DOI:10.16016/j.1000-5404.202011128

基于近红外功能成像技术的大脑冲突监测功能研究

张 晔,王 莉,张静娜,李鹏岳,王倩楠,桑林琼,邱明国 400038 重庆,陆军军医大学(第三军医大学)生物医学工程与影像医学系医学图像学教研室

[摘要] **目的** 运用近红外功能成像技术研究反应时不同的两组被试在冲突监测任务下大脑血氧反应的差异,探讨大脑冲突监测功能的神经机制。**方法** 选取 28 名本校在校学生作为健康被试,其中男性 16 名,女性 12 名,年龄 17~20(18.79±0.55)岁。运用近红外功能成像技术(functional near-infrared spectroscopy,fNIRS)采集被试 Stroop 任务下大脑的血氧浓度变化量。根据他们在 Stroop 任务中的反应时分为快组和慢组,每组 14 名。通过 nirsLAB 软件进行数据分析,对比两组被试大脑血氧反应的差异,并计算被试行为学指标与其大脑血氧浓度变化的相关关系。**结果** Stroop 任务主要激活的脑区位于双侧背外侧前额叶(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)和额极区。相比慢组,Stroop 任务下快组的脱氧血红蛋白(Hb)浓度变化显著降低($P<0.05$),主要位于左侧 DLPFC 和额极区。同时,Ch4 通道 Hb 的浓度变化值与被试反应时呈现正相关关系($r=0.422\ 3$,$P=0.025\ 2$)。**结论** 实验结果验证了 DLPFC 在冲突监测功能中的核心作用,同时发现左侧额极区的 Hb 浓度变化可以作为反映大脑冲突监测功能的重要指标。

[关键词] 近红外脑功能成像;冲突监测;Stroop 任务;血氧浓度
[中图法分类号] R319; R338.25; R445.7 [文献标志码] A

Application of functional near-infrared imaging for conflict monitoring: a preliminary study in 28 adults

ZHANG Ye, WANG Li, ZHANG Jingna, LI Pengyue, WANG Qiannan, SANG Linqiong, QIU Mingguo
Department of Medical Imaging, Faculty of Biomedical Engineering and Imaging Medicine, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, 400038, China

[**Abstract**] **Objective** To study the difference of cerebral blood oxygen response of subjects with different reaction speed under conflict task with the aid of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) in order to explore the neural mechanism of conflict monitoring. **Methods** Twenty-eight healthy students from our university were recruited as the subjects. They were 16 males and 12 females, at an age of 17~20 (18.79±0.55) years. The changes of blood oxygen concentration in the brain of these subjects during Stroop task were collected by fNIRS. According to their response time in Stroop task, they were assigned into fast group and slow group, with 14 students in each group. The data were analyzed by nirsLAB software to compare the changes of the relative concentration of oxygenated hemoglobin (HbO_2) and the relative concentration of deoxygenated hemoglobin (Hb) between the 2 groups, and the correlation between the behavioral indexes and the changes of cerebral blood oxygen concentration was analyzed. **Results** Stroop task mainly activated bilateral dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) and frontal polar region. Compared with the slow group, the relative concentration of Hb was decreased significantly in the fast group under Stroop task, mainly located in the left DLPFC and frontal polar region ($P<0.05$). Also, the relative concentration of Hb in Ch4 channel was positively correlated with the reaction time ($r=0.422\ 3$, $P=0.025\ 2$). **Conclusion** Our results verify the core role of DLPFC in conflict monitoring, and find that the relative change of Hb concentration in the left

[基金项目] 第三军医大学青年培育项目(2017XQN04);国家自然科学基金青年科学基金(81802253)
[通信作者] 邱明国,E-mail: qiumingguo@yahoo.com

1000-5404/Copyright © 2021, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循 CC BY 许可协议(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

frontal polar region can be regarded as an important indicator to reflect the conflict monitoring of the subjects.

[**Key words**] functional near-infrared spectroscopy; conflict monitoring; Stroop task; blood oxygen concentration

Supported by the Youth Training Program of the Third Military Medical University(2017XQN04) and the National Natural Science Foundation for Young Scholars of China(81802253). Corresponding author: QIU Mingguo, E-mail: qiumingguo@yahoo.com

冲突监测功能是大脑非常重要的一种认知功能,反映了大脑适应冲突的能力。应用现有的影像技术如功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)等对大脑冲突监测系统的研究方面已经取得了很多重要成果。在多种经典的涉及冲突干扰信息加工的任务中,例如 Stroop 任务、Go/No-Go 任务、Flanker 任务和错误监测等,可以发现大脑前额叶皮质的激活[1-6]。研究表明:背外侧前额叶(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)可能负责解决冲突信息,它通过自上而下的注意调节机制,调整负责视觉或听觉等方面加工的脑区的活动[1]。大多数冲突任务都发现了 DLPFC 的激活,研究者们认为其在完成冲突任务过程中参与了冲突监测和冲突解决[2]。先前的 fMRI 研究,重点对 Stroop 任务引起大脑激活的脑区进行了定位[1-6],但因其时间分辨率较低,无法研究 Stroop 实验引起的血氧浓度随时间变化的特性。因此,目前对于大脑冲突监测功能的神经机制,还需要进一步的深入研究。

被试在冲突监测任务中如何做出快速、准确的反应?下一步可否采用相关的刺激技术增强这种能力?研究这些问题更有利于深入探索大脑的冲突监测功能,而找到相应的靶点及生物标记物是研究的基础。近红外脑成像(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)技术采用光学原理测定大脑组织的血氧浓度变化,可以实时反映与神经元活动相关的大脑血液动力学信号[7],而反应时是反映被试处理冲突任务的 1 个重要指标。因此,本实验采用 fNIRS 技术重点考察了两组反应时不同的被试在冲突监测过程中大脑血氧反应的区别,研究反应时与被试大脑执行冲突监测任务时血氧浓度变化之间的关系,一方面可以从脑功能定位的角度进一步验证已有的发现,另一方面探索脑血氧浓度在 Stroop 任务下随时间的变化,明确能对冲突任务做出快速反应的生物标记及脑区定位,有利于下一步开发实时监测设备,用于战时或特殊人员的挑选和监测,以及开发相关的刺激技术增强冲突反应能力。

1 资料与方法

1.1 研究对象

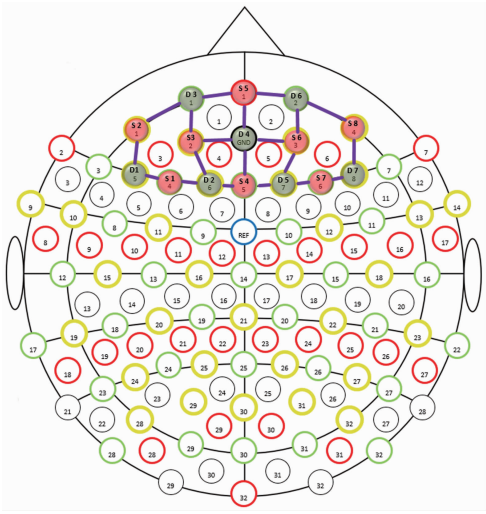
在本校本科在校生中招募健康被试共 28 名。其中男性 16 名,女性 12 名,年龄 17~20(18.79±0.55)岁。被试无神经和精神疾病史,均为右利手,母语均是汉语,无色盲、色弱。被试在实验前被告知实验内容,并签署知情同意书。本研究方案于 2017 年经第三军医大学医学伦理委员会批准。

1.2 实验设计

采用组块设计,被试执行 Stroop 任务[8],共包含 6 个组块。任务开始后,首先屏幕中央出现 1 个“+”,随后随机出现 3 个带颜色的汉字“红、绿、蓝”。被试被要求对所呈现汉字的颜色做出反应。实验过程中,被试手指置于键盘上,如果汉字的颜色是红色则按“J”键;如果是绿色则按“K”键;如果是蓝色则按“L”键。每个组块持续时间为 30 s,期间共呈现 20 个汉字,每个字呈现 500 ms,字与字之间间隔 1 000 ms,被试被要求在汉字呈现后尽快做出判断。实验任务的刺激呈现和行为学数据记录均由 E-prime 软件完成。

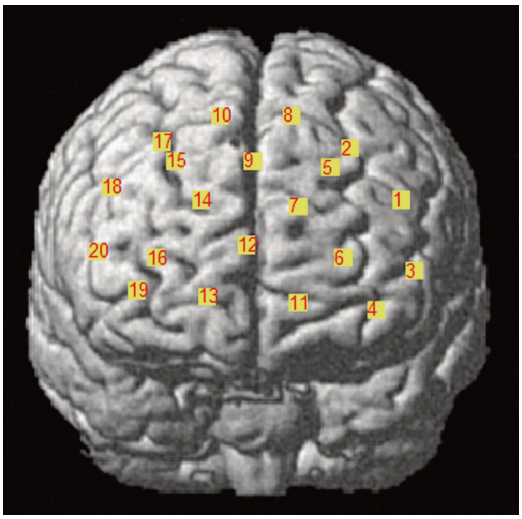
1.3 数据采集

采用美国 NIRScout16×16 近红外数据采集仪进行脑功能数据采集。本实验采用 7 个光源和 8 个探测器(图 1),采集共 20 个通道的信号。光源和探测器之间间距 3 cm,采样频率为 7.812 5 Hz。参照 10~20 国际脑电记录系统在被试前额位置安置光源和探测器。与我们之前的研究一致[9],采用三维数字化定位仪(PATRIOT,USA)进行通道的三维坐标定位,运用 nirs_SPM 软件进行空间配准,得到的通道分布以及对应的脑区如图 2 所示。



红色实心圆球 S:光源;绿色实心圆球 D:探测器;光源和探测器之间紫色的连线:光学探测通道;L:大脑左侧;R:大脑右侧;10~20 表示国际脑电记录系统电极位置

图 1 被试大脑前额叶区域光源探测器布局图



1~20 分别表示 20 个近红外数据采集通道

图 2 被试大脑前额叶 20 个光学探测通道定位图

1.4 实验数据分析

通过 nirsLAB(v201904)软件进行数据预处理。首先在软件中设定实验设计的刺激时间点,之后对过大的噪声波动数据进行手动剪裁。下一步对数据进行 0.01~0.20 Hz 的带通滤波,去除心跳、头动等噪声信号,同时去除慢漂移[10-11]。通过修正的比尔-朗伯定律(modified Beer-Lambert law,MBLL)将每个通道两个波长的光强信号变化转化为血氧浓度信号,包括含氧血红蛋白(HbO_2)、脱氧血红蛋白(Hb)、总血红蛋白(total Hb)3 种参数的相对浓度变化。之后通过一般线性模型(general linear model,GLM)进行数据建模,运用血液动力学函数(hemodynamic response function,HRF)和方波函数进行卷积运算,最终得到被试在实验任务过程中大脑血液动力学变化的时间特性。

1.5 统计学分析

根据被试行为学数据反应时的不同,通过 K 均值聚类法[12]分为两组,反应时小的为快组,反应时大的为慢组,每组各 14 人。通过 nirsLAB 软件中携带的 SPM 模块对两组数据进行统计学分析。采用单样本 t 检验计算被试 Stroop 任务状态下大脑的激活模式。采用双样本 t 检验比较两组被试在同一任务下大脑血氧浓度变化差异。采用 SPSS 22.0 统计软件,对两组被试实验任务的反应时和正确率进行双样本 t 检验,并计算各通道平均信号与被试行为学数据之间的相关关系。$P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 行为学结果

两组被试性别、年龄、正确率差异无统计学意义,反应时差异具有统计学意义($P<0.01$,表 1)。

表 1 被试的行为学数据($n=14,\bar{x}\pm s$,例)

组别	年龄/岁	性别(男/女)	正确率(%)	反应时/ms
快组	18.64±0.61	9/5	83.1±9.3	531.07±50.47
慢组	18.93±0.46	7/7	85.5±14.3	709.75±65.57
P 值	0.188 4	0.617 1	0.611 1	<0.000 1

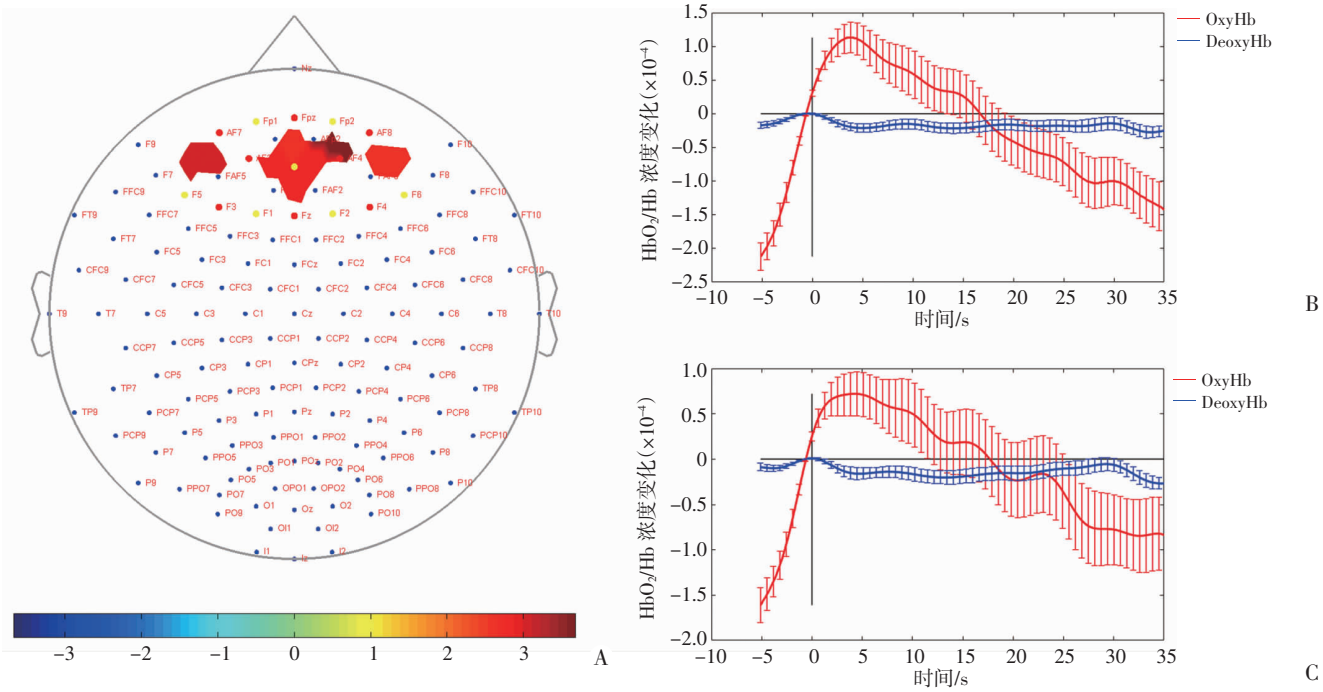
2.2 Stroop 任务下的大脑激活模式

对 28 名被试的脑血氧变化信号进行单样本 t 检验,得到所有被试在 Stroop 任务下的激活图($P<0.05$,图 3A)。结果显示:Stroop 任务显著激活了被试的 Ch3、Ch9、Ch9、Ch12、Ch14、Ch16 和 Ch20 通道,分别对应大脑左右两侧的 DLPFC 区域(BA9/46)和额极区(BA10)。被试任务状态下显著激活的代表性通道(Ch3,Ch20)中,HbO_2/Hb 浓度变化随时间变化的时程曲线如图 3B、C 所示,在任务开始后两个通道 HbO_2 浓度变化都有 1 个明显的峰值出现,任务结束后,信号开始回落。

分别对两组被试 Stroop 任务下的脑血氧变化信号进行单样本 t 检验,获得反应时不同的两组被试任务下大脑不同的激活模式图(图 4)。快组 Stroop 任务主要激活的脑区分布于 Ch16、Ch20 通道,对应右侧额极区(BA10)和背外侧前额叶(BA46)。慢组 Stroop 任务主要激活的脑区分布于 Ch3、Ch7、Ch9、Ch14、Ch16 通道,对应左侧背外侧前额叶皮质(BA9 和 BA46)以及双侧额极区(BA10)。

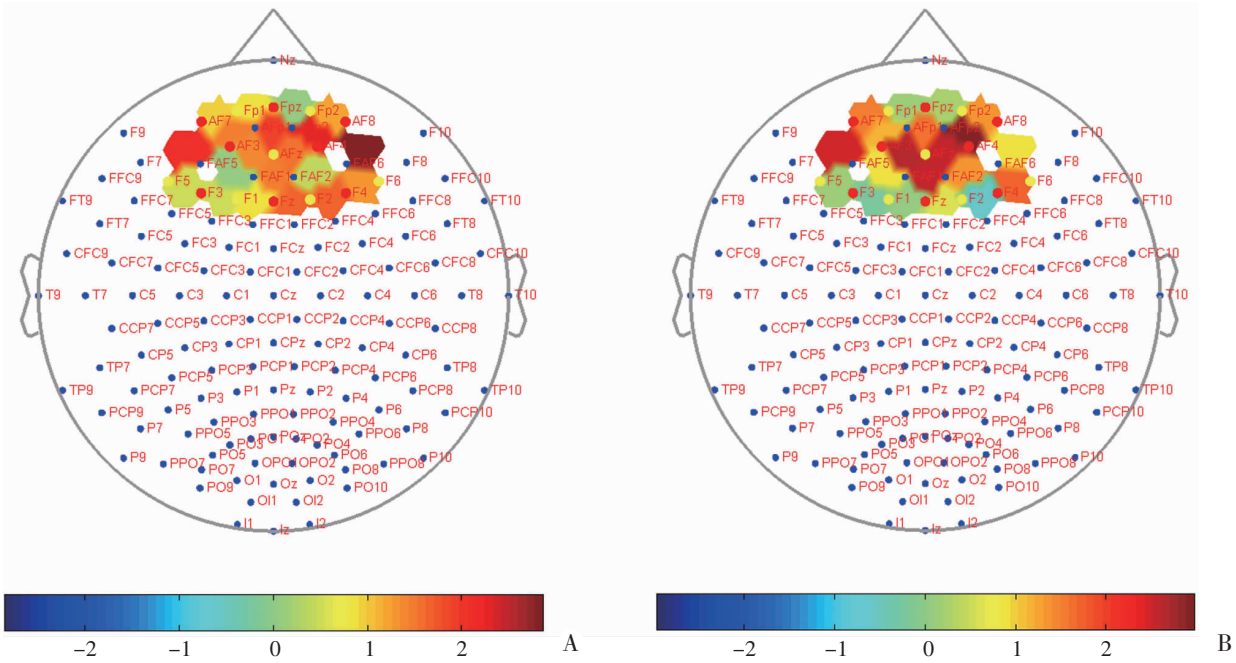
2.3 两组被试 Stroop 任务下脑血氧信号的差异

对两组被试 Stroop 任务下的脑活动信号(HbO_2 和 Hb)进行双样本 t 检验。两组被试 HbO_2 的浓度变化无明显差异。快组被试 Hb 的浓度变化在 Ch3、Ch4 通道明显低于慢组,对应左侧背外侧前额叶皮质以及额极区(BA46 和 BA10 区)($P<0.05$,图 5)。



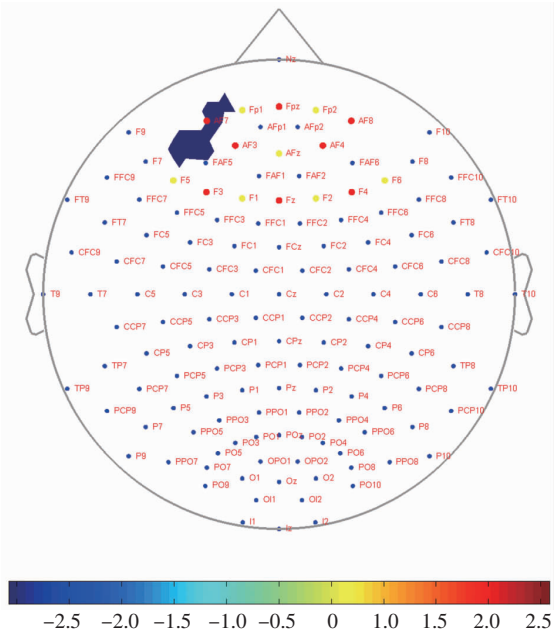
红色点表示光源;黄色点表示探测器;下方颜色条显示单样本 t 检验各通道 t 值大小,t 值越大,表明大脑激活越强;红色曲线代表 HbO_2 相对浓度变化;蓝色曲线代表 Hb 相对浓度变化

图 3　28 名被试 Stroop 任务的激活脑区(A)以及 Ch3(B)、Ch20(C)通道 HbO_2/Hb 相对浓度变化曲线



红色点表示光源;黄色点表示探测器;下方颜色条显示单样本 t 检验各通道 t 值大小,t 值越大,表明大脑激活越强

图 4　快组(A)和慢组(B)被试 Stroop 任务的激活模式



红色点表示光源;黄色点表示探测器;下方颜色条显示双样本 t 检验各通道 t 值大小,t 值越小,表明两组被试脱氧信号浓度变化的差异越大

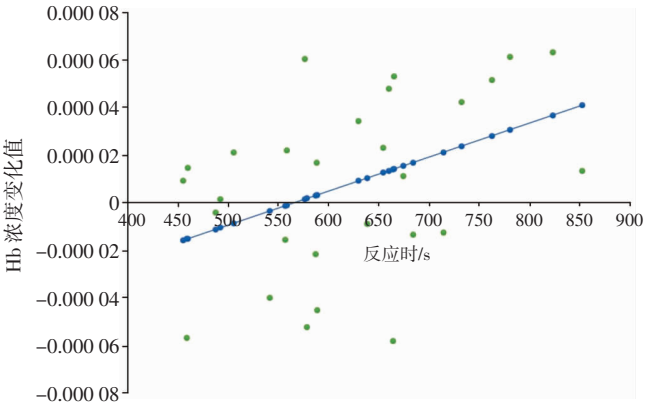
图 5 Stroop 任务下两组被试脱氧信号的显著性差异脑区

2.4 Hb 平均相对含量随时间的变化

分析两组被试任务状态下 Hb 浓度变化呈现显著差异的通道(Ch3,Ch4)中,Hb 浓度变化随时间变化的时程曲线(图 6)。结果显示:慢组 Hb 浓度变化明显高于快组,在任务开始后以及任务结束时分别有 1 个明显的峰值出现,快组在任务开始后的峰值并不明显,但在任务结束时仍有 1 个较小的峰值出现。

2.5 被试血氧浓度变化值与反应时的相关关系

计算 28 位被试各通道信号值与其反应时之间的相关关系,发现Ch4通道Hb的浓度变化值与被试反应时呈现正相关关系($r=0.422\ 3$,$P=0.025\ 2$,图 7)。其他通道未发现与反应时的显著相关关系。



绿点表示每个被试反应时和 Ch4 通道 Hb 的浓度变化值;蓝线为拟合出的相关直线

图 7 Ch4 通道 Hb 浓度变化值与被试反应时呈正相关关系

3 讨论

本研究采用近红外功能脑成像技术,研究了 Stroop 字色实验任务下前额叶大脑血氧信号的激活模式,同时对比了两组反应时不同的被试在 Stroop 任务下大脑 HbO_2 及 Hb 随时间的浓度变化差异。此外,本研究还对任务下全脑各通道 HbO_2 及 Hb 浓度变化与被试反应时之间的关系进行了研究,从影像学角度进一步揭示大脑冲突监测功能的神经机制。

所有被试的单样本 t 检验结果显示:Stroop 任务下被试双侧 DLPFC(BA9/BA46)和额极区(BA10)呈现显著激活。显著激活的代表性通道(Ch3,Ch20)中,HbO_2/Hb 浓度变化随时间变化的时程曲线较为相似,显示双侧大脑激活的模式具有一致性。分组后,两组

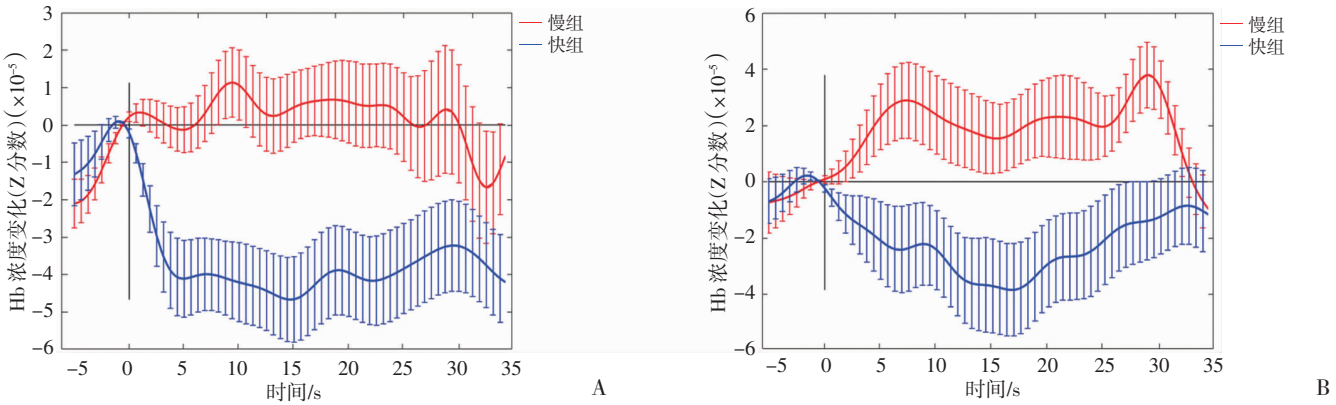


图 6 Stroop 任务下 Ch3(A)、Ch4(B)通道 Hb 相对浓度变化曲线

被试的单样本 t 检验结果显示:快组 Stroop 任务主要激活的脑区分布于 Ch16、Ch20 通道,对应右侧额极区(BA10)和背外侧前额叶(BA46)。慢组 Stroop 任务主要激活的脑区分布于 Ch3、Ch7、Ch9、Ch14、Ch16 通道,对应左侧背外侧前额叶皮质(BA9 和 BA46)以及双侧额极区(BA10)。所有被试以及分组后两组被试的激活脑区结果与之前的研究结果较为一致,即背外侧前额叶在冲突监测任务中起到了关键的作用[13-15]。而慢组被试激活的区域较快组被试更广,且激活强度也大于快组,表明慢组被试在执行冲突监测任务的过程中需要招募更多的脑区来参与,且调动了更多的大脑能量。

本研究双样本 t 检验结果显示:与反应时慢的被试比较,反应时快的被试 Hb 浓度变化显著降低,主要位于 Ch3 和 Ch4 通道,对应左侧 DLPFC(BA46)和额极区(BA10 区)。分析两组被试任务状态下 Hb 浓度变化呈现显著差异的通道(Ch3,Ch4)中 Hb 浓度变化随时间变化的时程曲线,慢组 Hb 浓度变化也显著高于快组。从脑区分布而言,BA10 包括额上回和额中回最前侧的部分,而 BA46 包括额中回[14]。神经科学研究已经确认 DLPFC 参与认知控制的自上而下的调节过程[1]。多项研究表明左侧 DLPFC 是冲突监测的关键脑区[1-3,6]。根据冲突监控假说,反应冲突的发生是由 ACC 发出的,而 DLPFC 中更多的认知控制被用于后续的表现[16]。多项不同的 Stroop 任务的功能成像研究和病变研究也都证明了 DLPFC 在选择性注意和反应抑制中的重要作用[17-18]。额极区(BA10)包括内侧和外侧,通常分别称为腹内侧前额叶皮质(ventromedial prefrontal cortex,vmPFC)和外侧额极皮质(lateral frontopolar cortex,lFPC)[19]。本研究中主要分布于 lFPC,这一区域的核心功能已经被理论化为支持认知分支,即在进行中的多个任务同时执行时,能够暂停另一个行动方案(待定任务集)[20-21]。有研究也发现了左侧 lFPC 在注意力资源的重分配中起到的重要作用,包括在视觉维度(颜色和运动)之间以及位置之间的注意力资源重分配[22-23],这与本研究字色 Stroop 任务对颜色判断的需求相对应。反应速度不同的人群在执行 Stroop 任务时大脑左侧 DLPFC 以及 lFPC 血氧反应的不同,印证了这些脑区在冲突监测任务中的核心以及关键作用。

重要的是,本研究还发现了 Ch4 通道(BA10)的 Hb 浓度变化与被试的反应时呈正相关关系($P=0.025\ 2$)。即被试在 Stroop 任务中反应时越慢,则其大脑 lFPC 的血氧反应变化越明显。lFPC 在大脑冲突监测功能中负责注意力资源的重分配以及支持多任务执行[21-23]。被试在执行冲突监测任务例如 Stroop 任务时,越慢的反应时意味着动用了更多的大脑资源,因而大脑中负责冲突监测功能的 lFPC 也随之出现更为明显的血氧反应。这一结果表明:Ch4 通道的 Hb 浓度变化可以从影像学角度反映被试的反应时,因此可以作为衡量大脑冲突监测功能的一个重要的生理学指标。明确这一生物标记及脑区定位,有利于下一步开发实时监测设备,用于战时或特殊人员的挑选和监测,针对这一脑区的刺激技术也可能增强被试的冲突反应能力。

综上所述,本研究应用 fNIRS 技术验证了 DLPFC 在冲突监测功能中的核心作用,重点对比了反应时不同的两组被试在冲突监测任务下大脑血氧反应的差异,研究了任务状态下大脑血氧浓度随时间的变化曲线,同时发现了 lFPC 的 Hb 浓度变化可以作为反映被试大脑冲突监测功能的一个重要指标,从一个新的角度了揭示大脑冲突监测功能的神经机制,也为进一步开发大脑的冲突监测功能提供了新的影像学依据。本研究也存在一定的局限性。首先,被试的样本量较小,仍需要进一步的大样本研究来验证当前的结果。其次,作为冲突监测的经典实验范式,本研究仅选择了 Stroop 任务作为刺激任务,下一步还需要结合更多的实验范式进行多角度的分析,更深入地研究大脑冲突监测功能的神经机制。

参考文献:

[1] ARANEDA R, RENIER L, DRICOT L, *et al*. A key role of the prefrontal cortex in the maintenance of chronic tinnitus: an fMRI study using a Stroop task[J]. Neuroimage Clin, 2018, 17: 325-334. DOI:10.1016/j.nicl.2017.10.029.

[2] AARTS E, ROELOFS A, VAN TURENNOUT M. Attentional control of task and response in lateral and medial frontal cortex: brain activity and reaction time distributions[J]. Neuropsychologia, 2009, 47(10): 2089-2099. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2009.03.019.

[3] ALEXANDER W H, BROWN J W. Medial prefrontal cortex as an action-outcome predictor[J]. Nat Neurosci, 2011, 14(10): 1338-1344. DOI:10.1038/nn.2921.

[4] BOTVINICK M M. Conflict monitoring and decision making: reconciling two perspectives on anterior cingulate function[J]. Cogn Affect Behav Neurosci, 2007, 7(4): 356-366.

DOI:10.3758/cabn.7.4.356.

[5] DAVELAAR E J, STEVENS J. Sequential dependencies in the Eriksen flanker task: a direct comparison of two competing accounts[J]. Psychon Bull Rev, 2009, 16(1): 121-126. DOI:10.3758/pbr.16.1.121.

[6] GRINBAND J, SAVITSKAYA J, WAGER T D, *et al*. The dorsal medial frontal cortex is sensitive to time on task, not response conflict or error likelihood[J]. NeuroImage, 2011, 57(2): 303-311. DOI:10.1016/j.neuroimage.2010.12.027.

[7] FERRARI M, QUARESIMA V. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application[J]. NeuroImage, 2012, 63(2): 921-935. DOI:10.1016/j.neuroimage.2012.03.049.

[8] STROOP J R. Studies of interference in serial verbal reactions[J]. J Exp Psychol, 1935, 18(6): 643-662. DOI:10.1037/h0054651.

[9] 王莉, 桑林琼, 张晔, 等. 工作记忆任务的近红外脑功能成像研究[J]. 第三军医大学学报, 2019, 41(21): 2061-2068. DOI: DOI:10.16016/j.1000-5404.201907031.
WANG L, SANG L Q, ZHANG Y, *et al*. Near infrared brain functional imaging of working memory in health young individuals[J]. J Third Mil Med Univ, 2019, 41(21): 2061-2068. DOI: DOI:10.16016/j.1000-5404.201907031.

[10] LUU S, CHAU T. Decoding subjective preference from single-trial near-infrared spectroscopy signals[J]. J Neural Eng, 2009, 6(1): 016003. DOI:10.1088/1741-2560/6/1/016003.

[11] 张静娜,王莉,张晔,等.基于功能近红外光谱技术的镜像运动脑激活特征的初步研究[J].第三军医大学学报,2018,40(18):1682-1687.
ZHANG J N, WANG L, ZHANG Y, *et al*. Brain activation characteristics during mirror movements in healthy subjects: findings by functional near-infrared spectroscopy[J]. J Third Mil Med Univ, 2018, 40(18): 1682-1687. DOI: 10.16016/j.1000-5404.201804010.

[12] USMAN D, STORES F S. On some data pre-processing techniques for K-means clustering algorithm[J]. J Phys Conf Ser, 2020, 1489: 012029. DOI:10.1088/1742-6596/1489/1/012029.

[13] LAGUË-BEAUVAIS M, BRUNET J, GAGNON L, *et al*. A fNIRS investigation of switching and inhibition during the modified Stroop task in younger and older adults[J]. Neuroimage, 2013, 64: 485-495. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2012.09.042.

[14] VANDERHASSELT M A, DE RAEDT R, BAEKEN C. Dorsolateral prefrontal cortex and Stroop performance: tackling the lateralization[J]. Psychon Bull Rev, 2009, 16(3): 609-612. DOI:10.3758/pbr.16.3.609.

[15] XU X, DENG Z Y, HUANG Q, *et al*. Prefrontal cortex-mediated executive function as assessed by Stroop task performance associates with weight loss among overweight and obese adolescents and young adults[J]. Behav Brain Res, 2017, 321: 240-248. DOI:10.1016/j.bbr.2016.12.040.

[16] BOTVINICK M M, BRAVER T S, BARCH D M, *et al*. Conflict monitoring and cognitive control[J]. Psychol Rev, 2001, 108(3): 624-652. DOI:10.1037/0033-295x.108.3.624.

[17] PLENGER P, KRISHNAN K, CLOUD M, *et al*. fNIRS-based investigation of the Stroop task after TBI[J]. Brain Imaging Behav, 2016, 10(2): 357-366. DOI:10.1007/s11682-015-9401-9.

[18] NISHIZAWA Y, KANAZAWA T, KAWABATA Y, *et al*. fNIRS assessment during an emotional stroop task among patients with depression: replication and extension[J]. Psychiatry Investig, 2019, 16(1): 80-86. DOI: 10.30773/pi.2018.11.12.2.

[19] SEMENDEFERI K, ARMSTRONG E, SCHLEICHER A, *et al*. Prefrontal cortex in humans and apes: a comparative study of area 10[J]. Am J Phys Anthropol, 2001, 114(3): 224-241. DOI:10.1002/1096-8644(200103)114: 3224: aid-ajpa1022>3.0.co;2-i.

[20] BOORMAN E D, BEHRENS T E, WOOLRICH M W, *et al*. How green is the grass on the other side? Frontopolar cortex and the evidence in favor of alternative courses of action[J]. Neuron, 2009, 62(5): 733-743. DOI:10.1016/j.neuron.2009.05.014.

[21] CHARRON S, KOECHLIN E. Divided representation of concurrent goals in the human frontal lobes[J]. Science, 2010, 328(5976): 360-363. DOI: 10.1126/science.1183614.

[22] MANSOURI F A, KOECHLIN E, ROSA M G P, *et al*. Managing competing goals-a key role for the frontopolar cortex[J]. Nat Rev Neurosci, 2017, 18(11): 645-657. DOI:10.1038/nrn.2017.111.

[23] PENG K, STEELE S C, BECERRA L, *et al*. Brodmann area 10: Collating, integrating and high level processing of nociception and pain[J]. Prog Neurobiol, 2018, 161: 1-22. DOI:10.1016/j.pneurobio.2017.11.004.

(**收稿**:2020-11-13;**修回**:2020-12-13)

(编辑 吴培红)