

·综述·

功能性近红外光谱技术在老年认知-平衡双任务中的应用

阚超杰^{1,2}, 朱仕哲^{2,3}, 王庆雷^{2,3}, 耿阿燕², 王彤^{2,3}, 郭川^{2,3*}

1 常州市德安医院, 江苏 常州 213004;

2 南京医科大学康复医学院, 江苏 南京 210029;

3 南京医科大学第一附属医院, 江苏 南京 210029

* 通信作者: 郭川, E-mail: guochuan@njmu.edu.cn

收稿日期: 2024-10-05; 接受日期: 2025-01-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3603604); 国家自然科学基金青年科学基金项目(82302882);

常州市科技局应用基础研究计划(CJ20253139)

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2026.01009

摘要 老年人跌倒风险与多任务操作能力下降相关, 认知-平衡双任务范式可通过双任务干扰评估跌倒风险, 其机制与注意资源或神经通路竞争有关, 而认知-平衡双任务训练能改善老年人相关功能, 阐明其脑激活机制对跌倒干预具有重要意义。临床常用功能性核磁共振成像(fMRI)、脑电图(EEG)、功能性近红外光谱技术(fNIRS)探索相关神经机制, 其中fNIRS因便携性强、抗伪影效果好等优势, 更适用于双任务监测。本综述总结fNIRS在老年人认知-平衡双任务中的设计要点及应用方法, 为跌倒风险评估与预防提供建议。在老年人的认知-平衡双任务中, 应用fNIRS的双任务范式、实验设计和感兴趣区选择逐步形成规范。利用fNIRS可揭示不同健康水平老年人的中枢机制: 认知健康者呈双侧前额叶代偿性激活; 认知受损者(主观认知下降、轻度认知障碍、阿尔茨海默病)激活水平随认知水平下降而递减, 阿尔茨海默病患者存在广泛皮质激活减少; 平衡受损者特定脑区激活有差异。fNIRS还可辅助双任务训练, 反映训练前后皮质激活模式的变化, 其神经反馈技术具有应用潜力但仍存争议。当前研究面临实验设计、样本特征、任务类型不统一等挑战, 未来需建立标准化方案, 探索多技术联合应用, 为老年人跌倒风险评估与预防提供理论支撑。

关键词 认知; 平衡; 双任务; 功能性近红外光谱技术; 老年人

老年人跌倒风险的增加与多任务操作能力下降有关^[1-2]。在临床研究中, 研究者大多通过双任务范式来模拟日常生活中的多任务操作, 要求被试同时执行认知任务和平衡任务^[3]。这会造成2个任务之间的干扰, 导致其中1个或2个任务表现下降, 称之为双任务干扰(dual-tasking interference, DTi)^[4-5]。DTi的潜在机制目前尚不清楚, 最具影响力的解释是“注意资源竞争模型”和“信息通路竞争模型”^[6-7]。由于认知功能和平衡功能存在协同效应, 认知-平衡双任务中的2个子任务可能会互相竞争注意力资

源, 也可能会占用彼此信息处理的神经通路, 最终导致其中1项或2项任务的表现比单独执行平衡任务时下降^[8-9]。老年人由于脑老化和皮层功能衰退, 中枢神经的信息处理能力下降, 执行认知-平衡双任务时, DTi会导致跌倒风险进一步增加^[10]。因此, 认知-平衡双任务评估有助于识别跌倒风险较高的老年人^[11-12]。此外, 多项研究报道, 老年人在执行双任务时相关脑功能区呈现不同程度的激活变化^[13-15]。进一步研究发现, 认知-平衡双任务训练能够改善老年人皮层功能, 并显著提升其认知和平衡

引用格式: 阚超杰, 朱仕哲, 王庆雷, 等. 功能性近红外光谱技术在老年认知-平衡双任务中的应用[J]. 康复学报, 2026, 36(1): 66-73.

KAN C J, ZHU S Z, WANG Q L, et al. Application of functional near-infrared spectroscopy in the cognition-balance dual-task of the elderly [J]. Rehabil Med, 2026, 36(1): 66-73.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2026.01009

©《康复学报》编辑部, 开放获取CC BY-NC-ND 4.0协议

© Rehabilitation Medicine, OA under the CC BY-NC-ND 4.0

表现^[16-17]。因此,阐明老年人在认知-平衡双任务下的大脑激活机制,可为拓展老年人跌倒干预策略提供重要的理论依据。

临床上常用脑功能成像技术来探索大脑皮质相关的神经机制,如功能性核磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)、脑电图(electroencephalography, EEG)和功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)等。fMRI是测量大脑皮层活动的金标准,但它也有一些缺点,如检测空间狭窄、仪器噪音较大、使用成本较高、抗运动伪影能力差以及只能监测静息状态下的脑部活动,不适合在实验室环境下的双任务监测^[18]。EEG是另一种监测脑区激活的脑功能成像工具,与fMRI相比,EEG成本更低、便携性强、更适合任务状态的监测。然而,EEG在双任务中应用时也存在缺陷,如空间分辨率低、容易受到电磁干扰和运动伪影的影响^[19]。相比之下,fNIRS为监测双任务中大脑皮质活动提供了一种更灵活、有效的方法。因其具有更强的便携性、更低的噪音水平、更高的空间分辨率、更好的抗伪影效果以及可应用在自然环境下复杂运动任务中等优点,已成为一种很有前途的双任务研究技术^[20]。本综述总结了fNIRS在老年人认知-平衡双任务中的设计要点,以及利用fNIRS探索其中枢机制、辅助认知-平衡双任务训练的具体方法,以期为老年人跌倒风险的评估和预防措施提供建议。

1 基于fNIRS的认知-平衡双任务研究设计

fNIRS可以利用生物组织中氧合血红蛋白(oxy-hemoglobin, HbO₂)和脱氧血红蛋白(deoxyhemoglobin, HbR)对近红外线的低吸收和高散射特性,通过捕捉近红外探头接收到散射光子的数量,间接反映与认知和平衡任务相关的皮层区域的局部血液动力学变化,达到测量老年人在认知-平衡双任务下的皮质激活水平的目的^[21-22]。在认知-平衡双任务研究中,fNIRS的应用逐渐形成了一些标准化的研究设计。

1.1 双任务范式

近年来,研究者采用多种认知任务与平衡任务的组合范式,揭示了不同任务类型对平衡控制的影响。早期的fNIRS由于技术限制,只允许被试在固定场景进行任务测试,所以认知-平衡双任务范式中的平衡任务通常采用静态平衡测试(如双脚站

立、单脚站立、软垫站立等)^[23-25]。随着fNIRS技术的发展,抗运动伪影效果逐渐增强,便携式fNIRS的应用使动态平衡测试成为可能(如行走、转身等)^[26-27]。平衡数据一般采用测力平台或步态分析器进行采集,主要评估指标包括身体压力中心的位移、身体摇摆的平均速度和摇摆轨迹所覆盖的范围、行走的步数及速度等^[28-30]。常见的认知任务则包括语言流畅性任务、反应时任务、数字计算任务、视觉空间记忆任务等^[31]。认知数据的采集一般采用口头报告的形式,主要评估指标包括正确率和反应时等^[32]。这些任务均能够有效地调动被试的注意力和工作记忆资源,通过研究这些任务的相互影响,能够深入理解老年人认知负荷和平衡控制之间的关系。

在基于fNIRS的老年人双任务范式中,平衡任务根据试验目的不同,一般选择步行任务或站姿稳定性任务。而认知任务最常用的是数字计算任务,即要求被试者在规定的任务时间内对1个随机3位数重复进行相同的减法计算,同时记录下计算正确率,如“重复减7”或“重复减3”,其优势在于任务难度可控,同时可重复性较强。例如,当平衡任务较难或被试者有认知功能减退时,选择难度较低的“重复减3”,反之则可选择“重复减7”。此外,在不同平衡任务的多项双任务中,数字计算任务可以使认知负荷难度基本一致。

1.2 实验设计

fNIRS在任务态下的实验设计一般采用区块平均设计,即其中多个任务区间和基线区间会交替出现^[33]。典型的区块平均设计包含任务区间与基线区间的重复循环,如每个任务区间持续30 s,其间被试执行特定的任务(如双任务)。随后是30 s的基线区间,其间被试不进行任何活动或干预,维持静息状态。这样的任务-基线循环通常会重复若干次,以确保通过多次重复能够获取足够的的数据,减少随机噪声,进而提高信号的统计可靠性。这种方法允许研究者通过比较任务与基线期的脑活动差异,识别与任务相关的脑区激活模式。

此外,也有研究者采用单一被试设计,也称之为A-B-A设计,具体包括A阶段(基线期)、B阶段(干预期)、A阶段(回撤期)^[34]。在基线期,研究者首先测量和记录被试在没有施加任何干预措施的情况下的行为或反应水平,并将这一阶段的数据作为基线。在干预期,研究者引入某种干预措施(双任

务通常处于干预期),以观察该措施对被试行为或反应的影响。在回撤期,研究者撤销之前的干预措施,观察被试的行为或反应是否回到基线水平,目的是评估干预效果的持久性或反转效应。这种设计的主要优势在于可以明确判断双任务干预是否有效,并测试效果是否可逆。

1.3 感兴趣区选择

在fNIRS研究中,感兴趣区(region of interest, ROI)是一个非常重要的概念,它是在大脑中被特定选择进行重点研究和分析的区域。由于大脑功能的复杂性和广泛性,难以同时对整个大脑进行全面而深入的分析。因此,研究者会根据研究目的和问题,确定特定的大脑区域作为ROI。

在认知-平衡双任务中,ROI的选择一般是与认知和平衡功能密切相关的脑区^[35]。通常选择的ROI有前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)、运动皮层、颞叶和顶叶等,其中运动皮层包括运动前区(premotor cortex, PMC)、初级运动区(primary motor cortex, M1)、感觉运动区(sensorimotor cortex, SMC)等。PFC在执行功能、注意力、工作记忆和决策过程中起关键作用^[36]。因此,在处理双任务时会显著激活PFC,使其成为相关研究中被广泛关注的脑区^[37-38]。运动皮层在计划和执行运动任务中起主要作用。在双任务研究中,运动皮层的激活可以提供关于平衡任务如何影响运动控制的信息^[39-40]。颞叶与听觉处理、语言理解和记忆相关,虽然在认知-平衡双任务中不是主要的ROI,但在涉及语言或听觉任务的双任务研究中,颞叶也可能成为感兴趣区^[41]。顶叶在空间感知、感觉整合和平衡控制中起重要作用,它对于在双任务中协调身体姿势和平衡非常重要^[42]。

2 利用fNIRS探索认知-平衡双任务的中枢机制

fNIRS脑功能成像的基础是神经血管耦联(neurovascular coupling, NVC)现象,即当大脑某个区域执行任务时,局部神经元活动增加的同时会导致局部血流量和血氧水平改变。fNIRS能够捕捉这些生理变化,从而间接反映神经活动。例如,当大脑执行某项任务时,特定区域的血流量增加,提示该区域参与了任务的处理。在认知-平衡双任务中,老年人不仅在行为学表现上有衰退,而且与任务相关的脑区也表现出特有的激活状态。因此,总结不同健康水平老年人执行认知-平衡双任务时的fNIRS

脑功能成像特征,进一步探索其潜在的中枢机制,可以为采取预防老年人跌倒的措施提供理论依据。

2.1 认知健康老年人

在认知-平衡双任务中,老年人不管是认知表现,还是平衡表现均弱于年轻人,但在皮质激活表现上则不同。多项fNIRS研究显示,健康老年人在执行认知-平衡双任务时,尤其是认知任务涉及执行功能时(如词色冲突任务、N步回溯任务),PFC的皮质激活水平相较于年轻人更高,且更倾向于双侧PFC的激活,这提示可能存在某种代偿机制^[38,43-44]。有研究认为,这可能与任务难度有关,当双任务的难度会带来潜在的跌倒风险时,老年人因为害怕跌倒,大脑会优化平衡控制的神经通路,通过代偿性激活PFC来强化平衡控制^[45]。进一步的fNIRS研究显示,年轻人能够在较少的PFC激活的情况下维持较高的双任务表现,这可能是由于他们的大脑功能连接性较好,且神经网络更加高效^[46]。相较之下,老年人在双任务下需要更多的皮质激活和更大范围的脑区参与,以补偿衰退的皮质功能,这可能导致他们在面对复杂任务时出现更高的错误率和更低的平衡表现。此外,有研究者提出神经效率假说,认为年轻人在执行同样的任务时,能够以更少的神经资源(即较低的皮质激活水平)达到相同或更好的任务表现^[47]。相反,老年人由于神经效率下降,可能需要动员更多的皮质激活来维持相同的任务表现。

2.2 认知受损老年人

老年人认知受损的情况包括主观认知下降(subjective cognitive decline, SCD)、轻度认知障碍(mild cognitive impairment, MCI)以及阿尔茨海默病(Alzheimer's disease, AD)等。fNIRS研究初步揭示了认知受损老年人在双任务下不同的脑功能成像特征。

SCD老年人通常在标准神经心理测试中没有明显的异常表现,但在主观上感觉到记忆力 and/或其他认知能力较之前的水平有所下降^[48]。而MCI通常被认为是介于正常老化和AD之间的过渡状态,会出现认知能力下降,但不影响日常生活能力^[49]。ZHANG等^[50]总结了在静息态下认知健康、SCD、MCI和AD老年人的前脑功能区的血流动力学变化特征,发现SCD组和MCI组的左右PFC激活水平均高于认知健康老年人,同时MCI组和AD组所观测的ROI平均激活水平要低于SCD组,而MCI组和AD

组之间的差异无统计学意义。同时,一些研究显示,SCD和MCI老年人在执行认知-平衡双任务时的fNIRS成像显示出与静息态下类似的PFC代偿性激活^[51-52]。这提示在认知障碍的早期阶段,个体会出现神经元代偿活动。有学者提出的“衰老与认知支架理论”,认为衰老的大脑可以适应和补偿MCI带来的神经元活动能力下降,即通过增加PFC的激活,来缓解整体神经功能和结构的衰退^[53-54]。此外,还有研究发现,MCI老年人脑区激活模式开始呈现局部化,部分脑区(如顶叶和运动皮质)的参与减少,神经系统的反应速度也显著减慢^[55]。这种动态反应延迟在fNIRS中表现为血氧水平的滞后反应,提示他们在协调认知和平衡任务时效率下降。然而,在AD老年人中,fNIRS成像却显示出广泛的皮质激活减少,尤其是在PFC和运动皮质^[56]。这提示AD老年人在认知-平衡双任务中大脑的神经功能显著衰退,任务表现也显著下降。进一步的研究发现,AD患者在执行双任务时常表现出皮质去激活的现象,部分脑区的激活水平甚至低于静息态,进一步反映了认知和运动控制的严重障碍^[57]。还有学者将左右两侧的背外侧前额叶皮质(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)作为ROI,比较SCD、MCI和AD 3组老年人的ROI平均激活水平。DLPFC主要参与工作记忆、注意力和执行功能,与双任务处理能力和运动控制密切相关。研究结果发现,3组老年人的左侧DLPFC激活水平差异存在统计学意义,具体表现为SCD组>MCI组>AD组,提示左侧DLPFC可能是认知受损老年人脑皮层损伤的关键^[58-59]。

2.3 平衡受损老年人

影响老年人平衡功能的疾病有脑卒中、帕金森病、痴呆症、眼部疾病(白内障、青光眼等)、下肢骨性关节炎、肌少症等。而在认知-平衡双任务研究中,纳入的平衡受损老年人需要排除会导致认知受损的情况,如脑卒中、帕金森病、痴呆症等。眼部疾病会造成老年人视觉功能受限,而平衡与视觉功能密切相关,在视觉与双任务相关性的研究中,一般不选择眼部疾病患者,而是通过让视觉正常的老年人以闭眼的形式进行研究^[60-61]。有研究显示,仅视觉受限时,老年人平衡表现低于年轻人,而皮质激活水平差异无统计学意义;视觉和本体感觉同时受限时,老年人右侧SMC和右侧PMC激活水平高于年轻人,而平衡表现差异无统计学意义^[62]。下肢骨性

关节炎和肌少症是常见的老年退行性疾病,这2种疾病会降低老年人的双任务表现^[63-65]。然而,鲜有研究利用fNIRS对下肢骨性关节炎和肌少症患者进行观察。利用fNIRS探索患有这2种疾病的老年人在执行认知-平衡双任务时的中枢机制,可能为预防此类老年人跌倒提供新思路。

3 利用fNIRS辅助认知-平衡双任务训练

在认知-平衡双任务训练中,fNIRS主要用于监测大脑皮层的血流变化,这些变化可以反映某种神经机制。通过实时监测大脑特定区域的血流动态,研究者能够获取有关老年人在执行双任务训练时的神经激活模式信息,为训练方案的设计和调整提供客观数据支持。

3.1 反映训练前后皮质激活模式的变化

在认知-平衡双任务训练过程中,fNIRS可以反映训练前后皮质激活模式的变化。例如,通过fNIRS监测ROI的血氧动态变化水平,研究人员能够了解老年人在双任务训练过程中神经资源的动员情况,比较训练前后的脑功能变化,从而判断该训练方法是否能够提升认知功能和姿势控制能力^[66-67]。PARK等^[68]研究了双任务训练对MCI老年人的执行功能和PFC活动的影响,发现其日常活动能力显著改善,且伴随着PFC活动的明显减少。这可能提示老年人中枢神经对信息处理的能力提升,神经资源利用率提高,能够更好地应对双任务产生的DTi。

此外,fNIRS还能够用于长期监测双任务训练的效果。通过多次fNIRS监测,研究者可以观察到训练前后皮质激活水平的变化轨迹,从而反映训练效果的持久性和长期影响^[69]。这对设计持续、长期有效的认知-平衡双任务训练方案具有重要意义。

3.2 基于fNIRS的神经反馈技术探索

神经反馈是一种脑科学研究中的重要方法,它通过测量和分析大脑活动来了解大脑的功能和机制。李鑫鑫和卜令国^[70]认为,fNIRS还可以作为一种神经反馈工具,实时监测大脑特定区域的活动,并将这些信息转化为可视化的反馈信号,如声音、图像或数字等。如果被试的大脑活动朝着预期的方向变化,反馈信号会变得更加积极。例如,声音会更响亮、图像会更明亮等。反之,如果大脑活动偏离了预期方向,反馈信号会变得不那么积极。被试的任务就是通过调整自己的心理状态或行为,来

使反馈信号变得更加积极^[71-72]。例如,在认知-平衡双任务训练中,被试者可能会尝试集中注意力在一个特定的任务上,以提高大脑特定区域的活动水平。研究发现,通过将fNIRS的结果与训练任务反馈结合,被试者可以了解到自己在执行双任务时的神经状态,从而逐步调整和优化自己的表现,最终达到改善认知功能和平衡功能的目的^[73]。总之,理论上双任务结合fNIRS的神经反馈可以提高认知和运动的协同能力,是一种有潜力的神经调节技术。然而,其效果还存在一定的争议,如不同个体的脑血流变化存在统计学差异,可能导致反馈效果不一致,并且难以确定检测到的脑活动是否与特定认知或情绪状态具有直接因果关系。因此,需要更多的临床研究来验证其有效性,并为优化基于fNIRS的神经反馈提供更为完善的参考。

4 小 结

fNIRS作为一种非侵入性、便携式的脑功能检测工具,具有广泛的临床应用潜力。特别是在老年人群中,fNIRS可以探索其在认知-平衡双任务中的皮质激活模式,为采取针对性的跌倒干预措施提供理论基础。此外,fNIRS还可以用于反映双任务训练前后的皮质激活模式变化,为训练方案的设计和调整提供数据支持。

然而,fNIRS在老年人双任务中的应用研究仍然面临一些挑战。首先,纳入的研究在实验设计、样本特征、任务类型和数据分析方法上存在差异,导致试验结果不一致。因此,未来的研究应着重于建立标准化的fNIRS实验方案 and 数据分析流程,以提高研究结果的可比性和可靠性。其次,对于fNIRS辅助双任务训练的临床研究仍然较少,尚未建立正常老年人皮质血流活动的数据库,没有一个标准的皮质血氧变化值的参考区间。同时,新技术“神经反馈”的效果存在一定争议,还需要进行更多的基于fNIRS的双任务研究加以验证。最后,由于fNIRS的空间分辨率有限,且局限于大脑皮层的观察,无法探索到更深层次的脑机制。未来的研究可以探索将fNIRS与其他神经成像工具(如fMRI、EEG)结合使用,以提供更全面的脑功能成像技术。

参考文献

[1] STURNIEKS D L, MENANT J, VALENZUELA M, et al. Effect of cognitive-only and cognitive-motor training on preventing falls in community-dwelling older people: protocol for the smart±step ran-

domised controlled trial [J]. *BMJ Open*, 2019, 9(8): e029409.

[2] PAULSON S, GILLS J L, CAMPITELLI A, et al. Differences in habitual and maximal gait velocity across age groups: a cross-sectional examination [J]. *J Aging Phys Act*, 2023, 31(6): 923-929.

[3] JAYAKODY O, BLUMEN H M, AYERS E, et al. Risk factors for decline in gait speed during walking while talking in older adults [J]. *Gait Posture*, 2022, 96: 67-72.

[4] KOGER A, JOHANNSEN L, KIESEL A, et al. Adjustments of balance control during cognitive dual tasking: evidence from event-related force-plate analysis [J]. *Psychol Res*, 2025, 90(1): 5.

[5] LINDBERG P G, AMIRSHAMIRANIHA N, KREWER C, et al. Increased dual-task interference during upper limb movements in stroke exceeding that found in aging—a systematic review and meta-analysis [J]. *Front Neurol*, 2024, 15: 1375152.

[6] PASHLER H. Dual-task interference in simple tasks: data and theory [J]. *Psychol Bull*, 1994, 116(2): 220-244.

[7] LACOUR M, BERNARD-DEMANZE L, DUMITRESCU M. Posture control, aging, and attention resources: models and posture-analysis methods [J]. *Clin Neurophysiol*, 2008, 38(6): 411-421.

[8] SURI A, VANSWEARINGEN J, ROSANO C, et al. Uneven surface and cognitive dual-task independently affect gait quality in older adults [J]. *Gait Posture*, 2023, 106: 34-41.

[9] BAYOT M, DUJARDIN K, DISSAUX L, et al. Can dual-task paradigms predict falls better than single task: a systematic literature review [J]. *Neurophysiol Clin*, 2020, 50(6): 401-440.

[10] RIEDEL N, HERZOG M, STEIN T, et al. Cognitive-motor interference during walking with modified leg mechanics: a dual-task walking study [J]. *Front Psychol*, 2024, 15: 1375029.

[11] CULIG L, CHU X X, BOHR V A. Neurogenesis in aging and age-related neurodegenerative diseases [J]. *Ageing Res Rev*, 2022, 78: 101636.

[12] ROSSO A L, METTI A L, FAULKNER K, et al. Complex walking tasks and risk for cognitive decline in high functioning older adults [J]. *J Alzheimers Dis*, 2019, 71(s1): S65-S73.

[13] UDINA C, AVTZI S, DURDURAN T, et al. Functional near-infrared spectroscopy to study cerebral hemodynamics in older adults during cognitive and motor tasks: a review [J]. *Front Aging Neurosci*, 2020, 11: 367.

[14] YEUNG M K, CHAN A S. A systematic review of the application of functional near-infrared spectroscopy to the study of cerebral hemodynamics in healthy aging [J]. *Neuropsychol Rev*, 2021, 31(1): 139-166.

[15] KAN C J, ZHU S Z, ZHUANG R, et al. Differences in cortical activation characteristics between younger and older adults during single/dual-tasks: a cross-sectional study based on fNIRS [J]. *Biomed Signal Process Control*, 2025, 99: 106945.

[16] UZUNKULAOĞLU A, KERİM D, AY S, et al. Effects of single-task versus dual-task training on balance performance in elderly patients with knee osteoarthritis [J]. *Arch Rheumatol*, 2020, 35(1): 35-40.

- [17] TAN H X, WEI Q C, CHEN Y, et al. The immediate effects of intermittent Theta burst stimulation of the cerebellar vermis on cerebral cortical excitability during a balance task in healthy individuals: a pilot study [J]. *Front Hum Neurosci*, 2021, 15: 748241.
- [18] BONILAURI A, PIRASTRU A, SANGIULIANO INTRA F, et al. Surface-based integration approach for fNIRS-fMRI reliability assessment [J]. *J Neurosci Meth*, 2023, 398: 109952.
- [19] CHEN Y X, TANG J L, CHEN Y F, et al. Amplitude of fNIRS resting-state global signal is related to EEG vigilance measures: a simultaneous fNIRS and EEG study [J]. *Front Neurosci*, 2020, 14: 560878.
- [20] MENANT J C, MAIDAN I, ALCOCK L, et al. A consensus guide to using functional near-infrared spectroscopy in posture and gait research [J]. *Gait Posture*, 2020, 82: 254-265.
- [21] PINTI P, TACHTSIDIS I, HAMILTON A, et al. The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience [J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2020, 1464(1): 5-29.
- [22] GERMAIN C, PERROT A, TOMASINO C, et al. Effect of the level of physical activity on prefrontal cortex hemodynamics in older adults during single- and dual-task walking [J]. *J Aging Phys Act*, 2023, 31(1): 96-104.
- [23] 刘鑫玥, 霍洪峰. 双重任务介入对人体静态平衡和动态稳定性的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2024, 39(4): 581-584.
LIU X Y, HUO H F. Effect of dual task intervention on static balance and dynamic stability of human body [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2024, 39(4): 581-584.
- [24] 陈茜茜, 陆琰, 鲍春蓉, 等. 健康人平衡任务近红外脑功能成像的系统研究[J]. *中国实用神经疾病杂志*, 2020, 23(12): 1100-1105.
CHEN X X, LU Y, BAO C R, et al. System research of brain activity during standing balance tasks in healthy people [J]. *Chin J Pract Nerv Dis*, 2020, 23(12): 1100-1105.
- [25] 李沁议, 罗思仪, 蒋咏春, 等. 双任务范式在中枢神经疾病中的应用及研究[J]. *康复学报*, 2022, 32(5): 462-470.
LI Q Y, LUO S Y, JIANG Y C, et al. Application and research of dual-task paradigms in central nervous system diseases [J]. *Rehabil Med*, 2022, 32(5): 462-470.
- [26] HUANG R S, HONG K S, YANG D L, et al. Motion artifacts removal and evaluation techniques for functional near-infrared spectroscopy signals: a review [J]. *Front Neurosci*, 2022, 16: 878750.
- [27] 鲁辉, 罗启航, 郑灵雄, 等. 基于功能性近红外光谱成像技术探究脑老化对老年人步行任务的影响机制[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2022, 44(12): 1069-1073.
LU H, LUO Q H, ZHENG L X, et al. Based on functional near infrared spectroscopy imaging technology, this paper explores the mechanism of brain aging on walking tasks of the elderly [J]. *Chin J Phys Med Rehabil*, 2022, 44(12): 1069-1073.
- [28] 陈秀恩, 郑洁皎, 庄雯雯, 等. Stroop范式和躯干控制双任务训练对老年脑卒中患者平衡功能的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35(1): 45-49.
CHEN X E, ZHENG J J, ZHUANG J W, et al. Effects of Stroop paradigm and trunk control dual task training on balance function in elderly stroke patients [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2020, 35(1): 45-49.
- [29] SUI S X, HENDY A M, TEO W P, et al. A review of the measurement of the neurology of gait in cognitive dysfunction or dementia, focusing on the application of fNIRS during dual-task gait assessment [J]. *Brain Sci*, 2022, 12(8): 968.
- [30] 段林茹, 郑洁皎, 徐国会, 等. 感觉的平衡维持优先策略研究[J]. *中国康复理论与实践*, 2017, 23(11): 1241-1244.
DUAN L R, ZHENG J J, XU G H, et al. Sensory preference to balance maintained [J]. *Chin J Rehabil Theory Pract*, 2017, 23(11): 1241-1244.
- [31] SALIHU A T, HILL K D, JABERZADEH S. Effect of cognitive task complexity on dual task postural stability: a systematic review and Meta-analysis [J]. *Exp Brain Res*, 2022, 240(3): 703-731.
- [32] 张芷, 王健, 冯金升. 认知与姿势控制的神经心理学研究进展[J]. *航天医学与医学工程*, 2013, 26(4): 333-337.
ZHANG Z, WANG J, FENG J S. A neuropsychology review of cognition and postural control [J]. *Space Med Med Eng*, 2013, 26(4): 333-337.
- [33] PENG T, ESMAELPOOR J, MAO D, et al. A parametric model for characterizing time-variant single trials of block-design fNIRS experiments [C]//2023 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). Sydney: IEEE, 2023: 1-4.
- [34] BYIERS B J, REICHLER J, SYMONS F J. Single-subject experimental design for evidence-based practice [J]. *Am J Speech Lang Pathol*, 2012, 21(4): 397-414.
- [35] BAEK C Y, KIM H D, YOO D Y, et al. Change in activity patterns in the prefrontal cortex in different phases during the dual-task walking in older adults [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2023, 20(1): 86.
- [36] KAPLAN R I, GIRNIS J, SEBASTIAN A, et al. Patterns of prefrontal cortical activity associated with attention-demanding and motor aspects of dual-task walking as measured with functional near-infrared spectroscopy [J]. *Behav Neurosci*, 2025, 139(6): 245-254.
- [37] LAPANAN K, KANTHA P, NANTACHAI G, et al. The prefrontal cortex hemodynamic responses to dual-task paradigms in older adults: a systematic review and meta-analysis [J]. *Heliyon*, 2023, 9(7): e17812.
- [38] ST-AMANT G, SALZMAN T, MICHAUD L, et al. Hemodynamic responses of quiet standing simultaneously performed with different cognitive loads in older adults [J]. *Hum Mov Sci*, 2022, 82: 102931.
- [39] DUBBIOSO R, PELLEGRINO G, RANIERI F, et al. BDNF polymorphism and interhemispheric balance of motor cortex excitability: a preliminary study [J]. *J Neurophysiol*, 2022, 127(1): 204-212.
- [40] REN L Y, ZHAI Z L, XIANG Q, et al. Transcranial ultrasound

- stimulation modulates the interhemispheric balance of excitability in human motor cortex [J]. *J Neural Eng*, 2023, 20(1):016043.
- [41] ZHAI T Q, ASH-RAFZADEH A, HU X S, et al. Tinnitus and auditory cortex; using adapted functional near-infrared-spectroscopy to expand brain imaging in humans [J]. *Laryngoscope Investig Otolaryngol*, 2021, 6(1): 137-144.
- [42] 邹颖, 李婧, 樊永梅, 等. 健康成人运动想象与运动执行期间的近红外脑功能成像[J]. *中南大学学报(医学版)*, 2022, 47(7): 920-927.
- ZOU Y, LI J, FAN Y M, et al. Functional near-infrared spectroscopy during motor imagery and motor execution in healthy adults [J]. *J Centr South Univ: Med Sci*, 2022, 47(7): 920-927.
- [43] ZHU S Z, WANG Q L, KAN C J, et al. Age-related cerebral changes during different n-back tasks: a functional near-infrared spectroscopy study [J]. *Front Aging Neurosci*, 2024, 16: 1437587.
- [44] ZHANG N Q, YUAN X, LI Q B, et al. The effects of age on brain cortical activation and functional connectivity during video game-based finger-to-thumb opposition movement: a functional near-infrared spectroscopy study [J]. *Neurosci Lett*, 2021, 746: 135668.
- [45] HOLTZER R, KRAUT R, IZZETOGLU M, et al. The effect of fear of falling on prefrontal cortex activation and efficiency during walking in older adults [J]. *Geroscience*, 2019, 41(1): 89-100.
- [46] LU C F, LIU Y C, YANG Y R, et al. Maintaining gait performance by cortical activation during dual-task interference: a functional near-infrared spectroscopy study [J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0129390.
- [47] HOLTZER R, RAKITIN B C, STEFFENER J, et al. Age effects on load-dependent brain activations in working memory for novel material [J]. *Brain Res*, 2009, 1249: 148-161.
- [48] HUANG J, WANG H, CHEN L, et al. Capturing subjective cognitive decline with a new combined index in low education patients with Parkinson's disease [J]. *Front Neurol*, 2024, 15: 1403105.
- [49] JONGSIRIYANYONG S, LIMPAWATTANA P. Mild cognitive impairment in clinical practice: a review article [J]. *Am J Alzheimers Dis Other Demen*, 2018, 33(8): 500-507.
- [50] ZHANG M X, QU Y J, LI Q, et al. Correlation between prefrontal functional connectivity and the degree of cognitive impairment in Alzheimer's disease: a functional near-infrared spectroscopy study [J]. *J Alzheimers Dis*, 2024, 98(4): 1287-1300.
- [51] SALZMAN T, TOBÓN D P, PERREAULT H, et al. Using cognitive-motor dual-tasks and functional near-infrared spectroscopy to characterize older adults with and without subjective cognitive decline [J]. *J Alzheimers Dis*, 2023, 95(4): 1497-1508.
- [52] KANG M J, CHO S Y, CHOI J K, et al. fNIRS assessment during cognitive tasks in elderly patients with depressive symptoms [J]. *Brain Sci*, 2023, 13(7): 1054.
- [53] PARK D C, REUTER-LORENZ P. The adaptive brain: aging and neurocognitive scaffolding [J]. *Annu Rev Psychol*, 2009, 60: 173-196.
- [54] YAP K H, UNG W C, EBENEZER E G M, et al. Visualizing hyperactivation in neurodegeneration based on prefrontal oxygenation: a comparative study of mild Alzheimer's disease, mild cognitive impairment, and healthy controls [J]. *Front Aging Neurosci*, 2017, 9: 287.
- [55] XU G C, ZHOU M, CHEN Y, et al. Brain activation during standing balance control in dual-task paradigm and its correlation among older adults with mild cognitive impairment: a fNIRS study [J]. *BMC Geriatr*, 2024, 24(1): 144.
- [56] KOPPELMANS V, SILVESTER B, DUFF K. Neural mechanisms of motor dysfunction in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: a systematic review [J]. *J Alzheimers Dis Rep*, 2022, 6(1): 307-344.
- [57] FERDINANDO H, MORADI S, KORHONEN V, et al. Altered cerebrovascular-CSF coupling in Alzheimer's disease measured by functional near-infrared spectroscopy [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 22364.
- [58] HUSSAIN B, FANG C, CHANG J L. Blood-brain barrier breakdown: an emerging biomarker of cognitive impairment in normal aging and dementia [J]. *Front Neurosci*, 2021, 15: 688090.
- [59] 高雅新, 王彤, 祁鸣, 等. 认知障碍患者背外侧前额叶功能连接与认知-步行能力的关系研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2021, 36(12): 1487-1495.
- GAO Y X, WANG T, QI M, et al. Relationship between DLPFC functional connectivity and dual task-walking ability in patients with cognitive impairment [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2021, 36(12): 1487-1495.
- [60] ST GEORGE R J, HINDER M R, PURI R, et al. Functional near-infrared spectroscopy reveals the compensatory potential of prefrontal cortical activity for standing balance in young and older adults [J]. *Neuroscience*, 2021, 452: 208-218.
- [61] 王成龙, 聂明剑, 肖辰辉, 等. 静态平衡能力对不同任务介入下老年人步行双任务成本的影响[J]. *协和医学杂志*, 2025, 16(3): 598-605.
- WANG C L, NIE M J, XIAO C H, et al. Effect of static balance ability on dual-task costs under different walking task interventions in Chinese older adults [J]. *Med J PUMCH*, 2025, 16(3): 598-605.
- [62] 吉莹, 郭川, 朱仕哲, 等. 不同感觉策略下认知-平衡双任务的年龄相关性差异分析[J]. *中国康复*, 2024, 39(10): 579-583.
- JI Y, GUO C, ZHU S Z, et al. Analysis of age-related differences in cognitive-balance dual-tasks with different sensory strategies [J]. *Chin J Rehabil*, 2024, 39(10): 579-583.
- [63] HIYAMA Y, YAMADA M, KITAGAWA A, et al. A four-week walking exercise programme in patients with knee osteoarthritis improves the ability of dual-task performance: a randomized controlled trial [J]. *Clin Rehabil*, 2012, 26(5): 403-412.
- [64] WANG X B, HOU M J, CHEN S Q, et al. Effects of Tai Chi on postural control during dual-task stair negotiation in knee osteoarthritis: a randomised controlled trial protocol [J]. *BMJ Open*, 2020, 10(1): e033230.
- [65] CADORE E L, CASAS-HERRERO A, ZAMBOM-FERRARESI F, et al. Multicomponent exercises including muscle power train-

- ing enhance muscle mass, power output, and functional outcomes in institutionalized frail nonagenarians [J]. *Age (Dordr)*, 2014, 36(2):773-785.
- [66] TECHAYUSUKCHAROEN R, IIDA S, AOKI C. Observing brain function *via* functional near-infrared spectroscopy during cognitive program training (dual task) in young people [J]. *J Phys Ther Sci*, 2019, 31(7):550-555.
- [67] SUN R F, LI X L, ZHU Z M, et al. Effects of dual-task training in patients with post-stroke cognitive impairment: a randomized controlled trial [J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 1027104.
- [68] PARK J H. Effects of cognitive-physical dual-task training on executive function and activity in the prefrontal cortex of older adults with mild cognitive impairment [J]. *Brain Neurorehabil*, 2021, 14(3):e23.
- [69] KIM J, LEE J, LEE G, et al. Relationship between lower limb muscle activity and cortical activation among elderly people during walking: effects of fast speed and cognitive dual task [J]. *Front Aging Neurosci*, 2022, 14: 1059563.
- [70] 李鑫鑫, 卜令国. 基于 fNIRS 和神经反馈的记忆认知训练研究[J]. *中国医疗器械杂志*, 2024, 48(2): 132-137.
- LI X X, PU L G. Research on memory cognitive training based on fNIRS and neurofeedback [J]. *Chin J Med Instrum*, 2024, 48(2): 132-137.
- [71] HOU X, XIAO X, GONG Y L, et al. Functional near-infrared spectroscopy neurofeedback enhances human spatial memory [J]. *Front Hum Neurosci*, 2021, 15: 681193.
- [72] LI K S, YANG J H, BECKER B, et al. Functional near-infrared spectroscopy neurofeedback of dorsolateral prefrontal cortex enhances human spatial working memory [J]. *Neurophotonics*, 2023, 10(2):025011.
- [73] LEE I, KIM D, KIM S, et al. Cognitive training based on functional near-infrared spectroscopy neurofeedback for the elderly with mild cognitive impairment: a preliminary study [J]. *Front Aging Neurosci*, 2023, 15: 1168815.

Application of Functional Near-Infrared Spectroscopy in the Cognition-Balance Dual-Task of the Elderly

KAN Chaojie^{1,2}, ZHU Shizhe^{2,3}, WANG Qinglei^{2,3}, GENG Ayan², WANG Tong^{2,3}, GUO Chuan^{2,3*}

¹ Changzhou De'an Hospital, Changzhou, Jiangsu 213004, China;

² School of Rehabilitation Medicine, Nanjing Medical University, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

³ The First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing, Jiangsu 210029, China

*Correspondence: GUO Chuan, E-mail: guochuan@njmu.edu.cn

ABSTRACT The risk of falls in older adults correlates with diminished multitasking abilities. The cognitive-balance dual-task paradigm enables fall risk assessment through dual-task interference, the mechanism of which is linked to competition for attentional resources or neural pathways. Cognitive-balance dual-task training improves related functional abilities in older adults, making the elucidation of its brain activation mechanisms crucial for fall prevention interventions. Clinically, functional magnetic resonance imaging (fMRI), electroencephalography (EEG), and functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) are commonly used to explore related neural mechanisms. Among these, fNIRS is particularly suitable for dual-task monitoring due to its advantages of portability and superior anti-artifact performance. This review summarizes key design considerations and application methods for fNIRS in cognitive-balance dual-task studies among older adults, offering recommendations for fall risk assessment and prevention. Standardized experimental paradigms, research designs, and regions of interest selection for fNIRS in cognitive-balance dual-tasks among older adults are progressively emerging. fNIRS analysis reveals distinct central mechanisms across elderly individuals with varying health status: cognitively healthy subjects exhibit compensatory bilateral prefrontal activation, while those with cognitive impairment (including those with subjective cognitive decline, mild cognitive impairment, and Alzheimer's disease) show diminishing activation levels corresponding to cognitive decline. Patients with Alzheimer's disease present widespread cortical activation deficits, and individuals with balance impairment exhibit distinct activation patterns in specific brain regions. fNIRS also supports dual-task training by reflecting cortical activation changes before and after training. Its neurofeedback technology holds potential applications but remains controversial. Current research faces challenges such as inconsistent experimental designs sample features, task types. Future efforts should be made to establish standardized protocols and explore combined multi-technique applications to provide theoretical support for fall risk assessment and prevention in older adults.

KEY WORDS cognition; balance; dual-task; functional near-infrared spectroscopy; older adults

DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.01009