

# 《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：认知控制的序列性及其认知神经机制

作者：黄佳敏，杨国春

## 第一轮

### 审稿人 1 意见：

该综述从序列的角度，综述了认知控制的行为、计算和神经机制的研究进展。并将序列记忆研究与认知控制进行对比整合。从理论融合、范式革新、应用方面提出了未来方向。论述充分、见解独到。

有部分内容需进一步澄清。

**意见 1：**“但这些机制是否同样适用于抽象序列信息仍待探索。”

是否可以进一步解释，“抽象序列”是什么。本段段首提及“近年来，序列加工的研究对象由具体刺激序列拓展到了抽象序列。”后面只解释了“具体刺激序列”，并未就“抽象序列”做出解释，却把“抽象序列”作为桥梁，连接了“序列加工”与“认知状态控制”

**回应：**感谢审稿专家的指正。

在引言部分最后一段，我们对“抽象序列”进行了较为粗略的解释，但我们承认这样是不够清晰的。为此，我们修改了具体的例子，把“某个任务”具象为“‘重复-转换-转换-重复’状态序列”。

为更好地理解抽象序列，我们对“抽象任务序列”这一在已有文献中做过明确定义的概念进行了补充说明，添加在 3.2 “抽象序列加工和序列加工的抽象化”第一段的末尾相关段落中，并补充了具体实例以增强直观理解。具体修改如下：

抽象认知任务序列指一组有序的认知操作序列，具有明确的开始和结束时间，其抽象的本质体现在操作独立于具体刺激呈现方式、且序列展开不受限于精确的时间进程。例如，在算术中遵循“先乘除，后加减”的原则，无论具体的数值或呈现模态如何，该操作序列结构保持不变，而且这种二阶认知需求要求个体主动监控序列位置，而不依赖时间线索(Desrochers et al., 2022)。

**意见 2：**“PES 在冲突型任务(Cravet & Ger, 2026; Danielmeier et al., 2011; Derrfuss et al., 2022) 和非冲突型任务(de Mooij et al., 2022; Kirschner et al., 2021) 中稳定存在。”这一句论述的“冲突型任务”和“非冲突型任务”分别是什么？前文提及“冲突任务（如 Stroop）”，但对“非冲突型任务”并没有清晰定义。PES 在两种任务中稳定存在想说明什么？

**回应：**感谢审稿专家的指正。

“冲突型任务”指的是 Stroop, Flanker 这类包含认知冲突的任务，冲突体现在无关信息对目标信息产生干扰作用；“非冲突型任务”指的是 Strop-signal, Task switching 这样的任务，虽然反映的是认知控制，但并不包含认知冲突。

我们在原稿中加入该句的初衷是想表达 PES 作为认知控制适应性调节机制的普遍性，不局限于 2.1.1 部分第一段中提到的冲突任务。但我们同意专家的意见，探讨“非冲突型任务”偏

离了这部分内容的核心主线。为保证文章结构的紧凑和聚焦，我们在修改稿中已将该句删除，并修改为：

和冲突适应类似，错误后减慢反映了系统监测到错误后进行的认知控制调整(Botvinick et al., 2001)。

.....

#### 审稿人 2 意见：

总体而言，该文章选题具有前沿性和理论价值。作者敏锐地捕捉到了“认知控制”与“序列记忆”两个传统独立领域之间的相似性，试图跳出传统的离散状态研究框架，从时间维度重构对认知控制的理解。文章逻辑框架清晰，文献引用较新，论证具有一定的说服力。然而，文章在概念界定的精确性、神经机制的完整性以及理论深度上仍有提升空间。以下是具体审稿意见：

**意见 1：**文章虽声称要融合认知控制与序列记忆，但第 2 节与第 3 节仍是分立的文献堆砌，未在每一小节中真正交叉引用对方领域的理论来解释本领域现象。建议在第 2.2.2 或 3.2 中增设“认知控制视角下的序列记忆”或“序列记忆视角下的认知控制”，真正实现双向融合。

**回应：**我们衷心感谢审稿专家提出这一建设性意见。按照您的建议，我们对修改稿进行了大幅修订，增补了 2.2.3 节和 3.4 节的内容：

1. 序列加工视角下的认知控制（第 2.2.3 节）：我们应用了统计学习、预测编码和层级组块化等序列加工领域的概念，来解释认知控制长、短序列的共性和特异性。这说明了序列加工机制对理解认知控制领域的问题具有重要的借鉴作用，体现了在认知控制领域融入序列加工的重要性。

#### 2.2.3 认知控制短序列与长序列机制的共性与特异性：序列加工的视角

从形式上看，认知控制的长序列是由多个短序列组合而成，但这并不代表长序列就是短序列的简单叠加。尽管目前还很少有研究直接对比认知控制长序列和短序列的机制，但是从序列加工的角度，可以对此提供一些重要启示：两者可能同时存在共性和特异性。

一方面，两者可能依赖一些通用的机制。比如，两者在初始的统计学习上同源，都依赖于对局部转移概率与时间信息的敏感追踪(Dehaene et al., 2015)。这种统计学习机制能自动提取相邻元素的转移概率，并通过成对联结的链式表征来建构整个长序列(Lewandowsky & Murdock, 1989)。在加工机制上，短序列和长序列对相邻元素的成对联结编码均受预测编码(predictive coding)所驱动，即系统会对未来即将出现的项目产生预期，一旦感觉输入违背了这种预期，便会产生“预测误差”信号，进而自下而上地修正当前的记忆状态表征(Jiang & Rao, 2024)。采用跨模态的局部-全局(local-global)序列学习范式的研究发现，个体的大脑在局部(短序列)与全局(长序列)层面均会产生显著的预测误差信号，表明预测编码机制贯穿于不同尺度的序列加工之中(Y. T. Huang et al., 2024)。另外，整体的长序列可以通过独

立学习短序列来习得，在初步编码阶段，个体一旦通过学习局部的转移概率习得离散的成对联结，在随后的静息状态下，大脑会自发引发快速的序列神经重放，将先前习得的成对联结组装成完整的长序列(Q. Huang et al., 2024)。

另一方面，两者又可能有明显的区别。短序列仅包含单一的转移关系，其执行主要依赖局部、瞬时的记忆表征；而长序列面临的不再是单一的转移关系，而是多重转移如何整合为整体结构的问题。为了应对内部表征干扰，认知系统不再依赖简单的维持策略，而是会启用高度特异性的项目间关系表征机制(Dehaene et al., 2015; Xie et al., 2022)。这种特异性机制的核心在于组块化。长序列要求大脑不能简单地以单向链条形式在初级感觉皮层无限延长，而是将多个感觉事件整合为更高层次的整体单元，即“组块”(Ding, 2025)。在神经层面，这种组块化体现为功能上的层级分化：初级运动皮层仅对单个离散按键动作(即单个序列项目)进行独立表征，而运动前区和顶叶皮层等高级联合脑区则负责将多个基础动作合并重组为更高层次的序列组块(Yokoi & Diedrichsen, 2019)。与短序列只关注相邻元素的局部转换不同，长序列组块的形成还涉及对组块内每个感觉事件分配特定的“序数位置”，并通过低频神经震荡来追踪和维系这种跨脑区的层级结构(Ding, 2025)。

由此可见，深入理解认知控制“长序列”的原理，需要充分借鉴序列表征已有的理论和发现。

2. 认知控制视角下的序列加工(第3.3节)：为了从认知控制的角度理解序列加工，我们引入了题为“抽象序列的拓展：认知控制状态序列的引入”的新小节。我们提出，认知控制状态序列是对任务序列的进一步抽象化，强调了序列加工的未来趋势是与认知控制进行更深层次的融合。

### 3.3 抽象序列的拓展：认知控制状态序列的引入

任务序列通常要求个体在输入信息保持不变的前提下，根据当前情境动态地对其中特定信息成分进行选择加工。在此意义上，任务序列可视为认知控制序列的一种形式(Desrochers et al., 2022)。然而，受限于任务的语义，此类序列的抽象性往往不足，实质上可能被表征为具体的言语串。例如，在“形状-颜色-颜色-形状”这类任务序列中，控制状态的切换可能依赖于对任务规则的语言复述，而非纯粹由认知控制需求驱动。

如果将抽象化进程再推进一步，序列研究的对象可以从“任务规则”转向“认知控制状态”本身，即考察构成任务执行基础的抽象控制需求，如高控制需求与低控制需求的交替变化。这类控制状态通常难以用语言明确表达，因此属于高度抽象化的认知状态。当这些控制状态在时间维度上依次展开时，便形成了独立于具体任务内容的序列结构，可称为“认知控

制状态序列”。进一步地，除不同控制需求水平组成的动态序列，认知控制的不同子成分也可能组成规律的序列，例如“注意目标-抑制反应-转换规则”的循环序列。尽管此类序列看上去更加复杂，却更贴近现实情境中人们的状态，因此有望成为提升序列研究生态效度的可能方式。

从“具体刺激序列”到“任务规则序列”，再到“认知控制状态序列”，序列加工领域的抽象化进程正逐步向更具普遍性与现实适应性的认知控制序列迈进（图1）。

**意见 2：**文章在第2节将“短序列效应”与“长序列效应”并列讨论。然而，这两者的心理机制可能存在本质差异。作者需要更深入地剖析这两者是否真的共享同一套“序列性表征机制”？

**回应：**感谢审稿专家提出的问题。我们同意，在未阐明机制差异的情况下将长短序列效应并列讨论确实过于简化了，理解它们之间的异同的确非常重要。

然而，由于我们未查询到前人的研究对两者进行过直接比较，我们无法对这一问题进行精确的论述。但审稿专家的上一个问题给我们提供了重要启发：序列加工领域对短序列和长序列有比较成熟的研究。因此，我们从序列加工的视角探讨了认知控制短序列与长序列机制的共性与特异性，共性在于两者依赖一些通用的机制，如统计学习、预测编码等，而且长序列可以由短序列来获取；特异性在于两者的层次不同，短序列加工只限于局部效应，而长序列是整体性加工，存在特异性的“组块”和位置编码等机制。具体内容见2.2.3部分，也可以查看我们对上一问题的回答。

**意见 3：**基底神经节（Basal Ganglia）的作用被低估，文章在神经机制部分重点讨论了前额叶与海马的协同作用，但对于“序列加工”和“认知控制”而言，皮层-基底神经节环路是绕不开的核心结构。大量文献指出，基底神经节（特别是纹状体）在动作序列的组块、认知控制的门控以及序列的启动与终止中起关键作用。忽略这一结构会使神经机制的论述显得不完整。

**回应：**非常感谢审稿专家提出这一宝贵意见！

作为回应，我们在修改稿中增加了“4.2.2 皮层-基底神经节环路”，系统论述了该环路在序列加工与认知控制中的关键作用。具体修改如下：

#### 4.2.2 皮层-基底神经节环路

认知控制与序列加工的深层耦合，很大程度上还依赖于皮层-基底神经节环路（cortico-basal ganglia loop）将抽象规则“编译”为具体动作流的动态过程。该环路由前额叶、纹状体、苍白球内侧段及丘脑构成闭合的信息处理回路，是实现从抽象规则到具体动作序列转化的关键架构(Desrochers, Burk, et al., 2015)。

作为皮层-基底神经节环路的主要输入端，纹状体接收来自前额叶皮层区域的广泛投射，是皮层信息进入该环路的关键入口。纹状体整合前额叶输入，将抽象的序列表征转化为可执行的动作单元(Janssen et al., 2022)。啮齿和灵长类动物研究表明，纹状体通过学习逐渐形成

对动作序列“边界”的特异性放电模式，从而构建出底层的“序列组块”表征(Desrochers, Amemori, et al., 2015; Favila et al., 2024; Jáidar et al., 2025)。随后，这种经由纹状体组块化的序列信号向更下游传递。苍白球内侧段作为基底神经节主要输出通路，对动作执行的速度起重要作用，药理性失活该脑区会显著减慢灵长类动物序列动作的执行速度，但不破坏步骤顺序(Desmurget & Turner, 2010)。此外，在注意（听觉 oddball 任务）和工作记忆（涉及口语流利度的复杂序列任务）任务处理过程中，苍白球内侧段同样承担重要的调节功能(Alanazi et al., 2021; Trotman et al., 2025)。最后，丘脑作为环路的关键中继核，将基底神经节的输出重新投回到前额叶皮层区域，从而完成闭环并对动作时序与规则选择施加门控(Alexander et al., 1986; Desrochers, Burk, et al., 2015)。灵长类的电生理结果显示，丘脑腹前核在抽象规则呈现后表现出选择性编码并将规则信息投射到前额叶，进而促使前额叶完成从规则理解到反应映射的转化(Phillips et al., 2025)。这种反馈机制确保了序列执行始终处于对高阶认知目标的监控之下，既能支持自动化的图式控制（schematic control），也能参与高阶的监督控制（supervised control）(Desrochers, Burk, et al., 2015)。基于此，皮层-基底神经节环路将静态的认知规则转化为动态的、受控的行为序列。

**意见 4:** 第 3.1 节对“序列记忆表征机制”的综述主要引用早年经典模型，忽视近年计算模型进展，建议补充，以增强前沿性。

**回应:** 非常感谢审稿专家的建议。

我们在修改稿中对第 3.1 节（序列记忆表征的计算模型进展）进行了扩充，系统性地补充了近几年影响力较大的计算模型。具体修改如下：

尽管传统理论成功刻画了序列记忆从编码到输出的整体流程，并能解释大量行为规律，但它们通常以高度抽象的功能模块为基础，难以揭示支撑这些过程的实时神经动力学机制。近年来，随着计算神经科学的发展，一系列融合神经科学与人工智能思想的计算模型，通过引入动态表征、突触可塑性、预测编码与分层注意等机制，为理解序列记忆的生物实现提供了新的、更具机制性的视角。在序列工作记忆的短期维持层面，连续吸引子神经网络（Continuous Attractor Neural Network, CANN）模型表明，神经回路无需依赖高能耗的持续放电，而是利用短时突触可塑性（Short-Term Plasticity, STP）将序列信息以“隐藏状态”的形式进行动态存储，成功解释了序列位置效应的动态偏移 (J. Zhou et al., 2024)。在序列结构的抽象与提取层面，Tolman-Eichenbaum 机器（TEM）模型通过两个功能分离但协同工作的计算模块来分别模拟了海马和内嗅皮层的功能，解释了海马-内嗅皮层系统如何通过将具体的感官输入与抽象的序列转移关系图谱相分离，从而学习到可泛化的顺序模式(Whittington et

al., 2020)。在序列表征的动态预测层面, 时间预测编码 (temporal Predictive Coding, tPC) 模型则从预测误差最小化的角度出发, 展示了循环神经网络可以稳定地记忆与提取序列 (Tang et al., 2023)。当面对复杂的长序列时, “组块化 Transformer” 模型提出, 大脑中观测到的“组块追踪神经活动”充当了关键的“位置编码”信号。组块内的事件可直接交互, 而跨越组块的远端上下文信息则被高度压缩并整合为全局上下文向量(Ding, 2025)。另外, 在序列记忆的离线巩固阶段, 情境维持与提取模型-重放(Context Maintenance and Retrieval with Replay, CMR-replay) 模型提出, 在编码阶段大脑将项目与其时间上下文建立双向关联; 在静息或睡眠期间, 序列重放可由上下文与其关联条目之间的自主双向交互触发, 形成级联再激活, 从而促进记忆的巩固(Zhou et al., 2026)。

**意见 5:** 论文声称“首次系统性整合认知控制与序列记忆研究”, 但整合停留在表面。应深入探讨两者在神经机制上的具体重叠, 如前额叶-海马交互如何同时支持序列记忆和认知控制序列的表征。建议在 4.3 深化神经机制层面的整合讨论。

**回应:** 非常感谢您提出的建设性的意见。

为了提升这部分的讨论深度, 我们对第 4.2.1 前额叶-海马环路 (即原稿件的 4.3) 进行了扩充和修改。修改后的段落采用了层层递进的结构: 首先, 我们阐述了前额叶与海马在序列加工和认知控制中的协同作用; 其次, 进一步指出这两个脑区共享一种结构化表征机制——其形式相似但功能互补; 最后, 我们指出, 上述发现可以被整合到一个已有的理论框架中, 即大脑存在两个相互关联的抽象知识表征系统(Vaidya & Badre, 2022), 从而为这些神经机制提供统一的解释。

我们相信, 这一修改可以使读者对前额叶-海马交互的理解更加深入和清晰。

具体修改如下:

#### 4.2.1 前额叶-海马环路

认知控制与序列记忆的深层联系体现在前额叶皮层 (PFC) 与海马体之间的功能交互。传统上, 前额叶被视为执行调控、规则维持和目标导向行为的中枢(Miller & Cohen, 2001), 而海马则主要负责情景记忆和空间序列的编码(Fortin et al., 2002; O'Keefe & Dostrovsky, 1971)。然而, 越来越多研究表明, 认知功能的实现并非特定脑区独立运作, 而是基于分布式的脑区之间的协同(Rosen & Freedman, 2026), 前额叶和海马也不例外。海马与前额叶之间存在记忆相关信息的双向流动。这些信息既包括海马的时空与序列表征 (如序列重放), 也包括前额叶的规则和冲突表征; 这些跨脑区信息交换由多种神经节律在不同时间尺度上调控, 从而支持记忆形成、基于情境的检索与记忆引导的控制过程(Shin & Jadhav, 2016)。

前额叶和海马通过高度协同的神经表征在序列记忆中发挥着重要作用。海马在清醒静息期会通过尖波涟漪 (sharp-wave ripples, SWRs, 约 200Hz 的高频震荡) 事件以压缩、时间重

组的方式重放过去经历或模拟未来可能的行为序列。研究表明，海马的 SWR 事件会驱动前额叶的兴奋性活动，同时抑制其局部的抑制性中间神经元。这种“兴奋-抑制”的协调模式为前额叶准确读取和整合海马传递的序列信息创造了理想的窗口(Jadhav et al., 2016)。此外，研究进一步揭示，前额叶也可以产生类似的重放活动，并与海马的活动同步；这种“海马-前额叶协同重放”能够有效区分动物实际走过和未走过的路径，只有当海马重放的是实际行为路径时，前额叶的协同重放才更强(Shin et al., 2019)。而且，在睡眠中对 SWR 进行闭环光遗传学放大可增强海马-前额叶的协同重放并改善随后的记忆提取(Robinson et al., 2026)。这种前额叶-海马的联合调控在主动探索或决策阶段也有类似的发现，只不过两个脑区的动态交互表现为显著的 theta 频段（4-8Hz）相位同步(Tang et al., 2021)。

近年来的研究表明，海马体不仅参与对空间位置或时间序列等具体事件要素的编码，还能将抽象的认知控制状态（如冲突水平或任务规则）整合进事件记忆中，并与前额叶产生交互。有研究者在 fMRI 实验中首次证明，左侧前海马的神经活动能够同时解码刺激、类别和冲突水平，说明海马将高/低冲突这一内部控制需求视为事件结构的一部分，与外部物理特征共同存储(Jiang et al., 2015)。随后的 EEG 研究发现，当与高冲突关联的线索再次出现时，海马依赖的记忆整合会引发 alpha 波段的提前抑制，预激活相应的认知控制配置，支持一种基于联想记忆的前瞻性控制(Jiang, Bramão, et al., 2020)。另一项 fMRI 研究进一步显示，当个体进入曾与特定任务规则（如“75% 做面孔判断”）相关联的空间情境时，海马对情境的特异性表征会前瞻性地驱动右侧背外侧前额叶皮层复现该任务需求的神经活动模式(Jiang, Wang, et al., 2020)。这些研究体现了海马-前额叶环路在记忆引导的适应性控制中的核心作用。最近，研究人员提出，海马本质上是一个同质化的“目标冲突检测器”：它接收来自新皮层的目标信号，当多个目标不兼容时（例如 Stroop 中颜色和语义的冲突），海马便从“监测模式”转入“控制模式”，通过广泛的输出通路（包括投射到前额叶皮层）协调全脑以解决冲突(McNaughton & Bannerman, 2024)。

近年来的研究提示，除了两个脑区之间的功能协同，海马和前额叶还都有类似的结构化表征功能。例如，海马能够将序列记忆编码为离散事件在时间维度上的结构化映射。单细胞记录研究发现，人类海马及内嗅皮层的神经元可通过其放电活动的渐进性变化，在无监督条件下自发地编码复杂图像序列中隐含的时序结构；更重要的是，在经验结束后，这种群体神经活动仍能重建出由序列所定义的结构图谱，形成对后续事件具有持久预测能力的表征(Tacikowski et al., 2024)。这种几何结构的编码机制不仅支持对物理事件的表征，也为更高阶的抽象认知控制提供了“脚手架”：正如海马结构中的位置细胞和网格细胞能够通过序列激

活来模拟未来路径以实现物理导航(Nyberg et al., 2022), 大脑在执行复杂任务时也构建了类似的“认知空间”。近期的研究表明, 右侧背外侧前额叶的活动模式能够编码不同类型冲突之间的相似性关系; 这表明, 在处理抽象规则或冲突时, 大脑的前额叶系统可能借用了海马系统表征底层时空与几何关系的基本机制, 将高度抽象的执行控制需求转化为可以在多维“认知地图”中进行导航与定位的具体坐标(Yang et al., 2024)。另外, 有一项研究同时探究和比较了前额叶和海马的空间编码机制(Bernardi et al., 2020), 发现海马与前额叶皮层均在高维空间中编码任务变量, 并同时展现出跨条件泛化能力和对任务变量关系的抽象化表征, 即通过构建共享特征变量来捕捉任务潜在结构, 从而支持泛化。但是, 二者的表征也存在一定差异。海马在任务过程中稳定维持抽象几何结构, 为事件提供连贯的关系骨架, 而前额叶的几何结构则根据当下情况快速调整, 刺激呈现前可抽象编码情境、价值与动作, 呈现后则优先强化即时动作与结果的抽象表征, 适配快速决策需求。

这些发现促进了前额叶和海马在理论层面的整合。近期的理论提出, 大脑中存在两种并行但相互关联的抽象知识表征系统: 一个是以额顶叶皮层网络(frontoparietal network, FPN)为核心的控制系统, 另一个则是涉及内侧颞叶(Medial Temporal Lobe, MTL, 包括海马)、内侧前额叶和眶额皮层(Orbitomedial Prefrontal Cortex, OMPFC)的认知地图系统。尽管两者都编码任务的结构化信息, 但表征格式存在本质差异: MTL—OMPFC 系统将任务经验组织为灵活的“认知地图”, 即基于关系结构的空问化或拓扑化表征, 支持对未经历状态的推理与路径规划; 而 FPN 则将这些结构转化为“产生式规则”, 即“如果—那么”式的条件动作映射, 以实现快速决策与行为执行(Vaidya & Badre, 2022)。

**意见 6:** 对“控制状态”如何被“海马”编码的机制阐述不足, 文章的核心创新点之一可能在于提出“认知控制状态可以被表征和记忆”。需要进一步解释: 海马是如何像编码空问位置或时间那样, 去编码抽象的“冲突水平”或“规则”的?

**回应:** 诚挚感谢审稿专家提出的宝贵意见。我们在 4.2.1 中增补了一个段落来回答这一问题。

近年来的研究表明, 海马体不仅参与对空问位置或时间序列等具体事件要素的编码, 还能将抽象的认知控制状态(如冲突水平或任务规则)整合进事件记忆中, 并与前额叶产生交互。有研究者在 fMRI 实验中首次证明, 左侧前海马的神经活动能够同时解码刺激、类别和冲突水平, 说明海马将高/低冲突这一内部控制需求视为事件结构的一部分, 与外部物理特征共同存储(Jiang et al., 2015)。随后的 EEG 研究发现, 当与高冲突关联的线索再次出现时, 海马依赖的记忆整合会引发 alpha 波段的提前抑制, 预激活相应的认知控制配置, 支持一种基于联想记忆的前瞻性控制(Jiang, Bramão, et al., 2020)。另一项 fMRI 研究进一步显示, 当

个体进入曾与特定任务规则（如“75% 做面孔判断”）相关联的空间情境时，海马对情境的特异性表征会前瞻性地驱动右侧背外侧前额叶皮层复现该任务需求的神经活动模式(Jiang, Wang, et al., 2020)。这些研究体现了海马-前额叶环路在记忆引导的适应性控制中的核心作用。最近，研究人员提出，海马本质上是一个同质化的“目标冲突检测器”：它接收来自新皮层的目标信号，当多个目标不兼容时（例如 Stroop 中颜色和语义的冲突），海马便从“监测模式”转入“控制模式”，通过广泛的输出通路（包括投射到前额叶皮层）协调全脑以解决冲突(McNaughton & Bannerman, 2024)。

**意见 7：**临床应用的举例可以考虑加入强迫症的讨论。强迫症患者表现出无法停止的重复行为序列（过度的序列刻板性）。更能直接反映“认知控制序列机制”的故障，可能比成瘾的例子更贴切。

**回应：**非常感谢审稿专家的建议。

最新的文献确实对强迫症(OCD)进行了系统的探究，但研究表明，OCD 患者在“认知控制序列”机制上与健康对照组相比并无显著的行为缺陷，其障碍更多体现为隐性运动序列的加工异常。尽管如此，我们完全认同加入强迫症讨论的必要性，因为这恰恰证明了认知控制序列范式具备鉴别不同类型序列加工障碍的重要价值。因此，我们并未直接将成瘾行为研究替换为强迫症研究，而是保留了两种疾病的表述并对他们进行了对比。这样可以使读者对认知控制序列的临床价值有更系统地认识。

在修改稿中，我们在 5.3 应用价值的段落加入了对强迫症的讨论：

类似地，强迫症（OCD）中无法停止的仪式化行为（如反复洗手、检查）也是一种难以正常终止的病理性序列。但相比成瘾行为，OCD 的干预策略要更谨慎。研究表明，OCD 患者在执行抽象任务序列时的行为表现并未显示出显著缺陷，且 RLPFC 随序列进展而增加的活动（即 *ramping*）的功能相对保留，但是有更多的前额叶区域（如前扣带回皮层和额上沟）显示出对 RLPFC 的代偿活动(Doyle et al., 2024; Doyle et al., 2026)。这表明，OCD 的核心缺陷可能并非高级的认知控制序列加工，而在于低级的隐性运动序列加工，所以治疗靶点不应盲目选择 RLPFC 而应聚焦于特异性地调节皮质-纹状体回路(Doyle et al., 2026)。综上所述，认知控制序列的研究范式对区分不同类型的精神障碍具有重要的鉴别意义。采用神经影像学的方法来探究他们的认知控制序列加工机制，不仅深化了我们对疾病底层神经动力学的理解，更为开发精准的靶向干预手段指明了方向。

**意见 8:** 论文在第 2 节和第 3 节对实证研究描述较多,但在第 4 节理论整合时,实证证据引用较少。例如,第 4.1 节提到序列加工与认知控制存在相似性,但缺乏足够的实证研究支持。建议增加对关键实证研究的引用。

**回应:** 感谢审稿专家的宝贵建议。

为了弥补这一不足,我们在修订稿中对“4.1.1 序列加工与认知控制研究中的相似性”章节进行了扩充与改进。具体修改和新增的实证证据如下:

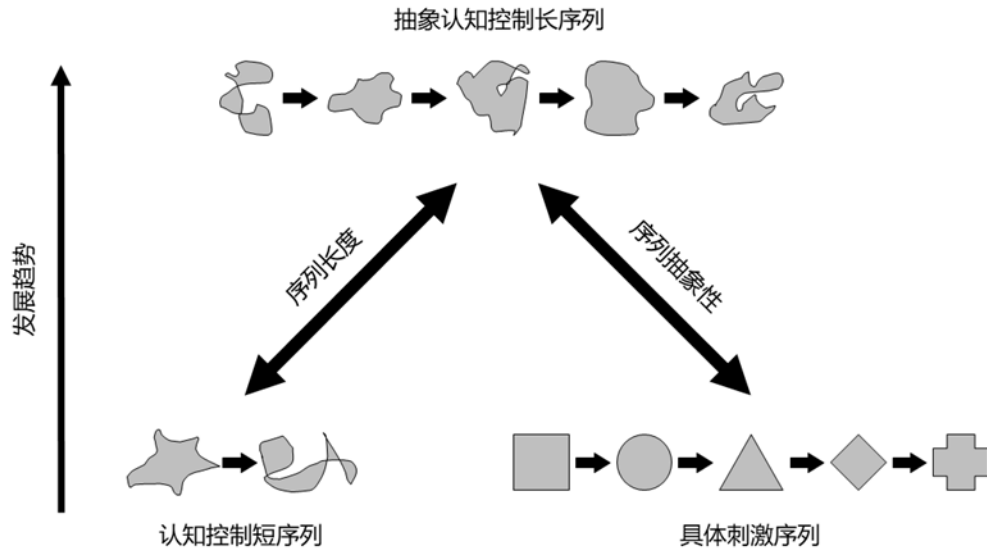
尽管序列加工与认知控制属于两个相对独立的研究领域,但两者所关注的实验现象却有显著的相似性,比如两者都涉及“抑制”过程。在认知控制领域,任务转换范式下广泛观察到 N-2 重复损耗现象(N-2 Repetition Cost, N2RC),即在当前任务(试次 N)与试次 N-2 相同而与试次 N-1 不同(即 ABA 序列)的条件下,个体的行为表现通常劣于三者均不同的序列(即 CBA)。一般认为,为了顺利执行当前任务,认知系统需要主动抑制前一个任务集,从而清除残留激活并避免潜在的认知冲突(Mayr & Keele, 2000)。近期的实证研究进一步表明,在引导序列行为时,个体的内部注意力会主动回避工作记忆中已完成的任务项目(van Ede et al., 2021)。在运动序列学习中,尤其是在序列规则发生变化或刺激-反应映射被反转的条件下,认知控制系统必须抑制不恰当的联结,以避免错误反应并支持受控加工(Verwey, 1999)。而在序列回忆任务中,认知系统在成功提取某一项目后,会对该项目施加系统性抑制,以防止其在后续位置被重复输出。这一抑制机制与经典的兰施布尔格效应(Ranschburg effect)密切相关:在序列回忆中,个体往往难以再次输出已出现的项目,而输出后的反应抑制被认为是导致该现象的核心机制之一(Henson, 1998; Maylor & Henson, 2000)。这一过程同样依赖于对最近活跃但当前不再相关的心理表征进行抑制,从而保证序列的正确性(Hurlstone et al., 2014)。这种跨领域的机制重叠不仅揭示了抑制过程在认知组织中的普遍作用,也提示序列加工与认知控制之间具有理论整合潜力。

**意见 9:** 综述文章非常需要高质量的图表,本文未提供任何概念图、模型图或理论框架图,难以直观呈现“认知控制序列”与“序列记忆”的融合逻辑。建议增加图表。

**回应:** 非常感谢审稿专家的建设性意见。

为此,我们在修改稿中新增了图 1(抽象认知控制长序列表征的演进与融合框架)。该图通过呈现“序列记忆”与“认知控制”的融合过程,集中体现了本文的核心观点:认知控制与

序列加工这两个领域的发展具有趋同性，将二者融合以探究抽象的认知控制长序列，代表了该领域未来发展的重要趋势。



**图 1 认知控制与序列表征的演进与融合框架：**本图展示了“序列记忆”与“认知控制”两大经典研究领域的发展趋势，突显了二者在两个关键维度上的趋同性融合：（1）在序列长度维度上，认知控制的研究范式正从短序列（只关注相邻试次的状态变化）向长序列（跨时间尺度的多步骤任务）拓展；（2）在刺激类型维度上，加工对象正从具体信息序列（如感知觉、运动序列）向抽象信息序列（如抽象认知任务序列）跃升。这两大发展趋势最终交汇并共同指向了对“抽象认知控制长序列”的研究。

**审稿人 3 意见：**1. 对本文的一般性评价

本文尝试从“认知控制的序列性表征”这一交叉视角整合认知控制与序列加工两个研究传统，选题具有一定前沿性与理论价值，整体结构清晰，文献覆盖较为全面，能够反映该领域的重要研究进展。然而，作为一篇以理论整合与领域建构为目标的综述文章，稿件在核心概念界定、理论脉络梳理及论证逻辑严密性方面仍有提升空间。

**意见 1：**认知控制的序列表征研究是本文提出的一个重要交叉研究领域，也是全文的核心。然而，稿件中并未对这一研究领域或这一关键概念进行明确界定。

**回应：**感谢您提出这一极具建设性的意见。

为此，我们已经在修改稿的 5.1 节中对这一关键概念进行了明确的界定：

因此，我们正式提出“认知控制序列表征” (Representation of Cognitive Control Sequence) 的概念，将其定义为大脑对由多个认知控制状态按特定顺序组合而成的结构化序列所形成的记忆表征。与“认知地图”侧重于空间结构的表征不同，认知控制序列表征更强调时间维度上

的组织，其核心功能在于对序列化行为的展开进行预期引导与动态调控。

**意见 2：**前言第二段直接提到序列加工的研究对象，而未事先说明序列加工是什么。另外对抽象信息序列的概念和例证太笼统。

**回应：**非常感谢审稿专家的细致阅读与指正。我们已在修改稿中对相关概念和例证进行了针对性的补充与细化。

1. 我们明确了“序列加工”的定义：

序列加工是大脑对时间上有序呈现的事件或刺激序列进行编码、存储、检索、预测和泛化的认知过程(Dehaene et al., 2015)。

2. 针对概念和例证过于笼统的问题，我们在第 3.2 节（“抽象序列加工和序列加工的抽象化”）中增加了详尽的论述。

抽象任务序列指一组有序的认知操作序列，具有明确的开始和结束时间，但其抽象的本质体现在操作独立于具体刺激呈现方式、且序列展开不受限于精确的时间进程。例如，在算术中遵循“先乘除，后加减”的原则，无论具体的数值或呈现模态如何，该操作序列结构保持不变，这种二阶认知需求要求个体在无外部线索时主动监控序列位置(Desrochers et al., 2022)。

**意见 3：**作者在第二部分中仅以“鉴于长序列研究在揭示认知控制持久性与层次性方面的独特价值”一句概括关注长序列的理由，论证简略，不足以支撑将长序列作为核心讨论对象的必要性。

**回应：**非常感谢审稿专家指出这一论证上的薄弱环节。

长序列绝非短序列在数量上的简单叠加，两者在底层的认知与神经机制上存在着本质的分化。为了充分支撑将长序列作为核心讨论对象的必要性，我们在修改稿中扩充了相关论述，具体修改如下：

相比短序列的执行更依赖局部、瞬时的认知控制状态维持(Egner et al., 2010)，而长序列的顺利执行则需要建立并维持长时的高阶表征以实现跨时间尺度的调控(Trach et al., 2021)。例如，支撑长序列执行的高阶认知控制网络在起始阶段加载图式后，能够跨越较长的时间窗口，以持续的追踪动态（如前额叶的递增活动，即 ramping）来维持对全局执行状态的监控(Desrochers et al., 2019)。另外，长序列任务还能有效揭示认知控制在局部和整体层次上的功能分化。例如，研究人员通过多步骤日常任务序列，发现默认网络偏向于表征整体任务

情境，而多重需求网络则更侧重于处理局部步骤信息，为理解大脑如何在长时间尺度上协调多层次目标提供了重要证据(Wen et al., 2020)。

**意见 4:** 抽象序列加工是本文反复强调的一个重要研究方向，但在第 3.2 节中，作者对该领域的神经机制讨论较为简略。

**回应:** 非常感谢审稿专家的建设性意见。

在修改稿中，我们已在“3.2 抽象序列加工和序列加工的抽象化”中添加了对“抽象序列神经机制”的相关研究，梳理了该领域最新的神经生物学发现。具体修改如下：

为实现这种脱离具体感官输入的内部状态追踪与规则迁移，大脑构建了从在线执行到离线巩固的完整加工网络。研究表明，抽象认知任务序列神经编码的核心脑区位于前额叶皮层和海马体，用以监控、表征和泛化非空间且独立于具体运动的任务序列。在抽象序列的在线执行阶段，RLPFC 发挥核心监控作用，其典型特征是随序列位置推进而稳步增强的“递增活动”(ramping)，该信号独立于具体刺激属性，专用于追踪内部序列进度(T. M. Desrochers, D. C. Burk, et al., 2015; Desrochers et al., 2019)。在超越在线执行的离线巩固阶段，海马体发挥着关键的互补作用。在静息态下，海马体能够对抽象的任务状态进行序列性重放，从而在大脑中构建并巩固抽象序列的高阶表征(Schuck & Niv, 2019)。在此基础上，跨物种研究进一步揭示了前额叶和海马在结构泛化中的精细分工。人类 fMRI 研究表明中外侧前额叶，楔前叶与下顶叶等网络维持可迁移的抽象任务表征(Vaidya et al., 2021)；而小鼠单细胞记录表明内侧前额叶倾向于提取一般化规则，海马 (dCA1) 则编码当前问题的具体细节，两者形成互补以支持跨情境迁移(Samborska et al., 2022)。

**意见 5:** 第四部分开头指出认知控制中的长序列加工与序列表征研究中的抽象序列加工构成一个重要交叉领域。然而，在随后论证二者交叉合理性时，讨论重点更多集中于一般意义上的序列加工与认知控制关系，而未突出“长序列”或“抽象序列”这一交叉领域的核心特征。

**回应:** 非常感谢审稿专家的宝贵意见。

需要澄清的是，第 4 部分的第一段的前两句(“传统的认知控制序列研究主要集中于任务切换和一致性短序列等过程，而对长序列加工的关注相对不足；与此同时，序列表征研究虽揭示了序列学习与记忆的基本规律，却较少深入探讨抽象序列的加工机制。二者的交叉领域，

即认知控制的序列性表征，恰好能够填补这一研究空白”)是对第 2、3 部分的总结，用以引出“认知控制序列表征”这一融合领域的说法。我们意识到，这个写法可能带来了歧义，使审稿专家误以为第 4 部分要探讨解决“长序列”和“抽象序列”的问题，对此表示抱歉。

但是，第 4 部分的功能定位并非是对认知控制领域缺乏的“长序列”，以及序列加工领域缺乏的“抽象序列”进行补偿性的文献综述，而是提供认知控制和序列加工这两个领域本身能够进行融合的实证基础。之所以需要这部分论述，是因为两个领域长期独立发展，直接提出将二者进行融合显得突兀。而这部分从更一般意义上来分析，是为了对两个领域进行融合的合理性提供广义的证据：两者之间存在惊人的现象学共性和深层次的脑环路关联。

再结合第 2、3 部分对两个领域各自发展趋势的论述，2-4 部分的论述共同为第 5 部分呼吁将两个领域进行理论融合、探究认知控制序列的表征机制奠定了基础。

为了更好地澄清第 4 部分的核心观点，在第一段，我们进行了修改：

如前所述，传统的认知控制序列研究主要集中于任务切换和一致性短序列等过程，而对长序列加工的关注相对不足；与此同时，序列表征研究虽揭示了序列学习与记忆的基本规律，却较少深入探讨抽象序列的加工机制。二者的交叉领域，即认知控制的序列性表征，恰好能够填补这一研究空白。将认知控制与序列表征结合起来，不仅能够更全面地解释人类在长序列任务中的灵活性与效率，还可以为理解抽象控制序列的认知神经机制提供新的理论框架。值得注意的是，尽管这两个领域长期以来各自独立发展，但其融合并非简单拼接，而是具有内在合理性。一方面，二者在关注的实验现象层面呈现出相似性；另一方面，认知控制和序列记忆的特异性脑区之间也已被证明存在紧密的功能连接。因此，打破对两个领域完全独立性的固有认知，推动二者的整合，不仅必要，而且具备坚实的实证与理论基础。下文将对此交叉领域的合理性进行系统论述。

**意见 6：** Rosen & Freedman (2026) 于 *Nat Rev Neurosci* 发表的最新综述指出，基于全脑尺度神经数据的研究表明，认知功能的实现依赖梯度式、动态化且高度分布式的脑区协同模式。而本文将“前额叶与海马的协同关系”作为认知控制序列性表征研究的合理性依据，其推导的逻辑关系是什么？

**回应：**感谢审稿专家推荐 Rosen & Freedman (2026) 的综述；我们认同该文关于“认知功能依赖梯度式、动态化且高度分布式脑区协同模式”的宏观视角。但是，这与传统认为脑区具有特异性的观点并不完全相悖，阐述如下：

首先，分布式并不等于功能均质；尽管认知信号广泛分布，但累积证据显示抽象认知变量在若干关键节点上仍表现出显著的功能特异性，这使得在分布式网络中识别“功能枢纽”成为合理且必要的研究策略(Rosen & Freedman, 2026)。作者在文中明确指出，认知变量的编码主

要分布在高级脑区而非初级感觉皮层(“cognitive variables are generally reflected in the activity of neurons distributed across a network of higher-order but not primary sensory regions”,p147), 而前额叶正是高级脑区的典型代表。此外, 文中还特别强调了前额叶在任务规则与情境编码中的核心作用: “Cognitive demand-dependent recruitment could also reflect top-down feedback from executive areas such as the PFC, which target a wide array of areas and are known to signal task rules or behavioural context.” (p147)。由此可见, Rosen & Freedman 的观点不仅未否定功能特异性, 反而为在分布式网络中聚焦关键节点提供了理论支持。

其次, 将前额叶和海马解释为功能上相互独立的系统, 长期以来都是认知神经科学中的主流观点。具体而言, 前额叶被视为认知控制的中枢(Miller & Cohen, 2001), 而海马则主要负责情景记忆和空间序列的编码(Norbert J. Fortin et al., 2002)。从大尺度脑网络的角度看, 二者也常被归入不同的脑网络系统: 前额叶被划分到额-顶控制网络和背侧注意网络, 而海马则被划分到默认网络(Ji et al., 2019; Yeo et al., 2011)。传统认为, 这两类网络之间是拮抗而非协作关系, 即一个网络激活时, 另一个趋于抑制(Fox et al., 2005)。正是基于这一强调脑区功能分化的背景, 近年来涌现的将前额叶与海马纳入同一框架进行探讨的研究(Jayachandran et al., 2019; Preston & Eichenbaum, 2013; Tompariy & Davachi, 2024; Whittington et al., 2025; Zhang et al., 2025)才显得尤为关键。这些工作恰恰说明, 传统上将认知控制与序列记忆表征视为完全独立领域的局面正在逐渐被打破, 因此与我们提出将两者进行融合的思想不谋而合。所以, 我们将“前额叶与海马的协同关系”作为认知控制序列性表征研究的合理性依据。

从分布式的角度来说, 前额叶-海马的协同关系, 也符合 Rosen & Freedman 的理论框架, 因此, 我们在修改稿中也对其进行了引用。

越来越多研究表明, 认知功能的实现并非特定脑区独立运作, 而是基于分布式的脑区之间的协同(Rosen & Freedman, 2026), 前额叶和海马也不例外。

Fox, M. D., Snyder, A. Z., Vincent, J. L., Corbetta, M., Van Essen, D. C., & Raichle, M. E. (2005). The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(27), 9673-9678. <https://doi.org/doi:10.1073/pnas.0504136102>

Jayachandran, M., Linley, S. B., Schlecht, M., Mahler, S. V., Vertes, R. P., & Allen, T. A. (2019). Prefrontal Pathways Provide Top-Down Control of Memory for Sequences of Events. *Cell Rep*, 28(3), 640-654.e646. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2019.06.053>

Ji, J. L., Spronk, M., Kulkarni, K., Repovš, G., Anticevic, A., & Cole, M. W. (2019). Mapping the human brain's cortical-subcortical functional network organization. *Neuroimage*, 185, 35-57. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.10.006>

Preston, Alison R., & Eichenbaum, H. (2013). Interplay of Hippocampus and Prefrontal Cortex in Memory. *Current Biology*, 23(17), R764-R773. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.05.041>

Tompariy, A., & Davachi, L. (2024). Integration of overlapping sequences emerges with consolidation through medial prefrontal cortex neural ensembles and hippocampal-cortical connectivity. *Elife*, 13. <https://doi.org/10.7554/eLife.84359>

Yeo, B. T., Krienen, F. M., Sepulcre, J., Sabuncu, M. R., Lashkari, D., Hollinshead, M., Roffman, J. L., Smoller, J. W., Zöllei, L., Polimeni, J. R., Fischl, B., Liu, H., & Buckner, R. L. (2011). The organization of the

human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *J Neurophysiol*, 106(3), 1125-1165.  
<https://doi.org/10.1152/jn.00338.2011>

Zhang, Z., Li, Z., Ding, R., Wu, G., Xie, X., Wu, J., Qin, S., & Luo, J. (2025). Hippocampal-prefrontal orchestration supports higher-order learning for creative ideation. *Nature Communications*, 17(1), 464.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-025-67157-x>

**意见 7:** 总结部分认为发展适用于长序列的认知控制理论非常重要，但是前文综述部分并未总结已有认知控制理论与序列记忆理论。

**回应:** 感谢审稿专家的重要意见。

1. 针对“认知控制理论”的系统补充：我们认同您所指出的问题，即原稿确实缺失了对已有认知控制理论的回顾。我们注意到，解释序列效应的经典认知控制理论基本都是基于认知控制短序列的，所以我们在第 2 部分第一段指出：

目前，短序列效应已逐渐成为研究热点，通常涉及相邻试次间的适应性调整，例如前一试次的冲突水平(Bognar et al., 2024)或任务表现(P.-S. Lee et al., 2025)会影响当前试次的反应时间和准确率。基于此，认知控制领域发展出一些经典的理论。相比之下，长序列效应关注跨三个及以上试次的序列，可能反映出认知控制的累积效应或记忆整合过程(Brown & Koch, 2024; Farooqui et al., 2023)，但因实验设计的复杂性，其研究相对滞后，也尚未形成系统的理论框架。

因此，为了解决您提到的理论缺失问题，我们在修改稿中新增了“2.1.4 基于短序列的认知控制理论”这一小节。

#### 2.1.4 基于短序列的认知控制理论

基于短序列实验范式的研究为认知控制机制的探讨奠定了扎实的实证基础，催生了一系列有影响力的认知控制理论。由于篇幅所限，以下列举两个具有代表性的理论框架。

冲突监测理论是认知控制领域中影响最为广泛的理论之一。该理论的核心观点是：认知控制并非在每次任务执行时都持续介入，而是在信息加工过程中监测到冲突或错误时被动态调用。前扣带回皮层在冲突监测中扮演关键角色，它负责检测无关信息与相关信息的冲突程度，并将这一信号传递至背外侧前额叶等执行控制脑区，从而增强对任务相关信息的关注、抑制无关信息的干扰。该理论成功解释了一致性序列效应和错误后延迟等经典现象，强调了认知控制的情境依赖性，为理解认知控制在动态环境中的调节功能提供了神经层面的解释框架(Botvinick et al., 2001)。

认知控制的学习与记忆理论是一组对认知控制的学习和记忆特性进行描述的理论。近年来，研究者日益关注认知控制状态如何通过与具体情境特征的关联而被编码、存储和提取。例如，认知控制记忆理论指出，抽象的认知控制状态可以像具体的知觉特征（如颜色）一样被编码进长时记忆，并在相同刺激情境再次出现时被自动提取调用，从而调节行为表现(Egner, 2014)。在此基础上，研究人员进一步将认知控制纳入学习理论的框架，明确提出“认

知控制的联想学习理论”，主张认知控制的根基在于联想学习机制。该理论认为，学习机制构成了认知控制的理论基础与功能基础，能够解释认知控制的若干关键特性：（1）情境特异性，即认知控制调节方式随具体情境而变化；（2）无意识启动，即认知控制可在无意识层面上被触发并影响行为；（3）奖赏强化，即认知控制的表现受到奖赏反馈的塑造与调节 (Abrahamse et al., 2016)。

## 2. 针对“序列记忆理论”的明确界定：

但是，我们想说明的是，原稿中“3.1 序列加工的编码机制”已经阐述了关于序列记忆的编码理论，因为这些编码机制都反映了序列记忆的底层逻辑。只是我们原来的表述偏向于“机制”与“表征”（如链式表征、位置机制等），未能凸显它们作为“经典序列记忆理论”的学术地位。因此，我们在修改稿中对这部分文字进行了修改，强调了这些编码机制的理论指导意义。另外，我们还补充了近些年发展起来的神经网络计算模型，这些计算模型已逐渐成为序列记忆理论体系的重要组成部分。具体修改如下：

### 3.1 序列加工的编码机制

对序列的学习、记忆和回忆，基本上依赖于大脑对序列的有效编码与表征。在相当长的一段时期内，该领域的研究主要依托于由具体感官刺激（如字母、音符、空间位置）构建的序列。得益于这些材料在实验中的易操作性，研究得以识别并验证了序列表征中的若干核心机制。

已有研究指出，序列的神经表征不仅依赖于单个元素的处理，还涉及对序列整体的编码。即格式塔编码（*gestalt coding*）或整体表征模型 (Conen & Desrochers, 2022)。这种整体化表征的一个重要特性在于其对不同序列具有特异性。例如，在非人灵长类动物的运动皮层中发现了序列特异性神经元的存在，这些神经元仅在特定动作顺序中表现出选择性激活，而对包含相同元素但顺序不同的序列则无反应，表明序列的表征能够以整体形式存在 (Mushiaké et al., 1991)。整体表征的一种表现形式是序列重放机制，即个体在静息或非任务状态下，海马等脑区的神经元自发地重新激活先前在序列加工过程中形成的特定神经活动模式 (Kaefer et al., 2022; Liu et al., 2019)。

整体化表征在面对较长或更复杂的序列时可能受到短时记忆容量的限制，因此序列可能会被分块处理，并对其中的部分信息进行特异性编码 (Ding, 2025)。具体而言，基于组块（*chunking*）的序列计算模型认为神经活动不仅会追踪组块（*chunking*）的起始与终止边界，还会为分块内的每个事件分配特定的顺序位置 (Dehaene et al., 2015; Ding, 2025)。围绕序列项目如何被组织与提取，学术界发展出了几种经典的序列记忆理论 (Hurlstone et al., 2014)。在

这种情况下，其中一种关键机制是联结链式表征（associative chaining）理论，即通过编码相邻项目之间的关系，当一个项目被提取时，后续项目会随之递归激活并被依次提取(Caplan et al., 2022)。另一种机制是位置编码（positional coding）理论，即通过为序列中的项目绑定绝对或相对的位置标记，以位置标记作为检索线索，从而确保序列回忆的顺序性(Brown et al., 2000; Burgess & Hitch, 1999)。当需要同时编码多个序列时，往往存在“竞争排队”(competitive queuing)理论，即多个备选项目在并行激活的状态下通过竞争来决定最终的输出顺序(Averbeck et al., 2003; Bullock & Rhodes, 2003; Grossberg, 1978)。另外，在序列回忆过程中，抑制理论认为还可以通过抑制已执行或非目标反应来防止重复错误，从而维持序列输出的准确性和保障认知控制的有序执行(Henson, 1998; Vousden & Brown, 1998)。

尽管传统理论成功刻画了序列记忆从编码到输出的整体流程，并能解释大量行为规律，但它们通常以高度抽象的功能模块为基础，难以揭示支撑这些过程的实时神经动力学机制。近年来，随着计算神经科学的发展，一系列融合神经科学与人工智能思想的计算模型，通过引入动态表征、突触可塑性、预测编码与分层注意等机制，为理解序列记忆的生物实现提供了新的、更具机制性的视角。在序列工作记忆的短期维持层面，连续吸引子神经网络（Continuous Attractor Neural Network, CANN）模型表明，神经回路无需依赖高能耗的持续放电，而是利用短时突触可塑性（Short-Term Plasticity, STP）将序列信息以“隐藏状态”的形式进行动态存储，成功解释了序列位置效应的动态偏移 (J. Zhou et al., 2024)。在序列结构的抽象与提取层面，Tolman-Eichenbaum 机器（TEM）模型通过两个功能分离但协同工作的计算模块来分别模拟了海马和内嗅皮层的功能，解释了海马-内嗅皮层系统如何通过将具体的感官输入与抽象的序列转移关系图谱相分离，从而学习到可泛化的顺序模式(Whittington et al., 2020)。在序列表征的动态预测层面，时间预测编码（temporal Predictive Coding, tPC）模型则从预测误差最小化的角度出发，展示了循环神经网络可以稳定地记忆与提取序列(Tang et al., 2023)。当面对复杂的长序列时，“组块化 Transformer”模型提出，大脑中观测到的“组块追踪神经活动”充当了关键的“位置编码”信号。组块内的事件可直接交互，而跨越组块的远端上下文信息则被高度压缩并整合为全局上下文向量(Ding, 2025)。另外，在序列记忆的离线巩固阶段，情境维持与提取模型-重放(Context Maintenance and Retrieval with Replay, CMR-replay)模型提出，在编码阶段大脑将项目与其时间上下文建立双向关联；在静息或睡眠期间，序列重放可由上下文与其关联条目之间的自主双向交互触发，形成级联再激活，从而促进记忆的巩固(Zhou et al., 2026)。

## 第二轮

审稿人 2 意见：作者已经针对上轮建议作了非常详细的修改，同意发表。

审稿人 3 意见：同意发表。

编委 1 意见：同意发表。

编委 2 意见：同意发表。

主编意见：稿件经过多位专家点审阅，作者进行了认真的修改，达到了发表水平，同意发表。