

事件相关电位技术在人脑注意网络研究中的应用进展

王铄辰 陈奥博 曹成龙 马生辉 冯 煜 宋 健

【关键词】 认知功能;注意功能;注意网络;事件相关电位技术  
【文章编号】 1009-153X(2021)12-0959-05 【文献标志码】 A 【中国图书资料分类号】 R 651

认知功能是大脑的高级功能之一,与病人的预后、生活质量息息相关,近年来逐渐受到临床的关注。注意功能作为高级认知功能的重要组成部分,在神经影像技术的日益发展下,注意功能的研究不断取得进展,并逐步转到认知行为潜在神经机制和神经解剖的研究。在传统注意研究的基础上,Posner 和 Petersen<sup>[1]</sup>首次提出将选择性注意系统依据功能和解剖定位差异分类,并逐步形成了著名的注意网络学说。在该学说的基础上,众多学者将不同范式与多模态技术融合,验证并扩充了注意网络理论<sup>[2-7]</sup>。事件相关电位(event-related potentials,ERP)技术是在常规脑电图的基础上结合诱发特定认知事件的相关影响,通过刺激呈现系统与被试进行交互,从而得到特定认知刺激诱发的脑电波形的技术。其毫秒级的时间分辨率使神经科学家发现了众多认知领域的神经处理机制,为揭示大脑高级神经活动提供了有力且确凿的证据。因此,本文将以注意网络相关理论为基础,以高时间分辨率的ERP技术为手段,对已有的注意网络相关研究进行综述。

1 注意网络的理论基础

1.1 注意网络学说的基础 随着对认知神经科学研究的不断深入,研究人员发现注意是多脑区协同运作处理的结果,构成了复杂多变的脑网络交互模式。学者们从大量的实验结果中将注意网络分为背侧注意网络(dorsal attention network,DAN)以及腹侧注意网络(ventral attention network,VAN)<sup>[8,9]</sup>。DAN

与“自上而下”调控的自主性注意相关,反映了以目标为导向的注意信号的来源,一般涉及额叶视区、辅助视区、顶内沟、顶上小叶以及楔前叶。VAN通常与“自下而上”调控显著的、无法预测的或新奇刺激有关,相关脑区多数偏向右侧大脑半球,其中包括颞顶联合、额下回及额中回。DAN和VAN相互协作,使注意能够集中在行为相关信息上,并随时对感兴趣目标进行重新定向。

注意网络学说将选择性注意系统分解为三个在解剖和功能上相互独立的子网络:警觉网络、定向网络和执行控制网络。

警觉网络通常描述为与觉醒和警觉相关的,对即将到来信息保持高度的敏感并随时做出行动的状态。神经影像学研究表明警觉网络多与蓝斑、顶叶及右侧额叶等去甲肾上腺素相关的区域有关。

定向网络为从众多的感觉输入信号中挑选信息并转移注意,例如注意的脱离与重新投入。该网络在解剖上通常与额叶视区、上丘、颞顶联合、丘脑枕及顶上皮质,与胆碱能系统相关。

执行控制网络为监测和解决在思想、情感、反应上冲突的能力,通常涉及对较弱的感兴趣目标的凸显以及对周边较强无关目标的抑制。该网络通常定位于前扣带回、岛叶前部、基底节区以及腹侧前额叶皮质等区域,并与多巴胺系统有关。

1.2 注意网络的相关范式 与注意网络学说相对应,Fan等<sup>[10]</sup>设计了能够将三个注意网络一次性分离的实验范式,即注意网络测试(attention network test,ANT),将提示监测与Flanker执行控制范式相结合,主要由无提示、双侧提示、中央提示和空间提示四类提示刺激,以及一致和不一致两类目标刺激构成。被试需要对提示后的目标刺激进行按键反应,进而可以对目标刺激反应的行为学数据(如反应时间及正确率)进行分析,间接评价各个注意网络的效能。除此之外,ANT范式也逐渐与多模态技术融合,通过

doi:10.13798/j.issn.1009-153X.2021.12.022  
作者单位:510515 广州,南方医科大学第一临床医学院(王铄辰、陈奥博、曹成龙);430070 武汉,中国人民解放军中部战区总医院神经外科(王铄辰、陈奥博、曹成龙、马生辉、冯煜、宋健);430065 武汉,武汉科技大学医学院(马生辉、冯煜)  
通讯作者:宋健,E-mail:docsongjian@yahoo.com

脑电图、功能磁共振等高时间和空间分辨率的技术深入分析注意网络。有学者在 ANT 范式的基础上,延伸出了改良版 ANT (attention network test-revised, ANT-R), 间接检测各网络之间的相互作用<sup>[5, 10]</sup>。与传统 ANT 范式相比, ANT-R 范式具有以下优势: ①提示目标间隔多变, 可研究定向时间和回返抑制等指标; ②引入空间提示的有效性, 可深度剖析定向过程的不同阶段; ③在 Flanker 冲突的基础上引入位置冲突, 但具体作用存在争议。需要注意的是, 基于 ANT-R 范式的脑电信号研究证据尚不充足, 可能与不同情况下对应的试次数量过少, 难以得到稳定的平均 ERP 波形有关。

除此之外, 有学者以 ANT 为基础设计出许多修改版范式: 如专注于测试发育儿童注意网络的儿童版 ANT 范式; 探讨大脑处理不同注意刺激时不对称性的偏侧化 ANT 范式等等。但这些范式均是 ANT 范式的应用拓展, 故本文主要介绍 ANT 范式的相关 ERP 分析方法与指标。

## 2 ANT 范式的常用分析方法与指标

**2.1 行为学分析** 通过对被试的行为学数据的分析, 如反应时和(或)正确率, 间接地反映各种提示条件对目标处理的贡献, 从而分离出各个提示条件的信号处理程度, 一定程度上量化被试者的注意网络子成分。该方法被广泛应用于任务相关的认知功能评估, 以注意网络为例, 其分析过程依赖于注意网络各子网络的行为学定义。以下将以反应时 (reaction-time, RT) 为例简要介绍 ANT 范式及 ANT-R 范式的相关行为学定义及其意义。

警戒效应=无提示 RT-双侧提示 RT: 两者相比, 增加了时间上的警醒效应, 因此两者对 RT 的贡献相减, 可以得到警戒网络效应。

定向效应=中央提示 RT-空间提示 RT: 两者相比多了对目标刺激的有效预测, 故两者对 RT 贡献之差可以得到定向网络效应。

冲突效应=不一致刺激 RT-一致刺激 RT: 与指向完全一致的刺激相比, 指向不一致时需要额外的执行控制进行冲突监测及冲突解决。因此两者对 RT 贡献之差可以得到执行控制网络效应。

ANT-R 范式在原有基础上增添了空间提示有效性、网络间相互作用等重要内容:

有效性效应=无效空间提示 RT-有效空间提示 RT: 即揭示提示是否有效对 RT 的贡献程度。该效应等同于对目标的脱离及重新定向。

位置冲突效应=位置不一致 RT-位置一致 RT: 位置不一致即中心靶刺激方向与目标刺激相对于中心十字出现的位置不一致。但该效应实际贡献与假设相左, 具体特性仍需要更多的实验进行论证。

相互作用: 通常可以解释为一种网络效应对某种目标冲突效应的影响, 如警戒效应提高了总体反应速度, 但在某些条件下却抑制了执行控制效应, 原因可能是有限注意资源的竞争效应。

## 2.2 时域分析

**2.2.1 提示刺激相关 ERP 成分** N1 为出现在刺激呈现后 150~250 ms 的标志性成分, 为分析警戒和定向网络最常用的 ERP 成分之一, 通常在偏后侧的电极上出现, 为视觉注意早期的 ERP 成分<sup>[11]</sup>。警戒增强 N1 主要分布在顶叶区域, 而定向增强 N1 主要分布在枕叶和顶枕区域<sup>[12]</sup>。后部 N1 成分通常反映注意对目标刺激处理的早期促进作用, 主要由有效空间线索提示来实现<sup>[13]</sup>。在 LANT 范式下, Hill-Jarrett 等<sup>[14]</sup>发现颅脑损伤 (traumatic brain injury, TBI) 病人在警觉效应下 N1 振幅的半球间差异减小, 右侧半球 N1 振幅显著下降, 一定程度上反映闭合性 TBI 对注意脑网络的影响。

P1 与 N1 类似, 为出现在刺激后 150~250 ms 的 ERP 成分。神经影像学证实, P1 早期成分通常起源于背侧纹状皮质, 而晚期成分产生于梭状回的腹侧部分。P1 对刺激参数敏感, 且会受到选择性注意和受试者觉醒状态的调控<sup>[15]</sup>。该成分和 N1 相似, 通常反映对刺激特性的早期视觉处理, 并可在注意高度集中时, 即注意位置和刺激呈现位置重合时达到增强<sup>[11]</sup>。

关联性复变 (contingent negativ evariation, CNV) 为出现在警戒提示刺激和目标刺激之间间隔的负向慢波, 在沿中线走行的额叶内侧区域达到峰值<sup>[15, 16]</sup>。目前认为 CNV 起源于广泛的皮质及皮质下区域, 包括前额叶皮质、前扣带回、基底节区及辅助运动区。当提示-目标间隔拉长至数秒时, 可将 CNV 区分为前后两个部分, 前部波形表示对提示信号的定向反应, 后部波形反映了运动反应的准备。总而言之, 更大的 CNV 振幅体现了对目标信息更快的反应<sup>[11]</sup>。

除上述常用 ERP 成分外, 在提示-目标刺激间隔内可能会出现一些与定向网络相关的 ERP 成分<sup>[17, 18]</sup>: ①早期定向负波, 为出现在提示刺激后 200~400 ms 的负波, 多出现在提示线索方向的对侧半球的顶叶区域, 反映对提示刺激含义的识别, 以及诱发注意力的定向转移; ②前向定向负波, 为出现在提示刺激



后 300~500 ms 的负波,在头部的前侧和后侧均有分布,通常反映与调控视觉空间注意相关的额叶区域的激活;晚期定向正波,广泛分布在提示方向的对侧半球,与负向慢波重叠在一起,反映了视觉感觉区域活动的偏向性,由跨模式的定向注意处理驱动。

**2.2.2 目标刺激相关 ERP 成分** N2 为出现在目标刺激后,峰值在 250~300ms,额叶中心电极区域分布的 ERP 成分<sup>[16,19]</sup>。冲突监测理论认为 N2 起源于前扣带回,主要负责冲突监测时资源的募集,以便对相应刺激进行评估。而近期有理论认为,N2 成分更多地反映对输出信号的有效评估,而非冲突监测功能<sup>[11]</sup>。最近研究表明,相对于正常对照组,垂体腺瘤病人手术前后均表现出 N2 成分幅值的降低,提示异常升高的激素水平可能是引起垂体腺瘤病人抑制控制及冲突检测能力降低的主要因素<sup>[20]</sup>。因此,N2 成分具体的神经心理学含义仍需进一步探索。

P3(P300)为呈现在相关刺激后,峰值在 250~500 ms,起源于前扣带回等区域,并沿中线区域电极记录到的 ERP 成分,是研究执行控制网络及认知控制最重要且最广泛应用的 ERP 成分之一<sup>[21]</sup>。P3 可以依据诱发的刺激类型分为提示刺激相关 P3(cue-P3)和目标刺激相关 P3(target-P3)。

针对 cue-P3 的研究较少,目前认为该成分反映将隐性注意定向到可能出现目标刺激位置的过程。在注意缺陷多动障碍(attention deficit hyperactive disorder, ADHD)的 ERP 研究中,cue-P3 振幅的减小被解释为注意网络定向功能受损或相关脑区活动的重新分配,从而达到一种能量上“次优”的稳定状态<sup>[16]</sup>。

更多的研究关注 target-P3 的特征,即呈现在目标刺激后的 ERP 成分。研究认为 P3 至少包含两个子成分<sup>[21,22]</sup>,即 P3a(分布于广泛的额叶区域,表现为对新奇刺激的监测)和 P3b(分布于颞中回及顶叶区域,与刺激信号的评估,更新背景信息及相关记忆存储有关)。一般认为,P3 潜伏期增加反映对目标刺激评估投入更多的时间。而 P3 振幅的改变有着多重含义:一则反映执行控制网络反应抑制处理时的皮质活动,用来描述被试执行控制/反应抑制状态的标志性成分;二则反映注意资源分配的改变<sup>[22,23]</sup>。值得注意的是,在冥想对注意认知改善作用的研究中,集中及分散性冥想状态下反而诱发出更大的 P3 波形,同样可以用注意资源分配理论来解释<sup>[24]</sup>。因此,P3 成分在不同范式、不同认知领域的解释上有着细微的差别,其综合详尽的意义有待进一步探索。

**2.3 脑电信号时频分析** 脑电图振荡的呈现是大脑区域之间信息传递的基本形式,且主要通过同步、去同步的频率变化来描述。在 ERP 信号的描述中,发生在特定频段脑电信号活动的改变,包含特定节律下幅度或功率的增大或减小。前者称为事件相关同步化(event-related synchronization, ERS),而后者则称为事件相关去同步化(event-related desynchronization, ERD)<sup>[25]</sup>。通常认为该现象是潜在相关神经元集群的电活动同步性增加或减少引起的。事实上,脑电信号是高度非稳态的,其统计特性和频谱密度会随时间变化。因此,对信号的 ERS/ERD 进行分析时,需要使用时频分析提供信号功率在时间-频率域上的联合时频分布。常用的时频分析技术包括短时傅里叶变换、连续小波变换等。研究表明,包括轻型颅脑损伤在内的多种神经、精神疾病都会在特定认知任务所诱发的脑电活动中表现出一定的 ERD 现象<sup>[26]</sup>。

Fan 等<sup>[2]</sup>对健康被试的 ANT 任务脑电信号进行时频分析,得出不同网络间不同频段下复杂的激活模式:①警觉网络,表现为警戒提示后 200~450 ms, theta、alpha、beta 频段的 ERD 改变,可能反映相关脑区对广泛视觉刺激的处理而非单纯警觉信号的处理,可能也反映包括去甲肾上腺素系统在内的丘脑-皮质循环通路的参与;②定向网络,表现为空间提示后 200 ms 左右 gamma 频段的 ERS,且 gamma 频段活动的增强一般出现在梭状回、右侧顶上小叶以及与定向相关的区域;③执行控制网络。执行控制的激活模式较为复杂:①针对目标刺激,早期表现为 gamma 频段的 ERS,而晚期表现为 beta 和 gamma 频段的 ERD;②针对被试者的反应时间,反应前表现为所有频段的 ERD,而反应后表现为所有频段的 ERS,其中早期额叶中部导联 gamma 频段的增强可能与前扣带回执行的整合处理有关。

研究表明,特定频段的振荡往往和广泛的认知功能相关联。在 Go/Nogo 范式中,theta 和 alpha 频带的神经活动通常与认知控制相关。同时,与执行控制相关的 theta 振荡活动也常被用来分析临床疾病与认知功能之间的关系。Cao 等<sup>[27]</sup>对 P300 及 N2 等时域信息分析的基础上,进一步通过时频分析探讨垂体腺瘤病人在执行 Go/Nogo 任务时神经振荡与反应执行和抑制之间的关系,与健康对照组相比,垂体腺瘤病人在 Go 和 Nogo 条件下均表现出更低的额叶 theta 功率,提示整体反应控制能力降低。

此外,ADHD 病人通常呈现出 theta 频带功率的

绝对增高以及 beta 频带功率的部分下降。使用 theta/beta 功率比值(theta/beta ratio, TBR)作为区分 ADHD 和正常发育儿童的筛查手段,具有一定的稳定性<sup>[28]</sup>,也具有较高的敏感度和特异度<sup>[29]</sup>。除此之外,注意条件下 alpha 节律的调制被认为是 ADHD 的潜在生物标志物<sup>[30]</sup>。因此,神经振荡分析在研究认知功能方面有着极其重要的作用,并为临床诊断提供了更多有价值的理论基础。

2.4 连通性分析 脑电图的高时间分辨率特性,使其在研究空间距离较远的脑区脑电信号的统计学依赖性,即时域的耦合性或依赖性上具有一定优势,弥补了空间分辨率的同时也拓宽了连通性分析的应用范围。连通性分析可分成两类:功能性连接和效应性连接,前者可以衡量信号间的统计学依赖关系,而后者可以进一步衡量信号之间的因果关系。主要指标包括基于相干性、相位同步、广义同步及格兰杰因果的指标。临床上,应用连通性分析能够在脑区激活以及脑区间功能性连接程度层面,更好地分析某些神经或精神疾病对高级认知功能的影响,以及判断不同治疗性干预对认知恢复的效果。Debnath 等<sup>[31]</sup>引入不同数据处理方法,并将 alpha 频段细化,证实了 ADHD 病人在静息态下的不同功率变化和连接模式,同时也揭示了连接程度和 ADHD 症状评分间的负性关系。此外, Li 等<sup>[32]</sup>分析颞叶癫痫病人在执行控制任务下的脑电信号时发现,相比于健康对照组,颞叶癫痫病人在执行控制任务下表现出更低的 theta 功率谱密度,且 Fz 电极与广泛额叶电极之间的功能连接程度下降,表现为执行控制能力下降,提示颞叶在执行控制网络中的重要作用。但目前,连通性分析在基于 ANT 范式的脑电信号处理中仍然少见,可部分归因于各注意网络之间的相互独立性,以及脑电有限的空间分辨率。

综上所述,ERP 技术为揭示脑区对注意信号的处理提供了重要依据:①时域分析客观地细化了处理进程并量化了效能及时间进程,但同一 ERP 成分可能在不同范式中存在不同的意义;②时频域的结合在脑区激活层面观察不同条件对注意激活的影响,具体指标分析时,应考虑数据分析方法和对频段的细化,复杂模式的解释应依赖更多的实验证据;③基于 ERP 的连通性分析可提示远程网络的连接变化,对注意网络的丰富及构建具有重要参考意义。

认知神经科学发展与临床疾病诊治相辅相成:临床应重视疾病对病人注意或认知的影响,早期完成认知筛查及多方位评估,更有助于注意等认知功

能障碍的早期识别及及时干预。与此同时,对疾病信息的深度挖掘也为多方面认知神经机制理论的构建提供了宝贵的灵感和研究方向。我们近期研究发现,在多技术手段评估下垂体腺瘤病人手术前后多认知领域存在不同程度的功能障碍<sup>[20,27,33-37]</sup>。相关研究结果在认知神经科学的基础上为垂体腺瘤病人临床评估诊治和预后相关风险规避提供重要的理论基础,同时也为相关认知理论的完善提供了重要资源。

【参考文献】

[1] Posner MI, Petersen SE. The attention system of the human brain [J]. Annu Rev Neurosci, 1990, 13: 25-42.

[2] Fan J, Byrne J, Worden MS, *et al.* The relation of brain oscillations to attentional networks [J]. J Neurosci, 2007, 27 (23): 6197-6206.

[3] Fan J, McCandliss BD, Fossella J, *et al.* The activation of attentional networks [J]. Neuroimage, 2005, 26(2): 471-479.

[4] Fan J, McCandliss BD, Sommer T, *et al.* Testing the efficiency and independence of attentional networks [J]. J Cogn Neurosci, 2002, 14(3): 340-347.

[5] Fan J, Gu XS, Guise KG, *et al.* Testing the behavioral interaction and integration of attentional networks [J]. Brain Cogn, 2009, 70(2): 209-220.

[6] Petersen SE, Posner MI. The attention system of the human brain: 20 years after [J]. Annu Rev Neurosci, 2012, 35: 73-89.

[7] Posner MI, Rothbart MK, Ghassemzadeh H. Restoring attention networks [J]. Yale J Biol Med, 2019, 92(1): 139-143.

[8] Gazzaniga M, Ivry R, Mangun G. Cognitive Neuroscience: The Biology of the Mind (fifth edition) [M]. New York: W. W. Norton & Company. 2018.

[9] Vossel S, Geng JJ, Fink GR. Dorsal and ventral attention systems: distinct neural circuits but collaborative roles [J]. Neuroscientist, 2014, 20(2): 150-159.

[10] Xuan B, Mackie MA, Spagna A, *et al.* The activation of interactive attentional networks [J]. Neuroimage, 2016, 129: 308-319.

[11] Williams RS, Biel AL, Wegier P, *et al.* Age differences in the attention network test: evidence from behavior and event-related potentials [J]. Brain Cogn, 2016, 102: 65-79.

[12] Neuhaus AH, Urbanek C, Opgen-Rhein C, *et al.* Event-related potentials associated with attention network test [J]. Int J Psychophysiol, 2010, 76(2): 72-79.

- [13] Kaufman DA, Sozda CN, Dotson VM, *et al.* An event-related potential investigation of the effects of age on alerting, orienting, and executive function [J]. *Front Aging Neurosci*, 2016, 8: 99.
- [14] Hill-Jarrett TG, Gravano JT, Sozda CN, *et al.* Visuospatial attention after traumatic brain injury: the role of hemispheric specialization [J]. *Brain Inj*, 2015, 29(13-14): 1617-1629.
- [15] Luck ST. An Introduction to The Event-Related Potential Technique [M]. 2nd Edition. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press. 2014.
- [16] Kratz O, Studer P, Malcherek S, *et al.* Attentional processes in children with ADHD: an event-related potential study using the attention network test [J]. *Int J Psychophysiol*, 2011, 81(2): 82-90.
- [17] Harter MR, Miller SL, Price NJ, *et al.* Neural processes involved in directing attention [J]. *J Cogn Neurosci*, 1989, 1(3): 223-237.
- [18] Talsma D, Slagter HA, Nieuwenhuis S, *et al.* The orienting of visuospatial attention: an event-related brain potential study [J]. *Brain Res Cogn Brain Res*, 2005, 25(1): 117-129.
- [19] Groom MJ, Cragg L. Differential modulation of the N2 and P3 event-related potentials by response conflict and inhibition [J]. *Brain Cogn*, 2015, 97: 1-9.
- [20] Cao C, Song J, Lin P, *et al.* A longitudinal, prospective study to evaluate the effects of treatment on the inhibitory control function after transsphenoidal surgery for pituitary adenomas [J]. *Clin EEG Neurosci*, 2021, 52(6): 444-454.
- [21] Polich J. Clinical application of the P300 event-related brain potential [J]. *Phys Med Rehabil Clin N Am*, 2004, 15(1): 133-161.
- [22] Polich J. Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b [J]. *Clin Neurophysiol*, 2007, 118(10): 2128-2148.
- [23] Savostyanov A, Tamozhnikov S, Bocharov A, *et al.* The effect of meditation on comprehension of statements about one-self and others: a pilot ERP and behavioral study [J]. *Front Hum Neurosci*, 2019, 13: 437.
- [24] Telles S, Singh D, Naveen KV, *et al.* P300 and heart rate variability recorded simultaneously in meditation [J]. *Clin EEG Neurosci*, 2019, 50(3): 161-171.
- [25] Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles [J]. *Clin Neurophysiol*, 1999, 110(11): 1842-1857.
- [26] Zhao WX, Wu RH, Wang SH, *et al.* Behavioral and neurophysiological abnormalities during cued continuous performance tasks in patients with mild traumatic brain injury [J]. *Brain Behav*, 2018, 8(5): e00966.
- [27] Cao C, Wen W, Liu B, *et al.* Theta oscillations in prolactinomas: neurocognitive deficits in executive controls [J]. *Neuroimage Clin*, 2020, 28: 102455.
- [28] Lubar JF. Discourse on the development of EEG diagnostics and biofeedback for attention-deficit/hyperactivity disorders [J]. *Biofeedback Self Regul*, 1991, 16(3): 201-225.
- [29] Arns M, Conners CK, Kraemer HC. A decade of EEG theta/beta ratio research in ADHD: a meta-analysis [J]. *J Atten Disord*, 2013, 17(5): 374-383.
- [30] Deiber MP, Hasler R, Colin J, *et al.* Linking alpha oscillations, attention and inhibitory control in adult ADHD with EEG neurofeedback [J]. *Neuroimage Clin*, 2020, 25: 102145.
- [31] Debnath R, Miller NV, Morales S, *et al.* Investigating brain electrical activity and functional connectivity in adolescents with clinically elevated levels of ADHD symptoms in alpha frequency band [J]. *Brain Res*, 2021, 1750: 147142.
- [32] Li X, Hou Y, Ren Y, *et al.* Alterations of theta oscillation in executive control in temporal lobe epilepsy patients [J]. *Epilepsy Res*, 2018, 140: 148-154.
- [33] Cao C, Huang Y, Chen A, *et al.* Improvement in attention processing after surgical treatment in functional pituitary adenomas: evidence from ERP study [J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 656255.
- [34] Cao C, Song J, Yao S, *et al.* The dysfunction of inhibition control in pituitary patients: evidence from the Go/Nogo event-related potential study [J]. *Neuroreport*, 2017, 28(5): 272-278.
- [35] Cao C, Wang Y, Liu J, *et al.* Altered connectivity of the frontoparietal network during attention processing in prolactinomas [J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 638851.
- [36] Song J, Cao C, Wang Y, *et al.* Response activation and inhibition in patients with prolactinomas: an electrophysiological study [J]. *Front Hum Neurosci*, 2020, 14: 170.
- [37] Song J, Cao C, Yang M, *et al.* The dysfunction of processing task-irrelevant emotional faces in pituitary patients: an evidence from expression-related visual mismatch negativity [J]. *Neuroreport*, 2018, 29(4): 328-333.

(2021-09-13 收稿, 2021-11-11 修回)