

# 风险决策过程验证：补偿/非补偿模型之争的新认识与新证据\*

张阳阳 饶丽琳 梁竹苑 周 媛 李 纾

(中国科学院心理研究所行为科学重点实验室, 北京 100101)

**摘 要** 风险决策是人类赖以生存和发展的重大决策。如何进行风险决策是人类不断认识和改造世界过程中遇到的未解之谜。主流风险理论认为, 风险决策是一个补偿性的、期望值最大化的过程; 而非主流的风险理论则认为, 风险决策是非补偿性的, 并不遵循期望法则所假设的加权求和等过程。这一谜团为何一直没有得以破解, 或许是因为我们未找到揭示其心理过程的令人信服的证据。近 10 年来, 我们针对风险决策过程, 借助行为实验、眼动记录法、事件相关电位、功能磁共振成像等技术, 系统探索风险决策的心理和神经机制, 为回答“风险决策是否遵循补偿性规则”这一问题提供了汇聚性证据。本文依据期望法则所假设的概率函数推导、加权过程、加权求和过程、总分最大化等步骤, 对这些研究进行梳理与回顾, 以期加深人们对风险决策机制的理解, 并为建立、健全与风险决策相关的政策、法律法规提供理论依据。

**关键词** 风险决策; 决策过程; 补偿性规则; 非补偿性规则; 眼动; ERP; fMRI

**分类号** B849:C91

## 1 引言

风险决策是人类赖以生存和发展的重大决策。如何进行风险决策是人类不断认识和改造世界过程中遇到的未解之谜。日常生活中, 人们经常需要根据风险信息做出决策或判断。例如, 决定股票是购入、持有还是抛售; 决定医疗方案是手术治疗还是保守治疗。最为学术界津津乐道的例子是法国数学家、物理学家、思想家 Blaise Pascal 在其著作《思想录》中所描述的“帕斯卡的赌注”(Pascal, 1985), 即: 我不知道上帝是否存在, 但是我知道, 如果他不存在, 我作为无神论者没有任何好处, 但是如果他存在, 作为无神论者我将有很大的坏处。所以, 我宁愿相信上帝存在。

Pascal 对信教还是不信教的分析被普遍认为是历史上首例风险决策分析。所谓风险决策是指决策者在对未来情况不完全确定、但是确知各种决策后果及其出现概率情况下的决策(李纾, 毕研玲, 梁竹苑, 孙彦, 汪祚军, 郑蕊, 2009)。从进化的角度理解, 人类须在风险或不确定的选项中进行权衡来满足生存和繁衍的需要。

### 1.1 补偿/非补偿模型之争

#### 1.1.1 补偿性模型

“帕斯卡的赌注”首次将“风险决策”系统、公式化地上升为理论——期望价值(expected value, EV)理论。该理论旨在告诉人们理想情况下应当如何进行推测和判断。它认为人们决策时需要计算各选项的期望价值, 从而选取期望价值最大的选项。即:

$$EV = \sum_{i=1}^n p_i v_i$$

其中,  $p_i$  表示事件发生的概率,  $v_i$  表示事件的结果,  $i$  表示事件的每一种可能结果 ( $i = 1, \dots, n$ )。即, 一个风险选项的总价值等于每一个可能结果(possible outcome)和其概率(probability,  $p$ )的乘

收稿日期: 2013-12-26

\* 国家重点基础研究发展计划(2011CB711002)、国家自然科学基金(31170976; 31300843; 71071150)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(SCX2-EW-J-8)、北京市优秀博士学位论文指导教师人文社科项目(20138012501)以及北京市重点学科建设项目资助。

通讯作者: 李纾, E-mail: lishu@psych.ac.cn

积之和(N. H. Anderson & Shanteau, 1970; Kahneman & Tversky, 1979)。由此可见,期望价值理论遵循“无限理性”假设,认为决策者的认知能力可以完成期望法则所需要的计算。

以期望价值理论为基础的主流风险理论认为,风险决策是一个使用补偿性规则进行期望值最大化计算的过程。所谓补偿性(compensatory)规则,就是采用一个累加后的价值函数,把概率和结果等多个维度通过加权求和,缩减到单一的“价值”维度上进行评估(Anderson, 2003)。从期望价值理论发展而来的诸多理论中,无论是采用了不同形式结果函数的规范性理论,如期望效用理论(Bernoulli, 1954)和主观期望效用理论(subjective expected utility theory)(Edwards, 1954),还是使用一个非线性的权重函数 $\pi(p)$ 替代了期望效用理论中的概率 $p$ 的预期理论(prospect theory)(Kahneman & Tversky, 1979)和累积预期理论(cumulative prospect theory)(Tversky & Kahneman, 1992)等,这些理论都保留了期望法则的基本形式,核心思想依然是计算概率和结果函数的加权求和(Hastie & Dawes, 2013; 梁竹苑, 徐丽娟, 饶俐琳, 蒋田仔, 李纾, 2012)。由于这些理论的共性是遵循补偿性规则,被称为补偿性模型。

### 1.1.2 非补偿性模型

另一类理论遵循“有限理性”假设,认为人类有限的认知能力无法进行诸如期望法则或者更复杂的计算。其中代表性理论有占优启发式模型(priority heuristic)(Brandstätter, Gigerenzer, & Hertwig, 2006)和齐当别抉择模型(equate-to-differentiate theory)(S. Li, 2004)等。占优启发式模型认为,人们在进行风险决策时,可能(至少在某些情况下)采取了一种简单、非补偿性的规则(Brandstätter et al., 2006)。该模型假设,人们依据选项的最小可能结果,最小可能结果的概率和最大可能结果的顺序对所给选项进行搜索。该模型借用抱负水平(aspiration level)来对该原则进行界定,如果达到或超过抱负水平,就停止搜索,进而选择更加具有吸引力(attractive)的选项。齐当别抉择模型认为,风险决策的真正机制不是最大限度地追求某种形式的期望值,而是辨察选项在某个维度上是否存在优势性(dominance)关系。从而人为地“齐同”掉在某一维度上差别较小的两个可能结果,“辨

别”在另一维度上差别较大的两个可能结果,并以此作为最终抉择的依据(Li, 2004; 李纾, 饶俐琳, 许洁虹, 2010)。虽然齐当别模型和占优启发式模型在描述决策过程的细节上有所不同,但是这些理论均认为风险决策遵循非补偿性规则,是一个进行非加权求和的过程,故统称为非补偿性模型。这些非补偿性模型构成了非主流的风险决策理论。

### 1.1.3 二者之争

关于风险决策是基于补偿性规则还是非补偿性规则,至今仍无定论(Baron, 2009)。目前多数研究都是基于结果预测(outcome prediction)或模型拟合(goodness-of-fitting)的模型检验方法(Birnbaum & Navarrete, 1998; Camerer, 1989; Levy & Levy, 2002a, 2002b; 2002; Mellers, Schwartz, & Cooke, 1998; Newell, Weston, & Shanks, 2003)。这些研究把焦点放在了“做出了什么决策”,而不是关注“决策是如何做出的”(Payne & Bettman, 2004)。这些基于“结果”的模型检验方法“很好地解释了人们的行为结果,但是却没有解释潜在的决策过程”(Brandstätter et al., 2006),因此此类方法并不能有效地检验“加权求和”的过程是否真的存在。其原因主要有两个:首先,在某些情况下,潜在认知过程完全不同的决策模型可以解释相同的结果(选择偏好),此种情况下无法从决策结果上判定哪一种(类)模型更好(Johnson, Schulte-Mecklenbeck, & Willemsen, 2008)。其次,就补偿性模型的发展历史而言,它总是在遇到新的挑战或悖论时修正加权求和函数,所以使用决策结果等外在行为指标对补偿性规则进行攻击,如同试图杀死希腊神话中的九头蛇——斩去一头会生出二头,无法从根本上证伪此类模型(S. Li, 1996; 李纾等, 2009)。

### 1.2 基于决策过程的检验方法

与基于“结果”的方法不同,基于决策过程的方法,可以有效地检验补偿性规则所假设的“加权求和”过程是否真正存在。这种方法并非通过操作刺激的属性并建立相应的数学模型,从而对最后的选择进行推测,而是对决策的内在心理认知过程直接进行推测(Schulte-Mecklenbeck, Kühberger, & Ranyard, 2010)。目前已经有多种追踪心理过程的手段和技术可供决策研究使用。例如,眼动技术可以根据眼跳的幅度(amplitude)、时

长(duration)等指标来研究内部的心理加工过程 (Glöckner & Herbold, 2011; Rayner, 1998; Sun, Rao, Zhou, & Li, 2013); 利用功能磁共振成像技术(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)和脑电技术(Event-related potentials, ERP)可以检验各个理论模型背后的神经基础(Breiter, Aharon, Kahneman, Dale, & Shizgal, 2001; Elliott, Friston, & Dolan, 2000; Mennes, Wouters, Van Den Bergh, Lagae, & Stiers, 2008; Rao et al., 2013; Rao et al., 2011)。并且已有少数研究从决策过程的角度检验风险决策的补偿性规则(Breiter et al., 2001; Elliott et al., 2000; Ernst et al., 2004; Glöckner & Herbold, 2011; Mennes et al., 2008; Todd, 1995)。

在最近几年里, 我们课题组综合使用 ERP、fMRI、眼动、行为等多种技术手段, 开发了一些独创的实验范式, 对风险决策的过程进行了系统的检验, 为解答风险决策是否遵循补偿性规则这一谜题提供了汇聚性证据。依据期望法则所假设的概率函数推导、加权过程、求和过程、总分最大化等步骤(见表 1), 本文将对这些研究进行梳理与回顾, 以期加深我们对风险决策遵循何种规则与模型的认识。

## 2 对概率函数推导的检验

价值函数与权重函数是预期理论(Kahneman & Tversky, 1979)的两大基石。借助权重函数  $\pi$  的导出, Kahneman 和 Tversky (1979)解释了一些期望效用(EU)理论无法预测和描述的抉择(如艾勒悖论) (S. Li, 1993, 2004; 李纾, 2001), 使预期理论(prospect theory)成为期望法则家族中修正模型的佼佼者。预期理论是对经济学和心理学等学科产生重大影响的决策理论。

Li 在 1995 年的研究中采用与 Kahneman 和 Tversky (1979)相同的推导逻辑, 得到了一系列与  $\pi$  函数特性相悖的结果。其研究目的并不在于提出比预期理论更贴切的概率函数, 而是质疑推导权重函数的期望最大化假设是否正确。如果指导人们进行风险决策的原则根本就不是期望法则, 有如 Simon 的“满意法则”(satisficing) (Simon, 1955),  $\pi$  函数便是子虚乌有。

针对 Li (1995)摒弃期望最大化原则的主张, Tversky 认为, 决策过程中任何明确的选择法则都可以描述成某个函数的最大化。因此, 问题不在于选择过程是否被描述成一个期望最大化的过

表 1 风险决策过程检验研究小结

检验过程	实验任务	技术手段	测量指标	调节变量	作者(年份)
概率函数推导	俄罗斯轮盘赌任务	行为	出价(WTP), 感受的幸福程度	/	Li 等人(2009)
加权过程	概率决策任务和比例决策任务	行为	反应时、选择比例	感觉寻求人格、算术能力、概率能力	梁竹苑等人(2012)
	单次风险任务、多次风险任务及比例任务	眼动	结果与概率间眼跳	计算难度	Su 等人(2013); 汪祚军和李纾(2012)
	偏好决策任务和判断决策任务	fMRI	脑区功能连接强度	/	Rao 等人(2012)
求和过程	单次风险任务、多次风险任务及比例任务	眼动	选项内眼跳	计算难度	Su 等人(2013); Sun 等人(2013)
	风险决策任务	眼动	最大(小)结果间眼跳	选项位置(交叉条件和非交叉条件)	汪祚军等人(2012)
	风险决策任务和期望价值决策任务	ERP	P300	最小结果维度差别和计算难度	Rao 等人(2013)
总分最大化	偏好决策任务和判断决策任务	fMRI	脑区激活程度	决策冲突	Rao 等人(2011)
	重大/轻微损失决策任务	fMRI	脑区激活程度	情绪反应	Li 等人(2011)
过程体验	“迫选规则体验”任务	行为	行为结果、情感评定和认可程度评定	/	饶伶俐、梁竹苑和李纾(2009)

程,而是究竟哪个函数被最大化了(梁哲,李纾,许洁虹,2007)。对此,Li 等人(2009)又利用俄罗斯轮盘赌(Russian roulette)任务对预期理论的非线性权重函数重新进行了检验。

俄罗斯轮盘赌任务常被用来研究风险决策(Grose-Fifer, Hoover, Zottoli, & Rodrigues, 2011; Schoemaker, 1993)。该实验指导语如下:“假设你被迫玩一种赌命的游戏——俄罗斯轮盘(Russian roulette),在左轮手枪(revolver)里装上子弹,将轮子旋转,然后对着自己的头部扣动扳机。现给你一个机会花钱从手枪里买出一颗子弹。试想,同样是买 1 颗子弹出来,把子弹数从 4 减至 3 和从 1 减至 0 这两种情况下,你会开出同样的价格么?”研究发现,与把死亡概率由 4/6 变成 3/6 相比,大多数人会愿意花更多的钱使死亡概率由 1/6 变成 0(Kahneman & Tversky, 1979)。

Kahneman 和 Tversky (1979)用这一经典的例子来解释预期理论中概率权重函数  $\pi$  的非线性,即,人们对客观概率的感受性是呈倒 S 型非线性的。Li 等(2009)的研究认为,尽管 Kahneman 和 Tversky 的说明与直觉相符,但是  $\pi$  函数的主要特性是人为地通过演绎法间接推导出来的,并不是通过实验直接测量获得的,因此,仍有必要通过实验测量对其进行检验。Li 等(2009)采用“出价”(Willingness To Pay, WTP)和“感受的幸福程度”两种指标,直接测量了人们对概率变化的感受性。结果(见图 1)发现,实验测量所得的决策者愿意出钱的数额,以及感受到的高兴程度,随着手枪中子弹数的增加而降低。即当左轮手枪里的子弹数是 1 的时候,人们确实愿意花最多的钱把这颗子弹买出,同时感受到的高兴程度最强烈,而随着手枪里的子弹数的增加,人们愿意出的金额以及高兴程度也随之降低。

这一结果与用  $\pi$  函数推导出的结果不一致。虽然  $\pi$  函数预测,与把死亡概率由 4/6 变成 3/6 相比,大多数人会愿意花更多的钱使死亡概率由 1/6 变成 0,但是  $\pi$  函数亦推论出,与把死亡概率由 4/6 变成 3/6 相比,人们会愿意花更多的钱使死亡概率由 6/6 变成 5/6。即,按照  $\pi$  函数的推导,决策者愿意出钱的数额不应当随着子弹数的增加呈单调递减趋势(见图 1),而是表现出一种 U 型趋势,即先降后升(见图 2)。这是诸如  $\pi$  函数这样倒 S 型概率权重函数的共同特性。而实验结果表明:所

有倒 S 型概率权重函数所推导出的权重变化函数都与实际测量的变化感受不符。这些行为证据对预期理论提出再质疑,从而促进人们重新思考 Tversky 和 Kahneman 缺省(by default)地假设期望最大化原则的合理性。换句话说:当期望最大化假设为真时,你尽可以找到一个被最大化的函数,但从期望最大化过程中推出这样一个函数的存在,并不能证明最大化假设本身是正确的。

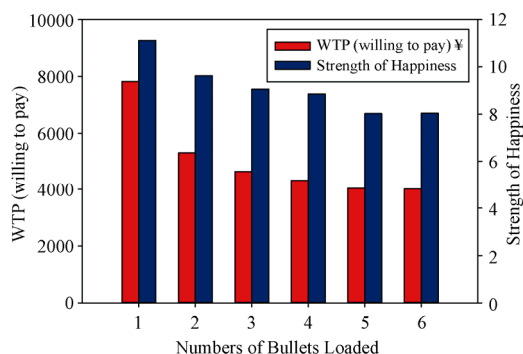


图 1 在俄罗斯轮盘赌任务中(6 种条件,枪中原有子弹数目分别为 1、2、3、4、5 和 6),减少 1 颗子弹被试愿意支付的钱数和感受的幸福程度。红色柱状图表示,被试愿意为减少 1 颗子弹所支付的钱数和枪中原有子弹数目的关系( $N = 70$ ),曲线  $y = e^{8.211+0.806/x}$  最适合描述二者的关系。蓝色柱状图表示,减少 1 颗子弹被试所感受的幸福程度和枪中原有子弹数目的关系( $N = 42$ ),曲线  $y = 11.057 \cdot x^{-0.182}$  最适合描述二者的关系(Li et al., 2009)。

### 3 对加权过程的检验

以期望价值理论为核心的补偿性规则的本质是,结果被概率或者概率的函数所加权。从数学表达式上看,这一加权过程其实就是概率函数与结果函数相乘。因此,“加权过程”是补偿性规则所假设的一个基本决策步骤。而检验“加权过程”是否真的存在,成为检验风险决策是否遵循补偿性规则的首要问题之一。近年来,我们课题组完成了一系列行为、眼动、fMRI 的研究,对此过程进行了检验。

#### 3.1 行为和眼动的证据

在行为层面上,假设求和过程不变,检验风险决策是否遵循期望法则的加权过程的问题,就可以转化为风险决策是否等价于结果和概率函数相乘的数学计算过程(梁竹苑等,2012)。

根据此思路,梁竹苑等人(2012)设计了一种

新的实验范式, 引入了概率决策任务(probability decision task)和比例决策任务(proportion decision task) (见图 3)。这两个任务所呈现的刺激完全相同, 只是指导语不一样。在概率决策任务中, 指导语

为“在每个选项中, 您都会按照某一个概率(用百分号表示), 获得或损失一定数额的金钱”。而在比例决策任务中, 指导语为“在每个选项中, 您都会按照某一个比例(用百分号表示), 获得或损失一

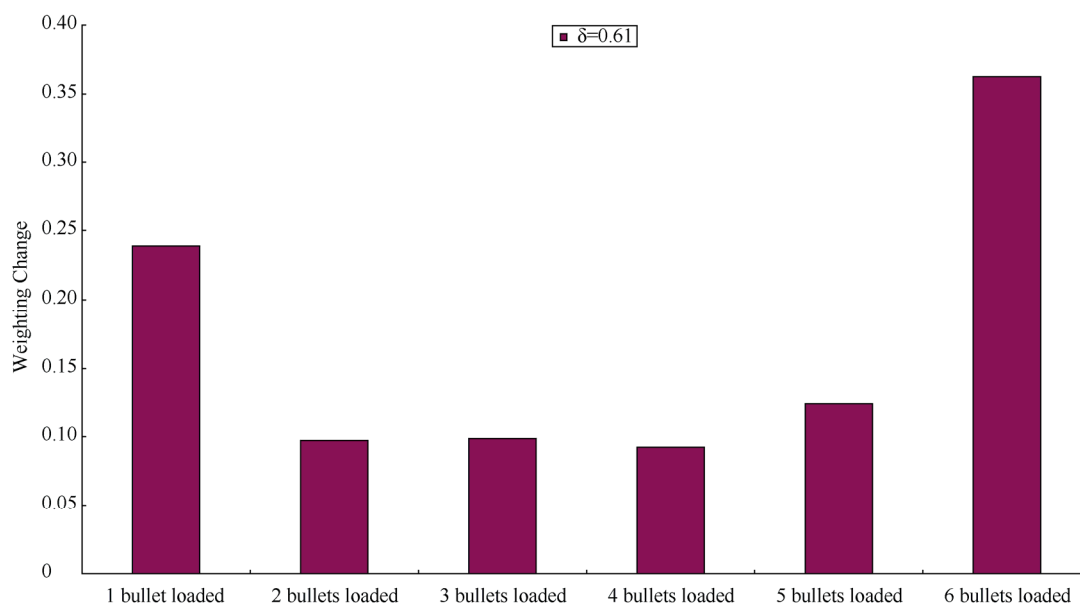


图 2 当在俄罗斯轮赌任务中(6 种条件, 枪中原有子弹数目分别为 1、2、3、4、5 和 6), 在  $\delta = 0.61$  时, 减少 1 颗子弹所引起的权重变化。权重变化公式为  $\Delta W = W(p) - W(p - \frac{1}{6})$  (Li et al., 2009)。

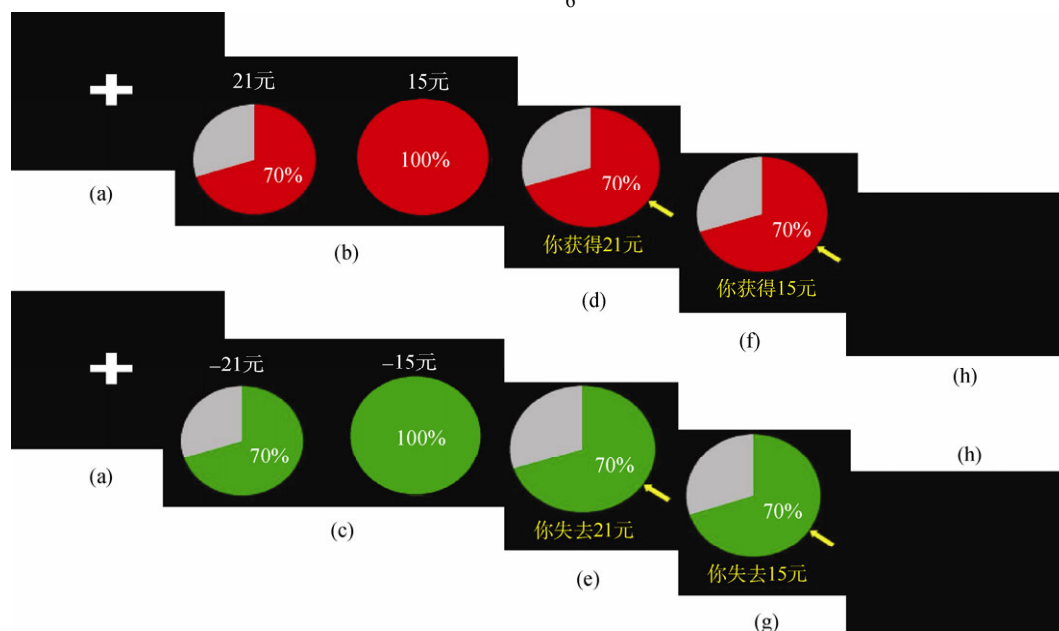


图 3 概率与比例决策任务流程示意图 (a: 注视点; b, c: 获得/损失效价的刺激呈现; d, e: 获得/损失效价的比例决策任务反馈; f, g: 获得/损失效价的概率决策任务反馈; h: 黑屏) (引自: 梁竹苑等, 2012)。

定数额的金钱”(梁竹苑等, 2012)。因此, 比例决策任务符合补偿性规则的假设: 按照加权过程的法则, 计算出每个选项的最大期望值进行决策。如果人们在概率决策任务中确实遵循期望法则的加权过程, 其进行的心理过程应当等价于结果和概率函数相乘的数学计算过程, 即比例决策任务中的心理过程。

按照这一逻辑, 我们可以用反应时和选择比例为指标检验“加权过程”。结合比例决策任务和概率决策任务, 我们可以推测: 如果被试在概率决策任务中遵循“加权过程”规则, 那么在需要计算的数字与难度均相同的前提下, 其反应时应与其在比例决策任务中的反应时无显著差异; 并且当比例和概率决策任务中各选项的数值均相同时, 二者的选择结果应无显著差异(梁竹苑等, 2012)。梁竹苑等人(2012)的研究结果表明, 在计算的数字与难度均相同的前提下, 决策者在比例决策任务中的反应时要显著小于在概率决策任务, 并且当选项完全相同时, 决策者按照“概率相乘”规则进行决策的比例在比例任务中更高。因此, 该结果并不支持“加权过程”假设。

我们亦可以通过个体的眼动轨迹来考察风险决策中信息搜索的过程, 从而验证“加权过程”是否存在(Liversedge & Findlay, 2000; Russo & Doshier, 1983; Su et al., 2013; Sun et al., 2013; 汪祚军, 李纾, 2012)。其研究逻辑是: 如果确实存在“加权过程”, 那么被试在做出决策之前, 需要对每个选项进行加权, 在每个选项的概率和结果之间的眼跳必然比较多, 这种蕴含在补偿性模型当中的过程叫做“基于选项(option-based)”的信息搜索; 而如果风险决策不遵循加权过程, 而是符合启发式模型, 被试就需要在选项的不同特征(如两个选项的最小结果、最小结果概率、最大结果)之间进行比较, 在概率与概率之间、结果与结果之

间的眼跳将较多, 这种蕴含在非补偿性模型的过程叫做“基于特征(attribute-based)”的信息搜索(Brandstätter et al., 2006; Johnson et al., 2008; 汪祚军, 李纾, 2012)。因此, 通过比较风险决策任务中“基于选项”和“基于特征”的眼动轨迹, 就可以有效地验证“加权过程”假设。

我们课题组所进行的系列眼动研究发现, 被试在进行风险决策时不符合补偿性模型所假设的“加权过程”。如果强迫被试使用补偿性规则完成风险决策任务, 其基于选项的眼跳次数显著多于基于特征的眼跳次数(Su et al., 2013; 汪祚军, 李纾, 2012)。如果被试按照自主选择策略进行风险决策任务, 那么被试基于特征的眼跳次数会显著多于基于选项的眼跳次数(Su et al., 2013; 汪祚军, 李纾, 2012)(见图4)。

### 3.2 脑功能连接的证据

有关风险决策的脑影像研究已积累了许多证据(Breiter et al., 2001; Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003; Ernst et al., 2004; Ernst & Paulus, 2005)。这些研究提示后顶叶皮层(posterior parietal cortex, PPC)和外侧前额叶皮层(lateral prefrontal cortex, PFC)与概率信息处理有关。具体而言, 后顶叶皮层由于其在数学计算中的作用(Dehaene et al., 2003), 在风险决策中被认为与表征概率有关(Ernst et al., 2004; Ernst & Paulus, 2005; Smith et al., 2009)。双侧前额叶皮层由于其在认知控制(cognitive control) (Satterthwaite et al., 2007)和信息整合中的作用(information updating and maintenance) (Cohen et al., 1997; Krawczyk, 2002), 在风险决策中被认为与概率信息的加工过程有关(Rao, Li, Jiang, & Zhou, 2012)。以往研究还发现与结果大小(outcome magnitude)有关的脑区主要是双侧基底神经节(包括丘脑、背侧及腹侧纹状体等),

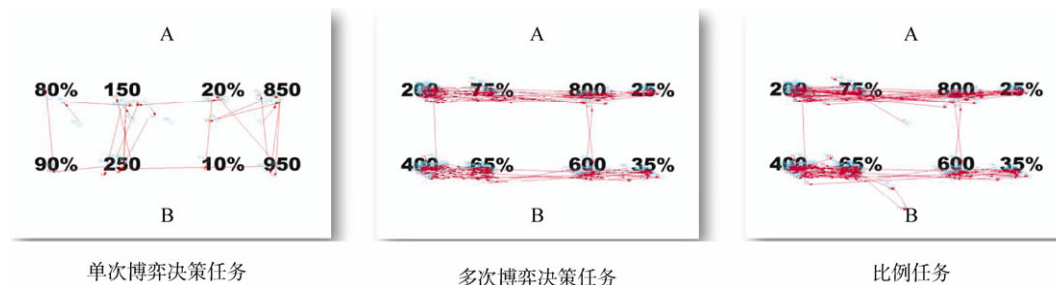


图4 被试在单次风险任务、多次风险任务及比例任务中眼动轨迹示意图



其中背侧及腹侧纹状体被普遍认为与奖赏有关(Breiter et al., 2001; Ino, Nakai, Azuma, Kimura, & Fukuyama, 2010; Knutson, Taylor, Kaufman, Peterson, & Glover, 2005; Tom, Fox, Trepel, & Poldrack, 2007)。虽然这些研究发现了关于数学计算、信息整合、概率等相关的脑区,但是这些证据并不能直接证明风险决策的过程中是否存在“加权过程”。

Rao 等人(2012)采用 fMRI 技术利用脑功能连接分析方法对风险决策是否存在“加权过程”进行了检验。该实验中设计了两种风险决策任务:判断决策任务要求被试先根据“加权求和”规则给每个风险选项赋值,然后选择赋值更大的那个选项。偏好决策任务(preferential choice task)要求被试按照自己的偏好进行风险决策。因为根据“加权求和”法则,如果偏好决策任务和判断决策任务一样,通过对所有可能结果进行加权求和的方法给每个选项赋值之后再行决策,那么在表征概率和回报的脑区之间应该有强协作性,这种紧密的协作性会导致这两类脑区的功能连接强度高,两种任务功能连接强度则没有差异;相反,如果偏好决策任务中结果与概率之间不存在加权过程,那么决策时表征回报的脑区与表征概率的脑区无需进行协作,这两类脑区的功能连接强度就应弱于判断决策任务。Rao 等人(2012)的研究结果表明,判断决策任务和偏好决策任务下,表征概率和回报的脑区之间的功能连接强度不一样。与判断决策任务相比,偏好决策任务中概率和回报脑区间的功能整合强度不如判断决策任务那般强。这一研究结果进一步提示,风险决策并不像期望法则所描述的那样,存在一个“加权过程”。

### 3.3 来自调节变量的证据

我们课题组的另一条研究思路是使用双分离逻辑,从风险决策的调节变量的角度检验风险决策过程。双分离(double dissociation)逻辑可以很好地检验是否存在某个认知加工过程(Shallice, 1988)。其具体思想是:如果两任务 A 和 B 包含了同一个心理过程 C,那么影响该心理过程 C 的变量,必然会同时影响这两个任务;反之,如果该心理过程 C 只包含在了其中一个任务 A,那么只影响该心理过程 C 的变量,就只会影响任务 A,而不会影响到任务 B,即双分离效应。所以依据“加权求和”假设,“加权求和”这一过程受到计算难度和个体的计算能力的影响,如果计算难度

和个体的计算能力同时影响了比例决策任务和概率决策任务,那么就可以推测,风险决策过程确实符合补偿性规则的假设。

按照这一逻辑,我们考察了人格和概率能力等因素对风险决策的作用。在风险决策中,概率能力(numerical ability)和感觉寻求(sensation seeking)是两个已证实的影响因素。高概率能力会增加风险评估的准确性(Reyna, Nelson, Han, & Dieckmann, 2009),降低框架效应的影响(Peters & Levin, 2008; Peters et al., 2006)。感觉寻求,即对新异复杂感觉和经验的需要,及冒着体力或社会风险去寻求这种经验的意愿(Zuckerman, 2010),与包括犯罪行为、吸烟等冒险行为有关(Boyer, 2006; Zaleskiewicz, 2001)。但是概率能力和感觉寻求并不会影响“加权过程”的单纯的计算过程。

梁竹苑等人(2012)的研究发现,比例决策任务和概率决策任务出现了双分离效应:计算难度和算术能力影响比例决策任务,不影响概率决策任务;概率能力和感觉寻求只影响概率决策任务,不影响比例决策任务。概率能力和感觉寻求等个体差异因素可调节被试在概率决策任务中的表现。其结果并不支持“加权求和”假设。

## 4 对求和过程的检验

补偿性规则认为,当风险选项中存在多个结果时,决策者不仅需要将概率函数对结果函数加权,还需要将各加权后的结果相加,即存在“求和”的过程。因此,我们尝试从直接和间接的角度对“求和”过程进行了检验。

通过“概率-比例决策任务”范式,可以直接检验补偿性规则的“求和”的假设。在比例决策任务中,每个选项包含了多个可能的结果,被试必须通过“求和”计算出每个选项的期望价值。因此比例决策任务就包含了“求和”的心理过程。将比例决策任务作为一个基线任务,就可以直接检验被试在自然状态下的决策过程与补偿性规则所预期的求和计算过程是否一致:如果风险决策遵循求和过程,则决策者在“风险决策任务”中的眼动轨迹(信息搜索与加工过程)与其在“比例任务”中相似;相反,如果信息搜索与加工过程在两个任务中存在显著差异,则风险决策并非遵循求和过程(Su et al., 2013; Sun et al., 2013)。

另外还可以通过单次风险决策任务和多次风

险决策任务,间接地验证“求和”假设。单次风险决策任务意为,行动方案只执行一次,或者所选择的选项只有1次随机过程;而多次风险决策意为,行动方案会执行多次,或者所选择的选项会有经历多次的随机(Su et al., 2013; Sun et al., 2013)。大量实验研究表明,当进行多次风险决策任务时,人们更倾向遵循补偿性规则,选择具有较大期望值的选项(Colbert, Murray, & Nieschwietz, 2009; Redelmeier & Tversky, 1990; Sun et al., 2013)。因此,若单次风险决策任务和多次风险决策任务的信息搜索与加工过程存在差异,则说明风险决策并非遵循“求和”规则。

#### 4.1 行为与眼动的证据

根据求和过程的假设,如果风险决策符合“求和”法则,那么被试在信息搜索时,基于选项眼跳的次数应该要显著多于基于维度眼跳(Böckenholt & Hynan, 1994)。Su等人(2013)基于概率和比例任务范式的研究中发现,被试在进行比例任务时的信息搜索是基于选项的,但是进行概率任务的信息搜索是基于维度的。并且,被试在单次风险决策任务与其在多次风险决策任务中的信息搜索和加工过程有显著差异(Su et al., 2013; Sun et al., 2013)。这些结果表明,人们在单次风险决策任务中并非遵循补偿性规则预期的求和过程。

#### 4.2 来自调节变量的证据

类似地,我们使用了双分离逻辑,考察了“计算难度”、选项位置等调节变量在求和过程中的作

用。根据双分离逻辑,在补偿性规则的假设下,风险选项的计算难度将会直接影响“求和”过程,从而影响决策结果,但是在非补偿性规则的假设下,决策结果不会受到影响。所以,以计算难度为调节变量的方法可以有效地检验这些决策模型。已有研究发现,计算难度不仅影响比例任务和多次概率任务的反应时(Su et al., 2013; 梁竹苑等, 2012),还影响这两个任务的平均注视点时长及眼动轨迹(Su et al., 2013)。

另一项眼动研究则巧妙地操作了不同选项特征呈现位置这一调节变量,并检验了其对风险决策过程的作用。汪祚军和李纾(2012)使用眼动轨迹这一指标,把不同选项的特征交叉或非交叉呈现(见图5)。根据“求和”过程的假设,被试应该主要在选项内进行搜索,所以无论刺激交叉还是非交叉呈现,交叉跳转次数都不应该有显著差异。但是研究表明,被试在进行风险决策时,交叉跳转次数在刺激交叉呈现和非交叉呈现条件下有明显差异。进一步的分析表明,决策者并非按照占优启发式模型(Brandstätter et al., 2006)所假定的具体决策步骤进行决策(汪祚军, 李纾, 2012)。

Rao等人(2013)基于双分离推论逻辑,采用了ERP技术分别考察了“最小结果维度差别”和“计算难度”的作用。因为其无创性和时间精度高等特点,ERP技术非常适合用来研究具体的心理认知过程。前人发现,P300和风险决策的概率大小(Yeung & Sanfey, 2004),风险偏好(Polezzi,

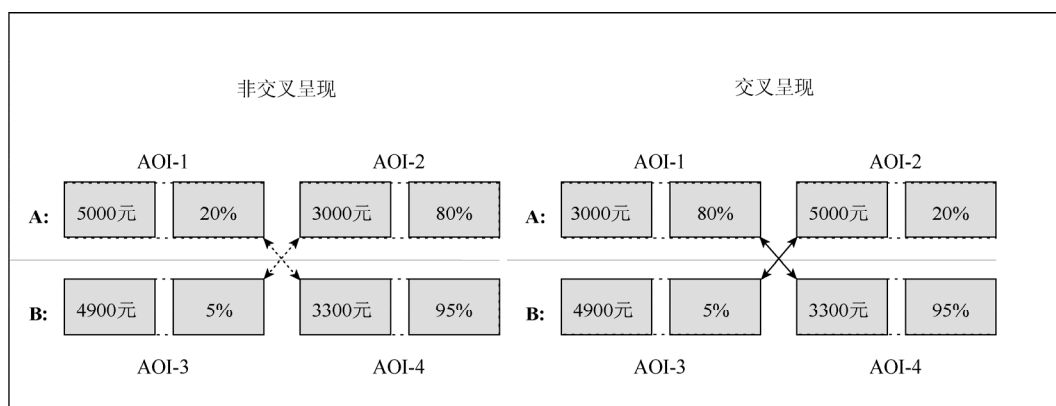


图5 非交叉呈现及交叉呈现两种问题情境中的兴趣区划分及兴趣区之间的眼跳示例(非交叉呈现问题情境中两个选项的最大结果(及其概率)、最小结果(及其概率)对应呈现,而交叉呈现问题情境中两个选项的最大结果(及其概率)、最小结果(及其概率)交叉呈现;阴影部分代表划分出的不同兴趣区,箭头表示不同兴趣区之间的交叉眼跳)(引自:汪祚军和李纾, 2012)。



Sartori, Rumiati, Vidotto, & Daum, 2010), 以及冲突加工(Frühholz, Godde, Finke, & Herrmann, 2011; Mennes et al., 2008)等有关。按照认知心理学中经典的双分离推论逻辑: 如果风险决策基于非补偿性规则, 那么影响启发式加工过程(如, 齐当别的“最小结果维度差别”的大小, 将会影响决策结果和与风险相关的 ERP 成分; 如果风险决策基于补偿性规则, 那么影响“期望计算加工过程”的计算难度, 将会影响决策的“反应时”和与“计算难度”相关的 ERP 成分。Rao 等人(2013)的研究结果发现, 计算难度越大, 参与者的“反应时”越长, 做出的选择越不符合期望价值理论, ERP 晚期正慢波的波幅也越大。也就是说, 计算难度仅仅影响期望价值决策任务中的决策结果及其 ERP 的晚期正慢波(见图 6)。这符合补偿性规则的假设。最小结果维度差别大小因素, 仅仅影响风险决策任务的决策结果以及 ERP 的 P300 (刺激出现后 300ms 左右达到峰值的正成分)和晚期正慢波(见图 7)。说明风险决策也许并非存在如同补偿性规则所假设的心算过程。

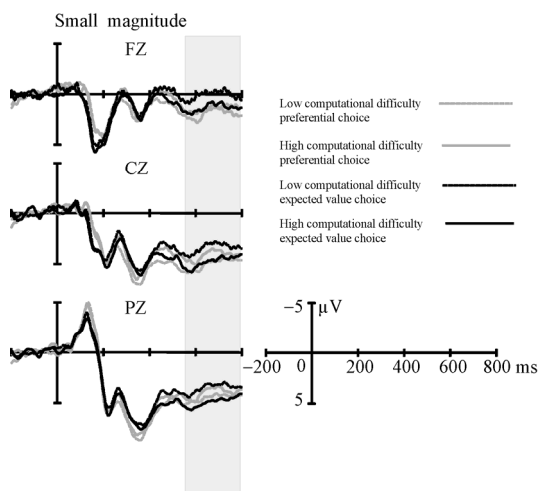


图6 在风险决策和期望价值决策任务中由计算难度引发的平均波形图(Rao et al., 2013)。

## 5 总分最大化的检验

从决策冲突的角度来看, 补偿性决策过程和非补偿性决策过程最本质的区别在于二者处理决策冲突的模式不同。根据补偿性规则, 人们通过对所有可能结果进行加权求和的方法给每个选项

赋值(所得到的赋值表征决策者的偏好)。由于计算赋值后, 一个选项会在总效用维度上优于另一个选项, 从而解决了“选项 A 在报酬维度优于选项 B; 而选项 B 在概率维度优于选项 A”的决策冲突。在补偿性过程中, 若两个选项在总效用维度上的差异越小, 那么决策者越难作出区分、所体验到的冲突越大。然而, 非补偿性规则摒弃了加权求和的过程, 不寻求一个选项会在总效用维度上优于另一个选项, 而是将在某个维度上处于劣势的选项排除出局, 从而作出选择。当没探测到一个处于强优势的选项时, 人们便时时会感到冲突。在这样的非补偿过程中, 若风险选项的两个维度内(概率和报酬维度)的差异越大, 那么所体验到的冲突越大。据此, Rao 等人(2011)提出补偿性-非补偿性的冲突反应假设: 决策者的实际风险决策过程若遵循补偿性规则, 选项间的总效用值越接近, 冲突越大; 若遵循非补偿性规则, 概率或报酬维度内差异越大, 冲突越大。

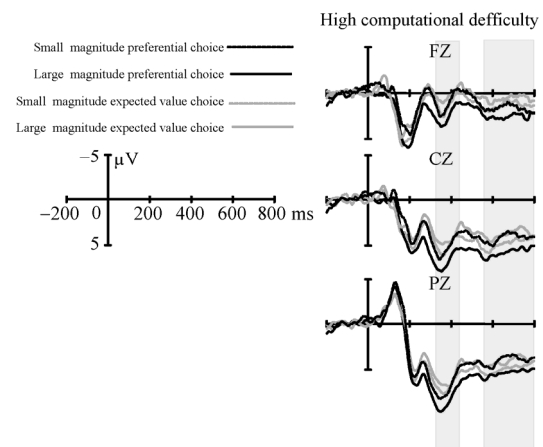


图7 在风险决策和期望价值决策任务中由最小结果维度差别引起的平均波形图(Rao et al., 2013)。

Rao 等人(2011)设计了偏好决策和判断决策两个任务。偏好决策任务要求被试按照自己的偏好进行决策, 而判断决策任务要求被试先根据“确定当量法”给每个选项赋值, 然后选择赋值更大的那个选项。因此, 判断决策任务便明确要求被试根据补偿性规则进行决策。若被试在偏好决策任务中也是根据补偿性规则作出决策的话, 那么, 偏好决策和判断决策两个任务下应具有相似的脑功能活动模式。其研究发现, 在偏好决策任

务中,冲突相关的脑区(背内侧前额叶)的激活程度受到两个选项维度(概率和报酬)内差异的显著影响,而与两个选项的总效用维度差异不相关。与之相反,在判断决策任务中,背内侧前额叶的激活程度受到两个选项的总效用维度差异的显著影响,而与维度内差异不相关。根据我们提出的补偿性-非补偿性的冲突反应假设,这一发现表明,人们在根据自己偏好进行决策的时候并不遵循补偿性规则。此外,我们还发现在偏好决策时的冲突强度大于判断决策下的冲突强度。这暗示,在判断决策过程中,决策冲突通过补偿性计算的方式解决了;而在偏好决策过程中,由于决策冲突没有被解决,被试一直感受到强烈的冲突。

从情感反应的角度来看,期望法则家族的理论一直认为,解决决策冲突是以“冰冷无情”的数学计算为基础,“两利相权取其重,两害相权取其轻”是规范性决策理论的一大基本原则。然而,在现实生活中,人们的决策特别是涉及生存威胁的决策,常常会引发人们的情感,这种情感会影响人的决策行为。Li 等人(2011)的研究比较了总效用相近的小损失决策情境和总效用相近的大损失决策情境,发现相比于小损失人们在重大损失之间进行决策时,对威胁性信息和负性情感相关的脑区杏仁核有显著的激活,而且激活大小和被试主观报告的负性情感正相关(见图 8)。这一结果表明:重大损失决策涉及“热”情感,而不是“两害相权取其轻”所能算计的问题,传统决策理论单纯

用数学计算公式解决决策冲突或无法真实地描述人们的避害决策。

## 6 过程体验的检验

在行为决策发展历程中,人们采用过两种不同检验决策理论的标准,即“决策结果的逻辑一致性”和“决策结果的预测准确性”。

采用“决策结果的逻辑一致性”标准时,研究者认为在信念和偏好系统内应该具备内部一致性(internal coherence)和逻辑一致性(logical consistency)(Mellers et al., 1998)。假定人们在决策中必须遵循一些规范性公理,且人们的决策结果必须与这些公理保持一致,否则将引发对决策理论的质疑。例如,绝大多数补偿性决策理论要求满足一致性(consistency and coherence)原则,即同一问题的不同形式表征,其决策结果应保持不变。采用“决策结果的预测准确性”标准时,研究者将理论预测的结果与决策者实际决策结果进行对比,从而检验理论模型是否能准确预测决策者的行为(Birnbaum & Navarrete, 1998; Camerer, 1989; Levy & Levy, 2002a, 2002b; Newell et al., 2003)。

饶娜琳等(2009)提出:可以通过决策者对决策过程的主观感受来考察决策者的内在决策过程。该研究首次尝试使用“迫选规则体验”的方法,通过预先规定决策者的决策规则,指导被试严格遵循预先规定的决策规则做出决策。然后使用 3 种不同的指标(行为结果、情感评定和认可程度评定)

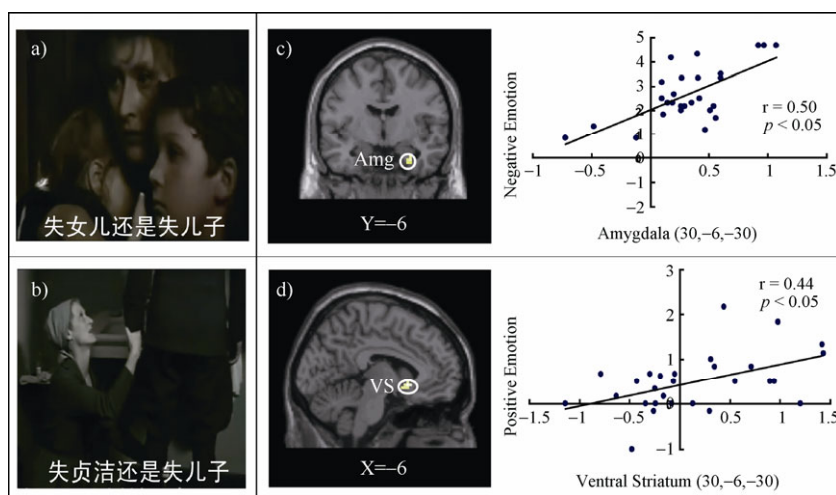


图 8 进行损失决策时脑激活模式 (Q. Li, et al, 2011)。

对所遵循的决策规则进行评定。其假设为: 自主决策和规则迫选决策条件下做出的相同决策越多, 表明该被试自主决策规则(真规则)和迫选决策规则(假规则)可能越匹配。而决策者对规则迫选决策过程的认可和情感评定, 则可以衡量迫选的决策规则(假规则)是否为决策者在实际决策中真实使用的规则。

“迫选规则体验”的方法以期寻求一种既有别于“决策结果逻辑一致性”又有别于“决策结果预测准确性”的检验标准, 且这种标准可以通用于不同决策理论的检验。研究发现: (1)被试在自主决策条件下比在规则迫选条件下体验到的正性情感程度更强, 负性情感的程度更弱(见图9左); (2)被试在自主决策与规则迫选决策两种条件下做出的相同决策越多, 该被试对迫选规则更加认可并体验到的正性情感程度越强, 负性情感的程度越弱(见图9左); (3)与期望价值理论相比, 齐当别抉择模型可能符合更多决策者的实际决策规则(见图9右)。这些结果表明, 作为检验规范性和描述性风险决策理论的新尝试, 迫选规则体验法可能更有助于回答“决策者实际采用的决策规则是什么”的问题(饶俐琳等, 2009)。

## 7 展望

风险决策领域的补偿性规则和非补偿性规则之争, 由来已久。二者争论的关键在于, 人们在进行风险决策时是否一定遵循“加权求和”的期望法则。本文遵循期望法则所假设的概率函数推导、加权过程、加权求和过程、总分最大化等步骤, 逐步介绍我们课题组对这些决策过程所做的系列验

证研究。这些研究的结果说明, 期望法则家族理论将“加权求和”结果作为人类风险偏好的单一指数, 或许是一种人为创造的错误指数。这些研究也说明, 基于决策的心理过程进行风险模型检验, 可能是一种可信且有效的基本检验范式。最后, 我们为未来的风险决策研究提出下列几点建议:

(1)对决策过程进行检验, 是一种检验风险决策模型的有效办法。在通过决策结果无法有效验证决策模型的情况下, 利用过程追踪手段和技术, 如眼动, ERP 以及 fMRI, 能够直接对心理过程进行追踪, 为以后风险决策模型的检验提供新颖独特的视角。

(2)对于非主流风险决策理论中的各个模型进行检验或者整合, 可能是未来该领域研究的重要方向。我们进行的一系列研究, 通过不同的技术手段和实验范式, 都一致发现, 风险决策的心理过程不符合主流风险决策理论所假设的补偿性规则。但我们并没有利用过程验证的方法, 检验哪种非补偿性模型能更好地诠释风险决策, 这可能需要在未来研究中进行探讨。

(3)综合使用多种技术, 可能为风险决策模型验证提供更为完整的证据。每种技术都有其优势和劣势, 都只能从一个侧面对所研究的问题提供证据。例如 ERP 的时间精度很高, 但是空间定位能力差, 而 fMRI 技术对于心理过程对应的脑区的定位很好, 但是时间精度不够好。所以将二者结合起来, 互补所需, 将会更有效的检验风险决策模型。此外, 还有一些已经被广泛使用的技术在本文中并没有提及, 例如经颅直流电刺激 (Transcranial DC stimulation, tDCS) (Gandiga,

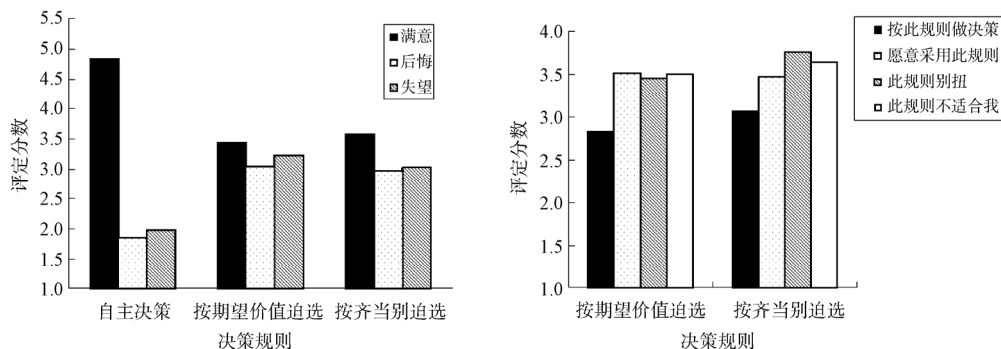


图9 对遵循三种决策规则做决策的情感评定结果(左图)和对遵循两种迫选决策规则做决策的认可程度评定结果(右图)(引自: 饶俐琳等, 2009)。

Hummel, & Cohen, 2006), 经颅磁刺激(Transcranial Magnetic Stimulation, TMS) (Paus, Jech, Thompson, Comeau, Peters, & Evans, 1997)等, 这些技术亦可用于研究风险决策过程, 为该领域研究提供不同的证据。

(4)基于心理过程验证的视角和方法技术可以推广到其它决策领域。虽然本文综述的系列研究都限于风险决策领域, 但是基于心理过程的检验方法及过程追踪技术, 同样可以用于研究其它决策问题, 例如决策中的情绪、不确定决策(uncertain decision making)、多属性决策(multiattribute decision making)等。

## 参考文献

- 李纾. (2001). 艾勒悖论 (Allais Paradox) 另释. *心理学报*, 33(2), 176-181.
- 李纾, 毕研玲, 梁竹苑, 孙彦, 汪祚军, 郑蕊. (2009). 无限理性还是有限理性?——齐当别抉择模型在经济行为中的应用. *管理评论*, 21(5), 103-114.
- 李纾, 饶俐琳, 许洁虹. (2010). 冒风险的决策者: 聪明乎? 糊涂乎?. *上海管理科学*, 32(3), 32-37.
- 梁哲, 李纾, 许洁虹. (2007). 预期理论权重函数  $\pi$  的由来、质疑及 Tversky 的阐释. *经济数学*, 24(4), 331-340.
- 梁竹苑, 徐丽娟, 饶俐琳, 蒋田仔, 李纾. (2012). “20% 的概率获得蛋糕”=“获得蛋糕的 20%”? 检验风险决策的期望法则假设. *科学通报*, 57(35), 3421-3433.
- 饶俐琳, 梁竹苑, 李纾. (2009). 迫选规则体验法: 检验规范性和描述性风险决策理论的新尝试. *心理学报*, 41(8), 726-736.
- 汪祚军, 李纾. (2012). 对整合模型和占优启发式模型的检验: 基于信息加工过程的眼动研究证据. *心理学报*, 44(2), 179-198.
- Anderson, C. J. (2003). The psychology of doing nothing: Forms of decision avoidance result from reason and emotion. *Psychological Bulletin*, 129(1), 139-166.
- Anderson, N. H., & Shanteau, J. C. (1970). Information integration in risky decision making. *Journal of Experimental Psychology*, 84(3), 441-451.
- Baron, J. (2009). *思维与决策(第4版)* (李纾, 梁竹苑 主译). 北京: 中国轻工业出版社.
- Böckenholt, U., & Hynan, L. S. (1994). Caveats on a process-tracing measure and a remedy. *Journal of Behavioral Decision Making*, 7(2), 103-117.
- Bernoulli, D. (1954). Exposition of a new theory on the measurement of risk. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 23-36.
- Birnbaum, M. H., & Navarrete, J. B. (1998). Testing descriptive utility theories: Violations of stochastic dominance and cumulative independence. *Journal of Risk and Uncertainty*, 17(1), 49-79.
- Boyer, T. W. (2006). The development of risk-taking: A multi-perspective review. *Developmental Review*, 26(3), 291-345.
- Brandstätter, E., Gigerenzer, G., & Hertwig, R. (2006). The priority heuristic: Making choices without trade-offs. *Psychological Review*, 113(2), 409-432.
- Breiter, H. C., Aharon, I., Kahneman, D., Dale, A., & Shizgal, P. (2001). Functional imaging of neural responses to expectancy and experience of monetary gains and losses. *Neuron*, 30(2), 619-639.
- Camerer, C. F. (1989). An experimental test of several generalized utility theories. *Journal of Risk and Uncertainty*, 2(1), 61-104.
- Cohen, J. D., Perlstein, W. M., Braver, T. S., Nystrom, L. E., Noll, D. C., Jonides, J., & Smith, E. E. (1997). Temporal dynamics of brain activation during a working memory task. *Nature*, 386(6625), 604-608.
- Colbert, G., Murray, D., & Nieschwietz, R. (2009). The use of expected value in pricing judgments. *Journal of Risk Research*, 12(2), 199-208.
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3), 487-506.
- Edwards, W. (1954). The theory of decision making. *Psychological Bulletin*, 51(4), 380-471.
- Elliott, R., Friston, K. J., & Dolan, R. J. (2000). Dissociable neural responses in human reward systems. *The Journal of Neuroscience*, 20(16), 6159-6165.
- Ernst, M., Nelson, E. E., McClure, E. B., Monk, C. S., Munson, S., Eshel, N., ... Towbin, K. (2004). Choice selection and reward anticipation: an fMRI study. *Neuropsychologia*, 42(12), 1585-1597.
- Ernst, M., & Paulus, M. P. (2005). Neurobiology of decision making: A selective review from a neurocognitive and clinical perspective. *Biological Psychiatry*, 58(8), 597-604.
- Frühholz, S., Godde, B., Finke, M., & Herrmann, M. (2011). Spatio-temporal brain dynamics in a combined stimulus-stimulus and stimulus-response conflict task. *Neuroimage*, 54(1), 622-634.
- Gandiga, P. C., Hummel, F. C., & Cohen, L. G. (2006). Transcranial DC stimulation (tDCS): A tool for double-blind sham-controlled clinical studies in brain stimulation. *Clinical Neurophysiology*, 117(4), 845-850.
- Glöckner, A., & Herbold, A. K. (2011). An eye-tracking study on information processing in risky decisions: Evidence for compensatory strategies based on automatic processes. *Journal of Behavioral Decision Making*, 24(1), 71-98.

- Große-Fifer, J., Hoover, S., Zottoli, T., & Rodrigues, A. (2011). Expecting the unexpected: An N400 study of risky sentence processing in adolescents. *Psychophysiology*, 48(9), 1184–1191.
- Hastie, R., & Dawes, R. M. (2013). *不确定世界的理性选择——判断与决策心理学*(第2版, 谢晓非, 李纾等译). 北京: 人民邮电出版社.
- Ino, T., Nakai, R., Azuma, T., Kimura, T., & Fukuyama, H. (2010). Differential activation of the striatum for decision making and outcomes in a monetary task with gain and loss. *Cortex*, 46(1), 2–14.
- Johnson, E. J., Schulte-Mecklenbeck, M., & Willemsen, M. C. (2008). Process models deserve process data: Comment on Brandstätter, Gigerenzer, and Hertwig (2006). *Psychological Review*, 115(1), 263–273.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 263–291.
- Knutson, B., Taylor, J., Kaufman, M., Peterson, R., & Glover, G. (2005). Distributed neural representation of expected value. *The Journal of Neuroscience*, 25(19), 4806–4812.
- Krawczyk, D. C. (2002). Contributions of the prefrontal cortex to the neural basis of human decision making. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26(6), 631–664.
- Levy, H., & Levy, M. (2002a). Experimental test of the prospect theory value function: A stochastic dominance approach. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 89(2), 1058–1081.
- Levy, H., & Levy, M. (2002b). Prospect theory: Much ado about nothing? *Management Science*, 48(10), 1334–1349.
- Li, L.-B., He, S.-H., Li, S., Xu, J.-H., & Rao, L.-L. (2009). A closer look at the Russian roulette problem: A re-examination of the nonlinearity of the prospect theory's decision weight  $\pi$ . *International Journal of Approximate Reasoning*, 50(3), 515–520.
- Li, Q., Qin, S., Rao, L.-L., Zhang, W., Ying, X., Guo, X., ... Luo, J. (2011). Can Sophie's choice be adequately captured by cold computation of minimizing losses? An fMRI study of vital loss decisions. *PLoS One*, 6(3), e17544.
- Li, S. (1993). What is wrong with Allais' certainty effect? *Journal of Behavioral Decision Making*, 6(4), 271–281.
- Li, S. (1995). Is there a decision weight  $\pi$ ? *Journal of Economic Behavior & Organization*, 27(3), 453–463.
- Li, S. (1996). What is the price for utilizing deductive reasoning? A reply to generalized expectation maximizers. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 29(2), 355–358.
- Li, S. (2004). A behavioral choice model when computational ability matters. *Applied Intelligence*, 20(2), 147–163.
- Liversedge, S. P., & Findlay, J. M. (2000). Saccadic eye movements and cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(1), 6–14.
- Mellers, B. A., Schwartz, A., & Cooke, A. D. J. (1998). Judgment and decision making. *Annual Review of Psychology*, 49(1), 447–477.
- Mennes, M., Wouters, H., Van Den Bergh, B., Lagae, L., & Stiers, P. (2008). ERP correlates of complex human decision making in a gambling paradigm: Detection and resolution of conflict. *Psychophysiology*, 45(5), 714–720.
- Newell, B. R., Weston, N. J., & Shanks, D. R. (2003). Empirical tests of a fast-and-frugal heuristic: Not everyone “takes-the-best”. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 91(1), 82–96.
- Pascal, B. (1985). *思想录*(何兆武译). 北京: 商务印书馆.
- Paus, T., Jech, R., Thompson, C. J., Comeau, R., Peters, T., & Evans, A. C. (1997). Transcranial magnetic stimulation during positron emission tomography: A new method for studying connectivity of the human cerebral cortex. *The Journal of Neuroscience*, 17(9), 3178–3184.
- Payne, J. W., & Bettman, J. R. (2004). Walking with the scarecrow: The information-processing approach to decision research. In *Blackwell handbook of judgment and decision making*. Wiley.
- Peters, E., & Levin, I. P. (2008). Dissecting the risky-choice framing effect: Numeracy as an individual-difference factor in weighting risky and riskless options. *Judgment and Decision Making*, 3(6), 435–448.
- Peters, E., Västfjäll, D., Slovic, P., Mertz, C., Mazzocco, K., & Dickert, S. (2006). Numeracy and decision making. *Psychological Science*, 17(5), 407–413.
- Polezzi, D., Sartori, G., Rumiati, R., Vidotto, G., & Daum, I. (2010). Brain correlates of risky decision-making. *Neuroimage*, 49(2), 1886–1894.
- Rao, L.-L., Li, S., Jiang, T., & Zhou, Y. (2012). Is payoff necessarily weighted by probability when making a risky choice? Evidence from functional connectivity analysis. *PLoS One*, 7(7), e41048.
- Rao, L.-L., Liu, X.-N., Li, Q., Zhou, Y., Liang, Z.-Y., Sun, H.-Y., ... Li, S. (2013). Toward a mental arithmetic process in risky choices. *Brain and Cognition*, 83(3), 307–314.
- Rao, L.-L., Zhou, Y., Xu, L., Liang, Z.-Y., Jiang, T., & Li, S. (2011). Are risky choices actually guided by a compensatory process? New insights from fMRI. *PLoS One*, 6(3), e14756.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372–422.
- Redelmeier, D. A., & Tversky, A. (1990). Discrepancy between medical decisions for individual patients and for

- groups. *New England Journal of Medicine*, 1162–1164.
- Reyna, V. F., Nelson, W. L., Han, P. K., & Dieckmann, N. F. (2009). How numeracy influences risk comprehension and medical decision making. *Psychological Bulletin*, 135(6), 943–973.
- Russo, J. E., & Doshier, B. A. (1983). Strategies for multiattribute binary choice. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 9(4), 676–696.
- Satterthwaite, T. D., Green, L., Myerson, J., Parker, J., Ramaratnam, M., & Buckner, R. L. (2007). Dissociable but inter-related systems of cognitive control and reward during decision making: evidence from pupillometry and event-related fMRI. *Neuroimage*, 37(3), 1017–1031.
- Schoemaker, P. J. (1993). Determinants of risk-taking: Behavioral and economic views. *Journal of Risk and Uncertainty*, 6(1), 49–73.
- Schulte-Mecklenbeck, M., Kühberger, A., & Ranyard, R. (2010). *A handbook of process tracing methods for decision research: A critical review and user's guide*. New York, NY: Taylor & Francis.
- Shallice, T. (1988). *From neuropsychology to mental structure*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Simon, H. A. (1955). A behavioral model of rational choice. *The Quarterly Journal of Economics*, 69(1), 99–118.
- Smith, B. W., Mitchell, D. G., Hardin, M. G., Jazbec, S., Fridberg, D., Blair, R. J. R., & Ernst, M. (2009). Neural substrates of reward magnitude, probability, and risk during a wheel of fortune decision-making task. *Neuroimage*, 44(2), 600–609.
- Su, Y., Rao, L.-L., Sun, H.-Y., Du, X.-L., Li, X., & Li, S. (2013). Is making a risky choice based on a weighting and adding process? An eye-tracking investigation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 39(6), 1765–1780.
- Sun, H.-Y., Rao, L.-L., Zhou, K., & Li, S. (2013). Formulating an emergency plan based on expectation-maximization is one thing, but applying it to a single case is another. *Journal of Risk Research*, doi:10.1080/13669877.2013.816333
- Todd, P. A. (1995). *Process tracing methods in the decision sciences Cognitive aspects of human-computer interaction for geographic information systems* (Vol. 83, pp. 77–95): Springer Netherlands.
- Tom, S. M., Fox, C. R., Trepel, C., & Poldrack, R. A. (2007). The neural basis of loss aversion in decision-making under risk. *Science*, 315(5811), 515–518.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1992). Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty. *Journal of Risk and Uncertainty*, 5(4), 297–323.
- Yeung, N., & Sanfey, A. G. (2004). Independent coding of reward magnitude and valence in the human brain. *The Journal of Neuroscience*, 24(28), 6258–6264.
- Zaleskiewicz, T. (2001). Beyond risk seeking and risk aversion: Personality and the dual nature of economic risk taking. *European Journal of Personality*, 15(S1), S105–S122.
- Zuckerman, M. (1979). *Sensation Seeking: Beyond the Optimal Level of Arousal*. Corsini Encyclopedia of Psychology.

## Process Test of Risky Decision Making: New Understanding, New Evidence Pitting Non-compensatory Against Compensatory Models

ZHANG Yang-Yang; RAO Li-Lin; LIANG Zhu-Yuan; ZHOU Yuan; LI Shu

(Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Decision making under risk is vital to human survival and development. How to make a risky choice is a compelling question facing scientists today. Mainstream theories of decision making under risk hold that risky choices are based on a compensatory expectation-maximizing process. Some researchers, however, argued that risky choice is based on a non-compensatory process, foregoing weighting and summing. People rely on only one (or a few) key dimension(s) rather than integrating information from all dimensions of an option for making a decision. To tackle this question and further our knowledge of the mechanism underlying human decision making, concrete and convincing evidence based on psychological process is required. Therefore, over the past decade, we designed and conducted a series of behavioral and neural experiments to systematically investigate the process of risky decision making. We organized and presented our experiments in line with the computation steps assumed by the expectation rule, that is, from

the process of deriving probability functions, to weighting process, to weighting and summing process, and then to maximizing overall values. This review illustrates how these “independent” studies can help us to gradually understand the global process underlying risky choices, thereby providing psychology- and neuroscience-based theoretical foundations for establishing and stipulating risk related policies, laws, and regulations.

**Key words:** risky choice; decision process; compensatory rule; non-compensatory rule; eye-tracking; ERP; fMRI

通讯作者简介:

李纾 博士(新南威尔士大学)。中国科学院“百人计划”研究员、博导。中国科学院大学人文学科群学位评定委员会副主席, 中国科学院心理研究所学位委员会主任, *Judgment and Decision Making* 期刊顾问编辑, 《心理科学进展》副主编。在 *JEP*, *Journal of Behavioral Decision Making*, *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, *Judgment & Decision Making*, *Thinking and Reasoning* 等期刊发表与行为决策相关论文 150 余篇。