

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：太极拳技能学习早期大脑功能的动态变化：基于运动表象的 fMRI 研究

作者：李琳 张小友 徐亚奎 宗博艺 赵文睿 赵革 姚猛 占竺旋 尹大志 范明霞

第一轮

审稿人 1 意见：

意见 1：“运动技能学习可以使大脑功能发生可塑性改变”，请检查该句子的句义是否符合想要表达的语义。我的理解是，大脑具有可塑性，运动技能的学习能够塑造大脑的静息态和任务态的功能；但文中的表述，却是说运动技能的学习改变的是“可塑”这个特性。请作者思考是否需要修正文中的多处表述。

回应：感谢审稿专家的宝贵意见和建议。“脑的可塑性”是指“人脑具有的根据行为、学习等内外环境的变化而改变其结构和功能的能力(Kolb & Gibb, 2014)”，这里的表达确有不妥，我们根据您的意见已将此处修改为“大脑具有可塑性，运动技能学习可以塑造大脑的静息态功能和任务态功能”，并将题目修改为了“太极拳技能学习早期大脑功能的动态变化：基于运动表象的 fMRI 研究”，对全文其他地方类似的表述也做了修改。

意见 2：“为了建立运动技能与脑的直接关联，较多学者采用运动表象任务替代技能实际执行”，请思考：既然“无法在运动技能实际执行时采集脑数据”，退而求其次，选择运动想象，这还能否称之为“直接关联”？

回应：感谢审稿专家的细致审阅和提醒。正如专家所说，运动表象替代运动技能的实际执行，还称之为“直接关联”的确不合适。为此，我们删掉了此处“直接”的表述，修改为“为了建立运动技能与脑的关联，较多学者采用运动表象任务替代技能实际执行”。

意见 3：个人建议，缩略语“functional magnetic resonance imaging, fMRI”放在更前面的位置，可以跟在“磁共振成像”的介绍之后，介绍功能性磁共振。

回应：感谢审稿专家提出的宝贵建议。已将“magnetic resonance imaging, MRI”跟在了前文“磁共振成像”之后，并将“functional magnetic resonance imaging, fMRI”修改为了缩略

语“fMRI”，在修改稿中呈现为“磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）是当前进行大脑结构和功能研究最为先进的技术……”和“基于上述分析，本研究拟采用多时点纵向追踪设计，借助于功能性磁共振成像技术（fMRI）……”。

意见 4: 实验组只进行三次测量，来验证“阶段性”特点，太少了。同为研究者，我深切理解磁共振实验开展困难，这的确是限制数据收集的重要因素，但这一定不能成为对不严谨结果放松把关的借口。因此，请思考，是否有必要调整分析（例如，进行非线性拟合）来支持“先慢后快”，是否有必要调整后文对于阶段性“先慢后快”的解释？

回应: 感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议。由于核磁实验开展困难等客观条件的限制，加之本研究聚焦于太极拳技能学习的早期，我们在 14 周的太极拳技能学习期间只采集了三次的数据，希望通过对这三次数据的分析来了解太极拳技能学习早期技能和脑的变化情况，当然如您所言，对于“阶段性”特点的验证，三次的数据采集的确有些偏少，我们已在修改稿的研究不足中补充了这部分内容。我们采用了重复测量方差分析对不同采集时点的行为表现和脑功能进行了差异检验，这也是脑的多时点（大于等于 3 次）纵向追踪研究中最为常用的分析方法(Liu et al., 2022; Talamonti et al., 2022; 陈丹丹, 2020; 宋秀, 2017)。但是总的来看，目前此类研究数量比较少，可供参考的高质量文章十分有限。

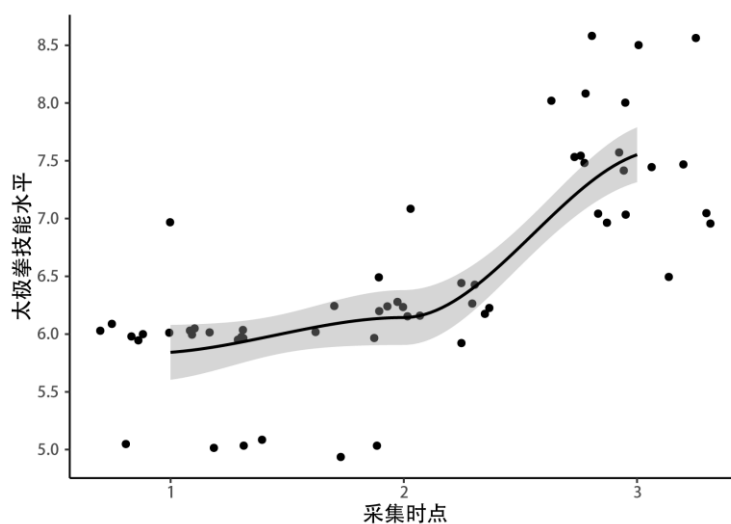


图 1 太极拳技能水平的 loess 拟合

我们计算了不同采集时点技能水平的平均增长率，第一次到第二次的平均增长率为 5.16%，第二次到第三次的平均增长率为 22.94%。同时根据您的建议，我们对三次采集到的技能水平的数据尝试进行了非线性拟合，拟合的方式为局部加权回归（locally weighted

regression, loess), 结合平均增长率的数值大小以及拟合的 loess 曲线 (图 1), 可以较为直观地得到太极拳技能水平先缓慢后快速变化的趋势, 这在一定程度上验证了本研究重复测量方差分析的结果, 但是由于此方法仅能对数据进行一些探索性分析, 目前还没有看到这一方法在类似研究中的使用。

意见 5: “除太极拳学习外, 要求实验组被试在实验期间不进行其他形式的运动项目学习和锻炼, 也不进行太极拳表象训练”。请思考: 磁共振数据收集之前, 不进行表象训练, 也就是说, 后期多次磁共振数据的采集, 有可能伴随着对运动表象这一认知过程的熟悉性的增加, 因此, 测量到的数据, 不仅仅有运动技能学习的解释, 还有其他可能。这是本文的一个重要不足, 请在文中交代不进行表象训练的原因, 以及在后文补充关于运动表象熟悉性的阐释。

回应: 感谢审稿专家的指正。非常抱歉我们在论文中没有很好地区分“运动表象训练”和“运动表象任务练习”这两个不同概念, 在这里我们做一些补充和解释, 同时在正文的相应部分也补充说明了原因。

运动表象训练是指一种不通过实际的身体动作, 仅在内心多次反复模拟某种运动动作或运动情境, 从而激活特定脑区的一种心理技能训练方法, 通常是指一段时间的多次反复的运动表象练习。本研究要求不进行运动表象训练的原因包括: (1) 运动表象训练能够促进技能水平的提高。有研究表明, 较短时间的运动表象训练就能够提高运动技能水平 (Chiacchiero et al., 2015; 游茂林 等, 2020; 钟霞, 柯敏, 2011)。为了避免运动表象训练的效果和运动技能训练的效果混淆, 本研究特意要求实验组和对照组被试都不进行太极拳动作的表象训练。(2) 运动表象训练能够对大脑功能产生积极影响。Wang 等 (2019) 的研究表明, 持续 4 周的运动表象训练就能够影响参与者的静息态脑功能。因此, 本研究要求不进行运动表象训练可以避免其对被试大脑功能产生潜在的影响。

此外, 为了让被试能够顺利完成本研究的运动表象任务, 被试在进入 MRI 扫描仪之前会进行一次运动表象任务练习, 目的是让被试在正式实验之前能对任务的操作有所熟悉。因为本研究两次采集间隔时间为 6 周, 实验过程中发现一些被试会遗忘表象任务的一些内容, 为了保证被试能够顺利完成正式的运动表象任务, 特在进入 MRI 扫描仪之前进行一次运动表象任务的练习。当然我们也深知对于同一任务范式的多次重复, 不可避免地会面临任务熟悉性对研究结果的影响。我们在研究中采取了以下两点做法: (1) 每次采集数据时, 在被试完成运动执行任务后, 进入 MRI 扫描仪前, 仅练习一次运动表象任务, 以保证被试每次练习的程度都是相同的。(2) 设置了性别、年龄和受教育年限匹配的对照组, 从实验设计上将

任务熟悉性对研究结果可能的影响进行了控制。

为了便于理解，我们将此部分的表述修改为了“除太极拳学习外，要求实验组被试在实验期间不进行其他形式的运动项目学习和运动。对照组被试保持正常的学习和生活，不进行任何运动技能的学习和有规律的运动（每周 3 次，每次 30 分钟以上）。为了避免表象训练对太极拳运动技能提升和被试脑功能产生影响(Chiacchiero et al., 2015; Wang et al., 2019)，要求两组被试在实验期间也不进行太极拳动作的表象训练”，同时在讨论分析的倒数第 2 段补充了以下内容：“有研究表明，一段时间的运动表象训练既能提高运动技能水平(Chiacchiero et al., 2015; 游茂林 等, 2020; 钟霞, 柯敏, 2011)，也能影响参与者的静息态脑功能(Wang et al., 2019)，为了避免运动表象训练的效果和运动技能训练的效果混淆，本研究要求实验组和对对照组被试在实验期间都不进行太极拳动作的表象训练”。

意见 6:“动觉表象平均得分超过 4 分”，平均是如何计算的？该量表 1-4 条目的平均分吗？请补充说明。

回应:感谢审稿专家的意见。正如您所言，动觉表象的平均得分为《运动表象问卷》1-4 条目的平均分，已在修改稿中做了补充说明。

意见 7:“运动表象质量和太极拳技能水平的相关检验”怎么做的？做的哪种相关？纳入哪些数据？如何分组？在 3 次时间点上做 3 次吗？请交代清楚。

回应:感谢审稿专家的意见。对于相关检验的做法我们确实没有交代清楚，结合回应 17 中补充的相关分析方法，我们在修改稿的数据统计分析部分补充了以下内容：“为考察实验组被试表象任务诱发的脑区激活和太极拳表象质量以及技能水平的关系，首先对三次采集的 ROI 平均信号值、时间一致性和太极拳技能水平进行汇总，然后采用皮尔逊相关检验分析三个变量之间的关系，其次对不同采集时间 ROI 平均信号值、时间一致性和太极拳技能水平的变化值进行皮尔逊相关检验，以探究三个变量的变化是否存在关联”。

意见 8: t 或 χ 值保留两位小数即可； χ 不是 x，请改正。效果量不需要斜体。括号的层次需要更正。

回应:感谢审稿专家提出的宝贵意见。已经按照您的建议，并参照最新发表的《心理学报》的文章对全文类似的问题进行了修改。非常抱歉！由于我们的不细致导致初稿中存在着一些细小格式上的问题（包括意见 10, 15 和 19），这本不应该发生，在今后的论文撰写过程中，

我们会确保不再出现类似错误。

意见 9: 对照组的不显著结果的解释，“太极拳技能水平和运动表象质量不会因时间不同而发生改变”，针对人群呢，请补充；另外，统计结果不显著并不意味着“不会改变”，请修正对结果的阐释。

回应: 感谢审稿专家的意见和指正。此处针对的人群是对照组被试，我们对统计结果不显著的阐释确实不够准确，已将此处的表述修改为了“对照组被试的太极拳技能水平和运动表象质量变化不大，没有达到显著性水平”。

意见 10: 表象质量的图，纵坐标是有单位的，请补充。

回应: 感谢审稿专家的提醒。已按要求在正文图 3B 的纵坐标处添加了单位 (ms)，同时为了避免引起歧义，将该图纵坐标的标签修改为了“时间一致性”。

意见 11: “太极拳技能水平从 2 周到 8 周提高较为缓慢，而 8 周后技能水平快速提高，太极拳技能学习早期技能提高速度表现出了先缓慢后快速的阶段特点”，个人以为，这个结果的阐释尚需谨慎。2 周与 8 周之间差异不显著，因此，三者的增长并不具有传递性。换言之，2 周到 8 周，技能真的提高了吗？速度上的“先缓慢后快速”，不能只从描述性统计的图上得出口头上的揣测，建议结合上述条目 4，补充数据分析上的支撑。

回应: 感谢审稿专家宝贵的意见和建议。我们对于此处结果的阐释确实不够准确。正如您所言，“2 周与 8 周之间差异不显著”并不能得到“技能缓慢提高”的结论。为了使表述更为准确，我们将此修改为了“说明从 2 周到 8 周太极拳技能水平变化不大，而 8 周后技能水平显著提高，从图 3A 可知，技能水平表现出先缓慢后快速的变化特点”，回应 4 中的不同时点技能水平的平均增长率以及 loess 拟合的结果（图 1）在一定程度上也能够为这一结论提供支撑。我们在修改稿中也订正了其他类似的表述。

意见 12: 图注里，“事后检验采用 Bonferroni 方法”，不完整，请补充完整。

回应: 感谢审稿专家提出的宝贵意见。根据您的建议，我们在数据统计分析部分补充了多重比较校正的说明：“事后多重比较采用 Bonferroni 校正”和“上述涉及到脑数据多体素检验的校正阈值设置为体素水平未校正， $p < 0.001$ ，团块水平的 FWE 校正， $p < 0.05$ ”，并将正文图 3、图 6 和附件图 1 的图注修改为“事后多重比较采用 Bonferroni 校正”，同时为了保证

格式的统一，对正文图 5、表 3 和表 4 的注释也做了修改。

意见 13:“ROI 神经加工能力越强”，请统一文章里关于脑活动的表述，诸如激活、神经加工能力等。

回应:感谢审稿专家的宝贵意见。我们在初稿中确实存在着表述不一致的问题，在查阅了任务态功能成像高水平期刊论文后，我们将初稿中存在的“脑区神经激活增强”“脑区功能激活增强”等统一表述为了“脑区激活增强”。

意见 14:“运动表象质量和太极拳技能水平具有显著负相关，表明太极拳技能水平越高，运动表象质量就越好”，一般而言，负相关的解释是“A 越高，B 越差”。本研究中，拐了一个弯：运动表象质量是差值，数值越大表示质量越差。因此，请详细补充为什么“负相关”却解释为“太极拳技能水平越高，运动表象质量就越好”。

回应:感谢审稿专家的意见。本研究中将运动表象时间与实际执行时间的差值绝对值，即“时间一致性”作为评价运动表象质量的指标，时间一致性数值越小，运动表象质量就越好。初稿的表述确实容易引起歧义，因此，我们将此处的表述修改为了“时间一致性和太极拳技能水平存在显著负相关 ($r=-0.27$, $p=0.042$)，表明太极拳技能水平越高，时间一致性数值越小，运动表象质量就越好”，文中其他的地方也做了相应的修改。

意见 15:表 1，三线表的线的粗细不一致；表 2，下数第二根线真有必要呈现吗，而且，其余三根线的粗细也不一致。其余表格亦然。

回应:感谢审稿专家提出的细致意见。我们参考了一些最近发表的心理学高水平文章，也查阅了心理学论文撰写方面的书籍，了解到三线表的规范的格式一般为：上下线较粗（通常为 1.5 磅），第二条线最细（通常为 0.75 磅），我们在初稿中确实没有太注意这个问题，现已按照最新的格式要求对全部的表格都做了修改。同时按照您的建议，我们去掉了正文表 2 和附件表 2、表 3 中多余的线。

意见 16:表 5，相关系数矩阵的画法，请参考高水平期刊的画法。

回应:感谢审稿专家提出的宝贵意见。我们已参照《心理学报》最新发表文章(张妮 等, 2022)的样式重新制作了相关系数矩阵表，具体见正文表 5。

意见 17: 从图 7 中可以看出, 相关的数据点达到几十个, 但本研究中实验组只有不到 20 人。结合前述问题 7, 相关分析的做法与阐释, 还需要斟酌与修正。从图 6 以及本文中他处的表述来看, 太极拳的技能水平和脑激活等很有可能是非线性的关系, 因此, 对于本文中的相关分析的做法, 我持高度怀疑的态度。请思考, 合并了 3 个时间点, 做相关分析, 是否合适? 请参考高水平 SCI 文章进行相关分析。

回应: 感谢审稿专家提出的意见和建议。我们想和审稿专家做一点思路上的交流和解释, 也想再听一听您在这一问题上的看法。

(1) 为了考察大脑功能、表象质量和技能水平三者之间的关系, 我们首先针对每一个采集时点分别进行了皮尔逊相关分析, 结果见表 1-表 3, 遗憾的是我们仅在第三次采集的数据中发现了时间一致性和技能水平存在显著的负相关 ($r=-0.63, p=0.004$), 我们推测可能的原因是本研究样本量偏小, 导致没能检验出其他可能存在的相关关系, 此外这一结果也说明技能水平的变化与脑功能的变化可能并不完全同步。为了进一步厘清三者之间的关系, 我们汇总了三次采集到的数据进行皮尔逊相关分析, 相关结果见正文表 5 和图 7, 结果显示 ROI 平均信号值和太极拳技能水平总体上存在显著的正相关 (左侧颞上回, $r=0.41, p=0.001$; 左侧楔前叶, $r=0.50, p<0.001$), 时间一致性和太极拳技能水平总体上存在显著负相关 ($r=-0.27, p=0.042$)。

表 1 各变量的相关分析 (第一次采集)

变量	<i>M</i>	<i>SD</i>	1	2	3
1 技能水平	5.84	0.50	—		
2 时间一致性 (ms)	2045.81	718.99	0.14	—	
3 左侧颞上回	0.76	0.72	0.13	-0.08	—
4 左侧楔前叶	-0.73	0.72	0.41	0.24	0.59**

注: **代表 $p < 0.01$

表 2 各变量的相关分析 (第二次采集)

变量	<i>M</i>	<i>SD</i>	1	2	3
1 技能水平	6.14	0.46	—		
2 时间一致性 (ms)	1807.47	1053.28	-0.12	—	
3 左侧颞上回	0.48	0.56	0.24	-0.12	—
4 左侧楔前叶	-0.68	0.71	0.16	-0.28	0.37

表 3 各变量的相关分析（第三次采集）

变量	<i>M</i>	<i>SD</i>	1	2	3
1 技能水平	7.55	0.57	—		
2 时间一致性 (ms)	1641.70	915.47	-0.63**	—	
3 左侧颞上回	1.34	0.89	0.18	-0.16	—
4 左侧楔前叶	-0.06	0.53	0.26	-0.27	-0.08

注：**代表 $p < 0.01$

(2) 根据以往类似研究常用的相关分析方法 (Wu et al., 2018; 董晓晓 等, 2020)。我们在修改稿中也补充了不同采集时点 ROI 平均信号值的差值、时间一致性的差值和太极拳技能水平的差值的皮尔逊相关分析, 以探究大脑功能变化、表象质量变化和技能水平变化之间的关系。差值的相关分析结果显示 (见正文图 8), 从 2 周到 14 周, 被试在左侧楔前叶平均信号值的变化和太极拳技能水平的变化呈显著正相关 ($r=0.56, p=0.013$); 而从 8 周到 14 周, 被试在左侧楔前叶平均信号值的变化和时间一致性的变化呈显著负相关 ($r=-0.52, p=0.022$)。我们希望通过这两方面的分析和补充, 能够更全面地揭示三个变量之间的关系。修改稿中的“数据统计分析”和“3.4 实验组 ROI、时间一致性和技能水平的关系”部分均做了相应的修改。

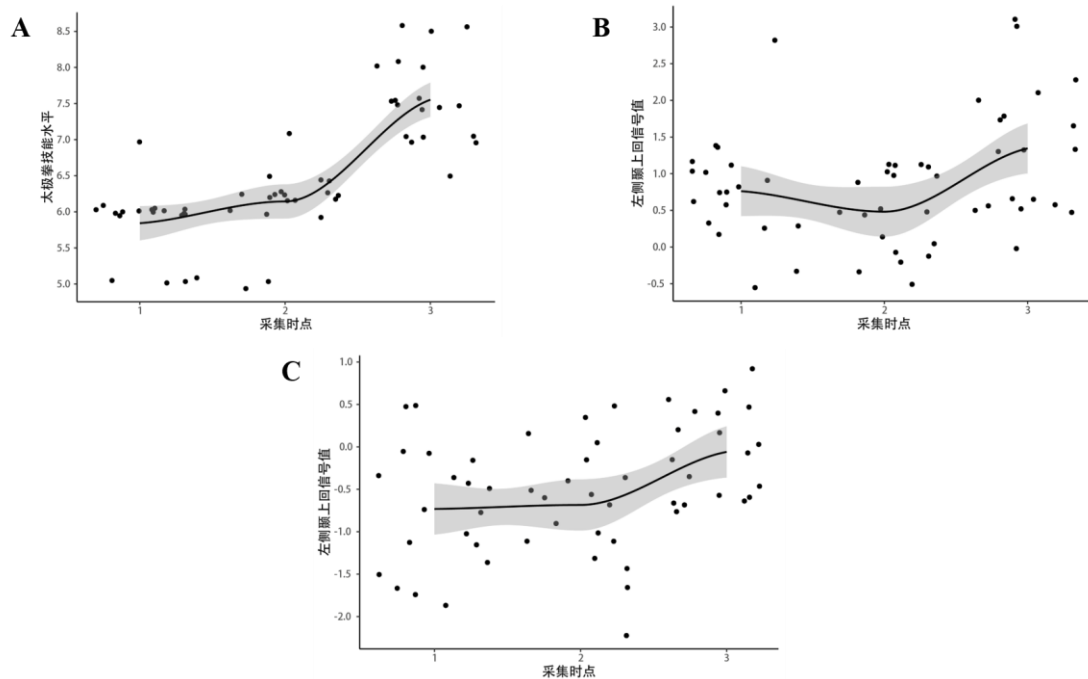


图 2 太极拳技能水平 (A)、左侧颞上回 (B) 和左侧楔前叶 (C) 的 loess 拟合

(3) 为进一步了解太极拳技能水平和脑激活的变化趋势,我们对太极拳技能水平、左侧颞上回和左侧楔前叶的平均信号值分别进行了非线性 loess 拟合,从三个指标拟合的曲线来看(图 2),可以较为直观地观察到三者的变化趋势基本类似:先缓慢后快速的变化特点,这在一定程度上能够体现出太极拳技能水平和脑激活之间存在的关系。

意见 18:“密切相关”,表述不够严谨。个人建议,可以直接根据相关系数的数值,描述为“中等程度的相关”“高相关”等。

回应:感谢审稿专家的建议。我们已按照您的建议对全文进行了检查和修改。

意见 19:参考文献中的英文文章题目,实词的首字母大写不一致,请参考《心理学报》的参考文献格式。

回应:感谢审稿专家提出的宝贵意见。我们已经按照最新的《心理学报》文献著录格式对全文进行了检查和修改。这一点我们确实没有太注意,以为使用了文献管理软件就不需要再进行额外的调整了,非常抱歉,我们在初稿中多次出现了类似的格式问题,在今后的论文撰写过程中,我们会提高对文章细节格式的重视,确保不再出现类似错误。

【参考文献】

- 陈丹丹. (2020). 足球脚背正面颠球学习对脑自发神经活动的动态影响 (硕士学位论文). 扬州大学.
- 董晓晓, 陈爱国, 刘智妹, 王金贵, 蔡可龙, 熊轩. (2020). 小篮球运动对学龄前孤独症儿童重复刻板行为及脑灰质体积的影响. *中国体育科技*, 56(11), 25-31.
- 宋秀. (2017). 认知行为治疗作用于抑郁症患者静息态脑功能的追踪研究 (硕士学位论文). 南京师范大学.
- 游茂林, 刘良辉, 樊荣, 童靖然. (2020). 专项表象训练方案设计与效果测评——以篮球罚球训练为例. *上海体育学院学报*, 44(11), 28-37.
- 张妮, 刘文, 刘方, 郭鑫. (2022). 8~12 岁儿童抑郁与认知重评的关系: 悲伤面孔注意偏向的中介作用. *心理学报*, 54(1), 25-39.
- 钟霞, 柯敏. (2011). 内-外表象训练影响乒乓球技能学习的教学实验. *首都体育学院学报*, 23(2), 165-168.
- Chiacchiero, M., Cagliostro, P., Degenaro, J., Giannina, C., & Rabinovich, Y. (2015). Motor imagery improves balance in older adults. *Topics in Geriatric Rehabilitation*, 31(2), 159-163.
- Kolb, B., & Gibb, R. (2014). Searching for the principles of brain plasticity and behavior. *Cortex*, 58, 251-260.
- Liu, C., Xie, Y., Hao, Y., Zhang, W., Yang, L., Bu, J., . . . Zhang, X. (2022). Using multisession tDCS stimulation

as an early intervention on memory bias processing in subthreshold depression. *Psychophysiology*, e14148.

Talamonti, D., Gagnon, C., Vincent, T., Nigam, A., Lesage, F., Bherer, L., & Fraser, S. (2022). Exploring cognitive and brain oxygenation changes over a 1-year period in physically active individuals with mild cognitive impairment: A longitudinal fNIRS pilot study. *BMC Geriatrics*, 22(1), 648.

Wang, H., Xu, G., Wang, X., Sun, C., Zhu, B., Fan, M., . . . Sun, L. (2019). The Reorganization of Resting-State Brain Networks Associated With Motor Imagery Training in Chronic Stroke Patients. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 27(10), 2237-2245.

Wu, M.-T., Tang, P.-F., Goh, J. O. S., Chou, T.-L., Chang, Y.-K., Hsu, Y.-C., . . . Lan, C. (2018). Task-switching performance improvements after Tai Chi Chuan training are associated with greater prefrontal activation in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 10, 280-280.

.....
审稿人 2 意见：

意见 1： 论文摘要增加对被试和实验设计的具体描述。

回应： 感谢审稿专家的指正。按照您的建议，我们将此处修改为了：“为了解太极拳技能学习早期大脑功能的动态变化特点，本研究共招募 29 名太极拳零基础被试（19 名实验组被试，10 名对照组被试），采用多时点纵向追踪设计，借助于功能磁共振成像技术，采集技能学习早期不同时点被试完成运动表象任务时的行为和脑功能数据”。

意见 2： 《运动表象问卷》部分，动觉和视觉表象能力应会影响到基于表象任务的大脑信号活动，为何后续分析没有考虑到这些能力的影响？

回应： 感谢审稿专家提出的宝贵意见。正如您在意见 5 和意见 6 中提到的那样，我们在初稿中确实没能很好地区分“运动表象得分”和“运动表象质量”这两个概念，从而影响了对于研究内容本身的理解，这里我们做一些解释说明。

“运动表象得分”指的是被试在运动表象问卷（MIQ-3）上的得分情况，由于该问卷涉及到的是四个日常生活中非常常见和简单的动作“抬膝”“跳跃”“手臂移动”和“腰部弯曲”，通常用来对被试基本的动觉或视觉表象能力（不涉及特定复杂的技术动作）进行评估(白学军 等, 2016; 沈诚 等, 2016; 张兰兰 等, 2017)。考虑到本研究中要求被试采用动觉表象想象太极拳动作，因此我们重点关注的是被试的动觉表象部分（MIQ-3 的 1-4 题）的得分情况，通过调查了解其是否能够顺利完成本研究的动觉表象任务。本研究参照白学军等（2016）和沈诚等（2016）对被试的筛选方法，同样以 MIQ-3 的 1-4 题平均分超过 4 为被试的入组标

准。由于本研究仅将“动觉表象得分”作为筛选被试的标准之一，同时组间和组内被试的动觉表象得分亦相差不大，因此没有将此部分数据纳入到后续的结果分析中，这和上述两项研究一致。

“运动表象质量”是本研究重点关注的变量之一，代表的是被试对本研究特定表象任务的完成情况。参考已有研究的做法(Collet et al., 2011; Guillot et al., 2012; Malouin et al., 2008)，本研究采用运动表象和运动实际执行的时间一致性来反映和评价运动表象质量。具体的计算方法为表象太极拳动作的时间与实际完成太极拳动作的时间差值的绝对值(沈诚 等, 2016)。这一指标在一定程度上可以反映和太极拳技能水平有关的运动表象水平，因此在后续的统计过程中重点分析此指标。

意见 3: 运动表象任务中 2s 的时间是否足够？一个 12s 的动作表象完成后，BOLD 信号在 2s 内可能还不能完全消失，可能影响到下一个 trial 的活动。

回应: 感谢审稿专家提出的宝贵意见。我们想就这一问题和审稿专家做一些交流和解释。首先，本研究中表象任务设置的 12s 的表象时间足够被试表象完成规定的太极拳动作，这可以从实验组三次采集的平均表象时间得到反映：第一次 (7965.81ms)，第二次 (7760.43ms)，第三次 (7285.37ms)，因此可以认为 12s 的表象时间中其实还预留了至少平均 4s 的非表象（闭眼休息）时间，这加上之后的 2s 时间，至少平均有 6s 时间可供 BOLD 信号恢复，所以我们认为这一设置应该基本上不会影响到下一个 trial 的神经活动。其次，本研究中 2s 的“嘟嘟”声仅作为提示睁眼的线索，真正的休息时间设置在了两个 block 之间（8 个 block 之间有 7 段休息时间，每段时长为 10s），因此可以认为本研究采用了 block 的分析思路（block 阶段的脑激活减去休息阶段的脑激活），当然为了避免无关刺激的影响，最大程度地得到纯净的表象动作的脑激活，我们在 GLM 模型中将 2s 的“嘟嘟提示音”和 3s 的“示范动作的图片和文字”都分别设置成了无关条件。

意见 4: fMRI 数据统计分析部分建议采用方差分析中的重复测量分析，目前的分析结果并未包含对照组的组间差异。该研究中的单样本 *t* 检验方法均不适用于包含对照组的实验设计，建议重新进行结果部分的分析。

回应: 感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议。由于行为学的 2（组别：实验组、对照组）*2（时间：2 周、14 周）两因素重复测量方差分析的结果发现，在没有经过系统的太极拳学习的情况下，对照组被试的太极拳技能水平和运动表象质量没有发生显著变化，因此我们把后

续分析的重点放在了实验组三次采集的脑功能数据上，我们除做了每次采集时点的单样本 t 检验，还重点进行了单因素重复测量方差分析以及基于差异脑区的 ROI 事后分析。此外，为了排除表象任务熟悉性对脑激活的潜在影响，针对对照组两次采集的脑功能数据，我们分别进行了全脑和基于 ROI 的配对样本 t 检验。考虑到实验组和对照组采集次数不同，并且实验组也没有采集严格意义上的基线数据，因此我们认为，相比于组别和时间的两因素重复测量方差分析，上述的分析方法更为合适和全面。

意见 5: 1. 表 1 动觉表象得分的单位是什么？基于动觉表象在该研究中的重要性，有必要提供基于原始数据差值的统计图；2. 该图反映的是基线水平的动觉表象质量？3. 动觉表象虽然没有差异，但是也建议作者将动觉表象相关得分作为协变量放入统计分析，否则很难说明该研究中表象的作用。如果表象没有提升，那么大脑里面反映出来的到底是什么心理过程？这似乎是一个悖论。

回应: 感谢审稿专家宝贵的意见和建议。非常抱歉我们在初稿中没有区分清楚“运动表象得分”和“运动表象质量”这两个不同的概念，从而影响了对研究内容本身的理解。1. “动觉表象得分”是被试在运动表象问卷 (MIQ-3) 1-4 题上的平均分，是用于筛选被试的标准之一，由于采用的是 1-7 级的 Likert 评分，因此是没有单位的。2. “动觉表象得分”是对被试基本表象能力的评估，仅作为实验正式开始之前筛选被试的标准，而“动觉表象质量”是由运动表象与运动执行的“时间一致性”指标来评价，是本研究任务反映出来的结果；3. 由于本研究仅将“动觉表象得分”作为筛选被试的标准之一，因此在后续的统计分析中没有对这部分数据作进一步处理。您提到的“如果表象没有提升，那么大脑里面反映出来的到底是什么心理过程？”，我们将在回应 9 中详细阐述。

意见 6: 表 2 中运动表象质量与表 1 的动觉表象分数有何差异？在文中，哪个指标能代表太极拳习得的动觉表象水平？这两个概念在文中交代得不够清楚，影响了对研究本身的理解。

回应: 感谢审稿专家细致的提醒。非常抱歉我们在初稿中确实没能很清楚地区分出这两个重要的概念，我们已经在回应 2 和回应 5 中针对这两个不同的概念进行了一些阐释，并在修改稿中补充和完善了相应的内容。

意见 7: 图 3B 的纵坐标单位是什么？

回应: 感谢审稿专家的提醒。为了避免引起阅读上的误解，我们已经把该图的纵坐标修改为

了“时间一致性”并添加上了单位“ms”。

意见 8: 实验组 fMRI 结果建议呈现差异图。

回应: 感谢审稿专家的建议。基于方差分析得到的差异脑区图在后面的 ROI 事后检验中已有呈现（见正文图 6 左列）。

意见 9: 实验组 ROI、表象质量和技能水平的关系部分“ROI 平均信号值和运动表象质量的相关没有达到 0.05 的显著性水平，但两者存在着负向关联的趋势。”这是研究中最为核心的部分，如果运动表象没有提升，大脑功能的变化到底如何解释？

回应: 感谢审稿专家宝贵的意见。我们针对实验组三次采集的时间一致性（运动表象质量）所做的单因素重复测量方差分析并没有得到理想中的显著差异结果，但是无论是从折线图的走势（图 3B），还是具体的数值（第一次：2045.81ms；第二次：1807.47ms；第三次：1641.70ms）来看，随着太极拳学习时间的延长，时间一致性的数值确实是在逐渐减少，这在一定程度上可以反映出运动表象质量在逐渐变好，我们推测出现这一情况可能的原因是本研究样本量偏小，导致统计结果没能达到显著性水平。此外，我们在修改稿中补充了不同采集时点左侧颞上回和左侧楔前叶平均信号值的差值、时间一致性（运动表象质量）的差值和太极拳技能水平的差值的皮尔逊相关分析（见正文“3.4 实验组 ROI、时间一致性和技能水平的关系”部分和正文图 8），结果发现从学习 8 周到 14 周（即从第二次采集到第三次采集）左侧楔前叶平均信号值的变化和时间一致性（运动表象质量）的变化呈显著负相关（ $r=-0.52$, $p=0.022$ ），表明随着学习时间的延长，大脑功能会随着运动表象质量的变化而发生改变。

意见 10: 作者应认识到，对照组只有 10 个人，这是一个不够充足的样本量，基于目前样本所得结论，应持谨慎态度。

回应: 感谢审稿专家提出的宝贵意见，这确实是本研究的不足之处，我们在修改稿的研究不足中补充了这部分内容。由于本研究主要的研究发现是基于 19 名实验组被试 3 次采集的数据分析得到的，对照组被试虽然只有 10 人，但其作用仅为排除表象任务熟悉性潜在的干扰，对本研究主要的结果和结论没有影响。

意见 11: 建议大脑激活水平与表象质量分数建立关联，否则很难立住，表象水平没提高，但是脑子活动发生显著变化？

回应：感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议。按照您的建议，我们在修改稿中补充了 ROI 平均信号值的差值和时间一致性（运动表象质量）差值的相关分析（回应 9 中有更为详细的介绍），结果发现从学习 8 周到 14 周（即从第二次采集到第三次采集）左侧楔前叶信号值的变化和时间一致性（运动表象质量）的变化存在显著负相关（ $r=-0.52$, $p=0.022$ ），这一结果在一定程度上可以建立起大脑激活水平与运动表象质量的关联，即随着太极拳技能水平的提高，运动表象质量变好，相关脑区激活得到增强。

【参考文献】

- 白学军, 张琪涵, 章鹏, 周菘, 刘颖, 宋星, 彭国慧. (2016). 基于 fNIRS 的运动执行与运动想象脑激活模式比较. *心理学报*, 48(5), 495-508.
- 沈诚, 吴殷, 张兰兰, 朱桦, 戴雯, 李雪佩, ... 谭晓纓. (2016). 不同本体感觉输入对复杂运动动作表象的影响:fMRI 研究. *天津体育学院学报*, 31(3), 227-232.
- 张兰兰, 沈诚, 朱桦, 李雪佩, 戴雯, 吴殷, 张剑. (2017). 运动技能水平与躯体感觉输入对运动表象的影响. *心理学报*, 49(03), 307-316.
- Collet, C., Guillot, A., Lebon, F., MacIntyre, T., & Moran, A. (2011). Measuring motor imagery using psychometric, behavioral, and psychophysiological tools. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 39(2), 85-92.
- Guillot, A., Hoyek, N., Louis, M., & Collet, C. (2012). Understanding the timing of motor imagery: Recent findings and future directions. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 5(1), 3-22.
- Malouin, F. P., Richards, C. L. P., Durand, A. P., & Doyon, J. P. (2008). Reliability of mental chronometry for assessing motor imagery ability after stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 89(2), 311-319.

第二轮

审稿人 1 意见：

意见 1：这个研究是多时点纵向追踪设计，实验组有 19 名被试，对照组却仅有 10 名被试，两个组样本量差异相对比较大，虽然提到了对照组的存在是为了排除表象任务熟悉性的影响，但还需要补充解释样本量不一致是处于何种实验设计考虑。

回应：感谢审稿专家提出的宝贵意见。本研究中实验组和对照组的样本量的确存在着差异，这里我们想做一些补充和解释。首先，对照组的设置是想尽量排除追踪研究中任务熟悉性对研究结果可能的干扰，两组样本量的差异并不会影响到本研究主要基于实验组得到的研究结果和结论。其次，出于经济性的目的，同时又考虑到对照组并不是本研究主要的研究对象，

因此在确定对照组被试的过程中，经过招募和筛选，最终纳入了 10 名和实验组在性别、年龄和受教育年限匹配的对照组被试。对照组样本量不够充分确实是本研究的不足之处，我们在修改稿的研究不足中已经补充了这部分内容。

意见 2：引言第二段“近年来的脑成像研究发现，大脑具有可塑性，运动技能学习可以塑造大脑的静息态功能和任务态功能(Yang, 2015; 娄虎, 刘萍, 2020; 任占兵等, 2019)。”这句话是否不通顺？是否应为“学习塑造功能变化”而非“学习塑造功能”。

回应：感谢审稿专家的细致审阅和指正。非常抱歉，这个地方的表述虽然经过了多次修改，但还是存在着语句不通顺的问题。按照您的建议，同时参考了有关文献的表述，我们已将此处修改为了“运动技能学习可以塑造大脑静息态和任务态功能的变化”。

意见 3：建议在引言部分对大脑可塑性进行一些介绍，补充一些运动与大脑可塑性有关的文献内容，更加便于读者对后续结果的理解。

回应：感谢审稿专家提出的宝贵建议。按照您的建议，我们在引言部分第二段开头补充了大脑可塑性的介绍：“大脑具有可塑性，大脑的可塑性是指人脑具有的根据行为、学习等内外环境的变化而改变其结构和功能的能力，是个体心理和行为适应性变化的物质基础”。此外，我们补充了运动与脑可塑性领域的经典研究文献，我们在引言部分第二段中间补充了以下内容：“例如，跳水运动员在表象跳水动作时海马旁回的激活更高(Wei & Luo, 2009); 羽毛球运动员左侧顶下小叶的静息态自发神经活动更低(Di et al., 2012); 乒乓球运动员在完成 go/no-go 视觉空间任务时，额中回、眶额区会表现出更低的激活(Guo et al., 2017)，但左侧小脑和左侧颞中回的自发神经活动更高(张牧 等, 2020)。Wu 等人(2018)认为脑区激活的降低可能与神经加工效率的提高有关，而脑区激活的增强可能与专业化程度更高的神经加工能力有关，两者都伴随着相同或更优的行为表现”。

意见 4：实验组和对照组在实验期间是否有记录训练日记，以观察每名被试每天是否按照实验要求没有进行其他形式的运动项目学习和运动。

回应：感谢审稿专家的细致审阅和提醒。实验组被试在 14 周系统的太极拳技能学习过程中是严格按照训练计划实施的，已整理出相应的太极拳训练计划如下(另见正文附件)，并对正文有关内容进行了修改。

(1)训练内容：每次 90 分钟、每周 5 次，其中包括 3 次教学指导课和 2 次自主练习课，

持续时间为 14 周，老师全程指导和监督。每次包括 10 分钟热身运动, 60 分钟太极拳技能训练, 10 分钟呼吸训练以及 10 分钟放松训练。训练内容以 24 式杨氏太极拳为主, 也学习 8 式、16 式太极拳。

(2)训练时间和频率:

第一个阶段为期 2 周。热身运动 10 分钟, 以拉伸练习和太极站桩为主; 技能训练 60 分钟, 主要包括太极拳基本的手法、步法练习以及 8 式太极拳的讲解和练习; 结束部分 20 分钟, 包括 10 分钟的呼吸练习和 10 分钟的放松练习。

第二个阶段为期 6 周。热身运动 10 分钟, 以 8 式太极拳练习为主; 技能训练 60 分钟, 主要包括 16 式和 24 式太极拳的讲解和练习; 结束部分 20 分钟, 包括 10 分钟的呼吸练习和 10 分钟的放松练习。

第三个阶段为期 6 周。热身运动 10 分钟, 以 24 式太极拳练习为主; 技能训练 60 分钟, 主要包括 24 式太极拳完整和连贯的练习, 强化动作规范, 提高动作质量; 结束部分 20 分钟, 包括 10 分钟的呼吸练习和 10 分钟的放松练习。

在被试招募和知情同意过程中对于实验期间运动的要求进行了明确的告知。在实验开始前, 与实验组和对照组被试签订了协议, 明确要求实验组被试在实验期间不能进行其他运动技能的学习和有规律的锻炼(每周 3 次、每次 30 分钟以上、持续至少 3 个月)(Tao et al., 2016), 对照组被试保持正常的学习和生活, 也不能进行任何运动技能的学习和有规律的锻炼。由于在 14 周实验期间, 实验组被试太极拳技能学习的内容多、时间长、频率高、考核要求严, 被试需要全身心投入到太极拳技能的学习中, 这也在一定程度上保证了被试很难再有时间和精力规律地进行其他运动技能的学习和有规律的锻炼。对照组被试在招募过程中已明确了其为少动人群。综合考虑上述因素, 在实验期间没有要求两组被试记录太极拳技能学习以外的训练日记。

意见 5: “结果”中的“描述性统计结果”主要是被试的人口统计学信息, 是否考虑将这个表格放到“方法”中的“被试”部分。纳入实验组和对照组被试平常的身体活动信息也是必要的。

回应: 感谢审稿专家提出的宝贵意见。已经将“表 1 实验组和对照组人口统计学特征”调整到了“研究方法”中的“被试”部分, 同时增加了对被试身高、体重的描述统计和差异检验。由于本研究没有记录两组被试进行其他形式运动的情况, 因此人口统计学信息中没有呈现被试日常身体活动信息。

意见 6: 需要对统计分析进行更为细致的描述。数据是否符合正态分布? 用于计算效应大小的方法的名称是什么?

回应: 感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议。非常抱歉我们在数据统计分析部分介绍的不够详细, 影响了读者对研究方法的理解。

针对您提出的数据正态分布的问题, 我们想在这里和您做一些方法上的交流。(1)针对本研究重点考察的四个变量(太极拳技能水平、时间一致性、左侧颞上回的平均信号值以及左侧楔前叶的平均信号值)进行了 S-W(Shapiro-Wilk)正态性检验, 虽然结果显示有小部分变量 $p < 0.05$ (见下表 1), 但是从图形来看四个变量的数据还是呈现大致的中间多、两边少的分布形态, 并且它们的总体理论上都符合正态分布, 因此可以认为上述四个变量均基本符合正态分布, 能够使用 t 检验、方差分析等参数检验方法。(2)考虑到上述变量均涉及到多次测量的组内数据, 参考配对样本 t 检验正态性检验的做法, 针对这四个变量在不同采集时点的差值进行了 S-W 正态性检验, 结果显示所有变量 $p > 0.05$ (见下表 2), 表明差值符合正态分布。(3)《心理学报》等高水平期刊近几年发表的涉及主观评分、时间一致性等变量的文章(彭婉晴 等, 2019; 张兰兰 等, 2017), 也都采用了重复测量方差分析、皮尔逊相关检验等参数检验方法。综上, 本研究的数据分析主要采用了重复测量方差分析等参数检验方法。

本研究主要报告了两种效应量, 分别是基于 t 检验的 Cohen's d 和基于 F 检验的 η_p^2 , 均已在数据统计分析部分做了补充说明, 同时对数据分析部分的其他内容也进行了检查和修改。

表 1 原始值的 S-W 正态性检验结果

变量	统计量	自由度	显著性
技能水平 1	0.67	19	0.000
技能水平 2	0.76	19	0.000
技能水平 3	0.91	19	0.076
时间一致性 1	0.89	19	0.026
时间一致性 2	0.90	19	0.038
时间一致性 3	0.91	19	0.064
左侧楔前叶 1	0.96	19	0.588
左侧楔前叶 2	0.98	19	0.981
左侧楔前叶 3	0.93	19	0.155
左侧颞上回 1	0.93	19	0.144
左侧颞上回 2	0.90	19	0.044
左侧颞上回 3	0.93	19	0.180

表 2 差值的 S-W 正态性检验结果

变量	统计量	自由度	显著性
技能水平(2-1)	0.91	19	0.064
技能水平(3-2)	0.96	19	0.480
技能水平(3-1)	0.92	19	0.110
时间一致性(2-1)	0.96	19	0.648
时间一致性(3-2)	0.91	19	0.083
时间一致性(3-1)	0.96	19	0.480
左侧楔前叶(2-1)	0.98	19	0.919
左侧楔前叶(3-2)	0.96	19	0.484
左侧楔前叶(3-1)	0.92	19	0.100
左侧颞上回(2-1)	0.95	19	0.460
左侧颞上回(3-2)	0.93	19	0.150
左侧颞上回(3-1)	0.97	19	0.697

注：“2-1”表示“第二次减去第一次”，“3-2”表示“第三次减去第二次”，“3-1”表示“第三次减去第一次”。

意见 7: 多个结果想要论证组与组之间或时间点之间差异不显著，如以太极拳练习第二周为基线，想要说明对照组和实验组在最初的太极拳技能掌握上是没有显著差异的，在传统的假设检验(NHST)框架下，假设检验不能为 H_0 是否为真提供证据，建议补充贝叶斯系数可以更充分地支持虚无假设。

回应: 感谢审稿专家提出宝贵的意见。首先想和您做一些思路上的交流，由于本研究中实验组并没有采集到严格意义上的基线(第一次采集是在太极拳技能学习 2 周后)，因此虽然是同一时间采集的两组数据，但是实验组和对照组在第一次采集时候的技能水平就已经存在了显著的差异(见正文附件表 2 和表 3)。根据您的建议，我们在传统的零假设检验(NHST)的基础上增加了贝叶斯因子 BF_{10} 作为统计分析结果的补充，具体见正文研究结果部分。

意见 8: 图 3 和图 6 需要补充图例，三角形，圆形和正方形分别都代表什么。

回应: 感谢审稿专家的细致审阅和提醒。非常抱歉，此处是我们作图的时候不够细致，导致出现了纰漏。我们原本是想使用不同的图例表示不同的采集时点，经过您的提醒，同时我们参考了高质量期刊重复测量数据折线图(Kraus et al., 2019)的展示，发现折线图中不同的图例通常是用来表示不同的组别。由于本研究中只展示了实验组的数据，因此我们将代表数据平均值的点的形状统一调整为了圆形(见修改稿正文图 3、图 5 以及附件图 1)。

意见 9: 在进入 fMRI 扫描仪进行完表象任务后，是否有简单问卷询问被试在多大程度上进

行了太极拳动作的表象，做一个操控检查？

回应：感谢审稿专家细致的指导和提醒！当被试完成实验，从磁共振扫描仪出来后，我们确实进行了口头询问，询问的问题包括是否会使用动觉表象任务，以及使用动觉表象的难易程度，绝大多数被试报告了能够按照实验的要求使用动觉表象完成任务，动觉表象的过程没有觉得难。但是比较遗憾的是当时并没有把这部分信息记录下来。

意见 10：图 3 和图 6 中的误差线标注的标准误差建议补充缩写(SD/SE)更便于读者理解。

回应：感谢审稿专家的细致审阅和提醒。已按照您的要求，并参考已有研究(Kraus et al., 2019)的重复测量折线图作了补充(见修改稿正文图 3、图 5 以及附件图 1)。

意见 11：三次扫描是在一天中相同时间点进行的吗？如果是请在方法部分补充说明，如果不是，扫描时间点差异过大是否会引入昼夜节律的影响？

回应：感谢审稿专家提出的宝贵意见。由于采集数据的磁共振扫描仪的机时实行预约制度，本研究统一预约的白天时间(上午 9 点-下午 6 点)进行实验。同时三次采集也是尽量安排同一名被试在相同或相近的时点采集，尽可能排除生物节律可能的影响。已按照您的建议，在“研究方法-实验流程”部分补充了以下内容“此外，为了尽可能排除生物节律的影响，安排同一名被试三次采集尽量在相同或相近的时间段”。

【参考文献】

- 彭婉晴, 罗玮, 周仁来. (2019). 工作记忆刷新训练改善抑郁倾向大学生情绪调节能力的 HRV 证据. *心理学报*, 51(06), 648-661.
- 张牧, 黄月, 高晴, 陈华富. (2020). 基于动态低频振荡振幅方法的乒乓球运动员脑可塑性变化. *上海体育学院学报*, 44(06), 62-69.
- Di, X., Zhu, S., Jin, H., Wang, P., ye, Z., Zhou, k., . . . Rao, H. (2012). Altered resting brain function and structure in professional badminton players. *Brain Connectivity*, 2(4), 225-233.
- Guo, Z., Li, A., & Yu, L. (2017). “Neural efficiency” of athletes’ brain during visuo-spatial task: An fMRI study on table tennis players. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 11(11), 72.
- Kraus, W. E., Bhapkar, M., Huffman, K. M., Pieper, C. F., Krupa Das, S., Redman, L. M., . . . Investigators, C. (2019). 2 years of calorie restriction and cardiometabolic risk (CALERIE): Exploratory outcomes of a multicentre, phase 2, randomised controlled trial. *The lancet. Diabetes & endocrinology*, 7(9), 673-683.

Tao, J., Liu, J., Egorova, N., Chen, X., Sun, S., Xue, X., . . . Kong, J. (2016). Increased hippocampus–medial prefrontal cortex resting-state functional connectivity and memory function after Tai Chi Chuan practice in elder adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 8(8), 25.

Wei, G., & Luo, J. (2009). Sport expert's motor imagery: Functional imaging of professional motor skills and simple motor skills. *Brain Research*, 1341(1341), 52–62.

Wu, M. T., Tang, P. F., Goh, J. O. S., Chou, T. L., Chang, Y. K., Hsu, Y. C., . . . Lan, C. (2018). Task-switching performance improvements after Tai Chi Chuan training are associated with greater prefrontal activation in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 10(10), 280.

.....

审稿人 2 意见：

文章质量在前一稿基础上有了很大提升，但仍需要厘清以下几个问题：

意见 1：左侧颞上回的信号强度为何在第 8 周有显著下降，需要在讨论中分析可能存在的原因。

回应：感谢审稿专家提出的宝贵意见。在提取了左侧颞上回的平均信号值所做的单因素重复测量方差分析和事后多重比较显示，从 2 周到 8 周，左侧颞上回的信号虽然暂时出现了下降，但是差异并没有达到显著性水平($p > 0.05$)(见正文图 6A)，我们推测这可能是脑区神经信号的正常波动，将可能的原因补充到了讨论部分第三段结尾处：“值得注意的是，本研究发现，从 2 周到 8 周，左侧颞上回的平均信号值虽然出现了暂时的下降，但是差异并不显著，推测可能是学习早期，被试可以利用的已有运动经验较少，需要不断重复练习单个基本动作，导致技能的学习出现了一些反复，表现为这一阶段技能水平变化不大，因此，相应的运动表象任务诱发的左侧颞上回的激活也变化不大”。

意见 2：时间一致性(表象质量)在所有结果中看上去都和显著脑区的信号活动没有显著关，说明太极拳学习后的动作表象能力不仅没有显著变化，而且最后激活的脑区也不能解释是表象任务提升引起的，并未验证作者的研究假设，这一点是文章中非常重要的核心假设，请作者在讨论中花篇幅说明原因。

回应：感谢审稿专家宝贵的建议。我们在修改稿中补充了不同采集时点左侧颞上回和左侧楔前叶平均信号值的差值和时间一致性(运动表象质量)的差值的皮尔逊相关分析结果(见正文

图 8B), 从学习 8 周到 14 周(即从第二次采集到第三次采集), 被试左侧楔前叶平均信号值的变化和时间一致性(运动表象质量)的变化呈显著的中等程度的负相关($r = -0.52, p = 0.022$), 表明随着学习时间的延长, 左侧楔前叶的功能变化会随着运动表象质量的变化而发生改变, 这一结果在一定程度上可以验证本研究的假设。当然比较遗憾的是, 我们并没有发现时间一致性(运动表象质量)在不同采集时点的显著性差异, 但是无论是从折线图的走势(正文图 3B), 还是从具体的数值(第一次: 2045.81 ms; 第二次: 1807.47 ms; 第三次, 我们推测出现这一结果可能的原因包括: (1)本研究样本量偏小, 导致统计结果没能达到显著性水平; (2)磁共振扫描仪具有特殊性, 被试在完成运动表象任务的时候处于仰卧位, 这与被试实际完成太极拳动作的站立位存在着较大的差异, 体位的不同可能影响了时间一致性指标的精确性。按照您的建议, 我们已经在讨论部分第一段结尾补充了以下内容: “值得注意的是, 我们并没有发现时间一致性(运动表象质量)在不同采集时点的显著性差异, 推测可能是本研究的样本量并不十分充足, 导致差异没能达到显著性水平; 此外, 由于磁共振扫描仪的特殊性, 被试在完成运动表象任务的时候处于仰卧位, 这与被试实际完成太极拳动作的站立位存在着较大的差异, 体位的不同可能会对时间一致性指标的精确性造成一定的影响”。

意见 3: 图 7b 应写清楚具体 p 值, 和其它图应具有一致性的 p 值表达。

回应: 感谢审稿专家细致的审阅和提醒。我们参考了《心理学报》最新发表的几篇文章(高可翔 等, 2023; 胡义秋 等, 2023), 以及《心理学论文写作规范(第二版)》(中国心理学会, 2016; 见 p87 和 p90)的相关内容后, 发现现在关于 p 值比较通用的写法为极小的 p 值应写成 $p < 0.001$, 而大于 0.001 的 p 值一般应该报告精确值并保留 3 位小数, 因此该图(现为修改稿正文图 6b) p 值的写法应该是符合这一要求的。

意见 4: 结论部分的表述需要在结果部分有所提升, 将研究发现的科学意义和价值表达清楚, 另外, 对相关研究或者同领域启示作用也需要增加一些思考在里面。

回应: 感谢审稿专家提出的宝贵意见和建议。按照您的建议, 我们将结论部分调整和修改为了“太极拳技能学习早期, 大脑左侧颞上回和左侧楔前叶的功能会发生积极变化, 表现为由运动表象任务诱发的神经激活显著增强, 脑区的功能变化与技能水平的提高显著相关, 呈现出先慢后快的变化特征。研究结果提示随着太极拳技能水平的提高, 相关脑区神经加工能力显著增强, 表明早期的太极拳等复杂运动技能的学习会对大脑功能产生积极影响。本研究的结果能够为太极拳等复杂运动健脑提供更加坚实的实证支撑, 从而帮助人们更好地理解运动

与脑可塑性的关系”。

【参考文献】

高可翔, 张岳瑶, 李思瑾, 袁加锦, 李红, 张丹丹. (2023). 腹内侧前额叶在内隐认知重评中的因果作用. *心理学报*, 55(02), 210–223.

胡义秋, 曾子豪, 彭丽仪, 王宏才, 刘双金, 杨琴, 方晓义. (2023). 亲子关系和父母教育卷入对青少年抑郁、自伤和自杀意念的影响: 挫败感和人生意义感的作用. *心理学报*, 55(01), 129–141.

中国心理学会. (编). (2016). *心理学论文写作规范(第二版)*. 北京: 科学出版社.

第三轮

编委意见:

作者认真参考了评阅人两次评审的意见与建议, 对论文进行了认真详细的修改, 论文质量有了明显提高。该文仍存有以下问题需要解决。

意见 1: 摘要中作者提到“左侧颞上回和左侧楔前叶的激活与运动表象质量以及太极拳技能水平具有相关性”, 建议说明是低度、中度还是高度相关, 效果量很重要。

回应: 感谢编委专家提出的宝贵建议。我们根据研究结果得到的相关系数的实际大小, 将此处修改为了:“左侧颞上回和左侧楔前叶的激活与运动表象质量以及太极拳技能水平具有中等程度的相关”, 并对全文涉及到类似表述的地方也做了修改。

意见 2: 研究方法中作者提到,“本研究要求实验组和对照组被试在实验期间都不进行太极拳动作的表象训练”, 那么, 有无实验结束后的操控检查吗?

回应: 感谢编委专家的细致审阅和提醒。首先, 每次实验组被试训练课程结束后, 实验主试都会询问被试关于本次课程的感受和心得体会, 并明确要求课余时间不能进行其他运动技能的学习和有规律的锻炼, 也不能进行太极拳动作的表象训练。其次, 在每次采集数据之前, 也会口头询问两组被试是否进行了其他运动技能的学习和太极拳动作的表象训, 都得到了否定的回答。在论文方法部分补充了以下内容:“要求两组被试在实验期间也不进行太极拳动作的表象训练, 并在每次数据采集前口头询问被试是否遵循了上述要求”。

意见 3: 研究方法中作者提到,“得到了华东师范大学人体受试者保护委员会的批准”,建议隐去大学的具体名称。

回应: 感谢编委专家的细致审阅和指正,已按要求进行了修改。

意见 4: 研究结果中的表 2: 请标注实验组和对照组的样本量。

回应: 感谢编委专家的细致审阅和指正,已按要求进行了修改,同时对附件表 2、表 3 和表 4 也注明了样本量。

意见 5: 作者在“4 讨论分析”中提到,“值得注意的是,我们并没有发现时间一致性(运动表象质量)在不同采集时点的显著性差异,推测可能是本研究的样本量并不十分充足,导致差异没能达到显著性水平”,但是,附件的表 2 提示,表象时间的时点主效应效果量仅为依他方 $0.01(p = 0.709)$,是极小的效果量,因此,通过提高样本量达到显著性水平存疑?

回应: 感谢编委专家细致的审阅和提出的宝贵意见。附件表 2 中关于时间一致性(运动表象质量)的方差分析结果是基于正式数据分析之前的一项探索性分析得到的(纳入了实验组第一次和第三次采集的数据,以及对照组前、后测的数据),并不是本研究主要的研究结果。在正式的数据分析中,针对 19 名实验组被试的时间一致性(运动表象质量)进行的单因素重复测量方差分析显示,虽然时间主效应不显著, $F(2, 36) = 2.19, p = 0.127$,但是效应量 η_p^2 达到了 0.11,按照 Cohen(1992)提出的标准, $0.11 > 0.06$,可以认为时间一致性(运动表象质量)的时间主效应达到了中等效应。并且事后多重比较发现,如果采用 LSD 校正方法,第三次采集(14 周)的时间一致性(运动表象质量)相比于第一次采集(2 周) $(t(18) = -2.48, p = 0.023, Cohen's d = -0.48)$ 存在着显著的差异(经 Bonferroni 校正后 $p = 0.069$),同样按照 Cohen(1992)提出的标准,差异效应量 Cohen's d 也接近于中等效应。综上,我们认为通过提高样本量来达到显著性水平具有一定的可预期性。

意见 6: 对于初学者来说,其实,视觉表象和动觉表象都很重要,只是到了高水平运动员,视觉表象的重要性才高于视觉表象。作者只测量了动觉表象,是有明显局限的。

回应: 感谢编委专家提出的宝贵意见,这里我们想和编委专家做一点思路上的交流。运动表象包括了视觉表象和动觉表象两种。视觉表象主要是指以外部的、第三人称视角对动作进行心理模拟,从而形成肢体动作的视觉表征过程(Milton et al., 2008);而动觉表象主要是指使用内部的、第一人称视角对动作进行心理模拟,侧重于体会动作执行的动觉感受过程(Solodkin et

al., 2004)。由于动觉表象依赖于已有的运动经验，更接近于动作的实际执行过程，和运动技能水平的联系更为紧密(Solodkin et al., 2004)，因此本研究采用了动觉表象。和已有研究一致(Batula et al., 2017; 白学军 等, 2016; 沈诚 等, 2016; 张兰兰 等, 2017)，本研究的运动表象任务要求被试采用动觉表象去想象指定的太极拳动作，因此只使用了运动表象问卷(MIQ-3)的动觉表象部分，筛选出动觉表象能力合格的被试参与正式实验,这和白学军等人(2016)的做法是相同的。

意见 7: 图 6 的 B 图纵坐标应为左侧楔前叶，而不是左侧颞上回。

回应: 感谢编委专家的细致审阅和指正，已按要求进行了修改。

【参考文献】

- 白学军, 张琪涵, 章鹏, 周崧, 刘颖, 宋星, 彭国慧. (2016). 基于 fNIRS 的运动执行与运动想象脑激活模式比较. *心理学报*, 48(5), 495–508.
- 沈诚, 吴殷, 张兰兰, 朱桦, 戴雯, 李雪佩, ... 谭晓纓. (2016). 不同本体感觉输入对复杂运动动作表象的影响: fMRI 研究. *天津体育学院学报*, 31(3), 227–232.
- 张兰兰, 沈诚, 朱桦, 李雪佩, 戴雯, 吴殷, 张剑. (2017). 运动技能水平与躯体感觉输入对运动表象的影响. *心理学报*, 49(03), 307–316.
- Batula, A. M., Mark, J. A., Kim, Y. E., & Ayaz, H. (2017). Comparison of brain activation during motor imagery and motor movement using fNIRS. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2017, 5491296.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, 112(1), 155–159.
- Milton, J., Small, S. L., & Solodkin, A. (2008). Imaging motor imagery: Methodological issues related to expertise. *Methods*, 45(4), 336–341.
- Solodkin, A., Hlustik, P., Chen, E. E., & Small, S. L. (2004). Fine modulation in network activation during motor execution and motor imagery. *Cerebral Cortex*, 14(11), 1246–1255.

第四轮

主编意见: 作者已根据编委和审稿人的意见进行了细致的修改，审稿过程中提出了非常详细的意见，作者也尽努力提供了修改，我通读了全文，我总体上同意编委和审稿人的结论，但

认为在发表之前，作者在摘要、前言和方法的用语部分仍需要进行一些修改。

意见 1: 摘要部分句子表述不够精确，用词比较宽泛，需要进行准确的描述并进行重新修改。

例如：“研究表明，太极拳技能学习早期，相关脑区的功能会伴随着太极拳技能水平的提高而发生改变，太极拳技能学习有益于大脑功能的积极变化。”这里请作者直接精确的描述所发现的核心脑区，以及关注的具体大脑功能，以及积极变化具体指的是什么，同时作者需要在正文中指出这种积极变化的直接证据。

回应: 感谢主编专家提出的宝贵意见。按照您的建议，我们重点对摘要部分最后一句进行了进一步的完善和补充，将此处修改为了“研究表明，太极拳技能学习早期，左侧颞上回和左侧楔前叶会伴随着太极拳技能水平的提高而发生改变，太极拳技能学习有助于优化与序列动作学习有关的脑区功能”，并对正文的结论部分相关的内容也做了修改。此外，根据您的意见，我们在讨论部分第一段中间补充了“本研究结果为早期太极拳技能学习有助于大脑功能的积极变化提供了行为和脑激活层面的证据”，在讨论部分第三段倒数第二句直接注明了“这进一步说明了太极拳技能学习会对左侧颞上回和左侧楔前叶的功能产生显著的积极影响”，在讨论部分倒数第二段最后补充了“上述结果为早期太极拳技能学习有助于优化与序列动作学习有关的脑区功能提供了证据”。

意见 2: 作者问题提出的部分有些零散，基本在引言的每一部分均提出了一个探索性的小问题，目前仍然让人较难把握作者所关注问题的核心。建议对引言部分的最后一段对问题进行更好的总结概括，以呼应作者在讨论第一段中的研究目的“本研究采用多时点纵向追踪设计，从神经科学视角动态观测了复杂运动技能学习早期大脑功能发生的变化。”同时，考虑到作者的整个研究其实偏探索性，也许在最后部分不宜提出非常明确的假设，而是重点阐述他们感兴趣的研究问题，例如，在上述研究目的后面，可加入“我们着重考察是否存在一些特定的脑区，可以随技能水平的变化而发生变化，且两者具有相关性。根据文献，我们尤其关注……脑区的变化，如果这些脑区可以通过训练表现出……，说明……”

回应: 感谢主编专家提出的宝贵意见和建议。按照您的建议，我们在引言部分最后一段开头补充了以下总结性的内容：“综上所述，一方面，目前聚焦于大脑功能动态变化的研究较为缺乏，尚未发现针对太极拳等复杂运动技能学习过程大脑功能动态变化的研究；另一方面，已有研究呈现的大多是长期太极拳技能学习的效果，仍不清楚太极拳技能学习早期大脑功能的动态变化特点”。同时参考您的意见，我们将研究假设部分修改为了“我们着重考察是否

存在着一些特定脑区的激活，可以伴随着技能水平的提高而发生变化，且两者之间具有相关性”，正如您所言，考虑到整个研究是偏探索性的，我们在研究假设部分并没有明确指出是哪些特定的脑区。

意见 3：关于“要求实验组和对照组被试在实验期间都不进行太极拳动作的表象训练。”这一实验操纵的理由，在方法部分也应进行说明，而不应等到讨论部分才进行说明。

回应：感谢主编专家细致的审阅和提醒，我们已经在方法部分针对“不进行太极拳动作的表象训练”的原因进行了补充说明，同时为了避免重复，我们在讨论部分删除了这部分的内容。