



## 眼-脑交互视角下排球运动员接发球知觉预测 认知加工特征研究

# A Study of Cognitive Processing Characteristics of Perceptual Prediction of Serve-Receive in Volleyball Players from Perspective of Eye-Brain Interaction

张文, 阚超, 郭丽敏, 刘知和, 刘阳\*

ZHANG Wen, KAN Chao, GUO Limin, LIU Zhihe, LIU Yang\*

**摘要:**目的:探究不同水平排球运动员接发球知觉预测过程中的视觉-运动认知加工特征。方法:选取21名国家一级及以上高水平排球运动员(专家组)和21名高校体育教育专业大学生(新手组),运用眼动和功能性近红外光谱成像技术,同步考察不同水平排球运动员在知觉预测过程中的行为表现及大脑神经机制。结果:1)专家组正确率显著高于新手组( $P<0.05$ ),反应时显著低于新手组( $P<0.05$ );2)专家组瞳孔直径和眼跳幅度均显著低于新手组( $P<0.01$ );3)专家组右侧背外侧前额叶、右侧额极区和左侧腹外侧前额叶激活均显著低于新手组( $P<0.01$ );4)专家组正确率与瞳孔直径和眼跳幅度均呈显著负相关( $P<0.05$ );专家组正确率与右侧背外侧前额叶激活水平和左侧腹外侧前额叶激活水平均呈显著负相关( $P<0.05$ );专家组右侧背外侧前额叶激活水平与瞳孔直径呈显著正相关( $P<0.05$ );左侧腹外侧前额叶激活水平与瞳孔直径和眼跳幅度均呈显著正相关( $P<0.05$ )。结论:专家组排球运动员在知觉预测过程中表现出专项认知优势。其视觉搜索模式更为精简、明确;在右侧背外侧前额叶、右侧额极区和左侧腹外侧前额叶表现出较低的激活水平;视觉信息捕捉与前额叶加工和处理具有耦合性,知觉预测快速且有效,表现出认知加工自动化的特征。

**关键词:**排球;接发球;知觉预测;眼动;fNIRS

**Abstract:** Objective: Exploring the visual-motor cognitive processing characteristics in the Process of perceptual prediction of serve-receiving in volleyball players at different levels. Methods: 21 high-level volleyball players at national first-grade level or above (expert group) and 21 physical education majors from volleyball clubs (novice group) were selected. Eye-tracking and functional near-infrared spectroscopy technologies were utilized to synchronously investigate the behavioral performance and neural mechanisms of the brain during the perceptual prediction process in volleyball players at different levels. Results: 1) The accuracy of the expert group was significantly higher than that of the novice group ( $P<0.05$ ), and the reaction time was significantly lower ( $P<0.05$ ); 2) both the pupil diameter and saccadic amplitude of the expert group were significantly lower than those of the novice group ( $P<0.01$ ); 3) the activations level of R-DLPFC, frontal pole region, and L-VLPFC in the expert group were significantly lower than those in the novice group ( $P<0.01$ ); 4) there was a significant negative correlation between the accuracy and both pupil diameter and saccadic amplitude in the expert group ( $P<0.05$ ), the accuracy in the expert group showed a significant negative correlation with the activation levels in the R-DLPFC and L-VLPFC ( $P<0.05$ ), the activation level in the R-DLPFC in the expert group was significantly positively correlated with pupil diameter ( $P<0.05$ ), while the activation level in the L-VLPFC was significantly positively correlated with both pupil diameter and saccadic amplitude ( $P<0.05$ ). Conclusions: Expert volleyball players show special cognitive advantages in the process of perceptual prediction. Their visual search patterns are more concise and clear; they show lower activation levels in the R-DLPFC, R-FPA, and L-VLPFC; visual information capture is coupled with prefrontal cortex processing and handling, and perceptual prediction is rapid

### 基金项目:

教育部人文社会科学研究规划基金项目(23YJAZH087);陕西师范大学高水平成果培育项目(2022BA002)

### 第一作者简介:

张文(1998-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为运动领域的注意、记忆和决策,E-mail:903411756@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、记忆和决策,E-mail:liuyang0330@snnu.edu.cn。

### 作者单位:

陕西师范大学,陕西 西安 710119  
Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China.

and effective, demonstrating the characteristics of cognitive processing automation.

**Keywords:** volleyball; serve-serve; perceptual prediction; eye movements; fNIRS

**中图分类号:**G804.8 **文献标识码:**A

知觉预测是指利用不完整信息或先行信息预测未知事件的信息加工过程(赵洪朋等,2010)。竞技比赛中,运动员需要在瞬息万变的时空转换中,快速捕捉有效信息,进行准确预判,进而作出相应的动作反应。在排球接发球情境中,运动员根据发球队员的技术动作、球的飞行轨迹等完成知觉预测(De Waelle et al., 2021),从而将球合理击出,这一系列复杂的运动反应均依赖于运动员对重要信息的提取、判断、分析和行动(孟国正,2016b)。可见,研究视觉-运动能力,关注运动视觉信息加工特征与运动员知觉预测能力提升的关系,对丰富专项训练理论具有重要意义。

信息加工理论认为,个体通过选择性注意搜寻并筛选环境中的关键信息(注意阶段);接着,将信息输入中枢神经系统,大脑对即时运动信息与长期记忆中的运动图式和动作记忆进行比较,直至找到最佳匹配(认知加工阶段);然后,通过中枢神经系统向效应器发出指令,与神经肌肉协调配合,完成相应的动作或反应(效应阶段)(冯建立等,2013)<sup>17-18</sup>。在运动领域中,有学者依据信息加工理论进行了专家-新手运动员的认知加工差异研究。眼动技术为探索不同水平运动员视觉注意能力,观察和分析其注视、认知以及行为表现提供了新的途径。已有研究发现,专家运动员经过长期的专业训练,在动作加工信息的方法和策略方面具有优势,对运动情境早期有效信息的加工能力更强(冯琰等,2009;付全,2005;刘阳等,2022;Vitor de Assis et al., 2021; Wang et al., 2019)。例如,在预判接发球落点过程中,专家排球运动员不仅能够捕捉到双方球员、球等显性信息,还能够注意到防守队员、场上空当等隐性信息,呈现出更高效的目标任务导向的注意控制策略(张海斌等,2018),注视点多集中在运动员身体部位,根据发球运动员肩、手臂、手腕和腰部等部位的信息预测球的飞行轨迹,认知资源消耗更少,表现出较高的预测成绩(肖坤鹏等,2016;Piras et al., 2014;Umezaki et al., 2021)。同时,有研究提出,在认知任务中视觉信息引导大脑神经活动发生相应的变化(Işbilir et al., 2019),眼球运动控制引起大脑皮质结构激活(Bishop et al., 2013; Qian et al., 2009; Tanaka et al., 2023)。例如,羽毛球专家运动员在视觉预测过程中背外侧和腹外侧额叶皮层区域显示了更强的激活,上述脑区可能与方向判断相关(Wright et al., 2007, 2010);在预测篮球罚球时,专家运动员通过感知动作信息判断结果,在双侧额下回表现出更强的激活,而新手运动员的注意水平较低,预测行为更多依赖于决策策略,在信息加工的相应脑区显示出更强的激活(Abreu et al., 2012);在足球守门员的知觉预测任务中,新手守门员需要调动更多的认知资源并将其投入对动作表

象信息的提取,此时背外侧前额叶(DLPFC)激活程度较高(康江辉等,2022)。可见,在不同运动项目中,运动员会根据特定的运动需求采取相应的视觉信息加工策略,并在对应脑区中表现出特定的神经活动变化。具体到排球接发球这一高度依赖快速判断和准确反应的运动环节,运动员如何依赖眼-脑之间的精密协调与动态交互完成知觉预测任务,有待进一步探究。综上提出假设:排球接发球任务中,专家运动员的知觉预测能力优于新手运动员,专家运动员具有独特的眼-脑加工特征。

功能性近红外光谱成像(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)技术作为一种非侵入性的大脑认知过程测量方法,通过特定波长的红外光监测毛细血管中的氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的血流动力学变化,从而反映大脑区域神经皮层的活动变化,相较于其他脑影像设备具有明显优势。联合使用fNIRS与眼动技术,在一定程度上能够直观反映被试视觉、认知、行为之间的关系,对不同水平排球运动员接发球信息的视觉搜索、知觉预测能力以及内在的神经机制进行科学探索。基于此,本研究使用眼动和fNIRS技术进行同步测量,探究排球运动员接发球的知觉预测过程的行为绩效、眼动特征及大脑血流动力学变化。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

采用单因素实验设计,利用G\*Power 3.1计算实验计划样本量(Faul et al., 2007),预期效应 $f$ 设置为0.9, $\alpha$ 设置为0.05,统计效力 $1-\beta$ 设置为0.8,计算得出至少需要42名被试。最终选取21名运动员技术等级为一级及以上的高水平排球运动员,纳入专家组;21名无等级的高校体育教育专业大学生,纳入新手组(表1)。

表1 被试基本信息

Table 1	Basic Information of the Subjects	$M \pm SD$
基本信息	专家组( $n=21$ )	新手组( $n=21$ )
运动员技术等级	一级及以上	无
平均年龄/岁	21.07 $\pm$ 1.58	20.53 $\pm$ 1.36
平均训练年限/年	8.27 $\pm$ 1.75	0.87 $\pm$ 0.53
训练频率/(h·d <sup>-1</sup> )	10.2 $\pm$ 1.5	1.2 $\pm$ 1.5

各组被试健康状况良好,受教育程度均为本科学历,皆为右利手,无脑部损伤或神经系统疾病记病史,视力或矫正视力正常,无色盲或色弱,在实验前无熬夜、饮酒、服用药物等情况。实验前,详细记录被试的基本信息,提前告知实验内容,并指导被试签署《实验知情同意

书》。完成实验后,被试将获得相应酬劳。本研究计划已获得陕西师范大学学术伦理委员会的批准(批准号:SN-NU202416006)。

### 1.2 实验材料与方法

本研究采用的高清实战场景视频片段均源自国际排球联合会主办的官方国际赛事(2018年国际排联世界男子排球锦标赛、2018年国际排联世界女子排球锦标赛、2019年国际排联男子排球世界杯和2019年国际排联女子排球世界杯)。根据以往研究(孟国正,2016a),发球准备到触球阶段是运动员快速获取和提取有效信息的关键时期。因此,在本实验中,截取运动员从开始发球准备动作到手与球接触的视频片段,将其作为刺激材料。采用EV录屏软件对排球比赛视频进行剪辑,利用Ulead Video Studio 11进行图像分析与加工,在确保视频质量的同时,将排球场地划分为左、中、右区,并设定对应反应键(左区为“1”键,中区为“2”键,右区为“3”键)。为控制无关变量对实验结果的潜在干扰,在隔音和恒定照明的实验室中进行实验,并对所有材料进行统一的后期处理,确保视频

刺激材料在呈现过程中没有输出音频信息。

### 1.3 实验流程

实验分为练习阶段和正式测试阶段。练习阶段包含5次视频判断,该阶段使用的刺激材料在随后进行的正式测试阶段中不会出现。练习阶段的目的是帮助参与者熟悉实验,在此期间未收集任何数据。

正式实验前,先进行30 s静息态数据采集,以此为基线数据。实验开始后,首先在白色背景上呈现注视点符号“+”,持续1 000 ms;随后呈现一段发球视频,时长约为2 000 ms(发球视频片段的顺序为随机排列);之后黑屏1 000 ms,同时被试需在1 000 ms内快速预测排球落点,如认为球的落点在排球场地的左、中、右区域则分别按对应的“1”“2”“3”号键。每个试次约为4 000 ms,随后会自动进入下一个试次,每次完成7个任务(任务时间为28 s)后进入休息阶段(30 s),整个实验共有28个任务。为尽量接近真实的接发球情境,被试的落点判断必须在1 000 ms以内完成,超出时间范围的判断结果不纳入后续的分析。实验测试流程如图1所示。



图1 测试流程图

Figure 1. Test Flowchart

### 1.4 实验设备

#### 1.4.1 fNIRS 设备

本研究采用LIGHTNIRS连续波近红外光谱系统(岛津,日本),采样频率为13.3 Hz。使用厂家自带的前额叶模版,由8个发射光极(涵盖780、805、830 nm波长)和8个接收光极共同构成22个测量通道(图2A)。使用3D定位仪确定探头位置。通过概率配准的方法对每一个fNIRS通道的位置与MNI空间坐标进行配准,以此获得所有通道与布鲁德曼分区的对应关系(图2B)。覆盖脑区主要包括:左侧背外侧前额叶(L-DLPFC)、右侧背外侧前额叶(R-DLPFC)、左侧腹外侧前额叶(L-VLPFC)、右侧腹外侧前额叶(R-VLPFC)、左侧额极区(L-FPA)、右侧额极区(R-FPA)、左侧眶额区(L-OFC)、右侧眶额区(R-OFC)。

#### 1.4.2 眼动设备

通过附着在计算机显示器(22英寸,分辨率为1 920×

1 080)底部的桌面式眼动仪aSee pro(7Invensun,中国)记录被试的眼动数据。测量模式为瞳孔-角膜反射,采集频率为120~240 Hz,视场角为110°,精度为0.5°,红外光波长为850 nm。实验过程中配备固定头托一个,避免被试在实验过程中低头、转头所致的眼动数据采集质量较差。在刺激呈现之前进行9点校准程序,对没有成功固定的被试重复校准程序,被试眼睛距离屏幕(70±10)cm。

#### 1.4.3 同步记录方法

通过局域网连接实现fNIRS和眼动仪的同步记录,电脑A负责呈现刺激以及收集眼动数据,电脑B负责收集fNIRS数据。刺激一旦呈现,或被试一旦进行响应,电脑A就会传递信号,使fNIRS和眼动设备同时记录数据,该信号可以使眼动和fNIRS数据得到同步记录,并且产生准确的时间标签以匹配离线数据(离线分析时,以注视开始和注视结束的时间点为fNIRS数据分段依据)。此外,本

研究使用(近)红外光设备,以避免这两种模式之间的干扰:fNIRS 传感器由隔热头带固定,以确保传感器带与皮肤之间紧密接触,并最大限度减少外部(近)红外源的影

响;红外相机和 fNIRS 传感器之间存在分离,使红外相机以远离前额的角度朝向瞳孔中心;通过预实验,确保打开和关闭眼动仪对 fNIRS 信号无影响。

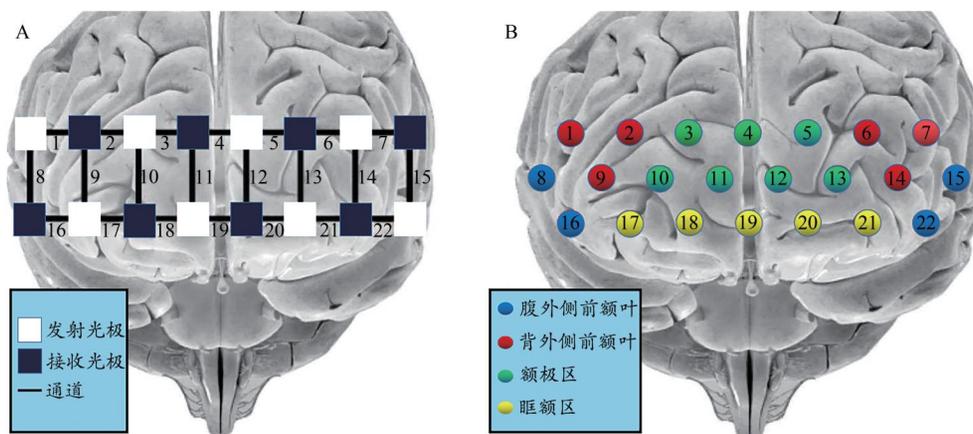


图2 fNIRS通道布局

Figure 2. fNIRS Channels Layout

注:A.探头布置;B.脑区划分。

### 1.5 数据统计与分析

行为学指标为反应时和正确率,将被试各绩效指标的均值作为行为结果。

以整个视频画面作为感兴趣区(region of interest, ROI),采用 aSee Studio 软件分析眼动数据。在本研究中,剔除累积置信水平不足 90%的眼动数据,专家组(90.92%±4.02%)和新手组(91.69%±4.73%)均符合数据质量的要求。选取眼跳幅度和瞳孔直径作为眼动指标,由于眨眼会引起瞳孔直径数据缺失以及前后数据异常,采用线性插值法进行数据填充和修正。

使用 Matlab R2013b 平台的 NIRS\_SPM 插件分析 fNIRS 数据,将原始数据转换为光密度的变化,然后应用低通滤波器消除心脏和呼吸伪影以及高频噪声。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,便于后续计算分析。具体包括 MNI 坐标配准、构建基于一般线性模型的设计矩阵、采用基于具有时间导数的血流动力学响应函数的

低通滤波器、采用基于小波分析去趋势算法的高通滤波器,然后对任务条件下的激活值(beta)进行评估,作为相应通道的激活指标。

利用 SPSS 26.0 对测量的行为学、眼动和 fNIRS 数据进行 Shapiro-Wilk 检验,  $P > 0.05$  表示数据服从正态分布。通过独立样本  $t$  检验分析两组运动员之间的差异,对两组运动员知觉预测任务中的眼动指标和 fNIRS 数据进行 Pearson 相关分析。涉及多重比较时,使用 FDR 校正所有的  $P$  值,  $P < 0.05$  表示差异具有统计学意义。

## 2 结果与分析

### 2.1 行为学指标结果

两组排球运动员接发球任务下行为学指标的独立样本  $t$  检验结果如图 3 所示。新手组的正确率(78.58%±5.96%)显著低于专家组(83.24%±6.39%),  $t_{(40)}=2.426, P < 0.05$ , Cohen's  $d=0.74$ ;新手组反应时[(3 691.09±175.35)ms]显著高于专家组[(3 529.28±187.62)ms],  $t_{(40)}=2.887, P < 0.01$ , Cohen's  $d=0.89$ 。

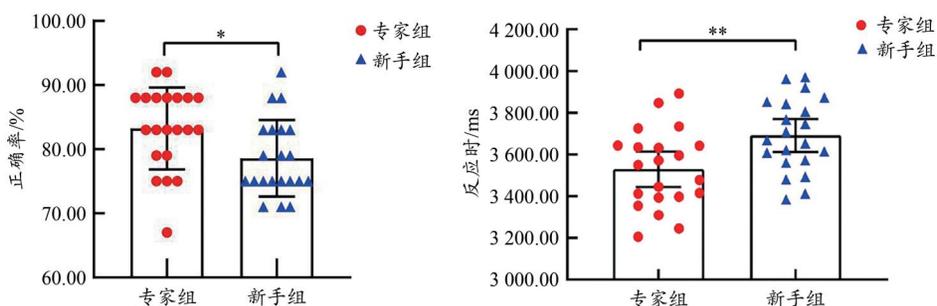


图3 不同水平排球运动员接发球任务行为学指标的差异

Figure 3. Differences of Behavioural Indicators of Serve-Receive Task for Volleyball Players at Different Levels

注:\* $P < 0.05$ ,\*\* $P < 0.01$ ;下同。

## 2.2 眼动结果

眼跳幅度是运动员在预判决策任务中视觉搜索的空间特征,能够有效反映其运动信息的筛选范围和注意选择区域。两组排球运动员接发球任务下视觉搜索空间特征的独立样本  $t$  检验结果如图 4 所示,新手组眼跳幅度  $[(3.06 \pm 0.40)^\circ]$  显著高于专家组  $[(2.69 \pm 0.27)^\circ]$ ,  $t_{(40)} = -3.504$ ,  $P < 0.01$ , Cohen's  $d = 1.08$ 。

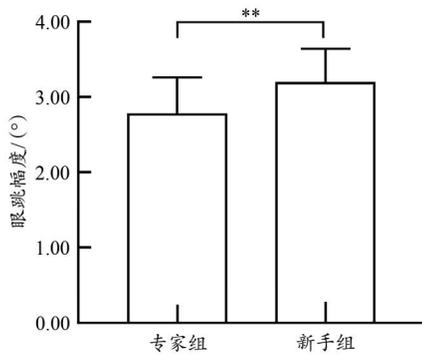


图4 不同水平排球运动员接发球知觉预测任务下眼跳幅度的差异  
Figure 4. Differences of Saccade Amplitude under Serve-Receive Perceptual Prediction Task in Volleyball Players at Different Levels

瞳孔的直径变化作为大脑唤醒水平的外周标记,可以反映个体在认知任务(注意、知觉加工等)中的信息加工负荷或心理努力程度,同时也是接发球预判过程中重要的眼动指标。两组排球运动员接发球任务下视觉搜索内容特征的独立样本  $t$  检验结果如图 5 所示,新手组瞳孔直径  $[(3.21 \pm 0.43)\text{mm}]$  显著高于专家组  $[(2.78 \pm 0.48)\text{mm}]$ ,  $t_{(40)} = -3.043$ ,  $P < 0.01$ , Cohen's  $d = 0.94$ 。

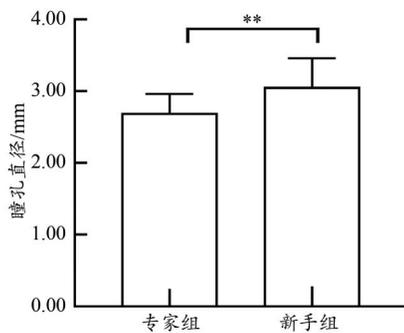


图5 不同水平排球运动员接发球知觉预测任务下瞳孔直径的差异  
Figure 5. Differences of Pupil Diameter under Serve-Receive Perceptual Prediction Task in Volleyball Players at Different Levels

注视热点能够直观显示被试的注意力集中区域,通常以不同颜色表示关注程度的不同(郭丽敏等,2023)。如图 6 所示,被试注视扫描过的位置通过绿色、黄色和红色进行突出显示。专家组注视热点主要集中在触球点、发球队员手臂、球网上发球路线所穿越的关键区域;新手组的注视热点相对分散,除出现在发球队员、球、球

网外,还有部分热点分布在发球方其他队员以及场地无关场景上。



图6 不同水平排球运动员接发球知觉预测任务注视热点图示例  
Figure 6. Examples of the Hotspot Map for Serve-Receive Perceptual Prediction Task in Volleyball Players at Different Levels  
注:红色表示高度关注,黄色表示中度关注,绿色表示较少关注。

## 2.3 fNIRS 结果

为考察不同水平排球运动员接发球知觉预测任务下的认知神经特征,将各通道的 beta 值作为结果变量,采用独立样本  $t$  检验进行差异分析。脑激活分析结果显示(图 7),在接发球知觉预测任务中,专家组脑区激活在通道 2 ( $t = 3.298$ ,  $P = 0.002$ , FDR 校正后  $P < 0.05$ , Cohen's  $d = 1.02$ )、通道 3 ( $t = 3.322$ ,  $P = 0.002$ , FDR 校正后  $P < 0.05$ , Cohen's  $d = 1.03$ )和通道 22 ( $t = 2.949$ ,  $P = 0.005$ , FDR 校正后  $P < 0.05$ , Cohen's  $d = 0.91$ )显著低于新手组,提示专家组 R-DLPFC、R-FPA 和 L-VLPFC 激活显著低于新手组。

## 2.4 相关性分析

### 2.4.1 行为表现与眼动的相关性分析

对专家组和新手组在接发球知觉预测任务下的正确率与瞳孔直径和眼跳幅度进行 Pearson 相关性分析,结果表明,专家组接发球知觉预测正确率与瞳孔直径 ( $r = -0.53$ ,  $P < 0.05$ )和眼跳幅度 ( $r = -0.51$ ,  $P < 0.05$ )均呈显著负相关,新手组接发球知觉预测正确率与瞳孔直径和眼跳幅度之间均无显著相关。

### 2.4.2 行为表现与 fNIRS 的相关性分析

进一步探究行为表现与前额叶激活的关系。由于接发球任务诱导的激活差异仅在 R-DLPFC(通道 2)、R-FPA

(通道3)和L-VLPFC(通道22)区域显著,所有后续分析均集中在这3个区域。由表2可知,专家组接发球知觉预测正确

率与R-DLPFC( $r=-0.64$ )和L-VLPFC( $r=-0.52$ ) beta 值呈显著负相关( $P<0.05$ ),新手组各指标之间均无显著相关。

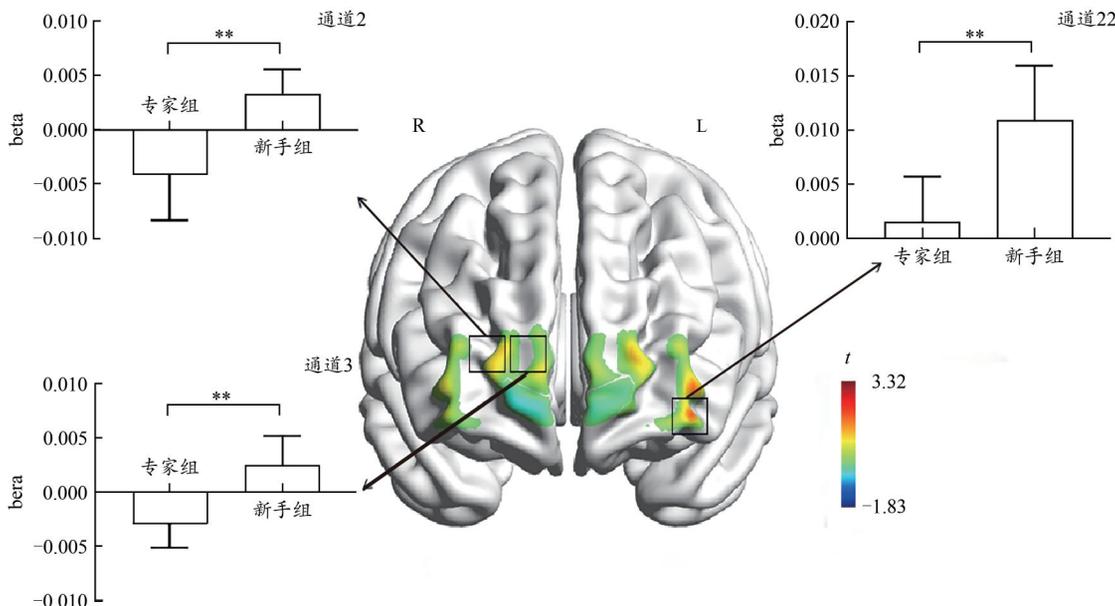


图7 不同水平排球运动员接发球知觉预测任务下脑激活的差异

Figure 7. Differences of Brain Activation under Serve-Receive Perceptual Prediction Task in Volleyball Players at Different Levels

表2 接发球知觉预测正确率与前额叶激活的相关性分析  
Table 2 Correlation Analysis between Perceptual Prediction Accuracy of Serve-Receive and Prefrontal Activation

组别	R-DLPFC		R-FPA		L-VLPFC	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
专家组	-0.64	0.02	-0.36	0.09	0.52	0.02
新手组	-0.30	0.19	-0.24	0.29	-0.18	0.44

### 2.4.3 眼动与fNIRS相关性分析

为进一步探究眼动与前额叶皮层激活的关系,分别检验瞳孔直径和眼跳幅度与R-DLPFC(通道2)、R-FPA(通道3)和L-VLPFC(通道22)的相关性。由表3可知,专家组R-DLPFC beta 值( $r=0.52$ )与瞳孔直径呈显著正相关( $P<0.05$ ),L-VLPFC beta 值与瞳孔直径( $r=0.47$ )和眼跳幅度( $r=0.66$ )呈显著正相关( $P<0.05$ );新手组各指标之间均无显著相关。

表3 接发球知觉预测眼动结果与前额叶激活的相关性分析  
Table 3 Correlation Analysis of Eye Movement Results and Prefrontal Activation for Serve-Receive Perceptual Prediction

组别	指标	R-DLPFC		R-FPA		L-VLPFC	
		<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
专家组	瞳孔直径	0.52	0.02	0.29	0.20	0.47	0.03
	眼跳幅度	0.41	0.07	0.33	0.14	0.66	0.01
新手组	瞳孔直径	0.35	0.13	0.11	0.65	0.21	0.37
	眼跳幅度	0.32	0.16	0.31	0.17	0.12	0.62

## 3 讨论

### 3.1 排球运动员知觉预测的专长优势

在行为学层面,本研究结果显示,专家组的知觉预测正确率显著高于新手组,反应时显著低于新手组,这与以往研究结论一致(肖坤鹏等,2012)。通过长期专项训练,专家运动员具备丰富的比赛经验和专项知识,临场信息刺激与反应决策之间的联系得到有效加强(陆颖之等,2018)。当再次面临相似的接发球情境时,需要将临场短时记忆的信息与长时记忆里提取出来的信息进行匹配,受专项知识和运动经验的影响,专家运动员信息加工效率更高,认知加工速度更快,能够作出更快速且有效的预测,表现出感知-动作耦合的自动化特征(唐思洁等,2023;Zhao et al.,2018)。新手运动员由于缺乏比赛经验和专项技术的积淀,内部信息加工和思维预判过程相对较长,尚未建立起完善的快速反应思维机制(Kiesel et al.,2010),往往表现出较慢的反应速度和较低的准确性。据此推测,积累丰富的运动技能经验有利于迅速捕捉关键信息,将知觉预测练习作为正常训练的一部分或补充训练能够有效提升运动员的感知和处理相关刺激的能力,从而在复杂的运动情境中作出快速而有效的运动反应。根据信息加工理论,在运动情境知觉预测过程中,个体通过视觉注意搜寻并筛选环境中的关键信息,将信息输入中枢神经系统,根据所识取的关键动作特征信息进行快速预测(冯建立等,2013)<sup>15-16</sup>。综上,可通过眼-脑交互范式,深入探索运动领域知觉预测认知加工的特征与机制,为运动员选材、训练计划制定和比赛策略优化提供科学

依据和实践指导。

### 3.2 排球运动员知觉预测的空间特征

眼跳幅度能够有效反映运动员在预判决策任务中视觉搜索的空间特征,体现运动员对运动信息的筛选范围和注意选择区域(康廷虎等,2020)。本研究发现,专家组眼跳幅度显著小于新手组。这与以往研究发现一致,受专业知识和运动经验的影响,在乒乓球动作预测任务中,专家运动员能够有效地引导视觉系统预测发球的变化,表现出较低的眼跳幅度(刘阳等,2018;Piras et al.,2017;Zhang et al.,2022)。在运动情境中会有多种刺激信息同时作用于人的感官,然而,在特定的时间条件下,个体只能对有限的刺激信息进行加工(Casanova et al.,2015)。在排球比赛中,运动员需要同时关注多方面的信息,如对手的动作、球的轨迹和队友的位置等。为了有效分配视觉注意,专家组采用“目标集中”的视觉搜索策略,优先关注关键信息或根据比赛情境调整注意焦点(刘阳等,2024;Vicente et al.,2023),从而提高了信息处理效率。在接发球知觉预测任务中,发球队员动作轨迹及球网等赛场信息是判断球路、速度和旋转的重要线索。注视热点图显示,专家组注视热点主要集中在触球点、发球队员的手臂、球网上方发球路线所穿越的关键区域,这进一步说明其视觉信息捕捉主要在关键信息上,能够根据捕捉到的动作线索预测球的飞行轨迹(张铁民,2016)。而新手组运动员对比赛情境和对手动作的理解不够深入,容易受到场上无关视觉信息的干扰,注视热点相对分散,除关键信息外,还关注了发球方其他队员以及场景信息,在面对快速变化的比赛节奏和复杂的对手动作时投入了更多的认知资源(Lee et al.,2023),从而眼跳幅度增大。

根据信息加工理论,感觉信息进入中枢神经系统,被传送到短时记忆中并与长时记忆中存储的过往经验进行对比和匹配,从而完成认知加工(冯建立等,2013)<sup>16-17</sup>。眼跳幅度是大脑信息处理和认知功能的外显表征,反映大脑加工区域的不同功能状态(Chan et al.,2015)。本研究发现,排球运动员的眼跳幅度与大脑特定区域激活水平显著相关,且专家组在通道2、通道3和通道22上的激活显著低于新手组,具体表现在R-DLPFC、R-FPA和L-VLPFC上。知觉预测任务中,被试需要借助先验信息和有限的当前信息来完成动作预测,整个过程中既需要权衡两类信息的有效性,又需要调动大脑记忆与认知决策等资源来完成动作预测。个体首先借助DLPFC快速检索长期记忆中储存的排球专业知识和经验,与当前视觉系统捕获的信息进行高效匹配(Imperio et al.,2023);VLPFC对感知到的有限信息进行快速整合,准确筛选出对决策至关重要的线索(Vaidya et al.,2022);FPA根据内部需求制定运动策略,考虑当前来球的情况,结合发球队员的动作、队友的位置以及场上局势等因素,制定出最佳的接发球

方案(Peng et al.,2018)。综上所述,排球运动员在完成接发球知觉预测任务时,其眼跳幅度和大脑加工脑区的活动变化,共同揭示了信息处理与认知加工的空间特征,未来研究可进一步探讨通过训练和优化大脑相关脑区加工模式提高运动员知觉预测和决策能力的方法。

### 3.3 排球运动员知觉预测的内容特征

瞳孔直径可以反映个体在认知任务中的心理努力程度(杨晓梦等,2020)。本研究观察到接发球知觉预测过程中,专家组瞳孔直径和大脑前额叶皮层激活显著低于新手组,且瞳孔直径变化与大脑前额叶激活显著相关。额叶是大脑的前部执行神经网络,负责意识决定、制定计划、调节和控制(张文等,2023)。研究表明,专家组只需要动用较少的脑功能活动以及注意力资源便可完成视觉信息处理加工,参与一般认知控制的前额叶皮层活动减少(Espino et al.,2023),表现出较低的瞳孔直径变化。新手组不能从相关任务中获得有效信息时,会从当前任务中脱离以搜索新目标(陈岩等,2019),认知资源则更多地投入视觉信息的加工,该行为常伴随中枢神经系统的紧张活动,导致前额叶网络内的神经活动增加(Eldar et al.,2013),瞳孔直径变化增大。

基于瞳孔心理反射的生理机制,当大脑准备加工信息时,个体通过眼睛捕捉的信息与大脑加工和处理的信息具有耦合性(Alnæs et al.,2014),前额叶激活程度和瞳孔直径变化具有共同的生理机制(Siddhartha et al.,2016)。当大脑受到视觉信息刺激时会激活中枢神经系统,中枢神经系统通过改变任务相关大脑皮层的处理机制应对任务的变化(Zhang et al.,2023),影响大脑皮层的激活程度,而瞳孔直径变化能够敏感地追踪这些电信号的变化和神经递质的投射(于洋等,2020)。本研究结果与朱泳等(2014)的研究结论一致,相比新手组,专家组能够相对快而流畅地完成动作,瞳孔变化幅度相对更小,表现出显著更低的前额叶激活趋势。提示,专家运动员经过长期系统的训练,获得了高度发展的特定领域认知优势,个体视觉系统能够在视觉预测任务中对动作模式进行快速识别和分类(Schorer et al.,2015)。研究进一步揭示了通过长期专项训练,专家运动员在接发球知觉预测过程中,基于视觉系统与前额叶区域高效的耦合机制,表现出认知加工自动化特征。根究上述研究结果,建议在运动员选材时评估其视觉-认知协调能力;在运动员训练中引入虚拟现实设备,模拟比赛场景以增强知觉预测与注意力训练,从而更为全面提升运动员的竞技水平。

## 4 结论

1)专家组排球运动员依靠专项经验,在接发球知觉预测过程中,能够作出更快速且有效的预测,表现出专长优势。

2) 专家组排球运动员在知觉预测过程中的视觉搜索模式更为精简、明确, 同时在 R-DLPFC、R-FPA 和 L-VLPFC 呈现出较低的激活水平, 表现出认知加工自动化特征。

3) 专家组排球运动员眼-脑交互的内在关联, 反映了视觉信息捕捉与前额叶加工和处理具有耦合性, 提示眼-脑交互是提升运动员知觉预测和决策能力的重要研究视角。

## 5 不足与展望

本研究以比赛场景视频为实验材料, 与真实比赛环境存在差异。在未来研究中, 可考虑利用虚拟现实设备或在真实的运动场景中进行实验和采集数据, 以进一步提高实验的生态效度。此外, 本研究从空间和内容角度归纳总结了不同水平排球运动员接发球知觉预测的认知加工特征, 未来可结合 ERP 技术从时间特征方面进行补充。

## 参考文献:

陈岩, 尚张钰婷, 郭振向, 等, 2019. 优秀跆拳道运动员神经-肌肉疲劳状态下的 VR 眼动特征研究[J]. 中国体育科技, 55(9): 64-69.

冯建立, 张宏杰, 2013. 运动技能操作的知觉理论辨析: 基于间接知觉和直接知觉理论[J]. 成都体育学院学报, 39(2): 15-18.

冯琰, 周成林, 2009. 高水平花剑运动员时间感优势的脑神经机制研究[J]. 体育科学, 29(1): 35-44.

付全, 2005. 信息量与认知风格对击剑运动员决策速度和准确性的影响[J]. 体育科学, 25(8): 33-38.

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[J]. 中国体育科技, 59(11): 24-31.

康江辉, 邓炜, 黄志剑, 2022. 得失情境下不同水平守门员的风险偏好与知觉预测研究: 来自 fNIRS 的证据[J]. 体育科学, 42(7): 62-73.

康廷虎, 张会, 2020. 场景知觉中的眼动分析指标: 基于注视和眼跳视角[J]. 心理科学, 43(6): 1312-1318.

刘阳, 何劲鹏, 2018. 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.

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[J]. 心理科学, 45(6): 1314-1321.

刘阳, 支慧晶, 吴林珍, 等, 2024. 竞走裁判员判罚决策过程中的视觉搜索特征[J]. 上海体育大学学报, 48(5): 41-51.

陆颖之, 王莹莹, 赵琦, 等, 2018. 专项运动经验对知觉预判过程中线索提取与加工的影响[J]. 天津体育学院学报, 33(1): 33-38.

孟国正, 2016a. 不同水平排球运动员动作情境中接发球决策行为研究[J]. 沈阳体育学院学报, 35(5): 104-108.

孟国正, 2016b. 排球运动员决策神经效率的 fMRI 研究[J]. 中国体育科技, 52(4): 84-90.

唐思洁, 秦奎元, 李瑛, 等, 2023. 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, 59(3): 20-27.

肖坤鹏, 孙建华, 2012. 排球运动员接发球过程中视觉搜索特征的研究[J]. 体育科学, 32(9): 67-74.

肖坤鹏, 孙建华, 张铁民, 2016. 发球方式对排球运动员视觉搜索特征影响的研究[J]. 天津体育学院学报, 31(4): 351-357.

杨晓梦, 王福兴, 王燕青, 等, 2020. 瞳孔是心灵的窗口吗?: 瞳孔在心理学研究中的应用及测量[J]. 心理科学进展, 28(7): 1029-1041.

于洋, 姜英杰, 王永胜, 等, 2020. 瞳孔变化在记忆加工中的生物标记作用[J]. 心理科学进展, 28(3): 416-425.

张海斌, 孟献峰, 张松奎, 等, 2018. 不同水平排球运动员在扣球情境任务中视觉搜索特征的试验研究[J]. 天津体育学院学报, 33(3): 243-250.

张铁民, 2016. 排球运动员判断发球落点任务中视觉搜索模式分析[J]. 体育学刊, 23(6): 63-70.

张文, 宋杨, 刘阳, 2023. 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, 35(2): 180-186.

赵洪朋, 周成林, 2010. 运动领域中知觉预测研究现状及发展趋势[J]. 沈阳体育学院学报, 29(3): 36-40.

朱泳, 高俊, 黄滨, 等, 2014. 基于眼动和 EEG 对篮球罚球思维调控特征的分析[J]. 天津体育学院学报, 29(4): 313-318.

ABREU A M, MACALUSO E, AZEVEDO R T, et al., 2012. Action anticipation beyond the action observation network: A functional magnetic resonance imaging study in expert basketball players[J]. Eur J Neurosci, 35(10): 1646-1654.

ALNÆS D, SNEVE M H, ESPESETH T, et al., 2014. Pupil size signals mental effort deployed during multiple object tracking and predicts brain activity in the dorsal attention network and the locus coeruleus[J]. J Vis, 14(4): 56-72.

BISHOP D T, WRIGHT M J, JACKSON R C, et al., 2013. Neural bases for anticipation skill in soccer: An fMRI study[J]. J Sport Exerc Psychol, 35(1): 98-109.

CASANOVA R, BORG O, BOOTSMA R J, 2015. Perception of spin and the interception of curved football trajectories[J]. J Sports Sci, 33(17): 1822-1830.

CHAN J L, KUCYI A, DESOUZA J F X, 2015. Stable task representations under attentional load revealed with multivariate pattern analysis of human brain activity[J]. J Cogn Neurosci, 27(9): 1789-1800.

DE WAELE S, WARLOP G, LENOIR M, et al., 2021. The development of perceptual-cognitive skills in youth volleyball players[J]. J Sports Sci, 39(17): 1911-1925.

ELDAR E, COHEN J D, NIV Y, 2013. The effects of neural gain on attention and learning[J]. Nat Neurosci, 16(8): 1146-1153.

ESPINO P C, LUIS D C V, MUÑOZ M D, 2023. Visual behaviours of expert padel athletes when playing on court: An in situ approach with a portable eye tracker[J/OL]. Sensors, 23(3): 1438 [2024-01-05]. <https://doi.org/10.3390/s23031438>.

FAUL F, ERDFELDER E, BUCHNER A, et al., 2009. Statistical power analyses using G\*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses[J]. Behav Res Methods, 241(4): 1149-1160.

IMPERIO C M, CHUA E F, 2023. HD-tDCS over the left DLPFC increases cued recall and subjective question familiarity rather than other aspects of memory and metamemory[J/OL]. Brain Res, 1819: 148538 [2024-02-19]. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2023.148538>.

İŞBİLİR E, ÇAKIR M, ACARTÜRK C, et al., 2019. Towards a multimodal model of cognitive workload through synchronous optical brain imaging and eye tracking measures[J/OL]. Front Hum Neurosci, 23(13): 375 [2024-01-05]. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00375>.

KIESEL A, STEINHAUSER M, WENDT M, et al., 2010. Control and interference in task switching: A review[J]. Psychol Bull, 136(5): 849-874.

LEE S M, AN J S, 2023. Gaze control and motor performance in mo-

- tor expertise studies: Focused review of field application research on perceptual skill training[J]. *Int J Appl Sports Sci*, 35(1):101-113.
- NEMANI A, YÜCEL A M, KRUGER U, et al., 2018. Assessing bi-manual motor skills with optical neuroimaging[J]. *Sci Adv*, 4(10): eaat3807[2024-01-08]. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat3807>.
- PENG K, STEELE C S, BECERRA L, et al., 2018. Brodmann area 10: Collating, integrating and high level processing of nociception and pain[J]. *Prog Neurobiol*, 161(1):1-22.
- PIRAS A, LOBIETTI R, SQUATRITO S, 2014. Response time, visual search strategy, and anticipatory skills in volleyball players[J/OL]. *J Ophthalmol*, 2014(1):189268[2024-01-05]. <https://doi.org/10.1155/2014/189268>.
- PIRAS A, RAFFI M, PERAZZOLO M, et al., 2017. Microsaccades and interest areas during free-viewing sport task[J]. *J Sports Sci*, 37(9):980-987.
- QIAN M, AGUILAR M, ZACHERY K N, et al., 2009. Decision-level fusion of EEG and pupil features for single-trial visual detection analysis[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 56(7):1929-1937.
- SCHORER J, RIENHOFF R, FISCHER L, et al., 2015. Hastening the acquisition of perceptual skill in volleyball players[J]. *Int J Sport Psychol*, 46(6):608-629.
- SIDDHARTHA J, YIN L, RISHI M, et al., 2016. Relationships between pupil diameter and neuronal activity in the locus coeruleus, colliculi, and cingulate cortex[J]. *Neuron*, 89(1): 221-234.
- TANAKA S, KARIBE H, KATO Y, et al., 2023. Evaluation of eye movement patterns during reading of mixed dentition panoramic radiographs in dental students[J]. *Pediatr Dent J*, 33(1):98-109.
- UMEZAKI S, YOSHIDA M, MORI Y, et al., 2021. Visual search behaviors and decision-making of receiver in volleyball tossing and spiking[J]. *Jpn J Coach Stud*, 34(2):125-137.
- VAIDYA A R, BADRE D, 2022. Abstract task representations for inference and control[J]. *Trends Cogn Sci*, 26(6):484-498.
- VICENTE R, BITTENCOURT J, COSTA É, et al., 2023. Differences between hemispheres and in saccade latency regarding volleyball athletes and non-athletes during saccadic eye movements: An analysis using EEG[J]. *Arq Neuropsiquiatr*, 81(10):876-882.
- VÍTOR DE ASSIS J, COSTA V, CASANOVA F, et al., 2021. Visual search strategy and anticipation in tactical behavior of young soccer players[J]. *Sci Med Footb*, 5(2):158-164.
- WANG Y Y, JI Q C, ZHOU C L, 2019. Effect of prior cues on action anticipation in soccer goalkeepers[J]. *Psychol Sport Exerc*, 43(1):137-143.
- WRIGHT M J, BISHOP D T, JACKSON R C, et al., 2010. Functional MRI reveals expert-novice differences during sport-related anticipation.[J]. *Neuroreport*, 21(2):94-98.
- WRIGHT M J, JACKSON R C, 2007. Brain regions concerned with perceptual skills in tennis: An fMRI study[J]. *Int J Psychophysiol*, 63(2):214-220.
- ZHANG J, PARK S, CHO A Y, et al., 2023. Recognition of empathy from synchronization between brain activity and eye movement[J/OL]. *Sensors (Basel)*, 23(11):5162[2024-01-05]. <https://doi.org/10.3390/s23115162>.
- ZHANG Z, PIRAS A, CHEN C, et al., 2022. A comparison of perceptual anticipation in combat sports between experts and non-experts: A systematic review and Meta-analysis[J/OL]. *Front Psychol*, 13(1): 961960[2024-01-04]. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.961960>.
- ZHAO Q, LU Y Z, JAQUESS K J, et al., 2018. Utilization of cues in action anticipation in table tennis players[J]. *J Sports Sci*, 36(23): 2699-2705.
- (收稿日期:2024-02-09; 修订日期:2024-05-07; 编辑:高天艾)

