

# 功能性近红外光学成像在运动认知神经科学中的应用

项明强, 黄文琴, 李文静, 刘书芳, 廖八根\*

广州体育学院运动与健康学院, 广州 510500

**摘要** 运动认知神经科学是运用运动认知神经科学技术, 探讨运动改善大脑认知功能的多学科交叉领域。近年来, fNIRS 成为该领域新兴的热点技术。研究发现, 在单任务步行中老年人的前额叶激活水平比年轻人激活水平更高, 而在双任务步行中, 老年人前额叶激活水平更低; 中等强度急性有氧运动是提升认知水平和增强大脑激活水平最佳锻炼方式, 而缺氧状态下运动则会损害认知功能; 长期有氧运动或高强度间歇运动能提升认知成绩和大脑激活水平, 但对老年人而言, 长期运动可能会降低大脑激活水平。未来 fNIRS 研究应排除运动情境中系统生理因素对大脑皮层激活影响, 加强长期运动对认知功能脑机制的随机对照实验研究, 运用多模态脑成像方法系统地考察运动认知神经机制, 积极探索运动认知领域的运动处方。

**关键词** 运动认知神经科学; 急性运动; 长期运动; 步行

进入 21 世纪, 运动心理学研究迎来新的发展机遇, 演化成一个年轻又充满活力的多学科交叉领域——运动认知神经科学<sup>[1]</sup>。研究者结合运动心理学的研究问题、认知心理学理论和认知神经科学的技术手段, 致力于探讨运动改善不同人群的认知功能及大脑可塑性<sup>[2]</sup>。张力为<sup>[3]</sup>指出, 研究方法是制约运动心理学理论和实践发展的重要因素。早期由于受到方法技术的限制, 运动认知神经科学发展较为缓慢。近年来, 随着认知神经科学的兴起, 研

究者开始采用事件相关电位(event related potential, ERP)、功能核磁共振成像(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)和功能性近红外光学成像(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)等技术探讨运动与大脑功能之间关系, 促使运动认知神经科学研究蓬勃开展。

fNIRS 是一种基于光学原理的重要功能神经影像学技术。它的基本原理是利用脑组织的血液氧合血红蛋白(oxyhemoglobin, oxy-Hb)和脱氧血红

收稿日期: 2022-03-17; 修回日期: 2022-04-30

基金项目: 国家社会科学基金项目(18BTY055)

作者简介: 项明强, 副教授, 研究方向为运动认知与脑科学, 电子信箱: xiangmq80@163.com; 廖八根(通信作者), 教授, 研究方向为运动医学, 电子信箱: bagen2015@163.com

引用格式: 项明强, 黄文琴, 李文静, 等. 功能性近红外光学成像在运动认知神经科学中的应用[J]. 科技导报, 2022, 40(10): 89-96; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.10.009

蛋白(deoxyhemoglobin, deoxy-Hb)对600~900 nm波长的近红外光吸收率的差异性,通过近红外设备测量透过大脑皮层(大约3 cm)漫射光的强度,然后基于朗伯比尔定律(Beer-Lambert Law)量化方程,计算大脑活动时oxy-Hb、deoxy-Hb和总血红蛋白(total hemoglobin, tHb)浓度的相对变化,进而间接推测特定感兴趣脑区的神经活动<sup>[4-5]</sup>。与fMRI、ERP相比,fNIRS具有轻巧便携、生态效率高、成像安全、对头动耐受性高和成本低等优点,同时fNIRS比fMRI有更高时间采样率,比ERP有更高空间分辨率。此外,Herold等<sup>[6]</sup>认为在运动认知领域中采用fNIRS的测试指标(例如oxy-Hb、deoxy-Hb、tHb)具有独特的优势,能够敏感地反映受试者在运动期间的认知功能变化,并与特定大脑区域紧密联系,这是传统运动处方指标(比如心率、最大摄氧量)无法比拟的。这些优势有利于将fNIRS研究成果推广到现实运动情景中,具有良好的生态效度。

在运动认知神经科学领域,fNIRS的优势已引起了国内外研究者的广泛关注,在PubMed和中国知网数据库发表的相关文献呈现逐年增长趋势。

## 1 步行的认知功能及脑机制

步行是日常生活中最常见的运动方式之一。随着生活节奏加快,手机电脑普及,导致人们久坐时间增加、体力活动减少,步行被认为是一种合适的健康运动方式,被许多医生列入运动处方中。然而,简单步行活动涉及了大脑多种神经元的动态作用和多个脑区激活,并配合多块肌肉的协同收缩,来应对行走过程中的复杂环境。以往fMRI研究,只能在静止状态下让受试者进行想象走路来探讨大脑激活状态,不能直接测量真实步行过程中大脑皮层的动态变化,从而限制了该领域研究进展。而fNIRS设备以其简便稳定,受环境影响小的特点,可以测量真实步行过程中大脑血流动力学反应,评估大脑激活状态,促进该领域研究蓬勃发展<sup>[7]</sup>。

### 1.1 单独步行的认知功能及脑机制

fNIRS研究表明,相比静息状态,步行期间的

前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)、运动皮层、辅助运动区、初级运动区和初级躯体感觉皮层的活动增加<sup>[8]</sup>。例如,Harada等<sup>[8]</sup>以健康老年人为研究对象,采用fNIRS技术比较低速、中速和快速行走3种条件下大脑oxy-Hb变化。结果发现,快速行走时左侧PFC和辅助运动区的oxy-Hb水平显著高于中速或低速状态,而且在快速行走时,步行能力低的老年人PFC激活变化程度高于步行能力高者。此外,内侧感觉运动皮质和辅助运动区的激活程度与运动速度有关,而心率反应仅与左侧PFC激活有关。这表明左侧PFC、辅助运动区和内侧感觉运动皮质控制着老年人的步态速度,其中左侧PFC激活可能与老年人随着年龄增加导致步态能力下降有关。Belli等<sup>[9]</sup>研究支持了这一观点。他们设计自主选择速度和快速步行2种条件,结果发现,在2种条件下老年人比年轻人表现出更高的PFC激活水平,并且老年人从自主选择步行到快走,其左侧PFC活动显著增加,但在年轻人中没有观察到此效应。这表明,随着年龄增加,老年人需要更多的PFC激活,提升行走过程中的控制能力来维持正常步行。

在健康人群中,稳态行走是自动化过程,主要依赖躯体感觉输入,无需过多关注行走状态和走路细节。然而,随着年龄增长,个体躯体感觉逐渐减弱,就会被迫主动增加控制能力,降低走路自动化,从而导致行走功能障碍<sup>[10]</sup>。对此,有研究者探讨通过其他方式增加躯体感觉。例如Clark等<sup>[11]</sup>设计了纹理鞋垫增加躯体感觉,结果发现,与正常穿鞋相比,轻度行动障碍老年人穿着有纹理鞋垫在跑步机上或者在地面上行走,双侧PFC激活减少。这表明,穿纹理鞋垫增强了躯体感觉,降低了老年人行走时的PFC激活水平,减少了行走过程中的控制能力。可推测,老年群体可通过降低步行速度,提高躯体感觉等方式提升步态稳定性。

### 1.2 双任务步行的认知功能及脑机制

在日常生活中,步行往往伴随着说话等其他认知任务,称之为双任务步行。在双任务步行过程中,除了步行任务会激活相关大脑皮层,认知任务也会促使相关大脑皮层产生变化。Holtzer等<sup>[12]</sup>利

用fNIRS技术,以年轻人和老年人为研究对象,比较正常走路和边走边说(双任务)2种状态下PFC激活程度。结果发现,边走边说状态下,PFC激活水平显著高于正常走路条件,而且年轻人PFC激活水平显著高于老年人。这可能是老年人在双任务中没有充分利用步行双任务。为了进一步明确双任务步行中的PFC激活增强的原因,即是由步行期间的步行认知双任务引起的,还是跟语言表达有关,Mirelman等<sup>[13]</sup>在边走边说双任务步行基础上增加了站立语言任务。结果发现,边走边说话的双任务的oxy-Hb水平显著高于正常步行和站立语言任务,而正常步行和站立语言任务之间oxy-Hb水平无显著性差异。该实验证实了双任务行走期间观察到的PFC变化与语言任务无关,而是由双任务引起。

此外,还有研究探讨了帕金森病患者在步行双任务中的PFC的激活模式。Maidan等<sup>[14]</sup>比较了帕金森病患者和健康老年人在正常行走、越障行走和双任务行走时PFC激活水平。结果发现,帕金森病患者在正常行走和克服障碍任务中PFC激活显著高于健康老人。在双任务行走时,与正常行走相比,帕金森病患者PFC水平仅仅略微提升;而健康老年人的PFC激活水平显著提高。这项研究表明,帕金森病患者在正常行走时已充分利用PFC的认知控制资源,导致无足够PFC认知控制资源来较好地完成更复杂的双任务。为此,作者提出改善帕金森病患者的步态稳定性的2条途径:(1)在简单任务中提高神经控制效率,即降低PFC激活;(2)在复杂任务中提升认知和运动能力,即增强PFC激活<sup>[14]</sup>。

最近Talamonti等<sup>[15]</sup>考察了长期运动改善老年人的双任务步行成绩和大脑PFC激活模式,发现经过1年有规律体育锻炼之后,老年人的步态更稳定、认知能力更强,大脑PFC激活模式更有效,即在正常走路任务表现出较低PFC激活水平,而在单一认知任务和双任务中表现出更高PFC激活水平,这种提升效应对具有心血管疾病风险的老人群体更有益处。未来或许可通过长期运动方式改善老年人认知和步行功能,降低老年人跌倒风险。

## 2 运动对认知功能影响及脑机制

依据运动时间的长短,运动一般可分成急性运动和长期运动两大类。急性运动是指一次性体育运动,通常持续时间为10~60 min;长期运动是指一周之内进行多次急性运动,维持数周、数月甚至数年<sup>[16]</sup>。研究者采用fNIRS技术,对这2种类型运动对认知功能作用及脑机制展开了广泛深入研究。

### 2.1 急性运动对认知功能影响及脑机制

#### 2.1.1 中等强度有氧运动对认知功能影响及脑机制

在急性有氧运动领域,研究者一般采用功率自行车运动的干预方式,设计不同运动强度,让受试者在运动前和运动后分别执行认知任务(例如Stroop任务、Flanker任务、n-back任务等),同时采用fNIRS检测PFC的oxy-Hb和deoxy-Hb浓度变化,以此评估大脑激活水平<sup>[17-23]</sup>。大量研究结果表明:个体在急性有氧运动之后(至少间隔1 min),认知测试成绩和PFC激活水平显著高于运动前<sup>[17-20]</sup>,或者急性运动组的认知表现和大脑皮层激活水平显著高于无运动的对照组<sup>[21-23]</sup>。这些结果表明急性有氧运动能显著提升认知表现,而且这种提升效应与大脑PFC激活水平存有关联。

在fNIRS研究中,研究者一般将PFC设定为感兴趣的脑区,具体包括左、右背侧前额叶皮层(left and right dorsolateral PFC, L-DLPFC, R-DLPFC),左、右腹侧前额叶皮层(left and right ventrolateral PFC, L-VLPFC, R-VLPFC),左、右额极区(left and right frontopolar area, L-FPA, R-FPA)。以健康年轻人为研究对象的fNIRS研究显示,有氧运动都可提升Stroop任务诱发的L-DLPFC的oxy-Hb浓度<sup>[19, 24-25]</sup>;而另一项研究结果显示,中等强度运动可提升大学生执行Flanker任务诱发的R-DLPFC的oxy-Hb浓度<sup>[26]</sup>。虽然Stroop任务诱发的左半球偏侧优势与Flanker任务诱发的右半球偏侧优势之间存在差异,但这两项研究说明DLPFC在执行各类认知任务,特别是抑制控制任务中起到重要作用,这与其他神经影像技术研究结果相一致<sup>[27]</sup>。此外,以老年人为研究对象的fNIRS结果显示,中等强度

运动可提升老年人 FPA 的 oxy-Hb 浓度<sup>[28-29]</sup>。这一结果与年轻人的结果不一致。其原因可能是,随着年龄增长,老年人的执行功能下降,除了 DLPFC 在维持和加工信息中扮演重要角色之外,还需要募集其他脑区(如 FPA)的神经元激活补偿中等强度运动的提升效应<sup>[30]</sup>。

### 2.1.2 其他运动类型对认知功能的影响及脑机制

随着研究的深入,研究者发现并非所有急性运动都能提升大脑认知功能的激活水平,它与运动类型有关。例如,Chang 等<sup>[31]</sup>研究表明,高强度抗阻运动后的认知任务所诱发总血氧水平显著低于中等强度有氧运动或不运动,这表明高强度抗阻运动会损害认知功能和降低大脑激活水平。此外,有氧慢舞蹈<sup>[32]</sup>、静态拉伸<sup>[33]</sup>、2 min 力竭运动<sup>[34]</sup>以及缺氧状态下踩功率自行车运动<sup>[35]</sup>都没有提升执行认知任务时大脑 PFC 的 oxy-Hb 浓度。综合这些结果,可认为运动量不够或缺氧状态下运动,并不能改善认知功能,甚至会损害认知功能。

为了进一步考察何种类型运动能更有效提升大脑激活水平,Moriarty 等<sup>[36]</sup>设计了非运动对照、中等强度有氧运动、高强度有氧间歇运动以及 44% 最大心率的瑜伽运动 4 种运动条件,让受试者按照随机顺序完成这 4 种运动之后再执行认知任务,结果发现只有在完成 45 min 的中等强度运动后,执行认知任务时,DLPFC 的 oxy-Hb 浓度才会增加。可见,适度急性有氧运动是提升认知水平和增加大脑激活最佳锻炼方式。

对于急性有氧运动提升认知功能的脑机制,研究者一般采用唤醒理论来解释<sup>[37]</sup>。该理论认为急性运动通过唤醒生理-心理系统,短暂促进脑部新陈代谢加快,增加大脑皮层血流量,进而优化认知资源的分配,促进认知加工效率的提升。近期一些神经科学的研究成果,为唤醒理论提供新视角:急性运动会引起相应的神经化学物质的释放,进而影响特定神经网络来参与特定的认知控制加工<sup>[38]</sup>。例如,急性运动会引起去甲肾上腺素、多巴胺和乙酰胆碱等多种神经递质释放。这些递质的释放虽然来自身体的不同唤醒系统,但均可增强与认知功能相关的 PFC 和海马脑区的神经元激活水平<sup>[39]</sup>。

## 2.2 长期运动对认知功能影响及脑机制

### 2.2.1 横断面设计研究的 fNIRS 结果

横断面设计的 fNIRS 研究发现,在成年人或老年人群中,具有较高心肺适能<sup>[30, 40]</sup>以及良好锻炼习惯者<sup>[41-43]</sup>,他们的认知测验成绩更好,其 PFC 激活水平更高,表现出更快的反应时和更高血红蛋白浓度。在年轻人群中,每周身体活动量与认知测验成绩、PFC 激活水平成正相关,而且认知任务诱发的 PFC 激活水平与受试者总睡眠时间相关<sup>[44]</sup>。然而,在儿童群体中,中等到高强度的体育活动与认知过程中的血红蛋白水平无关联<sup>[45]</sup>。这些横断面设计虽然能揭示长期运动与大脑功能之关系,但不能揭示它们之间的因果关系。

### 2.2.2 长期运动对认知功能影响及脑机制

针对横断面研究的不足,有部分研究者采用 fNIRS 技术考察了长期运动对认知功能影响的脑机制。例如,Xu 等<sup>[46]</sup>发现,经过 4 周运动联合饮食运动减肥干预后,肥胖青少年的体重显著下降,认知功能提升,且 L-DLPFC、R-DLPFC 和 L-VLPFC 的 oxy-Hb 显著提升。然而该项研究缺乏对照组,降低了研究结果的稳健性。为了进一步明确何种运动能更有效地提升大脑激活水平,Coetsee 等<sup>[47]</sup>以老年人为研究对象,设置了高强度间歇运动、中等强度持续有氧运动、抗阻运动和不运动对照组 4 种条件,干预周期为 16 周。结果发现,与不运动对照组相比,其余 3 种运动干预在皮层激活过程中产生了更有效的脑氧合状态,其中高强度间歇运动和中等持续有氧运动对 PFC 激活过程中任务效能的脑氧合状态和血氧利用的改善优于抗阻运动,这提示在长期运动条件下,中等强度有氧运动或高强度间歇运动更能提升老年人的认知成绩和大脑激活水平。

然而,也有研究表明长期运动会降低老年人的大脑激活水平。例如 Liao 等<sup>[48]</sup>考察了基于 Kinect 运动游戏和综合运动训练对体弱老年人的认知功能和大脑激活的影响。结果发现:12 周干预后两组在整体认知、执行功能和注意力方面都有明显改善,但 Kinect 运动游戏在整体认知、语言功能和工作记忆方面优于综合运动训练。但 fNIRS 数据

显示,两组在运动后的整体认知任务诱发的PFC激活水平显著低于运动前。另一项fMRI研究也表明,12周的跑步机运动干预也会降低患有轻度认知障碍的老年人PFC激活水平<sup>[49]</sup>。其原因可采用神经效能假说来解释:随着年龄增长,老年人的认知功能逐渐下降,需要激活更多的PFC来补偿认知功能衰退,从而达到与年轻人相似的认知表现;而经过运动干预之后,PFC只需较低激活水平就可有效地完成相同的认知任务,产生神经效能效应<sup>[50]</sup>。

### 2.2.3 传统项目对认知功能影响及脑机制

也有少数fNIRS研究探讨传统项目对认知功能的影响。例如8周的八段锦训练,能够显著提升大学生抑制控制功能和左PFC的oxy-Hb激活水平<sup>[51]</sup>。另一项研究却发现,经过24周的太极干预,虽然显著提升了健康老年人的认知测验成绩,但没有显著改变oxy-Hb浓度<sup>[52]</sup>。鉴于传统项目的fNIRS研究较少,未来还需更多fNIRS研究,针对不同人群探讨传统项目与认知功能及其大脑激活之间的关系,以此确定传统项目是提升大脑皮层的激活水平,还是产生了神经效能效应。

## 3 结论

研究者利用fNIRS的优势揭示了步行的认知功能及脑机制,以及急性和长期运动对认知功能影响的脑机制。然而,目前应用fNIRS在运动认知神经科学领域的研究还处于起步阶段,还存在一些不足。如目前大多数研究只关注大脑PFC,缺乏对与其他相关脑区以及个体生理状态的整体性的探讨,今后研究者应该充分考虑fNIRS的优势和不足,做到扬长避短,可从以下5个方面进一步开展研究。

1) 要综合考虑认知任务对大脑皮层影响。在运动认知神经科学领域,一般采用认知任务来诱发大脑皮层激活,为此在开展fNIRS研究之前,一方面要明确各种认知任务的测试功能及其对应的大脑激活皮层,另一方面还要考虑到认知任务本身对脑血氧浓度的影响。例如,如果认知任务涉及语言任务(或内部语言任务),或者让受试者一边走路一边说话,就可能引发低碳酸血症(即降低动脉血

液中的二氧化碳浓度),引起脑血管收缩和降低脑血流量,最终导致总血红蛋白浓度降低,包括oxy-Hb和deoxy-Hb的浓度<sup>[53]</sup>。此外,如果任务改变了受试者的呼吸频率和呼吸深度,那么fNIRS数据可能会受到这种二氧化碳效应的影响,而不仅仅反映神经血管耦合变化。

2) 排除急性有氧运动中系统生理因素对大脑皮层的激活影响。在急性运动后,个体有较高心率或者脑血流量,此时fNIRS信号容易受系统性生理因素的影响。例如一项方法学研究结果表明,在运动后的10 min之内,前8 min的fNIRS信号容易受到系统生理伪迹的影响<sup>[54]</sup>。因此,需要谨慎对待急性有氧运动与认知任务间隔时间小于8 min的fNIRS研究结果<sup>[17, 18, 21, 24, 32-33]</sup>。这些研究所观察到的fNIRS信号变化可能至少有部分受到系统生理伪迹的干扰,并且干扰程度取决于运动强度。建议未来开展急性运动的fNIRS研究,应在急性运动8 min之后再测试认知功能,同时检验采用多种生理测量方法去除生理伪迹,提高fNIRS信号质量,进而得出有效可靠的研究结果。

3) 加强长期运动对认知功能脑机制的随机对照实验研究。目前关于身体活动水平与认知功能的fNIRS研究刚刚起步,只有少数研究采用长期运动的随机对照实验设计,多数采用横断设计范式,其原因可能是长期运动干预本身具有诸多限制<sup>[55-56]</sup>。然而,横断面实验设计所获得的脑成像数据和结果都是静态的,不利于揭示长期运动与认知功能及大脑激活之间的因果关系。特别是低龄儿童群体,他们的大脑神经正处于变化发展阶段,若能借助fNIRS技术在低龄儿童进行较长一段时间内重复测量的优势,系统考察运动锻炼对大脑功能的影响是如何随着大脑的发育而变化的,无疑有助于加深对运动与大脑功能之间关系这一科学问题的认识和理解。

4) 结合多种学科手段,运用多模态脑成像方法系统全面地考察运动认知神经机制。目前fNIRS最大局限是探测深度不够,只能关注大脑PFC,无法检测到与运动改善认知有关的其他脑区,如海马等工作记忆加工的脑区。未来采用

fNIRS 探讨运动认知神经机制时,可考虑结合 fMRI、ERP 等其他技术进行测量,有效实现脑成像在时间和空间分辨率上的优势互补。同时检测个体运动时的皮肤电、肌电等生物力学指标,寻找汇聚性数据结果,进而为运动认知神经机制提供多方面的证据。

5) 积极拓展运动认知领域的运动处方研究。运动认知领域的运动处方是一个新兴话题,备受研究者广泛关注。然而,目前哪种运动处方(运动强度、运动时间和运动类型)最佳尚不明确。而 fNIRS 的测试指标能够敏感地反映受试者在运动期间的认知功能变化,并与特定大脑区域紧密联系,这为制定个性化运动认知处方提供了新途径<sup>[6]</sup>。未来应采用 fNIRS 技术,针对不同人群特征,提炼出更精准 fNIRS 脑源性参数,制定经济有效的运动认知处方,以提高广大群众的认知功能以及预防老年人的认知功能衰退。

### 参考文献(References)

- [1] 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[J]. 体育科学, 2012, 32(1): 54-63.
- [2] Raichlen D A, Alexander G E. Adaptive capacity: An evolutionary neuroscience model linking exercise, cognition, and brain health[J]. Trends in Neurosciences, 2017, 40(7): 408-21.
- [3] 张力为. 运动心理学研究方法的演进[J]. 武汉体育学院学报, 2005(12): 38-43.
- [4] 白学军,章鹏,张琪涵,等. 功能性近红外光谱技术在说谎研究中的应用[J]. 心理科学进展, 2019, 27(1): 160-70.
- [5] 刘宝根,周兢,李菲菲. 脑功能成像的新方法——功能性近红外光谱技术(fNIRS)[J]. 心理科学, 2011, 34(4): 943-949.
- [6] Herold F, Gronwald T, Scholkmann F, et al. New Directions in exercise prescription: Is there a role for brain-derived parameters obtained by functional near-infrared spectroscopy[J]. Brain Sciences, 2020, doi: 10.3390/brainsci10060342.
- [7] Hamacher D, Herold F, Wiegel P, et al. Brain activity during walking: A systematic review[J]. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 2015, 57: 310-327.
- [8] Harada T, Miyai I, Suzuki M, et al. Gait capacity affects cortical activation patterns related to speed control in the elderly[J]. Experimental Brain Research, 2009, 193(3): 445-454.
- [9] Belli V, Orcioli-Silva D, Beretta V S, et al. Prefrontal cortical activity during preferred and fast walking in young and older adults: An fNIRS study[J]. Neuroscience, 2021, 473: 81-89.
- [10] Mattay V S, Fera F, Tessitore A, et al. Neurophysiological correlates of age-related changes in human motor function[J]. Neurology, 2002, 58(4): 630-635.
- [11] Clark D J, Christou E A, Ring S A, et al. Enhanced somatosensory feedback reduces prefrontal cortical activity during walking in older adults[J]. Journals of Gerontology Series A-biological Sciences and Medical Sciences, 2014, 69(11): 1422-1428.
- [12] Holtzer R, Mahoney J R, Izzetoglu M, et al. fNIRS study of walking and walking while talking in young and old individuals[J]. Journals of Gerontology Series A-biological Sciences and Medical Sciences, 2011, 66(8): 879-887.
- [13] Mirelman A, Maidan I, Bernad-Elazari H, et al. Increased frontal brain activation during walking while dual tasking: An fNIRS study in healthy young adults[J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2014, 11: 85.
- [14] Maidan I, Nieuwhof F, Bernad-Elazari H, et al. The role of the frontal lobe in complex walking among patients with parkinson's disease and healthy older adults: An fNIRS study[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2016, 30(10): 963-71.
- [15] Talamonti D, Vincent T, Fraser S, et al. The benefits of physical activity in individuals with cardiovascular risk factors: A longitudinal investigation using fNIRS and dual-task walking[J]. Journal of Clinical Medicine, 2021, doi: 10.3390/jcm10040579.
- [16] Audiffren M, André N. The strength model of self-control revisited: Linking acute and chronic effects of exercise on executive functions[J]. Journal of Sport and Health Science, 2015, 4(1): 30-46.
- [17] Faulkner J, Lambrick D, Kaufmann S, et al. Effects of upright and recumbent cycling on executive function and prefrontal cortex oxygenation in young healthy men [J]. Journal of Physical Activity & Health, 2016, 13(8): 882-887.
- [18] Bediz C S, Oniz A, Guducu C, et al. Acute supramaximal exercise increases the brain oxygenation in relation to cognitive workload[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2016, 10: 174.
- [19] Kujach S, Byun K, Hyodo K, et al. A transferable high-intensity intermittent exercise improves executive performance in association with dorsolateral prefrontal activation in young adults[J]. Neuroimage, 2018, 169: 117-25.
- [20] Moriya M, Aoki C, Sakatani K. Effects of physical exercise on working memory and prefrontal cortex function in post-stroke patients[J]. Advances in Experimental

- Medicine and Biology, 2016, 923: 203–208.
- [21] Endo K, Matsukawa K, Liang N, et al. Dynamic exercise improves cognitive function in association with increased prefrontal oxygenation[J]. *Journal of Physiological Sciences*, 2013, 63(4): 287–298.
- [22] Tsujii T, Komatsu K, Sakatani K. Acute effects of physical exercise on prefrontal cortex activity in older adults: A functional near-infrared spectroscopy study[J]. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2013, 765: 293–298.
- [23] Tsuchiya K, Mitsui S, Fukuyama R, et al. An acute bout of housework activities has beneficial effects on executive function[J]. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 2018, 14: 61–72.
- [24] Byun K, Hyodo K, Suwabe K, et al. Positive effect of acute mild exercise on executive function via arousal-related prefrontal activations: An fNIRS study[J]. *NeuroImage*, 2014, 98: 336–345.
- [25] Yanagisawa H, Dan I, Tsuzuki D, et al. Acute moderate exercise elicits increased dorsolateral prefrontal activation and improves cognitive performance with Stroop test [J]. *Neuroimage*, 2010, 50(4): 1702–1710.
- [26] 文世林, 夏树花, 李怜军, 等. 急性有氧运动对大学生执行功能的影响: 来自 fNIRS 和行为实验的证据[J]. *天津体育学院学报*, 2015, 30(6): 526–531.
- [27] Boschini E A, Mars R B, Buckley M J. Transcranial magnetic stimulation to dorsolateral prefrontal cortex affects conflict-induced behavioural adaptation in a Wisconsin Card Sorting Test Analogue[J]. *Neuropsychologia*, 2017, 94: 36–43.
- [28] Hyodo K, Dan I, Suwabe K, et al. Acute moderate exercise enhances compensatory brain activation in older adults[J]. *Neurobiol Aging*, 2012, 33(11): 2621–2632.
- [29] 文世林, 夏树花, 李思, 等. 急性有氧负荷对老年人执行功能的影响: 来自 fNIRS 和行为实验的证据[J]. *体育科学*, 2015, 35(10): 37–45.
- [30] Hyodo K, Dan I, Kyutoku Y, et al. The association between aerobic fitness and cognitive function in older men mediated by frontal lateralization[J]. *Neuroimage*, 2016, 125: 291–300.
- [31] Chang H, Kim K, Jung Y J, et al. Effects of acute high-intensity resistance exercise on cognitive function and oxygenation in prefrontal cortex[J]. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 2017, 21(2): 1–8.
- [32] Hyodo K, Suwabe K, Soya H, et al. The effect of an acute bout of slow aerobic dance on mood and executive function in older adults: A pilot study[J]. *Bulletin of the Physical Fitness Research Institute*, 2017, 2017(115): 35–41.
- [33] Sudo M, Ando S, Nagamatsu T. effects of acute static stretching on visual search performance and mood state [J]. *Journal of Physical Education and Sport*, 2015, 15: 651–656.
- [34] Sudo M, Komiyama T, Aoyagi R, et al. Executive function after exhaustive exercise[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2017, 117(10): 2029–2038.
- [35] Ochi G, Yamada Y, Hyodo K, et al. Neural basis for reduced executive performance with hypoxic exercise[J]. *Neuroimage*, 2018, 171: 75–83.
- [36] Moriarty T, Bourbeau K, Bellovary B, et al. Exercise intensity influences prefrontal cortex oxygenation during cognitive testing[J]. *Behavioral Sciences (Basel)*, 2019, doi: 10.3390/bs9080083.
- [37] McMorris T. Chapter 1–History of research into the acute exercise–cognition interaction: A cognitive psychology approach[M]//McMorris T. *Exercise–Cognition Interaction*. San Diego: Academic Press, 2016: 1–28.
- [38] McMorris T, Turner A, Hale B J, et al. Chapter 4–Beyond the catecholamines hypothesis for an acute exercise–cognition interaction: A neurochemical perspective [M]//McMorris T. *Exercise–Cognition Interaction*. San Diego: Academic Press, 2016: 65–103.
- [39] Arnsten A F T. Catecholamine influences on dorsolateral prefrontal cortical networks[J]. *Biological Psychiatry*, 2011, 69(12): 89–99.
- [40] Dupuy O, Gauthier C J, Fraser S A, et al. Higher levels of cardiovascular fitness are associated with better executive function and prefrontal oxygenation in younger and older women[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2015, 9: 66.
- [41] Matsuda K, Ikeda S, Mitsutake T, et al. Factors influencing executive function by physical activity level among young adults: A near-infrared spectroscopy study[J]. *Journal of Physical Therapy Science*, 2017, 29(3): 470–475.
- [42] Makizako H, Doi T, Shimada H, et al. Relationship between going outdoors daily and activation of the prefrontal cortex during verbal fluency tasks (VFTs) among older adults: A near-infrared spectroscopy study[J]. *Arch Gerontol Geriatr*, 2013, 56(1): 118–123.
- [43] Giles G E, Cantelon J A, Eddy M D, et al. Habitual exercise is associated with cognitive control and cognitive reappraisal success[J]. *Experimental Brain Research*, 2017, 235(12): 3785–3797.
- [44] Kato K, Iwamoto K, Kawano N, et al. Differential effects of physical activity and sleep duration on cognitive function in young adults[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2018, 7(2): 227–236.
- [45] Mücke M, Andrä C, Gerber M, et al. Moderate-to-vigorous physical activity, executive functions and prefrontal brain oxygenation in children: A functional near-infrared spectroscopy study[J]. *Journal of Sport and Health Science*, 2018, 36(6): 630–636.
- [46] Xu X, Deng Z Y, Huang Q, et al. Prefrontal cortex–me-

- diated executive function as assessed by Stroop task performance associates with weight loss among overweight and obese adolescents and young adults[J]. *Behavioural Brain Research*, 2017, 321: 240–248.
- [47] Coetsee C, Terblanche E. Cerebral oxygenation during cortical activation: The differential influence of three exercise training modalities. A randomized controlled trial [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2017, 117(8): 1617–1627.
- [48] Liao Y Y, Chen I H, Hsu W C, et al. Effect of exergaming versus combined exercise on cognitive function and brain activation in frail older adults: A randomised controlled trial[J]. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2021, 64(5): 101492.
- [49] Smith J C, Nielson K A, Antuono P, et al. Semantic memory functional MRI and cognitive function after exercise intervention in mild cognitive impairment[J]. *Journal of Alzheimers Disease*, 2013, 37(1): 197–215.
- [50] Vermeij A, Van Beek A H, Olde Rikkert M G, et al. Effects of aging on cerebral oxygenation during working-memory performance: A functional near-infrared spectroscopy study[J]. *PLoS One*, 2012, 7(9): e46210.
- [51] Chen T, Yue G H, Tian Y, et al. Baduanjin mind-body intervention improves the executive control function[J]. *Front Psychol*, 2016, 7: 2015.
- [52] Wang W, Qiu C, Ota T, et al. Effects of Tai Chi exercise on attention in healthy elderly subjects as measured by near-infrared spectroscopy during the Stroop task[J]. *Journal of Nara Medical Association*, 2013, 64(5): 79–86.
- [53] Scholkmann F, Wolf M, Wolf U. The effect of inner speech on arterial CO<sub>2</sub> and cerebral hemodynamics and oxygenation: A functional NIRS study[J]. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2013, 789: 81–87.
- [54] Byun K, Hyodo K, Suwabe K, et al. Possible influences of exercise-intensity-dependent increases in non-cortical hemodynamic variables on NIRS-based neuroimaging analysis during cognitive tasks: Technical note[J]. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 2014, 18(4): 327–332.
- [55] Herold F, Wiegel P, Scholkmann F, et al. Applications of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) neuroimaging in exercise(-) cognition science: A systematic, methodology-focused review[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2018, doi: 10.3390/jcm7120466.
- [56] Stillman C M, Esteban-Cornejo I, Brown B, et al. effects of exercise on brain and cognition across age groups and health states[J]. *Trends in Neurosciences*, 2020, 43(7): 533–543.

## The application of functional near-infrared spectroscopy in exercise-cognitive neuroscience

XIANG Mingqiang, HUANG Wenqin, LI Wenjing, LIU Shufang, LIAO Bagen\*

Department of Sports and Health, Guangzhou Sport University, Guangzhou 510500, China

**Abstract** The exercise-cognitive neuroscience is an interdisciplinary field that explores the exercise improvement of the cognitive performance and the brain functions by using the cognitive neuroscience research methods. Recently, the functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) becomes a hot technique used in the exercise-cognitive neuroscience. It is shown that: The prefrontal activation level of the elderly is higher during the single-task walking than that of the young, and the activation level is lower during the dual-task walking; the moderate intensity acute aerobic exercise is the best way to improve the cognitive level and to increase the brain activation, while the exercise under the hypoxia would damage the cognitive function; the long-term aerobic exercise or the high-intensity interval exercise can improve the cognitive performance and the brain activation level, but for the elderly, the long-term exercise may reduce the brain activation level. The future studies should exclude the influence of the systemic physiological factors in the exercise situations on the cerebral cortical activation, strengthen the randomized controlled experiments of the effects of the long-term exercise on the cognitive function brain mechanisms, use the multimodal brain imaging methods to systematically investigate the exercise-cognitive neural mechanisms, and explore the exercise prescription in the field of the exercise-cognition.

**Keywords** exercise-cognitive neuroscience; acute exercise; long-term exercise; walking ●



(责任编辑 卫夏雯)