

· 学界视点 ·

偏好的异质性与一致性

——基于损失厌恶和脑刺激的神经经济学研究

贾拥民 黄达强 郑昊力 罗俊 叶航*

摘要：行为经济学家通过经验观察发现了个体风险决策中的损失厌恶现象，从而对经济学理性假说的公理体系构成了挑战。我们运用神经经济学的研究方法，通过经颅直流电刺激（tDCS）技术，从因果关系角度进一步验证了损失厌恶的神经机制。我们的研究发现，大脑神经系统对收益和损失的信息处理是非对称性的，从而使风险决策者的偏好表现出明显的逆转；但在给定的情境（收益或损失）下，决策者的行为偏好仍然服从一致性公理的要求。这一研究结果既可以拓展经济学对人类行为偏好的传统认识，又可以容纳行为经济学家对人类行为偏好的经验观察，从而为经济学基础理论的发展提供了一种可行的范式。

关键词：风险偏好 损失厌恶 偏好异质性 偏好一致性

JEL 分类号：A10, A12, C91, D01 **中图分类号：**F011, F016

文献标识码：A **文章编号：**1000-6249(2015)05-097-23

一、引言

“损失厌恶”（loss aversion）也许是经济学家最早发现的“异象”（anomalies）之一。所谓异象，是指那些与标准经济学模型预测不符的经验事实。马科维茨和威廉姆斯早在20世纪50和60年代就注意到投资者的这一反常行为（Markowitz, 1952; Williams, 1966），卡尼曼和特沃斯基系统研究了损失厌恶现象（Kahneman and Tversky, 1979; Tversky and Kahneman, 1992），并在此基础上创立了著名的“前景理论”（prospect theory）。

损失厌恶的一种标准表现为人们对等概率输赢的赌博不感兴趣，比如一项赌注为100元，输赢概率各为50%的赌局通常会被人拒绝。卡尼曼和特沃斯基（1979）认为，这是因为损失100

* 贾拥民，浙江大学经济学院和浙江大学跨学科社会科学研究中心，E-mail: jameschia@163.com，通信地址：浙江省杭州市浙大路38号浙江大学经济学院，邮编：310027；黄达强，浙江大学经济学院和浙江大学跨学科社会科学研究中心，E-mail: hdqjerry@163.com；郑昊力，浙江大学经济学院和浙江大学跨学科社会科学研究中心，E-mail: stephen36808@hotmail.com；罗俊，浙江大学经济学院和浙江大学跨学科社会科学研究中心，E-mail: roger.1228@163.com；叶航（通讯作者），浙江大学经济学院和浙江大学跨学科社会科学研究中心，E-mail: hangye@zju.edu.cn。

本文系国家社科基金重点项目“关于新兴经济学理论创新的综合研究”（13AZD061）阶段性研究成果。

元在人们心理上所产生的负效用要远远大于获得 100 元所产生的正效用。后续一系列研究还表明，损失带来的负效用大约相当于同等收益正效用的 2 倍左右（Tversky and Kahneman, 1981; Kahneman et al., 1990）。这就意味着，一张以相等机会赢得 200 元或输掉 100 元的彩票在人们心目中的估值为 0 元。这一现象无疑违背了经典的期望效用理论，我们可以将其形式化为：

$$U(x) < -U(-x), \text{ 当 } x > 0 \text{ 时} \quad (1)$$

损失厌恶的另一种重要表现为，当人们在 A. 100% 获得 3000 元与 B. 80% 获得 4000 元之间选择时，绝大多数被试都选择了 A；但当同一批被试在 A. 100% 损失 3000 元与 B. 80% 损失 4000 元之间选择时，绝大多数却选择了 B（Kahneman and Tversky, 1979）。卡尼曼和特沃斯基指出：如果一个被试的偏好是风险规避型的，那么无论哪种情境下他都应该选择不包含风险的 A；如果一个被试的偏好是风险追逐型的，那么无论哪种情境下他都应该选择包含风险的 B；但实验结果表明，同一被试在第一种选择中表现出风险规避偏好，在第二种选择中却表现出风险追逐偏好。这一偏好逆转无疑违背了经济学理性假设的偏好一致性公理（Lichtenstein and Slovic, 1971; Tversky and Kahneman, 1991; Ball et al., 2012），即：

$$A > B \text{ 且 } B > A, \text{ 而 } A \neq B \quad (2)$$

表 1 损失厌恶在现实经济中的各种表现

现象名称	涉及领域	相关描述	代表性文献
净资产溢价	金融学	股票回报率远高于债券回报率	Benartzi & Thaler, 1995
持股意向	投资决策	投资者过早出售盈利股票，却长期持有亏损股票	Shefrin & Statman, 1985
不动产惜售	投资决策	房价低于买入价时长期持有房产，不惜支付各种成本	Genessove & Mayer, 2001
终局效应	投资决策	每天赛马的最后一局，输钱的人更倾向于改投高风险的赌注	Jullien & Salanie, 2000
非对称价格弹性	微观经济学	消费者对涨价的反应远比降价更为敏感	Putler, 1992
禀赋效应	微观经济学	人们对某一他所占有的物品效用的估值大于他所没有的物品	Kahneman et al., 1990
非对称消费弹性	宏观经济学	收入提高时消费水平增加，但收入减少时消费水平不变	Duesenberry, 1951
货币幻觉	宏观经济学	物价水平和名义收入等比提高，比二者等比下降更吸引人	Shafir et al., 1997
劳动供给曲线的拐点	劳动经济学	完成每天预定的收入目标后，出租车司机就倾向于收工	Camerer et al., 1997
维持现状和默认状态	保险学	投保者很少改变保险计划，往往选择默认的保险品种	Johnson et al., 1992

注：本表编制参考了凯莫勒等（2004）、威尔金森（2008）和金迪斯（2009）等有关著作。

事实上,作为异象的损失厌恶不只是一种在行为经济学家的实验室中才能观察到的异常现象,它还广泛存在于各种真实的经济活动中。表1是我们根据有关文献对损失厌恶在现实经济生活中各种表现所做的归纳:

从经验实证看,上述被观察到的现象对经济学理性假说(包括期望效用理论和偏好一致性公理)构成了系统性背离;所谓“系统性背离”是指这些背离都有一个明确的、可预见的方向,而不是随机产生的决策错误(Wilkinson, 2008)。对经济学家来说,这就意味着他们必须正视人们在风险决策中所表现出来的损失厌恶现象,并给出一个合乎逻辑的解释。

事实上,20世纪70年代以来,经济学家已经为此做出过许多努力,这种努力主要沿着两个方向展开:第一,尝试修正公理体系,比如,有条件地放松偏好一致性公理,特别是允许对“无关选择独立性”的偏离,这在一定程度上可以容纳损失厌恶的存在(Starmer, 2000);第二,尝试修正决策理论,提出各种形式的非期望效用理论,如参照点依赖(Brickman et al., 1978)、加权效用理论(Chew and MacCrimmon, 1979)、心理核算(Thaler, 1985)、沮丧理论(Loomes and Sugden, 1986)、中介模型(Gul, 1991; Nielsen, 1992)和前景理论(Tversky and Kahneman, 1992)等等,以图解释包括损失厌恶在内的多种经济异象。

但正如弗登伯格所批评的,行为经济学家改进理论的常规方法往往是在标准经济学模型中修改一两个假设,从而使之更加符合现实;但这种步步为营的方法存在着很大的危险,因为对某个假设的放松可能会对其他假设产生间接影响,从而使这些假设彼此冲突。因此,构建模型的人需要将所有假设视为一个整体,并考察其中多少假设需要修正,从而使这些假设在修改后不会彼此发生冲突(Fudenberg, 2006)。

诞生于本世纪初的神经经济学则为我们提供了另一种完全不同的思路(叶航等, 2007):例如,格林切尔(2003)认为,人们在不确定条件下所表现出来的决策行为,在传统经济学理论中被描述为各种复杂的理性计算能力;但在神经经济学家看来,进化赋予人类的也许并不是一套最优的解决方法,而是一个“最优的大脑”。正如威尔金森(2008)所言,我们的大脑和神经系统会被那些反复出现的、具有重大生存意义的事件所塑型,从而能够确保它们在相同情境下进行最有效率的决策。

演化心理学家把损失厌恶看作人类在长期进化中获得的一种适应性本能:尽管收益能改善我们祖先的生存前景,然而重大的损失却会让他们彻底“出局”;有如穿越沙漠时额外一加仑水能让我们感到更舒服,而损失一加仑水却可能是致命的;在不确定条件下,对收益或损失的这种非对称性预期是不可避免的(McFarlane and Pliner, 1997)。如果演化心理学家的推测是正确的,那么神经经济学家就有理由相信:人类在风险决策中的损失厌恶不只是一个简单的理性计算过程,适应性的心理本能应该由人类大脑中特殊的神经结构所启动,而这种神经结构则是自然选择通过千百万年的演化在我们大脑中留下的印痕(Wilkinson, 2008)。

金迪斯(2009)指出,经典的经济学模型以个人偏好的一致性为前提,但这一假设并不符合人的心理特征和生理特征;如果假定个人偏好与人们的选择情境相关,那么我们就可以消除这种不一致性。举例而言,如果将收益和损失看作两种不同的情境,而我们的大脑会对此做出

完全不同的处理，则由损失厌恶所引起的违背期望效用理论与偏好一致性公理的矛盾就可以轻易地得到消除（Gintis, 2009）：以前述式（1）为例，如果人们对收益和损失的偏好在本质上是不同的，则式（1）可改写为 $U(x) < -U(-x')$ ，既然 x 与 x' 是不同质的，那么这一公式只是反映了人们对两种不同事物效用估值之间的大小关系，从而也就无所谓矛盾和不矛盾了；同理，前述式（2）则可以改写为 $A > B$ 和 $B' > A'$ （ $A \neq A'$ 且 $B \neq B'$ ），改写后的公式只是描述了被试在四种不同决策行为间的偏好关系，它既不与偏好一致性公理相矛盾，也不存在所谓的“偏好逆转”问题。

现代脑科学对损失厌恶已经有较为深入的研究，通过功能性磁共振成像（fMRI）技术，神经科学家发现，人类大脑在处理收益或损失时分别调用了不同的脑区（Kuhnen and Knutson, 2005；De Martino et al., 2010；Brooks and Berns, 2013）。但有批评者认为，脑成像给出的只是行为偏好与某一脑区的相关关系，而这种相关关系并不代表它们之间存在着必然的因果关系（Fudenberg, 2006）。随着科学技术的发展，近年来诞生的脑刺激（brain stimulation）技术，则可以使神经科学家观察某一脑区接受刺激后所导致的人们行为偏好的改变，并据此推断它们之间的因果联系（Ruff et al., 2013）。正是这一技术创新，使得今天的神经经济学家可以在大脑神经元和神经细胞的水平上重新定义人类行为偏好的内涵。

我们通过脑刺激这一最新技术对损失厌恶所做的神经经济学研究表明，大脑神经系统对收益和损失的信息处理确实是非对称性的，从而使风险决策者的偏好表现出明显的逆转；但我们也发现，在给定的情境（收益或损失）下，决策者的行为偏好仍然服从一致性公理的要求。这一研究结果既可以拓展经济学对人类行为偏好的传统认识，又可以容纳行为经济学家对人类行为偏好的经验观察，从而为经济学基础理论的发展创新提供了一种可行的范式。

二、损失厌恶的脑科学研究文献综述

脑科学或神经科学主要通过脑成像技术和脑刺激技术研究人类的风险决策过程，以及人们在这一过程中表现出来的损失厌恶倾向。这些研究所取得的成果，为我们认识损失厌恶的神经机制奠定了科学的基础。

（一）有关损失厌恶神经机制的脑成像研究

脑成像技术可以在给定的行为模式下观察被试脑区的激活状态，从而将大脑的功能结构与被试的行为偏好联系起来，为分析人们的行为偏好提供科学的依据。目前，功能性磁共振成像（functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI）是运用最广泛的脑成像技术，具有非侵入性、无辐射暴露、以及成像的空间分辨率较高等优点。有关人类损失厌恶神经机制的早期研究，大多是利用 fMRI 开展的。

包括杏仁核（amygdala）在内的边缘系统（limbic system）通常被认为是产生损失厌恶的重要脑区。杏仁核可以产生焦虑、恐惧、厌恶等多种负面情绪，在人体受到伤害后，杏仁核的特定区域会对这些伤害所引起的负面情绪产生长期记忆。研究者因而推断，杏仁核会对潜在的风

险做出反应,使人们产生损失厌恶行为。Breiter et al. (2001) 最早利用 fMRI 对被试风险决策中的神经反应做了观察。结果发现,风险决策者在面对损失时更多地调用了与情绪相关的脑区,如杏仁核和眶回 (orbital gyrus) 区域。

进一步的研究来自 De Martino et al. (2010) 对杏仁核受损者的观察。被试需要在一系列风险任务中做出选择,结果显示,杏仁核受损者比正常被试更愿意冒险,更不担心潜在的损失。研究者进而推断,杏仁核对人们赌博时产生“可能会输钱”的警示起到了重要作用。当杏仁核受损时,这种作用就会减弱甚至消失。Sokol - Hessner et al. (2012) 通过 fMRI 对以上结果进行了验证,发现个体风险决策中的损失厌恶确实与杏仁核的活动高度相关。

除杏仁核以外,纹状体 (striatum) 也被认为是影响风险决策的脑区。Knutson et al. (2001) 通过 fMRI 考察了人们风险决策时纹状体的激活状态。纹状体由尾核 (caudate nucleus)、壳核 (putamen) 和伏隔核 (nucleus accumbens) 构成。其中,伏隔核负责接收来自神经中枢的输入和输出信号,并决定大脑如何应对对外部环境刺激。研究者因而推测,人们在风险决策中的选择与纹状体有关。为证实这一推测,研究者让被试完成一个金钱激励延迟 (monetary incentive delay) 任务。在这个过程中,被试可能获得相应的奖励 (收益) 或惩罚 (损失)。研究者发现,预期收益的增加可引致伏隔核的激活,但预期损失的增加则不会。实验结果说明,人们进行风险决策时,不同脑区可能负责对不同的外部刺激信息进行编码、加工和处理。

Kuhnen and Knutson (2005) 的实验设定被试既可以选择固定收益,也可以选择有风险的收益 (可能得到更多收益,也可能没有收益或遭受损失)。他们通过 fMRI 观察了被试决策过程中伏隔核和前丘脑 (thalamus) 的激活状态,结果发现当被试做出冒险选择时,伏隔核会被显著激活;当被试做出保守选择时,下丘脑更为活跃。为以上结论提供支持的还有 Krawczyk and D'Esposito (2013) 的研究,他们发现,相对于无激励的情况 (控制组),当被试面对风险决策中的潜在损失时,纹状体区域有显著激活。

还有研究指出,损失厌恶不只是与某一脑区的神经活动相关,而是多个神经系统共同作用的结果。Tom et al. (2007) 利用 fMRI 检测了损失厌恶的神经关联。实验中,被试必须在各种等概率出现的收益或损失间做出选择。fMRI 检测结果显示,与大脑奖赏系统相关的纹状体,以及负责高级认知功能的腹内侧前额叶皮层 (ventromedial prefrontal cortex) 的活跃程度都与风险决策中的潜在收益正相关,而与潜在损失负相关。此外,它们对损失反应的敏感性都要远远大于对收益的反应。而这些脑区在面对收益或损失时的非对称性反应,则可以很好地描述损失厌恶的神经机制。

其他相似的研究还有 Fukunaga et al. (2012) 通过 fMRI 观察到损失厌恶与额下回 (inferior frontal gyrus)、前脑岛 (anterior insula) 和前扣带回皮层 (anterior cingulate cortex) 活动的相关性。Brooks and Berns (2013) 根据 fMRI 的检测结果,推断大脑不同区域会分别对偏好或厌恶两类信号做出不同反应:如眶额皮层 (orbitofrontal cortex) 的中心会对偏好类信号做出反应,眶额皮层的两侧会对厌恶类信号做出反应;伏隔核的中心会对偏好类信号做出反应,伏隔核的外

壳会对厌恶类信号做出反应；腹侧被盖区（ventral tegmental area）的背部会对偏好类信号做出反应，腹侧被盖区的腹部会对厌恶类信号做出反应。Canessa et al.（2013）基于 fMRI 的实验结果发现，当被试评估风险时，杏仁核与后脑岛（posterior insula）的活动会随潜在损失的大小发生变化，而损失厌恶的程度则与杏仁核 - 丘脑 - 纹状体的神经网络相关。研究者因而推断，损失厌恶是由多个神经系统共同决定的。

近年来，一种新兴的功能性近红外成像（functional Near - infrared Spectroscopy, fNIRS）技术也开始运用于神经科学的研究。fNIRS 通过近红外光对大脑血氧浓度的不同反射率来探测大脑皮层的功能激活状态，其优点在于可移动性、对被试限制较少、兼容磁性金属物品、允许长时间内的连续测量和短时间内的反复测量。

Shimokawa et al.（2009）通过 fNIRS 的研究发现，被试在面对期望收益和期望损失时，激活的脑区有显著不同。期望收益激活的是内侧前额叶皮层（medial prefrontal cortex），而期望损失激活的则是眶部皮层（orbital cortex）。Bembich et al.（2014）通过 fNIRS 检测含氧血红蛋白（oxy - hemoglobin）和脱氧血红蛋白（deoxy - hemoglobin）浓度的变化发现，被试做出低风险选择或高风险选择时，背外侧前额叶皮层（dorsolateral prefrontal cortex）被激活的程度有显著差别。

Holper et al.（2014）在细分不同风险偏好人群的基础上，利用 fNIRS 对上述结果进行了检验。发现风险追逐的被试在面对高风险决策时，背外侧前额叶皮层的反应会增强；但风险规避的被试在面对高风险决策时，这一区域的反应则会减弱。Cazzell et al.（2012）也通过 fNIRS 比较了被试在消极的风险决策（被动接受风险选项）和积极的风险决策（主动挑选风险选项）下大脑活动的区别。结果发现，在消极的风险决策中，背外侧前额叶皮层没有显著激活；而在积极的风险决策中，背外侧前额叶皮层被显著激活。Lin et al.（2014）同样利用 fNIRS 对被试在气球模拟风险决策任务（balloon analog risk task）^①中的脑区活动进行了观察，从而发现被试在积极的风险选择时，背外侧前额叶皮层被显著激活。

而我们此前基于 fNIRS 对损失厌恶神经机制的研究也发现，被试的右背外侧前额叶皮层是风险决策中处理损失的决定性区域，而左背外侧前额叶皮层是风险决策中处理收益的决定性区域。我们推测，人类的右背外侧前额叶皮层负责解读来自杏仁核的负面情绪信息，包括焦虑感、恐惧感和厌恶感等等，而左背外侧前额叶皮层则负责解读一般的功利性计算信息；解读以后的信息则由整个背外侧前额叶皮层整合、编码为一个统一的行为意图，进而使人们做出相应的风险决策（叶航，2014；黄达强，2014）。

上述脑成像研究虽然为我们提供了有关损失厌恶神经机制的丰富信息，但正如 Fudenberg（2006）所指出的那样，由于大脑各部位之间存在着高度的相互作用，因而很难从某个神经活动中分离出行为偏好的真正成因；换言之，一个行为伴随着大脑某个区域的激活，并不能说明这一行为就是由该脑区决定的，因为相互关联并不代表它们之间存在着

^① 一种常用于心理学实验的风险决策任务。例如，一个有 30 种不同爆点的气球，被试需要选择是否继续给气球打气。打气越多，被试的收益越多，但气球一旦爆裂，被试将损失所有收益。

必然的因果关系。事实上,从现有的脑成像研究文献中我们也不难发现,关于损失厌恶的神经机制存在着各种不同的描述,而且有些描述还是互相矛盾的。Wilkinson (2008) 则认为,这种状况主要与神经科学现有的技术水平有关,而随着脑科学研究技术的日趋成熟,这一局面正在得到有效的改善。

(二) 有关损失厌恶神经机制的脑刺激研究

随着科学技术的不断发展,一种新近诞生的“脑刺激”研究手段则可以较好弥补脑成像的不足。通过对特定脑区施加外部刺激可以影响大脑的神经活动,进而观察被试行为偏好的改变,这就可以使研究者在特定脑区的神经活动与相应的行为偏好之间建立起可控制、可重复、可验证的因果联系。经颅磁刺激 (Transcranial Magnetic Stimulation, TMS) 是最早用于脑科学研究的技术之一,它利用脉冲磁场作用于大脑中枢神经系统,通过阈上刺激 (suprathreshold stimulus) 引起神经元放电,进而改变神经细胞的膜电位并影响大脑的代谢活动,引起行为主体一系列生理和心理反应的变化。

Knoch et al. (2006) 首次用 TMS 研究了风险决策的神经机制。他们将 27 名被试随机安排到三个实验组,分别为左背外侧前额叶皮层刺激组、右背外侧前额叶皮层刺激组和伪刺激组 (类似于安慰剂组)。实施刺激后,所有被试都要参与一个双色球赌博游戏:箱子里有不同比例的蓝球与红球,被试需猜测实验员从箱子里取出的球的颜色;猜对者将获得相应的收益,猜错者将遭受一定损失。实验结果发现,接受右背外侧前额叶皮层刺激的被试更可能做出高风险的选择。据此,研究者推测该脑区皮层对人们的冲动性选择起重要作用。

由于 TMS 的磁场强度会对被试的健康造成潜在影响,且适用人群有一定限制 (Anand and Hotson, 2002)。因此, TMS 在神经科学研究中逐渐被一种新兴的脑刺激技术“经颅直流电刺激” (transcranial Direct Current Stimulation, tDCS) 所取代。tDCS 利用微电流 (1~2 mA) 刺激大脑皮层,改变神经细胞的放电活性,对人体不会造成任何伤害。tDCS 可以产生三种不同的刺激模式:其中阳刺激 (anodal stimulation) 会激活大脑皮质的兴奋度,阴刺激 (cathodal stimulation) 会抑制大脑皮质的兴奋度,伪刺激 (sham) 则提供一种比较基准,以便在结果分析时剔除可能产生的实验者效应^①。

Fecteau et al. (2007a) 通过 tDCS 对六组被试进行了背外侧前额叶皮层不同类型的刺激:右激活及左抑制、左激活及右抑制、单侧右激活、单侧左激活、伪刺激和无刺激。被试在接受刺激 10~15 分钟后执行一个气球模拟风险决策任务。实验发现:接受双侧刺激的被试比单侧刺激或伪刺激的被试表现出更多的风险厌恶,而接受双侧刺激的被试之间没有显著的行为差异。研究者据此推断,被试在进行风险决策时,左右背外侧前额叶皮层之间存在着跨区的相互作用;如果只对一侧进行刺激,这种作用就会消失。由于气球模拟风险决策任务带有模糊性 (被试不知道风险的具体概率),可能只有右背外侧前额叶皮层对风险决策起作用,而左右背外侧前额叶

^① 实验者效应 (experimenter effects), 也被称为实验者需求效应 (experimenter demand effects)。指实验者在实验过程中可能会以某种有意或无意的方式影响被试的真实想法,从而使他们的行为反应符合实验者的预期结果 (Zizzo, 2010)。

皮层的联合作用则会对模糊性的决策产生作用。

Fecteau et al. (2007b) 则对上述研究的风险决策任务进行了改进, 明确了风险选项的具体概率。他们对三组被试的背外侧前额叶皮层进行了不同类型的 tDCS 刺激: 左激活及右抑制、右激活及左抑制、伪刺激。刺激后的风险决策任务为经典的双色球赌博游戏。实验结果表明, 接受右激活及左抑制的被试相对于其他两组被试会选择更多的低风险选项。但由于该研究采取的是双侧刺激模式, 实验结果无法明确被试的行为差异究竟是右背外侧前额叶皮层的激活还是两侧前额叶皮层同时激活或抑制所导致的。

Boggio et al. (2010) 用老年被试对以上研究结果做了检验。他们将 27 名老年人随机安排到三个对背外侧前额叶皮层进行不同类型 tDCS 的刺激组: 左激活及右抑制、右激活及左抑制、伪刺激。刺激后的风险决策任务同样为经典的双色球赌博游戏。结果发现, 接受左激活及右抑制的被试相对于其他两组被试表现出更多的冒险行为, 而这一结果与上一篇文章中青年人被试的反应正好相反。研究者认为, 这说明对相同脑区进行刺激在青年人和老年人中可能有不同的效应, 其原因可能是右脑认知功能随年龄增长相对于左脑会受到更大的影响。

Weber et al. (2014) 结合 tDCS 和 fMRI 两种技术, 对人们在风险决策中接受刺激的脑部神经活动做了观察。22 名被试被随机安排到接受 tDCS 对背外侧前额叶皮层的真实刺激(右激活及左抑制)与伪刺激两个实验组。被试在接受刺激前后分别都要完成一次气球模拟风险任务和 fMRI 脑部扫描。实验结果发现, 人们在面对损失时, tDCS 刺激增加了右背外侧前额叶皮层与前扣带回皮层 (ACC) 的活跃程度, 但在面对收益时却没有这种现象。此外, 研究者还发现右侧前扣带回与大脑其他部分的连接度正相关于被试在实验中的冒险程度, 而右背外侧前额叶皮层与大脑其他部分的连接度则负相关于被试在实验中的冒险程度。

由于 tDCS 问世时间较晚, 利用这一技术研究风险决策的人员大部分集中于神经科学方向(部分为心理学方向), 鲜见经济学家的介入。因此, 他们通过 tDCS 研究风险决策、损失厌恶等经济学主题时, 往往存在一些专业方向上的改进空间。主要表现在——

(1) 样本数量较少。以上 tDCS 风险决策研究文献显示, 每个实验组的被试数量最少为 6 人, 最多为 11 人。这样的样本规模在神经科学研究中也许较为常见^①, 但却不适用以经济行为作为研究对象时对实验数据分析的要求。

(2) 无被试内设计 (within - subject design)。从以上文献的实验设计看, 采用的均是被试间设计 (between - subject design), 即将被试随机分配在不同刺激组, 以组间行为差异作为研究依据。这种实验设计很大程度上依赖被试没有显著的个体差异, 而样本数量越少就越难满足这个条件, 从而在研究结论的稳健性和科学性上留下较大隐患。^②

^① 在神经科学研究中, 尤其是影像学的数据分析是对所有样本数据进行叠加, 或针对每个样本的神经活动进行分析, 无需进行差异性检验或回归分析。因此, 神经科学领域对样本数量没有严格要求。

^② tDCS 脑刺激被试内设计的最大困难在于, 被试刺激前后完成同一任务可能产生记忆效应。国外有延滞实验的文献记载, 即刺激前的任务完成后, 3 天至一周后再让被试完成刺激后的任务。但是否能完全消除记忆效应仍然是一个疑问。由此我们猜测, 这也是为什么 tDCS 脑刺激实验很少有被试内设计的原因。

(3) 实验任务非经济学范式。以上文献中安排被试完成的风险决策任务都是典型的心理学游戏,如双色球赌博游戏或气球模拟风险决策任务;而心理学游戏在测度人们的风险偏好时,并不能达到经济学风险量表的准确性和定量标准。

(4) 没有分离收益或损失情境。以上文献中安排被试完成的风险决策任务都是在收益或损失之间进行选择,而不是在一系列收益或损失内部进行选择。考察被试分别面对收益或损失两种情境时的选择行为,可能在解释损失厌恶神经机制方面具有更大的意义。

(5) 无法分离刺激区域的具体作用。以上文献在研究中大多采用左右背外侧前额叶皮层双向刺激回路,这种刺激模式虽便于操作,但也存在较大缺陷。因为在分析被试的行为差异时,研究者无法清晰地分离出左右背外侧前额叶皮层对风险决策所产生的具体作用。

因此,上述 tDCS 研究损失厌恶神经机制存在的不足,将成为我们进行脑刺激研究时对实验设计进行改进的主要方向。

三、损失厌恶的脑刺激实验研究

(一) 实验技术

经颅直流电刺激(tDCS)是一种非侵入性的、以微弱电流(≤ 2 mA)作用于大脑皮层神经细胞放电活性的脑科学研究技术。与其他脑刺激技术如经颅磁刺激(TMS)不同,tDCS不是通过阈上刺激引起神经元放电,而是通过调节神经网络的活性发挥作用。tDCS对皮质兴奋性的调节是通过刺激极性的不同,进而引起神经元水平上静息膜电位超极化或去极化的形式实现的。tDCS可以提供三种基本的刺激模式:阳刺激会激活被试大脑皮层的兴奋性(超极化),阴刺激会抑制被试大脑皮层的兴奋性(去极化);伪刺激作为一种对照基准,给被试提供某种虚拟的刺激感受,但并不改变被试大脑皮层的兴奋性。研究者通过观察tDCS对被试大脑皮层某一功能区刺激后所引起的行为变化,就能在该脑区与人们的行为偏好之间建立起可控制、可重复、可验证的因果联系。

tDCS对大脑皮层神经细胞放电活性的影响,取决于刺激电流的强度和持续时间两个因素。出于安全性考虑,电流强度通常被限制在2毫安(mA)以内。如果持续时间足够长,刺激后大脑皮层兴奋性的改变可达1小时以上(Jacobson et al., 2012)。已有的tDCS研究通常刺激10~20分钟,就可以观察到被试心理与行为的显著改变。有研究报告,5分钟刺激时长已能诱发出相应的刺激效应(Boggio et al., 2009)。

我们的实验采用欧洲著名跨学科研究机构Starlab研发,NE(Neuroelectrics)公司生产的Starstim经颅直流电刺激仪。^①

(二) 实验设计

1. 靶区设置

靶区设置包括目标靶区和回路靶区设置。其中目标靶区的设置取决于研究者实验前假设的

^① Starstim 经颅直流电刺激仪的外观可见: <http://mypage.zju.edu.cn/yehang/681210.html>。

与损失厌恶直接相关的脑区。现有脑科学研究文献中，对损失厌恶相关脑区的推断多达 10 余处，但比较集中的则是大脑背外侧前额叶皮层（DLPFC）、尤其是右背外侧前额叶皮层（rDLPFC）。本次实验中，我们将目标靶区设置为被试的 rDLPFC，其在 tDCS 刺激帽上对应的坐标点为 F4（图 1）。

回路靶区是与目标靶区构成电流回路的区域。本次实验中我们将其设置为被试的顶叶（parietal lobe cortex）皮层，其在 tDCS 刺激帽上对应的坐标点为 Pz（图 1）。将回路靶区设置为顶叶皮层，一方面是考虑其空间位置比较适合，与 rDLPFC 有一定距离间隔从而可以避免刺激效应的互相干扰；另一方面是考虑这两个脑区的功能有较大差别，顶叶主要负责人类对空间关系的感知及有关语言的认知（Simon et al., 2002），与风险决策不构成相互影响。

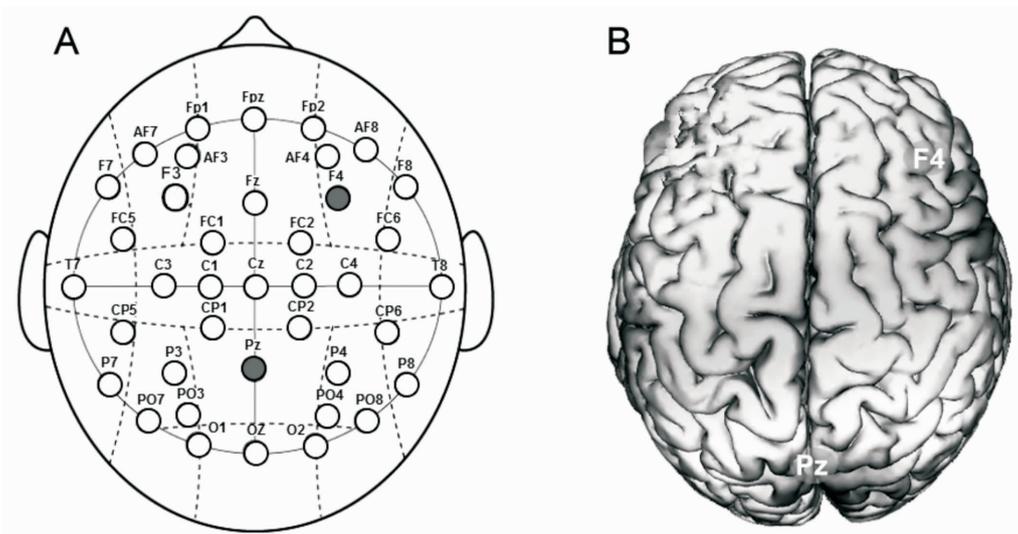


图 1 tDCS 靶区设置坐标

图 1A 为 tDCS 刺激帽上的坐标点，其中右上方的 F4 对应的脑区为右背外侧前额叶皮层（rDLPFC），是脑刺激实验中的目标靶区；中下方的 Pz 对应的脑区为顶叶皮层（parietal lobe cortex），是脑刺激实验中的回路靶区。图 1B 为 F4 和 Pz 在人类大脑皮层上的位置。

2. 刺激模式

参加实验的被试将随机分为三组，刺激模式分别为：第一，阳刺激，即 rDLPFC（坐标 F4）为阳极布点，顶叶皮层（坐标 Pz）为阴极布点，以激活目标靶区大脑皮层的兴奋度；第二，阴刺激，即 rDLPFC（坐标 F4）为阴极布点，顶叶皮层（坐标 Pz）为阳极布点，以抑制目标靶区大脑皮层的兴奋度；第三，伪刺激，作为对照组，该组被试在随机进行 30 秒阳刺激或阴刺激后即停止刺激（可通过对仪器的相关设置实现）；但被试仍然不摘下刺激帽，以最大程度地消除实验者效应。

以上三个组的刺激时长均为 15 分钟，电流强度为 2 毫安（mA）。图 2 是 Starstim 经颅直流电刺激仪的监控屏在实验过程中对上述靶区进行阳刺激和阴刺激时的实景显示。

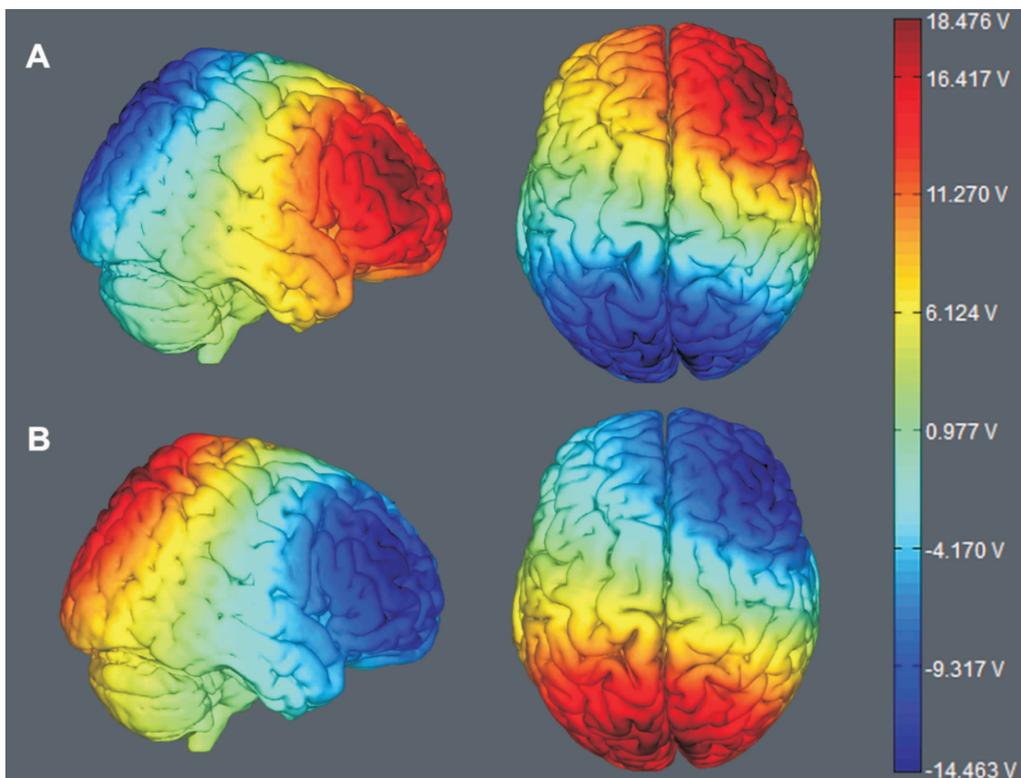


图2 tDCS 脑刺激实时显示

图2A为tDCS阳刺激时大脑的侧视图与俯视图,图2B为tDCS阴刺激时大脑的侧视图与俯视图,刺激电压强度从-14.463V~18.476V。

3. 被试设计

与现有文献所采用的被试间设计不同,本次实验采用被试内设计。所有被试均需在不刺激的情况下完成一次风险决策任务,刺激后再完成一次相同的风险决策任务。^①由于所有被试均随机编入三个刺激组,因此实验仍保持了被试间设计的所有要素,在数据分析时同样可以给出被试间实验结果的比较。

本次实验中,每个刺激组的被试数量为20人,整个实验的被试规模为60人。这一被试数量相对于已有的风险决策tDCS脑刺激实验有明显增加,从而可以更有效地排除被试个体差异性对实验结果的影响,增强实验结果的稳健性与科学性。

4. 任务设计

本次实验的主要内容为风险决策任务。该任务在Holt and Laury (2002)经典的风险测度量表基础上进行了较大改进,以符合脑刺激实验的要求。总体设计思路为——

^① 为避免被试内设计产生的记忆效应,在任务设计阶段,我们采取大题量和随机排序方法。根据实验后的被试反馈,大部分被试都不确定刺激前后完成的是不是同一个任务,并表示不会回忆前一任务的决策,而是对后一任务进行重新评估。由此表明,本次实验较好达到了被试内设计的效果。

第一，风险决策任务以一套基础风险测度量表为核心。该量表包含 35 道选题，每道选题均有 A、B 两个选项；其中 A 选项的潜在收益和潜在风险均较小，称为“保守项”；B 选项的潜在收益和潜在风险均较大，称为“冒险项”。

第二，基础风险测度量表中“保守项”（A）与“冒险项”（B）的总期望收益保持相等，即 $\sum E(A) = \sum E(B)$ 。但每一选题中 A 与 B 的期望收益不完全相等，其中 $E(A) = E(B)$ 为 15 题， $E(A) > E(B)$ 和 $E(A) < E(B)$ 各为 10 题。

第三，以基础风险测度量表为依据，实验中的风险任务为两套衍生量表。其中一套为收益量表，其数值均为可能获得的收益及其概率；另一套为损失量表，其数值均为可能遭受的损失及其概率。这一设计旨在分离收益和损失，以便在两种纯粹情境中观察被试的决策行为。

第四，两套衍生量表共包含 70 道选题。所有选题均由 z-tree 程序（Fischbacher, 2007）随机排序并由电脑逐题显示^①，并通过随机程序计算被试的实际收益或损失。全部实验结束后，被试的报酬由出场费和实验任务中的实际收益（损失）加总结算。

表 2 为本次实验的基础风险测度量表。

表 2 基础风险测度量表

选项 序号	A		B		选项 序号	A		B	
	50%	50%	50%	50%		50%	50%	50%	50%
1	6	14	5	15	19	9	11	6	15
2	7	13	5	14	20	9	11	7	12
3	7	13	5	15	21	9	11	7	13
4	7	13	6	14	22	9	11	7	14
5	7	13	6	15	23	9	11	8	12
6	8	12	5	14	24	10	10	5	14
7	8	12	5	15	25	10	10	5	15
8	8	12	5	16	26	10	10	5	16
9	8	12	6	13	27	10	10	6	13
10	8	12	6	14	28	10	10	6	14
11	8	12	6	15	29	10	10	6	15
12	8	12	7	13	30	10	10	7	12
13	8	12	7	14	31	10	10	7	13
14	9	11	5	14	32	10	10	8	11
15	9	11	5	15	33	10	10	8	12
16	9	11	5	16	34	10	10	9	11
17	9	11	6	13	35	10	10	9	12
18	9	11	6	14	-	-	-	-	-

^① 由电脑屏幕显示的被试选择界面可见：<http://mypage.zju.edu.cn/yechang/681211.html>。

图3 为实验中被试完成任务的全部流程:

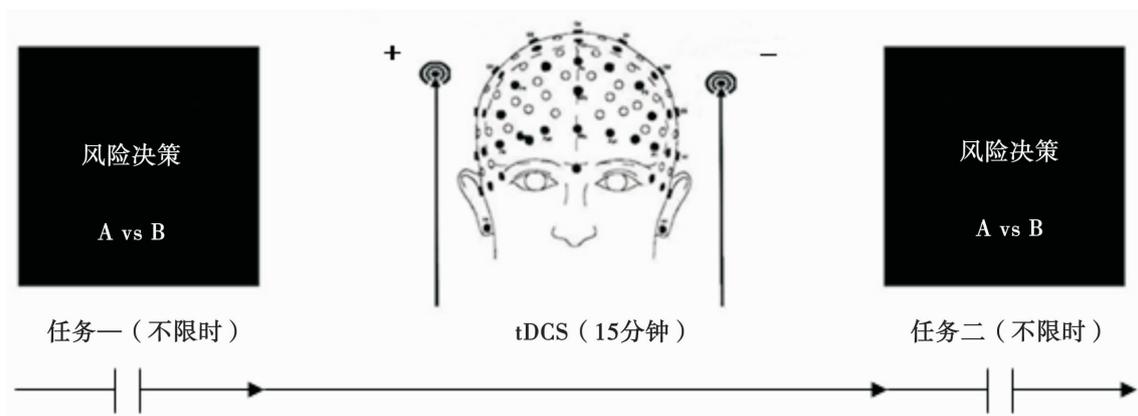


图3 tDCS 实验流程图

(三) 实验过程

我们于2014年9月15日至23日进行了正式实验。实验过程由以下4个环节组成——

1. 被试招募

本次实验的被试均通过浙江大学校内论坛 CC98 在线招募^①, 共有 62 名被试参加正式实验, 其中有效被试 60 人^②。被试的专业分布覆盖人文、社科、工科、理科、生物学、医学等 10 余个不同专业院系, 其中男性 24 人、女性 36 人, 平均年龄 21.1 岁。所有被试均为右利手, 身体健康, 无精神疾病及脑部损伤史, 无癫痫或癫痫家族史, 视力正常或矫正后正常。

2. 实验说明实验开始前, 被试需要签署一份知情同意书, 以确保实验的自愿性。随后, 被试需要仔细阅读实验说明, 以便了解实验的内容与流程。正式实验开始前, 被试还需要完成一组与风险决策相关的控制性问题; 该问题由 10 道与实验任务相似的风险选题组成, 以便被试能正确理解实验任务的基本性质, 掌握实验操作的基本要求。^③顺利通过控制性问题的被试将进入正式实验阶段。

3. 实验任务

实验任务分三个阶段: 第一, 刺激前的风险决策任务, 由被试在电脑上完成 70 道风险选题 (不限定时间); 第二, 接受经颅直流电刺激, 被试在实验员的帮助下佩戴电极帽, 在安静状态下接受 15 分钟 tDCS 微电流的脑刺激; 第三, 刺激后的风险决策任务, 被试继续佩戴电极帽在电脑上完成 70 道风险选题 (不限定时间)。

① 被试招募公告见: <http://mypage.zju.edu.cn/attachments/2014-12/07-1417528740-681622.jpg>。

② 其中 2 名被试没有通过实验前的控制性问题。

③ 实验说明、知情同意书样式见: <http://mypage.zju.edu.cn/yechang/681212.html>。

4. 实验完成

被试完成以上任务后，需填写一份调查问卷。内容包括年龄、性别、籍贯、专业背景、经济状况、风险偏好的自我评估等基本信息，并反馈实验过程中的感受与建议。^①本次实验的报酬由 50 元出场费和被试风险选择的实际收入组成，在实验结束后即行支付。本次实验每个被试总耗时约 60 分钟，平均报酬为 53.02 元（其中最高 90 元，最低 32 元）。

（四）实验结果

1. 刺激前的被试风险选择状态

阳刺激组被试在收益情境中，共选择保守项 472 题，冒险项 228 题；保守项占比 67.43%，表现出风险规避倾向；在损失情境中，共选择保守项 261 题，冒险项 439 题；冒险项占比 62.71%，表现出风险追逐倾向。

阴刺激组被试在收益情境中，共选择保守项 424 题，冒险项 276 题；保守项占比 60.57%，表现出风险规避倾向；在损失情境中，共选择保守项 320 题，冒险项 380 题；冒险项占比 54.29%，表现出风险追逐倾向。

伪刺激组被试在收益情境中，共选择保守项 445 题，冒险项 255 题；保守项占比 63.57%，表现出风险规避倾向；在损失情境中，共选择保守项 319 题，冒险项 381 题；冒险项占比 54.43%，表现出风险追逐倾向。

所有三个组的被试在无刺激状态下的收益情境中，保守项的选择占比 63.86%，整体表现出显著的风险规避倾向（ $p=0.0000$ ）^②；在损失情境中，冒险项的选择占比 57.14%，整体表现出显著的风险追逐倾向（ $p=0.0027$ ）。由于我们在任务设计时刻意保持了保守项与冒险项总期望收益相等，但被试面对收益或损失时，仍然采取了不同的选择策略，表现出明显的偏好逆转。也就是说，被试刺激前的选择行为完全符合 Kahneman and Tversky（1979、1992）前景理论中对损失厌恶现象的描述。

2. 刺激后的被试风险选择状态

阳刺激组被试在收益情境中，共选择保守项 432 题，冒险项 268 题；保守项占比 61.71%，表现出风险规避倾向；在损失情境中，共选择保守项 302 题，冒险项 398 题；冒险项占比 56.86%，表现出风险追逐倾向。

阴刺激组被试在收益情境中，共选择保守项 414 题，冒险项 286 题，保守项占比 59.14%，表现出风险规避倾向；在损失情境中，共选择保守项 324 题，冒险项 376 题；冒险项占比 53.71%，表现出风险追逐倾向。

伪刺激组被试在收益情境中，共选择保守项 444 题，冒险项 256 题，保守项占比 63.43%，表现出风险规避倾向；在损失情境中，共选择保守项 332 题，冒险项 368 题；冒险项占比 52.57%，表现出风险追逐倾向。

^① 调查问卷样式见：<http://mypage.zju.edu.cn/attachments/2014-12/07-1417529478-681626.pdf>。

^② 该处 p 值由 Wilcoxon sign-rank test 得到，下同。

所有三个组的被试在刺激后的收益情境中,保守项的选择占比 61.43%,比刺激前下降 2.43 个百分点,但整体仍表现出显著的风险规避倾向 ($p = 0.0002$);在损失情境中,冒险项的选择占比 54.38%,比刺激前下降 2.76 个百分点,但整体仍表现出显著的风险追逐倾向 ($p = 0.015$)。总体而言,被试刺激后的行为仍然服从前景理论对损失厌恶现象的描述;但相对于刺激前的选择,其趋势有一定程度减弱。

以上报告的具体实验数据^①如表 3 所示:

表 3 刺激前后被试总体风险选择状态

刺激类型	选项类型	刺激前				刺激后			
		收益情境		损失情境		收益情境		损失情境	
阳刺激	保守项	472	67.43%	261	37.29%	432	61.71%	302	43.14%
	冒险项	228	32.57%	439	62.71%	268	38.29%	398	56.86%
阴刺激	保守项	424	60.57%	320	45.71%	414	59.14%	324	46.29%
	冒险项	276	39.43%	380	54.29%	286	40.86%	376	53.71%
伪刺激	保守项	445	63.57%	319	45.57%	444	63.43%	332	47.43%
	冒险项	255	36.43%	381	54.43%	256	36.57%	368	52.57%
总样本	保守项	1341	63.86%	900	42.86%	1290	61.43%	958	45.62%
	冒险项	759	36.14%	1200	57.14%	810	38.57%	1142	54.38%

(五) 结果检验

1. 刺激前后被试风险选择状态差异的组内检验

我们采用 Wilcoxon sign - rank test 非参检验法对 tDCS 刺激前后被试风险选择状态的差异做了组内(被试内)检验,得到如下结果:

第一,接受阳刺激的被试相对于刺激前,在收益情境中,选择保守项的数目显著减少、选择冒险项的数目显著增加 ($z = 2.703, p = 0.007$);而在损失情境中,选择保守项的数目显著增加、选择冒险项的数目显著减少 ($z = -2.519, p = 0.012$)。实验结果表明,对 rDLPFC 实施阳刺激会显著改变被试的风险选择行为;在收益情境中,使被试变得更加冒险;在损失情境中,则使被试变得更加保守。

第二,接受阴刺激的被试相对于刺激前,在收益情境中,选择保守项和冒险项的数目无显著差异 ($z = 0.495, p = 0.621$);在损失情境中,选择保守项和冒险项的数目无显著差异 ($z = 0.056, p = 0.955$)。实验结果表明,对 rDLPFC 实施阴刺激不会改变被试的风险选择行为。

第三,接受伪刺激的被试相对于刺激前,在收益情境中,选择保守项和冒险项的数目无显

^① 本次实验全部原始数据见: <http://mypage.zju.edu.cn/attachments/2014-12/07-1417529550-681627.pdf>。

著差异 ($z = 0.417, p = 0.677$); 在损失情境中, 选择保守项和冒险项的数目无显著差异 ($z = 0.301, p = 0.763$)。实验结果表明, 对 rDLPFC 实施伪刺激不会改变被试的风险选择行为。

以上报告的组内检验结果如表 4 所示:

表 4 刺激前后被试风险选择状态差异的组内检验

阳刺激组		阴刺激组		伪刺激组	
收益	损失	收益	损失	收益	损失
$z = 2.703$	$z = -2.519$	$z = 0.495$	$z = 0.056$	$z = 0.417$	$z = 0.301$
$P = 0.007$	$P = 0.012$	$P = 0.621$	$P = 0.955$	$P = 0.677$	$P = 0.763$

2. 不同刺激下被试风险选择状态变化差异的组间检验

为进一步验证被试内实验得到的结论, 我们采用 wilcoxon rank sum test 非参检验法对三组被试刺激前后选择变化的差异进行了组间 (被试间) 检验, 得到如下结果:

第一, 阳刺激组的被试相对于阴刺激组, 接受刺激后, 在收益情境中选择保守项和冒险项的数目变化均有显著差异 ($z = -1.694, p = 0.090$), 表现出更强的风险追逐倾向; 在损失情境中选择保守项和冒险项的数目变化同样有显著差异 ($z = 1.951, p = 0.051$), 表现出更强的风险规避倾向。

第二, 阳刺激组的被试相对于伪刺激组, 接受刺激后, 在收益情境中选择保守项和冒险项的数目变化均有显著差异 ($z = -2.005, p = 0.045$), 表现出更强的风险追逐倾向; 在损失情境中选择保守项和冒险项的数目变化同样有显著差异 ($z = 1.394, p = 0.053$), 表现出更强的风险规避倾向。

第三, 阴刺激组的被试相对于伪刺激组, 接受刺激后, 无论在收益情境还是损失情境中, 选择保守项和冒险项的数目变化均无显著差异 (p 值分别为 0.687 和 0.703)。

以上组间检验得到的结论与组内检验一致, 具体结果如表 5 所示:

表 5 不同刺激下被试风险选择状态变化差异的组间检验

刺激类型	阴刺激		伪刺激	
	收益情境	损失情境	收益情境	损失情境
阳刺激	$z = -1.694$ $p = 0.090$	$z = 1.951$ $p = 0.051$	$z = -2.005$ $p = 0.045$	$z = 1.934$ $p = 0.053$
阴刺激	—	—	$z = -0.399$ $p = 0.687$	$z = 0.381$ $p = 0.703$

图4和图5则直观刻画了不同模式（包括刺激前后以及不同刺激类型）下被试风险选择情况：

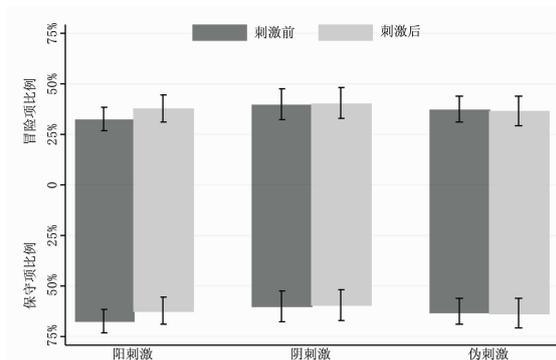


图4 收益情境下个体风险选择状态的变化

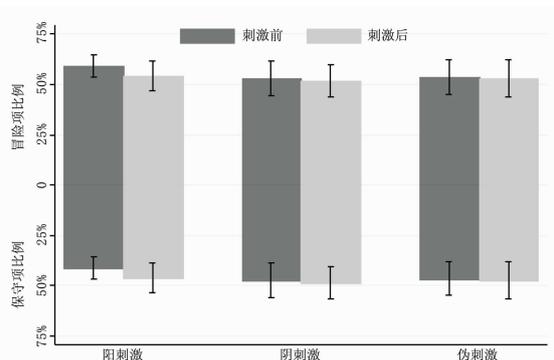


图5 损失情境下个体风险选择状态的变化

3. 实验结果的计量回归检验

为进一步验证非参检验得到的结果，我们构建了如下计量模型：

$$change_{ij} = C_j + \beta_{1j}Anodal_{ij} + \beta_{2j}Cathodal_{ij} + \beta_{3j}X_i + u_i + \varepsilon_{ij}$$

该模型以被试刺激前后选择保守项的数目变化为被解释变量^①，在控制个体特征、风险态度等问卷信息的条件下，以刺激类型为解释变量。其中，作为解释变量的刺激类型为虚拟变量：Anodal = 1、Cathodal = 0，表示阳刺激；Anodal = 0、Cathodal = 1，表示阴刺激；Anodal = 0、Cathodal = 0，表示伪刺激。X表示年龄、性别、消费状况等可能会影响被试风险偏好的个体特征，u表示未观察到的个体效应，ε为随机干扰项。表6为OLS回归结果：

表6可见，在收益模型中Anodal的系数显著为负，在损失模型中显著为正，而无论在收益还是损失模型中Cathodal的系数都不显著。该结果表明阳刺激组的被试相对于其他刺激组的被试，刺激前后的风险选择状态发生了更显著的变化：在收益情境中变得更加冒险，在损失情境中则变得更加保守。另一方面，阴刺激组的被试相对于伪刺激组的被试，刺激前后的风险选择状态没有发生更显著的变化。计量回归结果与非参检验结果一致。

为检验上述结果的稳健性，我们在模型中纳入了可能影响被试风险选择的变量，如性别、年龄、消费状况等个体特征。表6可见，Anodal的系数在收益情境中仍显著为负，在损失情境中仍显著为正，且标准差变化不大，说明实验结果具有较强的稳健性。另外，回归结果亦表明，性别（Gender）、年龄（Age）、是否独生子女（Only Child）、是否参与过类似实验（Participate）、是否兼职（Job）等因素对被试的风险选择没有显著影响；而收入状况（Income）、消费水平（Consume）、风险偏好的自我评估（Risk）等因素与被试的风险选择有一定关联，但不影响实验结果的稳健性。

① $j=1$ 表示被试面对收益情境， $j=2$ 表示被试面对损失情境。

表 6 不同刺激类型对个体风险选择的影响

被解释变量 解释变量	收益情境		损失情境	
	(1)	(2)	(3)	(4)
Constant	-0.3 (0.598)	4.226 (4.857)	-0.25 (0.680)	-4.816 (6.159)
Anodal	-1.7** (0.845)	-1.918** (0.867)	2.3** (0.962)	2.823** (1.099)
Cathodal	-0.2 (0.845)	-0.490 (0.864)	0.45 (0.962)	0.716 (1.096)
Gender		0.886 (0.714)		-0.579 (0.906)
Age		-0.014 (0.197)		0.269 (0.250)
Only Child		0.138 (0.764)		0.261 (0.970)
Income		1.340** (0.506)		-0.213 (0.642)
Consume		-1.272** (0.610)		0.139 (0.774)
Participate		-0.202 (0.661)		1.061 (0.839)
Job		-1.262 (0.880)		-0.226 (1.116)
Risk		-0.997** (0.436)		-0.472 (0.553)
Number of subjects	60	60	60	60
Adj R ²	0.0458	0.1809	0.0697	0.0094
F	2.42*	2.30**	3.21**	1.06

注：*、**、*** 分别表示在 10%、5%、1% 水平上显著，括号内为标准差。

四、总结与讨论

通过 tDCS 脑刺激实验获得的结果并结合此前经济学、心理学和脑科学的相关研究，我们可以得到如下三个基本结论：

第一，在无刺激和伪刺激模式下，所有实验被试都在收益情境中表现出风险规避倾向，而在损失情境中表现出风险追逐倾向。这一实验结果表明，在自然状态下，人们对收益或损失的

心理反应和行为反应具有明显的非对称性,这种非对称性完全符合 Kahneman and Tversky (1979、1992) 前景理论中对损失厌恶的描述。演化心理学家把这种不确定条件下的行为模式看作人类长期进化过程中获得的适应性本能 (McFarlane and Pliner, 1997; Wilkinson, 2008)。而脑科学家则认为,这种适应性本能通过杏仁核及边缘系统的长期记忆功能,以可遗传再现的情绪形式影响人们的风险决策行为 (Breiter et al., 2001; De Martino et al., 2010; Hessner et al., 2012)。

第二,对右背外侧前额叶皮层 (rDLPFC) 实施 tDCS 阳刺激 (激活神经细胞的放电活性),能显著改变被试在风险决策中的行为倾向,使他们在收益情境中变得相对冒险,在损失情境中变得相对保守。这一实验结果进一步深化了脑科学对损失厌恶神经机制的认识,它表明来自杏仁核及边缘系统的情绪信息并不是独立地、直接地作用于人们的风险决策行为,而是通过降低 rDLPFC 神经细胞的活性使人们产生损失厌恶倾向;因此,当我们利用 tDCS 激活这一脑区神经细胞的活性时,情绪信息对 rDLPFC 产生的影响就会被削弱;从而在一定程度上减轻了人们的损失厌恶倾向,使他们在收益情境中变得更冒险、在损失情境中变得更保守。

第三,对右背外侧前额叶皮层 (rDLPFC) 实施 tDCS 阴刺激 (抑制神经细胞的放电活性),不会对被试的风险决策行为造成显著改变。这一实验结果表明,来自杏仁核及边缘系统的情绪信息对 rDLPFC 神经细胞放电活性的影响是单向的,即激活该脑区神经细胞的活性会削弱这种影响,而抑制该脑区神经细胞的活性却不会增强这种影响。这种阳刺激和阴刺激所产生的不同效果表明,作为大脑情绪记忆中心的杏仁核及边缘系统与执行高级认知功能的 rDLPFC,在风险决策的信息处理中可能采用了一种并行 (parallel) 工作模式、而不是串行 (serial) 工作模式;正是这种信息处理方式才使损失厌恶的神经机制产生明显的非对称性,从而表明风险决策是人类大脑神经系统综合作用的产物,而不是某一脑区单独活动的结果。

以上基于神经经济学的脑刺激实验揭示出人类的损失厌恶倾向与大脑中特定的神经系统存在着可控制、可重复、可验证的因果联系,从而为经济学深入理解人类的行为偏好提供了坚实的科学基础。损失厌恶作为一种异象,虽然对经典的期望效用理论和偏好一致性公理构成了挑战;但神经经济学家与行为经济学家一样,并不提倡完全抛弃这些假说,而是希望通过提供更丰富的经验事实使其不断完善,从而增强经济学的解释力 (Camerer and Loewenstein, 2004; Ho et al., 2006; Gintis, 2009)。

正如我们的脑刺激实验所表明的,人类大脑处理收益或损失的神经机制是非对称性的,而这种非对称性使人们在不确定条件下进行风险决策时的偏好表现出明显的异质性。但我们的脑刺激实验还同时表明,在面对同一情境 (收益或损失) 时,人们在风险决策中所表现出来的行为倾向,仍然符合偏好一致性公理。因此,如果假定个人具有异质性的偏好,而且他们也知道自身的偏好,再附加与个人选择空间 (即情景状态) 相关的信息,我们就能够在形式上消除偏好的不一致性。

我们可以从行为实验和脑科学实验得到的经验事实中归纳出一个一般意义上的假设,并将其称为“情境依赖的偏好一致性公理”。正如 Gintis (2009) 所指出的,除非将决策者面临的情

境信息包括进来，否则偏好函数就没有任何意义；当我们感到饥饿、干渴、困乏、恐慌或性冲动时，我们的偏好序便会发生调整与改变；想找到一个不依赖于我们当前情境的效用函数，这样的想法既不合理、也不现实。

我们通过最新的脑刺激技术对损失厌恶所做的神经经济学研究，既可以拓展经济学对人类行为偏好的传统认识，又可以容纳行为经济学家对人类行为偏好的经验观察，从而为经济学基础理论的发展创新提供一种可行的范式。这种范式也是所有科学理论发展所共有的：新理论的产生并不意味着完全抛弃传统，创新是一种哲学意义上的扬弃过程。

参考文献

- Anand, S. and Hotson, J., 2002, "Transcranial Magnetic Stimulation: Neurophysiological Applications and Safety", *Brain and Cognition*, Vol. 50, pp. 366 – 386.
- Ball, L. J., Bardsley, N. and Ormerod, T., 2012, "Do Preference Reversals Generalise? Results on Ambiguity and Loss Aversion", *Journal of Economic Psychology*, Vol. 33 (1), pp. 48 – 57.
- Bembich, S., Clarici, A., Vecchiet, C., Baldassi, G., Cont, G. and Demarini, S., 2014, "Differences in Time Course Activation of Dorsolateral Prefrontal Cortex Associated with Low or High Risk Choices in a Gambling Task", *Name: Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 8, pp. 464.
- Benartzi, S. and Thaler, R., 1995, "Myopic Loss Aversion and the Equity Premium Puzzle", *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 101, pp. 73 – 92.
- Boggio, P., Campanhã, C., Valasek, C., Fecteau, S., Pascual – Leone, A. and Fregni, F., 2010, "Modulation of Decision – Making in a Gambling Task in Older Adults with Transcranial Direct Current Stimulation", *European Journal of Neuroscience*, Vol. 31, pp. 593 – 597.
- Boggio, P., Khoury, L., Martins, D., Martins, O., De Macedo, E. and Fregni, F., 2009, "Temporal Cortex Direct Current Stimulation Enhances Performance on a Visual Recognition Memory Task in Alzheimer Disease", *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, Vol. 80, pp. 444 – 447.
- Breiter, H., Aharon, I., Kahneman, D., Dale, A. and Shizgal, P., 2001, "Functional Imaging of Neural Responses to Expectancy and Experience of Monetary Gains and Losses", *Neuron*, Vol. 30, pp. 619 – 639.
- Brickman, P., Coates, D. and Janoff – Bulman, R., 1978, "Lottery Winners and Accident Victims: Is Happiness Relative", *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 36, pp. 917.
- Brooks, A. and Berns, G., 2013, "Aversive Stimuli and Loss in the Mesocorticolimbic Dopamine System", *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 17, pp. 281 – 286.
- Camerer, C., 1998, "Bounded Rationality in Individual Decision Making", *Experimental Economics*, Vol. 1, pp. 164 – 183.
- Camerer, C., Babcock, L., Loewenstein, G. and Thaler, R., 1997, "Labor Supply of New York City Cab Drivers One Day at a Time", *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 103, pp. 407 – 441.
- Camerer, C. and Loewenstein, G., 2004, "Behavioral Economics: Past, Present, Future", Princeton: Princeton University Press.
- Canessa, N., Crespi, C., Motterlini, M., Baud – Bovy, G., Chierchia, G., Pantaleo, G., Tettamanti, M. and Cappa, S., 2013, "the Functional and Structural Neural Basis of Individual Differences in Loss Aversion", *Journal of Neuroscience*, Vol. 33, pp. 14307 – 14317.
- Cazzell, M., Li, L., Lin, Z. J., Patel, S. J. and Liu, H., 2012, "Comparison of Neural Correlates of Risk

- Decision Making between Genders: an Exploratory fNIRS Study of the Balloon Analogue Risk Task (BART)", *NeuroImage*, Vol. 62, pp. 1896 – 1911.
- Chew, S. and MacCrimmon, K. , 1979, "Alpha – Nu Choice Theory: a Generalization of Expected Utility Theory", University of British Columbia.
- De Martino, B. , Camerer, C. and Adolphs, R. , 2010, "Amygdala Damage Eliminates Monetary Loss Aversion", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 107, pp. 3788 – 3792.
- Duesenberry, J. , 1951, "Income, Saving and the Theory of Consumer Behavior", *Review of Economics and Statistics*, Vol. 33, pp. 255 – 257.
- Fecteau, S. , Knoch, D. , Fregni, F. , Sultani, N. , Boggio, P. and Pascual – Leone, A. , 2007b, "Diminishing Risk – Taking Behavior by Modulating Activity in the Prefrontal Cortex: a Direct Current Stimulation Study", *Journal of Neuroscience*, Vol. 27, pp. 12500 – 12505.
- Fecteau, S. , Pascual – Leone, A. , Zald, D. , Liguori, P. , Théoret, H. , Boggio, P. and Fregni, F. , 2007a, "Activation of Prefrontal Cortex by Transcranial Direct Current Stimulation Reduces Appetite for Risk during Ambiguous Decision Making", *Journal of Neuroscience*, Vol. 27, pp. 6212 – 6218.
- Fischbacher, U. , 2007, "z – Tree: Zurich Toolbox for Ready – Made Economic Experiments", *Experimental Economics*, Vol. 10, pp. 171 – 178.
- Fudenberg, D. , 2006, "Advancing Beyond 'Advances in Behavioral Economics'", *Journal of Economic Literature*, Vol. 44, pp. 694 – 711.
- Fukunaga, R. , Brown, J. and Bogg, T. , 2012, "Decision Making in the Balloon Analogue Risk Task (BART): Anterior Cingulate Cortex Signals Loss Aversion but Not the Infrequency of Risky Choices", *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, Vol. 12, pp. 479 – 490.
- Genesove, D. and Christopher M. , 2001, "Loss Aversion and Seller Behavior: Evidence from the Housing Market", Working Papers, No. w8143. National Bureau of Economic Research.
- Gul, F. , 1991, "a Theory of Disappointment Aversion", *Econometrica*, Vol. 59, pp. 667 – 686.
- Ho, T. , Lim, N. and Camerer, C. , 2006, "How 'Psychological' Should Economic and Marketing Models be", *Journal of Marketing Research*, Vol. 43, pp. 341 – 344.
- Holper, L. , Wolf, M. and Tobler, P. , 2014, "Comparison of Functional Near – Infrared Spectroscopy and Electrodermal Activity in Assessing Objective versus Subjective Risk during Risky Financial Decisions", *NeuroImage*, Vol. 84, pp. 833 – 842.
- Holt, C. and Laury, S. , 2002, "Risk Aversion and Incentive Effects", *American Economic Review*, Vol. 92, pp. 1644 – 1655.
- Jacobson, L. , Koslowsky, M. and Lavidor, M. , 2012, "tDCS Polarity Effects in Motor and Cognitive Domains: A Meta – Analytical Review", *Experimental Brain Research*, Vol. 216, pp. 1 – 10.
- Johnson, W. , Brennan, T. , Newhouse, J. P. , Leape, L. , Lawthers, A. , Hiatt, H. and Weiler, P. , 1992, "the Economic Consequences of Medical Injuries: Implications for a No – Fault Insurance Plan", *JAMA*, Vol. 267, pp. 2487 – 2492.
- Jullien, B. and Salanié, B. , 2000, "Estimating preferences under risk: The case of racetrack bettors", *Journal of Political Economy*, Vol. 108.3, pp. 503 – 530.
- Kahneman, D. and Tversky, A. , 1979, "Prospect Theory: an Analysis of Decision under Risk", *Econometrica*, Vol. 47, pp. 263 – 291.
- Kahneman, D. , Knetsch, J. and Thaler, R. , 1990, "Experimental Tests of the Endowment Effect and the Coase Theorem", *Journal of Political Economy*, Vol. XCVIII, pp. 1325 – 1348.

- Knoch, D. , Gianotti, L. R. , Pascual – Leone, A. , Treyer, V. , Regard, M. , Hohmann, M. and Brugger, P. , 2006, “Disruption of Right Prefrontal Cortex by Low – Frequency Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Induces Risk – Taking Behavior”, *Journal of Neuroscience*, Vol. 26, pp. 6469 – 6472.
- Knutson, B. , Adams, C. , Fong, G. and Hommer, D. , 2001, “Anticipation of Increasing Monetary Reward Selectively Recruits Nucleus Accumbens”, *Journal of Neuroscience*, Vol. 21, RC159.
- Krawczyk, D. and D’ Esposito, M. , 2013, “Modulation of Working Memory Function by Motivation through Loss – Aversion”, *Human Brain Mapping*, Vol. 34, pp. 762 – 774.
- Kuhnen, C. and Knutson, B. , 2005, “the Neural Basis of Financial Risk Taking”, *Neuron*, Vol. 47, pp. 763 – 770.
- Lichtenstein, S. and Slovic, P. , 1971, “Reversals of Preference between Bids and Choices in Gambling Decisions”, *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 89 (1), pp. 46.
- Lin, Z. J. , Li, L. , Cazzell, M. and Liu, H. , 2014, “Atlas – Guided Volumetric Diffuse Optical Tomography Enhanced by Generalized Linear Model Analysis to Image Risk Decision – Making Responses in Young Adults”, *Human brain mapping*, Vol. 35, pp. 4249 – 4266.
- Loomes, G. and Sugden, R. , 1986, “Disappointment and Dynamic Consistency in Choice under Uncertainty”, *Review of Economic Studies*, Vol. 53, pp. 271 – 282.
- Markowitz, H. , 1952, “Portfolio Selection”, *Journal of Finance*, Vol. 7, pp. 77 – 91.
- McFarlane, T. and Pliner, P. , 1997, “Increasing Willingness to Taste Novel Foods: Effects of Nutrition and Taste Information”, *Appetite*, Vol. 28, pp. 227 – 238.
- Nielsen, L. , 1992, “Positive Prices in CAPM”, *Journal of Finance*, Vol. 47, pp. 791 – 808.
- Putler, D. , 1992, “Incorporating Reference Price Effects into a Theory of Consumer Choice”, *Marketing Science*, Vol. 11, pp. 287 – 309.
- Ruff, C. , Ugazio, G. and Fehr, E. , 2013, “Changing Social Norm Compliance with Noninvasive Brain Stimulation”, *Science*, Vol. 6157, pp. 482 – 484.
- Shafir, J. Diamond, P. and Tversky, A. , 1997, “Money Illusion”, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. CXII, pp. 341 – 374.
- Shefrin, H. and Statman, M. , 1985, “the Disposition to Sell Winners too Early and Ride Losers too Long: Theory and Evidence”, *Journal of Finance*, Vol. 40, pp. 777 – 790.
- Shimokawa, T. , Suzuki, K. , Misawa, T. and Miyagawa, K. , 2009, “Predictability of Investment Behavior from Brain Information Measured by Functional Near – Infrared Spectroscopy: A Bayesian Neural Network Model”, *Neuroscience*, Vol. 161, pp. 347 – 358.
- Simon, O. , Mangin, J. , Cohen, L. , Le Bihan, D. and Dehaene, S. , 2002, “Topographical Layout of Hand, Eye, Calculation, and Language – Related Areas in the Human Parietal Lobe”, *Neuron*, Vol. 33 (3), pp. 475 – 487.
- Sokol – Hessner, P. , Camerer, C. and Phelps, E. , 2012, “Emotion Regulation Reduces Loss Aversion and Decreases Amygdala Responses to Losses”, *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, nss002.
- Starmer, C. , 2000, “Developments in Non – Expected Utility Theory: the Hunt for a Descriptive Theory of Choice under Risk”, *Journal of Economic Literature*, Vol. 38, pp. 332 – 382.
- Thaler, R. , 1985, “Mental Accounting and Consumer Choice”, *Marketing Science*, Vol. 4, pp. 199 – 214.
- Tversky, A. and Kahneman, D. , 1981, “the Framing of Decisions and the Psychology of Choice”, *Science*, Vol. 4481, pp. 453 – 458.
- Tversky, A. and Kahneman, D. , 1991, “Loss Aversion in Riskless Choice: a Reference – Dependent Model”, *Quarterly Journal of Economics*, Vol. 106, pp. 1039 – 1061.
- Tversky, A. and Kahneman, D. , 1992, “Advances in Prospect Theory: Cumulative Representation of Uncertainty”,

- Journal of Risk and Uncertainty, Vol. 5, pp. 297 – 324.
- Tom, S. , Fox, C, Trepel, C. and Poldrack, R. , 2007, “the Neural Basis of Loss Aversion in Decision – Making under Risk”, Science, Vol. 5811, pp. 515 – 518.
- Weber, M. , Messing, S. , Rao, H. , Detre, J. A. and Thompson – Schill, S. , 2014, “Prefrontal Transcranial Direct Current Stimulation Alters Activation and Connectivity in Cortical and Subcortical Reward Systems; a tDCS – fMRI Study”, Human brain mapping, Vol. 35, pp. 3673 – 3686.
- Williams, A. , 1966, “toward Speculative Risks as an Indicator of Attitudes toward Pure Risks”, Journal of Risk and Insurance, Vol. 33, pp. 577 – 586.
- Zizzo, D. , 2010, “Experimenter Demand Effects in Economic Experiments”, Experimental Economics, Vol. 13, pp. 75 – 98.
- 格林切尔, 2003, 《决策、不确定性和大脑——神经经济学》中译本, 贺京同等译, 中国人民大学出版社, 2010年版。
- 黄达强, 2014, 《损失厌恶与偏好的异质性: 来自神经经济学的证据》, 《南方经济》第7期。
- 金迪斯, 2009, 《理性的边界: 博弈论与各门行为科学的统一》中译本, 董志强译, 上海三联书店, 2011年版。
- 凯莫勒等, 2004, 《行为经济学新进展》中译本, 贺京同译, 中国人民大学出版社, 2010年版。
- 威尔金森, 2008, 《行为经济学》中译本, 贺京同、那艺译, 中国人民大学出版社, 2012年版。
- 叶航、汪丁丁、贾拥民, 2007, 《科学与实证: 一个基于神经元经济学的综述》, 《经济研究》第1期。
- 叶航, 2014, 《神经元经济学》, 《学术界》第7期。

Preference Heterogeneity and Consistency: Based on Neuroeconomics Study of Loss Aversion and Brain Stimulation

Jia Yongmin Huang Daqiang Zheng Haoli Luo Jun Ye Hang

Abstract: Behavioral economists empirically observed phenomenon of loss aversion when individuals made risk decisions. This is a challenge to economics axiom system based on the rational man hypothesis. We use neuroeconomics research methods to test the neural mechanisms of loss aversion from causal relationship perspective by transcranial direct current stimulation (tDCS) technology. Our study found that they are non – symmetry when brain nervous system process information about gains and losses, so that the risk preference of decision makers showed obvious reversals. However, the behavioral preference of decision makers is still subject to the requirements of consistency axiom in the given situation (gains or losses). The results of this study can not only expand the traditional understandings about human behavioral preferences in economics, but also accommodate empirical observations about human behavioral preferences from behavioral economists, and thus provides a feasible paradigm for development of the basic economics theory.

Keywords: Risk Preference; Loss Aversion; Preference Reversals; Preference Consistency.

(责任编辑: 大同)