

大脑是如何决策的? 百年谜题获关键证据

● 本报见习记者 郑浩威

100多年前,西班牙神经学家圣地亚哥·拉蒙·卡哈尔绘制出神经元形态,确立神经元是大脑认知的基本单元,同时也留下一个未解谜题:这些如同小树般的神经细胞,究竟是靠怎样的内部运算支撑起人类灵活决策的?

长久以来,科学界习惯把神经元简化成网络中的一个“点”,却忽略了枝杈繁茂的树突蕴藏的计算潜能。中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心研究员徐宁龙团队首次在活体动物执行高级认知行为时,获得了树突参与抽象规则决策的直接实验证据。相关研究近日发表于《科学》。

从我国神经生理学家张香桐院士1951年开创性提出“顶端树突具有电兴奋性并整合突触输入”的科学猜想,到徐宁龙团队耗时近十年的科学探索,人类对大脑细胞如何思考的理解正在进入新的阶段。

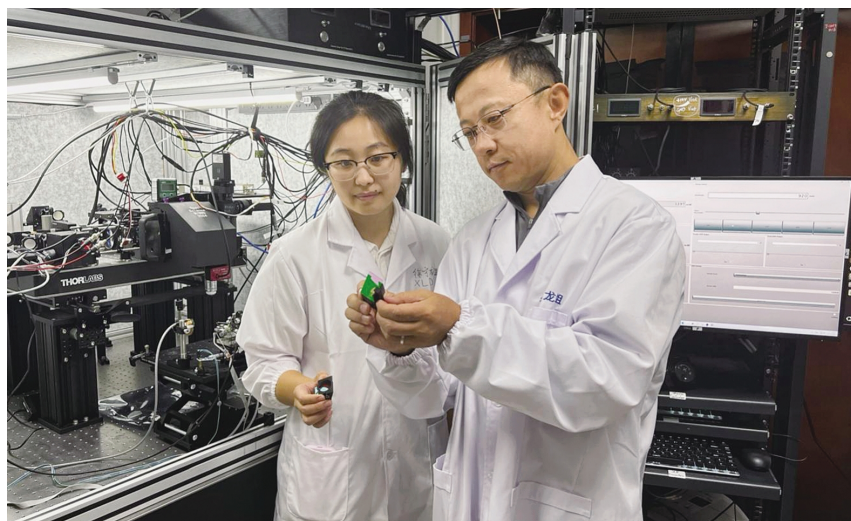
百年未解的科学谜题

如果把神经元比作一棵树,胞体是树根,向外层层分叉的枝杈便是树突。自神经元学说建立以来,这棵“树”的枝叶到底在做什么,始终是神经科学领域一块难啃的“硬骨头”。

很长时间以来,多数脑科学模型乃至今天的人工智能(AI)架构,都把神经元处理成简单的点状节点:信号传入,加权求和,输出放电。人类认知行为则被理解为海量“点”联网运算的结果。这个简化模型有一个核心问题一直未被解答——神经元复杂的内部结构,是否参与高级认知计算。

早在1951年,张香桐就依据皮层电信号观测推断:伸向大脑皮层表层的顶端树突具备主动电兴奋性,能够独立整合信息。受限于当时的技术,这只是一个无法直接验证的假说。

离体实验早已证实,树突能产生独立于胞体的电信号,实现非线性放大。可一旦要在清醒、正执行复杂认知任务的活体动物身上记录树突活动,障碍就接踵而至。树突分支仅微米尺度,同步记录同一神经元的树突与胞体并区分抽象信号,工具稀缺、成功率极低。全球敢啃这块“硬骨头”的实验室屈指



徐宁龙(右)和团队成员张园在讨论实验。

受访者供图

可数。

“认知灵活性是大脑智能的重要标志。就像威斯康星卡片分类测验,被测人员在不被告知规则时,要依靠反馈不断推断背后隐藏的逻辑,把内心推断的规则与感官信息相结合,作出选择。”徐宁龙说。这套底层运算究竟发生在神经细胞的哪一层,过去无人知晓。

团队把目光投向这片“无人区”。一只小鼠要被训练约两个月,才能熟练完成规则切换任务。随后,研究人员还要将小鼠开颅,病毒标记特定神经元,用双光子显微镜捕捉亚细胞钙信号,但成功率极低。团队成员张园接手课题后,从简单任务起步,持续迭代实验范式,前后数年打磨,才获得意外发现:树突中竟清晰编码着抽象的规则信息,与胞体记录到的感觉信号并不相同。

“能在行为过程中特异性记录,并且调控树突活动的实验,在现有文献中极为稀少,技术挑战巨大,这项研究堪称一场‘英雄式的探索’。”审稿人评价说。

研究揭示神经元内部分工

为看清树突如何参与决策,徐宁龙团队搭建了一套小鼠版“规则推理测试”。

实验中,头部固定小鼠聆听不同频率的声音,判断后选择左或右,获取水作为奖励。关键在于,声音高低的分类边界会毫无预警地切换,小鼠只能依靠每次选择后的奖励反馈,不断推断当下隐藏的规则——同样的声音,在不同规则下必须作出相反的选择,这正是认知灵活性的体现。

研究锁定听觉皮层第五层ET亚

型锥体神经元。这类皮层输出信号的关键细胞,已由团队前期实验证实直接参与决策行为。借助亚细胞分辨率的双光子成像,研究人员同时记录同一个神经元的顶端树突与深层胞体。

实验结果给出了清晰答案。同一个神经元内部出现明确分工:顶端树突主要编码小鼠推断出的抽象规则这一内在认知变量,胞体更多表征外界听觉感觉输入。两类信号在神经元内部发生非线性整合,生成决策输出,驱动行为选择。

“不是简单的1+1,两种信号共同作用时,会产生远超线性求和的输出。”徐宁龙说。为验证树突不是旁观者,团队用光遗传学技术激活SST中间神经元,特异性抑制顶端树突。结果显示,胞体的决策选择信号显著减弱,说明树突的编码活动是灵活决策输出必不可少的一环。

这一发现更新了主流认知:高级认知并非只是大量“点状神经元”联网计算,单个神经元内部的不同区室即可分工处理不同类型信息,独立完成非线性认知计算。

张园回忆,最初看到树突与胞体信号不一致时,团队十分意外,因为此前不涉及规则推理的实验里,二者往往趋于一致。多轮重复验证后,团队确认这一发现真实可靠。

这项研究结果把经典的树突双区室整合模型,从感知、运动处理拓展到抽象规则类高级认知,接续了张香桐70多年前的科学猜想。从假说到离体现象,再到活体认知行为下的直接证据,几代中国科研人员终于补上一块重

要的科学拼图。

对AI发展和脑部疾病治疗的启示

大脑是一台极度节能的“生物计算机”。反观主流AI大模型,把每个计算单元简化为点状节点,靠海量参数与深层网络堆叠能力,消耗巨量训练数据与算力,还容易出现灾难性遗忘、灵活性不足等问题。徐宁龙团队的这项发现,为AI底层架构提供了来自生物大脑的参考。

“如果借鉴树突多区室架构,让每个基础计算单元内部拥有多个信息处理分区,不同输入可在不同区室隔离处理。”徐宁龙解释,单个单元计算能力变强,不必依赖极深的网络,既能降低能耗,也可实现不同信息互不覆盖,有望缓解灾难性遗忘。未来,类脑AI或走向更低能耗、小样本下更灵活的推理,甚至赋能具身智能。不过,研究团队表示,从生物学发现到工程落地,仍有大量跨学科工作要做。

该研究也为精神认知障碍疾病的干预提供了新思路。强迫症、成瘾类病症的典型特征正是认知灵活性受损,患者接收的感官输入与常人无异,但大脑内部对环境的推断、信念发生扭曲。这种异常很可能源于树突承载的内在认知信号与胞体感觉信号的整合紊乱。

临床上,经颅磁刺激、经电刺激的作用靶点恰好在大脑皮层表层——顶端树突富集之处,但疗效通常不稳定。该研究的解释是,仅刺激表层树突,不足以产生有效的运算输出,需要兼顾树突与胞体的协同激活,树突亚细胞区室有潜力成为认知类精神疾病的全新干预靶点。

据了解,未来张园会进一步聚焦树突整合异常为何造成认知缺陷这一问题展开研究。徐宁龙实验室还将在绒猴等灵长类动物身上开展跨物种实验,并研究树突计算如何在大规模脑网络中流动,同时与AI研究者合作,探索生物机制向类脑算法转化的路径。

相关论文信息:

<https://doi.org/10.1126/science.adz5>