

错误相关电位的任务诱导模式及其在神经系统疾病中的应用进展

贾美雪, 随力, 王爱莉, 陈紫扬

上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093

【摘要】错误相关电位(ErrP)是脑在错误事件后出现的特定脑电位改变,隶属于事件相关电位。本研究就ErrP的任务诱导模式和其在神经系统疾病中的应用进行归纳总结,首先阐述错误相关负波、错误正波和反馈相关负波这3种ErrP成分的神经来源及其在错误加工中的意义,然后总结当前主要的ErrP任务诱导模式,其次介绍了ErrP在神经系统疾病中的应用,最后对ErrP未来的研究方向和应用趋势作出展望。

【关键词】错误相关电位;事件相关电位;错误相关负波;错误正波;反馈相关负波;综述

【中图分类号】R318;R741

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)10-1316-05

Task induction patterns of error-related potential and its applications in neurological diseases

JIA Meixue, SUI Li, WANG Aili, CHEN Ziyang

School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Error-related potential (ErrP) is specific EEG potential changes that occur in the human brain following error events and is part of event-related potentials (ERP). Herein the task induction patterns of ErrP and its applications in neurological diseases are overviewed. The study firstly makes an elaboration on the neural origins of error-related negativity, error positivity and feedback-related negativity of ErrP and their significance in error processing, then summarizes the current main task induction patterns of ErrP and introduces its practical applications in neurological diseases, and finally gives an outlook on the future research and application of ErrP.

Keywords: error-related potential; event-related potential; error-related negativity; error positivity; feedback-related negativity; review

前言

大脑能利用错误信息来不断监测、评估并调整自身行为以适应环境变化,错误信息加工过程在人类行为选择和认知控制中起着十分重要的作用。在犯错误情形下,脑内侧额叶区会出现一个负电位,这一特定的事件相关电位(Event-Related Potential, ERP)最早被命名为错误相关负波(Error-Related Negativity, ERN)^[1-2],随着研究的深入,与脑部错误信息加工相关的另外两个ERP成分,即错误正波(Error Positivity, Pe)^[2]和反馈相关负波(Feedback-Related

Negativity, FRN)^[3]也逐一被发现。目前,ERN(也称为错误负波,Error Negativity, Ne)、Pe和FRN(也称为反馈错误相关负波,feedback ERN, fERN)统称为错误相关电位(Error-Related Potentials, ErrP)。ErrP的研究对揭示脑对错误信息加工过程所起作用和执行错误监测功能十分重要,ErrP可以通过采用一些任务模式诱导产生,且ErrP在神经系统疾病筛查、辅助诊断及治疗/预后评估方面都有较广泛的应用。本研究就近年来ErrP这3种成分之间的关系、任务诱导模式和ErrP在医学方面的应用进展进行归纳和总结。

1 ErrP的3种成分

脑的错误处理过程涉及多个脑功能区的协同工作,这一过程决定ErrP并非单一成分,已有研究显示ErrP含有3种成分,即ERN、Pe、FRN,这3种成分的神经起源、特征、意义及之间的关系一直是ErrP研究的重点之一。

已有的动物和人类实验研究表明ERN起源于脑

【收稿日期】2023-05-06

【基金项目】上海理工大学科技发展项目(2019KJFZ239, 2020KJFZ232)

【作者简介】贾美雪,硕士研究生,研究方向:生物医学工程, E-mail: meixue991129@163.com

【通信作者】随力,教授,研究方向:神经工程, E-mail: lsui@usst.edu.cn

内侧额叶皮层的前扣带回(Anterior Cingulate Cortex, ACC)。实验动物在反应任务中出错时,前扣带沟中的错误识别单元会被激活,ACC区域可以检测到ErrP;人类被试参与的反向扫视任务中,被试如出现扫视方向错误时可产生较大的ERN波形,当两个或两个以上不相容反应同时被激活时,ACC被高度激活^[4,6]。目前公认ACC的激活与错误发生有关,ACC参与了在线监测错误或解决反应冲突,其通过检测错误来监测行为。尽管大量的研究表明ERN可定位于ACC,然而,有研究表明错误监控的脑功能区并非单一来源于ACC,操作错误试验中前扣带喙部和左外侧额叶皮层也被选择性激活了^[7],还有研究表明中颞叶、辅助运动区、额内侧回和前额叶皮层的一些部位也参与了脑错误信息检查系统^[8-9]。有关ERN的产生机制,目前有表征失配理论^[10]、强化学习理论^[11]、冲突监控理论^[12]和预测反应结果模型^[13]这4种理论模型。其中,表征失配理论模型认为ERN是由比较过程中ACC在检测到正确的与实际的反应表征不匹配时所引发,ERN反映比较过程的脑活动;强化学习理论认为在错误事件发生后,多巴胺解除了对前扣带沟腹侧的抑制,V层神经元去极化而产生ERN和FRN,继而ACC改变当前任务表现;冲突监控理论认为ACC负责冲突信息监控,当冲突出现时产生ERN;预测反应结果模型认为ACC对刺激可能的反应进行预测,预测中产生的ERN信号表示预测结果。这几种理论模型从不同侧面表明了ERN是一种反映行动监测过程的ERP,当脑监测到事件个体内部标准或目标冲突时就产生了ERN。

Pe是伴随ERN后的正向偏转电位,Pe的神经起源是否和ERN相同,有研究采用脑内ERP记录、头皮ERP记录和偶极子定位等多种方法进行研究,研究表

明ERN定位于尾侧ACC,而Pe更多定位于喙侧ACC附近,尽管关于Pe的功能和定位存在一些争议,但绝大多数的研究都表明ERN和Pe反映了错误信息处理中不同的神经过程^[14-15]。随着ErrP研究的深入,科研人员发现实验中无论是否意识到错误,错误事件后都会出现很大的ERN信号,而Pe在感知到的错误中比未感知到的错误中更明显^[4,16]。这些研究表明Pe相较ERN反映了有意识的错误加工或错误后处理,目前Pe常被认为是错误的反应后评估。

FRN是接收错误事件的反馈刺激后出现的一种负偏转电位,偶极子定位和功能磁共振成像研究表明FRN可能起源于尾侧ACC^[3,17],但其他的一些研究表明FRN是喙侧ACC和后扣带回区域的综合活动产生的^[18-19]。FRN的研究进一步显示正性反馈和负性反馈所诱发的FRN波幅不同,负性反馈相较正性反馈,FRN波幅更大^[20]。有研究更是进一步表明,FRN并不是仅仅依据反馈效价产生,而是通过监测实际反馈与预期是否一致,当实际反馈与预期不一致时,不论是正反馈还是负反馈,FRN的幅值都比较大,而由于被试通常对自身偏向于自信,预期不一致时负反馈产生的FRN幅值更大^[21]。FRN的幅值在事件学习过程中也不是一成不变的,在学习过程的早期阶段,FRN的幅值大于ERN,此阶段个体做出的正确行为是通过外部绩效反馈来评估的;在学习过程的后期阶段,FRN的幅值逐渐小于ERN,此阶段的行为巩固更多依靠内部系统的监测来完成^[22]。目前认为ERN是由内部神经系统监控产生的,而FRN则是通过外部条件监控触发的。

ErrP这3种成分的波形特征、源定位及在错误信息处理中的作用归纳见表1。

表1 ErrP不同成分特性的总结
Table 1 Summary of the characteristics of different components of ErrP

成分名称	波形正负	波形潜伏期	出现部位	源定位	意义
ERN	负波	50~100 ms	额叶中央区域	ACC	反映错误监测过程
Pe	正波	150~500 ms	顶叶中央区域	喙侧ACC	反映有意识的错误加工过程
FRN	负波	250~300 ms	额叶中央区域	尾侧ACC	反映预期结果与实际反馈信息的不匹配

2 ErrP的任务诱导模式

ErrP的3种成分在错误信息处理中的意义不同,有关ErrP研究也涉及错误信息处理的诸多方面,如错误绩效监控、奖励预测、期望偏差、反馈可靠性、错

误意识加工等,这些研究均是采用相应的任务模式来加以诱导出ErrP,这些任务模式虽然本质上都属于经典的实验范式,但都依据研究目的进行了一定程度的拓展和改动。表2归纳和总结了近年来ErrP研究中采用的实验任务诱导模式。

表2 ErrP任务诱导模式总结
Table 2 Summary of ErrP task induction patterns

任务名称	研究目的	诱发出的成分	刺激材料	呈现方式/界面
时间估计任务 ^[3]	探究ERN和FRN是否为同种成分	ERN、FRN	-	被试认为提示音1s时,按下反应键,依据被试的反应时给予反馈
Stroop任务 ^[23]	探究反应监测困难是源于错误检测中断还是纠正处理中断	ERN、Pe	4~5种带有颜色的单词	被试按下对应不同颜色的响应键
Go-Nogo任务 ^[24]	检验不同任务中,错误相关成分的可比性和可区分性	ERN、Pe	直立绿色三角形与倾斜10°绿色三角形	直立三角形时被试需按键反应,对倾斜10°三角形不反应
侧翼任务 ^[15]	研究ERN和Pe的源定位	ERN、Pe	HHHHH、HHSHH、SSHSS或SSSSS这4种字符串字母组合	被试对5个字母中间的字母做出反应,依据被试的反应时间给予反馈
被动赌博任务 ^[25]	研究强化学习理论中的奖赏预测机制	ERN、P300	一排4个大小相同的圆圈	被试随机选择并依据提前设置的正负反馈概率进行反馈
概率学习任务 ^[26]	研究奖赏期望对货币绩效反馈加工过程的影响	FRN、P300、P200	两组相同数量的盒子,其中被预选盒子的数量不同(预选的盒子用红色标记,未被预选的用白色标记)	被试判断并选择左侧还是右侧的盒子,子集更可能包含奖励,随后呈现盒子中是否有硬币奖励
视觉旋转任务 ^[27]	表征视觉旋转任务中的ErrP	ERN、关联性负变	偏转不同角度(0°、±22.5°、±45°)的红球与运动初始/目标位置的光圈	要求被试将红球光标移动到目标位置的光圈上
反馈可靠性任务 ^[28]	探究反馈可靠性影响的潜在机制	FRN、P300、P200	384个中文刺激组成的字符对	学习阶段:从每对刺激字符中进行选择并呈现反馈信息(积极/消极、可靠/不可靠) 测试阶段:选择出学习阶段的字符对刺激,并呈现货币反馈

3 ErrP在神经系统疾病中的应用

由于年龄增长和神经系统疾病的因素影响,导致脑局部结构萎缩、多巴胺浓度和受体密度下降以及脑结构、功能神经元发生变化,基于任务模式诱导的ErrP会随着年龄增长和患有神经系统疾病而发生变化。因此,ErrP在神经系统疾病的诊断/辅助诊断、治疗评估和预后评价等诸多方面均有较广泛的应用。

3.1 ErrP在认知老化和认知衰退中的应用

随着年龄增长,脑会出现一定程度的认知老化和认知衰退,脑对错误信息的处理和加工功能也有所降低,ErrP出现异常。采用字母辨别任务^[29]、心理旋转任务^[30]和侧翼任务^[31]等多种错误监测任务模式来诱导ErrP,结果显示老年人的ERN和Pe的波幅显著降低;采用货币绩效反馈任务^[26]、概率选择任务^[32]和视觉运动旋转任务^[33]等来检测老年人快速反应中的ErrP,结果显示老年人的FRN的幅值出现下降,且从反馈中学习的能力降低了^[34],表现出反馈处理能力减弱。脑内多巴胺水平随年龄增长而不断下降,ACC的错误处理功能下降使得老年人对复杂任务的适应能力及学习能力下降,更易犯错误^[35]。认知老

化和认知衰退使老年人在绩效监控、结果处理、概率学习等方面的表现逊于健康年轻人。

3.2 ErrP在神经系统疾病中的应用

许多神经系统疾病患者都会出现脑对错误信息处理过程异常,表现出ErrP异常,表3列举了几种神经系统疾病的ERN的幅值变化及异常原因^[36-41]。

研究表明许多神经系统疾病患者的ERN幅值异常,并且ERN的幅值异常和患者的错误监测系统的行为表现高度相关,因此,有研究提出ERN可看作是一种神经行为特征的神经指标,ERN可以作为一种跨诊断内表型^[42]。目前ErrP特别是ERN被认为是一种有前景的生物标志物,其幅值可以用于神经系统疾病的诊断/辅助诊断、疾病治疗/干预及预后评价的指标和标记物^[43]。

目前,ERN已应用于神经系统疾病的风险预测,如监测发育早期错误相关的大脑活动并测量儿童的ERN,可在儿童阶段预测相关神经系统疾病的风险,有利于早期诊断和及时干预^[44]。在可卡因依赖患者中,ERN可以作为治疗后复发预测指标^[45]。最新的研究表明Pe和正确相关负波可作为注意缺陷多动障碍患者的鉴别诊断指标^[46]。ERN也已用于急、慢性神经系统疾病的治疗/干预评价中,如短期的正念训

表3 几种神经系统疾病对ERN幅值的影响及其原因

Table 3 Effects of several neurological diseases on ERN amplitude and the causes

疾病名称	ERN幅值变化	异常原因
强迫症 ^[36]	增加	过度活跃的错误监测系统
焦虑 ^[37]	增加	对负面信息的持续神经敏感性
抽动秽语综合征 ^[38]	增加	过度活跃的绩效监控
注意力缺陷多动障碍 ^[39]	下降	自我监控或适应性控制缺陷
自闭症 ^[40]	下降	低效的绩效监测
精神变态 ^[41]	下降	错误监测系统缺陷

练可以逆转慢性抑郁症患者的ERN异常^[47],深部脑刺激调控了强迫症患者内侧额叶功能和异常的ERN^[48],无创经颅直流电刺激降低强迫症患者的临床症状和异常升高的ERN。ERN指标可以指导焦虑、抑郁症患者的血清素再摄取抑制剂治疗和认知行为治疗,ERN在奖励加工和认知控制中的变化能指导重度抑郁症患者的有氧运动^[49-50]。

4 总结与展望

本研究总结归纳了近年来ErrP的相关研究,ErrP是产生于错误事件后特定的ERP,主要产生于大脑额叶、顶叶等区域,个体通过错误信息来不断评估、调整自身行为,反映个体错误监测能力和对错误信息的敏感性,ErrP的特性在神经系统疾病领域可用于对某些神经系统疾病的诊断、治疗和预后。关于未来ErrP的研究方向和发展趋势可能有以下几个方面。

(1)在ErrP的神经机制方面,近年来有关ERN神经发生器的研究较多,大多数研究认同ERN来源于ACC,但Pe和FRN的神经发生器尚不明朗,需要进行更深入研究,揭示其神经传导机制将是未来的研究方向。目前ERN产生机制的理论众多,但关于错误处理及加工反馈各个过程的现有理论较为分散,并未提出统一理论,提出更有说服力的理论假说并趋向于建立统一体系可能是未来ERN理论假说的研究趋势。

(2)在影响ErrP幅值方面,认知老化和认知衰退对ErrP幅值影响的研究结论较为一致,由于大脑功能的退机会减弱错误处理的能力,使得ErrP的幅值下降。神经系统疾病对ErrP幅值影响的研究结论则有些出入,这可能是由于任务范式不同、被试个体差异以及ERP实验参数不同等因素造成的,表明缺少标准的评估体系,能否确定不同神经系统疾病的泛化任务诱导模式可能是未来的研究方向。

(3)在ErrP的神经系统疾病应用方面,若要将ERN发展为一种筛查和诊断相关疾病的工具,未来

应注重疾病不同发展阶段的纵向研究,确立一个标准化任务的个体化规范,并找到适合不同年龄的标准来比较个体,得出不同年龄的ERN临床分值,将有助于开展临床应用。

(4)在ErrP的其他应用方面,ErrP与脑-机接口相结合这一举措将提高脑-机接口的系统性能。用于康复医学领域的脑-机接口系统目前主要受众是患有严重行动或交流障碍的群体,他们所产生的ErrP信号相较于正常人有所差异,未来应关注这类人群ErrP信号的表征,确定他们的ErrP信号是如何变化的,并与脑-机接口系统相结合以更好地达到用户需求,从用户角度解决问题这将是以后脑-机接口系统的发展趋势。

【参考文献】

[1] Gehring WJ, Goss B, Coles MG, et al. A neural system for error detection and compensation[J]. J Gerontol, 1993, 4(6): 385-390.

[2] Falkenstein M, Hohnsbein J, Hoormann J, et al. Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks[J]. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, 1991, 78(6): 447-455.

[3] Miltner WH, Braun CH, Coles MG. Event-related brain potentials following incorrect feedback in a time-estimation task: evidence for a "generic" neural system for error detection[J]. J Cognit Neurosci, 1997, 9(6): 788-798.

[4] Nieuwenhuis S, Ridderinkhof KR, Blom J, et al. Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors: evidence from an antisaccade task[J]. Psychophysiology, 2001, 38(5): 752-760.

[5] Niki H, Watanabe M. Prefrontal and cingulate unit activity during timing behavior in the monkey[J]. Brain Res, 1979, 171(2): 213-224.

[6] Gamba H, Sasaki K, Brooks VB. 'Error' potentials in limbic cortex (anterior cingulate area 24) of monkeys during motor learning[J]. Neurosci Lett, 1986, 70(2): 223-227.

[7] Kiehl KA, Liddle PF, Hopfinger JB. Error processing and the rostral anterior cingulate: an event-related fMRI study[J]. Psychophysiology, 2000, 37(2): 216-223.

[8] Brázdil M, Roman R, Falkenstein M, et al. Error processing-evidence from intracerebral ERP recordings[J]. Exp Brain Res, 2002, 146(4): 460-466.

[9] Brázdil M, Roman R, Daniel P, et al. Intracerebral error-related negativity in a simple Go/NoGo task[J]. J Psychophysiol, 2005, 19(4): 244-255.

[10] Coles MG, Scheffers MK, Holroyd CB. Why is there an ERN/Ne on correct trials? Response representations, stimulus-related components, and the theory of error-processing[J]. Biol Psychol, 2001, 56(3):

- 173-189.
- [11] Holroyd CB, Coles MG. The neural basis of human error processing: reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity[J]. *Psychol Rev*, 2002, 109(4): 679-709.
 - [12] Botvinick MM, Braver TS, Barch DM, et al. Conflict monitoring and cognitive control[J]. *Psychol Rev*, 2001, 108(3): 624-652.
 - [13] Alexander WH, Brown JW. Medial prefrontal cortex as an action-outcome predictor[J]. *Nat Neurosci*, 2011, 14(10): 1338-1344.
 - [14] Van Veen V, Carter CS. The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex[J]. *J Cognit Neurosci*, 2002, 14(4): 593-602.
 - [15] Herrmann MJ, Römmler J, Ehrlis AC, et al. Source localization (LORETA) of the error-related-negativity (ERN/Ne) and positivity (Pe) [J]. *Cognit Brain Res*, 2004, 20(2): 294-299.
 - [16] Vidal F, Hasbroucq T, Grapperon J, et al. Is the 'error negativity' specific to errors? [J]. *Biol Psychol*, 2000, 51(2-3): 109-128.
 - [17] Holroyd CB, Nieuwenhuis S, Yeung N, et al. Dorsal anterior cingulate cortex shows fMRI response to internal and external error signals[J]. *Nat Neurosci*, 2004, 7(5): 497-498.
 - [18] Van Veen V, Holroyd CB, Cohen JD, et al. Errors without conflict: implications for performance monitoring theories of anterior cingulate cortex[J]. *Brain Cognit*, 2004, 56(2): 267-276.
 - [19] Nieuwenhuis S, Slagter HA, von Geusau NJ, et al. Knowing good from bad: differential activation of human cortical areas by positive and negative outcomes[J]. *Eur J Neurosci*, 2005, 21(11): 3161-3168.
 - [20] Nieuwenhuis S, Holroyd CB, Mol N, et al. Reinforcement-related brain potentials from medial frontal cortex: origins and functional significance[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2004, 28(4): 441-448.
 - [21] Oliveira FT, McDonald JJ, Goodman D. Performance monitoring in the anterior cingulate is not all error related: expectancy deviation and the representation of action-outcome associations [J]. *J Cognit Neurosci*, 2007, 19(12): 1994-2004.
 - [22] Pietschmann M, Simon K, Endrass T, et al. Changes of performance monitoring with learning in older and younger adults [J]. *Psychophysiology*, 2008, 45(4): 559-568.
 - [23] Alain C. Neurophysiological evidence of error-monitoring deficits in patients with schizophrenia[J]. *Cereb Cortex*, 2002, 12(8): 840-846.
 - [24] Riesel A, Weinberg A, Endrass T, et al. The ERN is the ERN is the ERN? Convergent validity of error-related brain activity across different tasks[J]. *Biol Psychol*, 2013, 93(3): 377-385.
 - [25] Holroyd CB, Nieuwenhuis S, Yeung N, et al. Errors in reward prediction are reflected in the event-related brain potential [J]. *NeuroReport*, 2003, 14(18): 2481-2484.
 - [26] Bellebaum C, Kobza S, Thiele S, et al. Processing of expected and unexpected monetary performance outcomes in healthy older subjects [J]. *Behav Neurosci*, 2011, 125(2): 241-251.
 - [27] Benyamini M, Demchenko I, Zacksenhouse M. Error related EEG potentials evoked by visuo-motor rotations[J]. *Brain Res*, 2021, 1769: 147606.
 - [28] Ernst B, Steinhauser M. Effects of feedback reliability on feedback-related brain activity: a feedback valuation account[J]. *Psychobiology*, 2018, 18(3): 596-608.
 - [29] Gehring WJ, Knight RT. Prefrontal-cingulate interactions in action monitoring[J]. *Nat Neurosci*, 2000, 3(5): 516-520.
 - [30] Band GP, Kok A. Age effects on response monitoring in a mental-rotation task[J]. *Biol Psychol*, 2000, 51(2-3): 201-221.
 - [31] Mathewson KJ, Dywan J, Segalowitz SJ. Brain bases of error-related ERPs as influenced by age and task[J]. *Biol Psychol*, 2005, 70(2): 88-104.
 - [32] West R, Huet A. The effect of aging on the erp correlates of feedback processing in the probabilistic selection task[J]. *Brain Sci*, 2020, 10(1): 40.
 - [33] Reuter EM, Leow LA, Carroll TJ. Task feedback processing differs between young and older adults in visuomotor rotation learning despite similar initial adaptation and savings[J]. *Neuroscience*, 2020, 451: 79-98.
 - [34] Schmitt-Eliassen J, Ferstl R, Wiesner C, et al. Feedback-based *versus* observational classification learning in healthy aging and Parkinson's disease[J]. *Brain Res*, 2007, 1142: 178-188.
 - [35] Volkow ND, Logan J, Fowler JS, et al. Association between age-related decline in brain dopamine activity and impairment in frontal and cingulate metabolism[J]. *Am J Psychiatry*, 2000, 157(1): 75-80.
 - [36] Gehring WJ, Himle J, Nisenson LG. Action-monitoring dysfunction in obsessive-compulsive disorder[J]. *J Gerontol*, 2000, 11(1): 1-6.
 - [37] Tobias MR, Ito TA. Anxiety increases sensitivity to errors and negative feedback over time[J]. *Biol Psychol*, 2021, 162(8): 108092.
 - [38] Bellato A, Norman L, Idrees I, et al. A systematic review and meta-analysis of altered electrophysiological markers of performance monitoring in obsessive-compulsive disorder (OCD), Gilles de la Tourette syndrome (GTS), attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD) and autism[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2021, 131: 964-987.
 - [39] Shiels K, Hawk LW. Self-regulation in ADHD: the role of error processing[J]. *Clin Psychol Rev*, 2010, 30(8): 951-961.
 - [40] D'Cruz AM, Mosconi MW, Ragozzino ME, et al. Alterations in the functional neural circuitry supporting flexible choice behavior in autism spectrum disorders[J]. *Transl Psychiatry*, 2016, 6(10): e916.
 - [41] Dikman ZV, Allen JJ. Error monitoring during reward and avoidance learning in high- and low-socialized individuals[J]. *Psychophysiology*, 2000, 37(1): 43-54.
 - [42] Riesel A, Klawohn J, Grützmann R, et al. Error-related brain activity as a transdiagnostic endophenotype for obsessive-compulsive disorder, anxiety and substance use disorder[J]. *Psychol Med*, 2019, 49(7): 1207-1217.
 - [43] Sagalakova OA, Truettsev DV, Zhirmova OV. Error-related negativity: neurocognitive transdiagnostic marker of anxiety disorders[J]. *Neurol Bull*, 2021, LIII(1): 80-83.
 - [44] Meyer A. On the relationship between the error-related negativity and anxiety in children and adolescents: from a neural marker to a novel target for intervention[J]. *Psychophysiology*, 2022, 59(6): e14050.
 - [45] Marhe R, van de Wetering BJ, Franken IH. Error-related brain activity predicts cocaine use after treatment at 3-month follow-up[J]. *Biol Psychiatry*, 2013, 73(8): 782-788.
 - [46] Awasthi P. Error-related brain activity in ADHD: a systematic review and meta-analysis of electroencephalography markers of cognitive control performance[J]. *CNS Spectrums*, 2022, 27(2): 249.
 - [47] Fissler M, Winnebeck E, Schroeter TA, et al. Brief training in mindfulness may normalize a blunted error-related negativity in chronically depressed patients[J]. *Psychobiology*, 2017, 17(6): 1164-1175.
 - [48] Sildatke E, Gruendler TO, Ullsperger M, et al. Deep brain stimulation reduces conflict-related theta and error-related negativity in patients with obsessive-compulsive disorder[J]. *Neuromodulation*, 2022, 25(2): 245-252.
 - [49] Brush CJ, Hajcak G, Bocchine AJ, et al. A randomized trial of aerobic exercise for major depression: examining neural indicators of reward and cognitive control as predictors and treatment targets[J]. *Psychol Med*, 2022, 52(5): 893-903.
 - [50] Gorka SM, Burkhouse KL, Klumpp H, et al. Error-related brain activity as a treatment moderator and index of symptom change during cognitive-behavioral therapy or selective serotonin reuptake inhibitors [J]. *Neuropsychopharmacology*, 2018, 43(6): 1355-1363.

(编辑:谭斯允)