助于对人类认知和智力损害性疾病病因的分析和药物的靶向筛选,引领靶向神经精神性疾病新药物、新的诊断治疗技术的研发和应用。同时,神经科学及相关工程技术的发展将推动国产生物医学影像技术和神经精神性疾病诊断技术的研发和临床应用,打破高端医疗器械和医疗产品长期被欧美垄断的局面,并催生万亿规模的脑健康产业。

1.2.2 我国经济转型升级,实现中国梦的需要

人工智能技术的突破将推动相关产业的发展,并迅速渗透到各行各业,促进智能化社会形态的形成。近年来,国际社会已掀起面向未来人工智能革命浪潮。美国政府发布《为未来人工智能做好准备》^[12]、《国家人工智能研究与发展策略规划》^[13]、《人工智能、自动化与经济》^[14],英国政府发布《人工智能:未来决策制定的机遇与影响》^[15]等重磅报告。产业技术界均对人工智能在未来社会中的作用寄予厚望。例如,麦肯锡公司发布的《机器的崛起:中国企业高管眼中的人工智能》报告称,人工智能发展近临界点,其迅猛发展将为科技产业公司带来更多的利好^[16];IDC全球商用机器人研究项目发布的《IDC FutureScape:2017年全球机器人预测》报告指出,机器人技术将继续加速创新,并将颠覆和改变许多行业的现有业务运营模式,预计机器人将在传统制造业以外的更多领域得到强劲的发展,包括物流、医疗保健、公共事业和资源领域^[17];埃森哲发布的报告指出,到2035年,人工智能会让12个发达国家经济增长率翻一倍^[18]。

培养和提升智能、智力,是我国成为智能强国和发展智能产业的基础。从中短期看,我国经济发展进入新常态,迫切需要通过发展人工智能等产业,

与第一、第二和第三产业系统融合, 提高生产效率, 降低生产成本。特别是将人工智能应用于民生, 主要体现在减轻社会负担和家庭负担, 提倡发展老年服务机器人, 这是一个大趋势, 也是大产业。从面向 2050 年、实现中国梦看, 抓住智能化经济发展的新机遇将抢占未来智能社会的发展先机, 寻找新的战略性经济增长点, 促进新经济的快速发展。人工智能技术正在快速推广到互联网、金融投资与监管、医疗诊断、公共安全等一系列重要领域, 将引发新一轮产业革命。

1.2.3 我国国防科技发展的需要

当前神经科学与信息、计算机、纳米、先进制造等众多学科之间的交汇贯通日益紧密, 这将深刻改变国防科技发展格局。2015 年, 美国国防高级研究计划局 (DARPA) 发布《保障国家安全的突破性技术》报告, 为 DARPA 设定了 4 项主要的战略投资领域, 其中, 神经科学是重点领域之一^[19], 目前已部署多项科研项目 (表 1)。2016 年, 美国陆军公布的《2016—2045 年新兴科技趋势报告》提出 20 项最值得关注的科技发展趋势^[20], 其中机器人与自动化系统、人类机能增强等多项先进科技与神经科学以及人工智能相关。

近年来, 欧美日韩等经济体争相出台大型脑计划和人工智能研究计划, 并在相关领域不断取得

重大进展。我国一直积极部署神经科学相关的重大科技项目, 并取得了一些重大研究进展。为保障国家安全和赢得未来战争, 增强国防科技水平, 积极规划神经科学与人工智能重大科技项目也应纳入重大科技决策议程。总之, 在新的形势下, 发展神经及人工智能科学技术对人口健康、生态环境和生活质量、经济繁荣、国家安全, 比以往任何时候都重要。

2 我国神经科学与类脑人工智能的科研组织需求: 布局形式及组织管理建议

大型科技计划是政府组织科学研究和技术开发活动的基本形式, 是政府弥补市场调节科学研究之不足、合理配置科技资源、促进科技进步和经济社会发展的有效手段^[22]。系统的科学计划组织管理可以有效统筹科技资源配置, 整合不同研究机构的优势, 提高科技研发效率, 是大型科学计划取得重大突破和卓越成果的必要保障。

2.1 借鉴国际经验优化布局形式

2.1.1 理论经验: 多元化参与、多层次合作是重大科技计划的主要特点

除保密项目外, 国际大型科技计划大致可以分为重大科技研发、重大科技工程和重大战略产品研发, 强调为了实现国家特定目标, 通过核心技术突

表1 美国国防高级研究计划局布局的神经科学领域相关项目^[21]

项目名称	项目简介	相关主题
电子处方(ElectRx)	开发一种微型、安全的植入式装置, 通过直接刺激特定的神经元, 持续监控人体的健康状况, 激发身体迅速而有效的自愈能力。	神经科学、健康、损伤、医疗设备、恢复
手部感觉和触摸接口(HAPTIX)	开发有高度触觉反馈, 像天然手臂一样灵活的假肢系统。	神经科学、健康、损伤、医疗设备、恢复、治疗
可靠的神经接口技术(RE-NET)	开发对神经系统进行刺激和监测的技术, 解决假肢的神经接口失效和高性能控制问题。	神经科学、健康、医疗设备、恢复
靶向神经可塑性训练(TNT)	利用人脑突触的可塑特性, 开发平台, 提高人对广泛的认知技能的学习能力, 降低强化训练的成本和时间, 提高训练效果。	神经科学、医疗设备、训练
神经工程系统设计(NESD)	开发可植入的神经界面, 在大脑和电子设备之间提供高级信号的分辨率和数据传输带宽。	神经科学、健康、医疗设备、恢复
神经功能、活动、结构和技术(Neuro-FAST)	利用数据处理、数学建模和新接口等多学科方法, 开发深入了解神经元活动与行为关系的神经结构、活动、功能的创新技术。	神经科学、健康、医疗设备
恢复主动记忆项目(RAM)	开发出可植入的无线装置, 帮助罹患脑外伤的退伍士兵恢复正常的记忆功能; 帮助外伤性脑损伤和神经疾病患者重建主动记忆能力。	神经科学、健康、医疗设备、恢复
革命性假肢项目	研发可帮助瘫痪或截肢者恢复行动能力与感知力的假肢。	神经科学、健康、医疗设备、恢复
系统性的神经技术新疗法(SUBNETS)	研制大脑接口、大脑活动的计算模型等, 使用深度脑刺激方法, 为抑郁、慢性疼痛、焦虑和创伤后应激障碍等疾病找到新疗法。	神经科学、健康、医疗设备、治疗

破和资源集成,在一定时限内完成或实现重大共性关键技术、重大工程和战略产品^[23]。尽管大型科技计划的战略目标、组织协调、管理运营模式各有不同,但都具备一些共同特征,主要包括:多学科的知识体系、多机构的合作协调、多渠道的资助形式、产学研多领域的结合,以及配合大型计划实施运行的监管体制。

以美国为例,美国大型科技计划通常实行“分散分权式”管理形式——即由美国白宫科技决策管理机构、国会、联邦部门分别负责计划制定、权责划分和组织管理。在实施过程中,联邦部门针对科技计划的不同阶段提出不同重点,在提出酝酿阶段强调竞争态势、经济需求、突破性技术的引领;在策划布局阶段强调吸纳公众意见与试点计划经验,并持续调整方案;在产出转化阶段强调未来战略投资效应和对经济社会的辐射、引领与渗透^[24]。美国能源部、国家人类基因组研究所等发起的“人类基因组计划”(HGP)被视作生物学领域首个大规模科技项目,“人类基因组计划”的成功实施不仅极大地推动了生物医学科技研究,也促使以学科交叉和跨领域合作为特征的大科学计划成为生物医学科技研究的主要组织模式。HGP为大型科学项目提供六大关键经验:跨国合作型科研、最大化数据共享、数据分析(整合)计划、优先考虑技术开发、

关注社会影响、开放的评估管理^[25-26]。

2.1.2 他山之石:发达国家“脑科学”专项计划组织管理模式各具特色

美国、欧盟、日本的脑计划基于自身先期基础和发展愿景而提出。美国“使用先进革新型神经技术的人脑研究计划”(BRAIN)旨在理解人类思想、动机、情感的产生过程,带动新型疾病疗法的开发和高科技产业的发展;欧盟“人脑计划”(HBP)依托信息通信技术(ICT),把认知神经科学和计算数字模拟结合起来,实现大脑系统的人工模拟,发展高性能计算机、医学信息学、神经形态工程、智能机器人等应用产业;日本“使用神经技术的脑科学疾病研究计划”(Brain/MINDS)目标为降低和消除神经精神疾病的社会负担^[1]。

美、欧、日脑科学计划的目标和规模差异很大,其参与机构和组织管理模式亦有不同(表2)。美国“使用先进革新型神经技术的人脑研究计划”由国家科学技术委员会(NSTC)设立神经科学跨部门工作小组(IWGN)协调管理,联邦机构(国防部高级研究计划局、国立卫生研究院、国家科学基金会、食品和药物监督管理局、高级情报研究计划署和能源部)、私营研究机构(科维理基金会、西蒙基金会、艾伦脑科学研究所等)和企业(谷歌公司等)三类参与机构对其参与部分进行独立管理;欧盟“人脑

表2 国际主要神经科学计划组织管理特点

科技计划名称	管理特点
美国“使用先进革新型神经技术的人脑研究”	<p>计划愿景: 以技术为基础,构建突破性大脑功能算法和模型,开发疾病新疗法和人工智能新产品,开创并引领全球神经科学产业。</p> <p>组织形式: 神经科学跨部门工作小组协调管理,联邦机构主导,私营研究机构、企业参与。</p> <p>计划特点: 参与机构根据承担工作开展独立自主管理。</p> <p>可借鉴经验: 以神经科学研究工具和技术为早期发展重点,以脑功能研究为中期研究目标,以疾病治疗和产品应用为最终目标,制定明确的计划技术路线图;具体工作下发至不同研究团队,由研究团队根据研究内容的属性和特点组织开展项目研究。</p>
欧盟人脑计划	<p>计划愿景: 利用信息通讯技术设施突破神经科学、计算机和大脑相关疾病治疗。</p> <p>组织形式: “人类脑计划”理事会统筹,研究机构竞标申请项目,并以公私合作伙伴关系形式寻找私人合作者。</p> <p>计划特点: 开展项目预研,指导后期项目进程。</p> <p>可借鉴经验: 吸收多方经验与意见,根据技术实施情况灵活调整实施方案与目标。</p>
日本“使用神经技术的脑科学疾病研究计划”	<p>计划愿景: 探索人类大脑疾病、精神疾病、心理疾病的变革性治疗。</p> <p>组织形式: 日本理化学研究所脑科学研究中心为核心机构、京都大学和庆应义塾大学作为合作机构,其他研究机构参与。</p> <p>计划特点: 聚焦猕猴研究,以集中制开发技术,以分散制开展临床试验。</p> <p>可借鉴经验: 针对若干社会负担较重的神经精神疾病,以分散制模式,依托不同地区的大型医疗机构建立临床试验站,大范围收集临床数据,并由“脑科学临床试验管理部门”统筹临床试验结果,反馈至神经科学基础研究领域。</p>

计划”原由瑞士知名神经学家构思并领导统筹,随后于2016年6月,该计划管理机构引入“利益相关方委员会”、“科学与基础委员会”、“理事会”等管理小组,化解原执行委员会导致的信任危机,重塑各界对计划的信心,欧盟成员国研究机构通过竞标形式申请子项目,每个子项目负责人通过公私合作伙伴形式寻找私人合作者扩大项目规模^[27];日本“使用神经技术的脑科学疾病研究计划”以集中式研究为主,分散式研究为辅。

值得注意的是,上述美、欧、日各经济体的脑科学计划只是其整体神经科学研究的一部分,其神经科学研究布局的范围和规模远远大于“脑计划”专项本身。随着各国脑科学研究的陆续实施和发布,开展神经科学研究国际科技合作的必要性日益凸显。例如,2016年4月,G-Science学术会议上G7集团的国家科学院及其他七个学术机构联合呼吁开展国际脑科学研究以应对重大神经精神疾病威胁。会议的“联合声明”提出了国际脑科学研究的四大目标:跨国家的基础研究;脑疾病预防、诊断、治疗的全球计划;大脑理论模型和以此为基础的人工智能;脑科学、社会科学、行为科学在教育改善和生活管理中的应用^[28]。“联合声明”呼吁,为达成这些目标,需要整合政府统筹和民间投入,融合神经科学的基础研究和临床应用。

2.2 我国神经科学和类脑人工智能发展规划:总体考虑和组织管理

2.2.1 总体考虑:“3+2+2”模式

我国神经科学与人工智能界已经初步提出脑科学和类脑研究^[29]和“人工智能2.0”计划^[30-31]概念。该脑科学和类脑研究以“一体两翼”为基础操作框架,关注脑认知科学的基础知识、神经精神性疾病的诊断与干预、类脑研究,在总体上几乎覆盖了美、欧、日三大脑计划的整体规划内容^[32]。“人工智能2.0”涉及大数据智能、群体智能、跨媒体智能、人机混合增强智能、自主智能系统等领域。

专家意见认为,面对神经科学和类脑人工智能的巨大发展机遇和战略需求,需要综合把握神经科学和人工智能的发展大趋势,需要以更广阔的视野、更长远视角来谋划未来。展望未来10~30年,我国神经科学和类脑人工智能发展规划可分为7大领域,实施“3+2+2”领域模式(表3),包括3大重点方向:基础神经生物学、神经精神性疾病、类脑人工智能;2大支撑性领域:变革性神经科学技术、支撑平台;以及2大产业领域:神经生物医药及生

物医学工程、人工智能产业。

2.2.2 组织实施:需要更加注重战略管理和过程管理

综合专家意见,我国神经科学与类脑人工智能发展应当坚持体系融合的基本组织实施路线,并在八个方面加强科技组织管理(表3)。

遵循五大体系融合基本组织实施思想。我国神经科学与类脑人工智能大型科技计划的布局范围将覆盖神经科学研究的各个方面,需要关注多方面的融合:国家科技计划与国家自然科学基金委、中国科学院等部委支持重大项目的融合或对接;与北京“脑科学研究”专项、上海“脑-智工程”等地方重大项目或计划的对接和互补;民口科技计划和国防需求的融合和对接;政府资源与社会、企业资源的融合;与其他相关大型科技计划的对接和互补。

实施多元参与、集中统筹相结合的整体管理架构。由科技部、国家自然科学基金委、中国科学院、教育部、国家卫生计生委、国防科技主管部门等组织跨机构工作组,成立我国“神经科学和人工智能发展领导小组”,下设专家顾问组(提供战略咨询意见和建议)、项目管理委员会(负责科技计划安排,组织对科技项目评估、指标考核、产出效果评价,制定运行体系机制)、第三方评估小组(机制)。项目管理委员会可引入共同主任或主任轮值制度,且必须充分明确下属工作组及成员职责与工作内容,防止“既是教练,又是运动员,还是裁判员”的情况。此外,为推动国际合作交流,专家顾问组中应引入熟悉国际与国内发展形势的海外华人专家。为组织和实施国家安全、国防相关项目,建议在项目管理委员会内另设专门工作委员会。

构建公私合作的社会化科技创新投入体制。公私合作创新机制能够最大限度地发挥市场配置创新资源的决定性作用,优化科技创新资源统筹分配,公私合作机构建设、公私合作基金、多层次创新伙伴关系是公私合作的典型体现形式^[33]。例如,在科研项目的立项和评审阶段,邀请社会学和产业应用专家进行社会效益预判和评估,提高产业界专家参与的积极性等。在具体项目实施中,放宽经费使用范围,允许项目组向具有投资、建设、运营管理能力的社会资本购买科技产品或服务;针对基础设施和大型研究平台,建立政企合作模式,引入企业等社会机构和资金参与和共同建设的合作模式。

对战略目标进行领域统筹。具体布局领域根据当前神经科学和类脑人工智能相关研究的高峰领域(当前研究重点且已有较好基础的领域)、培育领域

表3 对我国神经科学和类脑人工智能发展总体设计、组织管理方面的建议

主要方面	专家意见或建议要点
总体设计	“3+2+2”模式 3大重点方向：基础神经生物学领域、神经精神性疾病领域、类脑人工智能。 2大支撑性领域：变革性神经科学技术、支撑平台。2大产业：神经生物医学及生物医学工程、人工智能产业。
基本组织实施路线	五大体系融合和对接 部委支持重大项目的融合和对接；与地方重大项目或计划的对接和互补；军民对接和互补；政府资助与企业投入相结合；与其他大型计划融合和对接。
组织管理	整体管理架构 多元参与、集中统筹相结合；成立“神经科学和人工智能发展领导小组”；建立海外专家参与机制。
	政府、企业合作机制 邀请社会学和产业应用专家进行社会效益预判和评估，提高产业界专家的参与积极性。
	战略目标 进行领域统筹，设置高峰领域、培育领域、保护领域。
	评审立项过程 采用新型资助机制；完善同行评审体系；支持跨学科研究等。
	科研项目效率 建立跨部门、跨机构合作的运作体系和机制；建议设立国家神经科学和人工智能工程中心。
	考核评价 建立分类评价体系、差异化考核方式。
	第三方评估机制 对总体规划实施情况、项目申报和执行情况定期进行定期的第三方评估。
	专项：人才培养 支持青年科学家的研究，弥补高端人才、原创性人才不足局面。

(与未来科技进展关系密切,但当前基础较弱的领域)、保护领域(发展前景尚不明确的高风险领域)进行分类管理,以高峰领域(约60%)为布局主体,同时保障对培养领域(约30%)和保护领域(约10%)的支持力度。针对高峰领域及工程项目,依据可行性设定有限目标和发展方向。

保障评审立项过程科学和结果合理。在过程、形式、结果各方面保证评审结果的准确、透明、公正。适当借鉴美国NIH的R01项目等评审模式,扩大同行评审的范围(如在评审团队中引入1~2名其他领域专家),进一步健全并严格执行回避制度;针对本领域多学科交叉特性,根据项目领域,鼓励不同学科(神经科学、物理学、计算机科学等)和不同领域(基础科研、临床研究、技术研究、产业研究)人员参与研究项目,把学科交叉和领域合作纳入评审体系。

鼓励具体科研项目多重合作组织形式。对于神经科学和类脑人工智能研究的重点领域,可借鉴国家重点研发计划的项目制模式,通过妥善的合作形式(尤其是可有效解决科技资源供给和成果分配问题),统筹跨部门、跨机构的研究力量和资源,解决重大科学问题或突破关键科学技术;除依托现有国家重点实验室以外,对于目标明确、技术系统成熟的工程性课题,可以参考美国艾伦脑科学研究所等机构,建设国家神经科学和人工智能工程中心。

不断完善考核评价机制。需要建立分类评价体

系,明确应用目标导向和自由探索导向项目的差异化考核方式。在评估指标上,根据项目性质(“以科学为导向”、“以疾病为导向”、“重大产品/技术导向”)设立个性化考核指标,把项目研究的社会效益和社会影响力纳入考核评价体系,从科学、技术、产业、社会效益角度全面评判项目实施效果;在奖罚机制上,项目监管方可设立进出机制,确保有能力研究人员获得相应的项目支持。

建立独立的第三方评估机制。对总体规划实施情况进行定期的第三方评估,并在适当范围内,确保总体战略层层推进、按阶段完成目标。

交叉人才培养应是重点内容之一。针对重要领域人才不足的问题,一方面通过相关“人才计划”等形式继续吸引海外优秀研究人才回国发展,另一方面适当调整高校及研究机构的招生办法与指标(例如增设“人工智能”学科为一级学科),布局培养后备人才队伍,为后续领跑国际先进水平打下基础。

3 面向我国2020—2050年的重大科技布局初步建议：“3+2+2”模式

以3大重点方向(基础神经生物学、神经精神性疾病、类脑人工智能)、2大支撑性领域(变革性神经科学技术、支撑平台)为核心内容,按照中短期发展目标和面向2030—2050年的长期发展目标进行论述。

由于相关产业科技内容涉及更复杂的社会经济体系,需要更精确的产业路线图设计方法,本文暂时将2大产业(神经生物医药及生物工程、人工智能产业)涉及的有关内容融入相关科技布局中,而更加系统性的内容将在后续工作中完善。

3.1 基础神经生物学

围绕核心科学问题展开。基础神经生物学需要探索的核心科学问题包括(但不限于):感知和认知的神经基础是什么?智力的本质是什么?思维的本质是什么?什么是意识?意识起源于哪里?

3.1.1 脑图谱绘制

必要性:脑图谱的绘制是探索智力和意识本质的基础,是开展神经精神疾病研究与干预的基础。

中短期发展目标:1)绘制模式动物神经系统的神经元等细胞种类图谱、脑结构和功能图谱,其中神经元种类的鉴别是解析神经环路功能以及脑结构和功能图谱的关键性基础;2)解析神经元基因表达谱和蛋白质表达谱;3)对人类重要的脑功能亚区进行全方位的解析,从全细胞视野、精确的突触联系等结构研究,到相关功能研究。

面向2030—2050年的发展目标:1)绘制人类大脑的分子细胞图谱、结构和功能图谱;2)解析神经元电活动的信息、意义和功能,揭示神经元信息处理工作原理并模拟电活动;3)探索脑区的基本结构与功能单元,模拟大脑处理信息的基本法则。

3.1.2 神经发育研究

必要性:基因和外部环境因素相互作用确保神经发育各个阶段有序进行。神经发育研究对探讨意识本质和疾病临床诊疗与干预都至关重要。

中短期发展目标:1)解析神经干细胞分化迁移与极性建立的调控机制;2)揭示基因与脑区发育的关联性;3)阐明表观遗传和非编码RNA调控神经元、神经环路发育及建立的基本规律;4)利用诱导性多能干细胞技术等实现体外人脑发育研究,并进一步发现不同患病人群的疾病发展和药物反应机理^[34]。

面向2030—2050年的发展目标:1)彻底解析神经元及神经环路发育和建立,彻底解析脑发育的全过程,绘制脑发育图谱;2)将神经发育研究与罕见遗传疾病相关联,开展罕见疾病早期干预、治疗。

3.1.3 神经环路解析

必要性:神经环路是构成神经系统的基本单元,在脑信息传播和处理过程中发挥重要作用。理解神经环路的形成、调控及信号处理机制是理解神经信

息编码和大脑工作原理的基础。

中短期发展目标:1)解析重要行为相关神经环路的特异性、神经元种类及组合的功能表现和功能调控机制;2)解析神经环路信息编码的基础,重点解析神经元之间建立选择性联系的机制、神经环路中神经信息的处理与整合;3)阐明神经干细胞对神经环路的修饰和功能调节作用;4)研究外部获得性因素对神经环路的影响;5)探索病理状态的神经环路重构。

面向2030—2050年的发展目标:1)实现对跨脑区复杂神经环路的高时空分辨率的精细操控;2)深入开展病理状态的神经环路重构研究,从神经环路角度探索神经发育疾病和神经代谢疾病的早期干预与治疗方法。

3.1.4 认知的神经基础

开展基因—神经元—环路—网络—行为的多层次、多尺度研究,实验室研究与相关理论模型构建协同合作,全面解析人脑重要的认知功能。

1) 多模态感知整合研究

必要性:大脑如何整合不同模态的感知信息从而做出最优化的判断,是神经科学的重大基础问题,将为类脑智能发展提供理论基础。

中短期发展目标:(1)提出感觉信息的神经编码机制、数学模型和信息理论;(2)揭示感知觉皮层结构和功能的可塑性;(3)揭示复杂动态环境中感知觉信息处理的神经机制及其神经表达的时空特性;(4)解析视觉、听觉、痛觉等感知觉的调控机制。

面向2030—2050年的发展目标:揭示多通道感知觉信息整合的神经机制和计算原理,将其充分应用于人工智能,开发更加类人的智能产品或系统。

2) 学习与记忆机制

必要性:学习与记忆是人类和动物认识世界的基础之一,阿尔茨海默症等多种疾病都表现出学习与记忆障碍。

中短期发展目标:(1)从分子、突触、环路、网络的不同层面,解析大脑记忆的形成、存储、提取、遗忘(包括主动遗忘和被动遗忘)的机制;(2)揭示短期记忆(或工作记忆)、中长期记忆、长期记忆的分子细胞和神经环路机制,以及短期记忆向长期记忆转化的遗传与分子细胞机制等。

面向2030—2050年的发展目标:(1)从大尺度、整体层面探索人类学习、记忆机制,揭示人脑如何实现自我学习;(2)将研究成果应用于神经退行性疾病干预(如通过大脑植入物或脑机接口修复受损

记忆)和类脑人工智能产品研发。

3) 人类抉择行为的神经机制

必要性: 抉择是从多种选项中挑选出结果的思维或认知过程。人类如何在不确定的环境中作出适应性反应, 是一个重要的科学问题。

中短期发展目标: (1) 从神经环路、网络水平理解大脑如何利用视觉等感觉系统收集并整合抉择所需要的信息; (2) 大脑如何根据相关信息进行价值分析并作出最终抉择; (3) 研究价值概念在脑内表征的神经机制; (4) 阐述个体在不确定的情景中抉择的机制以及社会抉择(或称为群体抉择)行为的神经机制。

面向 2030—2050 年的发展目标: 进一步开展风险决策、群体抉择的神经机制研究, 加强与心理学、行为经济学交叉融合研究, 发展神经经济学^[35]。

4) 意识的神经机制

必要性: “意识是如何产生的”是神经科学领域的难点问题之一(尤其是自我意识), 探索意识机制是人类认识自我的途径之一, 将为相关精神疾病临床干预带来巨大的应用潜力。

中短期发展目标: (1) 制备用于意识研究的动物模型; (2) 揭示意识相关的脑区和神经环路^[36]; (3) 在神经层面区分意识与无意识及其认知神经机制; (4) 利用脑功能成像手段初步探索自我意识的神经机制, 包括涉及的相关脑区、神经环路和神经编码; (5) 初步探索自我与他人的神经表征差异。

面向 2030—2050 年的发展目标: (1) 阐明意识的神经机制^[37]; (2) 阐明自我意识的心理和神经机制; (3) 探索理解他人意图和情感的神经机制。

3.2 神经精神性疾病

综合考虑可行性、重要性和社会负担三个方面, 中短期内以脑卒中、疼痛、智力障碍(智障)等疾病为主, 降低发病率和社会负担; 面向 2030—2050 年, 以发病率高、负担重的重要神经退行性疾病和精神性疾病(抑郁症、精神分裂症等)为主, 从疾病的发病机制探索到早期诊断、早期干预和新疗法开发, 延缓疾病发生发展甚至实现治愈目标。

3.2.1 脑卒中

必要性: 脑卒中(中风或脑血管意外)是一类突然起病, 以局灶性神经功能缺失为共同特征的急性脑血管疾病, 是位居我国社会负担第一的重大疾病, 该病具有高发病率、高死亡率、高致残率、高复发率等特点。国家卫生计生委已设立脑卒中防治工程委员会, 实施了专门的“国家卫生计生委脑卒

中防治工程”。

中短期发展目标: 1) 开展神经科学与生物化学、代谢、心血管等领域的合作研究, 建立脑卒中机理合作研究体系和机制; 2) 开展脑卒中早期干预与诊断, 强化对脑卒中风险因素的干预, 减轻脑卒中的病理表现; 3) 发展脑卒中急救技术、方法和设备; 4) 研发脑卒中发生后的脑保护药物; 5) 发展脑卒中患者康复技术、方法和智能康复机器人等技术设备, 构建相关社会服务体系。降低脑卒中发病率、复发率和致残率, 到 2020 年, 脑卒中发病率增长速度降到 5% 以下, 死亡率下降 10%^[38]。

面向 2030—2050 年的发展目标: 1) 利用干细胞、新型脑机接口等新技术修复受损的脑组织与功能; 2) 建立完善的脑卒中早期干预与治疗、康复医疗服务体系。

3.2.2 智障、孤独症为代表的神经遗传与发育性疾病

必要性: 我国智障和孤独症临床发病率逐年攀升, 不仅给患者, 还给患者家庭、社会带来巨大的负担^[39]。

中短期发展目标: 1) 建立智障和孤独症诊断标准; 2) 通过大规模基因测序, 筛查致病的基因突变和遗传变异, 构建智障和孤独症的基因网络图谱; 3) 构建智障和孤独症的人脑图谱; 4) 探索智障、孤独症的致病因素和机理; 5) 开展产前诊断与筛查, 降低遗传性疾病的发病率; 6) 发展智障和孤独症患者的医疗和教育等社会服务技术、方法和体系。

面向 2030—2050 年的发展目标: 1) 优化相关诊断方法, 按病因诊断, 细化智障和孤独症等疾病分型; 2) 开发新型、高效的基因疗法和其他治疗方法与药物; 3) 大幅度降低智障和孤独症发病率。

3.2.3 慢性疼痛

必要性: 慢性疼痛是我国社会负担第三的重大疾病, 由于发病原因众多, 发病机理复杂, 导致难以诊断和治疗, 严重影响患者的精神心理健康和生活质量。

中短期发展目标: 1) 完成疼痛分子细胞、神经环路和脑结构与功能图谱的构建; 2) 解析常见慢性疼痛的机理; 3) 发现关键性镇痛药物靶点, 发展综合性治疗技术和方法; 4) 建立疼痛医疗康复的社会服务体系。

面向 2030—2050 年的发展目标: 1) 解析疼痛的脑图谱及其导致抑郁症等精神心理性疾病的神经机制; 2) 开发出新型治疗药物和工具, 例如新型磁刺激、电刺激和超声波刺激仪器设备, 缓解甚至治

愈慢性疼痛, 提高患者生活质量; 3) 全面完成慢性疼痛的个体化医疗体系建设。

3.2.4 以阿尔茨海默症、帕金森症为代表的神经退行性疾病

必要性: 神经退行性疾病是一类由中枢神经系统慢性退行性变性而产生的疾病总称。多数神经退行性疾病进展缓慢, 发病机制不明, 迄今仍无有效治疗措施, 严重影响我国老年人的生活质量。我国阿尔茨海默症、帕金森症、多发性硬化症等发病率高, 迫切需要开展以阿尔茨海默症和帕金森症为代表的神经退行性疾病研究与防治。

中短期发展目标: 1) 探索遗传、表观遗传和环境因素对阿尔茨海默症、帕金森症等神经退行性疾病发病的作用机制研究; 2) 揭示阿尔茨海默症、帕金森症核心症状记忆障碍的神经环路和网络异常模式; 3) 建立可用于药物研发、生理和物理干预研究的阿尔茨海默症、帕金森症转基因非人灵长类动物模型; 4) 以中国人脑组织标本和相关病史资料为对象, 开展病理学、影像学、基因检测和表观遗传学分析, 研发阿尔茨海默症、帕金森症早期诊断的生物标志物; 5) 研发早期诊断、干预治疗技术和新型药物, 开发新型无创治疗仪器。

面向 2030—2050 年的发展目标: 1) 全面、系统阐明阿尔茨海默症、帕金森症的发病机制和致病因素; 2) 构建基于神经环路、网络、遗传信息、生化和影像学、临床症状等的多模态生物标志指标体系; 3) 进一步研发高效的治疗产品与新疗法, 如神经干细胞疗法, 精准的深部脑刺激和经颅磁刺激疗法, 能修复大脑功能并治愈阿尔茨海默症、帕金森症的植入芯片或脑机接口等。

3.2.5 抑郁症、焦虑、精神分裂症为代表的重要精神性疾病

必要性: 我国的抑郁症、焦虑、精神分裂症等精神性疾病发病率高, 影响面广, 迫切需要开展这些疾病的基础与临床研究, 开发相关的干预与治疗产品。

中短期发展目标: 1) 探索抑郁症等精神性疾病的生物学机制, 包括遗传学、表观遗传学及脑异常改变等; 2) 揭示环境因素与基因相互作用在抑郁症等精神性疾病发生发展中的作用; 3) 构建和应用抑郁症等精神性疾病的非人灵长类动物模型; 4) 开展计算精神病学研究^[40], 将实验与模型构建相结合, 整合从基因到行为各个层面的信息, 多尺度全面、系统地探索重要精神性疾病的发生发展机制; 5) 开

发相关的生物标志物, 初步构建早期诊断方法, 针对常见精神性疾病开展前临床期的早期识别研究以建立多方面表型指标, 发展认知行为疗法、社会认知与人际互动培训、认知矫正等干预方法。

面向 2030—2050 年的发展目标: 1) 全面解析精神分裂症、抑郁症的发病机制, 构建早期识别与干预指标体系; 2) 借助神经环路和网络异常等分析、提升精神性疾病评估的客观性和准确性; 3) 构建精神性疾病个体化诊断与评估标准、干预标准; 4) 开发新型早期诊断工具和方法; 5) 开发新型治疗药物和非侵入性的干预手段(如能修复相关脑功能的大脑植入物或脑机接口等)。

3.3 类脑人工智能

受脑信息处理机制启发, 借鉴脑神经机制和认知行为机制, 发展类脑智能已成为近年来人工智能与计算科学领域的研究热点^[29]。对于类脑人工智能研究, 我国迫切需要进行更为细化的布局: 一方面充分利用神经科学领域的丰硕研究成果, 促进神经科学与人工智能的深度融合, 产生原始创新的理论和方法; 另一方面进一步加强人工智能技术与产品的研发、应用和产业化发展, 反过来助力神经科学研究与创新。

3.3.1 充分利用神经科学研究成果, 开发新理论、新算法

必要性: 类脑人工智能的技术突破, 需要有新理论、新算法、新模型的支撑。在重视人工智能前沿基础理论研究的基础上, 应积极开展计算神经科学研究, 充分利用神经科学研究成果, 挖掘人脑智能机制, 建立类脑智能新理论, 开发类脑人工智能算法和新模型^[41]。

中短期发展目标: 1) 进一步开发基于深度学习和生物识别的新型类脑算法, 初步构建与之相应的新一代人工神经网络模型, 对脑信息传递、自我学习、记忆等高级功能进行简单模拟; 2) 突破深度学习的理论和技术局限, 结合脑认知机制, 构建统计关联与特征关联相结合的新型学习理论, 实现“知识驱动”与“语义驱动”关联统一^[42]。

面向 2030—2050 年的发展目标: 1) 构建融合深度学习与强化学习、演化计算、主动学习、毕生学习等仿生和自然计算理论的新型理论框架; 2) 实现大规模并行神经网络、进化算法和其他复杂理论计算; 3) 对大脑原始能力(即理解和物种生存相关联的生物行为等)有了深入理解, 从而实现高级的机器逻辑能力。

3.3.2 重点部署深度学习, 探索和模拟脑信息处理机制

必要性: 将深度学习等机器学习过程与人类已经积累的大量高度结构化的知识相融合, 发展逻辑推理, 甚至自我意识等高级认知功能, 是类脑人工智能发展的大趋势。

中短期发展目标: 1) 对视觉、听觉、躯体觉等感知觉的神经机制进行模拟, 实现模式识别的优化与创新, 获得进一步优化和通用的虚拟现实技术、人机交互技术等; 2) 神经网络、认知计算模型和智能系统的自适应能力大幅度提升, 通用性人工智能技术获得突破; 3) 开发出能够同时完成语音识别、图像处理、自然语言处理、机器翻译等任务的通用性的人工智能系统。

面向 2030—2050 年的发展目标: 1) 突破智能系统在感知、认知、控制等方面的巨大瓶颈, 开发出具有自主学习能力的智能系统; 2) 建立类人学习机制的认知结构, 大幅度提高机器学习鲁棒性, 提高机器人的认知能力和主动学习能力; 3) 建立在材料、物理等相关技术突破的基础上, 开发出新型供能系统, 智能系统耗能降低至通用水平。

3.3.3 重视大数据技术和新一代互联网技术等基础技术支撑

必要性: 大数据和互联网是人工智能发展的基础技术支撑。应当充分利用我国互联网大国的优势, 把大数据和用户资源优势转化为人工智能技术优势。

中短期发展目标: 1) 充分发展软件定义网络(SDN), 利用 SDN 控制器采集的大数据进行深度学习, 提高人工智能决策的可靠性^[43]; 2) 进一步提高大数据智能分析能力, 尤其是与神经科学密切相关的脑图谱、神经信号等数据收集、分类、识别和综合处理能力。

面向 2030—2050 年的发展目标: 1) 构建起更为简单、开放、可扩展、安全、可靠、融合以及高效、灵活调控的网络及信息资源服务, 实现信息内容资源按需调控和差异化管理的服务定制网络(SCN); 2) 实现数据采集智能化, 数据传输零等待, 数据存储“学习”化, 数据分析“类脑”化。

3.3.4 开发类脑芯片、类脑智能器械、脑机接口等智能产品

必要性: 以市场和产品为导向, 开发原创性智能产品、提高产品性能、降低能耗、扭转国外技术垄断局面, 是我国人工智能领域发展的迫切需求。

中短期发展目标: 1) 神经计算电路模块的通用性进一步提高, 设计、制造难度进一步降低, 类脑芯片等类脑元器件和硬件系统获得技术突破; 2) 研发出综合性类脑人工智能软硬件系统; 3) 脑电信号检测、传感、编译、转换等技术有所突破, 高性能、高传输速度、高兼容性脑机接口得以推向应用。

面向 2030—2050 年的发展目标: 1) 类脑人工智能软硬件系统耗能和成本大幅度降低, 通用性显著提高; 2) 将人类识别能力与计算机高速运算能力相结合的“人-机”协作系统在安全、医疗、工业等领域广泛应用; 3) 国防、交通、医疗、民生等全领域“类脑人工智能化”, 类脑人工智能技术与产品占相应领域核心技术和产品 50% 以上, 且我国自主品牌市场占有率超过 50%。

3.3.5 推动类脑智能机器人的研发和应用

必要性: 机器人作为神经科学与智能技术的综合终端, 作为改变产业格局、提升经济效益最直观、最直接的产品, 是类脑人工智能布局的重中之重。

中短期发展目标: 1) 围绕汽车、机械、电子、危险品制造、国防军工、化工、轻工等工业机器人、特种机器人, 以及医疗健康、家庭服务、教育娱乐等服务机器人应用需求, 开发出初步具有动态立体视觉感知、快速自感知、多模态信息融合自学习能力、人机协作、快速反应和高精度操作的类脑智能机器人; 2) 积极研发新产品, 促进机器人标准化、模块化发展, 扩大市场应用; 3) 突破机器人本体、减速器、伺服电机、控制器、传感器与驱动器等关键零部件及系统集成设计制造等技术瓶颈。

面向 2030—2050 年的发展目标: 1) 机器人智能性大幅度提高; 2) 开发出应用于民生、减轻社会负担和家庭负担的民用机器人, 如具有情绪感知和抚慰能力的老年服务机器人等; 3) 工业领域的基本操作全面“机器人化”, 民用、军用领域简单工种 50% 被机器人替代。

3.3.6 提升国家整体智能制造能力

必要性: 随着工业 4.0 时代的到来, 全球制造业格局面临重大调整, 基于信息物理系统的智能装备、智能工厂等智能制造正在引领制造方式变革; 智能化已经成为制造业发展的必然趋势。从整体上提高我国智能制造能力, 是“中国制造 2025”的重大任务之一^[44], 是推动我国制造业转型升级和创新发展的保障, 巩固我国制造业大国地位的重要保障。

中短期发展目标: 1) 制造业重点领域智能化水平显著提升; 机械、航空、船舶、汽车、轻工、纺织、

食品、电子等行业生产设备初步完成智能化改造; 2) 掌握重点领域关键核心智能制造技术, 自主知识产权智能制造系统装备的市场占有率大幅提升; 3) 类脑人工智能技术在智能制造领域迅速转化, 促进智能交通工具、智能工程机械、服务机器人、智能家电、智能照明电器、可穿戴设备等智能产品的“类脑”研发及产业化。

面向 2030—2050 年的发展目标: 1) 制造业重点领域全面实现智能化, 关键工序智能化、关键岗位机器人替代、生产过程智能优化控制, 实现制造业“人工智能-人类专家”的交互协作; 2) 智能制造核心技术对外依存度明显下降, 基础配套能力显著增强, 重要领域高端智能装备能力达到国际领先水平; 3) 建立完善的智能制造标准体系和信息安全保障系统, 完成智能制造网络系统平台的搭建。

3.4 变革性神经科学技术发展

3.4.1 开展大脑及神经系统的神经生物元件的本底普查: 神经元的标记和类型鉴定新技术

必要性: 对神经元进行标记和分类鉴定是有效操纵神经元、了解大脑患病时神经元变化的先决条件, 需要发展神经元的标记和类型鉴定新技术^[45]。

中短期发展目标: 改进现有神经元标记工具, 包括神经元基因组、转录组、蛋白质组和代谢组高通量系统性检测、钙指示剂、突触监测器等, 重点发展神经元基因组编辑技术。发展非遗传学的生物化学或化学标记技术; 发展胶质细胞的标记修饰技术。

面向 2030—2050 年的发展目标: 建立神经元组学技术, 发展神经元标记综合实验工具, 更快速、廉价; 具有长期安全性和有效性的人类大脑神经元基因组编辑技术; 可跨越血脑屏障的非永久性基因标记技术。

3.4.2 认识神经功能的结构基础: 新型脑结构成像技术及神经环路反向工程技术

必要性: 进行脑结构各种层次的成像和重建, 将脑功能与结构基本对应起来, 需要新型脑结构成像技术及神经环路反向工程技术。

中短期发展目标: 1) 超微纳米成像技术, 解析完整的神经突触在接近生理状态下的高分辨三维超微结构, 发展神经微环路的解析技术, 如光电关联环路重建技术^[46]; 2) 具有更高灵敏度和特异性的超微光学成像技术, 可借用可突破光学衍射限制的利用受激辐射耗尽(STED)以及单分子定位重构(PALM/STORM)等超微光学成像技术等; 3) 整体透明成像技术和新型染色方法, 如 CLARITY、Scale 试剂或

SeeDB 光透明法等; 4) 活体模式生物三维空间神经元集群活动成像技术。

面向 2030—2050 年的发展目标: 实现神经突触的定量结构生物学表征分析; 发展面向任何物种均普遍适用的多脑区、全脑尺度神经元的同步观测技术。

3.4.3 识别特定神经功能的局部微观动态机制: 神经环路示踪、脑结构和功能图谱的绘制技术

必要性: 新一代神经环路示踪和脑结构功能图谱绘制技术体系, 将全面提供重要的神经结构和功能细节。

中短期发展目标: 1) 从分子生物学或化学角度, 开发出极弱毒力的, 侵入位点、传播方向和跨突触级数可控的, 高灵敏和灵活的, 适于不同物种(尤其是非人灵长类), 兼顾结构示踪与功能研究的, 细胞和突触类别特异的, 可标识执行特定功能的神经环路示踪工具库; 2) 整合神经环路示踪工具与束路追踪术或阵列断层摄影技术等, 提高分辨率; 3) 大脑精细结构图绘制技术及其提供支撑的组织标记和制备、自动组织切片和成像、大数据分析技术。

面向 2030—2050 年的发展目标: 构建单细胞分辨的人和灵长类动物全脑图谱。

3.4.4 解析特定行为大时空神经元活动机制: 高精度、大范围神经活动监测技术

必要性: 研究某个特定行为或认知过程的神经机制, 需要对大脑各相关区域的神经元活动广泛监测和取样; 分析生物行为和认知关系的神经电化学活动基础, 需要发展高精度、大范围的神经活动监测技术。

中短期发展目标: 1) 开发新一代植入式神经电极阵列和表层电极, 研发方向包括: 新电极材料、光电融合、记录与刺激融合、高生物相容性、较高的信噪比等; 2) 开发新型电压敏感指示器和纳米荧光探针及配套成像技术。高时空分辨率、大范围同时检测神经元集群电活动的新一代荧光分子或纳米粒子探针, 具有对细胞膜电位变化敏感、高信噪比、可分辨单个动作电位等特性。

面向 2030—2050 年的发展目标: 具有单细胞水平分辨率、便于哺乳动物脑结构大部分区域非侵入性或微创植入的检测设备; 实现对神经元环路重建、光遗传操控和大规模、长期监测技术的系统整合。

3.4.5 对神经活动功能理论假设的必要检验: 神经环路操纵技术

必要性: 对神经活动模式功能理论假设的因果

检验,要求能够对这种潜在的神经活动模式进行直接的操纵,需要发展神经环路操纵技术。

中短期发展目标:1)改进和发展现有光遗传学技术、声遗传学、电磁调控技术;2)发展具有较高准确性和特异性的电极刺激技术;3)发展其他可更细微调控神经功能的无创、非遗传学特定工具。

面向2030—2050年的发展目标:神经环路操纵技术的系统整合,通过直接激活或抑制一系列的神经元,推动神经科学从观察性研究发展到因果研究,并全面应用到临床医疗。

3.4.6 从动物跃升到人体:解析人脑正常功能和诊治神经精神性疾病的变革性技术

必要性:人脑功能研究面临的主要挑战是,许多应用与实验动物的研究方法不能在人类中展开,因而很难转化成对人的神经精神性疾病的诊断、预防和治疗。需要发展解析人脑正常功能和神经精神性疾病的变革性技术。

中短期发展目标:1)改进现有非入侵成像技术,包括:功能磁共振成像(MRI)技术、脑电图(EEG)和脑磁图描记术(MEG)、正电子发射断层扫描(PET)等技术,达到更高时空分辨率;2)与其他技术整合,如与示踪剂技术、体外检测或在体监测技术相结合;3)包括深部脑刺激术、经颅磁刺激(TMS)、脑机接口技术在内的人脑监测和刺激的技术开发。

面向2030—2050年的发展目标:发展具有分辨脑神经核团或神经元的高时空分辨率的人脑成像技术,发展基于全新原理,可对人脑分子、结构和功能成像一体化的技术和设备;发现众多新的神经药物靶标;具有较高生物相容性,更加安全、功能更加可靠、稳定和持久的实用性脑刺激设备和脑机接口设备。

3.4.7 解析高级脑功能:整合应用介观神经生物学技术、神经信息学和计算神经技术

必要性:通过理论、模拟以及复杂的定量分析,能够跨越空间和时间的尺度,将神经系统的基础性活动与复杂的神经系统的动态与行为有机联系起来,推进理解人类直觉难以直接分析的非线性脑功能。为此需要发展介观神经生物学技术、神经信息学和计算神经技术。

中短期发展目标:1)解决与大规模神经元群体记录的维度和动力学相关的理论性问题,开发新的技术和复杂行为范例;2)建立发掘脑及神经网络大数据集的技术和能力。

面向2030—2050年的发展目标:提出脑的高

能功能理论模型,理解人类直觉难以直接分析的非线性脑功能。

3.5 支撑平台建设

3.5.1 构建非人灵长类动物模型

非人灵长类动物模型是深入推进神经科学研究应用的基础条件。

中短期发展目标:1)神经精神性疾病方面的转基因和药物诱导模型;2)发展非人灵长类模式动物的表型分析技术,分析疾病的各种行为、生理和病理特征等表型;3)研发全脑表达光遗传学工具蛋白的转基因猴等工具模式动物^[47]。

3.5.2 开展大型队列研究,建设我国人脑库

开展脑血管疾病、神经退行性疾病等重大疾病的长期、标准化国家级队列研究,充分利用队列研究获得的数据开展个性化预防、治疗。同时,我国目前只有少数机构建立了小型的人脑库,迫切需要配合重大项目和大型队列研究,尽快建立大型、整合各类脑信息和数据、样本的我国人脑库。

大型队列研究中短期发展目标:1)建立人脑临床数据收集机制,对生物样本类型、内容构成、样本规模、标准规范、质量控制及资源共享等方面进行标准化、规范化以及网络信息化统一管理;2)开展分子标志物的筛选,以及特异性、敏感性、前瞻性、多中心大样本临床评价;3)基于大规模队列研究,开发个性化的预防、诊疗方案。

我国人脑库建设中短期发展目标:1)在条件成熟的地区,由国家和地方政府资助,尽快建立“中国人脑库”基地;2)重大科研计划和科研基地规划时,应设立专项基金,建立3~5家重要神经精神性疾病的人脑库。

3.5.3 加强基础硬件、数据库和信息化研究平台的整合部署

必要性:发展类脑人工智能,要充分整合资源,加强基础数据库和研究平台、信息化支撑平台、高级计算平台的建设。

中短期发展目标:1)初步完成涵盖脑、神经元、生物电等综合数据平台的设计;2)在整合已有的网络和数据系统资源的基础上,搭建起能够承载倍增级别的多种类型数据、参数、特征训练样本的传输、存储与处理的系统;3)建立类脑人工智能数据标准,明确数据的定义、标注、应用和测试等标准要求。

面向2030—2050年的发展目标:建立起涵盖类脑人工智能开发相关资源的标准化全维度数据库;建立起允许神经科学家和人工智能专家进行自

由合作、创新与技术产品开发的通用类脑人工智能资源平台。

3.5.4 政策保障平台

开展:1)颠覆性技术和重大突破成果的风险评估;2)人才、伦理、法律、社会等相关问题研究。

中短期发展目标:1)建立我国“神经科学和人工智能专家库”,并利用专家库辅助研究项目的统筹和分配,让“研究人员从事其真正擅长的研究工作”。2)成立“类脑人工智能社会与伦理委员会”,保持对类脑人工智能可能带来的社会与伦理问题的关注与研究。社会问题包括失业、产业重塑、“人-机”共生、机器人控制等;伦理问题包括人体机能增强、人工智能的“本能”与自生等。3)加强宣传,完善相关法律法规:向全社会普及遗体捐献意识和建立我国人脑库的价值;建立全国性的遗体捐献法律法规,制定脑库样本共享方面的知识产权规定^[48]。

面向2030—2050年的发展目标:具备保障“人类-类脑人工智能”社会有序发展的制度设计和政策执行能力。

综合以上,神经科学及相关的人工智能技术正在重塑未来科技和社会格局,亟需加强我国相关科技布局 and 产业发展。系统开展神经科学及相关人工智能领域发展方向预测和中长期技术路线图研究,有助于我国对相关重大科技计划统筹布局,加强相关高技术产业的培育和精准支持,带动新一轮产业和社会变革,进而牢牢把握在全球新一轮科技革命和产业变革中的主动权,筑牢中国梦。

致谢:多家单位和多名专家学者参与支持本工作。感谢军事医学科学院反馈的机构意见、感谢中科院院士上海浦东活动中心提供《关于推进脑科学与人工智能融合发展的相关建议》(其中包括杨雄里教授、郭爱克研究员、赵国屏研究员、蒲慕明研究员、谭铁牛研究员等专家的观点)。

感谢以下专家学者直接参与访谈、调研或提供书面反馈意见和相关资料(按姓氏笔画排序):于俊清(华中科技大学)、万有(北京大学)、马文刚(上海市张江高新技术产业开发管理委员会)、马兰(复旦大学)、马原野(中国科学院昆明动物研究所)、王小勤(美国约翰·霍普金斯大学)、王以政(军事医学科学院)、王立平(中国科学院深圳先进技术研究院)、王建枝(华中科技大学同济医学院)、王晓民(首都医科大学)、王韵(北京大学)、王箐(浙

江大学)、毛颖(复旦大学附属华山医院)、方方(北京大学)、冯建峰(复旦大学)、皮家甜(中国科学院上海微系统与信息技术研究所)、汪小京(上海纽约大学)、吉永华(上海大学)、尧德中(电子科技大学)、毕国强(中国科学技术大学)、朱剑虹(复旦大学附属华山医院)、朱频频(小I机器人/智臻智能网络科技股份有限公司)、乔红(中国科学院自动化研究所)、刘力(中国科学院生物物理所)、刘嘉(北京师范大学)、许楠(新松机器人自动化股份有限公司)、阮怀珍(第三军医大学)、李万(上海市科学学研究所)、李小俚(北京师范大学)、李云庆(第四军医大学)、李帅(赛默罗生物科技有限公司)、李武(北京师范大学)、李昌林(中国科学院神经科学研究所)、李逸平(上海市政协)、李静海(中国科学院)、李澄宇(中国科学院神经科学研究所)、杨建荣(上海市科学技术协会)、杨砾(新松机器人自动化股份有限公司)、肖华胜(伯豪生物技术有限公司)、何士刚(上海交通大学)、何生(中国科学院生物物理所)、何成(第二军医大学)、宋洪军(美国约翰·霍普金斯大学)、张玉秋(复旦大学)、张丽清(上海交通大学)、张灼华(中南大学)、张晓林(中国科学院上海微系统与信息技术研究所)、张海林(河北医科大学)、张强(联影医疗科技有限公司)、张鳌(上海市科学技术委员会)、陆巍(东南大学)、陈天石(寒武纪信息科技有限公司)、陈云霄(中国科学院计算技术研究所)、陈生弟(上海交通大学附属瑞金医院)、陈军(第四军医大学唐都医院)、范明(军事医学科学院)、林龙年(华东师范大学)、罗层(第四军医大学)、罗建红(浙江大学)、罗振革(中国科学院神经科学研究所)、罗跃嘉(深圳大学)、罗敏敏(北京生命科学研究所以)、周嘉伟(中国科学院神经科学研究所)、郑平(复旦大学)、赵春杰(东南大学)、胡志安(第三军医大学)、胡郁(科大讯飞股份有限公司)、钟春玖(复旦大学附属中山医院)、钟毅(清华大学)、段树民(浙江大学)、施路平(清华大学)、姜意(承蓝科技股份有限公司)、贾建平(首都医科大学)、徐广银(苏州大学)、徐天乐(上海交通大学)、徐如祥(北京军区总医院附属八一脑科医院)、徐志卿(首都医科大学)、徐富强(中国科学院武汉物理与数学研究所)、殷文璇(国家自然科学基金委员会)、翁旭初(杭州师范大学)、高天明(南方医科大学)、高文军(美国德雷塞尔大学)、唐北沙(中南大学湘雅医院)、唐华锦(四川大学)、陶建华(中国科学院

自动化研究所)、黄志力(复旦大学上海医学院)、黄铁军(北京大学)、龚辉(华中科技大学)、彭隽敏(美国圣犹达儿童研究医院)、董尔丹(国家自然科学基金委员会)、蒋田仔(中国科学院自动化研究所)、蒋毅(中国科学院心理研究所)、舒友生(北京师范大学)、鲁友明(华中科技大学同济医学院)、谢俊霞(青岛大学)、谢维(东南大学)、蔡冰(中国科学院神经科学研究所)、谭力海(深圳大学)、熊志奇(中国科学院神经科学研究所)、缪其浩(上海科学技术情报研究所)、镇学初(苏州大学)、黎明涛(中山大学)、潘纲(浙江大学)。

参 考 文 献

- [1] 韩雪, 阮梅花, 王慧媛, 等. 神经科学和类脑人工智能发展: 机遇与挑战. 生命科学, 2016, 28: 1295-307
- [2] 周振华, 陶纪明. 战略研究理论、方法与实践[M]. 上海: 上海人民出版社, 2014: 135-9
- [3] Ray Kurzweil. 机器之心[M]. 胡晓姣, 张温卓玛, 吴纯洁等译. 上海: 中信出版集团, 2016
- [4] 松尾丰. 人工智能狂潮: 机器人会超越人类吗? [M]. 赵函宏, 高华彬译. 北京: 机械工业出版社, 2015
- [5] 韦康博. 人工智能: 比你想象的更具颠覆性的智能革命[M]. 北京: 北京紫云文心图书有限公司, 2016
- [6] 集智俱乐部. 科学的极致: 漫谈人工智能[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015
- [7] 陈竺. 全国第三次死因回顾抽样调查报告[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2008: 14-5
- [8] 许予明, 李亚鹏, 宋波. 中国卒中高危人群筛查管理现状及对策. 中国卒中杂志, 2016, 11: 15-8
- [9] Zhou MG, Wang HD, Zhu J, et al. Cause-specific mortality for 240 causes in China during 1990–2013: a systematic subnational analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet*, 2016, 387: 251-72
- [10] Alzheimer's Disease International. World Alzheimer Report 2015, The Global Impact of Dementia-An analysis of prevalence, incidence, cost and trends [EB/OL]. [2016-12-10]. <http://www.alz.co.uk/research/world-report-2015>.
- [11] Alzheimer's Disease International. Dementia in the Asia Pacific Region[EB/OL]. [2017-01-20]. <https://www.alz.co.uk/dementia-in-the-asia-pacific>
- [12] The White House. Preparing for the Future of Artificial Intelligence[EB/OL]. [2017-01-20]. <https://www.whitehouse.gov/blog/2016/05/03/preparing-future-artificial-intelligence>
- [13] The White House. THE NATIONAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE RESEARCH AND DEVELOPMENT STRATEGIC PLAN[EB/OL]. [2017-01-20]. https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/whitehouse_files/microsites/ostp/NSTC/national_ai_rd_strategic_plan.pdf
- [14] The White House. Artificial Intelligence, Automation, and the Economy [EB/OL]. [2017-01-20]. <https://www.whitehouse.gov/blog/2016/12/20/artificial-intelligence-automation-and-economy>
- [15] GOVUK. Artificial intelligence: opportunities and implications for the future of decision making [EB/OL]. [2017-01-20]
- [16] McKinsey. The rise of the machines: How Chinese executives think about developments in artificial intelligence[EB/OL]. [2017-01-20]. <http://www.mckinsey.com/global-themes/china/the-rise-of-the-machines-how-chinese-executives-think-about-developments-in-artificial-intelligence>
- [17] IDC. IDC揭晓2017-2020全球机器人十大预测[EB/OL]. [2017-02-20]. <http://www.idc.com.cn/about/press.jsp?id=MTA0Nw==>
- [18] Accenture. Why artificial intelligence is the future of growth[EB/OL]. [2017-01-20]. <https://www.accenture.com/au-en/insight-artificial-intelligence-future-growth>
- [19] DARPA. DARPA Shares Its Vision for the Future [EB/OL]. [2017-01-20]. <http://www.darpa.mil/news-events/2015-03-26-2>
- [20] Assistant Secretary of the Army. Emerging science and technology trends: 2016-2045. A synthesis of leading forecasts [EB/OL]. [2017-01-20]. <https://www.futuribles.com/fr/bibliographie/notice/emerging-science-and-technology-trends-2016-2045-a/>
- [21] DARPA. Our Research[EB/OL]. [2017-02-20]. <http://www.darpa.mil/our-research?Filter=&Filter=1&sort=undefined>
- [22] 张晓林, 胡智慧, 裴瑞敏, 等. 发达国家科技计划管理机制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 1
- [23] 徐峰, 许端阳. 国外政府支持重大科技计划或专项组织管理特征分析与借鉴. 科技管理研究, 2011: 37-40
- [24] 上海市科学技术委员会. 美国科技创新战略规划的研究、制定与启示[EB/OL]. (2015-08-13). <http://www.stcsm.gov.cn/jdbd/sswgg/zlhb/341946.htm>
- [25] Green ED, Watson JD, Collins FS. Human Genome Project: Twenty-five years of big biology. *Nature*, 2015, 526: 29-31
- [26] 宗华. 人类基因组计划25年: 给大科学六大启示[N/OL]. 中国科学报, 2015-10-19. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2015/10/328877.shtm>
- [27] 李宏策. 着眼长远, 稳步推进——欧盟“人脑计划”进入运作阶段[N/OL]. 科学日报, 2016-08-17. http://digitalpaper.stdaily.com/http_www.kjrb.com/kjrb/html/2016-08/17/content_347050.htm?div=-1
- [28] G-Science Academies Statement 2016: Understanding, protecting, and developing global brain resources[C/OL]. http://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/2016_G7_Brain.pdf
- [29] Poo MM, Du JL, Y IN, et al. China Brain Project: basic neuroscience, brain diseases, and brain-inspired computing. *Neuron*, 2016, 92: 591-6
- [30] Pan YH. Heading toward artificial intelligence 2.0. *Engineering*, 2016, 2: 409-13
- [31] Pan YH. Special issue on artificial intelligence 2.0. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, 18: 1-2
- [32] 蒲慕明, 徐波, 谭铁牛. 脑科学与类脑研究概述. 中国科学院院刊, 2016, 31: 725-36

- [33] 万劲波, 赵兰香. 政府和社会资本合作推进科技创新的机制研究. 中国科学院院刊, 2016, 31: 467-76
- [34] 中国科学院人口健康领域战略研究组. 中国至2050年人口健康科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009
- [35] Glimcher PW, Rustichini A. Neuroeconomics: the consilience of brain and decision. *Science*, 2004, 306: 447-52
- [36] Koch C, Massimini M, Boly M, et al. Neural correlates of consciousness: progress and problems. *Nat Rev Neurosci*, 2016, 17: 307-21
- [37] Tononi G, Boly M, Massimini M, et al. Integrated information theory: from consciousness to its physical substrate. *Nat Rev Neurosci*, 2016, 17: 450-61
- [38] 国家卫计委. 国家卫计委关于印发脑卒中综合防治工作方案的通知(附工作方案)[EB/OL]. [2016-12-10]. <http://mt.sohu.com/20161210/n475515385.shtml>
- [39] 我国智力障碍临床发病率将近1%部分为遗传[EB/OL]. [2014-12-23]. <http://www.chinairn.com/news/20141223/112740535.shtml>
- [40] Wang XJ, Krystal JH. Computational psychiatry. *Neuron*, 2014, 84: 638-54
- [41] 谭铁牛. 人工智能发展的思考. 中国人工智能学会通讯, 2017, 1: 6-7
- [42] 张钊. 后深度学习时代的人工智能. 中国人工智能学会通讯, 2017, 1: 3-5
- [43] 刘韵洁. 人工智能将引发未来网络产业变革. 中国人工智能学会通讯, 2017, 1: 8-9
- [44] 中国制造2025[EB/OL]. [2017-02-15]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm
- [45] Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies (BRAIN) Working Group Report to the Advisory Committee to the Director, NIH. BRAIN 2025: A scientific version [EB/OL]. (2014-06-05). <https://www.braininitiative.nih.gov/2025/>
- [46] 杜久林, 毕国强, 骆清铭, 等. 脑科学研究新技术. 中国科学院院刊, 2016, 6: 783-92
- [47] 胡新天, 仇子龙, 顾勇, 等. 非人灵长类模型. 中国科学院院刊, 2016, 31: 773-82
- [48] 段树民. 尽快建立“中国人脑库”[EB/OL]. [2016-03-04]. http://yyh.cas.cn/yywg/201603/t20160309_4519875.html