

错误正波的神经发生源与功能意义解释*

蒋 军 陈安涛

(西南大学心理学院, 重庆 400715)

摘 要 错误正波(error positivity, Pe)是指在错误反应后 200~600ms 后出现的事件相关电位(ERP)的正偏转,对 Pe 的研究有助于揭示人类错误加工机制的全貌。现有研究表明 Pe 主要产生于前扣带回喙部,但不同的研究对其精细神经发生源并没有达成一致。Pe 的功能意义解释主要有错误意识假说、行为适应假说、情绪评估假说。当根据有关 P3 的理论来解释 Pe 的功能意义时,Pe 可能反映了对错误背景的刷新。然而上述每一种对 Pe 的功能意义的解释都还受到了一些研究结果的质疑和挑战。基于此,作者对现有研究存在的问题进行了总结和分析,并对今后如何对 Pe 的神经发生源和功能意义的进一步研究提出了建议。

关键词 错误正波; 错误意识; 行为适应; 情绪评估; P3

分类号 B842; B845

1 引言

在日常生活中个体不仅需要任务要求来调节行为,而且也需要根据监控到的错误反应信息来优化未来的行为反应。因此,错误加工不但是个体适应环境的重要能力,而且也是个体学习和行为调节的重要源泉。如果行为水平上的研究为人脑内存在一个错误加工系统提供了间接的实验证据(Rabbitt, 1966),那么近年来认知神经科学的研究则为错误加工系统提供了更直接的神经生理学上的实验证据(刘春雷 & 张庆林, 2009)。事件相关电位的(Event-related brain potential, ERP)研究已经确认两个 ERP 成分与错误加工有关: 错误(相关)负波与错误正波。在 20 世纪 90 年代初两个研究小组各自独立地发现,被试在选择反应时任务中做出错误反应后 50~100ms 左右会出现事件相关电位的明显负偏转(见图 1),由于它是与错误反应伴随的特定的 ERP 成分(刘春雷 & 张庆林, 2009),所以通常称之为错误相关负波(error-related negativity, ERN, Gehring, Coles, Meyer, & Donchin, 1990)或错误负波(error negativity, Ne, Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann, & Blanke, 1990)。ERN 于

额中(fronto-central)头皮电极记录点(例如, FCz)达到峰值,偶极子源定位分析发现 ERN 主要产生于前扣带回尾部(caudal anterior cingulate cortex, cACC; Mathewson, Dywan, & Segalowitz, 2005; O'Connell et al., 2007; van Boxtel, van der Molen, & Jennings, 2005; Van Veen & Carter, 2002)。而错误正波(error positivity)是指在错误反应后 200~600ms 出现的 ERP 成分的正偏转,它通常紧跟 ERN 峰后出现,是一种弥散性的分布于头皮电极点的慢正波成分,于中顶(centro-parietal)头皮电极记录点达到峰值(例如, Cz; Falkenstein, Hoormann, Christ, & Hohnsbein, 2000; Shalgi, Barkan, & Deouell, 2009; Vocat, Pourtois, & Vuilleumier, 2008)。可见与 ERN 相比,Pe 在头皮上的分布更靠后,有更长的潜伏期(见图 1)。

已有研究表明,ERN 和 Pe 可能反映了同一错误加工系统的两个不同的加工阶段。ERN 所反映的早期加工阶段主要功能是通过中央加工通路来侦测皮层或皮层下产生的不正确的动作命令,而 Pe 所反映的晚期加工阶段的主要功能是意识错误反应或调节行为(Endrass, Reuter, & Kathmann, 2007; Nieuwenhuis, Ridderinkhof, Blom, Band, & Kok, 2001; 刘春雷, 张庆林, 2009)。目前对 ERN 所反映的错误加工的第一个阶段进行了广泛而深入地研究,不但对 ERN 的

收稿日期: 2009-08-07

* 国家自然科学基金(30700226)和中国博士后基金(200902613)资助。

通讯作者: 陈安涛, E-mail: xscat@swu.edu.cn

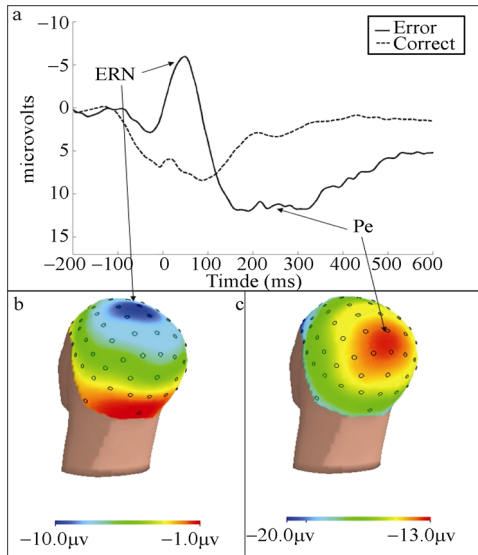


图1 (a)ERN和Pe。(b)ERN的头皮分布。(c)Pe的头皮分布。引自(Olvet & Hajcak, 2008)

神经发生源(neural generator)取得了较为一致的意见(ERN 主要产生于 cACC), 而且对其功能意义(functional significance)也形成了系统的理论解释, 例如, 失匹配理论、强化学习理论、动机情绪理论、冲突监测理论等(Olvet & Hajcak, 2008; 刘春雷, 张庆林, 2009)。但遗憾的是, 目前对由 Pe 所反映的错误加工的第二个阶段的研究却没有受到同样的重视(Overbeek, Nieuwenhuis, & Ridderinkhof, 2005; Ridderinkhof, Ramautar, & Wijnen, 2009; Shalgi et al., 2009; van Boxtel et al., 2005; Vocat et al., 2008)。然而, 要想揭示整个错误加工机制的全貌, 就非常有必要对 Pe 的神经发生源和功能意义进行深入地探索与研究。通过对仅有的研究 Pe 的神经发生源与功能意义的文献的回顾、归纳和总结, 作者希冀这不但有助于深入地认识与了解 Pe, 而且也有助于研究者将来对 Pe 的神经发生源与功能意义进行进一步的研究。

2 Pe 的神经发生源

尽管目前大多数源定位研究表明 Pe 主要产生于前扣带回喙部(rostral anterior cingulate cortex, rACC; Herrmann, Römmler, Ehliis, Heidrich, & Fallgatter, 2004; Mathewson et al., 2005; O'Connell et al., 2007; van Boxtel et al., 2005; Van Veen & Carter, 2002), 但目前就 Pe 的神经发生源

的精细定位并没有达成一致。有的研究发现除 rACC 外, 顶上叶(superior parietal cortex; Van Veen & Carter, 2002)、后扣带回(posterior cingulate cortex)和楔前叶(precuneus; O'Connell et al., 2007)、腹侧额叶区域(ventral frontal regions; Mathewson et al., 2005)也是产生 Pe 的可能区域。对于 Pe 定位于 rACC 的什么部位目前也没有取得共识, 例如 Herrmann 等(2004)用低分辨率电磁断层扫描术(low resolution electromagnetic tomography, LORETA)定位后发现他们的 rACC 定位比 Van Veen (2002)等人的更靠前。此外, 也有研究者对 Pe 产生于 rACC 的神经发生源定位结果提出了质疑。Davies, Segalowitz, Dywan 和 Pailing (2001)发现, Pe 不是产生于 rACC 而是产生于顶叶皮层(parietal cortex) (也可参见 Falkenstein et al., 2000; Taylor, Stern, & Gehring, 2007)。与此类似, Vocat 等(2008)通过偶极子源定位发现 Pe 主要产生于后扣带回(posterior cingulate cortex, PCC)。在对 Pe 的源定位的研究中也发现, ERN 主要产生于 cACC (Mathewson et al., 2005; O'Connell et al., 2007; van Boxtel et al., 2005; Van Veen & Carter, 2002), 这显然与 Pe 的神经发生源不同, 同时再次证实了 ERN 与 Pe 可能反映了错误加工的两个不同阶段的观点。

由于采用偶极子或 LORETA 源定位分析技术对 Pe 的神经发生源并没有取得共识, 所以 Hester, Foxe, Molholm, Shpaner 和 Garavan (2005)与 Klein 等(2007)试图基于 Pe 的错误意识的功能意义假设(该假说认为 Pe 反映了对错误的有意识识别, 详细请参见后文中 Pe 的功能意义解释部分), 通过采用功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)技术对 Pe 的神经发生源进行考察。Hester 等(2005)发现与没有意识到错误相比, 意识到错误时大脑双侧前额叶(prefrontal)、双侧顶下叶(inferior parietal cortex)的激活程度显著增强, 但无论是否意识到错误前扣带回背外侧(dorsal anterior cingulate cortex, dACC)、rACC、前辅助运动区(pre-supplementary motor area, pre-SMA)的激活程度并没有因此得到增强。Klein 等(2007)采用反眼跳任务考察错误意识所引起的大脑活动时也得出了类似的结果。他们发现, 意识到错误与没有意识到错误相比, 只有前下脑岛(anterior inferior insula)受到了更显著

的激活。而无论是否意识到错误,扣带区喙部(rostral cingulate zone, RCZ)、pre-SMA、双侧脑岛(insular)、双侧额下回(inferior frontal gyrus)的激活程度都没有显著的差异。显然来自 fMRI 的实验证据并不支持上述 Pe 的源定位的分析结果。

Brázdil 等(2002)使用颅内记录(intracranial recording)技术对 ERN 和 Pe 的颅内起源和分布进行了研究。结果显示,在 rACC、近颞叶(mesiotemporal)、眶额叶皮层(orbitofrontal cortex, OFC)和前额皮层背侧(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)的大多数记录点都发现了类似于头皮记录的 ERN 和 Pe,所以作者认为上述区域或许是 ERN 和 Pe 的共同神经发生源。

通过对有关 Pe 的神经源的研究的回顾,我们可以看出,虽然源定位研究与颅内记录都发现 rACC 可能是产生 Pe 的主要大脑区域,但是这一研究结果并没有得到来自 fMRI 研究的实验证据的支持。与此同时,源定位研究、颅内记录和 fMRI 研究都显示 Pe 可能具有多个神经发生源。对于为什么不同源定位研究所得出的 Pe 神经发生源的存在明显的差异,可能有以下几个方面的原因。首先,源定位方法的不同。目前对 Pe 神经发生源的源定位研究主要采用偶极子(如, Van Veen & Carter, 2002)和 LORETA(如, Herrmann et al., 2000)源定位分析技术,所以分析方法的不同可能导致研究结果的差异。其次,错误数量、数据分析方法不同。在对 Pe 的神经发生源的研究中,每个研究者报告的错误数量都不一致,而错误数量会对源定位结果产生巨大的影响(Vocat et al., 2008)。对 ERP 进行分析处理时,每一个研究者滤波的频带范围、时间窗口、计算差异波的方式等也存在的差异。最后可能是由被试对错误反应所引起的情绪与动机上的反应差异而造成的。比如有的人将错误看得很严重,当作出错误反应后会引引起情绪或动机上的剧烈变化,而有的则相反,错误对其几乎没有有什么影响。Taylor 等(2006)发现这种个体差异会导致被试在错误加工中 ACC 的各个分区的激活存在明显的个体差异,或许这可以部分解释为什么对 Pe 的源定位具有某种程度的不一致性。而对于源定位与 fMRI 的研究所得出的 Pe 神经发生源的差异,一方面可能是由于 fMRI 的相对有限的时间分辨率导致的。或许错误反应已经引起了大脑某些区域激活程

度的改变,但是这种激活的持续时间极其短暂,导致低时间分辨率的 fMRI 并不能捕捉到这种变化。比如,ACC 喙部的激活强度的细微增加可能在源定位分析中表现很明显,但是 ACC 喙部的激活或许很快消失或者由于时间的延长与其他大脑部位的激活互相卷入了(convolved),导致 fMRI 信号不能捕捉到激活强度的变化(O'Connell et al., 2007)。另一方面可能是源定位有限的空间分辨率导致的。一般来说,对源定位分析所得出的结果必须谨慎地加以解释。因为偶极子源定位结果说服力不够,即所谓的“逆问题”(inverse problem)。在对 Pe 进行源定位分析时,尽管广泛的头皮分布提示有多个发生源,但在定位时常常能够很容易地将这个广泛的分布拟合到很少的几个深部偶极子上(Overbeek et al., 2005; Ridderinkhof et al., 2009)。总之,目前就 Pe 神经发生源的精确定位尚不清楚,需要对其进一步研究,以揭示人类错误加工机制的全貌。

3 Pe 的功能意义解释

3.1 错误意识假说 (error awareness hypothesis)

错误意识假说认为 Pe 反映了对错误反应的有意识识别(recognition),即意识到错误与没有意识到错误时 Pe 的波幅会发生明显的改变(Falkenstein et al., 2000)。错误意识假说是当前对 Pe 的功能意义最有影响的理论解释,同时也得到了大量的实验证据的支持(Endrass et al., 2007; Nieuwenhuis et al., 2001; O'Connell et al., 2007; Shalgi et al., 2009)。错误意识指明地识别到了行为中的错误反应,在实验中通常让被试在每一试次(trial)结束后按键来表示是否明确地意识到了错误。Nieuwenhuis 及其同事(2001)率先通过反眼跳任务(antisaccade task)考察了错误意识与 ERN 和 Pe 之间的关系,他们发现意识到错误比没有意识到错误表现出了更大的 Pe 波幅(amplitude),而无论是否意识到错误 ERN 的波幅都没有显著的变化。这些结果不但清楚地说明 Pe 与 ERN 是两个不同的错误加工阶段,而且进一步说明 Pe 而不是 ERN 与有意识的错误识别有关。后来的研究者采用相同的实验逻辑(对比意识到与没有意识到错误情况下 Pe 的波幅变化),使用相同或不同的任务范式都得出了与(Nieuwenhuis et al., 2001)相同的实验结果。例如,Endrass 等(2007)利用反眼跳任务也重复出了

Nieuwenhuis 等人的结果,只不过他们将 Pe 进一步细分为早期 Pe (200~300 ms)和晚期 Pe (400~600 ms),结果发现错误意识只对晚期 Pe 有调节作用,而早期 Pe 与 ERN 一样并没有受到错误意识的调节,这说明只有晚期 Pe 反映了对错误的有意识识别,而且对错误的意识是发生在错误反应 300ms 以后。

与 Nieuwenhuis 等(2001)和 Endrass 等(2007)使用的要求被试进行动眼(oculomotor)反应的任务范式不同, O'Connell 等(2007)采用要求被试进行手动反应的基于 Go/no-go 实验范式设计的错误意识任务(error awareness task, EAT)对错误意识进行了研究,但仍然得出了与 Nieuwenhuis 等人(2001)相同的结果,这说明错误意识对 Pe 的调节在动眼通道(oculomotor modality)和手动反应通道(manual response modality)上具有一致性。Shalgi 等(2009)使用要求被试进行手动反应的听觉和视觉 EAT 任务对错误意识进行对比研究后发现,视觉和听觉通道的 Pe 波形呈现出了相同的变化趋势,即意识到错误较没有意识到错误有较大的 Pe 波幅。上述实验证据不但说明错误意识对 Pe 进行调节这个结果非常稳定,而且说明该结果具有跨通道的一致性。

尽管错误意识假说得到了上述实验证据的支持,但是对此功能意义解释还必须谨慎,因为一些实验证据并不支持错误意识假说。Murphy, Richard, Masaki 和 Segalowitz (2006)让受到不同时间长度(4小时 vs. 20小时)睡眠剥夺的被试完成 Eriksen Flanker 任务,对该任务唤起的 ERN 和 Pe 分析后发现,在两种条件下 ERN 的波幅没有显著的变化,但随着觉醒(wakefulness)时间的延长 Pe 波幅显著减小,这个结果与 Nieuwenhuis 等(2001)的一致。然而他们发现在两种睡眠剥夺条件下被试的错误意识能力并没有受到削弱,因为即使在 20 小时的睡眠剥夺后,被试主观报告的错误数量和客观分析得到的错误数量仍然很相近,这一结果与错误意识假说认为的 Pe 会受到意识程度的影响的观点不一致。实际上,先前研究也发现错误意识并没有引起可能产生 Pe 的主要 rACC 等区域激活强度的增加(Hester et al., 2005; Klein et al., 2007)。先前研究发现有被试在错误反应后并未出现 Pe,这与错误意识假说认为 Pe 反映了对错误的有意识识别的观点相矛盾,

因为被试在实验中不可能一点都没有意识到自己作出了错误反应(Falkenstein et al., 2000)。此外,也有实验证据表明 ERN 与有意识的评估错误的概率(Scheffers & Coles, 2000)或行为改变的程度(Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin, 1993)有关,这表明 ERN 反映了对错误的有意识识别(Murphy et al., 2006),这与(Nieuwenhuis et al., 2001)等观察到的错误意识对 ERN 无影响作用的发现不一致。上述对错误意识假说的反驳或许表明错误意识程度的改变或许并不是 Pe 波幅变化的根本原因,因为尽管有研究发现错误意识对 Pe 波幅有显著的影响,但这并不意味着错误意识与 Pe 产生之间存在因果关系(O'Connell et al., 2007),目前也尚不清楚是否不同被试组在 Pe 上的差异能够被解释为被试错误意识能的差异(Overbeek et al., 2005)。总之,错误意识假说有待进一步研究和检验。

3.2 行为适应假说 (behaviour adaptation hypothesis)

行为适应假说认为 Pe 可能反映了对错误后行为的调节,这个调节过程既可能由认知因素驱动,也可能由情感因素驱动,或者二者兼而有之(Falkenstein, 2004; Falkenstein et al., 2000; Overbeek et al., 2005)。错误后行为调节的最常见的表现是反应速度的减慢,这一现象在心理学研究中最先由 Rabbitt (1966)发现,他们观察到错误后(n)的正确试次(n+1)的反应时往往比平均正确反应时显著延长,这种现象被称为错误后减慢(post error slowing)。出现这种现象是因为个体意识到自己做出错误反应后,立即通过减慢反应速度或增加对错误后试次的认知控制等来调节自己的行为,减少或避免错误的发生,这也说明错误后减慢是一个受控的加工过程(Klein et al., 2007; Rabbitt, 1966)。

Nieuwenhuis 等(2001)发现意识到错误与没有意识到错误相比,不但有更大的 Pe 波幅,而且也存在明显的错误后减慢(25 vs. 2ms)。但在两种条件下 ERN 的波幅并没有显著的改变,因此 Pe 而不是 ERN 被认为与错误后减慢有关。Hajcak, McDonald 和 Simons (2003)则进一步研究发现错误后减慢的程度与 Pe 波幅存在显著的正相关。Vocat 等(2008)报告个体调节行为以满足速度要求的能力与 Pe 波幅显著相关,这种相关表明 Pe

与错误监测中的某些策略性的适应加工有关,因为个体可能在实验中需要调整当前的行为以提高行为成绩。同时 Vocat 等(2008)也提出了错误后行为调节的机制,他们认为错误后对行为的调节主要是通过提高对不正确行为的注意、警觉,增加执行功能可以利用的资源,加强工作记忆中刺激—反应映射(stimulus-response mapping)联结等方式来实现的。

值得注意的是, Nieuwenhuis 等(2001)报告只有在意识到错误之后才会表现出明显的错误后减慢,而且此时伴随着较大的 Pe 波幅。这说明 Pe 与错误后减慢的这种关系可能受到错误意识的部分调节,因为错误后减慢可能反映了一种通过对错误的有意识识别来有意调节行为的策略(Overbeek et al., 2005; Ridderinkhof et al., 2009)。然而有研究表明在没有有意识地知觉到错误的情况下也表现出了明显的错误后减慢(Hester et al., 2005; Rabbitt, 2002), 而且还有的研究发现存在较大的错误后减慢时,老年人的 Pe 波幅不是增大而是减小了(Falkenstein et al., 2000)。此外,与一些研究发现 Pe 与错误后减慢有关不同(Hajcak et al., 2003; Nieuwenhuis et al., 2001), 其他研究要么发现 ERN 与错误后的减慢有关(Debener et al., 2005; Gehring et al., 1993), 要么发现 Pe 与错误后行为调节之间没有联系(Fiehler, Ullsperger, & von Cramon, 2005; Gehring & Knight, 2000; Ullsperger & von Cramon, 2006)。例如, Gehring 和 Knight (2000)发现前额叶损伤的病人仍像正常人一样表现出了错误后减慢,但是在下一个目标出现时仍不能纠正自己的错误,这些研究结果对行为适应假说提出了严重的挑战。

针对这些不一致或相互矛盾的实验结果, Overbeek 等(2005)认为在信息加工过程中可能存在两个并行的系统来激起错误后的行为适应:位于 RCZ 中一个快速的前意识系统通过计算和发出奖赏的信号来引导适应性行为,而当出现明显的错误时,另一个慢速的、有意识的错误意义评估系统开始发挥作用。而对于为什么有些研究没有发现 Pe 与错误后行为调节之间存在联系(比如, Fiehler et al., 2005; Ullsperger & von Cramon, 2006)。O'Connell 等(2007)指出这是因为大多数研究都依赖于对错误后矫正行为的短期测量,比如错误后减慢,但这些行为可能根本就没有反映出

错误后行为策略的改变(比如, Gehring & Knight, 2000)或者这些行为调节可能不需要有意识地控制与错误侦测(Hester et al., 2005; P. Rabbitt, 2002)。O'Connell 等(2007)提出了这样的假设: ERN 虽然反映了短期内认知控制的增加,但这个控制过程并不依赖于意识,也不会引起当前试次行为的调节,而由 Pe 所代表的有意识的错误加工可能引起更广泛地行为策略的适应性调整,这就有可能在长期内引起行为的改变,也就是说, Pe 与错误后行为的调节之间的联系不能通过短期的(每一试次)行为测量显现出来,但依赖于长期行为测量(比如整个实验中反应时的变化)。上述观点不但可以解释为什么没有意识到错误的条件下也表现出了错误减慢,而且也可以解释为什么有些实验并没有发现 Pe 与错误后行为调节之间的联系。

3.3 情绪评估假说 (emotional assessment hypothesis)

Falkenstein 等(2000)等人提出 Pe 可能反映了对错误本身及其后果的情绪评估,它受到个体赋予错误主观价值高低的调节(即是否将错误看得很严重; Falkenstein, 2004; Falkenstein et al., 2000)。Overbeek 等(2005)则进一步指出:个体意识到自己犯了错误以后可能会导致情绪上必然的反应,而对这个错误事件进行情绪评估引起的神经情绪(neuroaffective)加工可能会通过 Pe 表现出来。目前支持情绪加工假说的证据主要来自两方面:一方面是 Falkenstein 等(2000)提供的实验结果,他们测查大量的被试以后发现相对于更少犯错误的被试,犯错误更多的被试有更小的 Pe 波幅(amplitude)。作者认为这可能是因为犯错误更多的被试比犯错误更少的被试将错误及其后果看得更轻(即无所谓),从而对错误及其后果赋予了较少的主观情绪色彩,在 ERP 上表现为较小的 Pe 波幅。另一方面可被看作支持情绪加工假说的实验证据来自对 Pe 的神经发生源的研究, Pe 通常被认为产生于前扣带回喙部,而情绪方面的研究又证实这一区域与情绪的加工有关(Luu, Collins, & Tucker, 2000),所以推论 Pe 可能反映了情绪评估或加工过程。

对于证据一,从 Falkenstein 等(2000)对其结果的解释我们可以推导出,他的基本假设是犯错误更少的被试在犯错误后会比犯错误更多的被

试产生更高的负性情绪。虽然许多研究者证实错误本身及其后果往往被人类视为一种令人厌恶的负性刺激(比如, Hajcak & Foti, 2008; Luu et al., 2000), 但是 Falkenstein 等(2000)的这个假设是否成立还值得商榷。因为其他研究者并没有重复出类似的结果, 而且事实上高负性情绪的被试比低负性情绪的被试有更小的 Pe 波幅(Hajcak et al., 2003; Herrmann et al., 2004)。对于证据二, 众所周知源定位分析由于其低空间分辨率, 其结果的可信度往往受到质疑, 而且无论是源定位研究还是 fMRI 研究都发现除 rACC 外, Pe 还有另外的神经发生源。

目前虽然没有更直接的证据支持情绪评估假设, 但日常生活经验告诉我们, 意识到自己犯了错误的时会对错误本身或后果产生一系列的情绪评估和反应(比如害怕受到惩罚而来带来的恐惧)。所以, 现在抛弃 Pe 的这种情绪评估的功能意义的解释目前还为时过早, 情绪评估假设是否正确需要进一步地研究。

3.4 Pe 具有与 P3 类似的功能

先前的研究发现, Pe 无论是在波形、潜伏期, 还是在头皮地形图(scalp topography)等方面都与 P3 极其相似(Falkenstein et al., 2000; Leuthold & Sommer, 1999; Nieuwenhuis et al., 2001; Overbeek et al., 2005; Shalgi et al., 2009)。P3 (P3a, P3b)是一种由刺激引起的慢正波(slow positive wave)ERP 成分, 它在动机显著性的刺激呈现后 300~600 ms 出现, 并且在顶中(centroparietal)头皮记录点达到峰值 (Overbeek et al., 2005; Ridderinkhof et al., 2009; Shalgi et al., 2009)。

Pe 与 P3 除在波形、潜伏期、头皮地形图等方面具有相似性外, 它们还可能具有相似的功能意义。尽管能诱发 P3(P3a, P3b)成分的先行条件(antecedent condition)有很多, 比如突显的、新颖的、稀少的、缺乏预期的刺激, 但这些刺激都具有一个共同的特点——它们都是动机显著性(motivational significant)的刺激(Nieuwenhuis, Aston-Jones, & Cohen, 2005), 也就是说, 这些刺激能促使个体为了获得最佳的行为成绩而发起和改变行为(Ridderinkhof et al., 2009)。而在完成某项任务中出现的错误也可视为一种动机显著性的刺激, 因而能诱发 P3 成分, 这早在 Donchin, Gratton, Dupree 和 Coles (1988)的实验中就得到

了证实: 他们发现词语分类任务中的错误能诱发出 P3 成分, 只不过这个 P3 成分延迟了大约 60 ms, 另外他们还报告如果错误反应后立即出现正确试次(错误行为得到纠正), 那么 P3 成分的波幅增大。与此类似, Pe 可以由具有动机显著性的错误所引起。已有研究发现错误越明显(动机显著)所引起的 Pe 的波幅越大(Leuthold & Sommer, 1999), 而在被试没有外显的(explicitly)识别错误的情况下会导致 Pe 波幅减小或者消失(Endrass et al., 2007; Nieuwenhuis et al., 2001; O'Connell et al., 2007; Overbeek et al., 2005)。最近, Ridderinkhof 等(2009)发现由明显的错误诱发的 Pe 的波幅而不是 ERN 的波幅与由数量稀少的目标刺激诱发的 P3 的波幅存在显著的共变(covary)关系。另外, O'Connell 等(2007)也发现 Pe 与 P3 共同受到大脑皮层唤醒程度的调节, 但是 P3 与 ERN 并不存在类似的关系。这些发现都一致地说明 Pe 与 P3 的功能意义具有相似性, 因为它们都参与了对动机显著性刺激事件的有意识加工(Ridderinkhof et al., 2009)。据此有研究者认为 Pe 与 P3 这两种 ERP 成分可能是同一个生理和功能系统的不同表现形式(Falkenstein et al., 2000; Nieuwenhuis et al., 2005; O'Connell et al., 2007; Shalgi et al., 2009), 因此对 Pe 的功能意义或许可以根据有关 P3 的理论来进行解释。

由错误反应诱发的 P3 被认为与错误反应后对任务背景的重新评价和加工系统对错误后的行为调节有关(Donchin et al., 1988; Leuthold & Sommer, 1999), 这种观点与 Donchin & Coles (1988)提出的背景刷新假说(context updating hypothesis)一致。该假说认为 P3 反映了个体对与环境背景有关的心理图式的积极巩固或修正, 如果刺激所传递的信息与心理图式的某些部分不匹配, 图式就得以刷新或修正, 对心理图式刷新或修正的程度会通过 P3 的波幅变化表现出来(Donchin & Coles, 1988; Leuthold & Sommer, 1999; Overbeek et al., 2005)。因而根据该理论, Pe 可能反映了在对错误背景的刷新(Falkenstein et al., 2000; Leuthold & Sommer, 1999; Nieuwenhuis et al., 2005; O'Connell et al., 2007; Overbeek et al., 2005)。另一种理论认为, P3 成分反映了去甲肾上腺素对信息加工的增强, 即去甲肾上腺素促进了对动机显著事件的反应(Nieuwenhuis et al.,

2005)。根据这种理论, Pe 可能反映了去甲肾上腺素对错误纠正的促进(Overbeek et al., 2005)。

正如其他研究者所注意到的那样, 尽管 Pe 与 P3 在形态、功能等方面具有相似性, 但是它们还是有所不同(Falkenstein et al., 2000; Leuthold & Sommer, 1999; Shalgi et al., 2009)。第一, Pe 不但在头皮上的分布比 P3 更靠前, 而且 Pe 的波幅并不总是在中顶叶有最大的峰值; 第二, Pe 消失的时候, 但 P3 仍然存在; 第三, P3 有通道的差异, 而 Pe 却具有跨通道的一致性。所以尽管对 Pe 的功能意义的考察可以从 P3 的角度来思考, 但是仍需注意他们的差异。

4 总结和展望

在 Pe 的神经发生源的研究方面, 前人研究发现 Pe 主要产生于 rACC, 但使用不同的研究手段(偶极子、LORETA、颅内记录、fMRI)研究其精细神经发生源的却得出了不一致的结果。在 Pe 的功能意义研究方面, 目前认为 Pe 主要反映了(a)对错误反应的有意识识别; (b)错误后个体反应策略的改变引起的对错误后行为的调节; (c)对错误及其后果的情绪评估。由于 Pe 在 P3 在波形、潜伏期、头皮地形图等方面具有相似性, 很多研究者认为 Pe 可能具有与 P3 类似的功能意义, 即 Pe 反映了对错误背景的刷新、对错误反应的评估, 或者反映了去甲肾上腺素对错误纠正的促进作用。可以看出, 目前对于 Pe 神经发生源的精细定位尚不清楚, 对 Pe 功能意义也没有形成统一的理论解释。前文中也论及过 Pe 反映的是错误加工的第二阶段, 如果不能清晰的了解 Pe 的神经发生源和功能意义就不能揭示整个错误加工机制的全貌, 所以这是一个亟待解决的问题。对于今后对 Pe 的神经发生源和功能意义的研究本文提出如下几点建议:

第一, 采用新的技术对 Pe 的神经发生源继续进行研究。由于对 Pe 源定位分析只能获得间接的实验证据, 所以将来验证 Pe 是否产生于 rACC, 更直接的证据可以通过耦合每一试次(trial-by-trial couplings)的 EEG (electroencephalogram)与 fMRI 信号来获得, 这样不但可以发挥 EEG 的高时间分辨率和 fMRI 高空间分辨率的优势, 而且二者结合后特别适合研究错误后即刻的行为调整引起的大脑的活动(Debener et al., 2005)。另外, 与通过头皮记录的 EEG 信号相比,

颅内记录可以更直接地获得大脑活动变化的信息, 但目前普遍采用的是低密度电极的颅内记录, 所以将来或许可以采用高密度电极的颅内技术来对 Pe 的神经发生源进行研究(Brázdil, Roman, Daniel, & Rektor, 2005; Brázdil et al., 2002)。无疑对 Pe 神经发生源的认识的加深将推动关于 Pe 功能意义的假说的进一步的发展和规范。

第二, 进一步探索与研究 Pe 的功能意义以形成系统的理论解释。尽管目前 Pe 的错误意识假说得到了较多的实验证据的支持, 但是目前很多研究只是简单的计算 Pe 与意识程度的相关而并没有直接探讨 Pe 波幅的变化与错误意识是否存在因果关系, 所以进行更直接的研究是揭示 Pe 功能意义的一个方向。行为适应假说目前主要集中于对错误后减慢的研究, 但我们必须注意到错误后减慢只是错误后行为调节的一个表现方面, 先前也有研究发现错误 Pe 波幅与错误相关自主性性的生理反应显著相关, 比如皮肤电的改变(Hajcak et al., 2003)、心率的下降(van Boxtel et al., 2005)等, 这说明错误后的行为调节或许会引起一系列的自主性生理变化, 所以将来的研究可以从自主性生理变化等方面来考察 Pe 的功能意义。在对 Pe 的功能意义进行深入研究后, 可以整合相关理论和实验证据, 对 Pe 的功能意义形成系统的理论解释。

第三, 关注临床人群的错误加工活动。虽然有关正常人群错误加工的 ERP 和 fMRI 研究已经提供了对 Pe 的神经机制和功能意义的初步认识, 但先前的研究已经表明, 警觉(alertness)系统受损的病人们对错误有意识侦测的能力显著下降(McAvinue, O'Keefe, McMackin, & Robertson, 2005), 而错误意识对 Pe 有明显的调节作用(Endrass et al., 2007; Nieuwenhuis et al., 2001; O'Connell et al., 2007; Shalgi et al., 2009), 所以对脑损伤、抑郁、焦虑等临床人群的研究是加深对 Pe 的神经机制和功能意义认识的有效途径。

参考文献

- 刘春雷, 张庆林. (2009). 错误加工的神经机制. *心理科学进展*, 19, 341-348.
- Brázdil, M., Roman, R., Daniel, P., & Rektor, I. (2005). Intracerebral error-related negativity in a simple Go/NoGo task. *Journal of Psychophysiology*, 19, 244-255.
- Brázdil, M., Roman, R., Falkenstein, M., Daniel, P., Jurák, P., & Rektor, I. (2002). Error processing -evidence from

- intracerebral ERP recordings. *Experimental Brain Research*, *146*, 460–466.
- Davies, P. L., Segalowitz, S. J., Dywan, J., & Pailing, P. E. (2001). Error-negativity and positivity as they relate to other ERP indices of attentional control and stimulus processing. *Biological Psychology*, *56*, 191–206.
- Debener, S., Ullsperger, M., Siegel, M., Fiehler, K., Von Cramon, D., & Engel, A. (2005). Trial-by-trial coupling of concurrent electroencephalogram and functional magnetic resonance imaging identifies the dynamics of performance monitoring. *Journal of Neuroscience*, *25*, 11730–11737.
- Donchin, E., & Coles, M. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating. *Behavioral and Brain Sciences*, *11*, 355–425.
- Donchin, E., Gratton, G., Dupree, D., & Coles, M. G. H. (1988). After a rash action: Latency and amplitude of the P300 following fast guesses. In G. C. Gathercole, M. L. Kietzman & E. Donchin (Eds.), *Neurophysiology and psychophysiology: Experimental and clinical applications* (pp. 173–188). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Endrass, T., Reuter, B., & Kathmann, N. (2007). ERP correlates of conscious error recognition: aware and unaware errors in an antisaccade task. *European Journal of Neuroscience*, *26*, 1714–1720.
- Falkenstein, M. (2004). ERP correlates of erroneous performance. In M. Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, conflicts, and the brain. Current opinions on performance monitoring* (pp. 5–14). Leipzig, Germany: Max Planck Institute of Cognitive Neuroscience.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1990). Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. In C. H. M. Brunia, A. W. K. Gaillard & A. Kok (Eds.), *Psychophysiological brain research* (Vol. 1, pp. 192–195). Tilburg, The Netherlands: Tilburg University Press.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *78*, 447–455.
- Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S., & Hohnsbein, J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biological Psychology*, *51*, 87–107.
- Fiehler, K., Ullsperger, M., & von Cramon, D. Y. (2005). Electrophysiological correlates of error correction. *Psychophysiology*, *42*, 72–82.
- Gehring, W. J., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1990). The error-related negativity: an event-related brain potential accompanying errors. *Psychophysiology*, *27*, S34.
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, *4*, 385–390.
- Gehring, W. J., & Knight, R. T. (2000). Prefrontal-cingulate interactions in action monitoring. *Nature Neuroscience*, *3*, 516–520.
- Hajcak, G., & Foti, D. (2008). Errors are aversive: defensive motivation and the error-related negativity. *Psychological Science*, *19*, 103–108.
- Hajcak, G., McDonald, N., & Simons, R. (2003). To err is autonomic: error-related brain potentials, ANS activity, and post-error compensatory behavior. *Psychophysiology*, *40*, 895–903.
- Herrmann, M. J., Römmler, J., Ehlis, A.-C., Heidrich, A., & Fallgatter, A. J. (2004). Source localization (LORETA) of the error-related-negativity (ERN/Ne) and positivity (Pe). *Cognitive Brain Research*, *20*, 294–299.
- Hester, R., Foxe, J. J., Molholm, S., Shpaner, M., & Garavan, H. (2005). Neural mechanisms involved in error processing: a comparison of errors made with and without awareness. *Neuroimage*, *27*, 602–608.
- Klein, T. A., Endrass, T., Kathmann, N., Neumann, J., von Cramon, D. Y., & Ullsperger, M. (2007). Neural correlates of error awareness. *Neuroimage*, *34*, 1774–1781.
- Leuthold, H., & Sommer, W. (1999). ERP correlates of error processing in spatial S-R compatibility tasks. *Clinical Neurophysiology*, *110*, 342–357.
- Luu, P., Collins, P., & Tucker, D. M. (2000). Mood, personality, and self-monitoring: negative affect and emotionality in relation to frontal lobe mechanisms of error monitoring. *Journal of Experimental Psychology: General*, *129*, 43–60.
- Mathewson, K. J., Dywan, J., & Segalowitz, S. J. (2005). Brain bases of error-related ERPs as influenced by age and task. *Biological Psychology*, *70*, 88–104.
- McAvinue, L., O'Keefe, F., McMackin, D., & Robertson, I. H. (2005). Impaired sustained attention and error awareness in traumatic brain injury: implications for insight. *Neuropsychological Rehabilitation*, *15*, 569–587.
- Murphy, T., Richard, M., Masaki, H., & Segalowitz, S. (2006). The effect of sleepiness on performance monitoring: I know what I am doing, but do I care? *Journal of Sleep Research*, *15*, 15–21.
- Nieuwenhuis, S., Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). Decision making, the P3, and the locus coeruleus-norepinephrine system. *Psychological Bulletin*, *131*, 510–532.
- Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K. R., Blom, J., Band, G. P. H., & Kok, A. (2001). Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors: Evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology*, *38*, 752–760.
- O'Connell, R. G., Bellgrove, M. A., Dockree, P. M., Lau, A., Hester, R., Garavan, H., et al. (2009). The neural

- correlates of deficient error awareness in attention-deficit hyperactivity disorder (ADHD). *Neuropsychologia*, 47, 1149–1159.
- O'Connell, R. G., Dockree, P. M., Bellgrove, M. A., Kelly, S. P., Hester, R., Garavan, H., et al. (2007). The role of cingulate cortex in the detection of errors with and without awareness: a high-density electrical mapping study. *European Journal of Neuroscience*, 25, 2571–2579.
- Olvet, D. M., & Hajcak, G. (2008). The error-related negativity (ERN) and psychopathology: Toward an endophenotype. *Clinical Psychology Review*, 28, 1343–1354.
- Overbeek, T., Nieuwenhuis, S., & Ridderinkhof, K. (2005). Dissociable components of error processing: On the Functional Significance of the Pe Vis-à-vis the ERN/Ne. *Journal of Psychophysiology*, 19, 319–329.
- Rabbitt, P. (2002). Consciousness is slower than you think. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, 55, 1081–1092.
- Rabbitt, P. M. A. (1966). Errors and error correction in choice-response tasks. *Journal of Experimental Psychology*, 71, 264–272.
- Ridderinkhof, K. R., Ramautar, J. R., & Wijnen, J. G. (2009). To PE or not to PE: A P3-like ERP component reflecting the processing of response errors. *Psychophysiology*, 46, 531–538.
- Scheffers, M. K., & Coles, M. G. (2000). Performance monitoring in a confusing world: error-related brain activity, judgments of response accuracy, and types of errors. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 141–151.
- Shalgi, S., Barkan, I., & Deouell, L. Y. (2009). On the positive side of error processing: error-awareness positivity revisited. *European Journal of Neuroscience*, 29, 1522–1532.
- Taylor, S. F., Martis, B., Fitzgerald, K. D., Welsh, R. C., Abelson, J. L., Liberzon, I., et al. (2006). Medial frontal cortex activity and loss-related responses to errors. *Journal of Neuroscience*, 26, 4063–4070.
- Taylor, S. F., Stern, E. R., & Gehring, W. J. (2007). Neural systems for error monitoring: recent findings and theoretical perspectives. *Neuroscientist*, 13, 160–172.
- Ullsperger, M., & von Cramon, D. Y. (2006). How does error correction differ from error signaling? An event-related potential study. *Brain Research*, 1105, 102–109.
- van Boxtel, G., van der Molen, M., & Jennings, J. (2005). Differential involvement of the anterior cingulate cortex in performance monitoring during a stop-signal task. *Journal of Psychophysiology*, 19, 1–10.
- Van Veen, V., & Carter, C. S. (2002). The timing of action-monitoring processes in the anterior cingulate cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 593–602.
- Vocat, R., Pourtois, G., & Vuilleumier, P. (2008). Unavoidable errors: a spatio-temporal analysis of time-course and neural sources of evoked potentials associated with error processing in a speeded task. *Neuropsychologia*, 46, 2545–2555.

The Neutral Generator and Functional Significance of Error Positivity

JIANG Jun; CHEN An-Tao

(School of Psychology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Error positivity (Pe) refers to positive deflection of event-related potentials approximately 200–600 ms after an errant response. Researches in this aspect will help reveal the mechanisms of human error processing. Current evidence shows that Pe mainly arises from the rostral anterior cingulate cortex, but different studies fail to reach a consensus on its precise neutral generator. Hypotheses of functional significance of Pe include error awareness, behaviour adaptation, and emotional assessment. When interpreted in light with P3-related theories, Pe may reflect updating of the error context. However, each of these interpretations have been questioned and challenged by some researchers. In view of this, this paper summarizes and analyzes some problems of the existing studies, and offers some suggestions regarding the neutral generator and functional significance of Pe for further study.

Key words: error positivity, error awareness, behaviour adaptation, emotional assessment, P3