

第二次修改

审稿人 1:

作者对上一轮审稿意见中的问题作出了细致的回答，现还存在以下建议供作者参考：

首先，文章中有些句子不通顺，请仔细阅读并修改。如，前言中，“相较于认知行为训练或单独的 tDCS 训练，tDCS 联合认知行为训练能够在较短的训练时间内提高个体的神经效率以目标行为绩效...”，其中的“以目标行为绩效”是指提高目标行为绩效吗？

答：感谢审稿专家的疑问，此处漏写了“以及”这个连词中的“及”，在修回稿中我们修正了这句话。另外，我们又请了两位心理学博士生仔细检查了文章的内容，重点检查了语病，语句不通，少字漏字等内容，本次修回稿已将上述问题进行了认真修改。

其次，在本研究中，三个实验组都进行了为期 5 天的训练，研究中的训练时间是如何确定的？由于训练的时间长短对于个体的情绪调节效果具有一定的影响，如 Long, Q., Yu, L., Tang, Y., et al. (2023). Improving adaptive response to negative stimuli through non-emotional working memory training. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 16, 1058866, 请作者就如何确定训练时间做出相关说明。

答：感谢审稿专家的提问。在认知增强训练领域，通常情况下行为训练需要较长的训练周期来达到训练效果，例如 Jaeggi 等人(2008)使用 8 天，12 天，17 天和 19 天的工作记忆刷新训练探究其对个体流体智力的迁移作用。在情绪调节的认知增强训练领域，基于以前的研究，Long 等人(2020)提出工作记忆行为训练周期至少为 7 天。在后续的研究中，Long 等人(2023)进一步发现，相较于 7 天的工作记忆行为训练，经过 14 天训练的被试情绪调节能力显著增强。然而已有研究发现，相较于行为训练，使用神经调试结合行为训练能够加快其工作记忆行为训练的速率，提高个体的神经效率，因此能够缩短训练周期。例如，Ruf 等人(2017)发现，相较于控制组的被试，3 天的联合训练能够显著提升其被试在空间工作记忆任务中的绩效。Jones 等人(2017)采用 4 天的联合训练也显著增加了被试在工作记忆任务中的任务绩效。Ke 等人(2019)在其研究中发现，与控制组相比，5 天的联合训练显著提高了被试在训练时的学习效率，并且训练效果迁移到了未经训

练的工作记忆任务中。基于上述发现，本研究认为联合训练的周期高于 3 天可能就产生了稳定的训练效果，因此本研究基于以前的研究发现将训练周期定为 5 天。在修回稿的研究方法部分，我们补充这部分内容。

参考文献

- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Perrig, W. J. (2008). Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *105*(19), 6829–6833.
- Jones, K. T., Peterson, D. J., Blacker, K. J., & Berryhill, M. E. (2017). Frontoparietal neurostimulation modulates working memory training benefits and oscillatory synchronization. *Brain Research*, *1667*, 28–40.
- Ke, Y., Wang, N., Du, J., Kong, L., Liu, S., Xu, M., An, X., & Ming, D. (2019). The effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on working memory training in healthy young adults. *Frontiers in Human Neuroscience*, *13*(February), 1–10.
- Long, Q., Hu, N., Li, H., Zhang, Y., Yuan, J., & Chen, A. (2020). Suggestion of cognitive enhancement improves emotion regulation. *Emotion*, *20*(5), 866–873.
- Long, Q., Yu, L., Tang, Y., Li, Q., Hu, N., Gu, Y., & Chen, A. (2023). Improving adaptive response to negative stimuli through non-emotional working memory training. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, *16*(January), 1–12.
- Ruf, S. P., Fallgatter, A. J., & Plewnia, C. (2017). Augmentation of working memory training by transcranial direct current stimulation (tDCS). *Scientific Reports*, *7*(1), 1–11.

审稿人 2:

感谢作者对审稿意见的认真回复，并做出相应修改。另有以下问题，请完善：

1. 请描述清楚生理指标 LogHF 是什么？其值越高代表焦虑水平越低？

答：感谢审稿专家的问题。LogHF 是将高频段的值取对数，这样做可以减少数据的偏态分布，使数据更符合正态分布，便于统计分析。研究显示，当个体的焦虑情绪较低时，交感神经系统的活动性相对减弱，这会导致心率变异性(HRV)中的高频成分（主要与副交感神经系统活动相关）相应增加(Thayer et al., 2012)，其结果是 LogHF 值的提升。我们在修回稿中添加了对 LogHF 的解释，及其与焦虑情绪的关系。

2. 文中多次出现“空间导航任务中的绩效”，并且空间导航任务结果报告了正确率和反应时两个指标。因此，给读者的印象是绩效包括反应时和正确率。但是，在中介路径检验中，因变量只考虑正确率变化量。若反应时变化量也作为因变量，中介检验结果是怎样的？

答：感谢审稿专家的问题。本文仅采用空间导航的正确率代表其任务绩效，确实存在不足。根据审稿专家的意见，在修回稿中我们添加了反应时指标作为因变量，但是检验结果发现当使用被试在前后测反应时的变化量作为因变量时，中介模型不成立。具体内容如下：此外，本文也将反应时的变化量作为因变量，探究空间工作记忆刷新训练能否通过降低个体的空间焦虑水平来进一步提高其反应速度。结果发现空间工作记忆刷新训练对空间导航任务反应速度的影响不显著 ($\beta = 0.141, p = 0.204$)；空间工作记忆刷新训练能够显著影响个体空间焦虑的变化量($\beta = -0.323, p = 0.003$)；检验空间焦虑的中介作用时发现空间焦虑的变化量无法显著预测个体在空间导航任务中反应时的变化量 ($\beta = -0.104, p = 0.374$)。因此将反应时的变化量作为因变量时，假设模型不成立。我们在修回稿中也添加了将反应时的变化量作为因变量这部分内容。

3. 文字错误：例如“研究表明左侧 DLPCF 对言语空间工作记忆的加工及其重要(Ke et al., 2023)”“三种训练方式都能够显著提高被试的反应时。”应该是降低？

答：感谢审稿专家指出的问题，我们已在修回稿中改正了以上两个错误。

第一次修改

审稿人 1:

该研究通过训练工作记忆来提升个体的空间导航能力,选题具有较大的应用价值。论文还需要进一步修改,以下修改意见供作者参考。

1、请仔细阅读全文,修改表述不清、有歧义的句子。如,摘要中“对实验组的被试分别进行 5 次空间工作记忆刷新训练, tDCS 训练, tDCS 与空间工作记忆刷新任务联合训练。”实验组是要进行几种训练?还是每种训练进行 5 次?

答:感谢审稿人的意见。我们阅读了全文,修改了表述不清楚且有歧义的句子。其中在摘要部分,我们把“对实验组的被试分别进行 5 次空间工作记忆刷新训练, tDCS 训练, tDCS 与空间工作记忆刷新任务联合训练。”这句话改成了“将被试分为行为训练组, tDCS 训练组, 联合训练组三个实验组, 并设置一个主动控制组。行为训练组接受空间工作记忆刷新训练, tDCS 组进行 tDCS 刺激训练, 联合训练组接受 tDCS 和空间工作记忆刷新训练, 每个实验组都训练 5 次”, 以提高文章的可读性。

2、前言部分论述不清晰, 焦虑情绪、工作记忆、空间导航能力之间的关系需要重新阐明。此外, 建议作者参考已发表论文的写作格式, 修改前言部分。阐明研究的创新之处。

答:感谢审稿专家的意见。在修回稿中, 我们首先重新梳理了工作记忆、空间焦虑和空间导航能力之间的关系。其次按照本期刊上已发表的论文, 修改了前言部分的写作格式, 删除了工作记忆、空间焦虑、空间导航能力和问题提出部分的小标题。另外, 我们也在问题提出部分明确提出了本研究的创新点。

3、论文中, 作者认为工作记忆训练提升的是情绪调节能力, 通过训练影响了个体焦虑情绪, 进而影响空间导航能力。但前言部分提到, 工作记忆能力是空间导航能力中的关键组成成分。工作记忆训练是否可以直接提升空间导航能力, 而不需要中介焦虑情绪? 特别是, 研究中焦虑情绪的指标用的是心率变异性, 而没有测量主观报告。生理指标和情绪并不是一一对应的。这种情况下, 如何能得出心率变异性测量的是焦虑情绪? 毕竟兴奋、激动也可能引起心率变异性的改变。

答:感谢审稿专家的建议。根据前人的研究, 在本研究中我们提出空间工作记忆刷新训练可能通过两种方式提高个体的空间导航能力。第一, 如文中所述,

空间工作记忆能力是空间导航能力的关键组成部分，因此理论上通过空间工作记忆训练能够提高个体的空间导航能力。第二，很多研究已经发现空间焦虑与个体的空间导航能力存在显著的负相关，个体空间焦虑水平越高，其在导航任务中的绩效越低；而研究发现工作记忆刷新训练能够提升个体的情绪调节能力，进而降低其焦虑水平。基于此，我们提出了部分中介的假设模型：空间工作记忆刷新训练不但能够直接提高个体的空间导航能力，并且能够通过降低空间焦虑水平进而提高其空间导航能力。本文使用结构方程模型验证该假设模型，结果与本文的假设模型一致。

本文的一个不足之处确实如审稿专家所言，没有测量个体空间焦虑的主观报告水平。但是心率变异性作为一个情绪反应的生理指标，已经被广泛地被用来代表个体的压力、紧张、焦虑等情绪。在本研究中，被试在执行空间导航任务时基本不受其他因素的干扰，很少出现兴奋或激动等其他情绪，因此被试在执行空间导航任务时心率变异性被当作空间焦虑情绪的客观体现方式。此外，在研究的不足之处部分我们将没有测量被试的主观报告水平作为本研究的不足，因此未来的研究需要结合被试的主观报告进一步探究训练的有效性。

4、作者采用了三种干预方法，有工作记忆训练、tDCS 训练、工作记忆+tDCS 训练，请阐明为何采用这样的方案？特别是，联合训练组中，被试先进行 tDCS，后进行工作记忆训练，这种方案起作用的机制是什么？与其他几组有何区别？

答：感谢审稿人的意见。在本文中我们采用了三种认知增强的训练方式，分别是空间工作记忆刷新训练，tDCS 训练和联合训练。目前，很多研究已经探究过以工作记忆训练为基础的认知增强训练的迁移效应。然而，很少有研究探究过不同的训练方法对其他认知能力的迁移效果。研究者指出，认知行为训练和 tDCS 训练都能显著提高个体的认知能力。然而不同训练方式的作用效果和作用时长也存在一定的差异，例如研究者发现认知行为训练的效果比较稳定，但是提升水平较小且训练周期较长；tDCS 训练能在短期内快速提高个体的认知功能，但是效果维持的时间较短。相较于认知行为训练或单独的 tDCS 训练，tDCS 联合认知行为训练能够在较短的训练时间内提高个体的神经效率以目标行为绩效，且训练效果维持时间较长。因此，本研究假设不同的训练方式都能对个体的空间导航能力有显著的迁移效应，然而相较于空间工作记忆刷新训练和 tDCS 训练，tDCS

联合空间工作记忆刷新训练提高个体空间导航能力程度更高。

5、此外，作者采用的控制组只进行前测和后测，中间不进行任何刺激和训练。这样的控制组设置与实验组不匹配，作者如何避免有关训练的期望效应的产生？

答：感谢审稿专家的意见。如审稿专家所言，对于控制组，前后测之间我们没有进行刺激和训练。这属于实验设计的不足，我们在修回稿的研究不足部分添加了该不足之处。

6、请在讨论部分结合相关的研究、理论解释当前的结果。

答：感谢审稿专家的建议。我们在修回稿中结合前人的研究结果及相关的理论对本文的发现进行了解释。

7、作者提到焦虑可能会影响空间导航能力，作者有测量被试自身的焦虑水平？如，特质性、状态性的焦虑水平。

答：感谢审稿专家的意见。本研究主要关注的变量是个体的空间焦虑，该焦虑是由执行空间任务而产生，因此没有考虑特质焦虑和状态焦虑对空间导航能力的影响。但有研究表明，在高焦虑状态下个体的很多认知能力都会受到显著影响。因此在修回稿中我们将这一问题作为本研究的另一个不足之处。

审稿人 2:

该研究通过 3 个实验组和 1 个空白对照组，探讨了认知增强训练对个体空间导航的提升作用以及空间焦虑在其中的中介作用，研究问题具有一定的创新性，有较好的理论和实践价值。实验设计严谨，撰写规范。以下几点修改意见供作者参考。

1. 题目，建议“~~~的提升作用：~~~”

答：感谢审稿专家的建议。在修改稿中我们将原来的题目改成：认知增强训

练对个体空间导航的提升作用：以空间焦虑为中介

2. 在前言中，一些概念和逻辑表述不清，或缺少重要内容，例如：

(1) 工作记忆刷新训练与认知增强训练之间的关系什么？根据审稿人经验，以及 1.5 的问题提出中“第一个研究重点在于推动工作记忆认知训练对于个体空间导航能力增强的理论发展”，工作记忆刷新训练属于认知增强训练中的认知行为训练。但是二者在引言中是并列关系进行叙述的，请理清逻辑脉络。

答：感谢审稿专家的建议。此处想要表达的意思是第一个研究重点是认知增强训练提升个体空间导航能力增强的理论发展。在修回稿中，我们将前言部分的相关的概念重新进行了梳理，以减少由于概念不清造成的混淆。

(2) “基于上述综述，当前研究拟探究的主要科学问题是如何通过认知训练调控个体在执行空间任务的情绪过程进而提高其空间能力”，认知训练主要指什么？是工作记忆刷新训练，还是 tDCS 调控，或者是两者都包括？

答：感谢审稿专家的意见。本研究主要关注的是能否通过认知增强训练调控个体的空间焦虑进而提高其空间导航能力，此处的“认知训练”应该改成以工作记忆为基础的认知增强训练，包括联合训练，行为训练和 tDCS 训练三种。在修回稿中我们将认知增强这一概念进行了梳理，提高文章的可读性。

(3) 虽然在 1.1 中指出“本研究使用 tDCS 作为神经调适训练的刺激工具”，但是在 1.5 问题提出中，并没有涉及到 tDCS，不清楚在实验设计中引入 tDCS 的目的和作用，请补充相应内容。

答：感谢审稿专家的意见。tDCS 作为一种神经调试工具，刺激个体的前额叶皮层主要是为了提高个体空间工作记忆刷新能力。在修回稿中，我们在问题提出部分添加了相关内容。

(4) 对文献引用不够完整，例如已有诸多文献表明 tDCS 联合工作记忆刷新训练能够促进神经效率以及目标行为，比如：Ke, Y., Liu, S., Chen, L. et al. Lasting enhancements in neural efficiency by multi-session transcranial direct current stimulation during working memory training. *npj Sci. Learn.* 8, 48 (2023)。对比以往文献并结合本研究的目的，请说明本文设计联合组以及单独 tDCS 组的目的、创新性和意义。

答：感谢审稿专家推荐的参考文献，该文献对本文具有重要的参考意义。除

此之外，我们又查阅了别的与本研究相关的参考文献。在修回稿中，我们在问题提出部分添加了联合训练组和单独 tDCS 组的目的，创新性及意义。

(5) 研究假设过于简略，需补充。

答：感谢审稿专家的建议。在修回稿中我们重新组织了问题提出部分，丰富了研究假设的提出，具体内容如下：

已经有研究发现以工作记忆为基础的认知增强训练能够显著提高个体的流体智力，注意，抑制控制以及数学计算能力等认知功能，然而目前还没有研究探究过以工作记忆训练为基础的认知增强训练对个体空间导航能力的迁移效应。因此，当前研究关注的问题是以空间工作记忆刷新为基础的认知增强训练能否调控个体在执行空间任务时的情绪过程进而提高其空间能力。本研究以空间导航能力为关注的重点，主要探究两个问题：第一，不同方式的认知增强训练能否提升个体的空间导航能力？目前，很多研究已经探究过以工作记忆训练为基础的认知增强训练的迁移效应。然而，很少有研究探究过以空间工作记忆刷新为基础的认知增强训练对空间导航能力的迁移效果。研究者认为，空间工作记忆是个体顺利进行空间导航的认知基础，且对空间工作记忆进行训练主要作用于个体的 DLPFC，而 DLPFC 也是空间导航能力的关键脑区，所以本研究认为对空间工作记忆进行训练有可能提高个体的空间导航能力。本文使用空间工作记忆刷新训练，tDCS 训练和 tDCS 联合空间工作记忆刷新训练三种不同的认知增强方式来探究对空间导航能力的迁移，研究假设为不同的训练方式都能对个体的空间导航能力有显著的迁移效应，然而相较于空间工作记忆刷新训练和 tDCS 训练，tDCS 联合空间工作记忆刷新训练对个体空间导航能力的提升程度更大。

第二，探究空间焦虑在认知增强训练提升个体空间导航能力过程中的中介作用。研究指出个体的情绪很难通过直接的情绪训练来改变(赵鑫 等, 2014)，但个体的工作记忆能力与情绪调节能力显著相关。例如，研究发现个体工作记忆刷新功能能够调节其焦虑症状(Beloe & Derakshan, 2020)。刷新能力强的个体能够快速转移负性情绪，减轻其对其他认知任务的干扰。基于此，本研究想探究能否通过对个体进行以空间工作记忆为基础的认知增强训练来提高其刷新功能，进而提升个体的情绪调节能力并改变其空间焦虑水平，最终达到提升个体空间导航能力的目标。因此，本研究想要验证如下的中介理论模型（图 1），研究假设为通过以

空间工作记忆为基础的认知增强训练能够显著降低个体的空间焦虑水平，并进而提高其空间导航能力。

3. 在方法中，需要清楚描述，比如

(1) 计算样本量时，使用什么统计方法？需要被试内因素，被试间因素，还是交互作用显著？显著性水平 α 是多少？效应量 0.4，是哪种效应量？

答：感谢审稿专家的意见。本研究计算样本量时采用了单因素 4 水平被试间方差分析，显著水平 $\alpha = 0.05$ ，效应值 $f = 0.4$ 。已在修回稿中修改了这部分内容。

(2) 在 tDCS 中，为何刺激右侧 DLPFC 而非左侧？请补充理由。

答：感谢审稿专家的意见。在我们前期查阅文献时发现，研究者认为左侧 DLPFC 与个体的言语工作记忆显著相关，而右侧 DLPFC 主要负责加工空间工作记忆。因此本研究选用右侧 DLPFC 作为刺激点位。已在修回稿中添加了这部分的说明。

(3) 实验流程图不够清楚，比如：联合训练组和行为训练组标明训练 7 天，但是实际上只有五次训练，建议改成次数。此外，tDCS 组训练次数需要标注。

答：感谢审稿专家的建议。我们在修回稿中修改了实验流程图，将联合训练组，行为训练组以及 tDCS 训练组的训练天数改成了训练次数，以上三组都改成了训练 5 次。

(4) 前测和后测包括空间工作记忆刷新任务，但是没有具体描述任务 block 数量，难度等。

答：感谢审稿专家的意见。我们在修回稿中仔细描述了前测和后测空间工作记忆刷新任务的等级确定。前测时我们先把任务难度设置为 3，当被试在某一难度等级上的正确率保持在 75%-87.5% 时确定为其初始等级。后测时根据最后一次训练等级开始测试，当其任务正确率保持在 75%-87.5% 时确定为其最后等级。由于被试的工作记忆能力高低不同，因此无法确定前测和后测时究竟完成了多少个 block。

4. 结果部分，所有的简单效应分析应在另一个方向上进行检验，即在每一个组内，前后测是否有显著差异？同时，所有的简单效应分析以及事后检验需要控制假阳性，并报告控制方法和结果。此外，中介分析是基于哪组被试的数据？

答：感谢审稿专家的意见。根据审稿专家的意见，在修回稿中我们添加了不

同组别在不同因变量指标上前后测之间的差异检验。同时我们对简单效应和事后检验进行了更加细致的数据报告，主要包括简单效应分析的 F 值以及效应量，事后检验的矫正方法等内容。在本文中，中介分析使用的自变量为前后测空间工作记忆等级的变化量，因变量为前后测空间导航任务正确率的变化量，中介变量为前后测生理指标 logHF 的变化量。

5. 讨论部分，“本研究探究认知增强训练对空间焦虑情绪的改善作用以及对空间导航任务绩效的迁移影响”，问题同引言，请明晰认知增强训练到底包括哪些部分，仅指工作记忆刷新训练，还是包括 tDCS 神经调控？

答：感谢审稿专家的提问。讨论部分的认知增强训练包括空间工作记忆刷新训练，tDCS 训练，和联合训练三种。在修回稿中我们将有歧义的表达进行了修改。