

前臂截肢者残肢运动时大脑脑电信号的事件相关去同步化/同步化变化特征*

郭 峰¹ 郝 莹² 黄 焱¹

摘要

目的:通过脑电技术探讨前臂截肢对人体大脑功能可塑性的影响。

方法:本研究使用脑电系统采集右侧前臂截肢者(9例,截肢年限均为6年以上)和正常健康人(15例)进行左右上肢直臂屈伸运动任务时的脑电信号。分析与运动相关的 μ 波(8—12Hz)的脑电信号的ERD/ERS变化特征。

结果:与正常组相比,截肢组受试者健侧肢运动过程中除了大脑右半球额区F4通道 μ 波的ERD现象程度显著降低($P<0.05$)外,其它脑区的通道均无显著性差异($P>0.05$);而截肢组受试者残肢运动时, μ 波ERD程度在对侧额区F3、中央区C3表现为显著降低($P<0.05$),而在双侧枕区(O1、O2)表现为ERD显著升高($P<0.01$)。

结论:截肢组受试者健侧肢运动时 μ 波变化与正常组相似,而截肢组受试者残肢在执行任务时,表现出特异性大脑对侧半球额区、中央区及双侧枕区 μ 波事件相关去同步化现象。

关键词 前臂截肢;残肢运动;脑电信号;事件相关去同步化/同步化

中图分类号:R493 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2023)-06-0749-07

Study on characteristics of event-related desynchronization/synchronization of electroencephalography during movement of residual limbs in forearm amputees/GUO Feng, HAO Ying, HUANG Yao//Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2023, 38(6):749—755

Abstract

Objective: To explore the impacts of forearm amputation on functional plasticity of the brain in amputees by electroencephalography (EEG) technique.

Method: The EEG system was employed to synchronously acquire EEG signals of the subjects. The subjects performed a straight arm flexion and extension movement task of the left and right upper limbs. EEG signals were used to analyze ERD/ERS of EEG μ rhythm (8—12 Hz), which is related to movement.

Result: Compared with the normal group, the amputation group showed significant decreased μ rhythm ERD degree of F4 channel in frontal area of right hemisphere during the intact limb movement ($P<0.05$). However, there were no significant differences in other brain regions between the normal group and amputation group. The degree of ERD phenomenon decreased significantly in the contralateral frontal area F3 and the central area C3 ($P<0.05$), and the degree of ERD phenomenon increased ($P<0.01$) in bilateral occipital region (O1 and O2) during the movement of residual limb.

Conclusion: The changes of μ rhythm during intact limb movement for the amputees were similar to that in the normal group. However, when performing the task by the residual limbs for the amputees, there is a specific ERD phenomenon of the μ rhythm in the frontal, central, and occipital regions of the brain bilateral hemispheric.

Author's address College of Human Kinesiology, Shenyang Sport University, Liaoning Shenyang, 110102

Key word forearm amputation; residual limb movement; electroencephalography signals; event-related desynchronization/synchronization

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.06.006

*基金项目:辽宁省教育厅科学研究经费项目(LQN2019ST02)

1 沈阳体育学院运动人体科学学院,辽宁省沈阳市,110102; 2 辽宁省优抚医院

第一作者简介:郭峰,男,教授; 收稿日期:2022-07-06

人类脑损伤后,大脑的神经网络功能会出现重组的现象,目前,学者们对脑卒中或偏瘫患者神经网络重组/可塑性已经开展了广泛研究,但我们对上肢截肢患者大脑功能的可塑性变化知之甚少。临床研究发现,患者截肢后神经网络会发生重组,这可能与截肢后产生的幻肢感觉有关^[1]。尽管有研究认为,缺失的手在大脑中对应的运动代表区会被残肢所占据,使“运动小人”在大脑运动皮质区发生侧向移动^[2],但最近研究发现并不是每一名截肢患者都会发生这种现象^[3]。因此,截肢发生后其大脑皮质功能发生变化的机制极其复杂。从研究技术层面来看,以往的研究大多采用功能性核磁共振(functional magnetic resonance imaging, fMRI)和经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)探测大脑运动皮质区结构和功能发生的变化,但这两种技术都存在一定局限性,即无法实时地探测到残肢在运动过程中大脑相关皮质区神经元电活动发生的变化。

脑电图(electroencephalography, EEG)具有较高的时间分辨率,可以用来评估受试者在动作执行过程中,大脑相关皮质区域激活模式。利用EEG信号评价大脑皮质区功能时,常使用机体运动时其EEG信号的事件相关去同步/同步化(event-related desynchronization/synchronization, ERD/ERS)现象进行评价^[4-5]。它们可以反映运动前、运动过程中和运动结束后感觉运动皮质区能量的变化关系^[6]。Pfurtscheller等^[7]研究发现,在与运动相关的EEG信号ERS/ERD现象中, μ 波段(8Hz—12Hz)较为明显。另外,有研究表明,运动准备和执行阶段均可引起大脑半球EEG信号 μ 波段的ERD/ERS现象^[8]。目前,学者已经将ERD/ERS用于探究机体在病理状态下,大脑相关皮质区功能变化。例如,寇程等^[9]利用感觉运动皮质区 μ 波的ERD/ERS变化,评价脑卒中患者的康复效果。尽管目前已经有学者使用EEG信号的ERD/ERS评价肢体真实运动或运动想象时大脑感觉运动皮质区功能的变化,并取得了较好的效果。但国内外关于截肢者残肢运动时EEG信号的ERD/ERS变化特征的研究甚少。因为,对于截肢者来说,其残肢在运动时,其大脑相关皮质区的激活可能产生一种特殊的激活模式^[10-11]。另外,鉴于以往的研究表明,EEG信号的 μ 波在评估运动偏侧化^[12-13],以及

运动准备、运动执行阶段时大脑感觉运动皮质区的功能变化较为敏感^[14-15]。所以,可以选择 μ 波的ERD/ERS评价截肢者残肢在运动时其相关皮质区功能的可塑性变化。同时,鉴于手部和前臂在大脑感觉运动皮质区投射面积大,选择前臂截肢者来探究截肢对大脑功能可塑性的影响,更有利于我们探究到其神经机制。另外,前臂截肢后残肢的运动控制的神经生理学机制尚不清楚。因此,本研究拟采用脑电仪采集前臂截肢者的残肢进行肩关节屈曲运动时的脑电信号,通过对比截肢者与正常健康人EEG信号 μ 波的ERD/ERS的差异,进而反映截肢者残肢在运动时大脑的特殊激活模式,以期待揭示截肢者大脑可塑性变化的神经电生理学特征,为截肢患者的运动功能康复模式制定以及假肢适应提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究共招募到24例受试者作为研究对象,其中截肢组受试者9例,全部来自于社会招募;正常组15例受试者,均为正常健康者,两组受试者在年龄 $[(24.7\pm 8.6)$ 岁 vs. (22.6 ± 2.7) 岁, $P=0.495$]、身高 $[(1.73\pm 0.1)$ m vs. (1.78 ± 0.1) m, $P=0.229$]、体重 $[(64.2\pm 16.4)$ kg vs. (71.2 ± 8.5) kg, $P=0.260$]方面均无显著性差异,并且两组受试者都没有抑郁、焦虑等精神方面问题。实验前向受试者详细介绍整个实验流程,每一面受试者都自愿参与本实验研究。同时,本研究得到了学校伦理委员会的批准,伦理批号为伦理字[2019]1号。

受试者纳入标准:①截肢组受试者截肢年限均在6年以上,均为右侧腕肘关节间的肢体缺失,并无幻肢痛或手术留下的疼痛;②受试者的年龄18—35岁之间;③男性;④受试者均为右利手;⑤受试者均非运动爱好者,且无长期的运动经历;⑥正常组受试者一年内无重大疾病,无肩关节损伤史,无双上肢手术史;⑦所有受试者的右肩(残肢)活动范围均在正常关节活动范围内。排除标准:①不符合上述纳入标准者;②肩关节有外伤史、慢性疾病或活动异常者;③48h内未充分休息或酗酒者。

1.2 试验设备与材料

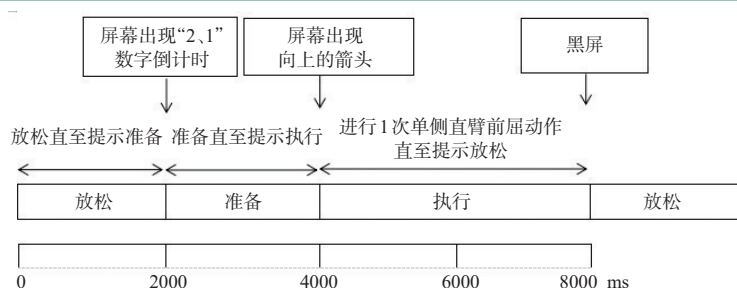
脑电系统(Eego™mylab, 荷兰)、电脑(戴尔公

司,美国)、脑电膏(格林泰克公司,中国)、磨砂膏、砂纸、医用胶带/棉签/酒精等。

1.3 试验过程

受试者身体放松,平静地坐在座椅上,两臂自然下垂,要求两组受试者分别进行左右侧上臂直臂屈伸运动,每次运动经历运动前的放松、运动准备、运动执行以及运动后的再放松过程,每一次的运动过程需要8s完成,一共完成50次的直臂屈伸运动。运动过程中要求受试者注意力集中,双眼注视电脑屏幕,在每一个阶段,电脑屏幕会出现相应的提示语。运动过程中同步采集受试者的EEG信号和三角肌前束的表面肌电(surface electromyography, sEMG)信号。运动范式如图1所示。

图1 受试者执行运动任务的范式



1.4 EEG信号采集与分析

本实验使用Eego™mylab脑电系统采集受试者的EEG信号,脑电帽为64通道的Waveguard帽,该脑电帽采用的电极分布按照10—20国际标准分布。在本研究中EEG数据采样频率设置为2000Hz,放大器的带通滤波范围设置为0.1Hz—100Hz。接地电极GND位于Fpz与Fz之间,参考电极为CPz点。同时采集受试者的眼电信号。在为受试者佩戴脑电帽之前,受试者需要使用碱性洗发水洗净头发并用吹风机吹干。随后主试者为受试者配戴脑电帽,然后用注射器向64个电极孔中注入调制好的导电膏,并利用调整导电膏量、剥离头发等方法降低电极的阻抗,使实验中每一个电极的阻抗均降至5kΩ以下。

本研究以肌电激活点作为事件相关点,选取肌电触发时刻到触发后的5000ms长度的时间窗为脑电分段(-3000—2000ms),共50个分段数据。①对原始EEG数据进行滤波处理,设置滤波的频率范围为0.5—50Hz,随后进行陷波50Hz处理,以去除50Hz交

流电干扰,再将分段脑电进行30Hz的低通滤波;②降采样处理,为了减少数据量,将原始EEG数据的采样频率降到250Hz,如果脑电数据中存在坏通道,进行滤波处理后,需要对坏通道进行插值处理,随后通过肉眼观察是否存在较大的伪迹干扰,手动去除有较大漂移或带有明显肌电干扰的分段脑电数据片段;③根据实验要求将EEG数据进行重参考,本研究中将各个电极的重参考设置为全脑平均参考;④使用独立成分分析(independent component analysis, ICA)方法对EEG信号进行降噪处理,目的是去除EEG信号中的肌电、眼电、心电等非脑神经活动的生理信号伪迹;⑤将处理后的分段脑电使用阈值法再次进行伪迹去除,阈值标准设置为±80μV,超过这个阈值范围的分段脑电数据系统会将其自动去除。

根据以往研究发现,运动皮质区与视觉皮质区中所产生的EEG信号中的α波(8—12Hz)不同,在运动皮质区与运动相关的α波称为μ波。根据实验设计,我们通过对处理后的分段脑电信号的μ波进行8—12Hz的Butterworth带通滤波。然后,将这些分段脑电信号采用快速傅里叶转换进行功率谱分析。

选取μ波作为观察的EEG信号波段,分别选取大脑左右半球的前额区(F3、F4)、中央区(C3、C4)、顶区(P3、P4)和枕区(O1、O2)作为主要的观察代表区域,进行统计学分析。为了便于观察执行运动任务的ERD/ERS现象,G.Pfurtscheller等^[7]在进行大量研究后,给出了运用百分比系数的方式量化ERD/ERS现象的计算方法。首先,对经过带通滤波后(8—12Hz)的脑电信号进行频谱分析,以选取具有明显ERD/ERS特征的兴趣区;然后将其进行时频分析,以获得该频率带脑电信号的功率值,在本研究中时频分析方法采用的是短时傅里叶转换;再对多次分段以及多个受试者的信号功率值取平均值,该过程通过EEGlab工具箱完成。为减小数据误差,对数据进行标准化处理;最后,运用量化ERD/ERS的计算方法计算标准化处理后系数(coefficient)C_{ERD/ERS}值。具体公式如下:

$$C_{\text{ERD/ERS}} = \frac{\text{post} - \text{pre}}{\text{pre}} \times 100\%$$

其中,pre为运动准备阶段脑电信号特定频段的功率谱值,post为运动任务执行后脑电信号特定频段的功率谱值。如果 $C_{ERD/ERS}<0$,表示运动任务执行后该频段的能量下降,发生了ERD现象;反之,若 $C_{ERD/ERS}>0$,则表示运动任务执行后该频段的能量增加,发生了ERS现象,而且其值的绝对值越大,说明这种现象越明显。

1.5 统计学分析

所有数据通过SPSS17.0进行统计学分析,两组的实验结果用均数±标准差的方式表示。截肢组与正常组受试者EEG信号的 μ 波的ERD/ERS比较,采用独立样本t检验的方法,检验标准 $P<0.05$ 为组间具有显著性差异, $P<0.01$ 为组间极显著性差异。

2 结果

2.1 运动过程中EEG信号的时频功率谱特征

图2和图3为右臂、左臂运动时,大脑左侧半球运动皮质区的C3电极位置EEG信号的时频功率谱。可见,不论是右臂还是左臂运动时,在运动执行时覆盖运动皮质区的C3电极EEG信号发生了明显的ERD/ERS现象,而且主要发生在8Hz—12Hz波段。其中在-2s之前表现为大脑半球的ERS现象,-2s—0s之间即运动准备阶段表现为ERS现象的减弱,同时逐步出现ERD现象,而0时刻之后即运动执行阶段表现为ERD现象。

2.2 运动过程中EEG信号的脑电地形图特征

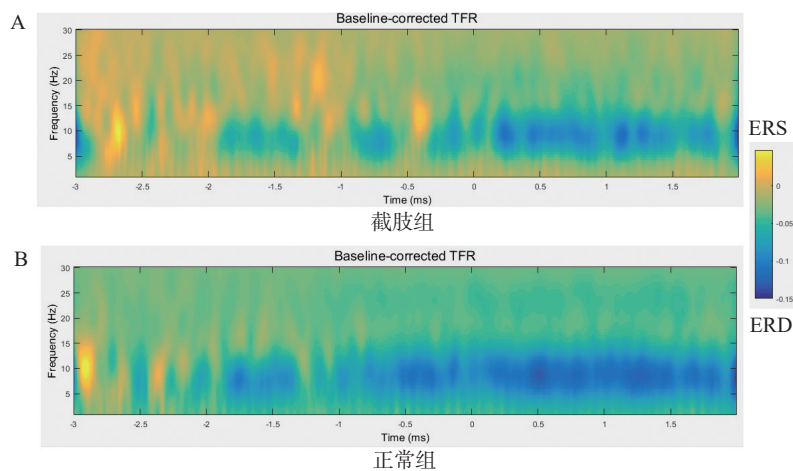
图4和图5为ERD/ERS现象的脑电地形图,正常组受试者在双侧上肢进行直臂屈伸运动中,均表现为大脑半球对侧运动区激活(即进行右侧上肢运动时表现为左侧半球运动区ERD现象,左侧上肢运动时表现为右侧半球运动区ERD现象),

而截肢组受试者右臂(残肢)执行运动任务时,则表现为双侧大脑半球的中央—枕区激活,且激活程度以及范围均高于正常组受试者(图4),而截肢者的健侧肢左臂执行运动任务时,除了与正常组相同的对侧运动区激活外,对侧枕区也有一定程度的变化(图5)。

2.3 运动过程中不同脑区 $C_{ERD/ERS}(\%)$ 的变化特征

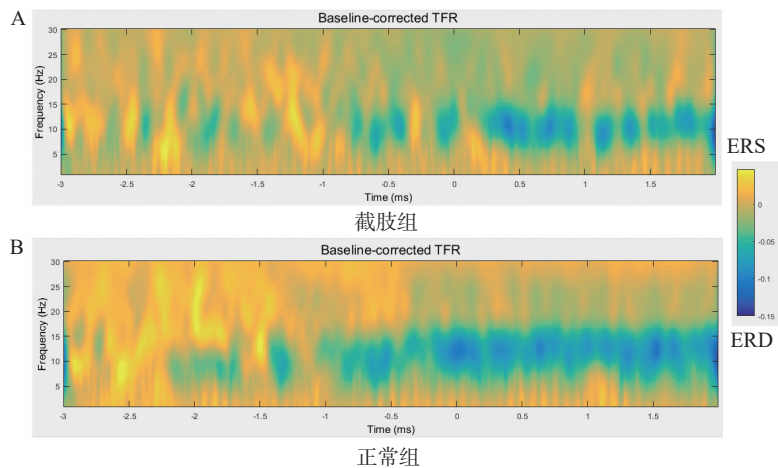
表1为两组受试者右臂执行运动任务时,在大脑额区、中央区、顶区、枕区四个脑区中具有代表性的各个电极点 $C_{ERD/ERS}(\%)$ 的变化程度。数据表明,两组受试者在运动执行时各个电极点都发生了ERD现象,其中对于正常受试者来说,在额区F3、中

图2 正常组与截肢组右臂(残肢)执行运动任务过程中C3通道EEG时频功率谱



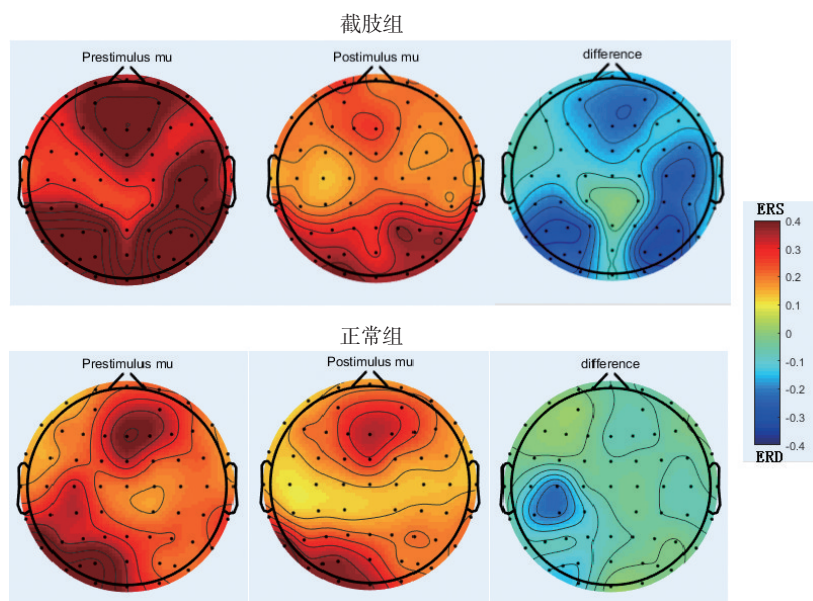
注:ERS:事件相关同步化,ERD:事件相关去同步化。Baseline-corrected TFR:经过基线校正后的时频功率谱。

图3 正常组与截肢组左臂(健侧肢)执行运动任务过程中C3通道EEG时频功率谱



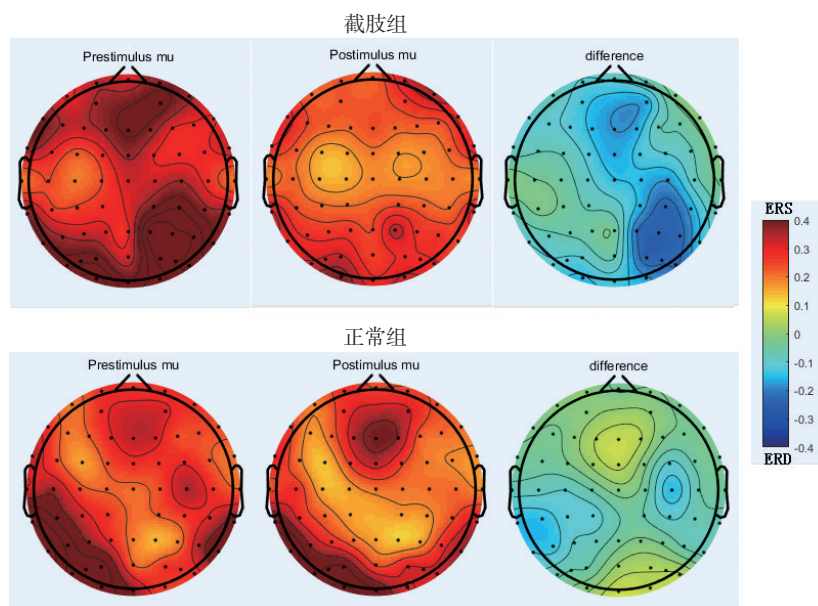
注:ERS:事件相关同步化,ERD:事件相关去同步化。Baseline-corrected TFR:经过基线校正后的时频功率谱。

图4 正常组与截肢组右臂(残肢)执行运动任务过程中ERD/ERS脑地形图



注: Prestimulus mu: 运动前准备阶段的 μ 波, Poststimulus mu: 运动执行阶段的 μ 波, difference: Poststimulus mu与Prestimulus mu的差值。ERS: 事件相关同步化, ERD: 事件相关去同步化。

图5 正常组与截肢组左臂(健侧肢)执行运动任务过程中ERD/ERS脑地形图



注: Prestimulus mu: 运动前准备阶段的 μ 波, Poststimulus mu: 运动执行阶段的 μ 波, difference: Poststimulus mu与Prestimulus mu的差值。ERS: 事件相关同步化, ERD: 事件相关去同步化。

中央区C3、顶区的P3和P4电极位置发生的ERD现象较为强烈;对于截肢组来说,在顶区P3和P4、枕区的O1和O2电极位置发生的ERD现象较为强烈。

对于组间比较来说,在额区的F3电极位置($t = -5.373$, $P < 0.001$)、中央区的C3电极位置($t = -2.874$, $P = 0.02$)、枕区的O1($t = 4.041$, $P = 0.001$)和O2($t = 4.730$, $P = 0.001$)电极位置的 $C_{ERD/ERS}(\%)$ 在两组之间存在显著性差异。

表2为两组受试者左臂(健侧肢)执行运动任务时,在大脑额区、中央区、顶区、枕区四个脑区中具有代表性的各个电极点 $C_{ERD/ERS}(\%)$ 的变化程度。总体来看,左臂运动时诱发的ERD现象的水平没有右臂运动时高。对于正常组和截肢组受试来说,其健侧肢运动时诱发的ERD现象最明显的电极点都是运动对侧大脑半球的运动皮质区C4电极位置。

对于组间比较来说,仅在运动对侧大脑半球的额区(F4)出现了显著性差异($t = -3.195$, $P = 0.02$),其它电极位置的 $C_{ERD/ERS}(\%)$ 差异均没有显著性意义。

3 讨论

本研究结果显示,在 μ 波段节律下,正常组受试者右臂进行运动时,运动对侧大脑半球额区(F3)、中央区(C3)以及区(P3)的 μ 波功率值出现较为明显的下降;左臂运动时,运动对侧大脑半球额区(F4)、中央区(C4)以及顶区(P4)的 μ 波功率值出现较为明显的下降,即ERD现象;截肢组左臂运动时出现的ERD现象与正常组一致,均表现为运动对侧大脑半球的ERD现象,而截肢组的右臂执行运动任务时,在双侧大脑半球顶区(P3、P4)及枕区(O1、O2)出现了明显的ERD现象。

根据大脑感觉运动皮质区的结构特征,在控制肢体的运动行为时,大脑遵循交叉控制原则,即右侧肢体运动行为主要受大脑左半球控制,而左侧肢体

表1 正常组与截肢组右臂(残肢)运动任务过程中
不同脑区 C_{ERD/ERS} ($\bar{x} \pm s, \%$)

脑区及电极	正常组 (n=15)	截肢组 (n=9)	t值	P值
额区				
F3	-10.75±4.50	-1.32±1.15 ^②	-5.373	<0.001
F4	-7.46±3.57	-8.45±6.67	0.328	0.7
中央区				
C3	-27.27±13.55	-8.53±6.18 ^①	-2.874	0.02
C4	-8.14±7.59	-10.25±13.30	0.466	0.65
顶区				
P3	-10.12±10.03	-20.94±18.23	1.542	0.15
P4	-10.72±9.49	-26.78±18.50	1.539	0.16
枕区				
O1	-7.39±3.77	-23.61±11.30 ^②	4.041	0.001
O2	-6.15±1.24	-18.80±7.60 ^②	4.730	0.001

与正常组相比:①P<0.05;②P<0.01

表2 正常组与截肢组左手(健侧肢)运动任务过程中
不同脑区 C_{ERD/ERS} ($\bar{x} \pm s, \%$)

脑区及电极	正常组 (n=15)	截肢组 (n=9)	t值	P值
额区				
F3	-1.38±1.29	-1.17±1.49	-0.252	0.81
F4	-6.47±1.55	-2.11±2.09 ^①	-3.195	0.02
中央区				
C3	-5.02±2.30	-5.51±1.83	0.384	0.71
C4	-8.56±1.43	-8.16±2.98	-0.298	0.77
顶区				
P3	-4.40±2.16	-4.59±1.38	0.170	0.87
P4	-7.04±0.25	-7.26±1.39	0.322	0.76
枕区				
O1	-1.38±1.10	-2.13±1.44	0.767	0.47
O2	-4.89±2.38	-5.38±3.03	0.287	0.78

①与正常组相比P<0.05

运动行为主要受大脑右半球控制。因此,当机体执行单侧上肢实际运动或想象运动时,在大脑感觉运动皮质区产生的脑电信号会有差别。在EEG信号中,8Hz—12Hz的脑波与人体运动密切相关,而这个波段脑波根据其在大脑皮质上的分布位置不同分为 μ 波和 α 波。虽然 μ 波和 α 波的频率范围基本一致,但两者有区别^[17]。首先, α 波在大脑顶、枕区最为显著,而 μ 波段在大脑半球的中央运动区域最为明显。其次, α 波主要出现在人闭眼安静状态下,睁眼后该波便会立刻消失,而 μ 节律在大脑清醒与放松的状态下持续存在,并且与肢体感觉运动密切相关,可以被感觉刺激及肢体运动后阻断。

前人的研究表明,健康人体在运动执行、运动想象以及运动观察时,会发生 μ 波ERD/ERS现象。ERD/ERS现象是机体在进行某一侧肢体运动时,大脑中相关皮质区域被激活而产生的信号抑制或增强的现象^[4-5]。例如,当我们在进行单侧肢体实际运动

或运动想象时,同侧大脑半球的初级运动皮质区的活动会受到抑制,处于静息状态,此时EEG信号表现为特定频率段幅值的升高,这称为事件相关同步化;与此同时,运动对侧大脑半球的初级运动皮质区电信号的活动将会兴奋,表现出EEG信号特定频率带幅值下降的现象,称为事件相关去同步化。而且这种变化主要出现在大脑感觉运动皮质区,其强弱程度可以直接反映感觉运动皮质区的活跃程度^[16-19]。因此,本研究选择 μ 波的ERD程度来观察机体在执行运动任务时运动皮质的激活程度,进而分析截肢者与正常健康人上肢运动时运动皮层激活的差异。Pfurtscheller等^[17]是较早发现人体肢体运动时 μ 波的ERD特征的学者,他们发现正常人体在进行单侧肢体动作或单侧肢体运动想象时 μ 波会被抑制。随后有学者在与运动相关的研究中报道,正常人单侧肢体运动可以激活初级感觉运动皮质区,在对侧大脑半球产生ERD现象,表现为 μ 波能量降低;而当受试者运动结束后,产生完全相反的ERS现象,表现为 μ 波能量的增加^[17]。目前的研究发现ERD/ERS现象对不同的肢体运动具有不同的空间特性和反应强度特征,通常表现为对侧变化幅度较大,而同侧幅度较小。即当受试者进行右侧肢体进行动作时,ERD/ERS现象主要发生在大脑左半球,而左侧肢体进行动作时,ERD/ERS现象主要发生在大脑右半球。Krol等^[16]发现健康受试者在执行抓握动作时和观察抓握动作时,运动对侧大脑半球的初级感觉运动皮质区的 μ 波(8—13Hz)都发生了ERD现象。而Garakh等^[19]发现,健康受试者在睁闭眼状态下进行运动想象时,大脑感觉运动皮质区的 μ 波发生了去同步化,主要发生在额区和中央区皮质,但是 α 波的去同步化主要发生在顶—枕区皮质。国内郭晓梅等^[20]在进行左右手运动想象脑电特征提取时,选择了位于大脑中央区C3、C4导联处的 μ 波,结果发现受试者在进行单侧肢体运动想象时,运动同侧大脑感觉运动皮质区的神经元活动受到抑制,从而引起特定频率段能量的升高,呈现ERS现象;而运动对侧大脑相应的区域变得兴奋,引起特定频段能量的降低,呈现ERD。本研究结果与上述学者研究结果一致,在我们的研究中健康组受试者右侧上肢进行肩关节的屈伸运动过程中,诱发了感觉运动皮

质区的 μ 波发生了ERD现象,并且主要发生在运动对侧大脑半球的感觉运动皮质区。

根据本研究的实验设计,我们除了选取中央区的C3、C4通道外,我们还选取了与辅助运动区、前运动区相关的额叶区F3、F4通道,与视觉运动协调相关的顶叶区P3、P4通道以及视觉相关的枕叶区O1、O2通道。截肢组受试者健侧肢(左臂)运动过程中大脑ERD现象与正常组基本一致,表现为运动对侧大脑半球的ERD现象;而截肢组受试者残肢(右臂)运动过程中,产生ERD现象的脑区主要集中在双侧大脑半球的顶区(P3、P4)和枕区(O1、O2)。Gagné等^[3]发现,上肢截肢者残肢运动时,在大脑运动皮质投射区并没有表现出初级运动皮质区激活面积增大的现象。本研究也发现,对于 μ 波来说,截肢组受试者残肢(右臂)运动时产生的ERD现象与正常组的差异主要有两个方面,首先,传统的ERD现象主要出现在运动对侧感觉运动区,而截肢组受试者残肢(右臂)运动时双侧大脑半球均出现了ERD现象,而且同侧强度要略大于对侧,这可能因为残肢进行运动时运动同侧大脑半球起到了代偿作用,神经网络可能发生了功能重建。Gerloff等^[21]发现患者患侧手在执行运动任务的时,健侧大脑半球可以起到代偿作用,这与我们的研究结果相似。其次截肢组受试者的产生ERD现象的脑区有向枕后部移动的趋势,说明运动过程中该区域相应的功能被激活,使其血流增加、代谢速度加快,从而导致脑电波 μ 频段的信号振幅降低,而大脑枕叶区是视觉神经中枢,主要负责将视觉信息与其他感觉系统信息整合,并与其他执行功能的大脑加工系统联系起来。截肢组右臂运动时枕叶出现ERD现象,可能与视觉运动有密切关联。

总体来看,截肢组受试者健侧肢运动时 μ 波ERD/ERS现象变化与正常健康人同侧肢体运动时相似,但截肢组受试者残肢执行任务时,表现出特异性大脑双侧半球顶区及枕区 μ 波事件相关去同步化现象,这可能与截肢者的残肢在运动控制过程中视觉空间反馈加强有关。

参考文献

- [1] Bruurmijn LCM, Raemaekers M, Branco MP, et al. Decoding attempted phantom hand movements from ipsilateral sensorimotor areas after amputation[J]. J Neural Eng, 2021, 18(5):056037.
- [2] Pacheco-Barrios K, Pinto CB, Saleh Velez FG, et al. Structural and functional motor cortex asymmetry in unilateral lower limb amputation with phantom limb pain[J]. Clin Neurophysiol, 2020, 131(10):2375—2382.
- [3] Gagné M, Héту S, Reilly KT, et al. The map is not the territory: motor system reorganization in upper limb amputees[J]. Hum Brain Mapp, 2011, 32(4):509—519.
- [4] Tariq M, Trivailo PM, Simic M. Mu-Beta event-related (de)synchronization and EEG classification of left-right foot dorsiflexion kinaesthetic motor imagery for BCI[J]. PLoS One, 2020, 15(3):e0230184.
- [5] Rizzo M, Petrini L, Del Percio C, et al. Mirror visual feedback during unilateral finger movements is related to the desynchronization of cortical electroencephalographic somatomotor alpha rhythms[J]. Psychophysiology, 2022, e14116.
- [6] Neuper C, Wãortz M, Pfurtscheller G. ERD/ERS patterns reflecting sensorimotor activation and deactivation[J]. Prog Brain Res, 2006, 159:211—222.
- [7] Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles[J]. Clin Neurophysiol, 1999, 110(11):1842—1857.
- [8] 魏聪惠, 刘绍文, 单新颖, 等. 基于下肢运动想象的脑电节律研究[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(6):737—742+749.
- [9] 寇程. 脑机接口结合功能电刺激对脑卒中慢性期大脑可塑性的影响[D]. 北京:中国人民解放军医学院, 2013.
- [10] Bao BB, Zhu HY, Wei HF, et al. Altered intra- and inter-network brain functional connectivity in upper-limb amputees revealed through independent component analysis[J]. Neural Regen Res, 2022, 17(12):2725—2729.
- [11] 吕元媛. 上肢截肢患者脑重塑的神经影像学[D]. 上海:上海交通大学, 2019.
- [12] Debnath R, Salo VC, Buzzell GA, et al. Mu rhythm desynchronization is specific to action execution and observation: evidence from time-frequency and connectivity analysis[J]. Neuroimage, 2019, 184:496—507.
- [13] Nam CS, Jeon Y, Kim YJ, et al. Movement imagery-related lateralization of event-related (de) synchronization (ERD/ERS): motor-imagery duration effects[J]. Clin Neurophysiol, 2011, 122(3):567—577.
- [14] Yu H, Ba S, Guo Y, et al. Effects of motor imagery tasks on brain functional networks based on EEG mu/beta rhythm[J]. Brain Sci, 2022, 12(2):194.
- [15] 赵伟伟. 运动经验对非预期动作加工的影响及神经活动特征[D]. 上海:上海体育学院, 2021.
- [16] Krol MA, Schutter DJLG, Jellema T. Sensorimotor cortex activation during anticipation of upcoming predictable but not unpredictable actions[J]. Soc Neurosci-UK, 2020, 15(2):214—226.
- [17] Pfurtscheller G, Neuper C, Flotzinger D, et al. EEG-based discrimination between imagination of right and left hand movement[J]. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1997, 103(6):642—651.
- [18] Pfurtscheller G, Neuper C, Guger C, et al. Current trends in brain-computer interface (BCI) research[J]. IEEE T Rehabil Eng, 2000, 8(2):216—219.
- [19] Garakh Z, Novototsky-Vlasov V, Larionova E, et al. Mu rhythm separation from the mix with alpha rhythm: Principal component analyses and factor topography[J]. J Neurosci Meth, 2020, 346:108892.
- [20] 郭晓梅. 基于左右手运动想象脑电特征提取与识别研究[D]. 太原:太原理工大学, 2018.
- [21] Gerloff C, Bushara K, Sailer A, et al. Multimodal imaging of brain reorganization in motor areas of the contralateral hemisphere of well recovered patients after capsular stroke[J]. Brain, 2006, 129(Pt 3):791—808.