

·临床研究·

基于脑电信号的上肢运动想象与运动执行脑网络的动态功能连接研究*

胡静璐¹ 郭冬菊¹ 王德正¹ 徐舫舟² 张杨¹ 岳寿伟^{1,3}

摘要

目的:本研究通过记录脑卒中偏瘫患者及健康人进行指定的运动想象(motor imagery, MI)及运动执行时的脑电信号,评估不同任务态初级运动区(motor area, M1)及运动前区(premotor area, PMA)相关节点的功能连接的差异,并探索其与共同运动、分离运动控制之间的关系。

方法:共纳入10例脑卒中偏瘫患者及19例健康人,所有受试者根据视觉指令完成运动想象与运动执行任务,采集执行任务时的脑电信号,选取包括M1和PMA上的12个信道数据进行分析。对8—30Hz频带脑电信号进行滤波处理,采用基于改良S变换提取特征,并进行归一化处理避免个体差异,分别对左右手运动想象以及两种运动执行时12个节点的数据进行相关性分析(Pearson相关系数)以明确脑功能连接,并对节点度进行 χ^2 检验观察差异。

结果:在脑卒中患者中,各节点关联度在运动想象及运动执行中的分布趋势与健康人类似;与运动执行相比,运动想象时各节点功能连接强度和密度都有升高趋势,与健康人结果类似。健康人在进行左手运动想象时,M1区的C4节点关联度明显高于对侧C3($P<0.05$),当右手运动想象时,在左侧PMA区FC3和FC1的功能连接总和明显高于对侧FC4和FC2总和($P<0.05$);当进行右上肢分离运动时,C3节点度明显降低($P<0.05$)。

结论:右手运动想象的功能连接的核心区域在左侧PMA区,且各信道节点关联度高于运动执行,而左手运动想象功能连接分布较平均。共同运动与分离运动模式所激活的主要脑区存在差异。

关键词 运动执行;运动想象;功能连接;相关性分析;分离运动

中图分类号:R493,R743.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2024)-03-0326-08

The dynamic functional connectivity of brain network during motor imagination and execution of upper limbs based on EEG signals/HU Jinglu, GUO Dongju, WANG Dezheng, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2024, 39(3): 326—333

Abstract

Objective: The electroencephalogram (EEG) signals were collected for analysis to define the differences in dynamic functional connectivity of the brain network of related nodes in the primary motor area (M1) and premotor area (PMA) during motor imagination and motor execution. The relationship between muscle synergy and isolated movement was also explored.

Method: Ten stroke patients with right hemiplegia and nineteen healthy adults participated in this study. All participants performed motor imagination (MI) and motor execution (ME) tasks according to visual instructions. We recorded and analyzed the EEG signals at 12 sites located in M1 and PMA areas. The chosen EEG signals were filtered and analyzed based on the modified S-transform (MST). All data were normalized to avoid individual differences. Then we analyzed the data with Pearson correlation to identify the dynamic functional connectivity (FC) and the differences with Fisher's exact test for node degrees.

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2024.03.004

*基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR202102200383);2019年山东省高等学校青创科技计划项目(2019KJN010);国家自然科学基金面上项目(82172535);山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY011112)

1 山东大学齐鲁医院康复科,山东省济南市,250012; 2 齐鲁工业大学(山东省科学院),光电工程国际化学院; 3 通讯作者
第一作者简介:胡静璐,女,住院医师; 收稿日期:2022-05-01

Result: All the distribution trend of correlation degree of chosen node about left or right MI and ME of stroke patients was similar to that of healthy participants. Compared with the motion execution, the function connection strength and density of each node were elevated at MI, which was also consistent with healthy participants. When healthy adults underwent left hand MI, the degree of the C4 node in the M1 area was significantly higher than that of C3 on the opposite side ($P<0.05$), while at right hand MI, the sum of the node degrees of FC3 and FC1 in the left PMA area was significantly higher than that of the lateral symmetric channel FC4 and FC2 ($P<0.05$). When the right upper limb isolated movement was performed, the node degree of C3 decreased significantly ($P<0.05$).

Conclusion: The major region of function connectivity of the right hand MI was in the left PMA area, and the node degree at MI was higher than ME. The functional connectivity of each node at the left hand MI was dispersed. The main channels activated by the muscle synergy are different from the isolated movement.

Author's address Qilu Hospital, Cheeloo College of Medicine, Shandong University, Jinan, 250012

Key word motor execution; motor imagery; functional connectivity; pearson correlation; isolated movement

脑卒中后常伴随上肢功能障碍^[1],而上肢功能占全身功能的60%,因此,上肢恢复的程度是影响康复结果的关键因素^[2]。运动想象(motor imagery, MI)是指在没有实际动作执行的情况下想象特定动作^[3],已应用于脑卒中后肢体偏瘫的运动康复训练,其疗效已被证实^[4]。运动想象结合实际运动比单独肢体锻炼更能提高运动功能恢复^[5],但其治疗机制目前并不明确。从大脑皮质的角度分析,与运动执行激活的脑区类似,运动想象同样可以激活以初级运动皮质(motor area, M1)和运动前区(premotor area, PMA)为主的感觉运动区^[6],但目前对于上肢运动想象与运动执行激活脑区及连接通路是否存在差异仍有待研究。

人类的大脑是一个复杂的网络,通过数千条轴突相互连接。对大脑功能连接(functional connectivity, FC)的研究有助于观察脑组织功能重塑的过程和相关性,使我们有可能揭示人类丰富的行为和思想的内组织和功能。目前脑网络的研究集中于基于fMRI的静息态脑网络图谱,即受试者不从事特定任务时神经活动自发波动的信息^[7],而动态FC更紧密地估计了实时认知过程,更能帮助我们更好地理解认知和行为灵活性的发展^[8]。脑电图在时间分辨率和实时记录方面有优势,有利于进行动态功能连接的研究^[9]。

如上所述,为了深入研究运动想象和运动执行的皮质激活位置差异,我们记录了脑卒中患者及健康人进行指定的运动想象及运动执行时的脑电信号,以评估在不同任务态时不同大脑区域之间的动

态功能连接关系,并探索其与共同运动、分离运动控制之间的关系。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本文纳入了2020年1月—2021年12月于山东大学齐鲁医院康复科住院治疗的恢复期脑卒中右侧肢体偏瘫患者10例,其中,男性7例,女性3例,平均年龄为(50.89±12.81)岁,均为右利手。另外选取19例健康成人[男11例,女9例,平均年龄(41.21±12.68)岁,均为右利手]参与本研究。

纳入标准:①符合《中国各类主要脑血管病诊断要点2019》^[10],并经头颅CT或MRI检查证实;②生命体征平稳,无严重心、肝、肾等重要脏器功能不全;③首次发病,右侧肢体偏瘫;④病程<1年;⑤神志清楚,具有想象能力,无认知功能障碍,简易精神状态检查评分>25分;⑥患者或家属签署治疗知情同意书。

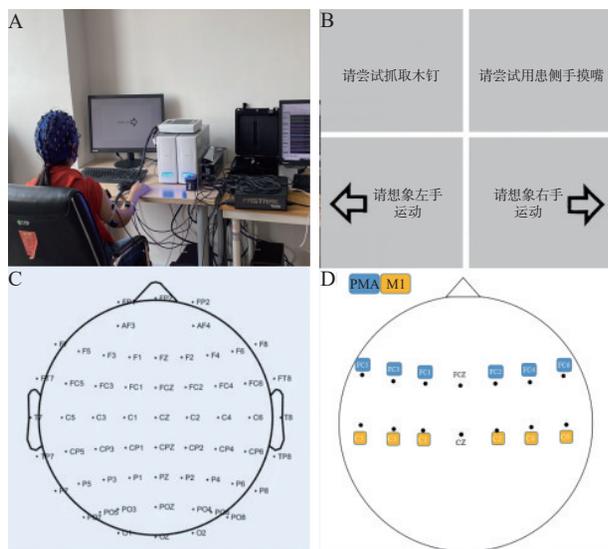
排除标准:①病情不稳定,处于急性进展期或并发严重心、肝、肾疾病及感染;②严重认知功能障碍、精神障碍、不配合者;③存在偏侧忽略、失用症;④文盲,视力下降或失明;⑤头部有金属植入物。

所有参与者视力正常或至少能清楚地看到屏幕上的文字,没有神经和精神疾病史,也没有进行运动想象的经验。所有参与者都已在实验前签署知情同意,此研究获得山东大学齐鲁医院伦理委员会批准(KYLL-2020(KS)-477)。

1.2 实验范式

参与者坐在封闭房间的一张舒适的椅子上,面对电脑屏幕。在运动想象模块中,被试者想象左手(T1)或右手(T2)抓木钉运动;运动执行模块中,按照指示用右手触摸嘴唇(T3)或进行手抓木钉(T4)。每个受试者共收集70组的脑电数据,其中包括运动想象左/右手的试验各30次、右手运动执行试验10次。整个实验大约需要20min。脑电图数据采集使NeuroScan 64-256导脑电系统(澳大利亚产,见图1),采样率为1000Hz,分辨率为24位,带宽从DC到250Hz。数据采集前,电极阻抗保持在50 kΩ以下。在视觉提示后1s进行采集,以避免视觉诱发电位的干扰。本研究选择M1和PMA的共12个信道的数据进行分析。

图1 脑电记录示意图



注:A实验设置示意图,参与者坐在舒适的椅子上,面对电脑屏幕,在信号采集过程中,所有参与者按照屏幕上的指令;B运动想象与运动执行的视觉指令;C电极坐标;D选取的信道。

1.3 数据处理

对8—30Hz(alpha波和beta波)的频带进行滤波、时频域分析和处理,采用基于改良S变换(modified S-transform, MST)提取特征,通过对两个自适应参数的优化,准确定位任务中运动想象和运动执行激发大脑运动皮质脑电节律变化的时频信息,对于一维脑电信号,MST被定义为

$$MST(\xi, f) = \int_{-\infty}^{\infty} t(s)g(\xi - s, f)e^{(-\tau/2\pi f)} dt \quad (1)$$

分析前,为避免个体差异,将所有数据进行归一

化(ΔX),公式定义为:

$$\Delta X = \frac{X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

然后将四种任务态下归一化后的各信道数据分别组内求和。将选取的12个信道作为节点,采用Pearson相关系数分析节点之间的相关性,根据相关性分析绘制功能连接图并计算出各节点关联度,与节点直接相连的边数称为度或关联度,本文中每个节点最多有11个关联度。4种任务态下12个信道与分别密切相关的信道节点关联度见表1(患者)、表2(健康人)。

1.4 统计学分析

采用SPSS 24.0进行数据分析。计量资料采用均值±标准差表示。各类计量满足正态分布和方差齐性,采用配对样本t检验比较组间的差异,采用确切概率(Fisher检验)计算 χ^2 ,以检验评估不同任务下功能连接的差异,以 $P < 0.05$ 为差异有显著性意义。

2 结果

2.1 性别、年龄标准化数据比较

我们将健康人分为30—40岁和40—50岁组,对4个任务条件下的时频域归一化参数按照性别和年龄分别进行了配对样本t检验,结果显示性别和年龄对结果无影响(均 $P > 0.05$),说明受试群体可共同参与绘制动态功能连接图谱。

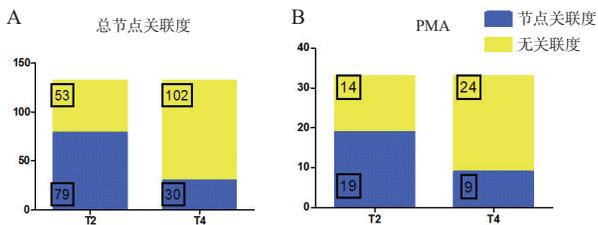
2.2 患者功能连接分析

将每个节点与其他11个节点进行相关性分析, Pearson相关系数 $r > 0.6$ 代表存在功能连接关系,得到节点关联度。将患者四种任务态下的节点关联度进行 χ^2 检验,结果显示运动想象(T1/T2)及运动执行(T3/T4)的关联度变化无显著性差异(均 $P > 0.05$,表1),而运动想象(T2)任务所有节点关联度均高于运动执行(T4)任务(表1),且总节点关联度及左侧PMA区节点关联度的变化均存在明显差异($P < 0.05$)(图2),此趋势同健康人结果类似(图6和7)。

2.3 健康人功能连接分析

本研究的四种任务分别标为T1(想象左手抓木钉),T2(想象右手抓木钉),T3(优势手共同运动模式,手摸嘴),T4(优势手分离运动模式,抓木钉), Pearson相关系数 r 值为0.8—1代表功能连接关系极

图2 患者运动想象(T2)和运动执行(T4)的节点关联度分析



注:A执行T2任务时,总节点关联度明显高于T4任务($P<0.0001$);B执行T2任务时,左侧运动前区(PMA)节点关联度明显高于T4任务($P=0.024$)。

表1 患者不同任务下各信道节点关联度

脑区及信道	T1	T2	T3	T4
PMA(左)				
FC5	6	5	4	3
FC3	4	7	7	3
FC1	6	7	5	3
M1(左)				
C5	5	5	5	3
C3	6	7	5	1
C1	4	5	5	4
PMA(右)				
FC6	6	5	1	3
FC4	4	7	3	3
FC2	8	7	5	3
M1(右)				
C6	6	8	3	3
C4	8	8	0	1
C2	7	8	2	0

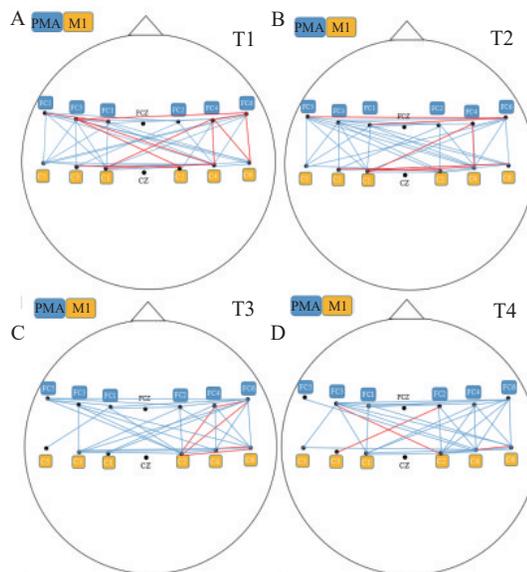
强(红线), r 值为0.6—0.8代表功能连接关系强(蓝线),据此画出脑功能连接图(图3)。

2.3.1 运动想象:在进行左手运动想象时,M1区的C4信道的节点关联度明显高于对侧C3($P=0.03$,图3和4,表2和3),右手运动想象时C4也高于C3($P=0.08$),提示C4脑区与运动想象脑网络构成密切相关。当右手运动想象时,在左侧PMA区FC3和FC1的功能连接总和明显高于对侧对称信道FC4和FC2总和($P<0.05$),但左手运动想象时,两侧无明显差异($P=0.28$),因此推测左侧PMA区FC3和FC1在右手运动想象时有着更为复杂的功能连接通路,为右手运动想象的主要激活脑区。

表2 健康人不同任务下各信道节点关联度

脑区及信道	T1	T2	T3	T4
PMA(左)				
FC5	9	7	5	1
FC3	11	10	5	8
FC1	8	9	5	5
M1(左)				
C5	7	5	1	2
C3	4	4	7	1
C1	9	8	2	6
PMA(右)				
FC6	8	8	9	7
FC4	10	6	5	6
FC2	5	6	6	4
M1(右)				
C6	7	8	7	7
C4	11	9	6	8
C2	5	8	9	7

图3 健康受试者四种任务下的脑功能连接图



注:A左手运动想象(T1);B右手运动想象(T2);C优势手共同运动模式,手摸嘴(T3);D优势手分离运动模式,抓木钉(T4)。

2.3.2 运动执行:当进行右上肢分离运动(T4)与共同运动(T3)相比(表2,图3),C3(1 vs. 7, $P=0.02$)、FC5功能连接降低趋势,C1连接有增强趋势,但FC5及C1的关联度的差异不明显(均 $P>0.05$)。所观察脑区各信道总关联度在T3和T4任务

表3 T2任务下重点信道的Pearson系数

	FC5	FC3	FC1	C5	C3	C1	FC6	FC4	FC2	C6	C4	C2
FC3	0.730 ^①		0.773 ^①	0.739 ^①		0.714 ^①	0.701 ^①	0.668 ^①	0.634 ^①	0.706 ^①	0.743 ^①	0.675 ^①
FC1	0.719 ^①	0.773 ^①		0.627 ^①	0.789 ^①	0.813 ^①	0.717 ^①		0.727 ^①		0.687 ^①	0.649 ^①
C1	0.654 ^①	0.743 ^①	0.687 ^①	0.612 ^①	0.824 ^①	0.746 ^①			0.884 ^①	0.670 ^①		0.871 ^①

注:①在0.01级别(双尾),相关性显著。

中无明显差异($P=0.62$,图5)。因此推测右上肢共同运动及分离运动的功能连接通路类似,但左侧C3与共同运动明显相关。

2.3.3 运动想象与执行:与运动执行相比,运动想象时各节点功能连接强度和密度都有升高趋势(图3,图7),并且以运动前区的FC5信道差异最大(图6, $P<0.05$)。执行T2任务时,左侧运动前区总节点关联度明显高于T4任务($P<0.05$),而且所有节点总关联度明显高于T4任务($P<0.05$),提示运动前区为运动想象的主要激活脑区。

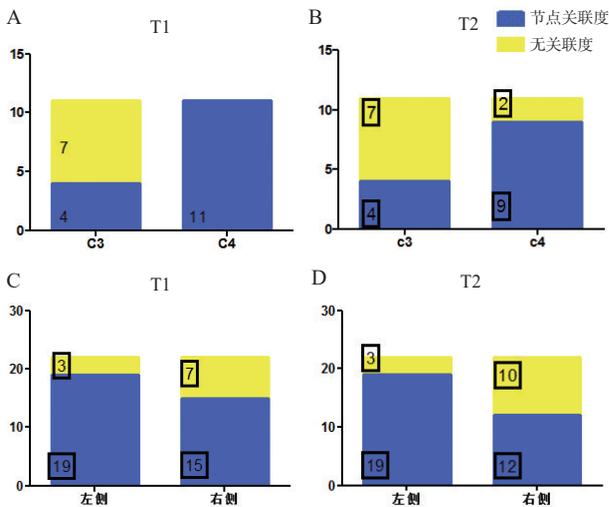
2.4 卒中患者与健康人差异分析

我们将患者四种任务态下的各信道节点关联度分别与健康人的数据进行卡方检验,发现T1任务态的节点关联度分布趋势与健康人类似,各信道的节点关联度变化无显著性差异(均 $P>0.05$)。而T2、T3、T4任务态下,左侧M1区和PMA区各信道的节点关联度变化无显著性差异(均 $P>0.05$),而患者T2、T3、T4任务态右侧运动前区的FC6和初级运动区的C4信道均明显低于健康人(图8)。

3 讨论

本研究观察了脑卒中患者和健康人在上肢运动

图4 不同任务下节点关联度差异分析

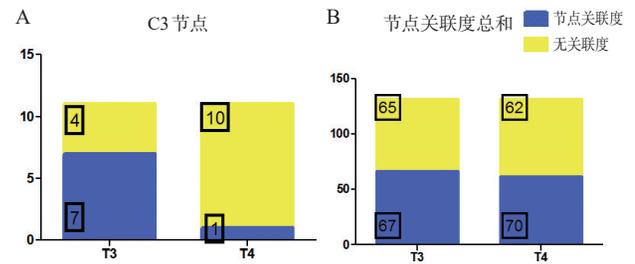


注:A T1任务下,C4信道的节点关联度明显高于C3($P<0.05$);B T2任务下,C4也有高于C3的趋势($P=0.08$);C T1任务下,左侧运动前区FC3和FC1的总节点关联度与对侧FC4和FC2总和无明显差异($P=0.28$);D T2任务下,左侧运动前区FC3和FC1的节点关联度总和显著高于对侧($P=0.04$)。

想象和运动执行任务中脑网络的动态功能连接,结果显示右手运动想象时脑功能连接比左手运动想象复杂,运动想象比运动执行的脑网络连接更多;左侧运动前区的FC3、FC1信道在右手运动想象中的可能为主要激活脑区,M1区的C3信道与共同运动有关,C1信道可能与分离运动有关。

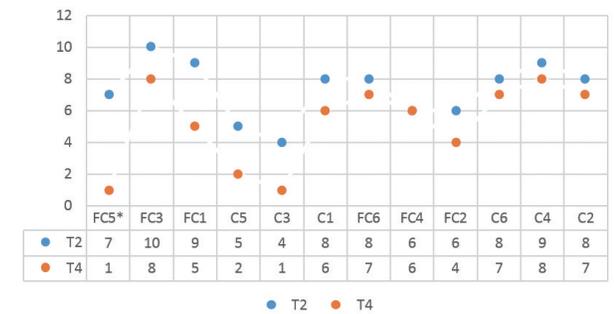
运动想象可促进偏瘫肢体功能恢复,但其治疗机制目前并不明确,脑功能连接分析是有效的研究方法。近年来针对脑卒中的功能连接研究主要基于

图5 共同运动与分离运动节点关联度差异分析



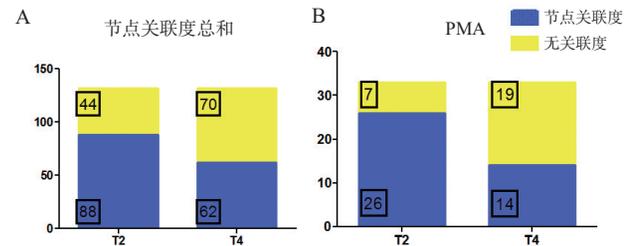
注:A T3任务C3节点关联度明显高于T4($P<0.05$);B T3和T4任务时,12个节点的总节点度无显著差异($P>0.05$)。

图6 健康人运动想象(T2)和分离运动(T4)各节点关联度的分布图



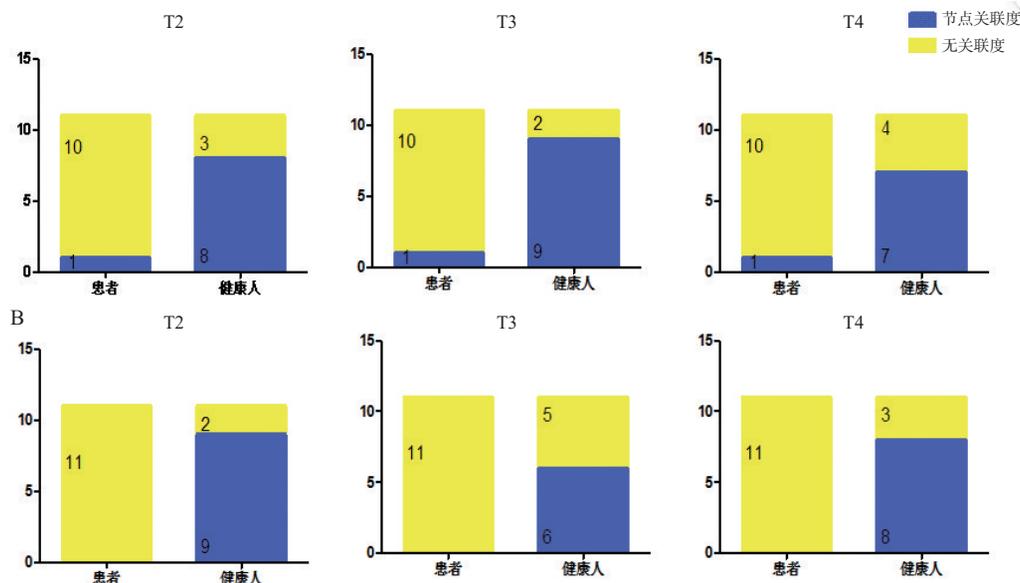
注:*该节点存在显著差异

图7 健康人运动想象与运动执行时节点度差异分析



注:A 执行T2任务时,总节点关联度明显高于T4任务($P=0.002$);B 执行T2任务时,左侧运动前区(PMA)节点关联度明显高于T4任务($P=0.005$)。

图8 T2/T3/T4任务下患者与健康人FC6及C4信道的节点度差异分析



注:三种任务态下,患者FC6信道(A, T2: $P=0.0075$; T3: $P=0.0019$; T4: $P=0.0237$)和C4信道(B, T2: $P=0.0002$; T3: $P=0.00124$; T4: $P=0.001$)的节点关联度明显低于健康人。

fMRI的脑网络图谱,观察各脑区之间的网络重组,如Bonkhoff等^[11]发现在皮质感觉运动区、皮质下或小脑的区域内部呈高度正相关,但区域间的连通性相对较低;另一项研究表明^[12],急性期皮质感觉运动区与小脑及视觉区之间出现高度负性的域间连接。Wang等^[13]给予慢性期卒中患者以机器人辅助训练结合神经引导干预,发现患者感觉运动网络、注意网络、听觉网络和默认网络中时间变异性增加。本文仅选取感觉运动区(M1、PMA),对相关节点度进行分析,为精准神经调控选择靶点提供依据。结果显示在脑卒中患者中,M1区及PMA区各节点关联度在运动想象及运动执行中的变化无显著性差异,运动想象时关联度明显高于运动执行,此趋势同健康人类似。我们推测脑卒中患者出现肢体障碍后,运动区及运动前区各信道广泛激活,与其他脑区功能连接重组以代偿M1区及PMA区功能。同时,如同健康人一样,运动想象激活的脑功能连接更广泛且更密集,M1区及PMA区的FC5、C4、C3信道可能为运动想象及运动执行的核心信道或主要激活信道。

运动皮质的PMA和M1在运动执行和准备中起着关键作用^[14-15];M1区产生神经冲动激活对侧骨骼肌;PMA区位于M1区前,参与运动的意识引导,

并控制身体近端肌肉和躯干肌肉,在高级运动调节过程中起重要作用,但具体激活回路及定位还有待研究^[16]。目前多采用功能磁共振成像(fMRI)研究运动执行和运动想象中涉及大脑区域^[17-19]。Stephan等^[20]发现运动想象激活了运动前内侧和外侧区、扣带回前区和腹侧运动前区,与运动想象相关的运动执行额外激活了左初级感觉皮质和运动前区、运动前扣带区和左上顶叶皮质的喙部。Porro等^[21]也证实了运动想象和运动执行参与的周围皮质区域存在重叠的神经网络。我们的结果显示右利手受试者在进行右手运动想象与运动执行时,运动想象激活的脑功能连接更广泛且更密集。这些结果提示,虽然运动想象过程中激活的脑区通路与现实运动执行过程中激活的脑区通路类似,但运动想象可能更有利于脑的功能重塑,可以通过运动想象激活运动相关的脑网络来促进脑卒中患者运动功能康复^[22]。特别是卒中早期上肢无法进行主动活动的患者,或者患者一般情况较差,不适合做大量康复训练时,运动想象可以作为有效的补充。

伸手及抓握动作是很多日常活动最基本的组成部分,要求上肢多关节协作,是最常用于研究上肢功能的动作之一^[23]。我们设计手摸嘴(T3)代表共同运

动,抓木钉(T4)代表分离运动。我们的结果显示,两种任务下运动前区和初级运动区的各节点关联度无显著性差异,说明两种运动模式的功能连接通路类似,但初级运动区的C3在进行分离运动时连接明显减少,推测该信道与共同运动有关,而C1信道在分离运动时连接增加,可能与分离运动有关。

本研究还发现,在进行左手想象时,运动前区和初级运动区呈现出广泛的且较平均的功能连接,而进行右手想象时,功能连接呈现以左侧运动前区为核心区域,这种差异有可能是脑组织生理结构或脑网络功能结构的差异造成的。Hammer等^[24]发现当右利手受试者进行1个自由度(左右)的运动任务时,大脑相关皮质激活强度存在差异。除此以外,有文献称男性右利手在左半球的中央沟明显比右侧深^[25],在对侧半球,左右手个体的中央沟深度不对称性明显不同^[26]。本实验在进行左手运动想象时,除左侧C3信道外,双侧脑区各信道功能连接较平均,因为运动感觉相关的脑电存在事件相关去同步事件相关同步(event-related de-synchronization/event-related synchronization, ERD/S)现象,即alpha和beta节律在运动中的振荡,分别量化了窄带感觉运动振荡的频带能量的增加或减少,表现为一侧的相关脑区频带能量的增加伴随对侧降低^[27]。同时,患者在进行右手运动想象及运动执行时,与健康人相比右侧C4、FC6信道的功能连接减弱。由于左侧脑区为右侧肢体运动的主要支配脑区,且患者左侧脑区各信道节点关联度的变化无显著性差异,我们推测右侧C4、FC6信道的功能连接减弱以相对增强对侧脑区的功能连接,即左侧C3和FC5信道。而健康人左手运动想象时,C3节点度降低伴随C4的增高,提示与C3对称的右侧C4信道为左手运动想象功能连接的关键节点;而进行右手想象时左侧运动前区FC3、FC1的节点关联度明显增强,提示此处为右手运动想象的主要激活脑区,右利手健康人进行运动想象时建立的功能连接通路更为复杂。因此对于右利手患者和左利手患者,可以考虑采取不同的基于运动想象的脑运动功能恢复策略,以建立有效的脑卒中后运动功能恢复方案。

本文研究仅选取了初级运动区、运动前区的左右两侧的共12个信道作为脑网络节点,尽管这些区

域涵盖了大脑运动功能的主要区域,但仍然数量较少;本文研究纳入的受试者数据较少,而且均为右利手,研究的功能连接差异不能排除存在受试者偏倚,下一步可扩大受试者数量和增加左利手的EEG信号,观察左右利手被试的不同,明确他们的脑网络连接是否具有镜像关系。

4 结论

本研究证实,在任务态下,右手运动想象的功能连接比左手想象更有趋向性,且节点关联度比运动执行更高;执行共同运动与分离运动模式所激活的主要信道不同。所以,在对卒中后偏瘫患者进行中枢神经调控治疗时,应根据患者的功能选择皮质区域激活肢体运动。

参考文献

- [1] Barthels D, Das H. Current advances in ischemic stroke research and therapies[J]. *Biochim Biophys Acta Mol Basis Dis*, 2020,1866(4):165260.
- [2] Raffin E, Hummel FC. Restoring motor functions after stroke: multiple approaches and opportunities[J]. *Neuroscientist*, 2018,24(4):400—416.
- [3] Blefari ML, Sulzer J, Hepp-Reymond MC, et al. Improvement in precision grip force control with self-modulation of primary motor cortex during motor imagery[J]. *Front Behav Neurosci*, 2015,9:18.
- [4] Kawala A. Efficiency evaluation of external environments control using bio-signals[D]. University of Greenwich, 2011.
- [5] Wriessnegger SC, Steyrl D, Koschutnig K, et al. Short time sports exercise boosts motor imagery patterns: implications of mental practice in rehabilitation programs[J]. *Front Hum Neurosci*, 2014,8:469.
- [6] Parsons LM, Fox PT, Downs JH, et al. Use of implicit motor imagery for visual shape discrimination as revealed by PET[J]. *Nature*, 1995,375(6526):54—58.
- [7] Fasiello E, Gorgoni M, Scarpelli S, et al. Functional connectivity changes in insomnia disorder: a systematic review[J]. *Sleep Med Rev*, 2022,61:101569.
- [8] Damaraju E, Allen EA, Belger A, et al. Dynamic functional connectivity analysis reveals transient states of dysconnectivity in schizophrenia[J]. *Neuroimage Clin*, 2014, 5: 298—308.
- [9] Mahmoud, Hassan, Fabrice, et al. Electroencephalography source connectivity: aiming for high resolution of brain networks in time and space[J]. *IEEE Signal Processing Maga-*

- zine, 2018.
- [10] 中华医学会神经病学分会,中华医学会神经病学分会脑血管病学组.中国各类主要脑血管病诊断要点2019[J].中华神经科杂志,2019,52(9):710—715.
- [11] Bonkhoff AK, Espinoza FA, Gazula H, et al. Acute ischaemic stroke alters the brain's preference for distinct dynamic connectivity states[J]. *Brain*, 2020, 143(5): 1525—1540.
- [12] Bonkhoff AK, Schirmer MD, Bretzner M, et al. Abnormal dynamic functional connectivity is linked to recovery after acute ischemic stroke[J]. *Hum Brain Mapp*, 2021, 42(7): 2278—2291.
- [13] Wang X, Wong WW, Sun R, et al. Differentiated effects of robot hand training with and without neural guidance on neuroplasticity patterns in chronic stroke[J]. *Front Neurol*, 2018, 9(1): 810.
- [14] He L, Hu D, Meng W, et al. Common bayesian network for classification of EEG-based multiclass motor imagery BCI[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems*, 2017,46(6):843—854.
- [15] Arvaneh M, Guan C, Ang KK, et al. Facilitating motor imagery-based brain-computer interface for stroke patients using passive movement[J]. *Neural Comput Appl*, 2017,28(11):3259—3272.
- [16] Wolpaw JR, Birbaumer N, McFarland DJ, et al. Brain-computer interfaces for communication and control[J]. *Clin Neurophysiol*, 2002,113(6):767—791.
- [17] Berman BD, Horovitz SG, Venkataraman G, et al. Self-modulation of primary motor cortex activity with motor and motor imagery tasks using real-time fMRI-based neurofeedback[J]. *Neuroimage*, 2012,59(2):917—925.
- [18] Hanakawa T, Immisch I, Toma K, et al. Functional properties of brain areas associated with motor execution and imagery[J]. *J Neurophysiol*, 2003,89(2):989—1002.
- [19] Binkofski F, Amunts K, Stephan KM, et al. Broca's region subserves imagery of motion: a combined cytoarchitectonic and fMRI study[J]. *Hum Brain Mapp*, 2000,11(4): 273—285.
- [20] Stephan KM, Fink GR, Passingham RE, et al. Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects[J]. *J Neurophysiol*, 1995,73(1):373—386.
- [21] Porro CA, Cettolo V, Francescato MP, et al. Ipsilateral involvement of primary motor cortex during motor imagery [J]. *Eur J Neurosci*, 2000,12(8):3059—3063.
- [22] Dijkerman HC, Ietswaart M, Johnston M, et al. Does motor imagery training improve hand function in chronic stroke patients? A pilot study[J]. *Clin Rehabil*, 2004,18(5): 538—549.
- [23] Chen Z, Xia N, He C, et al. Action observation treatment-based exoskeleton (AOT-EXO) for upper extremity after stroke: study protocol for a randomized controlled trial [J]. *Trials*, 2021,22(1):222.
- [24] Hammer J, Pistohl T, Fischer J, et al. Predominance of movement speed over direction in neuronal population signals of motor cortex: intracranial EEG data and a simple explanatory model[J]. *Cereb Cortex*, 2016, 26(6): 2863—2881.
- [25] de Vries S, Mulder T. Motor imagery and stroke rehabilitation: a critical discussion[J]. *J Rehabil Med*, 2007,39(1): 5—13.
- [26] Zimmermann-Schlatter A, Schuster C, Puhan MA, et al. Efficacy of motor imagery in post-stroke rehabilitation: a systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2008,5:8.
- [27] He B, Baxter B, Edelman BJ, et al. Noninvasive brain-computer interfaces based on sensorimotor rhythms[J]. *Proc IEEE Inst Electr Electron Eng*, 2015,103(6):907—925.