

错误后减慢效应及其适应性讨论

叶鸿铭

西南大学心理学部认知与人格教育部重点实验室, 重庆

收稿日期: 2024年2月20日; 录用日期: 2024年4月17日; 发布日期: 2024年4月29日

摘要

错误后减慢效应是指个体在犯错误后降低自身反应速度的现象, 是错误发生后较为稳定出现的情况。现有理论在错误后减慢效应的适应性上存在争议, 适应性理论认为错误后减慢现象是基于速度-准确性权衡的受控的加工过程, 对后续行为有促进作用, 而非适应性理论认为该现象并不是通过主动控制产生的, 而是一种被动过程, 对后续行为存在干扰, 综合性的理论则认为错误调整进程中不同时间阶段下错误后减慢的适应性存在差异。为了更好地解决有关适应性的争议问题以及更全面地揭示错误后调整的加工机制, 未来的研究应该以更精确的时间尺度来衡量错误后的加工进程, 将更多元的分析技术引入错误领域, 同时关注其他因素, 如记忆和压力等对于错误加工的影响。

关键词

错误后减慢效应, 试次间间隔, 适应性

Discussion on Post-Error Slowing Effect and Its Adaptability

Hongming Ye

Key Laboratory of Cognition and Personality, Ministry of Education, Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing

Received: Feb. 20th, 2024; accepted: Apr. 17th, 2024; published: Apr. 29th, 2024

Abstract

Post-error slowing effect refers to the phenomenon that individuals reduce their own reaction speed after making mistakes, which is a stable situation after the occurrence of mistakes. Existing theories are controversial on the adaptability of the post-error slowing effect. The adaptability theories believe that the post-error slowing is a controlled processing process based on the speed-accuracy tradeoff, which can promote the subsequent behavior, while the non-adaptability theo-

ries believe that the phenomenon is not generated by self-control, but is a passive process, which interferes with the subsequent behavior. The comprehensive theory holds that the adaptability of post-error slowing is different in different time stages of the error adjustment process. In order to better solve the controversial issue of adaptability and reveal the post-error adjustment processing mechanism in a more comprehensive way, future studies should measure the post-error processing process with a more accurate time scale, introduce more diversified analysis techniques into the field of errors, and pay attention to the influence of other factors, such as memory and stress, on error processing.

Keywords

Post-Error Slowing, ITI, Adaptability

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在犯错后,人们通常会放慢自己的速度,以此对错误进行反应或调整自己来精进之后的任务表现避免再次犯错。这种现象就是错误后减慢效应(post-error slowing, PES),具体表现为在错误反应之后,紧接着的正确试次的反应时相比于正确反应后的反应时显著更长(Rabbitt, 1966; Laming, 1968)。PES 已经在多种不同的任务情景下被观测到,例如 flanker 任务(Debenet et al., 2005), Stroop 任务(Gehring & Fencsik, 2001), Simon 任务(King et al., 2010)还有分类任务(Jentsch & Dudschig, 2009), PES 是错误发生后较为稳定的现象。然而,这种错误后反应放缓的行为能否提升任务表现时至今日仍然存在争议,即关于 PES 的适应性仍然有进一步研究和讨论的空间。因此本文会对错误后减慢效应的相关理论进行梳理,总结不同理论关于 PES 适应性的结果,在此基础上为之后的错误研究提出展望。

2. 错误后减慢相关理论

现有的研究理论从不同的视角对 PES 的产生原因进行了解释,其中有观点认为 PES 与作用在错误发出后的认知控制机制相关(Botvinick et al., 2001)。也有研究发现 PES 可能反映的是一种朝向反应(Notebaert et al., 2009)。此外也有证据表明 PES 可能与动作抑制相关(Marco-Pallarés et al., 2008)。接下来将对这几种较为主要的 PES 理论进行梳理。

2.1. 认知控制理论

PES 被认为是一种补偿性的控制机制,能够提升后续的任务表现(Gehring & Fencsik, 2001)。同时 PES 能够让个体有更多的时间去执行控制反应(Ridderinkhof et al., 2004)。认知控制理论认为错误后的调整是一种自上而下的调整,这种调整是由行为监控系统发出的,与 pMFC 脑区相关。fMRI 研究的证据表明 pMFC 脑区的活动与 PES 相关(Garavan et al., 2002; Kerns et al., 2004; Klein et al., 2007; Chevrier & Schachar, 2010),为认知控制理论的观点提供了支持。同时,EEG 方面的研究发现错误相关负波(error-related negativity, ERN)能够对 PES 进行预测(Gehring et al., 2016; Debenet et al., 2005; Wessel & Ullsperger, 2011),ERN 是反映错误监控的 ERP 成分。然而,有一些研究没有发现 pMFC 脑区与 PES 的相关(Gehring & Fencsik, 2001),而且一些研究发现 PES 是与错误正波(error positivity, Pe)相关而不是与 ERN 相关(Nieuwenhuis et al.,

2001; Hajcak et al., 2003)。这些矛盾的结果可能是因为 pMFC 的活动并不是直接影响 PES，有研究发现在错误试次中，pMFC 通过降低动作系统的活跃性来影响 PES (Danielmeier et al., 2011)。以上这些证据表明无论是通过直接还是间接的方式，PES 都与行为监控系统的活动相关，因此认知控制理论认为 PES 的出现反映了认知控制过程的执行。

2.2. 冲突监控理论

冲突监控理论认为个体往往在错误后，尤其是快速错误后，对刺激信息的加工仍在继续，导致即使是在错误后，仍然能够引起正确反应的激活。于是此时就形成了正确激活和错误反应之间的高冲突 (Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen, 2001)。同时，该理论提到前部扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)对冲突情境的监控，所以在错误后的高冲突情境中，ACC 的激活程度提高，导致认知控制水平的提升。高的认知控制水平促使个体采用更保守的速度——准确性权衡策略，即通过降低反应速度来提高错误后的执行表现。

2.3. 失匹配理论

失匹配理论(Coles, Scheffers, & Holroyd, 2001)认为错误加工系统中存在一个比较器，主要也是通过 ACC 脑区对预期执行的反应和实际执行的反应进行比较，如果存在不匹配的情况，则会产生错误相关负波 ERN。该理论中不匹配情境下 ERN 的产生，表明 ERN 在错误加工系统中更多地反映错误监测过程。ERN 的波幅与 PES 也存在相关，Debener 等人在单试次水平上发现更高的 ERN 波幅通常伴随着错误后更长的反应时，表明 ERN 波幅能够显著预测错误后减慢的程度(Debener et al., 2005)，这与 Gehring 等人在被试内水平上所发现的现象相一致。

2.4. 抑制理论

动作抑制理论认为错误的发生会导致错误后试次选择性抑制的增加(Ridderinkhof, 2002)，证据表明右半侧脑神经网络，包括 pre-SMA、IFC 和 STN 区的活动都与 PES 相关。该神经网络与动作停止或减慢相关(Aron et al., 2007)，因此认为 PES 与动作抑制相关。较早支持 PES 动作抑制理论的 EEG 相关证据是研究发现 PES 与增加的 beta 频带能量相关，beta 频带能量的增加被认为反映了动作抑制过程(Marco-Pallarés et al., 2008; Swann et al., 2009)。这些证据表明动作抑制对于 PES 的产生有很重要的作用，但这并不能排除认知控制或是朝向反应在其中的影响，不同的因素可能共同发挥作用。

3. 错误后减慢效应的适应性

前文提到，现如今关于错误后减慢效应如何影响后续的任务表现仍然存在争议，一部分观点认为 PES 具有适应性，能提升后续的表现，另一部分观点则认为 PES 具有非适应性，持相反的态度。在实际研究中，反映后续任务表现的指标通常是错误后正确率(post-error accuracy)，如果 PES 伴随错误后正确率的提高出现，则认为 PES 具有适应性，反之则具有非适应性。

3.1. 适应性的错误后减慢效应

与探究 PES 成因的理论相似，讨论 PES 的适应性的时候不同的理论也从不同的视角进行了研究。它们普遍认为错误后减慢是一种策略性的过程，个体在犯错后，会倾向通过降低反应速度来换取正确率，即采用一种更加保守的速度 - 准确性权衡。早期的理论围绕感觉系统或是导致行为发出的决策过程进行，大多数的理论都可以被归类为感觉输入系统或是动作输出系统，很多理论也融合了这些观点，认为是各个系统和因素的相互作用导致了适应性的 PES 的产生。虽然各个理论角度存在不同，但也都几乎都认为

PES 反映的是一种由错误诱发的, 受控的加工过程。

最早与感觉输入系统有关的理论来自于 Laming 1968 年的研究(Laming, 1968)。Laming 认为个体会不间断地从呈现的刺激中提取信息, 并由此得到感觉信息。但如果个体在任务相关刺激呈现前就开始进行信息收集, 那么这一过程会与任务相关刺激所诱发的决策过程产生冲突, 最终导致错误的产生。然而错误后个体对于信息的提取会出现延迟, 这反而避免了过早进行的信息收集, 从而减少了错误行为。因此错误后对于信息提取的延迟(即 PES), 让个体能够更好地规避错误, 表现了 PES 的适应性。后续的很多研究对该理论进行了佐证, 例如在利用人脸图片作为材料的研究中, 发现对于脸部信息敏感的早期大脑感觉皮层 FFA (fusiform face area)在错误试次中有更大的激活, 表明个体可能对信息的过早收集而导致错误(King et al., 2010)。也有研究者发现错误试次后的 P1 成分的波幅在较短的刺激反应间隔(response-stimulus intervals, RSIs)下显著小于正确试次(Buzzell et al., 2017; Li et al., 2021), P1 反映了空间注意对视觉加工的早期影响(Hillyard, Vogel, & Luck, 1998), P1 波幅的减少被视作为视觉感受性加工减损的早期指标(Butler et al., 2001, 2005; Haenschel et al., 2007; Schechter et al., 2005)。Beatty 等人在速度反应任务中也发现了相同的效应(Beatty et al., 2018)。即错误发生后, 如果给予个体进行错误加工的时间很短, 那么个体对刺激的感受性将减弱, 证明了错误后个体对感受性信息存在提取延迟的情况。

与动作输出系统相关的理论认为, 错误的产生导致了与反应关联的动作加工过程适应性的变化。这些变化大多体现在个体在错误后对反应行为的改变上, 所以大部分的动作理论都关联于错误后减慢效应。如上文提到的抑制理论表明了 PES 与动作抑制之间的相关关系, 行为和神经层面的结果都表明在错误后减慢的过程中包括了动作系统的抑制。而 Ridderinkhof 等人的研究又表示更大的 PES 往往伴随着个体受任务无关刺激冲突干扰影响更小(Ridderinkhof, Span, & van der Molen, 2002), 这样就可以把 PES 理解为适应性的策略调整, 个体在错误后通过抑制不恰当反应的激活(该过程表现在错误后减慢上), 降低了任务无关刺激对自己的影响, 从而优化了之后的任务执行表现。

无论是从感觉系统还是动作系统角度对错误后减慢效应进行探讨, 都比较单一地只考虑了一个维度对错误后认知系统的影响。事实上, 人们在错误发生后可能会进行更为全面和综合的调整。近年来, 有研究开始全面地考察感觉系统、动作系统、决策过程等对个体错误后行为调整的影响。前文提到的错误后的速度—准确性权衡的调整, 就是通过综合调节感受性、决策和动作过程来实现的。即通过提高做出动作反应所需的感受性信息量和决策程度来提升动作反应阈限, 以一种更为谨慎的态度来达到提高任务表现的目的。一些研究发现为这种观点提供了证据支撑。例如, 人们普遍认为前额叶皮层(PFC)促进了对行为更为谨慎的控制(Miller, 2000; Miller & Cohen, 2001), 而 PFC 的这种调节作用是通过与 STN 相互作用来实现的。mPFC 被认为可以根据对内源性或外源性冲突的评估对行为进行控制(Botvinick et al., 2001; Yeung, Botvinick, & Cohen, 2004), STN 则直接接收来自 mPFC 的信息, 然后能够形成一种直接通路从而快速地调节皮质—纹状体的加工, 从而促进更为谨慎的反应过程(Frank, 2006; Nambu et al., 2002)。基于基底神经节在决策形成中的功能计算模型, 研究者认为 mPFC 影响了 STN 的加工过程, 从而调节了反应冲突期间的决策阈限(Frank, 2006)。Cavanagh 等人通过测量 mPFC 脑区的 Theta 频带能量, 发现 mPFC 活跃度的增加能够预测决策阈限的提高, 而对 STN 进行功能抑制则会得到相反的效应(Cavanagh et al., 2011), 证明了 mPFC 和 STN 在冲突控制中的相互作用以及它们以改变决策阈限来控制冲突后行为的调控方式。Hanks 等人的研究也证明了由后顶叶、外侧前额叶和皮层下脑区组成的脑网络中感觉信息的整合会受到动物行为状态的影响, 以此来调整决策速度和准确性(Hanks et al., 2014; Heitz & Schall, 2012)。Purcell 等人对猴子外侧顶内沟皮质(LIP)单个神经元的反应进行记录, 该区域神经元活动反映的是与证据积累和决策阈限相关的信号。结果表明错误发生后感受敏感性的降低以及决策阈限的提高, 并且这两个因素都是通过决策形成的动态变化来实现的, 表明错误发生后, 神经反应的动态变化通过延长决策时间来实现快速的决策调整, 以此来减

准确性降低(Purcell & Kiani, 2016)。在行为层面, 由 Dutilh 等人(2011)引入的漂移扩散模型的数据为上述成果提供了支撑, 该模型能够将反应时分布建模, 并在错误后和正确后试次之间进行比较, 分离连续的错误后减慢心理加工过程, 以此来推断导致反应发出的潜在性加工变化(Wessel, 2018)。

3.2. 非适应性的错误后减慢效应

与适应性的理论相反, 在这些理论的研究中仍然会出现 PES, 只是此时错误后减慢效应不再被当作是一种认知控制下的, 适应性的调控策略, 不再被认为是速度 - 准确性权衡下的产物。对此, 也有一些非适应性理论作出了解释。

其中较为典型的是朝向理论(Notebaert et al., 2009), 该理论认为错误后减慢产生并不是因为错误本身, 而是因为错误相对于正确属于小概率事件, 这就让错误的性质变为了“非预期事件”, 个体面对非预期事件的发生, 会消耗更多的认知资源和注意到这种突发的新异刺激中去, 这就使得这些认知资源需要花费更多的时间回到后续任务中, 产生了错误后减慢。Notebaert 等人通过改变刺激的亮度来控制实验的正确率(分别有 35%, 55%, 75%三种情况), 发现当正确率较低(即正确作为非预期事件出现)时, 出现了正确后减慢的情况。为了进一步研究非期望事件对个体后续试次的影响, 他们引入了两种与任务无关的声音刺激, 一种声音在 75%的试次中出现, 另一种声音在 25%的试次中出现, 结果表明个体的反应时在占比 25%的声音出现后显著慢于 75%的声音出现后的反应时。因此, Notebaert 等人认为 PES 只是个体对非预期事件过度关注的副产物, 而非策略性行为。关于该理论的证据支撑, 前人曾有研究发现非预期事件会诱发 N2 和 P3 的混合波, 主要由 N2b (Folstein & Van Petten, 2007)和 P3a (Polich, 2007)组成。其中 P3a 成分主要发生于前额部, 反映的是个体将被动的注意转换成“朝向”注意, 与注意朝向和新异刺激加工相关(Danielmeier et al., 2011)。由错误诱发的 ERN 和 N2b 是分布位置相同的负性波, 研究者推测它们在功能上具有相似性(van Veen et al., 2004)。Wessel 等人结合 flanker 任务和 oddball 范式对该理论进行验证, 结果表明源自中部扣带回的前部 aMCC (anterior midcingulate cortex)的源信号解释了与错误有关的皮层活动, 也在很大程度上解释了与非期望事件有关的皮层活动。并且通过 fMRI 的数据发现, 错误和非期望事件相关的处理都与广泛的皮层和皮层下区域的活动有关, 例如 pre-SMA, 背侧和腹外侧的 PFC 等(Wessel et al., 2012)。

此外, Jentzsch 和 Dudschig (2009)通过改变试次间间隔(the duration of intertrial interval, ITI)发现, 当 ITI 较短, 即个体犯错后进行错误后调整的时间不充足时, 将会导致较差的错误后正确率以及 PES 的增加。这一结果与适应性理论认为 PES 反映错误后适应性调控以及 PES 与错误后正确率增加相关的观点相悖。但他们并没有将这一结果与朝向反应联系起来, 而是提出了瓶颈理论(bottleneck account), 认为错误加工是一种资源紧张的加工过程, 短 ITI 情况下资源被错误加工占据, 导致更大的 PES 和错误后正确率的降低。

3.3. 综合的错误后减慢效应

近年来越来越多的理论与研究发现 PES 的出现可能不绝对是适应性或非适应性的, 而是随着错误加工的具体情况改变而变化。Purcell 和 Kiani (2016)的研究发现, 人类和猴子在进行知觉任务时都出现了 PES 但错误后正确率没有变化, 这说明两物种都出现了错误后减慢效应, 但并不能归因于适应性的速度 - 准确性平衡。于是作者利用漂移扩散模型(Drift-diffusion models, DDM)分析 PES 的产生原因, 发现是增加的决策边界和降低的知觉敏感性共同导致了 PES, 而降低的知觉敏感性抵消了增加的决策边界会出现的适应性结果(例如错误后正确率增加)。因此在该研究中, PES 的适应性是综合的, 降低的知觉敏感性对于正在进行的任务来说是非适应性的, 然而增加的决策边界又是适应性的。Ullsperger 和 Danielmeier

(2016)认为 Notebaert 等人提出的朝向理论能够解释 Purcell 研究中知觉敏感性降低的结果:除了导致反应时间的变慢,朝向反应同样会引发唤醒增加,能够中断正在进行的加工过程并促进新加工的进行,所以朝向反应会导致选择性注意从当前的刺激中脱离,造成知觉敏感性的降低,但随着时间推移,朝向反应将会促进新加工的进行。因此 Ullsperger 等认为,在错误发生后会出现导致知觉敏感性降低和动作抑制的朝向反应,而之后才会发生针对任务的适应性的调整(例如选择性注意的增强)。所以当 ITI 较短个体来不及进行适应性的调整时,此时的 PES 会增大并且与降低或不变的错误后正确率相关,这与瓶颈理论的观点相似,但随着时间的增加,个体能够充分针对任务刺激进行调整时,这时的 PES 又与增加的错误后正确率相关,体现出适应性。

Wessel (2018)结合前人的理论研究,提出了适应性朝向理论(adaptive orienting theory)。该理论认为在错误会导致个体产生一系列反应,主要分为自动的加工过程以及受控的加工过程。自动的加工过程包括错误后立即引发的对正在进行的动作以及认知活动的抑制,这种抑制能够为个体节省出更多的认知资源,从而促进注意资源对于错误源的定位与识别,这个过程是针对非预期事件的调整,具有一般性。在错误源的定位与识别完成后,个体会进行受控的加工过程,其中包括任务重构、知觉重调、策略性的错误后减慢等,这些调控过程是针对错误进行的,具有特异性,同时也会促进后续的行为表现,提高错误后正确率,具有适应性。该理论中 PES 综合的适应性的体现与 Ullsperger 的理论相似,试次间间隔 ITI 在其中有着关键作用。Wessel 一共提出了 ITI 的三种情况对应不同的 PES 的产生原因及其适应性:第一种是 ITI 很短的时候,这种情况下个体还正在进行自动的加工阶段,即注意资源正在定位与识别错误源,ITI 过短导致下一试次刺激的呈现中断了这一过程,这时 PES 产生的原因是对当前任务的抑制与注意朝向错误源的需要,还没有来得及进行适应性的调整,所以此时的 PES 表现为非适应性。第二种情况是当 ITI 持续时间中等时,此时个体已经完成了对错误源的识别与定位,正在进行适应性的调整,此时下一刺激的呈现会中断适应性的调整过程,这时 PES 产生的原因为注意重新定向回正在执行的任务的需要的需要,因为此时的适应性过程并没有结束, PES 也表现为非适应性。第三种情况为 ITI 足够长,个体能够完全完成错误源的定位和适应性的加工过程,这时的 PES 就是策略性的 PES,即速度—准确性权衡下的错误后减慢,该情况下错误后的正确率得到提高, PES 体现出适应性。Li et al. (2021)等的研究发现,当试次间隔为 200 ms 时,错误诱发更大的 beta 频带能量以及更小的 P1 波幅,这表明错误后行为被抑制,感觉加工也减弱了。当试次间隔为 1000 ms 时,错误后的 alpha 频带和 beta 频带能量都更小,同时 P1 波幅不受影响,这表明间隔较长时,错误后有注意调整,并且不再有行为抑制,感觉加工也不受影响。这一结果表明 ITI 较长时 PES 表现为适应性,反之表现为非适应性。Gjorgieva 和 Egner (2022)的研究也发现在长时 ITI 的情况下,个体在错误后能更好地记忆目标刺激,这表明有充分时间进行错误加工时,个体可以进行适应性的调整,同样佐证了 Wessel 的理论。

4. 总结和展望

错误后减慢效应 PES 作为错误后稳定出现的现象,在错误领域被广泛讨论和研究。本文从 PES 的产生机制和 PES 的适应性两方面对该效应进行探讨,着重梳理了关于 PES 适应性理论的发展。不难看出对于 PES 是否促进后续行为表现这一问题还存在诸多讨论,为了更全面细致地了解 PES 所反映的错误调整机制,现为未来的研究提供以下几点参考。

第一,精细化试次间间隔时间对 PES 适应性的影响。前文提到的 Li et al. (2021)与 Gjorgieva 和 Egner (2022)的研究中对于试次间隔时间的操控都是较为粗略地分为短、中、长几种情况,没有在连续的时间维度或是更精细的范围内对 PES 的适应性进行讨论。综合性的理论都普遍认为随着时间推移, PES 由非适应性向适应性转变,那么对于不同任务情境下这种转变的具体时间进程的探究是很有必要的。因此,未

来的研究可以更精细化地操纵试次间隔的变化,有效推动解决错误加工中适应性问题的争议。

第二,将更多元的认知神经技术分析应用到错误研究领域。除了已经被广泛利用的事件相关电位分析等技术,近年来很多研究者尝试将更丰富的分析技术应用到错误后调整领域。例如, Li 等(2022)利用多体素模式分析 MVPA 发现错误早期阶段进行的是一般性调整,而随后进入特异性调整阶段。Nash 等(2023)首次将微状态分析引入了错误研究中,发现错误反应有 4 种区分明显的状态,分别为前错误阶段、与 ERN 相关的阶段、与 Pe 相关的阶段以及和一个后期正成分相关的阶段,更加直观且系统地描述了错误后具体加工阶段的特征。未来的错误研究可以利用不同的分析方法,从多个角度更加精确地探究个体错误后的加工机制。

第三,关注其他因素与错误的相互影响。错误引发的错误调整不单单受到错误本身的影响。例如很多研究发现工作记忆的能力与错误后调整呈正相关(Li et al., 2020; Wessel et al., 2022)。近期的一项研究也表明压力对于错误后调整存在不利影响,受到压力的个体更少地能够意识到错误以及识别错误,这导致他们不能够很好地进行错误后的调整,从而导致非适应性的结果(Hu et al., 2023)。未来的研究除了要关注错误本身带来的结果,还要更全面地考虑到错误涉及到的其他因素,提高错误研究的生态性。

参考文献

- Aron, A. R., Behrens, T. E., Smith, S., Frank, M. J., & Poldrack, R. A. (2007). Triangulating a Cognitive Control Network Using Diffusion-Weighted Magnetic Resonance Imaging (MRI) and Functional MRI. *The Journal of Neuroscience*, 27, 3743-3752. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0519-07.2007>
- Beatty, P. J., Buzzell, G. A., Roberts, D. M., & McDonald, C. G. (2018). Speeded Response Errors and the Error-Related Negativity Modulate Early Sensory Processing. *Neuroimage*, 183, 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.08.009>
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict Monitoring and Cognitive Control. *Psychological review*, 108, 624-652. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.3.624>
- Butler, P. D., Schechter, I., Zemon, V., Schwartz, S. G., Greenstein, V. C., Gordon, J., Javitt, D. C. et al. (2001). Dysfunction of Early-Stage Visual Processing in Schizophrenia. *American Journal of Psychiatry*, 158, 1126-1133. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.158.7.1126>
- Butler, P. D., Zemon, V., Schechter, I., Saperstein, A. M., Hoptman, M. J., Lim, K. O., Javitt, D. C. et al. (2005). Early-Stage Visual Processing and Cortical Amplification Deficits in Schizophrenia. *Archives of general psychiatry*, 62, 495-504. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.62.5.495>
- Buzzell, G. A., Beatty, P. J., Paquette, N. A., Roberts, D. M., & McDonald, C. G. (2017). Error-Induced Blindness: Error Detection Leads to Impaired Sensory Processing and Lower Accuracy at Short Response-Stimulus Intervals. *Journal of Neuroscience*, 37, 2895-2903. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1202-16.2017>
- Cavanagh, J. F., Wiecki, T. V., Cohen, M. X., Figueroa, C. M., Samanta, J., Sherman, S. J., & Frank, M. J. (2011). Subthalamic Nucleus Stimulation Reverses Medial Prefrontal Influence over Decision Threshold. *Nature Neuroscience*, 14, 1462-1467. <https://doi.org/10.1038/nn.2925>
- Chevrier, A., & Schachar, R. J. (2010). Error Detection in the Stop Signal Task. *Neuroimage*, 53, 664-673. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.06.056>
- Coles, M. G., Scheffers, M. K., & Holroyd, C. B. (2001). Why Is There an ERN/Ne on Correct Trials? Response Representations, Stimulus-Related Components, and the Theory of Error-Processing. *Biological Psychology*, 56, 173-189. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(01\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(01)00076-X)
- Danielmeier, C., Eichele, T., Forstmann, B. U., Tittgemeyer, M., & Ullsperger, M. (2011). Posterior Medial Frontal Cortex Activity Predicts Post-Error Adaptations in Task-Related Visual and Motor Areas. *Journal of Neuroscience*, 31, 1780-1789. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4299-10.2011>
- Debener, S., Ullsperger, M., Siegel, M., Fiehler, K., von Cramon, D. Y., & Engel, A. K. (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. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3286-05.2005>
- Dutilh, G., Vandekerckhove, J., Forstmann, B. U., Keuleers, E., Brysbaert, M., & Wagenmakers, E. J. (2011). Testing Theories of Post-Error Slowing. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74, 454-465. <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0243-2>

- Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2007). Influence of Cognitive Control and Mismatch on the N2 Component of the ERP: A Review. *Psychophysiology*, 45, 152-170. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2007.00602.x>
- Frank, M. J. (2006). Hold Your Horses: A Dynamic Computational Role for the Subthalamic Nucleus in Decision Making. *Neural Networks*, 19, 1120-1136. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2006.03.006>
- Garavan, H. et al. (2002). Dissociable Executive Functions in the Dynamic Control of Behavior: Inhibition, Error Detection, and Correction. *Neuroimage*, 17, 1820-1829. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1326>
- Gehring, W. J., & Fencsik, D. E. (2001). Functions of the Medial Frontal Cortex in the Processing of Conflict and Errors. *Journal of Neuroscience*, 21, 9430-9437. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.21-23-09430.2001>
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (2016). A Neural System for Error Detection and Compensation. *Psychological Science*, 4, 385-390. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1993.tb00586.x>
- Gjorgieva, E., & Egner, T. (2022). Learning from Mistakes: Incidental Encoding Reveals a Time-Dependent Enhancement of Posterror Target Processing. *Journal of Experimental Psychology: General*, 151, 718-730. <https://doi.org/10.1037/xge0001105>
- Haenschel, C., Bittner, R. A., Haertling, F., Rotarska-Jagiela, A., Maurer, K., Singer, W., & Linden, D. E. (2007). Contribution of Impaired Early-Stage Visual Processing to Working Memory Dysfunction in Adolescents with Schizophrenia: A Study with Event-Related Potentials and Functional Magnetic Resonance Imaging. *Archives of General Psychiatry*, 64, 1229-1240. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.64.11.1229>
- Hajcak, G., McDonald, N., & Simons, R. F. (2003). To Err Is Autonomic: Error-Related Brain Potentials, ANS Activity, and Post-Error Compensatory Behavior. *Psychophysiology*, 40, 895-903. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.00107>
- Hanks, T., Kiani, R., & Shadlen, M. N. (2014). A Neural Mechanism of Speed-Accuracy Tradeoff in Macaque Area LIP. *eLife*, 3, e02260. <https://doi.org/10.7554/eLife.02260.011>
- Heitz, R. P., & Schall, J. D. (2012). Neural Mechanisms of Speed-Accuracy Tradeoff. *Neuron*, 76, 616-628. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.08.030>
- Hillyard, S. A., Vogel, E. K., & Luck, S. J. (1998). Sensory Gain Control (Amplification) as a Mechanism of Selective Attention: Electrophysiological and Neuroimaging Evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 353, 1257-1270. <https://doi.org/10.1098/rstb.1998.0281>
- Hu, N., Long, Q., Wang, X. et al. (2023). Neural and Behavioral Measures of Stress-induced Impairment in Error Awareness and Post-Error Adjustment. *Neuroscience Bulletin*. <https://doi.org/10.1007/s12264-023-01154-2>
- Jentsch, I., & Dudschig, C. (2009). Short Article: Why Do We Slow Down after an Error? Mechanisms Underlying the Effects of Posterror Slowing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62, 209-218. <https://doi.org/10.1080/17470210802240655>
- Kerns, J. G., Cohen, J. D., MacDonald, A. W., Cho, R. Y., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2004). Anterior Cingulate Conflict Monitoring and Adjustments in Control. *Science*, 303, 1023-1026. <https://doi.org/10.1126/science.1089910>
- King, J. A., Korb, F. M., von Cramon, D. Y., & Ullsperger, M. (2010). Post-Error Behavioral Adjustments Are Facilitated by Activation and Suppression of Task-Relevant and Task-Irrelevant Information Processing. *Journal of Neuroscience*, 30, 12759-12769. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3274-10.2010>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.11.014>
- Laming, D. R. J. (1968). *Information Theory of Choice-Reaction Times*. Academic Press.
- Li, Q., Hu, N., Li, Y., Long, Q., Gu, Y., Tang, Y., & Chen, A. (2021). Error-Induced Adaptability: Behavioral and Neural Dynamics of Response-Stimulus Interval Modulations on Posterror Slowing. *Journal of Experimental Psychology: General*, 150, 851-863. <https://doi.org/10.1037/xge0000978>
- Li, Q., Long, Q., Hu, N., Tang, Y., & Chen, A. (2020). N-Back Task Training Helps to Improve Post-error Performance. *Frontiers in Psychology*, 11, Article 370. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00370>
- Li, Q., Wang, J., Li, Z., & Chen, A. (2022). Decoding the Specificity of Post-Error Adjustments Using EEG-Based Multivariate Pattern Analysis. *The Journal of Neuroscience*, 42, 6800-6809. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0590-22.2022>
- Marco-Pallarés, J., Camara, E., Münte, T. F., & Rodríguez-Fornells, A. (2008). Neural Mechanisms Underlying Adaptive Actions after Slips. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 1595-1610. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20117>
- Miller, E. K. (2000). The Prefrontal Cortex and Cognitive Control. *Nature Reviews Neuroscience*, 1, 59-65. <https://doi.org/10.1038/35036228>
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An Integrative Theory of Prefrontal Cortex Function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 167-202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
- Nambu, A., Tokuno, H., & Takada, M. (2002). Functional Significance of the Cortico-Subthalamo-Pallidal 'Hyperdirect'

- Pathway. *Neuroscience Research*, 43, 111-117. [https://doi.org/10.1016/S0168-0102\(02\)00027-5](https://doi.org/10.1016/S0168-0102(02)00027-5)
- Nash, K., Leota, J., Kleinert, T., & Hayward, D. A. (2023). Anxiety Disrupts Performance Monitoring: Integrating Behavioral, Event-Related Potential, EEG Microstate, and sLORETA Evidence. *Cerebral Cortex*, 33, 3787-3802. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac307>
- Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K. R., Blom, J., Band, G. P., & Kok, A. (2001). Error-Related Brain Potentials Are Differentially Related to Awareness of Response Errors: Evidence from an Antisaccade Task. *Psychophysiology*, 38, 752-760. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3850752>
- Notebaert, W., Houtman, F., Opstal, F. V., Gevers, W., Fias, W., & Verguts, T. (2009). Post-Error Slowing: An Orienting Account. *Cognition*, 111, 275-279. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.02.002>
- Polich, J. (2007). Updating P300: An Integrative Theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118, 2128-2148. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019>
- Purcell, B. A., & Kiani, R. (2016). Neural Mechanisms of Post-Error Adjustments of Decision Policy in Parietal Cortex. *Neuron*, 89, 658-671. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.12.027>
- Rabbitt, P. M. (1966). Errors and Error Correction in Choice-Response Tasks. *Journal of Experimental Psychology*, 71, 264-272. <https://doi.org/10.1037/h0022853>
- Ridderinkhof, K. R. (2002). Activation and Suppression in Conflict Tasks: Empirical Clarification through Distributional Analyses. In W. Prinz, & B. Hommel (Eds.), *Common Mechanisms in Perception and Action: Attention and Performance XIX* (pp. 494-519). Oxford Academic Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198510697.003.0024>
- Ridderinkhof, K. R., Span, M. M., & van der Molen, M. W. (2002). Perseverative Behavior and Adaptive Control in Older Adults: Performance Monitoring, Rule Induction, and Set Shifting. *Brain and Cognition*, 49, 382-401. <https://doi.org/10.1006/brcg.2001.1506>
- Ridderinkhof, K. R., van den Wildenberg, W. P., Wijnen, J., & Burle, B. (2004). Response Inhibition in Conflict Tasks Is Revealed in Delta Plots. In M. I. Posner (Ed.), *Cognitive Neuroscience of Attention* (pp. 369-377). The Guilford Press.
- Schechter, I., Butler, P. D., Zemon, V. M., Revheim, N., Saperstein, A. M., Jalbrzikowski, M., Javitt, D. C. et al. (2005). Impairments in Generation of Early-Stage Transient Visual Evoked Potentials to Magno- and Parvocellular-Selective Stimuli in Schizophrenia. *Clinical Neurophysiology*, 116, 2204-2215. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.06.013>
- Swann, N., Tandon, N., Canolty, R., Ellmore, T. M., McEvoy, L. K., Dreyer, S., Aron, A. R. et al. (2009). Intracranial EEG Reveals a Time- and Frequency-Specific Role for the Right Inferior Frontal Gyrus and Primary Motor Cortex in Stopping Initiated Responses. *The Journal of Neuroscience*, 29, 12675-12685. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3359-09.2009>
- Ullsperger, M., & Danielmeier, C. (2016). Reducing Speed and Sight: How Adaptive Is Post-Error Slowing? *Neuron*, 89, 430-432. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.01.035>
- van Veen, V., Holroyd, C. B., Cohen, J. D., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2004). Errors without Conflict: Implications for Performance Monitoring Theories of Anterior Cingulate Cortex. *Brain and Cognition*, 56, 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.06.007>
- Wessel, J. R. (2018). An Adaptive Orienting Theory of Error Processing. *Psychophysiology*, 55, e13041. <https://doi.org/10.1111/psyp.13041>
- Wessel, J. R., & Ullsperger, M. (2011). Selection of Independent Components Representing Event-Related Brain Potentials: A Data-Driven Approach for Greater Objectivity. *Neuroimage*, 54, 2105-2115. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.033>
- Wessel, J. R., Danielmeier, C., Morton, J. B., & Ullsperger, M. (2012). Surprise and Error: Common Neuronal Architecture for the Processing of Errors and Novelty. *Journal of Neuroscience*, 32, 7528-7537. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6352-11.2012>
- Wessel, J. R., Jiang, J., & Stolley, J. J. (2022). Action Errors Impair Active Working Memory Maintenance. *Journal of Experimental Psychology: General*, 151, 1325-1340. <https://doi.org/10.1037/xge0001142>
- Yeung, N., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2004). The Neural Basis of Error Detection: Conflict Monitoring and the Error-Related Negativity. *Psychological Review*, 111, 931-959. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.111.4.931>