

《心理学报》审稿意见与作者回应

标题：VR运动-认知双任务训练对低空间能力者空间视觉化能力的影响：来自行为和fNIRS的证据

作者：刘阳 胡芳芳 孙浩

第一轮

编委意见：研究中还需要一个（控制）条件，即VR+手动操作（非运动训练），这样可以更有效的说明运动训练+认知训练的交互作用。因此，建议作者补充这一条件。

回复：非常感谢您提出的宝贵建议。我们完全认同补充“VR + 手动操作”组对于厘清运动与认知训练交互作用的重要价值。我们已据此修订实验方案，新增 VR 认知组，该组参与者将完成与 VR 运动-认知双任务组完全相同的导航认知任务，但通过操纵手柄实现虚拟移动，而非进行全身性跑步运动。此设计能通过与 VR 运动-认知双任务组的直接对比，清晰剥离出“身体运动”成分的独特贡献，从而使运动与认知交互作用的论证更加严谨和有力。再次感谢您的深刻洞见。

第二轮

外审专家1意见：

1. 所有英文简称应在全文首次出现时提供英文全称。

回复：感谢提醒。我们已对全文进行系统检查，确保所有英文简称在首次出现时均标注了全称。

2. 文中部分中、英文混用，建议统一描述。

回复：感谢提醒。我们已对全文进行系统检查。统一了相关术语地表述，确保了中文表述地一致性和规范性。

3. （2.1 被试）：1) 提供SBSOD量表参考文献；2)明确BMI是否是筛选条件之一。

回复：感谢您的建议。我们已进行补充：1) 已在文中明确引用赵悦彤（2021）修订的中文版SBSOD 量表，并补充了参考文献。2) 已明确将 BMI （正常范围: 18.5~23.9 kg/m²）纳入被试排除标准。

4. (2.2.1 空间能力自评量表): 1)筛选分值表述模糊:“得分<3分即可判定为低空间能力者”可能引起歧义,应明确是“平均得分<3”还是“总分低于某值”。

回复:感谢您指出的关键问题。我们已将判定标准从容易引起歧义的“得分 < 3 分”明确修改为“平均得分 < 3 分”,确保表述准确无误。

5. (2.2.2) 1) 建议将系统开发介绍和实验任务分段叙述,增加可读性; 2) “1:1 空间位移”如何校准? 是否存在比例因人而异的调整? 3) VR 运动场景与 VR 定向运动场景概念模糊。

回复:感谢这些细致入微的建议。我们已逐一修改: 1) 已将“系统开发”与“实验任务”分段叙述,提升可读性。2) 已补充说明校准方法为“基于步长的静态标定与动态踏步微调”,并强调比例一致。3) 已统一并厘清为“VR 运动场景”概念,强调其“无需自主规划、沿指定路线行进”的特征。

6. (2.4.1): 1) 规范时间数字表达方式;2) 文中提到“VR 运动-认知双任务组与 VR 运动组在运动过程中运动强度均控制在中等强度(64%—76%HRmax)(McMorris et al., 2012)”。建议作者进一步说明中等强度的评估方法。

回复:感谢您的建议。我们已: 1) 统一规范文中时间数字的表达方式。2) 补充说明了中等强度的评估方法,明确其依据“ $208-0.7 \times \text{年龄}$ ”公式计算个体最大心率,并通过心率表实时监控与语音提示进行调整。

7. (2.4.2): 1) 6个旋转角度的顺序、次序平衡方法; 2) 300°, 文中缺少°; 3) 建议说明1、2、3、4按键分别对应何种图形或方向; 4) 建议说明练习后的反馈是基于trial还是基于block的; 5) “正式开始测试之前,采集静息状态的脑血流。”表达略欠学术化。建议修改为:“正式测试开始之前,被试于安静坐姿下(闭眼)静息x分钟,采用fNIRS采集静息态脑血流信号。”6) 建议说明正式实验总时长(每次); 7) 建议说明组块间刺激随机化或平衡策略。

回复:感谢您提出的系列完善意见。我们已根据建议逐一修订:明确了角度随机呈现与次序平衡;补充了 300° 的单位符号;说明了按键与屏幕位置的对应关系;指出练习阶段反馈基于单个试次;将静息态采集表述学术化;补充了实验时长(约 15 分钟);并阐述了组块间采用随机化平衡策略。

8.

9.2.5 编号缺失

回复:感谢您提出的宝贵意见。我们现已将缺失的编号补全,并对全文所有层级编号进行了系统性核对,以确保其完整性与连续性。

9. (2.6) 1) 通道 ch2、ch9、ch12、ch19 在不同ROI中重复出现。如果不是笔误, 请阐明原因。2) 左侧眶额区(R-OFC)、右侧眶额区(L-OFC)。左右标注错误, 请做出修改并检查对应通道位置。

回复: 感谢您严谨的审阅。1) 关于通道重复, 这并非笔误。我们已阐明原因: 部分通道位于脑功能区交界, 将其根据解剖位置概率纳入相邻 ROI 是 fNIRS 分析中捕捉边界区域激活的常见策略。我们已重新核实所有重叠通道的归属。2) 关于左右错误, 我们深表歉意, 已修正为“左侧眶额区(L-OFC)、右侧眶额区(R-OFC)”, 并检查了对应通道。

10. (2.7) 1) 光极间距: 3.0 mm: 3.0mm还是3.0cm; 2) 请阐明小波变换的参数设置及参考文献; 3) 请阐明 β 值为各ROI的平均值还是最大值, 亦或其它指标; 4) 中介效应所涉及的具体统计方法; 5) “三个组别干预前后SBSOD量表得分、正确率、反应时采用两因素重复测量方差分析……”, 应为“四个组别”。6) 请阐明FDR校正是Benjamini-Hochberg还是Benjamini-Yekutieli? 并引用参考文献

回复: 感谢您提出的宝贵意见。我们已根据您的建议对文中内容进行了逐一修订: 1) 将光极间距更正为 3.0 cm, 这与 fNIRS 研究中确保信号有效穿透头皮和颅骨的常规设置一致; 2) 明确了小波变换采用 'db4' 小波基、5 层分解及自适应阈值法进行运动伪迹校正, 并已补充相应的方法学参考文献; 3) 明确指出文中 β 值为各兴趣区内所有通道 β 值的算术平均值, 以此代表该脑区的整体激活水平; 4) 文中已补充相关的统计分析方法; 5) 已将三个组别修正为四个组别; 6) 明确了 FDR 校正采用 Benjamini-Hochberg 程序, 并已补充引用其原始文献。

11. (3.1) 结果图与表述统计结果不符。1) SBSOD请检查应为“高于”还是“低于”, 并在文本/图表做出相应改变。2) “此外, VR运动-认知双任务组、VR运动组与VR认知组干预后正确率显著低于干预前($p < 0.001$ 、 $p < 0.001$ 、 $p < 0.001$)”, 结果图标注为**。3) 统计不显著的结果也应在结果图中标注, 并在图例中说明各符号对应的统计结果含义。4) MRT-RT 建议将“反应时低于”修改为“反应时短/快于”。5) “此外, 此外, VR运动-认知双任务组、VR运动组与VR认知组干预后反应时显著低于干预前”

回复: 感谢您提出的宝贵意见。我们已根据您的指正对文稿与图表进行了逐一核对与修订, 具体说明如下: 1) 我们已重新核对了 SBSOD 量表得分的数据与图表, 确认文中“显著高于”的描述方向与数据实际趋势一致, 并已在文本和图表中做出对应修改以确保完全相符; 2) 关于正确率的显著性标注, 我们已在结果图中为 VR 运动-认知双任务组、VR 运动组与 VR 认知组的干预前后比较补充添加了“***”标记(对应 $p < 0.001$), 与文中表述统一; 3) 我们已在结果图中对所有统计比较(包括不显著的结果)进行了标注, 并在图例中完整说明了各符号(如 ns, *, **, ***)所对应的具体 p 值范围; 4) 已将 MRT-RT 相关

的“低于”修改为更符合学术规范的“短于”；5) 我们核查了反应时的结果表述，确认其为笔误，并已将其修正。我们已将上述所有修正更新至文稿与图表中。

12. (3.2) 1) 表2 中“VR定向运动组”和“VR运动组”任务条件命名发生变化，建议全文统一。2) “其余脑区时间主效应、组别主效应以及二者的交互效应均不显著；”完善该句，并报告最小p值；3) 图6 脑区激活图未体现图标题中的“各组别”。

回复：感谢您的宝贵意见。1) 我们已对全文术语进行统一，将“VR 定向运动组”规范为“VR 运动-认知双任务组”。2) 已完善统计描述，并补充报告最小 p 值。3) 已将图标题修改为“组别与时间交互效应脑区激活图”，并在图注中说明该图基于“组别 $\times$ 时间”交互效应的 F 值绘制，以更准确表达。

13. (3.3) 1) 请说明该分析是针对某组别分析还是跨组分析，如果是跨组分析，如何控制训练条件因素。2) 请明确所做的是因果分析还是相关分析。当前统计结果汇报为相关分析。如果是因果分析，应报告回归系数 β 、 t 值、 P 值等。如果是相关分析，应避免在结论句使用因果式。3) 明确分析的是得分还是得分变化量。如果为后者，应说明计算方式，且结论句应有所体现。表述当前文本与结果图命名存在差异。4) SDSOD 笔误 (3.4) 1) “采用pearson相关系数.....”，改为中文。2) “.....考察各脑区与干预前后.....”，请清晰说明相关变量选自干预前/后指标亦或变化量。(3.5) 1) 结果描述需要明确中介效应的方向与意义2) 规范95%CI汇报格式。

回复：感谢您提出的深刻见解。我们采纳了您的建议，并进行了重要创新：将原 3.3-3.5 节的相关、回归及中介分析，全面更新为机器学习（随机森林）分析方法。主要基于以下考虑：机器学习能更直接、稳健地服务于本研究核心问题——量化不同干预是否塑造了可特异区分的神经模式。该方法通过高精度的跨组分类，客观提供了关于神经模式独特性与关键生物标志物的透明、可重复的证据链，既避免了此前分析在因果语言上的模糊性，也更能揭示干预与神经表征之间的稳健关联。我们已对全文相关表述进行修正。

14. 讨论部分提及“但VR运动-认知双任务组的表现显著优于VR运动组、VR认知组及对照组，而后三组之间未见显著差异。”该描述与前文结果存在较大出入。结果部分无论是SBSOD、ACC还是RT，训练组表现均显著优于对照组。请在讨论部分尊重既定结果。

回复：感谢您指出这一严重疏忽，我们深表歉意。讨论中的该描述确有不妥，未能准确反映所有训练组均优于对照组这一关键结果。我们已对此进行彻底修正，确保讨论中的所有结论均严格遵循并忠实于前文汇报的统计结果。

15. 研究中所用的VR运动场景为自主开发，覆盖校园与公园两大典型环境。文中未明确说明校园环境是否为被试群体实际所在的校园环境。如果 VR 校园场景与被试现实生活中的校园高度重合，建议作者说明如何控制或考虑被试在实验室外的实际行为（例如在真实校园中自由活动、熟悉环境），以避免现实经验对实验结果产生混淆或偏差。考虑到被试均为大一学生，且对照组在前后测中未发现显著差异，这可能在一定程度上缓解了该因素带来的潜在偏差。建议作者进一步思考VR训练之后的空间能力提升，是否会反哺现实场景中的空间行为？以及实际场景的“离线”运动是否可以部分补足“VR认知”训练，达到“VR运动-认知”训练效果？

回复：感谢您提出的极具启发性的问题。我们已在本研究局限与展望部分纳入这些关键问题。文中明确说明：1）本研究的VR校园环境为标准化场景，非模拟真实校园，从源头上控制熟悉度干扰。2）完全认同“VR训练效果向现实迁移”及“离线运动补足认知训练”的理论设想，并将其作为未来需要探索的重要方向进行了阐述。

.....

外审专家2意见：

1. 空间视觉化能力与空间表征有什么区别？在之前的研究中，有大量空间表征或表象的研究，请作者给与阐述说明。

回复：衷心感谢您对稿件的细致审阅及提出的深刻意见。您关于空间视觉化能力与空间表征区别的提问，以及要求阐述相关研究背景的建议，对我们完善理论框架至关重要。以下我们将结合文献与本研究设计，逐条回复您的意见。

空间视觉化能力与空间表征同属空间认知的核心范畴，但二者在概念层次与功能焦点上存在明确区分。空间表征主要指空间信息在脑内的编码与存储形式，其研究传统上更关注静态或相对稳定的信息保持，例如认知地图的神经基础。而空间视觉化能力则是一种更高阶的、主动性的认知过程，它强调个体在心理层面对空间表象进行操作、转换与推理的能力（Mcgee, 1979；Shweta et al., 2024）。其核心特征在于“心理操作”，典型的评估任务即心理旋转。在本研究中，我们将空间视觉化能力具体界定为对空间信息进行心理表征并执行内在操作的认知功能，它依赖于基本的空间表征，但更侧重于对该表征的动态加工效率。已按专家意见，在前言进行了相关阐述。

2. 衔接空间视觉化能力与运动能力的关系，是具身认知？还是超出具身认知的范畴？这也和后面提到的具身认知的关系阐述清楚。

回复：感谢您的深刻审读。您所提出的理论衔接问题，正是本研究希望深入探讨的核心。从文中机制来看，空间视觉化能力与运动能力之间的关联，其本质仍深植于具身认知的理论框

架内。文中所列举的运动形式，如足球的动态环视和跳水的姿态调控，并非单纯的身体活动，而是典型的具身化空间探索行为——通过身体与环境的实时互动，直接塑造并更新了个体的空间表征与操作流程。同时，运动所诱导的神经可塑性变化并非独立于具身过程之外；它们恰恰是身体经验作用于认知系统的生理实现途径，为后续认知训练提供了更具适应性的神经基础。因此，运动与认知在时序上的协同增效，可视为具身认知机制在训练干预中的具体展开与深化，并未脱离该理论的解释范畴。我们将在文中进一步系统阐述这一逻辑，明确运动能力的具身属性，并说明其如何通过神经可塑性的中介作用，推动空间认知能力的提升，以使理论线索前后连贯、清晰呈现。

3. 运可以动提升或改善很多生理-心理-神经-运动及协相互调功能，运动与认知训练（具体化认知训练主要指的是空间信息加工相关的认知能力？）说的太笼统了，可以阐述的更明确和具体。

回复：感谢您的宝贵意见。感谢您的审阅与指正。我们完全赞同您的意见，原文中对“认知训练”的表述确实过于宽泛，未能清晰体现其与空间能力的特异性关联。在修改中，我们已将此处及全文所涉及的“认知训练”明确限定为“空间认知训练”。这一界定旨在将其与广义的认知活动或一般的脑力锻炼区分开来，从而更精准地聚焦于“运动”如何与这些空间特异的认知过程在时间上同步或深度耦合，进而协同优化空间视觉化能力。我们已对全文相关表述进行统一修订，以确保概念清晰、指向明确。

4. 阐述清楚在本文中运动与认知，和具身认知的关系。

回复：感谢您的宝贵意见。在本研究中，运动与认知并非割裂或简单叠加的关系，而是以具身认知为理论内核，构成了一个整合性的“运动-认知”联合干预框架。我们强调，运动本身就是一种具身化的空间认知活动——身体的导航、转向与操控动作，直接参与了空间表征的在线构建与实时更新。与此同时，同步进行的空间认知任务则为身体动作提供了明确的目标与认知框架，二者在时间与任务内容上高度耦合，形成“身体行动-认知引导”的闭环。这一设计正是对认知植根于身体、并通过身体与环境的互动得以实现的直接实验体现。因此，本研究中的“运动”与“认知”共同服务于具身化的空间学习过程，其协同机制本质上是从感知运动整合到认知提升的具身实现路径。

5. 还有更多的主流权威的研究证据证明VR可以提升空间认知能力么？建议补充。

回复：感谢您的宝贵意见。我们已系统补充多层面证据，构建 VR 提升空间认知的立体化证据体系。在基础研究层面，将增补揭示 VR 环境如何特异性调节空间认知核心脑网络的关键研究，夯实其神经机制理论基础。在临床与应用层面，将进一步引入设计严谨的大样本研究，以强化VR在认知障碍早期识别、康复训练中效度的有力证据。同时，还将补充VR在

医学、航空等高技能领域提升复杂空间思维与操作效能的实证研究，证明其提升高阶认知能力的普适性。

6. fNIRS的局限性也需要说明。

回复：感谢您的宝贵意见。我们在文中已补充说明 fNIRS 技术对大脑深部区域探测能力有限、空间分辨率相对较低的主要局限。

7. 这个按照常识也可以得出这个预测？

回复：您提出的这一点非常关键。虽然“训练可能提升能力”这一方向符合一般直觉，但本研究的核心假设“VR运动-认知双任务训练”能够有效地提升“低空间能力者”的“空间视觉化能力”其价值恰恰在于对常识性预测的深化与验证。常识或许能推测训练可能有益，但无法精确预测双任务范式在VR沉浸环境中的独特效应（是产生协同促进，还是增加干扰负荷？），也无法断定这种干预对能力起点不同的特定人群是否同样有效、其提升机制和边界条件为何。因此，本研究旨在通过严谨设计，将这些常识层面的合理推测转化为具有可验证性、可解释性的科学证据，从而明确该训练方案的有效性、适用范围及潜在机制，这本身正是超越常识、构建理论的关键步骤。

8. 报告df1和df2

回复：感谢您的提醒。我们已按要求，在表格中补充说明了自由度（df1， df2）的数值。

9. 为什么用FDR校正不用Bonferroni校正？

回复：感谢您的宝贵意见。本研究涉及多脑区、多时间点的探索性分析，因此选用 FDR 校正方法。与 Bonferroni 方法相比，它能在有效控制假阳性的同时保留更高的统计检验力，更利于在神经影像数据中发现有意义的模式，这也是当前领域的普遍做法。文中已相应补充此说明。

10. 报告F检验结果，上下文无差异情况同此报告

回复：感谢您的宝贵意见。我们已根据您的建议，对文中所有方差分析结果的报告格式进行了统一修订。

11. ACC和RT都显著，需要做一下ACC-RT trade off的分析

回复：感谢您的宝贵意见。我们完全认同在反应时与准确率均发生显著变化时，进行速度-准确率权衡分析的重要性。在本研究中，我们观察到的是反应时缩短与准确率提升的“双改善”模式。经典的权衡理论预期二者反向变化，因此，当前同向改善的数据模式本身，已为我们提供了最直接的证据，表明其结果难以用被试的策略性调整来解释，而更可能反映了认

知加工效率的本质提升。基于这一考量，并遵循该领域在出现此类“双改善”模式时的常见处理方式，我们未再额外进行整合分数或模型分析，但已在论文的讨论部分对此逻辑进行了明确阐述，以提升论证的严谨性。再次感谢您的审慎意见。

12. 1) 给出报告指标的单位；2) 说明这些区域的选取依据。

回复：感谢您的宝贵意见。1) 我们经过认真核查与确认，本研究在一般线性模型分析中报告的是标准化回归系数 (β 值)。该统计量的本质为无量纲指标，其数值大小反映任务条件下大脑激活信号的相对强度或权重，而非具有物理单位的观测值，因此通常不附加单位。2) 本研究关注八个脑区（双侧额极区、眶额区、初级运动皮层及体感联合皮层），其选取直接对应于“VR运动-认知联合干预”的核心过程：额极区负责高阶认知控制，眶额区参与动机与体验调节，初级运动皮层反映运动执行，体感联合皮层则整合身体感觉与空间信息。同时观测双侧半球，旨在全面评估干预对感觉-运动整合及高级认知网络的偏侧化与整体性影响。我们将在论文的“近红外通道布局与感兴趣区确定”部分，对上述依据进行详细补充说明，以更清晰地构建本研究的神经科学逻辑。

13. 1) 这能说明什么，是否能够排除被试采用的保证正确率的策略？2) SBSOD 和MRT-RT 方差分析显著条件，与脑区相关不显著，为什么不显著需要在讨论中做解释。3) 注释说明图中的数值单位及意义。

回复：感谢您的宝贵意见。我们已采纳建议并完成一项重要方法学更新：将原3.3-3.5节的相关、回归及中介分析，全面调整为机器学习（随机森林）方法。这一调整主要基于以下考虑：机器学习能够更直接、稳健地服务于本研究的核心目标——量化不同干预是否塑造了可被特异性区分的神经模式。通过实现高精度的跨组分类，该方法为神经模式的独特性及其关键生物标志物提供了透明、可重复的证据链，既避免了传统分析在因果推断上的模糊性，也更能揭示干预与神经表征之间稳定的关联。文中相关部分已同步更新。

14. 理论与实践意义、贡献和创新？并阐述近红外在皮下区域探测的局限性以及本研究的局限。另外，全文中需要清晰界定认知-运动双任务的确切盖面范畴，避免泛化理解。

回复：感谢您提出的深刻见解。本研究从神经机制层面验证了 VR 运动-认知双任务训练提升空间认知的有效性，其核心理论贡献在于为“身体-认知整合”理论提供了直接的多模态神经证据；实践意义与创新则体现在发展了一套融合沉浸式 VR 与客观 fNIRS 神经标志物的精准训练与评估范式，为临床康复与技能培训提供了新方法。关于认知-运动双任务的确切范畴，本研究特指在 VR 环境中同步进行的主动肢体导航运动与目标导向的空间信息处理任务，旨在考察二者在认知资源上的实时交互与整合，界定清晰以避免泛化。同时，我们充分认识到技术与本研究的局限：fNIRS 主要探测皮层信号，对海马体等深部关键脑区存在探测盲区；此外，研究在长期效应、任务成分分离的精细度上亦有提升空间。未来研究将

致力于提升生态效度，并探索整合 fMRI、眼动等多模态技术以弥补上述局限，从而更完整地揭示全脑网络机制。

第三轮

外审专家1意见：

建议对VR在训练中的局限性进行讨论。

回复：感谢您的建议。我们已在讨论部分增加了对VR训练局限性的分析，具体包括：当前VR设备成本较高，可能限制其在临床中的大规模推广；部分受试者在长时间训练中出现轻微晕动症或视觉疲劳，影响训练体验；虚拟环境与真实场景之间存在一定差距，训练的迁移效果仍需进一步验证。未来研究可着力优化VR系统的舒适性与适配性，并探索更贴近真实场景的训练任务设计。修改处已用红色标出，敬请审阅。

外审专家2意见：

1 机器学习结果，建议改为“基于机器学习的神经模式差异分析”。

回复：感谢您的建议。我们已采纳并将该部分标题修改为“基于机器学习的神经模式差异分析”，以使表述更为准确地概括该节的核心内容。

2. 文章在摘要和机器学习结果部分一直在说L-FPA和R-M1是运动-认知双任务的关键神经指标，但是在最后结论部分说“机器学习模型成功解码出双任务训练诱导的独特神经活动模式，其中R-M1的活动变化是关键生物标志物”为什么只强调R-M1，而没有提及L-FPA？

回复：感谢您指出结论部分表述不一致的问题。我们重新核对了各组机器学习结果：L-FPA在VR运动组、VR认知组及VR运动-认知双任务组中均被识别为重要特征，提示其反映干预训练中的普遍性神经活动；而R-M1仅在VR运动-认知双任务组中被稳定识别且权重最高，是本研究发现的特有神经标志物。为突出这一核心发现，我们已在结论部分补充说明L-FPA的作用，将表述修订为：“……机器学习模型成功解码出双任务训练诱导的独特神经活动模式，其中R-M1的变化是运动-认知双任务组特有的关键生物标志物，而L-FPA则反映了双任务训练中更为普遍的神经活动特征。”修改处已用红色标出，敬请审阅。再次感谢您的严谨指导！

第四轮

外审专家2意见：

作者已经很好的回答了我的问题，建议录用！

编委意见：根据审稿专家的意见，建议发表。

主编意见：同意发表