



国内脑电及其分析技术在不同项群竞技项目中的应用研究进展

裴新贞

摘要: 通过文献资料法,围绕体能主导和技能主导两大项群,结合3类体能主导小项群和5类技能主导小项群,及其共涵盖的20多个竞技项目,整理国内脑电及其分析技术在体育领域不同项群竞技项目中的应用成果现状与进展,为今后开展竞技体育项目与脑电结合的研究提供方向指导和参考借鉴。

关键词: 脑电;项群;体能主导;技能主导;竞技项目

中图分类号:G804 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2020)05-0071-12

DOI:10.12064/ssr.20200511

Application of Electroencephalogram (EEG) and its Analytical Techniques in Different Sports Events in China

PEI Xinzhen

(School of Life Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China)

Abstract: Based on the literature review, the study centers on the two major groups of stamina-oriented and skill-oriented sports events, covering more than 20 competitive events including 3 types of stamina-oriented sports and 5 types of skill-oriented sports, to analyze the domestic achievements and progress of electroencephalogram (EEG) and its application in different sports event groups, so as to provide a reference for future researches on integrating EEG with competitive sports.

Key Words: electroencephalogram (EEG); event group; stamina-oriented; skill-oriented; competitive events

近几年,随着计算机技术和人工智能的快速发展,脑科学和类脑智能领域成为全球各国研究的前沿热点和学术必争之地。2013年欧盟和美国相继启动“人脑计划”,率先将脑科学研究提升到国家战略层面。与之相比,中国脑科学研究起步相对较晚、体量较小。2016年脑科学与类脑研究被“十三五”规划纲要确定为重大科技创新项目和工程之一,随后各地脑科学和类脑智能研究中心相继成立,“中国脑科学计划”已筹备启动,脑科学和类脑智能研究在中国正进入跨越式发展的快车道。在体育运动领域,脑机能状态对运动员各种感知觉灵敏度、注意力集中程度、信息加工速度以及神经肌肉支配程度有着重要影响,是运动员竞技能力的重要组成部分。随着脑科学研究的不断深入,运动员大脑功能结构的研究、监测、评价和调控也越来越成为运动训练、运动选材等

体育科学研究的重要领域。

脑电(Electroencephalogram, EEG)作为一种无损伤、高时间分辨率、直接反映神经元电活动的技术,是观察大脑内部活动的一个重要窗口,从20世纪50年代初EEG就开始应用到运动员高级神经活动中,涉及运动员运动疲劳时、运动技能形成各阶段以及出现极点时的EEG变化等。直到20世纪50年代后期,中国才开始运动员的相关EEG研究,通过脑电图、脑象图、脑地形图以及脑超慢涨落图等分析技术,从不同层面和角度了解不同竞技项目运动员脑功能特征,取得系列研究成果。但这些研究成果均较散乱,未有系统整理归纳,因此,本文围绕我国在体育领域的脑电应用研究,查阅近百篇文献资料,从不同项群竞技项目的角度进行综述,为后续相关研究者提供参考借鉴。

收稿日期:2018-11-22

基金项目:上海市体育科技“雏鹰计划”项目(19C002)。

作者简介:裴新贞,女,在读博士研究生,副研究员。主要研究方向:运动人体科学、运动员选材育才、运动与脑科学。

E-mail: peixinzhen0923@sina.com。

作者单位:复旦大学 生命科学学院,上海 200438。



1 体能主导类项群脑电及其分析技术的应用研究

1.1 快速力量性项群脑电及其分析技术的应用研究

体能主导快速力量性项群要求运动员具有高度的爆发力,项目主要包括举重和田径中的跳跃、投掷等。从国内研究文献看,举重、跳高、跳远3项均有脑电相关研究,主要应用脑电复合谱分析的脑电 α 波竞争、脑超慢涨落、事件相关电位(Event-related Potentials, ERP)等分析技术,从运动选材、表象训练等方面与运动项目结合开展研究,而投掷类项目尚未发现相关脑电研究。

举重项目中,周北云等通过脑电复合谱分析的脑电波竞争分析技术,发现优秀举重运动员主要由运动控制认知型即脑电活动3型和运动控制优化型即脑电活动2型的人为主,提出熵值越小对举重选材越重要,熵值可作为一个举重选材指标^[1]。唐斌利用脑超慢涨落技术发现56 kg级、62 kg级组运动员脑电 α 波为平均型,69 kg级、85 kg级组运动员为优化型,77 kg级组运动员为慢化型;5个级别的运动员只有S1、S2和S7系存在显著性差异;各组运动员中枢疲劳度、焦虑指数和脑功能态无显著性差异但熵值存在显著性差异,认为男子举重运动员脑涨落图特征与各自级别的训练特点和恢复手段有关^[2]。

跳跃类项目的脑电研究国内主要围绕跳高和跳远,利用ERP技术结合行为实验开展研究。尹丽琴结合背越式跳高动作技能学习,应用关联性负变(Contingent Negative Variation, CNV)、N140波形波幅等指标发现无论是运动准备与表象准备,还是执行期的运动表象与运动执行,均有类似的脑活动时间机制,但执行期运动表象比运动执行需要付出更多的认知努力;应用PETTLEP模型表象训练与传统表象训练更利于背越式跳高动作技能的学习;表象过程中脑结构被激活的程度越高,表象干预效果越好^[3]。汤长发的研究结果除与前述一致外,还发现表象结合身体综合练习的训练效果最好,在动作技能掌握方面表象训练效果好于身体训练,表象训练有利于跳跃类项目动作成绩的提高;结合行为学变化与脑电活动,证实挺身式跳远与背越式跳高表象训练的机制具有一致性^[4]。

1.2 速度性、耐力性项群脑电及其分析技术的应用研究

速度性和耐力性项群包括跑、游、划、滑、自行车

等竞技项目,区别主要在于距离和时间的长短,而在以往与脑电研究相关的文献资料中,主要以项目大项分类,如田径、游泳、自行车等,较少细化到项目小项,因此笔者只能将速度性和耐力性项群项目综合考量,这或许也可成为未来细化项目与脑科学研究的方向之一。目前国内关于两类项群脑电相关研究主要涉及滑冰、自行车、田径和游泳项目。

有研究分别对我国优秀滑冰运动员进行脑电监测。其中利用脑电诱发实验对参加冬奥会的主力短道速度滑冰和花样滑冰运动员进行阶段性脑电图、脑地形图和压缩谱阵图的监测结果显示,运动表象诱发时运动员在良好、最佳、警戒、疲劳4种不同机能状态下,大脑唤醒水平有非常显著差异,在疲劳状态时,脑电 α 波被抑制程度呈现两种不同表现方式,脑电波 α 指数和功率谱比值可反映运动员训练过程中的疲劳征兆和竞技状态,研究者提出应用脑电图诊断、大脑唤醒水平、大脑神经元代谢方式与技术特点相适应的能力、功率谱分布情况、脑电功率谱比值对训练强度的承受能力等脑生物电指标,结合数据、图谱和训练表现等综合分析后,可明确诊断疲劳^[5]。张云等在对国家速滑运动员进行脑电测试和频谱分析后发现,采用运动表象诱发时,脑电 α 波被抑制的程度明显增加或减少都是大脑唤醒水平降低的表现^[6]。张振民等再次应用脑电图、压缩谱阵图和脑地形图对国家短道速滑和花样滑冰队主力队员进行跟踪监督,结果发现运动训练过程中运动员速度和力量素质可根据诱发条件下脑电频率和波幅的改变进行判断;脑功率谱能量比值 δ/α 或 θ/β 可反映运动员训练强度的应激水平;脑内神经递质在疲劳状态下多巴胺(Dopamine, DA)显著下降, γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)和5-羟色胺(5-hydroxytryptamine, 5-HT)明显增加^[7]。

自行车项目中,邹荣琪等对健将与二级男子自行车运动员安静和表象脑电进行比较发现,安静时EEG功率谱均成对称性分布,对应各区总功率均无显著性差异;表象时左侧各区EEG总功率与对应右侧各区相比只有二级运动员有显著性差异;健将级顶区和枕区脑电活力比值与二级运动员比较有显著性差异。健将级运动员左、右侧顶区与枕区 α 指数比值表象与安静状态下相比有显著性差异,但二级运动员无显著性差异。对于男子短距离场地自行车项目,健将级运动员中枢神经系统对外界信息的整合及技术动作协调能力优于二级运动员^[8]。

国内田径项目的脑电研究主要涉及中长跑和竞走。杨泽丽利用脑地形图技术发现安静时中长跑运



动员脑电功率谱与正常人基本一致,左右对称性好;各区 α_3 频段功率值最高; α 频段脑电功率值从前额、顶、中央、枕部呈递增趋势,而 θ 和 δ 频段脑电功率值则呈递减趋势;从前额到枕区,慢波逐渐减少,快波 α 节律增多,各脑区以 α 节律为主^[9]。黄贝君等利用主成分分析和序参量理论对健将级竞走运动员进行功能内稳态的脑电 α 波分析,发现10 Hz为状态优秀竞走运动员脑电 α 波的优势频率,根据表征项目内稳态(SpSH)的PC2和PC3发现状态优秀竞走运动员的优势脑区在额叶(F3、F4)、中央区(C3、C4)、顶叶(P3、P4)和前颞叶(F7、F8)^[10]。张亮基于运动训练的自主适应控制理论,运用脑电 α 波分析技术提出脑熵值可作为竞走运动员选材的参考指标,而血清睾酮值、血红蛋白值和脑电熵值之间不存在线性相关关系,但对重点运动员进行个案分析时,发现脑电熵值水平和训练强度水平有负相关趋势^[11]。

游泳项目的脑电研究相对较多。林丽雅等针对广东省游泳运动员^[12]和个案国际健将级游泳运动员刘禹^[13],结合生理生化指标检测,应用脑电压谱分析技术,对高原训练效果以及脑对运动训练负荷的自主适应调整水平进行研究。结果发现,高原训练后,运动员的脑信息平均分布频率向高频转移,赛前负熵值减小,信息熵离散;而从对个体刘禹的分析看,高原训练前后及赛前脑协同状态发生变化,主序参量赛前9 Hz水平在高原训练后发生漂移,而认知参量水平(10 Hz)和技能辅参量水平(11 Hz)均增加,反映自主适应情况的信息熵水平也发生大幅度升高。信息熵或主震荡水平离散或右移,均提示运动员竞技能力下降。采用脑波超慢涨落分析技术的追踪研究发现,赛前一天健将级游泳运动员大脑的中枢递质5-HT、乙酰胆碱(acetylcholine, Ach)和DA出现特殊空间构型,表现为5-HT的右脑优势,但在赛后又发生逆转,转移到左脑;Ach在赛前一的基本走向为前低后高,而临赛前发生前、后脑区的逆转,呈现出明显的前高后低趋势;DA在赛前一的优势右脑区转移到临赛前的左脑优势^[14]。另一项优秀游泳运动员赛前脑电研究发现,赛前脑电 α 波优势节律在表象时较安静时有显著变化, β 活动在枕区变化明显;赛前左右脑区脑波均衡性良好,在颞区的 β 活动出现平衡被打破的迹象;赛前安静时脑电 α 波波幅适中,45 μV 左右,能量百分比在70%~80%, β 波波幅在4~12 μV ,能量百分比在5%~10%^[15]。利用脑波涨落图技术对国家级游泳运动员与其他专业大学生脑电比较研究,发现游泳运动员脑涨落图S谱线中S1系在全脑、右脑和右后脑水平明显降低,

且右脑明显低于左脑;S11系前脑区显著增强,左前脑及前脑区明显高于右后脑及后脑;S13系后脑区高于对照组,右后脑及后脑明显高于左前脑及前脑^[16]。脑内神经递质释放具有特异性,递质水平表现出脑区差异,DA在前脑区显著增高,GABA水平明显低于正常水平;左前脑为兴奋性优势活动中心,右后脑为抑制性优势活动中心。游泳运动员这些特征可能是由于游泳运动的训练环境、呼吸方式及体位的特殊性造成的。而在花样游泳运动员与射击和射箭项目优秀运动员的对比研究中,发现闭目觉醒静坐状态下优秀花样游泳运动员全脑水平S3显著低于射击运动员和对照组;全脑水平、左脑、右脑、前脑、左前脑的S3/S4、左脑S3/S4比右脑S3/S4所得值均是花泳组最高,在后脑、右后脑最低,左脑高于右脑,反映了S3/S4的左前脑优势;右后脑S13外的所有谱线都显著低于其他组^[17]。

2 技能主导类项群脑电及其分析技术的应用研究

2.1 表现准确性项群脑电及其分析技术的应用研究

技能主导类中,表现准确性项群主要包括射击、射箭和弓弩类表现运动员准确完成专项技术能力的项目。该项群项目的脑电研究在国内最为广泛。射击项目的脑电研究分析技术涉及脑电时频分析、脑地形图、脑波超慢涨落和脑电非线性动力学分析。郑樊慧等先后应用脑电超慢涨落技术对重大比赛前后上海射击队飞碟多向运动员和不同训练期间移动靶运动员相关脑电特征进行研究,发现飞碟运动员赛前安静状态下各脑区四频段(δ 、 θ 、 α 、 β)的绝对功率和主频的绝对功率均高于对照组, δ 频段显著差异在F4、C4、 α 、 β 频段主要在F3、F4、C3、C4、P3、P4;而夏训不同训练阶段移动靶运动员全脑神经递质平均激活水平无显著性差异,但各脑区部分递质有显著变化,抑制介质(INH)在左前颞的激活水平夏训前值均低于上训练量两周后及上强度一周后;乙酰胆碱(Ach)在左顶叶区夏训前值高于上强度训练后;去甲肾上腺素(NE)在左前颞的激活水平夏训前的值高于上训练量两周后^[18-19]。周末艾等也利用脑波超慢涨落分析技术对中国优秀射击运动员进行动态追踪,发现与射击运动员大脑机能状态较密切的神经递质可能有DA、Ach、EXC、INH、NE、5-HT等,与大脑运动应激能力较密切的可能有DA、NE、Ach、5-HT等,而与运动等级相关的可能有INH和DA等^[20]。



在利用赛场非屏蔽环境对我国优秀射击运动员安静和表象下的赛前脑电研究中,发现安静时优秀射击运动员具有以 θ 波为代表的慢波活动特征,大脑平均唤醒水平临场赛前低于赛前一天,结合唾液皮质醇和restq-76紧张恢复情况量表发现,脑电唤醒水平和应激参数出现相关,疲劳程度与应激参数、恢复能力与唤醒水平均有显著性相关^[21]。而对不同水平射击运动员的脑电研究显示,脑 α 波类型不同水平射击运动员无显著差异,但高水平运动员表现出较高协同趋势和稳定度;熵值及脑 α 波各类型主频熵值在不同水平射击运动员均无显著性差异,但奥运冠军的熵值与国家队和广东省队协同稳定度高的被试存在显著差异;国家队认知型和优化型运动员的脑电 α 波主频与熵值呈显著性负相关^[22]。提示认知型可作为射击运动员选材的参考指标,熵值可作为监控优秀射击运动员训练适应状态的参考指标。利用脑电图和脑地形图技术的研究发现,从大脑唤醒水平和能量比值看,无论男女射击运动员之间还是国家射击队和河北省射击运动员之间均无显著性差异^[23]。而国内优秀气手枪射击运动员在赛前一天表象与安静状态的比较发现整个脑区 α 波能量百分比降低, β 波能量百分比上升;临赛前两者相比变化趋势不明显,平均唤醒水平显著低于赛前一天;赛前一天表象状态疲劳参数显著低于安静状态,而应激参数则显著高于安静状态;临赛前表象和安静状态疲劳参数无显著差异,而应激参数表象状态显著低于安静状态^[24]。王霆利用脑电非线性动力学、脑波超慢涨落参数等分析技术研究气手枪运动员无负荷安静状态与有负荷实弹射击状态之间特定脑区脑电复杂度参数,发现高水平气手枪运动员对视觉的依赖性低于普通运动员,而男女气手枪运动员特定脑区脑电复杂度在不同状态下不存在显著性差异;不同运动等级射击运动员在瞄准击发阶段和两弹间歇阶段顶枕区脑电复杂度变化趋势不同;高环值与远弹之间特定脑区脑电复杂度在实弹射击环境下存在显著差异^[25]。郑樊慧等对青少年女子气手枪运动员击发前脑电变化进行研究,发现击发前3s青少年女子气手枪运动员左颞区T7 α 波功率显著高于右颞区T8,枕叶中线Oz α 波功率呈上升趋势,10环时的Fz θ 波功率值显著高于8环时^[26]。安燕等应用脑电相干性分析,发现上海女子气手枪运动员在低 α 频段,击发与收枪时相比,信息沟通较少,只需较低的皮层唤醒和注意努力;左脑脑波相干性在低 α 频段显著低于右脑,运动员射击时右半球交流多,注意力转移到以视觉空间为主^[27]。近两年还有利用扩展

概率性因果方法分析步枪射击准备阶段大脑皮层的有效定向功能性连接的研究,显示射击过程中额区、额中、中央区、顶区和枕区都被激活,大脑功能连接数量右半球明显多于左半球, θ 频段额区汇入信息流多且强度较大,而 α 、低 β 和高 β 频段在中央区和顶区较活跃;高 β 频段全局效率值显著大于其他频段^[28],说明该频段是主要参与步枪射击相关信息整合的频段;步枪射击专家全局效率值比新手更高,说明专家大脑信息整合能力更强。

从射箭项目看,樊晋华等利用脑地形图分析技术发现表象竞赛时健将组射箭运动员大脑右枕区 α 波指数下降最显著,国际健将组 α 波指数被抑制程度最高,3个不同等级运动员大脑枕区 β 波指数都明显上升;过度换气和恢复期,健将组和国际健将组 β 波指数明显下降;表象时健将组和国际健将组大脑右枕区 θ 波指数均明显上升;一级组恢复期 θ 波仍显著高于安静状态,而健将组在过度换气和恢复期 θ 波已明显下降。表象时国际健将组大脑顶区 α 波左右差值较小,但在恢复期左右差值显著高于表象时,且明显高于健将组和一级组,这可能与神经疲劳有关^[29]。随后对我国健将级女子优秀射箭运动员安静状态、运动表象、过度换气诱发实验和恢复期的脑地形图研究发现,运动表象时 $\delta+\theta/\alpha$ 比值显著升高,而过度换气期以及恢复期比值明显下降;过度换气期RF/RO比值比表象时显著下降,而恢复期RF/RO比值则明显高于过度换气期;运动表象时枕部 α 波显著下降, α 波抑制指数为28.98%^[30]。武斌等的研究也得出同样结果^[31]。利用脑波涨落图研究,发现不同射箭运动员个体S谱线分布在闭目觉醒静坐状态下具有趋同性;与对照组相比,射箭组S2、S3、S4、S5、S11、S13系增强,S1、S6、S7系减弱,且呈左脑优势显著,优秀射箭运动员脑电特征超慢涨落谱线变化具有特异性^[32]。射箭项目ERP的研究显示,射箭组失匹配负波(Mismatch Negative,MMN)下平均面积在经典范式下普遍高于篮球组,在优化范式下组间差异更为明显;而无论在经典还是优化范式下,射箭组的潜伏期分布均较篮球组集中,说明射箭组辨别声音刺激间差异的时间短,辨别差异的能力也较强^[33]。优化范式下诱发的MMN波下平均面积比经典范式下诱发面积大。其他采用脑电图、脑地形图、脑象图、脑波超慢涨落等技术对我国优秀射箭运动员脑功能特征的综合研究,发现反映射箭运动员特征比较敏感、稳定、核心的脑电指标为:大脑顶区左右 α 波差值、 α 波抑制程度、 α 波前移指数、脑象图特征图形和脑电功率谱能量比值^[34]。研究发现,表



象竞赛时国际健将组大脑顶区左右 α 波差值优于其他组,大脑顶区左右 α 波差值与人体平衡能力存在相关关系,可用于射箭运动员选材与竞技状态诊断;射箭运动员脑电图功率谱比值在冬训期间随专项负荷量与强度的变化增高或降低,专项负荷训练课后,中央回双侧频段脑电功率值有显著上升趋势,顶枕区双侧频段脑电功率值有显著下降趋势;大龄运动员在 α 波抑制程度、功率谱比值以及 α 波前移指数中更具有专项特点;与射击项目相比,射箭运动员最佳竞技状态脑电功率谱比值更低,而 α 波抑制程度则高于射击运动员。从脑象图分析,优秀射箭运动员出现的赛前紧张多为恐惧情绪,为缩结型脑象图,而一般射箭运动员出现赛前紧张主要为焦虑情绪和逃逸型脑象图。吕慧等发现优秀男女射箭运动员间各类代谢物浓度及其相互之间的比值不存在显著差异,但表象刺激下前额叶背外侧白质及前部扣带回皮质N-乙酰天门冬氨酸(NAA)、胆碱复合物(Cho)浓度水平显著降低,脑功能应激代谢水平增高,提示大脑对工作记忆进行提取也参与了运动员的表象过程^[35]。对国家射箭队运动员脑电非线性特征参数的研究显示,优秀男女射箭运动员最大李雅普诺夫指数、近似熵与Lempel-Ziv复杂度等脑电非线性参数不存在显著性别差异;但3个非线性特征参数可作为反映中枢神经系统机能的定性指标,其中脑电Lempel-Ziv复杂度一定程度上可敏感反映被试运动员测试阶段是否处于中枢神经系统疲劳状态,脑电近似熵可在某种程度上反映优秀射箭运动员冬训备战阶段中训练负荷量与负荷强度的变化^[25]。同时对倒立状态下优秀射箭运动员大脑功能及心理状态出现的各种变化进行对比研究,发现当运动员进行5 min倒立训练后,坐姿恢复双侧枕区的 α 频段导频百分比与倒立体位下有显著差异;复杂度和近似熵两个脑电非线性参数及6种全脑中神经递质与坐姿恢复状态的表现均有显著差异;8周倒立训练后运动员脑电复杂度、近似熵、DA、5-HT、INH、NE、EXC、SCL90总分均与倒立训练前有显著变化,表明对优秀射箭运动员进行定期定量的倒立训练对缓解其负荷训练后产生的不良情绪与不适症状的作用明显^[36]。其他研究还发现,射箭运动员LL-HLI(低负荷量+高负荷强度训练)阶段与LL-LLI(低负荷量+低负荷强度训练)训练阶段额区 β 频段功率值有显著差异;在HL-LLI(高负荷量+低负荷强度训练)阶段,射箭运动员脑内5-HT水平呈显著上升趋势,而脑内DA水平则较LL-LLI(低负荷量+低负荷强度训练)阶段有所下降,HL-LLI训练阶段和LL-HLI训练阶段

运动员脑电复杂度均出现下降趋势,显著低于LL-LLI训练阶段^[37]。

针对团体射箭项目,发现首箭、二箭与末箭不同位置因比赛特点不同,其全脑中神经递质分布也具有各自特点,首箭、末箭位置运动员兴奋水平明显高于二箭位置运动员。赵国明等研究发现射箭选手枕区脑电高频 α 波功率在最佳发射前不同时段逐渐增大,而最差发射时则逐渐下降,发射前3 s内平均功率最佳发射时显著高于最差发射时,射箭选手发射动作自动化执行的先决条件为发射前瞬间的视觉抑制^[38]。与射击、花泳优秀运动员相比,优秀射箭运动员全脑水平S6系显著低于对照组,全脑水平、左脑、右脑、前脑、左前脑S3/S4所得值都最低,S2、S3在脑右前区明显高于对照组,S6在脑右前区明显低于对照组,S7在脑左前区显著低于对照组^[17]。

2.2 表现难美性项群脑电及其分析技术的应用研究

技能主导类项目中,表现难美性项群结合脑电开展研究的项目主要涉及技巧、跳水、体操、滑雪、武术等。1990年黄登惠等分析技巧运动员脑电图特点发现,与网球、花样游泳、击剑、射箭、射击等其他项目相比,技巧运动员脑波率较快,波幅较高,调频现象较好,脑波串长明显长于其他项目,过度换气后慢波出现率较高^[39]。

周末艾等应用脑电图和脑地形图技术对中国跳水运动员进行训练监控,结果显示表象竞赛时,能量比值和大脑唤醒水平值自选动作均略高于规定动作,女运动员大脑唤醒水平值自选动作明显高于规定动作,表明女跳水运动员神经机能状态略优于男跳水队员^[40]。与其他项目如乒乓球、短道速滑等相比,优秀跳水运动员大脑唤醒水平值相同,但能量比值较低,可能是跳水项目特点。对优秀跳水运动员进行时序脑电跟踪测试,发现跳水运动员脑 α 波类型偏向认知型,优秀跳水运动员 α 波主频在不同训练阶段基本不变,但在赛后恢复期有分散趋势;熵值在赛后恢复期有升高趋势^[41]。优秀跳水运动员脑电波多数以10 Hz为优势主频^[42-43]。脑信息熵的变化值与运动成绩的变化值呈中等强度负相关关系,熵值减小,运动表现更好^[42]。应用眼动和ERP分析技术,发现时间知觉任务中,跳水运动专家与普通人相比注视次数少,注视点持续时间短,眼跳距离大,瞳孔直径小;跳水运动专家在额叶、中央区 and 顶叶的CNV波幅显著小于普通人^[44]。提示跳水运动专家更多使用直接判断策略和计数策略,比普通人信息加工效率高,深度



浅,投入总认知资源少,信息加工自动化程度高。

专项训练内容安排和运动负荷与体操选手脑 α 波变化有直接联系。研究发现奥运和非奥运女子体操运动员在备战期不同训练阶段,脑 α 波优势频几率、脑熵值、中枢疲劳指数、兴奋抑制指数的变化趋势相似,并与训练负荷、专项内容安排变化相对应,可作为体操项目训练监控参考指标^[45]。而在同一训练阶段,尤其是强化阶段,奥运运动员呈现出脑 α 波优势频明显,同时具有较高的稳定度、协同性和有序性的脑电特征。建议可将脑 α 波优势频几率作为体操项目选拔参赛选手的参考指标。艺术体操运动员经过音乐训练后,脑电 θ 和 β 波降低, α 波升高,音乐放松训练可一定程度控制赛前焦虑^[46]。

张云等利用 SET 脑电中枢神经递质分析技术发现冰雪运动员大脑神经元代谢方式以速度型为主;DA 数据与脑功率比值变化一致,在评定运动能力中 DA 比血睾酮更敏感,还可免受采静脉血的创伤^[47]。大脑唤醒水平 $\alpha\%$ 相对值与功率谱比值成正比关系,脑内中枢神经递质 6 项技术指标呈相辅相成又相互颞颥关系。ERP 研究发现滑雪运动组被试 Go 刺激的反应时显著低于普通对照组;无论是水平方位还是垂直方位,140~220 ms 出现的早期成分 N2 在 Go 条件下比 Nogo 条件下诱发的波幅更大,且垂直方位的顶区电极波幅明显大于其他区域。垂直方位额区 Fz 潜伏期比中央脑区电极 Cz、Cpz 更短;300~420 ms 出现的晚期成分 P3,水平方位的中央脑区比顶区、前额区波幅更明显,与对照组相比滑雪运动组中央脑区和额区波幅更大。顶区 Nogo-P3 波幅明显小于 Go-P3,垂直方位中央脑区波幅大于其他脑区,运动组的 Nogo-P3 波幅显著大于对照组,顶区 Nogo-P3 小于 Go-P3 波幅。水平方位的脑顶区 Nogo-P3 潜伏期长。提出 Nogo-P3 的成分特征可作为测量单板 U 型滑雪运动员视觉空间方位知觉反应抑制能力的良好指标^[48]。

武术套路和散打项目的脑电研究主要采用 ERP 技术,研究发现散打组和套路组在顶叶可诱发 N1 成分;在顶叶和顶枕叶诱发较明显的 N2 成分;P2、P7、P8、Pz、PO4、PO7、POz 等电极显示组别主效应和时间主效应具有显著性差异。散打组诱发的 N2 波幅在波形做叠加处理后明显高于对照组和套路组;在外源性注意搜索范式条件下散打和套路运动员均诱发了较为明显的 N2 成分,特别是在 SOA 为 500 ms 和 800 ms 时诱发的 N2 成分更为显著^[49]。Stroop 任务中在色词不一致时 P3 波幅武术组显著大于健身组和对照组;Flanker 任务中 P3 潜伏期武术组长于

健身组和对照组;Go/Nogo 任务中在 Nogo 条件 N2 波幅武术组显著小于健身组,P3 波幅武术组高于其他两组。在抑制习惯性优势反应能力和抑制新形成的优势反应能力武术套路专项组好于健身健美组^[50]。

2.3 对抗格斗性项群脑电及其分析技术的应用研究

技能主导类中,除前两类表现性项群外,还有 3 类对抗性项群,其中格斗对抗性项群主要指以对手的躯体为攻击对象,双人进行格斗的项目,包括摔跤、柔道、拳击、击剑、武术散打等。国内结合脑电的研究文献主要集中在拳击、击剑和摔跤项目。

拳击运动员脑电活动特点以 α 波为主,节律在 8.5~12 Hz/s,波幅 10~80 μ V 之间,但最高波幅和平均频率略低于正常人对照组^[51]。不同竞技水平拳击运动员在表象竞赛下注意力集中程度呈现显著差异, α 波被抑制程度亦呈现差异。兴奋水平过高是过度唤醒表现, α 波被抑制数值超过 50%,出现紧张注意力不集中状态,为先兆疲劳征候;而当 α 波被抑制数值小于 17%,则反应迟钝,注意力涣散,兴奋水平显著降低,产生运动性中枢疲劳^[52]。拳击运动员在赛前大强度训练后直拳空击诱发至疲劳过程中出现慢波指数增加、快波指数下降现象,且 δ/α 比值呈 U 型变化,这种变化可能是中枢疲劳的一个特征^[53]。

采用脑象图技术对优秀击剑运动员大脑处理信息能力的研究显示,优秀击剑运动员双侧脑的最佳匹配为左前-右后脑,优势图形中的特征图形为内方型和隧道型;在大脑左颞区不同性别男女优秀击剑运动员的优势图形具有显著差异,提示女运动员比男运动员有更强逻辑记忆、理性思维能力和更稳定情绪及更高内驱力;脑象图中的边缘系数与击剑运动员竞技状态呈较高负相关^[54]。ERP 相关研究显示,高水平击剑运动员在空间知觉实验中相应脑区诱发的 P1、N1 和 P3 峰波幅低于体育大学生组,P3 峰潜伏期短于大学生组;高水平击剑运动员行为策略更偏向速度性而非准确性,视觉搜索主要采用向上视野的注意指向策略;高水平击剑运动员知觉上视野刺激在大脑皮层中央区、顶区、枕区诱发了明显的 P2、N2 成分^[55]。优秀击剑运动员在动作修正任务中所耗时间及未命中目标次数均显著少于对照组;任务开始阶段 P2 成分的潜伏期和 N1 成分的波幅显著大于对照组,P1 和 P2 成分的波幅均显著小于对照组;动作修正阶段 N2 和 P3 成分的波幅显著小于对照组^[56]。在 Go/Nogo 范式中,击剑运动员反应时快于普通大学生,其返回抑制量更大;额中央所诱发的



Nogo 条件下的 P3 波幅显著大于 Go 条件,说明击剑运动员具有更强的反应抑制能力;击剑运动员在无效提示下的 Nogo-P3 波幅大于有效线索提示,说明击剑运动员对无效线索提示后的刺激投入更多的认知资源^[57]。

ERP 与摔跤项目的研究发现,心理表象过程中摔跤运动员 Cz 电极的 P300 峰潜伏期显著小于其他电极位置,Pz 与 Cz 的 P300 峰波幅分别显著大于 P4 与 P3 处,说明脑中央区位置付出较多认知负荷,且快于脑部顶叶靠近枕区的激活速度与加工速度;P300 峰潜伏期在积极词语诱导条件下显著短于消极词语诱导条件,说明积极情绪词语有助于提高摔跤运动员在心理表象过程中的空间认知加工与转换速度^[58]。

2.4 对抗隔网性项群脑电及其分析技术的应用研究

技能主导类对抗性项群还包括对抗隔网性项目,主要包括乒乓球、羽毛球、网球、排球项目。国内运动项目与脑电方面的研究中,此项群项目研究最多,特别是乒乓球、网球项目。

早在 1988 年黄登惠等就发现健将级网球运动员 β 频率明显大于无等级组,脑波调频和调幅均优于一级及无等级组^[59]。优秀网球运动员脑电图为 α 脑波占优势,调频调幅较好,睁闭眼诱发试验反映好,为 R 型;过度换气诱发试验后,脑机能稳定,为兴奋型。建议选材时,最好不选脑电图为 M 型或不稳定型青少年。但之后网球项目的脑电研究渐少,直到 2012 年王小春运用 ERP 记录技术和眼动等方法,发现网球运动员的空间知觉判断中,大脑皮层顶叶和枕叶参与信息检索与加工过程^[60]。网球专家在空间方位判断中具有明显速度优势,诱发的 P1、N1 和 P300 峰潜伏期显著早于其他被试,波幅也都显著高于其他被试;在时间辨别实验中专家组诱发 CNV 波幅最大且潜伏期最早,被试诱发的 CNV 波幅和潜伏期与网球运动水平呈显著相关;网球专家视觉搜索策略倾向于整体性;在顶叶 Pz 电极点诱发的 PSW 波幅最大,额极区最小,在 4 个时间遮蔽点其波幅呈递增趋势,PSW 峰潜伏期明显早于其他组被试;在空间方位判断实验中诱发的 P3b 峰潜伏期显著小于经验组和新手组,在 T4 时间点潜伏期最短,但波幅显著大于经验组和新手组;以时间序列呈现的专业发球情境实验显示 T3 时间点所对应发球过程中的搔背动作为关键技术动作^[61]。同样运用眼动记录和 ERP 技术的研究发现,在判断线路和落点

时,对方球员的下肢运动趋势是网球专家关注的重点区域,对技术动作判断的主要依据是持拍手臂和球拍;ERP 数据显示网球专家对目标识别编码速度快,在刺激材料呈现的早期认知资源投入少,但在确定方案前会消耗更多时间和脑资源来建立对问题情境的表征,并进行评估和分类;在视觉搜索早期心理资源投入少,在辨别任务阶段的唤醒状态和注意负荷量低,而在对任务的类比加工过程中投入的认知资源多;在比赛相持阶段判断击球路线时,网球专家在各时间点的判断准确率都显著高于新手,且仅在对对手触球前 80 ms 表现出明显的反应速度优势;在球离拍后 360 ms 判断球落点的反应时最短,准确率最高;决策阶段 N250 成分的分析结果印证了网球专家在任务难度较大时表现出更明显的决策优势^[62]。网球专家组的反应抑制成功率高于新手组,对停止信号的激活速度快,唤醒程度高,占用注意资源多,其优势主要来自快速停止能力,250 ms 左右是网球运动员进行错误纠正的最佳抑制时间^[63]。优秀网球运动员 CNV 面积组别主效应显著,电极位点主效应显著,其中 Cz 点面积最大,电极位点与组别无交互作用;动态刺激条件下网球专家组 N1 的潜伏期显著大于对照组,P300 成分波幅电极位点主效应和组别主效应均显著^[64]。网球专家组深度运动知觉的判断准确率高于新手组,在球体靠近时的 P2(Oz 点)成分潜伏期长于球体远离时的潜伏期;枕区 P2 成分可作为深度运动知觉的评价指标^[65];枕颞区 P1 成分在远离时激活更早而强的反应,在深度运动过程存在专长效应,投入注意资源早于新手组^[66]。网球场图片只在网球专家之中引发显著的 LPP 波幅,而负性情绪面孔可引发显著的 LPP 波幅;专家组在不同场景混合图片上对注意竞争的波幅呈现显著差异^[67]。优秀网球运动员安静与忆象两种状态比较,脑电 α 波振幅和频率均有显著性变化,注意力集中时, α 波被抑制,集中程度越高, α 波被抑制程度也越高;从安静到忆象,脑内神经递质主要从兴奋性神经递质转向抑制性;安静时 5-HT 主要在右脑较活跃,DA 主要活跃在左脑,但在忆象状态时两种神经递质相互活跃逆转,突出了网球运动右利者的大脑活动结构特征性^[61]。

乒乓球项目的国内脑电研究亦较广泛。张振民等采用心理和脑电结合方法发现不同训练水平乒乓球运动员之间 α 指数被抑制的百分数有显著性差异, α 指数被抑制的百分数既能反映集中注意力,还可判断运动能力;从大脑神经元代谢方式看,表象竞赛时快弧者以速度强度交替形式出现,快攻者波率



加快,弧圈者波幅升高^[68]。随后对世界乒乓球冠军和同期银、铜牌得主及后备力量的研究也发现,运动表象时脑电 α 波被抑制程度可反映运动员集中注意力;且乒乓球技术打法与神经元代谢方式和脑功能特征相关联,如削球打法运动员训练中表现为力量占优势,脑电呈现为强度型;快攻打法运动员训练中以速度爆发力占优,脑电呈现为速度型;弧圈结合快攻打法运动员训练中表现为速度力量,脑电为速度强度型或强度速度变换型;乒乓球世界冠军运动员大脑唤醒水平和功率谱能量比值显著高于一般水平运动员,脑电功率谱可用于评价对训练负荷的应激水平,调控训练强度^[69]。对于反应快的乒乓球运动员,在提示刺激与必须应答刺激间的前750s的脑电 $\alpha 1$ 频段的功率值高,左顶和右后枕区 $\alpha 1$ 频段的功率值可能是乒乓训练中有效反应的关键^[70]。ERP研究发现,有提示条件下乒乓球运动员的反应时和大脑加工视觉信息的速度均显著快于一般大学生,也快于无效提示和中性提示条件下的反应时;P2成分有显著的提示效应,P1、N1都有对侧脑区效应,波幅大小的显著区别表现在左侧视野;从2D脑地形图看,乒乓球运动员对视觉刺激反应更敏感,正向活化波幅更大、范围更广,负向活化波幅更小、范围更窄^[71]。在完成动态图像识别任务时乒乓球运动员N1波幅显著大于普通大学生,在顶、枕区诱发显著的P2波幅显著小于普通大学生;完成图像识别和静态词汇判断两任务时额区诱发的P2成分波幅大于普通大学生,诱发的P3潜伏期显著短于普通大学生;在静态词汇判断任务中P3波幅显著大于普通大学生^[72]。乒乓球运动员CNV潜伏期缩短,平均波幅和面积均高于普通大学生,波峰潜伏期更加接近靶时距,反映更准确的时间知觉^[73]。动作识别过程中乒乓球运动员高频 α (10.5~12.5 Hz)的事件相关去同步化(ERD)幅度更低,正确识别发球动作时高频 α 频段的ERD在顶叶皮层和枕叶皮层的幅值更低,能量消耗较小^[74]。在辨别反应任务中,乒乓球运动员额区和中央区的低频 α (8~10 Hz)ERD及额区和中央区的高频 α (10~12 Hz)ERD高于非运动员,顶区和枕区的高频 α ERD低于非运动员^[75]。在Go/Nogo范式下,乒乓球运动员额-中央区、中央-顶区激活程度更大,Nogo-N2和Nogo-P3波幅更大,抑制功能更强^[76]。从脑电相干性看,乒乓球运动员与运动新手相比显示更低的脑电相干性,半球脑区内低频 α (8~10 Hz)在双侧P3F3、P4F4、P3T7、P4T8、P3C3、P3O1的相干性低,高频 α (10~12 Hz)和低频 β 频段(13~22 Hz)在P3C3、P3F3、P3O1、P3T7均显示低相干性,高频 β 频

段(23~25 Hz)P3F3、P3T7的相干性低;半球间在低频 α 频段内F3F4、P3P4和C3C4相干性低,高频 α 和低频 β 频段顶叶和中央运动区的相干性低,说明乒乓球运动员发球动作识别时大脑皮层之间的功能耦合精细分化,主要涉及顶叶与额叶、颞叶脑区及中央运动脑区^[77-78]。进行识别时乒乓球运动员左右颞叶 α 频段能量大于普通大学生,乒乓球运动员在右半球相干性上高于普通大学生;在经验相关图形识别过程中,乒乓球运动员的脑电相干性偏高^[78],右侧颞叶较低的激活以及右侧颞叶-运动前区之间的高相干性,可能表明乒乓球运动员具有良好的视觉-空间注意技巧,在图形识别过程中更多地依赖于视觉空间加工^[79]。在专项动作识别时乒乓球运动员枕顶视觉皮层和镜像系统激活降低,左半球内脑区和半球间脑区有效功能连接减弱,而右半球内脑区有效功能连接增强,表现在O2T8和O2F4电极 θ 和高频 α 波以及F4T8电极 θ 和低、高频 α 相干性系数高于新手组,而在O1P3和O1F3及F3P3电极高频 α 波、F3T7电极 θ 和高频 α 波、T7F3电极低和高频 α 波、F3F4和P3P4及T7T8电极 θ 和低、高频 α 相干性系数显著低于新手组^[80]。周末艾等综合整理了历年来乒乓球运动员脑电分析的诊断评估方法与经验,提出“国家乒乓球队脑电评估系统”,内容主要包括世界冠军大脑唤醒水平应达到48%以上,但超过50%则有可能由兴奋逆转为抑制,甚至出现中枢疲劳,处于警戒范围;大脑唤醒水平与大脑能量比值达1.95以上,临界值为2.00,超过则意味着大脑承受的运动负荷过大;eIQ通常在60~75之间,全脑协同参数最佳范围在160~200,eIQ超过80,或全脑协同参数超过200,提示运动员大脑活动过于激烈,并不利于最佳运动水平的发挥。从中枢神经递质看,不同的中枢神经递质参与不同的生理功能,如DA、Ach、阿片肽均与运动能力密切相关,其中DA与动作控制及情绪有关、Ach与大脑兴奋性及记忆能力有关、阿片肽与大脑兴奋性信号传导有关等^[81]。

小球运动中关于羽毛球运动员的国内脑电研究相对较少。采用ERP技术和经典信号停止任务范式研究发现,高水平羽毛球运动员Go反应时显著快于普通人,但反应抑制速度没有显著差异;停止信号诱发的脑电成分上,羽毛球运动员的N2波幅显著小于普通人,但N1、P3成分的波幅和潜伏期均未出现显著差异;变换信号诱发的脑电成分上,运动员右半球N1波幅显著大于普通人,而N2、P3波幅显著小于普通人^[82]。在Go信号诱发的脑电成分上,运动员的P2波幅大于普通人。这说明高水平羽毛球运动



员在进行动作变换时,在抑制过程前期投入更多的注意资源,从而更高效地加工和分辨变换信号,而在抑制过程以及后期,又使用较少的认知资源对抑制结果进行评价,用以保证更快速的动作变换,更加合理分配和利用认知资源,表现出节省化特点。

三大球中的排球属于隔网对抗项目,关于排球项目的脑电研究国内从20世纪80年代就有相关文献报道。张振民等对中国女排运动员不同负荷功率自行车运动实验前、中、后每分钟大脑皮层各区的脑电特点进行分析,发现枕区 α 波波幅运动到第3 min显著升高, α 指数此时虽有增加但无统计学意义,运动后休息2 min时频率明显增加; β 指数运动中显著增加,休息2 min后 β 指数恢复到实验前水平;中央运动区的脑电波无特殊改变^[83]。也有研究发现,健将级排球运动员大脑 α 频段在枕区和额区随着低、中、高不同训练负荷阶段变化呈现出由低到高趋势,而 β 频段则无大幅变化;枕区 α 频段在中负荷阶段时下降程度较大, β 频段在高负荷阶段时有显著性变化^[84]。运用眼动记录和ERP技术的研究发现,在预测判断扣球进攻方向时,排球自由人组运动员视觉搜索速度快、频率低、准确率低,在枕区、顶区和中央区P1、P2潜伏期短、波幅小;主攻和接应组P2潜伏期较短、波幅大;副攻组视觉搜索速度快、频率高,预测准确率高,P1潜伏期短、波幅大;相比自由人和二传组,接应、主攻和副攻组运动员的P3波幅更大^[85]。主攻组运动员P3潜伏期在2强攻条件下显著短于副攻组,接应组运动员P3潜伏期在4强攻条件下显著短于副攻组。相对于二传和自由人组,副攻和接应组运动员的P1、N1、P2、P3潜伏期长,波幅大,视觉搜索频率较高。与背向传球相比,正面传球的注视率显著更高,但正确反应率却偏低。在预测二传传球战术类型时,二传手、球、副攻手区域注视率较高,特别是二传手的躯干、手和球、臂部位置;主攻和副攻运动员的P1波幅较小、潜伏期显著较长;大脑皮层顶枕区的激活强度自由人组显著较低,而主攻组显著较高。P3波幅在快攻传球时显著大于强攻传球时。研究认为不同角色排球运动员应用了不同的视觉搜索策略,主攻、副攻组运动员使用较多较短的注视持续时间的搜索策略,预测反应正确率高,其较高的搜索速度伴随较高的神经激活强度。排球运动员的视觉搜索特征与其位置角色有关,对腿部的注视率主攻和副攻组显著大于自由人、接应和二传组,而对前快球的注视率副攻组显著高于主攻组;与二传和自由人相比,在预测扣球方向时主攻、副攻和接应组大脑皮层激活时程短且强度大,心理资源动用多,注意

集中程度高,预测判断的绩效更高,同时他们在皮层的顶区、中央顶区、中央区、顶枕区和枕区的P1、P2、P3波幅显著较大,脑神经平均活动水平较高,P2、P3波出现时间较早。扣球手、球的区域、扣球手躯干和手臂部位是预测扣球方向时的主要信息源;二传手、副攻手、球、一传手区域是预测二传传球方向的主要信息区,识别二传传球动作模式的主要信息区域是躯干、球和手区域,其中二传、副攻组臂部注视率最高。运用脑电超慢涨落系统,何洋发现优秀女子沙滩排球和中国乒乓球队女子世界冠军运动员测试的神经递质,INH/EXC 颞颥、兴奋水平高于抑制水平,Ach是全组全脑平均值,其数值低于正常值,脑协同指数平均值高于正常值,显示全脑综合智力水平比正常人偏高^[86]。在“专家-新手”范式下,发现排球专修组N1显著小于新手组O1、Oz、O2、Fz、Fcz、Pz;P300显著大于新手组O1、Oz、O2、Fz、Fcz、Pz;眼跳幅度显著小于新手组;注视轨迹更集中在扣球手上^[87]。

2.5 对抗同场性项群脑电及其分析技术的应用研究

技能主导类项目中的对抗同场性项群包括篮球、足球、手球、冰球、水球、曲棍球等。但目前国内与脑电技术相结合的研究只涉及篮球和足球项目,且主要集中在脑电ERP研究上。

在经典Oddball范式下,有研究发现篮球专项组MMN波下平均面积普遍低于射箭运动员组,声音频率MMN总平均波幅在F3、C4、Fz、Cz点低于射箭组,潜伏期也稍短;在优化范式下,组间差异更为明显,射箭组除在F3、C4、Fz、Cz4个点声音频率MMN总平均波幅高于篮球组外,F4和C3两点也高于篮球组,尤以F3、C3、C4突出^[88]。结合眼动与脑电的研究发现运动训练篮球专项大学生组罚球命中次数、眼动注视时间和眼跳距离显著高于体育教育非篮球专项组,罚球完成时间、瞳孔变化幅度、脑电波 θ 和 β 频段功率百分比变化显著低于体教组,表明罚球时篮球专家运动员对目标点注视时间更长,观察范围更大,注意趋向于集中在视觉和右侧肢体^[89]。利用时距两分研究范式结合ERP技术的研究发现篮球专业大学生比普通大学生在时距判断任务中对运动信息影响因子更加敏感,当刺激图片包含运动信息时,被试会高估其呈现时距;在时距知觉判断准确性方面篮球专业大学生优于普通大学生,被试都高估高难度运动信息的呈现时距,相对低估低难度运动信息呈现时距;刺激时距开始呈现250 ms直至刺激结束所诱发的CNV平均波幅存在运动信息类



别的显著性差异,高难度运动信息诱发的波幅要大于低难度运动信息;受过训练的篮球运动员时距知觉能力优于普通大学生,体验认知运动信息并模拟运动状态过程会提高时距机制的唤醒程度,使主观感受时距变长^[90]。

足球项目的脑电 ERP 研究发现,在触球阶段足球运动员较对照组预测准确率高,球飞出阶段预测准确率高于触球阶段;N1 成分振幅显著小于对照组;P1、P2、P3 成分潜伏期运动员组与对照组之间在不同阶段存在显著性差异,运动员组潜伏期更短,说明足球运动员视觉搜索能力较强,搜索速度较快;P4 成分振幅与对照组之间不同阶段存在显著性差异,足球运动员组振幅大;P4 成分潜伏期与对照组之间不同阶段存在显著性差异,足球运动员组潜伏期更长^[91]。在新手—专家范式下,运用眼动和 ERP 技术发现足球专家组守门员的反应时间长于新手组守门员,但正确率高于新手组;专家组守门员注视点更多,注视持续时间更短,总注视时间更长,主要关注的兴趣区为踢球脚和支撑脚;专家组在 CP2、Cz 点 N1 潜伏期显著短于新手组,N1 波幅在 Fz、FC1、Cz、FC2 处差异明显,且专家组的波幅大于新手组;专家组的 P2 波幅在 Fz、FC1、Cz 和 FC2 处显著大于新手组;专家组在 Pz、Oz 和 Cz 处 Pb 波幅显著大于新手组。这说明专家组守门员在判断来球方向的正确率上、视觉搜索模式上均存在优势^[92]。

3 结论与展望

3.1 国内不同项群项目与脑电结合的应用研究

从项群分布看,国内对技能主导类项目的脑电研究明显多于体能主导类项目,特别是在体能主导类项目中对速度和耐力性项目的区分研究较少;相对田径、游泳、自行车等体能主导类项目,国内对赛艇、皮划艇、激流回旋等水上项目的脑电研究几乎没有;在技能主导类项目中,国内脑电研究最多的是对抗隔网性项目和表现准确性项目,其中以乒乓球、网球、射箭和射击项目的脑电研究最多,较少或还未涉及脑电研究的项目主要为对抗同场性的手球、冰球、水球、曲棍球等项目和表现难美性的花样游泳等项目。建议未来关于运动项目的脑电研究可以涵盖更多项群项目。

3.2 国内脑电分析技术与项目结合的应用研究

脑电信号分析技术包括集中在时域和频域的传统线性分析技术和以超慢涨落谱线、复杂度、近似熵等为主要研究指标的非线性分析技术,在与运动项

目结合的脑电研究中,过去更多集中在以各种波的特征和功率谱的脑电研究,进入 21 世纪后则更多以非线性分析技术为主,但也有些项目如田径、体操、拳击等还较少涉及非线性分析技术,未来可加大对这些项目脑电信号的非线性分析。ERP 作为一种特殊的脑诱发电位,又被称为认知电位,可反映认知过程中大脑的神经电生理变化,因此近年来也广泛应用于运动项目的脑电研究中。从上述已有文献资料看,国内几乎绝大多数项群都已有关于 ERP 的研究,但体能主导类速度性和耐力性项目的 ERP 研究还相对较少。近年来随着脑电分析技术的不断发展,国外关于脑电波振荡耦合^[93-94]、脑电功能连接(含无向和有向功能连接)^[95-96]、脑电溯源^[97-98]等方面研究越来越多,但国内体育领域除射击、乒乓球等部分项目已涉及脑电功能连接研究外,绝大多数运动项目还尚未涉及。从研究对象来看,国内多数脑电研究围绕优秀运动员开展分析,或利用专家—新手范式进行 ERP 研究,较少涉及青少年运动员或介于专业与新手之间的业余训练运动员,因此建议未来可加大对非线性分析技术、功能连接、振荡耦合、溯源、ERP 研究较少的部分项目和业余训练运动员开展脑电研究。

参考文献:

- [1] 周北云,李捷,罗智.脑电活动类型对优秀举重运动员选材评估的价值[J].中国临床康复,2005,9(36):102-105.
- [2] 唐斌.不同级别优秀男子举重运动员的脑 α 波、神经递质、中枢疲劳度、焦虑指数、脑功能态和熵值的分析研究[J].军事体育学报,2015,34(4):110-113.
- [3] 尹丽琴. PETTLEP 模型表象训练与背越式跳高动作技能学习及其功能等价脑机制研究[D].长沙:湖南师范大学,2011.
- [4] 汤长发. 跳跃类动作技能表象训练的实效性及其机制研究[D].长沙:湖南师范大学,2011.
- [5] 张振民,周末艾,张云,等.优秀滑冰运动员的脑电监测与疲劳诊断[C]. 2002 年全国运动医学学术会议论文摘要汇编,2002:173.
- [6] 张云,张振民.我国优秀滑冰运动员脑疲劳诊断与恢复手段的研究[C].第 3 届全国青年体育科学学术会议,2002:100.
- [7] 张振民,周末艾,张云,等.采用脑生物电诱发实验诊断优秀运动员中枢疲劳[J].中国运动医学杂志,2004,23(4):422-425.
- [8] 邹荣琪,段立公,李广周,等.优秀男子短距离场地自行车运动员脑电变化分析[J].中国运动医学杂志,2009,28(1):79-81.



- [9] 杨泽丽. 中长跑运动员安静时的脑地形图分析[J]. 山西师大体育学院学报, 2001, 16(1): 67-69.
- [10] 黄贝君, 梁东梅, 曹伟, 等. 竞走运动员功能内稳态的脑电 α 波分析[J]. 体育学刊, 2013, 20(2): 119-123.
- [11] 张亮. 不同级别竞走运动员脑电 α 波特征及其与部分生化指标的相关分析[C]. 2016年全国运动生理与生物化学学术会议论文摘要汇编, 2016: 420-421.
- [12] 林丽雅, 张莉, 邓树勋, 等. 赛前高原训练对游泳运动员自组织适应状态的影响: 脑电压谱分析[J]. 中国临床康复, 2005, 9(40): 176-179.
- [13] 林丽雅, 李捷, 邓树勋, 等. 脑电压谱评价高原训练效果的探索性研究[J]. 体育科学, 2005, 25(6): 30-32+41.
- [14] 魏高峡, 梁成谋, 李佑发, 等. 优秀游泳运动员赛前心理状态的脑功能特征研究[J]. 体育科学, 2005, 25(10): 41-46.
- [15] 韦军, 王琳, 陆一帆, 等. 高水平游泳运动员赛前脑电特点与运动成绩的相关性研究[J]. 安徽体育科技, 2009, 30(2): 42-46.
- [16] 南开. 优秀游泳运动员的脑波涨落图特征[J]. 天津体育学院学报, 2009, 24(3): 274-276.
- [17] 庞俊华, 李捷, 李稚. 优秀射箭、射击、花泳运动员的脑波涨落图特征之比较[J]. 中国应用心理学杂志, 2008, 24(2): 208-210.
- [18] 郑樊慧, 张忠秋. 飞碟多向运动员重大比赛前后安静状态下脑电绝对功率值的比较研究[C]. 第8届全国运动心理学学术会议论文集, 2006: 1240-1248.
- [19] 郑樊慧, 全志伟, 张平法. 不同训练期间移动靶运动员脑电超慢信号系统变化特点的研究[J]. 体育科研, 2010, 31(6): 283-291.
- [20] 周末艾, 陈海涛, 何文革, 等. 中国优秀射击运动员超慢脑电涨落图分析[J]. 中国运动医学杂志, 2010, 29(2): 197-202+213.
- [21] 韦军. 优秀射击运动员临赛前脑电和唾液皮质醇变化的相关性研究[D]. 北京: 北京体育大学, 2007.
- [22] 王晓军, 李捷. 不同水平射击运动员脑电 α 波测试结果的比较[J]. 体育科研, 2009, 30(1): 89-91.
- [23] 孟兵林, 周末艾, 王振宇. 河北省射击运动员大脑机能监控研究[A]. 中华人民共和国第十一届运动会科学大会论文摘要汇编, 2009.
- [24] 韦军, 王琳. 优秀气手枪射击运动员临赛前脑电图变化的特征研究[J]. 山东体育学院学报, 2010, 26(1): 55-59.
- [25] 王霆. 脑电非线性分析在高水平射击运动员中枢机能研究的应用[D]. 太原: 山西大学, 2015.
- [26] 郑樊慧, 安燕, 谢前乔, 等. 青少年女子气手枪运动员击发前脑电变化特征的研究[J]. 中国体育科技, 2015, 51(2): 100-104.
- [27] 安燕, 郑樊慧. 上海女子气手枪运动员击发和收枪时脑电相干性分析[J]. 体育科研, 2016, 37(6): 83-87.
- [28] 张立伟, 周前祥, 柳忠起, 等. 基于因果关系的步枪射击 pre-shot 阶段脑电网络分析[J]. 生物医学工程学杂志, 2018, 35(4): 518-523.
- [29] 樊晋华, 何洋, 王霆, 等. 我国优秀射箭选手某些脑功能特征的研究[C]. 第七届全国体育科学大会论文摘要汇编(二), 2004.
- [30] 樊晋华, 武斌, 邱蕾. 我国优秀女子射箭运动员赛前脑地形图指标的分析[C]. 第十届运动会科学大会论文摘要汇编, 2005: 117.
- [31] 武斌, 樊晋华, 邱蕾. 我国优秀女子射箭运动员赛前脑地形图指标的分析[J]. 体育与科学, 2006, 27(5): 80-81.
- [32] 南开, 庞俊华. 初探优秀射箭运动员脑波涨落图特征[J]. 生物医学工程学杂志, 2007, 24(4): 760-763.
- [33] 王峥. 射箭与篮球运动员脑自动化加工的事件相关电位研究[D]. 北京: 首都体育学院硕士学位论文, 2008.
- [34] 何洋. 我国优秀射箭运动员脑电特征的研究[D]. 太原: 山西大学, 2008.
- [35] 吕慧, 李建英. 优秀射箭运动员表象状态下脑内特定功能区 MRS 表现的研究[J]. 体育科学, 2011, 31(5): 59-64, 74.
- [36] 王霆, 李建英, 石岩, 等. 优秀射箭运动员倒立训练后脑电非线性参数及脑功能变化特征的研究[J]. 体育科学, 2014, 34(2): 48-53.
- [37] 李欣鑫. 优秀射箭运动员不同负荷状态下中枢神经递质、脑电复杂度变化及干预方法的研究[D]. 太原: 山西大学, 2016.
- [38] 赵国明, 刘勇. 射箭选手发射前皮层脑电高频 α 波功率特征研究: 最佳发射与最差发射之对比[C]. 第十一届全国体育科学大会论文摘要汇编, 2019: 2471-2473.
- [39] 黄登惠, 孙晓菁, 刁力钢. 技巧运动员脑电图研究[J]. 四川体育科学, 1990(1): 29-31.
- [40] 周末艾, 陈长庚, 张振民, 等. 中国优秀跳水运动员大脑机能监控研究[J]. 中国运动医学杂志, 2004, 23(6): 649-653.
- [41] 蒋英, 张媛, 裘晟, 等. 广东优秀跳水运动员脑 α 波与神经递质的时序分析[A]. 2014年中国运动生理生化学术会议论文集, 2014: 227.
- [42] 郑晓, 李捷, 徐晓阳, 等. 优秀跳水运动员赛前脑功能训练适应状态的量化分析[J]. 中国运动医学杂志, 2015, 34(4): 383-387.
- [43] 宋爱晶, 裘晟, 张媛, 等. 比赛应激源对不同级别竞技水平跳水运动员脑 α 波与神经递质的时序影响[J]. 中国运动医学杂志, 2014, 33(6): 583-589.
- [44] 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.
- [45] 李稚, 吴瑛, 李捷, 等. 国家女子体操队备战伦敦奥运会不同训练阶段脑 α 波特征及适应状态分析[J]. 中国运动医学杂志, 2015, 34(10): 955-961.



- [46] 邢苏暄,任爽.音乐放松训练对运动员赛前焦虑控制的研究[J].当代体育科技,2014,4(33):34-36.
- [47] 张云,张振民,纪冬,等.脑电系列化监测在自由式滑雪空中技巧与单板U型场地滑雪训练中的应用[J].冰雪运动,2010,32(1):61-65.
- [48] 杨阿丽,张鑫,郭峰,等.单板U型滑雪运动员视觉空间方位知觉的反应抑制——来自ERPs的证据[J].沈阳体育学院学报,2016,35(4):111-117.
- [49] 王怡元.武术运动员注意特征的事件相关电位研究[D].上海:上海体育学院,2017.
- [50] 赵帅帅.武术套路和健身健美运动员抑制功能的比较研究[D].武汉:武汉体育学院硕士学位论文,2017.
- [51] 陈进,王延卿,张志,等.拳击运动员与正常人脑电图对比[J].辽宁体育科技,1994(2):15-16.
- [52] 丛林.拳击运动员表象竞赛时的注意力研究[J].上海体育学院学报,2006,30(4):63-65.
- [53] 张日辉,唐光大,康志新.拳击运动员赛前大强度训练的脑电监控分析[J].中国应用心理学杂志,2013,29(1):50-51.
- [54] 胡咏梅,张忠秋,徐红,等.优秀击剑运动员脑象图特征[J].武汉体育学院学报,2007,41(4):26-30.
- [55] 周成林,冯琰,王小春.高水平男子击剑运动员空间知觉特性的事件相关电位研究[J].中国运动医学杂志,2011,30(2):121-127.
- [56] 王碧野,周成林.优秀击剑运动员技术动作修正优势的事件相关电位特点[J].中国运动医学杂志,2013,32(4):307-313.
- [57] 黄琳,周成林.击剑运动员返回抑制能力及抑制特征线索化的事件相关电位研究[J].中国运动医学杂志,2014,33(3):208-213.
- [58] 王积福,黄志剑,于淋.情绪词语对摔跤运动员心理表象影响的事件相关电位研究[J].中国运动医学杂志,2015,34(4):388-394.
- [59] 黄登惠,周义琼,孙晓箐.网球运动员脑电图研究[J].中国运动医学杂志,1988(4):237-238.
- [60] 王小春.网球运动员时空预测特征及ERP研究[D].上海:上海体育学院,2012.
- [61] 殷加宝.对网球运动员忆象比赛状态时脑电及神经递质变化的研究[D].长春:东北师范大学,2012.
- [62] 张怡.网球选手比赛相持阶段知觉预测能力及特征研究[D].上海:上海体育学院,2013.
- [63] 陆颖之,周成林.网球运动员反应抑制能力及其最佳时区的ERP特点[J].中国运动医学杂志,2013,32(11):974-979.
- [64] 栗亚妮.网球运动员运动准备阶段及执行阶段事件相关电位(ERP)特征研究[D].上海:上海体育学院,2014.
- [65] 韦晓娜,漆昌柱,徐霞,等.网球运动专长对深度运动知觉影响的ERP研究[J].心理学报,2017,49(11):1404-1413.
- [66] 王淙一.球体速度与网球运动专长对深度运动知觉影响的ERP特征研究[D].武汉:武汉体育学院,2019.
- [67] 贺梦阳.优秀网球选手注意资源分配方式的ERP研究[D].武汉:武汉体育学院,2017.
- [68] 张振民,马国敏,关俨,等.优秀乒乓球运动员神经调节机能特征[J].中国运动医学杂志,1998,17(3):200-205.
- [69] 张振民,周末艾,蔡振华.中国乒乓球世界冠军运动员脑功能特征研究[J].中国运动医学杂志,2002,21(5):452-457.
- [70] Tsung-Min H., Chien-Ting W., Jung-Huei L., 等.优秀乒乓球运动员接受刺激前的脑电 α 频段功率与反应时间的关系[J].体育科研,2005,26(3):59-62.
- [71] 杨爱华,殷小川.乒乓球运动员空间注意特征的事件相关电位(ERP)研究[J].体育科学,2009,29(4):35-43+62.
- [72] 金晨曦,李安民,陶莹.乒乓球运动经验对动态信息识别过程影响的事件相关电位特点[J].中国运动医学杂志,2015,34(2):181-187.
- [73] 邹米娜.乒乓球运动员时间知觉的ERP研究[D].北京:首都体育学院,2009.
- [74] 王丽岩,李安民,顾楠,等.乒乓球运动员发球动作识别时的神经效率——来自EEG的证据[J].中国运动医学杂志,2013,32(5):430-436.
- [75] 郭志平,李安民,陆青等.乒乓球运动员在经验相关图形识别中的神经效率:一项EEG研究[J].首都体育学院学报,2017,29(1):78-84.
- [76] 徐立彬.“Go/NoGo”任务范式下乒乓球运动员对发球知觉判断的ERP研究[J].天津体育学院学报,2019,34(3):250-255.
- [77] 王丽岩,李安民,王洪彪.乒乓球运动员动作识别时的脑电相干性分析[J].体育科学,2013,33(5):31-40.
- [78] 郭志平,李安民,金晨曦,等.乒乓球运动员在经验相关图形识别中的脑电相干性分析[J].天津体育学院学报,2016,31(3):233-239.
- [79] 郭志平,李安民,王积福.乒乓球运动员的大脑功能非对称性及功能耦合性研究[J].天津体育学院学报,2015,30(3):256-261.
- [80] 魏瑶,李安民.运动员专项动作识别的神经效率:来自EEG节律去同步化和相干性证据[J].天津体育学院学报,2018,33(4):311-320.
- [81] 周末艾,尚学东,周志芳,等.乒乓球运动员脑电评估系统的研究与应用[C].2015年第十届全国体育科学大会论文摘要汇编,2015:5017-5018.
- [82] 陈嘉成.高水平羽毛球运动员反应抑制能力的事件相关电位研究[D].上海:上海体育学院,2017.
- [83] 张振民,岑望浩,徐静琴,等.中国女排运动员不同负荷自行车运动时脑电图研究[J].中国运动医学杂志,1984,3(4):212-220.



- [31] Sperlich B., Kleinoeder H., De Marées M., et al. Physiological and perceptual responses of adding vibration to cycling[J]. *Journal of Exercise Physiology online*, 2009, 12(2):40-46.
- [32] Filingeri D., Jemni M., Bianco A., et al. The effects of vibration during maximal graded cycling exercise: a pilot study[J]. *Journal of Sports Science & Medicine*, 2012, 11(3): 423-429.
- [33] Macdermid P., Fink P., Stannard S. Quantification of vibrations during mountain biking[J]. *Journal of Science and Cycling*, 2014, 3(2): 17.
- [34] Cardinale M., Wakeling J. Whole body vibration exercise: are vibrations good for you[J]. *Br. J. Sports Med.*, 2005, 39(9): 585.
- [35] Nigg B. M., Wakeling J. M. Impact forces and muscle tuning: a new paradigm[J]. *Exercise & Sport Sciences Reviews*, 2001, 29(1): 37.
- [36] Abercromby A. F. J., Amonette W. E., Layne C. S., et al. Variation in Neuromuscular Responses during Acute Whole-Body Vibration Exercise[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2007, 39(9): 1642.
- [37] Lienhard K., Cabasson A., Meste O., et al. Determination of the optimal parameters maximizing muscle activity of the lower limbs during vertical synchronous whole-body vibration[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2014, 114(7): 1493-1501.
- [38] Del Coso J., Areces F., Salinero J. J., et al. Compression stockings do not improve muscular performance during a half-ironman triathlon race[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2014, 114(3): 587-595.
- [39] Hintzy F., Gregoire N., Samozino P., et al. Effect of Thigh-Compression Shorts on Muscle Activity and Soft-Tissue Vibration During Cycling[J]. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 2019, 33(8): 2145-2152.
- [40] Kraemer W. J., Bush J. A., Triplett-Mcbride N. T., et al. Compression Garments: Influence on Muscle Fatigue[J]. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 1998, 12(4): 211-215.
- [41] Burden R. J., Glaister M. The Effects of Ionized and Non-ionized Compression Garments on Sprint and Endurance Cycling[J]. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2012, 26(10): 2837.

(责任编辑:刘畅)

(上接第 82 页)

- [84] 张海滨.训练负荷的变化对优秀排球运动员脑电的影响[C].2015 年第十届全国体育科学大会论文摘要汇编(二),2015:1680-1681.
- [85] 王新平.不同角色女子排球运动员视觉搜索策略与预测能力及其神经机制的研究[D].上海:上海体育学院,2010.
- [86] 何洋.山西女子沙滩排球运动员赛前脑机能特点研究[J].*运动*,2011,24(08):47-49.
- [87] 李四化,初悦,王晓媛.排球专修与新手大学生接扣球预判的 ERP 和眼动特征[A].2014 年中国运动生理生化学术会议论文集,2014:131-132.
- [88] 王峥.射箭与篮球运动员脑自动化加工的事件相关电位研究[D].北京:首都体育学院,2008.
- [89] 朱泳,高俊,黄滨,等.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*,2014,29(4): 313-318.
- [90] 聂荣彪.高校高水平篮球运动员运动信息体验的时距知觉特征及 ERP 研究[D].长沙:湖南师范大学,2015.
- [91] 孙连洁.足球运动员预测能力的神经心理机制研究[D].上海:上海体育学院,2011.
- [92] 张嘉伟.足球守门员在防守点球情境中的预判特征——来自眼动和 ERP 的证据[D].成都:成都体育学院,2017.
- [93] Moritz K., Uwe F., Benjamin S., et al. Theta-gamma coupling during episodic retrieval in the human EEG [J]. *Brain Research*, 2014,1577: 57-68.
- [94] Paul S., Charline P., Anna L. B., et al. Does cross-frequency phase coupling of oscillatory brain activity contribute to a better understanding of visual working memory? [J]. *British Journal of Psychology*, 2019, 110: 245-255.
- [95] Sebastian W., Ellen B., Philipp M. K., et al. Motor skill failure or flow-experience? Functional brain asymmetry and brain connectivity in elite and amateur table tennis players[J]. *Biological Psychology*, 2015, 105: 95-105.
- [96] Zargol M., Dante M., Alla Y., et al. Changes in intrinsic functional connectivity and group relevant salience: The case of sport rivalry[J]. *Behavioural Brain Research*, 2017, 322:126-135.
- [97] Christoph J., Cornelia H. The spatio-temporal dynamics of deviance and target detection in the passive and active auditory oddball paradigm: a sloreta study[J]. *BMC Neuroscience*, 2018,10:19-25.
- [98] Mustafa Y., Mustafa U., Mukadder O. A comprehensive sLORETA study on the contribution of cortical somatomotor regions to motor imagery[J]. *Brain Science*, 2019, 9:372.

(责任编辑:刘畅)