



# 运动认知神经科学研究(2012~2022): 10年回顾与未来展望

魏高峡<sup>1,2\*</sup>, 盖力钊<sup>1,2</sup>, 林莹<sup>3</sup>

1. 中国科学院心理研究所行为科学重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学心理学系, 北京 100049;

3. 北京师范大学中国基础教育质量监测协同创新中心, 北京 100875

\* 联系人, E-mail: [weigx@psych.ac.cn](mailto:weigx@psych.ac.cn)

2024-01-08 收稿, 2024-02-17 修回, 2024-03-15 接受, 2024-04-01 网络版发表

科学技术部“科技创新2030——脑科学与类脑研究”重大项目2030(2021ZD0200500)和国家自然科学基金(31671163)资助

**摘要** 随着脑成像技术的进步, 运动认知神经科学在具身认知理论的影响下过渡到一个新的发展阶段, 研究方法和研究技术上得到了开拓性变革, 也引发了研究主题的进一步聚焦. 运动行为所带来的广泛的脑结构和功能变化, 不仅直接影响着个体行为的适应性, 在提高动作观察和预期、优化表象和决策行为、促使个体拥有更多更完美的运动技能表现上扮演着关键角色, 而且在促进注意、记忆和抑制控制等认知能力, 改善情绪, 增进身心健康领域, 以及在预防疾病发生、维持大脑健康和治疗大脑疾病方面发挥着不可替代的重要作用. 今后运动认知神经科学的研究应充分认识到运动行为对大脑的影响具有极其复杂的非动力特征; 在解释研究发现时需要强调个体差异对多样性结果的影响; 特别需要考虑身体这一主体在心理和大脑作用中的价值和作用. 此外, 在大数据时代, 还应采取开放科学的态度, 融合人工智能技术, 迎接数字化带给运动认知神经科学的新挑战.

**关键词** 运动, 脑科学, 脑成像技术, 具身认知, 身体锻炼

运动认知神经科学(sports and exercise neuroscience)是心理学、体育学和神经科学等学科交叉融合的产物, 致力于理解人类的运动行为(包括身体活动/锻炼和竞技体育)对大脑认知功能、情绪及心理健康的影响<sup>[1]</sup>. 2012年至今, 运动认知神经科学的发展已迈入知识和技术手段快速迭代更新的时期, 面临前所未有的发展机遇. 特别是, 在第二代认知科学直接挑战了“物理符号系统假设”及其衍生的计算表征主义以后, 强调变量之间偶合关系的动力系统理论引发了新一轮的方法论的变革. 这些方法论和技术的进步直接推动了运动认知神经科学在研究成果数量和质量上的飞跃, 初步解答了体育和运动情境下个体或群体心理效应获得的神经机制和关键脑区. 运动认知神经科学这一交叉学科方向进入到一个史无前例的快速发展阶段.

究其发展原因, 除了神经科学技术的直接推动外, 现代心理学的具身认知理论也发挥了重要指导作用. 传统的认知科学一向怀疑和忽视身体的作用, 认为身体与心理是分离的. 当代具身认知流派则强调认知是身体和环境交互作用的结果. 正如梅洛·庞蒂在《知觉现象学》中提出的, 身体是认识的主体, 并不仅仅是一种物理特征, 而是我们参与认识世界的基础, 也是个体生存的方式<sup>[2]</sup>. 心理学的发展历程中, 有部分极具影响力的理论, 包括詹姆斯-兰格的“情绪产生理论”, 以及皮亚杰的“发生认识论”, 均支持了早期心理学家杜威的具身认知思想, 认为个体通过身体活动来获取外部事物的意义, 身体和心灵是一个整体. 因此, 现代的具身认知理论主张: 第一、认知的方式和内容受到身体结构的影响, 身体结构决定了认识的方式和内容; 第

**引用格式:** 魏高峡, 盖力钊, 林莹. 运动认知神经科学研究(2012~2022): 10年回顾与未来展望. 科学通报, 2024, 69: 3492-3514

Wei G X, Ge L K, Lin X. A decade of progress in sports and exercise neuroscience from 2012 to 2022: A review and perspectives (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 3492-3514, doi: [10.1360/TB-2024-0034](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0034)

二、认知内容受到身体感觉和身体动作以及身体动作带来的身体经验的影响；第三、认知过程受到身体和客观环境的交互影响<sup>[2]</sup>。可以说，当前的具身认知理论思潮已影响了一大批心理学和临近科学的研究方向，如人工智能、生物学、神经科学、语言学、人类学以及哲学等。运动认知神经科学本身就以身体的活动为研究对象，探讨人类各种运动行为(包括运动技能学习、结构化的身体锻炼、一般性的身体活动等)影响认知、情绪、社会适应性等心理过程的神经机制。它强调了身体运动获得的知识是实践的和实用的，这些知识建立在“第一人称”的身体经验基础上。因此，有研究认为，体育运动等身体活动方式具有重要的认识论意义<sup>[3]</sup>。运动认知神经科学的研究主体均高度重视身体经验的作用，比如在竞技运动领域，针对专业运动员的认知优势研究主题，近10年来呈现出了热点相对集中的趋势，强调身体学习经验对个体心理能力的积极影响，比较运动专家与新手在动作观察、运动表象、运动决策上的脑机制差异，探索特定脑区在其中的活动模式特点；在锻炼心理学领域，研究者也关注有日常身体锻炼经验儿童青少年的大脑特征对学业成绩的预测作用。因此，相比于其他学科，运动认知神经科学应当是具身认知理论影响下最具代表性的学科领域。

在体育科学领域内，研究者关于身体活动和专业运动行为导致相应心理效应发生的原因，在健康主题的框架下开展了广泛深入的探索。值得关注的是，个体在运动行为中所获得的心理效应的解释存在一些传统的理论假说，主要包括了认知行为假说、社会交往假说、注意力转移假说、心血管健康假说、胺假说和内啡肽假说等。这些假说大体分为两类：一类为行为水平的宏观假说；另一类则直接采用微观尺度上的神经生物学递质解释各种效应的存在。在这些宏观假说和微观机制之间，似乎缺少了最为重要的心理活动产生的物质载体，即大脑机制层面的解释。具身认知理论认为，大脑形成个体的认知表征和情绪体验过程中，身体或运动经验扮演着重要作用<sup>[2]</sup>。因此，这些运动经验对个体行为的影响自然离不开大脑这一关键物质基础。目前，大量影像学的研究发现已经为健康行为促进以及适应性行为的改变提供了更为深入的脑科学证据。身体活动或运动经验引起广泛性的大脑皮层以及皮层下多个关键神经环路的结构优化或功能活动的重组，这些局部脑区以及中观层面脑网络参数的改变构成了运动引起的行为变化的神经生物学基础。因此，在这一

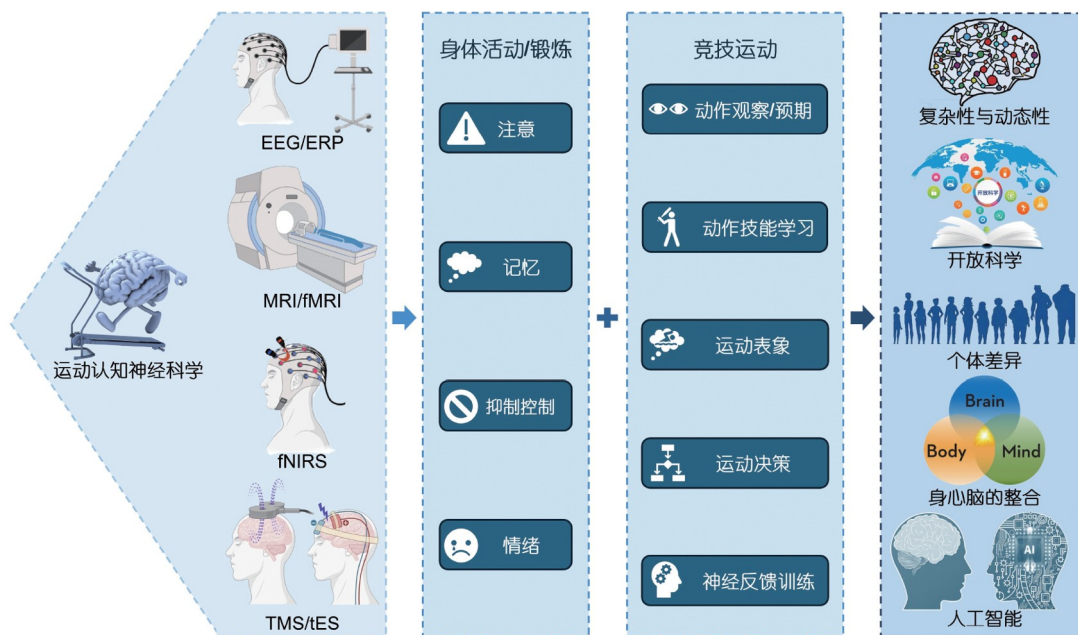
领域，脑机制层面的解释为运动所获得的心理效应提供了有益且重要的补充，凸显了身体-心理-大脑之间的紧密关联，为认知心理学中的具身认知理论提供进一步的实证证据支持。

近10年，运动认知神经科学开始向纵深方向发展，呈现出多个分支领域齐头并进的局面。脑成像技术手段从最初开始的脑电(electroencephalogram, EEG)、事件相关电位(event-related potential, ERP)和结构或功能磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI/functional MRI, fMRI)，逐渐过渡到功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)，以及经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)和经颅电刺激(transcranial electrical stimulation, tES)等非侵入性神经调控技术，这些技术被广泛用于竞技运动领域和体育锻炼领域，探索人类运动行为与大脑发展之间的关系，并催生了多模态的分析技术和全脑的研究视角(具体技术和应用见第2部分与表1)。本文基于2012年研究综述<sup>[4]</sup>，在具身认知理论的框架下，将人类运动行为大致分为结构化的身体活动(身体锻炼)和运动技能学习(竞技运动)两个部分，分别论述大脑这一物质载体在运动行为影响心理过程发生或心理能力发展中所起的作用，重点梳理了表现身体作用的身体活动和专门竞技运动行为在近十年间各主题的脑科学研究进展，分析了领域内主要的发展现状，提出了今后该领域内可能出现的潜在研究方向，具体框架如图1所示。

## 1 运动认知神经科学中常用的脑成像和神经调控技术

### 1.1 脑电图(EEG)

EEG是一种从头皮表层记录大脑神经元电活动的技术，是神经科学和临床医学的重要工具。EEG的信号反映了大脑皮层神经元的同步电活动(尤其是锥体细胞顶树突的突触后电位)，具有自发性、节律性和综合性。根据频率的不同，EEG可以分为 $\delta$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 等节律，它们与个体的睡眠、休息、警觉、注意力等状态有密切关系。EEG可以用于诊断和评估各种脑部疾病，也可以用于研究大脑的功能活动。此外，EEG还被广泛应用于脑机接口(brain-computer interface, BCI)技术中，通过大脑信号与外部设备的交互，实现对特殊需求群体的帮助。



**图 1** 运动认知神经科学发展框架图(2012~2022)。运动认知神经科学的研究通常采用脑成像技术与调控技术，其中常用的脑成像技术主要包括脑电图(electroencephalogram, EEG)、事件相关电位(event-related potential, ERP)、结构或功能磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI/functional MRI, fMRI)和功能近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS); 大脑调控技术主要包括经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)和经颅电刺激(transcranial electrical stimulation, tES)。在身体活动/锻炼领域的认知神经科学主要聚焦于身体活动和锻炼对注意、记忆、抑制控制, 以及情绪的影响及其脑机制。在竞技体育认知神经科学研究中, 研究者更多关注动作观察与动作预期, 动作技能学习, 运动表象, 运动决策和神经反馈训练等主题。在运动认知神经科学的未来研究中, 建议考虑运动情境下的大脑活动的复杂性和动态性特征, 向开放科学发展, 开展基于“个体差异”的脑机制研究, 将身体作为突破口开展身心脑整合研究, 迈向基于人工智能的新时代

**Figure 1** Development framework of sport and exercise neuroscience (2012–2022). Research in sports cognitive neuroscience typically employs brain imaging and modulation techniques. Commonly used brain imaging techniques include Electroencephalogram (EEG), Event-Related Potential (ERP), structural or functional Magnetic Resonance Imaging (MRI/fMRI), and Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS). Brain modulation techniques mainly include Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) and Transcranial Electrical Stimulation (tES). In the field of physical activity/exercise, cognitive neuroscience primarily focuses on the effects of physical activity and exercise on attention, memory, inhibitory control, and emotions, and their brain mechanisms. In competitive sports cognitive neuroscience research, researchers pay more attention to action observation and anticipation, motor skill learning, motor imagery, sports decision-making, and neurofeedback training. In future research in sports cognitive neuroscience, it is suggested to consider the complexity and dynamic characteristics of brain activity under sports situations, to develop towards open science, to carry out brain mechanism research based on individual differences, to take the body as a breakthrough point to carry out body-mind-brain integration research, and to move towards a new era based on artificial intelligence

## 1.2 事件相关脑电位(ERP)

ERP是由刺激或心理因素诱发的电位变化, 是EEG的一种特殊形式。它具有高时间分辨率、低成本和无创性的特点, 是神经科学和临床的重要研究工具。ERP的研究涉及多个认知领域, 如感觉、知觉、注意、记忆、言语、社会决策和情绪等, 以及相应的ERP成分, 如P300、N400、伴随性负变化(contingent negative variation, CNV)、失配性负波(mismatch negativity, MMN)、错误相关负波(error-related negativity, ERN)、反馈相关负波(feedback-related negativity, FRN)、晚期正电位(late positive potentials, LPP)等。ERP的研究也促进了神经科学的临床应用, 以及人机交互和用户体验等相关研究的发展。

## 1.3 磁共振成像(MRI/fMRI)

磁共振成像(MRI)是一种利用氢原子磁性重建人体内部图像的技术, 具有高分辨率和无创性的特点, 是全脑成像的首选方法。功能磁共振成像(fMRI)利用MRI测量神经元活动引起的血液动力与血氧变化, 能可视化负责信息处理的神经解剖区域, 增进对大脑功能的认识。在运动认知神经科学领域, MRI/fMRI可以用于观察和比较运动员的大脑结构和功能, 以及身体活动和运动干预对人脑的影响, 有助于深入了解运动对大脑的具体影响。此外, 静息态功能磁共振成像也广泛用于运动专业人群大脑功能特异性的评估或个体在运动场景中的大脑功能变化。它测量人类在清醒和放松状态下的血氧水平依赖(blood oxygenation level depen-

表 1 运动认知神经科学常用脑成像技术简表<sup>a)</sup>

Table 1 Summary of common brain imaging techniques used in sports cognitive neuroscience

方法类型	认知神经技术	特征	状态	常见指标	简介	研究应用	
脑成像技术	EEG	高时间分辨率 低成本 无创性	静息态	γ波	>30 Hz, 与认知活动(如注意和工作记忆)有关		
				β波	15~30 Hz, 中β波(16~20 Hz)与问题解决、智力活动和注意力等有关, 高β波(19~22 Hz)则可能与消极反刍思维有关		
				SMR波	12~15 Hz, 与身体放松、焦虑减少和精神警觉性等有关		
				α波	8~12 Hz, 与冥想、放松状态有关; 低α波与回忆有关, 高α波与最佳认知表现有关		
				θ波	4~8 Hz, 与创造力深层状态、最佳冥想状态、抑郁和焦虑等有关		
				δ波	0.5~4 Hz, 与深度睡眠、记忆巩固、复杂问题解决和无意识等有关		
				P300	250~500 ms, 与刺激的评估与分类有关		
	ERP			任务态	伴随性负变化(CNV)	260~470 ms, 与预期有关	
					失配性负波(MMN)	150~250 ms, 与对规则刺激中的异常反应有关	
					错误相关负波(ERN)	80~150 ms, 与错误的反应有关	
					反馈相关负波(FRN)	250~300 ms, 与错误行为或失去金钱等负性反馈有关	
	MRI/fMRI	高空间分辨率 无创性		脑结构	灰质体积	涉及神经细胞处理和存储信息的能力, 与认知功能、决策等有关	-脑机接口(BCI) -运动疾病(如脑震荡)监测与康复 -临床疾病诊断 -运动心理状态监测(心流、疲劳、抑郁和焦虑等) -运动训练效果监测 -运动选材 -神经反馈技术(NFT)
					皮层厚度	反映了神经元层的密度和组织结构, 与认知功能、决策等有关	
					皮层表面积	指大脑皮层的外部覆盖区域的总面积, 与认知功能、决策等有关	
					局部一致性(ReHo)	一个脑区内相邻体素间的时间序列信号的相似性或同步性, 反映了大脑局部功能的协调和整合	
fNIRS	高空间分辨率 无创性 低成本 便携性	静息态	脑功能(静息态/任务态)	低频振荡振幅(ALFF)	大脑在静息状态下低频(0.01~0.08 Hz)神经活动的振幅, 反映了局部脑区的自发神经活动强度		
				功能连接性(FC)	不同脑区间的时间序列信号相关性, 反映了脑网络的交互作用		
				静息态功能连接性(Resting-State FC)	大脑各区域之间的自发神经活动同步性, 反映了大脑在休息状态下的网络功能组织和信息处理机制		
TMS	高空间分辨率 无创性 准确性		任务态	低频振荡振幅(ALFF)	同MRI/fMRI, 不赘述		
				局部一致性(ReHo)	同MRI/fMRI, 不赘述		
				HbO <sub>2</sub> 和HHb等在相关脑区的浓度变化	反映了大脑在进行任务时局部区域的血氧水平和神经活动		
神经调控	tES	高空间分辨率 无创性 低成本 便携性	-	强度	-		
				频率-位置 持续时间.....			

a) 伴随性负变化(contingent negative variation, CNV)、失配性负波(mismatch negativity, MMN)、错误相关负波(error-related negativity, ERN)、反馈相关负波(feedback-related negativity, FRN)、晚期正电位(late positive potentials, LPP)、低频振荡振幅(amplitude of low-frequency fluctuations, ALFF)、局部一致性(regional homogeneity, ReHo)、功能连接性(functional connectivity, FC)、氧合血红蛋白(oxy-hemoglobin, HbO<sub>2</sub>)和脱氧血红蛋白(deoxy-hemoglobin, HHb)

dent, BOLD)信号,不需要任务刺激,可以探索大脑在静息状态下的血氧水平变化,反映大脑不同区域之间的神经活动.因此,在研究运动影响大脑发育、老化、疾病等方面具有广泛的应用前景.常见静息态指标包括低频振荡振幅(amplitude of low-frequency fluctuations, ALFF)、比率低频振幅(fractional amplitude of low frequency fluctuations, fALFF)、局部一致性(regional homogeneity, ReHo)、体素镜像同伦功能连接(voxel-mirrored homotopic connectivity, VMHC)等.

#### 1.4 功能性近红外光谱技术(fNIRS)

fNIRS是一种利用近红外光测量大脑皮层中氧合血红蛋白(oxy-hemoglobin, HbO<sub>2</sub>)和脱氧血红蛋白(deoxy-hemoglobin, HHb)浓度变化的神经影像学技术,可以反映神经元活动和血流动力学的响应.神经活动的增加会导致氧代谢的增加,进而导致HbO<sub>2</sub>浓度降低和HHb浓度增加.fNIRS设备成本低、便携灵活,具有非侵入性、高生态效率、不依赖实验室环境和不限限制被试动作等优势,适合应用于儿童、老年人以及特殊人群的脑功能成像研究,以及运动-认知研究领域.尽管fNIRS存在空间分辨率和深度探测能力较低,且易受头部运动干扰等局限性,但仍然是一种在多个新兴领域具有独特优势的非侵入式成像技术.

#### 1.5 经颅磁刺激(TMS)和经颅电刺激(tES)

TMS属于神经调控技术,它是利用脉冲磁场诱导大脑皮层中的感应电流,可以根据不同的参数设置,实现对目标脑区的兴奋或抑制.此外,TMS也已经成为了一种可用于探索皮质兴奋性的变化,以及获取特定功能映射和脑区定位的重要工具.TMS有多种类型,如单脉冲经颅磁刺激(single-pulse TMS, sTMS)、双脉冲经颅磁刺激(paired-pulse TMS, pTMS)、重复脉冲经颅磁刺激(repetitive TMS, rTMS)、波形可控脉冲经颅磁刺激(controllable pulse parameters TMS, cTMS)和脑深部经颅磁刺激(deep TMS, dTMS)等.TMS具有较高的空间分辨率,可以定位刺激特定脑区,但有一定副作用,主要包括头疼和头晕,容易诱发癫痫等.

经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)是tES中目前应用最广泛的神经调控技术.tDCS通过在头皮上放置阳极和阴极电极,利用低强度的直流电,达到分别提升或降低大脑皮层的兴奋性的目的.tDCS无创、高效、易操作,而且相对于TMS,具

有更强的调节作用和更持久的影响,设备也更简便易携带、成本低.然而,tDCS也具有一定局限性,比如空间精度较低、电流分布较广、难以进行精确定位,但高精度tDCS技术的出现正力图改善这一问题.除此之外,经颅交流电刺激和经颅随机噪声刺激(transcranial random noise stimulation, tRNS)是另外两种新兴的经颅电刺激技术.它们分别通过在头皮上施加正弦交变电流或者随机振幅和频率的交变电流来影响大脑皮层神经元,目前已在精神病学和认知神经科学领域有了初步的应用<sup>[5-7]</sup>.

综上,TMS和tDCS是两种不同的非侵入性脑神经调控技术,它们在认知神经科学、精神疾病治疗和康复医学中,有各自的优势和应用价值.根据研究目的,可以选择合适的技术进行对大脑的神经调控.

## 2 身体活动/锻炼领域的认知神经科学

身体活动/锻炼是一种广泛的行为,涵盖了从日常活动到有氧运动等不同强度、频率、持续时间和类型的身体运动.在本节中,我们主要关注的是健康人群的身体活动与锻炼领域的认知神经科学研究.并按照目前研究最为广泛的、不同的认知神经科学主题(注意、记忆、抑制控制、情绪等),分别介绍身体活动/锻炼对不同年龄阶段(儿童青少年、成年人、老年人)的认知神经科学表现的影响.在这些研究中,身体活动和锻炼在促进认知功能、改善注意力、增强记忆、提高抑制控制能力以及调节情绪等方面起到了重要的作用.此外,虽然运动/身体活动与认知障碍人群(如阿尔兹海默症、轻度认知障碍、痴呆症群体)的研究进展是一个重要的主题,但本文并未涉及这部分内容.我们期待未来有更多的研究能够深入探讨这个主题.

### 2.1 身体活动与脑的发展

儿童青少年时期是大脑可塑性和认知发展的关键阶段,这一阶段的大脑易受外界环境和生活方式的影响.近期,基于国内外大型儿童青少年脑智发育项目的研究,揭示了体育活动与大脑结构和功能的关系.例如,荷兰Generation R项目的一项队列研究追踪了1088名儿童,结果发现在10岁时的身体活动量与其14岁时杏仁核体积的增加有前瞻性关联,而海马体积的增加仅与儿童自我报告的身体活动有关<sup>[8]</sup>.来源于该项目的另一项四千人横断面研究发现,儿童的身体活动量与白质健康发育呈正相关,表现为全局各向异性分数

(fractional anisotropy, FA)的提高和全局平均扩散率(mean diffusivity, MD)的降低<sup>[9]</sup>。与此同时,美国一项青少年脑认知发展(adolescent brain cognitive development, ABCD)的大型国家级脑科学项目分析了6000名早期青少年的影像学数据,发现定期的身体活动可以直接改善他们的大脑功能性连接组的发展,包括提高网络连接性、效率、鲁棒性和稳定性。此外,身体活动还可以间接通过调节网络拓扑结构,帮助青少年更好地控制食物摄入、食欲和饱腹感,进而降低体重指数(body mass index, BMI),从而可能减轻异常体重对认知健康的消极影响<sup>[10]</sup>。2012年,中国彩票计划项目招募了222名6~18岁儿童青少年,进行了该群体的横断面研究。结果发现,身体活动与大脑多个局部脑区(中央后回、中央后沟和镜像神经元相关脑区)结构和功能发育密切相关,并且体质在体育活动与大脑可塑性之间具有重要的调节作用<sup>[11]</sup>。

随着年龄的增长,认知功能、大脑结构大小和白质完整性都会有所下降,但前额叶激活却会增加。认知和老化的脚手架理论(Scaffolding Theory of Aging and Cognition, STAC)认为,大脑具有可塑性,可以通过建立补偿性神经网络(脚手架)来缓解老化对脑结构或功能的影响,从而保护认知能力。认知训练、运动等方式等都可以达到脚手架的效果<sup>[12]</sup>。目前,已有大量的研究证实了身体活动和运动干预对老年人脑结构和功能的积极作用。例如,运动可以增加灰质和白质区域总体脑容量,增加前额叶和海马体积,改善白质完整性,以及增强默认网络和额叶执行网络功能连接。此外,太极拳等身心运动作为老年人友好型的身体活动方式,其对老年人脑的积极影响也得到了验证,包括广泛增强皮质厚度,降低额下回的ReHo,降低额顶网络、默认模式网络等大尺度网络的fALFF。

## 2.2 身体活动与注意

注意(attention)是心理活动或意识对一定对象的指向与集中。它被视为学生学习过程中最基本的的能力,提升注意能力是提高学习有效性的关键。注意随年龄增长而不断发展,7~10岁期间发展迅速,11~15岁期间发展缓慢。体育锻炼是提升儿童注意能力的重要方式。有研究使用脑磁图测量了59名青少年在Posner线索范式下的 $\alpha$ 波。结果发现,在操作选择性注意任务中,高活动量组别半球间 $\alpha$ 不对称性大于低活动量组,但高、低有氧体能组之间没有差异<sup>[13]</sup>。另一项ERP研究探索了急

性有氧运动对青少年警觉、定向和执行控制三个注意网络功能的影响。研究发现,运动会导致在注意的警觉与执行控制子任务时,额叶、中央回与顶叶中线部位P3振幅增大<sup>[14]</sup>。此外,9个月的体育锻炼计划能够提高8~9岁儿童注意和干扰控制任务表现,降低右侧前额叶前部皮层激活<sup>[15]</sup>。

注意依赖于大脑资源的分配,低龄段的孩子更容易注意力不集中。这是因为注意需要依靠前额叶皮层的支持,而前额叶皮层在儿童阶段尚未发育完全,尤其是在注意缺陷多动障碍(attention deficit hyperactivity disorder, ADHD)儿童群体。有横断面研究发现,体质水平更高的ADHD儿童静息态脑电图 $\theta/\alpha$ 比值更小,提示他们具有更高的注意自我控制能力<sup>[16]</sup>。研究者进一步发现,30 min运动干预能够降低ADHD儿童异常的 $\theta/\beta$ 比值,表明急性运动能够让ADHD儿童注意的觉醒和警觉功能正常化<sup>[17]</sup>。一项整合身体、脑、社会干预的研究结果表明,ADHD儿童注意控制能力较差(N2、P3波异常),而整合干预可以防止大脑注意力系统的恶化<sup>[18]</sup>。针对ADHD儿童与注意相关前额叶功能异常,目前运动干预也提供了一些有益的证据,即运动干预可以降低额叶 $\theta/\alpha$ 比值<sup>[19]</sup>,增强前额叶自发神经活动,促进注意资源分配,提高注意力<sup>[20]</sup>。

在成年人群体中也有类似的研究证据。持续注意力表现与心肺适能相关,而心肺适能较高的个体有更强的后扣带回激活和更早的辅助运动区P3b峰值<sup>[21]</sup>。最新的EEG研究表明,心肺适能较高的个体表现出典型的皮层电动力学(刺激前阶段微状态A持续时间减少,微状态D出现频率增加),这使得他们在从事持续注意任务时更有效地分配注意资源<sup>[22]</sup>。此外,有研究发现,长期进行太极拳训练的老年人注意网络测试表现与左颞上回皮质厚度、左脑前扣带ReHo降低,右侧中央后回ReHo增加有关<sup>[23]</sup>。运动干预的研究进一步阐述了运动对注意改善的脑机制。例如,一项EEG研究表明,剧烈运动可以缩短视觉注意任务的反应时,增加P300振幅<sup>[13]</sup>。另一项研究发现,急性太极拳干预可以增强年轻人的持续注意力,并强调了楔叶/楔前叶和额顶叶-小脑区域在促进警觉性中的关键作用<sup>[24]</sup>。还有研究探讨了运动剂量对注意的影响,发现中等强度运动比休息和低强度运动能使注意任务反应时减少,但中等强度变化负荷比恒等负荷有更高的任务准确性和更高的背外侧前额叶皮层的激活<sup>[25]</sup>。这提示我们,虽然中等强度的运动可以提高注意力,但恒定负荷的单调运动可能会

掩盖这种好处。

### 2.3 身体活动与记忆

记忆(memory)是在大脑中积累和保存个体经验的心理过程,也是人脑对外界输入的信息进行编码、存储和提取的过程。儿童青少年时期的记忆是非常重要的认知能力。已有综述指出,目前有横断面研究使用MRI探索了9和10岁不同体质水平儿童在记忆任务上的表现差异与大脑结构的关系<sup>[26]</sup>。高体质水平儿童(9~10岁)有更大的双侧海马体积和更好的记忆表现,并且双侧海马体积在一定程度上介导了体质和相关记忆表现之间的关系。在比较不同学习结果的大脑活动时,尽管记忆任务表现相同,但低体质水平青少年的双侧海马和右侧额上回明显比高体质水平青少年更活跃,而高体质青少年默认网络有更大的抑制<sup>[27]</sup>。这些发现提示,体育活动可能会影响大脑编码新记忆的方式,而体质较差的青少年可能需要更多的大脑资源来学习新知识<sup>[28]</sup>。来自运动干预的脑成像研究同样也证实了运动对记忆的益处。例如,急性有氧运动可以减少干扰后回忆任务时期颞枕区的神经激活,包括枕极、舌回、颞上回等<sup>[29]</sup>。此外,急性有氧运动可以增强儿童的工作记忆,增强双侧顶叶、左侧海马和双侧小脑的激活<sup>[30]</sup>。单次武术训练可以增强学龄儿童执行1-back任务时右侧眶额叶和布罗卡区的激活<sup>[31]</sup>。长期运动训练可以改善青春期前儿童的工作记忆,具体表现为反应准确性提高和额叶事件相关电位上出现更大的初始关联负变化(initial contingent negative variation, iCNV)<sup>[32]</sup>。

记忆衰退是老年时期最为主要的认知特点。有研究表明,有氧运动训练可以使老年人的海马体积增加2%,有效逆转了年龄相关的体积损失1~2个百分点,从而改善其记忆功能<sup>[33]</sup>。一项横断面研究也得出相似的结果,即长期练习太极拳可能通过重塑老年人的海马结构和功能来提高记忆能力<sup>[34]</sup>。另一项fMRI研究则发现,12周太极拳干预可以增强老年人海马和内侧前额叶之间的静息态功能连接,这种连接的增加与记忆功能的改善显著相关<sup>[35]</sup>。因此,除海马之外,前额叶是运动促进老年人记忆功能的另一个重要脑区。一项采用ERP-fNIRS联合技术的研究发现,12周太极拳运动干预能够显著提高老年人的工作记忆和右侧背外侧前额叶的激活水平,并且在整个n-back任务期间,P3振幅显著增加<sup>[36]</sup>。针对情景记忆的不同过程,也有研究发现,与久坐组相比,运动组的老年人在记忆编码阶段观察

到眶额和额极皮质更高的节点效率以及前额叶间更强的功能连接,在检索阶段观察到更高的眶额皮质节点效率和度中心性<sup>[37]</sup>。此外,身体活动对老年人记忆功能的有益影响独立于其运动强度,与前额叶和扣带皮层局部灰质体积的增加以及脑源性神经营养因子(brain-derived neurotrophic factor, BDNF)水平(趋势)呈正相关<sup>[38]</sup>。针对不同的记忆能力,运动对老年人脑似乎有更广泛的影响。例如,有研究发现,12周瑜伽干预导致的老年人言语记忆能力的提高,与语言处理网络和左额叶、下丘脑之间的连接增加呈正相关,而视觉空间记忆的改善与上顶叶网络和内侧顶叶皮层之间的连接呈负相关<sup>[39]</sup>。最新的一项研究则发现,运动促进老年人工作记忆的脑结构机制可能涉及运动对中央前回、辅助运动区、额叶、前/中部扣带回和直回灰质体积以及距状旁回/楔前叶脑沟深度的保护作用,尤其是右侧前/中部扣带回灰质体积可能是中高强度身体活动影响老年人工作记忆能力高低的关键脑区<sup>[40]</sup>。

### 2.4 身体活动与抑制控制

抑制控制作为一种基础的认知机制,主要负责阻止或压抑无关信息或行为,以减少其对当前信息加工的影响。最新的激活似然估计(activation likelihood estimation, ALE)元分析揭示了运动改善抑制控制的神经机制,确定了10个运动诱导的神经核团,包括颞上回、楔前叶、额上回、楔前叶、楔前叶、尾状核、后扣带、颞中回、海马旁回和中央前回等,并涉及额顶网络、默认网络和视觉网络<sup>[41]</sup>。有研究发现,高强度间歇运动对抑制控制的改善效果最好,并能减少N2的潜伏期<sup>[42]</sup>。然而,也有研究得出不一致的结论,即运动时虽然振荡脑活动增加,并且在中高强度运动期间这种增加比轻度运动更高,但是对抑制控制的影响没有强度差异<sup>[43]</sup>。

此外,运动对抑制控制影响还存在年龄差异。例如,有研究考察了习惯性锻炼对不同年龄群体抑制控制的影响,结果发现,在年轻群体中,干扰控制任务(即Flanker任务)下,一致条件诱发的P3b活动峰值明显早于不一致条件,而在中年经常锻炼的群体中未发现这一差异<sup>[44]</sup>。研究者进一步发现,在停止信号任务中,年轻与中年习惯锻炼者的P3b活动比非锻炼者更大,峰值更早,表明中青年经常锻炼者的反应抑制能力更强。该研究还发现,运动对中年女性抑制控制的保护作用似乎优于男性。另一研究的结果表明,15 min中等强度有氧运

动可以引起至少维持30 min的抑制控制的改善,但年轻人在运动后情绪唤醒状态显著增加,而老年人则倾向于表现出前额叶中部神经活动的增加<sup>[45]</sup>。

对于运动对年轻群体抑制控制的影响,有研究发现,与低体质水平的儿童(9~10岁)相比,高体质水平的同龄人在Flanker任务中有更强的抑制控制能力,同时其背侧纹状体体积更大<sup>[26]</sup>。尽管心理社会压力对青少年认知和前额叶活动有负面影响,但平时的身体活动水平与应激诱发前后的抑制控制表现无关<sup>[46]</sup>。一项纳入214名参与者的队列研究发现,儿童时期(<12岁)运动参与可以正向预测以后生活中的反应抑制能力,并且这种关联可以通过神经元回路的变化来调节,例如额顶网络、带状盖网络(cingulo-opercular, CON)、默认网络(default mode networks, DMN)结构和功能连接下降、突触密度降低、皮质厚度和效率的增加,以及半球间连通性的加强等<sup>[47]</sup>。运动干预对青少年和年轻人抑制控制的改善可能与前额叶活动增强<sup>[48]</sup>,右侧皮质脊髓束、左侧额枕上束白质微结构变化有关<sup>[49]</sup>。对于不同的运动方式,有研究比较了太极拳和快步走对年轻人抑制控制的影响,结果表明,8周的太极拳干预可以更好地提高与抑制控制相关的加工效率,改变年轻人的自发神经活动<sup>[50]</sup>。

在衰老过程中,抑制控制的下降显著损害了老年人的生活质量。与不规律锻炼的老年人相比,规律锻炼者在抑制控制任务的不同条件下均表现出更快的反应时间。研究者还发现,开放式训练组的老年人在中央部位(central site, Cz)的P300峰值振幅大于额部部位(frontal site, Fz),而封闭式和不规则训练组的老年人则没有这种差异。另一项电生理研究显示,经常进行太极拳训练的老年人,与停止信号相关的P3分量以及与错误反馈相关的Pe分量都明显增大,表明他们有更好的决策能力和错误意识<sup>[51]</sup>。此外,8周的太极拳干预可以显著提高老年人在Flanker任务不一致条件下的反应时,增加前额叶的氧合血红蛋白水平<sup>[52]</sup>。一篇综述指出,急性运动可以提高个体的抑制控制能力,激活前额叶兴奋调节和抑制通路(尤其是左背外侧前额叶皮层和前额叶-基底神经节通路),而这些通路在老年时被发现是受损的<sup>[53]</sup>。

## 2.5 身体活动与情绪

目前已有大量研究证实了身体活动和运动干预对情绪的改善作用。青春期到成年初现期,是情绪问题高

发的年龄阶段,这可能与青春期的大脑发育特点有关。在这个时期,处理感觉运动信息的皮质区域与参与自下而上情绪处理的边缘系统(即杏仁核、海马体和纹状体)已经成熟,但参与自上而下情绪与行为控制的前额叶和相关脑网络仍在发育,导致青少年难以自我调节心理和情绪问题。身体活动和运动干预可以增强前额叶结构和功能上的神经可塑性,促进前额叶与其他大尺度脑网络(如额顶网络、默认网络和皮质边缘系统)的整合和完善,进而加强自上而下系统对自下而上过程的控制,提高情绪的自我调节能力。一些实验研究也直接或间接验证了这一假设。例如,有研究发现,静息态额叶皮质不对称与中等强度运动引起的情感反应有关,左额叶主导型青少年比右额叶主导型青少年报告更多的正性情绪;但在剧烈运动时,这种关联不显著<sup>[54]</sup>。另一项研究发现,青少年基线时焦虑与右侧杏仁核激活强度正相关,他们在接受了12周的一种融合了正念、瑜伽和心理治疗的干预之后,右侧杏仁核激活显著降低与抑郁减少有关<sup>[55]</sup>。近期一项fMRI研究则发现,30 min急性有氧运动能够改善青春晚期学生的情绪,且这种情绪改善与眶额叶-杏仁核之间功能连接的增强有关<sup>[56]</sup>。

关于运动影响情绪的脑机制,目前有2种相关假说,即脑前额叶偏侧化假说与双模理论。前额叶偏侧化假说认为,左侧前额叶唤醒水平上升与正性情绪有关,右侧前额叶唤醒水平上升与负性情绪有关,而运动会引发左侧前额叶激活增加,导致产生正性情绪反应。双模理论认为,对运动的情感反应是2个因素相互作用的结果:一是源于前额叶的具有个体差异的认知过程(如运动动机、自我效能感、运动环境等);二是由运动相关生理变化引起的内感受器信号,通过皮层下通路达到大脑情感中枢。太极拳等身心运动领域的前额叶皮层假说也认为,前额叶皮层是帮助个人管理负性情绪与心理健康的多重复杂神经关联中的关键生物标志物<sup>[57]</sup>。越来越多的研究证据也都进一步支持了前额叶及其与其他情绪相关脑区之间功能连接和脑网络,在运动干预对情绪改善中的积极作用。例如,静息额叶脑电图不对称可以预测急性有氧运动后的情感反应,左侧额叶更多的活动已被证明可以预测运动后的积极情绪、疲劳与平静<sup>[58]</sup>。急性有氧运动后负性情绪改善与腹侧前额叶皮质和5-羟色胺能系统的激活<sup>[59]</sup>,背外侧前额叶对颞叶的更强影响<sup>[60]</sup>,杏仁核反应改变、及其与眶额皮层及脑岛的功能连接的变化<sup>[61]</sup>,眶额皮层与



杏仁核之间的功能连接强度增强有关<sup>[56]</sup>。除了前额叶的关键影响,其他脑区也在运动后情绪获益中发挥独特作用。例如,中等强度蹬车运动可以缓解负性情绪,并伴随前扣带回区域 $\alpha$ 2波段脑活动减少<sup>[62]</sup>。瑜伽练习者与非练习相比,在暴露于情绪唤醒刺激期间,独特地激活了顶叶上小叶和缘上回,而这两个脑区与注意、减少自我中心偏见和情绪调节有关<sup>[63]</sup>。高强度急性有氧运动对情绪的改善还涉及杏仁核-脑岛间功能连接增强,后扣带回、楔前叶、尾状核和壳核活动减少<sup>[64]</sup>。

焦虑障碍是我国最普遍的情绪障碍,根据中国精神卫生调查的结果,其终身患病率为7.6%<sup>[65]</sup>。身体活动和运动干预可以改善焦虑症患者的情绪状态和神经机制。一项脑电研究发现,高焦虑组的参与者在一次太极拳练习结束以及恢复时,随着 $\alpha$ 1波、 $\alpha$ 2波、 $\beta$ 1波的适量增加,处于适度的觉醒状态,高焦虑者得以情绪安定、身心放松、注意力集中,并向低焦虑状态变化<sup>[66]</sup>。另一项脑电研究发现,急性有氧运动能够增加高特质焦虑者的前额叶不对称性(降低左前额叶的能量值,升高右前额叶的能量值),刺激积极情绪的增加,抑制消极情绪的产生,从而改善他们的情绪状态<sup>[67]</sup>。另外,焦虑症患者往往表现出前额叶活动及其与皮层下区域之间功能连接的降低。身体活动可以改变这种异常,在那些满足身体活动指南的人群中,有无广泛性焦虑症的两组参与者的前额叶氧合水平无显著差异<sup>[68]</sup>。此外,习惯性身体活动可以解释14.67%的急性运动抗焦虑效应,其可能与杏仁核神经活动及其与眶额叶、脑岛和海马旁回的功能连接变化有关<sup>[61]</sup>。

抑郁症已成为我国致残的第二大原因,根据中国精神卫生调查,其终身患病率为6.8%<sup>[65,69]</sup>。抑郁症是一种应激和情绪失调的综合征,涉及额叶-边缘网络结构完整性受损。运动作为一种可行的非药物治疗方法,可以重塑抑郁症患者的大脑结构,激活相关脑区功能,保持海马和白质体积的完整性,增加默认网络连接,提高脑神经加工效率,恢复神经可塑性,从而促进行为适应性改变,延缓认知退化<sup>[70]</sup>。与抗抑郁药物不同,运动益处可能在治疗结束后仍然存在,并且前额叶皮层、前扣带皮层、海马体和胼胝体作为结构神经标记物出现,可能作为抑郁症运动治疗的靶点<sup>[71]</sup>。对于作为抑郁症前兆的阈下抑郁,目前研究结论并不一致。一项对阈下抑郁患者和健康对照组进行8周有氧运动干预的研究发现,基线时阈下抑郁组右侧壳核ALFF增高,尽管阈下抑郁组的抑郁得分在运动后显著降低,但未发现其

与ALFF变化显著相关<sup>[72]</sup>。另一项研究则发现,12周太极拳运动干预后,抑郁的改善与皮质醇水平和壳核灰质体积显著降低有关<sup>[73]</sup>。这种差异可能与阈下抑郁定义、运动类型、干预时长、样本量等因素有关。

总的来说,身体活动和运动干预在情绪调节中起着关键作用。这些干预一方面可以增强前额叶皮质的结构和功能,提高情绪的自我调节能力;另一方面,运动也可能通过自下而上的过程直接影响边缘系统等情绪脑区,从而对情绪产生影响。对于焦虑和抑郁症,身体活动和运动干预也显示出了显著的改善效果。然而,对于阈下抑郁,研究结果并不一致。这些研究结果为我们提供了深入理解运动如何影响情绪的神经机制的可能性,但我们还需要更多的证据来进一步探索这个领域。特别是关于寻找具体的脑机制,设计最佳的运动干预方式,以及运动影响情绪的个体差异问题仍需进一步研究<sup>[74]</sup>。

### 3 竞技体育认知神经科学研究

竞技体育是一种高水平、具有比赛性质的体育运动。与上一部分的身体活动/锻炼不同,竞技体育的运动训练是高度体系化、专业化的,代表了人类运动技能的最高水平。在本节中,我们主要梳理运动员群体相关神经科学的研究。由于运动员的年龄多为中青年,本节不再从年龄展开,而聚焦于对特定运动表现及其相关脑结构和功能的理论假说,介绍神经刺激干预运动表现的研究。竞技体育部分的主要研究范式为专家-新手范式,通过对比久经训练的运动员专家与训练年限较短或没有经历过训练的新手之间的行为与脑差异来探究动作学习的影响。本部分所纳入的研究大多使用此范式,并总结了有关差异的理论假说。由于每个竞技项目所涉及的心理能力不同,本部分重点阐述了领域内对运动表现影响最为典型、研究数量众多的几项心理能力进行综述。

#### 3.1 动作技能学习(motor learning)

动作技能学习是获得新的运动动作或新的运动模式的能力,包括对已学习动作的调整和新动作的学习,这些过程都需要大脑皮层、小脑和纹状体中脑神经的参与。不同的学习类型会涉及不同的大脑神经机制。Spampinato和Celnik<sup>[75]</sup>将动作技能学习的方法分为四种:基于错误的学习(error-based learning)、强化学习(reinforcement learning)、使用依赖学习(use-dependent

learning)和认知策略(cognitive strategies).

具体而言, 基于错误的学习指基于错误的信号反馈对行为进行修正的学习. 比如网球运动员根据不同场地、球拍和球的反馈来修正下一次挥拍的力度与角度. 基于fMRI的研究发现, 小脑(cerebellum)在错误驱动的学习模型中与个体的预测和更新有关<sup>[76]</sup>, 因此小脑可能在基于错误的学习中扮演着重要的角色. 相关TMS的研究也为基于错误学习时小脑的参与提供了实证证据, 在使用TMS刺激小脑半球时, 激活了小脑皮层VII和VIII小叶中的浦肯野细胞<sup>[77]</sup>, 而浦肯野细胞在动物实验中被证明和基于错误的学习有关<sup>[78]</sup>. 强化学习指的是基于运动是成功还是失败的简单反馈来学习和选择合适的动作, 以获得最大的回报. 基底神经节(basal ganglia)被认为在动作的强化学习中起到了关键作用, 基底神经节和初级运动皮层(primary motor cortex, M1)间的连接能够通过控制多巴胺的释放对动作进行奖励<sup>[79]</sup>. 使用依赖学习指的是, 对于运动员来说, 不断重复练习同个动作是不可避免的. 在练习过程中, 往往不一定能得到即时的反馈, 但是运动员对该动作之前的练习经验也会改变之后的动作表现, 这种动作的改变也被称为使用依赖学习<sup>[35]</sup>. 以往的研究发现, 使用依赖学习与M1有关<sup>[80]</sup>. 干预研究也发现, 使用tDCS对M1进行刺激后, 重复训练后新运动记忆的初始形成和保留被增强<sup>[81]</sup>. 最后一部分是认知策略. 虽然认知策略不涉及身体活动, 但是其对动作技能学习的重要性是不可忽视的. 认知策略影响动作技能学习的神经机制常受到忽视, 到目前为止, 还没有研究直接测试运动学习背景下与策略相关的神经生理学机制<sup>[75]</sup>. 一个可能的相关脑区是背侧前额叶皮层, 它被认为在外显学习中发挥着重要作用, 尤其是在需要制定认知策略来解决问题时<sup>[82]</sup>.

### 3.2 运动表象(motor imagery, MI)

运动表象是一种多感官参与的、动态的心理状态. 在这种状态下, 个体以想象的形式模拟自己身体进行移动或者对物体进行操控, 但并不实际进行操作. 多个实证研究证明, 运动表象训练能够促进动作技能学习, 提升动作准确性、动作速度、动作效率和力量, 并提高最终的运动表现<sup>[83,84]</sup>, 使其成为运动员心理训练的重要方式. 运动表象有多种形式, 除了运动表象的类型(视觉表象、身体表象)和表象的视角(第一人称视角、第三人称视角)之外, Guillot等人<sup>[85]</sup>还把运动表象分为

了5个维度: (1) 生动性(vividness), 表象的清晰程度和丰富程度; (2) 准确性(exactness), 表象与实际运动的相似程度; (3) 可控性(controllability), 表象是否能始终控制、转换和维持; (4) 时间一致性(temporal congruence), 表象是否能与实际的运动发生时间保持一致; (5) 可行性(ease), 能够形成恰当的、准确的运动表象的可行性.

运动表象的脑基础一直是运动认知神经科学的重要议题. 大量的实验证据表明, 运动表象能够激活额叶和顶叶、皮质下和小脑区域. 具体而言, 前运动皮层(premotor cortex, PMC, 包括双侧额下回(inferior frontal gyri, IFG)和补充运动区(supplementary motor area, SMA)的激活可能与运动表象中的动作计划与准备有关; 顶叶区域(包括顶下、顶上小叶, inferior/superior parietal lobules, IPL/SPL)和缘上回(supramarginal gyrus, SMG)可能与运动表象中的感觉整合、身体的运动表征有关; 躯体感觉皮层(somatosensory cortex)则能帮助个体在进行表象时感受自己的身体; 此外, 扣带皮层(cingulate cortex)、小脑、基底神经节(basal ganglia, 包括尾状核、壳核和苍白球)也在运动表象中被激活. Filgueiras等人<sup>[86]</sup>进一步对视觉表象和身体表象分别进行了ALE的元分析, 发现二者共享相似的神经网络, 包括上述提到的前运动皮层(PMC)、辅助运动区(SMA)、躯体感觉皮层、顶下/顶上小叶(IPL/SPL)和基底神经节中的尾状核.

运动表象对运动表现的促进也具有认知神经基础. Hardwick等人<sup>[87]</sup>在对400多个运动表象和运动执行(movement execution)相关的脑实验研究进行元分析后发现, 运动表象和运动执行在脑区活动上有很大的重叠. 这说明, 运动表象和运动执行很有可能具有相似的神经网络激活, 包括双侧皮层感觉运动和前运动簇, 以及壳核和小脑中较小的皮层下簇. 还有研究表明, 体育锻炼后产生的大脑可塑性在运动表象过程中也有所体现<sup>[88]</sup>. 虽然运动表象与实际运动有相似的脑网络激活, 但是二者的脑基础并不完全相同. 由于运动想象并不涉及现实的身体活动, 因此在运动表象的过程中, 个体会进行运动命令的抑制. 同时, 个体的差异也会导致运动表象的脑激活模式差异, 包括表象类型、表象速度、表象强度、表象能力个体的专业水平等. 比如, 视觉表象主要激活视觉通路, 包括颞叶区域、枕叶区域和楔前叶, 而身体表象主要涉及运动相关结构和顶叶下小叶<sup>[89]</sup>. 因此, 目前虽然对运动表象所涉及的脑区有初步的认识, 但是由于运动表象本身定义和特性的多

变,以及实验参与者的个体差异,运动表象的脑机制研究仍需要进一步深入。此外,目前大部分对运动表象的研究都集中在竞技体育领域,而缺少其体育教学领域的探索。未来研究可以尝试将运动表象作为一种教学手段,探究其对动作技能学习的训练效果,以及教学过程中的脑区变化。

### 3.3 动作观察(action observation)与动作预期(action anticipation)

动作观察是动物与人先天具备的能力,它是以镜像神经元为基础的认知过程。目前,已有ALE元分析对动作观察网络进行了解析,发现涉及多个脑区,包括额下回、前运动皮层、初级感觉运动皮层、辅助运动区、顶下小叶、顶上小叶、中央前回、顶内沟,过渡到视觉区的颞中回后部、颞上沟以及梭状回<sup>[90]</sup>。其中,额下回/前运动皮层,顶下小叶/顶内沟,以及颞中回后部/颞上沟是动作观察网络中最重要的节点。有研究者采用网球运动员和排球运动员互为专家与新手的方式,让他们分别对网球、排球任务中的球的走向进行判断。结果发现,在动作观察网络中的辅助运动区、小脑、顶上小叶均被激活,而且这种激活与特定的专业知识无关<sup>[91]</sup>,这可能是由于他们长期训练后脑的变化在一定程度上的一致性。

动作预期是一种高级的思维过程,指的是从观察到的动作序列中感知和处理视觉信息,并预测其结果。它涉及观察和预测其他个体(如对手)的行为。正确的动作预期对运动员取得成功至关重要,可以让运动员更好地利用先验信息。一项综述指出,运动专家在预期任务中的表现往往优于新手,并且两者在神经生理测量方面存在较大差异<sup>[92]</sup>。例如,脑电图研究显示,专家的额-顶叶-枕部活动更大。动作预期的任务态磁共振研究表明,运动专家有大量的脑区显示出更大的激活,其中前额叶皮层、视觉皮层、辅助运动区和前运动皮层值得重点关注。但研究者也指出,专家和新手在大脑激活方面的差异的一致性是有限的。最近,有更多研究开始关注动作预期,并陆续补充了一些新的神经影像学证据。与新手相比,羽毛球专家动作预期过程中表现出更强的左侧内侧额叶皮层激活,以及与其他脑区(如右侧后扣带皮层)之间更强的功能连接<sup>[93]</sup>。12周的羽毛球训练后,受训者在动作预期任务表现显著提高,前额叶N2振幅和顶叶P3振幅增大<sup>[94]</sup>。有研究还强调了在动作预期过程中,训练经验与动作观察网络节点之间的关系

是非线性的,以及小脑在其中的微妙参与<sup>[95]</sup>。此外,有研究发现,在动作预期任务中,正确预测时,纹状体、丘脑、感觉运动皮层和小脑的激活比错误预测时更高。

尽管目前研究认为,动作观察是动作预期的基础,动作预期过程也会激活动作观察网络相应脑区。然而,也有研究发现小脑可能也参与了这个过程。因此,在动作预期中,各个脑区如何协同工作还有待进一步研究。

### 3.4 运动决策(decision-making in sports)

决策反映了个体在复杂情境中处理信息的能力,是一种高级的认知功能。体育决策往往是基于瞬息万变的情境、承受巨大的身心压力、在几分之一秒内做出的。这种风险性的、高压力的环境会显著影响运动员的决策质量、反应时间和风险倾向<sup>[96]</sup>。因此,相比于一般的决策,体育情境是研究决策行为最天然和最为典型的场景之一。

目前,在竞技体育领域的决策认知神经研究中,最受关注的是专家与新手间的决策认知神经差异。Tenenbaum等人<sup>[97]</sup>把运动决策分为了几个阶段,包括:(1)准备阶段(即视觉搜索、注意选择和预期);(2)决策和反应选择阶段;(3)行为评估阶段,对新出现的信息做出调节。

Smith<sup>[92]</sup>对准备阶段的神经生理学基础进行了综述,在综合了对足球、羽毛球、篮球等运动的研究后发现,有一些证据表明,专家在准备阶段表现出了更大的激活程度,包括前运动皮层(M1)、顶上/顶下小叶、小脑等。然而,各个研究之间的结果仍然存在一些不一致。虽然这些研究尝试还原实际的运动情境,大部分也都基于图片和视频诱发。除了来自脑影像学的研究证据,研究者们也尝试采用眼动技术解释专家与新手在准备阶段的差别。研究表明,专家相比新手有更少的注视点、更长的注视时间,这一现象被称为“静眼(quiet eye)<sup>[98]</sup>”。

在决策阶段,Du等人<sup>[99]</sup>在对长期运动训练影响运动员决策的ALE元分析中发现,专家激活了右侧颞下回(inferior temporal gyrus, ITG)、右侧脑回(sub-gyral)和右侧枕中回(middle occipital gyrus, MOG);新手的脑区激活更多,包括左颞中回(middle temporal gyrus, MTG)、枕中回(MOG)、左后叶(posterior lobe),右侧舌回(lingual gyrus)、左侧缘上回(supramarginal gyrus)、右侧梭状回(fusiform gyrus)、双侧枕下回(inferior occipital gyrus, IOG)。也就是说,相比于新手,专

家在完成决策任务时,有更少的双侧枕叶、左侧小脑后叶和左侧颞中回激活。其中,枕叶是视觉空间信息处理的相关脑区,左侧小脑后叶与运动调节和运动学习有关,左侧颞中回则与运动规划和信息处理等认知功能有关。因此,新手在进行决策任务时,可能需要花费更多的能量在视觉信息处理、运动调节与计划上,这一结果也与之前的研究结果相一致。在行为评估阶段,运动员会不断地对当前的信息进行监测,并评估预期是否符合实际情况,这一行为可能有额叶内侧表面的前扣带皮层(anterior cingulate cortex, ACC)参与。专家通过不断地训练,培养了尽早识别决策错误的的能力,以便在条件需要时用另一种反应代替一种反应(即改变决策)。

虽然竞技体育领域已经积累了一系列决策认知神经研究,但是大部分研究都是在静态的实验环境中完成的,缺少对真实运动场景中的高躯体压力、高心理压力、高强度、丰富的环境信息的模拟,同时,具身决策和传统的认知决策本身也存在差异。因此,未来的研究可以往以下几个方向发展:一个可能的研究方向是电子竞技,相比于传统的竞技体育运动,电子竞技的环境更接近常见的实验环境设置,其竞技特点也与一般的心理学实验范式更相似,具有很大的参考价值<sup>[100]</sup>;另一个可能的研究方向是通过便携式EEG设备,在更贴近现实的情况下进行决策的认知神经基础探索。

### 3.5 神经反馈训练(neurofeedback training, NFT)

越来越多的研究证据表明,个体表现与其的大脑神经电活动之间存在紧密关联。不同的脑电波(如 $\delta$ 、 $\theta$ 和 $\alpha$ 波)与特定的感知、感觉运动或认知过程相关。因此,除了继续探究脑电活动与个体表现的关系,研究者也尝试直接对脑电活动进行干预,以期最大化个体表现,即神经反馈训练。NFT是生物反馈训练的一种,通过实时测量受训者的脑电活动并提供相应的音频/视频反馈信号,帮助受训者对自己的大脑进行更好地自我调节。在竞技体育领域,NFT能够直接反馈与训练运动员的自我调节能力(比如放松和集中注意力的能力),并进而提升运动表现,逐渐被越来越多研究者所关注。在众多脑成像技术中,EEG得益于其较高的时间分辨率和便携性,在运动领域NFT中的应用最广泛,因此,本文将重点介绍基于EEG的NFT技术。

基于EEG的NFT有几种干预方式。最早出现的一种是皮层慢电位(slow cortical potentials, SCP)训练。通过

对皮层及其下区域进行广泛的刺激来进行训练。Landers等人<sup>[101]</sup>最早将这种SCP应用于运动员心理训练领域,采用左右颞半球(T3、T4)的EEG反馈训练,成功提升了精英射箭运动员的表现。另一种训练方式,也是目前最常见的一种,是由研究者在训练前,根据理论或前人研究确定好一个或多个脑电波波形,确定记录该波形的脑区,并根据预期振幅进行相应训练。不同于SCP训练对特定区域皮层的刺激,这种NFT是对特定波形进行的针对性训练。常见的波形有SMR、 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\theta$ 波。其中,SMR和 $\alpha$ 波对运动员运动表现的促进最有效。先前的研究发现,对SMR的NFT训练促进了高尔夫<sup>[102]</sup>、橄榄球传球<sup>[103]</sup>和来复枪<sup>[104]</sup>的运动表现,但也有研究未得到SMR促进射箭表现的结果,而是发现SMR促进了射箭运动员的唤醒水平与愉悦水平<sup>[105]</sup>。对 $\alpha$ 波进行训练的研究发现,训练增进了舞蹈运动员<sup>[106]</sup>的舞蹈表现,也促进了高水平体操运动员的复杂协调活动<sup>[107]</sup>。但这种促进作用并没有体现在Gruzelier等人<sup>[108]</sup>对舞蹈运动员的 $\alpha$ 波训练中。由于不同任务和运动之间的差别都难以用特定的波形进行概括,人类大脑的复杂性也使得波形之间存在个体差异,一些学者提出了更个性化的训练方式。比如,个性化事件锁定的EEG图谱分析(personalized event-locked EEG-Profile),通过评估个体在基线条件下任务执行过程中最佳和最差表现相关的皮层活动,定制相关的神经反馈。Arns等人<sup>[109]</sup>通过首次任务的EEG图谱,找出每名参与者达到最佳的前额叶大脑状态时的波形与振幅,基于此为他们制定了个性化的神经反馈训练方式,并最终成功提升了业余高尔夫球员的高尔夫推杆表现。

竞技体育领域的NFT研究数量增长也催生了相应的综述性研究。总体而言,前人元分析的结果表明,NFT对改变EEG功率有小效应量,并对改善运动员的运动表现有小到中等的效应量<sup>[110,111]</sup>、对改善其反应时和决策亦有小的效应量<sup>[110]</sup>。但NFT目前研究存在几点不足:(1)大部分研究的被试量小;(2)各研究间的训练方式(例如所训练的脑区和波形)差异太大,难以放在一起进行比较;(3)在其他领域的NFT研究中,一些高空间分辨率技术(如fMRI)的研究成果也已经比较丰富,但是并没有被很好地运用到运动领域。

### 3.6 专家-新手差异的理论假说

运动专家相比于新手通常有更好的运动表现,其认知优势的背后机制是运动领域最具有价值的科学问

题。由于在此前的一篇综述中,作者曾以“专家知识系统”为标题,详细论述过专家-新手之间的差异研究,例如,在此前综述中,论述了什么是专家-新手差异,造成差异的可能原因,在哪些项目集中体现了专家-新手差异,获得了哪些一致性的研究发现以及该主题采用的研究手段和测量方法。因此,本文中该主题领域将不在此一一赘述<sup>[4]</sup>。近十年来,关于专家-新手差异形成了一些有影响力的理论假说,本文就这些理论假说进行详细阐述:

神经效率假说(neural efficiency hypothesis, NEH)也被称为心理动作效率假说<sup>[2]</sup>(psychomotor efficiency hypothesis, PEH),是该领域认同度最高的假说。假说认为,专家比新手在神经环路中有更高的效率、更少的能量消耗,因而有更好的运动表现。更高的神经效率体现为:(1)与任务相关区域的激活减少;(2)与无关信息处理相关区域的抑制减少,而专家与新手的区别体现为:(1)在观察判断相同运动视频时,专家的神经激活水平更低;(2)在想象自己完成不同动作时所消耗的神经能量更低<sup>[9]</sup>,因而有更好的运动表现。除了NEH的解释,还有一种解释认为,这种神经效率并非体现在整个大脑中,而只是表现为前额叶(意识与主动思考相关脑区)暂时性的功能减退<sup>[112]</sup>,这种假说也被称为暂时性前额叶功能减少假说(transient hypofrontality hypothesis, THH)。另外,NEH与THH也受到一些研究者的质疑,一些研究结果发现,个体在完成中低难度的任务时,NEH与THH确实能够给出合理的解释,但当任务更复杂、难度更大时,专家似乎投入了更多的皮层资源。也就是说,无论是NEH还是THH都并不适用于所有情况。因此,研究者们进一步提出了神经熟练度假说(neural proficiency hypothesis, NPH)。这种假说认为,对于自动化的、程序性的任务来说,专家表现出更高的神经效率;而对于更复杂的、陈述性的控制任务来说,专家则应该表现出更高的神经熟练度<sup>[113,114]</sup>。对于三个假说之间的关系,Filho等人<sup>[115]</sup>对基于EEG的研究的元分析结果表明,它们在解释最佳运动表现时,可能是协同作用、相互补充的,具体表现为:最佳运动表现既与整个皮层中的 $\alpha$ 和 $\theta$ 波有关,又尤其体现于前额叶的高 $\alpha$ 波和低 $\theta$ 波变化;对于同样的任务来说,专家的大脑相比新手总是更放松。Li和Smith<sup>[116]</sup>进一步对EEG、fMRI和fNIRS的NEH研究进行了综述。他们认为,研究结果在总体上支持了NEH的有效性,但NEH的解释力会受到运动员特

质、运动特征和具体事件与情境的影响,需要具体情况具体分析。

神经扩展假说(neural expansion hypothesis, NExH)与神经效率假说的观点相反,认为专家的神经活动比新手激活更多。基于专家的专业知识,诱发更多脑区的协同参与,最终提升运动表现。Bilalić等人<sup>[117]</sup>采用fMRI探究象棋的专家-新手差异,发现虽然两组的大脑外侧都有激活,但是专家的激活更明显。同时,两组都激活了左侧的颞中后回,但是只有专家组激活了右侧的颞中后回,表现出进一步的熟练物体识别。Kim等人<sup>[118]</sup>采用fMRI分别探究了精英、专家和新手弓箭手的瞄准表现,发现弓箭精英在补充运动区、颞顶区和小脑齿状区表现出活动,而专家们只在额上区表现出活跃,这一发现虽然与NEH不一致,但是与脑皮质的扩展过程一致。目前,NExH和NEH各自的适用范围仍然不明确,未来的研究应该进一步探究与区分,例如任务的复杂程度、任务情境是想象的还是现实的、参与者更具体的经验和水平等。

特异性加工假说(specialized processing hypothesis, SPH)认为,专家通过特定的学习与经验积累,改变了特定的脑区(或脑网络),从而持久地影响任务的执行和处理过程,最终取得更好的成绩<sup>[119]</sup>。比如,耐力运动员大脑白质体积更大、专门处理感觉刺激相关区域的灰质体积更小<sup>[120]</sup>,体育运动经验会影响左背外侧前运动皮层、观看和参与运动会改变辅助理解的神经网络等<sup>[119]</sup>。

内部模型假说(internal models hypothesis, IMH)认为专家通过特定的脑活动模拟相关控制系统的输入(比如视角、距离、重量等)和输出(比如动作、力度、手眼协调等),来获得更好的运动表现<sup>[121]</sup>。比如,Balser等人<sup>[91]</sup>采用fMRI探究了网球和排球专家在预测发球方向时的脑区活动,发现相比于新手,专家的动作-观察网络(特别是小脑)结构的激活更强,说明专家采用了预测性内部模型来解决预期任务。

## 4 未来展望

### 4.1 未来应考虑非线性和复杂网络分析方法在运动认知神经科学领域的应用和发展

人类大脑由数千亿个神经元和数以万计的突触组成,神经元之间的连接方式和效率不断变化,形成复杂的大脑神经网络,共同构成人类心理和行为活动的物

质基础,并且不断受到学习和经验的影响.这种复杂性的非线性动力系统使得神经科学研究开始尝试构建大脑的连接图谱,旨在更进一步理解大脑在更微观的层面是如何去工作的,在不同尺度上又是如何发生连接.目前,随着静息态成像所发现的大脑神经生物学意义逐渐清晰,从大尺度脑网络的角度去探索活动脑的功能已经成为推动神经科学发展的重要动力和突破口.在磁共振成像技术发展的早期阶段,基于任务的激活区检测占据着“认知神经心理学”的科学主流,由此人们对各个脑区的认知功能的研究获得了多个共识.然而,人脑是非常复杂的动力系统,其对外界环境变化的响应是作为一个整体来工作的,比如,一个简单的视觉刺激会诱发散布于整个大脑皮层有规律的神经活动,这意味着整个皮层都对最简单的感觉刺激做出反应<sup>[122]</sup>.从静息态脑网络角度对人脑功能进行研究,成为目前最具挑战性的研究领域.

因此,运动认知神经科学领域所要解决的科学问题,应建立在复杂系统科学的研究框架下,认识到运动行为对大脑产生的影响可能存在各种“涌现现象”,寻找复杂现象之间的“遥远的相似性”和普适性规律,充分考虑运动行为的多样性以及大脑所具有的复杂性,提出能够解决瓶颈问题的科学假设.比如,从时间序列的某些特征量判断运动对大脑功能活动的影响,通过关联维度、Lyapunov指数、Kolmogorov熵、LZ复杂度,确定这种影响的大小和程度;引入复杂网络理论的拓扑特及动力学特征来反映运动所带来的大脑组织形态学和功能活动变化,更多地借助于网络拓扑结构的度量指标,如节点度、聚类系数、最短路径长度、全局效率、局部效率、小世界属性等进行中观尺度的刻画.通过这些非线性特征和网络属性的计算和分析,研究者才能更好地揭示大脑中不同区域之间的复杂动力特征,为进一步研究运动影响大脑的工作原理提供理论基础<sup>[123]</sup>.

## 4.2 学科发展应逐步走向开放科学

近10年,多学科出现的可重复性危机给全球研究者带来新的思考:在多数小样本研究结果未能被成功重复的科学危机下,如何帮助研究者寻找一条可突围的道路,让科学研究发现更接近于科学问题的真实答案.心理科学和神经科学研究者开始尝试开放科学的解决道路.开放科学是科学的本质属性之一,开放科学的理念也在近十年的科学发展中得到学界研究者的

普遍认同.2021年11月,联合国教科文组织颁布了《开放科学建议书》.次月,我国开始修订《中华人民共和国科学技术进步法》,明确将推进开放科学作为发展目标.2023年,由中国心理学会出版工作委员会牵头多家核心心理学期刊杂志,提出了《心理学开放科学苏州倡议》.这些倡议包括:(1)提倡心理学研究者在研究实践中秉持开放科学理念,实现科学研究全流程的公开透明;(2)支持论文在期刊正式发表前以预印本形式公开交流;(3)倡导在研究开始前进行预注册,以增加研究透明度;(4)在不违反国家数据相关法律法规的情况下,强烈建议论文发表的同时,在符合“可发现”“可访问”“可互操作”“可重用”原则的科学数据平台公开论文关联数据;(5)积极鼓励将可复现研究过程的关键要素,如测量工具、实验材料、数据编码、观察记录和程序代码等以论文附件或其他关联形式完全公开.

在多个前沿科学的引导下,运动认知神经科学在未来的发展应尽快采用开放科学的态度,建立全流程的运动认知神经科学开放科学平台.具体的举措可以考虑:(1)建立运动认知神经科学开放科学门户,其中包括建立可持续发展大数据平台,在多学科领域的期刊杂志搭建科技论文和科技信息高端交流平台,共享国内多家单位的大型科学仪器及大科学装置平台等;(2)利用心理学、临床医学、神经科学领域的预注册平台,减少学术研究出现的出版偏倚等问题,保护被试,提高科研的透明度;(3)创建运动认知神经科学领域独特的实验标准工具箱,利用脑影像领域的开放分析工具箱,提供整合性的方法学解决方案,一键式选择标准化的研究工具,快捷处理脑成像数据,并实现多中心大数据协作;(4)构建运动认知神经科学领域的科学数据银行和科学数据中心,实现多中心的数据共享,提供共享环境,促进运动认知神经科学数据的可发现、可访问、可操作和可重复利用性,提升研究成果的价值和影响力;(5)充分应用心理学和脑科学领域的预印本平台,公开发表预印本论文,推动科研成果的快速开放获取和广泛交流;(6)提供开放式教育资源,包括领域内的教学慕课和开放社群,创建心理学科普平台.总之,开放科学应该帮助该领域的研究者从科学选题、研究设计、数据收集、数据分析、论文撰写和投稿的不同环节,提供一种全新的开放科学的科研流程,加速科研成果的发表,促进不同中心同行之间的科学协作,推进关键科学问题的解决.

### 4.3 开展基于“个体差异”的脑机制研究

近期,脑科学领域开启了人脑结构和功能生长发育图表的探索之路,旨在揭示人脑毕生发展规律和个体分化特征提供规范化参照<sup>[124]</sup>。由此,研究者提出了规范化建模的统计模型方法,对个体在群体中所处的相对位置和偏离程度进行统计推断建模,实现对群体一般规律的刻画及个体分化特征的“显微”观察<sup>[125]</sup>。这一发展趋势集中体现了个体差异在认知神经科学领域研究的重要性。值得关注的是,“中国学龄儿童脑智发育队列研究”作为中国脑计划的重要组成部分,也将个体差异问题提到了突出的位置,其中一项重要研究内容则涉及建立脑智发育中关于注意困难、中文阅读困难、数学学习困难、抑郁及焦虑问题的分型系统,针对不同年龄儿童需要建立这些不同心理问题的分型标准。这些基于正常个体和异常个体的研究均以个体差异为研究内容,力图将这种现象产生的研究发现应用到教育、临床、人类智慧生活等各个领域。

此外,与运动认知神经科学密切相关的一些临近学科一直高度重视个体差异研究。比如,在体育科学中,运动能力是一个显而易见的典型个体差异现象,在这个基础上产生的体质和体能水平的差异、技能水平的差异、人体解剖的差异已在运动生理学、生物力学、运动医学等领域得到充分的重视。除此之外,个体在认知发展速度、空间导航、认知能力、情绪易感性、亲社会行为也表现出一定的差异性<sup>[126]</sup>。研究者认为,这些心理现象差异性的来源一部分是遗传因素的影响,另一部分归因于外界环境或者学习经验的塑造。更重要的是,当代的临床医学开始从关注疾病推进到关注个体(即使同一种病的不同个体,也应该考虑给予不同的治疗方案),精准医学的概念已深入人心。他们倡导对患者进行全局性的综合判断,其中包括获取个体的微观层次(基因组、转录组、蛋白质组、代谢组)、个体的宏观层次(分子影像、行为方式、电子健康档案等)、个体的外部层次(肠道菌群、物理环境、社会条件等)方面的信息,构建基于该个体的“疾病知识网络”,用于支持精确诊断和个体化治疗<sup>[127]</sup>。

运动认知神经科学在前十年的萌芽发展阶段,均以揭示运动情境或运动行为对人类心理现象产生影响的脑机制规律为研究重点,研究者无论是采用横断面研究设计,还是追踪研究,其研究的科学问题还是在于解决大脑活动的一般性规律。然而,在大脑的毕生发展

过程中,人类脑智发生复杂的动态变化,个体的发展会呈现一定特异性。比如,不同性别的个体同样锻炼30 min,运动后所获得的情绪效应在行为学表现上明显不同,大脑的相关脑区也呈现不同的发展模式特点。同样,年轻人与老年人学习运动技能也呈现出学习速度的不同快慢趋势,在这些运动任务对应的大脑表征区域也呈现有差异的脑功能活动特点。这些由于个体差异所呈现的不一致研究是目前运动认知神经科学研究出现的一个值得关注的现状。该领域目前所出现因性别、年龄等因素造成的研究结果的不一致正是个体多样性的体现。这些多样性的结果应该成为今后应用研究开展精准干预的有力科学证据。特别是在将研究发现应用于神经系统疾病和精神疾病的康复中,针对不同个体如何采用一种接近精准化的运动干预方案,用于临床核心症状的治疗,应当成为未来应用研究所要关注的核心科学问题。此外,将神经科学成果应用到体育教育的过程中,也需要充分考虑儿童青少年的发展因素在其中所起的作用。为了最大程度优化体育教学对学生学习效果的影响,除了需要考察对象在个人能力、学习经验、性格特征、特质特征上的不同外,还需要结合大脑发育的差异性特点进行有针对性的体育课程设计和课程教学,扩大学生在体育教育中的身心健康获益。

在设计实验时,应考虑个体因素和剂量效应的交互作用。运动类型、方式和剂量会影响情绪,而运动强度、频次和持续时间等剂量效应相关的变量也会的大脑结构和功能产生显著影响。此外,特殊个体的运动干预可能需要特定的处方和有针对性的实验设计。在无需考察个体差异的研究中,应通过各种方法保证组间同质性。但需注意,个体差异会增大组内异质性,减弱群组效应。因此,可以考虑在保证样本量的同时增加亚组分析<sup>[74]</sup>。

### 4.4 身体是解释心理与大脑作用的未来突破口

广义上的具身认知定义将其思想广泛地渗透到心理学研究的各个研究主题。在今后运动认知神经科学的研究中,需要特别关注镜像神经元在运动技能学习中所起的作用。镜像神经元于20世纪90年代在灵长类动物中被发现,指的是一类在大脑中专门负责解码他人意图和动作的神经元,主要分布在额叶、顶叶和颞叶等区域。这类神经元对人类认知、模仿学习和共情等方面具有极为重要的意义<sup>[128]</sup>。在运动领域,多个证

据表明,镜像神经元参与了与动作观察、与动作有关的意图推理以及动作执行过程的模仿。在运动认知神经科学领域,动作技能学习的磁共振成像研究一致性发现,涉及球类动作的观察和动作预期任务中,包括镜像神经在内的动作观察网络被激活,如辅助运动区、顶上小叶、小脑等。这些脑成像研究不仅直接证明了镜像神经网络参与动作过程的重要性,更是直接为具身认知的合理性提供了有力的科学证据。

近期,神经科学领域和临床领域研究者开始对内感受以及在临床中的价值开展一系列的研究,认为内感受是多个临床疾病发生的核心病理学机制。大多数研究者将内感受定义为个体对自身内脏信号的感知、觉察和整合<sup>[129]</sup>。与运动有关的内感受主要包括对肌肉、心率、呼吸频率、力度和疲劳等方面变化的感知。比如,在运动过程中,大脑整合来自多个生理系统的信息,形成对运动强度的主观评价,进而直接影响了个体对任务完成的预期性调整,以确保任务以最佳的方式完成,同时保证运动的安全性。这些调整对预防潜在的生理风险(如肌肉疲劳和高体温)起着至关重要的作用<sup>[130]</sup>。因此,内感受不仅为个体提供了独特的主观体验,同时也被认为直接影响着运动表现的效果,如,运动知觉、运动预期、运动决策和自我调节等心理过程。另一方面,内感受也是一座联系身体、心理与大脑的桥梁,强调了身体在所有这些与运动有关的心理过程中的作用。国内有研究者近期关注了运动表现与内感受的关系,构建了一个发生机制的理论框架,阐述了运动情境下的身体,如何在外界环境发生改变的情况下,通过与大脑和心理的整合,持续保持相对的内稳态的过程<sup>[131]</sup>。此外,该综述也回顾了运动专家的相关研究,提出了这些运动专家群体是如何调整内感受信号,从而获得最佳的运动表现运动的。综上,内感受这一主题领域的重新兴起集中反映了具身认知理论的核心论点。运动认知神经科学的领域应有别于普通的认知科学领域,研究者需要试图结合身体或运动行为本身,从更独特的具身认知的视角看待人类从事运动行为所带来的独特心理效应。

#### 4.5 人工智能开创身心脑一体化研究的新时代

近年来,机器学习、深度学习等人工智能和大数据挖掘技术逐渐应用到心理学领域、康复领域与临床医学领域,带来了方法学的深刻变革。在此影响下,运动认知神经科学领域的部分研究在实验设计、数

据采集与挖掘以及应用产品开发等方面也逐渐开始采用人工智能辅助技术进行系统研究和创新。比如,近年来,研究者采用传统机器学习模型和深度学习模型,以及近几年仿真生物信号开发出的第三代神经网络模型-脉冲神经网络在运动表象和脑机接口(MI-BCI)技术进行了应用,发现该技术虽然在个体适应性、项目共通性以及识别速度上具有一定局限性,但在运动表现提高以及运动损伤患者、中风偏瘫患者、精神心理疾病患者康复护理等医疗领域具有显著的优势<sup>[132]</sup>。

这些成功的应用案例提示,在运动认知神经科学领域,采用脑电技术结合机器学习的研究方法,有助于提高科学问题的探索深度,更好理解大脑与体育行为之间的关系,从而为体育实践活动提供有效的信息。再比如,眼动技术通过对眼动轨迹的记录,从中提取诸如注视点、注视时间和次数、眼跳距离和瞳孔大小等数据,从而反映个体内在认知过程等一种技术,在阅读、视觉搜索、面孔加工等研究领域应用广泛。研究者可利用深度学习技术的长期短期记忆网络模型对时间序列的眼动注视数据进行分类,能够在一定程度上对特殊人群(如运动专家)进行具有预测度的甄别和分型,这些研究为预测和促进运动表现提供了极大的便利和客观标准。

此外,穿戴式设备(wearable computer)综合运用了各类识别技术、传感技术、数据连接以及数据处理的云计算技术等,实现对佩戴者的相关信息数据进行采集。因其可移动和具有较高的便携性已逐渐融入当今的社会生活。在体育科研领域,常用的穿戴式设备主要包括全球卫星定位技术、加速度计、陀螺仪、心率传感器、温度传感器等。这些技术通过对身体各项指标进行监测,记录运动轨迹、运动时间以及运动负荷等,从而实现了对运动行为的监控和预测。这些穿戴式技术可直接反映个体的身体活动水平。在某些人群(如儿童青少年、老年人、疾病人群)中探索体育运动与大脑之间的关系提供了基于大数据的关联可能。运动智能辅助训练机器人是运动领域人工智能等新兴热点。这一技术可以通过开发主被动多模式人机匹配系统,用于多种临床疾病等运动干预和运动康复。在孤独症、注意缺损与多动障碍症、阿尔茨海默病等神经系统疾病的治疗中,模拟、创设包括虚拟现实(virtual reality, VR)在内的多种情境,帮助患者通过运动技能学习获得大脑损伤部位的康复和治疗。



## 参考文献

- 1 Matta Mello Portugal E, Cevada T, Sobral Monteiro-Junior R, et al. Neuroscience of exercise: From neurobiology mechanisms to mental health. *Neuropsychobiology*, 2013, 68: 1–14
- 2 Wei C, Rong Y, Zhang J. Embodied cognition in psychology: A dialog among brain, body and mind (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021 [陈巍, 殷融, 张静. 具身认知心理学: 大脑、身体与心灵的对话. 北京: 科学出版社, 2021]
- 3 Ye H S. The meaning of the body: The epistemological value of sports from the perspective of phenomenology (in Chinese). *China Sport Sci*, 2021, 41: 83–88 [叶浩生. 身体的意义: 从现象学的视角看体育运动的认识论价值. 体育科学, 2021, 41: 83–88]
- 4 Wei G X, Li Y F. A new approach in sports psychology: Neurosciences in cognitive sports psychology (in Chinese). *China Sport Sci*, 2012, 32: 54–63 [魏高峡, 李佑发. 21世纪中国运动心理学的新方向: 运动认知神经科学研究. 体育科学, 2012, 32: 54–63]
- 5 Elyamany O, Leicht G, Herrmann C S, et al. Transcranial alternating current stimulation (tACS): From basic mechanisms towards first applications in psychiatry. *Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci*, 2021, 271: 135–156
- 6 Li Z J, Zhang L B, Chen Y X, et al. Advancements and challenges in neuromodulation technology: Interdisciplinary opportunities and collaborative endeavors. *Sci Bull*, 2023, 68: 1978–1982
- 7 Potok W, van der Groen O, Bächinger M, et al. Transcranial Random noise stimulation modulates neural processing of sensory and motor circuits, from potential cellular mechanisms to behavior: A scoping review. *eNeuro*, 2022, 9: ENEURO.0248-21.2021
- 8 Estévez-López F, Dall'Aglio L, Rodríguez-Ayllon M, et al. Levels of physical activity at age 10 years and brain morphology changes from ages 10 to 14 years. *JAMA Netw Open*, 2023, 6: e2333157
- 9 Rodríguez-Ayllon M, Derks I P M, van den Dries M A, et al. Associations of physical activity and screen time with white matter microstructure in children from the general population. *Neuroimage*, 2020, 205: 116258
- 10 Brooks S J, Parks S M, Stamoulis C. Widespread positive direct and indirect effects of regular physical activity on the developing functional connectome in early adolescence. *Cerebr Cortex*, 2021, 31: 4840–4852
- 11 Zhang S. Physical activity and brain development in children and adolescents: A preliminary study (in Chinese). Master Thesis. Beijing: Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, 2020 [张澍. 儿童青少年体育活动与大脑发育关联的探索性研究. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院心理研究所, 2020]
- 12 Park D C, Reuter-Lorenz P. The adaptive brain: Aging and neurocognitive scaffolding. *Annu Rev Psychol*, 2009, 60: 173–196
- 13 Hernández D, Heinilä E, Muotka J, et al. Physical activity and aerobic fitness show different associations with brain processes underlying anticipatory selective visuospatial attention in adolescents. *Brain Res*, 2021, 1761: 147392
- 14 Chang Y K, Pesce C, Chiang Y T, et al. Antecedent acute cycling exercise affects attention control: An ERP study using attention network test. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9: 156
- 15 Chaddock-Heyman L, Erickson K I, Voss M W, et al. The effects of physical activity on functional MRI activation associated with cognitive control in children: A randomized controlled intervention. *Front Hum Neurosci*, 2013, 7: 72
- 16 Huang C W, Huang C J, Hung C L, et al. Physical fitness and resting EEG in children with attention deficit hyperactivity disorder. *J Psychophysiol*, 2015, 29: 26–32
- 17 Huang C J, Huang C W, Hung C L, et al. Effects of acute exercise on resting EEG in children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Child Psychiatry Hum Dev*, 2018, 49: 993–1002
- 18 Smith S D, Crowley M J, Ferrey A, et al. Effects of Integrated brain, body, and social (IBBS) intervention on ERP measures of attentional control in children with ADHD. *Psychiatry Res*, 2019, 278: 248–257
- 19 Huang C J, Huang C W, Tsai Y J, et al. A preliminary examination of aerobic exercise effects on resting EEG in children with ADHD. *J Atten Disord*, 2017, 21: 898–903
- 20 Ge Y, Ding J, Jiang K. Effect of aerobic exercise on the amplitude of low-frequency fluctuation of executive function in children with attention deficit hyperactivity disorder. *Chin Child Health Care*, 2022, 30: 1287–1290, 1303
- 21 Di Muccio F, Ruggeri P, Brandner C, et al. Electrocortical correlates of the association between cardiorespiratory fitness and sustained attention in young adults. *Neuropsychologia*, 2022, 172: 108271
- 22 Di Muccio F, Simonet M, Brandner C, et al. Cardiorespiratory fitness modulates prestimulus EEG microstates during a sustained attention task. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1188695
- 23 Wei G X, Dong H M, Yang Z, et al. Tai Chi Chuan optimizes the functional organization of the intrinsic human brain architecture in older adults. *Front Aging Neurosci*, 2014, 6: 74
- 24 Chen R, Wang S, Fan Y, et al. Acute Tai Chi Chuan exercise enhances sustained attention and elicits increased cuneus/precuneus activation in

- young adults. *Cerebr Cortex*, 2023, 33: 2969–2981
- 25 Radel R, Tempest G D, Brisswalter J. The long and winding road: Effects of exercise intensity and type upon sustained attention. *Physiol Behav*, 2018, 195: 82–89
- 26 Chaddock-Heyman L, Hillman C H, Cohen N J, et al. III. The importance of physical activity and aerobic fitness for cognitive control and memory in children. *Monogr Soc Res Child*, 2014, 79: 25–50
- 27 Herting M M, Nagel B J. Differences in brain activity during a verbal associative memory encoding task in high- and low-fit adolescents. *J Cogn Neurosci*, 2013, 25: 595–612
- 28 Jin X H, Ding Y X, Zhou C L. Exercise promotes brain health: Evidence from behavioral and brain sciences (in Chinese). *Sci Tech Rev*, 2022, 40: 39–48 [金鑫虹, 丁宇翔, 周成林. 运动促进大脑健康: 来自行为和脑科学的证据. *科技导报*, 2022, 40: 39–48]
- 29 Slutsky-Ganesh A B, Etnier J L, Labban J D. Acute exercise, memory, and neural activation in young adults. *Int J Psychophysiol*, 2020, 158: 299–309
- 30 Chen A G, Zhu L N, Yan J, et al. Neural basis of working memory enhancement after acute aerobic exercise: fMRI study of preadolescent children. *Front Psychol*, 2016, 7: 1804
- 31 Li K, Dong G, Gao Q. Martial arts enhances working memory and attention in school-aged children: A functional near-infrared spectroscopy study. *J Exp Child Psychol*, 2023, 235: 105725
- 32 Kamijo K, Pontifex M B, O’Leary K C, et al. The effects of an afterschool physical activity program on working memory in preadolescent children. *Dev Sci*, 2011, 14: 1046–1058
- 33 Erickson K I, Voss M W, Prakash R S, et al. Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 3017–3022
- 34 Yue C, Yu Q, Zhang Y, et al. Regular Tai Chi practice is associated with improved memory as well as structural and functional alterations of the hippocampus in the elderly. *Front Aging Neurosci*, 2020, 12: 586770
- 35 Tao J, Liu J, Egorova N, et al. Increased hippocampus-medial prefrontal cortex resting-state functional connectivity and memory function after Tai Chi Chuan practice in elder adults. *Front Aging Neurosci*, 2016, 8: 25
- 36 Wang C, Dai Y, Yang Y, et al. Effects of Tai Chi on working memory in older adults: Evidence from combined fNIRS and ERP. *Front Aging Neurosci*, 2023, 15: 1206891
- 37 Yu Q, Herold F, Ludyga S, et al. Neurobehavioral mechanisms underlying the effects of physical exercise break on episodic memory during prolonged sitting. *Complement Ther Clin Pract*, 2022, 48: 101553
- 38 Ruscheweyh R, Willemer C, Krüger K, et al. Physical activity and memory functions: An interventional study. *Neurobiol Aging*, 2011, 32: 1304–1319
- 39 Eyre H A, Acevedo B, Yang H, et al. Changes in neural connectivity and memory following a yoga intervention for older adults: A pilot study. *J Alzheimer Dis*, 2016, 52: 673–684
- 40 Huang X Y. The benefits of long-term exercise on working memory in older adults and its mechanism of gray matter structure (in Chinese). Master Dissertation. Shanghai: Shanghai University of Sport, 2023 [黄芯怡. 长期运动对老年人工作记忆的影响及灰质结构机制. 硕士学位论文. 上海: 上海体育学院, 2023]
- 41 Wu J, Xiao W, Yip J, et al. Effects of exercise on neural changes in inhibitory Control: An ALE meta-analysis of fMRI studies. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16: 891095
- 42 Kao S C, Baumgartner N, Noh K, et al. Acute effects of intense interval versus aerobic exercise on children’s behavioral and neuroelectric measures of inhibitory control. *J Sci Med Sport*, 2023, 26: 316–321
- 43 Ciria L F, Perakakis P, Luque-Casado A, et al. Physical exercise increases overall brain oscillatory activity but does not influence inhibitory control in young adults. *Neuroimage*, 2018, 181: 203–210
- 44 Lennox K, Miller R K, Martin F H. Habitual exercise affects inhibitory processing in young and middle age men and women. *Int J Psychophysiol*, 2019, 146: 73–84
- 45 Fujihara H, Megumi A, Yasumura A. The acute effect of moderate-intensity exercise on inhibitory control and activation of prefrontal cortex in younger and older adults. *Exp Brain Res*, 2021, 239: 1765–1778
- 46 Mücke M, Ludyga S, Colledge F, et al. Association of exercise with inhibitory control and prefrontal brain activity under acute psychosocial stress. *Brain Sci*, 2020, 10: 439
- 47 Ishihara T, Miyazaki A, Tanaka H, et al. Childhood exercise predicts response inhibition in later life via changes in brain connectivity and structure. *Neuroimage*, 2021, 237: 118196
- 48 Li D. Meta-analysis of the influence of exercise intervention based on medical images on the inhibitory control function of adolescents. *Netw Model Anal Health Inform Bioinform*, 2021, 10: 54

- 49 Zhu H, Zhu L, Xiong X, et al. Influence of aerobic fitness on white matter integrity and inhibitory control in early adulthood: A 9-week exercise intervention. *Brain Sci*, 2021, 11: 1080
- 50 Shen Q Q, Yin H C, Cui L, et al. The potential advantages of Tai Chi Chuan in promoting inhibitory control and spontaneous neural activity in young adults. *Front Behav Neurosci*, 2021, 15: 747733
- 51 Chen C Y, Muggleton N G. Electrophysiological investigation of the effects of Tai Chi on inhibitory control in older individuals. In: Parkin B L, ed. *Real-World Applications in Cognitive Neuroscience*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2020. 229–242
- 52 Yang Y, Chen T, Shao M, et al. Effects of Tai Chi Chuan on inhibitory control in elderly women: An fNIRS study. *Front Hum Neurosci*, 2020, 13: 476
- 53 Levin O, Netz Y, Ziv G. Behavioral and neurophysiological aspects of inhibition—The effects of acute cardiovascular exercise. *J Clin Med*, 2021, 10: 282
- 54 Schneider M, Graham D, Grant A, et al. Regional brain activation and affective response to physical activity among healthy adolescents. *Biol Psychol*, 2009, 82: 246–252
- 55 Tymofiyeva O, Henje E, Yuan J P, et al. Reduced anxiety and changes in amygdala network properties in adolescents with training for awareness, resilience, and action (TARA). *Neuroimage Clin*, 2021, 29: 102521
- 56 Ge L K, Hu Z, Wang W, et al. Aerobic exercise decreases negative affect by modulating orbitofrontal-amygdala connectivity in adolescents. *Life*, 2021, 11: 577
- 57 Yao Y, Ge L, Yu Q, et al. The effect of Tai Chi Chuan on emotional health: Potential mechanisms and prefrontal cortex hypothesis. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2021, 2021: 5549006
- 58 Petruzzello S J, Hall E E, Ekkekakis P. Regional brain activation as a biological marker of affective responsivity to acute exercise: Influence of fitness. *Psychophysiology*, 2001, 38: 99–106
- 59 Fumoto M, Oshima T, Kamiya K, et al. Ventral prefrontal cortex and serotonergic system activation during pedaling exercise induces negative mood improvement and increased alpha band in EEG. *Behav Brain Res*, 2010, 213: 1–9
- 60 Ligeza T S, Nowak I, Maciejczyk M, et al. Acute aerobic exercise enhances cortical connectivity between structures involved in shaping mood and improves self-reported mood: An EEG effective-connectivity study in young male adults. *Int J Psychophysiol*, 2021, 162: 22–33
- 61 Chen Y C, Chen C, Martínez R M, et al. Habitual physical activity mediates the acute exercise-induced modulation of anxiety-related amygdala functional connectivity. *Sci Rep*, 2019, 9: 19787
- 62 Ohmatsu S, Nakano H, Tominaga T, et al. Activation of the serotonergic system by pedaling exercise changes anterior cingulate cortex activity and improves negative emotion. *Behav Brain Res*, 2014, 270: 112–117
- 63 Wadden K P, Snow N J, Sande P, et al. Yoga practitioners uniquely activate the superior parietal lobule and supramarginal gyrus during emotion regulation. *Front Integr Neurosci*, 2018, 12: 60
- 64 Schmitt A, Upadhyay N, Martin J A, et al. Affective modulation after high-intensity exercise is associated with prolonged amygdalar-insular functional connectivity increase. *Neural Plast*, 2020, 2020: 7905387
- 65 Huang Y, Wang Y, Wang H, et al. Prevalence of mental disorders in China: A cross-sectional epidemiological study. *Lancet Psychiatry*, 2019, 6: 211–224
- 66 Wang G P, Wang W C, Sakuma H R. The changes of brain wave characteristics and state-trait anxiety of different state-trait anxiety sufferers before and after doing Taijiquan exercise (in Chinese). *J Physical Edu*, 2006, 13: 43–47 [王国谱, 王文超, 佐久间春夫. 不同状态性焦虑者参加太极拳运动前后脑波特征及状态性焦虑的变化. *体育学刊*, 2006, 13: 43–47]
- 67 Duan Y. Emotion regulation by acute aerobic exercise in high trait anxious individuals—A study based on prefrontal asymmetry (in Chinese). Master Dissertation. Chongqing: Southwest University, 2022 [段意. 急性有氧运动对高特质焦虑者的情绪调节. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学, 2022]
- 68 McDowell C P, Newman L, Monroe D C, et al. The association between generalized anxiety disorder and resting-state prefrontal cortex oxygenation is modified by self-reported physical activity: Results from the Irish longitudinal study on ageing. *J Gerontol Ser A Biol Sci Med Sci*, 2021, 76: 1391–1397
- 69 Lu J, Xu X, Huang Y, et al. Prevalence of depressive disorders and treatment in China: A cross-sectional epidemiological study. *Lancet Psychiatry*, 2021, 8: 981–990
- 70 Zhao J L, Jiang W T, Wang X, et al. Exercise, brain plasticity, and depression. *CNS Neurosci Therapeut*, 2020, 26: 885–895
- 71 Gujral S, Aizenstein H, Reynolds Iii C F, et al. Exercise effects on depression: Possible neural mechanisms. *Gen Hosp Psychiatry*, 2017, 49: 2–10
- 72 Huang L, Huang G, Ding Q, et al. Amplitude of low-frequency fluctuation (ALFF) alterations in adults with subthreshold depression after physical exercise: A resting-state fMRI study. *J Affective Disord*, 2021, 295: 1057–1065
- 73 Wu J, Song J, He Y, et al. Effect of Tai Chi on young adults with subthreshold depression via a stress–reward complex: A randomized controlled

- trial. *Sports Med-Open*, 2023, 9: 90
- 74 Ge L K, Shen H R, Hu Z E, et al. Individual differences in exercise behavior promoting emotional health: A cognitive neuroscience perspective. *Chin J Sports Med*, 2023, 42: 836–846 [盖力锟, 沈浩冉, 胡卓尔, 等. 锻炼行为影响情绪的个体差异: 基于认知神经科学视角. *中国运动医学杂志*, 2023, 42: 836–846]
- 75 Spampinato D, Celnik P. Multiple motor learning processes in humans: Defining their neurophysiological bases. *Neuroscientist*, 2021, 27: 246–267
- 76 Diedrichsen J, Hashambhoy Y, Rane T, et al. Neural correlates of reach errors. *J Neurosci*, 2005, 25: 9919–9931
- 77 Celnik P. Understanding and modulating motor learning with cerebellar stimulation. *Cerebellum*, 2015, 14: 171–174
- 78 Yang Y, Lisberger S G. Role of plasticity at different sites across the time course of cerebellar motor learning. *J Neurosci*, 2014, 34: 7077–7090
- 79 Hosp J A, Luft A R. Dopaminergic meso-cortical projections to M1: Role in motor learning and motor cortex plasticity. *Front Neurol*, 2013, 4: 145
- 80 Dayan E, Cohen L G. Neuroplasticity subserving motor skill learning. *Neuron*, 2011, 72: 443–454
- 81 Koyama S, Tanaka S, Tanabe S, et al. Dual-hemisphere transcranial direct current stimulation over primary motor cortex enhances consolidation of a ballistic thumb movement. *Neurosci Lett*, 2015, 588: 49–53
- 82 Taylor J A, Krakauer J W, Ivry R B. Explicit and implicit contributions to learning in a sensorimotor adaptation task. *J Neurosci*, 2014, 34: 3023–3032
- 83 Simonsmeier B A, Andronie M, Buecker S, et al. The effects of imagery interventions in sports: A meta-analysis. *Int Rev Sport Exerc Psychol*, 2021, 14: 186–207
- 84 Toth A J, McNeill E, Hayes K, et al. Does mental practice still enhance performance? A 24 Year follow-up and meta-analytic replication and extension. *Psychol Sport Exerc*, 2020, 48: 101672
- 85 Guillot A, Rienzo F D, Frank C, et al. From simulation to motor execution: A review of the impact of dynamic motor imagery on performance. *Int Rev Sport Exerc Psychol*, 2021, 0: 1–20
- 86 Filgueiras A, Quintas Conde E F, Hall C R. The neural basis of kinesthetic and visual imagery in sports: An ALE meta-analysis. *Brain Imag Behav*, 2018, 12: 1513–1523
- 87 Hardwick R M, Caspers S, Eickhoff S B, et al. Neural correlates of action: Comparing meta-analyses of imagery, observation, and execution. *Neurosci Biobehav Rev*, 2018, 94: 31–44
- 88 Jackson P L, Lafleur M F, Malouin F, et al. Functional cerebral reorganization following motor sequence learning through mental practice with motor imagery. *Neuroimage*, 2003, 20: 1171–1180
- 89 Guillot A. Neurophysiological foundations and practical applications of motor imagery. In: Abraham A, ed. *The Cambridge Handbook of the Imagination*. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. 207–226
- 90 Caspers S, Zilles K, Laird A R, et al. ALE meta-analysis of action observation and imitation in the human brain. *Neuroimage*, 2010, 50: 1148–1167
- 91 Balsler N, Lorey B, Pilgramm S, et al. The influence of expertise on brain activation of the action observation network during anticipation of tennis and volleyball serves. *Front Hum Neurosci*, 2014, 8: 568
- 92 Smith D M. Neurophysiology of action anticipation in athletes: A systematic review. *Neurosci Biobehav Rev*, 2016, 60: 115–120
- 93 Xu H, Wang P, Ye Z, et al. The role of medial frontal cortex in action anticipation in professional badminton players. *Front Psychol*, 2016, 7: 1817
- 94 Liu T, Shao M, Yin D, et al. The effect of badminton training on the ability of same-domain action anticipation for adult novices: Evidence from behavior and ERPs. *Neurosci Lett*, 2017, 660: 6–11
- 95 Chen Y H, Chang C Y, Huang S K, et al. Nonlinear engagement of action observation network underlying action anticipation in players with different levels of expertise. *Hum Brain Mapp*, 2020, 41: 5199–5214
- 96 Parkin B L. A behavioral and brain science perspective on decision making in sport. Degree Thesis. London: University College London, 2017
- 97 Tenenbaum G, Filho E. Decision-making in sports: A cognitive and neural basis perspective. In: Yoo S, Ryu S, Kim S, et al., eds. *Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2017
- 98 Lebeau J C, Liu S, Sáenz-Moncaleano C, et al. Quiet eye and performance in sport: A meta-analysis. *J Sport Exerc Psychol*, 2016, 38: 441–457
- 99 Du Y, He L, Wang Y, et al. The neural mechanism of long-term motor training affecting athletes' decision-making function: An activation likelihood estimation meta-analysis. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16: 854692
- 100 Campbell M J, Toth A J, Moran A P, et al. Chapter 10-eSports: A new window on neurocognitive expertise? In: Marcora S, Sarkar M, eds. *Progress in Brain Research*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018. 161–174
- 101 Landers D M, Petruzzello S J, Salazar W, et al. The influence of electrocortical biofeedback on performance in pre-elite archers. *Med Sci Sports Exerc*, 1991, 23: 123–129

- 102 Cheng M Y, Huang C J, Chang Y K, et al. Sensorimotor rhythm neurofeedback enhances golf putting performance. *J Sport Exerc Psychol*, 2015, 37: 626–636
- 103 Salimnejad Z, Zandi H, Arsham S. Effect of bio-neural feedback exercises on the performance of female rugby players. *IJMCL*, 2019, 1: 10–18
- 104 Rostami R, Sadeghi H, Karami K A, et al. The effects of neurofeedback on the improvement of rifle shooters' performance. *J Neurother*, 2012, 16: 264–269
- 105 Paul M, Ganesan S, Sandhu J S. Effect of sensory motor rhythm neurofeedback on psycho-physiological, electro-encephalographic measures and performance of archery players. *Ibnosina J Med Biomed Sci*, 2011, 4: 32–39
- 106 Raymond J, Sajid I, Parkinson L A, et al. Biofeedback and dance performance: A preliminary investigation. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 2005, 30: 64–73
- 107 Strizhkova O, Cherapkina L, Strizhkova T. Neurofeedback course applying of high skilled gymnasts in competitive period. *J Hum Sport Exerc*, 2012, 7: S185 – S193
- 108 Gruzelier J H, Thompson T, Redding E, et al. Application of alpha/theta neurofeedback and heart rate variability training to young contemporary dancers: State anxiety and creativity. *Int J Psychophysiol*, 2014, 93: 105–111
- 109 Arns M, Kleinnijenhuis M, Fallahpour K, et al. Golf performance enhancement and real-life neurofeedback training using personalized event-locked EEG profiles. *J NeuroTher*, 2008, 11: 11–18
- 110 Brito M A, Fernandes J R, Esteves N S A, et al. The effect of neurofeedback on the reaction time and cognitive performance of athletes: A systematic review and meta-analysis. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16: 868450
- 111 Xiang M Q, Hou X H, Liao B G, et al. The effect of neurofeedback training for sport performance in athletes: A meta-analysis. *Psychol Sport Exerc*, 2018, 36: 114–122
- 112 Dietrich A. Transient hypofrontality as a mechanism for the psychological effects of exercise. *Psychiatry Res*, 2006, 145: 79–83
- 113 Bertollo M, Doppelmayr M, Robazza C. Using brain technologies in practice. In: Tenenbaum G, Eklund R C, eds. *Handbook of Sport Psychology*. Hoboken: Wiley, 2020. 666–693
- 114 Bertollo M, di Fronso S, Filho E, et al. Proficient brain for optimal performance: The MAP model perspective. *PeerJ*, 2016, 4: e2082
- 115 Filho E, Dobersek U, Husselman T A. The role of neural efficiency, transient hypofrontality and neural proficiency in optimal performance in self-paced sports: A meta-analytic review. *Exp Brain Res*, 2021, 239: 1381–1393
- 116 Li L, Smith D M. Neural Efficiency in Athletes: A Systematic Review. *Front Behav Neurosci*, 2021, 15: 698555
- 117 Bilalić M, Turella L, Campitelli G, et al. Expertise modulates the neural basis of context dependent recognition of objects and their relations. *Hum Brain Mapp*, 2012, 33: 2728–2740
- 118 Kim W, Chang Y, Kim J, et al. An fMRI study of differences in brain activity among elite, expert, and novice archers at the moment of optimal aiming. *Cogn Behav Neurol*, 2014, 27: 173–182
- 119 Beilock S L, Lyons I M, Mattarella-Micke A, et al. Sports experience changes the neural processing of action language. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 13269–13273
- 120 Geisler M, de la Cruz F, Makris N, et al. Brains of endurance athletes differ in the association areas but not in the primary areas. *Psychophysiology*, 2024, 61: e14483
- 121 Kawato M. Internal models for motor control and trajectory planning. *Curr Opin Neurobiol*, 1999, 9: 718–727
- 122 Gonzalez-Castillo J, Saad Z S, Handwerker D A, et al. Whole-brain, time-locked activation with simple tasks revealed using massive averaging and model-free analysis. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 5487–5492
- 123 Cao R. Nonlinear and complex network theory in the application of EEG data analysis research (in Chinese). Doctor Dissertation. Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2015 [曹锐. 非线性与复杂网络理论在脑电数据分析中的应用研究. 博士学位论文. 山西: 太原理工大学, 2015]
- 124 Zhou Z X, Chen L Z, Milham M P, et al. Six cornerstones for translational brain charts. *Sci Bull*, 2023, 68: 795–799
- 125 Zhang Q, Wang Y S, Chen L Z, et al. Normative modeling for developmental population neuroscience: A “microscope” through which the laws and characteristics of individual differentiation can be quantified in human brain-mind development (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 2086–2100 [张青, 王银山, 陈丽珍, 等. 发展人口神经科学中的规范化建模: 量化脑智发展规律与个体分化特征的“显微镜”. 科学通报, 2023, 68: 2086–2100]
- 126 Zhang F, Chen M, Pu Y, et al. Individual differences in spatial navigation: A multi-scale perspective (in Chinese). *Adv Psychol Sci*, 2023, 31: 1642–1664 [张凤翔, 陈美璇, 蒲艺, 等. 空间导航能力个体差异的多层次形成机制. 心理科学进展, 2023, 31: 1642–1664]
- 127 Wu J R. Reflection on the era of great health: New medicine+new concepts (in Chinese). Beijing: Science Press, 2023 [吴家睿. 大健康时代的思考: 新医学+新观念. 北京: 科学出版社, 2023]
- 128 Ye H S. The mirror neurons: Neural biological evidences for the embodiment of cognition (in Chinese). *Psychol Explor*, 2012, 32: 3–7 [叶浩生. 镜像神经元: 认知具身性的神经生物学证据. 心理学探新, 2012, 32: 3–7]

- 129 Tan Y F. The role of interoception in anxiety and the underlying neural mechanisms (in Chinese). Doctor Dissertation. Chongqing: Southwest University, 2020 [谈雅菲. 个体内感受在焦虑中的作用及其神经机制. 博士学位论文. 重庆: 西南大学, 2020]
- 130 Wallman-Jones A, Perakakis P, Tsakiris M, et al. Physical activity and interoceptive processing: Theoretical considerations for future research. *Int J Psychophysiol*, 2021, 166: 38–49
- 131 Zeng R, Zhou K, Si G, et al. Effects of interoception on athletic performance: Neural mechanisms and potential path (in Chinese). *China Sport Sci Technol*, 2024, doi: 10.16470/j.csst.2024012 [曾仁杰, 周珂, 姒刚彦, 等. 内感受对运动表现的影响: 发生机制与潜在路径. 中国体育科技, 2024, doi: 10.16470/j.csst.2024012]
- 132 Liu F, Guo T X, Tao K. A review of research on brain computer interface for sports imagination in multi event athletes. 13th National Sports Science Conference, 2023 [刘菲, 郭天晓, 陶宽. 多项目运动员运动想象脑机接口研究综述. 第十三届全国体育科学大会, 2023]

Summary for “运动认知神经科学研究(2012~2022): 10年回顾与未来展望”

## A decade of progress in sports and exercise neuroscience from 2012 to 2022: A review and perspectives

Gao-Xia Wei<sup>1,2\*</sup>, Li-Kun Ge<sup>1,2</sup> & Xuan Lin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CAS Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology, Beijing 100101, China;

<sup>2</sup> Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup> Collaborative Innovation Center of Assessment for Basic Education Quality, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

\* Corresponding author, E-mail: [weigx@psych.ac.cn](mailto:weigx@psych.ac.cn)

With the advancement of brain imaging technologies, sports, and exercise Neuroscience has entered a new phase of development under the influence of embodied cognition theory. This transition has led to innovative changes in research methods and techniques, resulting in a more focused approach to research themes. The structural and functional changes in the brain induced by physical activity directly impact the adaptability of individual behavior. The facilitative effects of exercise on cognition, emotion, and sociability have been identified with specific neural representations in localized brain regions, circuits, networks, or overall brain architecture. Physical activity and exercise interventions are found to enhance the structure and function of the prefrontal cortex, promoting neural plasticity and improving cognitive abilities such as attention, memory, and inhibitory control. These benefits are particularly pronounced during critical periods of cognitive development in children and adolescents, as well as during cognitive decline in the elderly. Additionally, exercise can strengthen the structure and function of the prefrontal cortex and its control over the limbic system, enhancing emotional regulation capabilities. It may also directly influence emotional brain regions through bottom-up processes. Besides its role in physical and mental health, exercise also plays an irreplaceable and important role in the prevention of diseases, maintenance of brain health, and treatment of brain diseases. In the realm of competitive sports, the development of cognitive neuroscience has delved into the potential neural basis for athletes' exceptional performance. This includes exploring brain activity during motor learning, representation, observation, and decision-making processes in athletes, and attempting to explain the neural mechanisms of differences between experts and novices. These insights provide theoretical support for sports training and talent selection. Furthermore, a deeper understanding of sports and exercise neuroscience has propelled the evolution of sports training science, advancing from traditional physical and psychological training to include neural training. Future research in exercise cognitive neuroscience should fully recognize the highly complex non-kinetic characteristics of the impact of physical behavior on the brain. It is essential to emphasize the influence of individual differences on diverse outcomes when interpreting research findings. Special consideration should be given to the value and role of the body as an agent in psychological and brain functions. Moreover, in the era of big data, an open science approach should be adopted, integrating artificial intelligence technologies to meet the new challenges that digitization brings to exercise cognitive neuroscience. This integration will not only enhance the field's methodological toolkit but also expand the horizons of research, allowing for more sophisticated analyses and interpretations of the complex interactions between physical activity and brain function. The convergence of these disciplines heralds a transformative era in which the boundaries of our understanding of the brain-body relationship are continually being redefined, offering exciting prospects for both scientific discovery and practical applications in enhancing human health and performance.

**sports, brain sciences, brain imaging techniques, embodied cognition, exercise**

doi: [10.1360/TB-2024-0034](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0034)