

脑认知的神经基础*



李澄宇^{1,2} 杨天明^{1,2} 顾勇^{1,2} 王立平¹ 徐宁龙^{1,2} 崔嵩¹ 王佐仁^{1,2**}

1 中国科学院上海生命科学研究院神经科学研究所 上海 200031

2 中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心 上海 200031

摘要 动物都需要认识和学习外界环境因素，并根据价值与风险做出抉择与行动；社会动物还必须有社会认知、共情、社会交往等社会行为能力；而人类有发达的自我认知、逻辑推演、意识、语言等能力。动物认知能力的好坏，决定了动物在野外是否能够成功觅食、躲避天敌、繁衍后代；而人类认知能力，则决定了个人的人生轨迹、自我价值实现乃至对社会的贡献。所有这些认知行为都需要由神经细胞的功能来决定，其神经基础是脑科学的核心问题，也是人类认识自身的终极挑战。经过多年的研究，神经科学已经揭示了认知行为神经基础的一些基本原理：不同认知行为是由脑内不同的神经环路负责，需要各脑区内的局部神经环路与脑区间长程神经环路的协同工作；学习与记忆是许多认知功能的必要基础，这是由神经细胞之间突触联结的强度与结构的可塑性介导；神经调质（例如多巴胺）可以在多个尺度上调节神经网络的活动与可塑性，从而调控认知行为。文章聚焦在感知觉、学习与记忆、抉择、社会行为、意识和运动控制等方面，对认知功能的神经基础进行了概述。我们认为，未来神经科学需要结合介观和微观尺度的研究，对认知行为的神经基础进行系统与深入的阐明。在介观层面，科学家们需要描绘脑区之间细胞类型特异性的联结图谱；绘制认知功能的大脑功能图谱；利用因果性手段、揭示认知功能的核心脑区；操控不同脑区及脑区间联结的活动，进而观察认知行为的改变和其他参与环路的活动变化，从而获得脑整体动态规律。在微观层面，需要阐明不同脑区有哪些特定类型的神经元；揭示不同类型神经元是如何参与特定认知功能的；解析不同类型的神经元是如何联结以及这些联结是如何在认知行为中发生动态改变的。这些介观与微观研究将为理解宏观认知行为的神经基础提供重要线索，对于破解人类智能这一终极奥秘具有重要意义。同时，揭示认知行为的神经机制还是治疗脑疾病的必要基础，而且有助于推动脑启发（Brain Inspired）的智能技术的发展。

*资助项目：中科院战略性先导科技专项项目（B类）（XDB02020000、XDB02040000）

** 通讯作者

修改稿收到日期：2016年6月28日

关键词 认知，神经基础，感知觉，学习与记忆，抉择，社会行为，意识，运动控制

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2016.07.004

人脑是智力演化的伟大奇迹，也是人类认识世界和改造世界最关键的物质基础。科学界对脑认知功能的研究在多个领域取得了重要进展，也产生诸多新的研究热点。动物的认知功能有3个层面。第一层面的认知是对外界事物的基本认知功能，这是许多动物生存必需具有的能力，包括对外界刺激的感觉和知觉、对有重要性的外界事物的注意、在多种可能采取的行为之间作出抉择、对外界事物的概念和功能进行分类等。对这些认知功能的研究可使用各种模式动物，包括线虫、果蝇、斑马鱼、大鼠、小鼠、猫、猴等。第二层面的认知是对自我与非我的认知，这是动物社会行为的基础，包括自我意识、同情心、同理心、理解他人意图的能力（Theory of Mind）。这些能力演化到灵长类有了大幅度的进展，非人灵长类（如狒猴和猕猴）可能是最好的研究模型。第三个层面的认知是逻辑思维和对语言的认知。只有人类才具有复杂的逻辑思维（如数学运算）和使用有句法、文法、无限开放式的语音交流。研究这些人类特有的认知功能的神经机制，只有使用非侵入性的手段对人类进行研究；在非人灵长类转入人类基因有可能对这些人类功能的演化过程有所理解。而所有认知功能的目的就是使动物能产生合适的行为，而行为需要有运动系统来进行。因此，认知系统与运动系统信息的转换与耦合是一个重要课题。本文将对各个层面的认知功能和运动系统的研究途径作一简述。

1 感知觉

感觉（Sensation）是人脑对直接作用于感受器的客观事物个别属性的识别。知觉（Perception）是大脑对直接作用于感觉器官的客观事物整体属性的反映。感知觉是动物获取外界信息的手段，也是人类认识世界的前提。

1.1 视听感知

视觉和听觉是人类最主要的两种感觉系统。人类对外界信息以及知识的获取主要通过视觉系统来实现；

而人类之间的交流则主要通过听觉系统和语言系统来完成。视觉通路起始于眼球的视网膜。视杆细胞和视锥细胞将光强和颜色信息转变成电信号后，由视神经经外侧膝状体投射到初级视皮层，再经腹侧通路和背侧通路传递到高级脑区。腹侧通路常被称为“内容通路”（“What” Pathway），参与物体识别，例如面孔识别。背侧通路常被称为“空间通路”（“Where” Pathway），参与处理物体的空间位置信息以及相关的运动控制。视知觉的产生，不仅依赖于由下至上（Bottom-up）的信息传递，也依赖于由上至下（Top-down）的调节。

视觉感知的研究首先希望阐明以下几方面的基本原理：颜色知觉的机理，空间视知觉和视觉细胞感受野的起源，立体视觉（亦叫深度知觉）的生理机制，运动知觉的神经机制。在此基础上，研究者进一步开展了复杂图的识别（包括面孔识别），视觉错觉的产生机制等研究。一个物体的不同方面的视觉信息是由腹侧和背侧通路分开传递的，而我们看到的却是一个完整的物体，大脑如何将这些视觉信息整合成一个整体，是视觉研究的一个重大课题——视觉特征捆绑问题。

在听觉方面，内耳的听小毛将声波转变成电信号，然后耳蜗将不同频率的声波信号进行分离，经过听觉神经通路将声音信号按照频率分布传递到初级听皮层，然后再向高级脑中枢传递。听觉系统不仅要识别声音的3种基本特性：响度、音调和音色，更重要的是要识别声音的复杂模式。感知觉的信息处理常包含了对特殊信息的注意。例如在一个鸡尾酒会上，虽然人声嘈杂，然而人们仍然能够挑选出与自己对话者的声音，这就是“鸡尾酒会效应”。双耳听觉在立体定位（尤其是一些动物）中发挥重要作用。这种对感知觉的注意，是目前感知觉研究的一个热点。

1.2 空间感知

人可以借助多种感觉系统来实现空间感知。视觉系统不仅可以判别物体在视野中上下左右的位置，亦可

通过双眼视差的信息来感知物体在空间中深度上的位置（图1）。与此类似，听觉系统亦可以通过双耳听觉的机制来判断声音在三维空间中的来源方位。除了视听系统，前庭系统亦在空间感知方面发挥重要作用，具体包括调整自身在空间中的平衡状态和指导机体在空间中的运动路径。空间感知的核心问题是：人如何利用各种感觉系统提供的空间信息，结合自身的本体感觉，建立一个内在的坐标系，指导自身的定位和导航。近年来的研究热点包括海马中的位置细胞（Place Cell），内嗅皮层的网格细胞（Grid Cell）以及头朝向细胞（Head Direction Cell）。这些神经元具有显著的与空间感知相关的放电特征，因此被广泛认为是大脑中负责空间定位以及导航功能的神经细胞。

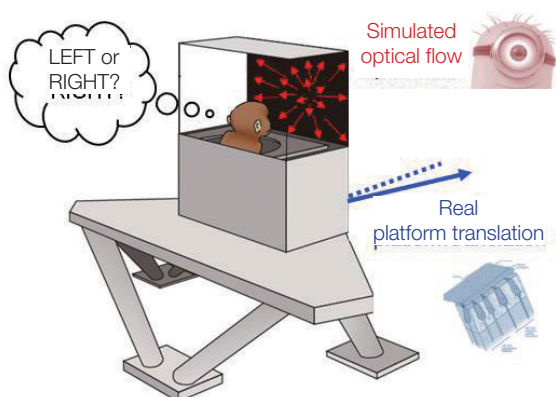


图1 猴子利用视觉和前庭觉来判断运动方向的实验

1.3 多模态感知整合

我们试想一个场景：一个人用手指指向一只正在发出叫声的猫。那么他的视觉系统所看到的信息，听觉系统所听到的信息，以及本体感觉（手指）所获取的信息，都同时指向一个物体——那只猫。人类生活在一个丰富多彩的世界中，时刻接受各种外界的各种信息。这些信息有时是一致的，有时是相互矛盾的。大脑如何将不同模态的感知信息整合起来从而作出最优化的判断，是脑科学的重大基础问题。多模态感知整合必定涉及多个脑区，这些脑区之间是通过何种机制实现协同与竞争的，是当前的研究热点。

1.4 注意

注意，是大脑几种优势资源优先处理最重要任务的一种能力。注意的功能包括警觉状态的维持、意识的导向以及执行控制等方面。上面提及到的“鸡尾酒会效应”，就是典型的听觉注意现象——在众多的嘈杂声音中，人们可以排除干扰，挑选出自己想要听的对话。大脑时时刻刻接受不同模态的信息输入，就可能要通过心理资源分配来优先处理其中的某些信息，于是就产生了选择性注意。注意的理论不仅有传统的朝向反射理论和注意的过滤器理论，也有包含 Bottom-up 和 Top-down 多层次机制的现代理论。目前，脑认知科学对注意的研究更加着重于注意的调节过程。

2 学习与记忆

学习与记忆是人类和动物认识世界的基础之一。按照其维持时间的长短，记忆可以分为长时程记忆与工作记忆（短时程记忆）。阐明它们的神经机制具有重大意义。

2.1 长时程记忆

长时程记忆包括“陈述式记忆”与“非陈述式记忆”。这两类长时程记忆都包括获取、存储、提取、巩固等多个过程。在理论层面，赫波（Hebb）等人创造性地提出神经元之间的突触联结可以被神经元的活动所改变的假说。这一假说被细胞层面的突触可塑性所证明，海马等突触强度会随着神经元活动而变化，即“长时程增强 LTP”与“长时程减弱 LTD”现象；突触可塑性可以被高频或低频神经元活动诱发，也依赖于突触前后神经元发放动作电位的不同时序（STDP）；在行为层面，突触可塑性的发生伴随着长时程记忆的获取。在分子机制方面，突触可塑性的发生依赖于钙离子、激酶、蛋白质合成等多种机制。除了突触强度之外，树突棘（突触的结构基础）的大小也会随着神经元活动及长时程记忆的获取和消退而发生相应的改变。

长时程记忆的未知机制主要在微环路与介观回路水

平。在微环路水平，需要揭示不同类型的细胞怎样参与长时程记忆的获取、提取、巩固、消退等过程，以及特定类型的细胞之间的突触功能与结构的可塑性如何介导动物行为的变化。在全局环路层面，还需要阐明很多重要的未知：在同一个脑区中存储的长时程记忆之间相互干扰的神经机制；序列学习这一语言等高级脑功能基础的神经环路机制；记忆消退的神经环路机制及如何避免消退；神经调质（如多巴胺）参与长时程记忆的规律及其环路机制；单次经历就可以形成的长时程记忆的神经机制；以及成瘾等病理性学习记忆的神经环路机制等。

2.2 工作记忆

大脑需要在线、实时地存储和操作信息，从而在快速变化的环境中作出合理的行为，这一过程就是工作记忆。工作记忆在日常生活中被频繁地使用：简单的比如进行数学心算、凭记忆在手机中输入一个电话号码；复杂的例如在脑中组织各种信息，从而完成一个项目的规划。工作记忆的能力与智商相关，其缺陷出现在精神分裂症、阿尔兹海默症等多种脑疾病中，而其环路机制是脑科学的关键未知问题之一。

工作记忆的一个核心特征是在感觉信息消失之后、行为输出之前，脑内内在环路所产生的神经元活动需要能够实现信息的存储。这一任务被认为是通过神经元的持续性发放完成的，这类发放广泛存在于包括前额叶皮层在内的环路中。光遗传手段已经证明在小鼠内侧前额叶皮层中存在的持续性发放可以在任务的学习阶段介导工作记忆的存储^[1]。后续研究中，应运用光遗传和电生理等手段，阐明在全脑尺度有哪些脑区的延迟期活动对于工作记忆任务是重要的，并获得介观尺度全脑活动图谱。在此基础之上，应使用光遗传等操控手段，在秒级时间尺度上对工作记忆的神经元环路进行因果性分析，阐明不同脑区的不同类型神经元及跨脑区的投射神经元如何参与工作记忆的不同阶段。还应阐明持续性发放的产生机制，解析不同类型神经元的突触活动、神经元的内在兴奋性、微环路与脑区间的回环联结这些不同尺度

的神经机制如何介导持续性发放。

工作记忆的另一个核心过程是信息的操纵，包括在同时做两个任务时的注意力切换、任务切换、对任务的规划与设计、跟踪任务进程等。这些能力是智能行为的核心过程，而目前对其机制知之甚少。未来应在动物模型中设计相应的行为学范式，并应用光遗传和电生理等手段对其微环路与介观环路的神经机制进行深入研究。工作记忆与长时程记忆的核心区别之一是工作记忆有明确的容量限制（如一般人视觉工作记忆的容量限制是4个），未来应通过光遗传与电生理手段阐明其机制。这些机制的解决可能为我们提供改善和提高工作记忆能力的方法。

3 抉择

高等动物对外界的反应不再仅仅限于简单机械的反射，而是能根据复杂的环境、过去的经验以及自身需求作出最有利的灵活选择，即抉择。抉择的神经机制的研究主要集中在两个方面：一是大脑是如何运用视觉等感觉系统收集并且整合抉择所需要的信息；二是大脑是如何在此基础上进行价值分析，并作出最终的抉择。

在第一方面的研究中，科学家们在一系列重要研究中发现大脑侧内顶叶（Lateral Intraparietal Cortex, LIP）在抉择过程中编码了用于抉择的整合信息^[2,3]。他们通过训练猕猴根据带有噪音的视觉信息进行抉择的研究中发现，猕猴能够运用累积视觉信息到一个阈值的策略来有效地进行抉择，而在这过程中，LIP神经元的发放反映了累积的信息含量。随后，其他研究者进一步发现，其他一些脑区也参与了这个过程。这其中包括了前额叶、基底核等重要结构。而且类似的神经环路不仅仅限于处理来自视觉方面的抉择信息，听觉、触觉等感觉在与之相关的抉择过程中也能激发相似的神经环路。

感觉系统可以提供当前环境的状况。然而根据这一状况来评估价值，是一个非常复杂的计算过程。比如，一件事物的价值往往是概率性的。同样的抉择，这次会

有好的结果，下次可能会有相反的结果。因此，大脑不仅需要能够处理确定的价值信息，还需要某种机制来处理概率信息。这个处理概率信息的神经环路包括了眶额叶、扣带回、岛叶等脑区^[4]。

价值评估的复杂性还体现在它的多变。事物的价值不是一成不变的。食物可能变质，货物可能增值。有的事物由于数量有限需要尽快争取，而有的东西在大量获取之后会失去其价值。价值的多变性决定了价值的评估同时也是一个学习过程。在这个学习过程中，大脑根据所得到的具体反馈来更新对价值的评估。这一过程被认为与中脑的多巴胺系统密切相关。在大脑获得了额外的奖励的时候，中脑的多巴胺神经元会被激活而释放出多巴胺。相反，如果大脑收到了意外的负面刺激的时候，多巴胺神经元则会被抑制。中脑的多巴胺系统影响了整个大脑前额叶等脑区神经元的活性，从而对整个大脑的价值评估系统产生影响^[5]。

最后，经过这些复杂过程所计算形成的价值信息很可能被送至眶额叶（Orbitofrontal Cortex）以及腹内侧前额叶（Ventromedial Prefrontal Cortex）与感觉信息进行整合，并且最终形成抉择。电生理和核磁共振的实验表明，大脑的眶额叶以及腹内侧前额叶的神经元活性在抉择过程中表征了抽象的价值信息^[6]。

另外，价值评估的规则可能进一步造成价值评估的复杂性。例如下围棋的时候，视觉系统可以相对迅速地给出当前棋局的信息，然而由于围棋规则决定了棋局的变化非常多，当前棋局对于弈者的优劣需要通过非常复杂的计算才能准确获得。这一类评估过程应该由前额叶尤其是极叶脑区（Polar Cortex）所处理，但是其神经机制的细节现在还不为人所知^[7]。

基于抉择的神经机制的研究，研究者建立一些计算模型来解释大脑的抉择过程。例如吸引子神经网络模型、随机扩散到阈值模型、价值归一模型等^[8]。这些模型可以解释一些观察到的神经元特性以及人和动物的抉择行为。然而在整体层面，人们对大脑抉择的整个神经

回路依然知之甚少。大量的行为经济学的研究针对人的抉择行为的研究展示了人的抉择行为的复杂性。这一复杂性的神经机制一方面是由于大脑神经回路的特性所造成，另一方面在个体之间存在一定差异。对于人和动物抉择行为的研究也催生了一门被称作神经经济学的新兴学科^[9]。

4 高等认知行为

人类不仅可以认识自我，而且可以与同类进行分工合作，人类的自我意识和社会行为是形成社会的重要基础。

4.1 意识

意识的起源对我们而言仍旧是迷雾重重。意识的形成，这个在19世纪不被科学界所接受的问题，在认知科学、神经生物学和脑成像等领域迅速发展的前提下，现在却是科学研究的前沿，是一个激动人心的领域。大量的实验科学研究取代了以往的单纯理论推测，并逐渐产生了例如“全局神经工作空间（Global Neural Workspace）”（认为意识是在大脑皮层神经网络中的信息共享的一种状态）^[10]和信息整合理论（Integrated Information Theory）^[11]等相关的神经科学假说。

但很显然对于意识的脑科学研究依旧面临着巨大的挑战。诸多的重要科学问题摆在我们面前：婴儿从何时开始具有意识？我们是否可以说猴、狗或者海豚等其他动物具有意识？我们是否可以解决自我意识的问题，也即：“我思故我在？”这种自我意识是否是人类独有的，是否具有独特的大脑神经环路？如果我们可以分析并控制该神经环路，是否意味着我们能够复制意识到计算机中，从而产生人工智能或意识？中科院神经科学所已经率先展开了动物自我意识的探索，并发现经训练后的猕猴能够成功地通过自我意识的“镜子检测”^[12]（图2）。目前所掌握的知识可以开始应用于医学临床领域。仅在中国各地的医院里，数以百万计的病人经历着昏迷或植物人的状态，他们能否重新获得意识？如果将

我们的脑研究转化为对意识水平的实时监控，能否帮助这些病人？这些都将成为研究人员追求意识研究最根本的源动力。

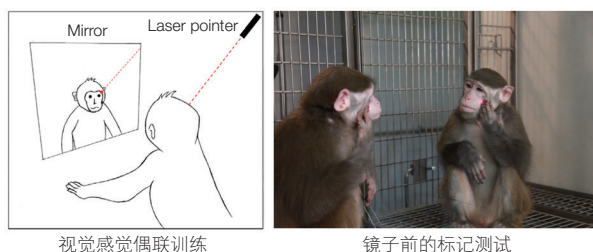


图2 经训练后的猕猴能够成功的通过自我意识的“镜子检测”

注：图片由龔能提供

4.2 共情心

人类所具备的共情能力（Empathy）使我们能够体会或预测他人的喜怒哀乐，这是我们情感表达和社会交往能力中的重要组成部分。大脑研究发现，我们共情他人的感受所激活的大脑神经网络，与直接以第一人称接受相同感受的网络存在着很大的一致性，也即我们的大脑在共情心的表征上也是“感同身受”^[13]。我们对于不同认知状态都具有共情心，已有的脑研究包括了疼痛、恐惧、焦虑、愤怒、悲伤、愉悦、奖赏和尴尬等，而且共情引起的大脑活动的激活会受到其他认知环境（社会群体效应等）的影响。目前这些研究结果均建立在以人为研究对象使用神经影像学手段的基础上。合理利用高等模式动物，特别是具有社会认知能力群居属性的猕猴上，巧妙开发出全新的研究行为学范式，在单个或群体神经元水平上探索共情认知的机制，将成为未来重要的研究领域。

4.3 语音交流与语言

相比于复杂而精细的视觉和听觉等神经系统，我们对于语言系统脑表征的了解却是相对粗糙。超过一个世纪的脑损伤研究和20年来脑成像技术的发展，描绘出了对应语言和言语的左脑区域网络，主要包括颞上回、颞中回后部、缘上回及角回的维尼克区（Wernicke's Area）和左额叶下回的布罗卡区（Broca's Area）。这两大脑区

又主要通过弓状束（Arcuate Fasciculus）相互连接。相比于其他像猩猩和猕猴等高等动物，人类的弓状束呈现出连接强度和效率的明显优势，而语言正是人类独有的认知功能，这意味着维尼克区和布罗卡区是语言神经环路的重要部分。

显然，认为语言是仅由两大脑区而产生和控制的想法是过于简单的。其他与听觉和运动相关的脑区的贡献显而易见，例如我们需要接受听觉声音和发声说话。而更加重要的是，我们对于语言系统中不同组成元素（音素、音节、词和短语等）和句法功能（组词、从句、疑问词移位、句法歧义和树形结构等）所对应的精确脑区的研究还未全面展开。譬如，有研究表明布罗卡区域内就存在超过10个子区域，这些子区可能用于编码句法中不同等级的树型结构，而它们的具体功能以及相互之间的关系我们并不了解。所以说，描绘语言精确大脑图谱将是未来一段时间内重要的研究工作。除此之外，更具有挑战性的工作为：理解语言表征脑区中的神经环路和其基本工作原理。换句话说，我们语言系统中所存在的不同大小和层次的语言元素和句法结构，是否能够对应上大脑的基本单元。因此，利用先进的转基因和细胞水平电生理的神经科学手段发展高等动物模型（猕猴），研究大脑神经网络和局部环路如何编码序列语法结构，这在将来的很长一段时间内是一项极具意义和挑战的工作。

5 感觉—运动转换与运动控制

感觉—运动转换是指大脑获得外界信息输入后经过特定的内在调节与选择过程产生相应动作指令指导行为的过程^[14]。该过程形式广泛，包括本能的反射行为，例如鱼类在逼近的阴影视觉刺激下迅速逃跑的行为；也包括复杂的感知抉择，例如社交活动中通过辨认面孔而决定是否开始交谈；还包括精确快速的运动控制，例如网球比赛时通过判断球速、方向和对手的位置而决定如何挥拍击打。因此感知—运动转换是动物体实现与环境的

相互作用的基本关键过程^[15]。同时,感知—运动转换也是一切智能系统的基本特征,在智能机器人中实现适应性的感知—抉择—动作是技术突破的关键。感知—运动转换的神经机制研究一直是脑科学的热点研究领域,其进展对于理解脑高级功能具有关键意义。近年来得益于行为学技术、光学成像技术、光遗传操控技术等方面的发展,通过对多种动物模型的研究,该研究方向得到显著推进,其中最重要的进展在于,越来越多的证据表明从感觉输入到运动输出之间有精细复杂的调节机制,并且对于这些调节机制的细胞、神经环路机理也有了更深入的了解。在这方面,我国的神经科学工作者作出了出色的成果,发现果蝇高级脑区蘑菇体内的神经调质多巴胺在果蝇根据视觉图像选择飞行方向时起关键调控作用;杜久林研究员实验室发现了斑马鱼在视觉—运动转换行为中,下丘脑多巴胺神经元以及后脑抑制性中间神经元的调控活动使动物能够根据不同的视觉刺激做出适应性的行为选择。

通过感觉运动转化形成运动计划后,大脑还要进一步产生详细的神经指令去驱动骨骼肌肉系统才能最终产生行为。这一过程中,神经系统必须解决一系列计算和生物力学难题。

(1) 运动系统内在的复杂性。哪怕是实现看似简单的肢体运动,也需要调动许多块肌肉通过协调性伸缩来使多个关节转动特定的角度才能完成。从计算上这是一个典型的不适应问题,因为每个运动都可以通过无穷多种骨骼肌肉的运动组合来实现,而大脑皮层水平上运动计划如何通过脑干和脊髓来间接驱动肌肉组以实现这一复杂变换至今还是个谜。

(2) 外界环境经常动态变化并存在很大的不确定性,并且神经传输必然引入延迟和噪声,所以运动控制不可能完全依赖感觉通过反馈实现。因此,目前流行理论认为运动控制主要是在神经系统对外界和自身状态建立内部模型的预测基础上通过前馈方式实现的,尽管相应编码脑区和实现机制目前还不清楚。

(3) 所有的运动技能都必须通过有别于事实性记忆的学习机制获得,而且运动记忆一旦建立就能长期保持还基本不被后来的记忆冲淡。比如,学会骑自行车后即使很多年没骑且中间学了网球和游泳等,再碰自行车也很快就能骑。运动记忆必须通过运动过程本身才能唤起,这就是为什么优秀的运动员在上场前也需要做热身运动。近期动物生理和人脑成像的研究表明,大脑皮层多个脑区以及整个小脑都参与了运动学习,尽管独特的运动记忆是如何在这一复杂网络中涌现出来的我们还知之甚少。

运动控制的神经机制不仅是当前神经科学的一项重要挑战,而且这个千百万年进化而来的精巧系统还是神经假肢和类脑机器人开发的最具借鉴意义的模型之一。通过在猕猴和瘫痪病人运动相关脑区上的电生理记录,有多个国外顶尖实验室已经能够通过解码的神经信号来控制人工手臂等以实现脑机接口。感知—运动转换和运动控制需要感觉皮层、运动皮层、基底核构成的复杂环路协同参与的过程仍不明了。其中任何环节出现病理理性变化就会导致严重的脑功能障碍性疾病,如帕金森氏症、亨廷顿、强迫症等。这方面的神经解码研究不仅可以大力推动智能机器人的开发,加速制造业的产业升级,同时也会大力促进临床神经假肢的开发以帮助运动障碍病患。

6 结语

对脑认知神经基础的研究是脑科学的核心问题,不仅对揭示人类智力基础的大脑奥秘有重要意义,而且有助于推动脑启发(Brain-inspired)的智能技术的发展。对感知觉神经机制的理解可以为智能技术中的模式识别研究提供一些新思路;对立体视觉神经机制的理解有助于虚拟现实技术的研发;研究抉择、学习记忆等脑认知功能研究的成果,有望对人工神经网络、类脑计算等应用领域产生重要影响。理解编码语言中句法结构的脑神经机制将极大地推动人工智能领域中语音与语言技术的

发展。阐明感知觉机理,如空间知觉的机理可能可以帮助机器人建立一个内在的坐标系。多感觉整合的研究成果可以帮助机器人变得更加耳聪目明。研究感觉—运动转换以及运动控制的神经机制将有助于设计和制造更加灵巧的机器人。与此同时,智能技术研究的新思想和新技术亦可以为脑认知神经基础的研究提供重要的借鉴和支持。

参考文献

- 1 Liu D, Gu XW, Zhu J, et al. Medial prefrontal activity during delay period contributes to learning of a working memory task. *Science*, 2014, 346: 458-463.
- 2 Shadlen M N, Kiani R. Decision making as a window on cognition. *Neuron*, 2013, 80(3): 791-806.
- 3 Yang T, Shadlen M N. Probabilistic reasoning by neurons. *Nature*, 2007, 447(7148): 1075-1080.
- 4 Rushworth M F, Behrens T E. Choice, uncertainty and value in prefrontal and cingulate cortex. *Nature Neuroscience*, 2008, 11(4): 389-397.
- 5 Hu H. Reward and aversion. *Annual Review of Neuroscience*, 2016, 14(120): 297-324.
- 6 Padoa-Schioppa C. Neurobiology of economic choice: a good-based model. *Annual Review of Neuroscience*, 2011, 34: 333-359.
- 7 Ramnani N, Owen A M. Anterior prefrontal cortex: insights into function from anatomy and neuroimaging. *Nature Reviews. Neuroscience*, 2004, 5(3): 184-194.
- 8 Cain N, Shea-Brown E. Computational models of decision making: integration, stability, and noise. *Current Opinion in Neurobiology*, 2012, 22(6): 1047-1053.
- 9 Glimcher P W, Rustichini A. Neuroeconomics: the consilience of brain and decision. *Science*, 2004, 306(5695): 447-452.
- 10 Dehaene S, Changeux J P. Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, 2011, 70: 200-227.
- 11 Tononi G. Integrated information theory of consciousness: an updated account. *Arch Ital Biol*, 2012, 150: 293-329.
- 12 Chang L, Fang Q, Zhang S, et al. Mirror-induced self-directed behaviors in rhesus monkeys after visual-somatosensory training. *Curr Biol*, 2015, 25: 212-217.
- 13 Bernhardt B C, Singer T. The neural basis of empathy. *Annu Rev Neurosci*, 2012, 35: 1-23.
- 14 Kristan W B. mNeuronal Decision-Making Circuits. *Curr. Biol*, 2008, (18): R928-R932.
- 15 Cisek P, Kalaska J F. Neural Mechanisms for Interacting with a World Full of Action Choices. *Annu. Rev. Neurosci*, 2010, (33): 269-298.
- 16 Franklin D W, Wolpert D M. Computational mechanisms of sensorimotor control. *Neuron*, 2011, 72(3): 425-442.

Neural Basis of Brain Cognition

Li Chengyu^{1,2} Yang Tianming^{1,2} Gu Yong^{1,2} Wang Liping¹ Xu Ninglong^{1,2} Cui He¹ Wang Zuoren^{1,2}

(1 Institute of Neuroscience, Shanghai Institutes for Biological Sciences, Chinese Academy of Sciences,

Shanghai 200031, China;

2 Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China)

Abstract All animals need to process and store relevant information about the external environment, while making decision and performing actions based on perceived value and risk. In addition, social animals need social cognitive abilities such as empathy, theory of mind and vocal communication. Furthermore, humans have superb abilities in self-awareness, logical reasoning, consciousness, and language. These cognitive abilities are critical for animals to successfully find food, avoid predators, and nurture their young. All cognitive abilities are determined by the function of neurons in our brain. Therefore, the neural basis of cognition is the central question for neuroscience and remains a grand challenge in human understanding of nature and ourselves. After centuries of studies, we now know several principles of neural basis underlying cognitive behaviors: different brain regions participate synergistically in different cognitive behaviors, using local neural circuits and long-range projections to process information within and among various brain regions, respectively. Learning and memory are mediated by plasticity changes in the strength and morphology of synapses; neuromodulators (such as dopamine) can modulate activity and plasticity of neural network at multiple levels and in turn modify cognitive abilities. In the current review we introduce the neural basis of cognition, focusing on sensory perception, learning and memory, decision making, social behaviors, and motor control. We propose that future studies need to combine meso- and micro-scale analysis for systematic and in-depth understanding of neural basis of cognition. At the mesoscopic scale, we need to construct the brain-wide connectome in a cell-type specific manner. In addition, functional activity map for different cognitive behaviors are required at the single-neuron level. Furthermore, we need to use optogenetic and chemogenetic tools to dissect the causal relationship between activities of various neural circuits and the cognitive functions. Eventually, we also need to manipulate activities of different brain regions and projecting terminals, while observing global neural dynamics across multiple brain regions. Such combined studies will yield principles of global brain dynamics for cognition. Furthermore, we need to dissect the connectivity patterns of neurons in a cell-type specific manner and illuminate the plasticity rule of these cell types in cognitive behaviors. The combined meso- and micro-scopic studies will without question shed new lights on the neural basis of cognitive behaviors. The efforts will be critical for eventually cracking the mystery of human intelligence. Understanding neural basis of cognition will provide necessary foundation for curing human brain disorders and promote the development of brain-inspired intelligence technologies.

Keywords cognition, neural basis, perception, learning and memory, decision making, social behavior, consciousness, motor control

李澄宇 中科院上海生命科学院神经科学所研究员，1995—1999年就读于北京大学生命科学院生理学和生物物理学系，获理学学士学位。1999—2004年就读于中科院神经科学所，获理学博士学位。2004—2009年，在美国加州大学伯克利分校分子和细胞生物学系从事博士后研究工作。李澄宇博士的兴趣主要在行为的神经元环路基础，包括动物的社会行为，工作记忆和长时程记忆等，已获得中科院“百人计划”和国家“杰出青年科学基金”支持。E-mail: tonglicy@ion.ac.cn

Li Chengyu Obtained his B.S. degree in Department of Physiology and Biophysics, School of Biological Sciences, Peking University, 1995-1999. Studying between 1999 and 2004, Li Chengyu obtained his PhD degree in Institute of Neuroscience, Shanghai Institutes for Biological Sciences, Chinese Academic of Sciences(CAS), Shanghai. Between 2004 and 2009, Li Chengyu studied as Postdoctoral Fellow in Department of Molecular & Cell Biology, Helen Wills Institute of Neuroscience, University of California, Berkeley, CA, USA. His main interests are in the functional circuitry of behavior, including social behavior, working memory, and long-term memory. He was supported by the “Hundred Talent Program” of CAS and “The National Science Fund for Distinguished Young Scholars” of NSFC. E-mail: tonglicy@ion.ac.cn

王佐仁 男，中科院上海生命科学院神经科学所研究员。1994年获华东理工大学理学学士学位，1997年获中科院上海生物化学所理学硕士学位，2002年获美国新泽西州罗格斯大学理学博士学位。2002—2004年，于美国加利福尼亚大学伯克利分校分子和细胞生物学系神经生物学分部进行博士后研究。2005年加入中科院神经科学所，任研究员和“神经环路及动物行为”研究组组长。获得中科院“百人计划”和国家杰出青年科学基金支持。E-mail: zuorenwang@ion.ac.cn

Wang Zuoren Male, he got undergraduate study at East China University of Science and Technology, and received his master degree from Shanghai Institute of Biochemistry in the Chinese Academy of Sciences. He pursued his Ph.D. degree at Rutgers University-New Brunswick in New Jersey from September 1997 to April 2002. Then, he conducted his post-doctoral research in the Department of Molecular and Cell Biology at University of California-Berkeley. He joined the faculty of ION in 2005 as Principal Investigator and Head of the “Laboratory of Neural Circuits and Animal Behavior”. He was supported by the “Hundred Talent Program” of CAS and “The National Science Fund for Distinguished Young Scholars” of NSFC. E-mail: zuorenwang@ion.ac.cn