DOI:10.16016/j.2097-0927.202305061

某军校男性学员爱荷华赌博任务的神经活动过程:一项 ERP 研究

朱 妍,吴 迪,孙科伟,陈祥龙,王祎凡,肖 玮 710032 西安,空军军医大学军事医学心理学系航空航天心理学教研室

[摘要] **目的** 探索不同风险决策能力个体的任务态脑电特征,了解风险决策的神经活动过程,并为决策能力训练的指导提供神经生理学的评估指标。**方法** 招募某军校男性学员 20 名,采用爱荷华赌博任务(Iowa gambling task,IGT)对其风险决策能力进行评估并测量其事件相关电位(event-related potential,ERP)作为神经生理学指标。以行为学指标(净分数)将被试分为高决策能力组和低决策能力组,并分析两组被试在 ERP 成分上的不同。**结果** 随着选择次数的增加,IGT 任务行为学绩效不断提升;Oz 通道上,高决策能力组的被试在"输""赢"两种情况下产生的 ENW、P200 和 FRN 振幅均高于低决策能力组($P<0.05$)。**结论** 大脑对于结果反馈的早期处理是区分高、低决策能力的重要因素,可以用于评估决策能力训练的有效性。

[关键词] 风险决策;事件相关电位;爱荷华赌博任务
[中图法分类号] B441.1; B845.1; R821.22 [文献标志码] A

Neural activity processes in Iowa gambling task among male cadets from a military university——an event-related potential study

ZHU Yan, WU Di, SUN Kewei, CHEN Xianglong, WANG Yifan, XIAO Wei Department of Military Medical Psychology, Military Medical Psychology School, Air Force Medical University, Xi'an, Shanxi Province, 710032, China

[**Abstract**] Objective To explore the characteristics of task-state electroencephalogram (EEG) in individuals with different risky decision-making abilities in order to better understand the neural activity process and provide neurophysiological assessment metrics for the guidance of ability training. Methods Twenty male cadets from a military university were recruited to assess their risky decision-making ability and measure their event-related potential (ERP) as a neurophysiological indicator using the Iowa gambling task (IGT) with a 32-channel EEG system. The subjects were divided into high- and low-decision-making ability groups by behavioral indicators (net scores), and then their differences in ERP components were analyzed between the 2 groups. Results The behavioral performance of the IGT was increased as the number of choices increased. On the Oz channel, the participants in the high-decision-ability group produced higher amplitudes of early negative wave (ENW), P200, and feedback related negativity (FRN) in both "lose" and "win" situations than those in the low-decision-ability group ($P<0.05$). Conclusion The brain's early processing of feedback on outcomes is an important factor in distinguishing high and low decision-making abilities, and can be used to assess the effectiveness of decision-making ability training.

[**Key words**] risk decision-making; event-related potentials; Iowa gambling task

Corresponding author: XIAO Wei, E-mail: xiaowei7304@outlook.com

决策是一个相对复杂的高级认知过程,同时也是心理学、认知神经科学、精神医学和经济学等多个学科领域的研究热点,而在各种不同的决策中,关于风险决策的研究一直是学者们关注的重点。目前很多研究采用赌博任务来研究风险决策(risky decision-making),而爱荷华赌博任务(Iowa gambling task,IGT)则是最常

[通信作者] 肖 玮,E-mail:xiaowei7304@outlook.com

2097-0927/Copyright © 2023, 陆军军医大学(第三军医大学)。这篇开放获取文章遵循 CC BY 许可协议(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

用的任务之一。IGT 是 BECHARA 等[1]为研究腹内侧前额叶皮质受损的决策障碍患者所开发的,之后的研究也表明, IGT 对决策功能的评估在不同的临床人群中显示出良好的效度[2-3]。IGT 包含 100 个试次,参与者被要求 1 次从 4 组卡牌中选择 1 张。这 4 组卡牌代表不同数量和概率的货币损失和收益。其中 2 组卡牌虽然提供了较高的即时收益,但是长期看来是损失的(即“坏牌”),而另外 2 组卡牌虽然提供了较低的即时收益,但是长期看来是获益的(即“好牌”)。由于对每组卡牌相关的输赢概率缺乏了解,参与者必须通过从每次选取卡牌后立即收到的结果反馈中学习,来调整他们的选择[4]。收益和损失后的反馈信息可以导致大脑产生不同的反应,这些反应可以通过对大脑电活动的研究来检测。因此,对利用 ERP 的研究成为了解该选择决策的神经过程的一个重要途径,也为决策能力的评价和训练效果的评估提供了神经生理学指标。

目前关于 IGT 的 ERP 研究主要集中在对反馈信号的研究即反馈负波(feedback related negativity, FRN)上[5]。FRN 主要产生于额叶和中央区域,其峰值潜伏期约为 250~350 ms。有研究发现,损失引起的 FRN 振幅大于收益引起的 FRN 振幅[6]。此外也有研究发现了一个主要产生于 Fz 和 Cz 电极位置,峰值潜伏期在 80 ms 的负波[7],其被称为错误负波(error-related negativity , ERN)或早期负波(early negative wave,ENW),似乎反映了错误检测系统的活动[8-10]。研究者们认为,ERN 和 FRN 成分都依赖相同的潜在认知和神经过程,主要反映了反馈结果的早期处理[11-12]。

反馈相关电位的第二个组成部分是在额叶电极位置上的 180~280 ms 处达到其峰值电位的正波,即 P200 成分。在一些研究中,P200 成分被解释为反馈信号早期处理的指标,其可能代表了几个刺激参数(可预测性、效价、显著性)的早期处理,这些参数可能与决策过程和随后的选择相关[13]。一些学者认为在决策任务中 P200 似乎也可以共享 FRN 的一些特征[14]。除此之外,CUI 等[6]发现了 P300 成分—— 一个主要产生于顶叶和额叶,峰值潜伏期在反馈开始后的 350ms 左右的正波,该成分似乎对消极结果比对积极结果更加敏感,其振幅可以随着损失金额的增加而增加。

研究认为,P300 以及晚期 ERP 成分(long-latency potentials, LP)等潜伏期长的 ERP 成分,可能反映了大脑对动机相关的刺激加工的资源分配[14],对后续行为的选择产生重要的作用。POLEZZI 等人[15]对赌博任务中 500 ms 以上的 ERP 成分进行研究,发现 N500 在结果不可预测或者结果为损失时产生更高的电位。同时,GOYER 等[16]对 400~600 ms 的 ERP 成分进行研究发现,该后期成分在结果反馈为损失的情况下产生了比结果为收益时更高的负波。该研究认为,这一后期成分可以代表对结果的情感评价,并对任务接下来的选择产生影响。

本研究通过对不同决策能力的个体在 IGT 任务中的行为表现以及任务中反馈信号所产生的 5 种 ERP 成分进行分析,进一步了解 IGT 任务中决策行为的神经活动过程,为决策能力的训练提供指导,并为其训练效果提供更好的评估指标。

1 对象与方法

1.1 研究对象

在某军校招募 20 名男性学员,年龄为 19~28 岁,平均年龄(21.89±2.38)岁。所有参与者均为右利手,视力正常或矫正视力≥1.0,无任何神经或精神疾病史,无药物滥用史。要求所有被试在实验前不得熬夜,不得摄入咖啡、酒精、茶等兴奋性饮品及食物。所有被试自愿参加实验,并填写书面知情同意书,实验结束后向其支付一定酬劳。并经西京医院伦理审查委员会批准。

1.2 研究流程

实验全程在安静、昏暗的电磁屏蔽房里进行。被试进入房间后,告知研究的具体流程以及 IGT 任务的执行规则,并先进行 20 试次的练习,然后在记录脑电信号的同时,完成 IGT 任务。整个实验持续大约 40 min。

1.3 任务范式

爱荷华赌博任务:本研究采用 BECHARA 等[17]开发的计算机实验程序,将指导语翻译成中文。采用 E-Prime3.0 对 IGT 任务进行编程,以用于 ERP 的记录。具体程序如下:在屏幕中呈现 1 000 ms 的注视点“+”,然后在屏幕中部呈现标记为 A,B,C,D 的 4 组卡牌。卡牌以背面呈现给被试者,要求被试者根据自己的判断每次从 4 组牌中任意选择某组牌中的 1 张牌,用鼠标点击这幅牌后,在接下来的 2 000 ms 内,被试接受反馈刺激。计算机会反馈给被试者本次选择的输赢,输钱用红色方框表示,赢钱用绿色方框表示。同时展示本次选择的赢钱数和输钱数,输的钱数用红色数字表示,赢的钱数用绿色数字表示。屏幕上方呈现每次选择后的收益余额血条。被试者一开始会得到 2 000 元的启动资金。选择每组牌后赢钱或输钱的概率如下:卡牌 A 每次赢得 100 元,连续 10 张牌中有 5 张牌会扣除 150~350 元不等,若连续选择 10 次,净损失 250 元;卡牌 B 每次赢得 100 元,连续 10 张牌中有 1 张牌会扣除 1 250 元,若连续选择 10 次,净损失 250 元;

卡牌 C 每次赢得 50 元,连续 10 张牌中有 5 张牌会扣除 25~75 元不等,若连续选择 10 次,净收益 250 元;卡牌 D 每次赢得 50 元,连续 10 张牌中有 1 张牌会扣除 250 元不等,若连续选择 10 次,净收益 250 元。如上所述,长远来看 A、B 组牌是“坏牌”,而 C、D 组牌是“好牌”。

任务总共包括 100 次选择,要求被试通过选牌来尽可能地获得最大收益,按照选择的先后顺序,可以将整个试验划分为 5 个模块(block),每阶段 20 次选择。IGT 的数据分析主要使用净分数(net score),是指被试在每个模块中选择的“好牌”的次数减去所选择的“坏牌”的次数,即[(牌 C+牌 D)-(牌 A+牌 B)]。比较净分数在不同模块中的变化趋势,可以分析出被试者在收益-损失情境下的决策特点及决策策略调整情况[18]。具体任务流程如图 1 所示。

1.4　脑电信号采集

使用德国 BP 公司生产的 32 导脑电设备采集脑电信号,采用国际通用的 10-10 电极导联定位系统进行定位,参考电极为 TP9/TP10,GND 接地。脑电采集频率为 1 000 Hz,所有通道的电阻控制在 5 kΩ 以下。

1.5　数据分析处理

1.5.1　行为学数据　为了分析任务表现,我们分别计算了 5 个模块中 20 个试次的“好牌”和“坏牌”的选择次数以及净分数,并进行以模块作为被试内变量的单因素方差分析。以 IGT 任务的总净分数为行为学指标,以中位数为分界线,高于中位数的被试被分入高决策能力组,低于中位数的被试被分入低决策能力。

1.5.2　脑电数据处理　使用 EEGLAB 和自定义 Matlab 脚本对脑电数据进行预处理。为了平衡两种情况(“赢”和“输”)下的试验数量,只选择具有这两种情况的试次进行分析。以反馈信号(绿色 *vs* 红色)作为反馈开始,开始前 200 ms 作为基线,分段为-200~800 ms。使用 FIR 滤波器将连续 EEG 数据在 0.1~40 Hz 之间进行带通滤波,并进行 48~52 Hz 的凹陷滤波,采样率为 1 000 Hz,参考电极为 TP9/TP10。手动识别并删除 EEG 中噪声过大的试次。对于剩余的脑电图试次,应用独立成分分析(independent component analysis,ICA)来去除由于眼球运动和眨眼引起的伪影。最后去除超过±100μV 的极端值。

为确定感兴趣的 ERP 成分,将每个被试每个试次的结果(赢 *vs* 输)区分开,并分别对两个结果的 ERP 数据进行叠加平均。对 Fz、Cz、Pz 和 Oz 通道的 ERP 波形图观察得出以下感兴趣的 ERP 成分:①80~180 ms:早期负波 ENW;②180~280 ms:P200 成分;③280~360 ms:负反馈负波 FRN;④360~480 ms:P300 成分;⑤480~800 ms:对于晚于 480 ms 的时间窗内未发现可以明显识别的成分,所以选择 480~800 ms 的时间窗为晚期电位成分 LP。超过 800 ms,没有任何成分。

此外,虽然 280~360 ms 时间窗内的负波被认为是 FRN 成分,但是由于前人研究发现 FRN 振幅受 P200 影响,所以采用 Hajcak 等人的提议,将 P200 的振幅均值与 280~360 ms 的振幅均值的差值作为 FRN 的振幅均值。

1.6　统计学分析

采用 2(分组:高决策能力 *vs* 低决策能力) * 2(结果:赢 *vs* 输)的两因素方差分析,分别计算 Fz、Cz、Pz 和 Oz 通道的 ERP 各成分的平均振幅与行为表现和输赢反馈之间的关系。所有统计分析均采用软件 SPSS 22.0 进行,使用 LSD 校正对两两比较结果进行事后校正,显著水平为 $P<0.05$。

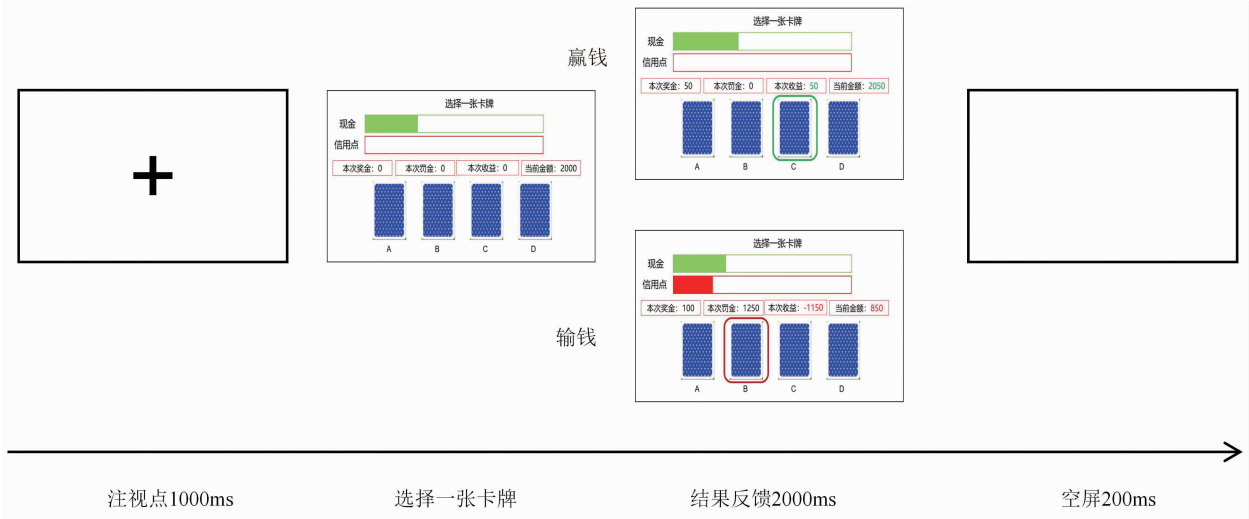


图 1　IGT 任务流程图

2　结果

2.1　IGT 任务绩效

对 IGT 任务的行为学绩效进行分析显示,随着任务进展,被试的任务表现(净分数)不断提升,即被试更多地选择了“好牌”。对净分数的单因素方差分析结果显示:模块主效应显著[$F_{(4,95)}=2.728$, $P=0.034$, $\eta^2=254.260$]。事后检验显示任务绩效在模块 5 和模块 1($P=0.005$)、模块 2($P=0.006$)、模块 3($P=0.026$)以及模块 4($P=0.049$)之间,均差异存在统计学意义(图 2)。

2.2　IGT 任务的脑电 ERP 结果

随着时间进程,绘制各 ERP 成分的地形图显示,ENW与P200主要集中于额叶,FRN与P300成分主要集中在额中线和中央区域,LP 成分主要集中于顶叶区域(图 3)。分别提取 Fz,Cz,Pz 和 Oz 通道的各 ERP 成分在“赢”和“输”结果反馈下的平均振幅(表 1),对两种结果进行配对 t 检验,结果均不显著($P>0.05$)。

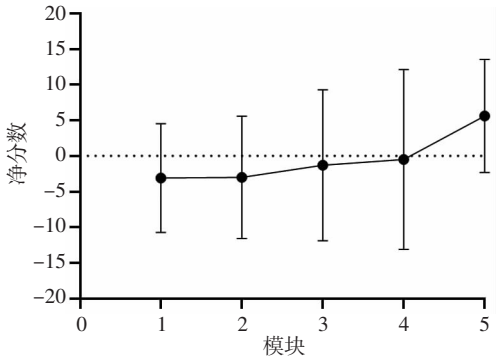


图 2　参与者在 IGT 任务 5 个模块的表现

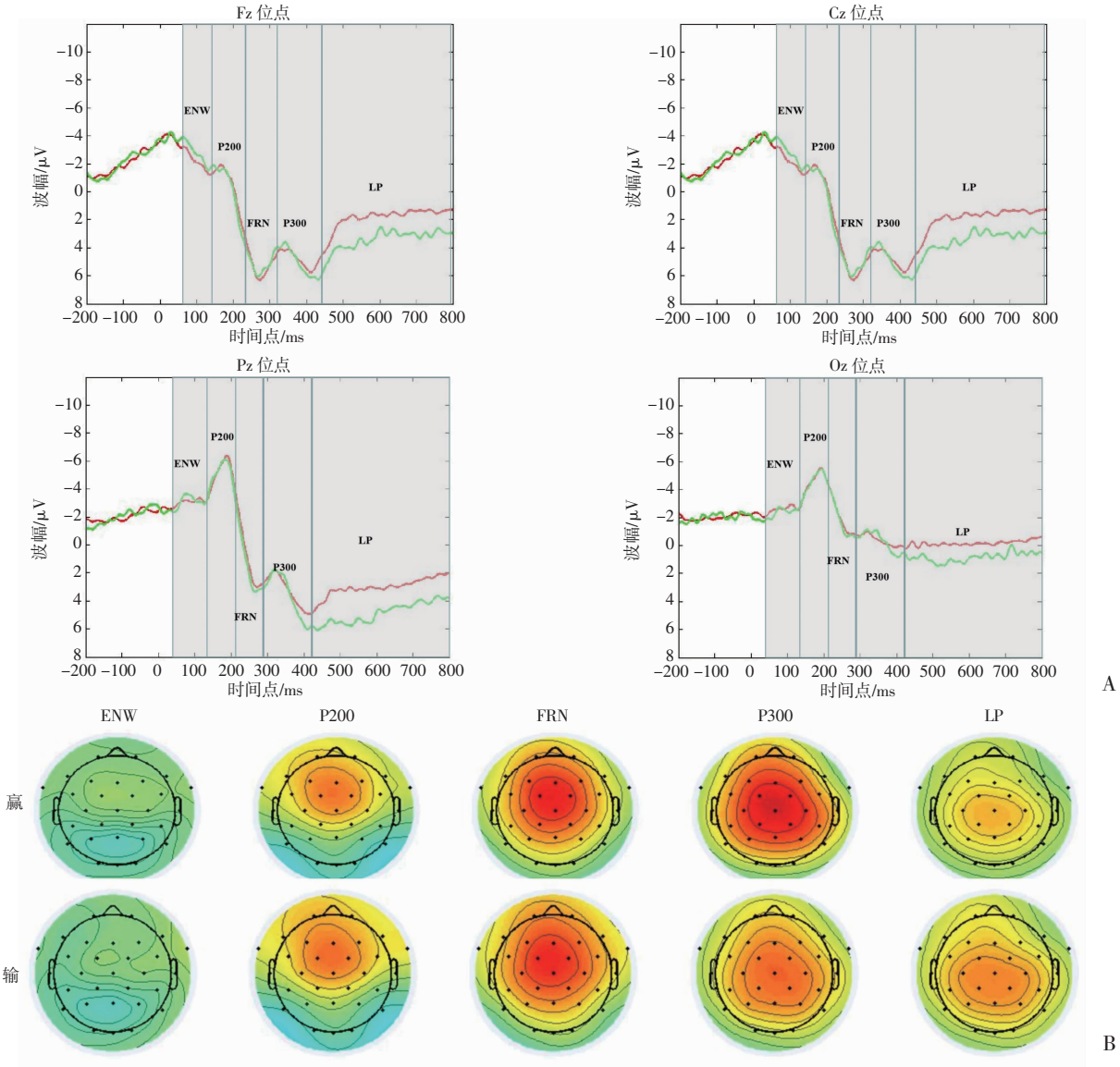


图 3　Fz、Cz、Pz 和 Oz 通道的 ERP 波形图(A)和各 ERP 成分在“赢”“输”结果反馈下的地形图(B)

表 1 各 ERP 成分在“输”“赢”结果反馈下的平均振幅(μV,$\bar{x}\pm s$)

ERP 成分	收益	通道			
		Fz	Cz	Pz	Oz
ENW(80~180 ms)	赢	0.47 ± 1.09	0.18 ± 1.76	−1.92±1.92	−1.46±1.10
	输	0.43±1.75	0.05±2.34	−1.95±2.29	−1.24±1.39
P200(180~280 ms)	赢	4.67±4.19	4.27±3.55	0.77±2.62	−1.26±1.66
	输	4.80±3.75	4.39±3.62	0.95±2.95	−1.08±2.01
FRN(280~360 ms)	赢	6.82±5.52	7.20±4.88	4.46±3.16	1.16±1.53
	输	6.23±5.44	6.69±5.22	4.07±3.84	1.00±1.99
P300(360~480 ms)	赢	6.73±4.86	8.01±4.69	6.29±3.15	1.91±1.53
	输	6.74±5.15	7.93±5.23	6.53±4.29	2.29±2.21
LP(480~800 ms)	赢	3.41±3.43	5.45±3.34	4.82±2.48	1.65±1.47
	输	4.49±4.02	6.35±3.91	5.63±3.32	2.55±2.33

2.3 ERP 振幅与 IGT 任务表现之间的关系

对高、低决策能力的两组被试在“赢”和“输”两种结果下,Fz,Cz,Pz 和 Oz 通道的各 ERP 成分进行比较,结果显示:①早期负波(ENW):在 Oz 通道,分组主效应显著[$F_{(1,18)}=9.357$, $P=0.007$, $\eta^2=0.342$],结果主效应不显著[$F_{(1,18)}=0.668$, $P=0.424$, $\eta^2=0.036$],交互作用不显著[$F_{(1,18)}=1.240$, $P=0.280$, $\eta^2=0.064$]。②P200:在 Oz 通道,分组主效应显著[$F_{(1,18)}=6.923$, $P=0.017$, $\eta^2=0.278$],结果主效应不显著[$F_{(1,18)}=0.257$, $P=0.618$, $\eta^2=0.014$],交互作用不显著[$F_{(1,18)}=0.019$, $P=0.892$, $\eta^2=0.001$]。③反馈负波(FRN):分组主效应边缘显著[$F_{(1,18)}=3.241$, $P=0.089$, $\eta^2=0.153$],结果主效应不显著[$F_{(1,18)}=0.150$, $P=0.704$, $\eta^2=0.008$],交互作用不显著[$F_{(1,18)}=0.029$, $P=0.866$, $\eta^2=0.002$]。其余通道均不显著。

P300 与 LP 成分在各通道均不显著。

3 讨论

本研究对 IGT 任务的行为学绩效进行分析,并分析了在 80~800 ms 的时间窗内,由结果反馈引起的 ERP 成分以及各 ERP 成分与任务表现之间的关系。鉴于以往的文献,在额中央和顶叶区域发现了最相关的结果,本研究主要讨论在 Fz、Cz、Pz 和 Oz 电极上获得的结果。

3.1 IGT 任务行为学绩效随着任务进程不断提升,出现学习效应

本研究将爱荷华赌博任务 100 次选择分成 5 个区组,对被试在每个区组的决策成绩进行分析,进一步了解被试的决策过程。结果表明,被试在任务开始时倾向选择更多的不利卡牌,而随着决策任务的进行,被试逐渐倾向选择较多的有利卡牌。这表明被试刚开始时在 4 种卡牌中进行尝试,随机从 4 种卡牌中进行选择。被试在经过多次尝试并接受了大量不利卡牌的惩罚后,倾向于从有利卡牌中进行选择,学习效应显著增强,决策成绩逐步提升,此结果与其他研究结果一致[19-20]。研究表明,多数被试在决策任务中从第 40 或 50 次开始倾向于选择更多的有利卡牌。

3.2 相较于低决策能力的个体,高决策能力的个体产生更加活跃的早期 ERP 成分

对 ERP 成分进行波形图和地形图的可视化分析可以看出,IGT 任务期间对结果反馈信号的处理开始于 ENW。ENW 与 P200 主要集中于额叶,FRN 与 P300 成分主要在集中在额中线和中央区域,LP 成分主要集中于顶叶区域。在 Oz 通道上,高决策能力的个体不论在赢钱还是输钱的反馈下都产生比低决策能力的个体更高的 ENW、P200 和 FRN 振幅。该结果证明相较于低决策能力的个体,高决策能力个体的大脑对反馈信号的早期反应更加活跃。这种早期的大脑反应可能并不是对结果的处理,而是代表了对反馈的一种评估过程[21]。本研究显示,该早期 ERP 成分主要集中在额叶和中央区域,在不区分“赢”和“输”的情况下对选择的结果进行初步评估[22]。该结果也为决策能力训练的评估提供了神经生理学的指标。另外,本研究提示,对于决策相关脑区的研究除了额叶以外,其他脑区如顶叶(Oz)区域,在决策能力的提升中也可能产生重要的影响,为决策能力的干预提供了新的靶点。

3.3 任务情境与被试动机影响 IGT 任务的表现

与既往研究结果不一致的是,本研究发现在“赢”和“输”两种结果反馈下,各 ERP 振幅均无显著性的不同,并且 P300 和 LP 振幅在高决策能力组和低决策能

力组之间无显著差异。对此结果提出2种猜想:(1)相对于前人研究,本实验采用的任务范式在不同结果的反馈信号的处理上,仅仅采用绿色和红色的字体和方框进行区分,对被试在视觉上产生的差异过小[23]。有研究发现,决策行为的早期信号的产生与情绪高度相关[24],而不同信号之间差异过小可能导致被试对"输""赢"两种结果所产生的情绪差异过低,从而导致两种结果激活的早期电信号之间差异过小;(2)结合P300和LP成分在高低决策能力组间无差异的结果进行分析,并且根据前人研究报告,P300以及LP等后期成分,其振幅可能与任务动机高度相关[25-26]。本研究猜测,该结果不显著可能与被试在任务过程中积极性不高有关。虽然会支付被试金钱报酬,但是针对任务绩效的高低以及完成任务的认真程度却没有相应的评估。可能导致部分被试对于任务过程中的结果反馈没有积极响应,对结果反馈的分析不认真、不充分,因此导致两种结果反馈信号之间产生的差异过低。该结果提示,在进行决策训练时,应采取各种方法(如视觉、听觉双通道训练)让被试更好地进入情境,同时采用按照成绩排名给予相应的金钱奖励的方式,提高被试的动机,从而提高训练的效果。

综上所述,通过对爱荷华赌博任务的行为表现和ERP成分研究,证明了军校学员在决策过程中可以根据选择结果不断进行学习和调整,并发现大脑对于结果反馈信号的早期处理是区分高低决策能力的重要因素。该结果为更有效的决策能力训练提供了指导,并为训练结果提供了神经生理学的评估指标。

参考文献:

[1] BECHARA A, DAMASIO A R, DAMASIO H, *et al*. Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex[J]. Cognition, 1994, 50(1/2/3): 7-15. DOI: 10.1016/0010-0277(94)90018-3.

[2] TOPLAK M E, SORGE G B, BENOIT A, *et al*. Decision-making and cognitive abilities: a review of associations between Iowa Gambling Task performance, executive functions, and intelligence[J]. Clin Psychol Rev, 2010, 30(5): 562-581. DOI: 10.1016/j.cpr.2010.04.002.

[3] WALTEROS C, SÁNCHEZ-NAVARRO J P, MUÑOZ M A, *et al*. Altered associative learning and emotional decision making in fibromyalgia[J]. J Psychosom Res, 2011, 70(3): 294-301. DOI: 10.1016/j.jpsychores.2010.07.013.

[4] PORTH E, MATTES A, STAHL J. The influence of error detection and error significance on neural and behavioral correlates of error processing in a complex choice task[J]. Cogn Affect Behav Neurosci, 2022, 22(6): 1231-1249. DOI: 10.3758/s13415-022-01028-6.

[5] BIANCHIN M, ANGRILLI A. Decision preceding negativity in the Iowa gambling task: an ERP study[J]. Brain Cogn, 2011, 75(3): 273-280. DOI: 10.1016/j.bandc.2011.01.005.

[6] CUI J F, CHEN Y H, WANG Y, *et al*. Neural correlates of uncertain decision making: ERP evidence from the Iowa Gambling Task[J]. Front Hum Neurosci, 2013, 7: 776. DOI: 10.3389/fnhum.2013.00776.

[7] ARBEL Y, DONCHIN E. How large the sin? A study of the event related potentials elicited by errors of varying magnitude[J]. Psychophysiology, 2011, 48(12): 1611-1620. DOI: 10.1111/j.1469-8986.2011.01264.x.

[8] MARTIN E A, MCCLEERY A, MOORE M M, *et al*. ERP indices of performance monitoring and feedback processing in psychosis: a meta-analysis[J]. Int J Psychophysiol, 2018, 132(Pt B): 365-378. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2018.08.004.

[9] DE BRUIJN E R A, JANSEN M, OVERGAAUW S. Enhanced error-related brain activations for mistakes that harm others: ERP evidence from a novel social performance-monitoring paradigm[J]. NeuroImage, 2020, 204: 116238. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2019.116238.

[10] SAILER U, FISCHMEISTER F P S, BAUER H. Effects of learning on feedback-related brain potentials in a decision-making task[J]. Brain Res, 2010, 1342: 85-93. DOI: 10.1016/j.brainres.2010.04.051.

[11] PFABIGAN D M, ALEXOPOULOS J, BAUER H, *et al*. Manipulation of feedback expectancy and valence induces negative and positive reward prediction error signals manifest in event-related brain potentials[J]. Psychophysiology, 2011, 48(5): 656-664. DOI: 10.1111/j.1469-8986.2010.01136.x.

[12] SCHUERMANN B, ENDRASS T, KATHMANN N. Neural correlates of feedback processing in decision-making under risk[J]. Front Hum Neurosci, 2012, 6: 204. DOI: 10.3389/fnhum.2012.00204.

[13] SAN MARTÍN R, MANES F, HURTADO E, *et al*. Size and probability of rewards modulate the feedback error-related negativity associated with wins but not losses in a monetarily rewarded gambling task[J]. NeuroImage, 2010, 51(3): 1194-1204. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2010.03.031.

[14] POLEZZI D, LOTTO L, DAUM I, *et al*. Predicting outcomes of decisions in the brain[J]. Behav Brain Res, 2008, 187(1): 116-122. DOI: 10.1016/j.bbr.2007.09.001.

[15] POLEZZI D, SARTORI G, RUMIATI R, *et al*. Brain

correlates of risky decision-making[J]. NeuroImage, 2010, 49(2): 1886-1894. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2009.08.068.

[16] GOYER J P, WOLDORFF M G, HUETTEL S A. Rapid electrophysiological brain responses are influenced by both valence and magnitude of monetary rewards[J]. J Cogn Neurosci, 2008, 20(11): 2058-2069. DOI: 10.1162/jocn.2008.20134.

[17] BECHARA A, DAMASIO H, TRANEL D, *et al*. The Iowa Gambling Task and the somatic marker hypothesis: some questions and answers[J]. Trends Cogn Sci, 2005, 9(4): 159-162; discussion 162-164. DOI: 10.1016/j.tics.2005.02.002.

[18] 冯田, 霍倩倩, 肖玮. 最优化与满意型决策风格对爱荷华赌博任务的影响[J]. 职业与健康, 2015, 31(15): 2068-2072.
FENG T, HUO Q Q, XIAO W. Effect of optimal and satisfied decision-making styles on Iowa gambling task[J]. Occup Health, 2015, 31(15):2068-2072.

[19] NAKAO, YAMANOUCHI J, TAKENAKA K, *et al*. The Iowa gambling task on HIV-infected subjects[J]. J Infect Chemother, 2020, 26(3): 240-244. DOI: 10.1016/j.jiac.2019.09.008.

[20] GLICKSOHN J, ZILBERMAN N. Gambling on individual differences in decision making[J]. Pers Individ Differ, 2010, 48(5): 557-562. DOI: 10.1016/j.paid.2009.12.006.

[21] ROGER C, BÉNAR C G, VIDAL F, *et al*. Rostral Cingulate Zone and correct response monitoring: ICA and source localization evidences for the unicity of correct- and error-negativities[J]. Neuroimage, 2010, 51(1): 391-403. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2010.02.005.

[22] FRANK M J, WOROCH B S, CURRAN T. Error-related negativity predicts reinforcement learning and conflict biases[J]. Neuron, 2005, 47(4): 495-501. DOI: 10.1016/j.neuron.2005.06.020.

[23] MARTÍNEZ-SELVA J M, MUÑOZ M A, SÁNCHEZ-NAVARRO J P, *et al*. Time course of the neural activity related to behavioral decision-making as revealed by event-related potentials[J]. Front Behav Neurosci, 2019, 13: 191. DOI: 10.3389/fnbeh.2019.00191.

[24] 陈璟, 姜金栋, 汪为, 等. 决策中情绪作用机制的理论研究述评[J]. 心理科学, 2014, 37(6): 1346-1353.. DOI: 10.3724/SP.J.1042.2011.00050
CHEN J, JIANG J D, WANG W, *et al*. The mechanism of emotion in decision making: a critical review of theoretical researches[J]. J Psychol Sci, 2014, 37(6): 1346-1353.. DOI: 10.3724/SP.J.1042.2011.00050

[25] FERRY R A, NELSON B D. Tactile P300 to unpredictable electric shocks: association with anxiety symptoms, intolerance of uncertainty, and neuroticism[J]. Biol Psychol, 2021, 162: 108094. DOI: 10.1016/j.biopsycho.2021.108094..

[26] 雷黎慧, 王萍. 成就动机与框架效应双重影响下大学生创业风险决策研究[J]. 经营与管理, 2017(4): 152-154. DOI: 10.7666/d.y1944298.
LEI L H, WANG P. Research on college students´ venture decision-making under the dual influence of achievement motivation and frame effect[J]. Manag Adm, 2017(4): 152-154. DOI: 10.7666/d.y1944298.

(**收稿**:2023-05-19;**修回**:2023-09-25)

(编辑 张艺霖)