

# 疲劳状态下定向运动员图景识别的认知加工特征研究

吕明明<sup>1</sup>, 孙浩<sup>2</sup>, 孟祥龙<sup>1</sup>

(1.西安工程大学 体育部, 陕西 西安 710048; 2.陕西师范大学 体育学院, 陕西 西安 710062)

**摘 要:** 挑选 32 名不同水平的定向运动员作为被试者, 其中专家组和新手组分别为 16 人; 运用功能性近红外光谱脑成像技术, 监测不同运动强度下定向运动员在图景识别任务里大脑皮层血氧激活的变化情况, 以揭示疲劳状态时定向运动员图景识别的认知加工特征。结果表明: 在图景识别任务中, 运动疲劳会对运动员的行为学绩效产生制约作用, 不过专家组依旧有一定的认知优势, 呈现出较高的正确率, 左侧背外侧前额叶即 L-DLPFC 脑区的激活较为明显; 处于疲劳状态时, 运动员心脏自主调节能力降低, 相关脑区的激活有所减弱, 具体表现为大脑双侧眶额区 OFC 的血氧浓度出现明显下降。研究发现可为日后借助神经调控来提高定向运动员在疲劳状态下的识图绩效以及实现科学化训练提供参考。

**关 键 词:** 定向运动; 运动疲劳; 图景识别; 心率变异性; 功能性近红外光谱成像技术

**中图分类号:** G826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7116(2026)05-0142-10

## A study on the cognitive processing characteristics of scene recognition in orienteering athletes under the condition of exercise fatigue

LV Mingming<sup>1</sup>, SUN Hao<sup>2</sup>, MENG Xianglong<sup>1</sup>

(1.Department of Physical Education, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2.School of Physical Education, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

**Abstract:** A total of 32 orienteering athletes with different skill levels were selected as participants, including 16 experts and 16 novices among them. Functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) was used to monitor changes in cerebral cortex blood oxygen activation during picture recognition tasks under varying exercise intensity, aiming to reveal the cognitive processing characteristics of orienteering athletes in picture recognition under fatigue conditions. The results suggest that in picture recognition tasks, exercise fatigue constrains behavioral performance in athletes, but experts still maintain a certain cognitive advantage, showing a higher accuracy and more pronounced activation in the left dorsolateral prefrontal cortex (L-DLPFC). And under fatigue conditions, athletes' cardiac autonomic regulation ability decreases and activation in related brain regions weakens, specifically manifesting a significant decline in blood oxygen concentration in the bilateral orbitofrontal cortex (OFC). The findings from this study may provide references for future research on applying neuromodulation to improve orienteering athletes' picture recognition performance under fatigue and realize scientific training practice.

**Keywords:** orienteering; exercise fatigue; picture recognition; heart rate variability; fNIRS

定向运动是要求参与者借助地图以及指北针穿越未知区域, 最终以最短时间抵达所有目标点者为获胜方的运动项目<sup>[1]</sup>。在定向运动中, 可快速且准确地把地图信息和现实当中的地物以及地貌特征相互匹配起来

的图景识别能力, 是该运动项目的核心技术<sup>[2]</sup>。图景识别指的是个体对地图符号展开识别, 将其表征成为真实环境的这样一个过程<sup>[3]</sup>。在该过程中, 地图符号的识别、关键信息的选择性注意、路线合理规划决策及

收稿日期: 2025-12-02

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金西部和边疆地区项目(25XJC890002)。

作者简介: 吕明明(1990-), 女, 博士, 研究方向: 认知功能与运动干预。E-mail: 402278863@qq.com 通信作者: 孟祥龙

已有知识的有效记忆提取等,涉及感知、记忆和注意等多个心理认知过程<sup>[4]</sup>。

运动强度对认知功能的影响研究是近年来国内外学者关注的重要领域。当运动强度达到特定程度时,运动员的能量会被消耗并引发疲劳,致使运动员认知能力降低<sup>[5]</sup>。研究显示,足球裁判员在比赛后半段常因运动疲劳出现大脑各项认知功能以及自我控制能力下降的情况,这对判罚行为的准确性产生不利影响<sup>[6]</sup>。而且当处于疲劳状态时,排球运动员的决策失误率会上升<sup>[7]</sup>。已有研究指出,客观与主观刺激对疲劳感的影响取决于运动强度与时间长度,当运动负荷过大身体代谢会出现较大变化,可能抑制认知调节并影响运动员的行为学绩效<sup>[8]</sup>。同时大量研究表明,经过长期训练可以改善运动员的认知加工模式,提高运动员在疲劳状态下对有限神经资源的利用率,从而增强大脑功能连接<sup>[9]</sup>。因此,本研究选取不同水平定向运动员进行疲劳状态下的图景识别认知任务比较,旨在分析不同水平运动员在不同运动状态下认知功能的行为表现与脑激活特征。

定向运动是一项高认知成分的运动项目,要求运动员在高速运动过程中完成地图识别、路线规划等认知任务。已有研究比较不同水平定向运动员在视觉注意、工作记忆、心理旋转等认知功能上的差异<sup>[10-11]</sup>,发现高水平定向运动员具有认知优势,表现为高水平定向运动员更擅长使用认知策略,进而提高决策的正确率和合理性<sup>[12]</sup>。但在现实比赛中,即便是高水平定向运动员在比赛后期也会出现低级错误<sup>[13]</sup>,如方向辨别、路线规划等,从而导致比赛失败,给教练员和运动员带来困扰。针对这一现象,研究通过调节运动强度、监测运动员疲劳状态,分析安静状态和疲劳状态下专家与新手的行为与脑激活差异,深入了解运动疲劳对运动员专项认知能力的影响机制。

功能性近红外光谱脑成像技术(fNIRS)是研究大脑认知和行为的重要手段<sup>[14]</sup>,可以探测大脑区域在执行认知任务时的血氧含量变化<sup>[15-16]</sup>。fNIRS的优点包括非侵入性、易于使用、适用于运动和自然环境下的实验。迄今为止,该技术已经应用于多个运动领域,如太极拳等<sup>[17]</sup>。以往研究发现,前额叶皮质在工作记忆、逻辑推理、行为计划等高级功能中均起关键作用<sup>[18]</sup>。其他脑区的各种信息最终汇集到前额叶,并在此进行加工、处理和整合,从而实现高级认知功能,如决策、问题解决、推理、计划和判断等<sup>[19]</sup>。已有研究表明,背外侧前额叶(DLPFC)脑区与执行功能存在着关联性,而腹外侧前额叶(VLPFC)脑区在空间认知过程发挥着重要的作用,特别是在方位认知和地图表征的加工过

程中<sup>[20]</sup>。一些借助N-back范式的研究发现额极区(FPA)作为核心脑区在工作记忆中起着关键性作用<sup>[21]</sup>,而眶额区皮层(OFC)是在决策过程中肩负着关键的功能作用<sup>[22]</sup>。同时,疲劳状态对于大脑前额叶皮层的激活程度也存在一定影响。研究显示,疲劳状态时因运动引发过度换气致使皮层血流量降低、脑血氧值急剧下滑,最终造成认知效率降低<sup>[23]</sup>。依据上述现有成果,本研究选择背外侧前额叶(DLPFC)、额极区(FPA)、腹外侧前额叶(VLPFC)和眶额区(OFC)作为兴趣区,使用fNIRS设备来观测不同水平运动员在执行图景识别任务的过程中所选兴趣区的氧合血红蛋白浓度的变化情况,同时结合行为学指标展开分析。此外,疲劳状态下运动员交感神经和副交感神经活动呈现显著性变化<sup>[24]</sup>,心率变异性(heart rate variability, HRV)指标可有效监测运动疲劳的变化<sup>[25]</sup>。因此,研究使用HRV分析仪作为运动员疲劳状态的监测手段。

综上,研究采用功能性近红外光谱脑成像技术,选取前额叶的4个兴趣区比较不同水平定向运动员在不同运动状态下图景识别任务的行为绩效和脑激活差异,探究疲劳状态下定向运动员图景识别任务的认知加工特征,以期为专项科学化训练提供理论支撑。研究提出以下假设:(1)运动技能水平对图景识别的行为绩效具有调节作用,即无论在安静或疲劳状态下,专家组均将表现出更高的任务正确率。(2)疲劳状态下,双侧OFC激活显著降低且L-DLPFC的激活水平与任务正确率呈正相关,专家组在此脑区的激活更强。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

本研究被试招募对象为国家一级定向运动员和非专业定向运动员,共32名男性。受试者标准:(1)依据训练年限和运动员等级分为:专家组16人,运动等级要求一级,平均年龄( $21.26 \pm 1.60$ )岁,训练年限均为10年以上,运动员有一个持续的训练计划,每周训练3次及以上,取得过全国赛事前8名的运动成绩。新手组16人,平均年龄( $20.83 \pm 0.84$ )岁,有一定的定向专项训练基础,无运动等级的体育专业学生。(2)专家组与新手组受教育程度一致,均为本科在读。(3)右利手。(4)视力或矫正视力正常,无色盲和色弱。(5)智力水平正常。(6)无重大躯体疾病,未患有脑创伤及神经系统疾病,实验前精神状况良好,无酒精、药物依赖史。(7)均未参加过同类实验。

在实验前一天,向被试详细告知与实验相关的各项要求,其中包括具体的时间安排以及需要注意的各类事项等,在实验正式开始之前记录被试的基本信息,

同时要求被试在实验开展之前保证拥有充足的睡眠且要保持头部清洁,而且在实验前一天不要进行剧烈运动。本实验已经征得所有受试者的同意,都签署实验知情同意书,在实验完成之后领取对应报酬。本研究已获得陕西师范大学伦理委员会的批准(批准文号:SNNU2023301)。

1.2 实验设计

运用 2(组别:新手组、专家组)×2(运动状态:安静状态、疲劳状态)的两因素混合设计方式,其中组间变量设定为组别,组内变量设定为运动状态,因变量包括正确率、前额叶各个兴趣区的氧合血红蛋白浓度变化以及 HRV 指标。

1.3 实验仪器及设备

fNIRS 测试:采用便携式功能性近红外光谱成像仪(LIGHTNIRS 系统),制造于日本岛津公司,以 3 种不同波长的近红外光(780 nm、805 nm、830 nm)、13.33 Hz 的采样率,对不同水平定向运动员在进行不同运动状态下的图景识别任务时的脑区氧合血红蛋白(HbO<sub>2</sub>)、脱氧血红蛋白(HbR)以及总血氧浓度进行监测。由于 HbO<sub>2</sub> 相较于 HbR 来说对大脑局部的血流变化更加敏

感<sup>[26]</sup>,因此本研究采用 HbO<sub>2</sub> 指标,用于反映大脑神经激活水平。在通道布局方面,共设有激光光源探头、接收探头各 8 个,构成 22 个测量通道(见图 1)。该图使用 Matlab 中 BrainNet 插件进行绘制,脑区地形图取自 BrainMesh\_ICBM152\_tal,对光极排布以及通道布局进行具体表示。

通道定位方法如下,首先运用 3D 定位仪(即 FASTRAK 系统)来准确定位光极在头部的具体位置所在,随后借助 NIRS\_SPM 软件的空间概率配准方法,把这些借助 3D 定位仪所获得的位置转变为 MNI 坐标系里的位置坐标,并且在成人布罗德曼区图谱中查找与之对应的脑区。在 ROI 划分中采用标准的解剖标定体系(即 Anatomical Labeling Systems)对大脑前额叶划分 8 个 ROI,ROI 分别是右侧背外侧前额叶(R-DLPFC)、左侧背外侧前额叶(L-DLPFC)、右侧额极区(R-FPA)、左侧额极区(L-FPA)、右侧腹外侧前额叶(R-VLPFC)、左侧腹外侧前额叶(L-VLPFC)、右侧眶额区(R-OFC)以及左侧眶额区(L-OFC)。以上 8 个 ROI 均匀分布在前额叶,每个通道覆盖的脑区及概率见表 1。

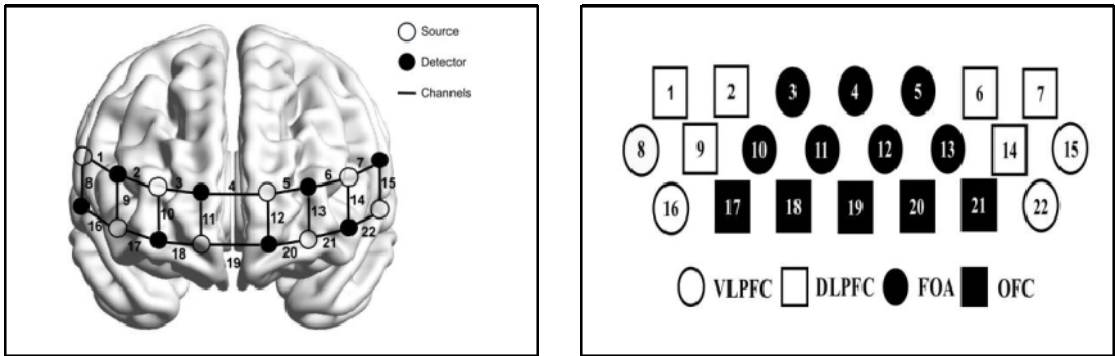


图 1 前额叶皮层通道布局及标定脑区信息(左图光极排布,右图脑区标定)

表 1 通道覆盖的脑区及概率

| ChID  | Brodman area                              | ChID  | Brodman area                              |
|-------|-------------------------------------------|-------|-------------------------------------------|
| CH 1  | 45-Dorsolateral prefrontal cortex, 74.24% | CH 12 | 10-Frontopolar area, 99.67%               |
| CH 2  | 46-Dorsolateral prefrontal cortex, 58.27% | CH 13 | 10-Frontopolar area, 76.34%               |
| CH 3  | 10-Frontopolar area, 100%                 | CH 14 | 46-Dorsolateral prefrontal cortex, 78.88% |
| CH 4  | 10-Frontopolar area, 100%                 | CH 15 | 45-pars triangularis Broca's area, 96.39% |
| CH 5  | 10-Frontopolar area, 91.42%               | CH 16 | 45-pars triangularis Broca's area, 100%   |
| CH 6  | 46-Dorsolateral prefrontal cortex, 81.18% | CH 17 | 11-Orbitofrontal area, 68.06%             |
| CH 7  | 45-Dorsolateral prefrontal cortex, 93.05% | CH 18 | 11-Orbitofrontal area, 78.06%             |
| CH 8  | 45-pars triangularis Broca's area, 78.64% | CH 19 | 11-Orbitofrontal area, 100%               |
| CH 9  | 46-Dorsolateral prefrontal cortex, 80.97% | CH 20 | 11-Orbitofrontal area, 100.00%            |
| CH 10 | 10-Frontopolar area, 67.33%               | CH 21 | 11-Orbitofrontal area, 50.00%             |
| CH 11 | 10-Frontopolar area, 100%                 | CH 22 | 45-pars triangularis Broca's area, 64.74% |

运动疲劳诱发与监测方案:功率自行车设备采用德国 Ergoline 100K 有氧功率自行车。请被试戴上 DOMOR 运动手表的传输带进行功率自行车骑行,用 DOMOR 运动手表遥测被试的心率。先要求被试进行热身活动,然后要求被试踩踏功率自行车进行递增负荷运动。开始时功率为 50 W,每隔 5 min 增加 25 W 功率<sup>[27]</sup>。疲劳状态的判定采用主客观相结合的综合标准:主观上,要求被试根据《主观用力感觉量表(RPE)》进行报告,当 RPE 评分持续达到“非常费力”等级(19~20 分)<sup>[28]</sup>时视为主观疲劳感已达极限;客观上,需同时满足以下两个条件:(1)无法维持目标功率:尽管给予口头鼓励,被试仍无法在连续 30 s 内维持当前递增阶段的预设功率;(2)心率达到平台期:在功率递增阶段,心率不再随负荷增加而显著上升(变化率<5 次/min),且接近其年龄预估最大心率(220-年龄)的 90%以上。当主客观标准均满足时,判定被试已达到本研究定义的“运动性疲劳状态”,随即停止递增负荷运动并进入后续的图景识别测试环节。

#### 1.4 实验流程

要求被试于实验前填写基本情况调查表,内容包括性别、年龄等信息。填写完成后实验人员讲解实验要求,让被试熟悉环境,实验人员为其佩戴 fNIRS 光极帽,调整好松紧度后固定,进行定位校准,随后将光纤插入探头,检查各个通道光线发射和接收是否正常,待各通道信号稳定后进行零点复位测量,实验时每个被试单独进行测试。请被试坐在功率自行车设备上,选取 6 名(专家 3 名、新手 3 名)进行预实验,实验一共分为 2 个阶段,即练习阶段和正式测试阶段。

练习阶段:首先,实验人员向被试讲解实验要求,告知受试者在实验过程中保持头部和肢体相对稳定,

尽量少动。待被试熟知任务内容和操作流程后,实验人员为被试提供纸质刺激材料,刺激材料由定向运动地图、检查点说明表(详细描述地图中点位位置的信息)、指北标识、实景照片(包含 4 个标志物,分别编号 1、2、3、4)组成。地图与实景照片方位相匹配(方向一致),受试者需要判断实景照片中哪个标志物符合地图所描述的信息,并用笔在实景图片中圈出再进入下一个试次。

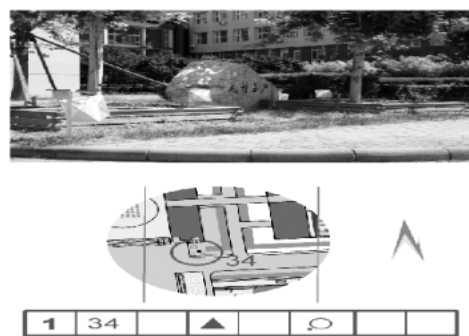


图2 图景识别任务刺激材料

测试阶段:正式实验与练习阶段流程基本相同。在实验开始前,要求被试在安静轻松坐在功率自行车上并保持头部稳定,利用 DOMOR 运动手表遥测被试的心率,当被试心率稳定在 60~90 次/min 时开始安静状态测试<sup>[29]</sup>。每 4 个试次组成一个 block,共 6 个 block,每个 block 之间休息 20 s,共计进行 24 个试次(24 个试次随机呈现),疲劳状态图景识别同安静状态。但每一个 block 间继续完成骑行任务,保持高强度运动状态。每个条件测试间隔 24 h,保证被试体力与脑力完全恢复,正式试验阶段与练习阶段相同(见图 3)。

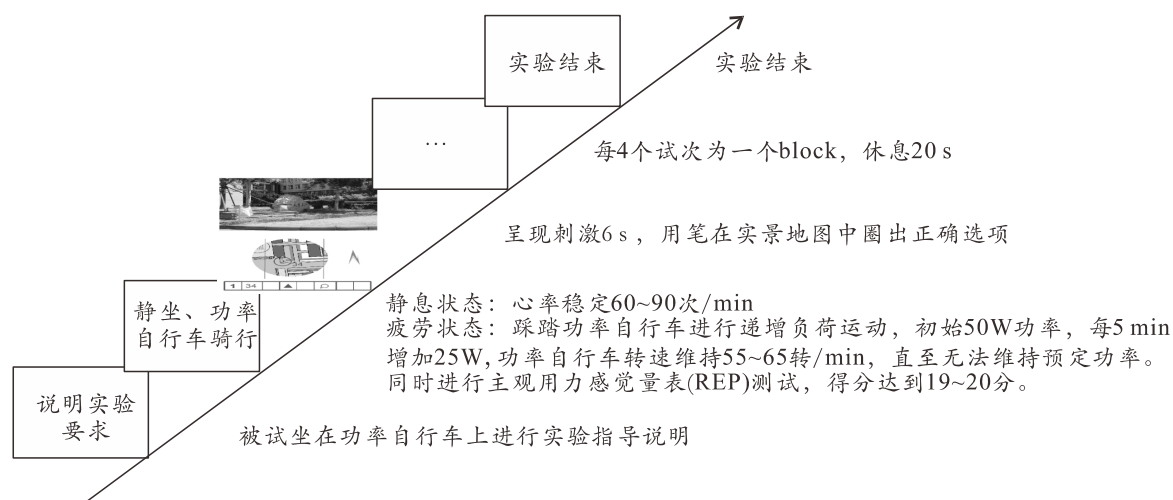


图3 图景识别测试实验流程

## 1.5 数据采集与分析

行为学数据:运用 SPSS 26.0 软件针对实验里所采集的行为学数据进行正态分布检验,结果表明显著性均大于 0.05,这意味着所有数据都服从正态分布。本研究采用 2(组别:新手组、专家组)×2(运动状态:安静状态、疲劳状态)的形式,针对图景识别任务中的行为学数据进行双因素方差分析。

fNIRS 数据:利用 fNIRS 设备自带软件对采集的原始数据进行解算。基于 Matlab(R2013b)平台的 NIRS\_SPM 软件,通过修正的比尔-朗伯定律将光强数据转换为血氧数据,然后对数据进行预处理,消除异常值、提高信噪比,使整体滤波后的信号便于后续计算分析。其中包括: MNI 坐标配准,基于一般线性模型(GLM)的设计矩阵的构建,基于具有时间导数的血流动力学响应函数(HRF)的低通滤波器,基于离散余弦变换(DCT)去趋势算法的高通滤波器,然后对任务条件下的 Beta 值进行评估作为相应通道的激活指标。把兴趣区当中包含的各个通道的  $\beta$  给予平均,这个均值就是该 ROI 的激活强度,借助 SPSS 26.0 进行双因素方差分析,并且针对存在交互效应的变量进行简单效应分析,多重比较运用邦弗伦尼法来校正,  $P < 0.05$  被视作有统计学意义。

在相关性分析中,当相关系数  $r$  大于 0 表示正相关关系,小于 0 表示负相关关系,相关系数  $r$  在 0~0.30 表示微弱相关性,在 0.31~0.49 表示具有较低程度的相关性,在 0.50~0.79 表示有显著的相关性,在 0.80~1 之间表示具有极度的相关性<sup>[30]</sup>。而后将 ROI 激活程度与行为学(正确率)进行相关性分析,并且进一步探讨激活程度和行为绩效的相关性。运用 GraphPad Prism 8.0 软件对本研究中行为数据和脑血氧数据进行相关性分析。

关于 HRV 的数据收集与处理方法:借助 DOMOR 运动手表的传输带,在实验过程中对不同疲劳状态下的被试在进行图景识别任务时的 HRV 进行记录。其

中,时域指标采用反应整体心率变异性的 R-R 间期标准差(SDNN)以及 R-R 间期差值的均方根(RMSSD)指标,频域指标采用反映交感神经活性的标准化低频功率(pLF)和表征迷走神经调节能力的标准化高频功率(pHF)指标<sup>[31]</sup>。采用 SPSS 26.0 软件对实验数据进行配对样本  $T$  检验,当  $P < 0.05$  时则被视为具有统计学上的显著意义。

## 2 结果

### 2.1 行为学结果

行为学数据的双因素方差分析结果(见表 2)显示,组别因素主效应显著 $[F_{(1, 30)}=13.467, P < 0.001, \eta_p^2=0.169]$ ,新手组正确率显著低于专家组;运动状态因素主效应显著 $[F_{(1, 30)}=118.797, P < 0.001, \eta_p^2=0.643]$ ,疲劳状态下正确率显著低于安静状态;组别×运动状态交互效应显著 $[F_{(1, 30)}=4.126, P=0.046, \eta_p^2=0.059]$ 。进一步简单效应分析发现,新手组的运动状态主效应显著 $[F_{(1, 30)}=112.539, P < 0.001, \eta_p^2=0.630]$ ,疲劳状态下正确率显著低于安静状态;专家组的运动状态主效应显著 $[F_{(1, 30)}=31.279, P < 0.001, \eta_p^2=0.322]$ ,疲劳状态下正确率显著低于安静状态;在安静状态条件下,组别主效应不显著 $[F_{(1, 30)}=1.332, P=0.250, \eta_p^2=0.019]$ ;在疲劳态条件下,组别主效应显著 $[F_{(1, 30)}=16.249, P=0.001, \eta_p^2=0.196]$ ,专家组正确率显著高于新手组(见图 4)。

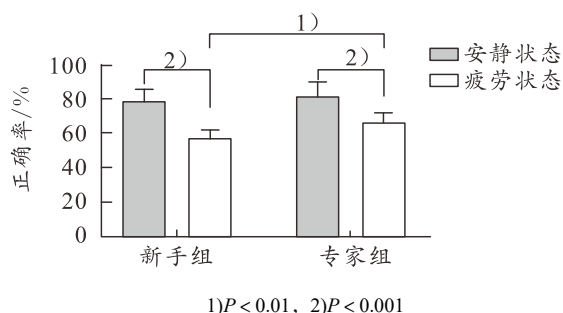


图 4 不同组别的正确率结果

表 2 行为学指标分析结果

|      | 新手组 (n=16) |          | 专家组 (n=16) |          | F                    |                       |                     |
|------|------------|----------|------------|----------|----------------------|-----------------------|---------------------|
|      | 安静状态       | 疲劳状态     | 安静状态       | 疲劳状态     | 组别                   | 运动状态                  | 组别*运动状态             |
| 正确率% | 77.8±7.4   | 56.2±5.2 | 80.5±8.6   | 65.7±5.6 | 13.467 <sup>2)</sup> | 118.797 <sup>2)</sup> | 4.126 <sup>1)</sup> |

1)  $P < 0.05$ , 2)  $P < 0.001$

### 2.2 HRV 结果

以组别、运动状态为自变量,对受试者的 HRV 时域指标和频域指标进行独立样本  $T$  检验和配对样本  $T$  检验(见表 3 和图 5)。

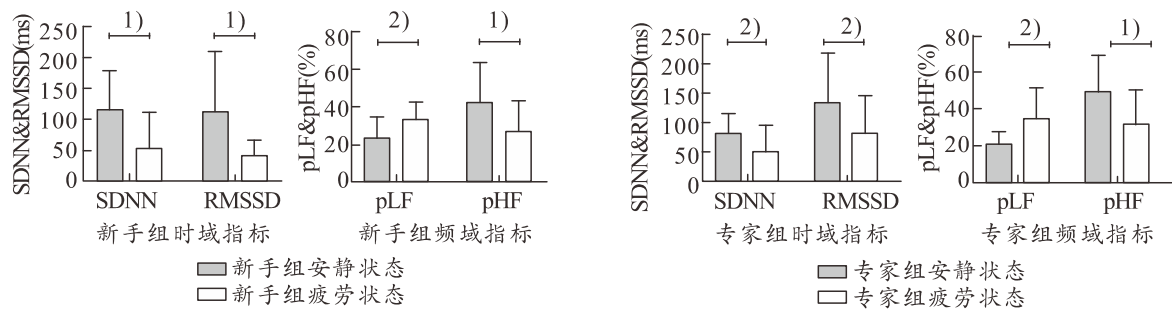
HRV 时域指标分析结果显示,与安静状态相比,新手组在疲劳状态下 SDNN 指标呈显著下降( $t=2.783, P=0.014$ ),RMSSD 指标呈显著下降( $t=2.704, P=0.016$ );专家组在疲劳状态下 SDNN 指标呈非常显著下降

( $t=3.174$ ,  $P=0.006$ ), RMSSD 指标呈非常显著下降( $t=3.751$ ,  $P=0.002$ ); 专家组在疲劳状态下, pLF 指标呈非常显著上升( $t=-3.229$ ,  $P=0.006$ ), pHF 指标呈显著下降( $t=2.595$ ,  $P=0.020$ ); 专家组在疲劳状态下, pLF 指标呈非常显著上升( $t=-3.511$ ,  $P=0.003$ ), pHF 指标呈显著下降( $t=2.411$ ,  $P=0.029$ )。

HRV 频域指标分析结果显示, 与安静状态相比, 新手组在疲劳状态下 pLF 指标呈非常显著上升

表 3 HRV 指标描述性分析结果

| 组别  | 时域指标         |              |             |             | 频域指标        |             |             |             |
|-----|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|     | 安静状态         |              | 疲劳状态        |             | 安静状态        |             | 疲劳状态        |             |
|     | SDNN(ms)     | RMSSD(ms)    | SDNN(ms)    | RMSSD(ms)   | pLF(%)      | pHF(%)      | pLF(%)      | pHF(%)      |
| 新手组 | 114.92±63.09 | 111.22±98.34 | 53.85±57.46 | 42.88±23.00 | 23.51±10.93 | 41.79±21.32 | 33.10±8.65  | 26.63±16.04 |
| 专家组 | 80.72±34.36  | 133.21±84.98 | 52.10±44.21 | 82.16±65.12 | 21.32±6.43  | 50.04±19.06 | 35.69±15.80 | 32.02±18.42 |



1) $P<0.05$ , 2) $P<0.01$

图 5 HRV 指标分析

2.3 fNIRS 结果

为进一步验证不同运动水平运动员在疲劳状态下进行图景识别任务时脑区激活程度的差异, 本研究以

组别和运动状态为自变量, 对受试者的脑血氧浓度( $\text{HbO}_2$ )的 $\beta$ 值进行 2(组别: 新手组、专家组) $\times$ 2(运动状态: 安静状态、疲劳状态)双因素方差分析(见表 4)。

表 4 不同兴趣区  $\text{HbO}_2$  ( $\beta$ ) 值描述性分析结果 ( $M \pm SD$ )  $\times 10^{-2}$

| 兴趣区     | 新手组          |              | 专家组         |              |
|---------|--------------|--------------|-------------|--------------|
|         | 安静状态         | 疲劳状态         | 安静状态        | 疲劳状态         |
| R-DLPFC | -0.131±0.954 | -0.037±1.137 | 0.445±1.122 | -0.274±1.932 |
| L-DLPFC | 0.064±1.285  | -0.194±1.293 | 0.735±1.712 | 0.391±2.499  |
| R-FOA   | 0.251±1.510  | -0.337±1.748 | 0.573±2.117 | 0.613±2.435  |
| L-FOA   | 0.323±1.319  | 0.084±1.403  | 0.742±1.764 | 0.722±2.302  |
| R-VLPFC | 0.196±1.481  | 0.258±1.745  | 0.669±1.746 | 0.724±4.461  |
| L-VLPFC | 0.278±1.945  | -0.070±1.526 | 0.776±1.823 | 0.110±3.741  |
| R-OFC   | 0.577±2.050  | -0.193±1.600 | 0.690±1.653 | -1.408±6.326 |
| L-OFC   | 0.647±2.110  | -0.281±1.773 | 0.591±1.583 | -1.684±7.181 |

R-DLPFC、R-FOA、L-FOA、R-VLPFC 以及 L-VLPFC 脑区的分析结果显示, 组别因素、运动状态因素主效应以及组别 $\times$ 运动状态交互效应均不显著。L-DLPFC 脑区的分析结果显示, 组别因素主效应显著 [ $F_{(1, 30)}=4.711$ ,  $P=0.032$ ,  $\eta_p^2=0.034$ ], 新手组 L-DLPFC 脑区  $\text{HbO}_2$  浓度显著低于专家组, 运动状态因素主效应以及组别 $\times$ 运动状态交互效应均不显著。R-OFC 脑区的分析结果显示, 运动状态因素主效应显著 [ $F_{(1, 30)}=6.764$ ,  $P=0.010$ ,  $\eta_p^2=0.048$ ], 在疲劳状态下 R-OFC 脑区  $\text{HbO}_2$  浓度低于安静状态, 组别因素主效应以及组别 $\times$ 运动

状态交互效应均不显著。L-OFC 脑区的分析结果显示, 运动状态因素主效应显著 [ $F_{(1, 30)}=6.837$ ,  $P=0.010$ ,  $\eta_p^2=0.048$ ], 在疲劳状态下 L-OFC 脑区  $\text{HbO}_2$  浓度低于安静状态, 组别因素主效应以及组别 $\times$ 运动状态交互效应均不显著。

以上结果表明, 各脑区组别 $\times$ 运动状态交互效应均不显著。其中, 组别因素主效应显著的脑区有: L-DLPFC, 新手组 L-DLPFC 脑区  $\text{HbO}_2$  浓度显著低于专家组。运动状态主效应显著的兴趣区有: R-OFC 和 L-OFC, 在疲劳状态下 R-OFC 和 L-OFC 脑区  $\text{HbO}_2$

浓度显著低于安静状态。

2.4 正确率与 fNIRS 结果的相关性分析

对组别(新手组、专家组)和运动状态(安静状态、

疲劳状态)4 个条件下图景识别任务中的正确率与 8 个兴趣区的 Oxy-Hb 浓度进行相关性分析(见表 5)。

表 5 正确率与 fNIRS 数据相关性分析结果

| 兴趣区     | 组别  | 安静状态     |          | 疲劳状态     |          |
|---------|-----|----------|----------|----------|----------|
|         |     | <i>r</i> | <i>P</i> | <i>r</i> | <i>P</i> |
| R-DLPFC | 新手组 | 0.052    | 0.818    | -0.086   | 0.705    |
|         | 专家组 | -0.126   | 0.681    | -0.084   | 0.786    |
| L-DLPFC | 新手组 | 0.108    | 0.632    | -0.370   | 0.090    |
|         | 专家组 | -0.002   | 0.995    | 0.614    | 0.026    |
| R-FOA   | 新手组 | 0.217    | 0.332    | -0.085   | 0.705    |
|         | 专家组 | 0.042    | 0.892    | -0.071   | 0.819    |
| L-FOA   | 新手组 | 0.257    | 0.249    | -0.163   | 0.468    |
|         | 专家组 | 0.264    | 0.384    | -0.019   | 0.951    |
| R-VLPFC | 新手组 | -0.154   | 0.494    | -0.179   | 0.425    |
|         | 专家组 | -0.125   | 0.683    | 0.472    | 0.103    |
| L-VLPFC | 新手组 | -0.062   | 0.782    | -0.044   | 0.845    |
|         | 专家组 | -0.099   | 0.748    | 0.508    | 0.076    |
| R-OFC   | 新手组 | 0.292    | 0.188    | -0.285   | 0.198    |
|         | 专家组 | -0.195   | 0.524    | -0.048   | 0.877    |
| L-OFC   | 新手组 | 0.221    | 0.324    | -0.241   | 0.279    |
|         | 专家组 | -0.199   | 0.515    | -0.150   | 0.624    |

相关性分析结果显示：在图景识别任务中图景识别正确率与 fNIRS 数据呈显著正相关。具体研究结果如下：在疲劳状态下，专家组运动员左侧背外侧前额叶脑区(L-DLPFC)激活水平与任务正确率之间存在着显著的正相关关系( $r=0.614$ ,  $P=0.026$ ),说明当专家组运动员该脑区的激活程度升高，在图景识别任务中的正确率就越高。研究结果还指出，新手组在图景识别任务中 fNIRS 所呈现的数据与图景识别正确率不存在显著相关性。

3 讨论

3.1 图景识别任务的行为学特征分析

研究表明，不同运动水平运动员进行图景识别任务的正确率存在显著差异，主要体现为专家组正确率显著高于新手组，说明专家组在进行图景识别任务时与新手组相比存在一定的专家优势，与本研究假设 1 相一致。或许是因为专家组拥有更为丰富的比赛经验以及更长的训练时长，这与经验说和样例理论相契合<sup>[32]</sup>。以往研究表明，高水平运动员经过长期训练与实践，在感知能力、认知模式、经验记忆以及注意分配等方面相较于新手运动员存在一定优势<sup>[33]</sup>。运动员在疲劳状态下进行图景识别任务的正确率明显低于安静状态，这是因为进行图景识别任务时需要高度集中的认知与感知能力<sup>[34]</sup>。这可能是疲劳会导致神经系统和肌肉

疲劳，影响感知和注意力的准确性与稳定性<sup>[35]</sup>，使得运动员在进行图景识别任务时对环境细节和关键信息的感知能力有所下降<sup>[36]</sup>。其次，图景识别任务需要大量的认知资源，包括注意力、工作记忆和决策等<sup>[9]</sup>。在疲劳状态下这些认知资源可能已经耗尽，导致运动员难以有效地处理和整合通过观察所得到的信息。最后是生理变化，疲劳状态下运动员的心率、呼吸等生理指标可能发生变化。以往研究表明，在疲劳状态下运动员的 HRV 时域指标会出现显著下降<sup>[37]</sup>。以上结果表明，在运动疲劳状态下不同水平运动员的副交感神经活动均受到抑制，心率变异性水平下降，而较强的副交感神经活性可以使运动员在运动中表现出更好的心率稳定性<sup>[38]</sup>，因此表现为运动员维持心率动态平衡的能力下降<sup>[39]</sup>。在频域指标方面，则表现出疲劳状态下 pLF 指标均呈非常显著上升，pHF 指标均呈显著下降<sup>[40-43]</sup>。以上结果表明，在运动疲劳状态下不同水平运动员在疲劳状态下心交感神经活动增强，但是副交感神经的调节能力以及交感和副交感神经的均衡性下降<sup>[41]</sup>。心率变异性增大，心脏自主调节能力较弱，在疲劳状态下运动会引起心脏交感神经和副交感神经关系失衡<sup>[42]</sup>。结合 HRV 时域指标以及频域指标可发现，运动疲劳会导致运动员心脏自主神经失衡，引发大脑皮层抑制<sup>[43]</sup>，这与本研究的结果相契合。这种情况或许会对大脑与身体间的协调产生影响，以及对图景识别的准确性造成影响<sup>[44]</sup>。

上述结果显示,相较于新手组,高水平运动员经过长时间的训练与实践,在不同状况下可更迅速且精准地完成信息的感知、记忆、推理以及决策等流程。具体体现为,高水平定向运动员在不同条件下进行图景识别任务时其正确率普遍要高于新手运动员。

### 3.2 定向运动员图景识别任务中心率变异性分析及脑激活表现

fNIRS 结果显示,在不同条件下各个脑区的激活程度存在显著差异,这与本研究假设2相一致。不同运动水平运动员在进行图景识别任务时 L-DLPFC 脑区血氧浓度存在显著差异,具体表现为专家组运动员血氧浓度高于新手组。神经血管耦合机制认为,大脑激活区域的 HbO<sub>2</sub> 浓度会随着神经活动增强而升高<sup>[45]</sup>。由此可推测,高水平定向运动员和新手相比,在进行图景识别任务时表现出更强的神经激活程度,这是因为两者在进行图景识别任务时采用不同的认知加工策略<sup>[46]</sup>。DLPFC 脑区负责参与认知控制、工作记忆、注意力和决策制定等认知功能<sup>[47]</sup>。新手组在观察定向地图时,虽然搜索信息的数量高于高水平运动员,但是由于对地图符号的不熟悉,搜索到的有效信息过少<sup>[48]</sup>,所以更多采取直觉策略,依靠自身以往经验进行图景识别任务。而高水平运动员在观察定向地图时,搜索信息呈现“少而精”的特点,通过不同的地图符号所传递的信息,能够在大脑中构建立体场景,充分发挥不同脑区之间的协同作用。这是高水平运动员普遍具有的认知优势,主要体现在高水平运动员能够快速提取关键信息,相关脑区之间的联系相对紧密和协调,从而表现出更高的脑区激活程度<sup>[49]</sup>。

对正确率和 fNIRS 结果进行相关性分析发现,专家组运动员在疲劳状态下 L-DLPFC 脑区的激活程度与正确率呈显著正相关,即专家组疲劳状态下正确率越高该脑区激活程度越高,而安静状态下 L-DLPFC 相关不显著。已有研究发现,疲劳状态下运动员大脑血流量和含氧量减少,导致肌肉疲劳的同时伴随着大脑功能的降低<sup>[50]</sup>,生理负荷的增加伴随着心理努力的增加和视觉搜索效率的下降<sup>[51]</sup>。Dietrich 等<sup>[52]</sup>指出,在疲劳状态下由于过度换气导致大脑皮层血流量减少,从而引起脑血氧值急剧下降,同时皮层资源有限,不同脑区需要竞争资源的优先使用权。本研究发现,在疲劳状态下专家组运动员 L-DLPFC 脑区的激活程度与其任务正确率呈显著正相关。结合“运动疲劳导致皮层认知资源有限”的理论<sup>[53]</sup>与专家组在疲劳状态下仍保持较高正确率的行为学结果,推测这可能意味着专家组运动员在资源竞争的情境下,能够更有效地维持或调用与任务核心认知功能(如工作记忆、决策)相关

的 L-DLPFC 脑区资源,从而支持其行为绩效。这一神经效率特征可能是其疲劳状态下专家优势的表现之一。

在处于疲劳状态时,负责视觉处理的 OFC 脑区血氧浓度明显低于安静状态,这是因为定向运动员在运动进程里疲劳状态会给大脑认知能力带来不利的作用。Sanders 所提出的能量-认知模型说明,在运动过程中能量身为一个关键要素,借助影响运动员的唤醒、活跃以及努力水平间接影响个体的认知表现。换言之,在疲劳状态下运动员可利用的能量资源欠缺,基于自我保护机制致使个体的唤醒、活跃以及努力水平降低,最终造成运动员的认知表现下滑<sup>[54]</sup>。有学者借助功能性磁共振成像技术发现,当处于疲劳状态下运动员的大脑神经网络连接会因为运动性疲劳而被削弱<sup>[55]</sup>。有研究显示,运动员在承受较高运动负荷之际其认知记忆能力会出现下降情况<sup>[56]</sup>。在疲劳状态时,大脑可获取的认知资源相对较少,使得执行相应过程的脑区激活程度下降,致使这些脑区在执行任务时处理信息的效率以及准确性下降<sup>[57]</sup>。定向运动员在进行图景识别任务时,需要对地图内容进行获取、存储、回忆和检索周围环境特征的信息<sup>[30]</sup>。在疲劳状态下,由于能源物质的消耗以及代谢产物的堆积,运动员出于自我保护机制的原因,大脑激活程度降低<sup>[58]</sup>,不同脑区竞争有限的皮层资源的优先使用权<sup>[23]</sup>,从而导致其识图能力的效率和准确度下降。

### 3.3 局限性与展望

本研究着重关注定向运动员在处于疲劳状态下开展图景识别任务时大脑前额叶皮层所呈现出的认知加工特征。鉴于设备通道存在限制,未能针对全脑区域展开监测与分析,所以在未来研究中可考虑采用更为先进的全脑监测设备,以此达成对更多脑区的监测与分析。fNIRS 设备信号采集对肢体运动等因素要求颇高,此次实验借助功率自行车递增负荷的形式模拟运动疲劳的产生,然而与真实的定向运动比赛环境相较存在一定差异。未来研究可借助虚拟现实技术,构建趋近真实的定向运动场景,使运动员凭借模拟定向跑步场景来完成图景识别任务,让研究有更高的生态学效度。

## 4 结论

本研究揭示不同水平运动员在疲劳状态下进行图景识别任务时的脑激活特征,经过对实验数据的分析发现高水平定向运动员在图景识别任务里呈现出较高的行为表现,其中在左侧背外侧前额叶(L-DLPFC)脑区和图景识别任务的正确率呈现出显著的正相关。而且运动疲劳会对大脑双侧眶额区产生不良影响,影响具体表现为血氧浓度下降带来的正确率降低。本研究

为后续采用神经调控技术来提升疲劳状态下的识图绩效研究以及制定科学化的训练方案提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] 郭丽敏, 杨万兰, 刘阳. 定向运动员现实场景图景识别的视觉搜索特征研究[J]. 中国体育科技, 2023, 59(11): 24-31.
- [2] 刘传安, 米靖. 定向越野识图过程与主要技术研究[J]. 山东体育学院学报, 2020, 36(1): 97-104.
- [3] 何彬彬. 特质流畅对定向识图视觉搜索特征的影响研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2023.
- [4] 刘阳, 何劲鹏. 不同认知负荷下定向运动员情景识别特征及策略研究[J]. 沈阳体育学院学报, 2016, 35(3): 59-65.
- [5] 杨倩倩. 力竭性运动对羽毛球运动员认知控制影响的NIRS研究[D]. 北京: 首都体育学院, 2015.
- [6] 施艳, 洪晓彬, 耿璐, 等. 红色——攻击性联结对足球比赛中裁判员犯规判罚决策的影响: 自我损耗与运动疲劳的调节作用[J]. 天津体育学院学报, 2020, 35(5): 566-573.
- [7] THOMSON K, WATTA, LIUKKONEN J. Differences in ball sports athletes speed discrimination skills before and after exercise induced fatigue[J]. Journal of Sports Science and Medicine, 2009, 8(2): 259.
- [8] 蔡理, 季浏. 运动中疲劳与心理耗竭若干问题研究述评[J]. 体育学刊, 2005, 12(3): 54-56.
- [9] 殷春宇, 史利, 张文. 不同水平足球运动员空间知觉能力差异: 基于行为学和fNIRS的研究[J]. 体育学刊, 2024, 31(1): 143-148.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 卞美健. 不同运动负荷对定向越野运动大脑识图能力影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [14] M A B, A J M, E Y K, et al. Comparison of brain activation during motor imagery and motor movement using fNIRS[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2017, 54: 91296.
- [15] SKAU S, HELENIU O, SUNDBERG K H G. Proactive cognitive control, mathematical cognition and functional activity in the frontal and parietal cortex in primary school children: An fNIRS study[J]. Trends in Neuroscience and Education, 2022, 28(6): 487-502.
- [16] 陈茜茜, 陆琰, 鲍春蓉, 等. 健康人平衡任务近红外脑功能成像的系统研究[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2020, 23(12): 1100-1105.
- [17] 罗雅丽, 陈劲松, 陈莎莎, 等. 太极式运动想象疗法对脑梗死患者的运动功能以及fNIRS的影响[J]. 中国康复, 2022, 37(5): 267-271.
- [18] 徐晖, 渠春环, 于平, 等. 前额皮层肾上腺素能受体在工作记忆中的作用[J]. 心理科学进展, 2009, 17(6): 1220-1227.
- [19] 熊哲宏. 认知心理学“经典范式”的系统阐述——评梁建著《当代认知心理学》[J]. 心理科学, 2005(6): 232-233.
- [20] 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.
- [21] 刘文正, 张昊, 杨柳, 等. 基于脑电图与功能近红外成像的工作记忆神经血管耦合分析[J]. 生物医学工程学杂志, 2022, 39(2): 228-236+247.
- [22] 何文斌, 沈云娟, 张新定. 眶额皮质相关癫痫的研究进展[J]. 中国临床神经外科杂志, 2020, 25(12): 886-889.
- [23] 张斌, 刘莹. 急性有氧运动对认知表现的影响[J]. 心理科学进展, 2019, 27(6): 1058-1071.
- [24] 杨珊珊, 谭雅兮, 刘耀天. 心率变异性监控运动性疲劳的研究进展[J]. 中国体育教练员, 2019, 27(1): 55-58.
- [25] 李秦陇, 车开莹, 施明强, 等. HRV与EEG生物反馈训练对中枢疲劳运动员的影响[J]. 中国体育科技, 2023, 59(8): 14-20+33.
- [26] 文世林, 王华. 有氧体能对执行功能的影响: 一项fNIRS研究[J]. 首都体育学院学报, 2016, 28(2): 161-166.
- [27] 王钧. 基于主观感觉疲劳量表和心率变异性相结合的运动性疲劳监测[D]. 武汉: 武汉体育学院, 2015.
- [28] 谭超. 中等强度抗阻训练对健康男大学生心率变异性的影响[D]. 金华: 浙江师范大学, 2022.
- [29] 李鑫楠. 不同强度运动对大学生知识学习效果的影响[J]. 科技风, 2017(9): 295.
- [30] G W H, W S M, M A B, et al. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science[J]. Medicine and Science in Sports and Exercise, 2009,

41(1): 3-13.

[31] 吴尽,王骏昇,贾坤,等.正念训练对优秀射箭运动员比赛期焦虑的影响:来自HRV的证据[J].首都体育学院学报,2021,33(6): 649-655.

[32] 梁祎明,张忠秋,章建成.跳水运动专家的时间知觉优势——来自眼动和脑电的证据[J].体育与科学,2018,39(4): 66-72+85.

[33] 刘阳,何劲鹏.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,2018,54(4): 120-128+145.

[34] 张力新,张春翠,何峰,等.体脑疲劳交互影响及神经机制研究进展[J].生物医学工程学杂志,2015,32(5): 6-15.

[35] 李亚伟,冯甜.运动经验对篮球运动员预判的选择性影响——来自时间信息量、投篮结果和错误觉察的证据[C]//中国体育科学学会.第十一届全国体育科学大会论文摘要汇编.2019.

[36] 吴雪玲.运动强度对定向越野运动员空间定位能力的影响[D].武汉:华中师范大学,2022.

[37] 黄传业,田野,聂金雷.少年和成年业余长跑运动员急性耐力运动后心脏自主神经恢复观察研究[J].体育科学,2012,32(9): 11-16.

[38] 申日娜,陈乐琴.定量负荷运动下体育生与非体育生心率变异性比较研究[J].四川体育科学,2017,36(2): 31-34+46.

[39] 万南生,陈宝元,冯靖.慢性间歇低氧对大鼠血压和交感神经兴奋性的影响[J].中华结核和呼吸杂志,2012,35(1): 4-11.

[40] KUNO H, OLAF H, DIETER H E. Heart rate variability and physical exercise[J]. Current Status Herz, 2006, 31(6): 544-52.

[41] 宋涛.24式太极拳运动前、中、后HRV的变化特征[J].中国体育科技,2016,52(1): 78-83+112.

[42] 戴雯.长期专门化运动训练对大脑运动皮层可塑性影响[D].上海:上海体育学院,2017.

[43] 杜维平,庞耀辉,张越,等.力竭运动后女子运动员脑电信号与心率变异性的变化研究[J].辽宁体育科技,2021,43(1): 58-62.

[44] 梁方方.对广西优秀少年跳远运动员认知心理结构的初步研究[D].桂林:广西师范大学,2000.

[45] 蔡治东,舒展,王兴,等.急性弹力带运动对高

龄老年人工作记忆的影响:来自fNIRS的证据[J].中国体育科技,2023,59(9): 46-53.

[46] 徐延君,吕中凡,史鹏,等.篮球运动员快攻情境下的视觉搜索特征[J].福建体育科技,2022,41(1): 36-39.

[47] 文世林,夏树花,李怜军,等.急性有氧运动对大学生执行功能的影响:来自fNIRS和行为实验的证据[J].天津体育学院学报,2015,30(6): 526-531+537.

[48] 王彤,罗歆歆.基于级别差异的定向越野运动员信息搜索能力对比研究[J].体育研究与教育,2012,27(4): 81-86.

[49] 唐思洁,秦奎元,李瑛,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.

[50] 蒋长好.近红外光谱技术在运动脑功能研究中的应用[J].生物物理学报,2010,26(11): 983-991.

[51] B D A, P D B, J S, et al. The impact of physiological load on anticipation skills in badminton: From testing to training[J]. Journal of Sports Sciences, 2019, 37(16): 1816-1823.

[52] DIETRICH A, AUDIFFREN M. The reticular-activating hypofrontality (RAH) model of acute exercise[J]. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 2011, 35(6): 1305-1325.

[53] D R M, W M R, J P O, et al. The influence of exercise-induced fatigue on cognitive function[J]. Journal of Sports Sciences, 2012, 30(9): 841-850.

[54] 杨勇涛,张新伟,冉静,等.运动强度和能量消耗对认知表现的影响[J].中国运动医学杂志,2011,30(1): 110-115.

[55] STAUDT M, HOLTHAUSEN H. Searching for motor functions in dysgenic cortex: A clinical TMS and fMRI study[J]. Journal of Neurosurgery, 2001, 38(7): 2913.

[56] 谢玉芬,罗洁源,钟国星.提升定向运动员专项体能素质策略[J].成功(教育),2012(20): 271-273.

[57] 翟洪昌,张维,苏经宇.面孔吸引力加工的功能磁共振成像[J].中国科学:生命科学,2010,40(6): 551-560.

[58] 牛峥,杨黎,万绪鹏,等.关于运动性疲劳的研究综述[J].体育世界(学术版),2017(1): 178-180.