

# 《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：自我空间与非自我空间参考系转换的神经机制

作者：刘佳丽 赵海潮 何清华

## 第一轮

### 审稿人意见：

本文聚焦于自我空间与非自我空间参考系转换的神经机制，探讨了空间导航中的核心问题。研究基于国家自然科学基金资助项目，理论联系实际，具有明确的科学问题和前瞻性。文章结构合理，从理论模型到实证研究，再到具体的研究构想，层层递进，逻辑清晰。研究方法科学，采用颅内脑电记录技术与深部电刺激技术，预期能够为空间认知领域提供新的理论支持和实践指导。然而，有些部分尚有进步空间。

**意见 1：**在研究背景部分，建议增加对应用颅内脑电技术对空间参考系转换的前人文献的介绍和探讨，作者引用的若干文献并非直接与本文研究领域相符合。

**回应：**感谢专家的建议。尽管颅内脑电技术因其高时空分辨率和多位点记录的优势，但由于被试的稀缺性，目前利用颅内脑电技术探究空间参考系转换神经机制的研究还比较少。我们将已有的少量相关颅内脑电研究加入到了“颅内脑电技术助力空间参考系转换的神经机制研究”部分，正文修改如下：

“目前，空间参考系转换的研究多集中于啮齿类动物的单神经元记录层面。尽管单神经元是神经操作的基本单位，但其容量和计算能力有限，复杂的认知任务需要神经集群的协作 (György Buzsáki, 2010)。神经振荡通过协调多个神经元在特定时间窗口内协同放电，以支持复杂认知活动 (G. Buzsáki & Vöröslakos, 2023)。此外，神经振荡在跨脑区的信息交互中也发挥着重要作用 (Hyafil, Giraud, Fontolan, & Gutkin, 2015)。空间参考系转换涉及顶叶、压后皮质和内侧颞叶的交互，神经振荡在这一过程中可能起到关键作用。颅内脑电技术因其高时空分辨率和多位点记录的优势，能够直接记录大脑内部的神经振荡活动，为研究空间参考系转换的神经机制提供了独特的视角和强有力的支持。神经振荡作为认知加工的重要基础，通过协调多个神经元在特定时间窗口内的同步活动，支持复杂认知任务 (G. Buzsáki & Vöröslakos, 2023)。因此，神经振荡可能在自我中心、非自我中心空间信息的表征中起关键作用。颅内脑电技术具有高时空分辨率和多位点记录的优势，能够直接记录大脑内部的神经振荡活动，为研究空间参考系转换的神经机制提供了独特的视角和强有力的支持。利用颅内脑电技术，研究者在内侧前额叶和嗅皮层发现了 theta 振荡的类网格状表征（一种非自我中心表征，见表 1) (Dong Chen et al., 2021; D. Chen et al., 2018)。Moraesku (2023) 等人利用颅内脑电技术的高时间分辨率，探讨了自我中心和非自我中心信息处理的时间动态及其相关脑区，结果表明自我中心表征的特异性脑区集中在内侧颞叶-枕叶区，而非自我中心表征的特异性脑区集中于顶内沟，并且自我中心信息的处理早于非自我中心信息 (Moraesku et al., 2023)。此外，神经振荡在跨脑区的信息交互中也发挥关键作用 (Hyafil et al., 2015)。研究发现，嗅皮层和内侧前额叶的类网格状表征通过同步的 theta 振荡实现协调，theta 同步强度与非自我中心记忆提取的准确性显著相关 (Dong Chen et al., 2021)。空间参考系转换过程中顶叶、压后皮质和内侧颞叶的信息传递也可能依赖低频神经振荡。综上，颅内脑电技术不仅为研究神经振荡在自我中心和非自我中心信息表征中的作用提供了有力工具，还为探索其在空间参考系转换中多脑区协同机制中的关键作用提供了新的契机。

此外，目前神经科学领域针对行为与神经活动因果关系的研究仍较为有限，电刺激技术为此提供了重要窗口。已有研究提示，可通过颅内电极在记忆相关脑区施加安全范围内的电刺激提升被试的记忆能力，并因果性地验证记忆的神经机制(Liu et al., 2021; Mankin & Fried, 2020)。已有研究表明，通过颅内电极在内侧颞叶（如海马和内嗅皮质等与空间表征相关的脑区）施加安全范围内的电刺激可影响非自我中心空间记忆(Mankin & Fried, 2020; Suthana et al., 2012)。未来研究可以针对参考系转换的核心脑区施加安全范围内的电刺激，进一步探究参考系转换的因果机制。”

注：横线为删掉文字，蓝色文字为添加文字

参考文献：

- Buzsáki, G., & Vöröslakos, M. (2023). Brain rhythms have come of age. *Neuron*, 111(7), 922-926.
- Chen, D., Kunz, L., Lv, P., Zhang, H., Zhou, W., Liang, S., . . . Wang, L. (2021). Theta oscillations coordinate grid-like representations between ventromedial prefrontal and entorhinal cortex. *Science Advances*, 7(44), eabj0200.
- Chen, D., Kunz, L., Wang, W., Zhang, H., Wang, W. X., Schulze-Bonhage, A., . . . Wang, L. (2018). Hexadirectional Modulation of Theta Power in Human Entorhinal Cortex during Spatial Navigation. *Curr Biol*, 28(20), 3310-3315.e3314.
- Hyafil, A., Giraud, A. L., Fontolan, L., & Gutkin, B. (2015). Neural Cross-Frequency Coupling: Connecting Architectures, Mechanisms, and Functions. *Trends Neurosci*, 38(11), 725-740.
- Mankin, E. A., & Fried, I. (2020). Modulation of human memory by deep brain stimulation of the entorhinal-hippocampal circuitry. *Neuron*, 106(2), 218-235.
- Moraesku, S., Hammer, J., Janca, R., Jezdik, P., Kalina, A., Marusic, P., & Vlcek, K. (2023). Timing of allocentric and egocentric spatial processing in human intracranial EEG. *Brain Topography*, 36(6), 870-889.
- Suthana, N., Haneef, Z., Stern, J., Mukamel, R., Behnke, E., Knowlton, B., & Fried, I. (2012). Memory enhancement and deep-brain stimulation of the entorhinal area. *New England Journal of Medicine*, 366(6), 502-510.

**意见 2:** 讨论部分应深入探讨研究结果的意义，包括对现有理论的贡献和对未来研究的启示，同时考虑结果的局限性和可能的替代解释。

**回应:** 感谢专家的建议。现对文章的“理论构建与创新”部分作如下修改：

“结合已有计算模型(BB model)(Bicanski & Burgess, 2018)以及已有的实验结果(Bicanski & Burgess, 2020)，本研究预期顶叶与内侧颞叶分别参与到自我、非自我中心目标方向的表征，而压后皮质则联合编码自我中心目标方向与头朝向。当自我中心参考系转换为非自我中心参考系时，顶叶、压后皮质以及内侧颞叶存在 ~~theta~~ 相位同步以及 ~~theta-gamma~~ 相位幅值耦合，信息流从顶叶传递到压后皮质，再到内侧颞叶；而非自我参考系转换为自我中心参考系时，上述三个脑区的信息流方向相反，同时伴随类似的低频振荡相位耦合特性。此外，电刺激能够调控压后皮质的神经活动，并可以预测行为表现的改善。”

本研究将补充 ~~BB model~~ 在神经振荡层面的证据。~~BB model~~ 以及空间参考系转换的研究多集中于啮齿类动物的单神经元记录层面。尽管单神经元是神经活动的基本单位，但复杂的认知任务需要神经集群的协作(György Buzsáki, 2010)。本研究将重点探讨神经振荡如何动态表征自我中心与非自我中心的空间变量，以及低频振荡在空间参考系转换过程中的跨脑区信息传递作用。通过揭示神经振荡在这一过程中的关键作用，本研究不仅深化对空间参考系转换机制的理解，也为 ~~BB model~~ 的优化提供科学依据，推动理论研究与实践应用的有机结合。此外，本项目采用当前流行的多变量分析方法：~~反向编码模型、表征相似性分析、分类器等~~

先进的多变量分析方法，从多角度解码和分析空间信息的神经基础，显著提升研究的深度与精度。

老化常伴随空间参考系转换能力的下降，严重影响个体的空间认知能力与导航能力。本项目结合深部电刺激技术，探索提升空间参考系转换能力的神经调控方法，为老化导致的空间认知障碍干预提供重要的理论支持和技术路径。

### (1) 探索自我与非自我中心空间表征的脑区拓扑分布

现有研究表明，BB model 可能有过度简化的嫌疑，顶叶-压后皮质-内侧颞叶回路对自我中心和非自我中心空间信息的编码可能并非简单的二分模式，而是呈梯度分布(Clark, Simmons, Berkowitz, & Wilber, 2018; C. Wang, Chen, & Knierim, 2020)。本研究将采用反向编码模型、表征相似性分析及分类器等多变量分析技术，解码头朝向、自我中心目标方向和非自我中心目标方向的神经表征，揭示自我与非自我中心变量在顶叶-压后皮质-内侧颞叶环路中的拓扑分布规律。本研究不仅有助于优化 BB model 对空间信息表征机制的解释，还为未来更深入探索空间认知能力提供了新的研究视角与方向。

### (2) 揭示低频神经振荡在空间参考系转换过程中的信息传递作用

BB model 强调空间参考系转换需要多脑区协作，但未具体阐明跨脑区信息传递的神经机制。本研究基于低频神经振荡在脑区交互中的关键作用，假设当自我中心参考系转换为非自我中心参考系时，顶叶、压后皮质和内侧颞叶的  $\theta$  相位同步及  $\theta$ - $\gamma$  相位幅值耦合显著，信息流从顶叶依次传递至压后皮质和内侧颞叶；反之，在非自我中心参考系转换为自我中心参考系时，信息流方向相反，且同样伴随低频振荡的相位耦合特性。本研究拟填补 BB model 关于自我中心和非自我中心空间信息如何跨脑区传递的空白，有助于空间导航理论研究向临床干预与类脑智能应用的转化。

### (3) 验证压后皮质在参考系转换中的因果作用

通过深部电刺激技术，本研究将因果性验证压后皮质在参考系转换中的关键作用，同时探索不同电刺激模式（如  $\theta$  burst 刺激）对行为表现的影响。研究结果不仅为空间参考系转换的 BB model 提供了可靠因果证据，为空间认知调控方法提供理论支持，还可为提升个体空间能力的干预研究提供了新思路。

注：横线为删掉文字，蓝色文字为添加文字

#### 参考文献：

- Bicanski, A., & Burgess, N. (2018). A neural-level model of spatial memory and imagery. *Elife*, 7.
- Bicanski, A., & Burgess, N. (2020). Neuronal vector coding in spatial cognition. *Nat Rev Neurosci*, 21(9), 453-470.
- Buzsáki, G. (2010). Neural syntax: cell assemblies, synapsembles, and readers. *Neuron*, 68(3), 362-385.
- Clark, B. J., Simmons, C. M., Berkowitz, L. E., & Wilber, A. A. (2018). The retrosplenial-parietal network and reference frame coordination for spatial navigation. *Behav Neurosci*, 132(5), 416-429.
- Wang, C., Chen, X., & Knierim, J. J. (2020). Egocentric and allocentric representations of space in the rodent brain. *Curr Opin Neurobiol*, 60, 12-20.

---

## 第二轮

审稿人意见：对作者的修稿没有其他意见了。感谢作者针对评审意见的所作的修订努力！

编委意见：同意发表。