

# 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

刘阳 胡芳芳 孙浩

(陕西师范大学体育学院 西安 710119)

**摘要** 空间视觉化能力是空间认知的核心成分。与传统认知训练相比，整合身体活动与认知加工的新型干预途径为提升该能力，特别是改善低空间能力个体的缺陷提供了新方向；然而，其有效性尚需行为与神经层面的实证证据支持。本研究旨在探讨虚拟现实（Virtual Reality, 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促进效果及神经可塑性机制。筛选 120 名低空间能力大学生，随机分为 VR 运动-认知双任务组、VR 运动组、VR 认知组以及对照组，进行 8 周干预。采用空间视觉化任务评估行为表现，利用功能性近红外光谱技术（Functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS）记录干预前后前额叶-顶叶网络激活变化，并基于随机森林机器学习模型解析神经模式的区分性特征。结果表明，VR 运动-认知双任务组在空间视觉化行为表现和神经效率上均显著优于其他组别，表现为左侧额极区（Left Frontopolar Area, L-FPA）和右侧初级运动皮层（Right Primary Motor Cortex, R-M1）的激活水平显著降低，提示其认知加工神经效率得到优化。机器学习模型进一步验证，双任务组的神经活动模式与对照组高度可分，其中 R-MI 与 L-FPA 的活动变化量为最具判别力的特征。VR 运动-认知双任务训练可通过协同优化前额叶与运动皮层的神经效能，显著提升低空间能力者的空间视觉化能力，研究为“身体-认知整合”理论提供了多模态证据，并为基于神经标志物的精准干预范式奠定了方法基础。

**关键词** 虚拟现实，运动-认知双任务训练，低空间能力，空间视觉化，fNIRS，机器学习  
**分类号** B842.1

收稿日期：2025-07-24  
国家社会科学基金项目 (24BTY093) 资助  
通讯作者：刘阳, liuyang0330@snnu.edu.cn

# 1 引言

空间视觉化能力 (Spatial Visualization Ability, SVA) 是空间认知的核心组成部分, 指个体在心理层面对空间信息进行表征、操作并预测其动态变化的认知过程, 主要表现在对物体的旋转、折叠等空间转换进行心理想象 (Mcgee, 1979)。与侧重静态编码的空间表征不同, 空间视觉化能力强调对空间表象的主动操作与优化, 其能力缺陷可直接导致个体在陌生环境中方向判断模糊、心理旋转效率低下等现实问题 (Tiwari et al., 2024)。然而, 在现实生活中许多人常自嘲为“路痴”, 即在陌生环境中容易迷失方向、难以形成有效的心理地图, 这正是空间视觉化能力较弱的一个典型表现 (Ishikawa & Zhou, 2020)。随着人工智能以及智能导航设备变得越来越普及, 个体对电子导航的依赖日益增强, 可能在一定程度上削弱其自主空间定位与方向判断的自然发展 (Dahmani & Bohbot, 2020)。除此之外, 现代生活方式中普遍存在的久坐行为和户外活动缺乏, 也进一步限制了空间认知能力的自然锻炼机会, 从而导致低空间能力者比例呈现出上升的趋势 (Weeks, 2015)。这类人群在执行空间任务时, 往往需要调动更多工作记忆资源, 信息处理效率会明显下降 (李寿欣, 周颖萍, 2006)。同时, 他们通常对环境布局的记忆能力较弱, 难以准确回忆地标顺序或在地图中标定自身位置, 在陌生环境中更容易迷路 (卢娜, 2023)。从现实认知需求以及训练的角度出发, 系统地关注并提升低空间能力者的空间视觉化能力, 不仅具有重要的认知理论价值, 而且对教育实践以及生活应用都有着积极的现实意义。

认知神经科学与运动心理学研究已证实, 身体活动与认知训练对于空间视觉化能力有着积极的促进效应。就身体活动而言, 有氧运动, 如跑步、球类活动等, 可通过改善大脑功能连接与神经可塑性, 进而提升空间信息处理效率 (Erickson et al., 2011)。例如, 足球运动中的动态环视以及战术配合, 有利于个体空间感知能力的提升 (Pietsch & Jansen, 2018), 而跳水则是通过身体在空中的精准姿态控制来强化空间定位能力 (冯甜 等, 2021)。就认知训练而言, 地图识别、路径整合以及空间推理等任务, 能够直接提高个体对空间关系进行心理表征和操作的能力 (刘赛芳 等, 2024; 殷春宇 等, 2024)。如定向运动识图训练通过地图-实景匹配、参照系转换等针对性训练, 可有效提升练习者空间工作记忆与心理旋转的表现 (郭程 等, 2023; 易妍 等, 2022)。然而, 当前多数干预方案倾向于将身体活动与空间认知训练分离实施, 未能充分挖掘二者在时间同步性与“运动-认知”耦合上的协同潜力, 从而限制了对空间视觉化能力的提升效果。已有研究表明, 对认知障碍患者先进行有氧运动、后进行认知训练的联合干预模式, 其效果显著优于单一训练 (Fabre et al., 2002), 提示“运

动-认知”的时序整合可能存在协同增益。然而，这种先后叠加的模式仍难以模拟真实情境中身体运动与认知加工同步进行时所产生的实时交互与深度整合特征。

随着具身认知理论不断深化发展，学术界越来越强调“身体-环境-认知”三者间的动态耦合在认知塑造方面所起到的核心作用（郭程 等，2023）。从这一理论的角度来看，运动和认知同步进行的交互式训练模式，由于它高度贴合真实世界中空间能力的使用情境，展现出显著优势（Waddington & Heisz, 2023）。以定向运动项目为例，这项运动要求参与者在身体移动过程中，同步完成地图识别、路径规划与实时决策（单小忠，2011），实现了运动执行与空间认知的有机整合。实践证明，进行定向运动训练能有效提升练习者在实景中方位判断以及路线选择的准确性和效率（刘阳，2020）。这种同步双任务处理的方式，可以促进多感官信息的整合，还可以推动空间工作记忆的更新，并且能够通过身体活动和认知挑战的协同效应，增强脑网络的功能连接与神经效率（殷春宇 等，2024）。然而，尽管“运动-认知”整合训练在定向运动等实景活动中已经取得了一定的效果，但要在更大范围内进行推广和应用，还面临场地、安全等方面的限制。

虚拟现实技术的成熟为突破这一瓶颈提供了关键的方法学支持。VR 不仅能构建高度仿真的沉浸式环境，还为研究提供了可控的实验室平台（Islam et al., 2026; 刘阳 等，2025）。从具身认知理论的角度来看，VR 的优势在于其通过多感官整合与身体动作交互，它把认知过程锚定在虚拟环境的“身体”体验中，从而强化了空间知识的具身性建构（谷倩 等，2023）。除此之外，VR 技术作为认知能力提升的重要手段，已经得到了多学科领域的广泛研究验证。例如，Beanato 等人（2024）的研究表明，通过将靶向空间认知关键脑区的脑刺激与 VR 导航训练相结合，可有效增强空间记忆核心脑网络的活动。在临床医学领域，VR 不仅可作为敏感的工具用于早期识别认知障碍，其沉浸式环境本身也是进行空间记忆与路径规划康复训练的有效平台（Solares et al., 2025; Serino et al., 2017）。此外，在建筑设计等专业领域，VR 通过构建全尺度、可交互的环境，深刻改变了人们对空间比例、尺度和材料的感知与决策方式，从而系统性地提升三维思维与空间理解能力（Jarrin et al., 2024）。这些证据共同表明，VR 通过提供生态化、可靶向干预的沉浸式体验，正在成为从基础研究、临床应用到专业训练中提升空间认知的关键技术。

fNIRS 技术的不断发展，使其具备了在自然情境下无创、实时监测大脑皮层血氧动力学变化的独特优势，这为本研究深入探究“运动-认知”同步训练的效益机制提供了关键的技术支持。该技术具有良好的运动耐受性，可以有效地捕捉到个体在进行身体活动同步认知任务时大脑所呈现出的激活模式（潘津津 等，2014），适用于 VR 环境中身体-认知协同干

预的机制研究。尽管该技术对大脑深部结构的探测能力有限，空间分辨率相对较低（Qiu et al., 2019），但本研究在实验设计与数据处理中已充分考虑这些因素，力求在技术边界内获取有效的脑活动数据，以合理解释训练效益的神经机制。在神经机制层面，前额叶皮层在认知控制、工作记忆更新以及复杂决策这些方面发挥着核心的作用（权文香等，2012）。例如，地图识别与路线选择的任务中，其激活水平会随着任务难度增加而升高（胡芳芳等，2025）。顶叶是空间信息处理的关键枢纽，它负责整合视觉、本体感觉等多种模态的输入，构建起空间表征，并且支持自我中心与非自我中心参照系之间进行转换（郑金龙等，2008）。在涉及身体移动与认知判断的双任务模式之中，前额叶-顶叶网络的功能耦合强度能够有效地预测个体空间任务完成的质量（Morioka et al., 2008; Fishburn et al., 2014）。

基于上述背景，本研究主要依据具身认知理论，自主研发了多场景 VR 运动-认知双任务训练程序，旨在系统考察该训练程序对低空间能力者空间视觉化能力的改善效益，并借助 fNIRS 技术揭示其背后的大脑神经可塑性机制。本研究重点探讨以下科学问题：（1）VR 运动-认知双任务训练能否有效地提升低空间能力者的空间视觉化能力？（2）与单一运动训练或单一认知训练相比，运动-认知交互训练是否表现出更好的改善效益？（3）有效的干预是否会让大脑产生独特的、可被机器学习模型捕捉到的神经活动模式，使得干预组能够被高精度地从对照组中区分出来？其关键神经生物标志物是什么？

## 2 方法

### 2.1 被试

采用 G\*power3.1 软件进行先验样本量估算（Bruce et al., 2020），设置显著性水平  $\alpha = 0.05$ ，统计功效  $(1-\beta) = 0.80$ ，并选取中等效应量  $f = 0.35$ 。经由估算得出，研究所需总样本量为 94 人，每组至少 24 名。为确保在可能出现被试流失的情况下仍满足统计要求，本研究最终面向某大学大一、大二学生发放空间能力自评量表（Santa Barbara Sense Of Direction Scale, SBSOD），共筛选出 120 名低空间能力者（男性 60 名，女性 60 名）。所有参与者被随机分配至四个实验组：VR 运动-认知双任务组、VR 运动组、VR 认知组以及对照组，每组各 30 人。被试纳入标准：1) 身体质量指数（Body Mass Index, BMI）处于正常范围（ $18.5 \sim 23.9 \text{ kg/m}^2$ ）；2) 无脑创伤及精神疾病等；3) 视力或矫正视力正常；4) 无定向运动基础或比赛经历；5) 无使用“东南西北”等方向进行寻路或指路的习惯；6) 无 3D 眩晕症病史；7) 右利手；8) 熟悉计算机键盘按键位置，且未参加过类似实验。被试排除标准：1) 患有抑郁症、精神分裂症等精神病患者；2) 严重心、肝、肾功能

不全等系统性疾病；3) 前庭功能障碍或影响运动执行的躯体疾病。在实验开始前，所有参与者均签署知情同意书，并承诺在实验期间不进行额外的系统性运动技能学习，同时保持其原有的体育锻炼习惯，以避免其他训练对神经与行为结果产生混杂效应。本研究方案已获得陕西师范大学伦理委员会的批准（批准文号：202410006）。

表1 被试基本信息

组别	VR 运动-认知组	VR运动组	VR认知组	对照组	F (3, 116)	p
性别(男/女)名	15/15	15/15	15/15	15/15	—	—
年龄/岁	19.97±0.81	20.10±0.76	19.87±0.77	19.97±0.61	0.50	0.69
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	21.65±1.66	21.61±1.71	20.97±1.81	20.84±0.64	2.31	0.08
静息心率/BPM	68.27±5.90	68.13±4.81	69.40±6.30	69.53±8.31	0.02	0.99

## 2.2 实验材料与设备

### 2.2.1 空间能力自评量表

采用赵悦彤（2021）修订的中文版 SBSOD 量表进行筛选。该量表共包含 15 个条目，采用 7 点计分法，从“1”代表完全不同意到“7”代表完全同意，其中第 1、3、4、5、7、9、14 题为正向计分，第 2、6、8、10、11、12、13、15 题为反向计分。评分时，将所有条目相加后计算平均值，平均得分低于 3 分则判定为低空间能力者。该量表在本研究样本中的 Cronbach's  $\alpha$  系数为 0.88，信度良好。

### 2.2.2 VR 运动场景开发与实验任务

为了能够精准地检验“运动-认知”同步训练对空间视觉化能力所产生的影响机制，本研究基于 Unity 引擎自主研发了一套多模态 VR 训练系统，该系统包含了三种不同类型的实验条件，分别是 VR 运动-认知双任务场景、VR 单纯运动场景以及 VR 单纯认知场景，目的是达成对干预成分实行精确控制，并且进行对比分析。

系统构建了校园与公园两类高仿真虚拟环境，整合道路、建筑、导航界面等地理要素，共预设 32 条训练路径，每种场景各 16 条，每条路径设 8 个目标点并嵌入 3D 点标旗作为空间导航任务载体。为实现身体运动与虚拟导航的高精度耦合，系统创新引入 Natural Locomotion 定位方案，通过双脚绑定 Tracker 定位器捕捉受试者原地踏步的频率、幅度与足底倾角，实时驱动虚拟角色实现 1:1 空间位移。该映射关系在实验前经由静态标定与动态验证两阶段校准，确保虚拟移动与个体实际动作节奏一致，有效增强身体参与的生态效度。

三类场景任务设计：① VR 运动-认知双任务场景：受试者需结合虚拟地图与指北针自主规划路径，通过原地跑步驱动虚拟角色移动至目标点后完成打卡；② VR 运动场景：参与者沿地面渲染的导航线跑步移动，无需主动路径规划；③ VR 认知场景：任务内容同运动-认知场景，但角色移动通过手柄控制，不涉及身体活动。

在系统开发过程中，邀请 6 名陕西省定向运动队现役运动员参与多轮场景测试与交互调试，进一步优化场景布局、任务逻辑与运动映射的真实性。系统在任务结束后自动输出地图使用时长、指北针调用频率以及打卡成功率等行为指标，为后续分析提供数据支持。

## 2.3 实验设计

本研究采用 4（组别：VR 运动-认知双任务组、VR 运动组、VR 认知组、对照组） $\times$ 2（时间：干预前、干预后）的两因素混合实验设计。因变量包括：SBSOD 量表得分、心理旋转任务反应时（Mental Rotation Task Reaction Time, MRT-RT）、正确率（Mental Rotation Task Accuracy, MRT-ACC），以及前额叶与顶叶各兴趣区（Region Of Interest, ROI）的脑激活水平。

## 2.4 实验程序

### 2.4.1 整体流程

实验流程主要包括练习阶段、前测、干预阶段与后测四个部分。

（1）练习阶段：主试首先示范 VR 设备的操作方法，然后指导每位被试进行实操练习，确保所有被试的操作熟练度达到统一标准。

（2）前测：当被试到达实验室之后，首先听取实验流程讲解并签署知情同意书。随后，填写个人基本信息，并佩戴心率手表，静坐 15 分钟后记录其静息心率。接着，为被试佩戴 fNIRS 设备，开始空间视觉化能力的基线水平测试。

（3）运动干预：干预持续 8 周，每周干预 3 次，每次 60 分钟，包含热身以及整理活动。VR 运动-认知双任务组与 VR 运动组在干预过程中运动强度均控制在中等强度（64%~76%HRmax）（Sun et al., 2026），运动中通过心率表实时监测被试心率，并通过语音提示调整步速以维持目标强度范围。VR 认知组不进行身体运动，通过手柄完成相同的导航认知任务。对照组在干预期间不进行任何有组织的体育锻炼。

（4）后测：在全部干预结束后，待被试心率恢复至接近其前测静息心率水平时，进行心理旋转任务后测，测试完成后向被试发放报酬。

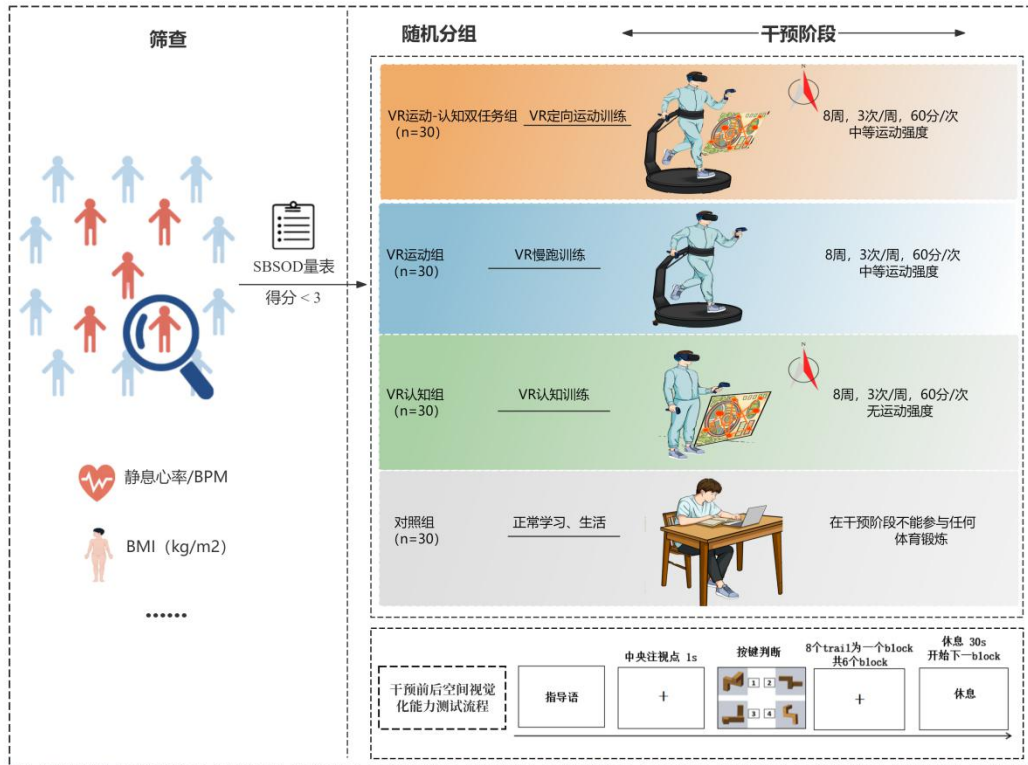


图1 实验流程图

#### 2.4.2 空间视觉化能力测试

采用 E-prime 3.0 编写测试程序。任务刺激采用经典空间视觉化能力的测试范式——心理旋转任务进行测评 (Vandenberg et al., 1978; 鞠成婷 等, 2013)。正式开始测试时, 被试闭眼静息 3 分钟, 采用 fNIRS 去采集其静息态脑血流信号作为基线。任务开始时, 屏幕首先呈现红色“+”字注视点 1 秒, 随后呈现一张刺激图片 6 秒, 图片包含同一图形的不同旋转角度以及一个干扰图形, 旋转角度有  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $240^\circ$ 、 $300^\circ$ 。这六个旋转角度会按照随机的顺序呈现出来, 并且会对呈现的次序进行平衡处理。被试需判断干扰图形的位置, 并按下对应的数字键, 1 = 左上, 2 = 右上, 3 = 左下, 4 = 右下, 进行反应。在练习阶段, 每个试次结束之后会给被试提供 MRT-RT 和 MRT-ACC 的反馈, 正式测试时不提供反馈。整个测试包含 6 个组块, 每 8 个试次构成一个组块, 共计 48 个试次。组块间休息 30 秒, 呈现顺序随机化。完整测试时长约为 15 分钟。记录指标为心理旋转任务的 MRT-RT 和 MRT-ACC 指标, 并在完成心理旋转任务时用近红外记录各脑区激活变化。

#### 2.5 实验仪器与数据采集

fNIRS 数据采集设备: 采用岛津便携式近红外光谱脑功能成像系统 (LIGHTNIRS), 系统使用三种波长 (780 nm、805 nm、830 nm) 的近红外光, 采样率为 13.33 Hz, 光极

布局采用 2×8 的探头阵列（8 个发射光极和 8 个接收光极），光极间距为 3.0cm，共形成 20 个测量通道，采用 FASTRAK 三维定位仪确定各光极位置，并通过 NIRS\_SPM 软件进行空间配准，将各通道坐标映射至 MNI 标准空间，并根据成人布罗德曼分区（Brodmann）图谱界定其所属脑区。基于 VR“运动-认知”双任务训练的核心设计，本研究为系统捕捉运动执行、感觉整合与高级认知控制的神经交互活动，据此针对性选定了最终呈现的 8 个兴趣区（ROI），如下所示。

表2 各感兴趣脑区与其对应的fNIRS测量通道

大脑区域	对应通道
左侧额极区 (Left Frontopolar Area, L-FPA)	ch2、ch3、ch6、ch7
右侧额极区 (Right Frontopolar Area, R-FPA)	ch1、ch2、ch4、ch5
左侧眶额区 (Left Orbitofrontal Cortex, L-OFC)	ch9、ch10、
右侧眶额区 (Right Orbitofrontal Cortex, R-OFC)	ch8、ch9
左侧体感联合皮层 (Left Somatosensory Association Cortex, L-SAC)	ch16、ch19、ch20
右侧体感联合皮层 (Right Somatosensory Association Cortex, R-SAC)	ch15、ch18、ch19
左侧初级运动皮层 (Left Primary Motor Cortex, L-M1)	ch12、ch13、ch17
右侧初级运动皮层 (Right Primary Motor Cortex, R-M1)	ch11、ch12、ch14

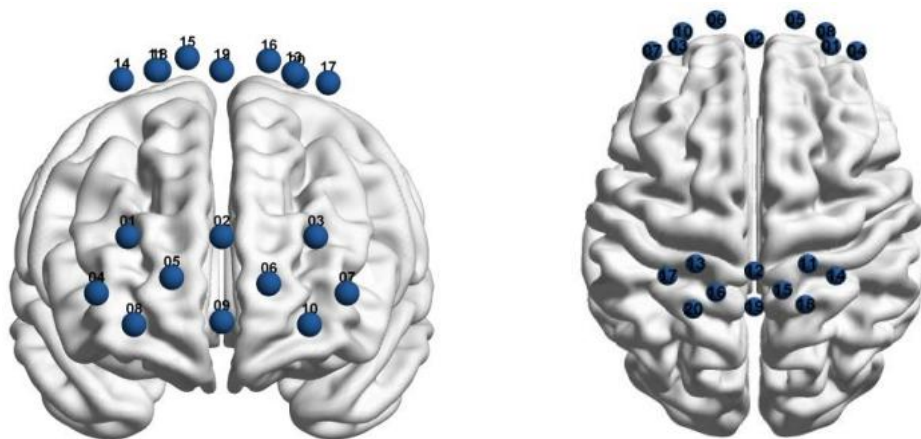


图2 fNIRS 通道布局及标定脑区信息

注：左图为前额叶，右图为顶叶。

VR 设备：HTC VIVE PRO VR 头戴式设备一套，（分辨率 2880×1600 像素、视场角最大 120°、刷新率为 90Hz），配备 2 个定位仪与 2 个 Tracker 定位追踪器。

心率监测设备：采用 DOMOR 运动手表监测实时心率。

## 2.6 数据处理与分析

fNIRS 数据：原始数据预处理与分析基于 Matlab (R2013b) 平台完成。首先将原始光强数据转换为光密度 (OD) 数据，然后通过修正的比尔-朗伯定律计算氧合血红蛋白 (HbO) 和脱氧血红蛋白 (HbR) 的相对浓度变化。预处理包含以下几个方面：(1) 运动伪迹的校正处理中，采用小波变换的算法予以实现 ('db4' 小波基，5 层分解，阈值选取采用自适应法) (Perpetuini et al., 2021)。(2) 滤波处理：先进行高通滤波以去除基线漂移，截止频率设置为 0.01 Hz (Kim et al., 2022)，再进行低通滤波以抑制高频生理噪声，截止频率设置为 0.2 Hz；(3) 浓度换算过程中，经过处理的 OD 数据借助修正版比尔-朗伯定律转换成 HbO 与 HbR 相对浓度变化的时间序列数据。空间配准操作基于 10-5 系统完成，各通道对应的解剖脑区通过 MNI 空间坐标系下的光极定位得以确定。预处理后的 HbO/HbR 浓度数据，设计一般线性模型 (GLM)。将任务条件和有时间导数的标准血流动力学响应函数 (HRF) 进行卷积，从而生成设计矩阵，并采用 0.02 Hz 的高通滤波把模型中的低频漂移过滤掉，得到各通道在任务条件下的  $\beta$  值，然后计算各 ROI 内所有通道  $\beta$  值的算术平均值，并作为该脑区的激活指标。最后采用 SPSS 27.0 对干预前后通道数据进行两因素重复测量方差分析。

行为学数据：首先对四个组别干预前后的 SBSOD 量表得分、MRT-ACC、MRT-RT 进行正态分布检验，S-W 检验结果显示， $p > 0.05$  服从正态分布。然后进行两因素重复测量方差分析 (组别 $\times$ 时间)，涉及多重比较时，均采用 Benjamini-Hochberg 程序进行错误发现率校正，校正后以  $p < 0.05$  为差异具有统计学意义 (Benjamini & Hochberg, 1995)。

机器学习分析：为了能够从神经模式的层面去对不同干预所产生的独特效应进行量化，本研究采用机器学习方法进行辅助分析。在 Python 3.9.13 环境下运行着随机森林算法的分类模型构建过程。包含 16 个特征集：8 个兴趣区基线激活值的干预前数据，以及这些兴趣区激活变化量的干预前后差异值 ( $\Delta$ 值=干预后-干预前)。三个二元分类任务被设计出来：对照组与 VR 认知组、对照组与 VR 运动组、对照组与 VR 运动-认知双任务组的比较分析。留一法交叉验证的实施使得模型性能得以评估，超参数优化的过程中网格搜索方法得到应用。使用准确率指标、AUC 值、精确率数据、召回率结果以及 F1 分数等多项评价标准用于模型表现的衡量。关键神经生物标志物的识别工作通过特征重要性排序完成。

## 3 结果

### 3.1 行为结果

#### 3.1.1 SBSOD量表得分

对 SBSOD 得分进行 4 (组别) × 2 (时间) 重复测量方差分析, 结果显示 (见图 3): 时间主效应显著 [ $F_{(1, 116)} = 268.05, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.70$ ], 组别主效应显著 [ $F_{(3, 116)} = 90.26, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.70$ ], 二者交互效应显著 [ $F_{(3, 116)} = 126.08, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.77$ ]. 简单效应分析发现, 前测时, 组别主效应不显著 [ $F_{(3, 116)} = 0.61, p = 0.607, \eta_p^2 = 0.02$ ]. 后测时, 组别主效应显著 [ $F_{(3, 116)} = 158.52, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.80$ ], VR 运动-认知双任务组得分显著高于 VR 运动组 ( $p < 0.001$ )、VR 认知组 ( $p < 0.001$ ) 与对照组 ( $p < 0.001$ ); VR 运动组得分显著高于对照组 ( $p = 0.002$ ). VR 认知组得分显著高于对照组 ( $p < 0.001$ ), VR 运动组与 VR 认知组并未表现出显著差异。VR 运动-认知双任务组, 时间主效应显著 [ $F_{(1, 116)} = 612.40, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.84$ ], VR 运动组, 时间主效应显著 [ $F_{(1, 116)} = 19.15, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.14$ ], VR 认知组, 时间主效应显著 [ $F_{(1, 116)} = 14.70, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.11$ ], 三个组干预后 SBSOD 得分均显著高于干预前, 对照组时间主效应不显著 [ $F_{(1, 116)} = 0.04, p = 0.832, \eta_p^2 = 0.01$ ], 干预前后并未表现出显著差异。

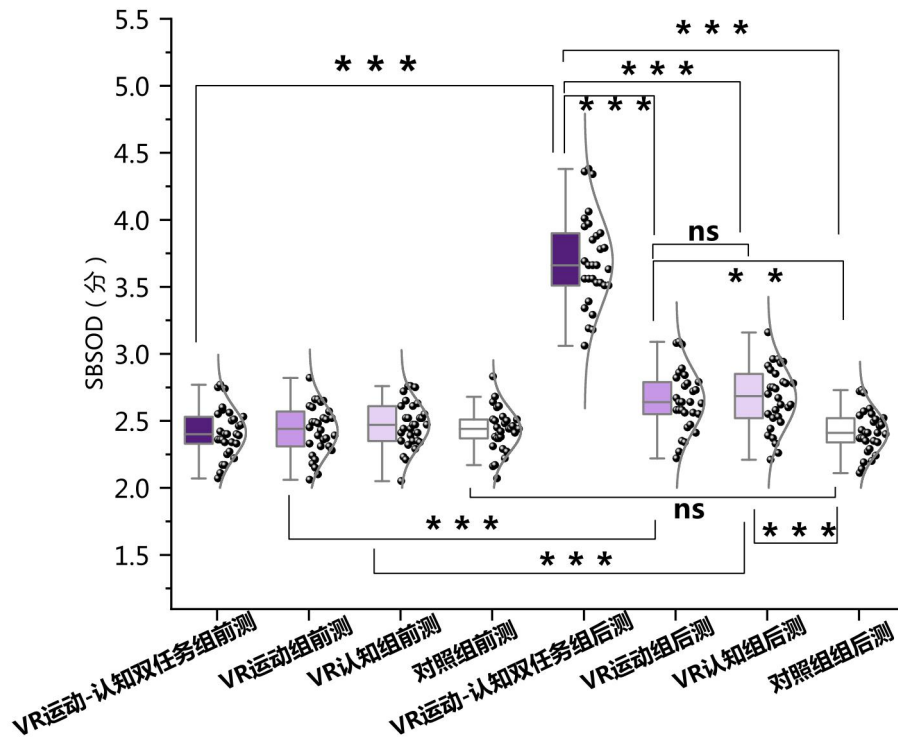


图3 干预前后 SBSOD 得分差异

注: ns 表示无显著差异 ( $p \geq 0.05$ ), \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ , 下同。

### 3.1.2 心理旋转任务正确率

MRT-ACC 方差分析结果显示 (见图 4): 时间主效应显著 [ $F_{(1, 116)} = 53.93, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.32$ ], 组别主效应显著 [ $F_{(3, 116)} = 16.75, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.30$ ], 二者交互效应显著 [ $F_{(3, 116)} = 14.41, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.27$ ]. 简单效应分析发现, 前测时, 组别主效应不显著 [ $F_{(3, 116)} = 0.51, p = 0.679, \eta_p^2 = 0.01$ ]. 后测时, 组别主效应显著 [ $F_{(3, 116)} = 31.10, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.45$ ], VR 运动-认知双任务组正确率显著高于 VR 运动组 ( $p < 0.001$ )、VR 认知组 ( $p$

< 0.001) 与对照组 ( $p < 0.001$ )。VR 运动组正确率显著高于对照组 ( $p = 0.007$ )。VR 认知组正确率显著高于对照组 ( $p < 0.001$ )，VR 运动组与 VR 认知组正确率无显著差异。VR 运动-认知双任务组，时间主效应显著 [ $F_{(1, 116)} = 73.48, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.39$ ]，VR 运动组，时间主效应显著 [ $F_{(1, 116)} = 12.66, p = 0.001, \eta_p^2 = 0.10$ ]，VR 认知组，时间主效应显著 [ $F_{(1, 116)} = 10.55, p = 0.002, \eta_p^2 = 0.08$ ]，三个组干预后正确率均显著高于干预前，对照组时间主效应不显著 [ $F_{(1, 116)} = 0.48, p = 0.492, \eta_p^2 = 0.01$ ]，干预前后并未表现出显著差异。

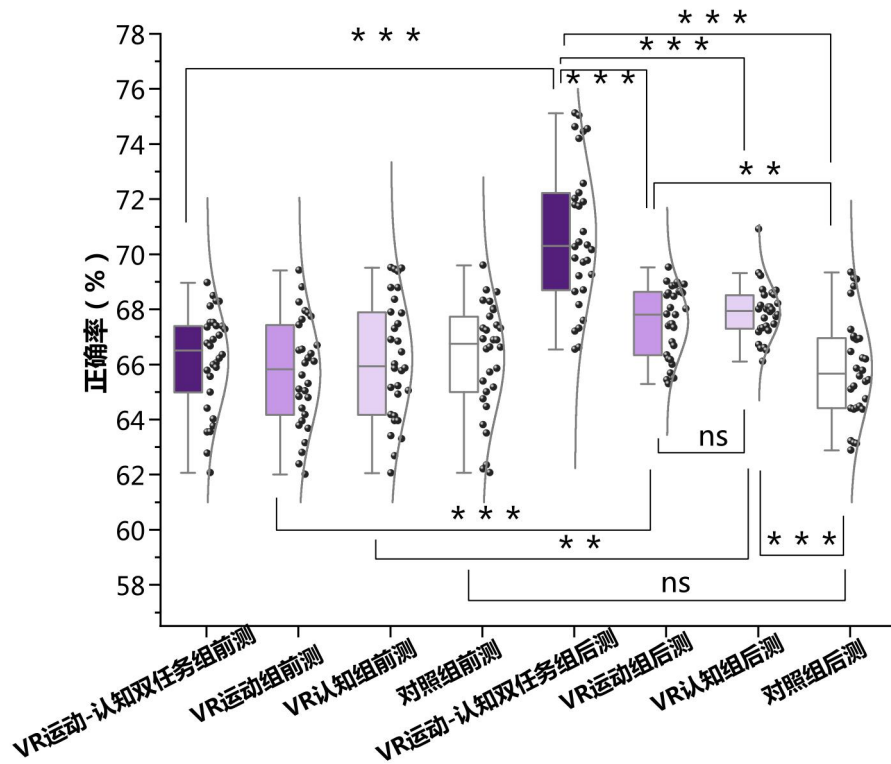


图4 干预前后 MRT-ACC 差异

### 3.1.3 心理旋转任务反应时

MRT-RT 方差分析结果显示 (见图 5)：时间主效应显著 [ $F_{(1, 116)} = 57.86, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.33$ ]，组别主效应显著 [ $F_{(3, 116)} = 8.81, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.19$ ]，二者交互效应显著 [ $F_{(3, 116)} = 8.66, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.18$ ]。简单效应分析发现，前测时，组别主效应不显著 [ $F_{(3, 116)} = 0.45, p = 0.718, \eta_p^2 = 0.01$ ]。后测时，组别主效应显著 [ $F_{(3, 116)} = 21.36, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.36$ ]，VR 运动-认知双任务组反应时显著短于 VR 运动组 ( $p < 0.001$ )、VR 认知组 ( $p < 0.001$ ) 与对照组 ( $p < 0.001$ )。VR 运动组反应时显著短于对照组 ( $p = 0.031$ )，VR 认知组反应时显著短于对照组 ( $p = 0.032$ )，VR 运动组与 VR 认知组反应时无显著差异。VR 运动-认知双任务组，时间主效应显著 [ $F_{(1, 116)} = 60.30, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.34$ ]，VR 运动组，时间主效应显著 [ $F_{(1, 116)} = 8.36, p = 0.005, \eta_p^2 = 0.07$ ]，VR 认知组，时间主效应显著 [ $F_{(1, 116)} = 14.65, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.11$ ]，三个组干预后反应时均显著短于干预前，对照组时间主效应不显著 [ $F_{(1, 116)} = 0.53, p = 0.467, \eta_p^2 = 0.01$ ]，干预前后并未表现出显著差异。

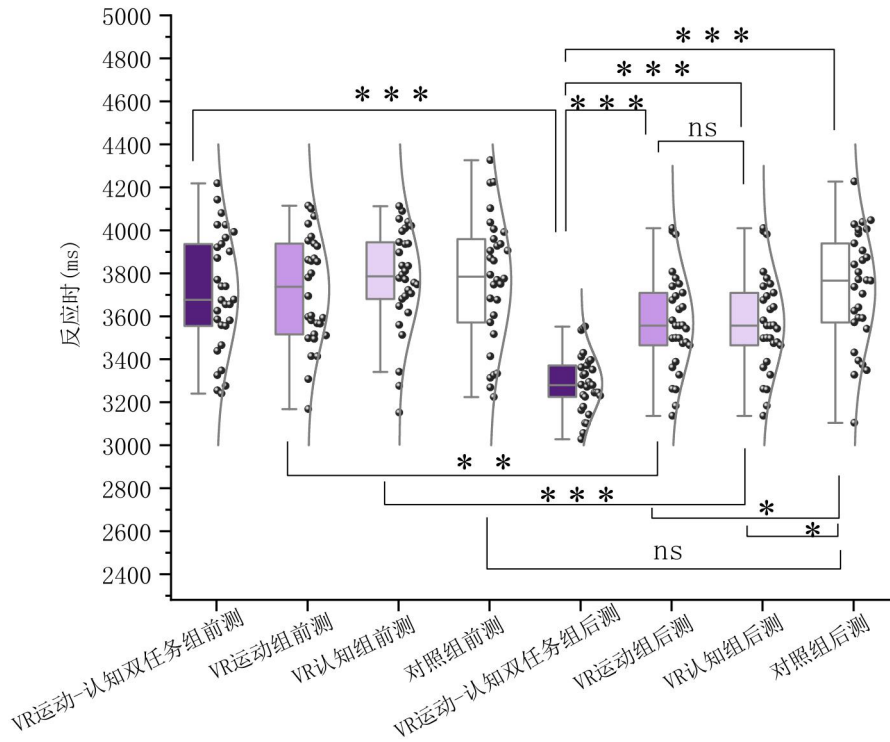


图5 干预前后 MRT-RT 差异

### 3.2 fNIRS结果

为检验干预对大脑激活的影响，对 8 个兴趣区 (ROI) 的  $\beta$  值进行了 4 (组别)  $\times$  2 (时间) 重复测量方差分析。描述性统计结果见表 3，交互效应显著的脑区激活模式见图 6。

表3 不同运动方式干预前后 beta 值描述性统计结果 ( $M \pm SD$ )

	VR运动-认知双任务组 (n=30)		VR运动组 (n=30)		VR认知组 (n=30)		对照组 (n=30)	
	干预前 $\times 10^{-3}$	干预后 $\times 10^{-3}$	干预前 $\times 10^{-3}$	干预后 $\times 10^{-3}$	干预前 $\times 10^{-3}$	干预后 $\times 10^{-3}$	干预前 $\times 10^{-3}$	干预后 $\times 10^{-3}$
R-FPA	4.49 $\pm$ 5.41	-2.51 $\pm$ 5.99	2.04 $\pm$ 5.70	-3.59 $\pm$ 6.04	2.98 $\pm$ 11.46	-3.51 $\pm$ 8.92	2.32 $\pm$ 8.89	2.43 $\pm$ 7.81
L-FPA	3.38 $\pm$ 7.39	-10.03 $\pm$ 7.38	4.35 $\pm$ 8.89	-2.07 $\pm$ 9.96	2.73 $\pm$ 9.01	-2.00 $\pm$ 10.03	3.76 $\pm$ 8.92	1.64 $\pm$ 11.41
R-OFC	2.97 $\pm$ 7.55	-2.59 $\pm$ 9.28	3.48 $\pm$ 9.99	2.83 $\pm$ 8.27	5.62 $\pm$ 12.97	5.86 $\pm$ 12.97	4.24 $\pm$ 9.18	2.02 $\pm$ 12.97
L-OFC	2.20 $\pm$ 6.03	-0.42 $\pm$ 8.41	2.10 $\pm$ 11.00	2.12 $\pm$ 9.22	6.31 $\pm$ 13.08	-0.64 $\pm$ 2.17	1.95 $\pm$ 9.77	1.55 $\pm$ 10.59
R-M1	1.70 $\pm$ 8.33	-10.91 $\pm$ 10.79	1.84 $\pm$ 9.44	-0.66 $\pm$ 6.29	2.49 $\pm$ 13.00	-0.65 $\pm$ 6.52	3.69 $\pm$ 9.58	3.23 $\pm$ 8.76
L-M1	1.80 $\pm$ 7.58	0.41 $\pm$ 7.93	3.30 $\pm$ 8.06	2.05 $\pm$ 8.18	0.69 $\pm$ 8.94	2.44 $\pm$ 14.73	0.92 $\pm$ 10.32	0.10 $\pm$ 1.29
R-SAC	1.12 $\pm$ 8.41	0.44 $\pm$ 6.70	1.44 $\pm$ 8.84	0.66 $\pm$ 8.32	0.76 $\pm$ 9.29	8.20 $\pm$ 11.50	2.71 $\pm$ 8.01	2.44 $\pm$ 9.07
L-SAC	2.45 $\pm$ 9.24	0.02 $\pm$ 7.42	3.79 $\pm$ 10.01	1.53 $\pm$ 7.75	2.30 $\pm$ 11.01	2.44 $\pm$ 8.77	1.64 $\pm$ 9.51	2.86 $\pm$ 10.34

右侧额极区 (R-FPA) : 时间主效应显著 $[F_{(1, 116)} = 26.22, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.18]$ , 组别主效应不显著 $[F_{(3, 116)} = 1.72, p = 0.168, \eta_p^2 = 0.04]$ , 二者交互效应显著 $[F_{(3, 116)} = 3.15, p = 0.028, \eta_p^2 = 0.08]$ ; 简单效应分析发现, 前测时, 组别主效应不显著 $[F_{(3, 116)} = 0.15, p = 0.929, \eta_p^2 = 0.04]$ 。后测时, 组别主效应显著 $[F_{(3, 116)} = 5.12, p = 0.002, \eta_p^2 = 0.12]$ , VR 运动-认知双任务组、VR 运动组与 VR 认知组激活显著低于对照组 ( $p < 0.001$ 、 $p = 0.011$ 、 $p = 0.012$ ) ; 而三个干预组之间无显著差异; VR 运动-认知双任务组, 时间主效应显著 $[F_{(1, 116)} = 14.24, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.11]$ , VR 运动组, 时间主效应显著 $[F_{(1, 116)} = 9.20, p = 0.003, \eta_p^2 = 0.07]$ , VR 认知组, 时间主效应显著 $[F_{(1, 116)} = 12.23, p = 0.001, \eta_p^2 = 0.10]$ , 三个组干预后脑激活显著低于干预前, 对照组时间主效应不显著 $[F_{(1, 116)} = 0.01, p = 0.950, \eta_p^2 = 0.01]$ , 干预前后并未表现出显著差异。

左侧额极区 (L-FPA) : 时间主效应显著 $[F_{(1, 116)} = 39.85, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.26]$ , 组别主效应显著 $[F_{(3, 116)} = 4.16, p = 0.008, \eta_p^2 = 0.10]$ , 二者交互效应显著 $[F_{(3, 116)} = 5.22, p = 0.002, \eta_p^2 = 0.12]$ ; 简单效应分析发现, 前测时, 组别主效应不显著 $[F_{(3, 116)} = 0.20, p = 0.894, \eta_p^2 = 0.01]$ 。后测时, 组别主效应显著 $[F_{(3, 116)} = 8.12, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.17]$ , VR 运动-认知双任务组激活显著低于 VR 运动组 ( $p = 0.008$ )、VR 认知组 ( $p = 0.007$ ) 与对照组 ( $p < 0.001$ ) ; 而 VR 运动组、VR 认知组与对照组组间并未表现出显著差异 ( $p \geq 0.05$ ) ; VR 运动-认知双任务组, 时间主效应显著 $[F_{(1, 116)} = 40.27, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.26]$ , VR 运动组, 时间主效应显著 $[F_{(1, 116)} = 9.23, p = 0.003, \eta_p^2 = 0.07]$ , VR 认知组, 时间主效应显著 $[F_{(1, 116)} = 5.01, p = 0.027, \eta_p^2 = 0.04]$ , 三个组干预后脑激活显著低于干预前, 对照组时间主效应不显著 $[F_{(1, 116)} = 1.00, p = 0.318, \eta_p^2 = 0.01]$ , 干预前后并未表现出显著差异。

右侧初级运动皮层 (R-M1) : 时间主效应显著 $[F_{(1, 116)} = 15.79, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.12]$ , 组别主效应显著 $[F_{(3, 116)} = 4.30, p = 0.006, \eta_p^2 = 0.10]$ , 二者交互效应显著 $[F_{(3, 116)} = 6.61, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.15]$ ; 简单效应分析发现, 前测时, 组别主效应不显著 $[F_{(3, 116)} = 0.26, p = 0.854, \eta_p^2 = 0.01]$ 。后测时, 组别主效应显著 $[F_{(3, 116)} = 10.10, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.21]$ , VR 运动-认知双任务组激活显著低于 VR 运动组 ( $p < 0.001$ )、VR 认知组 ( $p < 0.001$ ) 与对照组 ( $p < 0.001$ ) ; 而 VR 认知组、VR 运动组与对照组并未表现出显著差异 ( $p \geq 0.05$ ) ; VR 运动-认知双任务组, 时间主效应显著 $[F_{(1, 116)} = 33.22, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.22]$ , 干预后脑激活显著低于干预前 ( $p < 0.001$ ) ; VR 运动组, 时间主效应不显著 $[F_{(1, 116)} = 0.29, p = 0.591, \eta_p^2 = 0.02]$ , VR 认知组, 时间主效应不显著 $[F_{(1, 116)} = 2.06, p = 0.154, \eta_p^2 = 0.02]$ , 对照组时间主效应不显著 $[F_{(1, 116)} = 0.05, p = 0.833, \eta_p^2 = 0.01]$ , 三个组干预前后并未表现出显著差异。

左侧初级运动皮层 (L-M1)、右侧眶额区 (R-OFC)、左侧眶额区 (L-OFC)、右侧体感联合皮层 (R-SAC)、左侧体感联合皮层 (L-SAC) 时间主效应、组别主效应以及二者的交互效应均不显著。

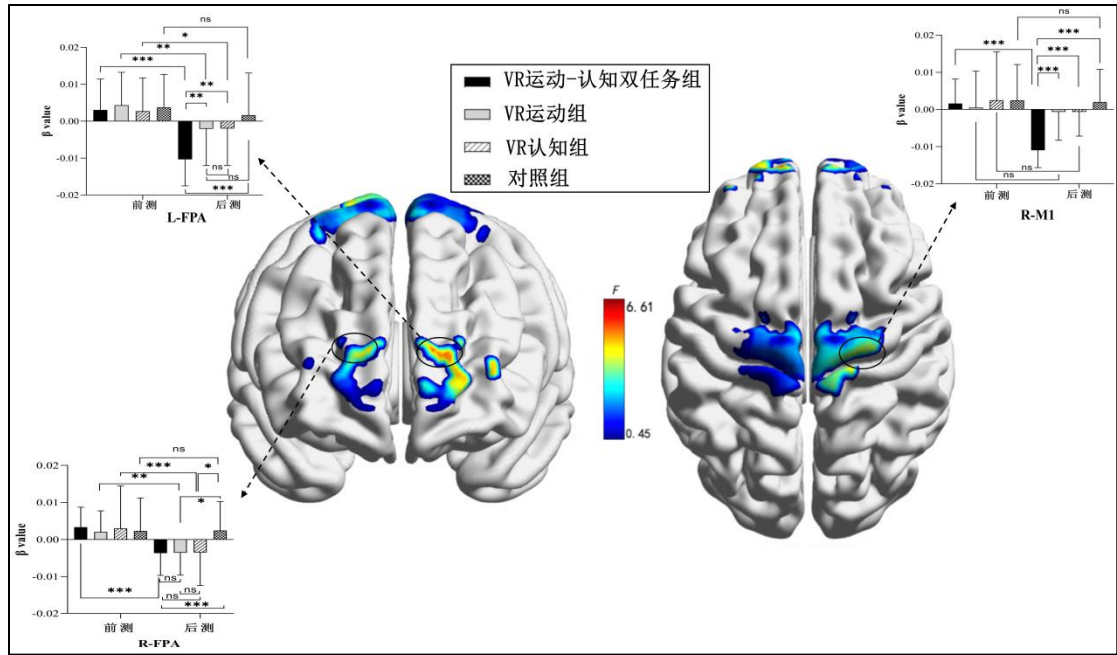


图 6 组别与时间交互效应脑区激活图

### 3.3 基于机器学习的神经模式差异分析

采用随机森林模型，基于 8 个 ROI 的基线激活水平及其干预前后的变化量 ( $\Delta$ 值) 所构建的 16 维神经特征集，用于区分干预组与对照组。表 4 中呈现了三个分类任务之性能指标值，关键特征重要性排序则见于图 7 至图 10。

表4 不同干预组与对照组神经模式分类的模型性能及关键特征比较

组别	准确率	AUC	精确率	召回率	F1分数	重要特征	重要性权重
对照组 vs 认知组	0.82	0.83	0.83	0.80	0.81	Delta_R-FPA/ Delta_L-FPA	0.15/0.13
对照组 vs 运动组	0.65	0.66	0.66	0.63	0.64	Delta_L-FPA/ Pre_R-FPA	0.14/0.07
对照组 vs 运动-认知 双任务组	0.80	0.79	0.78	0.83	0.81	Delta_L-FPA Delta_R-M1	0.23/0.15

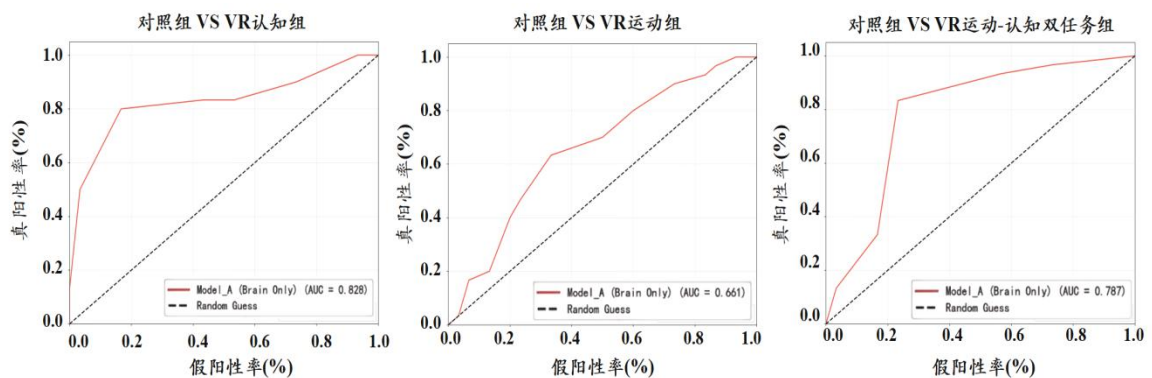


图7 不同干预组与对照组分类模型的ROC曲线对比

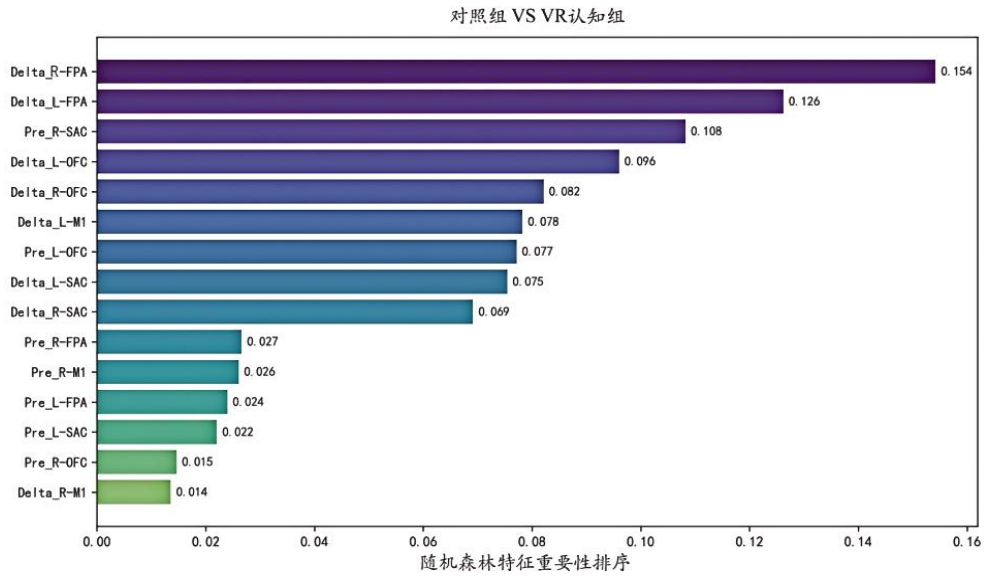


图8 对照组与认知组分类模型中各脑区特征的重要性排序

对照组 vs. VR 认知组：模型分类准确率为 82%，AUC 值为 0.83，表明模型能有效区分两组。最具判别力的神经特征为左侧额极区 (Delta\_L-FPA) 和右侧额极区 (Delta\_R-FPA) 的激活变化量。

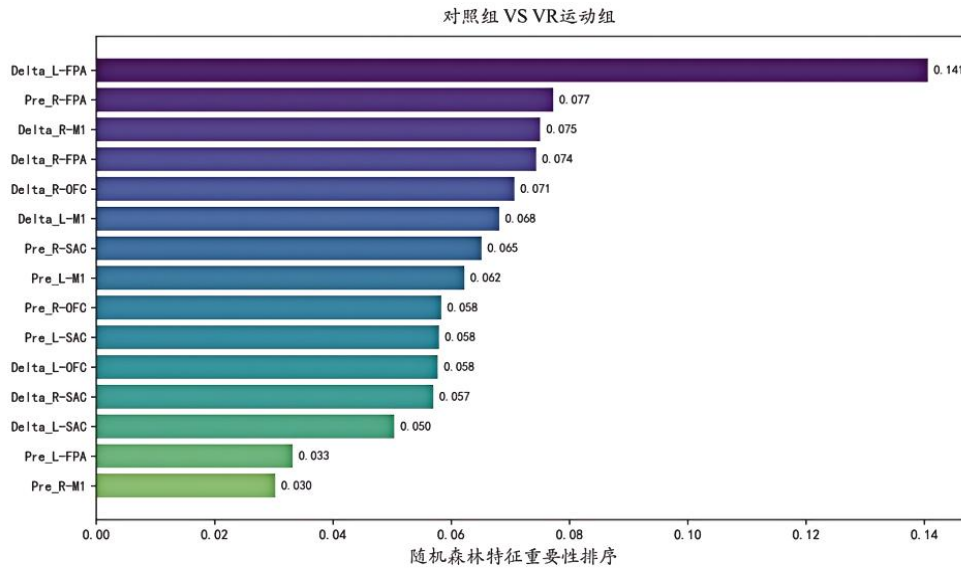


图9 对照组与运动组分类模型中各脑区特征的重要性排序

对照组 vs. VR 运动组：模型分类准确率为 65%，AUC 值为 0.66，性能相对较低，表明单纯运动干预诱发的神经模式与控制组的可区分度有限。最重要的特征仍为 Delta\_L-FPA 和 Pre\_R-FPA。

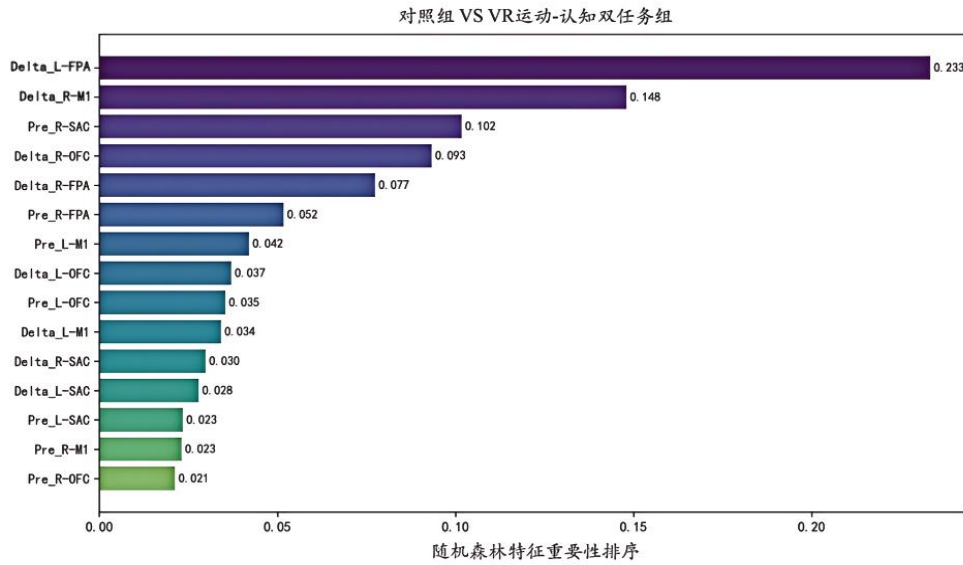


图 10 对照组与运动-认知双任务组分类模型中各脑区特征的重要性排序

对照组 vs. VR 运动-认知双任务组：模型分类准确率达到 80%，AUC 值为 0.79，表现出强大的区分能力。最关键的特征转变为右侧初级运动皮层（Delta\_L-FPA）的激活变化量，其次为左侧额极区（Delta\_R-M1）。这一特征重要性模式与单一任务组截然不同，提示双任务训练塑造了独特的、融合运动与认知成分的神经活动模式。

## 4 讨论

研究通过结合行为测量、fNIRS 脑功能成像与机器学习方法，系统探讨了 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促进效益及其神经可塑性机制。行为结果表明，所有干预组在经过 8 周训练后，其空间视觉化能力均得到显著提升，且 VR 运动-认知双任务组的改善幅度显著优于两个单一任务组，而两个单一任务组又均显著优于无干预对照组。这一发现有力地支持了本研究的基本假设，即整合身体运动与认知加工的双任务同步训练模式，在提升空间能力方面具有独到的优势。

行为层面的优势可归因于训练模式与具身认知理论的高度契合。本研究自主研发的 VR 训练系统，为具身认知的实现提供了理想载体，它不仅模拟视觉空间，更支持用户通过身体动作进行实时导航、操作与反馈，从而在感知与行动之间建立起紧密的耦合循环。VR 运动-认知双任务干预通过将原地跑步驱动的虚拟位移与空间导航认知任务进行实时同步，在运动中完成地图识别、路线规划等定向导航的认知加工，实现了身体行动与认知操作的深度耦合（刘阳，何劲鹏，2016），这种“运动-认知”交互同步训练能够不断强化对空间关系的理解和三维物体的心理操纵能力。具体而言，在目标搜索阶段，练习者需确定目标点地图方位并依据实地朝向在脑中旋转地图视角，在认知地图构建阶段，移动中的方向变化促使地物

在心理地图中的位置随视角旋转 (Meilinger et al., 2016), 在图景表征阶段, 参与者需将实地看到的地物和地图符号对应, 并根据自身所处位置及其朝向进行空间表征的调整 (温锐 等, 2016; 郭丽敏 等, 2024)。视觉、本体感觉与前庭觉等多模态感觉信息的高效整合与实时更新被大脑所执行, 这种“行动中的认知”现象使得空间工作记忆及其心理表征的灵活性得到显著增强。仅沿固定路线进行跑步操作的 VR 运动组, 其高级认知参与程度明显不足。通过手柄实现移动操作的 VR 认知组, 则存在着关键躯体运动反馈的缺失。“身体-认知”系统整体效能的优化可能来源于双任务训练的行为增益效应, 这与具身认知理论的核心观点相呼应 (Erickson et al., 2011)。

在神经层面, 本研究通过 fNIRS 所揭示的脑激活模式, 为不同训练模式的独特效益提供了实证依据。最为显著且特异的神经可塑性变化在 VR 运动-认知双任务训练中被诱发出来, 干预后 R-FPA、L-FPA 及 R-M1 的激活水平出现显著降低。L-FPA 和 R-M1 的激活水平相较于 VR 运动组与 VR 认知组具有更大幅度的下降, 这一现象尤为值得关注。机器学习模型的解码结果显示, 对照组与 VR 运动-认知双任务组的神经活动模式具有高度可区分性特征, 其中 R-M1 与 L-FPA 的活动变化量被识别为最具判别力的分类特征。虽然在干预后 VR 运动组与 VR 认知组在 R-FPA 和 L-FPA 的激活显著降低, 但其变化幅度相对较小, 且机器学习模型识别出的最关键分类特征仍集中于 FPA 的活动变化。Haier 等人 (1988) 提出的神经效能假说在本研究结果中得到验证, 经过高效训练的个体能够以更低水平的认知资源消耗完成相同难度的认知任务。更广泛的脑区激活降低现象及更优的神经模式区分度在 VR 运动-认知双任务组中得以体现, 实例表明该训练模式带来的神经效率提升效果显著。其内在机制可能在于, 该训练所特有的同步性认知需求, 如实时路线规划、地图识别和空间工作记忆更新, 对大脑提出了更高的信息处理要求 (刘阳, 唐思洁, 2022)。这些持续性的复杂认知挑战促进了相关神经回路的功能优化与重组过程, 实现了更经济、更高效的神经资源募集模式 (Bao et al., 2022)。定向运动员群体的研究结果与此发现高度一致 (易妍 等, 2022), 表明长期的运动-认知整合练习能够塑造更高效的神经资源利用模式。

从特定脑区的功能视角进行深入阐释, 前额叶皮层特别是其额极区, 在高级认知活动中占据重要位置, 涵盖决策制定、问题解决和注意力控制等 (Feizpour et al., 2024; Moriguchi et al., 2013)。其中信息整合过程、逻辑推理机制以及错误监控功能主要由 FPA 这一前额叶关键子区域负责, 该区域同时与工作记忆的维持和更新过程存在显著关联性 (Miller et al., 2001)。在完成心理旋转任务时, FPA 对多脑区信息的整合及认知控制功能的实现至关重要, 这一过程进而促进了连贯的空间环境认知表征形成 (Matthäus et al., 2012)。与此同时,

R-M1 负责整合视觉空间信息与躯体本体感觉信号，在构建三维空间表征方面发挥着核心作用。该整合功能与心理旋转任务的神经基础具有直接关联，心理旋转依赖于感觉运动模拟机制，在神经层面整合了视觉空间加工与运动表征过程（Bhattacharjee et al., 2020）。据此可推知，R-M1 所承担的多模态信息整合功能，为心理旋转过程中的空间表征构建提供了必要的神经基础。此外，大脑功能存在半球偏侧化现象，左半球主导线性思维、语言处理及逻辑推理功能，而右半球更擅长空间感知任务与图像处理过程。心理旋转任务中观察到的左右半球激活差异可能与此相关（Corballis, 1997）。综上所述，VR 运动-认知双任务组之所以能诱导出高度特异且易于辨识的神经活动模式，其核心机制在于该训练模式实现了“认知调控”系统与“空间整合”系统的同步深度激活优化。FPA 与 R-M1 两大功能系统由此形成了高效协同的工作网络架构。相比之下，单一模式训练仅能主要依赖其中某一系统运作，其诱导的神经模式在独特性维度上表现相对有限。

本研究从神经机制层面揭示了 VR 运动-认知双任务训练提升空间视觉化能力的有效路径，为“身体-认知整合”理论提供了多模态证据支持，也为发展基于客观神经标志物的精准认知训练范式奠定了方法学基础。然而，作为一种技术辅助手段，VR 训练仍存在固有限局，部分受试者在长时间训练中可能出现轻微晕动症或视觉疲劳，影响训练体验；同时，虚拟环境与真实场景在感知-行动层面存在差异，训练所得技能能否迁移至日常生活情境，尚待验证。此外，硬件成本较高的问题同样制约该干预方案在临床或社区中的广泛推广。需要指出的是，本研究仅验证了特定双任务范式的短期效果，其长期持续性及对现实场景的迁移效应尚需后续研究进一步追踪考察。且 fNIRS 技术的空间分辨率存在固有限局，信号主要反映大脑皮层活动，深部脑区功能变化难以精准定位与解析。未来可从以下方面进一步深化和拓展：首先，可着重深化研究的生态效度与迁移效应检验，系统探讨不同环境背景下“运动-认知”交互作用的边界条件，从而全面评估该训练模式的现实适用性与推广价值。其次，在技术方法上，可尝试整合功能磁共振成像、眼动、脑电等多模态技术，与 fNIRS 形成互补，从而更全面地覆盖大脑空间认知网络，特别是加强对全脑功能连接状态与动态加工过程的深入考察。

## 5 结论

VR 运动-认知双任务训练能有效提升低空间能力者的空间视觉化能力，其行为效益显著优于单一的 VR 运动训练或 VR 认知训练。伴随着神经效率的优化过程，行为效益得以显现，具体表现为 R-M1 与 L-FPA 激活程度的明显下降。感觉-运动整合系统与认知控制过程的自动化水平提高。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，

L-FPA在三个实验组中均被识别为关键特征，反映干预训练的普遍神经变化；而R-M1仅在VR运动-认知双任务组被稳定识别且权重最高，是该组特有的关键生物标志物。这表明双任务训练塑造了一种高度特异、可被量化的“运动-认知”协同神经模式，从计算层面证实了身体与认知在神经表征中的深度融合。本研究从行为、脑机制到计算特征三个层面，系统揭示了VR运动-认知双任务训练提升空间能力的积极作用与神经基础，为构建基于“身体-认知”整合理论的精准认知干预方案提供了坚实的实证依据与方法学支持。

## 参考文献

- Bao, S., Liu, J., & Liu, Y. (2022). Shedding light on the effects of orienteering exercise on spatial memory performance in college students of different genders: An fNIRS study. *Brain Sciences*, 12(7), Article 852. <https://doi.org/10.3390/brainsci12070852>
- Beanato, E., Moon, H. J., Windel, F., Vassiliadis, P., Wessel, M. J., Popa, T., ... Hummel, F. C. (2024). Noninvasive modulation of the hippocampal-entorhinal complex during spatial navigation in humans. *Science Advances*, 10(44), eado4103. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ado4103>
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B: Methodological*, 57(1), 289–300.
- Bhattacharjee, S., Kashyap, R., Abualait, T., & Chen, S. H. A. (2020). The role of primary motor cortex: More than movement execution. *Journal of Motor Behavior*, 53(2), 252–264.
- Bruce, A. S., Howard, J. S., Van Werkhoven, H., McBride, J. M., & Needle, A. R. (2020). The effects of transcranial direct current stimulation on chronic ankle instability. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 52(2), 335–344.
- Corballis, M. C. (1997). Mental rotation and the right hemisphere. *Brain and Language*, 57(1), 100–121.
- Dahmani, L., & Bohbot, V. D. (2020). Habitual use of GPS negatively impacts spatial memory during self-guided navigation. *Scientific Reports*, 10, 6310. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62877-0>
- Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., & Kramer, A. F. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(7), 3017–3022.
- Islam, F., Bright, Z., Chen, M. H., Zhan, L., & Shi, C. (2026). Evaluating the effect of immersive virtual reality technologies on cognitive load, situation awareness, and engagement using eye movements. *Applied Ergonomics*, 134, 104720. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2025.104720>
- Fabre, C., Chamari, K., Mucci, P., Massé-Biron, J., & Préfaut, C. (2002). Improvement of cognitive function by mental and/or individualized aerobic training in healthy elderly subjects. *International Journal of Sports Medicine*, 23(6), 415–421.
- Feizpour, A., Buckley, M. J., Mundinano, I. C., Rosa, M., & Mansouri, F. A. (2024). The role of frontopolar cortex in adjusting the balance between response execution and action inhibition in anthropoids. *Progress in Neurobiology*, 241, 102671. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2024.102671>
- Feng, T., Li, Y. W., & Zhang, Z. Q. (2021). Temporal embodiment and time course of event-related brain potentials in diving athlete's mental rotation. *Journal of Beijing Sport University*, 44(2), 105–115.
- [冯甜, 李亚伟, 张忠秋. (2021). 跳水运动员心理旋转的时间具身效应及脑加工时程特征. *北京体育大学学报*, 44(02), 105–115.]
- Fishburn, F. A., Norr, M. E., Medvedev, A. V., & Vaidya, C. J. (2014). Sensitivity of fNIRS to cognitive state and load. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 73786. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00076>
- Gu, Q., Mao, J., Huang, T., & Sun, J. H. (2023). Effects of immersive virtual reality exergaming on executive function among young adults: The role of exercise intensity in exergaming. *China Sport Science and Technology*, 59(12), 35–43.
- [谷倩, 茅洁, 黄涛, 孙晋海. (2023). 沉浸式虚拟现实游戏对青年人执行功能的影响: 游戏中运动强度的作用. *中国体育科技*, 59(12), 35–43.]
- Guo, C., Ding, D., Zheng, L., & Tang, C. (2023). Study on the mental rotation ability of orienteering

- expert–novice from the perspective of embodied cognition. *Journal of Beijing Sport University*, 46(9), 106–117.
- [郭程,丁道群,郑澜,汤长发.(2023).具身认知视角下定向运动专家-新手心理旋转能力的研究.北京体育大学学报,46(09),106–117.]
- Guo, L. M., Yang, W. L., & Liu, Y. (2023). Study on visual search features of picture recognition of orienteers in realistic scenes. *China Sport Science and Technology*, 59(11), 24–31.
- [郭丽敏,杨万兰,刘阳.(2023).定向运动员现实场景图景识别的视觉搜索特征研究.中国体育科技,59(11),24–31.]
- Haier, R. J., Siegel, B. V., Nuechterlein, K. H., Hazlett, E., Wu, J. C., Paek, J., ... Buchsbaum, M. S. (1988). Cortical glucose metabolic rate correlates of abstract reasoning and attention studied with positron emission tomography. *Intelligence*, 12(2), 199–217.
- Hu, F. F., Zhang, W., Zhao, M. S., & Liu, Y. (2025). Influence of exercise intensity and task difficulty on image recognition decisions of orienteers: Evidence from fNIRS. *Journal of Capital University of Physical Education and Sports*, 37(1), 105–115.
- [胡芳芳,张文,赵明生,刘阳.(2025).运动强度和任务难度对定向运动员识图决策的影响——来自fNIRS的证据.首都体育学院学报,37(01),105–115.]
- Ishikawa, T., & Zhou, Y. (2020). Improving cognitive mapping by training for people with a poor sense of direction. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 5(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s41235-020-00238-1>
- Jarrin, F., Koga, Y., Thomas, D., & Kawasaki, H. (2024). Virtual reality-based site layout planning for building design. *Automation in Construction*, 167, Article 105690. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105690>
- Ju, C. T., & You, X. Q. (2013). Spatial ability tests and their research applications. *Psychological Science*, 36(2), 463–468.
- [鞠成婷,游旭群.(2013).空间能力测验及其研究应用.心理科学,36(02),463–468.]
- Kim, D. H., Lee, K. D., Bulea, T. C., & Park, H. S. (2022). Increasing motor cortex activation during grasping via novel robotic mirror hand therapy: A pilot fNIRS study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 19(1), Article 8. <https://doi.org/10.1186/s12984-022-00988-7>
- [李寿欣,周颖萍.(2006).个体认知方式与材料复杂性对视空间工作记忆的影响.心理学报,38(4),523–531.]
- Li, S. X., & Zhou, Y. P. (2006). The Influence of Individual Cognitive Style and Material Complexity on Visuo-Spatial Working Memory. *Acta Psychologica Sinica*, 38(4), 523–531.
- Liu, Y., & He, J. P. (2016). Psychological interpretation and reflection on specialized cognitive skills in orienteering. *Liaoning Sport Science and Technology*, 38(5), 64–69.
- [刘阳,何劲鹏.(2016).定向运动专项认知技能的心理诠释与思考.辽宁体育科技,38(05),64–69.]
- Liu, Y., & Tang, S.J. (2022). Research on the influence of map-reading methods and maps difficulty on orienteers' map-reading decision performance and visual search characteristics. *psychological Science*(06), 1314–1321.
- [刘阳,唐思洁.(2022).识图方式与地图难度对定向运动员识图决策绩效与视觉搜索特征的影响.心理科学,45(06),1314–1321.]
- Liu, Y., Liu, Z. H., & Chen, L. X. (2025). Impact of VR immersive acute aerobic exercise on depression in female college students and characteristics of neural activities. *Journal of Beijing Sport University*, 48(4), 139–156.
- [刘阳,刘知和,陈丽霞.(2025).VR沉浸式急性有氧运动对女大学生抑郁的影响及神经活动特征.北京体育大学学报,48(04),139–156.]
- Lu, N. (2023). *The influence of landmark presentation methods in shopping mall maps on wayfinding behavior of individuals with high and low spatial abilities*(Unpublished master's thesis). Tianjin Normal University.

- [卢娜. (2023). 商场导览图地标呈现方式对高低空间能力者寻路行为的影响 (硕士学位论文). 天津师范大学.]
- Liu, S. F., Zhang, X. Y., Lu, Y., Qin, S. S., Yin, S. H., & Yin, S. H. (2024). The enhancing effect of cognitive training on spatial navigation: Spatial anxiety as a mediator. *Journal of Psychological Science*, 47 (6), 1305–1316.
- [刘赛芳, 张昕祎, 陆莹, 秦珊珊, 尹首航, 尹首航. (2024). 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. *心理科学*, 47 (6), 1305–1316.]
- Matthäus, F., Schmidt, J.-P., Banerjee, A., Schulze, T. G., Demirakca, T., & Diener, C. (2012). Effects of age on the structure of functional connectivity networks during episodic and working memory demand. *Brain Connectivity*, 2(3), 113–124.
- Mcgee, M. G. (1979). Human spatial abilities: psychometric studies and environmental, genetic, hormonal, and neurological influences. *Psychological Bulletin*, 86(5), 889. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.86.5.889>
- Meilinger, T., Frankenstein, J., Simon, N., Bühlhoff, H. H., & Bresciani, J.-P. (2016). Not all memories are the same: Situational context influences spatial recall within one's city of residency. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(1), 246–252.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 167–202.
- Moriguchi, Y., & Hiraki, K. (2013). Prefrontal cortex and executive function in young children: A review of NIRS studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 1–9.
- Pan, J. J., Jiao, X. J., Jiang, J., Xu, F.G., & Yang, H. J. (2014). Mental workload assessment based on functional near-infrared spectroscopy. *Acta Optica Sinica* (11), 344–349.
- [潘津津, 焦学军, 姜劲, 徐凤刚, 杨涵钧. (2014). 利用功能性近红外光谱成像方法评估脑力负荷. *光学学报*, 34(11), 344–349.]
- Perpetuini, D., Cardone, D., Filippini, C., Chiarelli, A. M., & Merla, A. (2021). A motion artifact correction procedure for fNIRS signals based on wavelet transform and infrared thermography video tracking. *Sensors*, 21(15), 5117. <https://doi.org/10.3390/s21155117>
- Pietsch, S., & Jansen, P. (2018). Laterality-specific training improves mental rotation performance in young soccer players. *Frontiers in Psychology*, 9, 220. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00220>
- Qiu, T., Hameed, N. U. F., Peng, Y., Wang, S., Wu, J., & Zhou, L. (2019). Functional near-infrared spectroscopy for intraoperative brain mapping. *Neurophotonics*, 6 (4), 0450. <https://doi.org/10.1117/1.NPh.6.4.045010>
- Quan, W. X., Bai, Y. F., Dong, W.T., Tian, J., & Yang, S. Z. (2012). Normal frontotemporal oxygenated hemoglobin level detection by near-infrared imaging. *Journal of China Medical University* (11), 1044–1046.
- [权文香, 白云峰, 董问天, 田菊, 杨淑珍. (2012). 近红外光成像技术检测认知任务期间正常额叶氧合血红蛋白水平的变化. *中国医科大学学报*, 41(11), 1044–1046.]
- Serino, S., Pedroli, E., Tuena, C., De Leo, G., Stramba-Badiale, M., Goulene, K., ... Riva, G. (2017). A novel virtual reality-based training protocol for the enhancement of the “Mental Frame Syncing” in individuals with Alzheimer's disease: A development-of-concept trial. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 9,

240.<https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00240>

Shan, X. Z. (2011). Establishment and application of orienteering technique groups. *Journal of Xi'an Physical Education University*, 28(3), 381–384.

[单小忠.(2011).定向运动技术群的构建及应用. *西安体育学院学报*,28(03),381–384.]

Morioka, S., Yamada, M., & Komori, T.(2008).Frontal Lobe Activity during the Performance of Spatial Tasks: fNIRS Study. *Journal of Physical Therapy Science*, 20(2),135–139.

Solares, L., García Navarra, S., Llana, T., Garces Arilla, S., & Mendez, M. (2025). Immersive technologies targeting spatial memory decline: A systematic review. *Biomedicines*, 13(9).<https://doi.org/10.3390/biomedicines13092105>

Sun, H., Liu, Z., Hu, F., & Liu, Y. (2026). A study on the effectiveness of immersive VR boxing games in improving depression levels among female college students with elevated depressive symptoms. *Psychology of Sport and Exercise*, 85, 103128.<https://doi.org/10.1016/j.psychsport.2026.103128>

Tiwari, S., Shah, B., & Muthiah, A. (2024). A global overview of SVA: Spatial–visual ability. *Applied System Innovation*, 7(3), 48.<https://doi.org/10.3390/asi7030048>

Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*,47(2), 599–604.<https://doi.org/10.2466/pms.1978.47.2.599>

Weeks, A. V. (2015). *The effect of medium term physical activity interventions on cognitive function and indices of cardiovascular health in overweight and obese adults* (Doctoral dissertation, University of Leeds). Retrieved June 3, 2025, from <https://etheses.whiterose.ac.uk/12193/>

Waddington, E. E., & Heisz, J. J.(2023).Orienteering experts report more proficient spatial processing and memory across adulthood. *PLoS one*,18(1),e0280435–e0280435.<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280435>

Wen, R., Ma, J., Zhu, Y., & Hu, J. (2016). Research on spatial cognition and design expression of orienteering map. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 39(5), 23–26.

[温锐,马京振,朱燕,胡健健.(2016).定向运动地图的空间认知和设计表达研究. *测绘与空间地理信息*,39(05),23–26.]

Yi, Y., Liu, J. R., Zhang, Y., Tang, S. J., & Liu, Y. (2022). Behavioral performance and brain processing characteristics of orienteering athletes' mental rotation ability under different cognitive load conditions. *Journal of physical Education* (02), 136–144.

[易妍,刘静如,张言,唐思洁,刘阳.(2022).不同认知负荷条件下定向运动员心理旋转能力的行为绩效及脑加工特征. *体育学刊*,29(02),136–144.]

Yin, C. Y., Shi, L., Zhang, W., & Liu, Y. (2024). The effect of orienteering exercises on the spatial orienteering ability for college students: evidence from the behavioral science and fNIRS. *Journal of physical Education* (05), 135–142.

[殷春宇,史利,张文,刘阳.(2024).定向运动练习对大学生空间定向能力的影响：来自行为学和 fNIRS 的证据. *体育学刊*,31(05),135–142.]

Zhao, Y. T. (2021). *The relation of wayfinding strategy and spatial navigation, and Influencing factors of wayfinding strategy* (Unpublished doctoral dissertation), Northeast Normal University, Changchun.

[赵悦彤.(2021).寻路策略与空间导航的关系及寻路策略的影响因素 (博士学位论文). 东北师范大学, 长春.]

Zheng, J. L., Wu, Y. M., Shu, S. Y., Liu, S. H., Guo, Z. Y., Bao, X. M., & Ma, H. Z. (2008). Role of the parietal

lobes in cognition of the spatial memory in healthy volunteers. *Tianjin pharmaceutical* (02), 81–83.

[郑金龙,吴永明,舒斯云,刘颂豪,郭周义,包新民,马翰章.(2008).人脑顶叶在空间记忆认知功能中的作用.天津医药,(02),81–83.]

## The Impact of Virtual Reality Motor–Cognitive Dual-Task Training on Individuals with Poor Spatial Visualization Ability: Evidence from Behavioral and fNIRS Studies

LIU Yang, HU Fangfang, SUN Hao

(Physical Education School of Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

### Abstract

Spatial visualization is a core component of spatial cognition. Compared with traditional cognitive training, novel interventions that integrate physical activity with cognitive processing offer new directions for enhancing special visualization, particularly for individuals with poor spatial ability. However, there is currently a lack of behavioral and neural evidence empirically assessing the effectiveness of these interventions.

The aim of this study was to investigate the facilitative effects and neuroplasticity mechanisms of virtual reality (VR)-based motor–cognitive dual-task training on the spatial visualization ability of individuals with poor spatial ability. A two-factor mixed experimental design was adopted with four groups (VR motor-cognitive dual-task, VR motor, VR cognitive, control) and two time points (pre- and post-intervention). Using the Santa Barbara Sense of Direction Scale (SBSOD), 120 college students with poor spatial ability (SBSOD < 3) were screened and randomly assigned to one of the four groups (n = 30 each). All intervention groups underwent an 8-week training program. Spatial visualization ability was measured using a mental rotation task, while functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) was used to record changes in prefrontal–parietal network activation before and after the intervention. A random forest machine learning model was then applied to identify the discriminative features of the neural patterns.

The key findings were as follows: (1) At the behavioral level, the VR dual-task group significantly outperformed the other three groups on post-test measurements of spatial visualization. No significant difference was observed between the two single-task training groups, but both performed significantly better than the control group. (2) At the neural level, the VR dual-task group exhibited the highest neural efficiency, with significantly lower activation levels in the left frontopolar area (L-FPA) and right primary motor cortex (R-M1) after the intervention compared with the other three groups. Those in the dual-task group also showed the greatest reduction in activation from pre- to post-test. In contrast, although the right frontopolar area showed significantly lower activation in all three intervention groups relative to the control group,

no significant differences were observed among the three intervention groups. (3) The machine learning model further validated that the neural activity patterns of the VR motor–cognitive dual-task group were highly separable from those of the control group. Changes in R–M1 and L–FPA activity were the most discriminative features.

In conclusion, VR-based motor–cognitive dual-task training can significantly improve spatial visualization ability in individuals with poor spatial ability by synergistically optimizing neural efficiency in the prefrontal and motor cortices. This study provides multimodal evidence for the “body–cognition integration” theory and establishes a methodological foundation for precision intervention paradigms based on neural markers.

**Keywords** virtual reality, motor–cognitive dual-task training, poor spatial ability, spatial visualization, fNIRS, machine learning