

大数据时代的大脑科学 ——绘制智力的蓝图

郭爱克*

(中国科学院生物物理研究所, 北京 100101)

摘要 在很多“之歌”中,我非常喜欢《长江之歌》,歌中唱道“你从远古走来,……你是无穷的源泉”。正值《生物化学与生物物理进展》创刊40周年的日子,我愿意唱一首心中的歌——“脑之歌”。人类大脑就好比是一条历史长河,它从远古流到了今天,又将从今天流向未来,是自然通过漫长进化所产生的最精细、最复杂、最优美和最成功的器官,是智力演化的最伟大奇迹,是人类智力产生的源泉,是人类灵性的家园。人脑以其非凡的能力造就了人类知识和文明的社会传承。可是到如今,我们还不知道人脑在整体上是如何工作的。脑功能神经组学或许是破解脑的奥秘的钥匙。

关键词 大数据, 大脑科学, 智力蓝图, 脑之歌, 脑功能神经组学
学科分类号 Q42

DOI: 10.3724/SP.J.1206.2014.00208

1 脑科学的历史使命

宇宙、物质、生命和思维是自然界四大奥秘。在世间万物中,脑是最复杂的系统。只要从几个简单的数字就可以说明脑结构与脑功能的高度复杂性。人脑大概有1000亿个神经元,可能超过了整个银河系星星数。大多数神经细胞类似于盘根错节的森林中的树木。想象有一百万棵树生长在一片狭小的土地上,就可以想象神经细胞是如何缠结在一起了。一个典型的神经元通过突触与约1000个其他神经元进行通讯。所以,大脑中就有100万亿个突触。神经递质是在神经元之间传递信息的化学信使,大部分神经递质还有各种各样的受体,它们可以调控多种不同的效应。因此同一种神经递质在不同的受体中可能会起不同的作用,甚至是相反的作用。大脑中胶质细胞的数目比神经细胞多10倍。长期以来胶质细胞被看作是支持细胞,没有通讯功能。但是现在认识到胶质细胞很可能影响细胞通讯,这样就极大地增加了大脑的复杂性。

脑科学是心智的科学,它是研究人、动物和机器的认知与智能的本质与规律的科学,它回答智力的本质是什么,创造性是从哪里来的,大脑如何成

为“灵性的王国”,脑如何产生和指导行为。脑科学让我们理解我们为什么会成为能感知、能学习、能记忆、能抉择、能思维、能创造、有个性、有感情、有理性、有语言、有社会性的生命体,回答什么是理性、什么是记性、什么是忘性、什么是个性、什么是人性、什么是创造性、我们怎样做决策、如何防范脑疾病、如何推迟衰老、能否创造脑式的能自己学习的人工智能系统,等等。

脑科学不仅将拓展人类对自然和人类自身的认识,它对于人类的知识创新、对于人民的健康和幸福、对于信息科学和人工智能、对于文化科学、社会科学、教育学、语言等都将产生极大的辐射作用,将对我国社会的进步、国家安全和经济发展有深远的影响。诺贝尔奖得主克里克(Francis Crick)说:“对我们人来说,在科学研究中没有比研究自己的脑更重要的了。我们对整个世界的认识都有赖于它。”“如果我们要想正确地懂得我们在我们周围这个极其广袤和复杂的世界中的地位,我们就必

* 通讯联系人。

Tel: 021-54921785, E-mail: akguo@ion.ac.cn

收稿日期: 2014-07-22, 接受日期: 2014-09-11

须要比较细致地认识我们的脑。”另一位诺贝尔奖得主埃德尔曼(Gerald M. Edelman)则是这样说的：“脑科学的知识将奠定即将到来的新时代的基础，这些知识使我们可以医治大量疾病，建造仿照脑功能的新机器，对我们自己的本质和我们如何认识世界都会有更深入的理解。”

2 大数据时代的神经科学特征

从19世纪到20世纪，人类对脑-智关系的探索走过了漫长而曲折的路，竖起了一个个不朽的里程碑。我曾在我的一本小册子里绘制了19世纪到20世纪脑理论演化地形图(郭爱克. 计算神经科学. 上海科技教育出版社, 2000). 卡哈尔(Santiago Ramon Y Cajal)的神经元学说, 巴甫洛夫(P. Pavlov)的经典条件化学说, 马尔(D. Marr)的视觉计算理论, 休伯尔和威瑟尔(D. H. Hubel & T. N. Wiesel)的视觉脑机制学说, 赫布的突触修饰和细胞群理论(1949, D. O. Hebb), 维纳的经典控制论(Norbert Wiener), 麦卡洛克和匹茨的(W. S. McCulloch & W. H. Pitts)形式神经元模型, 赖夏特与哈森斯坦茵(Reichardt and Hassenstein)的初级运动检测器模型, 坎德尔(Eric R. Kandel)的海兔的学习记忆研究, 等等. 上述科学成就都是在大数据时代开启之前的研究, 也主要是基于小数据的, 而不是数据密集型科学(data-intensive science). 其研究范式是实验、理论、计算和模拟. 是科学假设驱动的、创新驱动的、里程碑驱动的. 在大数据时代之前, 人类“主要是依赖抽样数据、局部数据和片面数据, 甚至在无法获得实证数据的时候, 依赖经验、理论、假设和价值观去发现未知领域的规律”(引自谢安为《大数据时代: 一场生活、工作与思维的大变革》作的序).

2008年《自然》(Nature)杂志^[1]从互联网技术、经济学、环境科学、生物医学等多个方面介绍了“大数据”带来的技术挑战、当前状况以及未来发展方向. “大数据的特点是更多, 更杂和相关性”. 更多: 不是随机样本, 而是全体数据; 更杂: 不是精确性, 而是混杂性, 失去微观层面上的精确度, 为的是获得在宏观层面的洞察力. 更好: 不是因果关系, 而是相关关系. 前不久在《科学》(Science)杂志发表了一篇论文, 讲的是在中国南方世代种水稻, 而北方世代种小麦导致南北不同人文特征^[2]. 水稻和小麦不同的种植农业导致了南方和北方人群的大尺度的心理认知的不同, “水稻人

群”更重视整体性和相互依存性, 而“小麦人群”更重视分析性的还原论思维方式, 可谓“一方农业养一方人”. 从脑科学的角度, 该文的“水稻理论”(the rice theory)所揭示的是数据之间的相关关系, 而不是因果关系. 有学者认为“放弃对因果性的追求, 就是放弃了人类凌驾于计算机之上的智力优势, 是人类自身的放纵和堕落. 如果未来某一天机器人和计算完全接管了这个世界, 那么这种放弃就是末日之始”. 大数据时代标志着生活、工作和思维深刻变革. 大数据时代的来临使我们有条件和条件, 基于全面数据、完整数据和系统数据, 深入探索脑的工作原理. “大数据”公认的4V特征: Volume, 量态——海量; Velocity, 动态——高速; Variety, 状态——复杂; Value, 价态——超值. 大数据的文化建设是4个“C”: Communication(沟通), Collaboration(合作), Coordination(协同), Credit(互信)^[3].

大数据时代的脑科学是什么样子? 只有当人们掌握了对复杂系统进行有效描述的方法, 掌握了从大数据中提取信息的策略, 才可能将还原主义获得的支离破碎的数据有效集成, 并且转变成砖石, 通过呈展论去重建生命现象本质和智力本质的宏伟大厦. 通过基因组学和蛋白质组学的研究, 我们已经初步拥有了人类的“生命蓝图”, 我们面对的更大挑战是绘制人类的“智力蓝图”——脑功能联结图谱, 这一目标的实现将推动脑科学研究的革命性突破. “心似千丝网, 中有千千结”(宋词人, 张先), “心之官则思”, 心者, 脑也. 克里克(F.Crick)认为, “我们至今没有绘制出人类大脑的联结图, 这是一件无法忍受的事情, 没有它就别指望能了解大脑是如何工作的”(Nature, 1993). 正如欧洲脑计划的领军人物, Henry Markram所指出的“神经科学的现状就好比幼儿的脑, 我们淹没在数据和理论中, 缺乏一种能力, 将其总和成为一个统一的看法”. Henry Markram问道, 我们需要爱因斯坦来告诉我们脑是怎样工作的吗? 脑科学界悟到“是改变脑研究策略的时候了”. 脑科学正在实现从强调个体细胞的结构与功能到强调功能回路联结图谱的革命性转变. 大数据时代的脑科学必将是将基因组、蛋白质组、神经联结组、脑网络组等进行有效的集成和大规模会聚的大科学前沿.

发达国家纷纷推出国家层面的脑计划. 2013年春季, 欧盟委员会和美国分别启动和准备启动两个耗资巨大的脑研究计划. 欧共体的“人类大脑计

划”(human brain project, HBP)是从一个已由瑞士资助多年的“蓝脑计划(blue brain project)”发展而来。人类大脑计划于2012年底被宣布入选“未来新兴旗舰技术项目”，计划规模大到结合80个世界顶尖研究单位跨领域的200名学者，一同解读超过上兆个脑神经联结的人类情感、意识与思维，将通过超级计算机多段多层的模拟来实现这些复杂的运算。其目标是依据人类有关脑的数据，“堆”成一个“硅脑”，来模拟人脑功能。美国神经生理学家和控制论专家，也是神经网络的奠基人之一，麦克卡洛(Warren Sturgis McCulloch, 1898~1969)曾指出“我们能不能设计出一台机器能做脑所能做的一切？对于这样一个理论问题的回答是：如果你能用一种清晰而有限的方法说清楚脑能做什么……那么我们就设计出一台机器来实现……但是你能说清楚脑做什么吗？”。美国的“创新技术脑研究计划”(brain research through advancing innovative neurotechnologies, BrAIN), 以前也被称为“脑活动图计划”(brain activity map project, BAM), 其使命是：形成一份包含各种脑细胞类型的分类清单；发展新的工具，用于分析那些负责实现将基因、蛋白质和化学物质运输到特定细胞的脑功能的复杂回路；发展新的方法，用于记录大脑各个部位的大量的神经元活动，并提高现有技术以使神经科学家们能广泛使用；通过整合实验、分析和理论方法，理解大规模神经回路；组建团队开发下一代非侵入式成像技术等。

中国科学院经过约两年的酝酿、准备和凝炼，于2012年11月启动了中国科学院战略性先导科技专项(B类)“脑功能联结图谱计划”。该项目的目标是力求完整地描述大脑的几种特殊而重要脑功能(感觉、情绪、记忆、学习、决策等)在正常态和病态期的神经网络联结的构造、运作方式和机制。我们认为，建立脑功能联结图谱，是脑科学的战略制高点。中国科学院的脑先导专项的目标并不在于描述所有神经细胞的所有电活动，而是描述各脑区特殊种类神经细胞群之间有功能的联结和运作。

在未来的20年里，脑与认知科学的重要方向将可能是：a. 从分子、细胞到脑网络和整体水平揭示学习记忆和思维等脑高级认知功能的神经机制，探索智力和创造性的神经基础；b. 研究脑的功能失常和紊乱以及认知障碍的机制，防治脑的衰老和疾病，促进国民的心理和精神健康；c. 在揭示自然智能本质的同时，创造脑式信息处理和计算

系统，是科学技术发展的必然趋势；d. 在上述各个方面，强化知识创新，力求提出新问题、新理论、新观念、新原理、新技术。

3 神经连接组学研究进展

这方面的研究已有初步的进展。当下，有关神经全连接图谱的研究，3~5年内力所能及的主要还是在线虫、果蝇以及小鼠等模式动物。秀丽线虫只有302个神经元。对于秀丽线虫的最精彩的研究是细胞的程序性死亡机制。这使得Sydney Brenner等三位科学家于2002年获得诺贝尔奖。这个事件本身令人信服地诠释了舒本华所讲“简约永远是真理和天才的共同特征”。2012年《科学》(Science)报道了采用神经联结组研究策略，电镜重构了线虫雄虫交配控制抉择网络的神经联结网络，该抉择“连接组”图谱包括了化学突触和电突触，是多级的、并行的、短距离的突触联结，返回的和互连的，具有吸引子动力学和小世界网络特征^[4]。

何谓小世界网络？人们常说，“远亲不如近邻”，小世界网络是有远亲也有近邻，是“海内存知己，天涯若比邻”。郭爱克等^[5]前几年有关抉择的神经计算研究就证明“小世界拓扑属性”在两难抉择任务中的表现要优于随机网络和无标度网络。网络的拓扑属性包括度(联结的数目)分布、平均路径长度和聚类系数等。已有的研究表明^[6]，人脑的某些功能区是一个具有小世界拓扑结构，且可以高效处理各种信息的复杂网络。有研究表明：智力表现越高的个体，其大脑解剖网络的边数越多，平均最短路径长度越短，网络的平均全局效率越高。表明个体的智力表现与其大脑结构的组织情况显著相关，而且阿尔茨海默病(AD)患者的小世界网络属性明显异常，精神分裂症患者的小世界属性降低。大量神经元相互作用、相互协作时，整个系统自发地涌现出动态重构等复杂自组织行为，这种自组织模式被认为是脑高级认知功能产生的物质基础。认识神经网络的结构与功能的自组织演化动力学是破译脑工作原理的关键。复杂动力学系统通过个体间相互作用产生全新的自组织整体行为的过程，存在于生物系统的各个层次，并一般被认为是神经系统产生智能、灵感、意识等高级功能的基础。借用恩格斯关于思维演化的“铁的必然性”的提法，涌现，时空呈展性也是“铁的必然性”。涌现，在一定意义上是发生在整体行为不等于各个部分行为的简单相加的复杂系统^[7]。神经系统中的涌现过程可以在多

个层次上表现出来, 例如: 细胞内分子作用网络通过自组织产生多稳态, 从而实现分子水平的学习记忆; 神经细胞间相互激发与抑制产生网络回响、震荡, 从而实现记忆痕迹的存储以及整体抉择; 大脑环路间的相互作用产生不同的脑功能态; 群居动物活动中产生的群体智能, 蚁群的群体智能行为并不是一群蚂蚁行为的线性相加; 人群的社会、经济行为等. 神经连接组学实验的数据与理论模拟方法结合可以对上述涌现现象进行机理分析.

再一个有趣的进展是关于果蝇的视觉初级运动检测的神经联结组学研究. 说来话长. 在二战期间, 两个德国年轻人——哈森斯坦 (Bernhard Hassenstein) 和赖夏特 (Werner Reichardt), 一个是学习生物学的大学生 (21 岁), 另一个是学习物理学的大学生 (19 岁), 都被征了兵. 他们相约如果能活下去, 一定要做成一件大事——建立一个综合物理学和生物学的研究所. 1958 年他们在德国图宾根的马克斯 - 普朗克生物学研究所中建立了控制论研究组, 通过对甲虫视动反应的研究建立了初级运动检测模型, 开始了视动检测的研究, 奠定了对视觉运动检测的模型研究的基础. 澳大利亚学者 Bruno Van Swinderen 曾指出, 自相关初级运动检测模型揭示了脑工作的基本原则. 赖夏特是学习物理出身的, 但是他对生物学实验非常重视, 后来他告诫到他们研究所来工作的青年人: “理论必须每时每刻都和实验紧密结合. 我不相信无中生有的脑科学理论会有任何机会取得成功.” 赖夏特是我在德国马普学会生物控制论研究所学术访问期间 (1982~

1984) 的老师、合作者和朋友. 半个多世纪以来, 人们孜孜不倦地求索运动检测的神经环路机制. 55 年过去了, 2013 年《自然》(Nature) 杂志发表了有关果蝇视觉运动检测神经连接组的报道^[9]. 该连接网路包括了 379 个神经元和 8 637 个化学突触, 确定了参与运动检测的不同神经元类型及它们所投射到的单一的对运动方向敏感的神经元. 连接组研究揭示了运动感知的神经计算原理. 该论文有 24 位作者, 体现了今天的脑科学是 “big, and integrative”.

郭爱克等在脑功能神经联结图谱研究方面获得了初步但重要的进展. 因为神经细胞电活动是大脑进行它的各种功能的方式和表征, 所以得到完整的电活动图谱就可以推断所有神经细胞间的网络联结图谱和大脑正常功能是怎么进行的, 进而理解脑疾病产生时网络功能是如何失常的. 眼下, 实现这个 “脑活动图谱” 梦有两大困难. 其一是, 为了能记录所有神经细胞的电活动, 首先必需研发出能反映电活动的非侵入性微探针. 目前脑科学界已有的方法都不能在记录大量神经细胞的同时, 又兼有足够的的时间和空间分辨率. 所以, 美国的脑计划将聚焦在开发分子尺度的探测技术和装置. 其二是, 即使我们拥有了这样的大数据, 目前的大数据科学还不能支持对这样海量数据的解读, 难以从中提取有关脑的工作的原理和规律信息. 郭爱克研究小组独辟蹊径, 发展了一种新型的神经细胞的双色钙成像技术, 用于研究神经元之间、突触前与突触后之间在结构和功能上的相互关系, 致力脑功能联结图谱建立 (图 1)^[9].

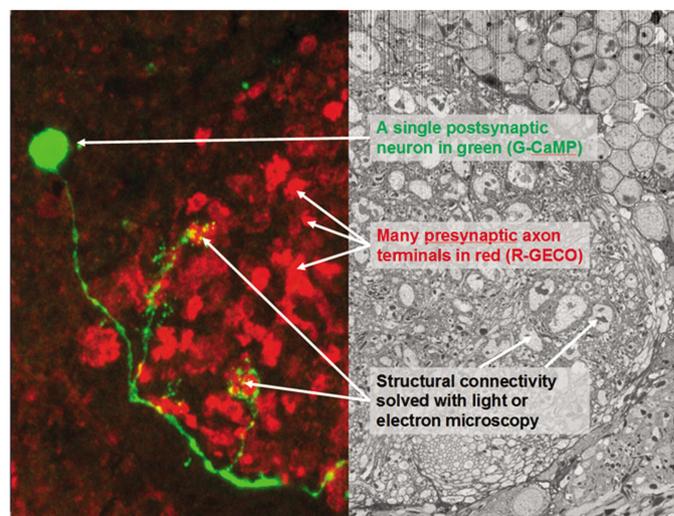


Fig. 1 A novel technology for neural activity demonstration: dual-color calcium imaging^[9]

图 1 一种新型的神经细胞的双色钙成像技术^[9]

用于研究神经元之间、突触前与突触后之间在结构和功能上的相互关系, 致力脑功能联结图谱建立.

郭爱克研究组投石问路, 首先以果蝇为模式, 用该策略揭示了在嗅觉感知过程中, 气味选择性是如何被编码的, 从嗅球的投射神经元到它的靶向神经元的微环路, 信息转换是如何实现的. 在大多数情况下, 每个神经元从许多突触前神经元接收输入, 并将这些输入信号整合为单一的输出信号. 所以, 每个神经元对外界刺激的反应特性在很大程度上是由它所接收的突触前神经元的反应特性加以整合而来的. 如果能够将一个神经元所接收的所有突触前神经元的反应特性逐一测量出来, 并和这个神经元自身的反应特性进行比较, 就可以对这个神经元所参与的环路计算有清晰的了解. 但是, 由于神经环路的结构极端复杂, 迄今尚没有一种有效的策略能够将某一神经元的突触前神经元逐一找出, 并进行详细的功能研究. 为了解决这个问题, 他们引入了一种基于双色钙成像的新策略, 并将其应用于果蝇脑的从嗅觉投射神经元群到蘑菇体神经元(KC)的微环路. 用绿色的钙指示蛋白标出单个 KC, 同时用红色的钙指示蛋白标出许多前级的投射神经元(PN). 通过在双光子光学显微镜成像和双束扫描电镜的结构追踪和重构, 可以分辨出单个 KC 细胞从哪些 PN 轴突末梢接收输入, 并将这个 KC 和它所接收的 PN 轴突末梢对气味的反应逐一测量出来. 由此发现, 单个 KC 对气味的反应选择性在很大程度上可以从它所接收的 PN 轴突末梢的气味反应进行预测. 只需要将这些 PN 轴突末梢的气味反应进行线性相加, 并对所得到的结果和预先设定的阈值进行比较, 就可以较为精确地预测单个 KC 对哪些气味起反应. 这说明 KC 对气味的反应选择性主要是由其接收的突触前 PN 的反应特性所决定的. 他们还进一步发现, 即使某一气味不能激活 KC 的输出, 单个 KC 所接收的 PN 轴突末梢的数目和这些 PN-KC 突触的平均强度具有逆相关的关系. 总之, 他们的工作提供了一种有效的策略, 可以用来研究单个神经元对外界刺激的反应特性是如何由它的突触前神经元转换而来的. 这种策略对于了解果蝇脑蘑菇体中信息传递和整合的过程提供了一种全新的视角, 对蘑菇体神经元气味编码特性的来源有了更加深刻的认识. 可以期望这种策略在未来可以广泛应用于多种神经联结网络, 以获取执行特定脑功能的相关脑结构所有神经细胞电活动的动态信息. 半个多世纪以来, 人们曾试图在脑中找到所谓的“祖母细胞”或“概念细胞”^[10], 在未来这种双色或多色细胞钙成像技术或能有助于理解“概念细

胞”的组织原理.

4 追寻智力的源头——一个脑科学梦

什么是智力? 什么是创造力? 智力的本质是什么? 智力是从哪里来的? 这是很久远很经典的脑科学难题——脑与心智的关系. 人们经常讲要破解脑的奥秘, 到哪里去寻找人类智力的根? “人类乃万物之灵长”, 人类从远古走来, 人脑就是智力演化的伟大奇迹, 哪里是它的遥远的根, 它的源头? 从研究果蝇的抉择与认知入手, 探索智力的遥远的根, 从而揭示智力的设计草图, 这就是我的脑科学梦. 人们会问, 难道果蝇会有智力吗? 从哪里入手研究智力? 美国科学院早在 1986 年就指出: “没有哪一项基础科学的研究目标能比‘了解人类如何思维、解决问题、做出决定, 如何改进我们解决问题和制定政策的能力’这一研究目标更有前景、更为重要”(Research Briefing, 1986). 2009 年 5 月 14 日出版的《自然》(Nature)杂志刊登社论——《为未知做好准备》, 呼吁科学界要充分应对未来不确定性的挑战.

我们生活在一个充满着不确定性的世界里. 所有生物, 从筑巢的蜜蜂到建筑鸟巢的工程师, 都必须对未来进行预测, 以便决定下一步的行动. 人类认知的起源和发展就植根于基因/脑/环境/行为之间的交互作用中. 一个人在短暂的生命周期里就需要面对人类历史从未经历过的不确定, 人类要生存下去, 必须适应这个充满未知和不确定性的世界. 生命就是一个不断做出抉择的过程. 抉择是指人或动物在风险或不确定性的条件下, 基于知识或经历权衡利弊得失, 选择何种策略如何行动的过程. 它是脑认知行为研究的核心问题之一. 果蝇(*Drosophila melanogaster*)与我们同在蓝天下, 同住地球村, 共享生命和智力演化的成果. 果蝇作为最成功的模式动物已有 100 年了. 果蝇是极好的经典模式动物, 被誉为生命科学的“万能钥匙”. 它有清晰的遗传背景、简约的神经系统、较短的生命周期、较强的繁殖能力、丰富的行为菜单、方便的基因操作等, 这些目前仍然是不可替代的. 前人以果蝇为模式, 在探索生命本质的道路上取得了重大突破, 在遗传、发育等方面三次获诺贝尔奖. 果蝇在帮助人类认知“生与死”、“爱与恨”的本质, 做出了很大的奉献. 它能帮助我们认知“智与愚”的本质吗? 果蝇的脑, 简约而不简单. 果蝇大约有 3×10^5 个神经元, 另外一种简单模式动物——线虫

(*C. elegans*)则只有 302 个神经元, 作为灵长类最高级的人类则有 10^{11} 个神经元, 从数目上看, 果蝇脑的神经元正好处于线虫和人类的几何平均。一方面说明了果蝇神经系统“恰到好处”的复杂性。另一方面, 果蝇的脑结构相对简单, 使得利用果蝇神经系统进行学习记忆等高级认知功能的分子细胞基因和神经联结机制研究相对简单易行。这些优势能帮助我们揭示层次之间的因果关系, 每一个较高层次上的行为和结构都依赖在它之前的较低层次上的行为和结构。抉择的脑联结图谱就是描述抉择的核心环路网络, 揭示脑如何基于对抉择后果的预期, 来选择适宜的行为方案所遵循的普适性神经法则。抉择涉及到感觉信息注册、价值表征、运动执行等若干步骤, 每个步骤都需要征用若干脑功能区, 这些脑功能区之间联系就构成了抉择行为相关的脑联结网络。

郭爱克研究组在国际上率先选择脑认知功能的核心问题——果蝇抉择为突破口, 并由此系统地多方面地开创了果蝇的认知行为及其相关神经回路和网络机制研究, 从而将果蝇作为模式动物的地位提升到了一个新高度, 为利用果蝇的强大的遗传工具研究脑认知的神经机制提供了范例。他们的实验室开创了果蝇“两难抉择”研究(图 2)。

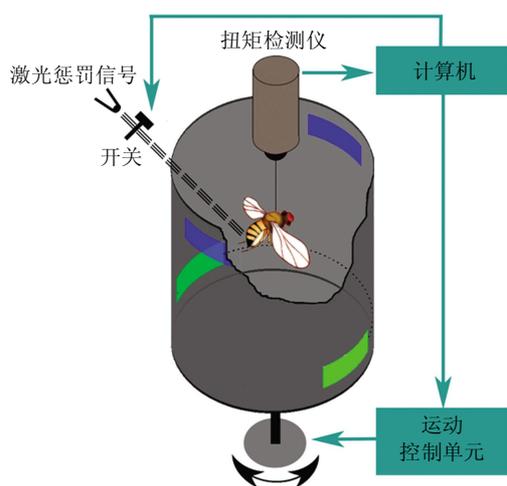


Fig. 2 Decision making paradigm for *Drosophila*: "color/shape" dilemma

图 2 “颜色/形状”的两难抉择范式

用连续可变的视觉模式参数(颜色或形状), 设置颜色/形状的不同组合, 检测果蝇在双线索所表达的利/害信息之间出现冲突时的抉择表现。发现果蝇根据颜色和形状线索的相对权重(relative

value), 采取惩罚概率极小化策略, 在两种相互竞争的视觉线索之间, 做出“趋利避害”的非线性的“胜者独享”(winner takes all)的抉择。研究不仅首次揭示了果蝇具有基于“价值”的抉择能力, 还证明了果蝇中央脑中的一个重要结构, 因形状上酷似一对蘑菇而被称作蘑菇体, 是参与抉择的脑区。早在 1850 年, 法国生物学家曾提出假设, 认为蘑菇体可能参与昆虫的自由意志和内禀的智能控制(F.Dujardin, 1850)。郭爱克等^[1]证明, 在没有蘑菇体参与的情况下, 果蝇的抉择是线性的, 即在两个冲突线索中做减法运算; 在有蘑菇体参与的情况下, 是非线性的“胜者独享”的抉择。这样为利用果蝇的强大的遗传工具来研究抉择行为的神经机制提供了可能。海森堡(M.Heisenberg)在引用该论文时指出, “维系当下的行为和切换到新行为的操作需要蘑菇体参与”。多巴胺作为“天使与魔鬼”化学小分子, 却参与多样的与情感相关的认知行为, 与心理和精神健康密切相关。郭爱克等在行为学和组织学观察的基础上, 采用神经行为遗传学操作, 进一步聚焦在抉择的神经环路机制上并提出了抉择的门控-增益调控理论假设, 蘑菇体-多巴胺能-伽马氨基丁酸能神经元构成的神经环路, 在面对两难选择时, 将起到一个类似于增益-闸门的作用, 将信息按照当前任务的重要性分档, 将重要的信号放过和加以强化, 而将次要信号或者干扰信号挡在门外。如果用这一理论来描述基于价值的抉择过程的话, 经环路将预期价值低的信号过滤掉, 而将可能带来最大价值的信号放大, 并使最后的行为输出也一并被放大, 从而表现出胜者全拿的 S 形抉择曲线(winner-take all)的非线性抉择。他们还证明果蝇有能力连续完成系列的抉择任务, 在面对新的抉择任务时, 它能放弃前一个选择, 转而做出新的选择。做出新的抉择仍需要蘑菇体结构和多巴胺系统重新快速参与, 直至抉择执行阶段^[2]。Randall C. O'Reilly 在讨论智力本质时指出: “智力的本质就是对既定目标的坚守和变化中的与时俱进”(Randall C. O'Reilly, Science, 2006)。“明者因时而变, 知者随事而制”(习近平在亚信峰会上发表的主旨演讲, 新华社上海 5 月 21 日电, 2014-05-22 日文汇报)。

5 脑科学未来

2013 年以来, 美国、欧盟等发达国家纷纷推出脑研究计划, 争夺这一引领世界科技发展、带动

相关产业革命的重要战略制高点。为贯彻落实国家创新驱动发展战略，应对国际科技革命的新挑战，脑科学已发展成为多学科交叉汇聚的前沿科学领域，必将引领新一轮的科技与产业革命，促进人口健康和经济社会持续发展。值得高度关注的是：基于近年来的研究积累和新技术的发展，脑科学在基础和應用上正在酝酿着重大的突破。

我国脑科学计划必将面向世界科学前沿，以脑认知的神经基础为核心科学问题，并针对国家重大需求，开展“脑机智能技术”和“脑疾病诊断治疗”两个重点领域的工作。充分利用我国信息、电子、材料等学科技术，脑疾病样本的丰富资源和非人灵长类动物模型等特色优势，在脑认知科学研究、脑机智能技术、脑疾病的早期诊断和干预三个前沿领域，取得国际领先的成果，“有所发现，有所发明，有所创造，有所前进”。

参 考 文 献

- [1] Editorials. Big data: The next Google. *Nature*, 2008, **455**(7209): 8-9
- [2] Talhelm T, Zhang X, Oishi S, *et al.* Large-scale psychological differences within China explained by rice versus wheat agriculture. *Science*, 2014, **344**(6184): 603-608
- [3] 赵国屏. 从大数据到 E-cell. SIBS 青年科学家联谊会, 2014-06-13
- Zhao G P. From Big-data to E-cell. SIBS Scientist Club, 2014-06-13
- [4] Jarrell T A, Wang Y, Bloniarz A E, *et al.* The connectome of a Decision-making neural network. *Science*, 2012, **337**(6093): 437-443
- [5] Lu S J, Fang J A, Guo A K, *et al.* Impact of network topology on decision-making. *Neural Network*, 2009, **22**(1): 30-40
- [6] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998, **393**(6684): 440-442
- [7] 约翰·霍兰(美). 涌现 - 从混沌到有序. 陈禹等, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 2001
- Holland J. *Emergence: From Chaos to Order*. UK: Oxford, 2000
- [8] Takemura S Y, Bharioke A, Lu Z Y, *et al.* A visual motion detection circuit suggested by *Drosophila* connectomics. *Nature*, 2013, **500**(7461): 175-183
- [9] Li H, Li Y M, Lei Z C, *et al.* Transformation of odor selectivity from projection neuron inputs to single mushroom body neurons mapped with dual-color calcium imaging. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, **110**(29): 12084-12089
- [10] 奎罗格, 弗赖特, 柯赫. 我们的记忆由谁编码. 陆惠民, 郭爱克, 译. 环球科学, 2013(3)
- Quiroga R Q, Fried I, Koch C. Brain cells for grandmother. *Scientific America*, 2013, **308**(2): 30-35
- [11] Tang S M, Guo A K. Choice behavior of *Drosophila* facing contradictory visual cues. *Science*, 2001, **294**(5546): 1543-1547
- [12] Zhang K, Guo J Z, Peng Y Q, *et al.* Dopamine-mushroom body circuit regulates saliency-based decision-making in *Drosophila*. *Science*, 2007, **316**(5833): 1901-1904

Big Brain Science in The Age of Big Data: Drawing Mental Blueprint

GUO Ai-Ke*

(Institute of Biophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Among many odes, I like the "Song of Yangtze River " very much: "you come from the ancient times, ...you are the source of endless". At the 40th anniversary of the *Progress in Biochemistry and Biophysics*, I would like to sing my heart song, "Ode to the Brain". The Human Brain is like the long river of history. It from ancient to today, and will from today to the future. Human brain is the most fine, most complex, most beautiful and the most successful organ created by the long natural selection process. It is the greatest miracle of intellectual evolution. It is the source of human intelligence, is the human spiritual home. The wisdoms of the human brain created and promote the formation of the social inheritance of human knowledge and civilization. Until now, we still don't know how the human brain works. We believe that the brain functional connectomics may be a key to crack the secret of the brain.

Key words big data, big brain science, mental blueprint, ode to the brain, brain functional connectomics

DOI: 10.3724/SP.J.1206.2014.00208

*Corresponding author.

Tel: 86-21-54921785, E-mail: akguo@ion.ac.cn

Received: July 22, 2014 Accepted: September 11, 2014