

· 临床研究 ·

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

鲁辉¹ 罗启航¹ 郑灵雄² 黄杏琛¹ 欧海宁¹ 林强¹ 梁俊杰¹

¹广州医科大学附属第五医院康复医学科, 广州 510700; ²贵航集团 302 医院康复医学科, 安顺 561000

通信作者: 梁俊杰, Email: lj88961@gzhmu.edu.cn

【摘要】 目的 基于功能性近红外光谱成像(fNIRS)技术探究脑老化对老年人步行任务的影响机制。**方法** 招募 20 例健康老年人和 22 例健康年轻人, 分别对 2 组受试者进行简明智力状态检查量表(MMSE)评分、站立步行试验(TUGT)、快速和自选速度 10 m 步行试验(10MWT)以及 GaitRite 步态参数采集和步行同步功能性近红外光谱成像(fNIRS)试验, 分析和比较 2 组受试者的前额叶认知区(PFC)和运动区初级运动皮质(MC)功能连接强度以及步态参数之间的差异。**结果** 在步态分析参数中, 老年组的步频较青年组明显增高($Z = -2.067, P = 0.039$)。在脑网络数据中, 老年组在同源 ROI 中 RPFC 的 FC 值低于青年组($t = 2.65, P < 0.05$), 且老年组在异源 ROI 中的 RMC-RPFC($t = 2.62, P = 0.04$)和 RPFC-LPFC($t = 2.69, P = 0.04$)FC 值亦低于青年组, 且差异均有统计学意义($P < 0.05$)。**结论** 老年人正常步行时出现 RPFC 及其相关脑区的 FC 值减少, 可能属于脑老化早期脑网络激活模式。

【关键词】 脑老化; 运动控制; 近红外光谱成像, 功能性; 功能连接

基金项目: 广州市卫生健康科技项目(20211A011105; 20211A011106); 2019 年广东省普通高校青年创新人才类项目(2019KQNCX119); 广东省医学科研基金项目(B2021007); 广州市基础研究计划市校(院)联合资助基础项目(202102010100); 广州市医学重点学科(2021-2023 年); 广东高校生物靶向诊治与康复重点实验室(2021KSYS009)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.12.003

The effect of brain aging on the brain's walking network as revealed by functional near infrared spectroscopy

Lu Hui¹, Luo Qihang¹, Zheng Lingxiong², Huang Xingshen¹, Ou Haining¹, Lin Qiang¹, Liang Junjie¹

¹Department of Rehabilitation Medicine of the Fifth Affiliated Hospital of Guangzhou Medical University, Guangzhou 510700, China; ²Department of Rehabilitation Medicine of China Guihang Group 302 Hospital, Anshun 561000, China

Corresponding author: Liang Junjie, Email: lj88961@gzhmu.edu.cn

【Abstract】 Objective To explore any effect of brain aging on the brain's walking network and its mechanism. **Methods** Twenty healthy elderly people and 22 healthy young adults formed an elderly group and a youth group. All were evaluated using the Mini-Mental State Examination (MMSE), the Timed Up and Go test (TUGT), the 10-metre walk test (10MWT), the functional near infrared spectroscopy walking synchrony test and GaitRite gait parameters. The intensity of functional connections and the gait parameters of the prefrontal cortex (PFC) and the primary motor cortex (MC) were compared between the two groups. **Results** Compared with the youth group, the average cadence of the elderly group was significantly faster. The FC value of the RPFC in the homologous ROI, as well as those of the RMC-RPFC and RPFC-LPFC in the heterologous ROI of the elderly group were significantly lower than in the youth group. **Conclusions** Lower FC values in the RPFC and its associated brain regions in the elderly during normal walking may be what activates the brain's walking network in the early stage of brain aging.

【Key words】 Brain aging; Motor control; Near-infrared spectroscopy, functional; Functional connections; Walking

Funding: A General Guidance Project of Guangzhou's Health and Family Planning Commission (20211A011105 and 20211A011106), Guangdong Provincial Department of Education (2019KQNCX119), a Guangdong Provincial Medical Research Fund project (B2021007), Guangzhou's Basic Research Program Funding for the City and its Universities (202102010100), the Key Medical Disciplines of Guangzhou (2021-2023) at Key Laboratories of Guangdong Higher Education Institutes (2021KSYS009)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2022.12.003

步行是人类特征性活动,其控制包括中枢命令、身体平衡及协调控制,涉及下肢各关节和肌肉的协同运动^[1]。脑老化早期会出现步行功能减退的表现,增加步行跌倒风险,导致骨折、脊髓损伤、颅脑损伤等严重后果^[2]。脑老化对于步行过程的影响机制目前尚不清楚,对脑老化和步行功能的研究和早期监测可有效降低跌倒事件发生风险^[3]。

采用功能性近红外光谱成像 (functional near-infrared spectroscopy, fNIRS) 进行运动状态下任务的监测是近年来较为热门的一种脑功能成像技术,可用于动态任务范式下的脑网络评估^[4]。本研究采用步行同步 fNIRS 作为主要实验方法,评估老年人在步行过程中认知区和运动区的脑网络情况,从而深入探讨脑老化对步行能力和运动控制的脑网络机制,为老年化的临床研究提供理论依据。

对象与方法

一、研究对象与分组

于 2022 年 1 月至 2022 年 4 月广州医科大学附属第五医院招募 20 例健康老年人和 22 例健康年轻人,分别设为老年组和青年组,其中 1 例老年人的站立步行试验 (timed up and go test, TUGT) 数据丢失。2 组受试者的一般临床资料详见表 1,其中除快速 10 m 步行试验 (10 meter walk test, 10MWT) 符合正态分布外,简明智力状态检查量表 (mini-mental state examination, MMSE) 总分、TUGT、自选速度的 10MWT 等其余数据均不符合正态分布。所有受试者均已签署实验知情同意书。本研究方案已通过广州医科大学附属第五医院医学伦理委员会审核批准 (KY01-2021-03-20),并通过中国临床试验中心注册 (ChiCTR2200058088)。

二、实验设备

使用 fNIRS 成像设备为便携式 fNIRS (NirSmart 丹阳慧创, 中国), 以 730 nm 和 850 nm 两种不同波长的近红外光形成信号,由 10 个探测器和 12 个发射器组成 24 通道,分布于兴趣区 (regions of interest, ROI), ROI 设置为双侧 PFC 和 MC,采样频率为 11 Hz。本研究中的 MC 包含初级运动皮质和运动前区。

使用 GaitRite 步态分析系统采集步态参数^[5], GaitRite 系统是一套为步态分析提供精确和方便的多个参数记录的压力反馈电子步态系统。系统主要构成

为电子步道 (长 975 cm, 宽 61 cm)、传感器数据组、数据组控制器、网络控制器、接口电缆。

三、实验方法

1. 临床评估: 所有受试者均进行 10MWT^[6]、TUGT^[7]、MMSE 评估^[8]以及步行同步 fNIRS 试验^[9]和 GaitRite 步态分析^[10]。

2. 步行同步的 fNIRS 试验: 步行同步 fNIRS 任务设计采用 Block 形式,即首先采集静息态数据 10 s,作为基线;然后采集步行试验时任务状态数据 30 s,接着采集站立静止状态数据 30 s,作为 1 个试验,重复 4 次试验,共 250 s。

操作流程: 研究者向受试者介绍试验流程,使受试者可配合完成试验。给受试者佩戴 fNIRS 并确定通道有效性后,指导其站在开始线位置并调整站姿,让受试者根据语音提示完成一次完整步行同步 fNIRS 任务 Block 范式,嘱咐受试者试验过程中除行走和站立外无多余动作。采集双侧前额叶 (prefrontal cortex, PFC) 和运动皮质 (motor cortex, MC) 的含氧血红蛋白和去氧血红蛋白浓度。

3. GaitRite 步态参数采集试验流程: 布置 GaitRite 步态分析系统并输入受试者基本信息 (姓名、性别、生日、身高、体重、腿长), 指导受试者站在电子步道前,启动系统后向受试者发出“开始步行”的指令,受试者沿步道匀速步行直至走出软垫,同步采集步态参数。以上作为一个试验,重复 3 次试验,取最佳结果作为目标数据。

四、观测指标

1. 10MWT: 分自选速度步行和快速步行两组,各记录 3 次用时,单位为秒 (s),取 3 次用时平均值作为最终结果。

2. TUGT: 记录 3 次试验用时,单位为秒 (s),取 3 次平均值作为最终结果。

3. GaitRite 步态参数: 采集关键时空学数据^[5],包括步速和步频;通过对称性指数 (symmetry index, SI) 计算左右脚步态时空学参数,包括步时、步长、单支撑相、双支撑相、摆动相、站立相。

4. fNIRS: 使用 NirSpark 软件对 fNIRS 数据进行预处理^[11]。去除时间间隔和运动伪迹,将原始光信号转化为光密度曲线,使用带通滤波 (0.1~0.2 Hz) 过滤生理干扰,最后通过 Hemo 模块计算含氧血红蛋白和去氧血红蛋白的浓度,结合区组块 (Block) 计算特征值。

表 1 2 组受试者的一般临床资料

组别	例数	性别 (例)		平均年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	MMSE 总分 (分, $\bar{x} \pm s$)	TUGT (s, $\bar{x} \pm s$)	自选速度 10MWT (s, $\bar{x} \pm s$)	快速 10MWT (s, $\bar{x} \pm s$)
		男	女					
青年组	22	11	11	21.46 $\pm$ 0.91	29.27 $\pm$ 0.99	7.14 $\pm$ 1.06	4.37 $\pm$ 0.59	3.26 $\pm$ 0.36
老年组	20	8	12	59.53 $\pm$ 8.63 ^a	26.84 $\pm$ 2.73 ^a	8.87 $\pm$ 1.42 ^a	4.79 $\pm$ 0.4 ^b	3.86 $\pm$ 0.57 ^b

注:与青年组比较,^a $P < 0.001$,^b $P < 0.01$

fNIRS 脑网络数据处理:在功能性脑网络分析模块中定义 ROI,分别为左侧前额叶皮质(left prefrontal cortex, LPFC)、右侧前额叶皮质(right prefrontal cortex, RPFC)、左侧初级运动皮质区(right primary motor cortex, LMC)和右侧初级运动皮质区(right primary motor cortex, RMC),左右 PFC 区各分布 4 通道,而左右 MC 区各分布 8 通道;然后计算各 ROI 脑区的氧合血红蛋白(oxyhemoglobin, HbO₂)信号均值,通过 HbO₂ 信号均值计算同源 ROI 和异源 ROI 的功能连接(functional connectivity, FC)值。

五、统计学方法

使用 SPSS 25.0 版统计软件对所得数据进行统计学分析处理,用 GraphPad 8.0 绘制数据结果图。将所有受试者的 10MWT、TUGT、MMSE、脑网络 FC 值、GaitRite 步态参数进行正态检验,计量资料用($\bar{x}\pm s$)表示。符合正态分布的数据使用 t 检验;不符合正态分布的数据使用秩和检验进行分析。FC 数据通过 NirSpark 软件中组分析进行处理,使用独立样本 t 检验和错误发现率(false discovery rate, FDR)矫正。 $P<0.05$ 认为差异有统计学意义。

结 果

一、GaitRite 步态参数比较

将处理后的步态参数进行统计分析,结果显示老年组的步频(步/min)明显高于青年组(Z 值 = -2.067, $P=0.039$),组间差异有统计学意义($P<0.05$)。其余数据差异未见明显统计学意义($P>0.05$)。

二、同源 ROI 脑网络 FC 值组间比较

老年组在 RPFC 中的 FC 值低于青年组($t=$

2.65),差异有统计学意义($P<0.05$),其余脑区的 FC 值差异无统计学意义($P>0.05$),具体数据详见表 3。

三、异源 ROI 脑网络 FC 值组间比较

结果显示,老年组在 RMC-RPFC($t=2.62, P=0.04$)和 RPFC-LPFC($t=2.69, P=0.04$)中的 FC 值低于青年组,差异有统计学意义($P<0.05$);其余异源 ROI 区域的 FC 值组间比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。具体数据详见表 4。

四、2 组受试者 ROI 区的功能连接脑网络

如图 1 所示,青年组脑网络可见 RMC-LMC 和 RPFC-LPFC 之间的脑网络连接较强(图 1a 和图 1b),而老年组仅有 RMC-LMC 脑网络明显(图 1c);结合通道间功能连接图比较,结果显示老年组通道内功能连接激活程度较低(图 1b 和图 1d)。2 组间的脑网络连接图(图 1e)提示具有差异的为 RMC-RPFC 和 RPFC-LPFC。

讨 论

大脑皮质参与控制步行的两种不同运动途径^[12]: ①直接运动路径,主要负责非病理状态下步行,属于自动化控制,涉及初级运动皮质、小脑和脊髓的参与;②间接运动路径,属于执行控制,当退化、病理改变或挑战性步行等原因引起自动化控制不足以满足步行需求时,间接运动路径会被激活,进行功能补偿,涉及辅助运动区、运动前区、PFC 和基底神经节,相关 fNIRS 研究已有报道^[9]。随着年龄的增加,大脑逐渐发生结构性和功能性退化,进而运动控制和认知功能下降,导致老年人步行过程中的运动控制和认知功能下降^[13],同时可能合并脑网络退化。

表 2 2 组受试者 GaitRite 步态参数比较($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	步速(cm/s)	步频(步/min)	不对称系数 SI					
				步时	步长	单支撑相	双支撑相	摆动相	站立相
青年组	22	121.74±13.70	113.38±6.63	0.01±0.02	0±0.03	0±0.03	0.01±0.03	0±0.03	0±0.02
老年组	20	123.54±15.57	116.92±6.45 ^{a#}	0±0.04 [#]	0.01±0.04 [#]	0.01±0.03	0±0.02	0±0.04	0.01±0.03

注:与青年组比较,^a $P<0.05$;[#]为采用秩和检验,其余采用 t 检验

表 3 2 组受试者同源 ROI 脑区 FC 值比较($\bar{x}\pm s$)

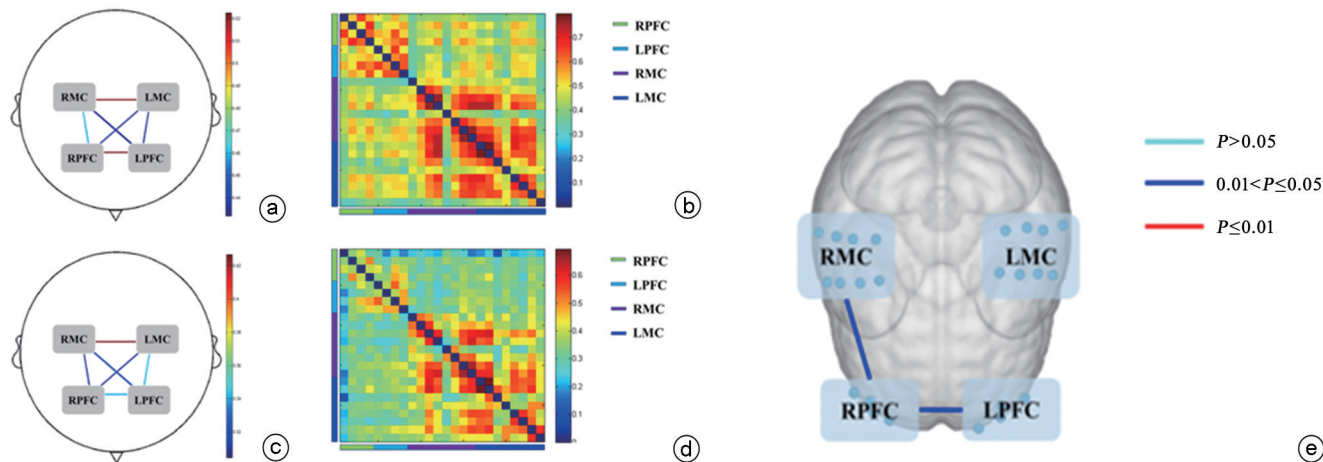
组别	例数	LMC	LPFC	RMC	RPFC
青年组	22	0.56±0.22	0.58±0.21	0.56±0.16	0.59±0.25
老年组	20	0.48±0.17	0.45±0.21	0.46±0.20	0.39±0.23 ^a

注:与青年组比较,^a $P<0.05$

表 4 2 组受试者异源 ROI 脑区 FC 值比较($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	RMC-LMC	LMC-RPFC	LMC-LPFC	RMC-RPFC	RMC-LPFC	LPFC-RPFC
青年组	22	0.52±0.17	0.43±0.18	0.44±0.20	0.46±0.17	0.43±0.16	0.52±0.22
老年组	20	0.43±0.16	0.31±0.21	0.34±0.15	0.31±0.20 ^a	0.32±0.18	0.34±0.22 ^a

注:与青年组比较,^a $P<0.05$



注:图 a 为青年组 ROI 区脑网络连接图;图 b 为青年组功能连接强度示意图;图 c 为老年组 ROI 区脑网络连接图;图 d 为老年组功能连接强度示意图;图 e 为两组受试者组分析后 ROI 区脑网络连接图(经 FDR 校正后)

图 1 2 组受试者功能连接脑网络图

本研究临床评估量表结果表明,健康老年组的 MMSE 评分、TUGT 评分、10MWT(自选速度、快速)等指标明显低于健康青年组,提示老年人在认知、步行功能已有退化趋势,跌倒风险高于健康年轻人。结合步态参数分析结果发现,健康老年组的步频明显增快,但步速、对称性指数与健康青年组相比并无差异,说明健康老年组的步行功能仍处于健康青年组相当水平;步行同步 fNIRS 数据分析显示,健康老年组 RPFC 功能连接弱于健康青年组,但双侧 MC 仍未见明显差异,考虑可能是因为认知功能退化比运动退化更早出现。Caliandro 等^[14]研究发现,PFC 激活与步态代偿机制相关,PFC 可能参与步行过程中运动控制,有助于维持步行稳定性。在步态维持的认知控制中 PFC 起关键作用^[15],其功能连接减弱与认知功能下降相关。Poole 等^[16]研究亦发现,老年人在进行双任务步行时,认知负荷与步行运动网络、注意和执行网络之间的 FC 增加相关,提示运动与认知网络之间的连接强度对维持正常步行能力的重要性。

本研究结果显示,健康老年组同源 ROI 中 RPFC 的 FC 值明显低于健康青年组($P < 0.05$),提示 RPFC 可能容易受脑老化影响,导致老年人在步行过程中该脑区网络功能连接减弱。Liu 等^[17]也发现轻度认知障碍老年人在步行双任务过程中的脑网络 FC 减弱,以 RPFC-RMC 明显,且出现对称性指数的改变,提示右侧大脑半球脑网络退化较左侧显著,与本研究结果相似。Maruya 等^[18]在老年人步行双任务中也观察到双侧 PFC 功能活动的差异,说明老年人步行时 PFC 存在偏侧化激活,说明 RPFC 激活可能与代偿功能大小相关。

Koren 等^[19]研究发现,健康年轻人在复杂步行时双侧 PFC 激活显著增高,且 RPFC 比 LPFC 明显,提示

RPFC 是主要功能代偿脑区。当 RPFC 脑网络连接减弱时,RPFC 的代偿效应不足以应对复杂步行条件,可能导致老年人跌倒风险增加。此外,Takeuch 等^[20]研究发现,RPFC 激活与躯干摆动加速度呈负相关,考虑 RPFC 功能是影响步态稳定的相关因素。可见,步行任务下 RPFC 脑网络 FC 可能属于脑老化的早期监测指标。

本研究结果还显示,步行时健康老年组在异源 ROI 中 RMC-RPFC 和 RPFC-LPFC 的 FC 低于健康青年组,结合 RPFC 在同源 ROI 中 FC 明显降低的结果,提示在老年人步行过程中与 RPFC 相关的脑区功能交互减少。当 RPFC 作为关键脑网络连接点时,可能影响其他脑区节点功能交互强度。Liu 等^[17]研究也发现轻度认知障碍老年人在命名步行双任务过程中,RPFC-RMC 的 FC 值显著降低,与本研究结果相似;存在明显 RPFC 相关脑网络退化趋势,可能与认知功能受损存在相关性。

Takeuch 等^[20]研究发现,老年人 PFC 激活模式呈非偏侧化,在双任务时仅能维持步行表现,无法保证认知任务的正常进行。这提示 RPFC 相关脑区可能更加侧重认知加工,当脑老化发生时,老年人脑网络资源有限时会选择优先维持步行稳定性^[21]。结合本研究结果,与年轻人对比,老年人在异源 ROI 中双侧 MC 和 PFC 的功能交互强度均呈减弱趋势,但仅有 RMC-RPFC 和 RPFC-LPFC 的 FC 值差异具有统计学意义($P < 0.05$),考虑可能是老年人在本研究 ROI 中呈现脑网络功能交互减少的发展趋势,也是脑老化发生的脑网络表现。Yang 等^[22]在 fMRI 研究亦发现,老年人在视觉、感觉和运动功能脑网络均有减弱,且存在广泛退化趋势。当 RPFC 相关脑区参与步行加工的交互减

少,可能处于脑老化早期脑网络激活模式。

综上所述,随年龄升高所带来的脑功能老化改变,影响老年人的步行和认知功能^[23]。老年人在步行时出现 RPFC 激活减弱和其相关脑区交互的 FC 值减少,可能属于脑老化早期脑网络激活模式。本研究采用横向设计,对比健康老年人与健康年轻人在单纯步行中脑网络机制的差异性,结果发现老年人在异源 ROI 中存在全脑退化趋势,后期研究可考虑扩大样本量和感兴趣脑区深入发掘脑老化的脑机制。另外,本研究还发现 RPFC 及其相关脑区的功能连接差异,可能属于脑老化特征性改变,未来研究可考虑验证这种特异性改变是否能作为脑老化早期筛查的特异性指标。

参 考 文 献

- [1] 王艳. 认知双任务训练对脑卒中恢复期患者步行控制能力的影响 [D]. 上海: 上海体育学院, 2021. DOI: 10.27315/d.cnki.gstyx.2021.000514.
- [2] Xiao Y, Luo Q, Yu Y, et al. Effect of baduanjin on the fall and balance function in middle-aged and elderly people: A protocol for systematic review and meta-analysis [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2021, 100 (37): e27250. DOI: 10.1097/md.00000000000027250
- [3] 吴跃迪, 刘腊梅, 王珍珠, 等. 老年人衰弱和跌倒相关性研究进展 [J]. *全科护理*, 2021, 19 (24): 3377-3380. DOI: 10.12104/j.issn.1674-4748.2021.24.015.
- [4] Koenraadt KL, Roelofsen EG, Duysens J, et al. Cortical control of normal gait and precision stepping: an fNIRS study [J]. *Neuroimage*, 2014, 85 Pt 1: 415-422. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2013.04.070
- [5] Lee D, Lee G. Effect of afferent electrical stimulation with mirror therapy on motor function, balance, and gait in chronic stroke survivors: a randomized controlled trial [J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2019, 55 (4): 442-449. DOI: 10.23736/s1973-9087.19.05334-6
- [6] Amatachaya S, Kwanmongkolthong M, Thongjumnroon A, et al. Influence of timing protocols and distance covered on the outcomes of the 10-meter walk test [J]. *Physiother Theory Pract*, 2020, 36 (12): 1348-1353. DOI: 10.1080/09593985.2019.1570577
- [7] Browne W, Nair BKR. The timed up and go test [J]. *Med J Aust*, 2019, 210 (1): 13-14. e11. DOI: 10.5694/mja2.12045
- [8] Li H, Jia J, Yang Z. Mini-mental state examination in elderly Chinese: a population-based normative study [J]. *J Alzheimers Dis*, 2016, 53 (2): 487-496. DOI: 10.3233/jad-160119
- [9] Pelicioni PHS, Tijsma M, Lord SR, et al. Prefrontal cortical activation measured by fNIRS during walking: effects of age, disease and secondary task [J]. *PeerJ*, 2019, 7: e6833. DOI: 10.7717/peerj.6833
- [10] Cleland BT, Arshad H, Madhavan S. Concurrent validity of the GAITRite electronic walkway and the 10-m walk test for measurement of walking speed after stroke [J]. *Gait Posture*, 2019, 68: 458-460. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.12.035
- [11] Lin Q, Zhang Y, Zhang Y, et al. The frequency effect of the motor imagery brain computer interface training on cortical response in healthy subjects: a randomized clinical trial of functional near-infrared spectroscopy study [J]. *Front Neurosci*, 2022, 16: 810553. DOI: 10.3389/fnins.2022.810553
- [12] Herold F, Wiegel P, Scholkman F, et al. Functional near-infrared spectroscopy in movement science: a systematic review on cortical activity in postural and walking tasks [J]. *Neurophotonics*, 2017, 4 (4): 041403. DOI: 10.1117/1.NPh.4.4.041403
- [13] Rodriguez-Sabate C, Morales I, Sanchez A, et al. The functional interaction of the brain default network with motor networks is modified by aging [J]. *Behav Brain Res*, 2019, 372: 112048. DOI: 10.1016/j.bbr.2019.112048
- [14] Caliendo P, Serrao M, Padua L, et al. Prefrontal cortex as a compensatory network in ataxic gait: a correlation study between cortical activity and gait parameters [J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2015, 33 (2): 177-187. DOI: 10.3233/rmn-140449
- [15] Holtzer R, Schoen C, Demetriou E, et al. Stress and gender effects on prefrontal cortex oxygenation levels assessed during single and dual-task walking conditions [J]. *Eur J Neurosci*, 2017, 45 (5): 660-670. DOI: 10.1111/ejn.13518
- [16] Poole VN, Lo OY, Wooten T, et al. Motor-cognitive neural network communication underlies walking speed in community-dwelling older adults [J]. *Front Aging Neurosci*, 2019, 11: 159. DOI: 10.3389/fnagi.2019.00159
- [17] Liu Y, Huo C, Lu K, et al. Correlation between gait and near-infrared brain functional connectivity under cognitive tasks in elderly subjects with mild cognitive impairment [J]. *Front Aging Neurosci*, 2021, 13: 482447. DOI: 10.3389/fnagi.2021.482447
- [18] Maruya K, Arai T, Fujita H. Brain activity in the prefrontal cortex during cognitive tasks and dual tasks in community-dwelling elderly people with pre-frailty: a pilot study for early detection of cognitive decline [J]. *Healthcare*, 2021, 9 (10): 1250. DOI: 10.3390/healthcare9101250
- [19] Koren Y, Parmet Y, Bar-Haim S. Treading on the unknown increases prefrontal activity: a pilot fNIRS study [J]. *Gait Posture*, 2019, 69: 96-100. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2019.01.026
- [20] Takeuchi N, Mori T, Suzukamo Y, et al. Parallel processing of cognitive and physical demands in left and right prefrontal cortices during smartphone use while walking [J]. *BMC Neurosci*, 2016, 17: 9. DOI: 10.1186/s12868-016-0244-0
- [21] Belli V, Orcioli-Silva D, Beretta VS, et al. Prefrontal cortical activity during preferred and fast walking in young and older adults: an fNIRS study [J]. *Neuroscience*, 2021, 473: 81-89. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2021.08.019
- [22] Yang AC, Tsai SJ, Liu ME, et al. The association of aging with white matter integrity and functional connectivity hubs [J]. *Front Aging Neurosci*, 2016, 8: 143. DOI: 10.3389/fnagi.2016.00143
- [23] 宇佳利, 王磊. 认知老化的发生机制及影响因素研究进展 [J]. *中国老年学杂志*, 2018, 38 (18): 4595-4598. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9202.2018.18.086.

(修回日期: 2022-08-23)

(本文编辑: 汪 玲)