

JPS2025-120 “近似运算动量效应的神经基础：来自电生理和功能磁共振的证据”的修改说明

第二轮修改

主编意见:

意见 1: 题目中不能直接出现不熟悉的英文缩写，可以用中文，把英文缩写放在括号中。

回应:

非常感谢您的宝贵建议。本研究题目确实出现了读者不熟悉的英文缩写。为准确表达，我们将原题目中的“近似运算 OM 效应”修改为“近似运算动量效应”。原论文题目“近似运算 OM 效应的神经基础——来自电生理和功能磁共振的证据”现修改为“近似运算动量效应的神经基础——来自电生理和功能磁共振的证据” (修改内容已用蓝色标注)。请您审查。

意见 2: 摘要存在较大的问题。没有直接给出 OM 定义，没有说清楚实验设计，没有充分利用 300 字限制。

回应:

非常感谢您的细致审阅和宝贵建议。本研究之前的摘要确实存在较大问题，在本次修改稿中，我们补充了 OM 效应的定义，说清楚了具体的实验设计。具体修改内容如下: (修改内容已用蓝色标注)。

运算动量(Operational Momentum, OM)效应是近似运算中个体倾向于高估加法结果、低估减法结果的算术偏差现象。然而，目前关于这种现象产生的原因仍存在争议。本研究采用算术验证任务，设置小于、等于和大于三类结果，要求被试在加法或减法运算中判断结果是否正确，并通过 ERP 和 fMRI 技术，考察不同类型结果诱发的神经活动差异，探讨了 OM 效应的形成机制。结果发现，被试不仅在加法中倾向接受大于结果，减法中接受小于结果，且在这类结果的加工中能诱发更大 P3b 波幅，在顶内沟、顶上小叶等与空间注意相关的脑区引起更强激活，同时增强楔前叶与视觉皮层的功能连接。以上结果说明，被试在判断加法较大结果和减法较小结果时，会投入更多空间注意资源，支持了注意转移理论。

意见 3: 引言最后一段存在明显问题。没有介绍实验设计与推论逻辑，研究假设也是语焉不详。

回应:

非常感谢您的意见建议，我们在本次修改稿引言部分的最后一段补充了实验设计和研究假设，进一步梳理了推论逻辑。具体修改内容如下：(正文修改内容已用蓝色标注)。

综上，本研究以非符号数量点阵为实验材料，采用算术验证任务，要求被试对加法或减法算式的小于、等于和大于结果进行正误判断(Jang & Hyde, 2020; McCrink et al., 2007)。同时，采用 ERP 和 fMRI 技术，通过比较加减法运算中被试对不同类型算术结果进行判断时神经活动的异同，揭示其形成机制。本研究假设如下：如果 OM 效应源于算术过程中的空间注意转移，那么加法运算中的较大结果和减法运算中的较小结果会在涉及空间注意转移的脑区引起更强激活，并诱发空间注意相关的 ERP 成分。反之，如果 OM 效应源于“加法即多，减法即少”的启发式规则，则更可能诱发 LPC 成分，并在背内侧前额叶与前扣带回等启发式加工相关脑区表现出更强激活。

参考文献：

- Jang, S., & Hyde, D. C. (2020). Hemispheric asymmetries in processing numerical meaning in arithmetic. *Neuropsychologia*, 146, 107524.
- McCrink, K., Dehaene, S., & Dehaene-Lambertz, G. (2007). Moving along the number line: Operational momentum in nonsymbolic arithmetic. *Perception & Psychophysics*, 69(8), 1324–1333.

意见 4：稿件可能还存在其他规范性问题，原因之一就是作者在提交稿件前，没有真正对照本刊的“检查清单”，敷衍了事，自以为是。

回应：

感谢您提出的宝贵意见。我们在本次修改稿中已对照本刊的“检查清单”，对稿件内容进行逐一检查，稿件质量得到进一步提升，请您审查。

1. 在引言部分，本研究通过 ERP 与 fMRI 技术，旨在解决注意转移理论与启发式理论的争议，并列举了可能分别支持两种理论的具体神经指标，以此说明采用神经成像方法解决现有争议的合理性与必要性。具体修改内容如下：(正文修改内容已用蓝色标注)。

上述两种理论的焦点在于 OM 效应究竟是源自算术过程中的空间注意转移，还是“加法即多，减法即少”的启发式规则。fMRI 研究发现，后顶叶皮层(posterior parietal cortex)，尤其是顶内沟和顶上小叶是算术加工与空间注意的共同脑机制，被分配更多空间注意资源的算术结果不仅会在这些脑区引起更强激活(Mathieu et al., 2018)，也会强化其与视觉皮层的功能连接(Park et al., 2013)。而背内侧前额叶(dorsomedial prefrontal cortex)与前扣带回(anterior cingulate cortex)与启发式规则有关，前者涉及评估结果与预期的一致性，在加工符合启发式规则的结果时激活更强；后者涉及冲突监控，当结果不符合预期时会被激活(Korn

& Bach, 2018)。ERP 研究也发现, 加工算术结果所诱发的 N1、P2 和 P3b 分别反映了不同加工阶段的空间注意资源分配。其中, N1 反映了早期加工阶段对特定空间位置或刺激属性的注意偏向(Avancini et al., 2014), P2 与数量信息空间编码有关(Qi & Gao, 2020), P3b 涉及自上而下的空间注意资源分配(Jang & Hyde, 2020)。而晚期正成分(late positive component, LPC)与启发式规则有关, 当算术结果与预期不符时, 会诱发更显著的 LPC 波幅(Jang & Hyde, 2020)。

参考文献:

- Avancini, C., Galfano, G., & Szűcs, D. (2014). Dissociation between arithmetic relatedness and distance effects is modulated by task properties: An ERP study comparing explicit vs. implicit arithmetic processing. *Biological Psychology*, 103, 305–316.
- Jang, S., & Hyde, D. C. (2020). Hemispheric asymmetries in processing numerical meaning in arithmetic. *Neuropsychologia*, 146, 107524.
- Korn, C. W., & Bach, D. R. (2018). Heuristic and optimal policy computations in the human brain during sequential decision-making. *Nature Communications*, 9(1), 325.
- Mathieu, R., Epinat-Duclos, J., Sigovan, M., Breton, A., Cheylus, A., Fayol, M., Thevenot, C., & Prado, J. (2018). What's Behind a “+” Sign? Perceiving an Arithmetic Operator Recruits Brain Circuits for Spatial Orienting. *Cerebral Cortex*, 28(5), 1673–1684.
- Park, J., Park, D. C., & Polk, T. A. (2013). Parietal Functional Connectivity in Numerical Cognition. *Cerebral Cortex*, 23(9), 2127–2135.
- Qi, M., & Gao, H. (2020). Acute psychological stress promotes general alertness and attentional control processes: An ERP study. *Psychophysiology*, 57(4), e13521.

2. 在方法部分, 具体修改内容如下: (正文修改内容已用蓝色标注)。

实验程序由 PsychoPy 3.0 编程, 采用算术验证任务, 要求被试对屏幕上依次出现的两组点阵进行加减运算, 并判断屏幕中央出现的比较点阵是否与前两组点阵的运算结果相符(McCrink et al., 2007)。实验开始前, 屏幕中央呈现指导语, 被试自行阅读后, 主试再次讲解实验流程。当被试确认已完全理解并表示可以开始时, 才正式启动实验。正式实验每一试次首先呈现一个 500ms 的注视点, 随后依次呈现第一组点阵、运算符号、第二组点阵和比较点阵, 呈现时间及间隔时间均为 500 ms。为避免按键反应所产生的肌肉伪迹干扰数据采集, 在比较点阵呈现后, 要求被试在看见屏幕中央呈现 “?” 后通过按键反应的方式对比较点阵进行判断(Pan et al., 2023)。为避免刺激呈现速度过快所造成的神经信号重叠, 每一试次结束后设置 2~4 s 的试次间间隔(inter-trial interval, ITI), 在被试做出判断后, 进入下一试次(见图 1)。按键在被试间进行平衡, 要求一半被试用左手按键(ERP 实验中按 “f”, fMRI 实验中按 “2”)做出正确判断, 用右手按键(ERP 实验中按 “j”, fMRI 实验中按 “3”)做出

错误判断，另一半则相反。

实验包括练习和正式实验。练习实验中，被试按键后得到反馈信息，并要求达到 80% 正确率后开始正式实验。练习实验材料包括 6 个算术问题，各问题呈现 3 次，其中正确答案呈现 1 次，错误答案呈现 2 次(小于大于各 1 次)，共 18 个试次。正式实验中，被试在按键反应后不会获得反馈信息。为避免练习效应，正式实验的算术问题均来自练习实验。正式实验的材料包括 18 个算术问题，各问题呈现 9 次，其中正确答案呈现 3 次，错误答案呈现 6 次(小于大于各 3 次)，共 162 个试次。完成整个实验大约 45 分钟。

3. 在方法部分，详细陈述了本实验按照什么标准删除数据或被试，具体删除了哪些被试。修改内容具体如下：(正文修改内容已用蓝色标注)。

(1)行为数据处理

为排除异常值对整体结果的干扰，对于每个被试首先是计算正确率和反应时的均值和标准差，然后剔除每种条件下超过均值 ± 3 个标准差的结果。根据这一标准，实验没有发现异常值。

(2)脑电数据处理

使用 AAR(automatic artifact removal toolbox)工具箱去除眼电与肌电引起的伪迹，同时剔除伪迹比例超过总试次 25%的被试。经检验，所有被试的伪迹比例均低于 25%，因此未剔除被试。

(3)磁共振数据分析

头动校正基于六个头动参数(3 个平移参数、3 个旋转参数)计算每位被试的帧间位移(framewise displacement, FD)。设定 $FD > 0.2 \text{ mm}$ 为被试剔除阈值。实验中被试的 FD 均值为 0.066 mm，范围为 0.041~0.127 mm，均低于设定阈值，故未剔除被试。

4. 在结果部分，每个图表均增加了详细文字说明以增强可读性。修改内容如下：(正文修改内容已用蓝色标注)。

(1)行为结果

注：图中横坐标为运算的结果方向，纵坐标为正确率(左)和反应时(右)。不同边框的柱条分别用来表示加法运算(实线)和减法运算(虚线)。误差线表示平均值的标准误差，*代表 $p < 0.05$ ，**代表 $p < 0.01$ ，***代表 $p < 0.001$ 。

(2)ERP 结果

注：图(a), (b), (c), (d)分别为加法运算(左)和减法运算(右)条件下，小于、等于和大于结果在 N1(60~120 ms)、P2(110~210 ms)、P3b(250~350 ms)和 LPC(400~600 ms)的波形图和地形图。误差线表示平均值的标准误差，*代表 $p < 0.05$, **代表 $p < 0.01$, ***代表 $p < 0.001$ 。

(3)fMRI 结果

注：在(a)图中，L 表示左侧脑区，R 表示右侧脑区，Precuneus_R 表示右楔前叶，Parietal_Inf_R表示右顶内沟，Parietal_Sup_R表示右顶上小叶；在(b)图中，横坐标为运算的结果方向，纵坐标为 Beta 值。不同边框的柱条分别用来表示加法运算(实线)和减法运算(虚线)。误差线表示平均值的标准误差，*代表 $p < 0.05$, **代表 $p < 0.01$, ***代表 $p < 0.001$ 。

(4)功能连接结果

注：在(a)图中，Fusiform_R 表示右梭状回，Occipital_Inf_L 表示左枕下回，Temporal_Mid_R 表示右颞中回；在(b)图中，横坐标为运算的结果方向，纵坐标为功能连接强度。不同边框的柱条分别用来表示加法运算(实线)和减法运算(虚线)。误差线表示平均值的标准误差，*代表 $p < 0.05$, **代表 $p < 0.01$, ***代表 $p < 0.001$ 。

(5)表征相似性结果

注：图(a)为各实验条件在 90ms、160ms 和 300ms 的 ERP 结果；图(b)为 fMRI 和 ERP 数据在各个条件下的 RDM；图(c)为 fMRI 和 ERP 数据在 90ms、160ms 和 300ms 的表征相似性结果。

5. 讨论部分，由于本实验得到数据较多，因此在本次修改稿讨论第一段首先总结了实验发现，指出核心结论。同时，在讨论其余段落围绕第一段结论进行优化调整。具体修改内容如下：(正文修改内容已用蓝色标注)。

本研究通过 ERP 和 fMRI 技术，考察近似运算中 OM 效应的形成机制。行为结果发现，被试在加法中倾向选择较大结果，在减法中倾向选择较小结果。ERP 结果发现，加法中的大于结果和减法中的小于结果诱发了更大的 P3b 波幅。fMRI 结果发现，在右楔前叶、顶内沟和顶上小叶，加法的大于结果比小于结果激活更强；减法的小于结果比大于结果激活更强；以右楔前叶为种子点的功能连接结果发现，加法中的大于结果比小于结果在左枕下回、右颞中回和右梭状回的连接更强。以上结果说明，被试在判断加法较大结果和减法较小结果时，会投入更多空间注意资源，支持注意转移理论。

有研究发现，顶内沟和顶上小叶是近似数量表征的关键脑区，支持视觉空间编码与注意资源分配(Dehaene et al., 1999; Hartmann et al., 2020)，当算术结果被分配更多空间注意资

源时，这些脑区的激活更强(Mathieu et al., 2018)。楔前叶位于顶叶内侧，包括腹侧楔前叶(ventral precuneus)和背侧楔前叶(dorsal precuneus)两个亚区，前者关联自我参照加工，如自我认知、内省思维等(Lyu et al., 2023; Na et al., 2022)；后者参与空间感知和自我相关的空间表征，与视觉区的功能连接支持对刺激的注意分配(Park et al., 2013)。根据 Dehaene 等(1995)的三重编码模型(triple code model)，不同算术加工对应的脑区存在偏侧化：左半球更倾向于语义加工，右半球在视觉空间处理上更具优势(潘运 等, 2025)。本研究发现，加法的较大结果和减法的较小结果在右侧顶内沟、顶上小叶和楔前叶的激活更强；且加法运算中对较大结果的判断还增强右楔前叶与视觉区的功能连接。说明被试在判断加法较大结果和减法较小结果时，会投入更多空间注意资源。

P3b 发生在晚期加工阶段，涉及自上而下的认知资源分配和注意选择(Jang & Hyde, 2020)。有研究发现，当目标在心理数字线上的位置与空间注意转移方向一致时，P3b 的波幅显著增强，表明该成分能反映算术过程中的注意资源分配(Núñez-Peña et al., 2021)。根据注意转移理论，加法运算中个体会增加预期数值，导致空间注意向心理数字线右侧转移；减法运算中则会减少预期数值，空间注意转向左侧(Glaser & Knops, 2020)，说明 OM 效应的产生涉及自上而下注意资源的分配和调整。本研究发现，被试对算术结果的判断会在双侧顶叶诱发 P3b 成分，且加法中结果越大或减法中结果越小，该成分波幅越强。说明加法运算会引起空间注意向右侧转移，偏向更大结果；减法运算向左转移，偏向更小结果。

近似运算中，与注意有关 ERP 成分包括 N1、P2 和 P3(陈杰 等, 2020; Hall et al., 2015; Gong et al., 2024)。N1 是目标呈现约 100ms 时在枕叶诱发的负波，反映对目标视觉特征的注意分配(Pan et al., 2022)。P2 是目标呈现后 150-250ms 时在额叶和中央区诱发的正波，反映自下而上的注意资源分配。P3 是目标呈现后 300-500ms 时诱发的正波，可进一步区分为额叶的 P3a 和顶叶的 P3b，涉及自上而下的注意资源分配。Salmela 等(2016)的研究通过 RSA，发现 N1 和 P2 在枕叶的电生理活动与自下而上的注意定向有关，而 P3 在额叶和顶叶涉及自上而下的注意控制。本研究结果发现，N1(90ms)、P2(160ms)和 P3(300ms)时间点，ERP 与 fMRI 的 RDM 分别在枕颞下皮层、下顶叶皮层和前运动皮层显著相关，且 ERP 数据中 OM 效应的一致结果比不一致结果诱发了更大 P3b 波幅，证明 OM 效应的形成机制受自上而下的注意加工影响。

综上，本研究从神经基础的角度揭示了近似运算 OM 效应的形成机制。Knops 等(2009)发现，近似运算反映了心理数字线上的空间编码与注意加工的动态交互，这种交互会激活顶叶皮层。Dehaene 和 Cohen(2007)认为，人脑在进化过程中为适应环境的变化形成了一些

基本认知功能，但随着社会文化发展，部分脑区会被“再利用”以支持更高级的认知活动，如近似运算激活了与空间注意有关的神经回路。本研究发现，位于心理数字线上右侧的加法和左侧的减法结果可被分配到更多注意资源，表明加法运算中空间注意能够转移至数字线右侧，而减法转移至左侧。这一结果为近似运算偏差现象的认知神经机制提供了脑科学证据，证明近似运算与空间注意转移有关。未来研究可选取发展性计算障碍儿童为被试，考察这些儿童在近似运算中是否也存在 OM 效应，为进一步理解近似运算的认知机制和实施高效率学习奠定基础。

尽管有研究认为注意转移理论和启发式理论存在矛盾，但也有研究者指出，空间注意转移的前提是个体意识到加法运算会导致更大结果，而减法运算导致更小结果。例如。Hartmann 等(2015)将 OM 效应分为运算 OM 效应，即加法运算中高估结果和减法运算中低估结果，和注意 OM 效应，即加法运算中注视点右偏和减法运算中注视点左偏，结果发现前者主要出现在 9 岁以上的儿童，而后者在婴幼儿阶段已存在。McCrink 和 Hubbard(2017)认为，启发式策略能够引导空间注意的转移，从而强化对结果的预期，因此 OM 效应可能是两种机制共同作用的结果。基于这些发现，Prado 和 Knops(2024)指出，OM 效应的形成机制可能因发展阶段不同而各不相同，个体在早期发展阶段通过“多”或“少”的概念驱动“右”或“左”的算术空间偏向，形成“加法即多，减法即少”的启发式规则；但随着年龄增长，加减法运算可自动诱发空间注意转移。未来可通过多年龄段的纵向研究，系统考察 OM 效应的发展趋势，从而进一步揭示其形成机制是否随个体发展而发生转变。

本研究也存在一定局限性。首先，根据已有文献(Jang & Hyde, 2020)，本研究将正确结果与错误结果的距离设为 33%。但有研究发现，正确结果与错误结果在心理数字线上的距离可能会影响近似运算中的注意转移(Prado & Knops, 2024)。因此，未来可以考察 OM 效应在不同数字距离条件下(如 25%、50%、75%、100%)的结果，以进一步揭示近似运算中空间注意转移的作用机制。其次，研究仅使用非符号点阵来考察近似运算，一定程度上限制了研究结果的普遍性。Walsh(2003)的量级理论指出，数量、空间和时间并非相互独立的概念，而是彼此补充、相互关联的整体。人脑在加工这些信息时会将其转化为统一的度量单位，并映射到共同的近似数量系统(Cona et al., 2024)。Bonato 等(2021)关于时距运算的研究发现，个体在加法中倾向于高估时距，减法中低估时距，表明时间维度中也可能存在 OM 效应(王小静, 李宝林, 2025)。因此，未来研究可探索 OM 效应在时间与空间维度的加工机制。

综上，本研究揭示了近似运算 OM 效应的形成机制，发现效应源于心理数字线上的空

间注意转移，表现为加法运算中个体将空间注意转移向心理数字线右侧，导致加法结果被高估；减法运算中将空间注意转向左侧，导致减法结果被低估。以上结果考察了近似运算偏差现象的认知神经基础，揭示了近似运算和空间注意转移的内在关联，为实现高效率学习和认知干预措施提供了科学依据。

第一轮修改

审稿人 1 意见:

意见 1: 文章对于“近似运算”的定义不够详细,建议引言部分明确操作性定义,说明本研究如何在任务层面考察近似运算。

回应:

感谢审稿人的意见和建议。我们在本次修改稿的引言第一段增加了对“近似运算”的定义和背景说明。具体修改如下:

“近似运算”(Approximate Calculation)是个体在无法计算出精确结果情境下,通过舍入、取整或其它估算策略获得近似答案的心理操作过程(华晓腾 等, 2013; Poloczek et al., 2022)。它反映了个体复杂情景中的快速估算能力(Glaser & Knops, 2023),对促进数学思维发展和培养问题解决能力(Szkudlarek & Brannon, 2018)有重要影响,也能预测个体未来的数学学术成就(Er & DiNç Artut, 2025)。(修改内容已用蓝色标注)。

参考文献:

- 华晓腾, 司继伟, & 卢淳. (2012). 数学困难儿童的数学估计能力. *心理科学进展*, 20(10), 1633-1641.
- Er, Z., & DiNç Artut, P. (2025). Comparative analysis of number sense performance and problem-solving strategies in gifted and typically developing students. *Humanities and Social Sciences Communications*, 12(1), 1016.
- Glaser, M., & Knops, A. (2023). Spatial biases in approximate arithmetic are subject to sequential dependency effects and dissociate from attentional biases. *Journal of Numerical Cognition*, 9(1), 44-64.
- Poloczek, S., Hammerstein, S., & Büttner, G. (2022). Children's mixed-rounding strategy use in computational estimation. *Journal of Numerical Cognition*, 8(1), 24-35.
- Szkudlarek, E., & Brannon, E. M. (2018). Approximate Arithmetic Training Improves Informal Math Performance in Low Achieving Preschoolers. *Frontiers in Psychology*, 9, 606.

意见 2: 研究采用 fMRI 和 ERP 技术,并通过 RSA 方法实现跨模态数据融合。然而,文章中对于单一模态的局限性论述较为简略。建议作者在引言中补充有关仅采用单一模态在时间或空间分辨率上可能带来的局限,并说明多模态融合在本研究问题上的优势与必要性。

回应:

感谢您的细致审阅和宝贵建议。针对您提出的 fMRI 和 ERP 技术局限性的问题,我们在本次修改稿中的引言部分第四段做了补充。具体修改内容如下:

鉴于 ERP 具有毫秒级的时间分辨率,但其空间定位能力有限,难以精确定位大脑皮层的神经活动(Li et al., 2024); fMRI 具有较高的空间分辨率,但时间分辨率有限,难以揭示快速的认知加工过程(Logothetis, 2008)。因此研究采用表征相似性分析(representational

similarity analysis, RSA)实现 EEG-fMRI 信号融合(白天阳 等, 2024; Kriegeskorte et al., 2006; Salmela et al., 2016), 尝试揭示 OM 效应的形成机制。(修改内容已用蓝色标注)。

参考文献:

- 白天阳, 杨天宇, 董政, & 董卫华. (2024). 地理课程与空间能力相关性的脑实证研究. *科学通报*, 28(2), 549-560.
- Kriegeskorte, N., Goebel, R., & Bandettini, P. (2006). Information-based functional brain mapping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(10), 3863–3868.
- Li, Y. T., Lee, H. J., & Lin, F. H. (2024). Functional magnetic resonance imaging signal has sub-second temporal accuracy: *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 44(9), 1643-1654.
- Logothetis, N. K. (2008). What we can do and what we cannot do with fMRI. *Nature*, 453(7149), 869-878.
- Salmela, V., Salo, E., Salmi, J., & Alho, K. (2016). Spatiotemporal Dynamics of Attention Networks Revealed by Representational Similarity Analysis of EEG and fMRI. *Cerebral Cortex*, 28(2), 549-560.

意见 3: 研究结果以注意转移理论解释 OM 效应的形成机制, 但未在文中讨论研究结果究竟是反驳了启发式理论还是支持两种机制并存的可能性。建议在讨论部分说明本研究结果对启发式理论的意义。

回应:

感谢您提出的宝贵意见和建议。我们在本次修改稿中补充了相关内容, 详见讨论部分的第五段, 具体内容如下:

尽管有研究认为注意转移理论和启发式理论存在矛盾, 但也有研究者指出, 空间注意转移的前提是个体意识到加法运算会导致更大结果, 而减法运算导致更小结果。McCrink 和 Wynn(2009)发现, 尚未形成心理数字线的婴儿在观看加法运算动画时, 注视点会向右偏移, 而观看减法运算动画时则向左偏移。Hartmann 等(2015)进一步将 OM 效应分为运算 OM 效应, 即加法运算中高估结果和减法运算中低估结果, 和注意 OM 效应, 即加法运算中注视点右偏和减法运算中注视点左偏, 结果发现前者主要出现在 9 岁以上的儿童, 而后者在婴幼儿阶段已存在。这些证据表明, “多”或“少”的概念能驱动空间注意的反应。基于这些发现, McCrink 等(2017)认为, 启发式策略能够引导空间注意的转移, 从而强化对结果的预期, 由此 OM 效应是算术逻辑直觉与空间注意转移共同作用的结果。未来研究可结合启发式决策与空间注意转移, 进一步考察 OM 效应的形成机制。(修改内容已用蓝色标注)。

参考文献:

- Hartmann, Mast, F. W., & Fischer, M. H. (2015). Spatial biases during mental arithmetic: evidence from eye movements on a blank screen. *Frontiers in Psychology*, 6, 12.
- McCrink, K., Dehaene, S., & Dehaene-Lambertz, G. (2007). Moving along the number line: Operational momentum in nonsymbolic arithmetic. *Perception & Psychophysics*, 69(8), 1324–1333.
- McCrink, K., & Wynn, K. (2009). Operational momentum in large-number addition and subtraction by 9-month-

olds. *J Exp Child Psychol*, 103(4), 400-408.

McCrink, K., & Hubbard, T. (2017). Dividing attention increases operational momentum. *Journal of Numerical Cognition*, 3(2), 230-245.

意见 4: 在 fMRI 数据采集方法中提及了 TR、TE 等技术参数，但对非专业读者而言可能不易理解。建议在文章中对这些参数进行简要说明，例如在参数后括注英文全称和含义，以便读者理解实验设置。

回应:

感谢审稿人的意见建议，我们在本次修改稿中对相关技术参数(如 TR 和 TE，添加内容已用蓝色字体标注)在中文描述后添加对应的英文名称，以提高文章的规范性和可读性，请您审查。

意见 5: 文章提到“OM 效应受自上而下空间注意转移影响”的假设，但未明确指出将依赖哪些具体神经指标进行检验（如特定 ERP 成分、脑区激活或功能连接指标）。建议在方法或理论部分明确这些可操作的神经指标与判定标准。

回应:

感谢审稿人提出的宝贵意见。我们在本次修改稿中的引言第四段说明了检验 OM 效应受空间注意转移影响时使用的神经指标。具体修改内容如下：

因此，我们预期加法运算中的较大结果和减法运算中的较小结果会诱发反映自上而下注意偏向的 P3b 成分，并增强空间注意相关的激活，如顶内沟、顶上小叶等。(修改内容已用蓝色标注)

意见 6: 作者报告使用 GPower 估算样本量并给出最小样本为 28，但未报告估算所用关键参数（效应量、 α 值、检验力等）。建议在方法 2.1 中补充 GPower 计算的具体设置并说明为何实际招募 60 名被试。

回应:

非常感谢您的细致审阅和意见建议。我们已在修改稿中的“2.1 研究被试”部分进行了补充，具体修改如下：

使用 G*Power 3.1 软件 (Faul et al., 2007) 进行了样本量估算，以中等效应量(Cohen's $d = 0.5$)、检验力($1 - \beta = 0.8$)和显著性水平($\alpha = 0.05$)为标准，计算所得的最小样本量需求为 28 人。(新增内容已用蓝色标注)。

参考文献:

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175–191.

意见 7: 在 2.2 实验设计中, 提到使用“非符号点阵”作为实验材料, 但未说明选择该材料的理由与其如何控制面积/密度等视觉特征。建议在该部分补充说明材料选取依据及为避免面积/密度等线索而采取的控制措施。

回应:

感谢审稿人对本研究材料选取及方法提出的宝贵意见和建议。我们已在修改稿中的“2.2 实验设计”部分进行了补充, 具体修改内容如下:

首先, 本研究参考了 OM 效应的相关研究, 尤其是在实验设计和材料方面, 借鉴了已有研究, 如 McCrink 等(2007)以非符号点阵作为实验材料, 通过算术验证任务, 发现了 OM 效应。Jang 和 Hyde(2020)采用相同的实验材料和任务范式, 考察了 OM 效应的电生理机制。基于已有研究, 本研究采用相似的实验材料。

其次, 如何控制面积/密度等视觉特征对近似运算的影响, 参考 Dehaene(1999)的方法, 采用 Matlab 脚本生成非符号点阵图片, 在一半的点阵中每个点的面积相等, 确保点阵的总面积与数量成正比; 另一半点阵中点的面积随机分布, 使得点阵的总面积与数量间不存在相关性(Dehaene et al., 1999)。(修改内容已用蓝色标注)。

再次感谢您的宝贵意见, 这对我们进一步完善研究具有重要的指导意义。

参考文献:

Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., & Tsivkin, S. (1999). Sources of Mathematical Thinking: Behavioral and Brain-Imaging Evidence. *Science*, 284(5416), 970–974.

McCrink, K., Dehaene, S., & Dehaene-Lambertz, G. (2007). Moving along the number line: Operational momentum in nonsymbolic arithmetic. *Perception & Psychophysics*, 69(8), 1324–1333.

Jang, S., & Hyde, D. C. (2020). Hemispheric asymmetries in processing numerical meaning in arithmetic. *Neuropsychologia*, 146, 107524.

意见 8: 在 2.3 节实验流程描述中, TR 设置为 1000ms, 而刺激呈现间隔仅为 500ms, 这可能导致 BOLD 信号重叠。建议在正文中说明如何解决这一问题 (例如采用何种方法避免信号重叠), 并在实验流程图中标注关键时间参数, 以使读者清晰理解设计细节。

回应:

感谢审稿人提出的宝贵意见和建议。关于如何避免 BOLD 信号重叠的问题, 我们主要

是基于以下两个方面的考虑：

首先，尽管试次内各刺激呈现较快，但在 fMRI 一阶建模中，我们仅将比较点阵呈现时点作为主要的感兴趣事件进行建模；同一试次内的其他刺激(包括注视点、第一组点阵、运算符、第二组点阵)则作为控制性回归量或短时事件纳入设计矩阵，以减少对比较刺激效应估计的混淆。

其次，实验采用 2~4 s 的试间间隔(Inter-Trial Interval, ITI)，这有助于降低相邻试次间血流反应函数(HRF)的重叠，从而提高对不同事件的参数可分辨性。

上述内容已在本次修改稿“2.2 实验设计”部分进行了补充。请您审查。(修改内容已用蓝色标注)

意见 9：建议在 2.5.2 脑电数据处理中说明 ERP 信号的基线窗口、是否做基线校正、以及伪迹（眼动、肌电）剔除或 ICA 阈值的具体标准。

回应：

感谢审稿人提出的意见建议。我们在本次修改稿的“2.5.2 脑电数据处理”中补充了 ERP 基线窗与基线校正的具体设定，并详细说明了伪迹剔除与 ICA 的判定标准。具体修改内容如下：

预处理采用 EEGLAB 和 ERPLAB 工具箱，包括：(1)加载电极位置文件；(2)以左右乳突(M1, M2 电极)的平均值作重参考；(3)对所有电极数据进行 0.1 Hz 高通滤波和 30 Hz 低通滤波；(4)在 ERPLAB 中根据不同的实验条件设置 Eventlist，并分配给相应的 Bin；(5)将连续记录分段为时间窗-200 ms 到+500 ms 的 epoch，并对每个 epoch 以-200 ms 至 0 ms 为基线窗口进行基线校正；(6)用独立成分分析法(ICA)进行眼电和肌电等伪迹的去除；(7)对数据进行坏导检测，若某导极在整个记录中电压方差或噪声超过全体导极均值的 5 个标准差，则标记为坏道并用球面样条插值替换；(8)伪迹检测；(9)利用 ERPLAB 工具包对预处理后的脑电数据进行叠加平均，得到 ERP 结果。(新增内容已用蓝色标注)

意见 10：本研究在 ERP 与 fMRI 实验中使用了不同被试组。请作者并补充文献先例或在文章报告为缓解跨组差异而采取的统计策略。

回应：

感谢审稿人提出的宝贵意见建议。关于审稿人提出的“为何可在两组被试间实现 EEG-fMRI 比较并保证方法学合理性”，我们认为在多模态神经影像研究中，分别招募不同

被试完成 EEG 与 fMRI 实验，并通过表征相似性分析(Representational Similarity Analysis, RSA)将两种模态的数据映射到同一抽象表征空间，以实现跨模态、跨时间点乃至跨被试的比较，是一种在已有研究中被普遍验证的方法。例如，Kriegeskorte 等(2006)在提出 RSA 时强调该方法能够把来自不同测量手段的信号映射到统一的表征不相似性矩阵(RDM)，从而考察大脑活动的表征一致性。Kriegeskorte(2009)的研究考察了猕猴在被动观看物体时的电生理信号与人类的 fMRI 信号通过 RSA 计算表征相似性，揭示了灵长类动物视觉信息加工的跨物种一致性。Mattioni 等(2022)采集了盲人与视力正常个体对语义刺激加工的 fMRI 数据，并通过 RSA 考察了两者语义加工的大脑表征相似性。上述研究表明，通过 RSA 在不同被试样本间进行 EEG-fMRI 比较对比具有可行性。

参考文献:

- Kriegeskorte, N. (2009). Relating population-code representations between man, monkey, and computational models. *Frontiers in Neuroscience*, 3(3), 363 – 373.
- Kriegeskorte, N., Goebel, R., & Bandettini, P. (2006). Information-based functional brain mapping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(10), 3863 – 3868.
- Mattioni, S., Rezk, M., Battal, C., Vadlamudi, J., & Collignon, O. (2022). Impact of blindness onset on the representation of sound categories in occipital and temporal cortices. *eLife*, 11, e79370.

意见 11: 在 2.5.4 节脑电磁共振相关性分析的描述中，需要补充以下细节：(1) 如何将 fMRI 数据与 ERP 时间点对应匹配；(2) 构建 RDM 矩阵时所采用的距离度量方法（例如欧氏距离或相关系数等）；(3) 选择半径 3mm 构建球形探照灯的依据。建议在方法中对这些分析参数作明确说明，以增强研究方法的透明度和可重复性。

回应: 感谢审稿人的意见和建议。我们在本次修改稿的“2.5.4 脑电-磁共振相关性分析”补充了相关内容，具体内容如下：

采用 NeuroRA(Lu & Ku, 2020)工具包，并参考 Salmela 等(2016)的研究计算 ERP 和 fMRI 的表征相似性。具体流程包括：(1)基于预处理后的脑电数据，使用连续 10ms 时间窗口计算 ERP 的表征相异性矩阵(Representational Dissimilarity Matrices, RDM); (2)基于预处理后功能像数据，通过半径为 3mm 的球形探照灯计算 fMRI 的 RDM; (3)选取 N1、P2、P3b 波峰所对应的时间点，采用斯皮尔曼相关系数，通过计算半径为 3mm 的球形探照灯内每个 ERP 的 RDM 和 fMRI 的 RDM 间的相关性，建构 RSA 表征相似性分析，对于各时间点对应的 RSA，根据 ERP 数据获得时间活动概况，根据 fMRI 数据获得空间相关图，对比较结果进行显著性检验，校正阈限设置为体素水平 $p < 0.001$ 未校正，团块水平 $p < 0.05$ FWE 校正。(修改内容已用蓝色标注)

参考文献:

- Lu, Z., & Ku, Y. (2020). NeuroRA: A Python Toolbox of Representational Analysis From Multi-Modal Neural Data. *Frontiers in Neuroinformatics*, 14, 563669.
- Salmela, V., Salo, E., Salmi, J., & Alho, K. (2016). Spatiotemporal Dynamics of Attention Networks Revealed by Representational Similarity Analysis of EEG and fMRI. *Cerebral Cortex*, 28(2), 549–560.

意见 12: fMRI 结果主要呈现右侧顶叶网络激活，建议作者在讨论中就侧化问题展开更充分的论述，例如分析这一发现与已有文献的异同，并讨论为何空间注意偏移偏向于右半球，以丰富结论的深度。

回应: 感谢审稿人的意见和建议。我们在本次修改稿的讨论部分补充了以下内容：

根据 Dehaene 等(1995)的三重编码模型(triple code model)，不同算术加工对应的脑区存在偏侧化优势，即大脑左半球更倾向于语义加工，如算术事实检索、口头计数等；右半球更擅长视觉空间处理，如几何运算、珠心算等(Siemann & Petermann, 2018)。有研究结果支持了右半球在数字-空间联结上具有优势。如 Zorzi 等(2002)的研究发现，右半球受损患者在线段二分任务中的表现显著低于左半球受损患者，表明右半球对于数字空间表征贡献更大。Harvey 等(2013)通过模型拟合的方式绘制了大脑皮层上的数量拓扑图谱，发现该图谱在右侧顶上小叶的模型拟合度更高、拓扑结构更一致。此外，近似运算的研究也发现空间注意转移会引起更强的右侧顶叶活动(Knops et al., 2009)。本研究结果发现，OM 效应存在右半球偏侧化优势，表现为右侧顶叶显著激活，且与视觉区的功能连接显著增加，说明 OM 效应的形成主要依赖基于心理数字线的空间注意转移。(新增内容已用蓝色标注)。

参考文献:

- Knops, A., Thirion, B., Hubbard, E. M., Michel, V., & Dehaene, S. (2009). Recruitment of an Area Involved in Eye Movements During Mental Arithmetic. *Science*, 324(5934), 1583–1585.
- Prado, J., & Knops, A. (2024). Spatial attention in mental arithmetic: A literature review and meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 31(5), 2036–2057.
- Siemann, J., & Petermann, F. (2018). Evaluation of the Triple Code Model of numerical processing—Reviewing past neuroimaging and clinical findings. *Research in Developmental Disabilities*, 72, 106–117.

意见 13: “3.1 行为结果通过 2(数据模态: ERP、fMRI) × 2(算术操作: 加法、减法) × 3(结果方向: 小于、等于、大于)重复测量方差分析,” 其中 “2(数据模态: ERP、fMRI)” 的说法欠妥，不易理解，请斟酌用词。

回应: 感谢审稿人的建议。我们已对行为结果部分的描述进行了修改，将原文中“2(数据模态: ERP、fMRI)”表述为更准确的“2(实验组别: ERP 组、fMRI 组)”。这样既能避免“模态”

一词带来的歧义，也能更清晰表明这是一个组间因素，请审稿人再次审查。(修改内容已用蓝色标注)。

意见 14：在讨论部分提到“为数学学习和发展性计算障碍认知干预提供了科学参考”。这句话虽然展望了未来的研究方向，但未提出具体干预路径，建议进一步本研究如何为干预提供方向性启示，并列举一两条可行的后续研究路径。

回应：感谢审稿人的意见和建议，我们在本次修改稿的讨论部分补充了以下内容，以更清晰地阐述为数学学习和发展性计算障碍提供认知干预的可行研究路径：

未来研究可选择发展性计算障碍儿童为被试，考察这些儿童在近似运算中是否也存在 OM 效应，为进一步理解近似运算的认知机制和实施高效率学习奠定基础。(修改部分已用蓝色标注)。

审稿人 2 意见：

意见 1：fMRI 功能连接结果显示加法偏大条件下右楔前叶与视觉区（左枕下回/右梭状回）连接增强，作者将其解释为“空间注意资源分配”，但楔前叶通常关联自我参照加工，而视觉区参与低级特征处理。建议补充讨论这种连接模式是否反映对点阵物理特征的注意增强（如点阵面积/密度）。

回应：感谢审稿人的意见和建议。关于审稿人提出的“为何采用空间注意资源分配，而不是对刺激材料物理特征的注意增强，来解释右楔前叶与视觉区的功能连接”，本研究主要出于以下考虑：

首先，楔前叶并非单一功能区，而是存在明确的亚区分化。有研究基于静息态 fMRI，将楔前叶划分为背侧楔前叶(dorsal precuneus)和腹侧楔前叶(ventral precuneus) 两个亚区，指出前者主要与枕叶、顶叶相联系，参与视觉空间加工(Halbertsma et al., 2020; Margulies et al., 2009)；后者通常与内侧前额叶、后扣带回等默认模式网络节点连接，涉及自我参照与记忆检索(Cavanna & Trimble, 2006; S. Zhang & Li, 2012)。在本研究中，右侧楔前叶的 MNI 坐标为 (15, -64, 44)，其 z 值 ≥ 40 ，属于背侧楔前叶。因此，加法偏大条件下右楔前叶与视觉区的连接增强可能反映了空间注意资源分配。

其次，本研究参考 Dehaene(1999)的方法，最大程度排除点阵物理特征对实验结果的干扰。具体来说，采用 Matlab 脚本生成非符号点阵图片，在一半的点阵中每个点的面积相等，

确保点阵的总面积与数量成正比；另一半点阵中点的面积随机分布，使得点阵的总面积与数量间不存在相关性。基于该设计，本研究点阵的数量大小与其总面积不存在相关性，从而减少了刺激物理特征差异对实验结果的潜在影响。

综上，本研究中楔前叶与视觉区的功能连接增强更可能反映了空间注意资源分配。我们将在本次修改稿中详细讨论右楔前叶与视觉区的连接增强的认知加工机制，详见“讨论”部分第三段，具体修改内容如下：

楔前叶位于大脑顶叶内侧，包括背侧楔前叶(dorsal precuneus)和腹侧楔前叶(ventral precuneus)两个亚区，前者主要参与视觉空间加工，如注意定向、空间想象等(Halbertsma et al., 2020; Margulies et al., 2009)；后者通常关联自我参照加工，如自我认知、内省思维等(Cavanna & Trimble, 2006; S. Zhang & Li, 2012)。枕下回和梭状回属于视觉联合皮层，涉及物体识别、面孔和文字加工等视觉认知功能(Fernández et al., 2023)。有研究表明，背侧楔前叶与视觉区的功能连接支持对视觉刺激的注意分配，这种功能连接的增强可能反映对信息的优先处理(Al - Ramadhani et al., 2021)。在近似运算中，与空间注意转移方向一致的结果会引起楔前叶与视觉区的功能连接增强(Lasaponara et al., 2025)。本研究结果发现，加法偏大条件下右背侧楔前叶与左侧枕下回和右侧梭状回的功能连接增强，说明加法运算中较大结果调用了更多视觉空间注意，支持了注意转移理论。(新增内容已用蓝色标注)。

参考文献：

- Al-Ramadhani, R. R., Shivamurthy, V. K. N., Elkins, K., Gedela, S., Pedersen, N. P., & Kheder, A. (2021). The precuneal cortex: Anatomy and seizure semiology. *Epileptic Disorders*, 23(2), 218–227.
- Cai, Y., Hofstetter, S., Harvey, B. M., & Dumoulin, S. O. (2022). Attention drives human numerosity-selective responses. *Cell Reports*, 39(13), 111005.
- Cavanna, A. E., & Trimble, M. R. (2006). The precuneus: A review of its functional anatomy and behavioural correlates. *Brain*, 129(3), 564–583.
- Fernández, A., Hanning, N. M., & Carrasco, M. (2023). Transcranial magnetic stimulation to frontal but not occipital cortex disrupts endogenous attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(10), e2219635120.
- Halbertsma, H. N., Elshout, J. A., Bergsma, D. P., Norris, D. G., Cornelissen, F. W., Van Den Berg, A. V., & Haak, K. V. (2020). Functional connectivity of the Precuneus reflects effectiveness of visual restitution training in chronic hemianopia. *NeuroImage: Clinical*, 27, 102292.
- Lasaponara, S., Pinto, M., Lozito, S., Scozia, G., Pellegrino, M., Presti, S. L., Gazzitano, S., Giove, F., & Doricchi, F. (2025). Changes in Brain Functional Connectivity Underlying the Space–Number Association. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 37(1), 210–226.
- Margulies, D. S., Vincent, J. L., Kelly, C., Lohmann, G., Uddin, L. Q., Biswal, B. B., Villringer, A., Castellanos, F. X., Milham, M. P., & Petrides, M. (2009). Precuneus shares intrinsic functional architecture in humans and monkeys. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(47), 20069 – 20074.
- Zhang, S., & Li, C. R. (2012). Functional connectivity mapping of the human precuneus by resting state fMRI. *NeuroImage*, 59(4), 3548 – 3562.