



## 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

### Study on Spatial Distance Perception Characteristics of Orienteers: Evidences from Behavioral and fNIRS

唐思洁<sup>1,2</sup>, 秦奎元<sup>1</sup>, 李瑛<sup>1</sup>, 鲍圣彬<sup>3</sup>, 刘阳<sup>1\*</sup>

TANG Sijie<sup>1,2</sup>, QIN Kuiyuan<sup>1</sup>, LI Ying<sup>1</sup>, BAO Shengbin<sup>3</sup>, LIU Yang<sup>1\*</sup>

**摘要:**目的:探究不同空间场景下不同水平定向运动员空间距离感知的特征。方法:采用2(运动水平:专家、新手)×2(场景类型:地图场景、实景场景)的混合实验设计,通过功能性近红外光谱成像技术测量在空间距离感知任务下定向运动员背外侧前额叶(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)在地图场景条件下,专家组正确率显著高于新手组,反应时显著短于新手组;在实景场景条件下,专家组正确率显著高于新手组;专家组和新手组在实景场景下正确率显著高于地图场景,反应时显著低于地图场景。2)新手组在L-VLPFC、R-VLPFC和L-DLPFC脑区Oxy-Hb激活显著,且实景场景激活程度大于地图场景;专家组在L-DLPFC脑区Oxy-Hb激活显著,且地图场景激活程度大于实景场景;实景场景条件下,L-VLPFC、L-DLPFC和R-DLPFC脑区Oxy-Hb激活显著,新手组的血氧浓度高于专家组。3)专家组在地图场景下行为绩效与L-DLPFC脑区的激活水平显著相关;新手组在实景场景下行为绩效与L-DLPFC和R-DLPFC脑区的Oxy-Hb激活水平显著相关;专家组和新手组的Oxy-Hb激活程度与正确率呈正相关,与反应时呈负相关。结论:1)专家组在空间距离感知任务中表现出高任务绩效和专项认知优势,具体表现为Oxy-Hb激活程度低;2)不同空间场景类型对定向运动员空间距离感知加工产生了不同的行为绩效和脑加工特征,Oxy-Hb激活变化与认知行为表现存在相关性,受运动水平及场景类型制约,体现在不同的脑区。

**关键词:**定向运动;功能性近红外光谱成像技术;空间距离感知;地图特征

**Abstract:** Objective: To explore the characteristics of orienteers spatial distance cognition in different levels under different spatial scenarios. Methods: Adopting mixed experimental design (level: Expert, novice) × (scene type: Map scene, real scene). Meanwhile, the changes of orienteers Oxy-Hb concentration in DLPFC and VLPFC under spatial distance perception task were measured by functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). Results: 1) Under the map scene condition, the correct rate of the expert group was significantly higher than that of the novice group, and the reaction time was significantly shorter than that of the novice group; under the condition of the real scene, the correct rate of the expert group was significantly higher than that of the novice group; the accuracy rate of the expert group and the novice group in the real scene is significantly higher than that of the map scene, and the reaction time is significantly lower than that of the map scene. 2) The novice group had significant activation of Oxy-Hb in the L-VLPFC, R-VLPFC and L-DLPFC, and the activation degree of the real scene was greater than that of the map scene; the expert group had significant activation of Oxy-Hb in the L-DLPFC, and the activation degree of the map scene was greater than that of the real scene; under the condition of the real scene, the Oxy-Hb activation in the brain regions of L-VLPFC, L-DLPFC and R-DLPFC was significant, and the blood oxygen concentration of the novice group was higher than that of the expert group. 3) In the map scene, the behavioral performance of the expert group was significantly correlated with the activation level of the L-DLPFC; in the real

#### 基金项目:

中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(GK202007035);陕西省教育科学“十三五”规划课题(SGH20Y1061)

#### 第一作者简介:

唐思洁(1996-),女,硕士,主要研究方向为户外运动理论与方法,E-mail:805610126@qq.com。

#### \*通信作者简介:

刘阳(1979-),男,教授,博士,硕士研究生导师,主要研究方向为运动领域的注意、记忆与决策,E-mail:liuyang0330@snnu.edu.cn。

#### 作者单位:

1. 陕西师范大学,陕西西安710119;
  2. 南山外国语学校(集团)深汕西中心学校,广东深圳518200;
  3. 南山外国语学校(集团)桃源中学,广东深圳518073
1. Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;  
2. Nanshan Foreign Language School (Group) Shenshan West Centre School, Shenzhen 518200, China;  
3. Nanshan Foreign Language School (Group) Taoyuan Middle School, Shenzhen 518073, China.

scene, the behavioral performance of the novice group was significantly correlated with the activation level of the L-DLPFC and R-DLPFC. The degree of Oxy-Hb activation in the expert group and the novice group was positively correlated with the correct rate, and negatively correlated with the response time. Conclusions: 1) The expert group shows high task performance and specific cognitive advantages in the spatial distance perception task, the specific performance is low activation of Oxy-Hb; 2) the different spatial scene types produced different behavioral performance and brain processing characteristics for the orienteers' spatial distance perception processing, there is a correlation between Oxy-Hb activation and cognitive behavioral performance, which is restricted by the level of athletes and the type of scene, and it is reflected in different brain regions.

**Keywords:** orienteering; fNIRS; spatial distance perception; map features

**中图分类号:**G826 **文献标识码:**A

个体对空间的距离感知是认知心理学的基本问题。距离感知是空间知觉的重要认知成分,是个体对物体形状、大小、距离和方位等的认知过程(孙帅,2017)。20世纪50年代,Gibson(1950)已开展对视觉空间感知觉的研究,提出了空间认知的理论,并探讨了包括目标物的距离、深度、方向等因素对空间感知觉的影响,为视觉空间感知觉方面的研究奠定了基础。在20世纪70年代,Schiff等(1979,1980)发现人可以凭借大量外部信息准确判断前方物体的距离。随着对空间距离研究的逐渐深入,Lee等(1982)研究发现,经验对于空间感知判断的重要性。Cutting等(1995)认为,空间距离能够判断物体的空间位置的原因是利用了相对大小、纹理和空气密度等深度线索。游旭群等(2010)在空间认知理论中强调了高级认知机制是在对各种初级感觉信息的分析过程中体现出来的认知功能水平。因此,空间距离感知是人的基本认知能力,经验积累与刻意训练有助于空间距离感知能力的提升。

有研究发现,优秀运动员与新手之间在视觉空间判断上存在差异,主要集中在球类、击剑等运动项目(李维仁等,2009)。定向运动比赛场地多为户外公园或森林,是一项需要参赛者借助地图和指北针进行导航的运动。在定向运动比赛中,运动员能否快速、准确判断图上距离(地图场景)和实景距离(实景场景)是比赛取得胜利的关键因素。因此,定向运动员需具备对地形、地貌、地物的形状、大小、远近以及方位等空间特征的感知能力和空间判断能力(郭恩强,2011)。综合有关定向运动项目的科学研究,主要集中在视觉搜索、工作记忆、认知决策、心理旋转等领域(刘洁,2021;刘阳,2017;刘阳等,2018a,2018b,2018c;唐思洁等,2021;宋杨等,2021),而鲜见定向运动员空间距离感知认知特征相关的科学探索研究。

随着认知神经科学的深入开展,功能性近红外光谱成像技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)为进一步探索运动认知加工过程的机制提供了新的技术手段和思路。fNIRS具有受头部移动影响较小、安全性高、便携、时空分辨率较高、可以长时间且重复测量等优点(Cui et al., 2015; Gervain et al., 2011)。通过测量总血

红蛋白(total hemoglobin, Total-Hb)、含氧血红蛋白(oxyhemoglobin, Oxy-Hb)和去氧血红蛋白(deoxyhemoglobin, DeOxy-Hb)的浓度变化,得到大脑区域神经皮层的反映情况,进而分析个体的认知活动。不同空间距离判断过程中大脑激活变化研究发现,不同的神经认知系统负责不同的空间尺度,随着距离尺度变大,大脑前额叶(prefrontal cortex, PFC)区域激活变化受到空间尺度的影响而出现差异(Peer et al., 2019)。因此,本研究选取背外侧前额叶(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)和腹外侧前额叶(ventrolateral prefrontal cortex, VLPFC)作为测量兴趣区。

针对上述问题,提出假设H1:在任务过程中,专家组与新手组之间呈现出不同的行为绩效,专家组运动员表现出专项认知优势;H2:行为学与脑血氧的结果具有相关性,在空间距离感知任务中,不同水平运动员表现出不同的激活特征,不同的场景类型会造成Oxy-Hb的激活差异。通过行为绩效及脑加工机制的探索,了解不同水平定向运动员在场景类型变化下的空间距离感知能力。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

选取26名(男性)定向运动员参加本实验:专家组为陕西省定向运动队现役队员13名,运动员技术等级一级以上,训练年限6年以上,获得过全国定向锦标赛或全国定向精英赛前6名;新手组为某高校定向运动公共体育课学生13名,训练年限半年以上。被试纳入标准为:1)受教育程度一致;2)母语为中文;3)右利手;4)裸眼视力或矫正视力正常;5)色觉正常;6)无精神疾病史;7)能够熟练掌握定向运动专项基础知识;8)未参加过类似实验。被试提前被告知实验相关的内容及注意事项,征得其同意后,签署实验知情同意书。本研究已得到陕西师范大学伦理委员会的批准(编号:20191011)。

### 1.2 实验设计和材料

采用2(运动水平:专家、新手)×2(场景类型:地图场景、实景场景)的两因素混合实验设计。

刺激材料中地图场景采用800×600 dpi像素定向运

动标准比赛地图,比例尺为 1:5 000,地图信息多为建筑物等地物、地貌特征;为减少被试熟悉度,地图材料由 2 名具有中国定向运动协会制图员资格的制图员通过 OCAD 10.0 绘

制。实景场景由专业定向运动裁判员对照地图信息所在场地的实景地拍摄(图 1)。旨在考察定向运动员在面对地图和实际地形时,能否精准地感知 2 个检查点之间的距离。

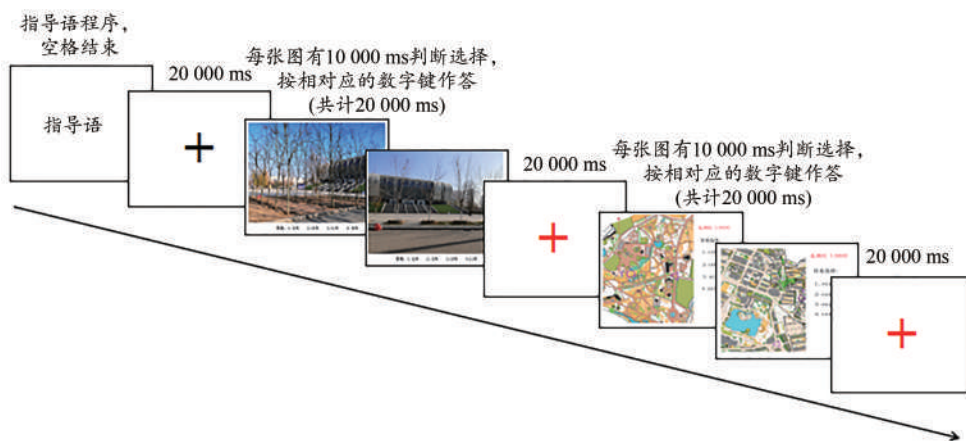


图 1 fNIRS 实验流程图

Figure 1. fNIRS Experiment Flow Chart

### 1.3 实验设备和 fNIRS 测试方案

实验仪器为便携式近红外光谱脑功能成像系统 Nirsport 2。以国际标准 10-10 系统实现探头布置,将帽子中线与 CZ-OZ 线重合,并将最低端处于中间位置的探头与枕骨隆突重合,覆盖顶枕联合区。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 PFC,实现对脑血氧数据采集。在通道布局方面,由 13 个光源探头和 8 个接收探头,共同构成 28 个测量通道(S-D 距离为 3 cm),采样频率设为 7.812 5 Hz(图 2)。本研究根据解剖标定体系(ana-

tomical labeling systems, LBPA 40) 划分出 4 个兴趣区(region of interest, ROI): L-VLPFC、L-DLPFC、R-VLPFC 和 R-DLPFC(表 1)。根据多通道 fNIRS 数据空间配准到 MNI 空间的方法获得与布鲁德曼分区之间的对应关系(Cui et al., 2015)。fNIRS 记录结束后,使用 3D 定位仪确定 Cz、Nz、AL、AR 点及探头位置。上述 ROIs 的所有通道均分布在 PFC。相关研究已发现, fNIRS 通道的位置与特定大脑区域之间存在关系(Okamoto et al., 2009)。

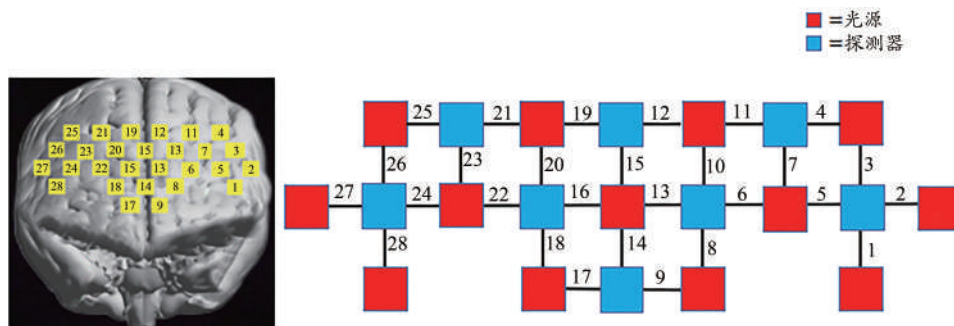


图 2 fNIRS 设备佩戴及通道布局图

Figure 2. fNIRS Equipment Wearing and Channel Layout Diagram

注:数字表示 1~28 个通道;光源与探测器之间的连线代表通道。

### 1.4 实验流程

本研究实验测试程序采用 E-prime 2.0 编写,所有刺激呈现在电脑屏幕且与 fNIRS 系统连接,被试坐在计算机显示器前不受限制的 60 cm 处通过键盘对实验刺激进行判断。

实验包括 2 个阶段。1) 练习阶段:首先呈现实验指导

语,按空格键结束,接着屏幕中央出现黑色注视点“+”记录基线,20 s 后出现实验刺激材料,要求被试认真观察刺激材料中的 2 个点位的实地距离,并在给出的 4 个选项中选择正确答案,同时手指放在对应键上作答(无论按键与否界面呈现时间为 10 s,每 2 张地图结束后休息 20 s)。练习阶段根据被试的反应,屏幕中央显示“正确”“错误”或

“未响应”的反馈 1.5 s,为了最大限度减少超出任务熟悉程度的学习量,练习阶段被限制在 4 min 以内,且使用的刺激材料与正式实验阶段不同。2)正式实验阶段:不同之处在于被试做出选择后不会得到反馈,直到红色注视点“+”结束,进入到下一试次。本研究共向被试呈现 64 张图片,其中前 32 张为实景场景,后 32 张为地图场景。期间被试的行为学数据以及血氧数据被记录到文件中。

表1 便携式fNIRS设备通道布局与大脑区域间的对应关系表  
Table 1 Correspondence between Portable fNIRS Device Channel Layout and Brain Regions

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

## 1.5 数据处理与分析

### 1.5.1 行为学数据

采用 SPSS 25.0 对收集的行为学数据进行正态分布检验,柯尔莫戈洛夫-斯米诺夫检验结果显示,所有数据的显著性均大于 0.05 阈值,服从正态分布。通过重复测量

方差分析对各指标的数值进行统计分析,并采用 Bonferroni 校正进行事后检验。

### 1.5.2 fNIRS 数据

Nirsport 2 系统可通过朗伯比尔定律对采集的光学数据进行解算,得到血氧信号数据。通过数据比对发现,相比于 DeOxy-Hb 而言,选取 Oxy-Hb 来反映大脑神经激活水平更为真实、有效 (Schroeter et al., 2004)。因此本研究采用 Oxy-Hb 信号考察被试的大脑神经激活变化水平。采用 Homer 2 进行数据预处理,本研究使用了带通滤波的方法(滤除大于 0.1 Hz 和小于 0.01 Hz 的成分),去除心跳、呼吸等对 fNIRS 数据的影响;采用主成分分析法去除运动伪迹 (Barker et al., 2013; Virtanen et al., 2009)。取各任务条件下所有试次的 Oxy-Hb 数值的平均值,得到被试在各个任务条件下每个通道在单位时间内各采样点的平均值。ROIs 所包含的 6~7 个通道的 Oxy-Hb 数据均值即为该 ROI 的血氧信号(杨海波等, 2019; McKendrick et al., 2019)。数据处理同行为学数据,运用皮尔逊法对 4 个水平下 Oxy-Hb 浓度与行为学结果进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 行为学数据

采用 2(运动水平:专家、新手)×2(场景类型:地图场景、实景场景)两因素重复测量方差分析,对空间距离感知任务中行为学数据进行统计分析(表 2)。

表2 空间距离感知任务正确率和反应时测试结果

Table 2 Accuracy Rate and Reaction Time Test Results of Spatial Distance Perception Tasks

|        | 专家组             |                 | 新手组             |                   |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
|        | 地图场景            | 实景场景            | 地图场景            | 实景场景              |
| 正确率/%  | 68±15           | 74±14           | 40±13           | 52±20             |
| 反应时/ms | 7 171.54±777.35 | 5 760.87±957.15 | 9 125.92±617.60 | 6 603.38±1 191.56 |

#### 2.1.1 正确率

运动水平主效应显著 [ $F_{(1, 24)}=28.086, P<0.001, \eta^2=0.539$ ], 专家组正确率显著大于新手组;场景类型主效应显著 [ $F_{(1, 24)}=5.432, P<0.05, \eta^2=0.185$ ], 实景场景下正确率显著大于地图场景;运动水平×场景类型的交互效应不显著 [ $F_{(1, 24)}=0.461, P=0.504, \eta^2=0.019$ ]。

#### 2.1.2 反应时

运动水平主效应显著 [ $F_{(1, 24)}=28.515, P<0.001, \eta^2=0.543$ ], 专家组反应时显著短于新手组;场景类型主效应显著 [ $F_{(1, 24)}=56.621, P<0.001, \eta^2=0.702$ ], 实景场景条件下反应时显著短于地图场景;运动水平×场景类型的交互效应显著 [ $F_{(1, 24)}=4.524, P<0.05, \eta^2=0.159$ ]。

简单效应分析,在地图场景条件下,运动水平主效应显著 [ $F_{(1, 24)}=50.375, P<0.001, \eta^2=0.677$ ], 专家组反应时显著短于新手组;在实景场景条件下,运动水平主效应不

显著 [ $F_{(1, 24)}=3.586, P=0.070, \eta^2=0.130$ ]。在专家组条件下,场景类型主效应显著 [ $F_{(1, 24)}=14.567, P<0.01, \eta^2=0.378$ ], 在实景场景条件下的反应时显著短于地图场景;在新手组条件下,场景类型主效应显著 [ $F_{(1, 24)}=46.578, P<0.001, \eta^2=0.660$ ], 在实景场景条件下的反应时显著短于地图场景(图 3)。

### 2.2 fNIRS 数据

采用 2(运动水平:专家、新手)×2(场景类型:实景场景、地图场景)两因素重复测量方差分析被试在完成距离感知任务时 PFC 的 Oxy-Hb 浓度变化(图 4、图 5)。

#### 2.2.1 左侧腹外侧前额叶(L-VLPFC)

运动水平主效应不显著 [ $F_{(1, 24)}=0.000, P=0.994, \eta^2=0.000$ ], 场景类型主效应不显著 [ $F_{(1, 24)}=1.800, P=0.193, \eta^2=0.076$ ];运动水平×场景类型的交互效应显著 [ $F_{(1, 24)}=17.373, P<0.001, \eta^2=0.441$ ]。

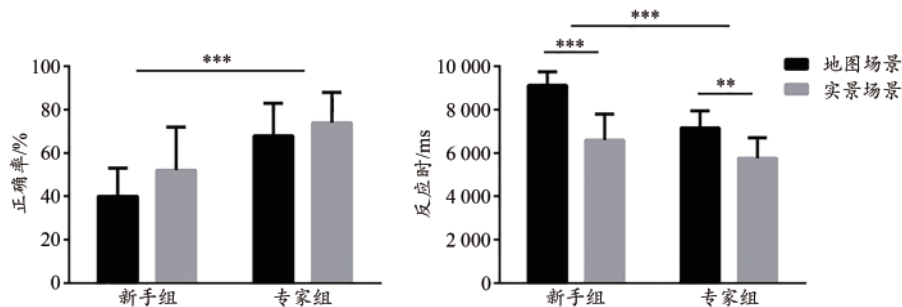


图3 空间距离感知任务行为学结果

Figure 3. Behavioral Results of Spatial Distance Perception Task

注:\*\*表示  $0.001 < P < 0.01$ , \*\*\*表示  $P < 0.001$ ;下同。

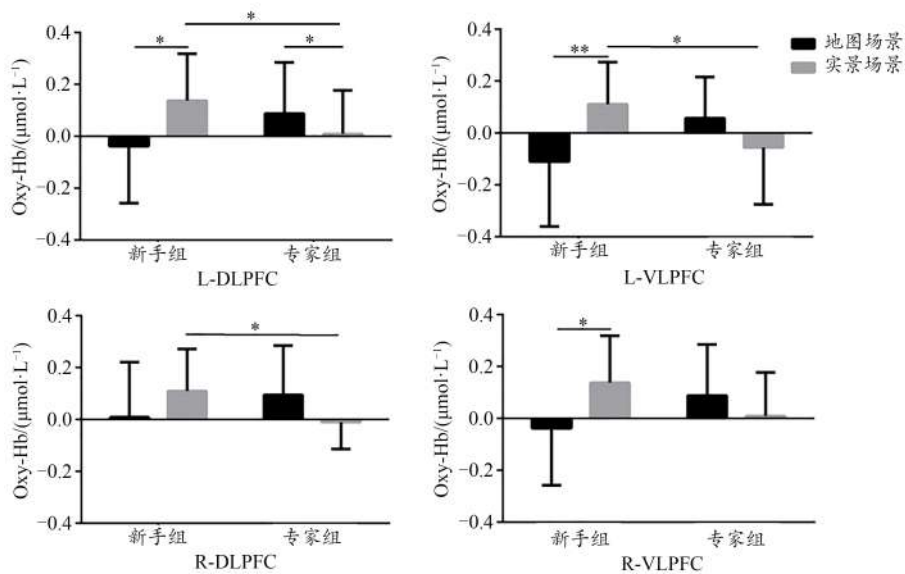


图4 不同兴趣区含氧血红蛋白浓度比较

Figure 4. Comparison of Oxy-Hb Concentration in Different Region of Interest

注:\*表示  $0.01 < P < 0.05$ ,下同。

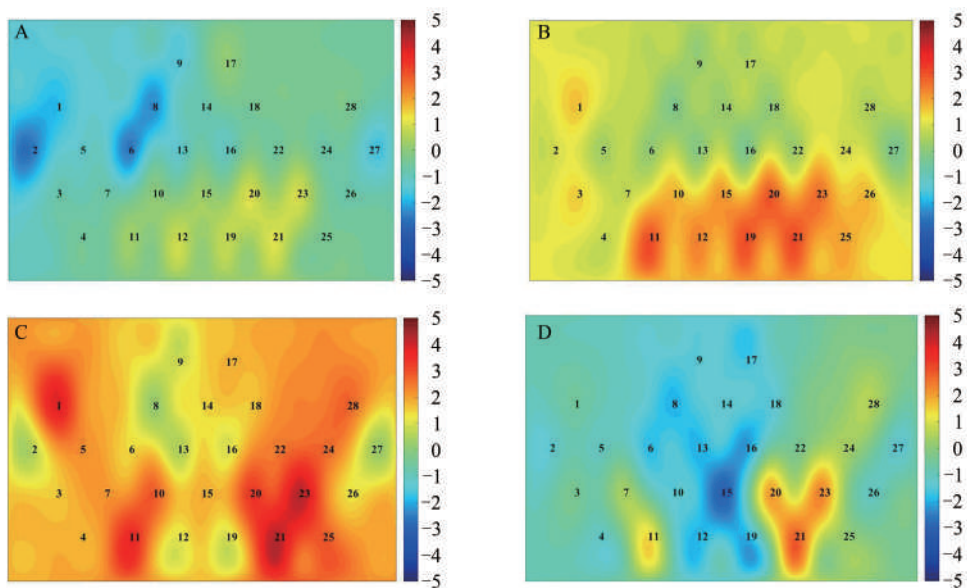


图5 大脑皮层各通道激活t热量图

Figure 5. t-value Calorimetry of Activated Channels in Cerebral Cortex

注:A.新手组地图场景;B.新手组实景场景;C.专家组地图场景;D.专家组实景场景。颜色越红激活程度越高。

简单效应分析,在地图场景条件下,运动水平主效应不显著 $[F_{(1,24)}=3.846, P=0.064, \eta^2=0.149]$ ;在实景场景条件下,运动水平主效应显著 $[F_{(1,24)}=4.454, P<0.05, \eta^2=0.169]$ ,新手组血氧浓度显著大于专家组。在专家组条件下,场景类型不显著 $[F_{(1,24)}=3.995, P=0.058, \eta^2=0.154]$ ;在新手组条件下,场景类型主效应显著 $[F_{(1,24)}=15.178, P<0.01, \eta^2=0.408]$ ,实景场景条件下血氧浓度显著大于地图场景。

### 2.2.2 右侧腹外侧额叶(R-VLPFC)

运动水平主效应不显著 $[F_{(1,24)}=0.000, P=0.988, \eta^2=0.000]$ ,场景类型主效应不显著 $[F_{(1,24)}=1.654, P=0.212, \eta^2=0.070]$ ;运动水平 $\times$ 场景类型的交互效应显著 $[F_{(1,24)}=11.102, P<0.01, \eta^2=0.335]$ 。

简单效应分析,在地图场景条件下,运动水平主效应不显著 $[F_{(1,24)}=2.244, P=0.184, \eta^2=0.093]$ ;在实景场景条件下,运动水平主效应不显著 $[F_{(1,24)}=3.219, P=0.087, \eta^2=0.128]$ 。在专家组条件下,场景类型主效应不显著 $[F_{(1,24)}=2.093, P=0.162, \eta^2=0.087]$ ;在新手组条件下,场景类型主效应显著 $[F_{(1,24)}=10.663, P<0.05, \eta^2=0.326]$ ,实景场景条件下血氧浓度显著大于地图场景。

### 2.2.3 左侧背外侧额叶(L-DLPFC)

运动水平主效应不显著 $[F_{(1,24)}=0.055, P=0.817, \eta^2=0.002]$ ,场景类型主效应不显著 $[F_{(1,24)}=0.066, P=0.799, \eta^2=0.003]$ ;运动水平 $\times$ 场景类型的交互效应显著 $[F_{(1,24)}=11.179, P<0.01, \eta^2=0.337]$ 。

简单效应分析,在地图场景条件下,运动水平主效应不显著 $[F_{(1,24)}=2.805, P=0.108, \eta^2=0.113]$ ;在实景场景条件下,运动水平主效应显著 $[F_{(1,24)}=7.303, P<0.05, \eta^2=0.249]$ ,新手组血氧浓度显著大于专家组。专家组场景类型主效应显著 $[F_{(1,24)}=6.482, P<0.05, \eta^2=0.228]$ ,地图场景条件下血氧浓度显著大于实景场景;新手组场景类型主效应显著 $[F_{(1,24)}=4.762, P<0.05, \eta^2=0.178]$ ,实景场景条件下血氧浓度显著大于地图场景。

### 2.2.4 右侧背外侧额叶(R-DLPFC)

运动水平主效应不显著 $[F_{(1,24)}=0.082, P=0.777, \eta^2=0.004]$ ,场景类型主效应不显著 $[F_{(1,24)}=0.003, P=0.957, \eta^2=0.000]$ ;运动水平 $\times$ 场景类型的交互效应显著 $[F_{(1,24)}=7.760, P<0.05, \eta^2=0.261]$ 。

简单效应分析,在地图场景条件下,运动水平主效应不显著 $[F_{(1,24)}=1.103, P=0.305, \eta^2=0.048]$ ;在实景场景条件下,运动水平主效应显著 $[F_{(1,24)}=4.776, P<0.05, \eta^2=0.178]$ ,新手组血氧浓度显著大于专家组。专家组场景类型不显著 $[F_{(1,24)}=4.035, P=0.057, \eta^2=0.155]$ ;新手组场景类型主效应不显著 $[F_{(1,24)}=3.728, P=0.066, \eta^2=0.145]$ 。

通过统计检验可以看出,不同场景类型和运动水平的主效应在统计学意义上差异不显著。但值得注意的是交互效应均显著,通过简单效应分析得出:新手组场景类型主效应显著的兴趣区为L-VLPFC、R-VLPFC和L-DLP-

FC,实景场景激活程度大于地图场景;专家组场景类型主效应显著的兴趣区为L-DLPFC,地图场景激活程度大于实景场景;实景场景条件下,运动水平主效应显著的兴趣区为L-VLPFC、L-DLPFC和R-DLPFC,新手组的血氧浓度显著高于专家组。

### 2.3 行为学数据和fNIRS数据的相关性分析结果

对运动水平(专家、新手)和场景类型(地图场景、实景场景)4个水平在距离感知任务中的行为学数据与4个兴趣区的Oxy-Hb浓度进行相关性分析(表3)。

表3 行为学数据和fNIRS数据的相关性分析结果

Table 3 Correlation Analysis Results of Behavioral Data and fNIRS Data

| 兴趣区     | 场景类型 | 正确率     |        | 反应时      |          |
|---------|------|---------|--------|----------|----------|
|         |      | 专家组     | 新手组    | 专家组      | 新手组      |
| L-VLPFC | 地图场景 | 0.345   | 0.343  | -0.368   | -0.113   |
|         | 实景场景 | -0.253  | 0.165  | 0.102    | -0.179   |
| L-DLPFC | 地图场景 | 0.749** | 0.481  | -0.797** | -0.218   |
|         | 实景场景 | 0.128   | 0.593* | 0.066    | -0.737** |
| R-VLPFC | 地图场景 | 0.513   | 0.230  | -0.449   | -0.199   |
|         | 实景场景 | -0.180  | 0.209  | 0.284    | -0.519   |
| R-DLPFC | 地图场景 | -0.387  | 0.358  | -0.253   | -0.101   |
|         | 实景场景 | -0.035  | 0.660* | 0.072    | -0.711** |

注:\*表示 $0.01 < P < 0.05$ ; \*\*表示 $0.001 < P < 0.01$ 。

在空间距离感知任务中,fNIRS结果与正确率显著相关,体现在:在地图场景下,专家组的L-DLPFC( $r=0.749, P<0.01$ ;图6A);在实景场景下,新手组的L-DLPFC( $r=0.593, P<0.05$ ;图6B)和R-DLPFC( $r=0.660, P<0.05$ ;图6C);专家组和新手组的血氧激活与正确率呈正相关,即正确率越高,血氧激活程度越高。fNIRS结果与反应时显著相关,体现在:在地图场景下,专家组的L-DLPFC( $r=-0.797, P<0.01$ ;图6D);在实景场景下,新手组的L-DLPFC( $r=-0.737, P<0.01$ ;图6E)和R-DLPFC( $r=-0.711, P<0.01$ ;图6F);专家组和新手组的血氧激活与反应时均呈负相关,即反应时越短,血氧激活程度越高。

## 3 讨论

### 3.1 定向运动员空间距离感知的行为学特征分析

地图场景与实景场景是定向运动员比赛过程中不断切换的2种场景类型。在定向运动比赛中,运动员需要识别地图,根据图上距离及比例尺判断两点间的实地距离;感知点与点的距离,结合实际场地环境测算到达时间。本研究发现,无论是地图场景还是实景场景中,专家组正确率均显著高于新手组;且专家组在地图场景条件下反应时显著短于新手组。本研究的假设H1得到验证,空间知觉能力与运动员的经验有很大的关联,专家组运动员在专项绩效上具有认知优势,与已有的定向运动员认知特征研究结果一致(刘阳等,2017)。专家组运动员在地

图信息和实景信息情景的提取与转换能力上表现出了较高的水平,空间知觉能力较强,识别反应能力较快,新手组在比赛地图场景中实景转换能力与专家组存在一定差距。专家组运动员通过训练和比赛在环境中具有更多的运动和感知经验,对位置的熟悉度会增加,从而可以更广泛、全面获得良好的位置关系,进而准确判断点与点之间

的距离。无论是专家组还是新手组运动员在实景场景中的行为绩效显著优于地图场景,说明定向运动员对实景场景距离感知能力更强。根据本研究采用的刺激材料,推测认为定向地图相较于实景图片涉及到更多的地物和地貌信息,需要具备较好的专项知识才能更准确地判断。

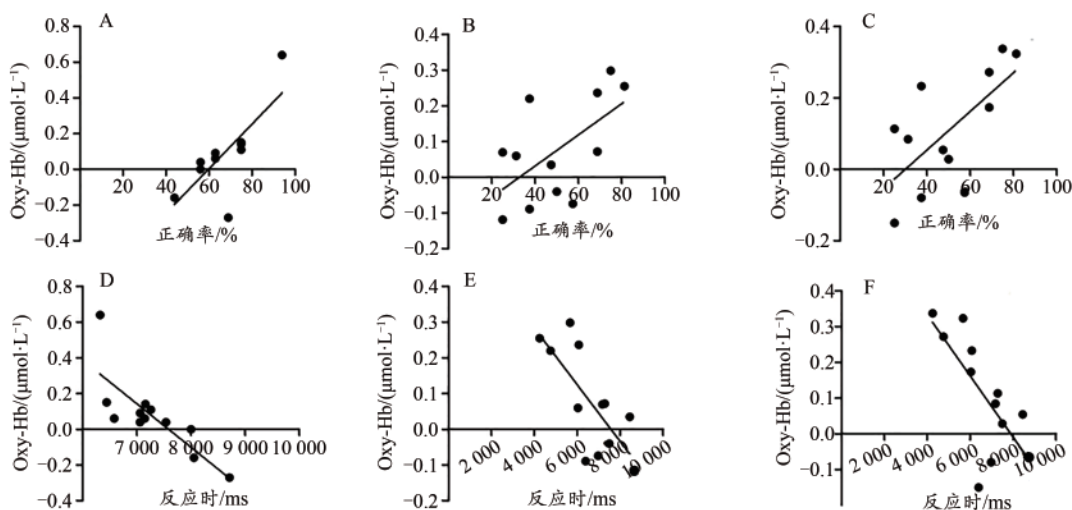


图6 相关性结果

Figure 6. Correlation Results

注:A. 专家组地图场景 L-DLPFC; B. 新手组实景场景 L-DLPFC; C. 新手组实景场景 R-DLPFC; D. 专家组地图场景 L-DLPFC; E. 新手组实景场景 L-DLPFC; F. 新手组实景场景 R-DLPFC。

综上,2种场景均对运动员的空间距离感知能力产生影响。有专项经验的运动员可以在头脑中形成相应的心象地图,有利于在捕捉地图信息时明确方向,通过明确的方向来制定可遵循的认知路线,进而大幅提高其地图认知的效果;但与实景感知相比,地图距离感知能力有待进一步提升,有针对性地对定向运动员进行地图距离感知训练,可更有效提升运动员专项认知技能。

### 3.2 定向运动员空间距离感知的脑激活表现

从认知神经科学的角度,人类的视觉联络皮层会先对外界表象信息进行整合,完成感知的过程,这些信息可能包括物体的形状、颜色、质感和空间位置,而 PFC 完成最后的决策。已有研究发现,空间知觉涉及额顶网络,其中包括 DLPFC 和 VLPFC (Kolb et al., 1987)。本研究对不同水平定向运动员距离感知实验过程中的 Oxy-Hb 浓度进行分析发现,定向运动员对于空间距离感知的个体差异表现在 L-VLPFC、L-DLPFC 和 R-DLPFC 3 个兴趣区,专家组激活程度显著低于新手组。不同水平运动员的脑激活差异验证本研究假设 H2,专家组运动员的脑激活差异是由脑认知加工所造成的,其普遍具有专项认知优势。既往神经效率方面的研究表明,相关领域表现(认知能力)越好,大脑皮层的激活程度越低,呈负相关,这是由于大脑的神经资源被保存和加工自动化后,大脑皮层神经

展现出的高效率 (Haier et al., 1992)。已有研究在逻辑推理 (Grabner et al., 2003)、速度处理 (Rypma et al., 2009)、工作记忆 (Miró-Padilla et al., 2019)、问题解决 (Jaušovec, 2000)、驾驶 (Bernardi et al., 2013) 等任务处理方面也得到了类似的结论。与运动相关的研究表明,长期运动训练会降低运动员在任务过程中使用的神经元数量,减少中枢资源消耗,还可以提高大脑神经效率,从而形成更加集中化思考和有效的大脑激活模式,进而验证神经效率假说 (Babiloni et al., 2011)。

在不同的场景条件下,专家组和新手组表现出不同的脑血氧激活特征,出现了脑区及场景激活的差异。新手组在 L-VLPFC、R-VLPFC 和 L-DLPFC 3 个脑区中,实景场景下的激活程度显著大于地图场景。专家组仅 L-DLPFC 1 个脑区,且地图场景下的激活显著大于实景场景。这可能是由于专家组运动员与新手组运动员在不同的场景类型条件下采用了不同的认知策略,从而造成了脑激活特征的差异。新手组在实景场景条件下 PFC 激活程度更高,可能是由于新手组在地图专项知识上与专家组存在差异,新手组对地图距离感知材料中的符号特征了解较少,更多依据直觉判断,实景条件下新手组可能在任务中对两点之间距离的判断更多参考了周围环境中的建筑物大小、方位及距离,从而激活了更多的脑区,并产生了

激活的差异。专家组在地图场景下的 Oxy-Hb 更高,是因为地图场景涉及到更多的地貌、地物信息,例如等高线、山脊、山谷等地标,运动员识别时需将平面的信息转换为立体的信息,同时还要进行比例尺换算,这需要其具备更为专业且全面的定向运动知识体系进行正确判断。专家组在地图场景距离感知中,通过对符号和比例尺的了解进行决策,其在脑加工过程中涉及地图表征的认知成分造成 Oxy-Hb 浓度的升高。研究表明,不同水平定向运动员受专项能力制约,应对不同场景时所动用的神经资源存在差别(Byun et al., 2014; Yanagisawa et al., 2010)。此外,脑血氧激活图直观显示了定向运动员在空间距离感知任务时的神经信号,并揭示了专家组运动员脑区域(VLPFC和DLPFC)之间的协同作用。

本研究还发现,相关性结果只存在于背侧区域。有研究证明,高认知的有氧运动可以造成PFC的血流动力学变化(Ronca et al., 2021)。PFC的不同区域具有不同的功能,腹侧区域支持信息(记忆)的维持,而背侧区域负责信息操纵或决策(Petrides et al., 1996)。有研究认为,DLPFC在多种涉及注意资源参与的认知功能中占有主导作用,并且背侧区域应对认知维度(形式、位置、顺序等)刺激时,表现出更强的激活状态,与本研究结论一致(Barbey et al., 2009)。提示,通过刻意靶向训练可提升定向运动员的空间距离感知能力,减少信息感知失误,提高竞技水平。

#### 4 结论

本研究整合了行为学和血氧信号证据发现,专家组运动员较新手组运动员在完成空间距离感知任务时表现出高任务绩效和专项认知优势,具体为Oxy-Hb激活程度低;不同场景类型对定向运动员的空间距离感知加工具有不同的绩效影响;脑激活变化与认知行为表现存在相关性,且受运动水平、场景类型及认知策略制约,并体现在不同的脑区。

#### 参考文献:

- 郭恩强, 2011. 论定向越野运动员空间感知能力的培养[J]. 搏击(体育论坛), 3(4): 64-65.
- 李维仁, 吴瑛, 胡贤豪, 2009. 重剑运动员距离感表象训练的实验研究[J]. 南京体育学院学报(社会科学版), 23(1): 122-125.
- 刘洁, 2021. 情绪与视觉空间工作记忆对定向识图认知决策的实验研究[D]. 济南: 山东师范大学.
- 刘阳, 2017. 定向运动选手识图的认知加工特征与技能训练研究[D]. 长春: 东北师范大学.
- 刘阳, 何劲鹏, 2017. 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, 24(1): 64-70.
- 刘阳, 何劲鹏, 刘天宇, 2018a. 定向运动练习者专项认知能力训练的实验研究[J]. 体育学刊, 25(2): 57-62.
- 刘阳, 何劲鹏, 2018b. 定向运动员识图过程中视觉搜索特征研究[J]. 中国体育科技, 54(4): 120-128, 145.
- 刘阳, 杨宁, 2018c. 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, (11): 39-44.
- 宋杨, 唐思洁, 线红, 2021. 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, 28(4): 125-130.
- 孙帅, 2017. 汽车驾驶员空间感知实验研究[D]. 淄博: 山东理工大学.
- 唐思洁, 刘阳, 2021. 定向运动: ADHD 儿童认知功能改善的干预选择[J]. 青少年体育, (3): 46-47.
- 杨海波, 刘和珺, 章鹏, 等, 2019. 掩蔽刺激对目标识别加工的作用: 来自fNIRS的证据[J]. 心理学报, 51(11): 1187-1197.
- 游旭群, 李晶, 2010. 基于参数表征的数量空间关系加工[J]. 心理学报, 42(12): 1097-1108.
- BABILONI C, VECCHIO F, INFARINATO F, et al., 2011. Simultaneous recording of electroencephalographic data in musicians playing in ensemble[J]. Cortex, 47(9): 1082-1090.
- BARBEY A K, BARSALOU L W, 2009. Reasoning and problem solving: Models[J]. Encyclopedia Neurosci, 8(5): 35-43.
- BARKER J W, AARABI A, HUPPERT T J, 2013. Autoregressive model based algorithm for correcting motion and serially correlated errors in fNIRS[J]. Biomed Opt Express, 4(8): 1366-1379.
- BERNARDI G, RICCIARDI E, SANI L, et al., 2013. How skill expertise shapes the brain functional architecture: An fMRI study of visuo-spatial and motor processing in professional racing-car and nave drivers[J]. PLoS One, doi: 10.1371/journal.pone.0077764.
- BYUN K, HYODO K, SUWABE K, et al., 2014. Positive effect of acute mild exercise on executive function via arousal-related prefrontal activations: An fNIRS study[J]. Neuroimage, 98: 336-345.
- CUI X, BAKER J M, LIU N, et al., 2015. Sensitivity of fNIRS measurement to head motion: An applied use of smartphones in the lab[J]. J Neurosci Methods, 245: 37-43.
- CUTTING J E, VISHTON P M, 1995. Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth[M]//Perception of Space and Motion. San Diego, CA: Academic Press: 69-117.
- GERVAIN J, MEHLER J, WERKER J F, et al., 2011. Near-infrared spectroscopy: A report from the McDonnell infant methodology consortium[J]. Dev Cogn Neurosci, 1(1): 22-46.
- GIBSON J J, 1950. The perception of visual surfaces[J]. Am J Psychol, 63(3): 367-384.
- GRABNER R H, STERN E, NEUBAUER A C, 2003. When intelligence loses its impact: Neural efficiency during reasoning in a familiar area[J]. Int J Psychophysiol, 49(2): 89-98.
- HAIER R J, SIEGEL JR B V, MACLACHLAN A, et al., 1992. Regional glucose metabolic changes after learning a complex visuospatial/ motor task: A positron emission tomographic study[J]. Brain Res, 570(1-2): 134-143.
- JAUŠOVEC N, 2000. Differences in cognitive processes between gifted, intelligent, creative, and average individuals while solving complex problems: An EEG study[J]. Intelligence, 28(3): 213-237.
- KOLB H, SOBOTKA R, WERNE R R, 1987. A model of performance determining components in orienteering[J]. Sci J Orienteer, 3(2): 71-81.
- LEE D N, LISHMAN J R, THOMSON J A, 1982. Regulation of gait in long jumping[J]. J Exp Psychol Hum Percept Perform, 8(3): 448-459.