

# 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

易妍<sup>1</sup>, 刘静如<sup>1</sup>, 张言<sup>2</sup>, 唐思洁<sup>3</sup>, 刘阳<sup>4</sup>

(1.东北师范大学 体育学院, 吉林 长春 130024; 2.内蒙古民族大学 体育学院, 内蒙古 通辽 028000;  
3.深圳东方英文书院, 广东 深圳 518128; 4.陕西师范大学 体育学院, 陕西 西安 710119)

**摘 要:** 从不同水平运动经验者的专项心理旋转能力出发, 探究不同任务负荷条件下运动员心理旋转能力的行为绩效及脑加工特征, 为进一步了解运动员空间认知加工机制及科学化训练提供理论依据。采用2(运动水平: 专家、新手)×2(地图难度: 简单地图、复杂地图)的两因素混合实验设计, 通过功能性近红外光谱成像(fNIRS)技术, 比较专家和新手共27名在不同任务难度条件下心理旋转任务中的正确率、反应时、背外侧前额叶(DLPFC)和腹外侧前额叶(VLPFC)中含氧血红蛋白(Oxy-Hb)浓度变化。结果:(1)随着地图难度的增大, 正确率显著降低、反应时显著加长, 专家组优于新手组;(2)在复杂地图条件下左右背、腹外侧前额叶4个脑区的Oxy-Hb浓度均显著高于简单地图, 专家运动员左右背、腹外侧前额叶4个脑区Oxy-Hb浓度显著低于新手组。结果说明: 专家运动员较新手运动员在完成识图心理旋转任务时表现出高任务绩效, Oxy-Hb激活较新手组低, 表现出了一定的专项认知优势。心理旋转认知过程受认知负荷的制约, 不同认知负荷条件对定向运动员心理旋转加工产生了不同的绩效影响及脑激活变化。

**关键词:** 心理旋转能力; 地图难度; 脑加工; 定向运动; 功能性近红外光谱技术

中图分类号: G 804.2; G804.8 文献标志码: A 文章编号: 1006-7116(2022)02-0136-09

## Behavioral performance and brain processing characteristics of orienteering athletes' mental rotation ability under different cognitive load conditions

YI Yan<sup>1</sup>, LIU Jingru<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, TANG Sijie<sup>3</sup>, LIU Yang<sup>4</sup>

(1.School of Physical Education, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2.School of Physical Education, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao 028000, China;

3.Shenzhen Oriental English College, Shenzhen 518128, China;

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

**Abstract:** Starting from the professional mental rotation of athletes with different sports experience, explore the behavioral performance and brain processing characteristics of athletes' mental rotation under different task load conditions, and to provide a theoretical basis for further understanding of the athlete's spatial cognitive processing mechanism and scientific training. Adopting a two-factor mixed experimental design 2 (Level: expert, novice) × 2 (Map difficulty: Simple, complex), and using functional near-infrared spectroscopy imaging technology to comparing athletes' correct rate, reaction time, changes of the Oxy-Hb concentration in the DLPFC and VLPFC in mental rotation tasks under different task difficulty conditions for 27 experts and novices. Results show that: (1) As the difficulty increases, the accuracy rate is significantly reduced, and the reaction time is significantly longer, and the experts is better than the novices; (2) under complex map conditions, the Oxy-Hb concentration in the four brain

收稿日期: 2021-10-23

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(202102223033); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK202007035)。

作者简介: 易妍(1986-), 女, 讲师, 博士研究生, 研究方向: 体育教育训练学。E-mail: 38663926@qq.com 通信作者: 刘阳

regions of the left and right dorsal and ventrolateral prefrontal lobes are significantly higher than simple map conditions. The Oxy-Hb concentration in the four brain regions of the left and right dorsal and ventrolateral prefrontal lobes of expert athletes is significantly lower than novices. Conclusion reveals that: Expert athletes showed higher task performance than novice athletes in completing mental rotation tasks of map reading, and Oxy-Hb activation was lower than that of novice athletes, showing certain specific cognitive advantages. The cognitive process of mental rotation is restricted by cognitive load. Different cognitive load conditions have different performance effects and brain activation changes on mental rotation processing of orienteering athletes.

**Keywords:** mental rotation ability; map difficulty; brain processing; orienteering; functional near infrared spectroscopy technology

定向运动是指参与者借助地图和指北针在陌生环境中去确定自身方位和寻找目标点的一项运动<sup>[1]</sup>。在定向运动行进过程中,运动员拿到的地图与实地方向往往是不一致的,面对方向的不断变动,运动员需不断调整地图和自身方位来更新与参照物的位置关系<sup>[2]</sup>。在这一过程大脑会自动表征地图,从而形成心象地图,方便运动员将心理地图与实际环境匹配。心理旋转能力在协助定向运动员进行空间定位过程中发挥了重要的作用,其能力的好坏直接影响到定向运动员的成绩表现<sup>[3]</sup>。

心理旋转是空间认知能力的重要成分,同时也为研究个体的空间认知能力提供了定量、客观的方法。科研人员通过心理旋转去测量空间认知能力,研究表明个体的空间认知能力与心理旋转的测验成绩显著相关<sup>[4]</sup>,心理旋转会消耗大量的精神资源,是一种认知压力<sup>[5-6]</sup>。心理旋转测验得分越高意味着空间认知能力越好<sup>[7]</sup>。随着认知心理学在运动领域中的发展,体育科研者对心理旋转的研究更加深入,心理旋转能力作为运动员专项运动技能所必备的重要能力,能较准确地预测运动员的运动水平和空间认知能力<sup>[8-9]</sup>。在定向运动领域,刘阳<sup>[10]</sup>、李俊<sup>[11]</sup>、宋杨<sup>[12]</sup>先后从不同角度对定向运动员认知能力展开了相关研究,通过研究发现:地图方位和难度在视觉注意和工作记忆过程中制约着定向运动员的识图能力,心理旋转和地图特征在识图过程中大大制约运动员的识图能力<sup>[12]</sup>,也了解到不同水平的定向运动员之间任务绩效存在差异<sup>[13]</sup>。

定向运动已有研究范式多为行为指标的探究及经验性的描述,缺乏深入的科学探索<sup>[14]</sup>。近年来,随着认知神经科学的不断发展,为定向运动提供了更多的研究技术和思路。功能性近红外光谱成像技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)在为进一步了解运动认知加工过程的机制具有重要的应用价值<sup>[15]</sup>。文献表明运动员在运动学习过程中,由额叶和顶叶组成的额顶神经网络是调节认知能力的主要功能脑区<sup>[16]</sup>。前额叶皮层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<sup>[17]</sup>。背外侧前额叶(DLPFC)和腹外侧前额叶(VLPEC)作为额叶皮质的主要功能区,在与运动认知相关的脑功能中发挥着重要作用,对依赖于情境的计划和决策具有重要意义。定向运动员在识图空间认知过程中,不可避免会诱发额叶血氧浓度的激活。不同水平运动员的心理旋转能力是否存在差异?是否表现出不同的脑激活特征?不同认知负荷下心理旋转任务表现出什么样的脑激活特征?这一系列问题急需解决。随着科学技术的进步,研究者可以通过fNIRS技术得到定向运动员在任务下脑机制的变化情况,了解定向运动员在不同地图难度条件下的心理旋转能力,以及不同水平定向运动员前额叶血氧浓度变化特征,从大脑加工机制的视角来探讨定向运动项目的专项认知加工问题。

因此,针对上述问题,研究提出假设:(1)在任务过程中,专家组与新手组运动员之间呈现出不同的行为绩效;(2)专家组运动员会表现出专项认知优势;(3)不同的地图难度会造成心理旋转任务中Oxy-Hb信号在前额叶(PFC)功能脑区上的差异,不同水平运动员的脑激活程度存在差异。通过研究可以挖掘定向运动项目的理论依据,完善定向运动项目训练体系,为定向运动项目中专家认知优势研究提供理论支撑与实践指导,实现训练的最优化。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

选取专家组运动员14名和新手组13名共27名(男性)定向练习者参加本实验,平均年龄为(20.54 ± 0.76)岁。专家组为现役陕西省定向运动队队员,运动等级一级以上,训练年限6年以上;新手组均为某高校定向运动公共体育课的学生,训练年限3个月以上。所有被试者裸眼视力或矫正视力正常,无任何精神疾病史,均未参加过类似实验。

所有被试者提前一天均被告知实验相应的内容,

如时间安排和注意事项等,要求被试者在测试进行之前保证充足的睡眠,以及头部的清洁,并在实验前一天内不进行剧烈运动,均征得了被试者的同意,并签署了实验知情同意书,完成实验后被试者将会领取到相应的报酬。该研究已得到本校伦理委员会的批准。

## 1.2 研究设计

采用 2(运动水平:专家、新手)×2(地图难度:简单地图、复杂地图)的两因素混合实验设计。地图难度为组内变量,运动水平为组间变量,考察不同认知负荷下专项识图情景下的心理旋转能力。因变量指标为受试者的正确性、反应时和 Oxy-Hb 血氧浓度。

## 1.3 实验仪器和刺激材料

所有刺激均在 Panasonic CF-53 显示器上显示,分辨率为 1 366×768,刷新率为 60 Hz,由运行 IBM 的 PC 兼容计算机管理,测验程序均用 E-prime 2.0 软件编写而成。

fNIRS 设备:本实验仪器是便携式近红外光谱脑功能成像系统 Nirxport 2,实现对前额叶皮层脑血氧数据采集。以国际 10-10 系统实现探头布置,通过校准仪器确保既定通道上可以准确探测到前额叶皮质区。

刺激材料:实验材料采用 800×600 像素定向运动标准比赛地图,由地图难度构成刺激材料(简单地图、复杂地图)。其中简单地图多为校园、公园场景,比例尺为 1:4 000,地图信息多为建筑物等地物特征。复杂地图多为野外、山地场景,比例尺为 1:10 000,地图信息多为山体等地貌特征(见图 1 和图 2)。

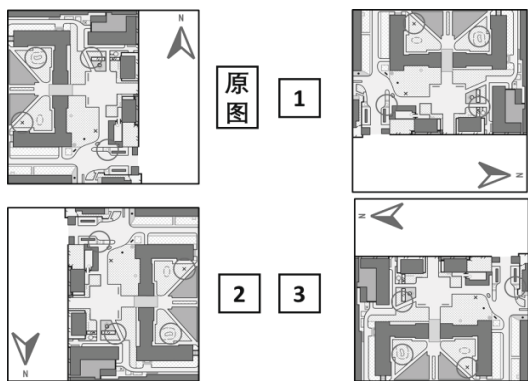


图 1 简单地图心理旋转任务示例

两种类型地图共 44 张(4 张图用于练习实验,其余 40 张作为正式实验材料)。所有刺激材料均采用近一年内未举办过定向运动赛事的定向运动地图,由 3 名具有国家资格的定向运动地图制图员进行难度评分,并通过 OCAD 11.0 版(定向运动地图开发的专业软件)绘制而成。每张刺激材料由 1 张原图+3 张旋转成不同方

向的图片组成,在 3 张不同方向的图片中只有 1 张与原图的点位(图 1、2 中圆圈位置)完全一致,被试者需观察并按对应的 1、2、3 键盘按键,做出判定。

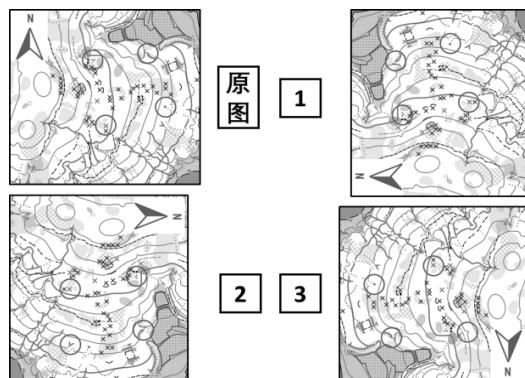


图 2 复杂地图心理旋转任务示例

## 1.4 实验流程

测试内容经由计算机与 fNIRS 系统相连接,要求参与者坐在计算机显示器前且不受限制的 80 cm 处完成实验,且在电脑屏幕上可清楚地看到呈现的测试内容。受试者戴上佩戴 fNIRS 光极帽实验人员对其进行校准,使其通道连接,期间让受试者熟读实验指导语,开始练习后,所有刺激均呈现在电脑屏幕上,待练习结束后收集 120 s 安静状态下受试者血样数据方可开始正式测试,从定向地图来设计任务,地图难度分为简单地图和复杂地图。实验条件对应受试者空间认知加工过程中所涉及的心理旋转和空间定向。受试者通过键盘对实验刺激进行判断,由此可得改编后识图心理旋转任务的反应时和正确率,以及测试出受试者的脑血流变化程度。

实验由练习阶段和正式测试阶段组成。在两个阶段中,每个轨迹的处理过程都相同,首先出现刺激地图,每道题包括 1 个参考图形和 3 个备选图形,受试者需要从 3 个备选图形中选出 1 个与参考图形相同,然后在白色背景(完整的计算机显示)的中心出现黑色的“+”注视点,持续 20 000 ms;为了避免熟悉度造成的实验结果不准确,整个过程要求 6 min 内完成。任务要求受试者仔细观察原图上的点位位置,快速搜索与原图点位一致的地图(持续 10 000 ms),并按对应的数字键作答。请在保证正确的前提下尽快按键。测试阶段根据受试者的反应,在屏幕中央会显示“正确”“错误”或“未响应”的反馈 1 500 ms。为了剔除受试者对练习效应和地图的复杂程度的影响,在练习阶段受试者需要对不熟悉的实验进行一定程度的练习,待成绩稳定后再进行正式测试。练习阶段使用的刺激

材料与随即进行的正式实验(测试阶段)所用的刺激材料不同。练习阶段的目的是帮助参与者熟悉实验, 并且在此期间未收集任何数据。

待练习结束后方可开始正式测试, 正式实验与练习实验过程相同, 但当受试者做出反应后不会得到反

馈, 而是呈现 20 000 ms 的注视点“+”, 让受试者保持放松状态, 直到黑色注视点“+”结束, 进入下一个试次的实验刺激。期间受试者对任务的行为数据和 fNIRS 数据被记录到文件中, 一直循环进行直至任务完成(见图 3)。

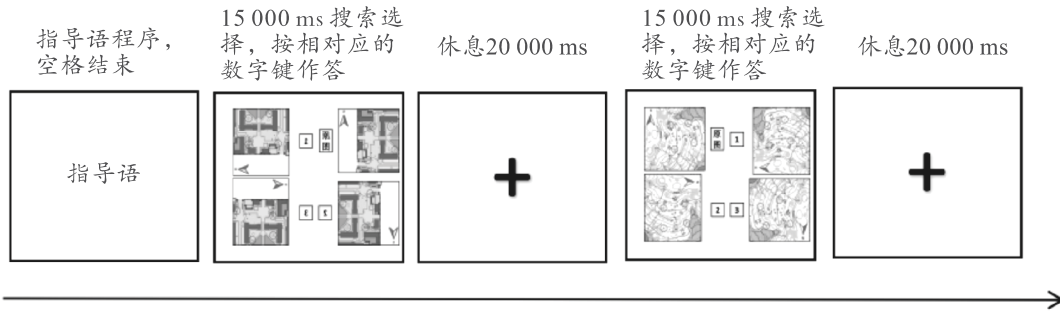


图 3 识图心理旋转任务测试流程

1.5 数据采集

实验前把受试者的头发充分的拨开, 为了确保探头和头皮的充分接触采用松紧头帽将其固定。在通道布局上, 包括 13 个光源探头以及 8 个接收探头, 组合成 28 通道, 采样频率设为 7.8 125 Hz(见图 4)。兴趣区(region of interesting, RIO)是根据已有的解剖标定体系(anatomical labeling systems, LBPA40)进行划分<sup>[18-19]</sup>。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 RIO, 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<sup>[20]</sup>。左侧腹外侧

前额叶(left-ventrolateral prefrontal cortex, L-VLPFC): Ch1、Ch2、Ch3、Ch4、Ch5、Ch7; 左侧背外侧前额叶(left-dorsolateral prefrontal cortex, L-DLPFC): Ch6、Ch8、Ch9、Ch10、Ch11、Ch12、Ch13; 右侧腹外侧前额叶(right-ventrolateral prefrontal cortex, R-VLPFC): Ch23、Ch24、Ch25、Ch26、Ch27、Ch28; 右侧背外侧前额叶(right-dorsolateral prefrontal cortex, R-DLPFC): Ch16、Ch17、Ch18、Ch19、Ch20、Ch21、Ch22。以上 4 个 RIO 均匀分布在 PFC, 采用多通道近红外数据空间配准到 MNI 空间的方法。

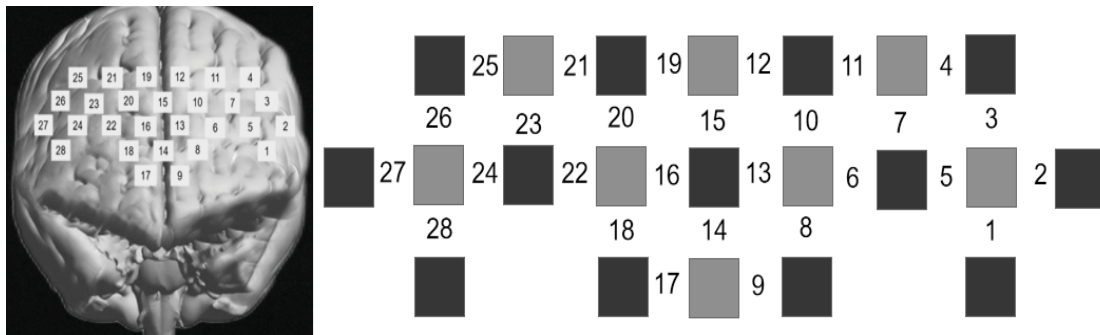


图 4 便携式 fNIRS 设备通道布局

(红色表示光源探头-Source, 蓝色表示接收探头-Detector, 黑色数字代表通道-Channel)

1.6 数据处理

数据处理部分由行为学和 fNIRS 两部分组成。行为学部分: 为了减少极端值给结果带来不必要的影响, 将反应时小于 5 000 ms 和大于 15 000 ms 的试次剔除掉。fNIRS 部分: 用 NirsLab 通过朗伯比尔定律(Lambert Beer law)对采集的光学数据进行解算, 得到含氧血红蛋白(Oxy-Hb)浓度的相对变化。本研究脑血氧数据分

析重点分析 Oxy-Hb, 相比 DeOxy-Hb 而言, 用 Oxy-Hb 来反映大脑神经激活水平信噪比更好, 对任务响应也更敏感<sup>[21]</sup>。fNIRS 数据的预处理使用了带通滤波的方法(大于 0.1Hz 和小于 0.01Hz 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)的方法来去除运动伪迹<sup>[22]</sup>。然后平均各任务条件下所有试次的 Oxy-Hb

浓度数值,得到了被试者在各个任务条件下每个通道在单位时间内(试次开始后 2~20s)每个采样点的均值。

## 2 研究结果

### 2.1 行为数据结果

采用 2(运动水平:专家、新手)×2(地图难度:简

单地图、复杂地图)两因素重复测量方差分析,对识图心理旋转任务中正确率和反应时两个部分的行为数据进行统计分析。先对行为数据进行预处理,然后在此基础上,检验识图心理旋转任务中地图难度和运动水平的主效应和交互效应(见表 1、图 5)。

表 1 识图心理旋转任务正确率和反应时测试结果( $\bar{x}\pm s$ )

组别	正确率/%		反应时/ms	
	简单地图	复杂地图	简单地图	复杂地图
新手	74±7	43±6	7 985.14±796.63	10 836.09±1 051.78
专家	92±7	67±5	6 759.52±810.95	9 486.14±1 649.92

#### 1)正确率结果。

重复测量方差分析结果显示,地图难度×运动水平的交互效应显著 $[F(1, 26)=4.671, P<0.05, \eta^2=0.152]$ 。运动水平主效应显著 $[F(1, 26)=115.641, P<0.001, \eta^2=0.816]$ ,地图难度主效应显著 $[F(1, 26)=338.809, P<0.001, \eta^2=0.929]$ 。进一步进行简单效应分析,在复杂地图条件下,运动水平主效应 $[F(1, 26)=127.679, P<0.001, \eta^2=0.831]$ ,专家运动员的正确率显著高于新手运动员。在简单地图条件下,运动水平主效应 $[F(1, 26)=41.481, P<0.001, \eta^2=0.615]$ ,相比复杂地图,在简单地图条件下,两者之间的显著性有所降低。新手组,地图难度主效应显著 $[F(1, 26)=197.418, P<0.001, \eta^2=0.884]$ ,专家组,地图难度主效应 $[F(1, 26)=142.111, P<0.001, \eta^2=0.845]$ ,无论是专家组还是新手组,随着地图难度的加大,正确率降低(见图 5(a))。

#### 2)反应时结果。

重复测量方差分析结果显示,地图难度×运动水平的交互效应不显著 $[F(1, 26)=0.79, P=0.782, \eta^2=0.003]$ ,运动水平主效应显著 $[F(1, 26)=11.584, P<0.01, \eta^2=0.317]$

地图难度主效应显著 $[F(1, 26)=158.102, P<0.001, \eta^2=0.860]$ ;专家组反应时显著低于新手组,复杂地图条件显著高于简单地图条件(见图 5(b))。

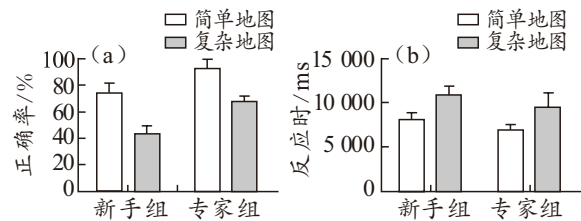


图 5 不同变量条件下心理旋转任务行为学结果

### 2.2 fNIRS 数据结果

采用 2(运动水平:专家、新手)×2(地图难度:简单地图、复杂地图)两因素重复测量方差分析受试者在完成识图心理旋转任务时左右腹外侧前额叶(L-VLPEC、R-VLPFC)和左右背外侧前额叶(L-DLPFC、R-DLPFC)的 Oxy-Hb 浓度(见表 2、图 6、图 7)。

表 2 不同变量条件下 ROI 上 Oxy-Hb 浓度检测结果( $\bar{x}\pm s$ )

组别	L-VLPFC		L-DLPFC		R-VLPFC		R-DLPFC	
	简单地图	复杂地图	简单地图	复杂地图	简单地图	复杂地图	简单地图	复杂地图
新手	0.068±0.075	0.163±0.100	0.050±0.106	0.105±0.125	0.058±0.076	0.185±0.092	0.041±0.107	0.167±0.096
专家	0.034±0.113	0.066±0.075	-0.016±0.130	0.028±0.108	0.007±0.118	0.050±0.117	-0.003±0.113	0.044±0.107

#### 1)左侧腹外侧前额叶(L-VLPFC)测试结果。

结果显示:地图难度×运动水平的交互效应不显著 $[F(1, 25)=1.724, P=0.201, \eta^2=0.065]$ ,运动水平主效应显著 $[F(1, 25)=6.237, P<0.05, \eta^2=0.200]$ ,新手组 Oxy-hb 浓度显著高于专家组;地图难度主效应显著 $[F(1, 25)=7.104, P<0.05, \eta^2=0.221]$ ,复杂地图条 Oxy-Hb

浓度显著高于简单地图(见图 6(a))。

#### 2)右侧腹外侧前额叶(R-VLPFC)测试结果。

结果显示:地图难度×运动水平的交互效应显著 $[F(1, 25)=6.634, P<0.05, \eta^2=0.210]$ ,运动水平主效应显著 $[F(1, 25)=6.811, P<0.05, \eta^2=0.214]$ ,地图难度主效应显著 $[F(1, 25)=27.402, P<0.001, \eta^2=0.523]$ (见图 6(b))。

进一步进行简单效应分析, 结果发现在简单地图条件下, 运动水平主效应不显著 [ $F(1, 25)=1.837, P=0.187, \eta^2=0.068$ ]; 在复杂地图条件下, 运动水平主效应显著 [ $F(1, 25)=11.157, P<0.01, \eta^2=0.309$ ], 新手组血氧浓度大于专家组。在新手组条件下, 地图难度主效应不显著 [ $F(1, 25)=3.409, P=0.077, \eta^2=0.120$ ]; 在专家组条件下, 地图难度主效应显著 [ $F(1, 25)=31.674, P<0.001, \eta^2=0.559$ ], 复杂地图血氧浓度显著高于简单地图。

3) 左侧背外侧前额叶(L-DLPFC)测试结果。

结果显示: 地图难度  $\times$  运动水平的交互效应显著 [ $F(1, 25)=7.820, P<0.001, \eta^2=0.401$ ], 运动水平主效应显著 [ $F(1, 25)=7.418, P<0.05, \eta^2=0.229$ ], 地图难度主效应显著 [ $F(1, 25)=33.024, P<0.001, \eta^2=0.569$ ] (见图 6(c))。

进一步进行简单效应分析, 结果发现在简单地图条件下, 运动水平主效应不显著 [ $F(1, 25)=2.154, P=0.155, \eta^2=0.079$ ]; 在复杂地图条件下, 运动水平主效应显著 [ $F(1, 25)=14.763, P<0.01, \eta^2=0.371$ ], 新手组血氧浓度大于运动员受试者。在新手组条件下, 地图难度主效应显著 [ $F(1, 25)=4.187, P<0.05, \eta^2=0.145$ ]; 在专家组条件下, 地图难度主效应显著 [ $F(1, 25)=37.895, P<0.001, \eta^2=0.603$ ], 复杂地图血氧浓度显著高于简单地图。

4) 右侧背外侧前额叶(R-DLPFC)测试结果。

结果显示: 地图难度  $\times$  运动水平的交互效应显著 [ $F(1, 25)=16.702, P<0.001, \eta^2=0.401$ ], 运动水平主效

应显著 [ $F(1, 25)=4.338, P<0.05, \eta^2=0.148$ ], 地图难度主效应显著 [ $F(1, 25)=31.976, P<0.001, \eta^2=0.561$ ] (见图 6(d))。

进一步进行简单效应分析, 结果发现在简单地图条件下, 运动水平主效应不显著 [ $F(1, 25)=1.087, P=0.307, \eta^2=0.042$ ]; 在复杂地图条件下, 运动水平主效应显著 [ $F(1, 25)=8.006, P<0.01, \eta^2=0.243$ ], 新手组血氧浓度大于专家组受试者。在新手组条件下, 地图难度主效应显著 [ $F(1, 25)=4.533, P<0.05, \eta^2=0.153$ ], 复杂地图血氧浓度显著高于简单地图; 在专家组条件下, 地图难度主效应显著 [ $F(1, 25)=35.281, P<0.001, \eta^2=0.585$ ], 复杂地图血氧浓度显著高于简单地图。

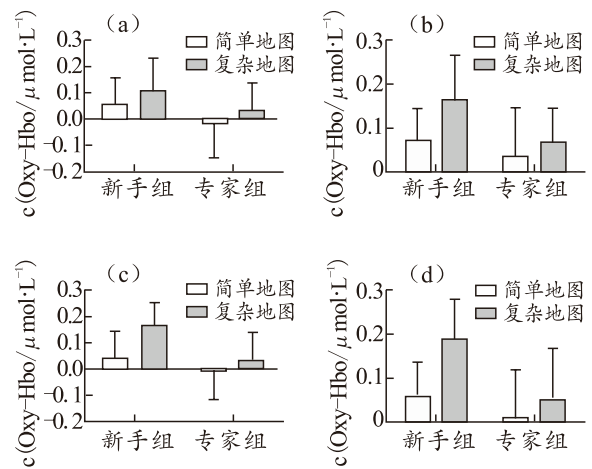


图 6 不同变量条件下 ROI 上 Oxy-Hb 浓度对比结果

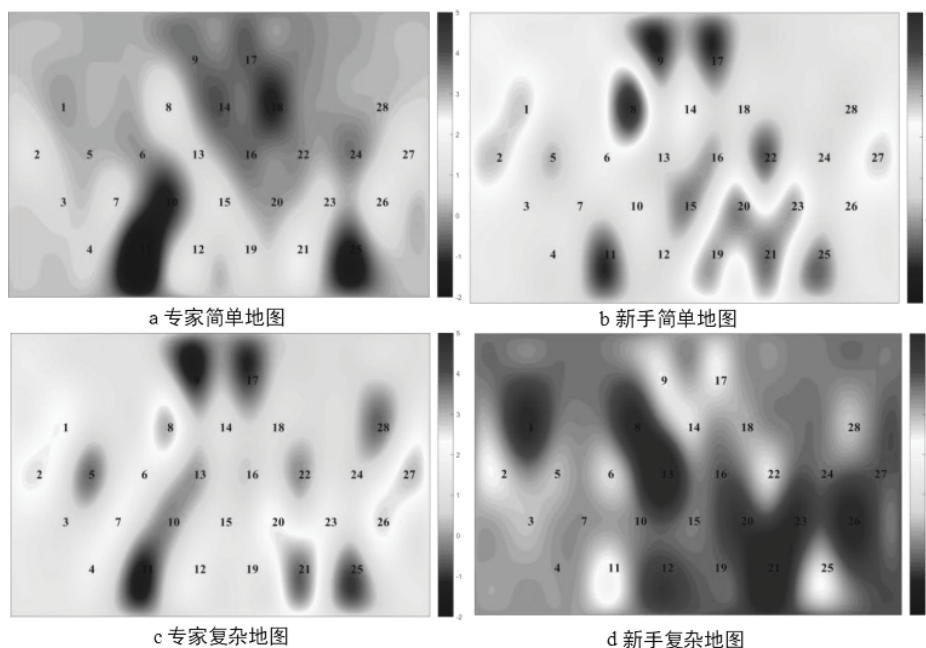


图 7 不同变量条件下 ROI 上 Oxy-Hb 浓度激活图

### 3 结果分析

#### 3.1 定向运动员心理旋转能力的行为学特征

研究以定向运动专项地图作为刺激材料对不同水平定向运动员在不同地图难度条件下的心理旋转能力进行测试。从行为学结果可以得知,地图难度的主效应表现为对复杂地图的识图反应时显著长于简单地图,正确率显著偏低,难度的加大制约了个体的行为绩效。运动水平的主效应表现为新手组识图反应时显著长于专家组,正确率上显著偏低。行为结果比较表明,新手组在心理旋转能力上与专家组有一定差距,专家组运动员的心理旋转能力优于新手组,具体呈现在高准确率和较快的加工速度,该结果也验证了本研究的假设,心理旋转能力与运动员过去经验有着很大的关联,专家运动员在专项绩效上具有认知优势,这与已有的研究结果一致<sup>[23]</sup>。许多研究发现,专家组运动员能够充分调动丰富的体育经验,也能够更灵活地利用先验信息;去提高匹配条件下的决策速度,同时减少非匹配条件下的决策损失<sup>[24]</sup>。Eccles 等<sup>[25]</sup>的研究表明定向专家运动员已经掌握了预测和计划技能,可以帮助他们准备对环境的快速变化做出最佳反应。定向专家组运动员通过表征过程对心象地图进行再现,不断完善心象地图,从而提高定向专家组运动员的空间认知加工速度,表征心理旋转能力形成优势效应<sup>[26-27]</sup>。

认知负荷对心理旋转的影响是研究人员关注的重要问题之一。研究中采用的刺激材料均为定向运动比赛专用地图,复杂地图相较于简单地图涉及到更多的地貌信息,复杂地图是经过高度概括综合的图形,包括复杂各异的地图形状、符号和标记。复杂地图无疑更加考验定向运动员的识图心理旋转能力,不单单是反应时,也包括正确率。这与 Bethell-Fox 等<sup>[28]</sup>的研究也一致,他们认为受试者进行心理旋转加工,反应时会伴随着图像的复杂程度而延长。难度在一定程度上也代表着认知负荷,复杂地图比简单地图难,但需要受试者在同样的实验条件下去甄别,面对复杂地图时需要花费更多的时间和精力去进行精确的判断。反之,简单地图条件下所需认知资源较少,相对认知负荷也会变化,因此对任务干扰较小。定向运动普修课的大学生,由于对定向运动地图有用信息的把握还不是很准确,从而在地图空间认知任务下绩效不如专家组运动员。

综上所述,地图难度制约着定向专家组运动员和新手组的识图心理旋转能力,运动水平也影响着运动员和新手组的识图心理旋转能力和定向运动员的任务绩效。本研究用反应时和正确率来衡量定向运动员心理旋转能力,然而这两个指标主要反映运动员任务测试的结果,无法准确地了解识图过程中运动员的表现,

因此借助 fNIRS 技术来监测任务过程中定向运动员大脑前额叶皮质区的变化。

#### 3.2 定向运动员心理旋转能力的脑激活表现

本研究使用多通道 fNIRS 系统探索识图心理旋转任务过程中定向运动员 VLPFC 和 DLPFC 的参与,目的是了解不同水平运动员心理旋转任务行为绩效结果与脑活动的关系,深入探究定向运动项目的认知价值。

在 fNIRS 结果中得知,在复杂地图条件下,专家组 Oxy-Hb 浓度显著低于新手组,通过脑血氧激活图也发现,新手复杂地图条件下大脑激活最为显著。不同水平的运动员在脑血氧激活上表现出了不同的差异,也与本研究的假设及相关领域的研究结果相一致,以往对神经效率的研究表明,相关领域的表现越高(认知能力越高),大脑皮层的激活程度越低,呈负相关。大脑的神经资源被保存和自动化,展现出大脑皮层神经的高效率<sup>[29]</sup>。一些研究人员在逻辑推理<sup>[30]</sup>、处理速度<sup>[31]</sup>、工作记忆<sup>[32]</sup>、问题解决<sup>[33]</sup>、驾驶<sup>[34]</sup>等任务处理方面取得了类似的结果,解释了个体表现差异的脑功能机制。一些与运动相关的研究表明,长期学习或训练可以提高大脑神经的效率。原因可能与通过锻炼来优化大脑皮层功能、减少大脑激活有关。从大脑皮层功能激活来看,解释运动员绩效的内在神经功能机制,进而验证神经效率假说<sup>[35]</sup>。

此外,难度变量条件下脑血氧的差异也是本研究的重点。行为学数据表明,难度加大制约了个体的行为绩效。通过近红外数据分析,发现随着难度的提升 Oxy-Hb 浓度显著提升,专家组更为明显。这说明,认知负荷诱发了前额叶脑功能活动强度,在其他研究中也发现 DLPFC 在冲突任务中被激活<sup>[36]</sup>,当任务过程中复杂性或整合需求增加时,DLPFC 也同样被激活<sup>[37]</sup>。同时,空间注意、场景记忆、空间定位的关键区域是 VLPFC<sup>[38-39]</sup>。根据前额叶皮层网络模型<sup>[40]</sup>,VLPFC 在空间认知中起着关键作用。在行动控制过程中,当复杂性或整合需求增加时,大脑也相应会增加其认知负荷,因此运动员在任务中需要选择对应信息以采取行动,调动 VLPFC 和 DLPFC 去感知任务过程中识图空间方面的信息,通过获得的信息与运动控制结构产生联系。定向运动心理旋转任务是一个复杂的认知加工过程,地图难度的变换涉及到二维(简单地图)和三维(复杂地图)的转换,受试者为了想象出导航空间整体性,需要拼接整合地图上分散的信息碎片,以形成完整的心象地图<sup>[41]</sup>。识图过程中大脑中 Oxy-Hb 的浓度高意味着更充足的血流供应,带来大脑代谢所需要的能源物质,因此在复杂地图条件下其中复杂的地形会调动更加多的认知参与定向专家组运动员受任务难度改变的影响

更为显著,这可能是由于在对复杂地图的理解和认知加工上专家运动员具有着专项认知优势,在应对不同难度定向地图时不同水平运动员所采用的策略也出现了差异。通过脑血氧的激活程度表明难度制约着定向运动员的行为绩效,这次绩效差异是由于对地图专项的认知所导致,在未来的专项训练中,需增加复杂地图认知的刻意训练,进一步提升新手组的心理旋转能力,从而提升运动成绩。

#### 4 结论

良好的识图心理旋转能力是定向运动员快速选择目标点、完成比赛的基础,深入了解定向运动员的识图心理旋转能力,对于提升专项技能水平具有积极的意义。研究通过不同地图难度条件下不同水平运动员的识图心理旋转行为学及脑激活特征分析得知,专家运动员较新手运动员在完成识图心理旋转任务时表现出高任务绩效,Oxy-Hb 激活较新手组低,展现出了-定的专项认知优势,不同地图难度条件对定向运动员空间认知加工产生了不同的绩效影响及脑激活变化。研究所采用的研究方法对于深入开展定向运动员专项认知优势方面的相关研究具有很好的推动作用,获得的研究结论对于加深人们对定向运动项目认知价值的认识很有帮助。

#### 参考文献:

- [1] ANNE C M, ECCLES D W, ETIENNE B. What makes an orienteer an expert? A case study of a highly elite orienteer's concerns in the course of competition[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2012, 30(1): 91-99.
- [2] 方浩,宋章通,杨流,等. VR 移动城市导航地图设计中的空间认知要素[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(8): 1124-1130.
- [3] UTTAL D H, MEADOW N G, TIPTON E, et al. The malleability of spatial skills: A meta-analysis of training studies[J]. *Psychological Bulletin*, 2013, 139: 352-402.
- [4] SHEPARD R N, METZLER J. Mental rotation of three-dimensional objects abstract. The time required to recognize that two perspective drawings portray[J]. *Science*, 1971, 171(2): 701-703.
- [5] 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: 664640.
- [6] TAYLOR B, YAM A, BELCHIOR P, et al. Videogame and computer intervention effects on older

adults' mental rotation performance[J]. *Games for Health Journal*, 2021, 10(3): 198-203.

- [7] KRAUSE D, RICHERT B, WEIGELT M. Neurophysiology of embodied mental rotation-event-related potentials in a mental rotation task with human bodies as compared to alphanumeric stimuli[J]. *The European Journal of Neuroscience*, 2021, 54(4): 5384-5403.
- [8] 宋杨,唐思洁,绿红. 心理旋转能力对定向运动选手识图效率的影响研究[J]. *体育学刊*, 2021, 28(4): 125-130.
- [9] 冯甜,李亚伟,张忠秋. 跳水运动员心理旋转的时间具身效应及脑加工时程特征[J]. *北京体育大学学报*, 2021, 44(2): 105-115.
- [10] LIU Y. Visual search characteristics of precise map reading by orienteers[J]. *PeerJ*, 2019, 7.
- [11] 李俊,王立小,王亮. 定向运动选手空间认知特征分析[J]. *体育世界·学术*. 2007(9): 91-93.
- [12] 叶钰侨,刘阳,黄修禹,等. 地图特征和心理旋转对定向越野运动员识图能力的影响: 空间线索提示的作用[C]//第二十二届全国心理学学术会议摘要集. 北京: 中国心理学会, 2019: 1903-1904.
- [13] 郭程. 定向运动新手-专家组运动员心理旋转能力的比较研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2018.
- [14] 刘阳,何劲鹏. 定向运动选手识图过程中视觉搜索特征研究[J]. *中国体育科技*, 2018, 54(4): 120-128+145.
- [15] PAOL P, ILIAS T, ANTONIA H, et al. The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2020, 1464(1): 5-29.
- [16] VALENTINA Q, MARCO F. Functional near-Infrared spectroscopy (fNIRS) for assessing cerebral cortex function during human behavior in natural/social situations: A concise review[J]. *Organizational Research Methods*, 2019, 22(1): 46-68.
- [17] ZTÜRK Z, ALGUN Z C, BOMBAC H, et al. Changes in prefrontal cortex activation with exercise in knee osteoarthritis patients with chronic pain: An fNIRS study[J]. *Journal of Clinical Neuroscience*, 2021, 90(1): 144-151.
- [18] PELICIONI P H S, TIJSMA M, LORD SR, et al. Prefrontal cortical activation measured by fNIRS during walking: effects of age, disease and secondary task[J]. *PeerJ*, 2019, 7: e6833.
- [19] YEUNG M K, LEE T L, CHAN A S. Right-



- lateralized frontal activation underlies successful updating of verbal working memory in adolescents with high-functioning autism spectrum disorder[J]. *Biological Psychology*, 2019, 148, 107743.
- [20] MAKIZAKO H, DOI T, SHIMADA H, et al. Relationship between going outdoors daily and activation of the prefrontal cortex during verbal fluency tasks (VFTs) among older adults: A near-infrared spectroscopy study[J]. *Archives of Gerontology & Geriatrics*, 2013, 56(1): 118-123.
- [21] BELLI V D, ORCIOLI-SILVA D, BERETTA V S, et al. Prefrontal cortical activity during preferred and fast walking in young and older adults: An fNIRS study[J]. *Neuroscience*, 2021(20), 473: 81-89.
- [22] CUI X, BAKER J M, LIU N, et al. Sensitivity of fNIRS measurement to head motion: An applied use of smartphones in the lab[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2015, 245: 37-43.
- [23] 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.
- [24] RUSSELL S, JENKINS D G, HALSON S L, et al. How do elite female team sport athletes experience mental fatigue? Comparison between international competition, training and preparation camps[J]. *European Journal of Sport Science*, 2021: 11.
- [25] ECCLES D W, WALSH S E, INGLEDEW D K. A grounded theory of expert cognition in orienteering[J]. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 2002, 24(1): 68-88.
- [26] HABACHA H, MOREAU D, JARRAYA M, et al. Dissociating object-based from egocentric transformations in mental body rotation: Effect of stimuli size[J]. *Experimental Brain Research*, 2018, 236(1): 275-284.
- [27] KOLB H, SOBOTKA R, WERNER R. A model of performance determining components in orienteering[J]. *SCI Orienteering*, 1987(3): 71-81.
- [28] BETHELL-FOX C E, SHEPARD R N. Mental rotation: Effects of stimulus complexity and familiarity[J]. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1988, 14(1): 12-23.
- [29] 彭艳芳, 任杰. 精准类项目运动表现与大脑 EEG 特征潜在关系研究[J]. *天津体育学院学报*, 2021, 36(3): 332-338.
- [30] 吴增生. 教育神经科学视野下的初中几何教学策略创新[J]. *教育生物学杂志*, 2021, 9(3): 249-256.
- [31] MAŁGORZATA P W, TOKOVAROV M, KACZOROWSKA M, et al. Three-class classification of cognitive workload based on EEG spectral data[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(24): 5340.
- [32] ANNA M P, ELISENDA B, NOELIA V C, et al. Long-term brain effects of N-back training: an fMRI study[J]. *Brain Imaging and Behavior*, 2019, 13(4): 1115-1127.
- [33] 马玉蓉. 身体运动功能训练促进老年人认知执行功能的实验研究[D]. 北京: 首都体育学院, 2021.
- [34] 许子明, 牛一帆, 温旭云, 等. 基于脑电信号的认知负荷评估综述[J]. *航天医学与医学工程*, 2021, 34(4): 339-348.
- [35] BABILONI C, VECCHIO F, INFARINATO F, et al. Simultaneous recording of electroencephalographic data in musicians playing in ensemble[J]. *Cortex*, 2011, 47(9): 1082-1090.
- [36] FAN J, FLOMBAUM J I, MCCANDLISS B D, et al. Cognitive and brain consequences of conflict[J]. *Neuroimage*, 2003, 18(1): 42-57.
- [37] STRATEN A V D, HUYSER C, WOLTERS L, et al. Long-term effects of cognitive behavioral therapy on planning and prefrontal cortex function in pediatric obsessive-compulsive disorder[J]. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 2018, 28(4): 320-328.
- [38] WILSON C R E, GAFFAN D, MITCHELL A S, et al. Neurotoxic lesions of ventrolateral prefrontal cortex impair object-in-place scene memory[J]. *The European Journal of Neuroscience*, 2007, 25(8): 2514-2522.
- [39] MARIKA C, STEFANIA L, ALESSIA B, 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): 785-797.
- [40] MARTINET L E, SHEYNIKHOVICH D, BENCHENANE K, et al. Spatial learning and action planning in a prefrontal cortical network model[J]. *PLoS Computational Biology*, 2011, 7(5), e1002045.
- [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.