DOI:10.16016/j.1000-5404.201503179

论著

应用 fNIRS 技术对运动执行与运动想象脑激活模式的研究

杜 凯,王 莉,冯正权,张 晔,邱明国 (400038 重庆,第三军医大学生物医学工程系医学图像学教研室)

[摘要] **目的** 研究在运动执行和运动想象任务刺激下大脑功能激活模式,探讨运动想象的神经机制。**方法** 选择23名右利手正常人作为被试,运用近红外光学脑成像系统采集在运动执行与运动想象任务下脑部氧合血红蛋白、去氧血红蛋白和总血红蛋白浓度相对变化量,并运用统计学检验和模型估计方法进行数据分析。**结果** 左手运动执行时激活脑区为右侧 SMA、PMC 和 M1 区,左手运动想象时激活的脑区为右侧 PMC 区,右手运动执行时激活脑区为左侧 PMC、M1 和 SMA 区,右手运动想象时激活的脑区为左侧 PMC 和 M1 区。**结论** 运用近红外光学脑成像能够很好显示刺激任务下脑功能激活状态,在运动想象和运动执行时大脑皮层激活部位及强度相似。

[关键词] 功能性近红外光谱技术;运动想象;运动执行;脑激活模式;氧合血红蛋白
[中图法分类号] R338.4;R445.7 [文献标志码] A

Brain activation modes during motor execution and motor imagery in healthy individuals by functional near infrared reflectance spectroscopy

Du Kai, Wang Li, Feng Zhengquan, Zhang Ye, Qiu Mingguo (Department of Medical Image, College of Biomedical Engineering, Third Military Medical University, Chongqing, 400038, China)

[**Abstract**] **Objective** To research the brain activation modes during motor execution and motor imagery, and explore the neuromechanism of motor imagery. **Methods** Twenty-three healthy right-handed persons were recruited, and the contents of oxyhemoglobin, deoxyhemoglobin and total hemoglobin in the brain during motor execution and motor imagery were measured by functional near infrared reflectance spectroscopy (fNIRS), and the data were analyzed by statistical test and model estimation. **Results** The activating areas during left-hand motor execution were right-side supplementary motor area (SMA), premoter cortex (PMC) and primary motor (M1) areas, and the activating area during left-hand motor imagery was right-side PMC area. The activating areas during right-hand motor execution were left-side PMC, M1 and SMA areas, and the activating areas during right-hand motor imagery were left-side PMC and M1 areas. All the activating areas were contralateral cerebral regions. **Conclusion** fNIRS can show the cerebral activation states in the stimulus tasks, and the cerebral cortex activating areas and strength are similar during motor execution and motor imagery.

[**Key words**] functional near infrared reflectance spectroscopy; motor imagery; motor execution; cerebral activation modes; oxyhemoglobin

Supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (81171866) and the Starting Fund of Overseas Resturnees of Ministry of Education (2012). Corresponding author: Qiu Mingguo, Tel: 86-23-68771274, E-mail: qiumingguo@yahoo.com

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(81171866);教育部留学回国人员科研启动基金(2012)
[通信作者] 邱明国,电话:(023)68771274,E-mail: qiumingguo@yahoo.com
[优先出版] http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1095.R.20150910.1106.014.html(2015-09-10)

运动功能障碍是脑卒中后最主要的表现之一,运动功能的恢复是脑卒中后治疗的关键。有研究[1-2]提出运动想象能显著提高脑卒中偏瘫患者运动功能,疗效得到了一定的临床验证,在脑卒中后的康复中应用潜力巨大,近几年成为神经功能康复领域的研究热点。目前对运动想象的研究以临床病例对照研究为主,研究内容虽较广泛却欠深入,对于运动想象的神经机制还不是很清楚。功能性近红外光谱技术(functional near infrared reflectance spectroscopy,fNIRS)作为一项新型无创监测技术[3],已广泛应用于新生儿的脑部研究,在成人大脑监测及脑功能成像方面也有很大的进展[4-5],具有无创、快速、可连续监测的优势[6]。为此,本研究运用近红外光学脑成像系统采集脑血流量,分析含氧血红蛋白、去氧血红蛋白和总血红蛋白浓度变化量,研究在运动执行和运动想象任务刺激下大脑功能激活模式,进一步探讨运动想象的神经机制。

1 对象与方法

1.1 研究对象

23名右利手正常人作为被试,被试者均为在校师生,包括男性16名,女性7名;年龄22~38(25±5)岁,其中78%的人年龄在26(含)岁以下。受教育程度均为高中以上,要求无任何精神疾病史或其他运动功能障碍疾病,试验前告知试验内容,要求被试认知能力正常,能明确理解试验过程。

1.2 研究方法

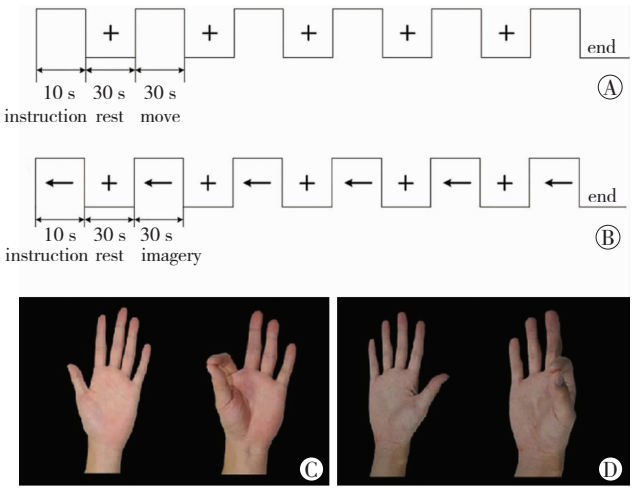
使用日本岛津公司生产的LABNIRS近红外光学脑成像系统采集被试脑功能影像数据,该系统为59通道采集系统,包括18个3波长光信号发射器和18个光电倍增管作为检测器,可实现高灵敏数据采集,采样频率为175.44 Hz,具有很高的时间分辨率;测量的光强变化按照Beer-Lambert定律转化为血红蛋白相对浓度变化。

试验任务设计如图1,首先呈现10 s的任务指示界面,试验开始后为30 s休息,接30 s任务,重复5次(流程见图1A运动执行任务和图1B运动想象任务),即完成1个任务;每名被试者需完成4个任务,整个试验持续20 min;任务为运动执行(图1C左手运动执行和图1D右手运动执行)和运动想象(被试者根据屏幕显示的指向想象用手方向的箭头选择左右手),动作都是食指和拇指的对指运动,被试者以1 Hz的频率进行。

1.3 试验数据分析

检查23名数据完整性,其中2名数据长度不够(即没有完整采集到20 min的数据),1名右手想象任务数据损坏,剔除上述3名数据,最终得到20名数据。

近红外光学脑成像系统监测发射器发出经脑组织反射后光信号光辐照度的改变,利用Beer-Lambert定律,将变化的值转换为血红蛋白浓度的相对变化量,直接反映脑组织血红蛋白含量的变化情况。



A:运动执行任务流程;B:运动想象任务流程;C:左手运动;D:右手运动

图1 试验整体流程图与运动执行任务设计

为了提高信噪比,对采集到的血红蛋白浓度相对变化的信号采用主成分分析(PCA)方法做滤波处理,并采用基于小波分析模型的方法进行去漂移处理,去除噪声干扰和其他影响因素,之后利用matlab工具箱NIRS_SPM[7]对预处理后的数据做建立估计模型,并结合最小二乘估计,估计总体参数beta,具体估计方法如下:

$$\begin{cases} Y=[y1,y2,y3\cdots yn] \\ X=\begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2m} \\ 1 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \\ \beta=[\beta_0,\beta_1,\beta_2,\cdots\beta_n]' \\ \varepsilon=(\varepsilon_0,\varepsilon_1,\varepsilon_2\cdots\varepsilon_n) \end{cases}$$

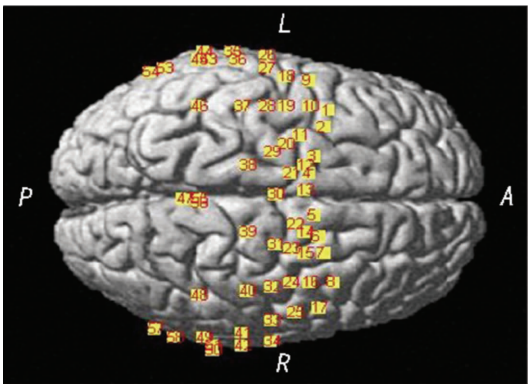
$$\begin{cases} Y=X\beta+\varepsilon \\ \beta_{ls}=(X'X)'X'Y \end{cases}$$

Y是建立模型数值,X实际测量值,是误差值,即为所求beta值。

利用试验头戴装置和 3D 定位仪得到参考点、光极和通道位置的坐标，进行空间配准处理，将 59 通道采样点精确配准到 MRI 结构图像上，进而得到头部激活通道的大脑皮层相应 Broadman 分区（图 2）。

1.4 统计学方法

利用 SPSS 13.0 软件以时间为组内变量，通道和任务为组间变量对 beta 值做单样本 t 检验，得到各个通道的 t 值和 P 值，选择 $P<0.05$（经过 FDR 矫正）的通道标记为激活通道；同样的以时间为组内变量，任务为组间变量对 HbO_2 和 Hb 值分别做配对样本 t 检验，得到 4 种休息与任务状态对比的 P 值，在 $P<0.05$ 的水平上检验休息状态与任务状态的差异是否显著。



A：前，P：后，L：左侧，R：右侧

图 2 LABNIRS 的采样通道与 MRI 结构图像的空间配准处理

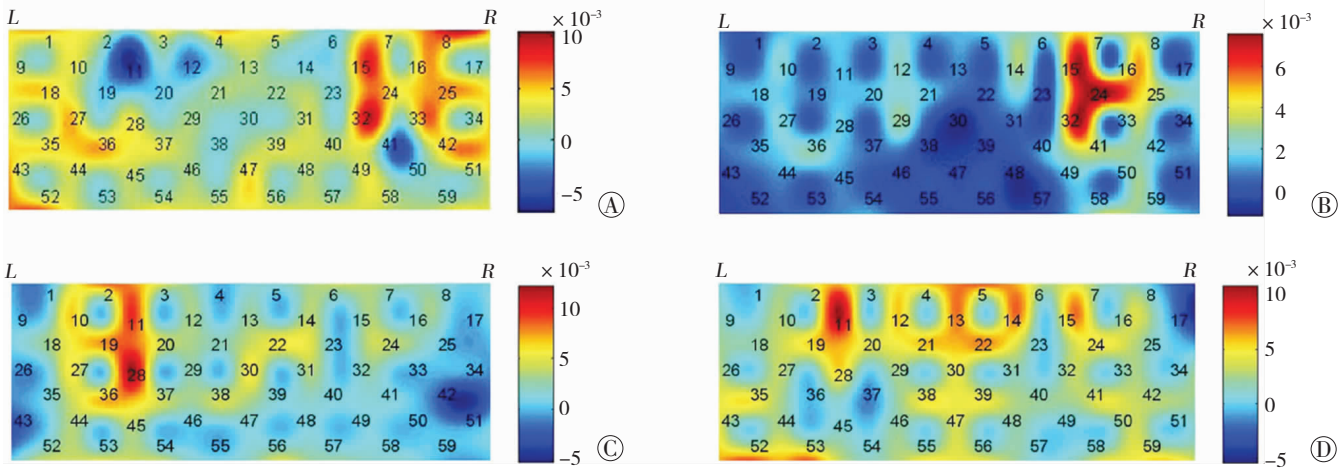
2 结果

2.1 运动执行和运动想象任务刺激下大脑功能激活模式

通过空间配准技术将各个通道采样点与 MRI 结构图像精确配准（图 2），每一个通道对应大脑皮层相应的 Broadman 分区。左手运动执行时显著激活右侧 SMA 区（6 通道）、PMC 区（10 通道）和 M1 区（21 通道和 38 通道），左手运动想象时激活右侧 PMC 区（16 通道），右手运动执行时激活左侧 PMC 区（2 通道和 10 通道）、M1 区（21 通道和 30 通道）和 SMA 区（13 通道），右手运动想象时激活左侧 PMC 区（2 通道和 10 通道）和 M1 区（3 通道）（图 3）。

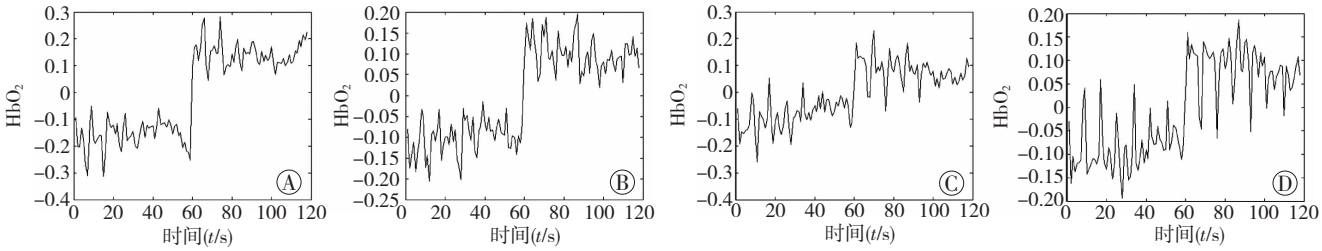
2.2 定量计算任务状态下血红蛋白相对含量

取得 fNIRS 数据中激活通道的信号，定量计算左、右手运动执行及运动想象时的氧合血红蛋白相对含量、去氧血红蛋白相对含量和总血红蛋白相对含量，以氧合血红蛋白为例，将 NIRS 数据中被激活通道的安静状态和任务状态的数据分别叠加后绘制曲线见图 4。从图 4 可以发现，氧合血红蛋白浓度在任务状态下比安静状态下有显著提高；同侧手的运动执行和运动想象任务氧和血红蛋白含量变化无明显差异；对于运动执行任务（或运动想象任务）左侧手氧合血红蛋白浓度增加幅度要高于右侧手。



A：左手运动执行；B：左手运动想象；C：右手运动执行；D：右手运动想象；L：大脑左侧，R：大脑右侧，颜色条由蓝色到红色表示激活强度逐渐由弱变强

图 3 任务状态下头部激活图像



A:左手运动执行;B:左手运动想象;C:右手运动执行;D:右手运动想象

图4 HbO_2相对含量变化曲线分析

表1 任务执行时脑血红蛋白浓度相对值($\bar{x} \pm s$)

4种任务	HbO_2		Hb		total Hb	
	安静	任务	安静	任务	安静	任务
左手运动	−0.157 4±0.003 0	0.144 8±0.002 3	0.059 9±0.001 2	−0.047 8±0.001 0	−0.097 5±0.002 3	0.096 5±0.001 6
左手想象	−1.011 0±0.001 9	0.099 7±0.001 8	0.009 6±0.001 1	−0.008 3±0.001 0	−0.091 8±0.001 6	0.096 5±0.001 6
右手运动	−0.085 4±0.003 4	0.080 1±0.002 9	0.012 5±0.000 6	−0.003 6±0.000 5	−0.073 4±0.002 8	0.077 0±0.018 0
右手想象	−0.086 9±0.002 7	0.083 3±0.002 7	−0.002 0±0.000 5	0.003 2±0.000 5	−0.091 9±0.018 0	0.089 5±0.018 0

定量计算左、右手运动执行及运动想象时的氧合血红蛋白相对含量、去氧血红蛋白相对含量和总血红蛋白相对含量,见表1;从定量计算结果来看,在 $P < 0.05$ 检验水平下,4种任务的 HbO_2 含量在任务状态下均比在安静状态显著提高,而Hb含量则显著下降。

3 讨论

人体血液对600~900 nm的近红外光的吸收非常小,具有良好的散射性,而在这个光谱范围内,760 nm左右和850 nm左右的光对氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的敏感性是不同的,前者对脱氧状态敏感,后者对氧合状态更为敏感,因此可以采用功能近红外光谱成像技术研究认知活动过程的脑区激活情况[8-9]。在进行认知活动时,脑组织中氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的含量会发生变化,这些变化会影响其光学特性,即影响对光的吸收程度,进而导致散射光的衰减。因而通过测定大脑活动区域脑皮层散射光的强度变化,可以推知该区域血氧含量的变化,这样就可以得到在进行认知活动时脑组织内氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白相对浓度的变化情况,从而研究与认知活动相关脑区的功能状态及其相互关系。现有的脑功能成像技术都存在一些局限,如fMRI,由于其对运动敏感、价格高、仪器大等原因,不适用于儿童、老年人以及特殊人群的脑功能成像研究。而功能近红外光谱成像的优点在于其无损性和可长时间连续监测性,在时间分辨率和空间分辨率的综合上有较好的优势,并能够在人体运动状态下对脑功能状态进行实时监测。

本研究采集设备为岛津公司生产的LABNIRS近红外光学脑成像系统,具有59通道,覆盖头部的采集点非常密集,采集的数据和采集的位置更加精准,对脑区激活情况的研究结果更为可靠。从研究结果来看,本研究得出的部分结果与其他研究方式[10-11],如fMRI相比,具有较多的相似性,如激活的脑区和交叉控制等结论是一致的。本研究通过分析20名被试者的近红外脑功能数据,研究在任务状态(左手运动执行、左手想象、右手运动执行和右手想象)和安静状态下 HbO_2、Hb和total Hb含量的相对变化量,发现在安静状态下各通道间的氧合血红蛋白、去氧血红蛋白和总血红蛋白相对含量均无显著性差异;任务状态下,激活时与未激活时氧合血红蛋白和去氧血红蛋白含量均有较大的变化,与文献[12-13]的结论相似;对于同侧手的任务,运动想象和运动执行在大脑皮层有相似的激活区域,并且从激活的部位来看,无论是运动执行还是运动想象,运动功能的控制存在交叉控制的现象,这与已有研究结果也是相一致的[1,14]。

本研究采用的fNIRS技术在时间分辨率上要比fMRI高出很多,因此,得到数据能更加容易记录每一个时间点脑区功能状态的变化情况,利用这些数据绘制曲线图对描述变化过程也更有实际意义。尽管运动想象疗法在临床治疗方面已有所应用[1,11],但治疗效果却因患者的个体差异有很大的不同[15]。因此利用近红外光谱技术可连续监测的特性,对接受治疗的患

者进行监测,便于研究康复治疗过程中脑部的变化情况,有助于运动想象脑机制的研究和临床治疗效果的进一步提升。此外,fNIRS 通过检测脑血氧浓度和脑血流动力学的变化,能直接反映大脑神经活动,应用fNIRS 技术对运动想象的神经机制进行研究,对于现有的功能影像技术是一个很好的补充,能更准确更直观地提取运动想象任务时的功能信号,可较好地应用于神经康复脑-机接口技术的研究,具有重要临床应用价值。

参考文献:

[1] 曹湾, 陈启波. 运动想象的脑机制及其在卒中患者运动功能康复中的应用[J]. 中国临床新医学, 2014, 7(1): 88-92.

[2] 苏艳丽, 柯晓燕, 潘恒足, 等. 高功能孤独障碍儿童抑制功能的脑近红外成像研究[J]. 中国心理卫生杂志, 2010, 24(6): 450-454.

[3] 刘宝根, 周兢, 李菲菲. 脑功能成像的新方法——功能性近红外光谱技术(fNIRS)[J]. 心理科学, 2011, 34(4): 943-949.

[4] Takeda K, Gomi Y, Imai I, *et al*. Shift of motor activation areas during recovery from hemiparesis after cerebral infarction: a longitudinal study with near-infrared spectroscopy[J]. Neurosci Res, 2007, 59(2): 136-144.

[5] 刘晓敏, 张小芊, 徐波, 等. 伴焦虑强迫症状的抑郁症患者前额叶血红蛋白浓度变化的近红外光图谱分析[J]. 中华精神科杂志, 2014, 47(3): 158-163.

[6] 顾丽燕, 姚丽华, 尤桂杰, 等. 近红外光谱技术用于运动和运动想象时大脑皮质血氧反应监测的研究[J]. 中国康复医学杂志, 2011, 26(8): 724-727.

[7] Kanoh S, Susila I P, Miyamoto K I, *et al*. The Effect of Neurofeedback Training on CorticalActivity during Motor Imagery Revealed by NIRS and fMRI[J]. Int J Bioelectromagn, 2011, 13(2): 82-83.

[8] Ye J C, Tak S, Jang K E, *et al*. NIRS-SPM: statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy[J]. Neuroimage, 2009, 44(2): 428-447.

[9] Penny W D, Friston K J, Ashburner J T, *et al*. Statistical parametric mapping: the analysis of functional brain images[M]. London: Academic press, 2011.

[10] 刘首峰, 高春林, 汪皖君, 等. 运动想象疗法联合第三代功能性电刺激术对急性缺血性卒中患者上肢运动功能的影响[J]. 中国现代神经疾病杂志, 2015, 15(3): 209-213.

[11] 屠建莹, 韩淑玲, 吴海艳, 等. 运动想象疗法对脑胶质瘤术后放疗患者的影响[J]. 中国康复理论与实践, 2014, 20(6): 571-575.

[12] Cicinelli P, Marconi B, Zaccagnini M, *et al*. Imaged-induced cortical excitability changes in stroke: a transcranial-magnetic stimulation study[J]. Cereb Cortex, 2006, 16(2): 247-253.

[13] Kakimoto Y, Nishimura Y, Hara N, *et al*. Intrasubject reproducibility of prefrontal cortexactivities during a verbal fluency task over two repeated sessions using multi-channel near-infrared spectroscopy[J]. Psychiatry Clin Neurosci, 2009, 63(4): 491-499.

[14] 顾丽燕, 尤桂杰, 赵娜娜. 运动想象疗法在临床中的应用[J]. 中外医疗, 2010, 29(34): 78.

[15] 王朴, 郭毅, 张君梅, 等. 运动想象疗法对脑卒中后患者上肢运动功能康复效果的系统评价[J]. 中国循证医学杂志, 2011, 11(5): 529-539.

(**收稿**:2015-03-26;**修回**:2015-06-10)

(编辑 黄 超)