

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2024.03.003

双人困境博弈中决策策略的脑电信号检测研究进展

龚瑾, 随力, 戚文静

(上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093)

【摘要】决策是运用感知觉、记忆、思维等认知能力,对情境做出选择、确定策略的过程。脑电技术和脑电信息分析是研究与分析脑决策功能及决策机制的重要方法之一。无论是在传统人文学科领域还是当代工程技术领域、医学领域,双人困境博弈都有着较广泛的应用或应用前景。囚徒困境博弈和胆小鬼博弈是双人困境研究中最经典的两个博弈模型,这两个双人困境博弈中的脑电信息分析不仅能较客观地描绘出脑在博弈选择策略中的动态信息处理过程,而且能揭示出博弈中合作决策的脑机制。该文归纳和总结了这两个博弈模型的实验范式、决策策略及近年来的脑电信号检测研究结果,并对双人困境博弈的发展趋势和发展方向进行了展望。

【关键词】事件相关电位;囚徒困境;胆小鬼博弈;脑电

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

文章编号:1674-1242(2024)03-0206-08

Research Progress of EEG Signal Detection in Decision-making Strategies in Two-person Dilemma Game

GONG Jin, SUI Li, QI Wenjing

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

【Abstract】Decision making is a process of making choices to situations and determining strategies by using cognitive abilities such as perception, memory and thinking. Electroencephalogram(EEG) technology and EEG information analysis is one of the important methods to study and analyze brain decision function and decision mechanism. The two-person dilemma game has a wide range of applications and prospects in the fields of traditional humanities and contemporary engineering and medicine. The prisoner's dilemma game and the chicken game are two classic game models in the study of two-person dilemma. The EEG information analysis of these two kinds of two-person dilemma games can not only objectively describe the dynamic information processing of the brain in the game choice strategy, but also reveal the brain mechanism of cooperation in the game. This review summarizes the experimental paradigms, decision-making strategies and the findings of brain signal detection in recent years of these two kinds of two-person dilemma games. Finally, the research trend and direction of two-person dilemma games are discussed.

【Key words】Event-related Potential; Prisoner's Dilemma; Chicken Game; Electroencephalogram

收稿日期:2023-10-07。

基金项目:上海理工大学科技发展项目(2019KJFZ239、2020KJFZ232)。

作者简介:龚瑾,硕士研究生,研究方向:生物医学工程;邮箱(E-mail):gongjin2022@163.com。

通信作者:随力,教授,研究方向:神经工程;邮箱(E-mail):lsui@usst.edu.cn。

0 引言

社会困境 (Social Dilemma) 于 1980 年由 Dawes^[1] 首次提出, 个人利益与集体利益冲突时的处境统称为社会困境。根据参与人数的多少, 可以将社会困境分为双人困境和多人困境。双人困境由于参与人数少, 易于进行博弈研究。目前双人困境博弈在很多学科都有较广泛的应用和研究, 但是采用脑电信号检测双人困境博弈中决策策略及相关脑机制的研究总体来说数量非常有限, 更缺少系统的归纳和总结。双人困境研究中最经典的两个博弈模型是囚徒困境 (Prisoner's Dilemma) 博弈和胆小鬼博弈 (Chicken Game)。本文就这两个博弈模型的实验范式、决策策略及影响因素、相关的脑电信号检测和对应的脑机制进行了归纳与总结, 对双人困境博弈的发展趋势和发展方向进行了展望。

1 双人困境博弈的应用领域

1.1 在人文学科领域的应用

双人困境博弈在伦理学、心理学、政治学、经济学、管理学、社会学等人文学科中有着较广泛的应用。伦理学中的应用涉及双人困境博弈规则的设定, 从而在满足个体追求自身利益最大化的前提下实现个体之间的公平^[2]。心理学中的双人困境博弈模型主要用来研究合作与非合作情况下的心理认知过程^[3]。政治学、经济学、管理学等学科均涉及现实社会中个人利益和公共利益之间的关系, 必须首先维护公共利益或公共利益才能够更好地实现个人利益, 必须对博弈各方客观存在的公共利益或公共利益实施有效的管理和维护, 才能有效避免出现非合作博弈的纳什均衡^[4]。总之, 双人困境博弈在传统人文学科领域中一直有着重要的研究价值和实践应用。

1.2 在工程技术领域和医学领域的应用

随着新兴学科和交叉学科的发展, 双人困境博弈模型在工程技术领域和医学领域也有了一定的应用。在交通运输领域, 利用博弈理论对车辆是否能够安全稳定地完成变道与避让行为博弈模型进行仿真分析, 求解博弈的混合策略纳什均衡解^[5], 从而避免车辆变道行为易导致交通事故和交通堵塞的问题。军事学中也涉及博弈问题^[6], 博弈模型的建立

可以有效实现军事战争的意图判断、威胁评估与指挥控制, 从而提高军事决策水平。在现代医学实践中, 双人困境博弈模型也可以模拟一些医院治疗场景^[7], 博弈模型的建立和分析结果有助于改善临床医生与患者或患者家属之间的互动, 如胆小鬼博弈模型在医患信任和医患互动中的应用^[8]。急诊、重症患者治疗和护理中的医疗决策、过度治疗导致住院费用增加及治疗不足导致患者病情加重等医疗场景中均涉及双人困境博弈理论与模型^[9]。综上, 双人困境博弈模型在工程技术领域和医学领域有较广阔的应用前景。

2 双人困境博弈的研究范式、决策策略及影响因素

2.1 囚徒困境博弈和胆小鬼博弈的研究范式

囚徒困境相关理论早期由 Merrill Flood 和 Melvin Dresher 提出, 纳什的非合作博弈研究与后期塔尔对该理论的阐述奠定了现代非合作博弈论的基石。在经典的囚徒困境博弈研究范式中, 由两个被试者 (分别用 A、B 表示) 组成, 每个被试者只有坦白和抵赖两个选项, 从而产生了 A 和 B 都坦白、A 坦白 B 抵赖、A 抵赖 B 坦白、A 和 B 都抵赖 4 种交互效果, 被试者的实验报酬或收益取决于最终的互动决策结果。任何一方收益值的高低都符合以下顺序: 自己坦白对方抵赖 > 双方抵赖 > 双方坦白 > 自己抵赖对方坦白。可见囚徒困境博弈中存在唯一的纳什平衡, 背叛是两种策略中的支配性策略, 并且个人收益最大化选择并非团体收益最大化选择或最佳选择。表 1 是一个典型的囚徒困境博弈收益矩阵, 其中显示了不同决策策略下双方的收益情况, 括号内的第一个值和第二个值分别为被试者 A 与被试者 B 的收益值。

双人困境博弈中的胆小鬼博弈于 1959 年由罗素提出, 起源场景为两人分别驾驶摩托车相向行驶, 率先让路的一方为胆小鬼, 如果双方都不让路, 那就两败俱伤。胆小鬼博弈实验范式中同样有两个被试者 (分别用 A、B 表示), 每个被试者收益值的高低符合以下顺序: 自己直行对方让道 > 双方让道 > 自己让道对方直行 > 双方直行。参加胆小鬼博弈的两个人取得集体收益最大化的条件是彼此建立良好的合作关系, 轮流做出不同的选择^[10]。胆小鬼博

弈存在两个纳什平衡，且无支配性策略，如果两人相互背叛，会导致可怕的结果。相比囚徒困境博弈，胆小鬼博弈更适合研究个体之间的竞争和冲突。表 2 是一个典型的胆小鬼博弈收益矩阵，显示了双方决策下的收益情况，括号内的第一个值和第二个值分别为被试者 A 与被试者 B 的收益值。

表 1 囚徒困境博弈收益矩阵
Tab.1 Payoff matrix in prisoner's dilemma game

	坦白 (被试者 A)	抵赖 (被试者 A)
坦白 (被试者 B)	(-2, -2)	(0, -10)
抵赖 (被试者 B)	(-10, 0)	(-0.5, -0.5)

表 2 胆小鬼博弈收益矩阵
Tab.2 Payoff matrix in chicken game

	让道 (被试者 A)	直行 (被试者 A)
让道 (被试者 B)	(+2, +2)	(+1, +3)
直行 (被试者 B)	(+3, +1)	(0, 0)

2.2 囚徒困境博弈和胆小鬼博弈的决策策略

决策是运用感知觉、记忆、思维等认知能力，对情境做出选择、确定策略的过程。广义上的决策包含判断部分。囚徒困境博弈和胆小鬼博弈虽同属于双人困境博弈，但所蕴含的决策策略并不相同。在囚徒困境博弈中，对个人最有利的决策策略并非集体的最佳策略^[11]，其博弈类型属于非零和博弈。在胆小鬼博弈中，一方的收益就是另一方的损失^[12]，属于零和博弈。所谓的零和博弈就是一方之所得为另一方之所失，双方得失相加为 0，否则为非零和博弈。

在囚徒困境博弈中，群体利益通常必须通过个体之间的合作才能够达到最大化，但对两个被试者来说，“背叛”才是最佳决策策略，因为“背叛”能够为个体带来相对更多的利益。因此，个体会在下次决策选择中考虑是否采用“背叛”决策策略。与囚徒困境博弈不同，胆小鬼博弈并不具有明确的优势策略，最佳结果通常是与对手做出完全不同的选择^[13]。简而言之，在囚徒困境博弈中，双方只有同时为对方考虑才能得到最优结果，信任在博弈策略选择中起到了很大的作用；而在胆小鬼博弈中，双方只有轮流示弱才能获得最优结果，合作在博弈策略选择中起到了很大的作用。在决策策略研究中，囚徒困境博弈常常作为有条件合作的模型、胆小鬼博弈常常作为合作和竞争模型来进行研究与应用。

2.3 影响囚徒困境博弈和胆小鬼博弈决策策略的因素

双人困境博弈中的双方均为处于复杂社会中的人，因此影响博弈决策策略的因素十分繁杂，有人的因素，也有环境的因素。目前认为影响社会困境博弈中的合作策略的因素可以分为三大类，即个体自我因素、对方因素和情景因素。有研究表明，人格影响个体的合作行为，人格特征对合作意识具有预测作用^[14]；性别会影响个体合作水平，有研究表明男性配对的合作水平几乎是女性配对的 2 倍^[15]；年龄也会影响个体合作水平，有研究表明，与成年人相比，儿童倾向于合作，成年人更倾向于竞争^[16]。高权力感者比低权力感者表现出更少的合作行为，高共情者比低共情者表现出更多的合作行为，高共情缓冲高权力感对合作行为具有负面影响^[17]。在社会困境博弈中，不同社会价值取向与社会距离对中国大学生合作行为的影响也不同，相比亲自我者，亲社会者表现出更多的合作行为^[18]。害羞儿童、青少年的合作倾向会由于社会支持的减少而被抑制，启动社会支持能显著增加害羞者的合作行为^[19]。另外，对对方行为的准确预判是决定自己合作与否的关键，而对方的能力线索常常被作为判断其能否提供回报的重要依据。有研究发现，对方的能力越高，自己对对方的合作预期越高，也越发关注合作带来的声誉价值，因而越愿意与对方合作^[20]。对有吸引力外表的偏好虽然不会让被试者对对方直接投资太多，但会让被试者给对方的回报较多^[21]。在社会困境任务中，个体在面对外部群体成员时，会面临更激烈的竞争，拥有更强的赚钱动机^[22]。在博弈中，人们对朋友会比对陌生人表现出更多的合作行为^[23]。

3 双人困境博弈中的脑成像技术与脑电信号检测

现代脑科学技术高度发展，常用的脑成像技术包括功能性近红外光谱 (Functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS)、功能性磁共振成像 (Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)、脑电图 (Electroencephalograph, EEG) 等。这些脑成像技术可以从不同的角度检测到双人困境博弈中人们做出合作或非合作决策时的脑活动状态，对于揭示双人困境博弈中的脑决策机制起到了重要的作用。表 3 列举了近年来双人困境博弈的脑成像相关研究。

在多种脑成像技术中, EEG 技术的高时间分辨率、无创、价格低等特点使研究博弈决策中的脑机制和脑功能更加便捷。EEG 信号蕴含了丰富的频域、时域、时频域和空域信息, 这些信息和脑的高级认知功能有着密切的关系。特别是基于 EEG 的事件相关电位 (Event-Related Potential, ERP) 具有锁时和锁相的特性, 使在毫秒级时间维度研究特定刺激下的特定认知活动成为可能。目前, 在博弈任务选择中诱导出的 ERP 成为研究博弈决策的神经机制的重要生理与心理指标之一。ERP 波形中的

成分可以以 P (Positive) 或 N (Negative) 开头, 后面带一数字, 代表该波出现的潜伏期, 如 P300 (简称 P3), 表示 300ms 左右出现的正向波。有些 ERP 成分的命名和其功能有关。例如, 反馈相关负波 (Feedback-Related Negativity, FRN) 是和反馈信息处理有关的一种 ERP 成分; 错误相关负波 (Error-Related Negativity, ERN) 反映了反应监测系统的活动; 准备电位 (Readiness Potential, RP) 与大脑在行动前的决定有关。ERP 成分的出现及其电位幅值、潜伏期、电流空间分布等参数的改变在

表 3 近年来双人困境博弈的脑成像相关研究
Tab.3 Brain imaging related studies of two-person dilemma game in recent years

年份	技术手段	博弈类型	主要实验结果	实验结论
2014 ^[24]	ERP	胆小鬼博弈	相对于选择冲突, 个体选择合作时, 输钱和赢钱反馈引发的 FRN 与 P3 波幅差异更大	合作增加了个体对博弈结果的预期, 引发了更大的 FRN 效应; 合作共赢诱发了更大的 P3 波幅
2018 ^[25]	fMRI	囚徒困境博弈	右侧眶额叶皮层的局部一致性、低频振幅与社会评价威胁条件下社会困境中的总合作率及受到多次威胁后的合作率呈负相关; 纹状体的低频振幅与之呈负相关	静息态下眶额叶皮层和纹状体的活动情况与社会评价威胁后社会困境中的合作行为有关
2019 ^[26]	ERP 超扫描	囚徒困境博弈	在个体水平上, 决策结果引发的 ERP 成分额叶 P3a 和顶叶 P3b 的振幅对信念更加敏感	信念指数与参与者的行为选择有很强的关联性
2019 ^[27]	ERP	胆小鬼博弈	对方的愤怒情绪诱发了更大的 P3 波幅, 双方均输钱和均赢钱较一方赢钱一方输钱引起的 theta、alpha、beta 和 gamma 频段神经同步性更高, 愤怒和中性情绪较高兴引起的 theta、alpha、beta 和 gamma 神经同步性更高	人际情绪影响个体决策行为; 高兴情绪和愤怒情绪均通过情感反应与推断加工影响决策
2020 ^[28]	fNIRS	囚徒困境博弈	单人脑活动上主要表现为 dlPFC (背外侧前额叶) 的激活, 在双人进行腐败合作时, 额上回和颞顶联合区被显著一致地激活, 并且在双低道德组中右侧额上回的激活水平显著高于双高道德组	无论是在常规合作中还是在腐败合作中, dlPFC 都起到了重要的认知调控和情绪调节作用
2020 ^[29]	ERP	胆小鬼博弈	与非货币奖励实验相比, 在货币奖励实验中, 参与者在做出攻击性决策后, 对手决策的反馈相关负性反应更强, 而 P3 波幅对货币奖励不敏感	在早期和自动结果处理阶段, 货币报酬会提高消极互惠的预期
2021 ^[30]	基于 EEG 的脑机接口	胆小鬼博弈	攻击行为与减少 α 事件相关的去同步化有关, 表明精神力量减弱; 报复和针锋相对策略的使用也与较小的 α 事件相关的去同步化有关	提供了一种新方法最大限度地减少运动混淆, 并表明在社会冲突中选择攻击和报复不那么费力
2021 ^[31]	ERP	胆小鬼博弈	当对手表现出合作与竞争的倾向时, 参与者对对手的攻击行为有较大的 P3 波幅和较大的频段能量	人们会根据对手的行为调整自己的合作行为
2022 ^[31]	fMRI	囚徒困境博弈	在预期阶段, 公平时被试者更多地激活了前扣带回、内侧额上回、尾状核等脑区; 在选择决策阶段, 公平时被试者更多地激活了额中回、尾状核/前脑岛、额下回、扣带回等脑区; 在结果反馈阶段, 不公平时被试者更多地激活了尾状核、脑岛、扣带回、眶部额下回等脑区	在不公平情境下, 被试者的扣带回、尾状核/前脑岛、眶部额下回活动反应更加强烈
2022 ^[32]	fNIRS	胆小鬼博弈	在 dlPFC 上, LL (低零和-低零和) 组中的低零和信念被试者的激活值高于 LH (低零和-高零和) 组中的低零和信念被试者; LH 组中的高零和信念被试者的激活值高于低零和信念被试者; HH (高零和-高零和) 组在 rTPJ (右侧颞顶联合区) 的脑间同步高于 LL 组, HH 组在 dlPFC 的脑间同步高于 LH 组	零和信念不仅会对个体的合作行为产生影响, 还会对互动双方的脑间同步产生影响
2022 ^[33]	ERP	胆小鬼博弈	被试者和解的结果引起的 dFRN (对手选择进攻时的 FRN 减去对手选择和解时的 FRN) 显著负于被试者进攻; 对手和解的结果引起的 theta-ERS 和 P3 波幅显著大于对手进攻; 非零和博弈组被试者进攻的结果引起的 P3 波幅和 theta-ERS 大于被试者和解; 零和博弈组被试者和解的结果引起的 P3 波幅显著大于被试者进攻	dFRN、theta-ERS 和 P3 波幅在不同情况下有差异
2023 ^[34]	ERP 时频分析	基于囚徒困境的第三方惩罚任务	损失情境比收益情境诱发了更大的 P3 波幅, 激活了更高的 δ 频段能量; 与 CC (双方选择合作)、DD (双方选择背叛) 及 DC (一方背叛, 一方合作) 方案相比, 第三方在 CD (一方合作, 一方背叛) 方案中诱发了更大的 P3 波幅, 激活了更高的 β 频段能量	个体在损失情境下更愿意制裁违反社会规范的行为, 拒绝不公平的损失比接受不公平的收益诱发了更多的认知冲突

一定程度上反映了脑内活动的相关信息^[35]。同样，在囚徒困境博弈和胆小鬼博弈实验研究中，ERP 成分也能反映出博弈决策中的脑认知功能，两种博弈研究中的 ERP 成分、主要分布区域与相关性如表 4 所示。

表 4 常见决策相关 ERP 成分、主要分布区域与相关性
Tab.4 ERP components related to common decisions, main distribution and correlation

ERP 成分	主要分布区域	ERP 的博弈决策相关性
P3 ^[36]	中央顶区	与决策动机和认知冲突相关
FRN ^[37]	内侧额叶	与反馈阶段的行为误差和损失相关
P1 ^[38]	颞枕区	与早期注意力资源量、特征察觉、冲突知觉相关
ERN ^[39]	背外侧前扣带皮层	由错误反应后的负反馈诱发
RP ^[40]	额叶和中央区	更早、更灵敏、更深刻地反映了加工图像信息时的视角记忆和特征判断等认知水平
N2 ^[41]	中央区	与反应冲突检测相关

4 参与博弈决策策略的脑结构和脑网络

博弈中的决策属于高级认知功能之一。研究表明，人类的前额叶皮层（Prefrontal Cortex, PFC）是执行思考、计划和决策的关键脑区^[42]之一，前额叶皮层在博弈决策中的重要地位一方面体现为前额叶皮层的几个区域均参与了决策脑高级功能，另一方面体现为前额叶皮层同参与决策功能的其他脑区有着广泛的神经投射关系，形成了脑信息网络。

前额叶皮层包括额极（Rostral）、背外侧（Dorsolateral）、腹外侧（Ventrolateral）、内侧（Medial）和眶额（Orbitofrontal）等几个区域，这几个区域在脑高级认知功能中的作用也是有差别的，其主要功能如图 1 所示。

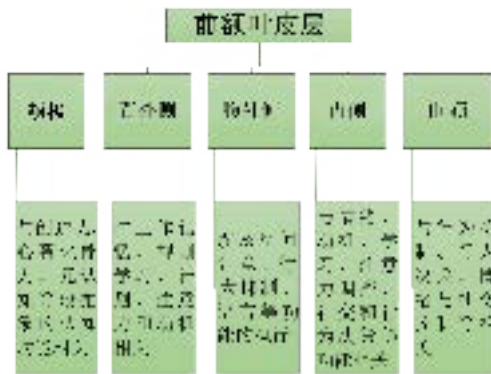


图 1 前额叶皮层各分区功能介绍
Fig.1 Functional introduction of each prefrontal cortex region

人甚至所有哺乳动物做出选择或规避风险时都依赖眶额叶皮质^[43]，该皮层能将外部刺激与内部状态整合在一起，调控多种脑高级认知功能，如奖赏预测、工作记忆、风险决策、情绪调节等神经活动^[44]。眶额叶皮质参与的预期奖赏系统可有效平衡预期与奖赏之间的偏差，及时调整预期，指导联想学习，规避错误，提高学习效率。内侧前额叶皮层在博弈决策行为中也起到了关键的作用，小鼠的简化爱荷华博弈实验研究结果表明，内侧前额叶皮层神经元群体参与了决策过程中不同行为的编码^[45]。同样，人在博弈决策过程中，多数情况下需要对多种选择进行对比，脑的这种“评估和比较”过程被证明是眶额叶皮质与前额叶皮质区域共同参与的过程^[46]。除了评估、对比，大脑还具有灵活调整策略的高级功能，该过程主要在背外侧前额叶皮层进行，该部位能控制认知过程中的神经元反应情况，以应对不同的处境^[47]。在这一过程中，大脑前扣带回与背外侧前额叶皮层的功能相辅相成，前扣带回主要检测识别“改变行动的必要性”，然后由背外侧前额叶皮层负责实施。现代博弈中的脑决策机制研究表明，决策功能不仅涉及前额叶皮层的几个脑区，还与脑内其他区域的结构和功能密不可分，形成了较复杂的脑网络，如内侧眶额叶皮质与海马体、杏仁核、前额叶、丘脑背外侧核、前扣带回形成了广泛的联系，参与奖赏、学习与记忆功能；外侧眶额叶皮质与杏仁核内侧基底核、丘脑腹外侧核、前运动皮质、后扣带回连接，可终止错误活动的进行^[48-50]。

5 总结与展望

在双人困境博弈的脑电检测方面，未来的发展趋势和发展方向可能集中在以下几个方面。

5.1 双人困境博弈模型的应用和拓展方面

双人困境博弈模型目前已在传统人文学科领域、工程技术领域和医学领域有了一定的应用。随着各学科的发展和更多新型学科的出现，双人困境博弈模型的应用将进一步扩大。双人困境博弈模型中经典的囚徒困境博弈模型和胆小鬼博弈模型的实验范式也会出现更多的衍生版本。例如，囚徒困境博弈模型和胆小鬼博弈模型目前出现了扩展的重复版本，称为重复博弈模型，即博弈在双人中连续多

次进行, 参与人可以依据对手先前的选择改变自己目前的决策策略, 有机会对对手之前的决策选择进行惩罚, 将惩罚机制融入合作决策策略。

5.2 双人困境博弈决策策略的多模态和超扫描检测方面

脑电信号在揭示博弈决策的神经机制方面起到了重要作用, 但不可否认, 脑电信号具有空间分辨率比较低的局限性, 功能性近红外光谱、功能磁共振成像等检测虽然时间分辨率较低, 检测价格较昂贵, 但空间分辨率较高, 这些检测连同脑电信号检测构成的多模态检测正好可以互相取长补短, 使博弈决策脑机制研究更全面、更深入。近年来兴起的超扫描技术能利用这些脑成像技术对处于社会互动中的两人或多人的大脑神经机制进行同时扫描, 通过分析脑间活动同步与行为指标之间的关系揭示社会互动的脑机制, 具有较高的生态效度。多模态检测和超扫描检测将是未来困境博弈研究必然的发展趋势之一。

5.3 博弈决策中的脑电信号分析方面

双人困境博弈决策过程中的脑电信号的解析对揭示脑的高级决策认知功能至关重要, 但目前脑电信号的解析大多基于传统的解析方法, 博弈决策过程中的脑电信号特征值大多是传统的脑电信号指标, 如频谱、常规ERP成分及这些成分的潜伏期等。随着脑科学和人工智能的发展, 机器学习算法和深度学习算法将更多地应用于脑电信号分析, 新的脑电信号特征值的发掘和人工智能在脑电信号分析中的运用无疑是博弈决策过程中脑电信号分析方面的发展方向之一。

5.4 博弈决策中的脑机制、脑机接口和脑功能调控方面

博弈过程中的决策功能是脑高级功能之一, 决策功能和其他脑高级功能之间也是密切相关的, 博弈决策中的脑决策机制研究无疑对揭示整个脑高级功能起到了一定的促进作用。博弈决策过程中的脑电信号特征值, 如P3、FRN、ERN、RP等, 也是脑机接口系统最常见的控制信号, 目前已有将社会互动中的脑电信号应用于脑机接口系统的研究报告。因此, 将博弈决策中脑电信号的输出应用于脑

机接口系统将是未来的发展方向和发展趋势之一。脑是人类行为的中枢, 影响个体在社会中的行为表现和决策, 采用无创性脑刺激技术(如经颅直流电刺激、经颅磁刺激等)调控脑决策功能和合作行为也是未来博弈决策研究的方向之一。

参考文献

- [1] DAWES R M. Social dilemmas [J]. *Annual Review of Psychology*, 1980, 31(1): 169-193.
- [2] 赵靓, 邹崇理. 伦理学视角下的囚徒困境——博弈论在伦理学应用一例 [J]. *重庆理工大学学报(社会科学)*, 2017, 31(4): 6-13.
ZHAO Liang, ZOU Chongli. The prisoner's dilemma from the perspective of ethics: an example of the application of game theory in ethics [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Social Sciences)*, 2017, 31(4): 6-13.
- [3] PENG M, WANG X, CHEN W, *et al.* Cooperate or aggress? An opponent's tendency to cooperate modulates the neural dynamics of interpersonal cooperation [J]. *Neuropsychologia*, 2021(162): 108025-.
- [4] 刘新民, 蔺康康, 王垒. 收益流风险视角下双渠道供应链的囚徒困境问题分析 [J]. *中国管理科学*, 2022, 30(11): 84-94.
LIU Xinmin, LIN Kangkang, WANG Lei. An analysis of the prisoner's dilemma of dual-channel supply chain from the perspective of income flow risk [J]. *Management Science in China*, 2022, 30(11): 84-94.
- [5] 金蔓. 基于博弈论的车辆自主变道决策算法研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2023.
JIN Man. Research on vehicle autonomous lane change decision algorithm based on game theory [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023.
- [6] 漆海霞. 国际军事冲突调停的三种策略效果比较 [D]. 北京: 清华大学, 2007.
QI Haixia. Comparison of the effect of three strategies on mediation of international military conflicts [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [7] YEUNG H M, MAKKAPATI S. Applying game theory models to inpatient medicine: opportunities to improve care [J]. *J Community Hosp Intern Med Perspect*, 2023, 13(1): 20-24.
- [8] SAPOSNIK G, JOHNSTON S C. Applying principles from the game theory to acute stroke care: learning from the prisoner's dilemma, stag-hunt, and other strategies [J]. *International Journal of Stroke*, 2016, 11(3): 274-86.
- [9] 卢加发, 钟宛静, 韩伟. 急诊医学医患共同决策中的博弈分析 [J]. *医学与哲学*, 2023, 44(2): 21-24.
LU Jiafa, ZHONG Wanjing, HAN Wei. Game analysis of doctor-patient co-decision in emergency medicine [J]. *Medicine and Philosophy*, 2023, 44(2): 21-24.

- [10] 李颖, 张振. “囚徒困境”与“斗鸡博弈”比较研究[J]. *兰州教育学院学报*, 2014, 30(6): 128-129.
LI Ying, ZHANG Zhen. A comparative study on “Prisoner’s Dilemma” and “Chicken Game” [J]. *Journal of Lanzhou University of Education*, 2014, 30(6): 128-129.
- [11] 杨春英, 李燕. 囚徒困境下的决策选择[J]. *中国商界(下半月)*, 2008(6): 244.
YANG Chunying, LI Yan. Decision choices under the prisoner’s dilemma[J]. *Business China (Second Half)*, 2008(6): 244.
- [12] 魏连启. 胆小鬼游戏与智猪博弈——弱者的决策策略[J]. *新东方*, 2006(5): 41-42.
WEI Lianqi. The chicken game and the game of intelligent pig: the decision-making strategy of the weak[J]. *The New Orient*, 2006(5): 41-42.
- [13] HEUS P D, HOOGERVORST N, DIJK E V. Framing prisoners and chickens: valence effects in the prisoner’s dilemma and the chicken game [J]. *Journal of Experimental Social Psychology*, 2010, 46(5): 736-742.
- [14] 王娜. 中国人人格特质结构对合作的影响机制[J]. *心理与行为研究*, 2012, 10(2): 92-97.
WANG Na. The influence mechanism of Chinese personality trait structure on cooperation[J]. *Studies of Psychology and Behavior*, 2012, 10(2): 92-97.
- [15] COLMAN A M, PULFORD B D, KROCKOW E M. Persistent cooperation and gender differences in repeated prisoner’s dilemma games: some things never change [J]. *Acta Psychologica*, 2018(187): 1-8.
- [16] 孙昕怡, 陈璟, 李红, 等. 合作指数与描述方式对儿童囚徒困境博弈中合作行为的影响[J]. *心理发展与教育*, 2009, 25(1): 27-33.
SUN Xinyi, CHEN Jing, LI Hong, *et al.* The effect of cooperation index and description on cooperative behavior in child prisoner’s dilemma game[J]. *Psychological Development and Education*, 2009, 25(1): 27-33.
- [17] 马苏兰, 孙倩, 田晓明. 权力感对公共物品博弈中合作行为的影响: 共情的调节作用[J]. *心理技术与应用*, 2024, 12(4): 193-199.
MA Sulan, SUN Qian, TIAN Xiaoming. The influence of the sense of power on cooperative behavior in the game of public goods: the moderating role of empathy[J]. *Psychology Techniques and Applications*, 2024, 12(4): 193-199.
- [18] 陈可炫, 邓永光, 吴铁钧. 价值取向和社会距离对大学生合作行为的影响[J]. *校园心理*, 2024, 22(1): 37-41.
CHEN Kexuan, DENG Yongguang, WU Tiejun. The effect of value orientation and social distance on college students’ cooperative behavior[J]. *Journal of Campus Life & Mental Health*, 2024, 22(1): 37-41.
- [19] 汪小虎, 魏琪, 付有恒, 等. 害羞对儿童青少年合作水平的影响: 社会支持的作用[J]. *教育生物学杂志*, 2024, 12(1): 59-64.
WANG Xiaohu, WEI Qi, FU Youheng, *et al.* The effect of shyness on the level of cooperation in children and adolescents: the role of social support[J]. *Journal of Bio-education*, 2024, 12(1): 59-64.
- [20] 李晴蕾. 囚徒困境博弈中对手间接能力的线索对合作行为的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2023.
LI Qinglei. Influence of opponent indirect ability cues on cooperative behavior in prisoner’s dilemma game [D]. Shanghai: East China Normal University, 2023.
- [21] SMITH F G, DEBRUINE L M, JONES B C, *et al.* Attractiveness qualifies the effect of observation on trusting behavior in an economic game [J]. *Evolution and Human Behavior*, 2009, 30(6): 393-397.
- [22] BORNSTEIN G, BUDESCU D, ZAMIR S. Cooperation in intergroup, n-person, and two-person games of chicken [J]. *Journal of Conflict Resolution*, 1997, 41(3): 384-406.
- [23] CHEN Y Z, LU J M, WANG Y W, *et al.* Social distance influences the outcome evaluation of cooperation and conflict: Evidence from event-related potentials [J]. *Neuroscience Letters*, 2017(647): 78-84.
- [24] 白丽英, 袁博, 张蔚, 等. 人际合作与冲突影响博弈决策的结果评价[J]. *心理学报*, 2014, 46(11): 1760-1771.
BAI Liying, YUAN Bo, ZHANG Wei, *et al.* Interpersonal cooperation and conflict influence the outcome evaluation of game decision making[J]. *Journal of Psychology*, 2014, 46(11): 1760-1771.
- [25] 陈卓, 刘志远, 郑丽, 等. 社会评价威胁对社会困境中决策行为的影响: 基于静息态fMRI的研究[J]. *磁共振成像*, 2018, 9(5): 8.
CHEN Zhuo, LIU Zhiyuan, ZHENG Li, *et al.* The effect of social evaluation threats on decision-making behavior in social dilemmas: a study based on resting state fMRI[J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2018, 9(5): 8.
- [26] ZHANG D, LIN Y, JING Y, *et al.* The dynamics of belief updating in human cooperation: findings from inter-brain ERP hyperscanning [J]. *NeuroImage*, 2019(198): 1-12.
- [27] 郑婷婷. 人际情绪影响斗鸡博弈的神经动力学机制[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
ZHENG Tingting. The neurodynamic mechanism of interpersonal emotion affecting cockfighting game [D]. Xi’an: Shaanxi Normal University, 2019.
- [28] 王驹. 常规合作和腐败合作的认知神经机制: 来自近红外超扫描的研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2020.
WANG Ju. Cognitive neural mechanisms of routine cooperation and corrupt cooperation: a study from near infrared ultra-scanning [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020.
- [29] LI J, XU N, ZHONG Y. Monetary payoffs modulate reciprocity

- expectations in outcome evaluations: an event-related potential study [J]. *Eur J Neurosci*, 2021, 53(3): 902-915.
- [30] WANG Y, LIN Y, FU C, *et al.* Effortless retaliation: the neural dynamics of interpersonal intentions in the chicken game using brain-computer interface [J]. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2021, 16(11): 1138-1149.
- [31] 李丹丹. 公平感对合作行为和撒谎行为的影响及神经机制 [D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- LI Dandan. The influence of perceived fairness on cooperative behavior and lying behavior and its neural mechanism [D]. Chongqing: Southwest University, 2022.
- [32] 胡汉玉. 零和情景及信念对合作行为的影响及其脑机制 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2022.
- HU Hanyu. Effects of zero-sum scenarios and beliefs on cooperative behavior and their brain mechanisms [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2022.
- [33] 王晓慧. 不同情境下 Chicken Game 中的合作行为与结果评价 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2022.
- WANG Xiaohui. Cooperative behavior and outcome evaluation of Chicken Games in different situations [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2022.
- [34] 杨蕾. 得失情境对利他惩罚的调节 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2023.
- YANG Lei. The regulation of altruistic punishment in the context of gain and loss [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2023.
- [35] OMEJC N, ROJC B, BATTAGLINI P P, *et al.* Review of the therapeutic neurofeedback method using electroencephalography: EEG Neurofeedback [J]. *Bosn J Basic Med Sci*, 2019, 19(3): 213-220.
- [36] 谈壮壮. 大学生诚信感及其在决策中的特点: 来自行为与 ERP 的证据 [D]. 上海: 上海师范大学, 2017.
- TAN Zhuangzhuang. College students' sense of integrity and its characteristics in decision making: evidence from behavior and ERP [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2017.
- [37] 尤婷婷, 张利平, 祁国梅, 等. 机会公平在早期加工阶段影响个体实际结果的评价 [J]. *心理学报*, 2023, 55 (12): 1997-2012.
- YOU Tingting, ZHANG Liping, QI Guomei, *et al.* Opportunity equity affects the evaluation of individual actual results in the early processing stage [J]. *Acta Psychologica Sinica*, 2023, 55 (12): 1997-2012.
- [38] 杨阳. 恐惧面孔表情探测的注意动态变化过程 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2019.
- YANG Yang. The dynamic change of attention in the detection of fearful facial expression [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2019.
- [39] 刘玉丽, 张智君. 错误相关负电位 (ERN) 及其理论解释 [J]. *应用心理学*, 2008, 14 (2): 180-186, 192.
- LIU Yuli, ZHANG Zhijun. Error related negative potential (ERN) and its theoretical explanation [J]. *Chinese Journal Applied Psychology*, 2008, 14 (2): 180-186, 192.
- [40] 王志远, 刘明辉. 抑郁症脑功能影像学研究进展 [J]. *中国行为医学科学*, 2006 (8): 760-761.
- WANG Zhiyuan, LIU Minghui. Advances in imaging studies of brain function in depression [J]. *Chinese Journal of Behavioral Medical Science*, 2006(8): 760-761.
- [41] TRELEAVEN-HASSARD S, GOLD J, BELLMAN S, *et al.* Using the P3a to gauge automatic attention to interactive television advertising [J]. *Journal of Economic Psychology*, 2010, 31(5): 777-784.
- [42] JOBSON D D, HASE Y, CLARKSON A N, *et al.* The role of the medial prefrontal cortex in cognition, ageing and dementia [J]. *Brain Communications*, 2021, 3(3): fcab125.
- [43] STALNAKER T A, COOCH N K, SCHOENBAUM G. What the orbitofrontal cortex does not do? [J]. *Nature Neuroscience*, 2015, 18(5): 620-627.
- [44] RUDEBECK P H, RICH E L. Orbitofrontal cortex [J]. *Current Biology*, 2018, 28(18): R1083-R1088.
- [45] 马骁. 小鼠内侧前额叶皮层神经元在价值决策行为中的编码机制 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- MA Xiao. Encoding mechanism of mouse medial prefrontal cortex neurons in value decision behavior [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [46] DIXON M L, THIRUCHSELVAM R, TODD R, *et al.* Emotion and the prefrontal cortex: an integrative review [J]. *Psychological Bulletin*, 2017, 143(10): 1033-1081.
- [47] CHAO W Y, JUN L, CHUN W Y, *et al.* A randomized, sham-controlled trial of high-definition transcranial direct current stimulation on the right orbital frontal cortex in children and adolescents with attention-deficit hyperactivity disorder [J]. *Frontiers in Psychiatry*, 2023(14): 987093.
- [48] ROLLS E T. The orbitofrontal cortex and emotion in health and disease, including depression [J]. *Neuropsychologia*, 2019(128): 14-43.
- [49] CHENG W, ROLLS E T, QIU J, *et al.* Medial reward and lateral non-reward orbitofrontal cortex circuits change in opposite directions in depression [J]. *Brain: a Journal of Neurology*, 2016, 139(12): 3296-3309.
- [50] 陈从新, 姚晶晶, 吕一丁, 等. 眶额叶皮质功能及其在精神疾病中的作用 [J]. *中国神经精神疾病杂志*, 2020, 46 (12): 755-758.
- CHEN Congxin, YAO Jingjing, LV Yiding, *et al.* Orbitofrontal cortex function and its role in psychiatric disorders [J]. *Chinese Journal of Nervous and Mental Diseases*, 2020, 46 (12): 755-758.