

实验结果显示，有大量的演奏者以非常不同的方式参与不同的交响曲。这也就意味着，采用相对局限的单细胞编码性质很难解释大脑是如何记忆序列信息的。透过复杂的、高维度的神经元群体信号找到低维度的、通用的编码模式，才能完整地理解序列工作记忆在大脑中的表征方式。

换句话说，就是把复杂的大脑记忆活动分解为群体编码的一小块“屏幕”，用记忆表征的几何结构来解释序列记忆是如何在大脑中存储的。

当然，真实的情况下，我们的大脑的运行方式会更加复杂，科学家提出这些比喻只是为了尽可能准确地来描述大脑的工作情况。

还有更多未解之谜

神经科学和生物物理学家郭爱克院士指出，这篇论文的创新性在于以猕猴的序列学习为对象，设计了时间和空间信息两个线索共存的实验范式，采用双光子在体钙成像技术，记

这个发现揭示了序列信息编码利用了降维原则，从而降低了神经计算复杂性，将对受脑启发的人工智能研究产生影响。

录了数千个大脑前额叶皮层神经元，发现了高维神经元状态空间可以分解为多个二维子空间之和，从而揭示了序列信息的工作记忆在猕猴前额叶皮层表征的简单几何结构。

“这个发现揭示了序列信息编码利用了降维原则，从而降低了神经计算复杂性，将对受脑启发的人工智能研究产生影响。”郭爱克说，70年前，著名神经心理学家卡尔·拉什利提出了一个假设——为了控制序列动作，我们的大脑需要将其工作瞬间转移到持续的神经活动模式上。“证明序列信息中时间和空间的整合发生在整体水平而不是单神经元层面，这个研究结果为这一理论假设提供了实验数据支持。这就是科学魅力之所在！”

猕猴作为结构和功能最接近人类的模式动物，利用猕猴开展高级

功能的验证无疑具有重要意义。“认知活动的一个核心维度是时序。时序信息的表征和操作是包括记忆、语言等重要认知活动的基础。大脑如何编码时序信息是极为重要的未解之谜。”认知科学和实验心理学家陈霖院士评价，这项研究成果是认知神经科学领域“里程碑”式的重要工作。

序列记忆中的环是如何构建、如何被提取的？是谁在控制不同环的大小，注意资源分配的原理是什么，记忆的容量为何有限？当序列中每个时间存在抽象关系时，记忆是如何被压缩的？

想要解开这些有关工作记忆运行机制的未解之谜，人类还有很长很长的路要走。（文图均由中科院脑科学与智能技术卓越创新中心提供）



07

这可能是因为次序靠后的信息所分配到注意资源会减少，这也解释了记忆提取时，为什么次序靠后的信息更容易出错。



08

序列工作记忆的神经表征对应了一种将不同次序子空间内的结构信息，嵌入高维向量空间的表征方式，这种编码方式很好地支持了下游神经网络对信息的线性读取。



09

该成果第一次在群体神经元水阐释了序列工作记忆的计算和编码原理，推翻了基于单神经元建立的经典序列工作记忆模型，为神经网络如何进行符号表征这一难题提供了新的见解。