DOI:10.16016/j.2097-0927.202106243

基于 fNIRS 的大脑前额叶皮层在不同脑力负荷下的激活模式研究

桑林琼[1],王 莉[1,2],乔 梁[1],张静娜[1],李鹏岳[1],尚光荣[1],张 晔[1],王倩楠[1],邱明国[1] 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[1],高原军事医学系极端环境医学教育部重点试验室[2]

[**摘要**] **目的** 利用功能性近红外光谱成像技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)探讨大脑双侧前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)在不同脑力负荷下的激活模式。**方法** 选取本校在校学生 34 例(男性 17 例,女性 17 例),分别进行 3 种负荷水平的 n-back(n=1、2、3)认知记忆任务试验,采用 fNIRS 检测被试大脑双侧 PFC 的含氧血红蛋白(HbO_2)的相对含量和时间特性。**结果** 随着负荷水平的增加,被试任务的正确率显著下降,反应时逐步升高,在 1-back 时显著低于 2-back 和 3-back,但 2-back 和 3-back 之间差异无统计学意义。大脑双侧 PFC 的激活强度随着负荷水平增加呈现非线性增强,相比于 1-back,2-back 时左、右侧 PFC 的激活均增强,特别是右侧 PFC 激活显著增强(P<0.05),然而 3-back 时双侧 PFC 的激活程度与 2-back、1-back 时差异均无统计学意义。检测 fNIRS 信号的时间特性发现,左侧 PFC 在 3-back 时的血流动力学响应较强。**结论** fNIRS 可以检测到不同脑力负荷下大脑双侧 PFC 在激活强度和血氧响应模式上均存在差异,随着脑力负荷增加,右侧 PFC 的功能激活显得较为重要。

[**关键词**] 功能近红外光谱成像技术;脑力负荷;脑激活;前额叶皮质

[**中图法分类号**] R338.2;R338.64;R445.7 [**文献标志码**] A

Load-dependent activation of bilateral prefrontal cortex: an fNIRS study

SANG Linqiong[1], WANG Li[1,2], QIAO Liang[1], ZHANG Jingna[1], LI Pengyue[1], SHANG Guangrong[1], ZHANG Ye[1], WANG Qiannan[1], QIU Mingguo[1] [1]Department of Medical Imaging, Faculty of Biomedical Engineering, [2]Key Laboratory of Extreme Environmental Medicine of Ministry of Education, Faculty of High Altitude Military Medicine, Army Medical University (Third Military Medical University), Chongqing, 400038, China

[**Abstract**] **Objective** To investigate the load-dependent activation in bilateral prefrontal cortex (PFC) during working memory tasks by functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). **Methods** Thirty-four undergraduates (17 males and 17 females) completed a standard N-back task at 3 load levels (n=1, 2, 3) while fNIRS data were collected from frontal cortex. Brain activation and relative content of oxygenated hemoglobin (HbO_2) in left and right prefrontal cortex was calculated respectively. **Results** As the load level increased, the accuracy was linearly declined and the action time was significantly prolonged in 1-back than in 2-back and 3-back, but there was no significant difference between 2-back and 3-back. Moreover, the activation of bilateral prefrontal cortex showed non-linear growth with the increase of load level. The activation of bilateral prefrontal cortex in 2-back both presented stronger when compared to 1-back, particularly in the right PFC (P<0.05). However, there was no obvious difference in the activation of bilateral prefrontal cortex in 3-back when compared to 2-back and 1-back. The time characters of fNIRS showed that the hemodynamic response of the left prefrontal cortex was stronger in 3-back. **Conclusion** fNIRS could detect the differences

[**基金项目**] 陆军军医大学青年培育项目(2018XQN04);军队卫勤保障能力创新与生成专项计划(21WQ004);教育部极端环境医学重点试验室开放课题(PR-KL2020GY001)

[**通信作者**] 邱明国,E-mail:qiumg_2002@sina.com

2097-0927/Copyright © 2022, 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/)

in the activation patterns and blood oxygen response mode of bilateral prefrontal cortex under different mental loads. Right prefrontal cortex plays more important role in higher mental load tasks.

[**Key words**] functional near-infrared spectroscopy; mental loads; brain activation; prefrontal cortex

Supported by the Youth Training Program of Army Medical University (2018XQN04), the Special Plan for Innovation and Generation of Military Medical Support Capability (21WQ004), and the Open Project of Key Laboratory of Extreme Environmental Medicine of Ministry of Education (PR-KL2020GY001).
Corresponding author: QIU Mingguo, E-mail: qiumg_2002@sina.com

脑力负荷是完成一项或多项任务时所产生的生理和心理需求,是衡量人在给定任务中大脑的信息处理系统被占用比例的指标[1-2]。当前高新技术日新月异,对工作的要求和难度加大,脑力负荷也必然增加,进而影响工作绩效。因此,研究大脑在不同脑力负荷下的功能活动,不仅有助于制定更加灵活的策略以提高工作效率,并且能为今后神经调控的参数选择和疗效评估提供客观依据。

功能性近红外光谱成像(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS)是一种新型的非侵入的脑功能成像技术。相比于 EEG 和 fMRI,它对运动伪影和环境噪声具有更好的鲁棒性,更适合用于研究真实环境下的大脑功能活动[3-4]。fNIRS 主要依据大脑皮层血流中含氧血红蛋白对 700~900 nm 近红外光谱具有特异吸收性,而血氧水平的变化又与大脑皮层的活动密切相关[5-6],因此,fNIRS 检测出的大脑血氧浓度的变化可以间接反映大脑的功能活动。工作记忆任务是指在执行认知任务过程中,用于暂时存贮信息与加工资源的容量有限的系统[7]。n-back 是常用的工作记忆试验范式,是被认为能够诱发不同脑力负荷水平的有效试验任务[8-9]。在 n-back 试验任务中,被试要求比较当前呈现的刺激与之前呈现的第 n 个刺激是否相同,n 的值通常为 1、2、3,代表了不同难度水平的工作记忆任务。目前,n-back 任务和 fNIRS 相结合是研究脑力负荷的有效手段之一。

潘津津等[9]联合 n-back 和 fNIRS 研究脑力负荷分级,通过不同程度的 n-back 任务成功诱发了不同的脑力负荷水平,同时发现大脑前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)的血氧水平随着脑力负荷的增加而发生变化。FISHBURN 等[10]发现大脑 PFC 的激活与工作记忆不同负荷水平之间的关系近乎线性。近年来,MEIDENBAUER 等[11]也发现 fNIRS 可以跟踪 n-back 任务诱发的不同的脑力负荷,并且可以揭示大脑活动和行为学表现之间的显著关联。然而,以往研究对左、右侧 PFC 分别在工作记忆任务中的作用机制分析还不够明确,在不同脑力负荷水平下大脑双侧 PFC 各自的血氧响应模式还不清楚。

本研究联合利用 fNIRS 和 n-back 试验范式,采集 34 例被试在 3 级 n-back 任务下的大脑 PFC 皮层的血氧浓度变化,探讨大脑双侧 PFC 分别在工作记忆不同脑力负荷水平下的血氧响应特性,明确双侧 PFC 的功能活动随着脑力负荷的不同而发生的变化,探究在不同脑力负荷中分别发挥重要作用的脑区,为进一步揭示不同脑力负荷下大脑的功能活动机制提供参考,也为今后通过神经调控提升高脑力负荷下的工作绩效提供客观依据。未来战争将是高科技体系作战,脑力负荷必然增加,因此,本研究也具有潜在的军事应用价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究选取本校在校学生 34 例,男性 17 例,女性 17 例,年龄 19~23 岁,大学本科学历。被试均为健康右利手,无神经及精神疾病史。试验前均告知被试试验内容和流程,对本研究知情并签署了知情同意书。该研究方案于 2018 年经本校医学伦理委员会批准通过。

1.2 试验任务

本试验任务的刺激序列编写、刺激呈现、运行并实时记录由 Eprime 3.0 软件完成。采用了以英文字母为外界刺激的 3 种负荷水平的 n-back 任务,分别是 1-back(低等负荷)、2-back(中等负荷)和 3-back(高等负荷),具体试验流程如图 1 所示。字母刺激选择 18 个大写字母(即除去 L、W、Y、D 外的所有辅音字母)。n-back 任务中,字母刺激呈现 500 ms 后消失,持续空白 1 s 后继续呈现新的字母刺激 500 ms,以此循环,被试根据当前呈现字母与前 n (n=1、2、3) 个出现的字母刺激相比对,若相同,被试按“F”键,若不同,则按“J”键。每种负荷水平的试验任务共有 8 个 block,每个 block 由 14 个刺激组成(1-back 需按键 13 次,2-back 需按键 12 次,3-back 需按键 11 次),每个 block 之间休息 20 s。每名被试在正式试验前要求练习至少 30 min,并且正式试验的每种负荷水平的第 1 个 block 也视为练习,不计入随后的数据分析。

1.3 数据采集及处理

通过 NIRScout 系统(Medical Technologies, LLC)进行近红外数据采集,采用系统自带的 PFC 模板,共采集 20 个通道的数据。近红外探头包括 7 个光源和 8 个探测器(图 2),源探间距为 3 cm,采样频率为 7.812 5 Hz。信号采集帽根据国际 10~20 系统中的 Cz 进行对正。

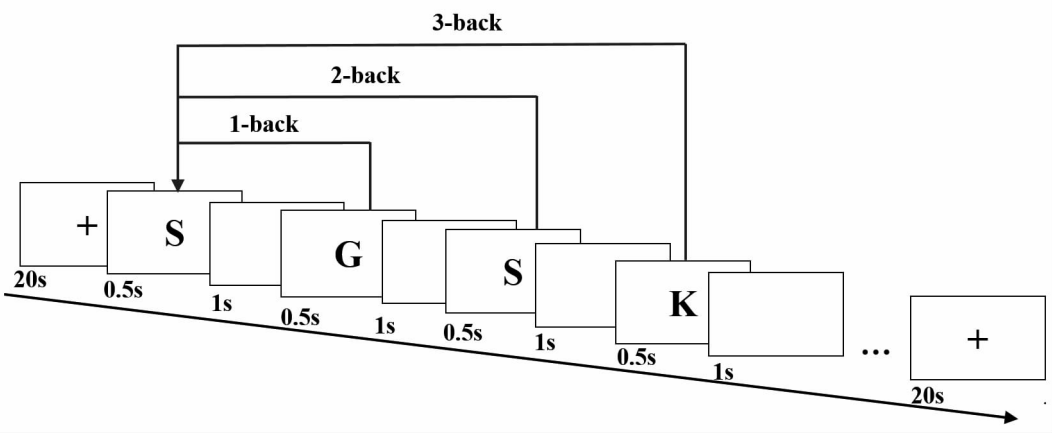
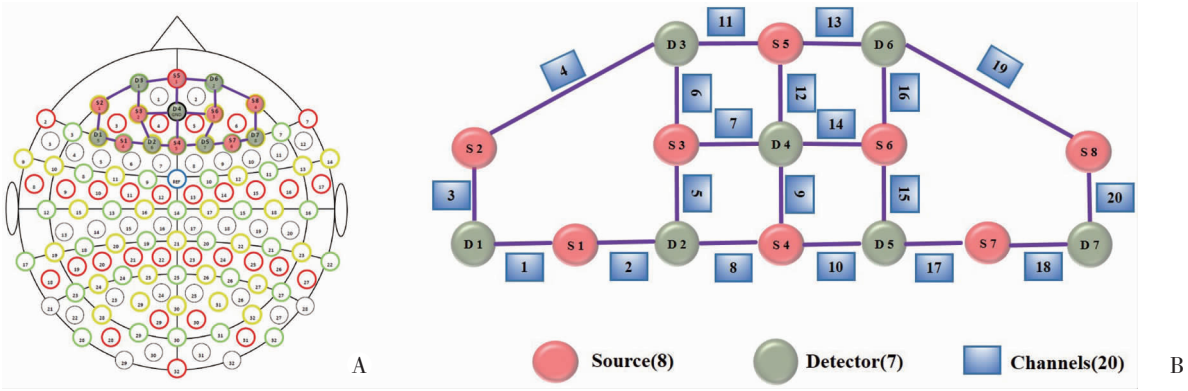


图 1 n-back 刺激试验范式



A:PFC 模板的光源和探测器的布局图;B:PFC 模板的 20 个通道位置示意图 红色实心圆球 S:光源;绿色实心圆球 D:探测器;L:大脑左侧;R:大脑右侧

图 2 fNIRS 采集系统中大脑 PFC 模板

fNIRS 数据预处理的方法包括下采样、带通或小波滤波、运动校正等[12-13]。fNIRS 数据受多种干扰源影响,主要是运动伪迹和生理干扰。运动伪迹的主要来源是被试的身体活动,如眨眼和头部晃动等。生理干扰则主要来源于被试的生理活动,如心跳、呼吸、血压波动、血液流动、毛细血管活动以及自发低频振动等引起的血液血氧指标波动。采用频率范围为 0.01~0.20 Hz 的带通滤波去除生理干扰用以滤除高频噪声、基线漂移和生理干扰。接着,应用修正的比尔朗伯(吸收)定律将每个通道 2 个波长的光强信号转换为氧合血红蛋白(HbO_2)和脱氧血红蛋白(HbR)相对浓度变化的信号[14-15]。本文主要分析不同脑力负荷下 HbO_2 信号的变化。

1.4 统计学分析

采用 SPSS 22.0 统计软件。多重测量方差分析用于检测正确率和反应时在 3 种负荷水平工作记忆任务之间的差异,接着采用 Post-hoc 分析不同负荷水平两两之间的差异。配对 t 检验用于检测不同负荷水平试验任务下大脑激活强度(beta 值)之间的差异。双样本 t 检验用于检测各个通道的激活情况。$P<0.05$ 则认为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 行为学检测

3 种负荷水平任务的行为学数据包括反应的正确率和反应时。任务正确率的描述如下(M 为均值,f_{sd} 为标准偏差):1-back($M=90.74$,$f_{sd}=5.82$),2-back($M=84.21$,$f_{sd}=6.9$),3-back($M=78.87$,$f_{sd}=10.01$)。任务反应时的描述如下:1-back($M=544.45$,$f_{sd}=60.58$),2-back($M=685.91$,$f_{sd}=114.69$),3-back($M=699.87$,$f_{sd}=143.83$)。

3 种负荷水平任务的正确率经过多重测量方差分析检验,不符合 Mauchly 球形度假设($W=0.719$,$P=0.005$)。经过 Greenhouse-Geisser 校正[F(1.56,

51.5)=29.28,P<0.001],3 种负荷水平之间差异有统计学意义。经过成对检验 Post-hoc 分析，正确率在 1-back 和 2-back（P<0.001）、1-back 和 3-back（P<0.001）、2-back 和 3-back（P=0.006）之间差异均有统计学意义（图 3）。

3 种负荷水平任务的反应时经过多重测量方差分析检验，$F(2, 66)=29.918$，$\omega^2=0.362$，P<0.001，3 种负荷水平之间差异有统计学意义。经过成对检验 Post-hoc 分析，反应时在 1-back 和 2-back（P<0.001）、1-back 和 3-back（P<0.001）之间差异有统计学意义，但是在 2-back 和 3-back 之间无差异（图 3）。

2.2　不同负荷水平下大脑双侧 PFC 的激活情况

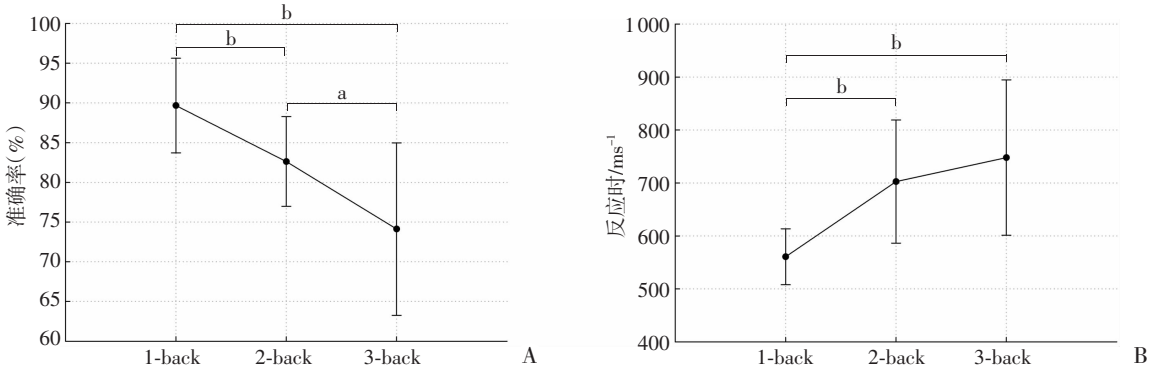
在 GLM 模型中，基线的定义为该通道在整个试验阶段中的数据。相比于基线，3 种负荷水平任务中，大脑 PFC 呈现不同程度和范围的激活，见图 4。

相比于基线，在 3 种负荷水平任务下均显著激活的通道有通道 1、2、10、15、17、18、19 和 20（表 1）。

根据 3 种任务中均显著激活的通道，分别计算左右两侧半球通道的 beta 值的平均值，比较分析左侧 PFC（CH 1、2、10）和右侧 PFC（CH 15、17、18、19、20）的激活强度在不同脑力负荷下的差异。结果发现，右侧 PFC 在 2-back 时的激活强度显著高于 1-back；3-back 与 1-back、2-back 之间差异无统计学意义，右侧 PFC 的激活强度与 2-back 时相比甚至略有下降（图 5）。

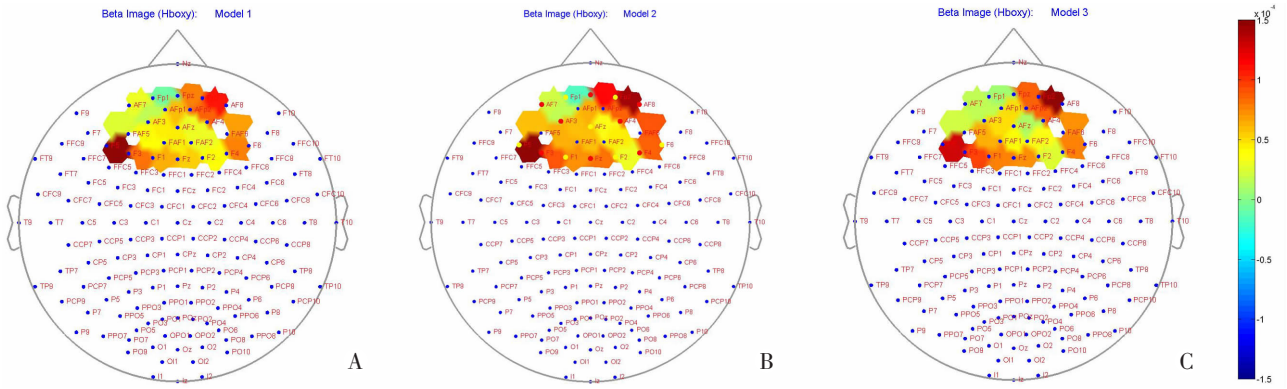
表 1　n-back 不同负荷水平下大脑显著激活的通道

通道	1-back		2-back		3-back	
	t	P	t	P	t	P
CH 1	4.27	<0.001	4.38	<0.001	4.252	<0.001
CH 2	2.157	0.035	2.199	0.031	2.472	0.016
CH 10	2.483	0.016	3.137	0.003	2.978	0.004
CH 12	–	–	2.424	0.018	2.121	0.038
CH 15	2.481	0.016	2.804	0.007	2.5	0.015
CH 16	–	–	2.247	0.028	2.252	0.028
CH 17	2.945	0.004	2.806	0.007	2.751	0.008
CH 18	5.373	<0.001	5.337	<0.001	5.606	<0.001
CH 19	2.691	0.009	3.357	0.001	3.142	0.003
CH 20	2.267	0.027	2.889	0.005	2.745	0.008



a:P<0.05，b:P<0.001

图 3　任务正确率（A）和反应时（B）随负荷水平的变化趋势



红色点表示光源，黄色点表示探测器，脑区的颜色表示大脑的激活强度，从蓝色到红色依次表示大脑激活的增强

A:1-back；B:2-back；C:3-back

图 4　工作记忆任务 n-back 不同负荷水平下的大脑激活图

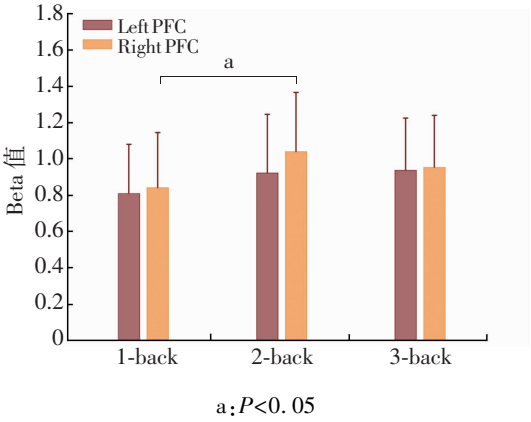


图 5 大脑左、右侧 PFC 在 n-back 不同负荷水平下的激活强度

2.3 血液动力学 HbO_2 变化的时间特性

分别计算左、右侧 PFC 的 HbO_2 随时间变化的特性。通过叠加左侧 PFC(CH 1、2、10)和右侧 PFC(CH 15、17、18、19、20)所有通道的所有被试的 7 个 block 的数据,作为平均时程曲线。左、右侧 PFC 在 n-back 不同负荷水平下 HbO_2 变化的时间特性如图 6 所示。结果显示,在 1-back 时左、右侧 PFC 的 HbO_2 浓度变化的峰值及到达峰值的时间无差异,但是左侧 PFC 的 HbO_2 浓度变化到达峰值后衰减较快。在 2-back 时,右侧 PFC 的 HbO_2 浓度变化的峰值较左侧 PFC 高,到达峰值的时间较晚,并具有较慢的衰减。在 3-back 时,左侧 PFC 的 HbO_2 浓度变化的峰值较右侧 PFC 高,到达峰值的时间也较晚。

从左、右侧 PFC 的角度分别来看与负荷水平相关的 HbO_2 变化的时间特性,随着负荷水平的增加,左侧 PFC 的 HbO_2 浓度变化显著增强,在 3-back 时的血流动力学响应最强;右侧 PFC 的 HbO_2 浓度变化逐步增强,与 1-back 相比,2-back 时峰值更高,到达峰值的时间也越长(图 7)。

3 讨论

本研究利用 fNIRS,检测被试在 3 种负荷水平 n-back 任务下大脑 PFC 中 HbO_2 的浓度变化,并按照左右半球将 PFC 的激活区域进行了对比分析,研究了左、右侧 PFC 在不同脑力负荷下的激活模式,为阐明不同脑力负荷下大脑的功能活动机制提供了参考数据。

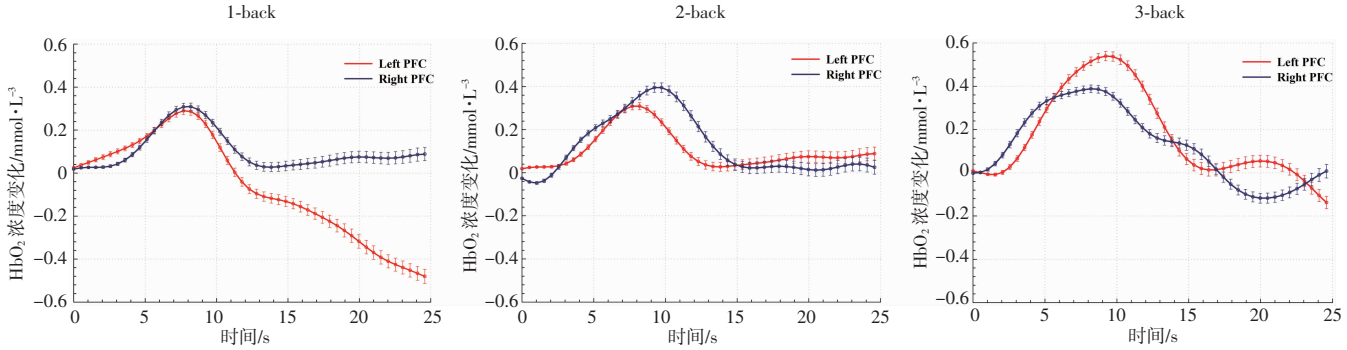


图 6 n-back 不同负荷水平下左、右 PFC 中 HbO_2 浓度变化的时间特性

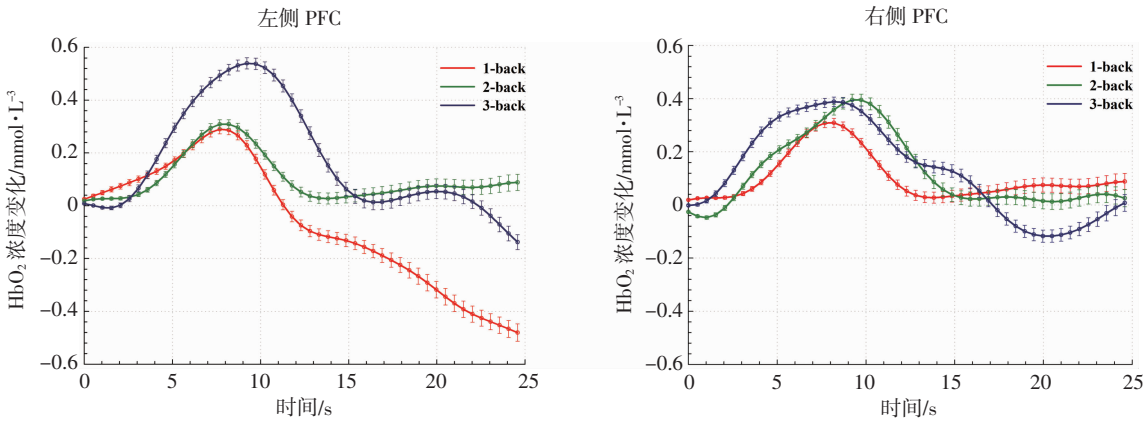


图 7 左、右侧 PFCK 中 HbO_2 浓度变化在 n-back 不同负荷水平下的时间特性

fNIRS 血流动力学的结果显示,随着任务负荷难度的增加,从 1-back 到 2-back 时,大脑双侧 PFC 的激活强度增强,这是因为难度越大的任务需要被试的注意力更集中,工作记忆中储存的信息更多,脑力负荷也就越大。这个结论跟以往的 fNIRS 研究一致[10-11, 16-17]。然而,相比于 2-back,在 3-back 时大脑双侧 PFC 的激活程度却没有显著增加,表示大脑激活强度并不随着任务难度成线性增加,这些结果也与以往研究[18-19]相一致,文献[19]提出在更难任务的情况下激活的非线性增加,可能只是因为当任务需求超过被试当前的心理容量时,他们可能会脱离太难任务从而导致 HbO_2 浓度下降。有观点认为一旦被试在一项要求很高(但可以完成)的任务(如 2-back)中达到了大脑皮层激活的最高水平,就不会有额外的神经"输出"来完成一项更困难的任务(如 3-back)[20]。本研究行为学结果也发现 2-back 时被试任务正确率比 1-back 显著降低、反应时显著增加,3-back 时被试任务正确率比 2-back 时显著降低,但反应时差异无统计学意义,该结果表明被试可能从 3-back 的任务中脱离。此外,2-back 时右侧 PFC 的激活强度显著高于 1-back,表明随着任务难度的增加,右侧 PFC 显著激活,这可能因为左侧半球为优势半球[21],当脑力负荷增加时,非优势半球(右侧)也将会作为补偿性资源参与认知活动中。然而,3-back 与 1-back、2-back 之间差异却没有统计学意义,右侧 PFC 的激活强度与 2-back 时相比甚至略有下降,这可能是因为当脑力负荷过大时,双侧半球的激活强度均已经达到峰值,出现了超负荷现象,反而造成了激活强度下降。DURANTIN 等[1]研究了脑力超负荷后的生理反应,认为脑力负荷过重时可能会导致外周神经系统以及大脑活动性的降低。

根据血流动力学响应的延迟效应,在 8 s 左右达到峰值,工作记忆任务会诱发 PFC 的神经电反应增多,需要更多的血氧供给,导致血氧响应曲线上升[22]。本研究中大脑双侧 PFC 的血氧变化都在 8~10 s 达到峰值,符合预期设想。fNIRS 时间序列的不同特征表明双侧 PFC 在不同负荷水平下的血氧响应模式存在差异,在 1-back 时,左侧 PFC 的 HbO_2 浓度变化稍早,双侧 PFC 均在 8~9 s 时到达峰值,然后左侧 PFC 的 HbO_2 浓度变化快速衰减,我们推测左、右侧 PFC 在较低脑力负荷时的血氧响应相近,但左侧 PFC 发挥更大作用。在 2-back 时,右侧 PFC 的 HbO_2 浓度变化稍晚于左侧 PFC,并且在 3~15 s 时 HbO_2 浓度变化均高于左侧 PFC,这可能是在较高脑力负荷时,需要调用非优势半球(右侧)作为补偿性资源参与认知活动。在 3-back 时,左侧 PFC 的 HbO_2 浓度变化的峰值较右侧 PFC 高,到达峰值的时间较晚,在高脑力负荷下大脑会进一步激活优势半球,但是被试任务正确率仍显著下降,表明在超负荷时大脑优势半球激活到达峰值仍难以完成任务,这时候非优势半球(右侧)作为补偿性资源就显得更为重要。这些结果预示,在高脑力负荷下,右侧 PFC 可能作为神经调控的刺激靶点以有效提高工作记忆的能力,这个结果为研究如何提升认知能力提供了新的视角。

综上所述,本研究发现 fNIRS 可以检测到不同脑力负荷下大脑双侧 PFC 在激活强度和血氧响应模式上均存在差异,发现随着脑力负荷增加,右侧 PFC 的功能激活显得较为重要,为今后通过神经调控提升高脑力负荷下的工作绩效提供了参考依据。本研究也存在一定的局限性:首先,本研究中样本量较小,可能导致统计分析的能力不足,从而不能充分识别组间的差异;其次,本研究没有分析双侧 PFC 的激活强度与行为学表现之间的关系。在接下来的研究工作中,需要继续招募被试采集 fNIRS 数据,进一步分析双侧 PFC 的激活模式分别与行为学表现之间的关系,并探索通过神经调控以提升高脑力负荷下工作记忆能力的有效途径。

参考文献:

[1] DURANTIN G, GAGNON J F, TREMBLAY S, *et al*. Using near infrared spectroscopy and heart rate variability to detect mental overload[J]. Behav Brain Res, 2014, 259: 16-23. DOI:10.1016/j.bbr.2013.10.042.

[2] ARVIDSSON H, LARSSON G, LARSOLLE A, *et al*. Easily applicable methods for measuring the mental load on tractor operators[J]. J Agric Saf Health, 2020, 26(1): 5-14. DOI:10.13031/jash.13223.

[3] YÜCEL M A, SELB J J, HUPPERT T J, *et al*. Functional near infrared spectroscopy: enabling routine functional brain imaging[J]. Curr Opin Biomed Eng, 2017, 4: 78-86. DOI: 10.1016/j.cobme.2017.09.011.

[4] PINTI, TACHTSIDIS I, HAMILTON A, *et al*. The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience[J]. Ann N Y Acad Sci, 2020, 1464(1): 5-29. DOI:10.1111/nyas.13948.

[5] RAHMAN M A, SIDDIK A B, GHOSH T K, *et al*. A narrative review on clinical applications of fNIRS[J]. J Digit Imaging, 2020, 33(5): 1167-1184. DOI:10.1007/s10278-020-00387-1.

[6] BUXTON R B. The physics of functional magnetic resonance imaging (fMRI)[J]. Rep Prog Phys, 2013, 76(9): 096601. DOI:10.1088/0034-4885/76/9/096601.

[7] PENG C, HOU X L. Applications of functional near-infrared

spectroscopy (fNIRS) in neonates[J]. Neurosci Res, 2021, 170: 18-23. DOI:10.1016/j.neures.2020.11.003.

[8] 姜劲, 焦学军, 潘津津, 等. 基于 fNIRS 的情绪对工作记忆负荷影响规律研究[J]. 航天医学与医学工程, 2017, 30(2): 115-122. DOI:10.16289/j.cnki.1002-0837.2017.02.008.
JIANG J, JIAO X J, PAN J J, *et al*. Study on influence of emotional state on work memory response mechanism using functional near-infrared spectroscopy[J]. Space Med Med Eng, 2017, 30(2): 115-122. DOI:10.16289/j.cnki.1002-0837.2017.02.008.

[9] 潘津津, 焦学军, 姜劲, 等. 利用功能性近红外光谱成像方法评估脑力负荷[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 344-349. DOI:10.3788/aos201434.1130002.
PAN J J, JIAO X J, JIANG J, *et al*. Mental workload assessment based on functional near-infrared spectroscopy [J]. Acta Opt Sin, 2014, 34(11): 344-349. DOI:10.3788/aos201434.1130002.

[10] FISHBURN F A, NORR M E, MEDVEDEV A V, *et al*. Sensitivity of fNIRS to cognitive state and load[J]. Front Hum Neurosci, 2014, 8: 76. DOI:10.3389/fnhum.2014.00076.

[11] MEIDENBAUER K L, CHOE K W, CARDENAS-INIGUEZ C, *et al*. Load-dependent relationships between frontal fNIRS activity and performance: a data-driven PLS approach[J]. Neuroimage, 2021, 230: 117795. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2021.117795.

[12] SCHOLKMANN F, KLEISER S, METZ A J, *et al*. A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology [J]. Neuroimage, 2014, 85(Pt 1): 6-27. DOI:10.1016/j.neuroimage.2013.05.004.

[13] HUPPERT T J, DIAMOND S G, FRANCESCHINI M A, *et al*. HomER: a review of time-series analysis methods for near-infrared spectroscopy of the brain[J]. Appl Opt, 2009, 48(10): D280-D298. DOI:10.1364/ao.48.00d280.

[14] COOPER R J, SELB J, GAGNON L, *et al*. A systematic comparison of motion artifact correction techniques for functional near-infrared spectroscopy[J]. Front Neurosci, 2012, 6: 147. DOI:10.3389/fnins.2012.00147.

[15] PINTI, TACHTSIDIS I, HAMILTON A, *et al*. The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience[J]. Ann N Y Acad Sci, 2020, 1464(1): 5-29. DOI:10.1111/nyas.13948.

[16] AGHAJANI H, GARBEY M, OMURTAG A. Measuring mental workload with EEG + fNIRS [J]. Front Hum Neurosci, 2017, 11: 359. DOI: 10.3389/fnhum.2017.00359.

[17] AYAZ H, SHEWOKIS P A, BUNCE S, *et al*. Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment[J]. Neuroimage, 2012, 59(1): 36-47. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2011.06.023.

[18] MANDRICK K, PEYSAKHOVICH V, RÉMY F, *et al*. Neural and psychophysiological correlates of human performance under stress and high mental workload[J]. Biol Psychol, 2016, 121(Pt A): 62-73. DOI: 10.1016/j.biopsycho.2016.10.002.

[19] CAUSSE M, CHUA Z, PEYSAKHOVICH V, *et al*. Mental workload and neural efficiency quantified in the prefrontal cortex using fNIRS[J]. Sci Rep, 2017, 7(1): 5222. DOI:10.1038/s41598-017-05378-x.

[20] MANDRICK K, DEROSIERE G, DRAY G, *et al*. Prefrontal cortex activity during motor tasks with additional mental load requiring attentional demand: a near-infrared spectroscopy study[J]. Neurosci Res, 2013, 76(3): 156-162. DOI:10.1016/j.neures.2013.04.006.

[21] LUNDSTROM B N, INGVAR M, PETERSSON K M. The role of precuneus and left inferior frontal cortex during source memory episodic retrieval[J]. Neuroimage, 2005, 27(4): 824-834. DOI:10.1016/j.neuroimage.2005.05.008.

[22] SCHAEFFER J D, YENNU A S, GANDY K C, *et al*. An fNIRS investigation of associative recognition in the prefrontal cortex with a rapid event-related design[J]. J Neurosci Methods, 2014, 235: 308-315. DOI:10.1016/j.jneumeth.2014.07.011.

(**收稿**:2021-06-30;**修回**:2021-08-27)

(编辑 吴培红)