

• 论 著 •

基于因果关系的步枪射击pre-shot阶段脑电网络分析

张立伟^{1,2}, 周前祥^{1,2}, 柳忠起^{1,2}, 饶永红³

1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院 (北京 100083)
2. 生物医学工程高精尖创新中心 北京航空航天大学 (北京 102402)
3. 63936 部队 (北京 102202)

【摘要】 大脑皮层网络有向功能连通性是理解大脑组织行为活动方式的关键。本文探索步枪射击任务中射手大脑网络在脑电信号不同节律下的有向功能连通性, 为加速步枪射击训练方法的研究提供神经科学方面的依据。采用扩展概率性因果方法分析步枪射击专家和新手在射击准备 (pre-shot) 阶段大脑皮层的有效定向功能连接。结果表明, 额区、额-中、中央区、顶区和枕区在射击过程中都被激活, 并且大脑右半球功能连接数量明显多于左半球。在 pre-shot 阶段, 与专家相比较, 新手大脑皮层网络参与活动的脑区明显增多、网络节点间的连接强度更大、全局效率值较低。这些结果间接地证明了新手需要更努力地协调更多的资源来完成任务, 这与专家功能性脑组织的“神经效率”假说一致。

【关键词】 因果分析; 脑网络; 脑电信号; 步枪射击

Efficient connectivity analysis of electroencephalogram in the pre-shot phase of rifle shooting based on causality method

ZHANG Liwei^{1,2}, ZHOU Qianxiang^{1,2}, LIU Zhongqi^{1,2}, RAO Yonghong³

1. School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, P.R.China
2. Beijing Advanced Innovation Centre for Biomedical Engineering, Beihang University, Beijing 102402, P.R.China
3. Troops 63936 PLA, Beijing 102202, P.R.China

Corresponding author: ZHOU Qianxiang, Email: zqyg@buaa.edu.cn

【Abstract】 The directed functional connectivity in cerebral cortical is the key to understanding the pattern of the behavioral tissue. This process was studied to explore the directed functional network of rifle shooters at cerebral cortical rhythms from electroencephalogram (EEG) data, aiming to provide neurosciences basis for the future development of accelerating rifle skill learning method. The generalized orthogonalized partial directed coherence (gOPDC) algorithm was used to calculate the effective directed functional connectivity of the experts and novices in the pre-shot period. The results showed that the frontal, frontal-central, central, parietal and occipital regions were activated. Moreover, the more directed functional connections numbers in right hemispheres were observed compared to the left hemispheres. Furthermore, as compared to experts, novices had more activated regions, the stronger strength of connections and the lower value of the global efficiency during the pre-shot period. Those indirectly supported the conclusion that the novices needed to recruit more brain resources to accomplish tasks, which was consistent with “neural efficiency” hypothesis of the functional cerebral cortical in experts.

【Key words】 causal analysis; brain network; electroencephalogram; rifle shooting

DOI: 10.7507/1001-5515.201705078

基金项目: 电子信息装备体系研究国防科技重点实验室基础研究项目支持 (DXZT-JC-ZZ-2015-016); 国家重点研发计划 (2016YFC0802807)

通信作者: 周前祥, Email: zqyg@buaa.edu.cn

引言

随着认知神经科学技术的发展,越来越多的研究者关注射击运动过程中的大脑认知活动。据已有文献报道,射击得分与脑电信号(electroencephalogram, EEG)的幅值和功率谱变化有关系^[1-4]。在射击的 pre-shot (执行射击动作之前大量的精神活动准备,被称为 pre-shot) 期间,与新射手(以下简称为新手)相比,专家级射手(以下简称为专家)大脑顶区和枕区的 EEG 信号功率较高^[2-3]。也有其他文献报道在专家大脑的颞-顶区, EEG 功率增加的幅度较大^[4]。Doppelmayr 等^[5]发现,专家额区在 theta 频段内的 EEG 功率显著增加。然而,对全脑区范围来说,专家被观察到 EEG 活动相对较少,这说明专家的神经网络比新手能更有效地被组织^[6],符合专家功能性脑组织中的“神经效率”假说(神经效率假说:以最小的能量消耗表示更有效的大脑皮质组织功能^[6-7])。即较低的神经复杂度将与较高的射击分数和较小的绩效可变性相关联^[8]。还有研究认为“神经效率”与 EEG 增强的功率谱具有相关性^[9]。而且,相关性的大小反映出两个脑区之间的突触连接的强度^[10]。Gentili 等^[10]通过功率相关性证明了皮层-皮层之间沟通减少时射击运动绩效会提高。

传统的互相关、互信息等相关性分析方法证明脑区之间存在功能连接,并且指出高度相关的活动区域^[9-11]。但是,只有少数研究分析射击运动 pre-shot 阶段大脑功能连接的方向;也很少有文献报道专家与新手的有向功能网络的差异以及从有向功能连接的角度探讨“神经效率”假说。

本文使用概率性因果方法(generalized orthogonalized partial directed coherence, gOPDC)评估射击动作执行前大脑的定向连接状态,观察 EEG 信号在感兴趣区域的定向网络连接随频率演变的规律^[12]。本研究的具体目标是:①探索专家和新手两组人群大脑网络信息流向的差异;②以脑网络的方式验证专家功能性脑组织中的“神经效率”假说。本研究的结果可以为加速步枪射击训练方法的研究提供实证数据和有意义的见解。

1 方法

1.1 参与者

本试验被试人员由 11 个步枪射击专家(士兵)和 9 个射击新手(大学生)组成。专家至少有 6 年

的步枪射击经验,年龄在 25 ~ 40 (30.6 ± 5.01) 岁;新手均没有实弹射击经验,年龄在 23 ~ 35 (28.4 ± 4.69) 岁。试验志愿者都为右利手的健康人,均提前了解试验过程并签署知情同意书。

1.2 任务过程

在热身射击结束后,每个射手使用 56 式半自动步枪完成 3 轮射击任务,每轮 10 次。每次射击任务包含据枪、瞄准和射击三个阶段。其中,据枪和瞄准阶段统称为 pre-shot 阶段,在 pre-shot 开始时刻有声音(音乐声)提醒。射手距离标准环形靶 70 m。射击分数由电子自动报靶器记录。专家的射击分数为 8.76 ± 0.13 ,新手的射击分数为 3.99 ± 0.38 。经独立样本 *t* 检验进行统计,结果显示两组人群的射击分数差异有统计学意义 ($P < 0.001$),证明专家组得分明显高于新手组。

脑电数据采集使用遵循 10 ~ 20 标准的 32 导联脑电帽(ElectroCap Inc, 美国)、型号为 BP ActiCHamp 的放大器和版本为 1.0 的脑电记录软件 Recorder。放大器的采样率设置为 1 000 Hz。参考电极为 Fz 导联,并且电极阻抗保持在 5 k Ω 以下。

1.3 数据分析

1.3.1 EEG 预处理 原始 EEG 信号使用软件 BrainVision Analyzer 2.1 进行预处理。首先,采用独立分量分析(independent component analysis, ICA)方法去除眼电信号。其次,采用半自动方式去除伪迹。再次,使用 10 阶切比雪夫滤波器进行滤波(0.1 ~ 45 Hz)后,将参考电极转化为全脑平均。之后,对数据进行分段:每试次的 EEG 数据以射击点为零点截取 4 个长度为 1 s 的子数据段, -3 ~ -2 s 标记为 T1, -2 ~ -1 s 标记为 T2, -1 ~ 0 s 标记为 T3, -6 ~ -5 s (据枪阶段数据)标记为 S1 (基线数据)。最后,将采样率降低到 256 Hz。

借鉴之前的研究^[1-2],对额区、额-中区、中央区、顶区和枕区的脑电信号在 theta (4 ~ 7 Hz)、alpha (8 ~ 13 Hz)、low-beta (14 ~ 22 Hz)、high-beta (23 ~ 35 Hz) 四个频段上进行分析。具体地,脑区左半球电极为 F3、FC5、C3、P3 和 O1;右半球电极为 F4、FC6、C4、P4 和 O4。

预处理后的 EEG 数据使用小波变换提取 4 个频带的子数据,并且采用 augmented Dickey-Fuller (ADF) 测试进行平稳性测试。

1.3.2 因果分析方法 本文采用基于多变量自回归(multivariate regression model, MVAR)模型^[13-14]的 gOPDC 方法计算不同频率分布下的 EEG 脑区之间的连接强度,并提取有效连接的方向信息,详见公

式(1)。

$$\psi_{kl}(n, f) = \frac{1}{\lambda_{kk}^2} \frac{|Real\{A_{kl}(n, f)\}|}{\sqrt{a_l^H(n, f) \sum_{\omega}^{-1} a_l(n, f)}} \cdot \frac{|Im\ ag\{A_{kl}(n, f)\}|}{\sqrt{a_l^H(n, f) \sum_{\omega}^{-1} a_l(n, f)}} \quad k \neq l \quad (1)$$

其中, n 是时间序列长度, f 是频率信息; $\sum_{\omega} = \text{diag}\{\lambda_{kk}^2\}$, ω 是对角协方差矩阵 $\text{diag}\{\lambda_{kk}^2\}$ 的零均值白噪声向量; $a_l(n, f)$ 是 $A(n, f)$ 第 l 列元素, $A_{kl}(n, f)$ 是 $A(n, f)$ 的第 k 行 l 列元素; a_l^H 是向量 a_l 的共轭转置。gOPDC 值 $\psi_{kl}(n, f)$ 的范围为 $0 \sim 1$, 这种计算方式不仅考虑了试次之间的差异, 也消除了志愿者之间的差异^[12]。根据基线数据的 gOPDC 值得到网络连接的阈值为 0.005。本文通过分析 pre-shot 阶段半球内网络属性(时-频分析、因果关系矩阵和全局效率)探讨大脑功能脑区之间的相互作用。

1.3.3 统计分析 对 pre-shot 阶段专家和新手半球内脑网络的全局效率值进行 ANOVA 分析。首先进行球形检验, 如果违反球形假设, 使用 Greenhouse-Geisser 进行自由度校正, 并将 Tukey's HSD 作为事后检验算法 ($P < 0.05$)。

2 结果

2.1 EEGs 因果关系的时-频分析

为量化专家和新手在 pre-shot 阶段半球内各电极之间的连接情况, 计算了频率段 $0.1 \sim 45$ Hz 的 gOPDC 值。由于篇幅的限制, 图 1 只画出临近射击零点的 T3 时间段内, 专家和新手大脑左半球 5 个电极(额区 F3、额-中区 FC5、中央区 C3、顶区 P3 和枕区 O1) 相互连接的时-频信息流图。

图 1a 和 1b 显示了专家和新手都有较强的信息流流向中央区 C3 和顶区 P3, 尤其是连接 $F3 \rightarrow C3$ 、 $P3 \rightarrow C3$ 、 $FC5 \rightarrow P3$ 和 $F3 \rightarrow P3$ 。在这些电极对中专家只在 20 Hz 以下频率带信息流强度较大, 而新手的强信息流体现在更宽的频率范围内。为了更清楚地显示信息流的情况, 图 1c 放大了专家和新手单向连接 $FC5 \rightarrow P3$ 在 $0.1 \sim 45$ Hz 的时-频信息流图。可以看到在前 250 ms 的时间段内, 新手具有强信息流的频率范围要明显大于专家。另外, T1 时间段的信息流计算结果发现专家和新手的信息流主要流入额区; 而 T2 时间段, 信息流开始向中央区和顶区汇聚。在 T1 和 T2 时间段也存在新手的强信息流表现在更宽的频率范围内的情况。

2.2 EEGs 因果关系矩阵

因果关系矩阵可以更直观地对比专家和新手半球内电极之间的相互作用。图 2 显示了 pre-shot 阶段(T1、T2、T3)在 4 个频率带(theta、alpha、low-beta、high-beta)的连接。每个频率带存在的网络连接情况有差异: 在 theta 频段, 新手 T1 和 T2 时间段的信息流主要流入额区和中央区; 而专家在 T2 时间段信息流主要流入中央区和顶区。alpha 和 low-beta 频段, 专家和新手左半球信息流主要流入中央区和顶区, 但右半球没有明显的规律。在 T3 时间段, 新手有信息流流入额区、中央区和顶区, 尤其是在 low-beta 频段流入顶区的信息流较多; 专家的信息流则主要汇入中央区。

值得注意的是, 在 theta、alpha 和 high-beta 频段都可以看到专家和新手大脑左半球的连接数量比右半球少; 还可以看到专家和新手右半球在整个 pre-shot 阶段都出现由额-中区、中央区和顶区组成相互作用的三角形。

2.3 全局效率

图 3 显示步枪射击专家和新手半球内全局效率的平均值。在 theta 频率段, 专家左、右半球在 T2 时间段的全局效率值均显著高于新手。在 alpha 频段, 专家右半球在 T1 和 T2 时间段全局效率值稍微大于新手, 而且呈现增强的趋势。在 low-beta 和 high-beta 频段, 专家大脑右半球的全局效率大于新手, 尤其是在 T1 时间段。值得注意的是在 high-beta 频段, 专家和新手的全局效率平均值均明显大于其他 3 个频率段; 而且专家右半球的全局效率值呈下降趋势, 但是新手基本没有变化。

3 讨论

射击任务需要由视觉、运动等多个感官的神经整合共同完成。本文旨在通过因果分析研究射击 pre-shot 阶段被激活的多个脑区之间的相互作用。研究结果显示, 在 theta 频率段, 专家和新手均有信息流入额区和额-中区, 说明额区皮层-皮层交流的变化可能反映出前额在执行任务过程中的参与程度, 这与其他研究得到的专家射手在 pre-shot 阶段额区的功率值增加情况一致^[15]。在 alpha、low-beta 和 high-beta 频段, 专家和新手汇入中央区和顶区的信息流较多, 这与 Del Percio 等报道的结果相同, 说明 alpha 和 beta 能够反映选择性注意和制定精确的视觉运动^[16]; 这也可能说明顶区与注意再投资有关^[17]。进一步分析发现, 三个时间段, 在不同的频带均出现大脑右半球的额-中区、中央区、顶

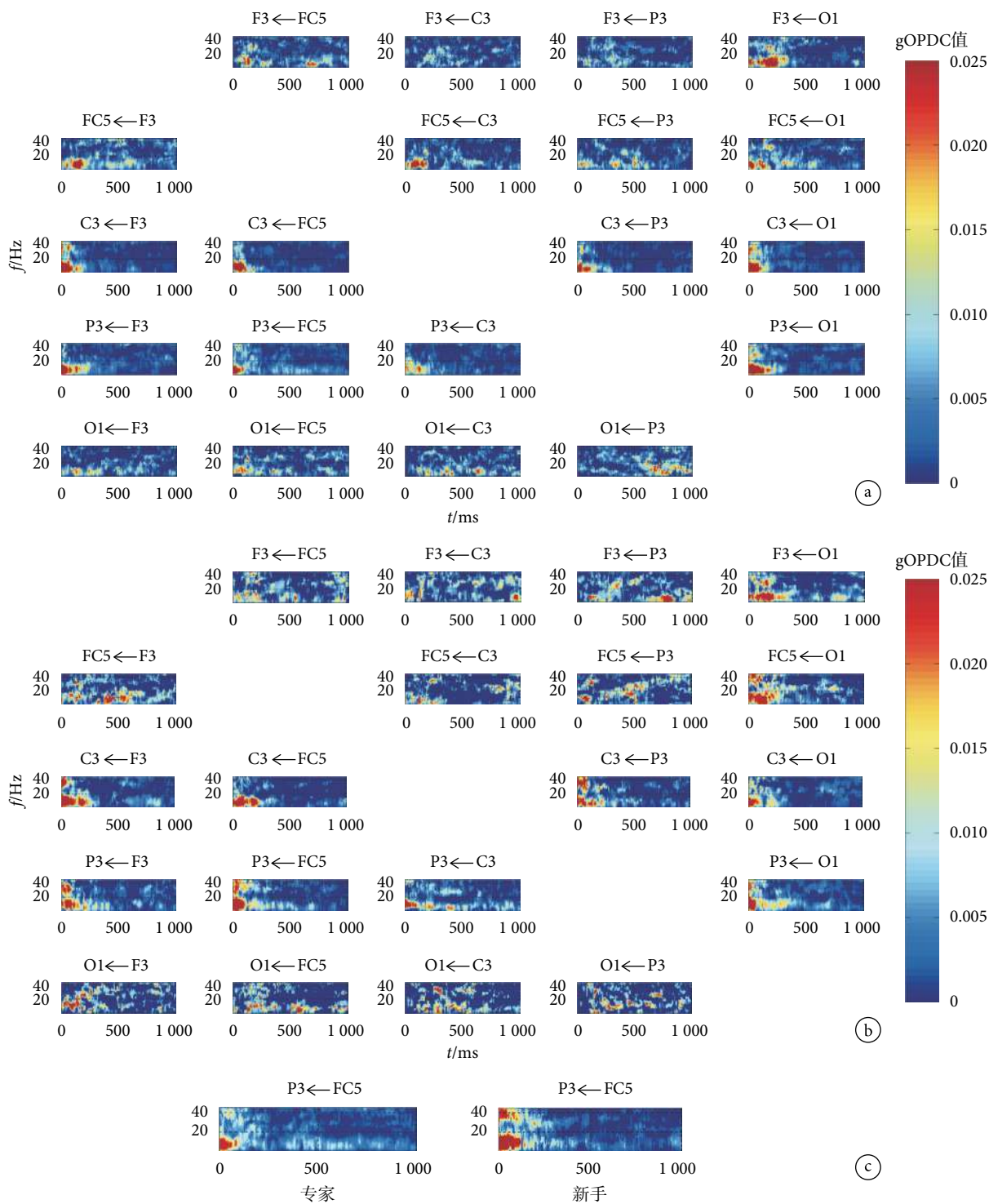


图1 EEG时-频信息流图 a. 专家大脑左半球的额-中央-顶-枕区的gOPDC信息流图; b. 新手大脑左半球的额-中央-顶-枕区的gOPDC信息流图; c. 连接FC5→P3在T3、0.1~45 Hz频段内的的信息流图。图上方箭头表示信息流的方向

Fig.1 EEG time-frequency information flow a. average gOPDC measures for the frontal-central-parietal-occipital regions at the left hemispheres in the experts; b. average gOPDC measures for the frontal-central-parietal-occipital regions at the left hemispheres in the novices; c. the FC5→P3 information flow which the gOPDC measure was averaged during the T3 period within the frequency range of 0.1–45 Hz. The direction of the information flow is presented on top of each map

区组成一个三角形环路的情况,说明在功能网络中存在功能性聚类,在相互联系的大脑区域中进行着特殊的处理。在T2、T3时间段及4~35 Hz频率带,新手大脑网络的连接数量比专家多,而且连接

强度比专家大,说明新手有更多参与信息交互的脑区。专家较少的大脑皮层-皮层之间的交流,符合专家“神经效率”假说的描述,即某些脑区域神经活动较少,是因为拥有特定的技能而使运动变得更

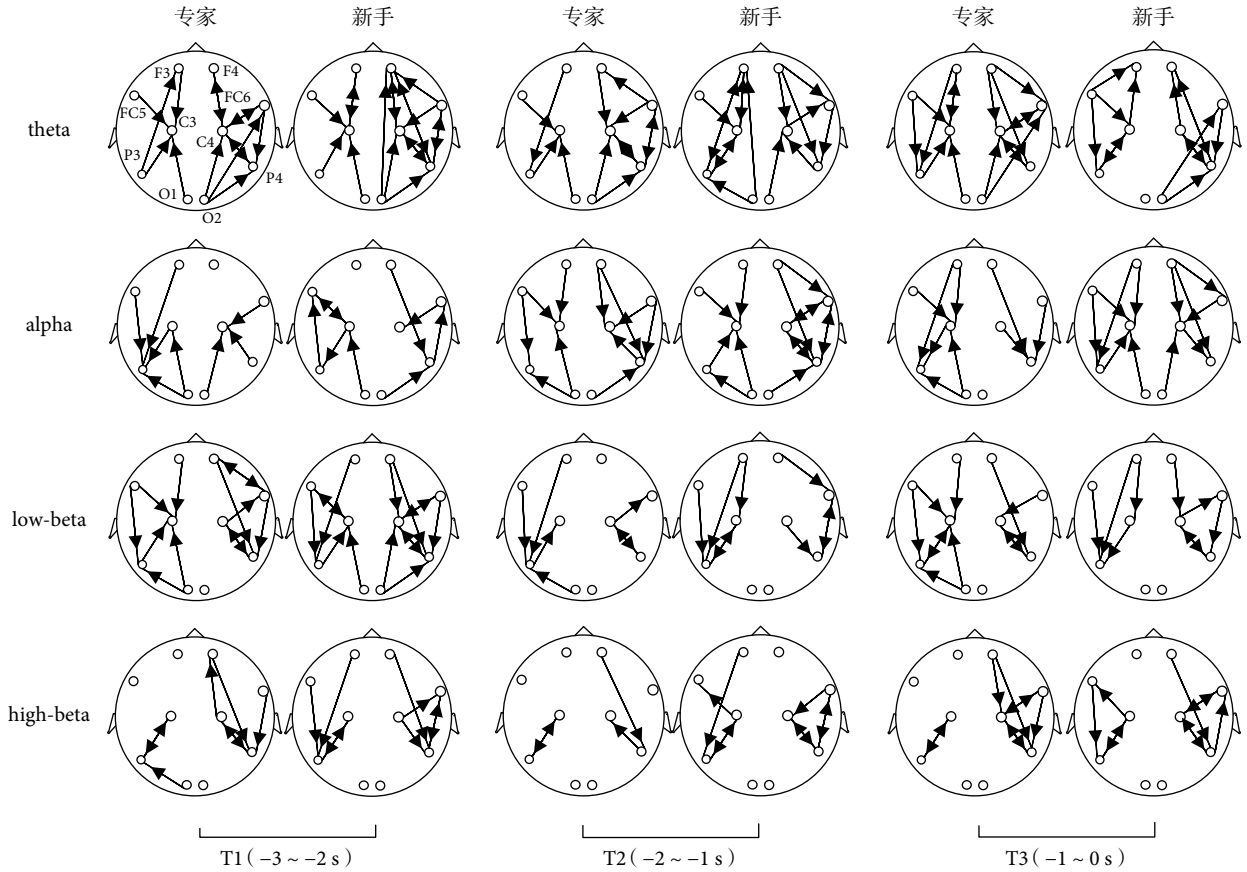


图2 专家和新手的关系连接图

Fig.2 The causality networks in the experts and novices

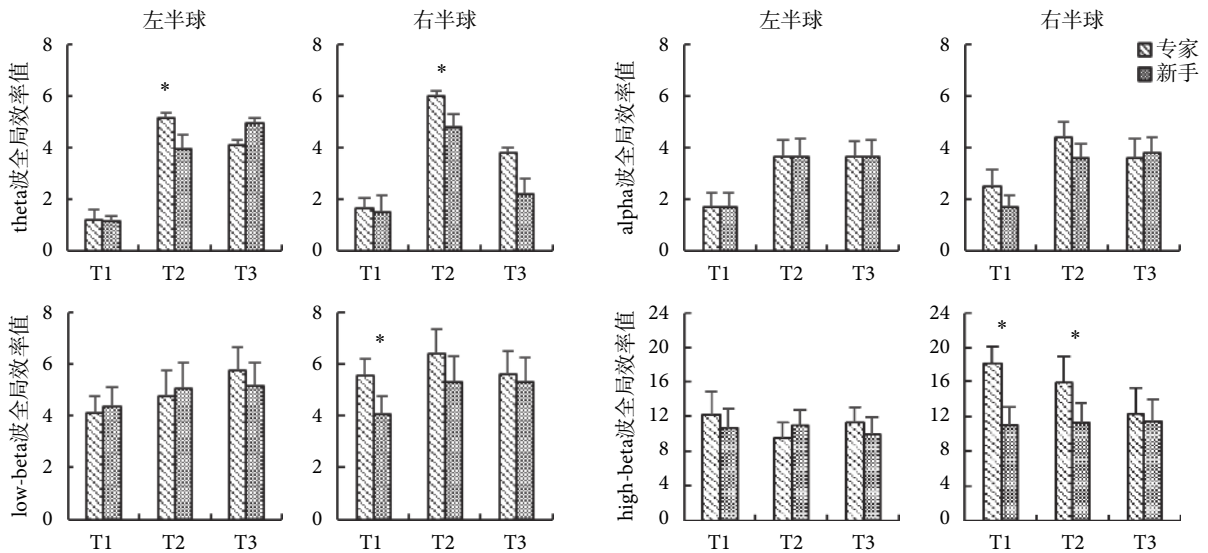


图3 专家和新手在三个时间段、四个频率带的半球内全局效率值 (* $P < 0.05$)

Fig.3 The hemispheric global efficiency in the experts and novices at four frequency bands during three periods (* $P < 0.05$)

加自动化, 控制更少^[18]。

此外, 研究结果还表明在 pre-shot 阶段大脑两个半球的表现不同: 左半球连接数量比右半球少; 左半球信息流动比右半球更有规律性。具体来说, 在 T2、T3 阶段信息流主要汇入左半球的中

央区和顶区, 而右半球的信息流动较分散; 右半球专家和新手的全局效率差异更大。这些表现显示出大脑的侧向化现象。这可能是由于被试者使用右手执行射击任务, 这些神经反应符合解剖生理学中的大脑左半球支配身体右侧运动的原理。

网络全局效率能够度量网络的全局传输能力,也可以衡量信息整合的能力。全局效率越大,说明信息整合能力越强。从结果可以看出专家和新手大脑左半球的全局效率差别不大,可能是由于专家部分脑区的连接强度比新手大但整体连接数较少的原因。但是在右半球,专家的全局效率明显高于新手,说明在射击过程中,虽然左半球起主导作用,但是右半球也起到了协调的作用。特殊地,high-beta 频段的全局效率值要比其他三个频率段的大,而且专家的全局效率比新手的大,说明 high-beta 频段是表现信息整合能力的主要频率段。

4 结论

本文从脑网络的角度分析了步枪射击任务 pre-shot 期间大脑区域之间的相互作用。theta 频段,额区汇入的信息流多,而且强度较大。alpha、low-beta 和 high-beta 频段,中央区 and 顶区较活跃。与专家相比,新手在射击任务 pre-shot 期间大脑皮层网络节点间的连接数量更多、连接强度更大,这些现象表明新手需要更努力地招募更多的资源来完成任务。high-beta 频段的全局效率值比其他频段的值明显增大,说明 high-beta 频段是主要参与步枪射击相关的信息整合的频段;与新手相比专家的全局效率值更大,说明专家大脑的信息整合能力更强。这些验证了步枪射击任务符合“神经效率”假说。将来的工作可以在以下 3 个方面继续进行:① 分析半球间的网络连接情况;② 功能聚类进行统计学分析;③ 设计训练方案,增强射击新手的神经通道的连接,缩短连接长度。

参考文献

- 1 Kerick S E, Douglass L, Hatfield B. Cerebral cortical adaptations associated with visuomotor practice. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2004, 36(1): 118-129.
- 2 Haufler A J, Spalding T W, Santa Maria D L, *et al.* Neuro-cognitive activity during a self-paced visuospatial task: comparative EEG profiles in marksmen and novice shooters. *Biol Psychol*, 2000, 53(2/3): 131-160.
- 3 Hatfield B D, Haufler A J, Hung T M, *et al.* Electroencephalographic studies of skilled psychomotor performance. *J Clin Neurophysiol*, 2004, 21(3): 144-156.
- 4 Kerick S E, McDowell K, Hung T M, *et al.* The role of the left temporal region under the cognitive motor demands of shooting in skilled marksmen. *Biol Psychol*, 2001, 58(3): 263-277.
- 5 Doppelmayr M, Finkenzeller T, Sauseng P. Frontal midline theta in the pre-shot phase of rifle shooting: differences between experts and novices. *Neuropsychologia*, 2008, 46(5): 1463-1467.
- 6 Schneider W, Shiffrin R M. Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search and attention. *Psychological Reviews*, 1977, 84: 1-66.
- 7 Babiloni C, Marzano N, Infarinato F, *et al.* "Neural efficiency" of experts' brain during judgment of actions: a high-resolution EEG study in elite and amateur karate athletes. *Behav Brain Res*, 2010, 207(2): 466-475.
- 8 Deeny S P, Haufler A J, Saffer M, *et al.* Electroencephalographic coherence during visuomotor performance: a comparison of cortico-cortical communication in experts and novices. *J Mot Behav*, 2009, 41(2): 106-116.
- 9 Del Percio C, Lacoboni M, Lizio R, *et al.* Functional coupling of parietal α rhythms is enhanced in athletes before visuomotor performance: a coherence electroencephalographic study. *Neuroscience*, 2011, 175: 198-211.
- 10 Gentili R J, Bradberry T J, Oh H, *et al.* Evolution of cerebral cortico-cortical communication during visuomotor adaptation to a cognitive-motor executive challenge. *Biol Psychol*, 2015, 105: 51-65.
- 11 Lehto M R, Landry S J. *Introduction to human factors and ergonomics for engineers*. 2nd ed. Boca Raton: Crc Press, 2012.
- 12 Omidvarnia A, Azemi G, Boashash B, *et al.* Measuring time-varying information flow in scalp EEG signals: orthogonalized partial directed coherence. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2014, 61(3): 680-693.
- 13 Ding M, Chen Y, Bressler S L. Granger causality: basic theory and application to neuroscience. *Quantitative Biology*, 2006: 826-831.
- 14 Granger C W. *Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods*. Essays in econometrics. Cambridge: Harvard University Press, 2001: 31-47.
- 15 Baumeister J, Reinecke K, Liesen H, *et al.* Cortical activity of skilled performance in a complex sports related motor-task. *European Journal of Applied Physiology*, 2008, 104: 625-631.
- 16 Del Percio C, Babiloni C, Bertollo M, *et al.* Visuo-attentional and sensorimotor alpha rhythms are related to visuo-motor performance in athletes. *Hum Brain Mapp*, 2009, 30(11): 3527-3540.
- 17 Masters R, Maxwell J. The theory of reinvestment. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 2008, 1: 160-183.
- 18 Callan D E, Naito E. Neural processes distinguishing elite from expert and novice athletes. *Cogn Behav Neurol*, 2014, 27(4): 183-188.

收稿日期: 2017-05-26 修回日期: 2018-04-22

本文编辑: 李蓓兰