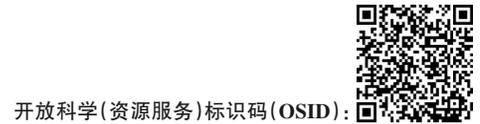


# 基于功能性近红外光谱技术探索自主排尿 相关腹肌运动控制脑功能活动

施银霜<sup>1,2</sup>, 王梦寰<sup>1,2</sup>, 潘颖颖<sup>1,2</sup>, 林枫<sup>2,3\*</sup>

1 南京医科大学康复医学院, 江苏 南京 210029;  
2 南京医科大学第一附属医院, 江苏 南京 210029;  
3 南京医科大学附属逸夫医院, 江苏 南京 211100  
\* 通信作者: 林枫, E-mail: peterduus@njmu.edu.cn

收稿日期: 2024-03-27; 接受日期: 2024-05-10  
基金项目: 国家自然科学基金项目(81672255)  
DOI: 10.3724/SP.J.1329.2024.03008



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**摘要 目的** 在自主排尿过程中腹肌随意收缩是一种运动控制任务,以功能性近红外光谱技术(fNIRS)探索该动作的中枢活动特征。**方法** 招募年龄 $\geq 18$ 岁的健康受试者共19例。接受2次fNIRS检测,分别在无尿意及强尿意状态下进行重复腹肌收缩动作。以对应的无腹肌收缩任务下的脑活动为基线,分析这2种不同状态时腹肌收缩特有的脑皮质活动。**结果** 强尿意时腹肌收缩主要激活双侧前运动/辅助运动区(BA6)、双侧背外侧前额叶皮层(BA9/46)、双侧额极区(BA10)、右侧额下回前部(BA47)、右侧颞中回(BA21)、右侧初级运动皮层(BA4)、左侧初级体感皮层(BA1/2/3)与左侧额下回三角部Broca区(BA45)( $P < 0.05$ )。无尿意时执行腹肌收缩动作主要激活双侧前运动/辅助运动区(BA6)( $P < 0.05$ )、右侧初级运动皮层(BA4)、右侧初级体感皮层(BA1/2/3)、右侧额下回三角部Broca区(BA45)及右侧边缘上回Wernicke区(BA40)( $P < 0.05$ )。相比于强尿意状态,无尿意时的主动腹肌收缩动作在双侧前运动/辅助运动区(BA6)存在更强激活( $P < 0.05$ )。相比于无尿意状态,强尿意时的腹肌收缩动作在左侧背外侧前额叶皮层(BA46)激活更强( $P < 0.05$ )。**结论** 前额叶皮层、初级体感皮层、初级运动皮层、前运动/辅助运动区共同参与调控自主排尿相关腹肌随意收缩。并且在强尿意状态下进行腹肌运动时,可引起前额叶皮层的进一步激活,提示前额叶皮层在感知尿意之后,对于促进腹肌运动和排尿启动具有积极的作用。

**关键词** 功能性近红外光谱技术; 大脑皮层; 腹肌收缩; 排尿控制; 膀胱

自主排尿是一种作业任务,表现为个体能够控制自己在特定环境下发起、调节和完成排尿任务。排尿启动时,往往是腹部肌肉收缩,腹内压增高,腹腔内脏器对膀胱产生向下的压力,打开尿道并使盆底向下移动,诱发排尿反射<sup>[1-2]</sup>。健康人可以根据膀胱充盈感和社会礼节做出排尿或延迟排尿的决定,如有需要,甚至可以中断或加速排尿进程<sup>[3]</sup>。由此体现为在反射性的膀胱逼尿肌收缩和尿道括约肌协调舒张以外,个体可以主动实施腹肌收缩动作,

以控制腹压,调节排尿速度和排空程度<sup>[4]</sup>。与之相应的神经损伤除了影响排尿反射以外,还可能导致患者自主排尿过程中的动作控制障碍<sup>[5]</sup>。如脊髓损伤后,腹肌和逼尿肌收缩力下降,可能导致膀胱排空延迟或不完全,引发反复泌尿系感染、尿路结石、肾积水等,最终导致肾功能衰竭。通过康复训练强化腹肌力量,改善膀胱排空功能,是预防上述并发症、保护肾功能的治疗措施之一。另有研究表明,腹肌训练还可以作为盆底肌训练的补充,有助于改

引用格式: 施银霜, 王梦寰, 潘颖颖, 等. 基于功能性近红外光谱技术探索自主排尿相关腹肌运动控制脑功能活动[J]. 康复学报, 2024, 34(3): 270-278.

SHI Y S, WANG M H, PAN Y Y, et al. Exploring the functional brain activity of motor control of abdominal muscle associated with voluntary voiding based on functional near-infrared spectroscopy [J]. Rehabil Med, 2024, 34(3): 270-278.

DOI: 10.3724/SP.J.1329.2024.03008

©《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

善前列腺癌术后患者的尿失禁症状<sup>[6]</sup>。因此,有必要了解中枢系统是如何调控自主排尿相关的腹肌收缩。

功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)通过检测与神经活动相关的血液中血红蛋白浓度的变化,评估脑功能活动<sup>[7-8]</sup>。MATSUMOTO等<sup>[9]</sup>曾采用fNIRS测量成人不同膀胱体积时额叶血流量变化,结果表明膀胱容量越大,尿意越强,双侧额叶皮层氧合血红蛋白浓度越高。这种脑氧合水平的动态变化与功能性磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)的评估结果相似<sup>[10]</sup>,提示fNIRS可用于研究大脑皮层与膀胱控制间的相互关系。既往相关研究多集中于排尿控制相关的盆底肌肉运动<sup>[11-12]</sup>,而对自主排尿相关的腹肌收缩尚未有相关研究。本研究旨在通过应用fNIRS对比健康受试者在无尿意时和强尿意时进行主动腹肌收缩任务的大脑皮层活动特征,探索自主排尿相关腹肌运动的中枢活动机制。

## 1 临床资料

### 1.1 受试者选择标准

1.1.1 纳入标准 ① 年龄 $\geq 18$ 岁;② 排尿日记符

合标准<sup>[13]</sup>:24 h 排尿量为1 500~3 000 mL、平均每次尿量 $> 200$  mL、昼夜排尿 $\leq 8$ 次、夜间排尿 $\leq 1$ 次、无漏尿发生。

1.1.2 排除标准 ① 有神经系统或泌尿系统相关疾病患者;② 有全身各系统重大疾病患者,如心脏病、肿瘤、糖尿病、呼吸系统疾病等;③ 处于妊娠期或月经期;④ 存在认知障碍不能配合者。

1.1.3 中止和脱落标准 ① 受试者突发身体不适等无法继续完成测试;② 受试者因各种原因申请退出。

### 1.2 一般资料

依据GROENENDIJK等<sup>[14]</sup>研究估算样本量,使用Gpower 3.1.9.7进行计算。以盆底肌收缩时大脑初级运动皮层(primary motor cortex, M1区)的激活峰值为指标,采用单样本 $t$ 检验方法,设I类错误率为0.05,最小功效为0.95,得出最小样本量为17例。本研究最终纳入19例健康受试者。受试者一般资料及排尿日记情况见表1。本研究已通过南京医科大学附属逸夫医院医学伦理委员会审批(审批号:2024-SR-006)。

表1 受试者一般资料及排尿日记情况

Table 1 General data and urinary diaries of subjects

性别	例数	年龄/ ( $\bar{x}\pm s$ ,岁)	体质量指数/ ( $\bar{x}\pm s$ ,kg/m <sup>2</sup> )	24 h 尿量/ ( $[M(P_{25},P_{75})]$ ,mL)	昼夜排尿次数/ ( $\bar{x}\pm s$ ,次)	平均每次尿量/ ( $\bar{x}\pm s$ ,mL)		夜尿次数/(n,%)	
						0次	1次		
男	7	24.60 $\pm$ 2.07	22.20 $\pm$ 1.12	1 770.00(1 637.50,1 902.50)	6.29 $\pm$ 1.11	308.00 $\pm$ 32.50	6(85.7)	1(14.3)	
女	12	23.30 $\pm$ 1.78	21.00 $\pm$ 2.11	2 000.00(1 836.00,2 164.00)	6.58 $\pm$ 1.08	323.00 $\pm$ 67.90	10(83.3)	2(16.7)	
$t/z$ 值		1.38	1.40	21.00	-0.57	-0.56	—		
$P$ 值		0.19	0.18	0.08	0.58	0.59	$> 0.99$		

## 2 方法

### 2.1 fNIRS设备

研究采用多通道功能近红外脑成像设备(NIRSmart II-3000A,丹阳慧创)监测受试者在执行腹肌收缩任务时脑血流动态变化。光源和接收器基于10~20国际标准导联系统分布于双侧前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)、额顶感觉运动皮层(sensorimotor cortex, SMC)与枕叶皮层,共组成44个通道。使用Patriot定位仪确定各通道的蒙特利尔神经研究所(Montreal Neurological Institute, MNI)空间坐标,并标注对应布罗德曼分区(Brodmann area, BA)。试验在安静、光线昏暗的房间由经fNIRS培训的人员进行操作。

### 2.2 fNIRS数据采集

试验前,由膀胱护理经验丰富的护士指导受试者进行腹肌收缩动作,途中避免屏气。使用表面肌电监测受试者腹肌收缩电活动,同时使用脉氧仪监测血氧饱和度变化情况。经确认受试者可完成任务后,进入fNIRS检测阶段。

试验时受试者需接受2次fNIRS测试。受试者测试前排空膀胱,休息5 min,在无尿意时(视觉感觉模拟评分为0分)进行第1次fNIRS测试,测试过程中要求受试者端坐,身体放松,根据语音提示执行重复腹肌收缩任务15 s,休息15 s。任务循环5个区块。第1次测试结束后,受试者开始自由饮水,期间避免剧烈活动,有强尿意时(视觉感觉模拟评分为6~8分)重复第2次测试,测试结束后患者自行排

尿,记录排尿量。第2次测试后受试者自主排尿量平均(350.4±6.3)mL。采用视觉感觉模拟评分确定排尿冲动评分:0分为膀胱排空,1分为首次膀胱充盈感,2~3分为初次排尿感,4~5分为正常排尿感,

6~7分为强排尿感,8~9分为急迫排尿感,10分为膀胱疼痛<sup>[15]</sup>。受试者强尿意时排尿冲动平均(6.9±0.2)分。fNIRS数据采集流程见图1。

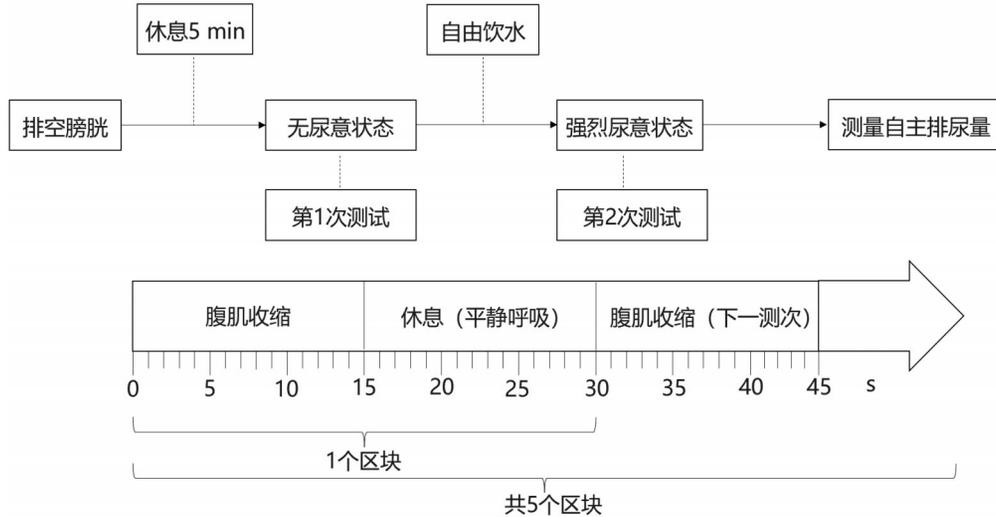


图1 fNIRS数据采集流程

Figure 1 Flow of fNIRS data acquisition

### 2.3 数据处理

参考WANG等<sup>[16]</sup>研究方法进行fNIRS信号处理。采用MATLAB R2013b中Homer2(version 2.8)进行数据预处理。参数设置:滑窗法遍历原始信号,窗宽0.5 s。当信号>20倍标准差或5倍窗内振幅时界定为运动尾影。采用峰值小波算法(峰值3.3)进行矫正,矫正范围设为±1 s<sup>[17]</sup>。带通滤波(0.01~0.08 Hz)滤除低频漂移和高频噪声<sup>[18]</sup>。根据修正Beer-Lambert定律将光密度波动换算为氧合血红蛋白(oxyhemoglobin, HbO<sub>2</sub>)和去氧血红蛋白(deoxyhemoglobin, HbR)浓度波动(μmol/L)。差分路径因子=6,光源-探头距离=30 mm<sup>[19]</sup>。最终,采用信号相关增益法再次修正血流信号。根据常规报道,采用对皮层活动最敏感的指标HbO<sub>2</sub>用于后续分析<sup>[20]</sup>。

### 2.4 统计学方法

数据分析在MATLAB R2013b环境下进行。对5次重复的任务区块进行区块平均分析,比较受试者各通道与任务相关的血流动力学响应曲线,得到30 s任务区块(重复腹肌收缩任务15 s,任务后休息15 s),对区块平均后15 s任务时间区间的均值与15 s休息时间区间的均值进行差值比较,从而计算任务

期间每个通道相对休息期间的血氧浓度变化。所有计量资料先通过Kolmogorov-Smirnov检验以考察其正态性,服从正态分布的数值变量以( $\bar{x}\pm s$ )表示,通过单样本t检验进行组内比较以反映在任务中皮层的激活情况;使用配对t检验比较无尿意与强尿意之间皮层的激活差异。如果计量资料不服从正态分布,采用M(P<sub>25</sub>, P<sub>75</sub>)进行统计描述,并采用非参数检验(Wilcoxon秩和检验)进行分析。采用Fisher确切概率检验比较计数资料。脑激活结果用Brain-Net Viewer进行可视化<sup>[21]</sup>。

## 3 结果

### 3.1 强尿意时腹肌收缩任务脑区激活情况

研究结果显示,受试者在强尿意时执行腹肌收缩任务相较于静息时有广泛的皮层区域激活,包括双侧前运动/辅助运动区(pre-motor and supplementary motor area, pSMA, BA6)、双侧背外侧前额叶皮层(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC, BA9/46)、双侧额极区(BA10)、右侧额下回前部(BA47)、右侧颞中回(BA21)、右侧M1区(BA4)、左侧初级体感皮层(primary somatosensory cortex, S1, BA1/2/3)与左侧额下回三角部Broca区(BA45)(P<0.05)。见图2、表2。

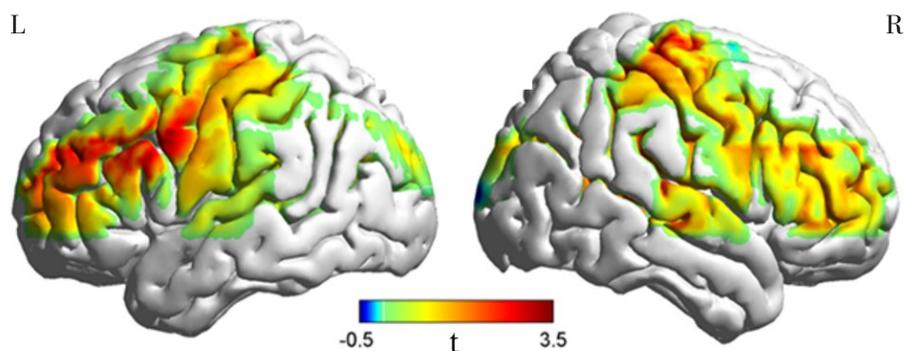


图2 强尿意时腹肌收缩任务脑区激活情况

Figure 2 Activation of brain areas in the task of abdominal muscle contraction during the strong desire to void state

表2 强尿意时腹肌收缩任务显著激活的通道、MNI空间坐标及对应BA

Table 2 Channels, MNI coordination and corresponding BA activated by the abdominal muscle contraction task during strong desire to void state

通道	MNI			ROI	BA	t值	P值
	x	y	z				
右脑半球							
1	70.647	-20.399	-5.156	TPC	21	2.370	0.029
7	55.231	41.705	-5.540	PFC	47	2.205	0.040
9	40.479	-26.790	69.549	SMC	4	3.503	0.002
11	47.645	-5.629	59.559	SMC	6	2.636	0.017
13	50.943	37.394	28.338	PFC	46	2.360	0.029
15	33.727	55.123	27.738	PFC	10	2.183	0.042
16	31.201	-19.862	75.684	SMC	6	2.901	0.009
17	18.870	-14.812	76.593	SMC	6	3.785	0.001
左脑半球							
24	-25.134	68.211	13.738	PFC	10	2.244	0.037
27	-32.026	-20.321	75.265	SMC	6	2.292	0.034
31	-34.562	54.133	28.364	PFC	10	2.721	0.014
33	-49.950	36.875	31.191	PFC	46	2.918	0.009
34	-41.257	-27.800	69.635	SMC	1/2/3	2.668	0.015
39	-60.384	26.256	15.256	SMC	45	2.297	0.033
42	-62.725	9.699	31.805	PFC	9	4.108	0.001

注:MNI指蒙特利尔神经研究所空间坐标;ROI指感兴趣区;BA指布罗德曼分区;TPC指颞叶皮层;PFC指前额叶皮层;SMC指感觉运动皮层。

Note: MNI means Montreal Neurological Institute; ROI means region of interest; BA means Brodmann area; TPC means temporal cortex; PFC means prefrontal cortex; SMC means sensorimotor cortex.

### 3.2 无尿意时腹肌收缩任务脑区激活情况

受试者在无尿意状态下执行腹肌收缩任务相较于静息时,主要激活集中在双侧的SMC,包括双侧pSMA(BA6)、右侧M1区(BA4)、右侧S1(BA1/2/3)、右侧额下回三角部Broca区(BA45)及右侧边缘上回Wernicke区(BA40)( $P<0.05$ )。见图3、表3。

### 3.3 强尿意与无尿意时腹肌收缩任务脑区激活的差异

比较2种不同状态下皮层激活情况发现,无尿意时主动腹肌收缩较强尿意时主动腹肌收缩在双侧pSMA(BA6)存在更强激活( $P<0.05$ ),而强尿意时腹肌收缩较无尿意时腹肌收缩在左侧DLPFC(BA46)存在更强激活( $P<0.05$ )。见图4、表4。

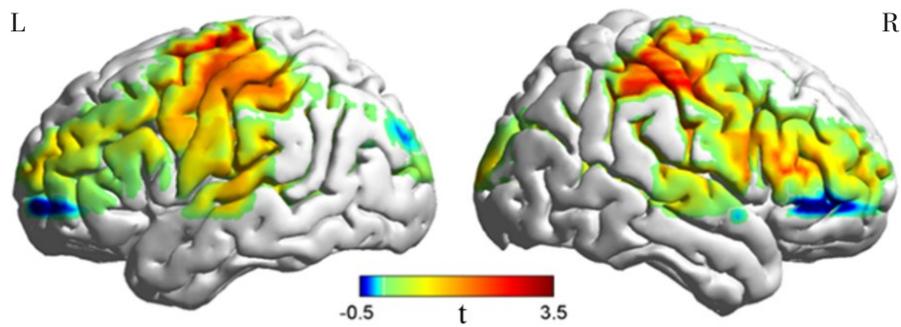


图3 无尿意时腹肌收缩任务脑区激活情况

Figure 3 Activation of brain regions of the abdominal muscle contraction task during no desire to void state

表3 无尿意时腹肌收缩任务显著激活的通道、MNI空间坐标及对应BA

Table 3 Channels, MNI coordination and corresponding BA activated by the abdominal muscle contraction task during no desire to void state

通道	MNI			ROI	BA	t值	P值
	x	y	z				
右脑半球							
4	61.380	-38.054	51.722	SMC	40	2.397	0.028
6	60.242	27.644	11.707	SMC	45	2.881	0.009
8	51.406	-32.046	62.608	SMC	1/2/3	2.941	0.009
9	40.479	-26.790	69.549	SMC	4	2.364	0.029
16	31.201	-19.862	75.684	SMC	6	2.254	0.037
17	18.870	-14.812	76.593	SMC	6	2.831	0.011
19	26.224	5.826	69.897	SMC	6	2.506	0.022
左脑半球							
26	-20.815	-15.501	76.548	SMC	6	2.577	0.019
27	-32.026	-20.321	75.265	SMC	6	3.479	0.003
28	-29.066	4.763	67.382	SMC	6	2.468	0.023
29	-37.831	-3.669	65.088	SMC	6	2.464	0.024

注:MNI指蒙特利尔神经研究所空间坐标;ROI指感兴趣区;BA指布罗德曼分区;SMC指感觉运动皮层。

Note: MNI means Montreal Neurological Institute; ROI means region of interest; BA means Brodmann area; SMC means sensorimotor cortex.

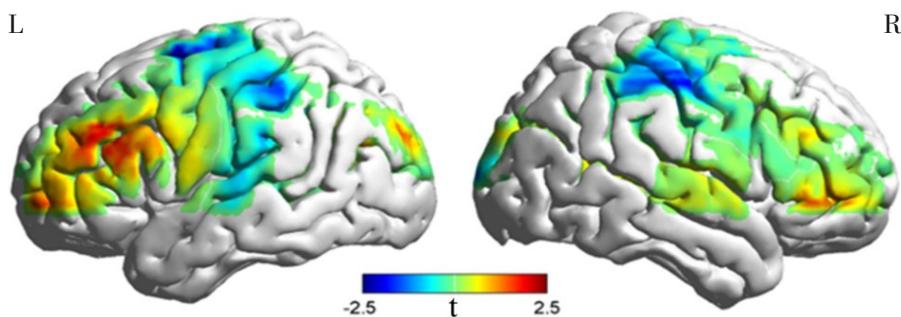


图4 强尿意时对比无尿意时腹肌收缩任务脑区激活情况

Figure 4 Activation of brain regions of the abdominal muscle contraction task during strong desire to void state versus no desire to void

表4 强尿意时对比无尿意时腹肌收缩任务显著激活的通道、MNI空间坐标及对应BA

Table 4 Channels, MNI coordination and corresponding BA activated by the abdominal muscle contraction task during strong desire to void state versus no desire to void state

通道	MNI			ROI	BA	t值	P值
	x	y	z				
10	58.153	-11.559 9	51.047 5	SMC	6	-2.200	0.041
28	-29.066 6	4.763 9	67.382 4	SMC	6	-2.408	0.027
33	-49.950 7	36.875 9	31.191	PFC	46	2.223	0.039

注:MNI指蒙特利尔神经研究所空间坐标;ROI指感兴趣区;BA指布罗德曼分区;SMC指感觉运动皮层;PFC指前额叶皮层。

Note: MNI means Montreal Neurological Institute; ROI means region of interest; BA means Brodmann area; SMC means sensorimotor cortex; PFC means prefrontal cortex.

#### 4 讨论

排尿无力是神经源性膀胱患者的重要障碍之一。在以简易膀胱容量测定或尿流动力学测定为代表的临床评估中,往往只关注患者的逼尿肌无力,尤其是反射性的逼尿肌无力。如果从排尿作业过程中分析,患者还可能存在难以发起并维持增加腹压动作的问题。事实上,主动实施排尿相关的腹肌收缩动作,是康复治疗的重要组成部分,这一内容体现在各种腹部增压技术中。如患者实施Valsalva动作或治疗师辅助增强腹压动作都希望有腹肌收缩的参与<sup>[22]</sup>,因此,排尿相关的腹肌收缩动作是一种自主的运动控制任务。此外,有别于婴幼儿的反射性排尿<sup>[23]</sup>,成人的自主排尿作业还需要能根据膀胱充盈感和日常生活需要调整排尿的时机,如在有尿意时延迟排尿或无尿意时提前排尿<sup>[24]</sup>。既往脑功能成像研究表明,PFC、M1区、pSMA和S1等参与排尿过程,这些区域在反射性排尿和自主排尿过程中的具体作用尚未阐明<sup>[25-26]</sup>。本研究借助fNIRS,探索排尿相关腹肌收缩动作的中枢控制特征,为神经源性膀胱的康复训练和中枢调控提供新依据。

本研究发现,强尿意时自主腹肌收缩可引起PFC显著激活,此结果与BLOK等<sup>[27]</sup>研究一致,对17名健康男性受试者在不同的排尿条件下进行了PET扫描,发现在强尿意状态下进行尝试排尿动作引起腹肌收缩时PFC显著激活,这提示PFC在调节腹肌运动以促进排尿启动方面扮演着重要角色。PFC是人脑的高级中枢,既往研究认为PFC参与排尿的自主决策,可决定特定的时间和地点启动排尿<sup>[28]</sup>。MICHELS等<sup>[29]</sup>应用fMRI对比22名健康男性在排尿启动和实际排尿期间的脑活动后发现,与实际排尿相比,自主排尿的启动需要更多的认知控

制,引起包括PFC在内的脑干、脑岛、丘脑、扣带回等多个脑区的显著活动。这些结果均表明PFC在排尿启动时发挥着不可或缺的作用。另一方面,准确地感知膀胱充盈状态是自主排尿启动的基础<sup>[30]</sup>。GHATAS等<sup>[31]</sup>用fNIRS采集8名健康受试者在膀胱自然充盈过程中PFC的HbO<sub>2</sub>浓度变化,结果显示随着尿意不断增强,双侧PFC的HbO<sub>2</sub>浓度增高,提示双侧PFC还参与尿意感知。本研究中,强尿意时腹肌收缩,腹内压增高,引起尿意的进一步增强,这可能是PFC激活的另一个原因。结合上述结果,本研究认为,在PFC的参与控制下,健康成人可在感受到尿意后决定腹肌自主收缩,增加腹压,促进排尿启动。

腹肌运动皮层定位于M1区的手臂和腿部区域之间,CARR等<sup>[32]</sup>对该区域的头皮进行磁刺激时可引起腹直肌的强烈反应。M1区被认为与自主运动执行相关<sup>[33]</sup>。本研究中无论强尿意还是无尿意状态下,主动腹肌收缩动作均引起SMC中M1区激活。这与此前NOUR等<sup>[34]</sup>结果基本一致,通过PET扫描研究了12名正常男性排尿时大脑活动的模式,发现排尿时左侧中央前回和中央后回(对应于腹部SMC)出现激活,这些脑区的活动增加与腹肌的感觉和运动控制有关,因为在排尿过程中需要协调腹肌收缩来帮助排尿。值得注意的是,YAO等<sup>[35]</sup>发现M1区的L<sub>5</sub>神经元可以通过激活脑桥排尿中心来触发排尿。通过光遗传学技术刺激这些神经元可以触发膀胱收缩和排尿行为。这表明M1区的功能不仅限于调节腹肌的运动,还可能与控制排尿的神经回路有关联。此外,pSMA在腹肌收缩任务中也出现激活,提示该脑区也参与调节腹肌运动。BLOK等<sup>[36]</sup>观察到自主持续腹肌收缩时,额上回、M1区前部(可

能代表pSMA)局部脑血流量显著增强。pSMA被认为在自主运动的准备和组织中起着重要作用。SHIMA等<sup>[37]</sup>和NAKAMURA等<sup>[38]</sup>发现猕猴的pSMA一旦失活或受损时,将无法发起简单或连续的自主运动。CUNNINGTON等<sup>[39]</sup>回顾了使用fMRI来观察在动作的计划、准备和执行过程中pSMA激活变化的时间进程,结果表明pSMA会对处于动作准备状态的运动表征进行编码,可能还会增加M1区中运动单元的兴奋性,以促进运动启动。本研究中,受试者执行腹肌收缩任务时,pSMA可能参与了腹肌收缩前的姿势调整,而M1区则控制实际的腹肌运动。

本研究还发现S1区在2种状态下均发生激活。众所周知,感觉加工和运动产出之间存在紧密的联系。BORICH等<sup>[40]</sup>认为感觉皮层可以协同或独立于M1区驱动运动。LAVROV等<sup>[41]</sup>表示,pSMA、M1、S1和PFC组成神经网络,负责复杂的运动控制和感觉运动整合。这些发现提示,自主排尿相关的腹肌收缩受到PFC、M1区、pSMA与S1的共同控制。PFC在感受到尿意后可决定腹肌收缩,pSMA、S1与M1区参与规划、驱动、执行腹肌收缩。

为了进一步探究尿意诱导的作用,本研究比较了2种不同尿意水平在大脑皮层激活的优势脑区。与无尿意时相比,强尿意下启动腹肌收缩时,PFC尤其是左侧DLPFC激活程度显著增加。DLPFC是额中回外侧PFC的一个区域,通常被认为与BA9/46重叠,与焦虑等情绪密切相关<sup>[42]</sup>。强尿意时,受试者进行腹肌收缩任务时需承担更高的尿失禁风险,情绪也更为紧张,对无法自主控制排尿的不良后果也更加警觉,这可能是导致DLPFC激活显著的原因。YARROW等<sup>[43]</sup>认为与右侧PFC相比,左侧DLPFC尤其是BA46是运动控制功能的重要脑区。因此,在参与尿意的感知及排尿控制中,左侧DLPFC或许发挥更重要作用。而无尿意时出现更强的SMC的激活,可能是由于受试者在该状态下对发生漏尿、排尿等担心较小,进而可以进行更强幅度的腹肌运动。

本研究有以下局限性尚待改进:①自主排尿过程非常复杂,受多个大脑功能区域的共同控制,且各个脑区并不是独立活动。功能相关的多个脑区广泛协调是大脑-膀胱控制的重要机制,本研究对不同脑区功能连接缺乏进一步的研究。②尽管本

研究中采用腹肌表面肌电监测腹肌收缩活动,但主要是作为一种质量监控,尚未记录分析表面肌电信号的不同。③本试验样本量较少,受试者均为青年人。④由于本研究纳入的受试者年龄、体质量指数及排尿日记均无明显性别差异,故未对性别分组比较皮层激活情况,但不同性别的下尿路结构差异所引起的排尿控制是否与大脑皮层的调控有关,有待进一步的探索。

目前,针对神经功能障碍相关尿潴留的治疗方法研究相对较少。这可能是因为这类病症的普遍性不及尿失禁,且现有间歇性导尿方法能够一定程度地缓解症状。尽管如此,探讨能够增强排尿自主性的有效治疗方法仍然具有重要价值,因为它能够帮助患者恢复对排尿的控制能力,提高其生活质量。通过上述研究,针对相关的脑区进行神经调控,恢复腹肌的自主收缩功能,或许能帮助神经源性膀胱患者更有效地进行膀胱排空。

综上所述,S1、M1区、pSMA共同参与调控腹肌收缩。在强尿意状态下进行腹肌运动时,可引起PFC的进一步激活,提示PFC在感知尿意之后,对于促进腹肌运动和排尿启动具有积极的作用。这可为探讨神经源性膀胱与大脑皮层间的内在联系提供参考,促进大脑靶向疗法新方案的出现。

## 参考文献

- [1] KRUGER J, BUDGETT D, GOODMAN J, et al. Can you train the pelvic floor muscles by contracting other related muscles? [J]. *NeuroUrol Urodyn*, 2019, 38(2): 677-683.
- [2] 丛惠伶, 廖利民. 中枢神经系统对排尿的控制和调节[J]. *中国康复理论与实践*, 2008, 14(11): 1011-1013.  
CONG H L, LIAO L M. Central pathways controlling for micturition (review) [J]. *Chin J Rehabil Theory Pract*, 2008, 14(11): 1011-1013.
- [3] LOVICK T A. Central control of visceral pain and urinary tract function [J]. *Auton Neurosci*, 2016, 200: 35-42.
- [4] CRUZ Y, DOWNIE J W. Abdominal muscle activity during voiding in female rats with normal or irritated bladder [J]. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 2006, 290(5): R1436-R1445.
- [5] KARSY M, HAWRYLUK G. Modern medical management of spinal cord injury [J]. *Curr Neurol Neurosci Rep*, 2019, 19(9): 65.
- [6] ZACHOVAJEVIENE B, SIUPSINSKAS L, ZACHOVAJEVAS P, et al. Effect of diaphragm and abdominal muscle training on pelvic floor strength and endurance: results of a prospective randomized trial [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 19192.
- [7] 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.
- [8] 王梦寰, 龚翔, 沈益苇, 等. 基于功能性近红外光谱技术的脑感觉运动联合区网络研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2022, 37(5): 714-719.
- WANG M H, GONG X, SHEN Y W, et al. Research progress of brain sensory-motor joint area network based on functional near infrared spectroscopy [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2022, 37(5): 714-719.
- [9] MATSUMOTO S, ISHIKAWA A, MATSUMOTO S, et al. Brain response provoked by different bladder volumes: a near infrared spectroscopy study [J]. *NeuroUrol Urodyn*, 2011, 30(4): 529-535.
- [10] HUPPERT T J, HOGE R D, DIAMOND S G, et al. A temporal comparison of BOLD, ASL, and NIRS hemodynamic responses to motor stimuli in adult humans [J]. *Neuroimage*, 2006, 29(2): 368-382.
- [11] SESEKE S, BAUDEWIG J, KALLENBERG K, et al. Voluntary pelvic floor muscle control: an fMRI study [J]. *Neuroimage*, 2006, 31(4): 1399-1407.
- [12] KUHTZ-BUSCHBECK J P, VAN DER HORST C, WOLFF S, et al. Activation of the supplementary motor area (SMA) during voluntary pelvic floor muscle contractions: an fMRI study [J]. *Neuroimage*, 2007, 35(2): 449-457.
- [13] 高铁, 廖利民. 健康成人膀胱储尿功能的大脑静息态功能网络连接研究[J]. *临床泌尿外科杂志*, 2018, 33(1): 12-15.
- GAO Y, LIAO L M. Functional connectivity study on brain control of bladder storage function [J]. *J Clin Urol*, 2018, 33(1): 12-15.
- [14] GROENENDIJK I M, LUIJTEN S P R, DE ZEEUW C I, et al. Whole brain 7T-fMRI during pelvic floor muscle contraction in male subjects [J]. *NeuroUrol Urodyn*, 2020, 39(1): 382-392.
- [15] 英小倩, 高铁, 廖利民. 健康女性强烈排尿感脑功能网络的小世界特征[J]. *中国康复理论与实践*, 2021, 27(5): 510-515.
- YING X Q, GAO Y, LIAO L M. Small-world network features of brain functional network as strong void perception for healthy female [J]. *Chin J Rehabil Theory Pract*, 2021, 27(5): 510-515.
- [16] WANG M H, WANG Y X, XIE M, et al. Transcutaneous auricular vagus nerve stimulation with task-oriented training improves upper extremity function in patients with subacute stroke: a randomized clinical trial [J]. *Front Neurosci*, 2024, 18: 1346634.
- [17] CHIARELLI A M, MACLIN E L, FABIANI M, et al. A kurtosis-based wavelet algorithm for motion artifact correction of fNIRS data [J]. *Neuroimage*, 2015, 112: 128-137.
- [18] BISWAL B, YETKIN F Z, HAUGHTON V M, et al. Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI [J]. *Magn Reson Med*, 1995, 34(4): 537-541.
- [19] DELPY D T, COPE M, VAN DER ZEE P, et al. Estimation of optical pathlength through tissue from direct time of flight measurement [J]. *Phys Med Biol*, 1988, 33(12): 1433-1442.
- [20] CUI X, BRAY S, REISS A L. Functional near infrared spectroscopy (NIRS) signal improvement based on negative correlation between oxygenated and deoxygenated hemoglobin dynamics [J]. *Neuroimage*, 2010, 49(4): 3039-3046.
- [21] XIA M R, WANG J H, HE Y. BrainNet Viewer: a network visualization tool for human brain connectomics [J]. *PLoS One*, 2013, 8(7): e68910.
- [22] BAESSLER K, METZ M, JUNGINGER B. Valsalva versus straining: There is a distinct difference in resulting bladder neck and puborectalis muscle position [J]. *NeuroUrol Urodyn*, 2017, 36(7): 1860-1866.
- [23] DE GROAT W C, WICKENS C. Organization of the neural switching circuitry underlying reflex micturition [J]. *Acta Physiol*, 2013, 207(1): 66-84.
- [24] GRIFFITHS D J. Cerebral control of bladder function [J]. *Curr Urol Rep*, 2004, 5(5): 348-352.
- [25] SMITH P P, KUCHEL G A, GRIFFITHS D. Functional brain imaging and the neural basis for voiding dysfunction in older adults [J]. *Clin Geriatr Med*, 2015, 31(4): 549-565.
- [26] GRIFFITHS D. Functional imaging of structures involved in neural control of the lower urinary tract [J]. *Handb Clin Neurol*, 2015, 130: 121-133.
- [27] BLOK B F, WILLEMSSEN A T, HOLSTEGE G. A PET study on brain control of micturition in humans [J]. *Brain*, 1997, 120 (Pt 1): 111-121.
- [28] ARYA N G, WEISSBART S J. Central control of micturition in women: brain-bladder pathways in continence and urgency urinary incontinence [J]. *Clin Anat*, 2017, 30(3): 373-384.
- [29] MICHELS L, BLOK B F, GREGORINI F, et al. Supraspinal control of urine storage and micturition in men: an fMRI study [J]. *Cereb Cortex*, 2015, 25(10): 3369-3380.
- [30] MUKHOPADHYAY S, STOWERS L. Choosing to urinate. Circuits and mechanisms underlying voluntary urination [J]. *Curr Opin Neurobiol*, 2020, 60: 129-135.
- [31] GHATAS 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.
- [32] CARR L J, HARRISON L M, STEPHENS J A. Evidence for bilateral innervation of certain homologous motoneurone pools in man [J]. *J Physiol*, 1994, 475(2): 217-227.
- [33] STIPPICH C, BLATOW M, DURST A, et al. Global activation of primary motor cortex during voluntary movements in man [J]. *Neuroimage*, 2007, 34(3): 1227-1237.
- [34] NOUR S, SVARER C, KRISTENSEN J K, et al. Cerebral activation during micturition in normal men [J]. *Brain*, 2000, 123 (Pt 4): 781-789.
- [35] YAO J W, ZHANG Q C, LIAO X, et al. A corticopontine circuit for initiation of urination [J]. *Nat Neurosci*, 2018, 21(11): 1541-

- 1550.
- [36] BLOK B F, STURMS L M, HOLSTEGE G. A PET study on cortical and subcortical control of pelvic floor musculature in women [J]. *J Comp Neurol*, 1997, 389(3): 535–544.
- [37] SHIMA K, TANJI J. Both supplementary and presupplementary motor areas are crucial for the temporal organization of multiple movements [J]. *J Neurophysiol*, 1998, 80(6): 3247–3260.
- [38] NAKAMURA K, SAKAI K, HIKOSAKA O. Effects of local inactivation of monkey medial frontal cortex in learning of sequential procedures [J]. *J Neurophysiol*, 1999, 82(2): 1063–1068.
- [39] CUNNINGTON R, WINDISCHBERGER C, MOSER E. Premovement activity of the pre-supplementary motor area and the readiness for action: studies of time-resolved event-related functional MRI [J]. *Hum Mov Sci*, 2005, 24(5/6): 644–656.
- [40] BORICH M R, BRODIE S M, GRAY W A, et al. Understanding the role of the primary somatosensory cortex: opportunities for rehabilitation [J]. *Neuropsychologia*, 2015, 79(Pt B): 246–255.
- [41] LAVROV I, LATYPOV T, MUKHAMETOVA E, et al. Pre-motor versus motor cerebral cortex neuromodulation for chronic neuropathic pain [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 12688.
- [42] WHITE L K, MAKHOUL W, TEFERI M, et al. The role of DPFc laterality in the expression and regulation of anxiety [J]. *Neuropharmacology*, 2023, 224: 109355.
- [43] YARROW K, BROWN P, KRAKAUER J W. Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports [J]. *Nat Rev Neurosci*, 2009, 10(8): 585–596.

## Exploring the Functional Brain Activity of Motor Control of Abdominal Muscle Associated with Voluntary Voiding Based on Functional Near-Infrared Spectroscopy

SHI Yinshuang<sup>1,2</sup>, WANG Menghuan<sup>1,2</sup>, PAN Yingying<sup>1,2</sup>, LIN Feng<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup> School of Rehabilitation Medicine, Nanjing Medical University, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

<sup>2</sup> The First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing, Jiangsu 210029, China;

<sup>3</sup> Sir Run Run Hospital, Nanjing Medical University, Nanjing, Jiangsu 211100, China

\*Correspondence: LIN Feng, E-mail: peterduus@njmu.edu.cn

**ABSTRACT Objective** The contractions of abdominal muscle during voluntary urination is a motor control task, Which aims to explore the central activity characteristics of this action with functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). **Methods** A total of 19 healthy subjects aged 18 years or older were recruited to undergo fNIRS testing twice, performing repetitive abdominal muscle contractions in the no-urine and strong-urine states. Brain activity under the corresponding no-abdominal muscle-contraction task was used as a baseline to analyze the cortical activities specific to abdominal muscle contractions in these two different states. **Results** Abdominal muscle contractions during the strong desire to urinate primarily activated the bilateral pre-motor/supplementary motor area (BA6), bilateral dorsolateral prefrontal cortex (BA9/46), bilateral frontal pole area (BA10), the anterior portion of the right inferior frontal gyrus (BA47), the right middle temporal gyrus (BA21), the right primary motor cortex (BA4), and the left primary somatosensory cortex (BA1/2/3) in conjunction with the left inferior frontal of pars triangularis Broca's area (BA45) ( $P < 0.05$ ). In contrast, abdominal muscle contractions with no desire to urinate primarily activated the bilateral pre-motor/supplementary motor area (BA6) ( $P < 0.05$ ), the right primary motor cortex (BA4), the right primary somatosensory cortex (BA1/2/3), the right inferior frontal of pars triangularis Broca's area (BA45), and the right supramarginal gyrus part of Wernicke's area (BA40) ( $P < 0.05$ ). Compared to the strong urination state, stronger activation of the bilateral premotor/assistive motor area (BA6) was present in the non-urination state ( $P < 0.05$ ). Compared to the non-urination state, stronger activation of the left dorsolateral prefrontal cortex (BA46) was present in the strong urination state ( $P < 0.05$ ). **Conclusion** The primary somatosensory cortex, primary motor cortex, and pre-motor/supplementary motor area are jointly involved in the regulation of voluntary urination-associated random abdominal muscle contractions. And further activation of the prefrontal cortex can be induced during abdominal muscle contractions in the strong urination state, suggesting that the prefrontal cortex plays a positive role in facilitating abdominal muscle movements and initiating urination following the perception of urinary awareness.

**KEY WORDS** functional near-infrared spectroscopy; cerebral cortex; abdominal muscle contractions; voiding control; bladder

**DOI:**10.3724/SP.J.1329.2024.03008