

研究论著

DOI: 10.3969/j.issn.0253-9802.2024.04.008

基于 fNIRS 对女性不同膀胱状态下盆底肌收缩任务的前额叶激活情况

徐正娴 潘伟婷 于灿灿 周星辰 石娇 王敏 陈尚杰

【摘要】 目的 为探讨前额叶在人体控尿功能中发挥的作用提供神经影像学依据。方法 利用近红外脑功能成像技术 (fNIRS) 收集 20 名健康成年女性志愿者膀胱充盈和空虚状态下盆底肌收缩时大脑前额皮层的血流动力学数据, 并对数据进行相应的处理, 通过分析各个通道所提取的氧合血红蛋白浓度的相对变化量所对应的 Beta 值, 对比前额叶不同脑区间激活情况差异。结果 膀胱充盈状态下前额皮层共有 30 个通道激活, 膀胱空虚状态下前额皮层共有 8 个通道激活 (P 均 < 0.05), 其中共同激活通道有 7 个; 相较于空虚状态, 膀胱充盈时的前额叶激活更明显, 且以右侧脑区激活为主, 差异主要体现在右侧背外侧前额叶和额极 (P 均 < 0.05)。结论 盆底肌收缩运动可以使大脑前额皮层被激活。当膀胱处于充盈状态时大脑前额皮层可能会通过神经反射活动感知膀胱的压力变化, 从而参与调控盆底肌的自主舒缩运动, 实现其在人体控尿功能中的作用, 其中右侧背外侧前额叶脑区在此过程中发挥的作用可能更为明显。

【关键词】 近红外脑功能成像技术; 前额叶; 盆底肌收缩; 膀胱状态; 女性

fNIRS-based study of prefrontal cortex activation during pelvic floor muscle contraction in women under different bladder states Xu Zhengxian[△], Pan Weiting, Yu Cancan, Zhou Xingchen, Shi Jiao, Wang Min, Chen Shangjie.[△] Graduate School, Bengbu Medical College, Bengbu 233000, China

Corresponding author: Chen Shangjie, E-mail: csjmesz@sina.com

【Abstract】 **Objective** To provide a neuroimaging basis for exploring the role of the prefrontal cortex in human urinary control function. **Methods** Hemodynamic data from the prefrontal cortex of the brain during the task of pelvic floor muscle contraction from 20 healthy female volunteers were collected using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) under two different states of bladder filling and emptying, and these data were processed accordingly to compare the differences in the activation state among different brain compartments of the prefrontal cortex by analyzing the Beta values corresponding to the relative amount of changes in the concentration of oxyhemoglobin extracted from each individual channel. **Results** A total of 30 channels were activated during bladder filling, whereas 8 channels were activated during bladder emptying (all $P < 0.05$), including 7 co-activated channels. The prefrontal cortex activation was more significant during bladder filling than bladder emptying, and the activation was predominantly in the right prefrontal cortex, with the differences mainly in the right dorsolateral prefrontal cortex and frontopolar cortex (all $P < 0.05$). **Conclusions** The prefrontal cortex can be activated by pelvic floor muscle contraction. Under the state of bladder filling, the prefrontal cortex may perceive the pressure change of the bladder through neural reflex activity and thus participate in the regulation of the voluntary pelvic floor muscle contraction, plays a role in human urinary control function. The right dorsolateral prefrontal cortex region possibly plays a more significant role in this process.

【Key words】 Functional near-infrared spectroscopy; Prefrontal cortex; Pelvic floor muscle contraction; Bladder state; Female

人脑高级中枢能够通过完整的反射弧接受来自膀胱壁上的压力感受器信号, 并对其做出反馈参与调控人体的排尿和储尿行为。现有理论认为

膀胱自然充盈到 400~500 mL 时, 膀胱壁的压力感受器会产生兴奋, 通过传入神经至相应的脊髓节段再到脑干的中脑导管周围灰质区 (PAG), 上

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (81973922); 深圳市宝安区卫生健康局区医学重点学科 (2022-2025) 专项

作者单位: 233000 蚌埠, 蚌埠医学院研究生院 (徐正娴, 于灿灿, 周星辰, 陈尚杰); 518000 深圳, 深圳大学第二附属医院康复科 (潘伟婷, 石娇, 陈尚杰); 233000 蚌埠, 蚌埠医学院第一附属医院康复科 (王敏)

通信作者: 陈尚杰, E-mail: csjmesz@sina.com

传至大脑皮层进行信息整合,对是否排尿做出判断^[1]。此过程中的任一流程出现问题均会导致人体的排尿功能出现障碍。研究表明,70%~84%的脊髓损伤患者伴有神经源性下尿路功能障碍^[2],其中高达90%的女性患者在其生活中会经历一定程度的控尿功能障碍,尤其是尿失禁^[3]。

前额叶皮质(PFC)是额叶较为靠前的脑区,同时占据额叶较大区域,在抽象思维、决策制定、预测行为以及心理情感表达等方面发挥重要作用,涉及大脑的诸多高级功能^[45]。现有研究显示,PFC是对膀胱活动信息进行分析并对排尿动作进行判断的重要脑区^[6]。还有研究显示,当膀胱产生强烈的急迫感时,PAG可能会受PFC反馈指令启动“备份机制”激活大脑运动皮层,然后收缩盆底肌缓解排尿冲动^[7]。但是,目前关于大脑皮层在下尿路神经控制方面的研究相对较少,因此,PFC在脑-膀胱生理反射过程中的具体调节通路尚不明确^[8]。

近红外脑功能成像(fNIRS)是利用650~950 nm的近红外光可穿透生物组织的特性适时记录脑血流量的脑影像技术。该技术比脑电图的空间分辨率更高、操作简单、方便快捷,也比MRI的花费成本低,而且轻巧便利、可随时移动。因此,该技术目前已被广泛应用于脑卒中后的运动康复、心理障碍、认知障碍等诸多神经病变的研究和诊断^[9,10]。故本研究应用该新兴技术为前额叶不同脑区在控尿功能中发挥的作用提供神经影像学方面的依据,为进一步优化常见控尿功能障碍的疗法提供参考。

对象与方法

一、研究对象

本研究组于2023年1月至4月在深圳市公开随机招募健康成年女性志愿者作为研究对象。考虑到本研究为探索性观察性研究,参考以往fNIRS相关研究样本量设置以及数据分析所需标准,共纳入20名志愿者,其年龄为(30.4±2.4)岁,BMI为(20.4±1.2) kg/m²,其中14人产次<2次,6人产次≥2次。纳入标准:①右利手;②年龄18~40岁;③认知功能正常,能配合完成研究;④无盆底神经肌肉组织、脏器损伤和功能障碍;⑤无中枢神经系统和其他器官病变。排除标准:①存在颅脑损伤或进行过颅脑手术;②存在脊髓损伤或进行过脊髓手术;③存在腹部创伤或进行过腹部手术;④伴有恶

性肿瘤或严重的系统性疾病;⑤存在精神问题;⑥近期服用过可使人兴奋的食物及药物;⑦有长期饮酒熬夜等不良习惯;⑧试验前1 h进行了剧烈运动。本研究通过深圳大学第二附属医院的伦理审查(批件号:BYL20220506),并在中国临床试验注册中心注册(注册号:ChiCTR2200067055),研究对象均自愿参与本研究并签署知情同意书。

二、研究方法

1. 任务模式

本实验采用区块设计方法:任务期以最大力量收缩盆底肌之后保持盆底肌的收缩状态5 s,再放松5 s,耗时10 s,总共收缩3次,时间为30 s,然后休息20 s,任务期加上休息时间为50 s。此过程重复进行5次,时间为250 s。在任务测试前有20 s的静息数据采集,整个流程耗时270 s。

2. fNIRS 数据收集

本研究仪器为武汉资联虹康公司的依瑞德近红外脑功能成像系统(BS-3000),其波长为690 nm和830 nm,采样频率为20 Hz。配套的光纤帽有12个发射光极、12个接收光极和37个通道,根据布鲁德曼脑部分区将光纤帽通道所覆盖的前额叶分为4个脑区,分别是腹外侧前额叶(VLPFC)、背外侧前额叶(DLPFC)、额极(FPC)和眶额区(OFC),见图1。在进行实验之前,确保每位受试者学会正确的盆底肌收缩运动。在进行fNIRS检测前,需要排空膀胱,且在15 min内口服1 000 mL的饮用水等待膀胱充盈,直至第1次产生膀胱充盈感或有想排空膀胱的感觉^[11],通过经腹超声检查明确膀胱处于充盈状态。受试者取坐位,充分放松四肢和躯干,避免说话、摇头等额外动作,戴好fNIRS光纤帽,矫正帽子上的光极,使其与头皮充分接触。制作同步的270 s视频以减少声音干扰,受试者可根据视频提示(收缩、休息)做出相应动作,其间保持平静呼吸。膀胱充盈时的近红外数据收集完成之后嘱研究对象排空膀胱,休息3 min后以同样流程收集膀胱空虚时的近红外数据。

3. fNIRS 数据处理

利用Matlab软件运行Homer2工具箱对37个通道的原始数据进行预处理^[12]:①将原始光强转为光密度数据;②运动伪影识别,减少身体微动产生的干扰因素;③用条样插值法去除运动伪影^[13],对数据进行修补;④用0.01~0.10 Hz带通滤波去除外界和自身因素的干扰信号;⑤根据修

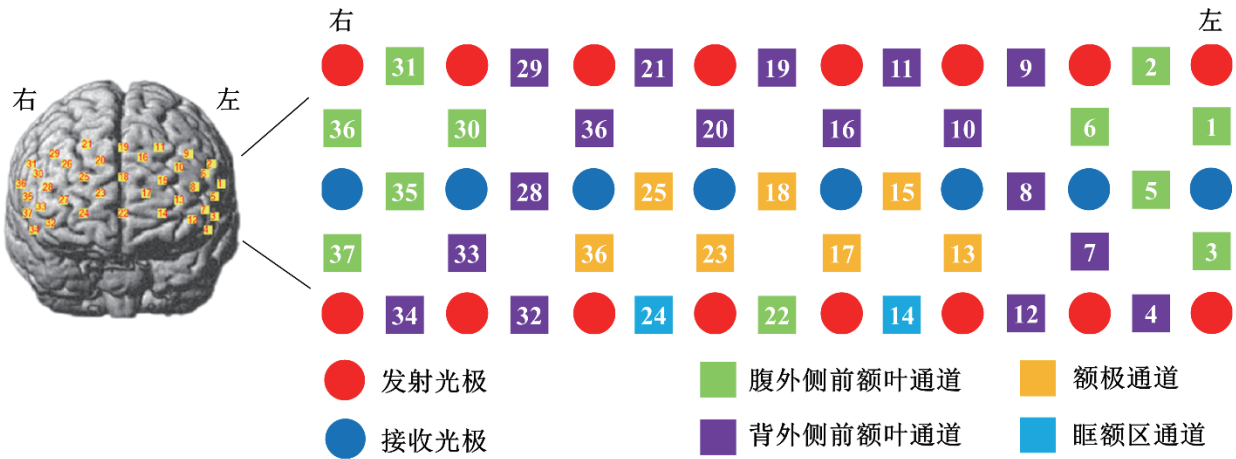


图1 近红外脑成像光纤排布图和通道位置图

正朗伯比尔定律 (Lambert-Beer law), 将光密度数据转换为信噪比较高的氧合血红蛋白 (Oxy-Hb) 浓度变化值^[4]; ⑥叠加平均每个区块的血流动力学数据。再通过 NIRS-KIT 工具箱对数据进行分析: 对 Oxy-Hb 变化值建立一般线性模型 (GLM) 估算盆底肌收缩任务下每个通道所对应的参数 Beta 值^[15], 作为此次研究的主要观察指标。然后利用 NIRS-KIT 工具箱的组水平分析板块分别对膀胱充盈状态和膀胱空虚状态下的 2 组 Beta 值数据进行统计学分析, 其中组内数据比较采用单样本 t 检验, 以 $P < 0.05$ 为激活通道; 2 组间数据比较采用配对样本 t 检验, 以 $P < 0.05$ 为差异通道。

三、统计学处理

利用 Excel 表格统计前额叶左右脑区和前额叶左右不同分区所对应各个通道 Beta 值, 然后利用 SPSS 23.0 软件进行统计学分析。其中符合正态分布的计量资料采用配对样本 t 检验, 以 $\bar{x} \pm s$ 表示; 非正态分布计量资料采用 Wilcoxon 符号秩和检验, 以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、膀胱充盈与空虚状态下大脑前额皮层脑区的激活情况

膀胱充盈状态下对各通道提取的 Beta 值进行单样本 t 检验并作图, 结果显示: 相较于静息期, 在进行盆底肌收缩任务时, 前额皮层明显激活, 总共有 30 个通道的 Beta 值 $P < 0.05$, 且 4 个脑区均有不同程度的激活, 分别为背外侧前额叶

(通道 4/7/9/10/11/12/16/19/20/21/26/28/32/34)、额极 (通道 13/15/17/18/22/23/25/27)、腹外侧前额叶 (通道 1/2/3/6/35/37) 以及眶额区 (通道 14/24), 见图 2A。

以同样的方法, 对膀胱空虚状态下的各通道的 Beta 值进行统计分析, 结果显示: 前额皮层也有部分脑区被激活, 有 8 个通道的 Beta 值 $P < 0.05$, 分别为背外侧前额叶 (通道 10/11/28)、额极 (通道 15/23/27) 以及腹外侧前额叶 (通道 2/30), 见图 2B。

2 种膀胱状态下共同激活的通道共 7 个, 分别是背外侧前额叶 (通道 10/11/28)、额极 (通道 15/23/27) 和腹外侧前额叶 (通道 2)。

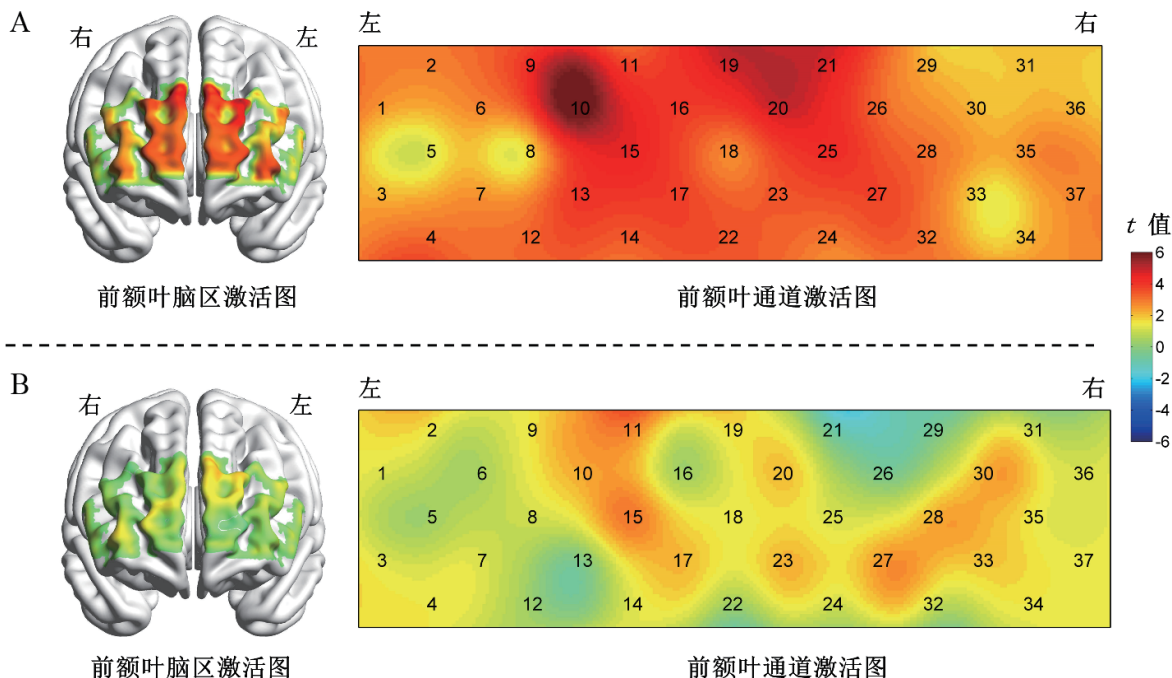
二、膀胱充盈与空虚状态下大脑前额皮层脑区激活情况对比

1. 膀胱充盈与空虚状态下大脑前额皮层激活通道的差异

对膀胱充盈与空虚状态下前额皮层各通道 Beta 值进行配对样本 t 检验, 4 个通道的差异均具有统计学意义 (P 均 < 0.05), 见表 1。

2. 膀胱充盈与空虚状态下大脑前额皮层不同脑区激活的差异

对膀胱充盈与空虚状态下前额叶左右脑区的激活情况进行对比: 膀胱充盈下的右侧脑区激活更明显 ($P < 0.05$), 见表 2。对前额叶左右不同脑区进行对比: 膀胱充盈与空虚状态下的右侧背外侧前额叶和额极激活存在差异 (P 均 < 0.05), 见表 3。其中眶额区被覆通道较少, 无法进行详细的比较分析。



注：A为膀胱充盈状态下前额叶激活图；B为膀胱空虚状态下前额叶激活图；颜色条代表t值，当t值对应的P < 0.05时，该通道所在脑区为暖色，视为激活部位。

图2 20名研究对象膀胱充盈状态与空虚状态下大脑前额皮层脑区的激活情况

表1 膀胱充盈与空虚状态下大脑前额叶皮层激活通道比较

通道	蒙特利尔神经学研究所空间坐标			布鲁德曼分区	Beta 值 / (× 10 ⁻⁷ mol/mm)		t 值	P 值
	X	Y	Z		充盈状态	空虚状态		
11	-27.51	61.07	52.77	BA9、BA46	2.07 ± 2.85	2.40 ± 3.05	-2.539	0.020
13	-41.68	73.83	12.87	BA10	2.06 ± 2.35	-1.07 ± 6.80	2.450	0.024
21	28.23	62.68	54.16	BA9、BA46	3.05 ± 2.89	1.05 ± 3.65	2.113	0.048
26	42.34	64.48	39.20	BA9、BA46	2.49 ± 3.72	0.11 ± 3.73	2.361	0.029

表2 膀胱充盈与空虚状态下前额叶左右脑区激活 Beta 值对比

膀胱状态	Beta 值 / (× 10 ⁻⁷ mol/mm)		Z 值	P 值
	充盈状态	空虚状态		
左侧脑区	2.44 (1.92, 3.27)	1.75 (0.54, 2.75)	-1.207	0.227
右侧脑区	2.11 (1.63, 2.67)	1.79 (1.05, 2.29)	-2.059	0.039
Z 值	0.993	-0.828		
P 值	0.336	0.407		

讨 论

既往脑功能成像方法以功能磁共振 (fMRI)、正电子发射断层显像 (PET) 和脑电图为主。fNIRS 通过光学原理检测血氧浓度，与 PET 相比对人体更为安全；fMRI 和脑电图更偏向于监测静息状态下的大脑活动^[16]，fNIRS 刚好弥补了两者的短板，不仅能够对全脑进行监测，还可以将大脑皮

层分为不同的兴趣区记录局部脑区活动，为探究特定脑区位置和人体功能活动之间的对应关系提供了便利^[17]。目前，fNIRS 因其抗干扰、便捷等优势已被广泛应用于临床上难以操控的肌肉活动和磁电干预下的脑功能评定。

本研究应用 fNIRS 技术记录膀胱充盈和空虚状态下盆底肌收缩时前额皮层的血氧动态数据。结果显示，2 种膀胱状态下执行盆底肌收缩任务时

表3 膀胱充盈与空虚状态下前额叶不同脑区激活 Beta 值对比

脑区	Beta 值 / ($\times 10^{-7}$ mol/mm)		t 值	P 值
	充盈状态	空虚状态		
左侧背外侧前额叶	2.75 \pm 0.91	2.58 \pm 2.59	0.188	0.856
右侧背外侧前额叶	2.13 \pm 0.75	0.81 \pm 1.39	2.660	0.032
背外侧前额叶	2.44 \pm 0.87	1.70 \pm 2.20	1.444	0.169
左侧腹外侧前额叶	1.76 \pm 0.64	2.09 \pm 2.06	-0.435	0.686
右侧腹外侧前额叶	1.74 \pm 0.40	1.90 \pm 0.62	-0.379	0.724
腹外侧前额叶	1.75 \pm 0.50	1.99 \pm 1.44	-0.597	0.565
左侧额极	2.88 \pm 0.81	1.12 \pm 1.91	1.607	0.123
右侧额极	3.24 \pm 0.50	2.33 \pm 0.07	1.849	0.080
额极	3.06 \pm 0.63	1.72 \pm 1.38	2.785	0.017

前额皮层均有不同程度的激活，而充盈状态前额皮层激活更为显著。有学者发现额叶病变的患者会出现尿急、尿失禁等临床症状，当额叶内肿瘤蔓延至前额皮层会影响排尿中心、产生下尿路症状^[18]，脑功能成像研究显示前额皮层、岛叶以及扣带皮层与人体自主控尿功能密切相关^[19,20]。

本研究通过膀胱充盈时自主收缩盆底肌来模拟特殊情况下不宜排尿时抑制排尿的行为，并与膀胱空虚时单纯的盆底肌收缩进行对比，发现膀胱充盈时右侧前额皮层显著激活。排尿在很大程度上由右脑控制^[1]，临床研究显示右侧额叶出血与尿失禁相关，随着右侧前额皮层出血灶的吸收，患者症状逐渐好转^[21]。本研究结果与现有研究结论相一致，由此推测右侧前额皮层在控尿过程中发挥的作用可能更为突出。通过进一步的分析发现右侧 DLPFC 和 FPC 在 2 种膀胱状态下的激活情况存在差异。前额皮层中负责执行功能的大脑区域主要是双侧的背外侧前额叶，其主要功能包括接收来自不同感官模式的输入、保持注意力、监控并执行工作任务中的信息以及协调目标导向等行为^[22-23]。此外，背外侧前额叶还参与任务设置和监测^[24]，同时与运动系统紧密联系，参与动作的选择和执行^[25]。最新提出的膀胱控制工作模型提示膀胱充盈扩张的感觉通过丘脑后可激活外侧前额皮层，减少对中脑导水管周围灰质 PAG 的输出，从而抑制排尿反射^[26]。人在感到排空冲动时会有意识地收缩盆底肌，从而抑制逼尿肌收缩，形成一种保护反射^[27]。既往研究表明，健康女性在接受膀胱扩张的内脏刺激时可激活背外侧前额叶^[28]，当大脑对空虚的欲望越强，双侧背外侧前额叶的激活就越强，提示背外侧前额叶可能与内部感受刺激的监测和膀胱状态的感知有关^[29]。额极位于前额皮层较为

靠前的位置，是灵长类动物独有的细胞结构区域，与其相关的神经成像研究大部分探讨的是认知功能^[30]，包括工作记忆、任务规划和行为探索等功能^[31]。虽然目前没有直接证据表明额极与人体正常控尿功能存在联系，但是有研究显示额极在前额皮层中存在广泛的功能连接并与外侧前额皮层联系密切^[32]。此外，额极与扣带皮层以及前运动皮层也存在紧密联系^[33]。

脑-膀胱神经传导通路研究仍然存在挑战，目前的研究设计和参数设置的不统一造成了结果偏差^[34,35]。本研究旨在观察女性受试者在不同膀胱状态下的自主盆底肌收缩运动前额皮层的激活特征，结果可能会受个体差异的影响，例如盆底肌肌力的不同造成盆底肌激活模式差异、受试者对自身盆底肌协调性的把握以及对膀胱充盈刺激的敏感度等。以后将在本研究的基础上继续优化方案，增加样本量检测整个额叶，着重分析背外侧前额叶与其他脑区的功能连接情况，完善实验结果。

综上所述，fNIRS 技术未来可以被应用于人体控尿中枢的影像学研究。背外侧前额叶是前额皮层的重要部分，其对膀胱充盈刺激的感受和控尿方面的作用不容忽视。对于大脑如何系统感知膀胱的压力变化并进行信息整合，如何通过调节盆底肌的自主舒缩运动发挥其在控尿过程中的作用等方面仍有待深入研究。

参 考 文 献

- [1] Lee C L, Lee J, Park J M, et al. Sophisticated regulation of micturition: review of basic neurourology [J]. J Exerc Rehabil, 2021, 17 (5): 295-307.
- [2] Fan Y H, Shen Y C, Hsu C C, et al. Current surgical treatment for neurogenic lower urinary tract dysfunction in patients with

- chronic spinal cord injury[J]. *J Clin Med*, 2023, 12 (4): 1400.
- [3] Shi Z, Tran K, Karmonik C, et al. High spatial correlation in brain connectivity between micturition and resting states within bladder-related networks using 7 T MRI in multiple sclerosis women with voiding dysfunction[J]. *World J Urol*, 2021, 39 (9): 3525-3531.
- [4] Ouerchefani R, Ouerchefani N, Ben Rejeb M R, et al. Pragmatic language comprehension: role of theory of mind, executive functions, and the prefrontal cortex[J]. *Neuropsychologia*, 2024, 194: 108756.
- [5] 周素妙, 黄兴兵. 氧化应激参与抑郁症认知功能障碍机制的研究进展[J]. *新医学*, 2019, 50 (12): 877-880.
- Zhou S M, Huang X B. Research progress on the mechanism of oxidative stress involved in cognitive dysfunction of depression patients[J]. *J New Med*, 2019, 50 (12): 877-880.
- [6] Tish M M, Geerling J C. The brain and the bladder: forebrain control of urinary (In) continence[J]. *Front Physiol*, 2020, 11: 658.
- [7] Karnup S. Spinal interneurons of the lower urinary tract circuits[J]. *Auton Neurosci*, 2021, 235: 102861.
- [8] Pang D, Gao Y, Liao L. Functional brain imaging and central control of the bladder in health and disease[J]. *Front Physiol*, 2022, 13: 914963.
- [9] 近红外脑功能成像临床应用专家共识编写组. 近红外脑功能成像临床应用专家共识[J]. *中国老年保健医学*, 2021, 19 (2): 3-9.
- Expert consensus on clinical application of near-infrared brain functional imaging technology writing group. Expert consensus on clinical application of near-infrared brain functional imaging technology[J]. *Chin J Geriatr Care*, 2021, 19 (2): 3-9.
- [10] Chen W L, Wagner J, Heugel N, et al. Functional near-infrared spectroscopy and its clinical application in the field of neuroscience: advances and future directions[J]. *Front Neurosci*, 2020, 14: 724.
- [11] Medina Lucena H, Tincello D G. Methods of assessing and recording bladder sensation: a review of the literature[J]. *Int Urogynecol J*, 2019, 30 (1): 3-8.
- [12] Lee Y J, Park S Y, Sung L Y, et al. Reduced left ventrolateral prefrontal cortex activation during verbal fluency tasks is associated with suicidal ideation severity in medication-naïve young adults with major depressive disorder: a functional near-infrared spectroscopy study[J]. *Psychiatry Res Neuroimaging*, 2021, 312: 111288.
- [13] Scholkman F, Spichtig S, Muehlemann T, et al. How to detect and reduce movement artifacts in near-infrared imaging using moving standard deviation and spline interpolation[J]. *Physiol Meas*, 2010, 31 (5): 649-662.
- [14] von Lühmann A, Li X, Müller K R, et al. Improved physiological noise regression in fNIRS: a multimodal extension of the General Linear Model using temporally embedded Canonical Correlation Analysis[J]. *NeuroImage*, 2020, 208: 116472.
- [15] von Lühmann A, Ortega-Martinez A, Boas D A, et al. Using the general linear model to improve performance in fNIRS single trial analysis and classification: a perspective[J]. *Front Hum Neurosci*, 2020, 14: 30.
- [16] Li C L, Deng Y J, He Y H, et al. The development of brain functional connectivity networks revealed by resting-state functional magnetic resonance imaging[J]. *Neural Regen Res*, 2019, 14 (8): 1419-1429.
- [17] 曹朝霞, 张彦峰, 韩雅迪, 等. 功能性近红外光谱成像技术在脑功能成像中的应用研究进展[J]. *甘肃中医药大学学报*, 2018, 35 (3): 99-103.
- Cao Z X, Zhang Y F, Han Y D, et al. Application of functional near-infrared spectroscopy in cerebral function imaging[J]. *J Gansu Univ Chin Med*, 2018, 35 (3): 99-103.
- [18] Akhavan-Sigari R, Mortzavi-Zadeh P, Trakolis L, et al. The connection between frontal lobe brain tumors and lower urinary tract symptoms-series of 347 patients[J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2021, 25 (2): 654-660.
- [19] Harvie C, Weissbart S J, Kadam-Halani P, et al. Brain activation during the voiding phase of micturition in healthy adults: a meta-analysis of neuroimaging studies[J]. *Clin Anat*, 2019, 32 (1): 13-19.
- [20] Zhao L, Liao L, Gao Y. Brain functional connectivity during storage based on resting state functional magnetic resonance imaging with synchronous urodynamic testing in healthy volunteers[J]. *Brain Imaging Behav*, 2021, 15 (3): 1676-1684.
- [21] Akhavan-Sigari R, Trakolis L, Amend B, et al. Connection between traumatic frontal intracerebral hemorrhage and lower urinary tract symptoms[J]. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 2021, 25 (7): 2994-3001.
- [22] Molnár Z, Clowry G J, Šestan N, et al. New insights into the development of the human cerebral cortex[J]. *J Anat*, 2019, 235 (3): 432-451.
- [23] Tung C, Lord S R, Pelicioni P H S, et al. Prefrontal and motor planning cortical activity during stepping tasks is related to task complexity but not concern about falling in older people: a fNIRS study[J]. *Brain Sci*, 2023, 13 (12): 1675.
- [24] Henri-Bhargava A, Stuss D T, Freedman M. Clinical assessment of prefrontal lobe functions[J]. *Continuum*, 2018, 24 (3, BEHAVIORAL NEUROLOGY AND PSYCHIATRY): 704-726.
- [25] Thura D, Cabana J F, Feghaly A, et al. Integrated neural dynamics of sensorimotor decisions and actions[J]. *PLoS Biol*, 2022, 20 (12): e3001861.
- [26] Zare A, Jahanshahi A, Rahnama'i M S, et al. The role of the periaqueductal gray matter in lower urinary tract function[J]. *Mol Neurobiol*, 2019, 56 (2): 920-934.
- [27] Lee B A, Kim S J, Choi D K, et al. Effects of pelvic floor muscle exercise on urinary incontinence in elderly women with cognitive impairment[J]. *Int Neurourol J*, 2017, 21 (4): 295-301.
- [28] Alfano V, Cavaliere C, Di Cecca A, et al. Sex differences in functional brain networks involved in interoception: an fMRI study[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1130025.
- [29] Li X, Fang R, Liao L, et al. Real-time changes in brain activity

- during tibial nerve stimulation for overactive bladder: evidence from functional near-infrared spectroscopy hypoxia scanning[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17 : 1115433.
- [30] Ainsworth M, Wu Z, Browncross H, et al. Frontopolar cortex shapes brain network structure across prefrontal and posterior cingulate cortex[J]. *Prog Neurobiol*, 2022, 217 : 102314.
- [31] Hogeveen J, Medalla M, Ainsworth M, et al. What does the frontopolar cortex contribute to goal-directed cognition and action?[J]. *J Neurosci*, 2022, 42 (45) : 8508-8513.
- [32] Law C K, Kolling N, Chan C C H, et al. Frontopolar cortex represents complex features and decision value during choice between environments[J]. *Cell Rep*, 2023, 42 (6) : 112555.
- [33] Domic-Siede M, Irani M, Valdés J, et al. Theta activity from frontopolar cortex, mid-cingulate cortex and anterior cingulate cortex shows different roles in cognitive planning performance[J]. *NeuroImage*, 2021, 226 : 117557.
- [34] Ghata M P, Burkett L S, Grob G, et al. A stepwise approach for functional near infrared spectroscopy measurement during natural bladder filling[J]. *Transl Androl Urol*, 2023, 12 (10) : 1477-1486.
- [35] Walter M, Leitner L, Michels L, et al. Reliability of supraspinal correlates to lower urinary tract stimulation in healthy participants-A fMRI study[J]. *Neuroimage*, 2019, 191 : 481-492.

(收稿日期: 2023-07-24)

(责任编辑: 洪悦民)

