

《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：时间错误监控中的元认知调节与神经生理机制

作者：崔倩 贾云轩 李佰科

第一轮

审稿人 1 意见：

《时间错误监控中的元认知调节与神经生理机制》本文回顾了时间错误监控的核心理念、任务范式及其元认知调节的认知神经机制。行文流畅，可读性强。但存在以下问题有待提高：

意见 1：本文还没有体现出时间加工的特异性，综述的这些元认知的机制对于其他维度的量值（如数量、重量）的加工也同样适用。可以考虑结合时间加工的模型展开论述。请参考以下论文论述元认知、反馈等如何调节时间知觉的不同加工阶段(Li et al., 2023)。

回应：感谢审稿专家提出的宝贵意见！我们在修改稿中重新对时间错误监控相比其他度量误差监控（如数量、重量、空间等）的特异性，进行了梳理，并做了相应修改（详见引言第 2 段）。此外，我们根据审稿人的意见，并在结合时间加工模型的基础上提出了新的理论模型，见后文第 5 部分“一个新的整合框架：两阶段三路径时间错误监控模型”。此外，我们在 3.2 反馈调节机制和 4.2 反馈调节机制的神经生理基础部分引用了审稿专家推荐的文献(Li et al., 2023)。

意见 2：“与其他物理量（如重量或长度）可以在实验中进行升降变化的双向操作不同，时间只能沿着单一方向流逝。这意味着个体在时间错误监控中无法通过逆向操作来修正时间感知，只能依赖于内部的时钟机制或时间记忆痕迹进行动态调节(Riemer & Wolbers, 2020)。由于时间的单向性，个体在持续的时间估计过程中需要不断更新对时间流逝的判断。这种监控不仅涉及对瞬时时间估计的评估，还必须对整个时间过程进行整体把握和调整。这一特性使得时间错误监控不仅仅是对误差的简单检测，还要求个体在时间流逝的过程中持续监控和校正，以应对时间感知的内在不确定性和动态变化。因此，时间的非可逆性和单向性构成了时间错误监控的核心挑战和独特之处，进一步凸显了其在时间知觉研究中的重要性。”无法理解这部分想要表达的涵义。升降变化的双向操作在时间知觉领域也是可以的，比如，让被试产生 1 秒的时距，第一次试验，被试产生了 0.6 秒，给与被试一个-0.4s 的反馈，被试知道产生短了，第二次试验，被试产生了 1.2s，给与被试一个 0.2s 的反馈，被试知道产生多了，第三次试验，被试产生了 0.9s，这样，被试根据反馈动态地进行增加或者减少的操作。这不就是“升降变化的双向操作”吗？

回应：感谢审稿专家的详细反馈。我们理解您提出的关于时间感知的“升降变化的双向操作”的看法。在实验任务中，确实可以通过反馈使被试在后续试次中对时间估计进行增加或减少的动态调整，这一点我们完全认同。然而，我们在原文所强调的“单向性”并非否认这种调整，而是指时间作为物理维度的不可逆性：一旦时间流逝，个体无法像在空间或数量任务中那样，通过即时的回溯修正来改变已经发生的时距。换句话说，空间或数量误差可以通过当下的“加一点/减一点”来立刻矫正，而时间误差只能在后续估计中依赖内部时钟机制和记忆痕迹进行调整，无法对已经过去的时间片段进行倒退式修正。我们已在修改稿中修改了表述，以避

免产生误解（详见引言部分第 2 段）。

意见 3: “Vierordt 效应（短时间高估、长时间低估）常常影响时间估计的准确性。在这些情况下，多次任务重复能够帮助个体逐步减少这些偏差，进一步验证了自我评估机制的有效性 (Akdoğan & Balci, 2017)”，这里 Vierordt 效应的举例不恰当，这个效应涉及当前时距与先验经验的贝叶斯整合，即使给与反馈，也不能很好地减弱这个效应 (Jazayeri & Shadlen, 2010)。可以考虑用 3 秒以下短时距的高估的反应偏差作为例子见 (Li et al., 2023)。

回应: 非常感谢审稿专家的细致指正。Vierordt 效应主要反映了当前时距与先验经验的贝叶斯整合机制，因此如果表述不够严谨，确实可能引起读者对其与自我评估机制关系的误解。对此，我们在修改稿（详见 3.1 节）中重新澄清了相关表述，并非将 Vierordt 效应本身作为自我评估机制的例证，而是引用 Bader 和 Wiener (2021) 的研究，他们在无反馈的重复试次中观察到中心趋势效应的减弱（在时间领域通常表现为 Vierordt 效应）。这一结果说明，个体能够依赖自我评估机制识别并修正时间判断中的方向性偏差，而非单纯依赖外部反馈。最近的后续研究 (Bader & Wiener, 2024) 也进一步强调了这一发现的重要性。

此外，关于 Li et al. (2023) 的研究，我们完全认同该研究揭示了短时距高估与反馈调节的重要性。鉴于其研究重点在于反馈对决策阶段的作用，我们已将其纳入“3.2 反馈调节机制”部分讨论，以保持逻辑的连贯性。

参考文献:

Bader, F., & Wiener, M. (2021). Awareness of errors and feedback in human time estimation. *Learning & Memory*, 28(5), 171–177.

Bader, F., & Wiener, M. (2024). Neuroimaging Signatures of Metacognitive Improvement in Sensorimotor Timing. *Journal of Neuroscience*, 44(9), e1789222023.

意见 4: “4.2 反馈调节机制”可能是时间的错误监控与其他维度的错误监控不同之处，见 (Li et al., 2023)。

回应: 感谢审稿专家的宝贵意见。您指出“反馈调节机制可能是时间错误监控与其他维度错误监控不同之处”的观点非常重要。根据您的建议，我们在修改稿第 3.2 节第 3 段中补充了 Li 等 (2023) 的相关证据：

“Li 等人 (2023) 的研究表明，反馈在时间任务中主要影响决策与行为输出阶段，而非早期的编码或记忆阶段。相比之下，在空间任务中，反馈则能更早地介入知觉表征，例如改变个体利用环境信息的方式，或重新缩放空间尺度的知觉表征 (Jacobs & Michaels, 2005; Rieser et al., 2013)。这提示反馈在不同类型的度量误差监控中所作用的阶段可能并不相同：时间任务更依赖于决策层面的调节，而空间任务则可能涉及更早期的表征调整。此外，不同的反馈方式也会导致差异化的作用效果，其机制差异的稳健性仍需跨任务的系统比较研究进一步检验。”

意见 5: “错误相关负波 (ERN)、错误正波 (Pe)、反馈相关脑电成分 (FRN)” 应该有英文全文作为参考。

回应: 感谢审稿专家的指正。已经添加英文全文和对应缩写，并进行全文检查。详见 4.2 部分。

意见 6: 总结与展望部分与前面的叙述有点割裂，关系不太强。本文前面的部分应该是总结与展望的基础。

回应: 感谢审稿人对本文结构提出的中肯意见。我们在修订过程中重点调整了“总结与展望”

部分的逻辑结构，使其更自然地衔接前文的分析。修改的总体思路是：让展望部分顺着正文的逻辑主线展开，从机制探讨到发展变化，再到理论框架与临床转化，形成一个递进式的结构。具体修改如下：

(1)与“神经生理机制”部分的衔接。我们将展望的第1点聚焦于“神经机制的系统性阐明”，直接延续正文第4节对自我评估、反馈调节和信心调节的神经基础（如 β 振荡和 α 振荡、FRN和P3成分、ACC和dIPFC脑区功能）的讨论。在此基础上，我们补充说明了未来研究可以如何结合“两阶段三路径”模型，利用多模态成像方法（如EEG-fMRI联合）来验证不同路径之间的动态协作机制。例如，前文综述了 β 波在时间表征中的作用，展望则提出未来可研究 β 振荡如何同步前额叶-顶叶网络以支持模型中的“信心调节路径”（详见修改稿第6部分第2段）。

(2)与“任务范式”和“元认知调节机制”的衔接。第2点的修改主要是为了更好地延伸前文关于任务范式和元认知调节机制的分析。我们将这一部分的重点放在“发展视角与生态化范式创新”上，提出未来研究可通过纵向或跨年龄设计，系统考察时间错误监控在不同发展阶段的变化。同时，我们补充了前文提到的生态化实验思路，建议利用虚拟现实和多任务条件，更贴近真实环境地研究个体在不确定与干扰情境下的调节过程。这些修改使展望部分与前文的实验与调节机制讨论之间建立了直接联系。（见第6部分第3段）

(3)与“神经机制”和“理论框架”在临床方向上的衔接。我们理解审稿专家关注的是展望部分能否真正立足于前文，在修订时，我们特别加强了神经机制、理论模型与临床应用的连接。修改后的第3点聚焦于“临床应用潜力的拓展”。前文总结了错误监控的神经指标，如错误相关负波（ERN）、反馈相关负波（FRN）等在健康人群错误监控中的关键作用，而临床研究已知这些标志在患者中存在异常。在理论框架层面，我们提出的“两阶段三路径”模型在理论上为整合这些差异性发现提供了思路，即通过区分自我评估、信心调节与反馈调节三条路径，能够更系统地解释不同精神障碍中错误监控机制的异常模式。修改后的展望据此提出，未来研究可在“两阶段三路径”模型框架下，进一步将健康个体的监控机制与临床群体的特征相联系，并在此基础上探索基于模型的干预策略（如神经反馈靶向调节ACC、dIPFC等脑区功能），以推动基础研究成果向临床应用的转化。（见第6部分第4段）。

此外，我们还对相关表述进行了修改和完善，并在必要之处增删文献，以使得总结与展望部分更加紧扣前文叙述，逻辑更为清晰。

意见 7： 本文最大的问题在于仅仅是对已有论文的归纳式的呈现，缺乏科学问题或自己理论上的观点，即有点像“教科书式写法”。作者也在一定程度上意识到这一点“时间错误监控的神经机制尚未形成完整的理论框架”，如果能够将时间监控与元认知结合时间加工现有理论模型，提出一个（初步的）理论框架或设想，并用已有论文发现作为证据论证该设想，或者针对某个有争议的问题进行阐述，将会很好地提升本文的质量。

回应： 非常感谢审稿专家的宝贵意见。针对您的建议，我们在修改稿中做了如下实质性的改动：

(1)在引言部分，我们重新凝练了本文的核心科学问题，即“时间错误监控中，元认知调节机制如何作用于个体的时间估计与行为调整？这些机制的神经生理基础又如何被整合进一个初步的理论框架？”这样使综述紧紧围绕科学问题展开。

(2)根据您的建议，我们在修改稿中提出了一个初步的理论框架——“两阶段三路径”模型，它系统整合了自我评估、反馈调节与决策信心三种元认知机制，并结合错误相关脑成分与神经振荡证据加以论证。这一模型不仅总结了现有研究，也为未来研究提供了框架性假设。（详见正文“5 一个新的整合框架：两阶段三路径时间错误监控模型”部分）

(3)此外，在修订稿中，我们进一步强调了本文的创新性贡献。例如：(1)突出了时间

错误监控的动态、前瞻性特点，并与其他类型的度量误差监控相区分（见引言第二段）；（2）我们从元认知调节机制的角度系统梳理了时间错误监控的神经生理证据（如 α 、 β 波），并尝试将两者整合到一个初步的框架之中。这一视角有别于以往单一的心理或神经层面综述，体现了本文的理论整合创新（见正文“4 时间错误监控的神经生理机制”部分）；（3）在未来研究展望中，我们强调纵向研究与高生态效度范式的必要性、指出其在精神障碍中的潜在应用价值（见正文“6 总结与展望”部分）。

这些都不仅仅是单纯的文献汇总，体现了综述的创新和导向作用。再次衷心感谢审稿专家的宝贵意见，这些建议极大地促进了我们在理论深度方面的思考与改进。

.....

审稿人 2 意见:

时间错误监控是一种重要的认知加工能力，论文以揭示时间错误监控的认知以及神经机制为目的进行综述，具有一定的学术价值。然而，一些关键概念尚需明确及区分使用，最重要的是各部分核心内容之间的逻辑关联尚不清晰，比如研究范式如何服务于论文的目的，其与其他各部分之间的关联是什么，认知机制与神经机制的逻辑关联等方面均存在一定的不足。自检报告中的科学问题以及如何解决的表述与论文内容的一致性较弱。对论文的意见及建议分为以下三个部分。

一、概念与逻辑

意见 1: “元认知”、“元认知监控能力”、“元认知调节”并非同一个概念，均需要进行严谨的定义并区分使用。

回应: 感谢审稿专家的宝贵意见。在修改稿中，我们对“元认知”、“元认知监控能力”和“元认知调节”三者进行了明确定义和区分。在引言第三段中，我们补充阐释了它们的关系：“元认知不仅包括对认知过程的觉察与评估（即元认知监控），也包括基于评估结果进行的主动调整（即元认知调节）(Flavell, 1979)。在时间估计任务中，个体既需要实时觉察自己的判断偏差，也需要据此调整注意力分配或校准内在时间表征(Akdoğan & Balci, 2017)。因此，时间错误监控融合了监控与调节两个层面，共同提升时间判断的准确性与适应性。”

此外，我们在全文中严格区分了三者的使用场景：在涉及觉察与评估时使用“元认知监控”，在涉及策略修正时使用“元认知调节”，在讨论整体能力时使用“元认知”。在修订过程中，我们也仔细考虑了论文的大标题与第 3 部分小标题的用词，我们之所以使用“元认知调节机制”，是因为本文的综述重点在于探讨个体如何在识别时间估计误差后进行策略调整和优化，这正是调节机制的核心过程。例如，我们提出的“两阶段三路径模型”进一步体现了这一聚焦方向，强调了自我评估、信心调节与反馈调节在时间错误监控中的作用。通过这样的调整，修改稿在概念使用上更加严谨，也更能突出研究的理论重心与创新视角。

意见 2: “时间监控”与“时间错误监控”是不同的概念，时间监控指对时间延续性的监控，而时间错误监控则指自身时间估计误差的觉察和调整能力。论文中并非加以区分使用。

回应: 感谢审稿人对关键概念的细致指正。我们同意“时间监控”与“时间错误监控”并非同一概念。在修改稿中，我们规范了概念的使用，统一修改为“时间错误监控”。

意见 3: 时间监控的独特性与其认知机制及神经机制的关联是什么？

回应: 感谢审稿专家提出这一关键问题。时间监控的独特性与其认知、神经机制相互依存：时间加工的特征往往决定了其所依赖的认知与神经过程。本文的核心论点之一即是：时间维

度的固有特性（独特性）塑造了其错误监控所依赖的特定认知策略（认知机制），而这些策略又对应着特异性的神经活动模式（神经机制）。具体而言，这种关联体现在以下三个层面：

第一，时间的单向性和实时性使得其监控过程必须依赖前瞻性和分布式的神经加工。时间流逝的单向性决定了错误监控必须在极短的时间窗口内完成，无法事后回溯重验。这要求认知系统具备“前知”特征，能够进行实时、在线的误差预测和补偿（Balci & Ben-Yehuda, 2025）。这体现为自我评估机制依赖于内部多个计时积分器信号的实时比较（如 OPDDM 模型所述），而非单一、静态的判断。这种实时比较在神经层面表现为 β 波（15 ~ 40 Hz）活动。研究发现，运动皮层和 SMA/Pre-SMA 的 β 波功率不仅能预测生成时距的长短（Kononowicz & van Rijn, 2015），其活动模式更如同一个“内部预测信号”，在行为发生前就编码了时间记忆标准并预判潜在误差（Wiener et al., 2018; de Lange et al., 2013）。这与空间/数量监控所依赖的、更多处理静态表征的神经机制形成鲜明对比。

第二，时间误差具有累积性，这使得监控过程需要持续性与动态调整的支持。时间误差既可能在单次试次内随时距延长而逐步累积，也会在连续任务中跨试次累积并影响后续判断。因此，个体不仅需要在单次任务中即时觉察误差，还必须进行跨试次的持续性调整。这一过程本质上体现为元认知调节。个体需要根据信心水平在内部与外部信息之间进行动态权衡（如决定在低信心时依赖外部反馈，在高信心时依赖内部表征）以及跨试次的策略优化。这种持续性调节依赖于脑网络的动态协作。fMRI 研究表明，默认模式网络（DMN，负责内部反思）与时间加工网络（TN，负责时距产生）的功能连接在无外部反馈时支持内部误差觉察（Bader & Wiener, 2024）；而当外部反馈出现时，系统会发生重组，FRN（反馈相关负波）作为关键神经指标，实时反映预测误差并支持随后的行为修正。

第三，由于时间信息具有内在性与抽象性，其监控更依赖于基于信心的元认知评估机制。时间无法像空间或数量一样被外部感官直接“感知”，主要依赖大脑的内部计时系统，因此更具主观性和不确定性。这一特性使得决策信心调节机制的作用变得至关重要。由于缺乏稳固的外部参照，个体必须不断地评估自身时间判断的可靠性（信心），并据此分配认知资源（例如，在低信心时更依赖外部反馈）。这种高阶的元认知评估与前额叶皮层（如背侧 PFC、OFC）的功能紧密相关（Bang & Fleming, 2018）。虽然时间领域直接证据仍在积累，但动物模型（Lak et al., 2014）和临床行为研究（Doenyas et al., 2019）提示前额叶可能在信心计算中发挥关键作用，在不确定性较高时调节信心水平并影响后续行为调整。

通过对上述三方面的整理，我们在修订稿中更系统地展示了时间监控的独特性如何塑造其认知与神经机制，为模型的完善与理论整合提供了依据。

意见 4：主观感知的时间错误监控来源是什么？尤其在缺少外部反馈提供的情况下。

回应：感谢审稿专家提出这一核心问题。本文的一个重要观点正是指出，在缺少外部反馈的情况下，主观感知的时间错误监控主要源于一个分布式的内部比较与评估过程，而非一个单一的“内部时钟”读数。我们在第 3.1 节和第 4.1 节中对这一问题作了系统讨论。

从认知计算的角度看，时间错误监控依赖于内部计时信号之间的动态比较。正如文中综述的顺序扩散过程（OPDDM 模型）所指出，时间估计是多个独立的神经积分器通过噪声积累并竞争达到决策阈值的过程。在一次时间产生后，系统会通过比较这些积分器的激活时间差，来获得一个内源性的“差异信号”，从而判断反应是“偏早”或“偏晚”并量化误差幅度（Akdoğan & Balci, 2017）。这是一种纯粹依赖于内部信号比较的机制。

在神经层面，这一内部比较过程得到了特定神经振荡活动的支持。其中， β 振荡（15 ~ 40 Hz）扮演了“内部预测信号”的角色。诸多研究，如 Kononowicz 与 van Rijn（2015）以及 Wiener 等人（2018）的工作均表明，源自辅助运动区（SMA）等脑区的 β 波活动，编码了时间记忆的“标准”，其功率与时间估计的长短和准确性密切相关，甚至在行为发生前就可

预测潜在误差，从而为内部比较提供了基准线。而在时间产生后的评估阶段， α 振荡（8~14 Hz）功率的降低则反映了系统对先前 β 波所编码时间状态的主动读取与评估（Kononowicz & van Wassenhove, 2019），这可视为执行内部比较过程的神经生理标志。

从更宏观的脑网络视角来看，这种内源性评估功能依赖于脑网络之间的协作。Bader 与 Wiener（2024）的 fMRI 研究表明，即使在无反馈条件下，默认模式网络（DMN）与计时网络（TN）之间的功能连接也会显著增强。这意味着，负责时间表征生成与输出的 TN，与负责内部指向性认知（如自我反思）的 DMN，通过协同工作共同实现了对时间误差的监控与评估，这构成了内源性自我评估的宏观网络基础。

因此，我们认为，主观时间错误监控的内源信号可被理解为一个由分布式脑网络（TN-DMN）支持、通过神经振荡（ β/α ）活动实现、并可用 OPDDM 等计算模型描述的“内部信号差异比较”过程。本文提出的“两阶段三路径模型”中，“自我评估路径”正是在整合这一多层证据的基础上形成的。

意见 5: 时间错误监控的任务范式与全文其他部分的关联是什么？第 3 部分在论文中的功能并不明确。

回应: 感谢审稿专家提出的宝贵意见。您的意见帮助我们进一步理清了各章节之间的逻辑衔接。在修改稿中，我们按照“由方法入手、逐步上升至机制与理论”的思路重新组织了论述结构。第 2 部分介绍了时间错误监控研究中常用的任务范式，为后续分析提供了实验基础；第 3 部分则在此基础上进一步探讨这些实验结果所揭示的元认知调节机制。

具体而言，选择退出范式主要用于考察自我评估机制，因为它依赖个体在无反馈条件下对自身误差的觉察，但也与信心水平相关；自我评估范式更直接地反映信心调节机制，通过要求被试报告误差方向与信心，可以直接反映信心调节的行为特征；重试决策范式体现了反馈驱动的调节机制，它通过外部反馈促使个体调整策略，同时也与内部自我评估过程相互作用。因此，第 3 部分的主要作用是将实验任务所揭示的规律上升为机制层面的理解，为后续神经机制分析和整合模型的建构提供了理论支撑。我们已在修改稿中补充了这一逻辑说明。

此外，我们还优化了语言。删除冗余描述，精简实验流程细节，突出范式设计的理论意图。（具体修改内容请见第 2 部分）

意见 6: 4.1 仅论证了自我评估机制的存在，但自我评估机制的机制并不明确。

回应: 感谢审稿专家提出的宝贵意见。在修改稿的 4.1 节中，我们重新梳理了相关论述，力求从理论模型与神经机制两个层面呈现这一过程。具体而言，自我评估机制并不仅是对误差的主观觉察，而是一个由内部比较和神经实现共同支撑的动态过程。在理论框架层面，顺序扩散过程模型（OPDDM）提出，个体可能依赖于对多个内部计时信号的比较，将它们之间的差异转化为可量化的误差信号，从而判断反应的偏早或偏晚。在神经实现层面，这一比较与估计过程可能由特定的神经活动模式来支持： β 振荡在行为前提供预测基准， α 振荡在行为后执行误差读取与比较，而默认模式网络与计时网络的协作则为上述过程提供宏观的脑网络支持。根据您的建议，我们在第 4.1 节结尾新增了一个总结段落，用以整合模型解释与神经证据，进一步明确自我评估机制的动态结构。

此外，关于内源性信号来源的讨论，请参阅我们对意见 4 的详细回应，其中补充了相关的计算模型与神经网络证据。再次感谢您的指正，这一意见帮助我们使论文的理论逻辑更加完整、条理更加清晰。

意见 7: 第 4 部分的时间错误监控中的元认知调节机制的三种机制的适用范围是什么？三种机制之间的关系是怎样的？这两点对梳理清楚时间错误监控机制具有重要意义。

回应：感谢审稿专家的宝贵意见。您提出的问题非常关键——明确三种元认知调节机制的适用范围及其相互关系，对构建时间错误监控的整体框架具有重要意义。我们在第3部分末尾补充了相关说明，以明确三者的边界与联系（见第3部分最后一段）。

意见 8：第5部分的神经生理机制部分脱离了元认知调节机制，而聚焦在了ERP成分及神经振荡，这部分理应服务于论文所提出的元认知调节机制。并且第4部分既有认知机制又包含了部分神经机制的探讨。总体而言，各部分的逻辑关系较为混乱。

回应：感谢审稿专家的宝贵意见。我们根据您的建议，对论文的结构进行了重新梳理，以更清晰地体现认知机制与神经机制之间的层次关系。

具体而言，第3部分（原第4部分）结尾新增了一段内容，明确阐述了自我评估、反馈调节和信心调节三种机制的适用范围及相互关系，使机制之间的层次更加清晰。同时，我们将神经层面的论述集中到第4部分（原第5部分）。第4部分在内容上也进行了重新组织，不再单纯呈现ERP与振荡结果，而是按照三种调节机制的结构顺序分别对应展开相关ERP成分与神经振荡证据，从而使每一类神经指标都与具体的认知机制相呼应（详见第4部分）。这些为第5部分的理论模型的提出奠定了基础。我们希望这些修改能够更好地凸显各部分之间的逻辑联系，使整体论证更加连贯。

意见 9：自检报告中的“科学问题”、“如何解决”，以及“创新性贡献”部分均需要调整，更加客观、准确地反映论文的内容及贡献。

回应：感谢审稿专家的宝贵意见。在修改稿中，我们已对自检报告中“科学问题”、“如何解决”以及“创新性贡献”三部分进行了重新梳理和精炼，使其内容更客观、准确地反映论文的研究逻辑与核心贡献。

在“科学问题”部分，将焦点明确为时间错误监控中的三类元认知调节机制及其神经基础，避免了原稿中过于宽泛的表述。（本文旨在解决的核心科学问题是：在时间错误监控中，三种元认知调节机制（自我评估、反馈调节、决策信心调节）如何影响个体的时间估计与行为调整，以及这些机制的神经生理基础如何被整合进一个初步的理论框架？）

为回答这一核心科学问题，我们以“从任务范式到认知机制，再到神经机制，最终整合为理论模型”的思路展开综述。（为了解决这一科学问题，本文按照“从任务范式到认知机制，再到神经机制，最后整合为理论模型”的思路展开综述。首先，系统梳理了时间错误监控的主要实验范式（选择退出、自我评估、重试决策），并提炼出三类元认知调节机制。其次，整合行为和神经影像学证据，揭示 β/α 振荡、FRN/ERN以及前额叶—顶叶网络如何支撑这些调节机制。最后，提出“两阶段三路径”整合模型，并在总结与展望部分进一步指出三条未来研究路径：一是通过纵向与跨年龄追踪设计揭示时间错误监控的动态演变；二是结合多模态成像技术与高生态效度范式（如虚拟现实、多任务情境与实时神经反馈），深入揭示脑网络间的协同作用；三是探索时间错误监控研究在抑郁症、强迫症等精神障碍干预中的可能应用与实践路径。本文基于上述思路，回答了核心科学问题，并提出了理论与临床研究的未来发展方向。）

在“创新性贡献”部分，我们突出了论文的整合视角与理论建构意义。（本文的创新性主要体现在以下三个方面：

（1）本文尝试从元认知调节的视角综述时间错误监控研究，明确提出三类调节机制（自我评估、反馈调节、信心调节），并揭示其与神经生理指标（ERP与神经振荡）的对应关系。

（2）在整合现有证据的基础上，提出“两阶段三路径”整合模型，揭示时间错误监控从误差检测到信心调节与反馈修正的全过程，为理解其认知与神经机制提供了新的理论框架。

（3）在总结与展望部分进一步提出三条未来研究路径：通过纵向与跨年龄追踪揭示发

展动态，结合多模态成像与高生态效度范式捕捉跨网络的动态协作机制，并探索时间错误监控在抑郁症、强迫症等精神疾病干预中的应用潜力。)

此外，我们还对“与现有外文综述的区别”部分进行了修改与补充，使其更准确地体现本研究的整合深度与理论创新。我们希望这些修改能够使自检报告更加客观、准确地反映论文的逻辑结构与实际贡献。

二、内容

意见 1: 论文涉及的核心概念体系并不复杂，并不需要用一部分（第 2 部分）来介绍概念，实际上论文中的 2.1 介绍了时间错误监控的概念，2.2 则是通篇要去论证的时间错误监控及元认知之间的关系，2.2 并不涉及概念的明确，而作为关系的论证又不充分。因此，第 2 部分是冗余的，可以与第一部分相结合。

回应: 感谢审稿专家的细致意见。我们理解您关于第 2 部分的建议。原稿中确实单独设置了“核心概念”部分，但其内容与引言部分存在一定重叠。我们据此将原第 2 部分的核心内容融入引言，并在结构上重新组织逻辑层次，具体而言，在引言前半部分，我们简明界定了时间错误监控的概念及其独特性；在后半部分，进一步阐述时间错误监控与元认知的关系，以此作为提出研究问题的逻辑起点。这一调整避免了冗余，使文章在引言部分就建立起完整的概念框架与研究逻辑，更符合问题导向型综述的写作要求。（具体修改见引言前三段）

意见 2: 时间错误监控是一个非常重要的认知加工能力，时间尺度不同时存在不同的时间加工机制，但论文中并未对时间尺度进行说明。引言中提及的“例如，运动员需要依赖时间错误监控来调整自身的节奏，以达到最佳竞技状态；学生在学习中则通过自我反思来优化时间的分配和管理”，横跨不同的时间尺度，那么时间错误监控与时间尺度无关吗？

回应: 感谢审稿专家的宝贵意见。我们完全同意时间尺度是时间加工中的关键因素，不同尺度可能依赖不同的神经机制。原稿中的“学生学习”示例确实容易引发歧义，暗示时间错误监控可直接外推至长时间尺度。根据您的建议，我们已在修改稿中删除了这一表述，并保留了更贴近“短时间尺度”的例子（如运动员的节奏控制），以避免模糊化。

同时，我们在引言结尾部分补充了说明：“本文聚焦于秒级范围内的时间错误监控，这是现有行为与神经生理研究最为集中的核心窗口，……”我们认为这一调整既消除了潜在的误解，也使研究问题的范围更加清晰和聚焦。

意见 3: 论文最后一段并不存在与理论意义的关联。

回应: 感谢审稿专家提出的宝贵意见。我们已将相关表述中的“理论意义”修改为“基础研究意义”，以更准确地反映研究的价值。

详见修改稿最后一段“最后，时间错误监控不仅具有重要的基础研究意义，也在抑郁症、强迫症等精神疾病的诊断和干预中展现出较高的临床应用潜力。……”

三、表述及写作规范性

意见 1: 时间知觉的稳定性与准确性是两个不同的概念，引言第一段中的表述“然而，时间感知往往并不稳定，容易受到情绪状态、注意力水平和任务特征等因素的干扰，导致主观时间判断与客观时间之间的偏差(Lake et al., 2016; Matthews & Meck, 2016)”需调整。

回应 1: 感谢审稿人的细致指正。我们认同“稳定性”与“准确性”是两个不同的概念，原文的表述确实存在不够准确之处。我们的本意是强调主观时间判断可能与客观时间产生偏

差,因此应表述为“准确性”而非“稳定性”。在修改稿中,我们已将相关句子调整为:“然而,时间感知的准确性往往容易受到情绪状态、注意力水平和任务特征等因素的干扰,从而导致主观时间判断与客观时间之间出现偏差(Lake et al., 2016; Matthews & Meck, 2016)(见引言第一段第4行)。”这一修改能更清晰地传达原意,并避免了与“稳定性”的混淆。

意见 2: 引言最后一段中“通过整合现有文献,本文旨在为理解时间错误监控的认知机制提供一个全面的理论框架。”的表述并未包含神经机制。

回应 2: 感谢审稿专家的指正。我们对引言最后一段进行了较大幅度的修改。修改后的正文如下:“围绕这一问题,本文系统梳理现有研究范式并结合认知模型、计算模型与神经生理证据,探讨时间错误监控的机制,并提出未来研究的潜在方向与理论设想。”

意见 3: 注意表述的严谨性,如“这一发现为大脑在时间任务中的预测和调整机制提供了神经基础”,因为“神经基础”并非“研究发现所能提供的”。

回应: 感谢审稿专家的指正。已删除了不严谨的表述,并对该部分的表述进行较大幅度的修改和完善(详见第4部分 时间错误监控的神经生理机制)。

意见 4: 时间估计任务并非只有再现。见第6页“时间估计任务,即再现一个视觉刺激的持续时间”。

回应: 感谢审稿专家的指正。已删除了不严谨的表述,并对该部分整体进行了修改和完善(详见2.3 重试决策范式)。

意见 5: 文内文献引用括号的全角半角混用问题。

回应: 感谢审稿专家的细致审阅。我们已全面检查全文,对所有文献引用的括号样式进行了统一,确保格式规范和一致。

意见 6: 英文缩写首次使用时需交代全称。

回应: 感谢审稿专家的提醒。我们已对全文进行逐一检查,确保所有英文缩写在首次出现时均补充了全称。

第二轮

审稿人 1 意见:

作者进行了较为仔细的修改,还存在以下问题,有待提高:

意见 1: 根据反馈所提供的信息维度,可以区分为三种类型:范围反馈、幅度反馈和符号反馈。命名有点奇怪,可以考虑更为恰当的命名,如正误反馈(正确、错误反馈)、数量反馈(只有数量大小,无方向)、符号数量反馈(有正负方向,有数量大小)。

回应: 感谢审稿专家对术语命名的建议。我们已将原文中“范围反馈 / 幅度反馈 / 符号反馈”分别修改为“正误反馈 / 绝对误差反馈 / 符号误差反馈”,以更直接反映反馈中所包含的误差信息维度,并与相关文献中的“binary / absolute / signed feedback”(Riemer et al., 2019; Bader & Wiener, 2021)保持一致。

具体修改详见3.2节第一段(“根据反馈所提供的信息维度,可以区分为三种类型:正

误反馈、绝对误差反馈和符号误差反馈。正误反馈，提供反应是否落在目标区间的二分判断（如“正确/错误”）；绝对误差反馈通过量化误差大小但不指明方向（如“估计误差 300 毫秒”），符号误差反馈则同时给出误差方向和大小（如“估计偏短 300 毫秒”），从而提升校正的针对性(Bader & Wiener, 2021)。

意见 2：“两阶段三路径”模型是核心创新点，但其内部的一些具体假设与现有实证证据的对应关系可以更紧密地说明。例如，模型中“信心调节路径”与“反馈调节路径”的双向箭头所代表的具体神经交互过程，在正文中的支撑证据可以更集中和明确地阐述。

回应：非常感谢审稿专家提出的宝贵意见。根据您的意见，我们在修订稿中对模型中“信心调节路径”与“反馈调节路径”之间的双向关系进行了更为集中和具体的阐述。正文中补充了来自时间估计任务的脑电研究证据，结合错误反馈负波 FRN 与 P3 等反馈相关成分，说明在时间估计任务中，反馈加工如何整合个体基于自身表现形成的内部预期与主观信心，并在跨试次尺度上影响学习更新 (Frömer et al., 2021)。此外，我们参考概率学习领域的相关研究结果，进一步说明主观信心如何调节反馈相关神经反应的强度及学习更新权重 (Ben Yehuda et al., 2025)。

与此同时，在计算与元认知研究中，已有理论与模型工作对信心与反馈学习之间的相互作用进行了较为系统的讨论。一方面，信心可作为反映不确定性的内部状态变量，调节新反馈在信念更新中的权重；另一方面，反馈与误差信息也会在跨试次过程中参与信心的形成与校准 (Meyniel et al., 2015; Fleming, 2024)。由于时间知觉领域中直接检验信心—反馈交互机制的研究仍相对有限，我们在修订稿中将上述跨领域证据作为功能层面的参考，用以支持模型中相关路径假设的合理性，而非视作对时间知觉机制的直接证明。

现有研究已从神经与计算层面对信心—反馈交互提供了初步线索，但相关证据仍较为分散。本文模型的主要目的并非重复或验证某一具体神经效应，而是在已有证据基础上，对时间错误监控中不同调节路径的功能分工及其信息流向进行更清晰的结构化描述，从而为后续在该领域系统检验信心—反馈交互机制提供明确的理论假设。（具体修改见第 5 部分倒数第二段。）

意见 3：文中陈述“基于标量计时理论与元认知调节理论”，但从图上看不出本文提出的模型与“标量计时理论与元认知调节理论”的具体关系（哪些是标量计时模型的内容，哪些是元认知的，哪些是本文独创的？或者只是简单地将两个已有理论整合？）可以将标量计时理论、元认知理论和本文提出的模型用图示表示三者的关系，例如，可以结合标量计时模型的三个阶段：时钟（编码）阶段，记忆（工作记忆、参照/长时记忆）、决策阶段加以绘图论述。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见。根据该意见，我们在修订稿中对本文模型与标量计时理论、元认知调节理论之间的关系进行了更为明确的区分与说明，并对图 1 进行了相应的重绘与调整。

具体而言，我们在正文第 5 部分中明确指出，模型的第一阶段（时间编码与误差表征生成）直接对应标量计时理论中关于时钟—记忆—比较过程的核心计算假设，用以说明时间误差表征的来源与形成机制；该阶段主要承担时间误差表征的生成过程，其理论基础来自既有计时模型，而非本文的创新重点。相比之下，模型的第二阶段（元认知评估与调节）并不包含于传统标量计时框架之中，而是借鉴元认知研究中对监控与控制过程的功能区分，用以说明个体在时间判断形成之后，如何在不确定条件下整合内部评估、主观信心与外部反馈，对行为反应进行调节。

在此基础上，我们进一步强调，本文模型并非将标量计时理论与元认知理论简单并列或叠加，而是通过阶段划分与路径结构的重新组织，区分了时间判断的生成过程与基于判断结

果的行为调节过程。模型的创新之处在于，在一个连贯的“时间错误监控”流程中，将两者有机整合为一个两阶段的序列加工框架，并具体化为三条可检验的调节路径（内部评估、信心调节与反馈调节），其中进一步明确了主观信心与反馈信息之间的双向调节关系。这一结构化设计清晰区分了“误差信号从何而来”与“如何利用该信号调节行为”这两个关键问题。为避免概念混淆，修订稿中还进一步澄清，本模型中的“决策整合”并不等同于标量计时模型中的比较器判断阶段，而是指发生在时间判断形成之后、用于调节反应策略与决策阈限的行为控制过程。

考虑到模型的可读性，在修订过程中，我们并未将标量计时模型与元认知模型作为两个独立且完整的结构并列呈现在模型图中。相应地，我们在图注中明确标明：模型的第一阶段对应标量计时理论的核心计算过程，用以说明时间编码与误差表征的生成；第二阶段及其三条调节路径则体现了本文在元认知调节视角下，对时间错误监控过程的扩展与整合。需要说明的是，本文模型并非借鉴或复现某一具体的元认知模型，而是将元认知理论作为一种指导性的理论视角加以体现，因此未在图中呈现完整的元认知模型结构。

通过上述修改，本文更清晰地呈现了“两阶段三路径”时间错误监控模型的结构逻辑与理论贡献。（具体修改见第5部分）。

审稿人2意见：作者很好地回答了审稿人问题，并根据审稿意见对原稿件进行了调整。当前版本可为时间知觉研究学者提供较有价值的参考，建议发表。

第三轮

审稿人1意见：作者按照意见对本文进行了很好地修改，还有一些语句上的小问题，如“旨在同一框架下整合时间误差的生成、评估与调节过程，并为相关神经机制的检验提供明确假设。”，需要作者通篇阅读订正。

回应：感谢审稿专家的细致审阅和建设性建议。我们已将该句修改为“旨在通过统一的理论框架整合时间误差的生成、评估与调节过程，并为相关神经机制的检验提出可操作的研究假设”（详见第5部分第一段）。此外，我们已对全文进行了通篇审读和语言层面的修订，并对相关句式进行了调整，力求使行文更加准确、简洁和流畅。

第四轮

编委1意见：该文经过几轮修改，质量有所提高，基本达到发表要求。然而，虽然文中提出的两阶段三路径时间错误监控模型具有一定参考价值，但在模型架构上还值得进一步推敲。例如，第二阶段中的“三路径”描述并不清晰，逻辑不够顺畅。

回应：非常感谢编委对本文的肯定以及对模型架构提出的关键意见。我们认真梳理后认为，前一稿中第二阶段之所以显得不够清晰，主要在于三条路径的功能分工交代不够充分，第二阶段与第一阶段之间的边界界定不够明确，同时反馈调节路径与反馈更新关系的表达亦有待进一步澄清。针对上述问题，我们已对模型图和正文表述作了系统修改，具体如下。

第一，我们重新明确了第二阶段三条路径的来源和功能分工。在修订稿中，我们将第一

阶段形成的内部误差表征进一步区分为偏差内容和不确定性线索两个方面,并在此基础上重新说明了第二阶段三条路径的分工。与此同时,我们也进一步强调了时间判断不同于一般正确/错误式判断的特点,即其误差通常不仅表现为是否出错,还包含偏差方向、幅度及表征精度等维度,因此有必要在模型中区分误差内容评估与可靠性评估。自我评估路径主要基于第一阶段误差表征中的内容维度,对偏差方向与幅度进行读出,形成内源偏差信息;信心调节路径主要基于误差表征中的不确定性线索,形成对当前判断可靠性的主观评估,并进一步对后续整合过程发挥调节作用;反馈调节路径则以历史反馈信息为输入,形成反馈校准信号。通过这样的调整,三条路径在信息来源、加工功能和输出形式上均得到区分,从而避免了原稿中“三路径”并列表述较为笼统的问题。

第二,我们进一步理顺了三路径之间的组织关系。修订后,第二阶段被明确区分为两类机制:一类是内容性输入,即为决策整合提供偏差信息或校准信号;另一类是参数性调节,即对这些信息在整合过程中的作用方式进行调节。通过这种处理,第二阶段不再是三条同类输入并列,而是两条路径提供内容,一条路径负责调节,这三者共同作用于决策整合,从而使第二阶段的内部逻辑更加清晰,也更能体现信心调节路径在模型中的元认知性质。与此同时,我们也进一步澄清,信心在本模型中既体现为个体对当前判断可靠性的主观评估,也作为后续整合环节的调节因素发挥作用;它并不直接改写误差内容本身,而是影响后续信息的利用方式。

第三,我们对模型图进行了相应重绘,以提高结构可读性。修订后,第一阶段输出的“内部时间误差表征”仅保留一次,并明确标注其包含“内容”和“不确定性”两个可读出维度;在第二阶段中,自我评估路径与信心调节路径分别对应这两个维度,而反馈调节路径则由独立的“历史反馈信息(外部)”输入,不再与第一阶段输出混为同一来源。同时,在“决策整合”模块中,我们进一步区分了内容性输入与参数性调节,以突出三条路径在第二阶段中的不同作用方式。图示和图注中也据此作了相应调整,进一步区分了当前试次的外部反馈结果(若提供)与后续试次中可进入反馈调节路径的历史反馈信息,以避免读者将反馈调节路径理解为对当前反馈结果的即时读取,并由此造成对第二阶段整体逻辑的误解。(详见修订稿图1和第5节标注深蓝色字体部分)

此外,根据整体结构需要,我们还对第6部分“总结与展望”作了相应调整。修订稿在展望部分保留了与模型相关的关键问题意识,如不同阶段、不同路径的神经基础、发展变化及临床失衡特征等,并在此基础上对后续研究中值得进一步关注的问题作了更清晰的归纳,以增强模型与未来研究方向之间的衔接,体现该模型对未来研究的启发作用。(详见修订稿第6节标注深蓝色字体部分)

编委2意见:同意发表。

第五轮

编委1复审意见:该稿件经过几轮修改,质量明显提高,达到发表要求。建议发表。

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