

# 右侧正中神经电刺激促醒疗法对健康人脑功能影响的 fMRI 研究

陈祯<sup>1</sup> 王俭<sup>2</sup> 王宝兰<sup>1</sup> 门卫伟<sup>3</sup> 张磊<sup>2</sup> 张小宁<sup>4</sup>

<sup>1</sup>新疆医科大学第一附属医院康复医学科;<sup>2</sup>新疆医科大学第一附属医院影像中心;<sup>3</sup>北京大学磁共振成像研究中心;<sup>4</sup>新疆医科大学第一附属医院神经内科

通信作者:张小宁,Email: 596970592@qq.com

**【摘要】** **目的** 探讨右侧正中神经电刺激(RMNS)促醒疗法对健康人脑功能的影响。**方法** 选取 28 例健康志愿者作为受试者,将 RMNS 促醒治疗模式作为任务刺激,采用 Block 实验设计,给予受试者 30 s 刺激-30 s 休息共重复 6 次,并同步采用大脑功能磁共振成像(fMRI)技术进行成像扫描。使用 SPM 12 软件进行统计处理时将同一受试者刺激状态与静息状态的脑功能成像互为对照,分析其脑区激活情况。**结果** fMRI 检查显示,RMNS 促醒治疗模式下健康人脑正激活区主要集中在左侧初级运动皮质(M1)、皮质运动前区(PMC),双侧初级体感皮质(S1)、双侧次级体感皮质(S2)及左侧岛叶。与静息态相比,RMNS 促醒刺激模式下上述激活脑区 BOLD 信号强度变化较大, $T>5.84, P<0.05$ (FWE 校正)。**结论** 右侧正中神经电刺激促醒治疗能通过激活右手运动及感觉功能相关脑区,兴奋局部大脑皮质,产生一定促醒效应。

**【关键词】** 右侧正中神经电刺激; 促醒; 功能磁共振成像

**基金项目:**新疆医科大学第一附属医院自然科学基金项目(2013ZRQN02);新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2015211C036)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.02.003

## The effects of electrically stimulating the right median nerve

Chen Mi<sup>1</sup>, Wang Jian<sup>2</sup>, Wang Baolan<sup>1</sup>, Men Weiwei<sup>3</sup>, Zhang Lei<sup>2</sup>, Zhang Xiaoning<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Rehabilitation Medicine, The First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830054, China; <sup>2</sup>Imaging Center, The First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830054, China;

<sup>3</sup>Center for Functional Imaging, Peking University, Beijing 100871, China; <sup>4</sup>Department of Neurology, The First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830054, China

Corresponding author: Zhang Xiaoning, Email: 596970592@qq.com

**【Abstract】** **Objective** To explore the effect of right median nerve stimulation (RMNS) on brain function in healthy subjects. **Methods** Twenty-eight healthy volunteers were selected as the study's subjects. RMNS was administered as a task stimulation in a wake-up therapy mode. The subjects were given 30 seconds of stimulation followed by 30 seconds of rest, repeated for 6 times as the block experiment designed, and functional magnetic resonance imaging (fMRI) was performed simultaneously with the task stimulation. The brain activation was analyzed using SPM 12 software. **Results** The fMRI showed that RMNS activated primarily the left M1, the premotor cortex (PMC), the bilateral primary and secondary somatosensory cortices (S1 and S2), and the left insular lobe. Compared with the resting state, the intensity of BOLD signal in the above activated brain areas changed significantly in RMNS wake-up stimulation mode. **Conclusion** Stimulation of the right median nerve can stimulate the local cerebral cortex and produce a certain wake-up effect by activating the right brain areas related to the motor and sensory functioning of the hand.

**【Key words】** Right median nerve; Electrical stimulation; Functional magnetic resonance imaging

**Fund program:** Natural Science Foundation of the First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University (2013ZRQN02); Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2015211C036)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.02.003

随着急救及重症医学的发展,外伤性及非外伤性脑损伤患者的死亡率下降,临床中发生意识障碍的患者越来越多,给家庭和社会带来沉重的负担,这类患者的促醒治疗一直是国内外研究的热点问题<sup>[1-10]</sup>。目前常见

的促醒治疗主要包括促醒药物、高压氧疗法、刺激疗法(包括深部脑电刺激、颈部脊髓硬膜外电刺激、外周神经刺激)、自体免疫活化细胞注射疗法等。其中,外周神经电刺激治疗安全无创、操作简单,适合昏迷早期应用。

正中神经属外周神经,由于支配手功能的神经纤维在大脑皮质的投射面积大,且正中神经的脊髓部分与脑干上行网状激活系统(ascending reticular activating system, ARAS)具有突触联系<sup>[2-4]</sup>,如果对正中神经进行电刺激可能引起较大区域脑皮质的兴奋甚至 ARAS 的激活,产生某种程度上的促醒效应。基于上述推测,1996 年日本和美国学者相继采用右侧正中神经电刺激(right median nerve stimulation, RMNS)进行促醒治疗的研究,发现患者不仅意识状态得到改善,其言语和计算能力也有提高<sup>[4,10]</sup>,这一结果与正中神经电刺激能兴奋 Broca 运动/语言计划区(Broca's motor/speech planning area)有关<sup>[2]</sup>,而多数个体中,不论利手是右手还是左手,其 Broca 运动/语言计划区均位于左额颞区,因此不少学者倾向于选择右侧正中神经进行电刺激<sup>[2-6]</sup>。近 20 年的临床观察发现, RMNS 在意识障碍促醒治疗中有一定效果<sup>[1-6]</sup>。虽然有研究通过脑血流灌注断层显像、诱发电位检查、神经递质检测发现 RMNS 能加速病灶脑区的血流速度、改善脑电活动并调节脑神经递质<sup>[2]</sup>,但 RMNS 促醒治疗模式对功能脑区的激活情况是怎样的,有无其他与意识相关的脑皮质被激活,这些问题迄今尚未完全明了。本研究利用基于血氧水平依赖的功能磁共振成像(blood oxygenation level dependent-functional magnetic resonance imaging, BOLD-fMRI)技术观察 RMNS 促醒模式下脑区激活的情况,为避免意识障碍患者病灶差异对结果的影响,选择健康人作为研究对象,旨在探究 RMNS 促醒刺激模式对脑功能的影响。

## 对象与方法

### 一、研究对象

所有入选者通过常规脑磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)检查,排除既往神经系统疾病史,且均为右利手,近 2 周无服药史,无心理或精神疾病史,无长期从事音乐演奏、特殊手工艺操作经历。招募健康志愿者 32 例,其中有 4 例因咳嗽、喷嚏等动作导致头部活动过大剔除,共有 28 例入组,其中男 13 例,女 15 例,年龄 22~55 岁,平均(34.53±10.15)岁,体重指数平均(22.06±2.59)kg/m<sup>2</sup>。详见表 1。本研究已通过新疆医科大学第一附属医院医学伦理委员会批准(伦理审批号 20140621-01),所有受试者均签署知情同意书。

表 1 受试者的一般情况( $\bar{x}\pm s$ )

性别	例数	平均年龄 (岁)	体重指数 (kg/m <sup>2</sup> )
男	13	33.77±10.77	22.90±2.64
女	15	35.19±10.03	21.34±2.39

### 二、电刺激仪和刺激方法及任务设计

电刺激仪:电刺激任务由一改装的电刺激仪完成(江苏德长医疗科技有限公司 DC-L-500 智能助行仪),该设备能接受 5 V 正向矩形脉冲外部触发信号。将德国产西门子磁共振成像仪同步触发器(10092360 fMRI Trigger Converter)的输出端连接至该电刺激设备的外部触发信号输入端,当磁共振成像仪开始进行 BOLD-fMRI 序列扫描时,电刺激设备能实现同步启动。改装后,电刺激仪的刺激时间和间歇时间均可调至 30 s 以上。电刺激仪输出端通过碳纤维电极线与电极片连接;进行磁共振检查时,除电极线及电极片外,其它电刺激设备部件均放在磁共振检查室外。

电刺激方法<sup>[2-4]</sup>:于受试者右前臂掌侧腕横纹上 2 cm 处并置两个电极片,给予不对称双相波进行电刺激,脉宽 300 ms,频率 40 Hz。刺激强度 7~20 mA,通常为产生手指运动阈强度的 1.5 倍,使受试者有明显的食指、中指屈曲动作。

电刺激任务:采用 Block 实验设计,电刺激仪被磁共振成像仪同步触发后先静息 12 s,做为空扫时间,此后刺激 30 s,静息 30 s,重复 6 次,共 6 min 12 s。同一受试者刺激状态与静息状态的脑功能成像在统计处理时互为对照,减少了试验偏倚。

### 三、fMRI 检查

所有受试者的 fMRI 数据采集均在新疆医科大学第一附属医院影像中心完成。采用西门子 Magnetom Skyra 3.0T 自由呼吸磁共振成像仪,成像线圈为 20 通道头颈联合线圈。扫描时用海绵垫固定受试者头部,令其保持头部不动。嘱其放松、睁眼,保持清醒并排除杂念,待其适应检查室环境后开始扫描。任务态和结构像扫描参数采用中国脑成像联盟(www.abimaging.org)建议参数,任务态功能扫描采用基于梯度回波的平面回波序列,重复时间 2000 ms,回波时间 30 ms,倾角 90°,视野 224 mm×224 mm,采集矩阵 64×64,横断面 32 层,层厚 3.5 mm,层间距 0.875 mm。采集时间 6 min 12 s,前 12 s 为空扫。为保证机器状态的稳定性并排除机器信号漂移、减少血液动力学对脑区信号的影响,功能扫描的前 12 s 的数据弃除。

### 四、数据处理和统计分析

使用 SPM 12 进行数据预处理及分析。预处理:为了得到稳定的时间信号,删除功能像前 6 个时间点,层间时间校正,头动对齐,排除头部活动过大的 4 例受试者数据(在 X、Y、Z 轴上平动>3 mm 或旋转角>1°),对剩余 28 例受试者数据进行分析;利用联合分割方法将功能像标准化到 MNI152 标准空间,重采样体素大小为 3 mm×3 mm×3 mm;使用半宽高 8 mm 高斯核进行空间平滑。采用 SPM 12 对受试者任务态进行个体和组分析,组分析使用单样本 T 检验,组分析结果 P<



表 2 RMNS 促醒刺激模式下健康人 fMRI 扫描显示的正激活脑区参数

解剖位置		激活区大小 (体素)	体素水平			MNI 空间坐标(mm)		
解剖名称	Brodman 分区		T	Z	$P_{FWE-corr}$	X	Y	Z
左侧中央前回	BA2、3、4、6	402	10.41	6.55	0.000	-45	-19	59
左侧中央后回								
左侧缘上回	BA40	132	8.66	5.94	0.000	-51	-22	23
左侧中央后回								
左侧岛叶	BA13	47	8.54	5.90	0.000	-42	-4	14
右侧缘上回	50	7.21	5.34	0.000	57	-19	23	
右侧中央后回								

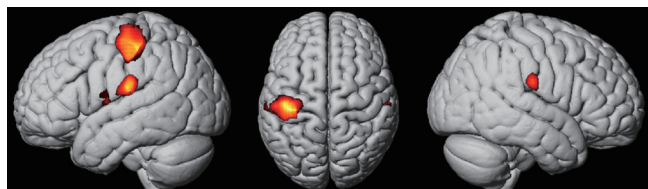
注:体素大小为 3 mm×3 mm×3 mm,  $P<0.05$ (FWE 校正),  $T>5.84$ , 激活簇>30 个体素

0.05(FWE 校正), 激活簇>30 个体素认为有显著性意义的激活脑区。

### 结 果

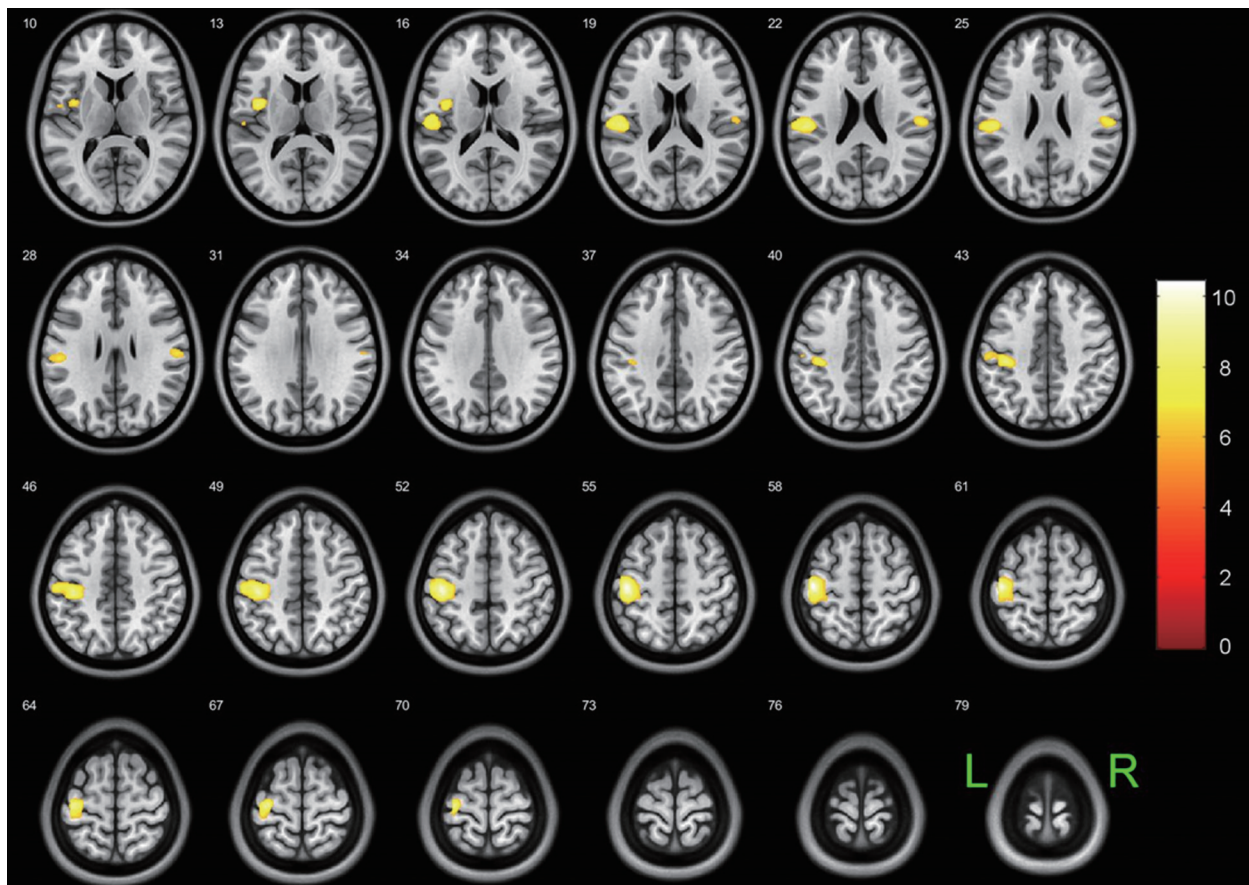
通过 BOLD-fMRI 检查发现, 右侧正中神经电刺激促醒治疗模式下 28 例受试者正激活的脑区主要集中在左脑的手运动、感觉功能区, 包括初级运动皮质(primary motor cortex, M1)所在的中央前回(BA4)、皮质运动前区(premotor cortex, PMC)所在的中央前回(BA6)、初级体感皮质(primary somatosensory cortex, S1)所在的中央后回(BA2、BA3)、次级体感皮质(secondary somatosensory cortex, S2)所在的缘上回(BA40)、左侧岛叶(BA13)。右脑也存在激活区, 主要

位于 S2 所在的缘上回及 S1 所在的中央后回。与静息态相比, RMNS 促醒模式下上述激活脑区 BOLD 信号强度变化较大,  $T>5.84$ ,  $P<0.05$ (FWE 校正)。详见表 2、图 1 及图 2。



注:左脑中央前回、中央后回、缘上回激活区(左);左脑中央前回、中央后回激活区(中);右脑缘上回、中央后回激活区(右)

图 1 组分析激活结果脑表面显示图(激活结果图由 xjView 9.6 制作)



注:水平位层切显示激活脑区, 显示的激活区域与图 1 相同

图 2 组分析激活结果显示图(激活结果图由 xjView 9.6 制作)

## 讨 论

意识的构成包括觉醒 (wakefulness) 和知觉 (awareness)。觉醒是指人能睁眼并对一定程度的刺激有反应, 如果还能拥有感觉、情感和思想则称为有知觉<sup>[11]</sup>。两者的神经传导通路不同, 觉醒是依靠脑干上行网状激活系统(脑干网状结构及其丘脑非特异性投射)来实现的, 而知觉则有赖于丘脑、皮质及其白质连接功能的完整<sup>[8]</sup>。脑干上行网状激活系统损害会导致昏迷, 丘脑、皮质及其白质连接受损但脑干上行网状激活系统功能完整则进入植物状态<sup>[9]</sup>。促醒治疗应当能作用于觉醒和/或知觉的传导通路, 通过改善其功能来发挥促醒效应。右侧正中神经电刺激对中枢神经可能产生以下作用: ①控制手功能的脑区范围大, 因此刺激正中神经可能会兴奋大面积的脑皮质; ②大多数人不论右利手或左利手, 其优势半球多位于左脑, 当进行手主动运动或是思考如何进行语言表达或手运动时, 正电子断层扫描 (positron emission tomography, PET) 显示左侧额颞区 (Broca 运动/言语计划区) 兴奋, 而右侧正中神经电刺激能模拟这一效应, 激活左侧额颞区<sup>[12]</sup>; ③正中神经的传导通路与 ARAS 具有突触联系<sup>[24]</sup>, RMNS 产生的上行冲动能兴奋蓝斑 (去甲肾上腺素能神经递质系统) 及中缝背核 (5-羟色胺能神经递质神经递质系统)<sup>[13]</sup>, 激活丘脑-皮质的投射系统<sup>[14]</sup>。

现有研究显示, RMNS 可能通过以下效应产生促醒作用: ①加快脑血流量, 改善脑细胞代谢<sup>[15-16]</sup>; ②调节脑内神经递质: 抑制脑脊液中类吗啡样物质  $\beta$ -内啡肽含量, 逆转其对中枢神经系统的抑制<sup>[17]</sup>, 降低前额叶皮质区 (Prefrontal cortex, PFC) 抑制性神经递质 GABA b 受体表达<sup>[18]</sup>, 上调 PFC 兴奋性神经递质组胺 H1 受体表达<sup>[19]</sup>, 上调 PFC 和下丘脑兴奋性神经肽 Orexin-A 及 Orexin 受体 OXIR 水平<sup>[20]</sup>, 上调 PFC 兴奋性神经递质 5-HT 2A 受体水平<sup>[21]</sup>; ③改善脑电活动, 促进脑电活动从慢波向快波转变<sup>[22]</sup>。

本研究中使用 RMNS 促醒治疗模式, 其参数设置缺乏统一规范, 虽有国内研究对参数设置进行了探讨<sup>[23]</sup>, 但仍参考 Cooper 在其多项临床研究<sup>[2-5]</sup>中所采用的脉宽 300 ms、频率 40 Hz 的不对称双向波进行电刺激。电流强度因人而异, 以产生手指运动阈强度的 1.5 倍为准, 一般在 7~20 mA, 可观察到受试者有明显的食指、中指屈曲动作。按照这组参数进行电刺激时激活的脑功能区主要集中在左侧 M1 区、PMC 区, 同时双侧 S1、S2, 左侧岛叶也有激活。上述激活脑区中, 左脑 M1 区激活与 RMNS 促醒治疗模式下引发的手指运动有关。而 PMC 区参与外源性感觉信号引导的运动

准备<sup>[24]</sup>, RMNS 时强烈的感觉刺激伴随运动产生, 从而激活了左侧 PMC 区, 这一点与非电刺激引发的健康人手被动运动中 PMC 区被激活的情况类似<sup>[25]</sup>。右侧正中神经电刺激时双侧 S1、S2 区均有激活的原因可能由以下几点: ①电刺激信号通过外周神经上传入脑, 可能在胼胝体内将冲动转换到另一侧大脑半球, 即交叉迁移现象<sup>[26]</sup>, 这种交叉效应不是在颈脊髓水平介导的, 电化学脉冲的传递需要通过颈髓、脑干、丘脑和大脑皮质的通路, 然后胼胝体内的脉冲信号会传递到对侧大脑半球<sup>[5]</sup>; ②电刺激信号通过丘脑直接投射到同侧或对侧的大脑皮质, 从而引发双侧感觉皮质激活<sup>[14]</sup>; ③部分信号可能通过非交叉的上行纤维直接投射到同侧大脑半球, 引发同侧感觉皮质激活。至于 RMNS 引发左侧脑岛叶激活, 可能是由于试验前受试者未接受任何适应性的电刺激治疗, 试验时电刺激产生的不适感受对受试者会有明显影响。脑岛能接受躯体来源的各种刺激信息并形成主观感受<sup>[27]</sup>, RMNS 产生的不适感引起左侧岛叶激活。因此, 本研究利用 BOLD-fMRI 技术证实了 RMNS 促醒治疗能激活右手运动及感觉功能相关脑区, 兴奋脑皮质。这一效应对意识障碍患者觉醒可能产生有益的作用。

国外也有利用 fMRI 观察 RMNS 激活脑区的研究, 但这些研究着重观察 RMNS 在诱发电位检查中的作用, 多采用 1~10 Hz 的刺激频率, 脉宽 200 ms<sup>[28-29]</sup>, 与 RMNS 促醒模式的参数相差较大。这些研究也发现 RMNS 感觉刺激能激活双侧 S1、S2 区<sup>[29-31]</sup>, 运动刺激时给予的刺激强度以手指刚刚出现抽动为准, 可以出现左侧 M1 区被激活<sup>[28-29]</sup>。

本研究中, 未能观察 RMNS 在脑神经网络中的上传路径。有学者推测, RMNS 冲动可能沿“正中神经-脊神经-颈髓-脑干-丘脑-皮质功能区”传导通路上行<sup>[17]</sup>, 此过程中与意识管控相关的传导束可能被激活; 正中神经与 ARAS 存在突触联系<sup>[24]</sup>, 冲动上传中可能使 ARAS 兴奋; 左侧脑岛被激活, 提示 RMNS 在上传中也能对某些知觉通路产生刺激。因此, RMNS 除了兴奋右手运动及感觉功能相关脑区, 还可能通过多途径产生促醒效应。

综上所述, RMNS 可能对人脑觉醒及知觉通路产生一定影响并发挥促醒作用。然而, 意识障碍患者大多存在不同部位、不同程度的脑损伤, 而病灶部位和损伤程度直接影响 RMNS 的促醒效果。目前临床治疗中并未根据昏迷患者的病灶部位对是否使用 RMNS 进行选择<sup>[1-6]</sup>, 疗效也缺乏预期<sup>[5-6]</sup>。就笔者的临床应用体会, RMNS 对严重脑干损伤、缺血缺氧引起广泛脑白质脱髓鞘病变引发昏迷的促醒效果欠佳; 可进一步利用 fMRI 研究 RMNS 促醒治疗对不同类型意识障碍



患者脑皮质激活的情况,考察 RMNS 促醒治疗的适用范围及预期效果。

### 参 考 文 献

- [1] Cossu G. Therapeutic options to enhance coma arousal after traumatic brain injury: State of the art of current treatments to improve coma recovery[J]. Br J Neurosurg, 2014, 28(2):187-198. DOI:10.3109/02688697.2013.841845.
- [2] Cooper EB, Scherder EJ, Cooper JB. Electrical treatment of reduced consciousness; experience with coma and Alzheimer's disease[J]. Neuropsychol Rehabil, 2005, 15(3):389-405.
- [3] Cooper EB, Cooper JB. Electrical treatment of coma via the median nerve[J]. Acta Neurochir Suppl, 2003, 87(1):7-10.
- [4] Cooper JB, Jane JA, Alves WM, et al. Right median nerve electrical stimulation to hasten awakening from coma[J]. Brain Injury, 1999, 13(4):261-267.
- [5] Lei J, Wang L, Gao G, et al. Right median nerve electrical stimulation for acute traumatic coma patients[J]. J Neurotrauma, 2015, 32(20):1584-1589. DOI:10.1089/neu.2014.3768.
- [6] Wu X, Zhang C, Feng J, et al. Right median nerve electrical stimulation for acute traumatic coma (the Asia Coma Electrical Stimulation trial): study protocol for a randomised controlled trial[J]. Trials, 2017, 18(1):311. DOI:10.1186/s13063-017-2045-x.
- [7] Femndez-Espejo D, Junque C, Cruse D, et al. Combination of diffusion tensor and functional magnetic resonance imaging during recovery from the vegetative state[J]. BMC Neurol, 2010, 10:77. DOI:10.1186/1471-2377-10-77.
- [8] Plum F, Posner JB. The Diagnosis of Stupor and Coma[M]. 3rd ed. Philadelphia:FA Davis, 1982.
- [9] 谢秋幼,虞容豪,何艳斌,等.意识障碍:概念、分类与评定[J].医学与哲学(临床决策论坛版),2009,30(10):39-41.
- [10] Yokoyama Y, Kemei Y, Kanno T, et al. Right median nerve stimulation for comatose patients[J]. Society For Treatm Coma, 1996, 5:117-120.
- [11] 戴懿,朱熠,汪兵,等.意识障碍患者的神经功能成像—评价、预后和局限性[J]. 罕见疾病杂志,2016,23(2):61-64. DOI:10.3969/j.issn.1009-3257.2016.02.023.
- [12] Montgomery G. The mind in motion[J]. Discover, 1989, 10(1):58-68.
- [13] Kayama Y, Koyama Y. Brainstem neural mechanisms of sleep and wakefulness[J]. Eur Urol, 1998, 33(Suppl 3):12-15.
- [14] Bagnato S, Boccagni C, Sant'angelo A, et al. Emerging from an unresponsive wakefulness syndrome: brain plasticity has to cross a threshold level[J]. Neurosci Biobehav Rev, 2013, 37(10 Pt 2):2721-2736. DOI:10.1016/j.neubiorev.2013.09.007.
- [15] 杨初燕,王亮,冯珍,等.正中神经电刺激对脑外伤后昏迷患者促醒作用的临床及机制研究[J].中国康复医学杂志,2016,31(11):1195-1199. DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2016.11.004.
- [16] 雷晋,高国一,宋绍莉,等.右正中神经电刺激对颅脑创伤昏迷患者脑血流灌注的影响:SPECT-CT 显像观察[J].中华神经外科杂志,2012,28(2):112-115. DOI:10.3760/cma.j.issn.1001-2346.2012.02.002.
- [17] 贾功伟,宋琦,许川山,等.正中神经电刺激对持续性植物状态患者促醒作用的研究[J].中华物理医学与康复杂志,2008,30(1):59-60.
- [18] 魏天祺,冯珍.正中神经电刺激对脑外伤后昏迷大鼠  $\gamma$ -氨基丁酸 b 受体表达变化的影响[J].中国康复医学杂志,2016,31(1):9-13. DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2016.01.003.
- [19] 杜青,冯珍.正中神经电刺激对脑外伤昏迷大鼠前额叶皮质 H1 受体表达的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2017,39(2):81-85. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2017.02.001.
- [20] 钟颖君,王亮.正中神经电刺激对脑外伤后昏迷大鼠前额叶皮质及下丘脑 Orexin-A 及其受体 OX1R 表达变化的影响[J].中国康复医学杂志,2015,30(7):640-644. DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2015.07.002.
- [21] 杜青,冯珍.正中神经电刺激脑外伤昏迷大鼠前额叶皮质 5-HT 2A 受体表达的实验研究[J].中国康复医学杂志,2017,32(3):253-257. DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2017.03.002.
- [22] 游文栋,唐琪临,王磊,等.右正中神经电刺激对颅脑创伤昏迷患者脑电活动的影响[J].中华创伤杂志,2016,32(2):120-123. DOI:10.3760/cma.j.issn.1001-8050.2016.02.006.
- [23] 石艳红,邵秀芹,冯珍,等.正中神经电刺激对脑外伤后昏迷促醒治疗的参数研究[J].中国康复理论与实践,2017,23(2):207-210. DOI:10.3969/j.issn.1006-9771.2017.02.018.
- [24] 宋扬,李吉.手指运动相关脑皮层功能区 fMRI 的研究[J].立体定向和功能性神经外科杂志,2006,19(3):178-180.
- [25] 蔡伟森,吴毅,吴军发,等.健康成年人手部主动及被动运动时大脑功能区的功能性磁共振成像研究[J].中华物理医学与康复杂志,2011,33(1):20-24. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2011.01.007.
- [26] Hortobágyi T, Scott K, Lambert J, et al. Cross-education of muscle strength is greater with stimulated than voluntary contractions[J]. Motor Control, 1999, 3(2):205-219.
- [27] 刘婧,尚伟芬.脑岛 (insula) 对心理健康和行为的奇特影响[J].中国生物化学与分子生物学报,2007,4:255.
- [28] Manganotti P, Formaggio E, Storti SF, et al. Steady-state activation in somatosensory cortex after changes in stimulus rate during median nerve stimulation[J]. Magn Reson Imaging, 2009, 27(9):1175-1186. DOI:10.1016/j.mri.2009.05.009.
- [29] Kampe KK, Jones RA, Auer DP. Frequency dependence of the functional MRI response after electrical median nerve stimulation[J]. Hum Brain Mapp, 2000, 9(2):106-114.
- [30] Puce A, Constable T, Luby ML, et al. Functional magnetic resonance imaging of sensory and motor cortex: comparison with electrophysiological localization[J]. J. Neurosurg, 1995, 83:262-270.
- [31] Davis KD, Wood ML, Crawley AP, et al. fMRI of human somatosensory and cingulate cortex during painful electrical nerve stimulation[J]. Neuroreport, 1995, 7:321-325.

(修回日期:2018-12-29)

(本文编辑:汪玲)