

·运动人体科学·

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

殷春宇¹，史利²，张文³，刘阳^{3,4}

(1.西北大学 体育教研部，陕西 西安 710127；2.陕西青年职业学院 公共课教研部，陕西 西安 710100；
3.陕西师范大学 体育学院，陕西 西安 710119；4.陕西师范大学 运动学习科学重点实验室，陕西 西安 710119)

摘要：探讨定向运动练习对大学生空间定向能力的影响及其脑机制，为提升人的空间认知能力提供新途径和科学依据。以48名大一学生为研究对象，随机分为实验组和对照组，对实验组进行8周定向运动练习干预，采用功能性近红外光谱成像系统(fNIRS)记录被试者大脑氧合血红蛋白(Oxy-Hb)浓度变化，分析被试者干预前后空间定向认知任务的行为表现及神经机制。结果表明：(1)定向运动练习显著提升练习者空间定向认知任务的正确率且显著优于对照组。(2)在空间定向任务中，实验组左侧腹外侧前额叶(L-VLPFC)和左侧背外侧前额叶(L-DLPFC)的Oxy-Hb激活显著降低且低于对照组。(3)实验组腹外侧前额叶(VLPFC)的Oxy-Hb浓度与正确率显著相关。研究认为，定向运动练习可以有效改善练习者的空间定向认知能力，且空间定向能力的改善效益与大脑前额叶皮层激活程度有关。定向运动练习改善练习者空间定向能力的脑机制可能是通过改变练习者的空间认知加工模式，从而促进其脑神经活动的优化。

关键词：定向运动；认知功能；空间定向；功能性近红外光谱成像系统
中图分类号：G826 文献标志码：A 文章编号：1006-7116(2024)05-0135-08

The effect of orienteering exercises on the spatial orienteering ability for college students: Evidence from the behavioral science and fNIRS

YIN Chunyu¹, SHI Li², ZHANG Wen³, LIU Yang^{3,4}

(1.Department of Physical Education, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2.Public Courses Teaching and Research Department, Shaanxi Youth Vocational College, Xi'an 710100, China; 3.School of Physical Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 4.Key Laboratory of Motor Learning Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: To investigate the impact of orienteering exercise on college students' spatial orientation ability and its brain mechanism, so as to provide new approaches and scientific evidence for enhancing human spatial cognitive ability. A total of 48 freshmen were recruited and randomly divided into an experimental group and a control group. The experimental group underwent an 8-week orienteering exercise intervention, and the functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) system was used to record changes in the concentration of oxyhemoglobin (Oxy-Hb) in the subjects' brains, and the behavioral performance and neural mechanisms of spatial orientation cognitive tasks for subjects before and after the intervention were analyzed. Results showed that (1) orienteering exercise significantly improved the accuracy of spatial orientation cognitive tasks in the participants, and also significantly outperforming the control group. (2) During spatial orientation tasks, the Oxy-Hb activation in the left ventrolateral prefrontal cortex (L-VLPFC) and left dorsolateral prefrontal cortex (L-DLPFC) for the experimental group was significantly

收稿日期：2023-12-29

基金项目：教育部人文社会科学规划基金项目(23YJAZH087)；陕西省社会科学基金项目(2022003)；西安市社会科学基金项目(24TY15)。

作者简介：殷春宇(1981-)，男，副教授，研究方向：体育教学与训练。E-mail: 1451638@qq.com 通信作者：刘阳

reduced, and lower than that of the control group. (3) The Oxy-Hb concentration in the ventrolateral prefrontal cortex (VLPFC) for the experimental group was significantly correlated with accuracy. The conclusion suggests that orienteering exercise can effectively improve the spatial orientation cognitive ability of participants, and the benefit of improved spatial orientation ability is related to the activation level of the prefrontal cortex. The brain mechanism underlying the improvement of spatial orientation ability through orienteering exercise may involve changes in the spatial cognitive processing patterns of participants, and thereby promoting the optimization of brain neural activity.

Keywords: orienteering; cognitive function; spatial orientation; functional near-infrared spectroscopy (fNIRS)

空间认知能力是人的基本认知能力^[1],是产生、搜索、保持和处理视觉空间信息的能力,在人们的日常生活中具有不可或缺的作用。如运动、寻路和科学技术及数学领域^[2],能够帮助人们在不同的空间环境中认识自己的位置和方向,并在往返于不同地点时保持空间感^[3]。关注个体空间能力的改善,探索提升空间认知能力的有效手段已经成为多学科领域研究者关注的前沿热点^[4]。

空间定向是指个体在所处环境中正确辨识方向的空间认知能力^[5],帮助个体正确辨认自己所在位置与周围环境的关系以及相互间的空间关系,是人对自己在空间的位置和运动方向的判断及再认^[6]。日常生活中,人们常常借助地图或导航系统完成寻路任务,当地图与环境不一致时需借助指南针或地图与实景信息进行匹配,从而完成空间定向、明确前进方向^[7]。空间定向认知过程是由视觉、前庭觉、本体感觉及感觉通道传来的空间信息,经过大脑加工处理形成的。有研究发现空间定向能力与个体的心理旋转、地图认知和图景表征能力显著相关^[8]。因此,本研究以三维场景为原图、不同方向的二维地图为选择项,设计空间定向测试任务,考察个体判断不同方向地图与现实场景匹配的空间定向能力。

研究表明,体育锻炼与认知方面之间存在正相关关系^[9],体育锻炼对青少年以及老年人空间认知能力的形成和增强有着促进作用^[10-11]。脑可塑性假说提出,心理现象都是以大脑的活动为基础的,运动产生的认知改善是运动引起脑激活模式改变的结果^[12-13]。现有关于空间定向能力的改善多以老年人或脑部受损的患者为研究对象^[14],而大学生处于成年早期,脑可塑性仍有发展空间。此外,不同运动方案对空间定向能力的提升也可能存在差异^[15-17]。这提示,选择适合个体空间定向能力改善的运动方式十分必要。定向运动是一项借助于地图和指北针导航在最短时间内完成比赛的有氧运动项目^[18-19]。在定向运动过程中,参赛者需要在环境中不断地变换方位并且寻找正确行进方向从而到达目标地,完成比赛任务。相较于其他运动项目,定向运动员具有较强的空间智能优势,具体表现为空

间定向能力、空间旋转能力等^[20]。宿凯娟^[21]、鲍圣彬等^[22]对中班幼儿园的儿童进行定向运动练习,发现定向运动对儿童的空间定向能力有着较好的促进作用。目前相关研究多为行为学效益的分析,普遍缺乏改善机制的探索,而揭示定向运动项目对个体空间定向能力的影响效果及脑机制,能够为提升个体空间能力提供新的科学依据与干预路径。

近年来功能性近红外光谱成像系统(fNIRS)在运动领域的应用越来越广泛,在篮球^[23]、太极拳^[24]、乒乓球^[25]和有氧运动^[26]等方面都有一定的进展与突破,具有可移动性且没有噪音、操作与维护也很便捷、很少被受试者限制、适用范围广等优势。前额叶(PFC)在认知过程中扮演着重要角色,有研究证实在空间定向任务与大脑皮质的前额叶的功能相关^[27-28]。PFC是接收来自大脑其他功能区的经过处理的外部信息,然后整合记忆、意图等大脑信息立即作出合理的计划区域^[29],背外侧前额叶(DLPFC)和腹外侧前额叶(VLPEC)作为PFC的主要功能区,在与运动认知相关的脑功能中发挥着重要作用,并对于空间定向判断等定向任务具有重要意义。所以基于已有研究,本研究选取DLPFC和VLPEC作为兴趣区(Region of interesting, ROI)进行探究定向运动练习对大学生空间定向能力的影响,从大脑认知的角度探求定向运动对空间定向能力的影响机制,同时提出以下研究假设:(1)定向运动练习能有效改善练习者的空间定向能力;(2)受试者在空间定向任务中的行为表现与前额叶脑血氧浓度之间存在相关性,表现出激活区域的差异。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

招募大一学生48人(男24、女24),随机分为实验组24人(男12、女12),年龄(18.16±1.01)岁,对照组24人(男12、女12),年龄(18.63±0.68)岁,两组年龄无显著性差异($P>0.05$)。所有受试者裸眼视力或矫正视力正常,皆为右利手,无精神疾病史,能够熟知键盘按键位置,均未参加过类似实验,实验前均征得受试者同意。该研究已得到陕西师范大学伦理委员会批准。

1.2 实验设计及流程

1) 实验设计。

本研究采用 2(组别: 实验组、对照组) × 2(时间: 前测、后测) 的双因素混合实验设计。实验前让受试者填写基本情况调查表, 记录受试者的性别、年龄等基本情况。在实验前受试者熟悉环境和实验相应要求, 知悉注意事项, 实验时每个受试者单独进行测试。要求受试者在测试之前保证充足睡眠以及头部清洁, 并在实验前一天不进行剧烈运动。

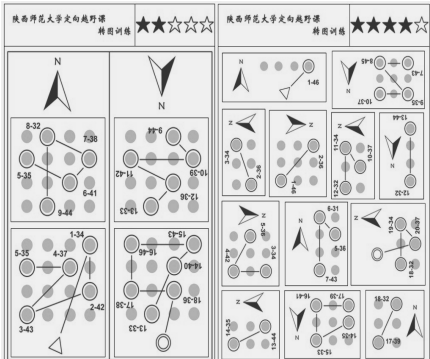

2) 定向运动干预方案。

结合定向运动练习可改善定向运动练习者的各项空间能力, 以及定向运动专项练习的特点, 设计 8 周

定向运动干预方案。定向运动练习分为两部分, 第一部分 1~4 周通过不同难度的方位定向训练, 锻炼练习者方向辨别和空间定位能力(见表 1)。第二部分 5~8 周结合定向运动地图进行地图符号识别和图景识别训练, 锻炼练习者认知地图和图景表征能力。在课堂中通过 Firstbeat 可穿戴监控系统实施心率监测^[30], 运动中平均强度控制在中等强度心率范围(120~140 次/min)^[31]。

实验组 24 名同学进行为期 8 周、每周 2 次(60min/次)的定向运动专项训练, 同时对对照组 24 名同学进行其他体育项目练习。为确保实验变量的控制, 运动干预方案的实施严格按照训练计划进行练习, 确保受试者没有在其他时间进行定向运动练习。

表 1 定向运动练习干预方案

周次	课程目标	教学内容	课程地图材料
1~4	方向辨别 空间定位	1. 理论: 方向辨别、转图方法、指南针使用 2. 实践: 完成六级难度(地图方向、旋转角度)的方位定向训练	
5~8	认知地图 图景表征	1. 理论: 地图符号学习、地图认知、图景表征、路线决策 2. 实践: 完成校园与城市的地图识别及地图与实景信息的匹配训练	

3) 实验材料与流程。

测试以实景图 and 不同方向的地图为刺激材料(见图 1), 刺激材料中以三维场景为实景原图, 二维地图经过不同角度的旋转作为选项, 只有唯一 1 个与原图方向一致, 实验共 30 个试次。

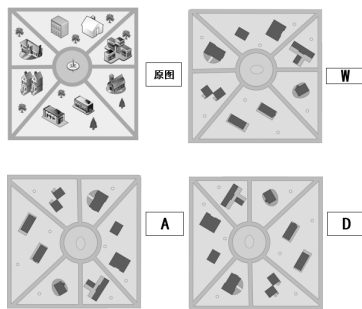


图 1 空间定向任务实验材料

实验共分为 2 个阶段, 即练习阶段和正式测试阶段。首先, 在屏幕上会呈现受试者须知(指导语): 准备无误后按空格键开始练习, 每个试次呈现 4 张地图, 在 W、A、D 3 个选项中选择与原图(方向)相符的选项并按相应键反应。练习阶段结束后开始进行正式测试, 正式测试与练习阶段实验过程相同, 只是受试者作出反应后不会得到反馈, 而是 5 s 后进入下一个试次。空间定向测试共分为 6 个组块, 每个组块包含 5 个试次, 组块之间休息 20 s, 共计呈现 30 个试次, 记录测试者判断空间定向测试反应时和正确率指标, 并在完成空间定向任务时用近红外记录氧合血红蛋白吸收和散射关系, 来考察任务状态下脑组织中的变化, 进而反映脑功能等指标(见图 2)。

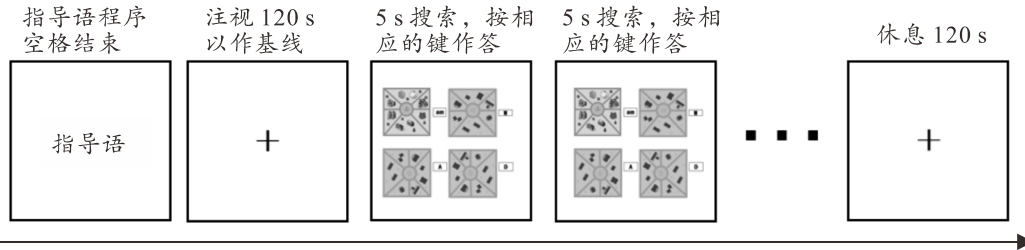


图 2 空间定向任务测试实验流程

1.3 实验仪器

所有刺激均在 PanasonicCF-53 显示器上显示, 分辨率 1 366 × 768, 刷新率为 60 Hz, 由运行 IBM 的 PC 兼容计算机管理, 测试程序均使用 E-Prime 2.0 软件编写。

通过便携式近红外光谱脑功能成像系统 Nirxport2, 实现对脑血样数据采集。探头布置采用国际 10-10 系统, 经过仪器和相应模板进行校准, 确保既定通道上可以准确落入感兴趣的区域。实验前把受试者的头发充分拨开, 采用松紧头帽将其固定, 目的是为确保探头和头皮的充分接触, 其中实验探头所设

定监测的皮质区域为前额叶皮质区。在通道布局上, 包括 13 个光源探头 (Source) 以及 8 个接收探头 (Detector), 组合成 28 通道 (Channel), 采样频率设为 7.812 5 Hz, 兴趣区 (ROI) 是根据已有的解剖标定体系 (Anatomical Labeling Systems, LBPA40) 进行划分 (见图 3)。为了提高信噪比和信号可靠性, 测量通道分为左、右两侧区域, 共划分出 4 个 ROI, 每个区域由 6~7 个通道表示, 可确保区域之间的信噪比相同 (见表 2)。各兴趣区均匀分布在前额叶皮质区, 采用的是多通道近红外数据空间配准到 MNI 空间的方法。

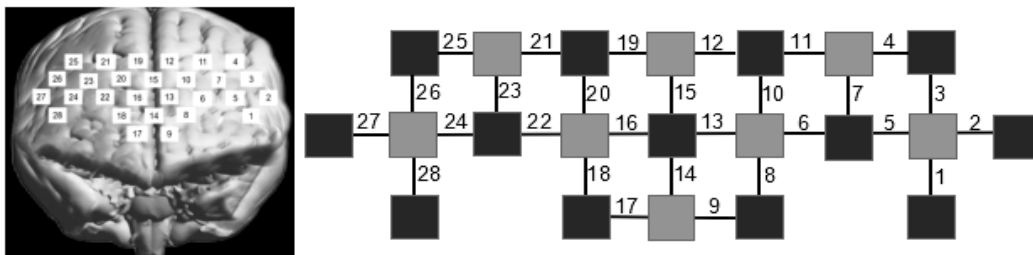


图 3 前额叶皮质区域的测量通道的配置

表 2 fNIRS 设备通道布局与大脑区域间的对应关系

大脑区域	对应通道
左侧腹外侧前额叶皮质区 (L-VLPFC)	Ch1、Ch2、Ch3、Ch4、Ch5、Ch7
左侧背外侧前额叶皮质区 (L-DLPFC)	Ch6、Ch8、Ch9、Ch10、Ch11、Ch12、Ch13
右侧腹外侧前额叶皮质区 (R-VLPFC)	Ch23、Ch24、Ch25、Ch26、Ch27、Ch28
右侧背外侧前额叶皮质区 (R-DLPFC)	Ch16、Ch17、Ch18、Ch19、Ch20、Ch21、Ch22

1.4 数据处理

(1)行为学数据: 为确保实验数据的准确性, 将差距较大的极端值去掉, 平均值 ± 3 个标准差范围以外的数据也被删除, 没有进入后续统计分析。借助 SPSS 23.0 软件, 对测量数据进行正态分布检验, 结果显示数据均大于 0.05 阈值且服从正态分布。为说明定向运动的干预效果对空间定向任务的数值进行组别和时间的重复测量方差分析, 若出现交互作用则采用 Bonferroni 方法进行简单效应分析, 显著性水平设为 $P < 0.05$, 行为数据的变异程度用标准差报告。

(2)fNIRS 数据: 研究使用带通滤波的方法 (大于 0.1 Hz 和小于 0.01 Hz 的成分被滤除) 过滤掉心跳、呼吸等因素对 fNIRS 数据的影响, 采用主成分分析 (Principal Components Analysis, PCA) 去除运动伪迹。平均任务条件下所有试次的 Oxy-Hb 数值, 得到受试者在任务条件下每个通道在单位时间内 (试次开始前 1 s 到后 5 s) 每个采样点的均值, 将 ROIs 所包含的 6~7 个通道的 Oxy-Hb 数据进行平均, 即为该 ROI 的血氧信号。同行为学数据, 借助 SPSS 23.0 软件对 Oxy-Hb 数值以组别和时间进行正态分布检验和双因素重复测量方差分

析, 使用 Greenhouse-Geisser 方法进行矫正。若出现交互作用则采用 Bonferroni 方法进行简单效应分析, 显著性水平设为 $P < 0.05$, Oxy-Hb 数据的变异程度用标准差报告。与此同时, 运用 Pearson 相关分析对实验组定向运动干预前后大学生每个 ROI 的 Oxy-Hb 浓度与正确率结果进行相关性分析, $P < 0.05$ 被认为具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 运动干预前后行为学结果

采用重复测量方差分析探讨定向运动练习对练习者空间定向能力的正确率、反应时的影响, 结果发现, 在正确率上时间 \times 组别交互作用显著 [$F(1,46)=6.815$, $P=0.012$, $\eta^2=0.129$]; 在反应时上交交互作用不显著(见表 3)。

表 3 定向运动练习对练习者空间定向能力影响的行为学结果 ($\bar{x} \pm s$)

指标	时间	实验组		对照组	
		正确率/%	反应时/ms	正确率/%	反应时/ms
空间定向	前测	0.69±0.12	3 036.87±349.38	0.73±0.20	2 995.31±316.24
	后测	0.85±0.08	3 061.45±302.62	0.76±0.10	3 037.91±324.74

进一步对正确率交互作用进行简单效应分析发现, 实验组后测正确率显著高于对照组 [$F(1,46)=$

10.439, $P=0.002$, $\eta^2=0.185$]; 实验组后测正确率显著高于前测 [$F(1,46)=20.851$, $P < 0.001$, $\eta^2=0.305$](见图 4)。

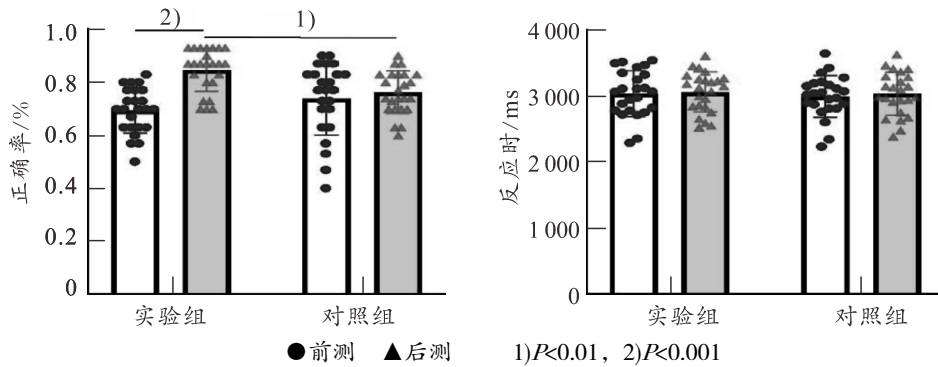


图 4 不同运动干预前后空间定向能力的正确率、反应时的变化

2.2 运动干预前后 fNIRS 数据结果

对受试者在空间定向任务中的 fNIRS 指标在 L-VLPFC、R-VLPFC、L-DLPFC 和 R-DLPFC4 个脑

区上进行组别、测试时间的双因素重复测量方差分析, 分析受试者在定向运动干预前后空间定向任务时前额叶的 Oxy-Hb 浓度的变化(见表 4)。

表 4 定向运动练习对低空间能力者空间定向能力影响的 Oxy-Hb 浓度变化 ($\bar{x} \pm s$) $\mu\text{mol/L}$

组别	时间	L-VLPFC	R-VLPFC	L-DLPFC	R-DLPFC
实验组	前测	-0.168±0.482	-0.090±0.415	-0.184±0.477	-0.086±0.546
	后测	-0.526±0.441	-0.615±0.365	-0.305±0.472	-0.267±0.479
对照组	前测	-0.191±0.480	-0.106±0.516	-0.024±0.601	-0.075±0.512
	后测	0.005±0.696	-0.185±0.525	-0.276±0.455	-0.258±0.480

采用重复测量方差分析探讨定向运动练习对低空间能力者空间定向能力的 Oxy-Hb 的影响, 结果发现, 在左侧腹外侧前额叶 (L-VLPFC) [$F(1,46)=6.307$, $P=0.016$, $\eta^2=0.121$] 和左侧背外侧前额叶 (L-DLPFC) [$F(1,46)=5.364$, $P=0.025$, $\eta^2=0.104$] 上时间 \times 组别交互作用显著, 表明在不同组别运动干预前后

上述脑区的 Oxy-Hb 变化存在显著差异。

进一步对交互作用进行简单效应分析发现, 在 L-VLPFC 上, 实验组后测 Oxy-Hb 浓度显著低于对照组 [$F(1,46)=10.874$, $P=0.002$, $\eta^2=0.191$], 实验组后测 Oxy-Hb 浓度显著低于前测 [$F(1,46)=17.432$, $P < 0.001$, $\eta^2=0.275$]. 在 L-DLPFC 上, 实验组后测 Oxy-Hb 浓度

显著低于对照组 $[F(1,46)=9.979, P=0.003, \eta^2=0.178]$, 实验组后测 Oxy-Hb 浓度显著低于前测 $[F(1,46)=4.471, P=0.040, \eta^2=0.089]$ 。

2.3 正确率与各脑区脑血氧激活程度相关性分析结果 对实验组的空间定向任务时各 ROI 的 Oxy-Hb 浓

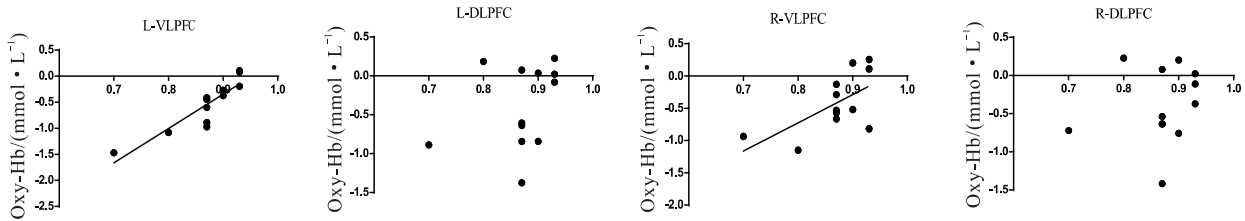


图 5 正确率与各脑区脑血氧激活程度相关

3 讨论

3.1 定向运动练习对大学生空间定向能力的改善效益

由行为学结果可知, 大学生在 8 周的定向运动练习之后其空间定向能力得到提升, 具体表现为在实验组干预后正确率增强且显著高于对照组。定向运动是一项要求练习者借助地图和指南针等工具, 依据周围环境判断自身在环境中的位置, 以及地图中各个检查点所在位置, 从而选择合理的行进路线, 按照规则到达所有点位的运动^[32]。在干预方案设计中, 首先进行不同方向的方位角定向练习, 其目的在于让练习者通过图和实地北的方位匹配进行空间定向, 快速、正确地进行方向识别, 通过多次反复及不同方位难度的空间认知训练, 有效提升练习者对方向的辨别能力。同时干预方案进行地图认知和图景识别的表征训练, 地图认知训练提升练习者对地图符号的理解, 能够改善练习者认知地图的能力, 而认知地图是个体完成空间定向任务的重要前期条件, 图景识别训练主要针对图和实景进行匹配训练。当没有指南针等辅助工具时, 个体在空间定向过程中更多的依赖地图信息与实景信息位置和环境的一致性来进行方向定位^[33]。由此可以看出, 定向运动训练对个体空间定向能力的提升具有靶向锻炼价值, 反复多次专项技能的训练可有效改善个体的空间定向能力。

3.2 定向运动练习对大学生空间定向任务不同脑区的脑激活特征分析

fNIRS 数据分析结果显示, 经过定向运动干预之后, 实验组在空间定向任务中的表现为左、右侧腹外侧额叶的 Oxy-Hb 浓度显著降低且显著低于对照组, Oxy-Hb 浓度与正确率呈显著相关。空间定向是一个复杂过程, 依赖于许多基本的认知功能^[34]。通过结果发现, 定向运动干预改善效益对应改变的脑区为

度与正确率进行相关性分析, 探讨激活程度和行为绩效的相关程度。结果发现实验组受试者在后测阶段中, L-VLPFC($r=0.895$)和 R-VLPFC($r=0.624$)Oxy-Hb 浓度与正确率显著相关(见图 5)。

VLPFC, 表现为 Oxy-Hb 浓度降低。多项研究表明, VLPFC 作为人类大脑中与空间认知活动密切相关的脑区^[35], 是空间信息导航和定向过程的重要脑区^[36]。作为空间认知的重要脑区, VLPFC 在视觉空间注意与反射性重新定向过程中起着重要作用^[37]。在定向运动不同认知任务的脑加工机制中, 已经证实不同的定向运动训练任务会激活不同脑区。如地图认知任务主要激活 VLPFC 脑区, 图景识别任务同时激活 DLPFC 和 VLPFC 脑区^[38], 地图空间距离感知任务激活 L-VLPFC、R-VLPFC 和 L-DLPFC 脑区^[39], 空间知觉涉及额顶网络, 包括 DLPFC 和 VLPFC。其中, DLPFC 的激活与空间信息的保持、监控以及认知决策等功能有关^[40]; 而 VLPFC 的激活与方位认知和地图表征有关, 视觉空间信息在 VLPFC 进行处理并通过背腹侧功能连接与 DLPFC 中处理的信息相整合。本研究结果发现, 经过 8 周的定向运动训练实验组 L-VLPFC 和 L-DLPFC 的 Oxy-Hb 激活浓度显著降低。神经效率假说也提出在认知加工过程中, 高绩效个体皮层激活降低的原因, 可能是大脑神经环路或神经元激活数量下降, 或者皮层区域激活更集中, 使得大脑整体皮层激活降低, 节约中枢神经资源能量的消耗, 表现大脑认知加工皮层神经高效率^[41]。由此可见, 练习者通过方向辨别、地图认知和图景表征的对应训练, 大学生掌握空间定向的技能, 更善于整合利用有用的信息进行定向, 从而获得一个良好的训练效果。大脑激活的降低也反映出大脑皮层神经元集群功能协同性提高, 说明长期定向运动练习提高皮层神经效率, 进而改善大学生的空间定向能力。

4 结论

本研究通过综合研究行为学和神经影像学证据,

发现定向运动练习能够显著提升大学生的空间定向能力,并且在定向运动干预之后大脑前额叶表现出神经效能变化,大脑血氧激活程度与行为绩效存在一定的相关性,大脑前额叶皮层不同脑区表现出不同的激活状态,左侧腹外侧前额叶(L-VLPFC)和左侧背外侧前额叶(L-DLPFC)变化显著。本研究为挖掘运动干预与空间定向能力之间的关系提供新证据,为提升大学生空间定向能力提供实践路径和理论证据。

参考文献:

- [1] THOMAS W, MARY H. What determines our navigational abilities?[J]. Trends in Cognitive Sciences, 2010, 14(3): 138-146.
- [2] NGUYEN T, CONDY E, PARK S, ET al. Comparison of functional connectivity in the prefrontal cortex during a simple and an emotional Go/No-Go task in female versus male groups: An fNIRS study[J]. Brain Sciences, 2021, 11(7): 909-909.
- [3] FABIAN C, NEIL B. The cognitive architecture of spatial navigation: Hippocampal and striatal contributions[J]. Neuron, 2015, 88(1): 64-77.
- [4] HUESTEGGE L, SKOTTKE E M, ANDERS S M, et al. The development of hazard perception: Dissociation of visual orientation and hazard processing[J]. Transport Res F Traffic Psychol Behav, 2010, 13: 1-8.
- [5] Boccia M, Rosella M, Vecchione F, et al. Enhancing allocentric spatial recall in pre-schoolers through navigational training programme[J]. Frontiers in Neuroscience, 2017, 11: 574.
- [6] 贾大光,李学山. 飞行员空间定向能力训练研究[J]. 军事体育进修学院学报, 2012, 31(4): 44-46.
- [7] CAMPOS A, CAMPOS-JUANATEY D. Measure of spatial orientation ability[J]. Imagination, Cognition and Personality, 2020, 39(4): 348-357.
- [8] MALINOWSKI J C. Mental rotation and real-world wayfinding[J]. Perceptual and Motor Skills, 2001, 92(1): 19-30.
- [9] HILLMAN C H, PONTIFEX M B, CASTELLI D M, et al. Effects of the FITKids randomized controlled trial on executive control and brain function[J]. Pediatrics, 2014, 134(4): e1063-e1071.
- [10] MORAWIETZ C, MUEHLBAUER T. Effects of physical exercise interventions on spatial orientation in children and adolescents: A systematic scoping review[J]. Frontiers in Sports and Active Living, 2021, 3: 2624-9367.
- [11] 吴浩东,任杰,温筱茜. 运动干预对社区健康老年人认知功能的影响:方法学系统综述[C]//第十一届全国体育科学大会论文摘要汇编.北京:中国体育科学学会,2019:5306-5307.
- [12] 陈爱国,熊轩,朱丽娜,等. 体育运动与儿童青少年脑智提升:证据与理论[J]. 体育科学,2021,41(11):43-51.
- [13] 周成林,金鑫虹. 从脑科学诠释体育运动提升学习效益的理论与实践[J]. 上海体育学院学报,2021,45(1):20-28.
- [14] 刘阳,唐思洁,鲍圣彬. 定向运动综合训练延缓老年人认知老化的作用及干预路径[J]. 文体用品与科技,2020(24):114-116.
- [15] SPIERS H J, GILBERT S J. Solving the detour problem in navigation: A model of prefrontal and hippocampal interactions[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2015, 9: 1-15.
- [16] OLIVEIRA L M, EVANGELISTA S E, ALVES M R, et al. 2D virtual reality-based exercise improves spatial navigation in institutionalized non-robust older persons: A preliminary data report of a single-blind, randomized, and controlled study[J]. Frontiers in Neurology, 2021, 11: 609988.
- [17] 鲍圣彬,刘阳. 定向运动练习对大学生空间记忆能力的影响研究[J]. 福建体育科技,2022,41(3):87-92.
- [18] 刘阳,何劲鹏. 不同任务情境下定向运动员视觉记忆特征及加工策略[J]. 体育学刊,2017,24(1):64-70.
- [19] 刘阳,唐思洁. 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[J]. 心理科学,2022,45(6):1314-1321.
- [20] 郑裔军,林儒. 定向运动与其他项目运动员的空间能力比较研究[J]. 四川体育科学,2012,42(6):71-73.
- [21] 宿凯娟. 定向运动对中班幼儿空间能力发展影响的实践研究[D]. 成都:成都大学,2021.
- [22] 鲍圣彬,魏静娟,刘阳. 定向运动:儿童青少年空间定向与导航能力的干预选择[J]. 青少年体育,2021(12):54-56.
- [23] LI L, WANG H, LUO H, et al. Interpersonal neural synchronization during cooperative behavior of basketball players: A fNIRS-based hyperscanning study[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2020, 14: 169.

- [24] YANG Y, CHEN T, SHAO M, et al. Effects of Tai Chi Chuan on inhibitory control in elderly women: An fNIRS study[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2020, 14: 476.
- [25] CARIUS D, KENVILLE R, MAUDRICH D, et al. Cortical processing during table tennis-an fNIRS study in experts and novices[J]. *European Journal of Sport Science*, 2021(6): 1-11.
- [26] MÜCKE M, LUDYGA S, COLLEDGE F, et al. The influence of an acute exercise bout on adolescents' stress reactivity, interference control, and brain oxygenation under stress[J]. *Frontiers in Psychology*, 2020, 11: 3091.
- [27] PARSONS O A, NIXON S J. Neurobehavioral sequelae of alcoholism[J]. *Neurologic Clinics*, 1993, 11(1): 205-218.
- [28] SQUIRE L R. The neuropsychology of human memory[J]. *Annual Review of Neuroscience*, 1982, 5: 241-273.
- [29] SCHAFER R J, MOORE T. Selective attention from voluntary control of neurons in prefrontal cortex[J]. *Science*, 2011, 332(6037): 1568-1571.
- [30] 樊云彩, 闫琪, 李敏. 4周高强度间歇训练对优秀花样游泳运动员专项运动能力提升效果的研究[J]. *中国体育科技*, 2019, 55(9): 60-63+107.
- [31] TANAKA H, MONAHAN K D, SEALS D R. Age-predicted maximal heart rate revisited[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2001, 37(1): 153-156.
- [32] 刘阳, 杨宁. 定向运动练习对ADHD儿童认知能力影响的实验研究[J]. *中国特殊教育*, 2018(11): 39-44.
- [33] 刘阳, 柳文杰. 定向运动体验式教学与应急安全教育融合模式研究[J]. *体育学刊*, 2019, 26(6): 108-112.
- [34] FERNANDEZ - BAIZAN C, ARIAS J L, MENDEZ M. Egocentric and allocentric spatial memory in young children: A comparison with young adults[J]. *Infant and Child Development*, 2021, 30(2), e2216.
- [35] TANG H, BARTOLO R, AVERBECK B B. Reward-related choices determine information timing and flow across macaque lateral prefrontal cortex[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1-13.
- [36] CARRIERI M, LANCIAS S, BOCCHI A, et al. Does ventrolateral prefrontal cortex help in searching for the lost key? Evidence from an fNIRS study[J]. *Brain Imaging and Behavior*, 2018, 12(3): 785-797.
- [37] LEVY B J, WAGNER A D. Cognitive control and right ventrolateral prefrontal cortex: Reflexive reorienting, motor inhibition, and action updating[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2011, 1224(1), 40-62.
- [38] 张文, 宋杨, 刘阳. 不同认知任务下定向运动员脑加工特征研究——来自fNIRS的证据[J]. *首都体育学院学报*, 2023, 35(2): 180-186.
- [39] 唐思洁, 秦奎元, 李璘, 等. 定向运动员空间距离感知特征研究: 来自行为学和fNIRS的证据[J]. *中国体育科技*, 2023, 59(3): 20-27+36.
- [40] 赵明生, 刘静如, 鲍圣彬, 等. 任务难度对定向运动练习者路线决策的影响研究——来自fNIRS的证据[J]. *山东体育学院学报*, 2022, 38(2): 110-118.
- [41] 魏瑶. 乒乓球运动员在不同空间任务认知加工神经效率的EEG研究[D]. 上海: 上海体育学院, 2019.

