

复杂认知活动中 结果评价的脑机制

买晓琴 著



科学出版社

复杂认知活动中结果评价的脑机制

买晓琴 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

结果评价的脑机制是认知神经科学研究中的重要课题,本书作者采用事件相关电位(event-related potential, ERP)技术,考察了三种相对复杂的认知任务,即欺骗、赌博,以及猜谜,并且选择了将纵向深入的递进式研究和横向展开的比较研究结合起来的研究方法,试图揭示复杂认知活动中结果评价过程的神经机制。本书呈现了从研究背景、问题提出、设计思路、研究方法、数据分析、结果到最后讨论这一完整的研究过程,能令读者较为全面地了解复杂认知活动中结果评价的脑机制及相关的研究过程。

本书对于社会认知神经科学领域的研究生和研究者进行相关的科学研究具有一定参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

复杂认知活动中结果评价的脑机制 / 买晓琴著. —北京: 科学出版社, 2016.12

ISBN 978-7-03-050935-2

I. ①复… II. ①买… III. ①脑机制—研究 IV. ①B845-1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 282028 号

责任编辑: 胡治国 周 园 / 责任校对: 郑金红

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017 年 1 月第二次印刷 印张: 9

字数: 250 000

定价: 55.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

我们在日常生活中总是直接地、自动地并且几乎是不由自主地评价着我们遇到的任何事物，尤其是我们对于自身或他人的行为所导致的好坏结果或奖惩反馈的评价更能直接影响我们以后的行为，并且由此而产生一种朝向评价为好（喜欢）的东西或远离评价为坏（不喜欢）的东西的感受倾向，这一过程就是结果评价（outcome evaluation）。结果评价是认知系统的核心功能之一，它对人类认知发展以及多种认知能力和技巧的形成都有重要的作用。揭示结果评价过程的认知与脑机制有助于指导人们的决策和学习，从而优化和改善各种行为，在教育、心理健康、经济等方面均有广泛的应用前景，因而这方面的研究近年成为认知神经科学领域的热点问题。

目前研究者们主要采用事件相关电位（event-related potential, ERP）对结果评价的神经机制进行研究，已有研究发现两个与结果评价相关的 ERP 成分：反馈相关负波（feedback-related negativity, FRN）和 P300。而相关的 fMRI 研究则发现前额叶皮层（prefrontal cortex, PFC），尤其是前扣带回（anterior cingulate cortex, ACC）在结果评价过程中起重要作用。然而到目前为止，关于 FRN 和 P300 的认知和神经加工机制仍然不清楚；而且，结果评价过程的认知神经研究主要是基于一些较为简单的任务（比如简单判断任务和简单赌博任务）的研究，而很少有关于复杂认知任务的研究。

在本研究中，我们采用了三种相对复杂的认知任务，即欺骗、赌博，以及猜谜，并且选择了将纵向深入的递进式研究和横向展开的比较研究结合起来的研究方法，试图揭示结果评价过程的神经机制。首先，我们以一个研究任务（欺骗）作为突破口，由浅入深，由简入繁地进行了三个纵向实验，分别对简单反应行为、简单欺骗行为和复杂的交互式欺骗行为中结果评价的 ERP 相关成分进行了研究。然后，我们又从横向对比的角度对赌博行为中结果评价的神经机制以及猜谜行为中结果评价的神经机制两个问题进行了研究，将它们的结果与欺骗行为的结果进行横向比较。

研究结果发现：①不同任务以及有奖赏和无奖赏的结果评价加工都伴随着 FRN 和 P300 的出现，说明 FRN 和 P300 是与结果评价加工有关的两个基本 ERP 成分。偶极子源定位分析显示，FRN 起源于 ACC 背侧尾部，而 P300 的起源靠近 ACC 的喙部。②FRN 和 P300 在功能上表现出明显的认知和情绪的分离现象：FRN 反映的是一种做出反应以后实际结果与期望不一致时的认知冲突加工，而 P300 反映的是对结果刺激的情绪评价加工，并且 P300 波幅的高低与被试自己的情绪体验强弱有关。③期望和动机对结果评价过程中的冲突成分和情绪成分有着重要影

响,这种影响也主要表现在 FRN 和 P300 上。总的来说,任务越复杂,被试的期望和动机越强,结果评价阶段所产生的认知冲突和随后的情绪体验也越强。

本研究具有重要的理论意义和现实意义。在理论意义上,结果评价阶段是人类认知行为中重要的组成部分,其神经机制的研究对相关的决策、反馈和其他社会认知研究都有着重要的影响;在现实意义上,欺骗、赌博和猜谜等是人类社会生活中常见的行为,对它们的脑机制研究对我们理解和分析人类行为有着重要意义,在教育 and 经济领域都有十分重要的应用价值。

本书之所以得以完成,离不开我的导师罗跃嘉教授和罗劲教授的指导,在此对他们表示深深的感谢。科学出版社的周园编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动,在此也表示衷心的感谢。此外,本成果受到中国人民大学“统筹支持一流大学和一流学科建设”经费的支持。

需要说明的是本书中研究一的部分数据在 S. Han 和 E. Popper 编著的书 *Culture and Neural Frames of Cognition and Communication* (2011) 中有介绍;研究三的数据已经发表在 2004 年 *Human Brain Mapping* 上,文章题目为“Aha! Effects in a Guessing Riddle Task: An ERP Study”,在本书中我们从结果评价的角度对数据重新进行了解释。此外,我们在本书附录中介绍了一项关于学龄前儿童结果反馈评价的脑机制的研究,该研究也已发表在 2011 年的 *PLoS One* 上,文章题目为“Brain Activity Elicited by Positive and Negative Feedback in Preschool-Aged Children”。

本书完稿之后虽然经过反复校阅,但可能还有未能发现的疏漏、不当或错误,敬请读者及同行专家不吝指正。

买晓琴

2016 年 8 月

目 录

第一章 文献综述	1
第一节 结果评价的 ERP 研究	1
第二节 结果评价的 fMRI 研究	13
第三节 前扣带回的功能	15
第四节 前扣带回在结果评价中的作用	23
第二章 问题提出和研究框架	25
第一节 问题提出	25
第二节 研究框架和研究目的及意义	26
第三章 研究一：欺骗行为结果评价的神经机制	28
第一节 实验一：简单反应任务中结果评价的 ERP 效应	29
第二节 实验二：简单欺骗任务中结果评价的 ERP 效应	39
第三节 实验一（简单反应组）与实验二（欺骗组）比较	48
第四节 实验三：交互式欺骗任务中结果评价的 ERP 效应	55
第四章 研究二：赌博行为结果评价的神经机制	68
实验四：不同输赢概率条件下赌博任务中结果评价的 ERP 效应	68
第五章 研究三：猜谜行为结果评价的神经机制	95
实验五：猜谜任务中结果评价的 ERP 效应	95
第六章 总讨论和结论	103
第一节 复杂认知活动中结果评价的神经机制研究	103
第二节 复杂认知活动中结果评价的神经机制讨论	110
第三节 结论与展望	114
参考文献	116
英文缩写词表	123
附录	125

第一章 文献综述

认知系统的一个核心功能是对自身或他人的行为所导致的结果或外界反馈进行快速评价,从而采取相应的对策改善我们的行为,这一过程就是结果评价(outcome evaluation)(Binner, 1975)。我们在日常生活中总是直接、自动并且几乎是不由自主地评价着我们遇到的任何事物,尤其是我们对于自己的行为所导致的结果评价更能影响我们以后的行为,并且由此而产生一种朝向评价为好(喜欢)的东西或离开评价为坏(不喜欢)的东西的感受倾向。评价过程的一个重要功能就是确定正在进行的事件的情感意义或动机意义,并且通过这些机制对我们自身的行为所导致的结果或我们在环境中遇到的刺激的价值提供快速的判断(Yeung and Sanfey, 2004)。

Arnold (1950)认为评价补充着知觉并产生去做某种事情的倾向。整个评价的复杂过程几乎是在瞬间发生的。Lazarus (1968)进一步把Arnold的评价扩展为评价、再评价过程;这一过程包括筛选信息、评价及应付冲动、交替活动、生理反应的反馈、对活动后果的知觉等成分。他认为对个人所处情境的评价也包括对可能采取什么行动的评价。

近年来人们对于结果反馈评价,尤其是有奖惩结果评价的神经机制研究兴趣逐渐增加。在下文中我们将主要介绍近年来这方面的研究情况,主要是与事件相关电位(event-related potential, ERP)和功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)相关的研究。

第一节 结果评价的 ERP 研究

通过记录人类被试的脑电(electroencephalogram, EEG)活动,分析ERP相关的认知成分是现如今认知神经科学发展的主要方向之一。ERP的高时间分辨率特性对于研究结果评价的时间特性提供了很好的方法,因此对于结果评价的神经机制的研究提供了重要的技术。过往的研究已经确定了两个与这种快速评价功能相关的ERP成分——反馈相关负波(feedback-related negativity, FRN)和P300(Sutton et al., 1978; Johnston, 1979; Gehring and Willoughby, 2002; Holroyd and Coles, 2002; Yeung and Sanfey, 2004)。本节将介绍结果评价的ERP研究范式以及两个与结果评价有关的ERP成分。

1 结果评价的研究范式

1.1 简单赌博任务

简单赌博任务是研究结果评价比较常用的实验范式,这一任务让被试在电脑

上进行类似赌博的游戏。例如在 Gehring 和 Willoughby (2002) 的研究中, 被试首先看到两个方块, 每一个方块中都有一个数字 5 或 25, 代表 5 美分或 25 美分。被试通过按键选择其中的一个方块 (选择反应)。做出选择后, 每一个方块变成红色或绿色 (结果)。如果所选择的方块变成绿色, 那么与选择的数字相应数量的钱被加到被试总的报酬中; 如果选择的方块变成红色, 那么将从被试总的报酬中减去相应数量的钱。简单赌博任务的另一种形式是猜测任务, 它要求被试对屏幕上的四张不同花色的扑克牌进行按键选择, 猜测哪张扑克牌接下来会保留在屏幕上。如果被试猜测正确则会赢钱, 否则会输钱 (Ruchow et al., 2002)。

1.2 简单学习任务

结果评价研究领域里的简单学习任务都是与奖赏相关的, 要求被试在任务中学会相应的反应。例如在 Frank 等 (2005) 的研究中, 被试进行一个概率选择的任务, 在两个刺激中进行选择。被试选择后, 将会在屏幕上看到自己的选择是否正确, 两个刺激的正误概率是一定的但互不相同。两个刺激中其中一个正确率高、另一个正确率低, 即被试选择两个刺激得到正性反馈的概率有高低之分, 被试需要在任务中学会选择正确概率较高的刺激。

1.3 时间估计任务

时间估计任务是首先给被试一个声音的提示表示计时开始, 然后让被试来估计一秒钟的时间, 如果感觉到了一秒钟就按键停止计时, 随后呈现反馈刺激告诉被试前面对时间的估计是否正确。一般被试估计的时间在一个时间段内都算正确, 并且正确的标准会根据被试前面试次的表现进行实时的调整 (Mars et al., 2004)。

1.4 互动情境任务

互动情境任务一般涉及一些复杂认知任务。例如在简单任务的基础上加入多名被试, 让被试在多人互动情境下对任务进行反应。如 Yu 和 Zhou (2006) 设计了一个旁观者观察执行者完成任务的情境, 在此情景下记录旁观者和执行者的脑活动。该研究第一次在多人互动的实验室情境下对结果评价的神经机制进行了探索。

在以上所介绍的这些实验范式中, 结果反馈常常是钱的输赢或行为的对错, 比如在 Gehring 和 Willoughby (2002) 的赌博任务中, 结果反馈是以红色或绿色的方块所代表的输赢; 在时间估计任务中, 结果反馈是对一秒的估计是否正确。研究者们通过分析结果反馈刺激诱发的 ERP 波, 对结果评价的神经机制进行研究。

2 反馈相关负波 (feedback-related negativity, FRN)

反馈相关负波 FRN 由 Miltner 等 (1997) 首次报道, 是结果反馈刺激引发的

一个负性走向的 ERP 成分，这个成分发生在反馈出现后的 200~300 ms，波峰出现在反馈出现后 250 ms 左右，波幅最大位于内侧额叶头皮电极位置，因此也被叫做内侧额叶负波（medial frontal negativity, MFN）。负性结果（比如反应错误或钱的损失）比正性结果诱发的 FRN 波幅更大，源定位分析显示 FRN 的发生源可能位于前扣带回（anterior cingulate cortex, ACC）（图 1-1）。其他的 fMRI 研究和单细胞记录研究也进一步支持了这种观点（Miltner et al., 1997; Gehring and Willoughby, 2002; Ruchow et al., 2002; Luu et al., 2003）。FRN 的波幅不仅受到结果效价、结果大小以及被试是否预期到结果的影响，还受到一系列社会性因素的影响，并且与人们的行为调整相关。以下我们将介绍这些影响 FRN 的因素以及研究者们提出的一些解释 FRN 的理论。

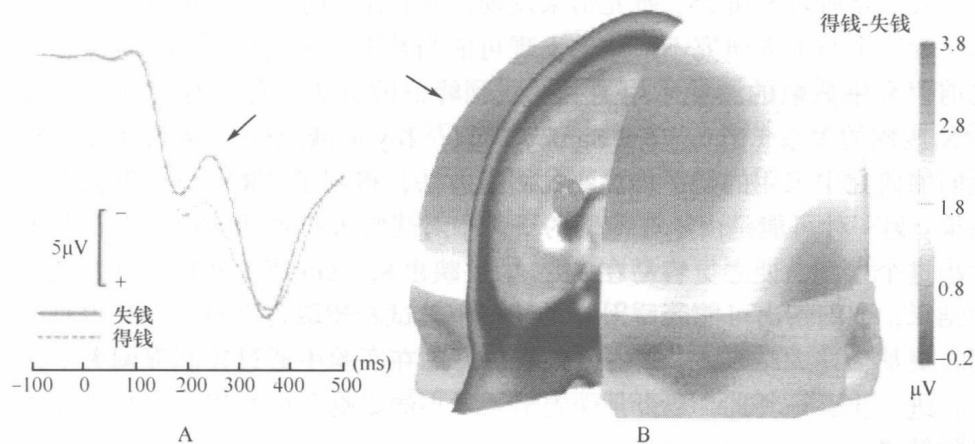


图 1-1 赌博任务中结果反馈引发的 ERP 波形，头皮电压分布图和 FRN 的神经发生源

A 图中显示的是 Fz 电极点（额部）的波形。实线代表的是被试失钱时的结果刺激引发的 ERP 总平均波；点线代表的是被试得钱时的结果刺激引发的 ERP 波。箭头所指的是 FRN。B 图得钱的 ERP 波减去失钱的 ERP 波所得到的差异波在结果刺激出现后 265 ms 时的头皮电压活动图。更正的值对应于更大的 FRN 效应。箭头所指的就是 FRN 在 Fz 电极的主要活动。偶极子定位分析显示 FRN 的发生源位于 ACC，由中心在 ACC 的一个球体表示。（Gehring and Willoughby, 2002）

2.1 FRN 与结果效价

研究 FRN 与效价关系的研究结果都较为一致。Gehring 和 Willoughby（2002）采用简单赌博任务，发现输钱比赢钱能引发更为负向的 FRN，说明 FRN 对负性反馈更加敏感，而对正性反馈较为不敏感。Yeung 和 Sanfey（2004）也发现了相似的结果，他们让被试进行选择卡片金钱任务，发现输钱比赢钱引发了更大波幅的 FRN。但是，后来的研究者却发现真正影响 FRN 波幅的是相对效价，这又被称作背景依赖性。Hajcak 等（2005）的研究发现，同样的一个反馈刺激在不同条件下会受到人们不同方式的评价。Hajcak 等（2006）的研究加入了中性反馈刺

激,却发现中性反馈刺激和负性反馈刺激产生一样波幅的 FRN。在这个实验中,被试对结果的评价为满意与不满意,事实上就是一种背景依赖性的判断。他们进一步指出,结果与预期相比的相对效价与 FRN 波幅直接相关,比预期差的结果会产生更大波幅的 FRN,而比预期好的结果则会使 FRN 波幅减小(Hajcak et al., 2007)。

2.2 FRN 与结果大小

与结果效价相比,研究者们对于结果大小对 FRN 的影响的关注要少很多,并且已有的相关研究结果并不明朗。Yeung 和 Sanfey(2004)的研究虽然发现了 FRN 受到结果效价的影响,却没有发现结果大小引发的 FRN 波幅的不同。但是 Wu 和 Zhou(2009)却发现小结果能产生更大波幅的 FRN。他们使用简单赌博任务,结果的大小分别为 5 和 25,研究结果发现,结果为 5 时会引发更负向的 FRN。他们认为这个与前人研究不一致的发现可能与数据分析时使用的不同方法有关,之前研究中波幅的测量采用的是基线到峰值的方法,都没有得到结果大小与 FRN 波幅的关系(Yeung and Sanfey 2004; Toyomaki and Murohashi 2005),而他们的研究中采用的是平均波幅的测量方法,得到了 FRN 与结果大小相关的结果。另一种可能是由于在他们的研究中对奖赏大小预期的控制更强调了结果大小这个维度,使之更容易在 FRN 中反映出来。Gu 等(2011)也发现了类似的结果,他们指出可能的原因是在任务中被试希望取得高分,因此相对小结果而言更加偏好大结果。未来的研究可以考虑在实验中通过控制强调大小这个维度,进一步验证 FRN 是否会受到结果大小的影响,继续探索以往研究中不一致的结论。

2.3 FRN 与预期

与结果评价相关的很多研究都将反馈刺激与被试的预期联系起来。Holroyd 和 Coles(2002)的研究将结果与预期进行比较,发现比预期差的结果诱发了更负的 FRN,而比预期好的结果诱发了相对正向的 FRN。后来的研究中,研究者设置了奖赏组与非奖赏组,发现奖赏组的负性反馈引发波幅更大的 FRN,这是由于奖赏组的被试有较高的预期(Holroyd et al., 2003)。Gu 等(2011)的结果与此类似,因为被试希望在任务中取得高分,因此较小的结果相对预期差,从而引发更大波幅的 FRN。但在 Nieuwenhuis 等(2005)的一项研究中,他们发现不论结果是否被预期,输钱都会诱发 FRN。对此,他们并没有给出明确的解释,只是在讨论中提及这个结果或许与不同效价的结果出现的频率有关,认为含较少不好结果的实验设计会更容易检测到 FRN 成分。我们认为这可能是由于在相对预期的正性结果较多的情况下,偶尔的负性结果会诱发更大的 FRN。总之,对于 FRN 是否受被试预期的影响还需要进一步研究。

2.4 FRN 与行为调整

少数研究尝试将 FRN 波幅与被试行为上的调整联系起来。Frank 等 (2005) 的研究发现, 被试由正负反馈刺激产生不同的 FRN, 与其对避免负性反馈、获得正性反馈的学习有关。这是因为结果评价这一过程的目的正是为了对行为进行适当调整, 因此不同的波幅反映了不同的结果评价过程, 自然指向不同的行为。在赌博任务中对两个方块进行选择时, 如果被试这次所选方块的结果是输钱, 那么下次被试更倾向于选择另外一个方块, 也说明了结果反馈对于被试行为的影响 (Liu & Gehring, 2009)。我们的研究发现甚至 4~5 岁的儿童也会根据结果反馈进行行为调整 (Mai et al., 2011) (见附录)。

2.5 FRN 与社会性因素

人是社会动物, 我们的认知和情感活动都无时无刻不受到其他人的影响, 结果评价作为人与环境交互过程中的基本能力之一自然也不例外。近年来研究者们对于社会情境下结果评价脑机制的研究兴趣也在日益增加。研究发现大脑不仅对自己行为的结果反馈有反应, 对别人的行为结果也有反应。例如, Yu 和 Zhou (2006) 考察了执行任务与观察任务下 FRN 的状况。执行任务下, 被试需要进行决策并承担相应的金钱奖惩; 观察任务下, 被试无需进行任何操作, 只对他人的决策与奖惩反馈进行观察。结果显示, 执行任务和观察任务都能够诱发被试的 FRN, 说明人们在对自己与对他人行为的结果评价中存在类似的神经机制。但是, 与执行任务相比, 观察任务所诱发的 FRN 波幅较小, 这可能与被试的自我认知有关, 执行任务涉及了更多与自我有关的认知活动 (Yu and Zhou, 2006)。Segalowitz 等 (2010) 进一步将观察任务的对象区分为朋友与陌生人两组。研究发现, 与观察对象为陌生人的被试相比, 观察对象为朋友的被试产生了更大波幅的 FRN, 这可能是因为观察朋友涉及更多和自己有关的认知活动。

除了考虑个体是否为任务的执行者外, 一些研究者还考察了执行者与观察者的利益关系。Itagaki 和 Katayama (2008) 的研究将执行者与观察者的关系划分为合作与竞争两种模式。结果显示, 合作条件下他人输钱与竞争条件下他人赢钱都诱发了更大的 FRN, 这是由于合作条件下他人输钱对个体本身意味着输钱的负性惩罚, 而竞争条件下他人赢钱对个体而言也是相对的负性惩罚, 个体相对于他人的收益减少是一种输钱的负性反馈刺激。Marco-Pallarés 等 (2010) 进一步完善了 Itagaki 和 Katayama (2008) 的研究, 将观察者与执行者的奖惩关系分为不相关、完全正相关以及完全负相关三种, 并且同时记录了观察者与执行者的脑电活动。该研究发现, 当二者奖惩不相关或完全正相关时, 观察者与执行者产生了相似的 FRN; 而当二者奖惩完全负相关时, 执行者赢钱意味着观察者输钱, 从而也诱发了 FRN。该结果与 Itagaki 和 Katayama (2008) 的研究结果一致, 也能说明 FRN

的诱发并不取决于反馈刺激的绝对效价,而是考虑背景依赖性,取决于相对效价,这与 Holroyd (2004) 采用简单任务的结果也相吻合。

另一批研究关注执行者与观察者的亲密关系。在利益关系研究的基础上,王益文等(2011)进一步研究了竞争条件下执行者与观察者为朋友和陌生人时的情形,发现和朋友竞争所诱发的 FRN 波幅大于和陌生人竞争所诱发的 FRN。他们由此推测竞争情境下的 FRN 可以反映由竞争所引起的个体的认知冲突,和朋友竞争一方面要追求自己的利益,另一方面要顾及二人的亲密关系,因此引发更大的认知冲突。这个结果与 Kang 等(2010)的研究类似,该研究发现观察朋友进行颜色命名的 Stroop 任务时诱发的 FRN 比观察陌生人时更大,他们认为与陌生人相比,朋友更容易被归入自我概念中,其行为结果的反馈对个体调整自己随后的行为有更加重要的意义。

近年来我国还有一些研究创新性地考虑了人际关系中的结果评价。Li 等(2010)考察了结果评价中的责任感。他们采用赌博任务研究了责任分散对结果评价的影响,设计了高责任感与低责任感两种任务情境。结果显示,在高责任感条件下诱发的 FRN 波幅较大,此时被试感到自己对输钱更有责任而对赢钱更有贡献。这个结果说明 FRN 能够反映社会情境下人们对责任感的加工。这个结果与张慧君等(2009)的研究结果一致,其在三人赌博任务中,将责任感划分为三个水平,分别是负全责、负一半责任与负 1/3 责任。实验发现,在负全责条件下 FRN 波幅明显大于其他两种条件,即高责任感会诱发较大波幅的 FRN。吴燕和罗跃嘉(2011)采用信任博弈游戏考察利他惩罚的结果评价,实验结果发现被试在观察惩罚结果或不惩罚结果时都会产生 FRN。其中,“惩罚-他人输钱”和“惩罚-自己输钱”时都引发了明显的 FRN,说明被试将利他惩罚知觉为负性结果。但是,与惩罚结果相比,负性程度更强的不惩罚结果所引发的 FRN 波幅更大,与 FRN 对与负性结果幅度的正相关结果相吻合。

总体来看,研究者们主要从被试在实验中的角色以及人际关系对影响 FRN 的社会性因素进行了考察。有关研究涉及自我认知等复杂的认知活动,关注点主要集中在任务的执行者上。未来的研究可以考虑从社会比较角度切入,探索个体在社会环境中是如何受到他人影响,从而以相同或不同的方式评估自己的行为。

2.6 FRN 的认知神经机制

2.6.1 冲突监控理论

冲突监控理论(Botvinick et al., 2001)认为,大脑监控系统首先对一个特定领域的信息加工过程状况进行简单的评估,评价当前任务的冲突水平,然后将冲突信息传递到其他负责控制的脑区,由他们指导具体的行为调控反应。这里的冲突指任务可能要求被试克服两种加工的互相干扰,如 Stroop 颜色命名任务;或是

出现在被试出现反应错误的情形下,如学习任务中未能正确反应。ACC 检测不同脑区之间的串扰和冲突,发现冲突的时候就会发出信号,对竞争反应间的冲突尤其敏感。Botvinick (2007) 进一步说明了冲突监控与决策的关系,将 ACC 监控信息加工过程中的冲突和监控行为结果这两个功能相结合,分别站在两个角度对 ACC 功能进行了探讨。这一理论指出,冲突在此过程中作为一个驱使回避学习的指导信号,指导人们从做出有偏差的决策转向正确而有效的认知方法。在此机制中,错误反应表征与正确反应表征的冲突由 FRN 反映。

2.6.2 强化学习理论

强化学习理论 (Nieuwenhuis et al., 2004) 是目前对 FRN 最有影响力的解释,它认为 FRN 由中脑多巴胺系统产生,而中脑多巴胺系统参与奖赏预期和强化学习。一方面,基底神经节参与当前事件的评估与预测,当基底神经节所做的预测认为当前事件会带来正性结果时,会导致中脑多巴胺系统神经元的活动相位增加,反之所做预测当前事件会带来负性结果时,会导致中脑多巴胺系统神经节活动的相位降低。多巴胺活动相位的变化表明正在进行的事件与预期相比的结果,同时也用于更新其预测,以便该系统能够逐渐从最早的对奖赏和惩罚的预期中进行学习。另一方面,多巴胺信号作为强化学习的信号,也被传到内侧额叶,它会促进行为的适应性调整。多巴胺信号对 ACC 的调节作用决定了 FRN 的波幅:当结果比预期差时,多巴胺相位的降低解除了对 ACC 的抑制,引起更大的 FRN;反之结果比预期好时,多巴胺相位的增加抑制了 ACC,引起更小的 FRN;ACC 使用多巴胺信号改进当前的行为。

2.6.3 情绪动机理论

情绪动机理论 (Gehring and Willoughby, 2002) 认为,FRN 反映了错误检测活动,是对负性反馈引起的情绪动机意义的评价,其目的是使具有动机的行为得以实现。错误是具有明显动机作用的,错误反应会引起一系列生理心理的变化。因此,该理论指出 FRN 波幅大小可能反映了错误本身的意义,同时也指出 ACC 有认知和情绪两个功能。

FRN 与另一个叫做错误负波 (error negativity, Ne) 或错误相关性负波 (error-related negativity, ERN) 的 ERP 成分在某些方面有相似性。Ne 是紧跟错误反应之后的一个大的负走向波,首先由 Hohnsbein 等 (1989) 发现。Gehring 等 (1993) 在错误相关的加工中观察到相同的现象并将其命名为 ERN。最近的 ERP 研究对这个成分有了更进一步的理解。研究者们已经在许多不同的任务中观察到 ERN/Ne, 比如赌博任务 (Gehring and Willoughby, 2002)、猜测任务 (Ruchow et al., 2002) 等。错误反应发生后诱发的 ERN/Ne 在额中央记录点最强,并且许多研究者用单个偶极子模拟 ERN/Ne 的发生源都发现其位于中央前额叶区或 ACC

(Holroyd et al., 1998)。进一步的 fMRI 研究也发现, 相对于正确反应, 错误反应过程中 ACC 的活动明显增强 (Kiehl et al., 2000)。因此, ERN/Ne 被认为是一个反映 ACC 功能的电生理指标 (Carter et al., 1998; Falkenstein et al., 2000)。

Miltner 等 (1997) 提出 FRN 与 ERN 有关, 并且认为同一种错误加工机制产生与错误反应相关的 ERN 和与反馈相关的 FRN。虽然 FRN 和 ERN/Ne 具有类似的额中央头皮分布和 ACC 发生源, 但是二者之间也有一些不同。ERN/Ne 是一个在快速反应任务中错误反应后约 100 ms 就到达最大峰的 ERP 成分, 即紧跟在错误反应之后出现, 而 FRN 是发生于反馈信息给出后约 200 ms 的负波。FRN 可能与行为所产生的结果的评价以及行为的动机意义相关联, 而不是对犯错本身起反应。

2.6.4 预期违反假说

预期违反假说 (Oliveira et al., 2007) 认为 ACC 是作为检测违反预期的事件而不是检测错误或比预期差的事件, FRN 反映的是实际反馈与预期不一致, 而不是负性的反馈刺激引发的。该理论认为 FRN 是由预期违反引起的, 不管是正反馈还是负反馈, 只要与预期相反就会引发 FRN。因为被试大多会表现得过度自信, 因此违反预期的负性反馈会引发更大的 FRN 波幅。

目前而言, 以上四个理论中比较有影响力的是冲突监控理论和强化学习理论。冲突监控理论强调两种加工之间的干扰, 强化学习理论能够很好地解释在一系列与奖赏有关的学习任务中 FRN 波幅变化的情况, 并且二者都能够为行为调整提供理论支持。情绪动机理论更多地关注负性反馈引起的评价, 因此无法将 FRN 与 ERN 有效地区分开来。预期违反假说将解释范围扩展到了正负反馈, 但是由于早期研究中并未重视对被试预期的考察, 尚未得到足够有力的验证。

3 P300

另一个与结果评价相关的 ERP 成分是 P300。该成分由 Sutton 等 (1965) 首次发现, 为晚成分的第三个正波 P3, 最初发现的 P3 是在 300ms 左右出现的正波, 所以被命名为 P300。它最大波幅的部位在头皮顶部, 对任务相关的小概率事件敏感 (Donchin and Coles, 1988)。P300 是 ERP 研究中被广泛关注的成分, 它的相关心理因素包括注意、记忆等。同时 P300 也是早期结果评价研究关注的成分, 一般被认为与认知资源的分配有关。在结果评价研究领域, 对 P300 的研究也考察了结果效价、结果大小、社会性因素对其波幅的影响, 同时也有一些研究关注它与行为调整的联系。目前有两个解释 P300 在结果评价中作用的理论, 我们将在下文一一介绍。

3.1 P300 与结果效价

早期的研究认为表示不正确行为的反馈刺激 (负反馈) 比正确行为的反馈刺激

(正反馈)引发更大的 P300 (MacKay, 1984; Squires et al., 1973); 但后来的实验显示, 当使反馈发生的概率相等的时候, 正负反馈诱发的 P300 波幅相等 (Campbell et al., 1979)。进一步的研究发现, 当反馈刺激与被试对结果的预测不一致时, P300 波幅显示为最大。所以, 当被试认为他们做了一个正确反应时的负反馈, 和被试认为他们做了一个错误反应时的正反馈引发最大的 P300 (Horst et al., 1980)。

最近 Yeung 和 Sanfey (2004) 的实验也观察到了这个现象。他们使用简单赌博任务发现, 无论是正性反馈还是负性反馈, 所诱发的 P300 的波幅都随着钱数额的增加而增大。因此, 他们认为 P300 对于奖赏的大小敏感, 而对于奖赏的效价不敏感。但是, 后来的一批研究陆续证明了 P300 波幅也受到结果效价的影响, 即使不同研究者的结果仍存在一定的分歧。Frank 等 (2005) 利用奖赏学习任务, 发现 P300 对负性反馈更加敏感, 即失比得诱发了更大波幅的 P300。然而, 更多研究则认为 P300 与 FRN 恰恰相反, 对正性反馈更加敏感。比如, Toyomaki 和 Murohashi (2005) 的研究得出了得比失能诱发更大波幅 P300 的结论。Bellebaum 和 Daum (2008) 也采用奖赏学习任务验证了这个结论, 发现 P300 受到结果效价和预期的影响, 正性反馈与未被预期到的结果诱发了更大波幅的 P300, 但尚不能证明 P300 是否反映的是与预期不一致的正性结果。Wu 和 Zhou (2009) 使用金钱赌博任务考察了奖赏的效价和大小以及被试的预期对结果评价中 P300 的影响。研究结果显示, 在被试预期到奖赏时, 奖赏的效价以及大小都会影响 P300。这个结果与 Bellebaum 和 Daum (2008) 的结果有所不同, 造成的原因可能是采取了不同的实验范式。Wu 和 Zhou (2009) 认为, P300 是一个需要更多注意资源、对后期自上而下的结果评价控制过程敏感的 ERP 成分。

3.2 P300 与结果大小

早期的研究发现 P300 波幅对于奖惩的数量比较敏感, 它的波幅随着赢或输的钱的数量的增加而增大 (Sutton et al., 1978; Johnston, 1979)。虽然 Yeung 和 Sanfey (2004) 对于结果效价的结论在随后的数年中逐渐被推翻, 但是他们对于结果大小的发现却得到了广泛的验证。在他们的研究中, 被试玩一个简单的赌博游戏, 要求被试从两个有颜色的卡片中选择一个, 这两个卡片与少的或多的钱的输赢有关, 这种输赢结果是不可预测的。被试作出选择以后, 表示选择项结果的反馈出现, 然后呈现他们没有选择的另外一个卡片的结果 (未选项的结果)。结果 (图 1-2) 显示在选择项的结果中, 钱多的结果诱发的 P300 比钱少的结果更大, 而得失之间的 P300 没有差异; 在未选项的结果中, 钱多的结果诱发的 P300 比钱少的结果更大, 得钱的 P300 比失钱更大, 尤其表现在钱多时的得失结果。因此作者认为 P300 对于奖赏的大小敏感, 但是对于奖赏的效价 (得或失) 不敏感, 而且 P300 波幅的个体差异与对没有选择的的结果的反映的行为调节有关。

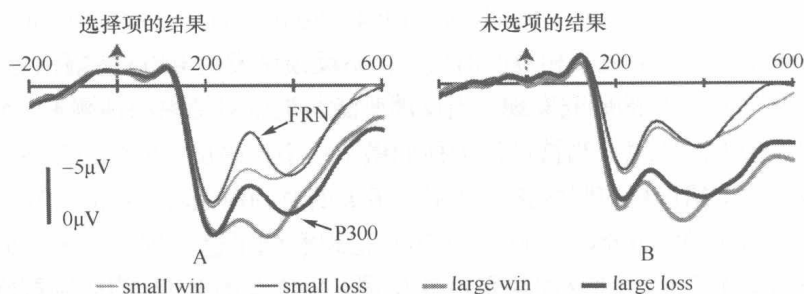


图 1-2 赌博任务中被试选择项的结果刺激 (A) 和未选项的结果刺激 (B) 引发的 ERP 总平均波。深黑色代表失钱, 浅黑色代表得钱; 细线代表钱少, 粗线代表钱多

后来的一系列研究使用奖赏学习任务或金钱赌博任务都发现更大程度的正性结果会引起更大波幅的 P300 (Toyomaki & Murohashi, 2005; Wu & Zhou, 2009)。甚至 Bellebaum 等 (2010) 的研究得到如下结果: P300 的波幅不只受到实际奖赏大小的影响, 也受到所有可能的潜在奖赏大小的影响。当告诉被试他们在实验中可能赢得的不同总金额 (如 5 欧元, 20 欧元, 50 欧元), 即使没有得到奖赏, 也能观察到 P300 成分, 并且潜在奖赏金额越大, P300 波幅也越大, 这与实际奖赏情况下 P300 波幅与奖赏金额大小的关系一致。对于这个发现, 研究者用注意资源相关的理论来解释。由于早期 P300 研究主要集中在注意方面, 他们指出动机和任务相关刺激需要更多的注意资源, 因此更大数额的结果占用更多注意资源, 从而引发更大幅度的 P300。

P300 波幅对于钱的多少很敏感。当被试对钱多的结果给予更大的注意时也可能引起整个 EEG 波幅的增加, 所以钱的多少对于 P300 波幅的影响可能反映的是这种与注意有关的加工。但因为在 FRN 波幅上没有观察到类似的现象, 所以, 钱的多少对于 P300 波幅的影响反映的可能是一种有意义的神经加工过程的变化, 在选择和没有选择的情况下钱的多少对 P300 波幅的影响可能说明这个成分反映了对奖赏大小的一种客观的编码加工, 而与实际是否获得了这种奖赏无关。

3.3 P300 与行为调整

关注行为调整 and P300 的关系的研究并不太多。Yeung 和 Sanfey (2004) 的研究将被试按照每个试次后的行为调整情况分为高低两组, 对比他们的脑电波发现, 采取更多行为调整的被试产生的 P300 波幅更大。这说明 P300 可能可以反映被试是否采取了行为调整。但是 Frank 等 (2005) 的研究则并没有发现 P300 与行为调整有相关, 却发现 FRN 与之相关。这之前 Yeung 和 Sanfey (2004) 的结果相悖, 可能由于 Frank 等 (2005) 的学习任务只需要被试在负性反馈后作出行为调整, 而 FRN 是对负性反馈更为敏感的 ERP 成分。

3.4 P300 与社会性因素

张慧君等(2009)的研究曾考察过责任感对 P300 的影响,发现 P300 对责任感水平也敏感。他们的研究表明,承担责任的人数越多, P300 波幅越小,即责任感较弱时所诱发的 P300 波幅更小。Li 等(2010)的责任分散研究也考察了 P300 成分,其结果与张慧君等(2009)的研究相同。他们发现在高责任感情境下,所诱发的 P300 波幅较大;反之低责任感情境下,所诱发的 P300 波幅较小,这说明 P300 也能够反映个人的责任感加工过程。索涛等(2011)将责任归因引入了结果评价的研究。他们将被试区分为内控与外控两组,内控组被试认为自己的成败祸福主要取决于自身因素,外控组被试把行为结果归结为(比如运气等)外部因素。研究发现在完成同样任务的情况下,内控的被试比外控的被试产生了更大波幅的 P300,这可能说明 P300 成分可以反映责任认知。

除了责任感,另一组研究者则将社会比较和社会距离引入了结果评价的研究(Wu, Zhou et al., 2011; Wu et al., 2012)。Wu 等(2011)采用经典的最后通牒游戏考察公平感对结果评价的影响。他们设定了高度不公平和一般不公平的条件,发现越不公平的分配诱发了更大波幅的 P300。在更进一步的研究中,他们在双人金钱任务中加入了新的变量,即被试的结果相对另一位假被试的数额(分为 1:1, 1:2 和 2:1 三个水平),来考察社会比较,也得到了类似的结果(Wu et al., 2012)。研究结果表明,当相对金额为 1:1 和 2:1 时, P300 的波幅较大,而 1:2 时 P300 波幅较小。他们对 1:1 条件下的结果解释为人们更加偏好公平结果,而人们的偏好会在有限的注意资源中占用更多比重,从而诱发更大波幅的 P300;这个结果也符合行为经济学领域人们都是风险厌恶者的结论。而对 2:1 和 1:2 两种不公平条件,作者认为人们更偏好对自己有利的不公平,即 2:1 条件,因此这个偏好占用更多注意资源,引起 P300 波幅的增大。

与影响 FRN 的社会性因素研究类似,研究者在研究影响 P300 的社会性因素时也较多地关注了责任感。已有研究已经开始涉足双人任务,但是很少同时记录两位被试的脑活动并进行同步性分析。在社会交互情况下,如果能关注交互双方并进行结果评价的相应研究,将有助于我们更好地理解人们在社会决策中对结果反馈的评价机制。

3.5 P300 的认知神经机制

3.5.1 LC-P3 假说

LC-NE (locus coeruleus-norepinephrine) 即蓝核-去甲肾上腺素系统, LC-P3 是目前对 P300 成分解释较为有力的理论。该理论最早由 Pineda 等(1989)提出,他们认为 P300 反映的是 LC-NE 对结果评价过程和决策加工过程的反应,已经有