

《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：孤独症谱系障碍的多感觉时间整合：特征、机制与干预展望

作者：陈雁 李晶

第一轮

审稿人 1 意见：

问题 1：研究问题不够明确。 尽管作者提出探讨“ASD 多感觉时间整合的认知神经机制”，引言未明确具体研究问题，正文大部分集中于多感官整合的一般性论述，缺乏时间维度的聚焦。建议在引言中明确研究目标与核心问题。

回应 1：感谢审稿老师的宝贵意见，根据老师的建议，我们已经对引言部分做了以下几方面的调整：

（1）首先介绍“多感觉整合”的概念，再进一步引出“多感觉时间整合”的概念，强调其更聚焦感官信息在时间上的精确对齐与协调。且提出在时间整合过程中涉及到的“时间绑定窗口”概念。详见引言第一段，已标红。“多感觉整合（Multimodal integration）指大脑来自不同感官通道（如视觉、听觉、触觉等）的信息结合起来……TBW 的宽窄是个体时间分辨能力的标志，窗口越窄，感知越精确；窗口越宽，则越容易发生错误的知觉绑定(Stevenson et al., 2014)”

（2）将原第二段关于 ASD 个体多感觉时间障碍表现证据进行梳理和凝练，先是概括描述“ASD 个体在多个时间尺度（毫秒、节奏和昼夜节律）上存在时间信息感知与加工困难，并在跨通道的感觉整合（如视听觉、听觉-运动、视触觉、视觉-运动及语言-非语言信号）中存在特异性”，随后选取有代表性的视听语言及感觉运动整合证据进行简要分析，证据指向相同的文献做了合并处理，删除于时间整合相关性较小内容，使所有内容更加聚焦时间维度。详见引言第二段，已标红。“孤独症谱系障碍(Autism spectrum disorder,ASD)是一种广泛性神经发育障碍，主要症状特征为社交障碍、限制性兴趣和刻板行为(American Psychiatric Association, 2013 ……在感觉—运动协调方面，ASD 个体表现出时间和空间节律的整合困难，干扰其对动作时机的准确控制(Danielet al., 2022)”

（3）在第三段基于 ASD 的多感觉时间整合障碍表现以及当前研究现状，引出时间整合作为多感觉整合的核心环节，其精确性直接影响个体对外部时间的整体感知和行为反应。进而提出本文的研究目标：从时间的维度探讨 ASD 个体的整合表现特点，分析其背后的认知

神经机制，并提出针对性的干预方案。通过解决以上核心问题，为 ASD 社交沟通障碍的形成机制提供新的理论视角。详见引言第三段，已标红。“综上，我们发现 ASD 个体存在听觉、视觉和运动等感觉输入的非典型整合以及感觉时间处理的特异性(Bloch et al., 2019).....以期理解 ASD 社交与沟通障碍的形成机制提供新的理论视角，并为早期诊断与干预策略的制定提供科学依据”

问题 2.1：文献回顾。文章虽然引用了部分 2023–2024 年的研究，但整体文献结构仍以早期文献为主，尤其是理论综述部分，新近参考文献较少。部分关键进展（如基于 EEG/MEG 的时间绑定研究、ASD 多感觉预测编码模型的新证据等）未被纳入，中文近期研究文献未充分体现。

回应 2.1：感谢评审老师的宝贵意见，我们将问题分解成以下几点来回应：

（1）我们已经正文在添加了近期 ASD 多感觉时间整合相关文献

如 1.1 时间绑定窗口普遍拓宽处

“Ainsworth 和 Bertone (2023)的研究发现，对于闪烁刺激的同时性判断，13 岁以下 ASD 儿童的时间绑定窗口宽于 TD 儿童，但在 13–18 岁组别中，该差异消失。一项以成人为对象的研究进一步支持了 ASD 与 TD 在时间绑定窗口上无显著差异的结论(Weiland et al., 2023)”

“在视触觉研究中也发现了这一特征，ASD 儿童在单模态和跨模态任务中的时间绑定窗口均显著宽于 TD 儿童，且在触觉主导的视触觉任务中时间绑定窗口要宽于视觉主导的任务(Purpura et al., 2024)”

1.2 感知觉时间同步困难处

“还有研究采用计算建模方法进一步证实，ASD 个体的感觉同步困难主要来源于时间信息累积过程的不稳定性，而非单纯的运动执行缺陷(Dwyer et al., 2024)。”

“其内部计时系统难以有效处理复杂的时间要求(Vishne et al., 2021)，这可能是由于其内部计时存在较高的固有噪音(Cannon et al., 2024)”

“感知同步是 ASD 个体在多感官时间整合中的突出特征。这一特征在从简单的感官通道同步到复杂的协调互动中均有明显体现(Baldwin et al., 2022)”

2.2 社交定向的持续和转移困难处

“这种不稳定的视觉采样模式使其难以追踪和预测动态社交刺激中精确的时间结构，例如对话中音节起始与唇形变化之间的微妙时间关系(Zhao et al., 2022)。”

“这种视觉注意模式的损伤，直接影响了 ASD 个体对社交互动中精确时间线索的捕捉和

利用(Zhao et al., 2022)。”

“研究表明，TD 婴儿在 1 岁前即能发展出良好的视听语言整合能力，这得益于正常的多感觉时间同步性和视觉选择性注意发展(Edgar et al., 2022)。然而，ASD 高风险婴儿在 1 岁前就表现出对谈话过程中嘴部区域视觉注意的减少，伴随着视听同步整合水平下降，进而影响其后期语言发展(Lozano et al., 2024)。这种早期缺陷会持续影响个体发展，从童年期开始，ASD 个体对说话者嘴部和面部的选择性注意持续减少，严重阻碍其视听时间同步能力的发展(Feng et al., 2023)。除了语言理解领域，ASD 个体在视觉凝视与语伴手势整合方面也表现出时间绑定窗口拓宽的现象，即视觉信号与手势指向信号的整合延迟(Bloch et al., 2022)”

(2) 我们在“3.神经生理异常”处新增了 EEG/MEG 的时间绑定研究

1. 神经生理异常处

“基于脑磁图（MEG）的研究显示，ASD 个体在执行同步任务时表现出神经振荡同步异常，他们对持续时间判断的准确性降低，认知资源分配减少(Lambrechts et al., 2018)”

3.3 神经系统激活与连接异常处

“基于脑磁图（MEG）的研究显示，ASD 个体进行听觉的时间加工和整合时，存在内侧枕叶皮层和初级运动皮层的连接性降低(Wilson et al., 2022)”

“最新的脑电图（EEG）研究显示，ASD 被试在整个 γ 频段范围内的频谱功率显著降低，其中额下回和颞顶联合区的降低尤为明显(Kakuszi et al., 2024)。”

“存在关键整合区域（如右额中回、角回等）激活减弱，额-顶叶等脑区间的功能连接普遍降低(Bierlich et al., 2024; Wilson et al., 2022)， γ 频段功率显著下降（尤其在前额-颞顶区域）的现象(Kakuszi et al., 2024)”

(3) 我们将 2.认知模式缺陷中的第一点 2.1 处改为“预测编码障碍”纳入多感觉预测编码模型新证据分析 ASD 的预测障碍，首先介绍了 ASD 的多感觉预测编码模型及其对分析多感觉时间整合的重要意义，接着分析该模型框架下，ASD 的“低先验”以及“内部模型更新僵化”等障碍影响了他们的预测表现，且他们在非结构化任务中，这种预测表现更差。详见“2.1 预测编码障碍”，已标红。“预测编码（Predictive Coding）框架认为，大脑是一个“贝叶斯推理机器”.....而对感觉信息的错误监控以及缓慢的更新共同影响了 ASD 个体的感觉同步与整合表现(Bowsher-Murray et al., 2022; Kasten et al., 2023; Purpura et al., 2024)，并最终导致在动态、不可预测的感知觉和社交互动中出现严重的时间同步困难”

问题 2.2: 对已有文献尚缺深入分析，如文中“在视触觉同步感知研究中，Cascio 等人(2012)

通过橡胶手错觉实验探讨 ASD 儿童的视触觉同步感知, 结果发现 ASD 组最初无法识别错觉, 但 6 分钟后就能识别错觉找到真实手, 说明他们存在非典型的多感觉时间整合和本体感觉的异常”其实文中表明反应延迟是多感官不能整合的关键, 需要作者提炼文献反映的实质性问题;

回应 2.2: 感谢评审老师的宝贵意见。这是本文存在的普遍性问题, 对此问题我们已经对全文进行整体调整, 深入解释分析每个证据背后反应的实质性规律, 并将其归纳整理, 聚焦其背后共性和机制总结。现针对老师提出的具体 Cascio 等人(2012)橡胶手错觉实验做具体回应, 其他证据的归纳总结将在后面回回应主体部分时详细列举。修改后我们的描述如下在 1.1 时间绑定窗口的普遍拓宽第二段, 已标红: “橡胶手错觉实验为此提供了直观证据: ASD 组最初无法识别错觉, 但 6 分钟后就能识别错觉找到真实手, 这种延迟反应反映了其即时时间整合窗口的异常(Cascio et al., 2012)。”

问题 2.3: 对研究存在的分歧尚缺乏具体的评价。文章虽然综述了多个感官通道的研究结果, 但缺少对不同研究之间关系的分析。多数段落以“有研究发现……”开头, 罗列了各类实验结论, 却没有总结不同研究的一致性与分歧, 例如, 部分文献报告 ASD 个体在视听同步任务中存在延迟整合, 而另一些研究则显示 ASD 个体在特定条件下表现出更高的时间分辨率。稿件未分析这些相互矛盾结果的可能原因。建议在每段的总结中, 不是仅概述, 更需要分析材料反应的实质性问题, 并对不同研究结果进行评价。

回应 2.3: 感谢评委老师的宝贵意见。根据评审老师的建议, 我们已经对全文证据内容进行调整修改, 避免文献罗列, 我们对每个证据结果进行评论, 并总结归纳, 分析其共性与差异, 找出实质性规律。因这样的修改调整涉及全文, 这里不一一列举。此处仅针对老师提出的具体案例做回应。我们对视听同步中的“更高时间分辨率”、“反应延迟”、“时间敏感性降低”障碍现象归纳入“时间绑定窗口拓宽”的特征中, 他们在接受感觉信号时, 对通道感觉信息的反应过慢。或者过度关注某些独立感觉信息, 难以进行整合绑定。又或者对感觉信号的时间感知过于迟钝, 这些都是造成“时间绑定窗口拓宽”的主要原因。他们在时间整合时普遍存在过于敏感或过于迟钝的现象。在“1.1 时间绑定窗口拓宽”最后一段, 我们对所有证据进行了总结归纳: “综上所述, ASD 个体在多感官时间整合中表现出时间绑定窗口的普遍拓宽。进一步分析, 时间敏感性降低、时间阈值偏高且感觉延迟可能是 ASD 个体时间绑定窗

口拓宽常见的原因。这种对感觉信号的过度敏感或迟钝，都影响着他们的时间绑定表现，且这一现象在视听、视触觉整合任务中均得到反复验证。生命早期感知觉的时间整合能力还可能对他们的语言与社会功能发展产生深远影响。然而，该领域的研究结果并不完全一致：部分研究未在成人或特定年龄组中观察到 ASD 与 TD 人群在时间绑定窗口上的显著差异，提示年龄及任务类型都可能是重要的影响因素，如 Mostofsky 等人(2000)使用较为简单的听觉间隔任务发现 ASD 儿童 TD 对照组之间的听觉阈值没有差异，而 Bhatara 等人(2013)使用了比 Mostofsky 更复杂的声音刺激且增加了结果反馈，发现 ASD 儿童的听觉阈值高于 TD 儿童。

问题 3：研究聚焦与创新点不够。作者未明确本研究与既有综述（如 Baldwin et al., 2022）的实质区别。建议突出文章的核心，例如整合不同通道的研究证据以揭示多感官整合的时间加工障碍

回应 3：感谢评委老师的宝贵意见，以往文献 Baldwin, M. M., Xiao, Z., & Murray, A. (2022). Temporal Synchrony in Autism: A Systematic Review. *Review Journal of Autism and Developmental Disorders*, 9(4), 596–617.主要是从视听、听觉-运动、视触觉或视觉-运动整合几个感官通道讨论 ASD 个体的时间同步。本文在上述文献的基础上加了语言和非语言信息的同步以及在其他感官同步的分析上添加了最新文献，并从社会性发展的角度凝练出三个主要特征（时间绑定窗口拓宽、感知时间同步困难和社会性线索同步困难加剧）来系统分析孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征，且进一步分析其背后的认知神经机制，并提出针对性干预方案。与 Baldwin et al.（2022）综述相比，原论文中“1. 孤独症谱系障碍的多感觉时间整合表现”部分在组织结构上确实没有进一步的创新，缺少主题凝练。因此，此次修改我们将原文 1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合表现中的 1.1 视听觉同步、1.2 听觉—运动同步、1.3 视触觉同步、1.4 视觉—运动同步、1.5 语言—非语言信息同步中的相关文献证据进一步梳理与总结，从社会性发展的角度归纳出三个主要特征：时间绑定窗口拓宽、感知时间同步困难和社会性线索同步困难加剧。并以这三个特征作为小标题进行讨论分析，揭示每一个证据背后的规律。本次修改我们强调从“社会互动中的时间结构”这一新视角，对多感觉时间整合的实证证据进行重新组织与解读。该视角强调，ASD 个体在多感觉时间整合上的困难，不仅反映在基础感知层面，更关键的是削弱了其在动态社会互动中捕捉、适应与回应他人行为时间线索与同步的能力，从而影响社交沟通。详情见“1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征”，已标红。“多感觉时间整合研究主要采用同时性判断和时序判断任务范式(Poole et

al., 2024), 通过呈现不同模态的刺激组合来考察大脑整合时间信息的能力。常用的刺激组合包括视听、听觉-触觉以及视觉-触觉等。为深入探究其在复杂社会互动中的表现.....这些行为特征不仅直接导致 ASD 个体在动作协调、言语感知等基础领域的功能困难(Poole et al., 2024), 更通过破坏人际互动的精确时间结构, 对其社会交往与沟通能力产生深远的级联负面影响(Bowsher-Murray et al., 2023; Noel, De Nier, et al., 2018)”

主体部分:

(一) 多感觉时间整合部分

问题 1. 概念界定需进一步精准

(1) 文中“感觉时间整合 (Multimodal temporal integration) 是指个体将同时呈现的多个感觉通道的信息 (视觉、听觉、触觉等) 在时间上有效整合成统一连贯的、有意义的知觉过程(Noel et al., 2018)。”，该定义欠精准，需强调在时间上接近的信息，才能绑定成一个统一的、连贯的知觉体验的过程。

回应 1: 感谢评审老师的宝贵意见。原文概念确实不够精准。我们进一步查阅文献并调整了多感觉时间整合的概念，强调时间相近的感觉信息，详见引言第一段，已标红。“多感觉时间整合 (Multimodal temporal integration) 强调个体将时间上接近的感觉信息上绑定为单一、连贯知觉的基本过程，更注重不同感官信息在时间上的精确对齐与协调(Noel et al., 2018)”

(2) 文章未充分区分“多感官整合障碍”与“多感官时间整合障碍”。前者泛指不同感官信息的综合困难，后者则特指在时间维度上对多感觉输入进行同步和整合的能力。建议作者在引言或本节开头明确区分这两个概念，并聚焦后者，以避免将所有感官相关障碍笼统纳入讨论。

回应 1: 感谢评审老师的宝贵意见。我们在引言处首先介绍了“多感官整合障碍”的概念，进一步引出“多感官时间整合障碍”更聚焦感觉信息在时间维度上的对齐与整合，并介绍了时间整合过程中的关键概念“时间绑定窗口”。请见引言第一段，已标红。“多感觉整合 (Multimodal integration) 指大脑将来自不同感官通道 (如视觉、听觉、触觉等) 的信息结合起来，形成统一、连贯的知觉体验的过.....TBW 的宽窄是个体时间分辨能力的标志，窗口越窄，感知越精确；窗口越宽，则越容易发生错误的知觉绑定(Stevenson et al., 2014)。”

问题 2. 标题不够突出、增加评述的总结段

(1)小标题反应综述的内容不突出。建议 1.1 题目“视听觉同步”改为“视听觉同步缺陷”，后面的小标题也做类似的修改。

回应 2: 感谢评审老师的宝贵意见。根据评审老师对论文总体修改意见，我们综合考量后，决定将原文 1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合表现中的 1.1 视听觉同步、1.2 听觉—运动同步、1.3 视触觉同步、1.4 视觉—运动同步、1.5 语言—非语言信息同步中的相关文献证据进一步梳理与总结，从社会性发展的角度归纳出三个主要特征：时间绑定窗口拓宽、感知时间同步困难和社会性线索同步困难加剧。并以这三个特征作为小标题进行讨论分析，揭示每一个证据背后的规律。详情见“1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征”，已标红。“多感觉时间整合研究主要采用同时性判断和时序判断任务范式(Poole et al., 2024)，通过呈现不同模态的刺激组合来考察大脑整合时间信息的能力。常用的刺激组合包括视听、听觉-触觉以及视觉-触觉等。为深入探究其在复杂社会互动中的表现……这些行为特征不仅直接导致 ASD 个体在动作协调、言语感知等基础领域的功能困难(Poole et al., 2024)，更通过破坏人际互动的精确时间结构，对其社会交往与沟通能力产生深远的级联负面影响(Bowsher-Murray et al., 2023; Noel, De Niear, et al., 2018)”

(2) 第 1.1 至 1.5 节普遍为“通道+文献罗列”，缺少比较与分析。建议在每节末增设小结，归纳通道特征、差异与共性（如时间窗口偏宽、感知同步下降）。此外，若该节最后一段旨在总结“多感觉时间整合障碍对 ASD 个体同步与社交功能的影响”，则建议调整节标题以反映其综合性质，避免章节层级与内容不匹配所造成的逻辑不清晰。

回应: 感谢评审老师的宝贵意见。对于此章节，我们已经将小标题从社会性发展的角度改成三个主要特征：时间绑定窗口拓宽、感知时间同步困难和社会性线索同步困难加剧，1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征部分已根据评审老师意见整体进行调整(修改详情已在问题 2 (1) 中详细阐述)。且对于每一个时间整合特征，我们都对共性与差异进行详细讨论，如“1.1 时间绑定窗口拓宽”第一段，我们将视听整合结果显示的证据在一起讨论，Ainsworth & Bertone(2023)发现 ASD 整体知觉时间敏感性降低，但 H.-Y. Zhou et al.(2021)发现敏感性的降低出现在视觉上，且这种降低可能是视觉回避引起的。具体内容详见“1.1 时间绑定窗口拓宽”第一段：“在视听觉整合方面，研究发现 ASD 个体的视听同步时间绑定窗口普遍较宽，对视听刺激时间的敏感性显著降低(Ainsworth & Bertone, 2023)。还有研究进一步发现，ASD 个体在视听时间顺序和同时性判断任务中的表现显著差于 TD 个体，这种障碍

主要体现在视觉时间敏锐度的降低，而非听觉或多感觉时间处理困难，这可能是他们的普遍存在的视觉回避引起的，孤独症症状更高的 ASD 视觉时间敏感性更低(Zhou et al., 2021)”

问题 3： 小节内容存在交叉与范畴模糊。

部分章节在界定研究对象与任务类型时存在重叠与概念混用。例如，第 1.1 节中对视听整合的论述部分掺杂了空间整合内容。

回应 3： 感谢评审老师的宝贵意见。因为从 ASD 个体内维度来探讨多感觉时间整合的话，目前“主要是采用同时性判断和时序判断任务范式(Poole et al., 2024)，通过呈现不同模态的刺激组合来考察大脑整合时间信息的能力。常用的刺激组合包括视听、听觉-触觉以及视觉-触觉等”已在“1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征”第一段描述。按旧的论文结构 1.1 视听觉同步、1.2 听觉—运动同步、1.3 视触觉同步……的话 ,容易出现界定研究对象与任务类型时存在重叠与概念混用的现象,我们在调整后的论文中对于每个时间整合特征都分别将实验证据按不同的感觉整合通道分别讨论，如“1.1 时间绑定窗口拓宽”分别从视听、视触等通道依次讨论。

而第 1.2 节中听觉—运动同步与视觉—运动同步的研究均以“敲击任务”为主，未明确说明该任务究竟反映的是哪种多感觉同步机制。“语言”与“非语言”是否应视为独立的感觉通道也值得进一步考虑。

回应 3： 感谢评审老师的宝贵意见。在更改后的章节结构中，我们独立出一个小标题 1.2 感知觉时间同步困难，并把“敲击任务”归纳进此类别中，在以往文献中“敲击任务”主要用于分析感觉运动同步能力。调整内容详见“1.2 感知觉时间同步困难”第二段：“这种内部计时噪音不仅影响简单的运动同步，在复杂的协调任务中表现得更为显著。研究表明，ASD 个体的听觉-运动同步障碍在复杂、间接以及需要平衡协调能力的动作中表现得尤为严重(Whyatt & Craig, 2012)。在视觉-运动同步领域，感知异步同样明显。研究发现，ASD 个体在合作敲击任务中，无论是在恒定还是不恒定节奏条件下，其同步水平均差于对照组，且在不恒定节奏中表现出更大的脑波活动(Kawasaki et al., 2017)。”

以往研究仅从采用视、听、触等个体内维度来探讨 ASD 多感觉时间整合。而本研究不仅仅聚焦个体内，如果将范围扩大到个个体内与个体间的多感觉时间整合的话，我们认为是要将“语言”与“非语言”纳入讨论中，因此我们在时间整合特征中增加小标题分类 1.3 社会性

线索同步困难加剧，社交互动作为孤独症的核心症状之一，他们往往对社会线索的感觉整合更加困难，因此个体间的表情、手势、视觉凝视等社交感觉信号都应考虑在内。更改详情见“1.3 社会性线索同步困难加剧”整体内容：“ASD 个体而言，其多感官时间整合障碍在涉及社会性信息或复杂社交情境时表现得尤为突出。首先，ASD 个体的社会性刺激的加工存在困难.....更通过破坏人际互动的精确时间结构，对其社会交往与沟通能力产生深远的级联负面影响(Bowsher-Murray et al., 2023; Noel, De Niear, et al., 2018)。”

（二）认知与神经机制分析

问题 1：理论整合不足。作者的认知机制和神经机制之间缺乏清晰的层级逻辑与因果对应。建议在文中构建一个整合性模型，以系统阐明认知加工过程与神经基础之间的映射关系。尽管在结论部分可见类似逻辑，但前文对此缺乏铺垫与统一框架，导致在大量文献与概念堆叠中难以辨识清晰的理论主线。

回应 1：感谢评审老师的宝贵意见。根据评委老师建议，我们重新构建了 ASD 个体多感觉时间整合模型，对于每一个章节中的证据深入分析其背后的因果逻辑和规律，且在行文上进行铺垫。我们将原文 2.孤独症谱系障碍多感官时间障碍的认知神经机制分成两个章节，分别从认知模式和神经生理机制两个角度讨论 ASD 的感觉时间整合。

在认知模式部分，首先，因为孤独症者往往存在独特的认知模式，我们将原文的认知机制，改为“2.认知模式缺陷”，并且将该模块中原第一个小标题“预测障碍”，改为“2.1 预测编码障碍”，引入预测编码理论框架，分别从低先验、内部模型僵化和结构化依赖三个方面分析。并将每一种认知模式与行为表现呼应进行因果分析，如在 2.1 预测编码障碍第二段，在分析 ASD 认知模式中的时间先验缺陷时，根据以往证据推理“这种基于时间信息的内部模型更新障碍，是导致 ASD 个体时间绑定窗口拓宽和反应变异性增高的核心认知机制(Cannon et al., 2024)。其次，我们在“2.认知模式缺陷”最后一段，综合分析了 ASD 认知模式对行为特征“时间绑定窗口拓宽”和“感知时间同步困难”的影响。此外，为了行文逻辑更加严谨和流畅，避免文献罗列的现象，我们已经将原文证据顺序调整，且将文字表述调整。详见“2.认知模式缺陷”全部内容，已标红。“ASD 个体普遍存在独特的认知模式，这种认知模式又反过来加剧其核心障碍的表现。研究表明，ASD 个体普遍存在预测编码障碍、认知灵活性不足及认知加工偏差等基础性认知障碍(Kasten et al., 2023)。.....分配异常则进一步限制了在关键时间窗口内有效处理多感官信息的能力(Zhou et al., 2023)。这不仅解释了 ASD 个体在实验室环

境中的表现，更重要的是，为理解其在真实世界社交互动中面临的核心困难提供了机制性解释(Feldman et al., 2024)。”

在原文 2.2 神经机制方面我们也做了重要调整，首先，将这一部分作为独立的章节“3. 神经生理异常”。其次，我们将神经元系统和脑神经激活连接综合为一个小标题“3.3 神经系统激活与连接异常”，使其结构更清晰。再者，我们将每个小标题“3.1 自主神经系统失调，3.2 神经递质分泌异常及 3.3 神经系统激活与连接异常”中所有证据及分析思路进行调整和文字表述的优化，使其更聚焦时间整合。在每一个神经生理机制特点分析中，我们都与前文的认知机制与行为特征相结合。如在 3.1 自主神经系统失调中，我们分别在皮肤电及心率监测实验中得出，ASD 的自主神经系统主要存在低唤醒的特点，且与情绪表现相关，在最后我们总结分析自主神经系统与认知模式及行为特征的联系：“这些发现提示，自主神经系统的唤醒程度能够影响 ASD 个体感觉通道的敏感性，进而影响他们对感觉时间的判断和预测。并且这种唤醒程度还对情绪产生影响，特别是在涉及社交线索的感觉处理时，他们需要花费大量的注意力资源来处理情绪问题，导致感觉的时间处理出现困难(Bufo et al., 2022; Gandhi et al., 2021)”。其他段落分析同样采取该原则。此外，为了行文逻辑更加严谨和流畅，避免文献罗列的现象，我们已经将原文证据顺序调整，且将文字表述调整。详见“3.神经生理异常”全部内容，已标红。“大脑和身体以恰当的方式接收外部环境的可预测节律信息，并且对环境刺激进行有效的感知和同步互动，是成功社交的基础。研究发现，ASD 个体在大脑-身体-环境的时间动态同步中出现困难，其神经系统无法有效地调节以适应环境中的时间可预测事件(Beker & Molholm, 2023)。.....儿童和青少年 ADHD 患者倾向于高估时间长度（觉得时间过得慢），但在实际产生时间间隔时却产出较短的间隔。在需要同时处理多项任务的情况下，他们的时间感知困难更为明显(Hinault et al., 2023)。”

最后 5.总结与展望部分，我们根据前文分析，建立“ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知行为整合模型（图 1）”，从低层次的感觉输入到中间感觉时间加工与对齐（含认知模型和神经生理过程分析）再到高层次的行为和社交表现。在中间的过程，我们重点分析认知模型与神经生理的相互作用机制，自主神经神经系统失调影响 ASD 的时间预测以及注意力资源分配，神经递质分泌影响他们的预测编码，而神经系统激活和连接异常影响他们的注意力资源分配和社会定向。详见“5.总结与展望”1-4 段，已标红：“基于上述分析，本研究进一步梳理出 ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知行为整合模型（图 1），旨在系统性地阐述 ASD 个体在多感官时间整合障碍方面的潜在机制。.....如多模态的信息流（如语言、表情、

语调、手势），对话节奏、共情回应、联合注意等社交环节中出现困难，并进一步侵蚀情景记忆的形成与社会性联想学习，构成了 ASD 核心社交障碍的感知基础(Wallace et al., 2020)”

问题 2：证据呈现失衡。神经机制部分对实验结果（如褪黑素、催产素、多巴胺等）罗列较多，也缺乏整合性分析与理论归纳，也未明确区分这些机制的因果性与伴随性关系。

回应 2：感谢评审老师的宝贵意见。对于“3.2 神经递质调节障碍”部分，我们已经在实验证据文字表述上进行优化和调整，使其更具逻辑且更聚焦时间整合，但目前关于神经递质对时间整合影响的相关证据较少，且证据指向较为零散，我们修改已有证据文字表述及删除部分相关性不强的证据，在最后添加了总结性的讨论：“总而言之，神经递质失调可能导致 ASD 个体在处理感觉信息时，对时间知觉的精准预测能力下降，表现为节律感知迟钝以及时间同步感知困难。因此，神经递质失调很可能会影响 ASD 个体在多感觉时间整合过程中的预测编码机制。修改内容详见“3.2 神经递质调节障碍”全部内容，已标红。“ASD 个体在多感官时间整合上的困难，还与体内的神经递质水平相关，已发现他们存在多种神经递质（多巴胺、褪黑素、催产素等）失调现象，破坏了其对时间性信息的精确处理(Lalanne et al., 2021; Pavăl & Micluția, 2021).....总而言之，神经递质失调可能导致 ASD 个体在处理感觉信息时，对时间知觉的精准预测能力下降，表现为节律感知迟钝以及时间同步感知困难。因此，神经递质失调很可能会影响 ASD 个体在多感觉时间整合过程中的预测编码机制。”

问题 3：对比视角不足。文章未充分比较 ASD 与 ADHD、智力障碍等共病人群在时间整合机制上的差异，限制了理论解释的特异性与推广价值。

回应 3：感谢评审老师的宝贵意见。根据评审老师意见，我们在“3.3 神经系统激活与连接异常”最后一段，增加了 ASD 与 ADHD、阅读障碍及精神分裂症几种神经发育障碍感觉时间整合认知、行为神经生理特征差异分析，ADHD 主要是注意力不集中引起的时间精度不足，阅读障碍主要是视听整合的异常，精神分裂症的感知异常常常伴随着幻觉。详见“3 神经系统激活与连接异常”最后一段，已标红。“基础感觉时间整合能力是受损，特别是在生命早期，可能会对多领域能力（如认知、语言和社会发展）的发展产生及联效应(Cascio et al., 2016)。其他类型的神经发育障碍同样存在多感官时间整合困难.....这使 ASD 的表现区别于其他障碍，呈现出一种在基本感觉绑定层面的普遍性困难，并影响到更高层级的认知、语言与社会功能发展。”

（三）干预启示

问题 1：逻辑衔接欠充分。感觉统合训练与人际同步干预虽相关，但缺乏直接证据支持“改善多感觉时间整合→提升社交功能”的因果链。建议增加机制性推理或纵向研究引用。

回应 1：感谢评审老师的宝贵意见。根据老师的建议，我们将 4.基于孤独症谱系障碍多感觉时间整合特征的干预启示的内容进行调整。

首先，感觉统合训练我们保留原文中部分聚焦时间整合的干预改善证据，并且进一步分析这些改善背后的机制，感觉统合训练通过前庭、本体和触觉的输入，增加感觉信息处理能力，调节大脑的唤醒水平和神经振荡，改善感觉调节功能障碍（过敏、低敏、寻求），进而达到改善多感觉时间整合的目的，详见“4.1 感觉统合训练”第二段，已标红。“进一步分析感觉统合干预背后的作用机制。首先，干预课程结合秋千、弹跳、触摸各种材质的物品的形式，提供针对性的前庭、本体和触觉输入。……有研究针对 2-4 岁 ASD 儿童进行为期 12 周的感觉统合干预课程，发现他们在交流领域（表达、接受、书写）和社会化领域（人际关系、游戏和休闲时间）的功能均得到显著改善(Raditha et al., 2023)”

其次，在人际同步干预中我们同样采取保留原来干预改善证据中与时间整合联系紧密的部分内容。在“3.2 人际同步干预”第二段增加改善机制分析，如节拍线索增加神经同步，音乐成分促进多巴胺分泌，节律线索激活相关脑区，结构化线索提示可预测能力等，详见“3.2 人际同步干预”第二段：“进一步人际同步干预对 ASD 个体能力的改善机制，主要体现在以下几个方面：首先，通过节拍器等工具提供的明确节律线索，能够有效诱发个体在行为层面（如语气、发音、语调及肢体表达）的同步……如通过增强同步、预测和运动技能，缩小时间绑定窗口，减少时间反应变异性以及在增强对非结构化和社交性刺激的感觉同步表现”

最后，我们综合分析，两种干预方案结合正好能优势互补,全方位帮助 ASD 个体改善感知觉、预测能力、神经同步等，进而促进多感觉时间整合的能力。“综上，我们发现感觉统合干预能够改善 ASD 个体前庭、本体及触觉等基础感觉的输入效率，并且改善他们的感觉调节功能障碍。而人际同步干预通过节律线索，能够帮助 ASD 个体提升感知运动、可预测性及社交沟通能力。将两者结合，能够为 ASD 群体在多感觉时间整合过程中提供系统支持——从低层次的感觉输入，到中层次的感觉时间加工，再到高层次的行为认知与社交沟通，形成完整的干预路径。未来在课程设计上建议考虑将感觉统合与人际同步相结合，如在进行秋千、弹跳和触摸等感统练习时增加音乐、节拍等节律性线索引导。”

问题 2：文中“在社交互动方面，可开展以节律线索引导的人际同步干预课程”，此表述唐

突，前面内容未涉及任何节律线索有助于改善人际同步的研究。

回应 2: 感谢评审老师的宝贵意见。根据评审老师建议，我们引用以往文献的研究结果，已经将此句改成：“在社交互动方面，可开展增强亲社会行为、凝聚力以及协调互动的人际同步干预课程，引导 ASD 个体对社交情景中不同感觉信息的协调和同步(Morris et al., 2021)。”从已发现人际同步疗效的角度描述，详见“4.基于孤独症谱系障碍多感觉时间整合特征的干预启示”第一段。

问题 3: 理论支撑不足。 对干预有效性的神经或认知基础阐述不够。建议结合前述机制（如镜像神经元激活、自主神经调节）说明干预与核心机制的逻辑关联。

回应 3: 感谢评审老师的宝贵意见。针对“理论支撑不足，对干预有效性的神经或认知基础阐述不够”这一问题。我们对“干预措施”部分做了调整，着重补充并深化了关于感觉统合训练和人际同步干预其背后神经与认知机制的理论阐述。1）针对感觉统合训练：我们进一步阐述了其如何通过调节神经生理活动来改善多感觉整合。修改后的内容明确指出：该干预通过有节奏、可预测的前庭和本体感觉输入，有助于调节大脑的唤醒水平和神经振荡，从而增强神经同步化能力，这可能为缩窄多感觉时间绑定窗口提供了关键的神经基础。同时，干预通过改善基础感觉系统的组织性，为更高层次的视听整合创造了条件，并直接关联到减轻感觉调节障碍及其引发的焦虑，从而优化了感知觉处理的环境。2）针对人际同步干预：我们强化了其与核心认知神经机制的关联，具体补充了：该干预通过明确的节律线索，不仅能诱发行为同步，更能促进神经层面的同步活动。我们结合文献，说明了此类活动如何促进催产素、多巴胺等神经递质的分泌，并激活涉及社交、运动及语言的脑网络。更重要的是，我们明确指出，结构化的节律线索有助于提升 ASD 个体对时间信息的内部预期能力，这直接针对并可能弥补 ASD 个体在多感觉整合中存在的预测编码缺陷。3）理论整合：在总结部分，我们清晰地构建了两种干预措施协同作用的逻辑路径：从感觉统合训练的“改善低层次感觉输入与调节”，到人际同步干预的“优化中高层次感觉时间加工与认知模式”，形成了一个从神经生理到行为认知的完整、递进的干预理论框架。调整内容详见“4.1 感觉统合训练”第二段：“进一步分析感觉统合干预背后的作用机制。首先，干预课程结合秋千、弹跳、触摸各种材质的物品的形式，提供针对性的前庭、本体和触觉输入。这些感觉系统是大脑处理感觉信息的“基础感觉”(Camino-Alarcón et al., 2024).....发现他们在交流领域（表达、接受、书写）和社会化领域（人际关系、游戏和休闲时间）的功能均得到显著改善(Raditha et al.,

2023)。”及“3.2 人际同步干预”第二段、第三段:”进一步人际同步干预对 ASD 个体能力的改善机制，主要体现在以下几个方面：首先，通过节拍器等工具提供的明确节律线索，能够有效诱发个体在行为层面（如语气、发音、语调及肢体表达）的同步.....提供针对性解决方案，未来应在课程设计时应考虑将感觉统合与人际同步的结合，如在进行秋千、弹跳和触摸等感觉统合练习时增加音乐、节拍等节律性线索引导。”

（四）总结与展望部分

问题 1: 缺乏整合性讨论。结论主要重复前文描述，未体现“理论—实证—干预”的逻辑闭环。建议提炼关键机制线索，说明研究如何在理论、神经机制与干预之间形成闭环。

回应 1: 感谢评审老师的宝贵意见。讨论部分我们已经根据评审老师的建议做出调整，构建“ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知行为整合模型”（图 1），并以此为核心，系统地阐述了理论机制、实证发现与干预策略之间的内在联系。理论层面： 我们构建了一个从“低层次感觉输入”到“自下而上信息处理”，再到“行为与社会功能输出”的理论框架。该框架不仅整合了 ASD 个体在感觉处理、时间对齐、预测编码和注意定向等方面的核心认知理论，也明确了其背后潜在的神经生理基础（如神经唤醒、神经震荡、连接异常等）。实证层面： 在理论框架的每一环节，我们都引用了实证研究证据作为支撑。例如，通过引用脑成像与神经生理学研究，将行为上观察到的“绑定窗口拓宽”、“同步困难”等特征，与“神经网络激活与连接异常”、“预测编码障碍”等神经与认知机制直接关联，从而在理论与实证数据之间建立了坚实的桥梁。干预层面： 基于上述理论与实证所揭示的机制（如感知觉调节异常、神经同步困难），我们进一步提出了具有针对性的干预路径。具体而言调整内容如下：首先，模型涉及从低层次的感觉输入到中间感觉时间加工与对齐（含认知模型和神经生理过程分析）再到高层次的行为和社交表现。在中间的过程，我们重点分析认知模型与神经生理的相互作用机制，自主神经系统失调影响 ASD 的时间预测以及注意力资源分配，神经递质分泌影响他们的预测编码，而神经系统激活和连接异常影响他们的注意资源分配和社会定向，并绘制 ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知行为整合模型（图 1）。详见“5.总结与展望”1-4 段，已标红：“基于上述分析，本研究进一步梳理出 ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知行为整合模型（图 1），旨在系统性地阐述 ASD 个体在多感官时间整合障碍方面的潜在机制。.....如多模态的信息流（如语言、表情、语调、手势），对话节奏、共情回应、联合注意等社交环节中出现困难，并进一步侵蚀情景记忆的形成与社会性联想学习，构成了

ASD 核心社交障碍的感知基础(Wallace et al., 2020)”

其次，我们基于认知理论和神经机制的整合模型，分析感觉统合与人际同步干预对 ASD 多感觉时间整合的针对性改善，详见 5.总结与展望第五段：“针对 ASD 个体多感官时间整合中的认知行为及神经生理特征，本研究发现感觉统合干预能够在感知觉调节、神经唤醒与震荡、感觉处理等方面，改善 ASD 个体的时间知觉和时间绑定等能力，而人际同步干预能够在神经同步、脑神经激活、神经递质分泌、运动感知及时间预测等方面，改善 ASD 个体的时间感知、预测编码、神经生理异常等障碍。在感觉统合干预的基础上，增加人际同步（如音乐、节拍等节律线索）的要素，二者相互结合，优势互补，可能可以针对性帮助 ASD 个体改善多感觉时间整合的障碍。”

问题 2：表述新意不够突出。 结论停留在“ASD 存在多感觉整合障碍，应早期干预”，缺乏新意。建议需强调独特贡献，如“通过跨通道证据揭示多感官时间加工的异常”。

回应 2：感谢评审老师的宝贵意见。根据评审老师的建议，我们将全文的总结部分进一步简练，强调本文的独特贡献及实质性创新，强调本研究在 ASD 多感觉时间整合方面探讨发现，如发现 ASD 个体的多感觉时间整合存在时间绑定窗口拓宽、感知觉时间同步困难、社会性线索同步困难加剧三大表现特征，从认知模式与神经生理层面深入剖析了其背后潜在机制，并提出针对性干预方案，详见“5.总结与展望”第六段：“总体而言，本研究深入分析了 ASD 个体在多感觉时间整合方面的核心障碍及其认知与神经机制，并探讨了针对性的干预路径。主要贡献在于：首先，揭示了 ASD 个体存在时间绑定窗口拓宽、感知与社会线索同步困难等特征；其次，从认知模式与神经生理层面深入剖析了其背后潜在的社交定向、预测编码及神经激活连接异常等机制；最后，基于上述特征，论证了在 ASD 儿童早期进行感觉统合与人际同步干预对于改善多感觉时间整合的有效性。”

问题 3：图文一致性问题。 图 1 内容与主题“多感觉时间整合”不完全对应，更接近“多感觉整合”。建议调整图示核心概念与层级关系，确保与逻辑主线一致。

回应 3：感谢评审老师的宝贵意见。因全文整体结构已做重大调整，因此我们的图 1 已相应做出调整，绘制 ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知行为整合模型（图 1）。模型解释已在（四）总结与展望部分问题 1 中详细阐述。模型紧扣时间整合障碍中的核心概念，如时间绑定窗口，预测编码，自主神经系统等，以感觉输入——时间加工——社交行为表现这样的层级关系和逻辑主线梳理出 ASD 多感觉时间整合过程。调整详见“5.总结与展望”部分

的图 1。

（五）其它问题

问题 1：部分引用格式错误（如 H.Zhou et al., 2023），建议作者仔细校对，以确保学术规范和格式的统一性。

回应 1：感谢评审老师的宝贵意见。我们已根据老师的提出的问题对所有文献做了核对。首先,对正文中参考文献引用进行检查：如将原文中的（H.Zhou et al., 2023），（H-Y .Zhou et al., 2021）,修改为（Zhou et al., 2023），（Zhou et al., 2021）；将(Bianco et al., 2021)修改为(Del Bianco et al., 2021)；将(S.Danielet al., 2022)修改为：(Danielet al., 2022)等；

其次，我们还对文献列表进行逐一检查，1)将引用文献标题大小写调整，如：Baldwin, M. M., Xiao, Z., & Murray, A. (2022). Temporal synchrony in autism: a systematic review. *Review Journal of Autism and Developmental Disorders*, 9(4), 596–617.

Bloch, C., Vogeley, K., Georgescu, A. L., & Falter-Wagner, C. M. (2019). Intrapersonal synchrony as constituent of interpersonal synchrony and its relevance for autism spectrum disorder. *Frontiers in Robotics and AI*, 6, 73 等

2) 将著者超过 8 名的在第 6 名后改为“...,”如：Bierlich, A. M., Scheel, N. T., Traiger, L. S., Keeser, D., Tepest, R., Georgescu, A. L., ... Falter-Wagner, C. M. (2024). Neural mechanisms of social interaction perception: observing interpersonal synchrony modulates action observation network activation and is spared in autism. *Human Brain Mapping*, 45(15), e70052.

Cannon, J., Eldracher, E., Cardinaux, A., Irfan, F., Bungert, L., Li, C., ...Sinha, P. (2023). Rhythmic and interval-based temporal orienting in autism. *Autism Research*, 16(4), 772–782.等

3) 核对原论文补充卷号和页码等，如：Kuliński, W., & Nowicka, A. (2020). Effects of sensory integration therapy on selected fitness skills in autistic children. *Wiadomosci Lekarskie (Warsaw, Poland: 1960)*, 73(8), 1620–1625.

Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Richardson, M. J., Helt, M., Verbalis, A. D., Schmidt, R. C., & Fein, D. (2013). Autism and social disconnection in interpersonal rocking. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7. 4.等

4) 将正文参考文献与文献列表一一匹配核对，删除因修改后不再引用但文献管理软件未能识别的多余文献，如：Allman, M. J., & Falter, C. M. (2015). Abnormal timing and time perception in autism spectrum disorder? a review of the evidence. In Allman, M. J., & Vatakis, A.

(Eds.), *Time Distortions in Mind – Temporal Processing in Clinical Populations* (Chapter 2, pp.37–56). The Netherlands: Brill Academic Publishers

Sato, K. (2022). What is the mechanism of loudness hyperacusis in autism? *Medical Hypotheses*, 159, 110759. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2021.110759> 等

因修改位置涉及全文，做出修改的地方已标红。

文中的批注也供作者参考。

注：因提交给审稿老师的版本不设批注模式，现整理出所有批注出处及内容并作一一回应，正文取消批注模式。

批注 1：

原文 1.1 视听觉同步处，批注：建议题目改为视听觉同步障碍，下同

回应 1：感谢评审老师的宝贵意见。我们已经对此部分的所有标题及结构做了调整。以 ASD 多感觉时间整合的最主要的三个障碍特征为分类，分别为：1.1 时间绑定窗口拓宽、1.2 感知觉时间同步困难、1.3 社会性线索同步困难加剧。

批注 2：

原文 1.1 视听觉同步处，第一段：“进一步分析发现他们的视听同步障碍是由视觉时间敏锐度的降低，而非听觉或多感觉时间处理困难造”，

批注：此研究与文章主题相悖，应该有解释。

回应 2：感谢评审老师的宝贵意见。对于该证据我们已做进一步解释，分析视听异步背后原因可能时因为视觉回避引起的，其他类似的问题，我们都一一做了分析解释。详见“1.1 时间绑定窗口拓宽”第一段：“还有研究进一步发现，ASD 个体在视听时间顺序和同时性判断任务中的表现显著差于 TD 个体，这种障碍主要体现在视觉时间敏锐度的降低，而非听觉或多感觉时间处理困难，这可能是他们的普遍存在的视觉回避引起的，孤独症症状更高的 ASD 视觉时间敏感性更低(Zhou et al., 2021)”

批注 3：

原文 1.2 听觉—运动同步处，第一段：“但他们的运动模式存在异常，ASD 个体不太愿意与他人维持交流互动，而更愿意探索虚拟环境，可能是因为 ASD 存在社会动机不足和感官超载的问题(Zapata-Fonseca et al., 2018)。”

批注：与视听时间整合有什么关系呢？

回应 3：感谢评审老师的宝贵意见。此部分章节结构调整后，没有听觉—运动同步的分类。且对于此篇论文的实验证据，我们提取了与 ASD 个体多感觉时间同步更紧密的部分，在 1.2 感知觉时间同步困难，第二段处：“这表明 ASD 个体在适应不规则时间结构时需要动用更多的认知资源(Zapata-Fonseca et al., 2018)，”无关部分已删除。

批注 4：

原文 1.2 听觉—运动同步处，第二段:方面存在运动障碍(Faber et al., 2022)；在听觉敏感性 & 听觉信息处理方面存在异常(Jones et al., 2020; Sato, 2022)；在多感觉通道的整合方面也出现困难，这些因素共同影响 ASD 个体的听觉—运动同步表现。此外，运动形式和听觉刺激条件也会影响 ASD 个体的同步表现，如他们在连续运动任务上的计时准确性显著高于不连续运动任务，并且在有听觉反馈的任务中，其时间一致性显著高于无听觉反馈时(Williams et al., 2024)

批注：在每段的总结中，不是仅概述，而是需更多地对不同研究结果进行评价

回应 4：感谢评审老师的宝贵意见。结构调整后，此部分内容已删除，我们已经根据评审老师意见，在每个障碍特征背后我们都对研究证据进行评价分析与逻辑梳理。如在“1.1 时间绑定窗口拓宽”结尾处，我们总结：“综上所述，ASD 个体在多感官时间整合中表现出时间绑定窗口的普遍拓宽。进一步分析，时间敏感性降低、时间阈值偏高且感觉延迟可能是 ASD 个体时间绑定窗口拓宽常见的原因，这一现象在视听、视触觉整合任务中均得到反复验证。”

批注 5：

原文 1.3 视触觉同步处，第一段：“但 6 分钟后就能识别错觉找到真实手”

批注：反应延迟是困难的关键

回应 5：感谢评审老师的宝贵意见。我们已根据老师建议，对每个证据进行评价分析，此证据调整后的描述见 1.1 时间绑定窗口拓宽，第一段：“橡胶手错觉实验为此提供了直观证据：ASD 组最初无法识别错觉，但 6 分钟后就能识别错觉找到真实手，这种延迟反应反映了其即时时间整合窗口的异常(Cascio et al., 2012)。”

批注 6：

原文 2.2 神经机制，第三段：有研究通过外源性褪黑素干预，发现 ASD 儿童的睡眠时长和质量显著提升，孤独症症状也得到改善(Lalanne et al., 2021)，这提示褪黑素在调节 ASD 个体感觉时间整合中的潜在作用。

批注：？表明睡眠时长与感觉时间整合有关系？

回应 6：感谢评审老师的宝贵意见。此部分我们已经做了调整，原文部分证据，我们将文字描述更加聚焦时间整合，联系不紧密的证据删除，此证据内容已经删除。

批注 7：

原文 3.基于孤独症谱系障碍多感觉时间整合特征的干预启示 第一段：“节律线索”

批注：唐突

回应 7：感谢评审老师的宝贵意见。此处的“节律线索”确实显得唐突，我们调整为针对人际同步干预疗效（如增强亲社会行为、凝聚力以及协调互动等）的角度引出人际同步干预，调整内容详见“4.基于孤独症谱系障碍多感觉时间整合特征的干预启示”第一段：“基于 ASD 群体的多感觉时间整合表现以及认知神经作用机制特征，在感觉通道方面，可开展强调视觉、听觉及触觉等感知觉单通道和多通道整合的感觉统合训练课程(Camino-Alarcón et al., 2024)。在社交互动方面，可开展增强亲社会行为、凝聚力以及协调互动的人际同步干预课程。”

.....

审稿人 2 意见：

问题 1：论文的题目孤独症谱系障碍的多感觉时间整合及其认知神经机制，但文中内容还包含了一部分干预的内容，是否题目要做优化，以更好地体现内容？

回应 1：感谢评审老师的宝贵意见。根据评审老师建议我们将标题改为：“孤独症谱系障碍的多感觉时间整合：特征、机制与干预展望”。

问题 2：论文中关于多感觉时间整合的干预，显得比较单薄，这两种干预方法是否就是最有代表性的方法，需要阐述；

回应 2：感谢评审老师的宝贵意见。ASD 循证干预疗法很多，但是针对多感觉时间整合障碍，我们选取两个针对性较强的干预进行分析论述，感觉统合干预主要针对 ASD 的感觉整合问题，人际同步干预主要针对他们的感觉时间同步问题。且对于干预方案有效性背后的

理论机制我们也进行了详细调整分析，详见评审专家 1（三）干预启示问题 1。

问题 3:文本的语言表达还需要进一步完善，例如，1.5 部分，“将语音信号与相应的发音姿势进行时间绑定时出现困难”，其中时间绑定术语首次出现需要进行阐释，否则有的读者很难理解。类似于这样的表述都需要阐明清楚。

回应 3:感谢评审老师的宝贵意见。根据评审专家 1 的建议，我们已经在引言处增加时间绑定窗口的概念：“这个过程还涉及一个关键概念——时间绑定窗口（Temporal Binding Window, TBW）即个体将不同感觉信号判断为属于同一个事件所接受的最大时间间隔 (Gotow & Kobayakawa, 2023)”。此外我们也补充增加了多感觉整合的概念：“多感觉整合（Multimodal integration）指大脑将来自不同感官通道（如视觉、听觉、触觉等）的信息结合起来，形成统一、连贯的知觉体验的过程，涉及时间、空间、语义等多种特征的整合(Wallace et al., 2020)”，与“多感觉时间整合”进行区分。

.....

审稿人 3 意见:

该论文选题有一定的理论意义和现实价值。但该综述题目太大，内容非常宽泛，这导致该综述存在不少问题：不能很好的聚焦具体一些的科学问题；不能深层次分析该领域的实质性进展；各部分都有所涉及，但都比较浅显，未能深入分析；更倾向文献罗列，述多评少。建议作者找到该领域核心的科学问题，聚焦最主要具体的进展点，以具体科学问题为主线，深层次论证和剖析。

回应:感谢评审老师的宝贵意见。首先，我们针对评审老师提出的“聚焦”问题，对全文结构，实验证据及文字描述都进行修改和调整，更聚焦感觉整合的时间维度，详细修改说明见针对评审专家 1 提出的主要问题 1 的回复。如 1) 在引言处增加“多感觉整合”与“多感觉时间整合”概念的区别，进而引出“多感觉时间整合”过程中重要的概念“时间绑定窗口”。引言第二段论述更聚焦时间的维度，删除于时间整合相关性较小的证据。引言第三段基于 ASD 的多感觉时间整合障碍表现以及当前研究现状，引出时间整合作为多感觉整合的核心环节，其精确性直接影响个体对外部时间的整体感知和行为反应。2) 原文 1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合表现中的 1.1 视听觉同步、1.2 听觉—运动同步、1.3 视触觉同步、1.4 视觉—运动同步、1.5 语言—非语言信息同步这几部分的小标题删除，涉及的实验证据我们做了重要调整。调整后更侧重时间的维度，从社会性发展的角度归纳出三个主要特征：时间绑定窗

口拓宽、感知时间同步困难和社会性线索同步困难加剧，并以这三个特征作为小标题进行讨论分析，揭示 ASD 个体多感觉时间整合的规律。详见引言和 1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征表现全部内容，已标红。

其次，针对评审老师提出的“不能深层次分析该领域的实质性进展”问题，我们对原实验证据进行深入分析及评论，并总结出规律性进展，详细修改说明见评审专家 1 提出的主体部分，问题 2、标题不够突出、增加评述的总结段中的回应。例如，对于 Cascio 等人(2012)的橡胶手错觉研究，修改后我们不再仅仅描述“ASD 组延迟识别错觉”的现象，而是将其阐释为“反映了其即时时间整合窗口的异常”，从而将具体实验发现与核心理论概念“时间绑定窗口”直接关联。详见”1.1 时间绑定窗口拓宽”第一段，已标红。又如在“干预措施”部分，调整后着重补充并深化了关于感觉统合训练和人际同步干预其背后神经与认知机制的理论阐述。详见 4.1 感觉统合训练第二段及 4.2 人际同步干预第二、第三段。

再者，针对老师提出的：“更倾向文献罗列，述多评少”问题，我们也进行了全文调整，每一个实验证据文献重新梳理分析，找出共性与差异，增加评论和分析总结，详见针对评审专家 1 主体部分的修改回应。如在分析“时间绑定窗口拓宽”时，我们不仅报告了 Ainsworth & Bertone (2023)关于 ASD 整体时间敏感性降低的发现，更深入对比并探讨了 Zhou et al. (2021)提出的特异性机制，指出其障碍可能“主要体现在视觉时间敏锐度的降低，而这可能是由他们普遍存在的视觉回避引起的”。这种对共性与差异的讨论，显著增强了对实质性问题的剖析深度。详见”1.1 时间绑定窗口拓宽”第一段，已标红。

总体而言，我们根据以上几位评审老师的意见，对全文进行了根本性的重构与深化。我们明确了本文的核心科学问题：ASD 个体社交沟通障碍的感知根源，是否与其在多感觉信息时间维度上进行精确整合的能力受损有关？并将分析聚焦于“时间整合”这一具体维度。我们摒弃了按感觉通道（视听、听觉-运动等）罗列文献的浅显结构，创新性地将所有实证证据提炼、归纳为三个核心特征表现：行为表征上，ASD 个体存在时间绑定窗口的普遍拓宽（即容忍异步的间隔更长）。加工缺陷上，ASD 个体在动态互动中表现出感知觉时间同步困难（即内部计时不稳定）。社会功能链接上，ASD 个体的上述障碍在社会性线索同步中加剧，并直接破坏人际互动的节奏。随后，在认知层面，我们引入预测编码理论，阐释 ASD 个体如何因无法生成和更新精确的时间先验模型，导致其绑定窗口拓宽和反应变异性增高。在神经层面，我们系统梳理了从自主神经失调（非最优唤醒基线）、神经递质紊乱（节律感知异常）到脑网络连接异常（跨脑区信息协同失败）的证据链，说明了时间整合障碍的生理基础。最后，我们通过构建一个“ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知行为整合模型”（图

1) , 将上述所有分析整合到一个清晰的框架中。该模型不仅系统描绘了从低层感觉输入到高层社交障碍的完整路径, 更使得我们提出的干预方案(感觉统合与人际同步) 不再是孤立的建议, 而是基于前述机制分析的、有针对性的逻辑推论。最终形成“理论-实证-干预”的逻辑闭环。

第二轮

审稿人 1 意见:

一、 文章结构、逻辑与提炼问题

问题 1: 论文主体结构经过重组, 但综述论文自检报告未同步更新, 与当前稿件不匹配, 需整体审视并重新撰写。

回应 1: 感谢审稿老师宝贵意见。我们根据您的建议, 我们根据调整后的论文内容, 修改了自检报告, 具体修改如下:

1) 在问题 1 解决什么科学问题处, 因主要结构变动较大的是 1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征, 根据调整后的结构, 将第一句改为: “本文通过探讨孤独症个体多感觉时间整合异常(表现为基础时间窗口拓宽、动态协调困难及社交线索整合障碍)。”已标紫色。

2) 在问题 2 如何解决处, 因为 1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征、2.神经生理异常 以及 3.认知模式缺陷三个章节的讨论方向均做了较大调整。因此将第一及二句改为: “首先, 本文充分分析了孤独症个体多感觉通道的时间整合表现特征(表现为基础时间窗口拓宽、动态协调困难及社交线索整合障碍)。接着, 从神经认知层面展开探讨: 在神经生理的层面上, 他们在进行多感觉时间整合时出现自主神经系统、神经递质分泌、神经系统激活与连接的紊乱与异常; 在认知表现上, 他们在对感觉信息进行输入、输出与整合时, 出现预测编码困难、非典型注意模式的现象。”已标紫色。

3) 在问题 3 创新点处, 因为经过两轮审稿老师的意见以及修改调整, 论文整体讨论的深入程度和逻辑性有了很大变化, 我们做了整体修改。在自检报告问题 3 处, 已标紫色: “1. 与现有研究相比, 本文首次明确将多感觉时间整合(特别是基础时间窗口异常、动态时间协调困难及社会线索整合障碍)确立为核心科学问题.....其理论基础应从改善泛化的感觉处理, 转向专门重塑时间窗口、训练动态时间协调能力及利用时间性社会线索。这为开发下一代更具个体适应性、以“时间校准”为核心目标的精准干预方案提供了全新的理论依据与实践方向。”

4) 在问题 6 参考文献统计处, 对所有文献进行计算统计, 并修改表格, 调整如下, 在自检报告问题 6 处已标紫色:

		文献年代		
		2020~2025	2015~2019	2015 年以前
文献类型	理论性综述	21 (16.54%)	10 (7.87%)	13 (10.24%)
	实证研究报告	52 (40.94%)	16 (12.60%)	15 (11.81%)

5) 在问题 8 摘要实质性内容处, 补充说明本文摘要在研究对象, 研究问题、研究结果及未来研究方向等实质性的内容, 具体已在问题 8 处标紫色: “回应: 摘要具有实质性内容, 并非空话套话。具体体现在以下几个方面.....指出了未来研究的明确路径: 建议未来研究应提高生态效度, 并开发更具适应性的干预课程, 方向具体。”

问题 2: 孤独症谱系障碍(Autism spectrum disorder, ASD)是一种广泛性神经发育障碍, 主要症状特征为社交障碍、限制性兴趣和刻板行为(American Psychiatric Association, 2013), 该放在引言最前面, 而不是放在第二段。从逻辑上来讲, 首先应讲的孤独症儿童的核心特征及再讲时间整合有关内容。

回应 2: 感谢审稿老师宝贵意见。我们根据您的建议, 对引言部分的结构和逻辑顺序进行了调整和优化。具体修改如下:

(1) 逻辑顺序调整: 我们根据审稿老师的意见, 首先在将 ASD 的定义放在第一段开头, 并增加新的文献证据, 直接点明 ASD 个体在复杂动态社交环境中的适应困难与感知神经基础差异及时间调节困难相关, 进一步强调了多感觉整合(特别是时间整合)作为连接低阶感知异常与高阶社交障碍的关键桥梁作用, 从而自然引出本文的核心焦点——多感觉时间整合及其关键概念时间绑定窗口(TBW)。详见引言第一段, 已标紫色: “孤独症谱系障碍(Autism spectrum disorder, ASD)是一种广泛性神经发育障碍, 主要症状特征为社交障碍、限制性兴趣和刻板行为(American Psychiatric Association, 2013).....其中, 在跨通道信息整合上的特异性, 即多感觉整合功能的异常, 被认为是连接低阶感知与高阶社交障碍的关键因素(Baum et al., 2015)”。

(2) 论述逻辑优化: 在介绍完多感觉时间整合、时间绑定窗口等概念后, 直接引出 ASD 在各个维度上(感觉通道、时间模式)的时间整合困难表现。详见引言第二段, 因只是更换内容结构顺序, 没有调整文字内容, 仍用红色字体: “具体而言, ASD 个体在多个时间尺度(毫秒、节奏和昼夜节律)上存在时间信息感知与加工困难, 并在跨通道的感觉整合(如视

听觉、听觉-运动、视触觉、视觉-运动及语言-非语言信号）中存在特异性，导致他们在复杂的多感觉环境中出现时间整合困难.....此外，在感觉—运动协调方面，ASD 个体表现出时间和空间节律的整合困难，干扰其对动作时机的准确控制(Danielet al., 2022)。”

问题 3：第 2 点认知模式缺陷与第 3 点神经生理异常内容位置对调，更符合逻辑。

回应 3：感谢审稿老师宝贵意见。我们已将第 2 点认知模式缺陷与第 3 点神经生理异常内容位置对调，且根据后面问题“三、第二部分：认知模式机制的层级不清及重复问题”及问题“四、第三部分：神经生理机制的主线不足、材料堆叠”中的具体意见对整体内容进行全面修改和调整，详见调整后论文：“2.神经生理异常 大脑和身体以恰当的方式接收外部环境的可预测节律信息，并且对环境刺激进行有效的感知和同步互动，是成功社交的基础。.....3. 认知模式缺陷 ASD 个体普遍存在独特的认知模式，这种认知模式又反过来加剧其核心障碍的表现。研究表明，ASD 个体普遍存在预测编码障碍、认知灵活性不足及认知加工偏差等基础性认知障碍(Kasten et al., 2023).....而注意资源分配失调则削弱了在实时加工中对多感觉时间信息进行绑定与同步的计算资源(Huntley et al., 2023; Stevenson et al., 2014)。这两者共同作用于预测编码过程，加剧了 ASD 个体在多感觉时间整合中的核心困难”，修改部分已标紫色。

问题 4：研究问题的核心问题仍不够明确，部分内容逻辑链条不够严密

(1) 虽然引言新增了“多感觉整合”与“多感觉时间整合”的区分，并引入了 TBW 概念，但文中仍难以明确本综述究竟聚焦哪一项核心科学问题。目前引言包含概念解释、ASD 的多感觉时间整合困难的基本背景、时间整合的重要性，但缺少一句话明确指出：本综述的核心是分析“哪些机制导致 ASD 在时间维度上的整合受损”。建议可以在引言末段增加明确的问题指向，如“本综述旨在系统总结 ASD 个体在多感觉时间整合上的行为特征，并探讨其潜在的认知与神经机制，从而明确时间加工障碍在 ASD 社交困难中的作用路径。”

回应 4 (1)：感谢审稿老师宝贵意见。我们采纳了您的建议，在“调整后论文”（即修改稿）引言末段，对研究目的句进行了关键性补充和强化。在前言最后一段增加以下内容：“因此，本综述旨在系统总结 ASD 个体在多感觉时间整合上的行为特征，探讨其潜在的认知与神经机制，从而明确时间加工障碍在 ASD 社交困难中的作用路径，并提出针对性干预方案。”修改内容已标紫色。

(2) 行为特征的分类逻辑仍需进一步论证,“TBW 拓宽”是否涵盖“同步困难”,是否存在概念重叠?例如:在 1.2 部分的“感知觉时间同步困难”中讨论的变异性增加、同步精度下降,本质上也与 TBW 扩展有关。建议明确两者的界限。三类行为特征的因果和层级关系未明确阐述,建议在三类特征开头加入一段“分类依据”,说明从基础加工到社会互动的递进逻辑。

回应 4 (2): 感谢审稿老师宝贵意见。针对老师提出的行为特征分类的界限模糊与逻辑关系不明,我们做了两个方面的调整,第一、明确三个特征的概念界限,第二、明确阐述三个行为特征之间的因果或层级关系。具体修改如下:

(1) 重命名三类特征,以明确其层次与区别: 1.1 基础时间窗口异常(原“时间绑定窗口拓宽”): 我们首先明确其定位为“在多感官整合的基础层面”。导言句强调,此部分聚焦于个体判断跨模态刺激是否属于同一事件的基本时间分辨能力,其核心测量指标是时间绑定窗口(TBW)。1.2 动态时间协调困难(原“感知觉时间同步困难”): 我们明确其定位为“在需要知觉和预测来协调动作以匹配外部时间流的动态协调层面”。导言句指出,此部分探讨的是在持续变化的时间流中,主动调整自身行为(如动作节律)以与外部事件保持同步的能力。1.3 社会线索整合障碍(原“社会性线索同步困难加剧”): 我们明确其定位为,前两种障碍“在社交环境特有压力下被协同放大的结果”。导言句强调,此部分并非一个独立的缺陷,而是基础异常在复杂、非结构化社会情境中的表现,并最终影响高级认知(如言语感知)。这明确了其作为前两者在应用层面的延伸和综合体现的层级关系。详见:“1.1 基础时间窗口异常 ASD 个体在多感官整合的基础层面,表现为用于判断跨模态刺激是否属于同一事件的时间绑定窗口拓宽。这反映了个体处理多感觉时间关系的基本能力。”、“1.2 动态时间协调困难 ASD 个体在需要知觉和预测来协调动作以匹配外部时间流的动态协调层面表现出困难。这种困难可能主要是源于他们在时间知觉和知觉计时上存在的障碍(Cannon et al., 2024).”及“1.3 社会线索整合障碍 ASD 个体的多感官时间整合障碍在涉及社会性信息或复杂社交情境时表现得尤为突出。这并非独立缺陷,而是其基础时间窗口异常和动态时间协调困难在社交环境特有压力下被协同放大的结果,并最终导致高级认知功能(如言语感知)的缺陷(Cannon et al., 2024).”,修改已标紫色。

(2) 调整内容组织以契合新逻辑: 1)在 1.1 节,我们强化了 TBW 作为基础感知指标的概念,并专门讨论了“时间处理是多感官整合的关键线索”以及“TBW 受刺激复杂性影响”等点,以夯实其作为“基础”特征的论述,详见 1.1 节标紫色部分:“ASD 个体在多感官整合的基础层面,表现为用于判断跨模态刺激是否属于同一事件的时间绑定窗口拓宽。这反映了

个体处理多感觉时间关系的基本能力.....其将视听信息整合成一个统一知觉(如麦格克效应)的能力就越弱(Stevenson et al., 2014)。这一特征意味着他们在知觉层面上对跨通道信息的时间对齐存在障碍,这可能构成更高层次时间协调困难的底层基础。”2)在 1.2 节,我们更清晰地区分了“时间感知障碍”和“内部计时噪音”两个子点,并强调后者是导致动态协调困难的核心,详见 1.2 节标紫色部分:“ASD 个体在需要知觉和预测来协调动作以匹配外部时间流的动态协调层面表现出困难。这种困难可能主要是源于他们在时间知觉和知觉计时上存在的障碍(Cannon et al., 2024)。首先,ASD 个体在整合多感觉通道的时间信息上存在障碍.....整体上,这类时间协调能力的变异不仅直接影响动作执行的流畅性,还可能破坏人际互动中依赖精准时序的社交协调机制(如对话轮转、共同注意),进而对更高层级的社交认知功能产生级联式负面影响(Bowsher-Murray et al., 2023)。”3)在 1.3 节,我们保持了原有三个子点(社会性刺激加工困难、任务结构影响、过滤无关信息困难),但因其定位已明确为综合性的情境表现,逻辑上更为顺畅。

(3) 优化总结段落: 在第三部分(1.3)的结尾,我们重写了总结段落,明确指出了三个特征的关联性:“基础感知方面,表现为时间绑定窗口拓宽.....在动态时间协调方面,反映了其时间知觉和内部计时的不稳定性.....前两者的障碍在复杂社会情境中,使得 ASD 个体的适应过程更为艰难”。详见 1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征,最后一段,已标紫色:“综上所述,ASD 个体在多感觉时间整合中表现出三个相互关联的核心行为特征:在基础感知方面,表现为时间绑定窗口拓宽,影响对跨模态事件同时性的基本判断,且受刺激复杂度影响(Zhou et al., 2018).....也使其在同时处理感官信息与语言、手势、表情等多重信号时,面临的同步困难更加显著(Bowsher-Murray et al., 2022)。”

(3) 在各段的总结上述偏多,提炼偏少。

回应 4 (3): 感谢审稿老师宝贵意见。根据审稿老师意见,我们已经对全文各章节中的总结部分做了调整,加强提炼与分析,主要涉及以下章节: 1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征中的 1.1 基础时间窗口异常及 1.2 动态时间协调困难部分; 2.神经生理异常 中的 2.1 自主神经系统失调、2.2 神经递质调节障碍及 2.3 神经系统激活与连接异常; 3.认知模式缺陷 中的 3.2 非典型注意模式; 4.基于孤独症谱系障碍多感觉时间整合特征的干预启示中的 4.1 感觉统合治疗及 4.2 人际同步干预。

➤ 如在 1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征中的 1.1 基础时间窗口异常最后一段,进行了完全重写: 删除平铺直叙的“综述式”总结: 删除了原稿结尾段中诸如“进一步分

析，时间敏感性降低、时间阈值偏高且感觉延迟可能是……常见的原因”、“这一现象在视听、视触觉整合任务中均得到反复验证”等侧重于归纳和描述研究发现的句子。修改后，开篇即用一句话高度概括了本小节的核心结论：“ASD 个体在基础的多感觉同时性判断上，多存在时间绑定窗口拓宽的倾向。”随后，不再重复描述原因或列举现象，而是立即转向阐述这一特征的功能性后果：“此外，他们在多感官时间处理上的敏锐度越低（即 TBW 越大），其将视听信息整合成一个统一知觉（如麦格克效应）的能力就越弱(Stevenson et al., 2014)。”详见 1.1 基础时间窗口异常最后一段，已标紫色：“总体而言，ASD 个体在基础的多感觉同时性判断上，多存在时间绑定窗口拓宽的倾向……这一特征意味着他们在知觉层面上对跨通道信息的时间对齐存在障碍，这可能构成更高层次时间协调困难的底层基础。”

➤ 又如在 1.2 动态时间协调困难最后一段进行了精简和强化，核心修改体现在：

1) 删除并整合冗余描述，直接提炼核心特征：原稿总结段开篇为“感知同步困难是……突出特征。这一特征在从简单的感官通道同步到复杂的协调互动中均有明显体现(Baldwin et al., 2022)。”这属于对前文已详细论述内容的复述。修改稿开篇直接以更高概括性的语句点明本小节的核心定位：“总结而言，ASD 个体的动态时间协调困难是其多感官时间处理中的核心特征，贯穿从基础时间知觉到复杂感觉运动同步的多个层面(Baldwin et al., 2022)。”这句话更精炼地定义了本节所讨论问题的性质与范围。2) 将“任务调节作用”的讨论融入段落主体，避免其成为孤立的“补充说明”：原稿将“任务类型的影响”作为总结段之前一个独立的“值得注意的是”段落，结构略显松散。修改稿将其整合进总结段，并用“值得注意的是，其协调表现受到任务特性的调节……”来引导，使“研究发现”与后面的“干预启示”的论述更连贯。详见 1.2 动态时间协调困难最后一段，已标紫色：“总结而言，ASD 个体的动态时间协调困难是其多感官时间处理中的核心特征……进而对更高层级的社交认知功能产生级联式负面影响(Bowsher-Murray et al., 2023)。”

全文均进行相应调整，这里不再一一例举。

二、第一部分：多感觉时间整合特征的概念边界不清

问题 1：所提出的三个特征（TBW 拓宽、感知同步困难、社会性线索同步困难）内部边界模糊，内容存在明显交叉，尚未体现出时间整合机制的不同层次。

回应 1：感谢审稿老师宝贵意见。此问题与总体评价的问题 4 中的第（2）点类似，并已在前面做详细回应，这里再做简要修改说明。我们总体上对三个行为特征进行重新命名、

增加层级定位导言句，以及调整论述焦点等方面的调整。具体如下：1.1 基础时间窗口异常（原“时间绑定窗口拓宽”）：我们将其明确界定为“在多感官整合的基础层面”的障碍。该节聚焦于个体判断跨模态刺激 是否属于同一事件的基本时间分辨能力，其核心是“时间绑定窗口”这一静态的知觉敏感度指标。这对应了时间整合的“何时发生”层面；1.2 动态时间协调困难（原“感知觉时间同步困难”）：我们将其重新定位为“在需要知觉和预测来协调动作以匹配外部时间流的动态协调层面”的困难。本节探讨的是在持续变化的时间流中，主动“如何持续跟随”，即调整自身行为节律以与外部事件保持动态同步的能力。我们明确指出，这种困难主要源于时间知觉和内部计时系统的不稳定性，从而在概念和任务范式上与 1.1 的基础感知缺陷区分开来；1.3 社会线索整合障碍（原“社会性线索同步困难加剧”）：我们明确其并非独立的初级缺陷，而是“其基础时间窗口异常和动态时间协调困难在社交环境特有压力下被协同放大的结果”。这一定位将其确立为前两种基础障碍在复杂、非结构化社会情境中的综合表现和应用延伸，体现了从实验室简单任务到真实世界复杂交互的层次递进。详见：“1.1 基础时间窗口异常 ASD 个体在多感官整合的基础层面，表现为用于判断跨模态刺激是否属于同一事件的时间绑定窗口拓宽。这反映了个体处理多感觉时间关系的基本能力。”、“1.2 动态时间协调困难 ASD 个体在需要知觉和预测来协调动作以匹配外部时间流的动态协调层面表现出困难。这种困难可能主要是源于他们在时间知觉和知觉计时上存在的障碍(Cannon et al., 2024)。”及“1.3 社会线索整合障碍 ASD 个体的多感官时间整合障碍在涉及社会性信息或复杂社交情境时表现得尤为突出。这并非独立缺陷，而是其基础时间窗口异常和动态时间协调困难在社交环境特有压力下被协同放大的结果，并最终导致高级认知功能（如言语感知）的缺陷(Cannon et al., 2024)。”，修改已标紫色。

问题 2：尤其是“社会性线索同步困难”部分，尚未充分阐释为何社会性任务比非社会性任务更依赖时间同步，也未说明 ASD 的时间加工缺陷如何在社会情境下被放大。

回应 2：感谢审稿老师宝贵意见。经过进一步文献检索，我们确实发现当前并没有足够的证据支持“社会性线索同步困难加剧”的论点，于是将改章节的标题改为：“社会线索整合障碍”，并围绕新标题进一步调整论述内容，具体如下：1）在第一段开头对该行为特征进行层级分类定位，表明其并非独立的初级缺陷，而是“其基础时间窗口异常和动态时间协调困难在社交环境特有压力下被协同放大的结果”。详见 1.3 社会线索整合障碍第一段标紫色部分：“ASD 个体的多感官时间整合障碍在涉及社会性信息或复杂社交情境时表现得尤为突出。这并非独立缺陷，而是其基础时间窗口异常和动态时间协调困难在社交环境特有压力下

被协同放大的结果，并最终导致高级认知功能（如言语感知）的缺陷(Cannon et al., 2024)。”2）在 1.3 社会线索整合障碍最后一段，进一步加强提炼与分析。原稿总结采用的是对三个特征的并列式罗列（“时间绑定窗口的普遍拓宽……感知时间同步困难……以及社会性线索同步困难加剧……”）。修改稿采用了逻辑整合与递进的表述方式：“在基础感知方面，表现为时间绑定窗口拓宽……在动态时间协调方面，反映了其时间知觉和内部计时的不稳定性……前两者的障碍在复杂社会情境中，使得 ASD 个体的适应过程更为艰难……”，概括了前两个小节的核心发现，更关键地是明确指出了“社会线索整合障碍”与前两者之间的关系（“使得”），加强整体逻辑，修改部分已标紫色。

问题 3：1.1 节在论证上存在逻辑摇摆：前段强调 TBW“普遍拓宽”，中段引入“不一致结果”，最后在小结中又回到“普遍拓宽”。建议将“不一致结果—潜在解释”单独组织成独立段落，避免打断主论证链条。

回应 3：感谢审稿老师宝贵意见。原稿将不一致结果夹杂在主要证据中，确实削弱了论证的力度和清晰度。根据审稿老师意见，我们重组了 1.1 节的结构和内容：1)集中呈现支持性证据：首先，我们连续引用了多项关键研究（Foss-Feig et al., 2010; Zhou et al., 2018; Ainsworth & Bertone, 2023; Purpura et al., 2024; Cascio et al., 2012），从不同感官模态（视听、视触觉）和不同实验范式（错觉、同步判断）出发，集中、连贯地论证 TBW 拓宽这一现象的存在及其普遍性。2)插入理论分析与衔接：在主要证据之后，我们新增了“时间处理是多感官整合的关键线索”和“时间绑定窗口受刺激复杂性的影响”两个段落。前者从理论上夯实 TBW 的重要性，后者则巧妙地将 TBW 的“可变性”作为一种规律（随复杂性增大）引出，并为过渡到社会性任务困难做铺垫，这增强了论述的深度和逻辑性。3)后置并整合不一致结果的讨论：我们将所有关于研究异质性的内容，包括年龄差异（Ainsworth & Bertone, 2023）、成人研究无差异（Weiland et al., 2023; Borgolte et al., 2021）等，整合并后置为一个独立的段落：“然而，关于 TBW 拓宽的结论存在一定的研究异质性……”。该段落明确指出异质性可能受年龄、任务范式、测量方法等因素影响，并以“然而，这些影响因素的存在，并不否定 TBW 拓宽作为 ASD 潜在重要特征的价值，而是提示其表现具有条件性。”作为结尾。具体调整详见 1.1 基础时间窗口异常 1-4 段标紫色部分：“ASD 个体在多感官整合的基础层面，表现为用于判断跨模态刺激是否属于同一事件的时间绑定窗口拓宽。这反映了个体处理多感觉时间关系的基本能力……这一特征意味着他们在知觉层面上对跨通道信息的时间对齐存在障碍，这可能构成更高层次时间协调困难的底层基础。”

问题 4: 存在与主题关联较弱的跨障碍比较（如阅读障碍、精神分裂症、婴儿期语言发展），但未交代将其纳入讨论的目的，反而削弱 ASD 特异性。

回应 4: 感谢审稿老师宝贵意见。论文中出现其他神经发育障碍的对比，确实显得突兀，且未能服务于明确的论述目的，反而可能稀释了 ASD 的特异性。在修改稿中，我们做出了如下处理：1）直接删除无关比较：我们完全删除了原稿中提及的“阅读障碍(Francisco et al., 2017)和精神分裂症(Zvyagintsev et al., 2017)中均有发现”以及“婴儿期的视听同步水平能够预测其未来的语言能力发展(Suri et al., 2023)”等内容。2）聚焦 ASD 核心发现：修改后的 1.1 节，所有论述和引用的研究都紧密围绕 ASD 群体本身在 TBW 上的表现展开，包括其拓宽的证据、可能的原因（如视觉依赖减少）、影响因素（刺激复杂性、年龄等）。这确保了内容的纯粹性和针对性。详细修改内容见 1.1 基础时间窗口异常 1-4 段标紫色部分：“ASD 个体在多感官整合的基础层面，表现为用于判断跨模态刺激是否属于同一事件的时间绑定窗口拓宽。这反映了个体处理多感觉时间关系的基本能力.....这一特征意味着他们在知觉层面对跨通道信息的时间对齐存在障碍，这可能构成更高层次时间协调困难的底层基础。”

三、第二部分：认知模式机制的层级不清及重复问题

问题 1: 本部分标题为“认知模式缺陷”，但三小节的层级与抽象程度差异显著：2.1 是高层次理论框架（预测编码）；2.2、2.3 则是行为表现（社交注意与资源分配）的描述。需明确三者是否是并列机制，或后两者是否为预测编码障碍的下位机制，否则章节之间显得“并列但互相嵌套”。

回应 1: 感谢审稿老师宝贵意见。原稿将三个机制平行排列，确实未能阐明其内在的逻辑关系。在修改稿中，我们进行了进一步结构调整：1）重构章节结构：我们确定“预测编码障碍”是本部分解释 ASD 多感觉时间整合行为特征的核心理论框架和根本认知机制。因此，在修改稿中将其保留并强化为 3.1 节。原“社交定向困难”与“注意资源分配异常”并非与“预测编码”并列的独立认知机制，而是影响预测编码过程效能的关键输入/加工条件，即“非典型注意模式”。因此，在修改稿中，我们将二者整合并重组为一个大节：“3.2 非典型注意模式”，并下设“3.2.1 社交注意定向异常”和“3.2.2 注意资源分配失调”两个小节。2）阐明逻辑关系：在 3.2 节的开头，我们新增了明确的导言句：“上述预测编码的核心障碍（弱先验与预测误差处理异常），还受到 ASD 个体普遍存在的非典型注意模式的影响与作用。这种注意模式通过影响时间先验的构建质量与实时时间加工的计算资源，加剧了其在多感觉时间整合中的困难。”这一论述表明：“非典型注意模式”是“影响”和“加剧”“预测编码障碍”

表现的重要因素。两者并非并列关系，而是“核心认知机制”与“影响该机制的关键因素”之间的
主从关系。这解决了原稿“并列但互相嵌套”的逻辑混乱问题，建立了从“核心计算机制”
（预测编码）到“重要影响因素”（注意模式）的清晰层级。修改详见 3.认知模式缺陷部分各
章节中标紫色部分：“3.1 预测编码障碍预测编码（Predictive Coding）框架认为，大脑是一个
“贝叶斯推理机器”，不断地基于先验经验生成预测，并通过将感觉输入与预测进行比较所
产生的“预测误差”来优化内部模型(Arthur et al., 2023).....而注意资源分配失调则削弱了在实
时加工中对多感觉时间信息进行绑定与同步的计算资源(Huntley et al., 2023; Stevenson et al.,
2014)。这两者共同作用于预测编码过程，加剧了 ASD 个体在多感觉时间整合中的核心困难。”

问题 2： 2.1 节中预测编码理论介绍较完整，但仍停留在概念映射，与具体行为指标（TBW、
同步误差、计时噪音）的对应关系不足。建议明确说明：哪些行为范式体现“先验不足”；哪
些范式体现“预测误差精度异常”。

回应 2：感谢审稿老师宝贵意见。在修改稿的 3.1 节，我们着重加强了理论（预测编码
障碍的两个方面）与第一部分总结的行为特征（时间绑定窗口拓宽、内部计时噪音与同步困
难）之间的具体对应和因果解释：1)明确“弱先验”与“时间绑定窗口拓宽”的对应：在阐述“弱
先验”部分，我们明确指出，由于难以形成和利用精确的时间先验来预测事件（如利用节律
结构预测未来时间点、对他人动作预测不足），ASD 个体在判断跨模态刺激是否同源时，
就需要更大的时间容错范围。2)明确“HIPPEA”与“内部计时噪音/同步困难”的对应：在阐述
“HIPPEA”假说时，我们明确指出，在时间维度上，这种预测误差处理的不灵活性“直接导
致了内部计时的极不稳定”。随后，我们结合具体研究，说明这种不稳定性在行为上的表现：
在时间结构稳定时，表现可能正常；但在时间结构波动时，会高估环境波动、模型更新缓慢、
运动计划反应延迟。3)在章节总结中强化整合：在 3.1 节的总结段落，我们再次强调：“这两
者共同作用，从计算层面直接造就了行为上可观测的‘时间绑定窗口拓宽’和‘感知时间同步困
难’。”使本节的理论阐释明确服务于解释前文的行为特征，强化了全文的逻辑连贯性。修
改详见 3.1 预测编码障碍标紫色部分：“首先，ASD 个体先验薄弱与僵化导致时间预期模糊
与窗口拓宽。根据“弱先验”假说，ASD 个体的感知更受即时感官输入支配，而自上而下的
预测影响减弱(Pellicano & Burr, 2012)。在时间领域，这表现为难以形成和利用精确的时间先
验来预测未来事件。例如，ASD 被试难以利用先前的节律结构来预测未来事件发生的确切
时间点(Rapaport & Sowman, 2024).....ASD 个体的注意缺陷和感官失调进一步影响其多感觉
通道信息反馈回路的形成，而对感觉信息的错误监控以及缓慢的更新共同影响了 ASD 个体

的感觉同步与整合表现(Bowsher-Murray et al., 2022; Kasten et al., 2023; Purpura et al., 2024), 并最终导致在动态、不可预测的感知觉和社交互动中出现严重的时间同步困难。”

问题 3: 2.2 节大量行为描述与 1.3 节重复（如眼动、手势-语言整合结果），应在本节减少行为呈现，转而强调其作为输入采样策略如何限制时间先验构建。

回应 3: 感谢审稿老师宝贵意见。修改说明与回应：在原稿的“社交定向”部分，确实复述了许多已在第一部分“社会线索整合障碍”中描述过的行为现象。修改稿（3.2.1 社交注意定向异常）做了如下调整：

1) 从“描述行为表现”到“阐明认知影响”。我们大幅删减了对于 ASD 个体具体眼动模式（如看哪里、看多久）的细节描述，以及对手势-语言整合具体困难的重述。取而代之的是，我们将论述的核心锁定在“这种注意模式如何作为一种低效的输入采样策略，影响时间先验构建”这一机制性问题上。2) 强化机制性论述：开篇即点明：“构建可靠的时间先验需要从环境尤其是社会互动中持续、稳定地提取时间统计规律。然而，ASD 个体在社会定向中存在异常……”在指出其注意模式“碎片化与不稳定”后，立即阐明后果：“使其难以追踪和预测动态社交刺激中精确的时间结构，例如对话中音节起始与唇形变化之间的微妙时间关系。”进一步，引入“注意维持与转移困难”的研究，并明确指出其影响：“直接限制了高质量时间先验的形成。”3) 最后，在本节总结中升华：“这些证据共同表明，非典型的社交注意定向作为一种低效的输入采样策略，从根本上削弱了 ASD 个体构建精确时间先验的能力，进而影响其在多感觉整合任务中的表现。”，修改详见 3.2.1 社交注意定向异常中标紫色部分：“构建可靠的时间先验需要从环境尤其是社会互动中持续、稳定地提取时间统计规律。然而，ASD 个体在社会定向中存在异常，表现为对社会性线索（如眼部与嘴部区域）的注视模式呈现碎片化与不稳定特征(Avni et al., 2020)……这些证据共同表明，非典型的社交注意定向作为一种低效的输入采样策略，削弱了 ASD 个体构建精确时间先验的能力，进而影响其在多感觉整合任务中的表现(McNaughton & Redcay, 2020)。”

四、第三部分：神经生理机制的主线不足、材料堆叠

问题 1: 本节引言提出“大脑-身体-环境的时间动态同步”为总框架，但各小节（ANS、神经递质、脑网络）并未围绕该框架建立内在逻辑主线，呈现并列罗列状态。

回应 1: 感谢审稿老师宝贵意见。我们根据审稿老师意见将原罗列并列的描述文字重新整理优化，进一步提炼共性与差异，并围绕“大脑-身体-环境的时间动态同步”总框架进行逻辑

辑梳理，调整如下：1）在总体框架上我们对每个部分的功能进行定位，首先，探讨外周自主神经系统如何通过调节内在生理节律，为时间感知奠定基础；其次，分析神经递质系统如何在化学层面调制时间预测与社交同步动机；最后，深入阐述脑网络同步化与跨区域连接异常作为时间绑定障碍的核心中枢机制。明确三个层级的递进关系。

2）围绕以上框架，对每一个标题下的证据内容进行重新梳理：

➤ 在 2.1 自主神经系统失调中，我们摒弃了原文中“首先...其次...再者...”的并列罗列结构，致力于构建一条从基础功能到动态反应，再到行为后果的递进式逻辑主线。核心逻辑链条为：自主神经系统（ANS）是维持内部节律稳定、支持时间感知的生理基础 → ASD 个体的 ANS 存在基线功能异常与动态调节缺陷 → 这些异常导致其在面对时间性刺激时唤醒与调节模式非典型 → 进而通过影响注意资源分配，损害对时间序列的精确追踪与同步能力 → 最终成为制约其多感觉整合与社交同步行为的时间感知基础。具体修改见 2.1 自主神经系统失调标紫色部分：“自主神经系统（ANS）通过动态调节心率、呼吸及皮肤电活动等内在生理节律，为大脑感知外部时间性信息（如刺激间隔与节奏）维持着一个稳定的内部节律背景.....因此，ANS 失调不仅关乎一般感觉通道的唤醒，更通过影响时间感知的生理基础，间接制约了 ASD 的动态同步能力。”

➤ 在 2.2 神经递质调节障碍中，我们首先增加了各神经递质（多巴胺、褪黑素、催产素及皮质醇）对时间节律及 ASD 时间整合影响作用的证据，如“多巴胺在中脑边缘回路中负责奖赏评估和动机形成，其信号异常会导致 ASD 个体对社会性奖赏的动机减弱(Pavăl, 2017; Pavăl & Micluția, 2021)，并影响其对时间性信息的预测精度，从而影响多感觉整合中对时序关系的判断(Pavăl & Micluția, 2021)”，“ASD 个体普遍存在褪黑素水平显著降低(Björklund et al., 2025)，这不仅与常见的睡眠障碍相关(Jia et al., 2022)，更可能通过周期蛋白 1（Period Circadian Regulator 1, PER1）、隐花色素 1（Cryptochrome Circadian Regulator 1, CRY1）及昼夜节律运动输出周期蛋白基因（Circadian Locomotor Output Cycles Kaput, CLOCK）等核心生物钟基因的节律性表达(Meléndez-Fernández et al., 2023; Tordjman et al., 2013)”等。其次我们在整体上进行重新构建，改变了原文对多种神经递质进行简单枚举的论述方式，修改稿分别从“预测处理与动机”、“内稳态与节律同步”以及“社会性时间协调”三个维度，解释 ASD 多感觉时间整合障碍的“神经递质功能网络”。具体修改见 2.2 神经递质调节障碍中标紫色部分：“ASD 个体在多感官时间整合上的困难，与体内神经递质系统的调节障碍密切相关。现有研究表明，ASD 存在多巴胺、褪黑素、催产素及皮质醇等多种神经递质与激素的失调.....这些系统的交互

作用紊乱,很可能共同导致了 ASD 个体在整合跨模态信息时预测编码机制的效率下降,影响他们的时间窗口、节律感知与社会同步表现。”

➤ 2.3 神经系统激活与连接异常中,我们摒弃了原文将“神经元系统损伤”与“脑神经活动异常”作为两个孤立板块进行并列陈述的结构。修改后的版本确立了一条清晰的论述主线:多感觉时间整合依赖于神经同步与连接 → ASD 个体在此方面存在广泛障碍 → 这种障碍体现在从“脑网络”到“神经振荡”的系统层面异常 → 而系统异常可能根植于更基础的“神经元与通路”层面功能损伤。具体修改见 2.3 神经系统激活与连接异常中标紫色部分:“多感觉时间整合依赖于大脑分布式网络之间精确的神经同步和有效的跨区域连接。TD 个体中,对同时性刺激的加工与左侧顶叶皮层的激活相关(Hinault et al., 2023).....并最终导致 ASD 个体在感觉时间绑定、注意力分配和社交信息处理上的困难。未来的干预研究或可针对这些同步与连接异常,探索利用特定神经系统的可塑性(如镜像神经元系统的补偿机制)进行靶向调节(Xu et al., 2022)。”

问题 2: 多处概念(如内部模型僵化、社交定向困难)与第二部分重复,模糊认知层与神经生理层之间的分界。

回应 2: 感谢审稿老师宝贵意见。在修改稿中,我们区分了“认知模式”与“神经生理”两个部分的论述边界,并作如下调整: 1) 通篇审视并删除了所有直接引用或重复第二部分核心概念(如“内部模型僵化”、“社交定向困难”)的表述。如删除 2.神经生理异常第一段:“ASD 个体的内部模型僵化和社交定向困难,很可能与他们社交互动感知的神经处理差异有关”内容。2) 严格聚焦于神经生理层面的证据与机制:所有论述均围绕生理指标(心率、皮肤电)、生化物质(神经递质、激素)、神经活动(脑区激活、功能连接、神经振荡)展开。3) 明确神经生理机制对认知功能的基础性支撑:我们仅在总结或过渡句中,以更概括的方式阐明神经生理异常如何构成认知缺陷的基础,例如,在神经递质部分总结其“共同构成了一个影响多感觉时间整合的功能网络”,从而影响“预测编码机制”。这保持了层次的清晰,即认知层解释行为,神经生理层解释认知功能背后的生理与神经基础。具体修改详见 2.神经生理异常标紫色部分:“基于此,本节将从三个相互关联的层级系统阐述其时间同步障碍的神经生理基础:首先,探讨外周自主神经系统如何通过调节内在生理节律,为时间感知奠定基础.....并最终导致 ASD 个体在感觉时间绑定、注意力分配和社交信息处理上的困难。未来的干预研究或可针对这些同步与连接异常,探索利用特定神经系统的可塑性(如镜像神经元系统的补偿机制)进行靶向调节(Xu et al., 2022)。”

问题 3：实证证据中不少内容涉及情绪调节、一般感觉敏感性或社交加工，与“时间加工/同步机制”关联不强。建议：强化直接涉及节律知觉、神经振荡、时间相关连通性的证据；对间接关系的结果需标注其限度，避免因果推断过度。

回应 3：感谢审稿老师宝贵意见。我们已按照“强化直接证据，审慎表述间接证据”的原则，对文中的证据进行了筛选和重新表述：1)例如，在 2.1 自主神经系统失调中，我们删除/替换了关于情绪调节、情绪调节、一般感觉敏感性或社交加工等与“时间感知/加工”主题相关性不强的表述内容，如删除原文：“如有研究发现，与 TD 个体相比，ASD 个体表现出更大的心率变异性与更低的心率唤醒水平，且心率变异程度与感觉唤醒和情绪调节之间存在相关关系(Chiu et al., 2024; Dijkhuis et al., 2019)”，“再者，自主神经系统唤醒程度还与社交行为及情绪表现相关。一项通过皮肤电指标考察 ASD 个体情绪与睡眠调节的研究发现，ASD 个体存在迟钝的生理唤醒，且皮肤电异常程度与他们整体行为失调相关(Chong et al., 2021)”等表述。2)强化直接相关证据：我们大幅增加了与时间加工直接相关的神经生理证据。例如，在“2.3 神经系统激活与连接异常”小节中，我们开篇即引用关于同时性加工（左侧顶叶）和节律感知（基底节）的神经基础研究，为本节讨论奠定明确的时间加工框架。同时，我们详细阐述了与神经同步化直接相关的 γ 频段振荡异常及其与 GABA 能系统的关联，这些是感觉特征绑定和高级时间认知的核心神经机制。3)优化间接证据的表述，明确其限度：对于与时间加工间接相关的证据（如 ANS 失调、部分神经递质的作用），我们调整了表述方式，强调其“可能通过影响”、“构成了...的生理基础”或“与...表现相关”，而非直接断言其导致时间障碍。例如（修改稿 2.2 神经递质调节障碍）：对于催产素，我们指出其干预“可能通过促进 α 波段神经振荡来增强时间同步能力”，并补充“但其对非社交领域症状改善有限，提示其作用聚焦于社会性时间整合。”这既说明了潜在机制，也限定了其作用范围。具体修改详见 2.神经生理异常标紫色部分：“基于此，本节将从三个相互关联的层级系统阐述其时间同步障碍的神经生理基础：首先，探讨外周自主神经系统如何通过调节内在生理节律，为时间感知奠定基础.....并最终导致 ASD 个体在感觉时间绑定、注意力分配和社交信息处理上的困难。未来的干预研究或可针对这些同步与连接异常，探索利用特定神经系统的可塑性（如镜像神经元系统的补偿机制）进行靶向调节(Xu et al., 2022)。”

问题 4：关于神经递质（多巴胺、褪黑素、催产素、皮质醇等）的论述较为“列举式”，未形成整合框架；部分表述带有超出现有证据的因果语气（如“直接导致.....”）。建议按功能体系（如奖励/预测系统、唤醒系统、社交调节系统）进行整合讨论。

回应 4: 感谢审稿老师宝贵意见。我们根据审稿老师（如奖励/预测系统、唤醒系统、社交调节系统）整合论述框架和审慎因果推断的建议，对“神经递质调节障碍”一节进行了结构性重写，根据神经递质在时间信息处理中的核心功能维度进行以下概括组合：1）奖励、预测与动机维度：重点讨论多巴胺系统，阐述其在奖赏评估、动机形成和时间预测精度中的作用；2）内稳态与节律同步维度：将褪黑素和皮质醇放在一起讨论，阐明它们如何通过影响生物钟基因表达（如 PER1, CRY1, CLOCK）和神经网络兴奋/抑制平衡，破坏昼夜节律的系统同步性和时间信息处理的稳定性；3）社会性时间同步维度：聚焦催产素系统，论述其在社交互动中协调时间线索的特异性作用，并引用外源性干预研究佐证。具体修改见 2.2 神经递质调节障碍中标紫色部分：“ASD 个体在多感官时间整合上的困难，与体内神经递质系统的调节障碍密切相关。现有研究表明，ASD 存在多巴胺、褪黑素、催产素及皮质醇等多种神经递质与激素的失调.....这些系统的交互作用紊乱，很可能共同导致了 ASD 个体在整合跨模态信息时预测编码机制的效率下降，影响他们的时间窗口、节律感知与社会同步表现。”

问题 5: 3.3 节涵盖范围广（外周神经元、镜像系统、 γ 振荡等），但缺少明确主轴。建议以“神经同步化与跨区域连接”作为核心机制进行重新组织。

回应 5: 感谢审稿老师宝贵意见。我们以“神经同步化与跨区域连接异常”为核心主轴，对原“神经系统激活与连接异常”一节进行了重组：1）明确核心主轴，开篇第一句即点明核心论点：“多感觉时间整合依赖于大脑分布式网络之间精确的神经同步和有效的跨区域连接。”2）围绕主轴组织内容：脑网络层面：首先论述关键整合脑区（右额中回、角回等）的激活减弱和跨脑区（额-顶叶、左右半球）的功能连接普遍降低；神经振荡层面：紧接着深入论述与神经同步化密切相关的 γ 频段振荡异常（功率降低），并探讨其可能的底层机制（GABA 能抑制功能异常）；基础神经元层面：最后，将外周神经元功能、镜像神经元系统等更基础层面的异常，定位为可能构成上述高级脑区同步与连接异常的“基础”或“源头”。例如，“ASD 个体中观察到的神经元系统层面的多感觉通路损伤，可能构成了上述高级脑区同步与连接异常的基础。”3）在总结段落，我们再次强调 ASD 的障碍与“多层次的神经同步化及连接异常密切相关”，并依次总结了系统层面、振荡层面和基础层面的异常表现，使整节论述形成一个从基础到高级、围绕“同步与连接”主轴的有机整体。具体修改详见 2.3 神经系统激活与连接异常标紫色部分：“多感觉时间整合依赖于大脑分布式网络之间精确的神经同步和有效的跨区域连接。TD 个体中，对同时性刺激的加工与左侧顶叶皮层的激活相关 (Hinault et al., 2023).....并最终导致 ASD 个体在感觉时间绑定、注意力分配和社交信息处理

上的困难。未来的干预研究或可针对这些同步与连接异常，探索利用特定神经系统的可塑性（如镜像神经元系统的补偿机制）进行靶向调节(Xu et al., 2022)。”

五、第四部分：干预启示与机制模型的映射不足

问题 1：虽然作者删除了与主题不相关的内容（如褪黑素干预），并补充了“感觉统合”和“人际同步”两类干预，但干预选择的“代表性”仍缺乏充分论证。文中说明选择感统与人际同步是因为其“针对性强”，但仍需给出更系统的文献支持证据，说明相比其他干预方式为何更贴合“时间整合”主题。

回应 1：感谢审稿老师宝贵意见。根据审稿老师的意见,我们做了如下调整：1）修改稿在引言第一段即明确指出，有效的干预应能作用于前述综述所揭示的核心机制：“因此，有效的干预应能直接或间接地作用于这些核心机制。”这些核心机制包括：时间绑定窗口（TBW）异常拓宽、预测编码功能受损、神经同步化（如 γ 振荡）与跨区域连接减弱。2）更注重干预对时间整合相关疗效背后的机制探讨：我们明确提出了筛选依据：“基于此标准，感觉统合治疗与基于节律的人际同步干预因其理论上的作用机制与上述缺陷吻合，有可能成为精准的干预方向。”这表明，我们的选择并非基于干预的普遍流行度，而是其理论机制与本文核心科学问题（多感觉时间整合障碍）的契合度。这为后续分别深入阐述两类干预如何作用于这些具体机制奠定了基础，使其代表性得以在逻辑框架内确立。3）并提出现有研究的不足，目前仅是理论上的推导探讨，还需进一步更多实证证据对时间整合疗效的支持。修改详情见 4.基于孤独症谱系障碍多感觉时间整合特征的干预启示，标紫色部分：“如前所述，ASD 个体多感觉时间整合障碍的认知神经机制主要涉及时间绑定窗口（TBW）异常拓宽、预测编码功能受损以及神经同步化（如 γ 振荡）与跨区域连接减弱等(Bierlich et al., 2024; Feldman et al., 2018; Kakuszi et al., 2024; Stevenson et al., 2014).....未来研究应着力于采用严格的随机对照试验（RCT）设计，并直接以多感觉时间整合的核心指标（如 TBW、时间再校准、声音诱发闪光错觉）和神经相关物（如 EEG γ 波段同步、fMRI 关键网络连接）作为首要结局变量，以建立干预与目标机制间的因果证据链。”

问题 2：虽以“基于时间整合特征的干预”为题，但 4.1、4.2 节更像是对“感觉统合”和“人际同步”两类干预的一般性综述，缺少与前文指出的机制缺陷（如 TBW 拓宽、内部计时噪音、 γ 振荡异常、预测编码缺陷）的一一对应关系。

回应 2：感谢审稿老师宝贵意见。根据审稿老师建议，我们调整了两小节的结构和论述

重点，将核心从“介绍干预是什么”转变为“阐述干预如何可能作用于前文揭示的具体机制”。具体调整如下：1）在“感觉统合治疗”（4.1）小节中：开篇点明与底层机制的关联：我们首先指出，尽管传统疗效指标广泛，但其“核心作用原理与多感觉时间整合的底层机制直接相关”。构建“行为-神经计算-神经生理”的映射链条：行为层面：指出有节奏、可预测的输入旨在“优化个体的感觉反应阈值和神经唤醒水平”，并明确提出一个“唤醒水平适中的大脑其神经同步化能力更强，可能有助于缩窄时间绑定窗口”。神经计算层面：在分析其机制后总结，这种调节“相当于优化了神经系统的底层节律与稳定性，可能为需要精确时间同步（如 γ 波段活动）的高级多感觉整合提供了必要的神经基础。”神经生理层面：引用相关研究，指出感统失调与“皮层兴奋/抑制失衡（如 GABA 能功能障碍）及脑网络连接异常相关”，而干预可能“调节与塑造基础脑网络的功能与连接”。修改详情见 4.1 感觉统合治疗标紫色部分：“感觉统合治疗是一种以游戏为基础、通过提供结构化的感觉体验，以改善感觉信息处理与整合能力的临床方法(Randell et al., 2019).....因此，将行为改善直接归因于多感觉时间整合能力提升仍属基于机制的推演，未来的高质量研究需结合心理物理任务和脑电图（EEG）/脑磁图（MEG）技术，直接检验感统治疗对 ASD 个体时间整合精度和神经同步化的特异性影响。”

2）在“人际同步干预”（4.2）小节中：开篇建立直接理论联系：明确指出这类干预“直接作用于时间预期、行为同步和社会协调过程，与 ASD 的预测编码缺陷和神经连接异常机制高度契合。”明确阐述对核心认知机制的补偿作用：提出“规律性节律提供了极佳的时间预测线索...可以强化其内部计时模型，提高对未来事件发生时间的预期准确性，从而补偿预测编码缺陷。”并指出“这种增强的时序预测能力理论上能优化对感觉刺激的整合窗口。”连接行为改善与神经机制：在引用实证研究证明其改善“运动节律同步能力”后，立即指出“这为其内部时间预期机制的改善提供了行为层面的证据”。并进一步阐述其能“有效增强涉及...脑网络之间的功能连接”。修改详情见 4.2 人际同步干预标紫色部分：“基于节律的人际同步干预，利用音乐、舞蹈或同步动作游戏等媒介，引导个体与外部节律或他人在时间和形式上达成一致(McNaughton & Redcay, 2020).....并直接以多感觉时间整合的核心指标（如 TBW、时间再校准、声音诱发闪光错觉）和神经相关物（如 EEG γ 波段同步、fMRI 关键网络连接）作为首要结局变量，以建立干预与目标机制间的因果证据链。”

问题 3：大部分干预研究测量的是运动技能、社交行为或情绪改善，缺乏直接的多感觉时间整合指标。当前稿件将这些行为改善推断为“时间整合能力提升”，因果链条偏跳跃，建议明确划分：现有证据支持的部分；基于机制推演的假设性启示。

回应 3: 感谢审稿老师宝贵意见。根据审稿老师建议, 我们严格区分 “已验证的证据”、“基于机制的合理推演” 和 “尚待验证的假设”。具体修改如下: 1) 我们删除和替换了仅针对运动技能、社交行为或情绪改善等与时间整合关联性不强的干预疗效证据, 如在“4.1 感觉统合治疗”小节处: “有研究分别考察感觉统合和团体治疗方案对高功能 ASD 儿童的疗效, 结果发现感觉统合训练能够显著改善 ASD 儿童的运动感知及运动技能(Iwanaga et al., 2014), 该结果在 Roley 等人(2015)随后的研究中得到了进一步验证”, 在“4.2 人际同步干预”小节处: “强调人际同步的干预也被证实在改善 ASD 个体脑神经激活、共同注意、积极情绪和感知运动等方面具有显著效果(陈雁, 李晶, 2024)。如有研究通过音乐节律引导的人际同步干预, 发现 ASD 群体在拍击时节奏同步能力提升, 且他们的联合注意和互动参与能力也得到提高 (Dvir et al., 2020; Yoo & Kim, 2018)。”

2) 调整表达方式, 更注重干预对时间整合疗效背后的机制分析:

➤ 在“4.1 感觉统合治疗”小节: 我们明确证据局限性新增了一个独立的段落指出: “然而, 目前绝大多数感统研究并未直接评估多感觉时间整合行为指标...其疗效多通过运动技能、感觉反应量表或泛化的行为问卷来体现。” 清晰界定推论性质: 紧接着明确指出: “因此, 将行为改善直接归因于多感觉时间整合能力提升仍属基于机制的推演。” 提出未来验证方向: 以此为基础, 提出未来研究需结合心理物理和神经成像技术“直接检验...特异性影响”。修改详情见 4.1 感觉统合治疗标紫色部分: “感觉统合治疗是一种以游戏为基础、通过提供结构化的感觉体验, 以改善感觉信息处理与整合能力的临床方法(Randell et al., 2019).....因此, 将行为改善直接归因于多感觉时间整合能力提升仍属基于机制的推演, 未来的高质量研究需结合心理物理任务和脑电图(EEG)/脑磁图(MEG)技术, 直接检验感统治疗对 ASD 个体时间整合精度和神经同步化的特异性影响。”

➤ 在“4.2 人际同步干预”小节: 审慎表述干预效果: 我们指出, 尽管前景可观, “但直接将人际同步干预的效益(如社交参与度提升、情绪改善)等同于多感觉时间整合能力改善仍显跳跃。”指出调节变量与研究不足: 补充说明“干预效果可能受到诸多因素调节...目前研究对这些关键调节变量的探讨尚不充分。” 这进一步明确了当前结论的局限性和条件性。修改详情见 4.2 人际同步干预标紫色部分: “基于节律的人际同步干预, 利用音乐、舞蹈或同步动作游戏等媒介, 引导个体与外部节律或他人在时间和形式上达成一致(McNaughton & Redcay, 2020).....并直接以多感觉时间整合的核心指标(如 TBW、时间再校准、声音诱发闪光错觉)和神经相关物(如 EEG γ 波段同步、fMRI 关键网络连接)作为首要结局变量, 以建立干预与目标机制间的因果证据链。”

问题 4：文末提出“感觉统合 + 人际同步”的整合干预路径具有理论价值，但未讨论实际实施中的关键调节变量（发展阶段、共病、症状异质性、干预剂量、长期随访等），也缺乏对现有干预文献质量的批判性评价。

回应 4：感谢审稿老师宝贵意见。我们根据审稿老师的意见，在整合路径的讨论中强化了批判性视角。在讨论整合路径时纳入调节变量：在提出结合两类干预构建“从‘低阶感觉调节’到‘高阶社会整合’的精准干预路径”后，我们以示例说明如何结合。更重要的是，将前述“4.2 人际同步干预”小节中提到的调节变量（发育阶段、共病、初始敏感性、干预剂量等），自然地作为未来研究需要探讨的“关键调节变量”纳入本部分的总结性讨论中，使其成为构建有效干预方案时必须考虑的现实因素。强化未来研究的循证与批判性要求：在全文最后，我们明确提出未来研究应着力的方向：“为推动此领域向循证实践发展，未来研究应着力于采用严格的随机对照试验(RCT)设计，并直接以多感觉时间整合的核心指标...和神经相关物...作为首要结局变量，以建立干预与目标机制间的因果证据链。”修改详情见 4.1 感觉统合治疗最后一段：“然而，目前绝大多数感统研究并未直接评估多感觉时间整合行为指标（如 TBW、声音诱发闪光错觉）或相关的神经振荡特征.....未来的高质量研究需结合心理物理任务和脑电图（EEG）/脑磁图（MEG）技术，直接检验感统治疗对 ASD 个体时间整合精度和神经同步化的特异性影响。”。4.2 人际同步干预最后两段：“因此，这类干预有望直接训练并强化 ASD 个体在多感觉时间整合中表现薄弱的跨脑区功能连接。尽管前景可观，但直接将人际同步干预的效益（如社交参与度提升、情绪改善(Koch et al., 2015; Yoo & Kim, 2018).....和神经相关物（如 EEG γ 波段同步、fMRI 关键网络连接）作为首要结局变量，以建立干预与目标机制间的因果证据链。”

六、第五部分模型图（图 1）的主要问题

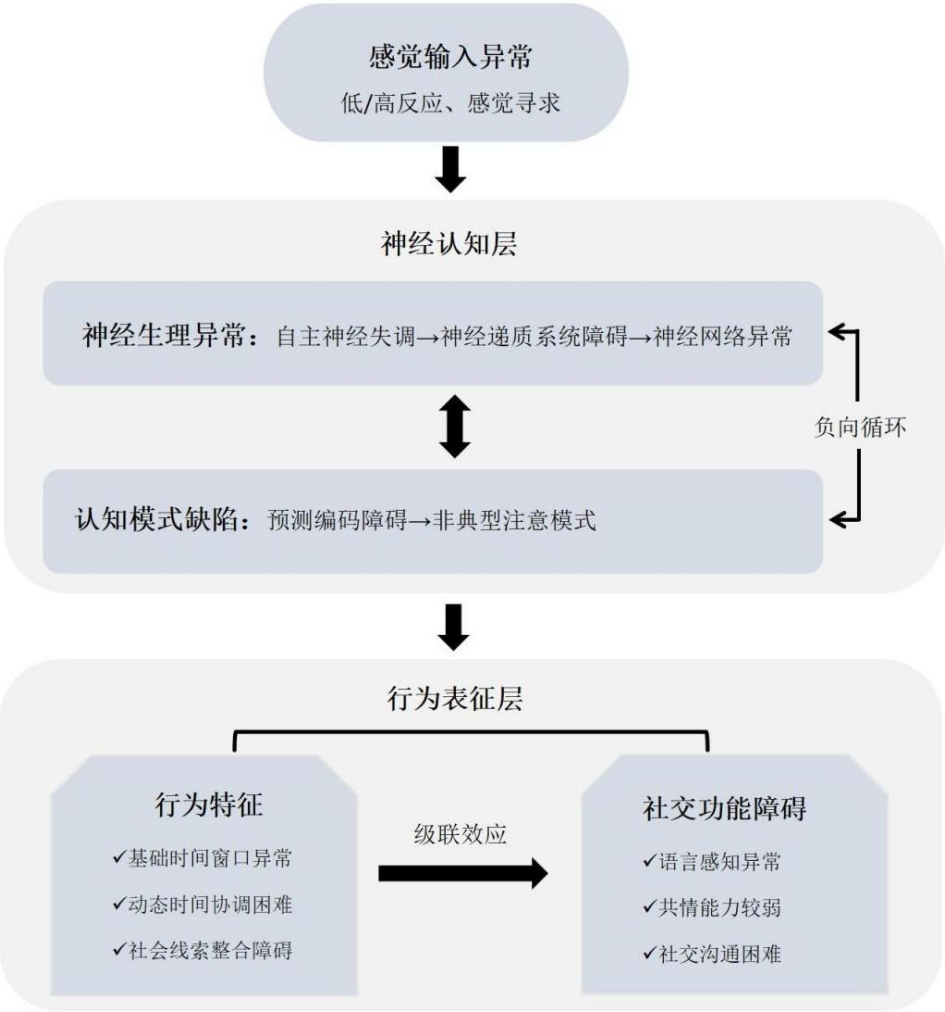
图 1 存在较为明显的理论与呈现问题，建议重新绘制。主要问题包括：

问题 1：因果关系模糊

模型呈现三层结构，但中间层“神经生理异常—认知模式缺陷”并列且以双向箭头连接，使因果顺序及作用路径难以理解，需作者进一步斟酌。

回应 1：感谢审稿老师宝贵意见。我们已经根据审稿老师意见，重新绘制模型图，修改图神经生理异常在认知模式缺陷之上，凸显了神经生理异常的基础地位，且二者在发育过程中相互影响，负向循环，新图做了箭头流向及文字标注说明。在正文中关于模型图的解释中，在 5.总结与展望第二段，增加了：“根源可追溯至早期出现的、相互关联的神经生理与认知

异常，并形成负向循环”具体修改见图 1 ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知行为整合模型



问题 2：模型将“行为表现（TBW 拓宽等）”与“社交表现（沟通困难等）”并列，行为表现与社交表现两者有交叉、重叠。且全文论证强调社交困难是时间加工缺陷的级联后果，模型未体现这一核心关系。

回应 2：感谢审稿老师宝贵意见。我们已经根据审稿老师意见，重新绘制模型图，修改后，行为表现与社交表现，属于行为表征层，二者虽然仍并列显示，但用箭头指向表明行为表现与社交功能之间的级联效应关系，且二者共同受神经认知层的影响。具体修改见图 1 ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知行为整合模型。

问题 3：感官部分

加入嗅觉、味觉扩大了研究范围，与全文聚焦的视听与多感觉时间同步不够一致。

回应 3：感谢审稿老师宝贵意见。我们已经根据审稿老师意见，重新绘制模型图并修改文字表述，在正文中 5.总结与展望第一段，引用新的证据文献：“然而，大量研究表明，ASD 个体在生命早期即表现出跨感觉通道的异常反应模式，包括感觉低反应性、高反应性及感觉寻求(Russo et al., 2025)。”并且在绘图上，删除原稿中具体视觉、味觉等感官内容，改为他们的感官异常表现：低/高反应性、感觉寻求。具体修改见图 1 ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知行为整合模型。

第三轮

审稿人 1 意见：

问题 1.1：摘要与引言：摘要中关于几个层面的表述要一致，干预效果被直接表述为“能够促进社交”，语气略显肯定，与后文对证据不足的说明略有出入，建议调整为更谨慎的措辞。

回应 1.1：感谢审稿老师的意见。因全文均根据审稿老师意见进行调整，所以摘要部分，我们除了修改审稿老师提出的“干预效果与后文对证据不足的说明略有出入”外，还根据调整后的全文内容对摘要进行整体修改，主要体现在以下方面：

1) 在开篇直接切入主题：改为：“孤独症谱系障碍（ASD）的多感觉时间整合缺陷是联结低阶感知异常与高阶社交障碍的关键环节。”删除泛化论述，使摘要开篇更加聚焦于 ASD 核心议题，与全文主题高度一致。

2) 在核心内容陈述上，行为层面改为：“在行为层面，表现为基础时间窗口异常、动态时间协调困难和社交线索整合障碍。”表述更加精炼，与正文第一章的三大特征严格对应，保持术语一致性。神经生理层面改为：“在神经生理层面，自主神经失调、神经递质调节障碍，以及关键脑区激活和连接异常构成其生物学基础。”表述更加规范，将“紊乱与异常”统一为“失调、调节障碍、异常”，与正文第二章的论述保持一致。认知层面改为：“在认知层面，以‘弱先验’和‘预测误差精度调节失灵’为核心的预测编码障碍，与非典型注意模式相互交织，共同解释了个体难以形成精确时间预期并进行实时整合的机制。”引入“弱先验”和“HIPPEA”两个核心理论术语，与正文第三章的深入分析相呼应，增强了理论深度。

3) 在干预效果表述上，将“能够帮助...进而促进”改为“在理论上可能...有望...”，语气从肯定变为谨慎，与正文 4.1 和 4.2 部分对现有干预证据局限性的讨论（如“临床转化价值有待

进一步验证”“直接将效益等同于多感觉时间整合能力改善需谨慎”)保持一致。新增限定语句:“但这一因果路径仍需未来干预研究结合多模态指标加以实证检验”,明确指出了当前结论属于“机制层面的推断”,而非“有直接数据支持的结论”。

以上修改详见摘要标黄部分:“孤独症谱系障碍(ASD)的多感觉时间整合缺陷是联结低阶感知异常与高阶社交障碍的关键环节。.....有望改善其感知觉状态与人际同步能力,从而对社交技能发展产生积极影响,但这一因果路径仍需未来干预研究结合多模态指标加以实证检验。”

问题 1.2: 此外,引言部分可以适当压缩与时间整合关联不直接的背景描述。引言中“这种基础时间窗口的异常,可能与 ASD 个体对视觉言语信息的依赖减少,并过度依赖听觉信号有关(Iarocci et al., 2010)”。而有较多研究表明,ASD 儿童有视觉化优势,因此下此结论与大多研究不符,因此要谨慎下此结论,下此结论需要更多文献支撑。

回应 1.2: 感谢审稿老师的意见。您关于“适当压缩与时间整合关联不直接的背景描述”的建议,我们深入审视前言全文结构,认为引言中的各部分内容均直接服务于“多感觉时间整合”这一核心主题的引出与论证,且环环相扣,逻辑链条较为完整。如第一段层层递进介绍了“孤独症谱系障碍”“多感觉整合”“多感觉时间整合”以及“时间绑定窗口”几个核心概念。第二段概述 ASD 个体在多个时间尺度和多种感觉通道组合上存在时间整合困难,第三段对前述内容进行总结,明确以往研究的局限,指出“时间维度上的整合加工机制”系统探讨的必要性。

随后审稿老师指出:“引言中‘这种基础时间窗口的异常,可能与 ASD 个体对视觉言语信息的依赖减少,并过度依赖听觉信号有关(Iarocci et al., 2010)’...谨慎下此结论,下此结论需要更多文献支撑”,我们在“1.1 基础时间窗口异常”中找到了此段而非引言部分。因此,我们理解,老师指的“与时间整合关联不直接的背景描述”是否是在“1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征”引言处。此处确实存在“与时间整合关联不直接的背景描述”现象。在整体逻辑链条上,原前言是较为清晰和必要的,首先介绍了当前主要的研究范式,为下文中各种同步研究的表现做铺垫,其次介绍 ASD 人群在主要存在的感官同步障碍表现,最后引出本章中探讨 ASD 个体的多感觉时间整合障碍核心特征的必要性。因此我们的修改维持了原逻辑链条,但在描述上更加凝练,仅提出主要研究结果,不过多介绍研究背景,具体调整见“1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征”第一段标黄处:“考察大脑整合跨模态时间信息的能力.....以上时间整合障碍均可能影响其社交互动中的信息处理。”

在“1.1 基础时间窗口异常”处，审稿老师提出：“‘这种基础时间窗口的异常，可能与 ASD 个体对视觉言语信息的依赖减少，并过度依赖听觉信号有关(Iarocci et al., 2010)’。而有较多研究表明，ASD 儿童有视觉化优势，因此下此结论与大多研究不符，因此要谨慎下此结论，下此结论需要更多文献支撑。”。我们进一步研读参考文献 Iarocci, G., Rombough, A., Yager, J., Weeks, D. J., & Chua, R. (2010). Visual influences on speech perception in children with autism. *Autism: The International Journal of Research and Practice*, 14(4), 305–320. 发现该处的“视觉语言信息”是指 ASD 对唇部动作的视觉信息与听觉语音整合时，他们对唇读之类的视觉线索中获益较少。综合考虑，我们认为该实证证据在此处的表述确实缺乏严谨性，因此该研究证据做删除处理。此外，我们还对“1.1 基础时间窗口异常”整体内容的严谨性进行排查和调整，如在“1.1 基础时间窗口异常”第三段第四行“表明，ASD 的基础时间窗口异常在面对复杂信息时更为凸显，可能为其在社会性任务中更大的困难埋下了伏笔。然而，关于 TBW 拓宽的结论存在一定的研究异质性，这种不一致可能受到年龄、任务范式和测量方法的影响。”增加“可能”二字；在最后一段处，增加“现有研究多支持”字眼。此外，针对审稿老师多次提出的“证据罗列堆积”现象，我们在“1.1 基础时间窗口异常”第二段结尾处针对前述证据做了进一步总结：“综合来看，单通道感觉信息处理的障碍，可能是导致 ASD 个体在跨通道整合中出现基础时间窗口异常的重要原因。”以上修改调整均已在相应位置标黄。

问题 2：1.2：本节将核心机制界定为“内部计时噪音增加或时间信息累积不稳定”，但目前同时性判断、持续时间判断、间隔探测、跨通道边界、运动反馈延迟和敲击同步等多类任务并列呈现，整体读感更像是现象罗列，机制指向不够集中。建议按任务类型或关键指标重新组织材料，明确不同任务结果分别反映动态协调过程中的哪些环节，并围绕 TBW、同步阈值、同步误差及其变异性等操作性指标展开讨论，以增强机制层面的连贯性。

回应 2：感谢审稿老师的意见。我们已根据审稿老师指出的“机制指向不够集中”的核心问题，对原文进行了结构性重组与论述深化，旨在将分散的现象描述，整合为一个以“内部计时不稳定性”为核心机制、以关键行为指标为证据链条的连贯论述。主要修改如下：

首先、根据审稿老师“按任务类型或关键指标重新组织材料，明确不同任务结果分别反映动态协调过程中的哪些环节”的建议，我们将原先并列的多个任务，明确归类至动态协调过程的两个连续性环节：（1）“时间感知与判断”环节：主要对应同时性判断、持续时间判断、跨通道边界判断等任务。这些任务主要反映 ASD 个体在构建内部时间表征时的异常，表现为“时间敏感性降低”和“时间判断异常”；（2）“感觉-运动同步”环节：主要对应节拍同

步、合作敲击等任务。这些任务直接反映 ASD 个体在利用时间表征在线指导动作时的困难，表现为“同步准确性和稳定性下降”。

其次、在每个环节中，我们严格围绕审稿老师提出的操作性指标展开讨论。（1）在“时间感知”环节，强调“时间判断的变异性”这一指标，并引用元分析 (Allman & Falter, 2015) 指出其增高是 ASD 的普遍特征，从而直接支持“内部计时噪音”的假说。（2）在“运动同步”环节，则集中论述“同步误差”与“同步变异性（试次间变异性）”这两个指标。明确指出它们是衡量同步精度与内部计时稳定性的关键行为指标，并将多个研究发现的“表现更差”、“准确性低”等描述具体化为这些指标上的异常。

最后，强化“指标-机制”的逻辑链条。在总结段，我们将前文分散的指标（感知判断的准确性下降、变异性增高；同步的误差增大、变异性增加）明确归结为共同指向“内部计时系统的稳定性降低”。这使得整个小节从问题提出（计时信号不稳定），到中间环节的证据展示（两个层面、多个指标），再到最终结论，形成了首尾呼应、逻辑紧密的整体。

整体更改详见 1.2 动态时间协调困难各段标黄部分：“ASD 个体在需要知觉和预测来协调动作以匹配外部时间流的动态协调层面表现出困难。这一困难可能源于其内部计时信号的不稳定(Cannon et al., 2024).....这种动态协调能力的损害，构成了其在瞬息万变的社交互动中实现精准人际协调（如对话轮转、共同注意）的根本性挑战，从而产生级联式的社交功能影响(Bowsher-Murray et al., 2023)。”。

问题 3：1.3：“社会线索整合障碍”的概念边界仍需进一步明确。目前更像对“社会情境下同步更差”的综合解释，但尚未清晰区分其究竟属于多感觉时间整合缺陷，还是由社会认知、语言规划或任务负荷导致的同步下降。建议明确：哪些证据直接指向“时间对齐/同步机制”的受损，哪些属于社会任务负荷或高级认知对时间整合的调节作用；同时给出该概念对应的具体时间整合操作指标，避免泛化为对所有社交困难的解释。

回应 3：感谢审稿老师的意见。我们将以上意见归纳为三个核心问题：1、概念模糊；2、作用机制区分不清晰；3、操作指标不明确。

首先，对于问题 1 概念模糊

我们试图通过文献检索找到“社会线索”的明确概念并做进一步的操作指标量化，最终仅在文献 Maes, P., Stercq, F., & Kissine, M. (2021). Attention to intentional versus incidental pointing gestures in young autistic children: An eye-tracking study 中发现“social cues”的相关介绍，但文中并没有“social cues”直接的概念，通读全文我们认为“social cues”翻译为“社交线索”

更为准确，因此将小标题改为：“1.3 社交线索整合障碍”。此外，文中介绍的“社交线索”主要指的是通过社交互动中他人的行为（如眼神注视、头部转动、语言提示及指向手势等）传递的信息。因此，“1.3 社交线索整合障碍”我们在第一段第一句话将“社交线索”做了调整和备注：“ASD 个体的多感官时间整合障碍在涉及社交线索（如眼神注视、头部转动、语言提示及指向手势等）时表现得尤为突出”，以上所有修改已标黄处理。

其次，对于问题 2 作用机制不清晰

我们认真考虑审稿老师提出的：“哪些证据直接指向“时间对齐/同步机制”的受损，哪些属于社会任务负荷或高级认知对时间整合的调节作用”建议，查阅原论文中所有该小结涉及的所有参考文献原文，找出孤独症在社交线索缺陷相关实证研究背后涉及的分析及机制，但具体指向性机制分析的讨论甚少。因此，我们仍保留原论文中主要框架：第一点：社会性刺激加工困难；第二点：任务结构与可预测性（现象描述）；第三点：过滤无关信息困难（现象描述），但在尽量将涉及到机制讨论的证据做了调整，修改稿中：第一点（社会性刺激加工）：强调社会性信息作为干扰源，占用时间对齐资源（引入“认知负荷”调节视角）；第二点（任务结构与可预测性）：引入 Li et al. (2025)的 fNIRS 证据，明确人际神经同步作为核心机制的量化指标，并区分结构化/非结构化任务的调节作用；第三点（过滤无关信息）：引入 Lozano et al. (2024)的纵向证据和 Maes et al. (2021)的眼动证据，说明选择性注意偏差和指向忽视是核心机制在行为层面的表现。修改内容详见“1.3 社交线索整合障碍”第一至第三段标黄部分：“首先，ASD 个体在处理社会性刺激时表现出的时间加工困难.....这一结果可能是由于 ASD 被试在语音呈现的 3 秒关键期内，未能及时将听觉信息（假词）与视觉信息（指向手势）进行时间绑定，导致后续的参照物选择缺乏依据。”。此外，我们在最后一段讨论部分做了全部调整，增加机制的层级框架讨论，详见最后一点标黄部分：“综合上述证据，ASD 个体在社会性信息条件下的多感觉时间整合呈现出复杂的层级结构.....此外，对选择性注意的偏差(Lozano et al., 2024)和对指向性手势的忽视(Maes et al., 2021)进一步说明，时间整合障碍不仅体现为神经层面的同步异常，也表现为行为层面对动态社交线索的响应延迟或缺失。”

最后，问题 3 操作指标不明确

回顾以往文献未能给出“社交线索”的具体明确概念，亦未发现针对“社交线索”提出具体测量指标，目前研究主要还是通过行为观察、按键时间、脑电及眼动等方式在测量同步水平时，加入眼神注视、头部转动、语言提示及指向手势等社交线索。因此，我们在“1.3 社交线索整合障碍”第二段任务结构及可预测性和第三段过滤感官信息部分，检索并添加了涉及在

“社交线索”同步水平的相关指标信息，如“脑区同步值”，“触觉时序判断正确率”及“嘴部注视比例”等，修改详见“1.3 社交线索整合障碍”第二段和第三段标黄部分：“Li 等人 (2025)采用功能性近红外光谱超扫描技术进一步揭示了这一差异的神经基础：在意图性模仿任务（结构化）中，ASD 儿童在左侧额下回、左侧顶下小叶和右侧颞顶联合区的人际神经同步显著低于 TD 儿童.....这一结果可能是由于 ASD 被试在语音呈现的 3 秒关键期内，未能及时将听觉信息（假词）与视觉信息（指向手势）进行时间绑定，导致后续的参照物选择缺乏依据。”

问题 4：2.1 与 2.2 节：从“泛生理异常”推及“时间整合缺陷”的关系仍偏弱，且相关性证据存在被放大表述为机制性因果的问题。建议区分直接证据与推测性机制，并通过 TBW、同步误差或同时性判断阈值等指标加强对应关系。例如，多巴胺部分目前主要聚焦奖赏、动机与预测精度，其与 TBW 或同步任务表现的直接关联仍需更明确；褪黑素主要涉及昼夜节律，与本文关注的毫秒级时间整合跨度较大，应说明是跨时间尺度的统一假设，还是并列的时间维度问题，并相应调整论证力度。

回应 4：感谢审稿老师的意见。我们将老师意见归纳为以下三个问题并给与修改和回应：

问题一：从“泛生理异常”推及“时间整合缺陷”的关系偏弱，相关性证据存在被放大为机制性因果的问题，需通过 TBW、同步误差等指标加强对应关系。

针对问题一，我们做了以下几个方面的修改：1）将原文较为笼统的推论（“可能通过影响注意资源的分配与稳定性，进而损害其对刺激时间序列的精确追踪与同步”）拆解为四个逻辑环节：ANS 失调 → 损害注意稳定性（Bradshaw et al., 2025）注意稳定性受损 → 影响多感觉时间整合精度，表现为同时性判断阈值异常（Zhou et al., 2021；Isaksson et al., 2018）基础时间感知脆弱 → 延伸至社交互动，表现为更大的同步误差（Carnevali et al., 2024）；2）明确使用“同时性判断阈值”和“同步误差”作为核心观测指标，使“时间整合缺陷”这一概念具象化、可量化；3）将原文“这些发现提示.....可能.....”的模糊表述，替换为“基于上述发现，我们梳理出如下逻辑链条”的清晰推理结构，明确区分了实证发现（ANS 异常、注意损害、时间感知异常、同步误差增大）与基于这些发现构建的理论链条。修改详情见 2.1 自主神经系统失调标黄部分：“基于上述发现，我们梳理出如下逻辑链条.....因此，异常的 ANS 唤醒模式可能通过损害注意稳定性，影响多感觉同时性判断的精度，最终在需要实时协调的社交互动中体现为更大的同步误差。”

问题二：多巴胺部分：聚焦奖赏、动机与预测精度，与 TBW 的直接关联需更明确

针对问题二，我们在多巴胺部分做了强化与 TBW 的直接关联处理：1）引入 Lee et al.

(2024)的“特征特异性预测误差”理论：该理论指出，多巴胺神经元以特征特异性的方式编码预测误差，不同神经元分别负责编码环境不同特征的预测精度。这为“多巴胺异常可能特异性地损害时间特征（刺激发生时序）的预测精度”提供了直接的理论支撑；2）补充 Diederens et al. (2017)的 fMRI 证据：证实多巴胺功能紊乱直接损害预测误差编码的适应性，影响个体对刺激发生时序的预测精度；3）将原文“影响其对时间性信息的预测精度，从而影响多感觉整合中对时序关系的判断”的模糊表述，修改为“多巴胺功能异常可能通过损害个体对刺激发生时序的预测精度，进而影响其对多感觉刺激间 TBW 宽窄的判断”，建立了“多巴胺 → 时间预测精度 → TBW”的逻辑关联。修改详情见 2.2 神经递质调节障碍第二段标黄部分：“基于预测编码框架的理论认为，多巴胺参与编码时间预测误差，是进行时间性预测的基础(Lee et al., 2024).....我们推测多巴胺功能异常可能通过损害个体对刺激发生时序的预测精度，进而影响其对多感觉刺激间 TBW 宽窄的判断。”

问题三：褪黑素部分：涉及昼夜节律，与毫秒级时间整合跨度较大，需说明是跨时间尺度的统一假设还是并列的时间维度问题。

针对以上问题，我们对褪黑素部分进行了处理时间尺度问题的调整：1)新增“虽然昼夜节律与毫秒级的时间知觉属于不同的时间尺度”的表述，坦诚回应审稿人关于尺度跨度的关切；2）阐明昼夜节律紊乱并非直接作用于毫秒级时间加工，而是通过影响唤醒状态和注意稳定性等一般性资源间接产生干扰。这构建了“昼夜节律（小时-天）→ 唤醒/注意（一般性资源）→ 时间感知（毫秒级）”的间接影响路径，将不同时间尺度串联起来。修改详情见 2.2 神经递质调节障碍第二段标黄部分：“虽然昼夜节律与毫秒级的时间知觉属于不同的时间尺度，但基础生理节律的紊乱可能通过影响唤醒状态和注意稳定性.....因此，昼夜节律紊乱可能通过干扰这些一般性资源，导致对时间节律的感知迟钝。”

问题 5：第 3 部分：在解释社会情境下的多感觉时间整合困难时，整体论述仍偏“社交相关”，存在将社交加工困难与时间整合机制混写的问题。当前常见的论证路径是社交注意定向异常、社交伪装负荷增加或外源干扰增加导致资源占用，从而引发时间同步下降，但多为间接推断，缺少在同一研究中将社交变量与 TBW、同时性判断阈值、同步误差及其变异性建立直接对应的证据。建议进一步细化“社会性刺激下表现更差”的具体机制，并明确区分哪些属于时间整合过程本身，哪些只是社交情境中的调节或放大因素；同时在讨论各机制时，尽量说明它们在 TBW、同步阈值或反应变异性等指标上的具体表现，使论证始终围绕多感觉时间整合这一核心展开。

回应 5: 感谢审稿老师的意见。我们将老师意见归纳为以下几个问题并给与修改和回应:

问题一: 论述偏“社交相关”, 存在将社交加工困难与时间整合机制混写的问题

针对问题一, 我们做了如下调整: 1) 在“3.2.1 社交注意定向异常”构建推理链条, 注意维持/转移困难 → 制约时间统计规律提取 → 时间先验构建薄弱 → 行为表现为更宽或更易变的的同时性判断阈值, 在推理终点明确锚定“同时性判断阈值”, 并补充 Lieder et al. (2019) 作为“时间统计规律提取能力受损”的间接证据; 2) 在“3.2.2 注意资源分配失调”将原文笼统的“证据堆积”拆分为两点清晰的障碍路径: 认知负荷和感觉干扰。认知负荷被定位为“资源挤占”因素, 感觉干扰被定位为“注意捕获”因素, 二者均通过挤占或干扰实时加工所需的认知资源来影响时间整合, 而非将社交困难本身混同于时间整合。每条路径均以“资源占用→时间加工指标变化”的逻辑展开, 明确了社交因素与时间整合机制的层级关系。

问题二: 论证多为间接推断, 缺少在同一研究中将社交变量与 TBW、同时性判断阈值、同步误差建立直接对应的证据。

针对问题二, 我们做了如下调整: 1) 在 3.2.1 节中, 新增 Denis et al. (2025) 研究中相关因果链条证据: 先验不足→时间同步障→社交困难, 并且补充 Isaksson et al. (2018) 和 Lozano et al. (2024) 中其行为层面的行为同步障碍表现 (如阈值更宽或更易变异), 为“时间先验薄弱”的行为表现提供了直接支撑。同时, 引入 Lieder et al. (2019) 作为“时间统计规律提取效率降低”的间接证据, 明确其为理论延伸, 而非直接因果。2) 在 3.2.2 节路径中, 引入 Jagadeesan & Grahm (2025) 的双任务研究, 直接证明认知负荷对协调稳定性的影响: 当个体同时执行周期性任务和附加认知任务时, 个体内协调的相位相干性显著下降。这一发现为“认知负荷挤占注意资源→实时加工精度下降”提供了直接的实验证据。同时, 保留 Bowsher-Murray et al. (2023) 和 Kasten et al. (2023) 关于人际同步任务中同步误差增大的证据, 使认知负荷与同步误差之间建立更明确的关联。3) 在 3.2.2 中, 引入 Dwyer et al. (2024) 的研究, 在同一研究中直接建立注意模式与感觉反应的量化关联: ASD 儿童的“注意解除困难”与感觉超反应性、感觉寻求等行为显著相关。这一发现将注意模式与感觉异常直接挂钩, 为“感觉干扰导致注意资源碎片化”(Anquetil et al., 2023; Dean et al., 2017) 提供了实证基础。同时, Huntley et al. (2023) 和 Stevenson et al. (2014) 的研究已被证明注意转移延迟与 TBW 拓宽、同时性判断不稳定存在直接关联, 可作为感觉干扰影响时间整合的直接证据。4) 对于仍缺乏直接证据的环节 (如社交伪装与时间整合指标的量化关联), 我们使用“可能”“有待直接验证”等谨慎表述, 并明确其为基于现有证据的合理推论。

问题三：需说明各机制在 TBW、同步阈值或反应变异性等指标上的具体表现。

针对问题三，我们做了如下调整：1）在 3.2.1 节中，我们将注意维持/转移困难的影响锚定到“同时性判断阈值”这一核心指标。通过推理链条明确：提取效率降低 → 时间先验薄弱 → 行为表现为更宽或更易变的的同时性判断阈值（Isaksson et al., 2018; Lozano et al., 2024）。这使得社交注意定向异常对时间整合的影响有了可量化的行为指标。2）在 3.2.2 节路径中，我们将认知负荷的影响锚定到两个层面：个体内协调稳定性：采用相位相干性指标，证明认知负荷导致协调稳定性下降（Jagadeesan & Grahm, 2025）；人际同步表现：采用同步误差和误差修正速度指标，证明高认知负荷导致同步误差增大、修正减慢（Bowsher-Murray et al., 2023; Kasten et al., 2023）。3）在 3.2.2 节中，我们将感觉干扰的影响锚定到多个指标：注意转移延迟与 TBW 拓宽、同时性判断不稳定的直接关联（Huntley et al., 2023; Stevenson et al., 2014）。此外我们还新增以下证据：注意僵化对视听同步整合的放大效应（Maes et al., 2024）。通过 Dwyer et al. (2024) 的研究，将注意解除困难与感觉超反应性等行为指标量化关联，进一步强化了干扰对注意资源的占用证据。

本小结综合以上问题，主要修改主要集中在“3.2.1 社交注意定向异常”与“3.2.2 注意资源分配失调”部分。具体修改见：1）见 3.2.1 社交注意定向异常第一及第二段标黄部分：“这种不稳定的视觉采样模式，直接影响其对动态社交刺激中时间规律的提取效率.....时间先验的薄弱最终会在行为层面体现为多感觉时间整合的异常，例如更宽或更易变的的同时性判断阈值(Isaksson et al., 2018; Lozano et al., 2024)。”。2）3.2.2 注意资源分配失调第二及第三段标黄部分：“首先，认知负荷挤占注意资源，导致实时时间加工的精度下降.....他们一旦将注意固定于嘴部区域，便难以根据语境需求灵活地将注意再分配至眼部(Maes et al., 2024)，这种注意资源的僵化进一步放大了其视听同步整合的困难”。

问题 6：第 4 部分：干预建议的结构仍可更清晰，明确干预方式如何依次对应生理/神经变化、时间整合行为指标以及社交表现。同时需谨慎界定证据适用范围：Feldman（2020）更接近时间知觉训练，其作为感统治疗证据需限定条件；人际同步相关的神经递质机制跨度较大，更适合作为可能的中介或调节因素讨论。

回应 6：感谢审稿老师的意见。我们将审稿老师的意见归纳为以下问题：

问题一：明确干预方式如何依次对应生理/神经变化、时间整合行为指标以及社交表现。

针对问题一，我们在 4.1 节和 4.2 节中，均采用“首先，干预对神经生理的影响”“其次，

神经生理改变对时间整合的影响”“最后，时间整合改善对社交表现的促进作用”三级标题，且每个标题内的研究证据也根据主题内容做了相应调整。使每一层级的因果关系清晰可见。可明确追踪从具体干预操作到神经机制、再到行为指标、最终到社交表现的完整路径。具体修改详见 4.1 节和 4.2 节中标黄部分标题：“首先，干预对神经生理的影响。感统治疗通过有节奏、可预测的前庭、本体及触觉输入（如秋千、弹跳、触摸各种材质），旨在优化个体的感觉反应阈值和神经唤醒水平(Holland et al., 2021; Kilroy et al., 2019).....尽管已有研究观察到干预带来的社交参与度提升和情绪改善(Koch et al., 2015; Yoo & Kim, 2018)，但将这些效益直接等同于多感觉时间整合能力改善仍显证据不足。”

问题二：Feldman（2020）更接近时间知觉训练，其作为感统治疗证据需限定条件。

针对问题二，我们在 4.1 节中，将 Feldman 研究从“感统相关训练”修正为“基于反馈的视听时间知觉训练”，明确其与感统治疗的区别。如实报告研究结果（仅 1/3 参与者表现出明确效应），并强调“临床转化价值有待进一步验证”，严格限定了该证据的适用范围，避免过度结论。修改详见 4.1 感觉统合治疗第三段标黄处：“在为数不多以时间整合为干预改善指标的感知觉训练研究中，Feldman 等人(2020)采用多基线设计，对 ASD 儿童进行基于反馈的视听时间知觉训练。该训练通过同时性判断任务提供即时反馈，旨在缩窄其视听言语时间绑定窗(TBW)。研究结果显示，3 名进入训练的参与者中，仅 1 名表现出明确的 TBW 变窄效应。该研究仅提示 ASD 儿童的时间整合能力可能具有一定可塑性，但其临床转化价值有待进一步验证。”

问题三：人际同步相关的神经递质机制跨度较大，更适合作为可能的中介或调节因素讨论。

针对问题三，我们在 4.2 节中，将神经递质内容从直接作用机制中剥离，单独作为“可能的神经递质中介机制”段落。构建完整的假设路径，并结合 Noda & Noda (2025)提出的音乐节律与神经可塑性机制级联模型，该模型提出了输入层（音乐等声学节律）→加工层（神经震荡、多巴胺奖惩机制等）→可塑造层（神经突触、灰质体积等改善）→输出层（认知功能、社会互动、情绪等加强）的作用路径。我们以此作为理论框架支撑，明确神经可塑性可能受到各神经递质的调节。修改详见 4.2 人际同步干预第二段标黄处：“值得注意的是，上述神经可塑性变化可能受到神经递质系统的调节。音乐已被证实能够促进催产素、多巴胺和皮质醇等神经递质的分泌(Chanda & Levitin, 2013; Gebauer et al., 2016)。..... ②促进神经递质释放 → ③增强社交动机与时间同步能力 → ④改善多感觉时间整合表现(Noda & Noda, 2025)。这一路径仍有待未来研究直接验证。”

问题 7: 在总结部分：图 1 出现突兀，缺乏说明与过渡。此外，总结中其有些论述是对原因及溯源的说明，建议这些内容移前，而不是放在总结中。

回应 7: 感谢审稿老师的意见。我们完全同意您的观点。原稿中图 1 的出现缺乏必要的铺垫。现已将图 1 及其相关的推导性论述整体移至第三章“认知模式缺陷”之后。这是因为该模型是基于前三部分——即“行为特征”（第一章）、“神经生理异常”（第二章）和“认知模式缺陷”（第三章）——的系统性分析与整合后自然推导得出的理论框架。将其置于此处，作为对前三部分机制讨论的总结与升华，逻辑上更为顺畅，避免了在全文总结中突然出现的突兀感。

此外,我们已在“5. 总结与展望”部分的开头，新增了一段完整的全文总结。新增的总结部分并非简单重复前文，而是从以下三个维度对全文进行了系统性的回顾与整合：1)行为表现维度：首先概括了 ASD 个体在多感觉时间整合上的三大核心行为特征——基础时间绑定窗口异常、动态时间协调困难、社交线索整合障碍，对应了论文的第一章内容。2)机制解释维度：接着，深入整合了产生上述行为特征的根源，分别从神经生理层面（自主神经、神经递质、脑网络与振荡）和认知模式层面（预测编码障碍、非典型注意）进行了归纳，对应了论文的第二、三章内容。3)理论整合与干预启示维度：最后，基于上述分析，引出并阐明了本文提出的神经生理-认知行为整合模型的核心价值——揭示从感觉到社交的级联路径，并据此点明未来精准干预（如感觉统合、人际同步干预）的理论方向。具体修改见 5. 总结与展望第一段标黄部分：“本研究系统梳理了 ASD 个体在多感觉时间整合方面的行为特征、神经生理基础及认知模式缺陷，并探讨了其对社交障碍的潜在影响路径。.....感觉统合治疗与人际同步干预因其分别作用于基础感觉调节与时间预测、社会神经耦合等核心靶点，展现出作为精准干预方向的潜力(Ding et al., 2024; Patil & Kaple, 2023)。”

问题 8: 未来研究部分：可进一步对准模型中的关键假设，通过更有针对性的实验设计加以检验。尤其可在干预研究中同时纳入 TBW、时间再校准、同步误差及 EEG 伽马活动等指标，用以追踪干预是否首先改变时间整合相关过程，以及这些变化是否进一步关联到社交表现的改善，从而逐步澄清干预作用的具体路径。

回应 8: 感谢审稿老师的意见。根据审稿老师的意见，我们对展望部分做了以下几方面的调整：1）第一点：机制检验，原文讨论生态效度，建议将研究场景从实验室拓展至现实环境，采用可穿戴设备进行行为监测。我们根据审稿老师的意见，完全重写第一点，提出“采用多模态指标检验模型的因果链”，建议设计 RCT 干预研究，同时纳入 TBW 宽度、时间再

校准能力、同步误差与变异性、 γ 波段振荡同步性等核心指标，并通过中介模型分析“干预→时间整合指标改变→社交表现改善”的因果路径。2）第二点：生态效度与异质性，随后，我们将原第一点的生态效度建议与第二点的异质性合并，提出“提升情景生态效度，并考虑个体异质性对模型影响”。一方面借助可穿戴技术拓展至自然情境；另一方面系统区分 ASD 亚组（单纯 ASD vs. ASD 共病 ADHD），并将认知因素作为协变量纳入模型。3）第三点：精准干预。调整后，我们明确提出“基于整合模型进行机制层面的分型”，例如根据基线 TBW 宽度、 γ 振荡强度或自主神经反应模式，将个体划分为不同亚型（如“基础时间窗口异常突出型”vs.“社交线索整合困难主导型”），并为其匹配合适的干预方案（感统训练 vs. 人际同步干预）。同时保留长期追踪的建议。以上三点修改详见 5.总结与展望第 3—5 段标黄部分：“首先，未来研究应采用多模态指标检验模型的因果链。……并为其匹配具针对性的干预方案（前者可能更受益于感统训练(Kilroy et al, 2019)，后者可能更需要人际同步干预(Daniel et al, 2022)。”

问题 9：还有个别地方需要表述需要更简练与准确，具体见文中批注。

批注 1：摘要处：“孤独症个体的多感觉时间整合呈现出基础时间窗口异常、动态时间协调困难和社会线索整合障碍的特征。从神经生理的层面，”批注内容：此几个层面的表述要一致。

回应批注 1：感谢审稿老师意见。我们在新的摘要中已分别对行为层面、神经生理层面及认知层面所涉及的标题表述做了一一对应排查，修改调整思路详见问题 1 的回复，修改内容见摘要标黄部分：“在行为层面，表现为基础时间窗口异常、动态时间协调困难和社交线索整合障碍。……与非典型注意模式相互交织，共同解释了个体难以形成精确时间预期并进行实时整合的机制。”

批注 2：原文：“1.1 基础时间窗口异常”第二段：“可能与 ASD 个体对视觉言语信息的依赖减少”，批注内容：有较多研究表明，ASD 儿童有视觉化优势，下此结论与大多研究不符，因此要谨慎下此结论，下此结论需要更多文献支撑。

回应批注 2：感谢审稿老师意见。经原文献认真核实，我们认为该实证证据在此处的表述确实缺乏严谨性，因此该研究证据做删除处理。此外，我们还对“1.1 基础时间窗口异常”整体内容的严谨性进行排查和调整，如在“1.1 基础时间窗口异常”第三段第四行“表明，ASD 的基础时间窗口异常在面对复杂信息时更为凸显，可能为其在社会性任务中更大的困难埋下了伏笔。然而，关于 TBW 拓宽的结论存在一定的研究异质性，这种不一致可能受到年龄、

任务范式和测量方法的影响。”增加“可能”二字；在最后一段处，增加“现有研究多支持”字眼。

批注 3：原文：“1.1 基础时间窗口异常”最后一段处：“敏锐度越低（即 TBW 越大）”，标注内容：这二者非等同关系，应该是因果关系吧

回应批注 3：感谢审稿老师意见。我们已将“敏锐度越低（即 TBW 越大）”改为“时间敏锐度越低（表现为时间绑定窗口越宽）”，用“表现为”替代“即”，明确了时间绑定窗口宽度是时间敏锐度低的行为指标，而非等同关系，符合审稿人要求的因果/指代逻辑。详见新稿“1.1 基础时间窗口异常”最后一段标黄处。

批注 4：原文：“2.神经生理异常 ”第一段处：“调制时间预测与社交同步动机”对“动机”二字打问号。

回应批注 4：感谢审稿老师意见。我们仔细核对斟酌，确实觉得社交同步动机这个词不够恰当，现已将“调制时间预测与社交同步动机”改为“调节时间预测与社交协调”，用“社交协调”，更准确地反映了神经递质系统（如多巴胺参与时间预测编码、催产素调节社会性同步）的实际功能，避免了将神经递质作用与心理层面的“动机”概念直接等同，表述更加严谨。修改内容详见“2.神经生理异常 ”第一段标黄部分。

批注 5：原文：“2.1 自主神经系统失调”第一段处：“两项指标均”。批注内容：哪两项要具体说明

回应批注 5：感谢审稿老师意见。我们已将该部分原为中的“两项指标”改为：“皮肤电及脑磁图所测指标”更精确指出是何指标。修改内容已在“2.1 自主神经系统失调”第一段标黄。

第四轮

审稿人 1 意见：

主要不足：

问题 1：论证语气需统一，摘要与结论对干预效果的因果表述偏肯定，应与正文“证据有限、多为推论”保持一致。

回应 1：感谢审稿老师的意见。根据审稿老师的意见，我们对摘要和结论进行了如下修改：

一、摘要部分的修改

原表述：“感觉统合训练与人际同步干预……有望改善其感知觉状态与人际同步能力，

从而对社交技能发展产生积极影响”

修改后：“感觉统合训练与人际同步干预在理论上可能作用于时间整合的核心靶点，可能对感知觉状态与人际同步能力产生积极影响，进而潜在地促进社交技能发展。但这一因果路径目前仅为理论推论，仍需未来干预研究结合多模态指标加以实证检验。”

修改要点：增加“在理论上可能”“潜在地”“仅为理论推论”等限定词，明确区分理论推测与实证结论，语气从偏肯定调整为审慎推论。修改内容已在摘要处标绿色，详见摘要最后部分：“针对 ASD 个体的感知觉特征.....进而潜在地促进社交技能发展。但这一因果路径目前仅为理论推论，仍需未来干预研究结合多模态指标加以实证检验。”。对应的英文摘要也做了相应调整，见英文摘要最后部分：“In light of the perceptual and sensory features of ASD.... remains a theoretical inference at present, and empirical testing through future intervention studies with multimodal measures is required.”

二、结论部分的修改

原表述：“.....展现出作为精准干预方向的潜力”

修改后：“.....从理论上提示了作为精准干预方向的潜力。然而，目前相关证据有限，多为推论（Ding et al., 2024; Patil & Kaple, 2023），其实际效果有待未来实证研究检验。”

修改要点：新增“从理论上提示了”“目前相关证据有限，多为推论”“实际效果有待未来实证研究检验”等表述，明确点出现阶段结论的推论性质，与正文的措辞形成一致。修改内容已在“5.总结与展望”第一段末尾处标绿色：“基于这一机制模型，感觉统合治疗与.....然而，目前相关证据有限，多为推论，其实际效果有待未来实证研究检验。”

问题 2：模型图神经生理-认知行为整合模型命名有些歧义，在图中认知与行为是两个环节，而图名命名为一个环节，反而感觉有逻辑问题，请重新考虑命名。并建议突出神经生理为基础、认知为中介、行为为结果的级联路径。

回应 2：感谢审稿老师的意见。根据审稿老师提出的模型图命名问题及建议突出级联路径两个建议，我们做了如下调整：

一、模型命名修改为：ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知-行为级联模型，修改后的命名明确区分了“神经生理”、“认知”、“行为”三个独立的层级，并使用“级联模型”一词强调信息从基础层到结果层的逐级传递路径，消除了原命名中的逻辑歧义。

二、根据审稿老师提出的“突出神经生理为基础、认知为中介、行为为结果的级联路径”建议，我们对正文“3.2.2 注意资源分配失调”中第 5—9 段模型构建的讨论部分做了修改：1）

拆分原“神经认知层面”，明确区分神经生理与认知两个层级，神经层面：集中论述自主神经失调、神经递质调节障碍、神经网络激活与连接异常，并明确收束为“这些神经生理层面的异常，共同构成了时间整合障碍的底层基础”；认知层面：集中论述预测编码障碍与注意资源分配失调，并明确表述为“上述神经生理异常经由认知加工过程进一步中介和放大”。2）将原“神经认知层”中相互影响，形成“负面循环”的讨论，移至“3.2.2 注意资源分配失调”最后一段，行为层面的末尾处。从更宏观的角度，讨论神经生理、认知、行为三者的相互影响，改为：“因此，ASD 个体的时间对齐障碍可追溯至早期出现的、相互关联的神经生理、认知与行为异常，并形成负向循环。”

以上修改见“3.2.2 注意资源分配失调”中第 5—9 段标绿部分：“基于上述分析，本研究进一步梳理出 ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知行为整合模型（图 1）.....构成了 ASD 个体核心社交障碍的重要感知基础(Feldman et al., 2022; Wallace et al., 2020)。”

三、模型图结构调整：首先，我们根据审稿老师意见，将模型分为基础层、中介层及结果层，其中初期的感觉刺激及神经生理表现为基础层、认知模式为中介层、行为表现特征与社交障碍为结果层。在构图上将原几大版块顺序调整，神经生理及感觉输入（基础层）在最下方，直观体现多感觉时间整合障碍的发展中自下而上的过程。其次，在神经生理、认知和行为特征三个方面的表现上用相互作用的箭头方向，表示这部分障碍相互影响，造成“负向循环”。最后，我们单独列出“社交功能障碍”级联效应，明确其为行为层异常所导致的最终后果，包括语言感知异常、共情能力较弱、社交沟通困难。

以上修改见 3.2.2 注意资源分配失调末尾：图 1 ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知-行为级联模型，模型图已替换，图注已标绿色。

问题 3：部分段落仍然有总结不足问题，语言可进一步凝练。

回应 3：感谢审稿老师的意见。根据审稿老师的意见，我们全文核查，确实部分段落存在总结不足的问题，具体修改如下：

一、在“1.2 动态时间协调困难”最后一段总结处。1）简化行为表现陈述：原段落中重复罗列了“时间感知任务中的准确性下降、变异性增高”与“同步任务中的误差增大、稳定性下降”及其引文。修改后将其合并为一句简洁的概括：“行为上可归纳为两大核心表现：时间感知任务中的判断准确性下降与变异性增高，以及感觉-运动同步任务中的同步误差增大与稳定性下降”。这样既保留了核心指标，又避免了重复叙述。2）重构逻辑链条：原段落逻辑为“核心机制（计时稳定性降低）→ 任务结构等因素调节 → 计时不稳定性贯穿 → 损害人际

协调能力 → 级联社交影响”。其中“任务结构调节”与“计时不稳定性贯穿”之间存在冗余和层次不清。修改后简化为三层递进结构：行为表现 → 核心机制（内部计时系统稳定性降低）→ 社交影响（削弱实时人际协调 → 形成级联影响）。这一结构在原文中保留了所有关键引文（Baldwin et al., 2022; Bowsher-Murray et al., 2023），但去除了中间干扰项，使读者能清晰追踪从感知运动缺陷到社交功能损害的路径。修改内容已标绿色，见“1.2 动态时间协调困难”最后一段：“综上，ASD 个体的动态时间协调困难在行为上可归纳为两大核心表现……从而形成从感知觉异常到社交功能障碍的级联影响(Bowsher-Murray et al., 2022; Williams et al., 2024)”。

二、在“1.3 社交线索整合障碍”最后一段。1) 重构逻辑结构，修改前：采用“核心层面……调节层面……此外……”的并列式结构。其中“调节层面”内部又混杂了“一方面……另一方面……”两种不同性质的调节因素，整体呈现为平铺罗列，缺乏层次递进。修改后：建立“基础异常→情境调节→行为后果”的三层递进框架。每一层均有明确的逻辑功能：第一层定位缺陷的源头，第二层解释缺陷如何被放大，第三层揭示缺陷的行为表现及本质。2) 二、删除冗余与次要信息。删除内容：“呈现出复杂的层级结构”、“调节层面则表现为社会情境对核心机制的动态影响”等。合并内容：将“不仅体现为神经层面的同步异常，也表现为行为层面对动态社交线索的响应延迟或缺失”与前面的“导致对动态社交线索的响应延迟或缺失”合并为最后一句的总结性陈述，避免前后重复。修改内容已标绿见“1.3 社交线索整合障碍”最后一段：“综上，ASD 个体在社会性条件下的多感觉时间整合障碍……这表明，其时间整合障碍不仅存在于神经层面的同步异常，也表现为行为层面的实时响应损伤”

三、在“3.2.2 注意资源分配失调”第四段。1) 深化逻辑链条：梳理两个逻辑链条“社交注意定向异常→时间先验薄弱”、“注意资源分配失调→计算资源不足”。最后总结时，明确对应预测编码中的“先验缺陷”与“预测误差处理异常”，揭示注意模式缺陷分别作用于预测编码的两大核心组成部分（先验与预测误差），而非笼统的“共同作用”。2) 总结凝练，合并重复信息：删除原“这两者共同作用于预测编码过程，加剧了……核心困难”中“共同作用于”这一较为模糊的表述，改为“分别对应……，共同导致……”，既保留了协同效应，又明确了分工机制。将最终的困难表述从“加剧了核心困难”具体化为“难以形成精确的时间预期，也无法在偏差发生时进行有效调整”，使读者清楚理解“先验缺陷”和“预测误差处理受限”各自导致的后果。修改内容已标绿见“3.2.2 注意资源分配失调”第四段：“综上，ASD 个体的非典型注意模式从两个层面损害多感觉时间整合……共同导致 ASD 个体在动态环境中难以形成精确的时间预期，也无法在偏差发生时进行有效调整，从而从根本上加剧了其多感觉时间整

合的核心困难。”

第五轮

编委 1 复审意见：

在经过大量修改后（感谢审稿人提出的非常有建设性的意见），论文整体质量不错。我有一些额外意见，希望作者进一步回应：

问题 1：“最后，ASD 个体在过滤无关感官信息方面的缺陷，加剧其在复杂环境中的时间整合困难。研究发现……”，这一段后面举的例子和“过滤无关感官信息方面的缺陷”并不直接对应。例子更像是 ASD 个体社会性注意的异常，它与“过滤无关感官信息方面的缺陷”可能存在关联，但并不是必然联系。作者可能需要考虑修改相关论述或者通过补充解释性语句把“过滤无关感官信息方面的缺陷”和社会性注意的异常建立关联。

回应 1：感谢审稿老师意见。针对审稿人指出的“段首句与后文例子（社会性注意异常）缺乏直接对应”问题，本次修改从以下方面进行了调整：

一、修改段首句：通过进一步文献梳理，Keehn 等人（2016）的研究指出无论“task-relevant”还是“task-irrelevant”的感觉信息都能捕获 ASD 个体的注意力，而 TD 个体会将注意力放在“task-relevant”上。L. E. D. Kwakye 的研究指出“ASD 大脑神经元过滤感觉信息的能力降低，感觉加工的时间相关方面可能被改变，且对语言和社交互动产生深远影响”。因此，我们将“过滤无关感官信息方面的缺陷”这一表述替换为更严谨、更能涵盖后文例子的概念——“ASD 个体感觉过滤功能损伤，难以有效区分任务相关与任务无关的感官输入，可能加剧其在复杂社交环境中的时间整合困难(Keehn et al., 2016; L. E. D. Kwakye, 2011)”

二、增加过渡衔接：在引入社会性注意例子之前，加入过渡句：“在社交情境中，这种对任务无关感官信息的过滤困难，表现为社会性注意异常(Keehn et al., 2019)”及：“这一现象虽表现为注意偏差，但其深层原因仍与难以过滤非目标任务信息有关”，将“过滤困难”与“社会性注意异常”建立直接关联。

以上修改见“1.3 社交线索整合障碍”第三段标粉红色部分。修改后，明确逻辑链条，段首核心概念与分析例子建立关联。同时，新增的参考文献为论述提供了实证支撑。

问题 2：在把自主神经系统失调作为时间加工困难这一部分，作者同样举了很多跟时间加工无关的例子，证据链并不强。同时，作者提到“注意资源分配制约多感觉时间整合的精度”，

但后面的例子却是“视觉时间敏锐度损伤”、“同时性判断”，它们与注意资源分配的联系是什么？

回应 2：感谢审稿老师意见。针对审稿人提出的意见：（1）自主神经系统失调与时间加工困难的论证中列举了较多与时间加工无直接关联的例子，证据链不够紧密；（2）“注意资源分配制约多感觉时间整合精度”的论点与后续所举例子（视觉时间敏锐度损伤、同时性判断）之间的逻辑关联不清晰。我们进行以下调整：

一、补充自主神经与时间加工的直接证据

经进一步文献检索，我们发现在 ASD 群里中自主神经与时间加工的直接证据研究较少，因此我们在“2.神经生理异常”第一段末尾补充了 TD 人群中自主神经与时间加工的证据中 1）新增 Meissner & Wittmann（2011）的研究：心跳感知准确率与时长复制表现呈显著正相关，心率减速斜率与时间判断精度显著相关。2）新增 Grund 等人（2022）的研究：呼吸相位与心脏周期特定阶段显著影响触觉检测率，呼吸-心脏耦合共同优化感知表现。为“ANS 活动与时间加工密切相关”这一核心论点提供了直接、具体的实证支持。建立了从 TD 人群到 ASD 人群的逻辑推理起点，使后续关于 ASD 自主神经异常导致时间加工困难的推论更加有据可依。

二、精简 ASD 自主神经异常的相关例证

原文列举了较多 ASD 自主神经异常的例子（如触觉诱发反应降低、GSR/MEG 异常等），部分例子与时间加工的核心论点的直接关联不够明确，导致证据链显得松散。因此，在第二段，1）我们保留与时间加工和社交同步直接相关的核心证据（心率变异性、心率唤醒水平、社交任务中的呼吸心率反应）；2）精简其他例证的表述，避免堆砌与核心论点关联不够紧密的例证。提升论证的紧凑性和说服力，避免冗余信息。

三、引入“大脑-身体-环境”理论框架

原文直接提出逻辑链条，缺乏理论框架的支撑，导致论述的学术深度和理论依托不足。修改后：1）引入 Beker & Molholm（2023）的“大脑-身体-环境”时间动态耦合受损理论框架；2）强调 ANS 作为连接内部生理状态与外部环境的核心中介角色；3）明确 TD 个体能够实现自主神经节律与环境中时间可预测事件的适应性同步，而 ASD 个体可能无法建立这种同步关系。为 ANS 失调与时间加工困难之间的关联提供了系统性的理论解释

四、重构“注意资源分配”段落的逻辑关联

原文提出“注意资源分配制约多感觉时间整合精度”后，所举例子（Zhou et al., 2021 的高孤独特质个体视觉时间敏锐度损伤与异常时间绑定窗；Isaksson et al., 2018 的 ASD 儿童同时性判

断阈值多变) 仅涉及时间感知本身, 并未说明这些例子与“注意资源分配”之间的直接联系, 导致逻辑链条断裂。修改后: 1) 删除与注意资源分配无直接关联的例子(Zhou et al., 2021; Isaksson et al., 2018); 2) 保留 Bradshaw 等人(2025)关于心率减速与持续注意、认知投入之间关系的直接证据; 3) 保留 Carnevali 等人(2024)关于 ASD 社交同步误差的元分析作为逻辑链条的终点。使逻辑链条更加清晰、连贯。

以上修改详见“2.神经生理异常”标粉红色部分:“自主神经系统(Autonomic Nervous System, ANS)通过动态调节心率、呼吸及皮肤电活动等内在生理节律.....然而, 目前尚缺乏直接针对 ASD 人群中这一中介路径的实证研究, 有待未来采用同时测量自主神经活动、注意行为与时间加工表现的纵向设计加以验证。”

问题 3: 作者认为社交注意定向和注意资源分配分别对应“弱先验”与“预测误差处理异常”, 但这是没有研究证明的(包括作者引用的文献同样没有直接证明这个关系)。作者需要拿出令人信服的证据。

回应 3: 感谢审稿老师意见。在“3.2.2 注意资源分配失调”第四段末尾, 原文将“社交注意定向和注意资源分配分别对应‘弱先验’与‘预测误差处理异常’”确实缺乏严谨性, 经过进一步文献检索与阅读, 并未发现有“对应”的直接证据支持, 因此我们将这一段的论述做了以下调整:

一、删除缺乏严谨的段落“这两者分别对应预测编码框架中的‘弱先验’与‘预测误差处理异常’, 共同导致 ASD 个体在动态环境中难以形成精确的时间预期, 也无法在偏差发生时进行有效调整”。结合已有文献证据支持, 将“非典型注意模式”对“弱先验”与“预测误差处理异常”的影响分析分别放在两个层面的分析中。

二、在第一层面“社会注意定向异常”分析上, 新增 Hou et al. (2024)的研究发现——ASD 儿童眼动变异性高、社交注意减少, 而高预测能力儿童表现出更稳定的注视模式。引入实证研究作为逻辑桥梁, 为“注意模式影响先验获取”提供了直接、具体的实证证据。

三、在第二层面“注意资源分配失调”分析上: 1) 新增 Vogan et al. (2014)的 fMRI 证据——ASD 个体在认知负荷增加时难以调动额叶高级认知控制资源, 而是依赖后部脑区进行低级加工; 2) 新增 Dwyer et al. (2024)的证据——感觉超反应性与“粘性注意力”(注意解除困难)显著相关。并进一步推理“可能导致个体在处理预测误差时缺乏足够资源”。

以上修改详见“3.2.2 注意资源分配失调”第四段标粉红色部分:“综上, ASD 个体的非典型注意模式从两个层面损害多感觉时间整合: 第一, 社交注意定向异常导致其难以从动态环

境中提取稳定的时间规律.....ASD 个体的非典型注意模式从两个层面损害多感觉时间整合：
第一，社交注意定向异常导致其难以从动态环境中提取稳定的时间规律”

问题 4：有很多 typo，比如“以上时间整合障均可能碍影响其社交互动中的信息处理”；“障”应为“障碍”，还有一些括弧乱标、标点错误、同一句子重复等问题。作者需要仔细审阅。

回应 4：感谢审稿老师意见。老师提出的：“1.孤独症谱系障碍的多感觉时间整合特征”第一段，我们已经做了核对修改，并作标粉红色处理：“以上时间整合障碍均可能影响其社交互动中的信息处理”，此外我们还对全文进行括弧、标点、句子准确性等方面的核查，修改如：

一、摘要处修改模型名称为：“ASD 多感觉时间整合的神经生理-认知-行为级联模型”，英文摘要也做了相应调整；

二、前言第二段，删除重复句子：“这使他们在复杂多感觉环境种面临时间整合障碍”；

三、前言最后一段，修改标点，删除多余“并”字；

四、“1.1 基础时间窗口异常”第四段，修改错别字，调整为：“表现为时间绑定窗口越宽”；

五、“3.2.2 注意资源分配失调”第八段，删除多余括号，优化句子使其更通顺，调整为：“另一方面，定向注意困难与注意资源分配不当，使得 ASD 个体难以在纷杂的多感官流中优先选择并锁定与时间上相关的信息进行绑定(Bowsher-Murray et al., 2022)”，“在后期成长过程中，这种认知模式进一步阻碍其神经生理发育”

六、“4.1 感觉统合治疗”第四段，修改“应急”为“应激”，调整后为：“并减轻感官异常带来的焦虑和应激状态(Kirby et al., 2022)”

七、“4.2 人际同步干预”第三段，删除重复句子：“这为其内部时间预期机制的改善提供了行为层面的证据。”

以上修改已在相应位置标粉红色，此外还有多处括号调整、标点修改及空格添加删除及错别字修改，不一一例举。

问题 5：在提到“麦格克效应”，可以附上英文单词，并简要解释。

回应 5：感谢审稿老师意见。根据老师的意见，我们在“1.1 基础时间窗口异常”最后一段，“麦格克效应”出现处，做了解释，并附上英文单词及引用文献，修改处已标粉红色处理：“例如经典的麦格克效应（McGurk effect）。该效应指视觉唇部动作与听觉语音不一致时，大脑会融合两者产生一个全新的知觉(Mcgurk & Macdonald, 1976)。这

一整合能力在 ASD 个体中受损(Stevenson et al., 2014)”

编委 2 复审意见：

本文聚焦孤独症谱系障碍多感觉时间整合问题，系统梳理行为特征、神经生理、认知机制与干预研究，选题较为前沿。文章围绕时间绑定窗口、动态时间协调、社交线索整合三大特征展开，构建神经生理-认知行为整合模型，对后续有关研究有帮助。特别是作者根据评审意见，经过多次修改，质量得到提升。结合外审意见，同意发表。

第六轮

编委 1 意见：无其他意见，同意发表。

主编意见：作者根据审稿专家意见进行了多轮认真修改，同意发表。