

决策后的反事实思维过程: 来自 ERP 研究的证据

王会丽, 冯廷勇, 索涛, 梁静, 孟现鑫, 李红*

西南大学心理学院, 认知与人格教育部重点实验室, 重庆 400715

* 联系人, E-mail: lihong@swu.edu.cn

2009-05-21 收稿, 2009-10-23 接受

国家自然科学基金(批准号: 30770727, 30800292)资助项目

摘要 反事实思维指在心理上对过去已经发生的事情进行否定, 进而构建一种可能性假设的思维活动, 是“实际结果”和“假设结果”比较的假设思维过程. 反事实思维根据比较方向的不同, 分为上行、下行反事实思维. 本研究利用事件相关电位技术(ERP)高度精确的时间分辨率, 通过决策情境的简单赌博任务, 操纵部分反馈和全部反馈, 考察了反事实思维过程的神经电生理证据. 结果表明, 上行反事实思维在 FRN 和 P300 成分得到反映, 下行反事实思维仅影响 FRN; 对上行、下行反事实思维的溯源分析结果表明定位在前扣带回(ACC). 因此我们认为, FRN 和 P300 是对反事实思维敏感的 ERP 成分, 且 ACC 可能是调节反事实思维的重要神经结构.

关键词

反事实思维

FRN

P300

ERP

当你发现自己又胖了 10 斤, 是否会后悔“如果没有暴饮暴食, 就不会长胖了!”; 当你刚刚穿过马路就看到身后发生一起车祸, 你是否腿软发抖的同时也暗自庆幸“如果晚一步, 被车撞的就是我了”, 这种根据事件结果进行与事实相反的假设思维过程是反事实思维. Kahneman 和 Tversky 首次提出了反事实思维(counterfactual thinking)的概念, 它是指在心理上对过去已经发生的事情进行否定, 进而构建一种可能性假设的思维活动^[1,2]. 一般以“如果, 那么(if/then)”形式出现, 如“如果昨晚不熬夜, 那么今天早上就不会迟到了”. 反事实思维包括“假设前提”(“昨晚不熬夜”)和“假设结果”(“今天早上不会迟到”). Roese 把反事实思维按照反事实比较方向的不同, 分为上行反事实思维和下行反事实思维^[3-6]. 尽管两种反事实思维的认知比较过程相似, 但能诱发不同性质的情绪体验. 上行反事实思维也称上行假设(upward counterfactual), 是对过去发生的事件, 想象与更好的假设结果相比, 即“假设结果”比“实际结果”更好, 如“如果不暴饮暴食, 就不会长胖 10 斤”, 上行假设会产生后悔等负性情绪体验; 下行反事实思维也称下

行假设(downward counterfactual), 想象与更糟糕的假设结果相比较, 指“假设结果”比“实际结果”更糟糕, 如“幸好早一步穿过马路, 如果晚一步被撞的就是我了”, 下行假设对应庆幸等正性情绪体验. 因此, 反事实思维是对“实际结果”和“假设结果”进行反事实比较的认知加工, 并在反事实比较基础上产生情绪体验的过程.

反事实思维是社会生活中常见的心理现象, 从日常生活的琐事到关系个人前途命运、甚至国家政策的重大决策, 随处可见. 但是, 反事实思维被纳入心理学研究领域始于 20 世纪 80 年代. 1982 年 Kahneman 等人^[1]在实验中要求被试阅读一篇关于某人回家路上遭遇车祸的故事, 故事描述包括 2 种条件: 主人公回家的路线与往常不同; 主人公按照往常路线回家. 结果表明, 阅读到主人公回家路线与往常不同出车祸的被试反事实思维频率更高, 说明反事实思维受到反馈结果偶然性的影响. 1995 年, Medvec 研究奥运会获奖运动员的反事实思维, 发现银牌获得者比铜牌获得者的情绪更糟糕, 因为银牌获得者更容易产生上行反事实思维, 即惋惜自己没有获得金牌; 而

英文引用格式: Wang H L, Feng T Y, Suo T, et al. The process of counterfactual thinking after decision-making: Evidence from an ERP study (in Chinese). Chinese Sci Bull (Chinese Ver), 2010, 55: 1113—1121, doi: 10.1360/972009-1082

铜牌获得者更容易产生下行反事实思维,即差一点就没有获得奖牌^[7]。结果说明,上行反事实思维更易产生负性情绪,下行反事实思维更容易产生正性情绪。Roese^[8]通过自我报告、学业成绩反馈任务等方法研究反馈信息对反事实思维的影响,结果表明,反馈结果效价影响反事实比较的方向,并且被试对负性结果比正性结果反应时更短,说明上行反事实思维产生的负性情绪比下行反事实思维产生的正性情绪更强烈。

综合已有研究不难发现,结果反馈信息影响反事实思维的激活,上行反事实思维和下行反事实思维分别伴随后悔和庆幸等不同性质的情绪体验,并且上行反事实思维比下行反事实思维诱发的情绪更加强烈。最近关于后悔情绪的脑成像研究中也涉及到反事实思维。2004年, Camille 等人^[9]让眶额皮层(the orbitofrontal cortex)受损的病人和正常被试完成轮盘赌博任务。任务要求被试在2个赌注数额(50, 200)和赢钱概率(0.2, 0.5, 0.8)都不同的轮盘选项中选择1个,2个轮盘都可能按照不同的概率赢/输50或200块。决策按键后,反馈方式分2种方式呈现:一种是部分反馈(partial feedback),即只呈现被试选中选项的结果;另一种是全部反馈(complete feedback),即呈现选中选项的同时呈现另一个未选项的结果。结果表明,正常被试在全部反馈且选中选项输钱、未选项赢钱时产生后悔情绪,后悔情绪是由全部反馈提供的反事实比较信息所诱发的;而眶额皮层受损的病人,无论部分反馈还是全部反馈,都不会产生后悔情绪^[9]。这表明,眶额皮层在后悔情绪产生过程中起着重要作用。2005年, Corecelli 等人^[10]用相似的轮盘赌博任务,研究反事实比较基础上情绪体验激活的脑区。结果发现,腹内侧眶额叶(medial orbitofrontal cortex)、前扣带回(anterior cingulate, ACC)和海马(hippocampus)等脑区在被试产生后悔情绪时被激活。

尽管后悔情绪的脑成像研究对反事实思维有所涉及,但对其神经机制并没有深入探讨。目前为止,认知神经科学领域没有反事实思维加工过程的神经电生理研究,特别是大脑对反事实思维加工的相关ERP成分以及时程加工尚不清楚。所以,本研究尝试探索反事实思维的神经电生理证据:首先,利用高时间分辨率的事件相关电位(ERP)技术,考察反事实思维加工的动态过程,以及探索反事实思维加工过程

是否存在特异性ERP成分;其次,分别探索上行反事实思维和下行反事实思维的心理加工过程。

本实验在 Camille 等人^[9]的研究范式基础上设计了一个简单赌博任务。被试置身一个类似真实的决策情景中,在两个赌注选项(A, B)中选择一个,这两个选项都可能赢钱或输钱,且比率相同,被试按键后呈现反馈结果,反馈方式有部分反馈和全部反馈2种。通过操纵反馈方式,同时记录被试大脑皮层的诱发电位(ERPs)。根据反事实思维的定义和 Camille 等人^[9]的研究,我们认为,在部分反馈条件下,被试从反馈信息中只知道自己选择的结果,而不知道未选项结果,即无反事实比较信息,不会诱发反事实思维;而在全部反馈条件下,由于被试同时知道自己的结果以及未选项结果,所以会进行反事实比较。另外,在全部反馈条件下,通过控制每个选项的结果效价,被试产生不同方向的反事实比较:在被试看到选中选项输钱、同时未选项结果赢钱时会产生上行反事实思维;在选中结果赢钱、未选项结果输钱时会产生下行反事实思维。基于大量反馈结果加工和情绪研究所涉及的ERP成分^[11-23],我们推测这种反事实思维过程很可能在反馈负波(feedback related negativity, FRN)和P300等脑电成分上得到反映。并且,有反事实思维过程的全部反馈应该比部分反馈诱发的FRN和P300波幅更大。

1 实验方法

(i) 被试。20名在校大学生(8男12女,年龄在18~25岁之间,平均年龄 20.55 ± 2.41)参加本次实验。所有被试都身心健康,右利手,无神经系统疾病,视力正常或矫正视力正常。实验前,告诉被试得到20元作为本次赌博游戏的底金,游戏中每一次输赢都会在底金基础上扣除或增加。实验结束后,根据被试在实验中的表现决定最后报酬。实验之前均签署实验知情同意书。

(ii) 任务和程序。被试带好电极帽后舒适地坐在一间光线柔和的隔音室里,双眼注视屏幕中心点,眼睛距屏幕约100 cm,实验中的图片水平和垂直视角均控制在 2.3° 内。图1为实验流程图:首先在屏幕中心呈现一个持续500 ms的“+”注视点提示实验马上开始,随后呈现2个选项A和B,这2个选项都可能输钱也可能赢钱,输赢数额相同,都是5个代币。要求被试从中做出选择,被试用双手食指在相应位

置按键(左手食指按F键表示选A,右手食指按J键表示选B)。被试在0~3000 ms内做出决策并按键,按键后用一个小方框提示被试选中的选项呈现500 ms,接着呈现600~1000 ms的随机空屏,然后出现反馈结果,持续1500 ms。2个Trial的时间间隔为300~800 ms。被试不知道反馈结果为随机呈现,且部分反馈与全部反馈在Block内随机出现的概率各为50%。告知被试使用一切策略尽可能地多赢钱,并承诺在实验中所赢的代币在实验结束后以一定比例兑换成现金。当被试完成实验中第一个Block后,让其用一个情绪词汇(后悔、失望、庆幸、高兴或其他情绪)评定自己看到结果时的感受。如果被试选“其他情绪”,要求其用一个具体的情绪词汇表明自己的真实感受。每个block结束后,被试赢得的奖赏累计数额会呈现给被试。

在本实验中(表1),部分反馈情况下,只呈现选中选项的结果,有输赢2种情况。在全部反馈条件下(表1),同时呈现2个选项的结果,有4种情况:选中选项和未选项的结果可能同时输钱(A-5, B-5),可能同时赢钱(A+5, B+5);也可能选中选项赢钱、未选项输钱(A+5, B-5),选中选项输钱、未选项赢钱(A-5, B+5)。根据反事实思维定义,只有全部反馈条件并且选中选项和未选项结果效价不同,才能产生反事

实思维过程:当选中选项输钱、未选项赢钱时,即“实际结果”比“假设结果”更糟糕时产生上行反事实思维;当选中选项赢钱、未选项输钱时,即“实际结果”比“假设结果”更好时产生下行反事实思维。因此,实验结果分析中,只选符合以上2种反事实思维定义的全部反馈条件数据进行统计分析。整个实验分为3个Block完成,每个Block有180个Trials,总共540个Trials。在每个Block结束告知被试在这一轮中的输/赢数额。

(iii) EEG记录和分析。使用德国Brain Products公司的ERP记录与分析系统,按国际10-20系统扩展的64导电极帽记录EEG。参考电极置于双侧乳突连线,以双侧乳突平均值为参考。具体做法是,脑电记录时所有电极参考于左乳突的一只参考电极,离线分析时,为避免脑电的半球偏向,再将右乳突的一只有效参考进行再参考,即从各导联信号中减去1/2该参考电极所记录的信号。接地点在前额FPz和Fz中点。双眼外侧约1.5 cm处安置电极记录水平眼电(HEOG),左眼上下眼眶安置电极记录垂直眼电(VEOG)。每个电极处的头皮和电极之间的阻抗小于5 k Ω 。滤波带通为0.05~80 Hz,采样频率为500 Hz/导。离线分析时,分析时程为反馈呈现前200 ms(作为基线)和反馈呈现后的800 ms。自动校正眼电,波幅大于 $\pm 80 \mu V$ 被视为伪迹自动剔除。

对部分反馈输钱、部分反馈赢钱、全部反馈输钱和全部反馈赢钱4种结果诱发的脑电数据分别叠加并平均,每种条件叠加次数约70次,所得ERPs经0.01~24 Hz的无相数字滤波,以反馈呈现前的均值校正基线。参照Yeung等人^[17]的研究,本实验选取15个电极点:F3, Fz, F4, FC3, FCz, FC4, C3, Cz, C4, CP3, CPz, CP4, P3, Pz, P4进行统计。依据总平均图(图2)所示成分:主要分析FRN和P300成分。首先,考虑FRN平均波幅会受到其他ERP成分如P2, P300的影响,因此采用Holroyd的“峰-峰”算法测量FRN波幅^[24,25],在反馈刺激呈现后150~250 ms内找到波幅最正的点,在这一点测量P2的峰值,并把这一点的的时间作为FRN的开始时间,然后从此点开始到320 ms找到最负的峰值点为FRN的绝对值。如果没有发现负波,那么FRN的波幅就记为0 μV ^[24,25]。FRN的波幅就是其绝对值和与P2峰值之间的差值;其次, P300成分同样受到FRN波幅的影响,因此,采用相同算法(峰值到峰值)计算P300波幅,在320~500 ms

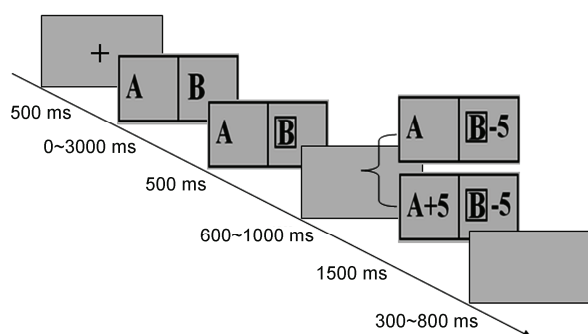


图1 实验流程图

表1 简单赌博任务中的结果反馈的种类^{a)}

	输	输	赢	赢
部分反馈	<u>A-5</u>	B	<u>A+5</u>	B
	A	<u>B-5</u>	A	<u>B+5</u>
全部反馈	<u>A-5</u>	B+5	<u>A+5</u>	B-5
	A+5	<u>B-5</u>	A-5	<u>B+5</u>
	<u>A-5</u>	B-5	<u>A+5</u>	B+5
	A-5	<u>B-5</u>	A+5	<u>B+5</u>

a) 下画线为被试选中的选项

内找到最正峰值作为 P300 的绝对值, P300 的波幅是 P300 的绝对值与 FRN 的绝对值之间的差值. 另外, 分别对 250~320 ms 的 FRN 和 300~500 ms 的 P300 潜伏期进行检验. 最后, 从 ERPs 总平均图看出, 不管是上行反事实思维还是下行反事实思维, 都有明显的 N1(50~150 ms)、P2 (150~250 ms)成分, 因此也分别对 N1 和 P2 做基线到峰值统计分析. 运用 SPSS15.0 统计软件分别对上行反事实思维和下行反事实思维的 FRN, P300, N1, P2 成分进行重复测量方差分析 (repeated measure ANOVA). 分析因素为: 反馈方式 (部分反馈、全部反馈)、电极点前后 (前部、前中部、中部、中后部、后部)、电极点左右 (左、中、右). 采用 Greenhouse-Gessisser 法校正 P 值.

(iv) 偶极子溯源分析. 运用 Brain Electrical Source Analysis Program (BESA, Version 5.0) 软件, 选择四壳椭球模型 (four-shell ellipsoidal head model), 对 ERP 数据进行偶极子溯源分析, 为了更加准确地探讨 250~320 ms 时间窗口内 ERP 的发生源, 选取上行反事实思维 (输钱) 和下行反事实思维 (赢钱) 条件下部分反馈和全部反馈的 ERP 差异波进行主成分分析 (principal components analysis), 确定偶极子个数后, 软件自动确定偶极子的位置, 以相应的残差作为偶极子定位是否真实作为评价指标. 最后运用 TDC (Talairach Daemon Client) 源定位软件, 找出偶极子发生源的具体脑区.

2 结果

2.1 行为结果

输钱情况下, 被试用“失望”表达部分反馈时的情绪体验概率为 80% ($\chi^2_{(1)}=39.800$, $P<0.001$), 用“后悔”表达全部反馈时 (上行反事实思维) 的感受为 72.5% ($\chi^2_{(2)}=27.950$, $P<0.001$); 赢钱条件下, 被试用“高兴”表达部分反馈时情绪体验的概率为 75% ($\chi^2_{(1)}=10.000$, $P=0.002$), 用“庆幸”表达全部反馈时 (下行反事实思维) 的感受概率为 67.5% ($\chi^2_{(1)}=4.900$, $P=0.027$). 行为结果表明, 在全部反馈条件下, 上行反事实思维和下行反事实思维分别伴随后悔和庆幸等不同性质的情绪体验.

2.2 ERP 结果

如图 2 各个条件下 ERPs 总平均图所示, 被试按

键后结果反馈刺激诱发了 FRN, P300 等成分. 分别对 FRN 和 P300 进行 3 因素重复测量方差分析.

(i) 上行反事实思维. 尽管在各种反馈方式条件下都产生了明显 N1 和 P2 成分, 但是 N1 和 P2 统计结果显示, 反馈方式主效应及反馈方式与电极点交互作用都不显著, 所以后面不再讨论.

FRN 反馈方式主效应显著 ($F_{(1,19)}=4.745$, $P=0.042$), 全部反馈 ($-3.510\pm0.596 \mu\text{V}$) 比部分反馈条件下 ($-2.493\pm0.427 \mu\text{V}$) 的 FRN 负向偏转更大, 这说明上行反事实思维影响 FRN 波幅变化. 电极点前后位置主效应显著 ($F_{(4,16)}=26.572$, $P<0.001$). 电极点左右位置主效应显著 ($F_{(2,18)}=14.173$, $P<0.001$). 反馈方式和电极点前后位置的交互作用显著 ($F_{(4,16)}=7.633$, $P=0.006$), 进一步简单效应分析 (表 2), 额部、额中部记录点达到显著 ($F_{(1,19)}=6.552$, $P=0.019$; $F_{(1,19)}=6.745$, $P=0.018$), 在中部记录点达到边际显著 ($F_{(1,19)}=4.052$, $P=0.058$). 反馈方式和电极点左右位置的交互作用不显著 ($F_{(2,18)}=3.352$, $P=0.052$).

P300 反馈方式主效应不显著 ($F_{(1,19)}=0.885$, $P=0.359$), 电极点前后位置主效应显著 ($F_{(1,19)}=6.669$, $P=0.008$). 电极点左右位置主效应显著 ($F_{(1,19)}=7.556$, $P=0.003$). 反馈方式和电极点前后位置的交互作用显著 ($F_{(1,19)}=16.872$, $P<0.001$). 进一步简单效应检验 (表 2), 在中后部、后部达到显著 ($F_{(1,19)}=5.886$, $P=0.025$; $F_{(1,19)}=15.250$, $P=0.001$), 说明 P300 在头皮中后、后部对反事实思维效应敏感. 反馈方式和电极点左右位置的交互作用不显著 ($F_{(2,18)}=0.989$, $P=0.381$).

(ii) 下行反事实思维. FRN 反馈方式主效应显著 ($F_{(1,19)}=6.645$, $P=0.018$), 全部反馈 ($-1.803\pm0.392 \mu\text{V}$) 比部分反馈条件下 ($-1.046\pm0.310 \mu\text{V}$) 的 FRN 波幅更大, 说明 FRN 波幅对下行反事实思维加工敏感. 电极点前后位置主效应显著 ($F_{(4,16)}=13.183$, $P<0.001$), 电极点左右位置主效应显著 ($F_{(2,18)}=4.972$, $P=0.018$). 反馈方式和电极点前后的交互作用显著 ($F_{(4,16)}=14.047$, $P<0.001$), 进一步简单效应分析 (表 2), 在额部、额中部记录点达到显著 ($F_{(1,19)}=19.920$, $P<0.001$; $F_{(1,19)}=9.401$, $P=0.006$) 反馈方式和电极点左右的交互作用不显著 ($F_{(2,18)}=2.908$, $P=0.069$).

P300 反馈方式主效应不显著 ($F_{(1,19)}=1.926$, $P=0.181$), 电极点前后位置主效应显著 ($F_{(4,16)}=33.236$, $P<0.001$), 电极点左右位置主效应不显著 ($F_{(2,18)}=0.821$, $P=0.433$). 反馈方式和电极点前后位置的交互

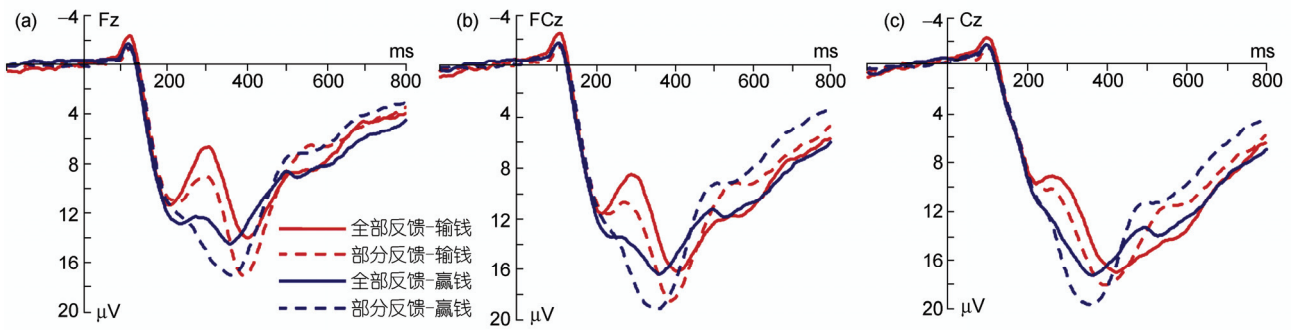


图2 上行、下行反事实思维条件下的部分反馈和全部反馈 ERPs 总平均波形图

表2 上行、下行反事实思维的 ERPs 数据分析结果^{a)}

	额部			额中部			中部			中后部			后部		
	M	SE	F	M	SE	F	M	SE	F	M	SE	F	M	SE	F
FRN															
上行	-5.27	0.75	6.55*	-3.94	0.65	6.75*	-2.73	0.53	4.05	-1.78	0.36	2.14	-1.29	0.28	0.01
下行	-2.45	0.51	19.92**	-1.87	0.44	9.40*	-1.21	0.34	3.52	-0.85	0.25	0.82	-0.75	0.22	0.03
P300															
上行	9.08	1.04	1.79	9.84	1.13	0.40	10.80	1.18	0.65	11.82	1.24	5.89*	11.70	1.04	15.25**
下行	5.65	1.15	—	7.71	1.05	—	8.54	0.99	—	9.76	1.09	—	10.03	1.02	—

a) **, $P < 0.01$; *, $P < 0.05$. M, 记录点的平均波幅; 上行: 上行反事实思维; 下行: 下行反事实思维, 下同.

作用不显著($F_{(4,16)}=2.546, P=0.103$). 反馈方式和电极点左右位置的交互作用不显著($F_{(2,18)}=3.066, P=0.063$).

(iii) 差异波及地形图. 首先, 分别从上行、下行反事实思维诱发的差异波及地形图可见, 上行反事实思维(输钱)诱发的差异地形图(图 3(a)), 在额叶和中部头皮活动电压值较大; 下行反事实思维(赢钱)诱发的差异波地形图(图 3(b))所示, 也是在额叶前部和中部最大. 与上面统计结果一致.

其次, 在 250~320 ms 时间窗口对上行、下行反事实思维诱发的 FRN 成分进行峰值检验. 结果表明, 上行、下行反事实思维之间的差异不显著($F_{(1,19)}=0.439, P=0.516$). 对上行、下行反事实思维诱发的 FRN 潜伏期检验结果表明, 上行、下行反事实思维的 FRN 潜伏期差异不显著($F_{(1,19)}=3.377, P=0.082$). 并且此时间窗口的地形图相似. 这可能说明上行、下行反事实思维的认知加工过程和加工速度具有一致性.

再次, 在 320~500 ms 时间窗口对上行、下行反事实思维诱发的 P300 成分进行峰值检验. 结果表明, 上行、下行反事实思维的主效应不显著($F_{(1,19)}=1.898, P=0.184$), 但是与电极点前后位置交互作用显著($F_{(1,19)}=13.964, P<0.001$). 进一步简单效应分析可得, 在中后部、后部记录点上行反事实思维诱发的负性情绪明显大于下行反事实思维诱发的正性情绪($F_{(1,19)}=$

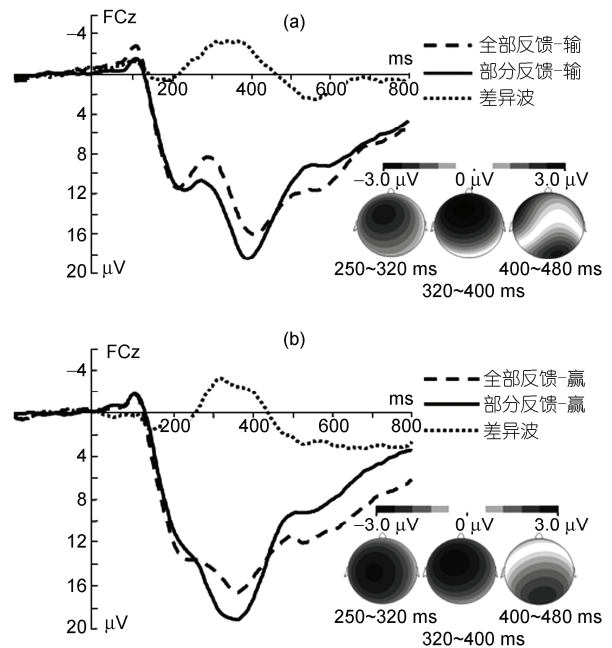


图3 上行反事实思维和下行反事实思维的差异波及地形图

$7.850, P=0.011$; ($F_{(1,19)}=17.481, P=0.001$). 对上行、下行反事实思维的 P300 潜伏期检验结果表明, 上行、下行反事实思维的 P300 潜伏期差异不显著($F_{(1,19)}=0.579, P=0.456$). 这可能说明上行反事实思维诱发的

负性情绪比下行反事实思维诱发的正性情绪更强烈,但是对两种情绪的加工速度相似.

(iv) 溯源分析. 把上行反事实思维和下行反事实思维诱发的 FRN 差异波导入 BESA Version5.0 软件,用四壳椭球模型进行偶极子溯源分析.主成分分析确定偶极子个数后,软件自动确定偶极子的位置.结果如图 4 所示,两种条件均可用一个偶极子进行拟合,该偶极子位于前扣带回,相应区域的 Talairach 坐标见表 3.通过比较发现,上行、下行反事实思维的发生源均在 ACC.

3 讨论

本实验通过一个操纵反馈方式(全部反馈 vs. 部分反馈)的简单赌博任务,考察了反事实思维的相关 ERP 成分.下面根据实验结果分别进行讨论.

3.1 FRN

在本实验中,不管上行还是下行反事实思维条件下,FRN 的反馈方式主效应显著,全部反馈比部分反馈诱发的 FRN 波幅更大.

首先,大量结果反馈的研究表明,FRN 是不正确行为反应和金钱损失反馈刺激诱发波形负向偏转、峰值大约出现在反馈刺激呈现后的 250~300 ms 左右的 ERP 成分^[11-21,26-33].本实验中的反事实思维过程诱发的 FRN 波幅负向偏转、峰值在 250~320 ms,并且

其差异波的地形图分布位于额-中部大脑皮层,偶极子溯源分析结果都位于 ACC,因此反事实思维过程诱发的 ERP 成分与前人研究的 FRN 成分相同^[12,18,34-37].结果初步证实,大脑在结果反馈后的 250~320 ms 进行反事实思维加工和评价过程,FRN 是对反事实思维加工敏感的 ERP 成分.

其次,在部分反馈条件下,被试只能根据自己选择的输、赢反馈结果进行好-坏评价,这与强化学习观点一致,FRN 能够反映对结果反馈好-坏进行评价^[34-37].但是部分反馈没有提供反事实信息,因此不存在反事实比较过程;但是,输钱时全部反馈条件比部分反馈的 FRN 波幅更大,因为被试看到选中选项输钱、放弃的选项赢钱,被试在对输钱这个比预期更糟糕的结果进行评价的基础上,产生了“如果选另一个选项就能赢钱了”的上行反事实比较;同理,赢钱时全部反馈条件比部分反馈的 FRN 波幅更大,因为看到选中选项赢钱、放弃的选项输钱,在对赢钱这个和预期一致的结果评价的基础上,可能产生了“幸亏我选了这个选项,不然就输了”的下行反事实比较.因此本研究认为,FRN 不仅反映了好-坏维度上的结果快速评价过程,而且能够反映反事实思维比较的认知加工过程.

最后,上行、下行反事实思维的 FRN 成分检验的差异不显著,更有意思的是,2 种反事实思维的差异波及地形图,甚至源定位结果都十分相似,说明上

表 3 上行、下行反事实思维的 Talairach 坐标

	时间窗口	脑结构	Brodmann 区	X	Y	Z	最大瞬时力度	残差
上行	280~320 ms	L, ACC	33	-5.8	18.1	17.8	300 ms	9.31%
下行	280~320 ms	L, ACC	24	-1.1	12.8	28.5	295 ms	7.94%

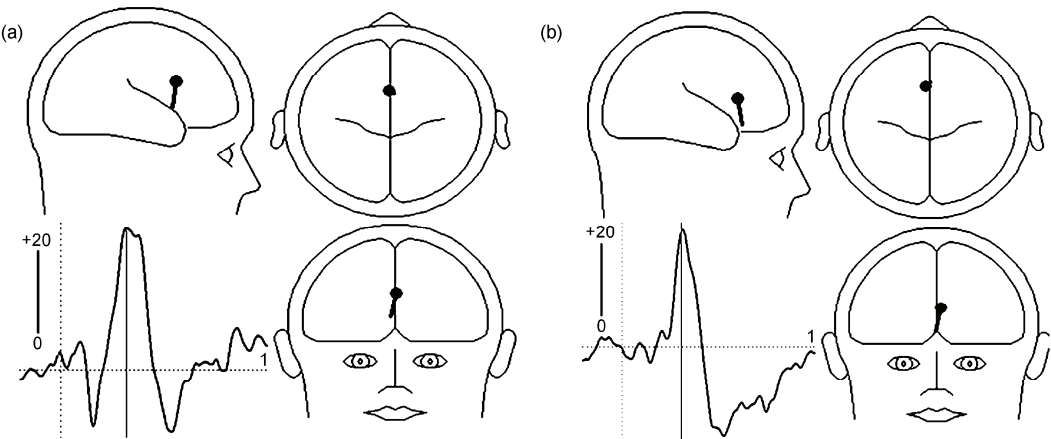


图 4 FRN 的差异波偶极子定位溯源分析结果

行、下行反事实思维的认知加工过程具有一致性,具体讨论见 ACC 部分.即使 2 种反事实思维的认知加工有一致性,不同反事实思维基础上产生的情绪体验也不同,这可能表现在 FRN 之后的 ERP 成分上.行为评定结果和 P300 对反事实思维敏感能够说明这个问题.

3.2 P300

首先,主观评定行为结果表明上行、下行反事实思维基础上产生的情绪性质不同.被试对反馈结果的主观评定结果表明,上行反事实思维(输钱)条件下,被试部分反馈时更多感到“失望”,即被试对这个失败结果感到无可奈何,但更多用“后悔”表达自己看到全部反馈的感受,说明“实际结果”和“假设结果”的对比使被试对自己错误的决策行为感到后悔;下行反事实(赢钱)条件下,被试部分反馈时更多感到“高兴”,但更多用“庆幸”表达自己看到全部反馈的感受,说明“实际结果”和“假设结果”的对比使被试对自己正确的决策行为满足之余心存侥幸.

其次,ERP 结果中非常有趣的是,在大脑中后部、后部记录点上,P300 对上行反事实思维诱发的后悔情绪比下行反事实思维诱发的庆幸情绪更加敏感.一些研究认为,FRN 是结果评价的一个重要 ERP 成分^[17,38,38],P300 可能反映了结果认知评价基础上的情绪加工,并且 P300 波幅大小表示情绪强度的卷入程度^[22,23].并且,在情绪研究领域,P300 被认为是一个与情绪加工相关的重要成分,情绪效价不同的正、负情绪图片都能诱发 P300,但是,负性图片诱发的 P300 波幅比正性图片更大^[39-41].因此,实验结果初步证实,P300 可能反映了反事实认知加工基础上产生的情绪体验过程.结合行为结果我们认为,2 种反事实思维基础上产生的情绪性质、情绪效价都不同,且人们对负性的后悔情绪体验比正性的庆幸情绪体验更加强烈.

具体讲,上行反事实思维(输钱)过程中,部分反馈使被试对输钱结果评价产生失望情绪;全部反馈时,选中选项输钱、未选项结果赢钱,产生失望情绪的同时进行“实际结果”比“假设结果”更糟糕的上行反事实比较,诱发了后悔情绪.因此全部反馈与部分反馈相比,上行反事实思维伴随着更加复杂的负性情绪诱发 P300 波幅增大;但是,下行反事实思维(赢钱)过程中,部分反馈赢钱让被试对结果评价产生欣

喜体验;全部反馈时选中结果赢钱、未选项结果输钱,产生欣喜的同时进行“实际结果”比“假设结果”更好的下行反事实比较,诱发了庆幸情绪.已有反事实思维研究表明,由于反事实思维引起的对比效应(contrast effects)^[3,9,10,42-44],在反事实思维认知过程基础上会产生复杂情绪体验,上行反事实思维基础上产生负性的后悔情绪比下行反事实思维诱发正性的庆幸情绪更强烈,并且频率更高^[3,9,10,45].已有反事实研究结果与本研究一致.此外,Kahneman 和 Tversky^[46,47]的前景理论(Prospect Theory)之一认为,“损失的价值函数比收益的价值函数更为陡峭,所以损失比收益的感觉更加突出”,即“损失 500 美元的感觉比获得 500 美元的感觉更加强烈”.这能够进一步说明,上行反事实比较诱发的后悔体验比下行反事实比较诱发的庆幸体验更强烈.因此,P300 为反事实思维基础上产生的情绪体验提供了神经电生理证据,进一步支持上述 FRN 对反事实思维的理论解释.

3.3 ACC

进一步探讨两种反事实思维的认知加工过程是否一致,分别对上行、下行反事实思维诱发的 FRN 差异波做溯源分析.结果显示,上行反事实思维与下行反事实思维的源定位都在 ACC,这说明反事实思维过程的发生源可能位于 ACC,这与以往结果反馈的神经生理研究结果一致^[11,12,44].强化学习理论认为,强化学习信号由基底神经节通过中脑多巴胺系统传递到 ACC,这种强化学习信号被 ACC 用于调整当前认知加工和行为反应.FRN 的波幅变化反映了 ACC 的认知加工过程^[11,18].很多脑成像研究也表明 ACC 在多种认知任务中激活,包括认知冲突监测、调节行为动机强度、反应竞争和执行功能调节均涉及到 ACC^[48-50].因此本研究认为,上行、下行反事实思维可能有相似的认知加工过程:先看到自己的选项结果,进行预期与事实是否一致的评价;然后把选择结果和未选项结果进行比较,产生反事实比较过程.所以,尽管上行反事实思维和下行反事实思维的比较方向不同,产生的情绪性质也不同,但是,2 种反事实思维的认知加工具有一致性,具有相似的脑内源,因此 ACC 调节反事实思维加工过程.此外,一些后悔神经生理研究报告中,反事实比较产生的后悔情绪导致 ACC 及 OFC, MFC 等脑区激活,进一步说明 ACC 可能是调节反事实思维加工的重要

神经结构。

4 结论

本研究用决策情景的赌博任务范式,通过操纵反馈方式,研究了反事实思维过程的相关 ERP 成分。结果表明,FRN 和 P300 对上行反事实思维加工敏感,

但只有 FRN 对下行反事实思维敏感,且两种反事实思维的溯源分析都定位在 ACC。因此我们认为,对反事实思维敏感的 ERP 成分有 FRN 和 P300,且 ACC 可能是调节反事实思维的重要神经结构。但是,为什么人们产生上行反事实思维比下行反事实思维更多,还需要以后研究中进一步证实。

参考文献

- 1 Kahneman D, Tversky A. The simulation heuristic. In: Kahneman D, Slovic P, Tversky A, eds. *Judgment Under Uncertainty: Heuristics And Biases*. New York: Cambridge University Press, 1982. 201—208
- 2 Kahneman D, Varey C A. Propensities and counterfactuals: The loser that almost won. *J Per Soc Psychol*, 1990, 59: 1101—1110
- 3 Epstude K, Roese N J. The functional theory of counterfactual thinking. *Soc Personal Soc Psychol*, 2008, 12: 168—192
- 4 Roese N J. Counterfactual thinking. *Psychol Bull*, 1997, 121: 133—148
- 5 陈俊, 贺晓玲, 张积家. 反事实思维两大理论: 范例说和目标-指向说. *心理科学进展*, 2007, 15: 416—422
- 6 Markman K D, Gavanski I, Sherman, S J. The mental simulation of better and worse possible worlds. *J Exp Soc Psychol*, 1993, 29: 87—109
- 7 Medvec, Husted V, Scott F M, et al. When less is more: Counterfactual thinking and satisfaction among Olympic Medallists. *J Personal Soc Psychol*, 1995, 69: 603—610
- 8 Roese N J. The functional basis of counterfactual thinking. *J Per Soc Psychol*, 1994, 66: 805—818
- 9 Camille N, Coricelli G, Sallet J, et al. The Involvement of the orbitofrontal cortex in the experience of regret. *Science*, 2004, 304: 1064—1170
- 10 Coricelli G, Critchley H D, Joffily M, et al. Regret and its avoidance: A neuroimaging study of choice behavior. *Nat Neurosci*, 2005, 8: 1255—1262
- 11 Miltner W H R, Braun C H, Coles M G H. Event-related brain potentials following incorrect feedback in a time-estimation task: Evidence for a 'generic' neural system for error-detection. *J Cogn Neurosci*, 1997, 9: 788—798
- 12 Gehring W J, Willoughby A R. The medial frontal cortex and the rapid processing of monetary gains and losses. *Science*, 2002, 295: 2279—2282
- 13 Nieuwenhuis S, Holroyd C B, Mol N, et al. Reinforcement-related brain potentials from medial frontal cortex: Origins and functional significance. *Neurosci Biobehav Rev*, 2004, 28: 441—448
- 14 Holroyd C B, Larsen J T, Cohen J D. Context dependence of the event-related brain potential associated with reward and punishment. *Psychophysiology*, 2004, 41: 245—253
- 15 Toyomaki A, Murohashi H. The ERPs to feedback indicating monetary loss and gain on the game of modified "rock-paper-scissors". *Inter Congr Ser*, 2005, 1278: 381—384
- 16 Nieuwenhuis S, Slagter H A, von Geusau N J A, et al. Knowing good from bad: Differential activation of human cortical areas by positive and negative outcomes. *Eur J Neurosci*, 2005, 21: 3161—3168
- 17 Yeung N, Sanfey A G. Independent coding of reward magnitude and valence in the human brain. *J Neurosci*, 2004, 24: 6258—6264
- 18 Yeung N, Holroyd C B, Cohen J D. ERP correlates of feedback and reward processing in the presence and absence of response choice. *Cereb Cortex*, 2005, 15: 535—544
- 19 Holroyd C B, Coles M G H. The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychol Rev*, 2002, 109: 679—709
- 20 Hajack G, Holroyd C B, Moster J S, et al. Brain potentials associated with expected and unexpected good and bad outcomes. *Psychophysiology*, 2005, 42: 161—170
- 21 Hajack G, Moster J S, Holroyd C B, et al. The feedback-related negativity reflects the binary evaluation of good versus bad outcomes. *Biol Psychol*, 2006, 71: 148—154
- 22 贾世伟. 人脑对反馈刺激加工的认知神经研究. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学, 2008. 7—8
- 23 买晓琴. 复杂认知活动中结果评价的神经机制. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2005. 111—115
- 24 Holroyd C B, Nieuwenhuis S, Yeung N, et al. Errors in reward prediction are reflected in the event-related brain potential. *NeuroReport*, 2003, 14: 2481—2484
- 25 Holroyd C B, Hajack G, Larsen J T. The good, the bad and the neutral: Electrophysiological responses to feedback stimuli. *Brain Res*, 2006, 1105: 93—101
- 26 Masaki H, Takeuchi S, Gehring W J, et al. Affective-motivational influences on feedback-related ERPs in a gambling task. *Brain Res*, 2006, 1105: 110—121
- 27 Ruchow M, Grothe J, Spitzer M, et al. Human anterior cingulate cortex is activated by negative feedback: Evidence from event-related potentials in a guessing task. *Neurosci Lett*, 2002, 325: 203—206
- 28 Luu P, Tucker D M, Derryberry D, et al. Electrophysiological responses to errors and feedback in the process of action regulation. *Psychol Sci*, 2003, 14: 47—53

- 29 Yu R J, Zhou X L. To bet or not to bet? The error negativity or error-related negativity associated with risk-taking choices. *J Cogn Neurosci*, 2009, 21: 684—696
- 30 Yu R J, Luo Y J, Ye Z, et al. Does the FRN in brain potentials reflect motivational/affective consequence of outcome evaluation? *Prog Nat Sci*, 2007, 17: 136—143
- 31 Donkers F C L, Nieuwenhuis S, Geert J M, et al. Mediofrontal negativities in the absence of responding. *Cogn Brain Res*, 2005, 25: 777—787
- 32 李鹏, 李红. 反馈负波及其理论解释. *心理科学进展*, 2008, 16: 705—711
- 33 Yeung N. Relating cognitive and affective theories of the error-related negativity. In: Ullsperger M, Falkenstein M, eds. *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance Monitoring*. Leipzig: MPI of Cognitive Neuroscience, 2004. 63—70
- 34 Nieuwenhuis S, Yeung N, Holroyd C B, et al. Sensitivity of electrophysiological activity from medial frontal cortex to utilitarian and performance feedback. *Cereb Cortex*, 2004, 14: 741—747
- 35 Frank M, Woroch B, Curran T. Error-related negativity predicts reinforcement learning and conflict biases. *Neuron*, 2005, 47: 495—501
- 36 Holroyd C B, Coles M G H. Dorsal anterior cingulate cortex integrates reinforcement history to guide voluntary behavior. *Cereb Cortex*, 2008, 44: 548—559
- 37 Hewig J, Trippel R, Hecht H, et al. Decision-making in Blackjack: An electrophysiological analysis. *Cereb Cortex*, 2007, 17: 865—877
- 38 Nieuwenhuis S, Aston-Jones G, Cohen J D. Decision making, the P3, and the locus coeruleus-norepinephrine system. *Psychol Bull*, 2005, 131: 510—532
- 39 Yuan J J, Zhang Q L, Chen A T, et al. Are we sensitive to valence differences in emotionally negative stimuli? Electrophysiological evidence from an ERP study. *Neuropsychologia*, 2007, 45: 2764—2771
- 40 Huang Y X, Luo Y J. Temporal course of emotional negativity bias: An ERP study. *Neurosci Lett*, 2006, 398: 91—96
- 41 Ito T A, Larsen J T, Smith N K, et al. Negative information weighs more heavily on the brain: The negativity bias in evaluative categorizations. *J Per Soc Psychol*, 1998, 75: 887—900
- 42 Roses N J, Olson J M. *Counterfactual thinking: A critical overview*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Inc. 1995. 1—55
- 43 索涛, 冯廷勇, 王会丽, 等. 后悔的认知机制和神经基础. *心理科学进展*, 2009, 17: 334—340
- 44 Zeelenberg M, Pligt J V D. Attributions of responsibility and affective reactions to decision outcomes. *Acta Psychol*, 2000, 104: 303—315
- 45 Coricelli G, Dolan R J, Sirigu A. Brain, emotion and decision making: the paradigmatic example of regret. *Trends Cogn Neurosci*, 2007, 11: 258—265
- 46 Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, 1979, 47: 263—291
- 47 斯科特·普劳斯, 著. 施俊琦, 王星, 译. *判断与决策*. 北京: 人民邮电出版社, 2004. 84—86
- 48 Botvinick M M, Cohen J D, Carter C S. Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends Cogn Neurosci*, 2004, 8: 1364—1366
- 49 Pisapia N D, Braver T S. A model of dual control mechanisms through anterior cingulate and prefrontal cortex interactions. *Neurocomputing*, 2006, 69: 1322—1336
- 50 Kerns J G, Cohen J D, Macdonald A W, et al. Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, 2004, 303: 1023—1026

The process of counterfactual thinking after decision-making: Evidence from an ERP study

WANG HuiLi, FENG TingYong, SUO Tao, LIANG Jing, MENG XianXin & LI Hong

School of Psychology, Southwest University; Key Laboratory of Cognition and Personality of Ministry of Education, Chongqing 400715, China

Counterfactual thinking occurs when an individual experiences thoughts that ignore what has happened in the past, and generates a hypothesis which comparing “what is” with “what might have been”. Counterfactual thinking can be classified into upward and downward counterfactual thinking based on the direction of the comparison involved. The present study used an event-related potential (ERP) recording protocol with high temporal resolution to measure neurophysiological activity while participants performed a simple gambling task in which the feedback mode was manipulated (partial and complete feedback). Our results showed that both the amplitudes of FRN (feedback-related Negativity) and P300 enhanced during reflected upward counterfactual thinking processes, while only the FRN reflected downward counterfactual thinking. Moreover, dipole analysis indicated that the dipole was located in the anterior cingulate cortex (ACC). This suggests that the FRN and P300 are both sensitive to counterfactual thinking, and that the ACC may be an important neural structure in the modulation of counterfactual thinking.

counterfactual thinking, FRN, P300, ERP

doi: 10.1360/972009-1082