

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：师生互动中组块化反馈促进长时学习迁移：行为和近红外超扫描研究

作者：朱怡，胡谊

第一轮

审稿人 1 意见：

研究通过 2 个实验，探索了组块化精细反馈的学习绩效影响，研究发现组块化反馈对于低知识基础的个体，可以有效促进其 7 天时间的长时学习迁移，并通过师生脑际耦合探索了这一效应的可能神经机制，研究发现对于理解人类学习过程具有一定的积极意义。然而，论文在研究设计、假设提出、研究结果组织等方面还存在不少需要改进的地方，审稿人建议大修。以下是具体建议：

意见 1： 论文的文献综述和问题提出需要进一步提炼，文献综述要更针对本文研究内容，问题提出需要更有针对性。比如，反馈信息的组块化已有研究是否常用这样的两个提出问题和反馈的形式？精细和组块化表达的是否是同一个概念？本研究采用师生互动神经耦合的必要性是什么？回答了有什么已有单人研究不能回答的问题？选择 fNIRS 的依据又是什么？知识再认和迁移有怎样的区别？哪个更重要？引入知识基础的理由是什么？等等。

特别的，在实验假设提出部分，所引用文献和陈述的逻辑没有对假设提供直接的支持。以实验室 1 的假设（1）为例，过往研究说“新手或基础较差的学生更可能受益于旨在提供更多支持的反馈”，并不能直接说明知识基础低就一定受益于组块化的反馈，更何况“知识迁移”了。

回应： 感谢审稿人指出应提高文献综述与问题提出的针对性，并进一步提高引用文献和陈述的逻辑对假设的支持性。首先，我们按审稿人的每条意见进行了如下修订。此外，结合修稿过程中的理解，我们对引言部分进行了全面修订。

意见 1-1： 反馈信息的组块化已有研究是否常用这样的两个提出问题和反馈的形式？

回应： 前人有关反馈信息的组块化呈现对学习的影响主要集中在知觉类别学习的研究中，例如在 Coutinho 等人（2010）和 Simith 等人（2014）的研究中，组块化反馈出现在 6 个试次（一个试次持续约 5s）结束后，即 30s 后，对正确或错误的试次一起做反馈。上述研究中的反馈为判断正确/错误的简单反馈。

Hattie 和 Timperley（2007）认为在教学中，可以将教学指导(instruction)和反馈看成一个连续统。在连续统的一端是教学指导与反馈之间存在明确区别，这里的反馈往往只能确证学生认知或行为是否正确。但当反馈包含越来越多精细化的信息时，反馈和教学指导就会交织在一起，直到反馈过程本身呈现出新的教学形式，也就是连续统的另一端。在本研究中使用的反馈包含正确答案和举例，是一种精细内容反馈，所以更接近于教学指导。据此，在设置组块化反馈时参考了既往教与学研究中对学习材料的组块化呈现方式，比如在动作学习研究中，组块化呈现的方式通常是将动作序列内容的 2~4 个试次一起呈现(Cohen & Sekuler, 2010; Sakai et al., 2003)；在记忆学习研究中，组块化呈现的容量为 7 ± 2 ，在短时记忆中存储时间大约为 5~60s (Gobet et al., 2001; Thalmann et al., 2019)；在知识学习的研究中，通过强调概念间的相互关联可以帮助学习者在结构不良领域获得高级知识并促进学习迁移 (Jonassen, 1991; Spiro et al., 1991)。

综上，本研究将“组块”界定为两个存在关联的概念对，“组块化反馈”界定为同时呈现两个关联概念的定义及举例，使得组块化反馈出现在两次提问和两次回答之后（约 30~40s），组块化反馈本身持续约 60~70s，可对短时记忆形成一定的挑战。并在文中进行了参考文献的补充说明（p. 4）：

“依据前人反馈信息组块化和学习材料组块化研究，将组块化反馈设定为同时呈现两个关联性概念的答案和举例（Simith et al., 2014; Cohen & Sekuler, 2010; Gobet et al., 2001; Spiro et al., 1991）。”

参考文献：

- Coutinho, M. V., Couchman, J. J., Redford, J. S., & Smith, J. D. (2010). Refining the visual-cortical hypothesis in category learning. *Brain and cognition*, 74(2), 88–96.
- Thalmann, M., Souza, A. S., & Oberauer, K. (2019). How does chunking help working memory?. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 45(1), 37–55.
- Sakai, K., Kitaguchi, K., & Hikosaka, O. (2003). Chunking during human visuomotor sequence learning. *Experimental brain research*, 152, 229–242.

意见 1-2： 精细和组块化表达的是否是同一个概念？

回应： 前人有关反馈信息的组块化呈现对学习的影响主要集中在知觉类别学习的研究中，例如在 Coutinho 等人（2010）和 Simith 等人（2014）的研究中，组块化反馈出现在 6 个试次（一个试次持续约 5s）结束后，即 30s 后，对正确或错误的试次一起做反馈。上述研究中的反馈为判断正确/错误的简单反馈。

Hattie 和 Timperley（2007）认为在教学中，可以将教学指导(instruction)和反馈看成一个连续统。在连续统的一端是教学指导与反馈之间存在明确区别，这里的反馈往往只能确证学生认知或行为是否正确。但当反馈包含越来越多精细化的信息时，反馈和教学指导就会交织在一起，直到反馈过程本身呈现出新的教学形式，也就是连续统的另一端。在本研究中使用的反馈包含正确答案和举例，是一种精细内容反馈，所以更接近于教学指导。据此，在设置组块化反馈时参考了既往教与学研究中对学习材料的组块化呈现方式，比如在动作学习研究中，组块化呈现的方式通常是将动作序列内容的 2~4 个试次一起呈现（Cohen & Sekuler, 2010; Sakai et al., 2003）；在记忆学习研究中，组块化呈现的容量为 7 ± 2 ，在短时记忆中存储时间大约为 5~60s（Gobet et al., 2001; Thalmann et al., 2019）；在知识学习的研究中，通过强调概念间的相互关联可以帮助学习者在结构不良领域获得高级知识并促进学习迁移（Jonassen, 1991; Spiro et al., 1991）。

综上，本研究将“组块”界定为两个存在关联的概念对，“组块化反馈”界定为同时呈现两个关联概念的定义及举例，使得组块化反馈出现在两次提问和两次回答之后（约 30~40s），组块化反馈本身持续约 60~70s，可对短时记忆形成一定的挑战。并在文中进行了参考文献的补充说明（p. 4）：

“依据前人反馈信息组块化和学习材料组块化研究，将组块化反馈设定为同时呈现两个关联性概念的答案和举例（Simith et al., 2014; Cohen & Sekuler, 2010; Gobet et al., 2001; Spiro et al., 1991）。”

参考文献：

- Coutinho, M. V., Couchman, J. J., Redford, J. S., & Smith, J. D. (2010). Refining the visual-cortical hypothesis in category learning. *Brain and cognition*, 74(2), 88–96.
- Thalmann, M., Souza, A. S., & Oberauer, K. (2019). How does chunking help working memory?. *Journal of*

Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 45(1), 37–55.

Sakai, K., Kitaguchi, K., & Hikosaka, O. (2003). Chunking during human visuomotor sequence learning. *Experimental brain research*, 152, 229–242.

意见 1-3: 研究采用师生互动神经耦合的必要性是什么？回答了些什么已有单人研究不能回答的问题？

回应: 在教育心理学结合神经科学技术的实验研究中，大量使用静态的学习材料（如，文字和图片），少数使用的动态材料也通常是间断或序列的（如提前录制好教学视频，再呈现给被试进行学习）；采用的任务范式通常是只关注学习者或教学者单人、缺乏真实互动的任务，即便设置互动也通常是一种伪互动（如，与事先设定的计算机互动或与假被试进行互动）。

但是，真实的教学是一个双向的过程，涉及教师与学生通过互动来实现知识的动态传递。本研究关注的教学反馈是师生互动的一种典型方式，也具有动态、连续、双向的信息交互特征。所以，为了揭示上述基于反馈的师生互动过程中涉及的认知神经过程，研究有必要超越静态的学习材料、间断的学习过程、单人的无或伪互动任务设置，改用动态连续的教学、双人的任务设置。所以依赖于简单刺激重复呈现的事件相关的单脑指标不再适用，而是需要在基于互动双方的大脑活动的同时采集的基础之上计算师生的大脑神经耦合性或同步性等指标（Tan et al., 2023）。将上述内容整理后，补充在引言中（p. 1）：

“教学反馈是一个双向过程，涉及教师与学生通过连续互动进行知识的动态传递，为揭示上述动态、连续、双向的教学过程中涉及的认知神经过程，研究有必要超越静态的学习材料、间断的学习过程以及基于单人的无或伪互动范式，从人际视角切入对互动双方的大脑信号进行同时的采集与分析（Tan et al., 2023）。”

意见 1-4: 选择 fNIRS 的依据又是什么？

回应: 考虑到 fMRI 的时间分辨率和扫描空间对任务类型的限制，目前较少应用于真实教学互动研究进行同时的数据采集。而 EEG 和 fNIRS 更容易实现在师生互动过程中对他们的大脑活动进行同时采集，但相比于 EEG，fNIRS 具有更高的空间分辨率、且对动作伪迹的容忍度更大（Lloyd-Fox et al., 2010），所以更适用研究于动态、连续、多人的教学活动。补充在 1.3（p. 3）和 1.4（p. 4）。

参考文献：

Lloyd-Fox, S., Blasi, A., & Elwell, C. E. (2010). Illuminating the developing brain: the past, present and future of functional near infrared spectroscopy. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(3), 269–284.

意见 1-5: 知识再认和迁移有怎样的区别？哪个更重要？

回应: 知识再认和迁移是概念性知识学习的两种常见结果。知识再认一般指联结再认，在本研究中指判断术语与定义之间同时出现过的能力。知识迁移指在一种情境中获得的知识和理解在另一情境中的运用（Gick & Holyoak, 1987），在本研究中指为术语匹配新例子的能力。知识再认是知识迁移的基础。相比于知识再认，知识迁移更为重要，因为迁移常作为教学目标——为迁移而教，在教学活动中广泛存在，与学生新情境问题解决能力和创造性思维密切相关（王磊，2016）。在引言中进行了补充说明（p. 1）。

参考文献：

Gick, M. L., & Holyoak, K. J. (1987). The cognitive basis of knowledge transfer. In *Transfer of learning* (pp. 9–46). Academic Press.

王磊.(2016).学科能力构成及其表现研究——基于学习理解、应用实践与迁移创新导向的多维整合模型. *教育研究*(09),83-92.

意见 1-6: 引入知识基础的理由是什么?

回应: 引入知识基础是因为考虑到原有的知识经验背景是影响知识理解及迁移的重要影响因素之一 (Gick & Holyoak, 1987), 同时考虑到接受反馈前学生先验知识水平会影响反馈的有效性 (Fyfe et al., 2012; Krause et al., 2009), 所以通过设置学习导入阶段来操纵学生接收反馈前的知识基础, 以此考察知识基础的可能影响 (p. 4)。

意见 1-7: 特别的, 在实验假设提出部分, 所引用文献和陈述的逻辑没有对假设提供直接的支持。以实验室 1 的假设 (1) 为例, 过往研究说“新手或基础较差的学生更可能受益于旨在提供更多支持的反馈”, 并不能直接说明知识基础低就一定受益于组块化的反馈, 更何况“知识迁移”了。

回应: 将实验 1 的假设 (1) 修订如下:

“新手或基础较差的学生更可能受益于提供更多支持的反馈 (Paas et al., 2003; Sweller et al., 1998), 而更有经验或知识基础较好的学生对于更多支持的反馈信息依赖更小 (Renkl & Atkinson, 2003; Sweller et al., 1998); 精细内容反馈可以促进知识迁移 (Butler et al., 2013; Finn et al., 2018; Zhu et al., 2022); 将学习内容按组块化呈现相比于单独呈现可以为概念辨别或关联提供更多支持与机会 (Spiro et al., 1991; Chase & Simon, 1973), 所以预期当学生知识基础较低时, 按组块化呈现的精细内容反馈, 能更有效地支持学习并表现为促进知识迁移”

此外, 将实验 1 的假设 (2) 修订如下:

“由于组块化的信息有利于长时记忆 (Gobet et al., 2001), 且因组块化呈现而导致的反馈延迟也更可能带来学习的延迟-保持效应 (Kulhavy & Anderson, 1972), 所以预期组块化反馈也能促进长时的学习表现, 特别是 7 天后的知识迁移”

将实验 1 的假设 (3) 修订如下:

“基于反馈促进学习的可能认知机制 (Bangert-Drowns et al., 1991; Nicol & McFarlane-Dick, 2006), 预期反馈呈现方式通过组块化错误修正或认知努力影响长时的知识迁移”

将实验 2 的假设 (3) 修订如下:

“反馈信息加工激活接收者和提供者的额、顶脑区 (Apps et al., 2015; Crone et al., 2008; Luft et al., 2013), 真实的教学互动引发双方在额叶和颞顶区域的同步性脑活动 (Tan et al., 2023; Zhu et al., 2022), 而前人研究还发现人类加工组块信息依赖的脑区包括 DLPFC 和后顶叶皮层 (Alamia et al., 2016; Bor et al., 2003; Jin et al., 2020; Pammi et al., 2012), 所以预期在师生互动中组块化反馈引发更大的师-生脑间同步, 且出现在与反馈加工和组块加工均有关的额、顶区域”

意见 2: 实验设计: 知识再认和迁移的具体任务需要明确介绍出来, 为什么选择学习后 7 天的依据需要更加明确论述, 高知识基础的现有“导入”操作是否会带来混淆从而影响高知识基础部分的结果? 知识组块的定义通过选择人数是否过半来评价是否合理? 学生和老师的性别设置有何考虑? 是否需要控制?

回应: 感谢审稿人对实验设计方面的建议, 我们逐一进行了修订。

意见 2-1: 知识再认和迁移的具体任务需要明确介绍出来

回应: 已在文中补充 (p. 8):

“在知识再认的测量中, 学生被试需要为提供的 10 个定义匹配其对应的术语; 在知识迁移的测量中, 学生被试需要为提供的 10 个新例子匹配其对应的术语 (测验设置参考 Finn et al., 2018)。”

意见 2-2: 为什么选择学习后 7 天的依据需要更加明确论述

回应: 已在文中补充 (p. 8):

“参考前人研究在测量长时学习效果时, 常会设置 7 天的时间间隔 (如, Butler et al., 2007; Smith & Kimball, 2010), 本实验中的学生被试在 7 天后被要求通过会议软件在线完成第二次学习后测验 (限时 15 min), 内容与之前一致, 以此考察反馈呈现方式对学习的长时效应。”

意见 2-3: 高知识基础的现有“导入”操作是否会带来混淆从而影响高知识基础部分的结果?

回应: 确实可能存在一定混淆或干扰。当前研究在“导入”阶段时将概念的术语和定义连续给学生讲述两遍, 这一操作有可能对学生的知识基础提高过多, 以致反馈呈现方式的可能影响无法显现。后续研究可以尝试在保证高知识基础操纵成功的前提下, 使知识基础提高量相对于当前研究更少。例如, 对“导入”的操作进行修订, 如将讲述遍数从 2 缩减为 1, 或在“导入”与问答反馈阶段之间设置更长的时间间隔 (如一天)。基于此, 进一步探查反馈呈现方式对知识基础相对较高的学生的学习是否也会带来影响。此处不足, 补充在讨论中 (p. 27)。

意见 2-4: 知识组块的定义通过选择人数是否过半来评价是否合理?

回应: 对于知识组块的定义是基于当时招募另一组心理学专业被试 ($N = 20$, 4 名男性, 年龄 $M = 24.45$, $SD = 2.89$) 依次完成的两项任务, 任务 1 的结果在前稿中已汇报, 任务 2 的结果在修稿中做补充汇报 (p. 6)。

任务 1: 两两配对。要求: 以下 12 个社会心理学概念之间可能存在一定的关联 (比如相似、相反、同属于某大类等), 请将你认为有关联的概念进行两两配对。

任务 2: 评价关联。要求: 以下 5 组社会心理学概念之间存在一定的关联 (比如相似、相反、同属于某大类等), 请评价概念对之间关联程度的大小 (1-7)。任务 2 中的 5 组存在一定关联的概念是基于实验者 (第一作者) 的事先判断, 由此编制了问卷。

在任务 1 中, 至少有 70% 的被试选择将前 5 组概念配对。在任务 2 中, 经韦克斯勒秩和检验, 前 4 组概念的关联度均显著大于中等水平 (即, 4), 第 5 组“去个体化和社会促进”的关联度评分与中等水平 (即, 4) 不存在显著差异。综合两项任务的结果, 我们最终选定前 5 组概念作为实验材料, 后续按上述配对情况进行概念组块化。但需要注意的是, 所选用的实验材料中“去个体化和社会促进”虽然在配对时被 70% 的被试选择, 但他们的关联度评分仅在中等水平, 我们在方法部分补充报告了这一情况 (p. 6), 供后续研究参考。

表 S1 材料评定结果

	登门槛效应 &门面效应	易得性启发& 代表性启发	基本归因错 误&自我服务 偏差	后视偏差& 反事实思维	去个体化& 社会促进	观察者效 应 & 曝光 效应
两两配对, N	20	16	15	14	14	9
评价关联 M $\pm SD$	6.15 ± 0.65	5.70 ± 0.90	5.80 ± 0.75	4.80 ± 1.20	4.00 ± 1.00	无数据
韦克斯勒秩 和检验, p	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.026	0.839	无数据

意见 2-5: 学生和老师的性别设置有何考虑? 是否需要控制?

回应: 因为学校学生性别比例及不同性别学生参与心理学研究的积极性存在差别, 导致取样上无法避免存在一定的性别差异。在分析时, 已将性别作为一个随机效应纳入模型, 从统计层面进行控制。但是, 性别设置方面的问题, 我们也在讨论中列出 (p. 30), 特别是将结论做外部推论时需要谨慎。

意见 3: 图 2 中知识再认在多个条件下似乎都到了天花板, 这个问题需要深入讨论并谨慎考虑结论中对知识再认结果的表述。

回应: 知识再认的结果确实呈现天花板情况, 这个问题我们在讨论中进行了补充探讨 (p. 26), 并对全文涉及知识再认结果的表述做了更谨慎地修订。

“首先, 呈现方式不同的精细内容反馈只影响知识迁移而不包括再认。前人研究发现精细内容反馈相比于简单内容反馈可以同时促进知识再认和迁移 (Finn et al., 2018) 或只能促进知识迁移 (Butler et al., 2013), 这可能与所用测题的类型或难度有关。值得注意的是, 在本研究中知识再认的结果呈现天花板情况, 这可能反映了再认测量的难度较低, 或使得这一维度的结果不呈现条件间差异。后续, 可转变当前使用的联结再认为回想再认, 从而提高再认的难度, 继续考察反馈呈现方式对知识再认的影响。此外, 再认测量上正确率达天花板且不存在条件间差异, 可以在一定程度上排除, 反馈呈现方式对知识迁移的影响并不由“无法再认”或“再认差别”所可能导致。”

意见 4: 实验 1 的讨论中提到的“反馈时间点的改变”, 请更明确的进行解释。同时说明实验 2 如何针对这一点进行修正。

回应: 在实验 1 的讨论中对“反馈时间点的改变”进行了更明确的解释 (p. 13)。

“在呈现组块化反馈时, 信息内容在被组块化的同时也被延迟了反馈发生的时间点。但单独反馈是信息内容没有被组块化的及时反馈。所以实验 1 中的两种实验条件, 除了存在反馈信息是否组块化的差异外, 还在反馈的时间点上也存在差别。”

前人研究发现, 延时反馈对学习的促进作用, 更可能出现在长时间间隔 (如 7 天后) 的学习表现上, 包括长时迁移 (Mullet et al., 2014)。因此, 实验 1 的结果无法排除组块化反馈的长时迁移增益来自于纯粹的反馈延迟。为了更好地排除这种解释, 在实验 2 中安排了第三个实验条件——假组块 (两个关联较小的概念) 反馈组, 即信息非组块化的延迟反馈 (p. 13)。

“实验 2……引入第三个实验条件——即假组块 (两个关联较小的概念) 反馈, 即信息内容没有被组块化的延迟反馈。实验 2 将通过三个水平的比较, 在考察实验 1 的结果能否重复的基础上, 尝试排除“纯粹反馈延迟”的可能解释。”

意见 5: fNIRS 部分, 请补充更多的分析细节, 比如: 是否只考虑对应通道的分析? 延迟-峰值效应的具体调节如何操作以及实际结果如何? 基于簇的置换检验仅考虑了特定的方向性结果 (组块>假组块、组块>单独且组块>休息) 是否合理或全面? 考虑到近红外的空间聚焦程度好, 相邻通道的合并是否合理?

意见 5-1: 是否只考虑对应通道的分析?

回应: 是只考虑了对应通道的分析, 已在方法部分 3.5.2 明确指出 (p. 16)。考虑到反馈加工不仅激活接收者的额、顶叶位置 (Luft et al., 2013; Crone et al., 2008), 也同样激活提出者的额叶位置 (Apps et al., 2015), 这样一种分析有一定的参照依据, 但也存在局限性。例如, 师生存在角色不匹配的情况, 双方的不同脑区可能在其中起到不同的作用, 故而可能引

发不用脑区的神经耦合（如 Zheng et al., 2018）。这也是本研究的一处局限，在讨论中已列出（p. 28）。

意见 5-2：延迟-峰值效应的具体调节如何操作以及实际结果如何？

回应：考虑到血氧反应存在延迟达峰的情况（5-10s），在数据分析时将任务中反馈开始与结束的时间点往后各推迟 6s（Jiang et al., 2015），即 $6 \times 10\text{hz} = 60$ 个采样点，进行后续的 WTC 分析。图 1Sa 所示为组块反馈条件的某一组被试通道 21 号上的 HbO 浓度变化的时间序列，真实的反馈开始结束由实线指示，用于数据分析的两端由虚线指示。在反馈开始后，HbO 浓度变化呈逐渐增高趋势；在反馈结束后，HbO 浓度仍呈保持或增高趋势再回落，上述情况也体现了血氧反应存在延迟达峰的情况。图 1Sb 所示为对应的 WTC 数值的时间序列（通道 21，频点为 0.028Hz），按无延迟（实线范围）与有延迟（虚线范围）平均后，后者显著更大（ 0.37 ± 0.22 vs. 0.42 ± 0.22 , $t = -3.50$, $p < 0.001$ ，图 1Sc）。据此，有必要进行延迟-峰值的操作，以保留更完整的大脑反应。

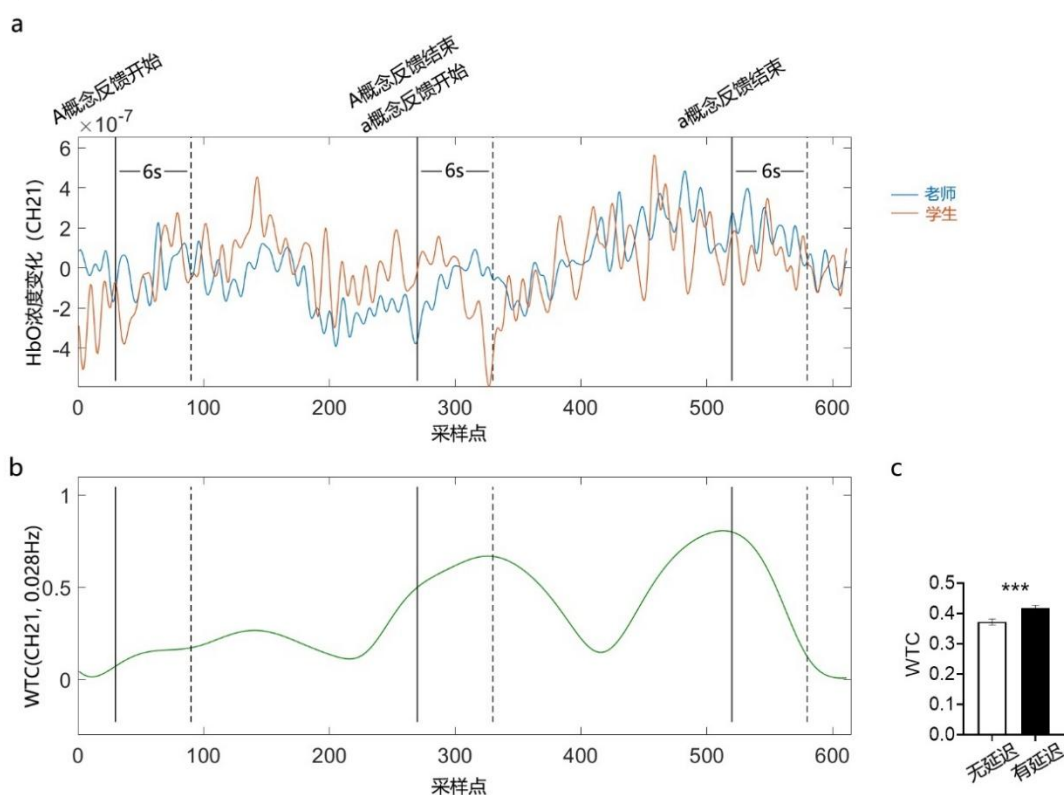


图 S1 延迟-峰值具体操作与效果示例

意见 5-3：基于簇的置换检验仅考虑了特定的方向性结果（组块>假组块、组块>单独且组块>休息）是否合理或全面？

回应：基于簇的置换检验仅考虑了特定的方向性结果（组块>假组块、组块>单独且组块>休息）有一定的合理性。实验 2 的研究开展建立在实验 1 行为实验的结果发现之上，实验 1 发现组块化反馈条件下学生的迁移表现更好，所以我们在实验 2 的假设提出时有理由预期支持这一行为结果的神经活动也应当呈现此趋势，故而只关注于带有方向性的结果。在方法部分 3.5.2 对只关注上述特定方向性结果的合理性进行了补充解释（p. 17）。

“基于实验 1 的结果，组块化反馈条件下学生的迁移表现更好，预期背后的神经活动也呈现此趋势；故而在这一步中关注上述方向性的结果。”

但同时这种只关注特定方向性的结果肯定是不全面的。前人研究发现虽然延时反馈相比于及时反馈更能够促进学习迁移，但学习者在主观上仍会偏好于接收及时的反馈（Lefevre & Cox, 2017; Mullet et al., 2014），这一过程也可能存在着特定的神经基础。但考虑到这不是本研究最主要关注的问题，我们将这部分思考整理后附在讨论中供后续研究参考（p. 28）。“第五，在本研究中组块化的反馈方式同时带来了反馈延时。虽然这种带有延时性的反馈更能促进学习迁移，但前人研究也发现学习者在主观上仍会偏好更及时的反馈（Lefevre & Cox, 2017; Mullet et al., 2014）。相比于组块化反馈，学习者是否也会更偏好于及时的单独反馈，以及背后的认知神经机制有待后续继续研究。”

参考文献

Lefevre, D., & Cox, B. (2017). Delayed instructional feedback may be more effective, but is this contrary to learners' preferences?. *British Journal of Educational Technology*, 48(6), 1357–1367.

意见 5-4：考虑到近红外的空间聚焦程度好，相邻通道的合并是否合理？

回应：合并相邻通道的是考虑到通道-脑区的映射关系可能存在被试的个体差异，即可能存在 1 号被试的通道 1 映射脑区 1，2 号被试的通道 2 映射脑区 1，3 号被试的通道 3 映射脑区 1，且通道 1、2、3 在空间位置上相邻（仅举例，真实情况不一定如此）。这种个体差异是由不同被试的头围、头部结构、脑部结构导致的，均是与任务无关且较难控制的变量。在结果上，若相邻通道均表现出相似的神经活动，更倾向于支持这些通道映射的共同脑区上的活动与任务相关。这种办法能更好地控制个体差异的影响，使得一些在单通道上仅呈现趋势性的结果也能得以保留，进而提高统计检验的灵敏度（Maris & Oostenveld, 2007）。对于合理性的表述，精简后添加在方法部分 3.5.2 中（p. 16）。

“这是一种非参数统计方法，适用于分析多通道和多频点的神经数据，它相比于对单一通道或频点进行多重比较校正更可能保留一些受个体差异干扰的趋势性结果，进而提高统计检验的灵敏度（Maris & Oostenveld, 2007）。”

参考文献：

Maris, E., & Oostenveld, R. (2007). Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *Journal of Neuroscience Methods*, 164(1), 177–190.

审稿人 2 意见：

采用认知行为和脑影像技术探讨师生互动教学过程及其与学习效果的关联是当前的热点问题。该研究对师生互动中组块化精细反馈的作用模式及其神经基础进行了探讨，揭示了组块化错误修正的作用及其与学习效果的密切关联。并且，这一过程伴随着师生额-顶脑区的活动同步，其中额叶的大脑同步能够预测学习行为。这些结果对教学实践有一定的启发意义，对深入理解教学过程也有一定的科学价值。

意见 1：1.3 师生互动的人际神经基础部分，内容过于宽泛。建议结合近期的综述，讨论大脑同步的认知意义及其在师生互动研究中的可能价值。例如，与单脑相比，同步反映的信息有何不同？在师生互动或反馈呈现方式中，同步能够揭示什么信息？可能表现出什么模式？

回应：结合近期的相关综述（Kelsen et al., 2022; Shamay-Tsoory et al., 2019; Tan et al., 2023），我们对大脑同步的认知意义及其在师生互动研究中的可能价值归纳总结如下：

前人研究指出，社会互动所引发的大脑同步被认为是预测性编码机制的一部分，允许个

体在社交上与他人对齐而表现出同步运动、情绪感染和社会遵从等 (Shamay-Tsoory et al., 2019)。依赖于口头交流的人际互动所引发的脑同步不仅出现在基础的视听觉脑区, 也出现在支持相互理解和人际关系的高级脑区, 特别是心智化网络 (Kelsen et al., 2022)。基于上述综述观点, 大脑同步的认知意义包括互动双方或群体在行为、情绪和认知上的对齐, 支持一致性动作、情绪共情、社会遵从、语言理解、人际联结等。单脑信息一般只能反映个体对信息的加工与处理; 单脑分析通常基于事件相关的逻辑, 依赖于简单、短时刺激的重复呈现, 对揭示加工复杂信息、连续长时、没有事先标定事件的自然化刺激的认知神经机制的效力有限 (Hasson et al., 2004)。相比之下, 脑间同步可以有效在反映真实、复杂且多变的社会活动中, 互动双方或群体在行为、情绪或认知上达成的对齐状态, 不仅指示是否达成齐性, 还可以进一步反应如何达成齐性的动态变化过程 (Stephens et al. 2010)。

真实的教学是一个双向的过程, 涉及教师与学生通过互动来实现知识的动态传递。本研究关注的教学反馈是师生互动的一种典型方式, 也具有动态、连续、双向的信息交互特征。所以, 为了揭示上述基于反馈的师生互动过程中涉及的认知神经过程, 单脑指标不再适用。相比之下, 师生的大脑同步信息可以反映教学过程中师生对学习内容的理解是否达成对齐, 即学生的理解向老师的理解靠拢使得双方在认知上达成一致的状态, 这也是实现有效教学的基础 (Tan et al., 2023)。在师生互动或反馈呈现方式中, 大脑同步可以揭示师生基于不同的反馈呈现方式, 是否达成对概念性知识的共同理解及其程度的大小, 进而支持学生的知识迁移水平。此外, 大脑同步还可以提供师生如何达成共同理解的动态进程性的信息, 如时间早晚、时间差模式等 (Zheng et al., 2018; Zhu et al., 2022), 进而实现对课堂上的互动动态的理解。例如, 持续较低的大脑同步可能标志着学生在课堂上编码知识遇到了困难, 即无法与教师对知识达成共同理解。若能基于师生大脑同步指标建立对教师的实时提醒, 可以帮助教师及时调整并优化教学过程, 提高后续的教学效果。

在引言 1.3 中补充了大脑同步的认知意义 (p. 3)

“虽然脑间同步的认知意义仍存在一定争议, 但研究较为一致地指出脑间同步是互动参与者在行为、情绪和认知层面达成一致的关键机制, 涉及行为对齐、情绪共情、社会遵从、语言理解和人际联结等, 反映复杂社会互动中的动态认知神经机制 (Kelsen et al., 2022; Shamay-Tsoory et al., 2019; Tan et al., 2023)。”

及其在师生互动研究中的可能价值 (p. 4)

“在师生互动研究中, 采用脑间同步指标可以反映教师与学生间的认知对齐情况, 这种同步信息有助于识别教学过程中的理解差异, 指导教学调整与优化, 进而提升教学效果。”

参考文献

- Hasson, U., Nir, Y., Levy, I., Fuhrmann, G., & Malach, R. (2004). Intersubject synchronization of cortical activity during natural vision. *science*, 303(5664), 1634–1640.
- Kelsen, B. A., Sumich, A., Kasabov, N., Liang, S. H., & Wang, G. Y. (2022). What has social neuroscience learned from hyperscanning studies of spoken communication? A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 132, 1249–1262.
- Shamay-Tsoory, S. G., Saporta, N., Marton-Alper, I. Z., & Gvirts, H. Z. (2019). Herding brains: a core neural mechanism for social alignment. *Trends in cognitive sciences*, 23(3), 174–186.
- Stephens, G. J., Silbert, L. J., & Hasson, U. (2010). Speaker–listener neural coupling underlies successful communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(32), 14425–14430.
- Tan, S. J., Wong, J. N., & Teo, W. P. (2023). Is Neuroimaging Ready for the Classroom? A Systematic Review of Hyperscanning Studies in Learning. *NeuroImage*, 120367.

意见 2: 1.4 关于神经基础的假设限于脑区，与前面关于大脑同步的论述并不相符。建议从人际和同步的角度完善这部分假设。

回应: 感谢建议，从人际和同步的角度完善这部分假设如下 (p. 5):

“反馈信息加工激活接收者和提供者的额、顶脑区 (Apps et al., 2015; Crone et al., 2008; Luft et al., 2013)，真实的教学互动引发双方在额叶和颞顶区域的同步性脑活动 (Tan et al., 2023; Zhu et al., 2022)，而前人研究还发现人类加工组块信息依赖的脑区包括 DLPFC 和后顶叶皮层 (Alamia et al., 2016; Bor et al., 2003; Jin et al., 2020; Pammi et al., 2012)，所以预期在师生互动中组块化反馈引发更大的师-生脑间同步，且出现在与反馈加工和组块加工均有关的额、顶区域”

意见 3: 是杂志要求将结果和分析方法混在一起呈现还是作者的偏好？若不是杂志的要求，建议分开。

回应: 前稿是考虑了篇幅，并非杂志要求。现已将实验 1 的分析方法 (2.4) 和结果 (2.5) 分开呈现，感谢建议。

意见 4: 基于簇的置换检验是选择脑同步频段的重要步骤，建议增加参考文献依据。

回应: 此处确实存在遗漏，感谢细心指出，已补充 (p. 16)。

“使用基于簇的置换检验方法，需要找到至少由两个相邻通道和至少两个相邻频点组成的频段-通道簇，在这样的簇上面反馈阶段的 WTC 大于休息阶段的 WTC。这是一种非参数统计方法，适用于分析多通道和多频点的神经数据，它相比于对单一通道或频点进行多重比较校正更可能保留一些受个体差异干扰的趋势性结果，进而提高统计检验的灵敏度 (Maris & Oostenveld, 2007)。”

参考文献:

Maris, E., & Oostenveld, R. (2007). Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *Journal of Neuroscience Methods*, 164(1), 177–190.

意见 5: 3.6.2 的分析主要关注了时间效应，但是题目则强调了精细反馈的促进作用，二者矛盾。在这部分中，读者更关心的是组块反馈组在学习前后三个时间点的特殊性。3.6.3 又对三个时间点分别构建 LME 进行分析，无法看到时间和反馈的交互作用。

回应: 前稿在表述精细和组块化时存在混淆或不明确，有可能导致了题目与内容在分析的关注点不明确或矛盾。在本研究中所使用的反馈，无论是否组块化，均包含正确答案和举例，所以均属于精细内容反馈。当出现“精细反馈”时，指精细内容反馈；当出现“组块化反馈”时，均指经过关联性组织的精细内容反馈。已对全文的相关表述做了更明确的修订。对这两部分的数据分析的思路修订如下：

3.6.2 确证基于反馈的师生问答（无论呈现方式）能增加学生的概念性知识并长时保持。

在结果中补充报告了测试时间和反馈呈现方式各自的主效应和交互效应的具体统计结果，供读者查看 (p. 19–20)。

“此外，在再认上，反馈呈现的主效应不显著 ($F(2, 24.43) = 2.20, p = 0.132$)，测试时间和反馈呈现的交互效应不显著 ($F(4, 135.30) = 0.44, p = 0.778$)。在迁移上，反馈呈现的主效应不显著 ($F(2, 27.43) = 1.74, p = 0.195$)，交互效应边缘显著 ($F(4, 130.73) = 2.22, p = 0.070$)。”

3.6.3 探究反馈呈现方式对概念性知识增加的长时影响。

补充说明 3.6.2 至 3.6.3 的分析承接逻辑与差别 (p. 20)。

“为了控制个体在知识基础上的差异，并进一步探查反馈呈现方式在不同测试时间上对学习的影响，后续分析均就学习后概念性知识的增加（相对于前测的正确率增量）建立线性混合模型。”

类似地，对 2.5.2 和 2.5.3 进行了补充说明和修订，详见（p. 10）。

意见 6: 3.6.5, “脑同步差值”建议改为“脑同步增加”。

回应: 感谢建议，已悉数做了修订。

意见 7: 脑同步的结果并没有体现其揭示底层机制的重要作用。研究发现的这些脑同步与反馈有什么关系？反映了什么样的内隐过程？在行为数据或单脑激活的基础上是否提供了额外的有用信息？

回应: 感谢指出此处不足。基于当前的实验结果，我们对脑同步的结果揭示认知机制的可能作用进行了更详细地说明与论述：

教学反馈是真实课堂中师生互动的一种典型方式，常由教师向学生提供关于当前表现与目标之间差距的信息。所以，当反馈发挥其教学效力时，学生的表现或理解应该向教师设定的目标（通常是教师对学习内容的理解）靠拢，使得两者之间的差距不断减小。考虑到反馈的认知机制包括错误修正（Narciss & Huth, 2004），本研究采用该指标来标识基于反馈的教学互动过程中涉及的认知层面的改变，并对其在反馈呈现方式和学习迁移关系之间的中介作用进行了考察。结果发现存在反馈的呈现方式通过整组概念的错误修正影响长时迁移的间接通路，这提示组块化错误修正是支持性的认知过程。在师生教学研究中，教师在理论上被认为对学习内容是全知的状态（设为 1），而学生在学习前处于 <1 的水平，并需要通过学习对其不理解或错误理解的部分进行修正，不断趋近于教师的全知状态。所以，错误修正水平可以在一定程度上反映师生在教学之后，对学习内容在认知层面上达成的一致性理解水平，即“认知齐性”。结合本研究的结果，发现组块化反馈过程中师生在额叶上的脑间同步与组块化错误修正存在正相关关系，这提示脑间同步指标可以反映错误修正（达到“认知齐性”）这一认知过程。当前结果还发现脑间同步对反馈的呈现形式敏感，这也体现了脑同步可以反映师生基于不同形式的反馈达到的“认知齐性”程度不同。

行为数据较难揭示不外显的、发生在人脑中的认知活动及其变化过程。单脑激活一般只能反应个体对信息的加工，单脑分析通常基于事件相关的逻辑，依赖于简单、短时刺激的重复呈现，对揭示人脑加工复杂信息、连续长时、没有事先标定事件的自然化材料的认知神经机制的效力有限（Hasson et al., 2004）。本研究关注的教学反馈是师生互动的一种典型方式，具有动态、连续、双向的信息交互特征。所以，为了更深入地揭示高自然化的基于反馈的师生互动过程中涉及的认知神经过程，单脑激活指标并不适用。相比之下，师生的大脑同步可以反映教学过程中师生对学习内容的理解是否达成对齐，即学生的理解向老师的理解靠拢使得双方在认知上达成一致的状态，这也是实现有效教学的基础（Tan et al., 2023）。此外，脑间同步不仅指示是认知是否达成齐性，还可以进一步反映如何达成齐性的动态变化过程，如达成时间点、互动双方时间差模式等（Liu et al., 2018; Zheng et al., 2018; Zhu et al., 2022）。

综上，将上述内容归纳整理后补充在讨论中（p. 29）：

“值得注意的是，脑间同步与组块化错误修正的正相关关系，提示学生的理解逐渐向教师的理解修正的过程，这种对齐表明了师生在认知层面上的一致性正在增强。脑间同步反映了在教师与学生间进行的复杂的认知过程，特别是在错误修正和认知对齐方面。此外，与单脑激活或行为数据相比，脑间同步提供了更深入的洞察力。单脑激活数据往往局限于反映个体对简单和短暂刺激的处理，而脑间同步能够揭示更复杂、持续更长时间的认知过程，尤其是在无法提前预设固定事件的自然化教学环境中。此外，脑间同步不仅显示了认知是否达到一致，

而且能够展示达成这种一致性的动态过程,如达成时间点、互动双方时间差模式等(Liu et al., 2018; Zheng et al., 2018; Zhu et al., 2022)。这为理解和改善教学反馈方法提供了宝贵的信息,有助于优化教育实践并促进更有效的学习。”

第二轮

审稿人 1 意见: 没有更多意见, 同意发表。

回应: 非常感谢审稿专家在上一轮中提出的富有洞察力的问题和建设性的建议, 基于这些问题和建议所做的修订对我们提升稿件质量帮助非常大。

审稿人 2 意见: 作者对文章进行了修改, 在一定程度上回答了上一稿中的问题。但是部分问题的解决并不理想。具体如下。

回应: 非常感谢审稿专家对上一稿修改的肯定并悉心指导仍然存在的问题, 我们认真思考了这些问题并对论文做了新一轮的修改。

意见 1: 对引言部分的回复很详细, 但是文章的修改非常简略, 并没有充分体现回复中的内容。建议进一步完善。

回应: 非常感谢审稿专家的建议。我们对回复和正文内容做了进一步的整合, 在提供更多有效信息的基础上精简了语言, 具体见 1.3 (p. 3-4)。

意见 2: 关于神经基础的假设, 仍然在讨论脑区, 但是不同的反馈如何体现在大脑同步和其背后的认知意义上?

回应: 非常感谢审稿人指出的问题。我们将实验 2 的原假设 (4) 修改后分成假设 (4) 和假设 (5) 以便更好地体现与脑间同步相关的前人研究结果对当前假设的支持性 (p. 5)。

“ (4) 由于组块化语言信息的加工更依赖于额叶 (Jin et al., 2020; Grodzinsky & Santi, 2008) 且额叶的活动与长时的记忆或学习表现有关 (Sakai & Passingham, 2003; Squire et al., 1993); 师生额叶的脑间同步可以指示有效的教学策略 (Pan et al., 2018; 2020), 而组块化呈现教学内容是一种更有效的教学策略 (Spiro et al., 1991; Cohen & Sekuler, 2010), 故而预期组块反馈过程中额叶上的师生脑间同步与学生的长时迁移表现正相关; (5) 由于社会互动引发的脑间同步反映互动双方在认知上的对齐 (Shamay-Tsoory et al., 2019) 且出现在支持相互理解的心智化网络, 包括额叶 (Kelsen et al., 2022), 而错误修正可以反映学生的理解向教师的理解靠拢并达成一致, 所以预期额叶上的脑间同步可能与组块化错误修正正相关。”

此外, 在讨论中, 做了对假设内容回应性的补充 (p. 28-29)。

意见 3: Maris & Oostenveld, 2007 使用的置换检验方法与文中的方法并不一致。

回应: 非常感谢审稿人指出参考文献的问题。考虑到当前研究中的真实数据为师、生配对数据, 故而置换检验中的零假设分布由随机置换学生和老师的的教学数据构成虚假配对后计算得到。这种置换检验方法是参考前人超扫描研究 (例如, Jiang et al., 2012; Long et al., 2021), 对文中基于簇的置换检验的第四步补充了参考文献 (p. 17):

“第四步, 随机置换数据, 即学生的数据和另外一组的教师的数据组成虚假配对 (Jiang et al., 2012; Long et al., 2021) ”

意见 4: 部分表述不严谨，比如“脑间同步提供了更深入的洞察力”。讨论部分也缺少令人信服的文献支持，如“单脑激活数据往往局限于反映个体对简单和短暂刺激的处理，而脑间同步能够揭示更复杂、持续更长时间的认知过程，尤其是在无法提前预设固定事件的自然化教学环境中。”

回应: 非常感谢审稿人悉心指出前稿中存在的问题，我们补充了支持性的文献并修改了不严谨的表述（p. 29）。

“相比之下，单脑指标一般反映个体独立加工信息的过程；基于事件相关的单脑指标，依赖于简单、短时刺激的重复呈现，对揭示人脑加工内容复杂、连续长时、没有事先标定事件的自然化刺激的神经机制的效力有限（Hasson et al., 2004）。真实的课堂教学具有动态、连续且双向的信息交互特征，所以师生的脑间同步相比于单脑指标更能有效地反映教学过程中师生对学习内容的理解是否达成对齐，这是实现有效教学的基础（Tan et al., 2023）。此外，脑间同步除了指示认知是否达成齐性，还可以反映达成这种一致性的动态过程，如达成时间点、互动双方时间差模式等（Liu et al., 2018; Zheng et al., 2018; Zhu et al., 2022）。基于此，师生脑间同步可以为调整并优化课堂教学活动提供及时有效的客观证据，例如，持续较低的师生脑间同步可能提示学生在知识理解上出现问题，所以无法与教师达成对知识的共同理解。”

参考文献

Hasson, U., Nir, Y., Levy, I., Fuhrmann, G., & Malach, R. (2004). Intersubject synchronization of cortical activity during natural vision. *science*, 303(5664), 1634–1640.

编委意见: 我也建议接受。

主编意见: 该文已经两轮审稿，作者认真回应了审稿专家的意见，审稿专家表示同意修改，我也读了该文，整体上文章达到心理学报的发表水平。同意接受。