



神经肌肉疲劳对跆拳道运动员追踪移动目标时眼动特征的影响

陈岩¹, 刘朦², 周军², 刘昊扬², 包大鹏^{2*}

摘要: 目的: 旨在探讨跆拳道运动员追踪移动目标时的视觉特征及神经肌肉疲劳对其视觉特征所产生的影响。方法: 利用 VR 眼动仪分别采集 24 名跆拳道运动员训练前和训练后完成实验任务(追踪移动目标)与对照任务(无移动目标)时的眼动信息, 测试持续 42 个训练日, 共完成 655 人次测试; 通过下蹲跳(CMJ)测试评价受试者训练后是否出现神经肌肉疲劳, 最终筛选出 44 人次因训练产生神经肌肉疲劳的受试者的眼动参数进行统计分析。结果: 与对照任务相比, 受试者完成实验任务时瞳孔直径显著缩小, 总注视次数显著减少; 与非疲劳状态相比, 神经肌肉疲劳状态下受试者完成实验任务时瞳孔直径显著增大, 眼跳速度显著加快, 平均注视时长显著加长。结论: 跆拳道运动员追踪移动目标时提取信息相对容易, 仅需较少的注意力即可快速获取有效信息; 出现神经肌肉疲劳后, 跆拳道运动员追踪移动目标时瞳孔直径显著增大, 对有效信息的敏感度降低, 提取视觉信息的难度增大。

关键词: 目标追踪; 跆拳道; 神经肌肉疲劳; 视觉追踪

中图分类号: G804 文献标志码: A 文章编号: 1006-1207(2024)02-0060-07

DOI: 10.12064/ssr.2023081601

Effects of Neuromuscular Fatigue on Eye Movement Characteristics of Taekwondo Athletes Tracking Moving Target

CHEN Yan¹, LIU Meng², ZHOU Jun², LIU Haoyang², BAO Dapeng^{2*}

(1. Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

Abstract: This study aims to investigate the visual attributes of Taekwondo athletes while tracking moving objects and assess the impact of neuromuscular fatigue on these attributes. Method: Employing a virtual reality (VR) eye tracking system, this study gathered eye movement data from a cohort of twenty-four elite Taekwondo athletes during both experimental (tracking moving target) and control (without moving target) tasks, both before and after their training sessions. The test lasted for 42 training days. The dataset comprised a total of 655 records. Subjects exhibiting signs of neuromuscular fatigue, as determined through the counter-movement jump (CMJ) test, were identified, resulting in a selection of 44 participants for subsequent statistical analysis. Results: In comparison to the control task, the subjects exhibited a significant reduction in pupil diameter and fixation duration during the experimental task, regardless of their fatigue status. Notably, the subjects in the neuromuscular fatigue displayed an increase in pupil diameter, enhanced saccade velocity, and prolonged fixation duration. Conclusion: Following extended specialized training, Taekwondo athletes exhibit improved tracking skills and information gathering, requiring less attention for the retrieval of valuable data. In the presence of neuromuscular fatigue, Taekwondo athletes experience an enlargement in pupil diameter, reduced sensitivity to valuable information, and increased difficulty in collecting visual information while tracking moving targets.

Keywords: target tracking; Taekwondo; neuromuscular fatigue; visual tracking

收稿日期: 2023-08-16

基金项目: 国家体育总局“科技冬奥”重点专项(2019YFF0301602-3)。

第一作者简介: 陈岩,男,博士,讲师。主要研究方向:运动训练理论与方法。E-mail:chenyan430@126.com。

* 通信作者简介: 包大鹏,男,博士,研究员,博士生导师。主要研究方向:体能测试与评估。E-mail:baodp@bsu.edu.cn。

作者单位: 1.北京航空航天大学 体育部,北京 100191; 2.北京体育大学,北京 100084。



跆拳道是一项高强度、快节奏的同场对抗类项目,运动员需要在比赛过程中不断通过视觉和本体感觉系统获取对手的运动信息以判断其移动速度、移动方向、运动轨迹及到达某一位置的时间,从而做出有效的技战术决策,这就要求他们具备极强的视觉搜索能力和视觉追踪能力^[1-2]。有学者^[2]提出,良好的视觉追踪能力能够帮助运动员在复杂的情景中(如高强度比赛)快速、准确地获取关键有效信息,这对于提升其运动表现发挥着关键作用。然而,鲜见针对跆拳道运动员视觉追踪能力和视觉特征的研究。此外,目前研究多关注威胁刺激类型、状态焦虑水平及运动水平对跆拳道运动员的视觉搜索效率和特征的影响^[3-6],缺乏针对他们追踪移动目标过程中视觉特征的相关研究。

疲劳作为运动科学研究的热点,长期以来备受关注,作为一个极其复杂的生理现象,它会对运动员的运动能力^[7]、动机水平^[8]、自主神经调控能力^[9-10]、身体姿势控制能力^[11]、认知行为表现^[12-14]及决策能力^[15]等产生不利的影响,这些不利影响会对他们的专项运动表现产生负面影响。神经肌肉疲劳(neuromuscular fatigue)作为一种常见的疲劳类型,是一种由运动引起的肌肉力量或爆发力下降的生理现象,是否出现神经肌肉疲劳取决于机体是否能够继续按照预定的强度进行运动^[16]。有研究发现,神经肌肉疲劳的出现会显著降低高水平跆拳道运动员的视觉敏锐度,与此同时,他们的瞳孔直径显著增大、眼跳速度显著加快^[17],这不利于他们在瞬息万变的赛场上及时、有效地获取相关信息。然而,神经肌肉疲劳对跆拳道运动员追踪移动目标时视觉特征的影响尚不清楚。

此外,以往研究多采用头戴式或桌面式眼动追踪系统开展相关研究^[1-18],而虚拟现实(Virtual Reality, VR)与眼动追踪技术的结合为开展运动感知觉相关研究提供了全新的研究工具。借助 VR 能够使任务环境更自然、运动更真实、实验环境及数据采集更可控,能够为开展与运动相关研究提供更多的可能性^[19]。

因此,本研究拟采用 VR 眼动仪结合视觉运动追踪研究范式——平滑追踪^[20],探讨跆拳道运动员追踪移动目标时的视觉特征及神经肌肉疲劳对其造成的影响,为今后针对跆拳道运动员进行视知觉能力训练改善视觉追踪能力和知觉预测能力提供数据和实证支持。基于以往研究的发现,本研究提出以下假设:跆拳道运动员只需投入较少的注意力即可有效追踪移动目标;神经肌肉疲劳的出现会显著增加跆拳道运动员追踪移动目标获取视觉信息的难度。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

实验前共招募了 30 名高水平跆拳道运动员,其中 6 人因存在心理倦怠而被排除在外,共计 24 名运动员(女性 14 人,男性 10 人)完成本研究(表 1)。本研究获得了北京体育大学伦理审查委员会的批准(2021004H),所有受试者自愿参加并填写知情同意书。

表 1 受试者基本信息

Table1 Participants characteristics

年龄/岁	身高/cm	体重/kg	训练年限/年	运动等级
19.45±2.14	180.89±3.75	66.09±4.55	6.30±2.78	二级 8 人, 一级 16 人

通过运动员疲劳问卷(Athlete Burnout Questionnaire, ABQ)从成就感、情绪/体力耗竭和运动消极评价 3 个维度评价运动员是否存在心理倦怠,首先将问卷 3 个维度的得分转化为标准分数(Z),计算方式为: $Z_{成就动机} \times 0.47 + Z_{情绪/体力耗竭} \times 0.21 + Z_{运动消极评价} \times 0.32$,最终得分 $Z < -0.55$ 表示无心理倦怠^[21]。

1.2 实验方法

1.2.1 实验流程

实验流程如图 1 所示,每天训练前后要求运动员完成下蹲跳(Counter-Movement Jump, CMJ)测试,并分别采集完成实验任务(平滑追踪任务)和对照任务(视频片段)过程中的眼动信息。每天每名运动员训练前后完整进行了 CMJ 测试和眼动信息采集则计为 1 人次,缺席任何一次、一项测试则该运动员当日测试结果作废,不计入实验结果。测试时间为 7 月 12 日至 8 月 30 日,共计 42 个训练日(休息日不进行测试)。每日训练前测试时间为 8:00—9:00,训练结束后测试时间为 17:30—21:30。正式实验前一周为运动员熟悉测试流程阶段。

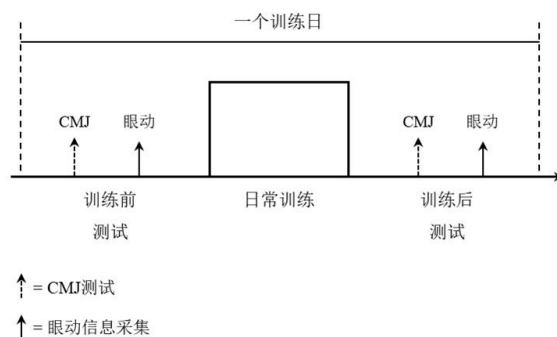


图 1 单日实验流程示意图

Figure1 Schematic diagram of single-day experiment process



采用电子纵跳测试仪(分度值为 0.1 cm,精度为 1%F·S)进行 CMJ 测试。测试时要求运动员双手叉腰,准备好之后快速下蹲并向上跳起,测试 3 次取平均成绩作为最终成绩。采用基于角膜反射法追踪技术的 aSee Pro VR 眼动仪(采集频率为 120~80 Hz,精度为 0.5°)及与其相匹配的 HTC Vive VR 眼镜(分辨率为 2 160×1 200 像素,刷新率为 90 Hz)采集和记录运动员完成实验任务和对照任务时的眼动轨迹,然后通过 aSee Studio VR 眼动分析软件得到运动员完成任务过程中的瞳孔直径、眼跳速度和总注视次数,共 3 个眼动参数。采集眼动信息时,测试人员首先辅助运动员佩戴 VR 眼镜并将显示质量调至最佳,采用 3 点对设备进行校准,按照任务要求完成实验任务和对照任务,任务之间间隔 5 s。

1.2.2 神经肌肉疲劳评价标准

通过 CMJ 测试来评价受试者是否出现神经肌肉疲劳,评价标准:与训练前相比,训练后运动员 CMJ 测试结果的降低幅度(%)大于所选取研究对象的最小有价值变化(Smallest Worthwhile Change, SWC)与变异系数(Coefficient of Variation, CV)之和,则意味着该运动员出现神经肌肉疲劳^[22]。在体育科学领域,SWC 反映的是运动员所表现出的对其运动表现具有实际意义的最小变化,它是基于效应量的

大小来确定的,0.2 是变化是否有价值的最小阈值^[22]。SWC 的计算方法为 $0.2 \times \text{组内标准差(SD)}$,它以百分比(%)的形式表示^[23]。CV 指的是概率分布离散程度的归一化量度,用于衡量单个运动员重复多次测试之间的变异程度,计算方法为标准差与平均值之比(%)。CV < 5% 表示特定人群的测试结果是可靠的,CV < SWC 表示具有良好的测试敏感性^[22]。本研究中运动员 CMJ 测试结果的变异系数(CV)通过 Hopkins 提供的 Excel 电子文档计算获得(<https://sports.org/2015/ValidRely.htm>)。

1.2.3 任务材料

实验任务为一段速率为 30 帧/秒、持续时间为 30 s 的平滑追踪任务(图 2)。完成任务时,要求运动员将视线始终保持在一个直径为 90 像素的移动绿色小球上。小球的初始坐标为(240,145),屏幕最左上角为坐标系原点(0,0),x 轴向右,y 轴向下;小球由静止开始做路径随机、加速度约为 $1.4^\circ/\text{s}^2$ 的匀加速曲线往复运动(最快移动速度为 $25^\circ/\text{s}$,平均速度约 $12.5^\circ/\text{s}$),到达速度峰值后开始做加速度约为 $1.4^\circ/\text{s}^2$ 的匀减速曲线往复运动;小球的终点坐标为(725,900)。在整个运动过程中,小球垂直方向的最大位移距离为 850 像素,平均移动距离为 809 像素。

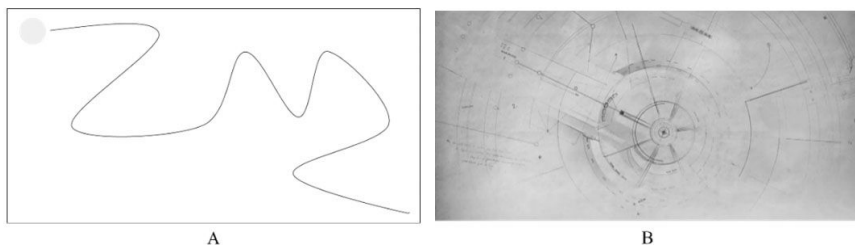


图 2 任务材料示意图(A-实验任务;B-对照任务)

Figure 2 Schematic diagram of task materials(A-Experimental task; B-Control task)

对照任务为完成色彩柔和、无故事情节、无突出人物和(或)动物、持续 30 s 的视频片段(图 2),为保障最佳的显示质量,所选取视频分辨率均为 $1\ 920 \times 1\ 080$ 像素及以上。本研究共选取视频 140 个,测试时系统进行随机播放。

1.3 数据分析

本研究依据运动员训练后 CMJ 测试结果的下降比例(%)是否大于 SWC 与 CV 之和来界定该运动员是否出现神经肌肉疲劳,筛选出训练后出现神经肌肉疲劳运动员的测试数据进行分析。采用 SPSS25.0 对测试数据进行分析,结果以平均值±标准差($\bar{X} \pm \text{SD}$)表示。采用双因素方差分析对比任务

类型(实验任务/对照任务)和机体状态(非疲劳/疲劳)对所筛选出的出现神经肌肉疲劳运动员眼动参数的影响。 $P < 0.05$ 表示具有显著性差异, $P < 0.01$ 表示具有非常显著性差异。通过效应量(Effect Size, ES)量化组间差异的程度和自变量对因变量影响的程度:0.2 表示效应量小,0.5 表示效应量中等,0.8 表示效应量大。

2 研究结果

男子运动员 CMJ 测试结果的 SWC 和 CV 分别为 1.59% 和 2.48%,女子运动员分别为 1.38% 和 1.36%。本研究共获得有效测试 655 人次,通过对比训练前后 CMJ 测试结果筛选出 44 人次因训练产生



了神经肌肉疲劳。统计结果表明,出现神经肌肉疲劳的男子和女子运动员 CMJ 测试结果下降幅度分别为(8.27±4.54)%和(7.09±3.62)%。

跆拳道运动员不同机体状态下完成不同任务时的眼动参数测试结果见表 2。

表 2 不同机体状态下跆拳道运动员完成不同任务时的眼动参数测试结果 ($\bar{X}\pm SD$)

Table2 Results of eye movement parameters of Taekwondo athletes completing different tasks under different physical states ($\bar{X}\pm SD$)

眼动参数	实验任务		对照任务	
	非疲劳	疲劳	非疲劳	疲劳
瞳孔直径/mm	3.15±0.26	3.48±0.25	3.74±0.48	3.92±0.34
眼跳速度/(°·s ⁻¹)	819.29±61.29	847.83±56.89	807.52±81.97	785.53±74.02
总注视次数/次	53.22±13.23	57.14±15.97	71.95±17.54	84.29±13.17

2.1 瞳孔直径

统计结果表明,任务类型(实验任务 vs.对照任务)主效应显著, $F(1,43)=104.982, P<0.01, \eta_p^2=0.363$; 机体状态(非疲劳 vs.疲劳)主效应显著, $F(1,43)=25.771, P<0.01, \eta_p^2=0.123$; 两因素之间不存在交互作用, $F(1,43)=2.189, P=0.141$ (图 3)。事后检验结果表明,非疲劳与疲劳状态下,运动员完成实验任务时的瞳孔直径均显著小于对照任务 ($P<0.01, r=0.25$); 疲劳状态下,运动员完成实验任务时的瞳孔直径显著大于非疲劳状态 ($P<0.05, r=0.21$)。

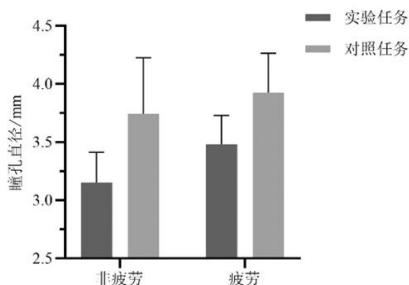


图 3 疲劳与非疲劳状态下瞳孔直径对比

Figure3 Comparison of pupil diameter under fatigue and non-fatigue conditions

2.2 眼跳速度

统计结果表明,任务类型(实验任务 vs.对照任务)主效应显著, $F(1,43)=13.432, P<0.01, \eta_p^2=0.182$; 机体状态(非疲劳 vs.疲劳)主效应不显著, $F(1,43)=0.105, P=0.746$; 两因素之间交互作用显著, $F(1,43)=6.253, P=0.013, \eta_p^2=0.133$ (图 4)。简单效应分析结果表明,不同机体状态下,运动员完成不同任务时的眼跳速度存在显著差异:实验任务的 $F(1,184)=3.990, P<0.05, \eta_p^2=0.021$; 对照任务的 $F(1,184)=2.368, P=0.126$ 。事后检验结果表明,非疲劳状态下,运动员完成实验任务和对照任务时的眼跳速度无显著性差异 ($P=0.411$);

疲劳状态下,运动员完成实验任务时的眼跳速度显著高于对照任务 ($P<0.01, r=0.36$)。

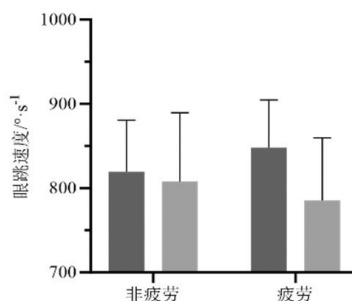


图 4 疲劳与非疲劳状态下眼跳速度对比

Figure4 Comparison of saccadic velocity under fatigue and non-fatigue conditions

2.3 总注视次数

统计结果表明,任务类型(实验任务 vs.对照任务)主效应显著, $F(1,43)=26.566, P<0.01, \eta_p^2=0.347$; 机体状态(非疲劳 vs.疲劳)主效应不显著, $F(1,43)=3.336, P=0.069$; 两因素之间不存在交互作用, $F(1,43)=0.894, P=0.346$ (图 5)。事后检验结果表明,非疲劳与疲劳状态下,运动员完成实验任务时的总注视次数均显著少于对照任务 ($P<0.01, r=0.28; r=0.34$)。

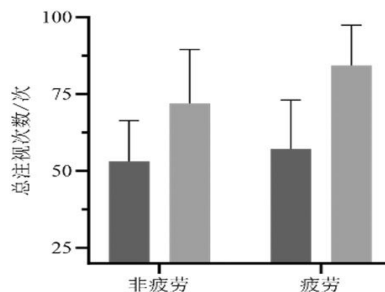


图 5 疲劳与非疲劳状态下总注视次数对比

Figure5 Comparison of fixation count under fatigue and non-fatigue conditions



3 分析与讨论

本研究发现,跆拳道运动员完成实验任务时瞳孔直径和总注视次数均显著低于对照任务、眼跳速度显著高于对照任务,意味着他们追踪目标时内部唤醒水平相对更高、视觉敏感性相对更强且获取视觉信息的难度较低;出现神经肌肉疲劳后,他们追踪移动目标时瞳孔直径显著增大、眼跳速度显著加快,表示疲劳导致他们追踪移动的内在负荷增加、视觉敏感性降低。

3.1 跆拳道运动员追踪移动目标时的视觉特征

运动员完成不同任务时眼动参数的差异,说明他们在完成这两项任务时采用了不同的视觉信息搜索策略,这可能与任务性质及运动员的训练经历有关。

瞳孔直径能反映个体注意力的分配能力,瞳孔直径小则意味着有更大的增大空间^[24],表示待分配的注意力资源更多。运动员追踪移动目标时,首先要通过基于空间位置的选择性注意获取移动目标^[25],这种自上而下的注意力通常能够增强与特定目标相关的刺激信号与知觉^[26],移动目标速度和方向的不变化也会吸引运动员的注意^[25];另外,开始追踪移动目标任务之前,运动员已明确任务目标,注意力已经有了明确的指向性,即移动小球。因此,运动员无须投入过多的注意力进行信息搜索、确定注视目标,表现为瞳孔直径相对更小;完成对照任务时无明确指向性,他们对视觉信息的提取具有随机性、不可预测性,视频画面中的任何信息都可能引起他们的注意,这会刺激运动员通过增大瞳孔直径以获取自己感兴趣的信息。此外,实验任务中的移动目标如同赛场上不断移动的对手,快速追踪不断移动的对手是跆拳道运动员必备的基本能力,长期的专项训练使他们具备极强的目标追踪能力。

眼跳是一种快速的眼球运动,指的是眼睛将注视点从一个目标快速转向另一个目标,它更像是一个定位系统,其核心是能够快速、准确地完成视觉注视点的变化^[27]。Di Stasi 等^[28]指出,眼跳速度主要受眼跳方向和视觉目标的影响,它反映了交感神经兴奋性水平,即唤醒水平。本研究发现,与无特定目标的对照任务相比,运动员追踪移动目标时的眼跳速度更快,这可能与任务特征相关。运动员追踪移动目标时存在明确的视觉目标,而观看无特定目标的视频片段时不存在特定视觉目标,此时他们的视觉注视点可能会不断地变化,会将视线对准非视觉目标,这会导致眼跳速度变慢^[29]。Szinte 等^[30]研究发现,受试者是否能够通过眼跳有效地追踪移动目标主要与

注意力能否平滑转移密切相关。因此,跆拳道运动员进行视觉追踪训练时,需着重考虑所选用的训练任务是否能够确保他们注意力的平稳转移。

总注视次数指的是完成实验任务过程中的注视次数^[31],在一定程度上反映了运动员搜获信息的难易程度。运动员追踪移动目标时,为了进行有效追踪,视觉系统必须通过对目标的时空特征信息进行加工,以克服运动轨迹的变化^[25],此时他们需要关注的目标非常明确、需采集的信息相对集中且单一;而观看视频片段时,视频中无突出的故事情节、人物或动物且视频画面不断切换,所传递的信息相对分散,导致运动员需要通过增加注视次数的方式不断调整感兴趣的区域以获取感兴趣的信息。由此可见,与无特定刺激的场景和任务相比,跆拳道运动员追踪移动目标时提取视觉信息相对更加容易。

3.2 神经肌肉疲劳对跆拳道运动员追踪移动目标时眼动特征的影响

本研究发现产生神经肌肉疲劳后跆拳道运动员追踪移动目标时瞳孔直径显著增大,原因可能是训练产生神经肌肉疲劳后,其交感神经处于过度兴奋状态导致瞳孔放大^[30]。此外,信息加工负荷和任务难度增加也会引起人体瞳孔直径的增大^[32],尽管本研究所选用的实验任务难度并没有变化,但是由于神经肌肉疲劳的出现会对他们的认知加工能力产生消极的影响,造成他们完成任务时信息加工负荷增大。Morad 等^[33]和 Yamada 等^[34]研究发现,疲劳状态下运动员完成认知任务时的瞳孔直径显著减小,这与本研究的结果并不一致,原因可能是运动员不同、疲劳类型不同、实验任务类型不同。本研究的研究对象是跆拳道运动员,而他们的研究对象是普通人;他们通过剥夺睡眠和进行连续的听觉注意力测试(mPASAT)来诱发精神疲劳,本研究是探究训练引起的神经肌肉疲劳对运动员眼动特征的影响;他们在黑暗的环境中记录自由观看视频时眼动信息,本研究则是在运动员完成平滑追踪任务过程中采集眼动信息,这些不同均可能造成实验结果的差异。由此可见,不同的疲劳类型使运动员表现出不同的眼动特征,从而使瞳孔直径缩小^[35],而神经肌肉疲劳与此相反。

眼动产生的目的是选择信息并将要注意的刺激物成像于中央窝区以形成清晰的图像,追踪移动目标时眼跳能够对已有的偏差进行反应和纠正^[36],当移动目标的运动轨迹发生变化时,运动员常通过加快眼跳速度来追赶目标^[37]。相比其他眼动参数,眼跳速度能够更加准确、客观地反映运动员的中枢机体



状态^[38],验证了跆拳道运动员产生神经肌肉疲劳后不仅影响外周机能导致运动能力下降,还会对与眼动调节相关的中枢或自主神经调控产生影响。Di Stasi 等^[28]提出,眼跳速度与交感神经的激活程度高度相关,训练产生疲劳后,运动员的交感神经处于过度兴奋状态,从而造成眼跳速度加快。但也有研究发现疲劳后运动员眼跳速度显著减慢^[17],其原因可能是不同运动员完成不同类型或不同难度的实验任务时会采用不同的追踪策略,导致其眼跳速度相同^[39-43]。本研究测试所得的眼跳速度远远超过正常的眼跳速度(400°/s~600°/s),这种现象称之为眼跳抑制,眼跳的速度极快,导致眼睛对视觉信号的敏感度大大降低,几乎无法获得任何有效信息^[44]。

4 结论

跆拳道运动员追踪移动目标时提取信息相对容易,仅需较少的注意力即可有效追踪移动目标;出现神经肌肉疲劳后,跆拳道运动员追踪移动目标时瞳孔直径显著增大、眼跳速度显著加快,意味着对有效视觉信息的敏感度降低、提取有效信息的难度增大。

参考文献:

[1] 肖坤鹏,孙建华.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,2012,32(9):67-74.

[2] 孙国晓,张力为,WILSON M R.运动目标的视觉追踪:静眼研究进展与前瞻[J].成都体育学院学报,2018,44(6):110-115.

[3] 刘尚礼,吴璇,陈旭.威胁刺激下高焦虑跆拳道运动员视觉搜索的早期加工特征[J].西南师范大学学报(自然科学版),2017,42(10):123-127.

[4] 吴璇,陈旭,刘尚礼.跆拳道运动员在动态威胁情景下的视觉搜索优势:来自 ERP 的证据[J].北京体育大学学报,2017,40(9):60-65.

[5] 刘尚礼,陈旭,周文芳.威胁刺激类型对不同状态焦虑水平跆拳道运动员视觉搜索效率的影响[J].山东体育科技,2016,38(5):65-69.

[6] 刘尚礼.威胁刺激对特质焦虑跆拳道运动员视觉搜索效率的影响[J].山东体育科技,2015,37(1):69-73.

[7] BILIĆ Z, SINKOVIĆ F, BARBAROS P, et al. Exercise-induced fatigue impairs change of direction performance and serve precision among young male tennis players [J]. Sports(Basel), 2023, 11(6):111.

[8] SCHIPHOF-GODART L, ROELANDS B, HETTINGA F J. Drive in sports: How mental fatigue affects endurance performance[J]. Frontiers in Psychology, 2018, 9(1):1383.

[9] YOSHIUCHI K, QUIGLEY K S, OHASHI K, et al. Use of time-frequency analysis to investigate temporal patterns of cardiac autonomic response during head-up tilt in chronic fatigue syndrome[J]. Autonomic Neuroscience, 2004, 113(1-2):55-62.

[10] TANAKA M, MIZUNO K, YAMAGUTI K, et al. Autonomic nervous alterations associated with daily level of fatigue[J]. Behavioral and Brain Functions, 2011, 7(1):46.

[11] 张希妮,傅维杰,夏锐,等.不同疲劳诱导方案对落地时下肢关节力学、刚度和能量吸收的影响[J].体育科学,2017,37(11):48-55.

[12] SMITH M R, ZEuwTS L, LENOIR M, et al. Mental fatigue impairs soccer-specific decision-making skill[J]. Journal of Sports Sciences, 2016, 34(14):1297-1304.

[13] SMITH M R, COUTTS A J, MERLINI M, et al. Mental fatigue impairs soccer-specific physical and technical performance[J]. Medicine Science in Sports Exercise, 2016, 48(2):267-276.

[14] THOMPSON C J, FRANSEN J, SKORSKI S, et al. Mental fatigue in football: Is it time to shift the goalposts? An evaluation of the current methodology[J]. Sports Medicine, 2019, 49(2):177-183.

[15] DUNCAN M J, FOWLER N, GEORGE O, et al. Mental fatigue negatively influences manual dexterity and anticipation timing but not repeated high-intensity exercise performance in trained adults[J]. Research in Sports Medicine, 2015, 23(1):1-13.

[16] BOYAS S, GUÉVEL A. Neuromuscular fatigue in healthy muscle: Underlying factors and adaptation mechanisms[J]. Annals of Physical Rehabilitation Medicine, 2011, 54(2):88-108.

[17] 陈岩,尚张钰婷,郭振向,等.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,2019,55(9):64-69.

[18] 张海斌,王朝军,葛春林,等.排球运动员发球预判过程中的视觉搜索特征[J].天津体育学院学报,2015,30(5):438-447,460.

[19] CLAY V, KÖNIG P, KOENIG S. Eye tracking in virtual reality[J]. Journal of Eye Movement Research, 2019, 12(1):1-8.

[20] 刘洋,漆昌柱,秦杰.视觉运动追踪及其在体育运动中的应用与启示[J].武汉体育学院学报,2018,52(8):78-84.

[21] 张连成,张力为.技能类项目运动员心理疲劳的评价标准[J].中国体育科技,2010,46(4):105-111.

[22] ROE G, DARRALL-JONES J, TILL K, et al. Between-days reliability and sensitivity of common fatigue measures in rugby players[J]. International Journal of Sports



- Physiology and Performance, 2016, 11(5):581-586.
- [23] HORIUCHI M. Ischemic preconditioning: Potential impact on exercise performance and underlying mechanisms[J]. *The Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, 2017,6(1):15-23.
- [24] ALNÆS D, SNEVE M H, ESPESETH T, et al. Pupil size signals mental effort deployed during multiple object tracking and predicts brain activity in the dorsal attention network and the locus coeruleus[J]. *Journal of Vision*, 2014, 14(4):1.
- [25] 陈婷婷,蒋长好,丁锦红.视觉运动追踪的加工过程[J]. *心理科学进展*,2012,20(3):354-364.
- [26] 赵武校,刘伟民.视知觉学习与注意力的关系[J].*眼科研究*,2010(10):1006-1008.
- [27] ENDERLE J D. Models of horizontal eye movements, Part I: Early models of saccades and smooth pursuit[J]. *Synthesis Lectures on Quantum Computing*, 2010, 5(1): 1-163.
- [28] DI STASI L L, CATENA A, CANAS J J, et al. Saccadic velocity as an arousal index in naturalistic tasks[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2013, 37(5): 968-975.
- [29] GALLEY N. Saccadic eye movement velocity as an indicator of (de) activation. A review and some speculations[J]. *Journal of Psychophysiol*, 1989, 3(1):229-244.
- [30] SZINTE M, CARRASCO M, CAVANAGH P, et al. Attentional trade-offs maintain the tracking of moving objects across saccades[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2015, 113(7):2220-2231.
- [31] HOLMQVIST K. Eye tracking: A comprehensive guide to methods and measures[M]. Oxford: Oxford University Press, 2011.
- [32] O'BRIEN S. Methodologies for measuring the correlations between post-editing effort and machine translatability[J]. *Machine Translation*, 2005, 19(1):37-58.
- [33] MORAD Y, LEMBERG H, YOFE N, et al. Pupillography as an objective indicator of fatigue[J]. *Current Eye Research*, 2000, 21(1):535-542.
- [34] YAMADA Y, KOBAYASHI M. Detecting mental fatigue from eye-tracking data gathered while watching video: Evaluation in younger and older adults[J]. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2018, 91(1):39-48.
- [35] 马锦飞,常若松,高远.瞳孔直径大小检测驾驶员疲劳的实证效度分析[J].*辽宁师范大学学报(社会科学版)*,2014,37(1):67-70.
- [36] DE BROUWER S, MISSAL M, BARNES G, et al. Quantitative analysis of catch-up saccades during sustained pursuit[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2002, 87(4):1772-1780.
- [37] 王向博,丁锦红.平滑追踪眼动及其对运动物体时空特征表征和预测的影响[J].*心理科学进展*,2011,19(5): 682-691.
- [38] ROWLAND L M, THOMAS M L, THORNE D R, et al. Oculomotor responses during partial and total sleep deprivation[J]. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 2005, 76(7):104-113.
- [39] 陈顺森,林彩云,任杰.目标刺激运动特征对自闭症谱系障碍儿童平滑追踪眼动的影响[J].*心理与行为研究*,2017,15(3):392-399.
- [40] 刘运洲,张忠秋.优秀排球运动员的预判特征研究:以“扣球”为例[J].*中国体育科技*,2012,48(4):46-51.
- [41] 王福兴,侯秀娟,段朝辉,等.中国象棋经验棋手与新手的知觉差异:来自眼动的证据[J].*心理学报*,2016,48(5):457-471.
- [42] 张学民,廖彦罡,葛春林.排球运动员在运动情境任务中眼动特征的研究[J].*体育科学*,2008,28(6):57-61,72.
- [43] CAZZOLI D, ANTONIADES C A, KENNARD C, et al. Eye movements discriminate fatigue due to chronotypical factors and time spent on task-a double dissociation [J]. *PLoS One*, 2014, 9(1):e87146.
- [44] 田芸,于赛克,周前祥,等.眼动指标在脑力疲劳研究中的应用分析[J].*人类工效学*,2015,21(4):69-73.

(责任编辑:刘畅)