

风险决策和跨期决策的过程比较： 基于概率和时间的等量转换范式*

周 蕾¹ 李立统¹ 梁竹苑^{2,3} 李 纾⁴ 惠青山¹ 张 磊^{5,6,7,8}

(¹广东工业大学管理学院, 广州 510520) (²中国科学院心理研究所, 认知科学与心理健康全国重点实验室, 北京 100101) (³中国科学院大学心理学系, 北京 100049) (⁴福州大学人文社会科学学院应用心理学系, 福州 350108) (⁵英国伯明翰大学心理学院, 伯明翰 B15 2TT) (⁶英国伯明翰大学心理健康研究所, 伯明翰 B15 2TT) (⁷英国伯明翰大学人类脑健康中心, 伯明翰 B15 2TT) (⁸英国伯明翰大学发展科学中心, 伯明翰 B15 2TT)

摘 要 风险与跨期决策对人类生存发展至关重要。两类决策在理论、行为和过程上具有多重相似性, 但已有研究缺乏对两类决策过程的系统性直接比较, 且忽略了概率与时间的等量关系问题及其中的个体差异。本研究设计了自适应设计优化的概率-时间等量转换任务新范式, 基于个体层面测量其概率和时间的等量转换值, 据此在个性化的单结果(研究 1)和双结果(研究 2)风险和跨期决策眼动实验中, 针对两类模型检验的核心规则(补偿性/非补偿性、基于选项/基于维度), 基于多层次指标(行为、局部和整体过程特征、认知建模), 全面比较两类决策的异同。结果表明: 自适应设计优化的概率与时间等量转换范式有效, 个体可对概率与时间进行有效等量转换; 两类决策均更遵循非补偿性和基于维度的规则, 但二者在行为、过程及机制层面均存在特异性。该结果为未来两类决策的比较研究提供了可靠有效的工具, 有助于构建和发展普适性决策模型, 并为该模型提供了精细化参数及基于心理学解释的基础证据。

关键词 风险决策, 跨期决策, 等量转换, 眼动追踪, 分层贝叶斯模型

分类号 B849:C91

1 引言

对概率与时间信息的处理是日常决策的核心, 对人类生存和发展至关重要。如, 选择 50% 的概率获得 20 元或 100% 的概率获得 10 元, 以及 30 天后获得 20 元或立即获得 10 元。前者是风险决策(risky choice), 涉及不同概率下结果的权衡(Kahneman & Tversky, 1979); 后者是跨期决策(intertemporal choice), 涉及不同时间点结果的选择(Frederick & Loewenstein, 2002)。两类决策在理论发展、行为效应和神经基础上均相似, 可能遵循共同的决策规则(黄元娜等, 2023; 周蕾等, 2019; Peters & Büchel, 2009; Weber & Huettel, 2008)。因此, 从决策过程出发, 检验其共性与特异性, 有助于发展普适性决策

理论(Vanderveldt et al., 2015), 并厘清其适用边界。但现有研究缺乏对两类决策过程的直接比较, 且忽略概率与时间的等量转换关系。本研究设计了一套基于自适应设计优化(Adaptive Design Optimization, ADO)的概率与时间等量转换范式, 基于单个个体测量其个性化的概率和时间等量转换值, 结合眼动追踪、分层贝叶斯模型拟合等方法, 系统比较了两类决策在行为、过程及认知机制上的异同。

1.1 风险与跨期决策的关系

1.1.1 理论发展

风险和跨期决策的理论模型主要基于两种决策规则(rules) (Stevenson et al., 1990): (1)补偿性/非补偿性规则(compensatory/non-compensatory rule) 关注决策信息整合方式: 补偿性规则假设个体采用

收稿日期: 2025-03-20

* 国家自然科学基金面上项目(72271066, 71471171, 72271230), 广州市科技计划基础与应用基础研究专题项目(2025A04J5384)资助。
通信作者: 梁竹苑, E-mail: liangzy@psych.ac.cn

某种累加式价值函数,将概率、延迟、结果等属性加权整合为单一“价值”进行评估(Anderson, 2003);非补偿性规则认为个体在有限认知资源下,倾向于以较少的加工努力,仅基于关键维度进行选择(张阳阳等, 2014; Anderson & Shanteau, 1970)。(2)基于选项/基于维度规则(option-based/attribute-based rule)关注信息加工顺序:基于选项加工指个体在选项内整合各维度后再比较选项;基于维度加工则指个体先逐维度比较不同选项,再据维度差异选择(Payne et al., 1993)。两种规则分别刻画了决策加工的两条相互独立的心理维度,代表相对独立的决策机制。研究者可根据决策任务在这两类规则上的表现(如“是否符合补偿性”、“是否基于选项加工”)构建相应模型。

现有风险与跨期决策模型大体遵循由折扣模型向非折扣模型演进的路径(Zhou et al., 2018)。折扣家族模型遵循补偿性和基于选项规则,假设个体整合所有维度形成选项总价值并选择最选项;非折扣家族模型则遵循非补偿性和基于维度规则,假设个体依据维度比较并选择维度占优选项。其代表性模型见补充材料 1 表 S1。

20 余年来,研究者尝试用统一理论框架解释两类决策。折扣家族模型(如双曲线折扣模型)可较好拟合两类决策(Green et al., 1999; Green & Myerson, 2004; Killeen, 2023; Luckman et al., 2018)。亦有一些非补偿性/基于维度模型被用来解释两类决策,如漂移扩散模型(drift diffusion model, DDM; Krajbich & Rangel, 2011)、齐当别模型(equate-to-differentiate model; Li, 2004; Rao & Li, 2011)或跨期决策启发式模型(intertemporal choice heuristics model, ITCH 模型)(周蕾等, 2019; Marzilli Ericson et al., 2015)。Guo 等(2025)在 DDM 框架下考察了概率与时间模糊性的交互影响,并比较属性分离模型与整合价值模型的适用性。研究发现纳入模糊性偏好的 DDM 模型表现更优,但风险与跨期决策分别更适配整合价值模型和属性分离模型。近来,He, Zhao 和 Bhatia (2022)比较了 62 个风险决策模型和 27 个跨期决策模型的结构和距离,发现两类决策在模型本体结构上相似:折扣类模型更集中于模型空间中心,连接性(connectedness)更高,普适性强;非折扣与启发式模型则分布于外围,特异性更强。

总体而言,比较两类决策的相似和特异性,有助于构建普适性决策理论框架,揭示决策的核心机

制,并提升模型预测力。

1.1.2 两类决策的比较研究

两类决策的相似性引发了广泛研究,以揭示二者在认知过程上的重要关联。其中,相似性检验包括:概率与时间维度功能等价性、共享心理机制(Johnson et al., 2020)及相似的行为效应与偏差(周蕾等, 2019; Jiang & Dai, 2021);特异性检验则涵盖独立过程驱动机制(Fidasoski et al., 2023)、决策阶段分离假说及特异影响因素的甄别等(He et al., 2023; He, Zhao & Bhatia, 2022)。

在相似性检验研究中,部分研究认为概率和时间维度可能等价:二者均降低了奖赏的主观价值,从而共享心理机制(Johnson et al., 2020)。如“延迟即风险”(delay as risk)理论(Benzion et al., 1989; Jiang & Dai, 2021)认为延迟必然带来风险,如延迟付款表明可能资金不足。而“风险即延迟”(risk as delay)理论(Rachlin et al., 1986)认为风险是一种延迟,如购买彩票中奖通常需要长期等待。此外,大量研究发现两类决策中存在相似的行为偏差。如风险决策中的确定效应(Kahneman & Tversky, 1979)、伪确定效应(Kahneman & Tversky, 1984)、阿莱悖论(Allais, 1953)等。以及对称存在于跨期决策中的即刻效应(Kirby & Herrnstein, 1995; Kirby, 1997)、伪即刻效应(Li et al., 2010)和落花悖论(Rao & Li, 2011)等。且在确定效应和即刻效应中,两类决策均表现出非补偿性和基于维度的规则(周蕾等, 2019)。

特异性研究则旨在指出二者机制的差异。例如,仅就决策过程而言,概率折扣与时间折扣无显著相关,难以由单一机制统一解释(Johnson et al., 2020; Ohmura et al., 2016)。因此,这种差异可能体现在不同阶段:二者在价值感知(value perception)过程相似,但在选择过程(choice process)不同(Fidasoski et al., 2023)。其原因可能在于两类决策受不同心理机制驱动。如风险决策更依赖收益转换(payload transformation)(He, Analytis & Bhatia, 2022),而跨期决策更受注意加工影响(He et al., 2023);此外,影响两类决策的其他因素也可能存在特异性:如,奖励真实性、奖励大小与未来情境想象等因素会影响时间折扣,但对概率折扣作用有限(Anderson et al., 2023; Hinvest & Anderson, 2010; Mok et al., 2020)。

值得注意的是,现有比较研究多基于单结果情境(如“50%的概率获得 100 元”或“50 天后获得 100

元”)。但现实决策常为多结果情境(如“50%的概率获得100元, 50%的概率获得50元”或“立刻获得50元, 50天后获得100元”)。有研究报告, 人们在两类决策的单/双结果任务中存在差异。如, 在风险决策中加入“零结果”, 与单结果任务相比, 双结果任务会削弱“零结果”的参照对比, 从而增强风险规避(risk aversion; DeKay & Dou, 2024; Reyna et al., 2023)。在跨期决策中引入共同的早期收益(token), 则在双结果任务中提升对长远选项的偏好(Read & Scholten, 2012)。然而, 基于多结果情境对两类决策进行系统比较的研究仍极为稀缺。

综上, 风险与跨期决策虽共享部分认知基础, 但也存在关键特异性, 因此有必要基于决策过程, 在单/双结果情境中系统检验其相似性与特异性。

1.2 风险与跨期决策的过程研究

过程追踪技术可为决策认知机制提供直接证据(Schulte-Mecklenbeck et al., 2017), 如眼动追踪(eye-tracking)(魏子晗, 李兴珊, 2015; Glöckner & Herbold, 2011; Su et al., 2013), 鼠标追踪(mouse-tracing)(Freeman & Ambady, 2010; Kononov & Krajbich, 2020; Stillman et al., 2018)等。

两类决策的眼动研究已检验了“补偿性/非补偿性”规则。相关研究多以加工复杂度与加工深度为指标, 发现二者不符合补偿性规则: 如风险决策不遵循“加权求和”(梁竹苑等, 2012; Hu et al., 2024; Su et al., 2013; Sui et al., 2020), 跨期决策不包含“折扣计算”(X.-L. Yang et al., 2022; Zhang et al., 2022; Zhou et al., 2024)。检验“基于选项/基于维度”规则的研究多以加工方向为指标: 如, 风险决策主要进行基于维度加工(汪祚军, 李纾, 2012; Su et al., 2013); 跨期决策的过程也更多基于维度加工(Amasino et al., 2019; Chen et al., 2024; Cheng & González-Vallejo, 2016; Zhang et al., 2022)。且少量研究对两类决策进行了决策过程的比较。如黄元娜等(2023)发现, 风险、跨期和空间决策中均表现出基于维度眼跳模式, 并通过“维度间差异比较”达成决策; 周蕾等人(2019)基于共同行为效应, 综合眼动与模型拟合等证据, 发现二者均更符合非补偿性和基于维度规则, 且部分过程特征存在差异。上述研究多采用单结果情境, 但其结构简单, 易导致眼动数据稀疏或信噪比不足(Orquin et al., 2016; Orquin & Holmqvist, 2018; Stewart et al., 2016), 难以准确揭示过程机制。而多结果任务可诱发更丰富的眼动过程(Jenke et al., 2021; Ludwig et al., 2024;

Orquin et al., 2021; Zhang et al., 2024), 有助于揭示从单结果到多结果情境下决策行为与认知加工的变化。

为揭示决策过程的认知机制, 近期研究尝试将过程指标与决策结果建立关联。在风险决策中, 注视次数、最终注视维度、属性偏好和注视转换模式等可预测决策结果(Amasino et al., 2019; Coronel et al., 2021)。跨期决策中, 注意力在选项与维度层面的分配可预测决策结果(Franco - Watkins et al., 2016; Fisher, 2021; X. Yang & Krajbich, 2023)。也有研究采用外源性和注视追随等范式干预决策, 以验证过程变量与结果的因果关联(林尧敏等, 2022; Bhatnagar & Orquin, 2022; Liu et al., 2021)。

这些研究表明, 未来可结合过程追踪数据与认知模型参数解释决策行为与过程, 从而促进模型精细化并明确参数的心理学涵义(Zilker & Pachur, 2022, 2023)。

1.3 风险与跨期决策比较研究的任务范式

以往对两类决策的比较虽取得进展, 但在任务范式上仍存在根本缺陷, 即忽视了不同决策参数及个体差异可能引入的系统性偏差。

首先, 这些范式忽略了概率和时间维度是否具有等价的心理涵义。这类研究通常用两套固定参数分别设定概率与时间, 保持结果维度一致, 再直接比较两类决策(Anderson et al., 2023; Green & Myerson, 2004, 2013; Mok et al., 2020)。如Mok等人(2020)对所有被试采用了7个固定延迟水平(1周至10年)和6个固定概率水平(5%–90%)。概率和时间是两类决策的核心属性, 其取值会直接影响决策结果和过程。若两者的心理含义不等价, 可能会引入参数效应与系统性误差。因此应在设计中排除这类混淆(Białaszek et al., 2019; Johnson et al., 2020)。近期研究提出“概率和延迟的无差异点”(probability indifference delay, PID)(Anderson et al., 2023; Mok et al., 2020), 即在特定选项下二者主观价值相等。基于此, 少数研究采用滴定(titration)范式测量PID后比较两类决策(Peters & Büchel, 2009; Weber & Huettel, 2008), 或基于对应的行为效应, 设计匹配的范式, 在特殊参数条件下进行比较(周蕾等, 2019)。可见, 概率和时间维度可能存在等量转换点, 识别其等量转换关系可为两类决策的对比奠定更严谨的量化基础。

其次, 这些研究常对不同个体采用统一刺激参

数, 忽视个体差异。风险与时间偏好受性别、年龄、教育、认知能力、人格等因素的影响(Meissner et al., 2023; Trinh, 2025)。部分因素对两类决策作用一致: 如 Meissner 等(2023)基于 8 个欧洲国家约 1.26 万人发现: 男性与高认知能力者(如: Cognitive Reflection Test, CRT)更不规避风险且更有耐心; 开放性(openness)较高的个体同样如此(Trinh, 2025)。但更多研究报告同一因素对两类决策影响不同: 如 Meissner 等(2023)发现年龄增长会同时提高风险规避与耐心; 教育水平提高增加耐心但不改变风险偏好, 收入提高会降低风险规避但不影响折扣率。Trinh (2025)发现, 情绪稳定性(emotional stability)和宜人性(agreeableness)较高者分别具有更低/更高的风险规避, 但其时间偏好无显著变化; 尽责性(conscientiousness)较高者则更规避风险且更缺乏耐心。

因此, 在两类决策的比较研究中, 有必要在范式中同时考虑概率-时间的等量转换关系与个体差异, 从而改进研究的精度和效率。

1.4 研究目的与假设

本研究旨在系统探究两类决策在行为和过程上的相似与特异性, 并检验其更符合何类决策规则的模型假设。为探讨决策过程随情境变化的规律, 我们设计了两个子研究, 单结果决策(研究 1)与双结果决策(研究 2)任务。两项研究均采用两阶段范式: 阶段一在个体层面测量概率与时间等量转换点, 阶段二基于阶段一生成的参数, 为每位被试构建结果与概率/时间等量的决策任务。

阶段一采用自适应设计优化(ADO)范式, 在不同结果条件下测量概率与时间维度的等量转换值, 为阶段二提供参数。基于“概率和时间维度具有等价性”的观点, 近期研究提出个体在两类决策中存在“概率-延迟无差异点”(PID) (Anderson et al., 2023; Mok et al., 2020), 即两类选项在主观价值上可等量转换, 本研究提出假设 1:

H₁: 风险决策的概率与跨期决策的时间存在等量转换点。

在阶段二, 基于阶段一的参数, 为每位被试构建结果与概率/时间参数均等量的决策任务, 比较其行为与眼动数据, 检验其符合哪种决策规则, 揭示两类决策过程的相似与特异性及适配模型。基于以往研究发现“两类决策在不同阶段存在差异”且“受不同心理机制影响”, 本文以两类决策在行为、过程, 以及结果预测的过程机制层面均具有相似性

为零假设。拒绝零假设表示两类决策在某特征上表现出特异性, 反之则表现为相似性。基于此, 本文提出假设 2、3:

H₂: 基于等量转换后的风险和跨期决策具有相似的行为和过程特征。

H₃: 两类决策中能够预测行为结果的过程特征一致。

为检验两类决策更符合何种规则模型, 本文以二者均遵循非折扣模型为零假设。鉴于新近的模型多基于非折扣框架构建(Dai & Busemeyer, 2014; Scholten & Read, 2010), 且已有大量过程证据支持其适用性(黄元娜 等, 2023; 周蕾 等, 2019; Su et al., 2013), 基于此, 本文提出假设 4:

H₄: 两类决策过程更遵循非补偿性/基于维度规则加工。

针对各具体检验指标, 本文提出的具体假设详见补充材料 1 表 S2。

2 研究 1: 单结果风险和跨期决策的过程比较

本研究将建立风险和跨期决策中概率-时间等量转换的任务范式, 在单结果的风险和跨期决策眼动实验中, 系统比较两类决策的行为和眼动过程特征。

2.1 研究设计

2.1.1 阶段一: 风险和跨期选项中概率与时间的等量转换任务: 行为实验

(1)被试

基于 Brysbaert 和 Stevens (2018)的建议, 对于涉及反应时等指标的多试次认知实验, 每种实验条件应不少于 1600 试次。本研究中, 每名被试在眼动实验中将完成两个实验任务, 每个任务包含 47 个试次, 因此眼动实验最小样本量为 35 人。

阶段一共招募来自北京市多所高校大学生 41 名($M_{\text{年龄}} = 27.14$ 岁; $N_{\text{女性}} = 19$), 均为右利手, 无红绿色盲, 视力或矫正视力正常, 实验前同意签署知情同意书。每个被试可获得 35 元报酬。

(2)实验材料和流程

为了基于每个被试测量其个性化的风险和跨期选项的等量转换参数, 基于自适应设计优化(ADO)范式, 阶段一首次设计了风险和跨期选项的等量转换任务。

实验任务的目的是找到风险选项与跨期选项之间的无差异点, 要求被试完成若干对二择一的选

择, 从风险决策选项和跨期决策选项选出更偏好的一个。其中, 每对风险和跨期选项中的结果均相同, 但跨期选项中的时间和风险选项的概率不同。其中, 跨期决策选项包括“短时间小结果”(small- sooner, SS)与“长时间大结果”(large-later, LL)两类; 风险决策选项包括“低风险(大概率)小结果”(small-lower risky level, SL)和“高风险(小概率)大结果”(large-higher risky level, LH)两类。基于“延迟即风险”和“风险即延迟”理论可知, 跨期决策中的 SS 选项从逻辑上对应于风险决策中的 SL 选项, 而 LL 选项从逻辑上对应于风险决策中的 LH 选项。

跨期决策选项为本实验参数设计的基线。在经典跨期决策研究中, 纳入变化较大的延迟时间范围已成为标准测量范式之一(王鹏 等, 2019; Kaplan et al., 2016; Kirby & Maraković, 1996)。根据前人广为使用的研究范式(Escobar et al., 2023; Green et al., 2014; Konstantinidis et al., 2020; Luckman et al., 2020; Mok et al., 2020), 本研究的跨期决策任务中设定了 5 组延迟时间参数(20~700 天), 覆盖了短期(20~60 天)、中期(180 天)与长期(700 天)三个时间层级, 以更全面地反映折扣函数的非线性特征, 并提高主观价值随延迟递减趋势的估计精度, 本研究设定了 5 个金额参数(20~500 元), 与 5 个延迟时间条件共形成 25 个任务组块(block)。

每个组块中包含若干试次。其中, 跨期选项的参数保持不变, 风险选项的结果和跨期选项保持相

等, 但风险选项的概率随被试的选择变化。各组块的首个试次中, 风险选项的概率设为 1%, 随后每试次中概率值按照 90%的梯度, 根据被试在上一试次中的选择变化(见图 1A), 直至两个连续试次中风险选项的概率之差小于 4% (ADO 范式稳健性检验见补充材料 2)。实验程序将判定此时找到该被试在该组块内风险和跨期选项的等量转换无差异点, 组块任务结束。该无差异点中的概率取值为最后两轮风险选项中概率值的均值。

为检验各无差异点对被试的吸引力是否相同, 完成所有实验任务后, 被试填写任务评估问卷, 对 25 个无差异点中的风险与跨期选项进行 6 点评分(1 = 非常不同, 6 = 非常相同)。

2.1.2 阶段二: 等量转换后的风险和跨期决策比较: 眼动实验

(1)被试

完成阶段一被试共计 41 人, 未能进行第二阶段的被试 10 人。其中, 8 人在阶段一做出不合逻辑选项对比例过高(大于 50%), 即风险选项与跨期选项的匹配不符合逻辑, 出现了跨期选项中的 SS 或 LL 选项分别与风险选项的 LH 选项和 SL 选项匹配; 2 人中途退出眼动实验。有效被试 31 人($M_{\text{年龄}} = 24.61$ 岁; $N_{\text{女性}} = 16$), 其不合逻辑选项对的平均比例为 6.69%。

实验结束后被试均获得 40 元基本报酬。此外, 为了激励被试认真完成实验任务, 所有任务结束后, 从被试所做各实验任务中随机抽取一个试次, 按照

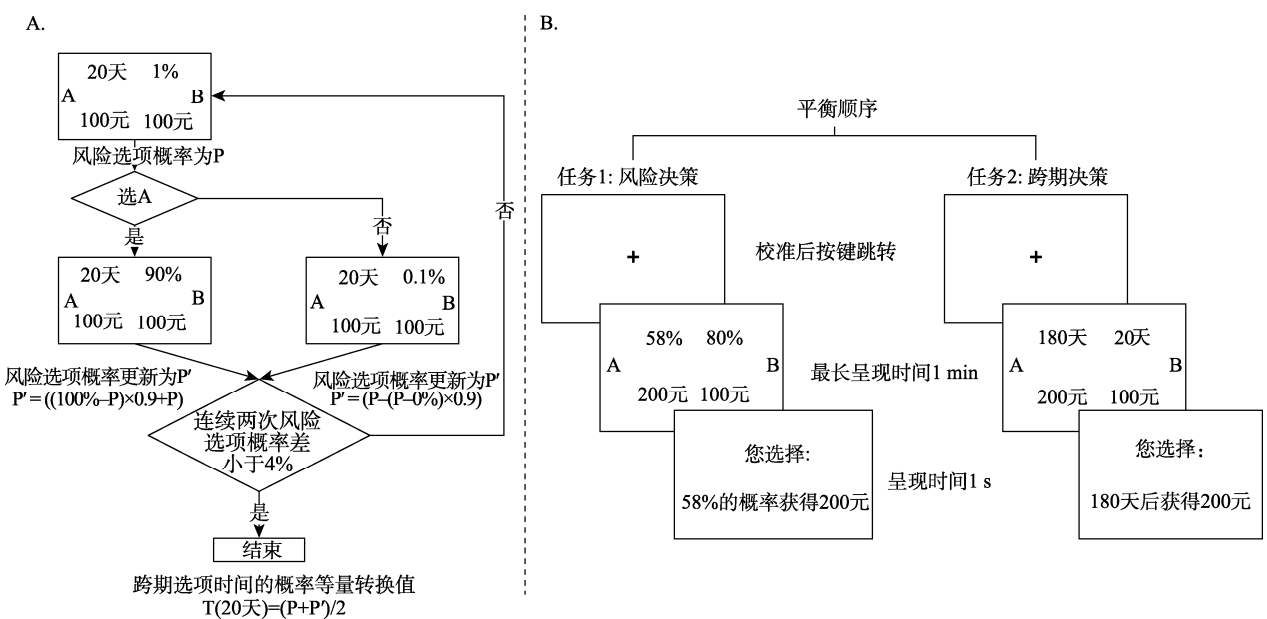


图 1 研究 1 实验流程图

注: A. 阶段一: 概率和时间等量转换实验; B. 阶段二: 单结果风险和跨期决策比较眼动实验。

其实际选择的结果以一定比例支付额外报酬(总额 5~10 元)。其中, 风险任务部分中的额外报酬, 由计算机运行一个随机程序决定选择的实际结果; 跨期任务中的额外报酬, 将依据被试实际选择, 在相应的延迟时间发放。

(2) 仪器

眼动实验采用由 SR Research 公司开发的 EyeLink 2000 型眼动仪, 采样率为 2000 Hz, 记录的注视点的最短时长为 40 ms。实验中采用距离显示器 58 cm 的腮托, 利用眼动追踪系统的自动补偿机制, 使得头动对眼动轨迹记录的影响达到最小。实验刺激呈现于 19 英寸、分辨率为 1024 × 768 的 DELL 纯平显示器上。被试眼睛与屏幕边缘的水平视角为 28°, 垂直视角为 21°。被试通过微软 SideWinder 游戏手柄的按键来完成反应。

(3) 实验材料和流程

被试相继完成多轮二选一的风险与跨期决策任务, 两个决策任务的顺序平衡。任务流程如图 1B。各任务中, 被试阅读指导语后完成 4 次练习试次, 然后完成正式实验任务。两个决策任务均包含 47 个正式试次和 24 个填充试次, 均分为 2 个组块。每个组块间被试休息至少 1 分钟, 两个决策任务间被试休息至少 2 分钟。

阶段二的实验任务中, 针对每个被试使用了一套个性化的风险和跨期决策任务实验材料参数。每个被试在阶段一均获得 25 组风险和跨期选项无差异点参数, 按照如下原则在两类任务中分别配置选项组合。

其中, 跨期决策任务为基线任务, 所有被试的实验材料参数一致。每对选项均为 SS 和 LL 选项, 如“A. 20 天后获 50 元; B. 60 天后获 100 元”。风险决策任务中, 各被试的任务参数由阶段一测得的等量转换参数构成。对应于跨期决策任务中的各对跨期选项, 按照该被试的等量转换无差异点参数, 设置其风险决策任务中的一对选项(SL vs. LH)参数, 如“A. 70%概率获 50 元; B. 40%概率获 100 元”。按照该逻辑, 为每个被试在两类决策任务中各配置出 47 对选项, 参数示例详见补充材料 3 表 S3。

实验结束后, 被试将完成包括人口统计学信息的简短问卷, 并填写了 4 类与风险和跨期决策密切相关的人格与能力问卷: 风险倾向量表(Risk Propensity Scale; Meertens & Lion, 2008)、Barratt 冲动性量表中文版(Barratt Impulsiveness Scale, BIS-11; 周亮 等, 2006; Patton et al., 1995)、计算能

力量表(Numeracy Scale; Peters et al., 2006)和认知反思测验(Cognitive Reflection Test; Frederick, 2005) (见补充材料 4)。

2.2 数据分析

为了回答“经过概率和时间等量转换后, 风险和跨期决策是否具有相似的行为和过程特征”, 以及“两类决策更遵循哪种决策规则”两个科学问题, 本文从行为、局部过程和整体过程三个层面的 7 个变量(含 9 个指标), 对两类决策进行了系列综合比较。数据分析的逻辑框架见图 2。

2.2.1 行为层面变量及指标

研究分析比较了两类任务中的行为层面变量, 并运用分层贝叶斯模型拟合, 基于行为层面指标, 对两类决策的最优拟合模型进行比较。

行为层面变量使用了两个指标: 经典的决策时间和选择偏好。在风险决策任务和跨期决策任务中, 选择偏好的指标分别定义为选择 LH 选项或选择 LL 选项的比例。

分层贝叶斯模型拟合的目的是检验风险和跨期决策任务中的选择结果支持何类决策模型假设。我们分别选取了两个折扣模型和一个非折扣模型, 进行模型拟合与参数估计。参考前人用共同模型拟合两类决策的研究(Green et al., 1999), 折扣模型选择了经典的指数模型(exponential model) (Samuelson, 1937)和双曲线模型(hyperbolic model) (Mazur, 1987)。二者均符合基于选项加工规则, 核心假设是通过计算折扣率来选择主观效用较大的选项。考虑到风险与跨期决策的非折扣模型彼此差异较大(He, Zhao & Bhatia, 2022), 我们选择了跨期决策启发式模型(intertemporal choice heuristics model, ITCH, 以下简称 ITCH 启发式模型) (Marzilli Ericson et al., 2015)作为两类决策的通用非折扣模型代表。该模型基于参照点比较(Kahneman & Tversky, 1979)、绝对与相对评估、维度独立性及线性加权聚合等规则构建, 这些规则在跨期和 risk 决策均适用(Marzilli Ericson et al., 2015)。已有研究有效运用 ITCH 模型同时拟合风险和跨期决策(周蕾 等, 2019)。该模型的核心假设是, 个体通过基于维度比较的启发式策略, 赋予不同规则以权重, 并依此选择更优选项。三个模型的数学公式及建模具体细节, 见补充材料 5。

2.2.2 局部过程层面变量及指标

局部过程层面变量主要使用了来自眼动数据的多个指标。眼动数据通过 EyeLink Data Viewer

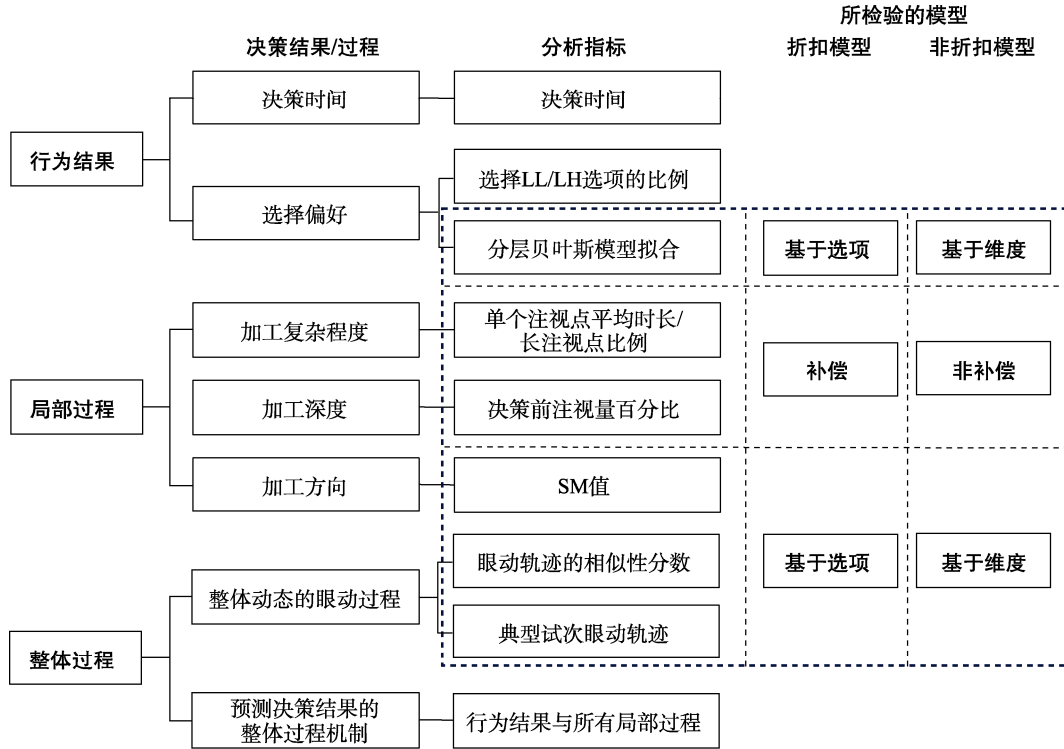


图 2 研究 1 和研究 2 数据分析逻辑框架

(SR Research, 加拿大)导出和预处理。眼跳定义为速度超过 30°/s 且加速度超过 8000°/s² 的一次眼动; 注视则定义为两次眼跳之间眼睛位置相对稳定的时间段。每个刺激材料被划分为 4 个面积相同(322 × 236 像素)且互不重叠的矩形兴趣区, 覆盖了所有选项的 4 个属性(示意图见补充材料 6 图 S3)。研究中共有 2912 个正式试次。数据分析时剔除 57 个试次(1.96%), 其中眼动追踪错误(设备未能捕捉到)试次 1 个(0.03%), 反应时过短(< 200 ms)或过长(大于平均反应时 3 个标准差的试次 56 个(1.92%))。有效试次 2855 个。为检验结果的稳健性, 我们对比了包含与不包含剔除试次的两种条件下的分析结果, 二者一致, 详见补充材料 7 表 S8。

其中, 为检验补偿性/非补偿性的规则, 使用了加工复杂程度和加工深度两个变量。加工复杂程度包括两个眼动指标: 决策过程中单个注视点平均时长、长注视点(300 ms 以上)所占比例(Rayner, 2012)。当决策采取了补偿性规则时, 可能包含审慎的计算过程, 表现为较长的平均注视时长和更多的长注视点; 反之, 则可能采用非补偿性规则(Horstmann et al., 2009)。加工深度通过决策前注视的选项特征数量与全部选项特征数量的比值来衡量(Payne et al., 1978)。决策者采用补偿性规则时, 通常会注视所有可用选项的信息; 相反, 基于非补

偿性规则时, 可能只关注有限的选项特征(Goldstein & Gigerenzer, 2002; Payne et al., 1978; Su et al., 2013; Zhou et al., 2021)。

为检验基于选项/基于维度的规则, 使用了加工方向这一变量, 其指标为 SM 值(alternative-based vs. dimension-based search measure, Böckenholt & Hynan, 1994)。SM 值越大(大于 0), 表示决策过程更倾向于基于选项加工的规则, SM 值越小(小于 0), 表明决策更依据维度加工的规则。其计算公式如下:

$$SM = \frac{\sqrt{N} \left(\frac{AD}{N} \right) (r_a - r_b) - (A - D)}{\sqrt{A^2(D-1) + D^2(A-1)}} \quad (1)$$

其中, A 和 D 分别代表选项和维度数量, r_a 和 r_b 分别代表基于选项和基于维度的眼跳频次, N 代表眼跳的总频次。

2.2.3 整体过程层面变量及指标

整体过程层面以整体动态眼动过程为关键变量, 包含两个指标: 两类决策任务眼动轨迹的相似性分数和典型眼动轨迹。

眼动轨迹(scanpath)反映了个体对视觉刺激的加工顺序及整体模式, 受到内化认知模型的自上而下驱动(Noton & Stark, 1971)。眼动轨迹分析基于注视点进行, 实验中共采集到 27319 个注视点, 后续分析剔除了 524 个注视点(约 1.92%), 其时长低于

50 ms 或位于兴趣区以外, 最终有效注视点为 26795 个。

眼动轨迹的相似性分数可以定量地检验两类决策任务在整体序列性及动态变化上的一致性 (Cristino et al., 2010), 从而判别二者决策过程是否遵循一致的决策规则。典型试次 (typical trial) 眼动轨迹可以直观定性观察不同任务中最具有代表性试次的眼动轨迹模式 (Zhou et al., 2016), 从而评估决策任务中的加工模式是否与决策模型假设的过程一致。

最后, 基于所有局部过程特征, 我们构建了广义线性模型来预测被试的选择偏好, 从而检验预测决策结果的整体过程机制。模型拟合基于 R 语言 lme4 包 (Bates et al., 2015) 中的广义线性混合模型 (generalized linear mixed-effects models, GLMMs)。自变量为行为与局部层面的 5 个指标 (固定效应), 包括: 决策时间、单个注视点平均时长、长注视点比例、决策前注视量和 SM 值; 被试和试次作为随机效应纳入模型。所有眼动指标均进行标准化 (z -score 转换) 处理。模型拟合采用随机效应逐渐递减原则, 直至拟合成功。

2.2.4 假设检验

本研究目的为比较两类决策的行为和过程特征, 其零假设为“风险决策与跨期决策行为和过程特征相同”。因此, 除传统假设检验外, 我们使用了贝叶斯估计法, 通过贝叶斯因子比较数据对零假设相对支持度 (Hoffmann et al., 2022)。

该分析基于 R 语言 BayesFactor 包, 先验分布为 $\gamma \approx 0.707$ 的柯西 (Cauchy) 分布; 在分层贝叶斯模型拟合部分, 运用 R 软件包 hBayesDM (Ahn et al., 2017)。贝叶斯模型运行 4 条独立 MCMC 链, 每链 1000 个有效样本, 确保参数后验分布由 4000 个有效样本构成。使用 Gelman-Rubin 检验确认模型收敛良好。研究以 elpd (expected log pointwise predictive density) (Vehtari et al., 2017) 作为贝叶斯模型比较的依据, elpd 值越大, 表明模型的样本外预测性 (out-of-sample predictive accuracy) 越强。模型比较采用模型之间 elpd 差值与其标准误 (SE) 的比值, 通常来说, 此比值 > 4 时, 表示模型之间存在有意义的区别 (Vehtari et al., 2017; Sivula et al., 2020)。

2.3 结果

2.3.1 阶段一: 风险和跨期选项中概率与时间的等量转换任务: 行为实验

被试对跨期选项中的时间等量转换后, 可测得

其风险选项无差异点, 该无差异点的概率分布图 (5 种金额条件) 见图 3。

该实验为 5 (延迟时间) \times 5 (金额) 被试内设计。两因素重复测量方差分析结果表明, 转换点受决策结果大小 (即金额) 的影响, 随着延迟时间的增加和金额水平的降低, 与其对应的概率等量转换值逐渐减小 (如图 3 所示): 延迟时间和金额水平的主效应均显著, $F_{\text{时间}}(4, 120) = 94.54, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.17$; $F_{\text{金额}}(4, 120) = 34.69, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.13$ 。这说明概率和时间的等量转换点存在量级效应, 即概率与时间的无差异点随决策结果大小变化而动态调整。此外, 同一时间条件下得到的概率等量转换值分布的标准误较大, 说明转换点也存在较大的个体差异, 即同一风险决策试次中不同个体的等价延迟点不同。

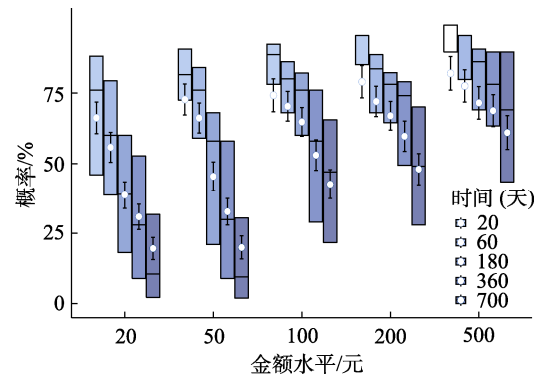


图 3 研究 1 中概率与时间等量转换点的参数分布注: 箱线图的横线自上而下分别为上四分位数、中位数、下四分位数, 白色圆点为均值 M , 误差线为标准误 SE 。图中每组柱状图自左至右分别代表时间 20/60/180/360/700 天。彩图见电子版。

对等量转换无差异点的吸引力评分的分析 (单样本 t 检验) 显示, 无差异点选项的吸引力 ($M = 4.32, SE = 0.03$) 显著高于 3.5 分, $t(30) = 27.05, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 4.86$ 。该结果支持 H_1 , 表明在各金额参数条件下, 风险决策中的概率和跨期决策中的时间存在等量转换点。

同时, 基于 23 名 (73.19%) 有效样本, 我们对个体差异和人口学变量对等量转换值的影响进行了探索性分析, 发现 4 个人格或能力变量均未显著影响等量转换值 ($F_s < 3.3, p_s > 0.08$), 但性别与时间的交互作用显著, $F(1.51, 31.61) = 4.24, p = 0.033$, 表明在短至中期延迟 (20~360 天) 条件下, 女性相较于男性需要更低的概率水平才能与跨期选项实现心理等值, 表现出更强的风险规避, 而在长期延迟 (700 天) 条件下无性别差异。因此, 在后续研究中均

基于个性化的实验参数进行眼动研究, 以规避个体差异对研究结果带来的混淆。

2.3.2 阶段二: 等量转换后的风险和跨期决策比较

(1)行为层面

通过配对样本 t 检验, 分析风险和跨期决策任务中行为层面各变量(图 4)。结果显示: 被试在风险任务中的决策时间($M = 2.56, SD = 0.12$)显著短于跨期任务($M = 2.85, SD = 0.16$) (图 4A), $t(30) = -2.80, p = 0.01, Cohen's d = -0.50$; 在风险决策中选择 LH 选项的比例($M = 67.68%, SE = 3.66%$), 显著高于其在跨期决策中选择 LL 选项的比例($M = 28.32%, SE = 4.46%$) (图 4B), $t(30) = 8.97, p < 0.001, Cohen's d = 1.61$ 。

对选择偏好进行分层贝叶斯模型拟合, 结果发现(表 1), 在风险和跨期决策任务中, ITCH 启发式模型的拟合度和对选择结果预测准确率均更优 ($\frac{|elpd-diff|}{se} > 4$) (Sivula et al., 2020), 且预测准确率均可达 80%以上。

上述结果说明, 经过等量转换后, 被试在风险和跨期决策任务中的行为表现不同: 被试在风险决策任务中决策时间更短, 更偏好高风险大结果选项, 而跨期决策任务中更偏好近期小结果选项。然而, 两类决策行为偏好的差异并不意味着其决策机制的分离, 相反, 这些差异可由个体冲动性 (impulsivity) 水平加以统一解释, 即风险决策中的风险寻求与跨期决策中的短视行为均可能源于较高的冲动性水平。此外, 被试在两任务中的选择结果均更符合 ITCH 启发式模型的预测, 遵循基于维度的决策规则。

(2)局部过程层面

为检验补偿性规则, 使用配对样本 t 检验对加工复杂程度和加工深度两个特征进行比较。

结果显示, 风险和跨期决策任务中被试的加工复杂程度存在差异: 风险决策任务中的单个注视点平均时长短于跨期决策任务(图 4C), $M_{\text{风险}} = 208.64, SE = 5.39; M_{\text{跨期}} = 216.53, SE = 6.35; t(30) = -2.56, p = 0.02, Cohen's d = -0.46$; 且风险任务中长注视

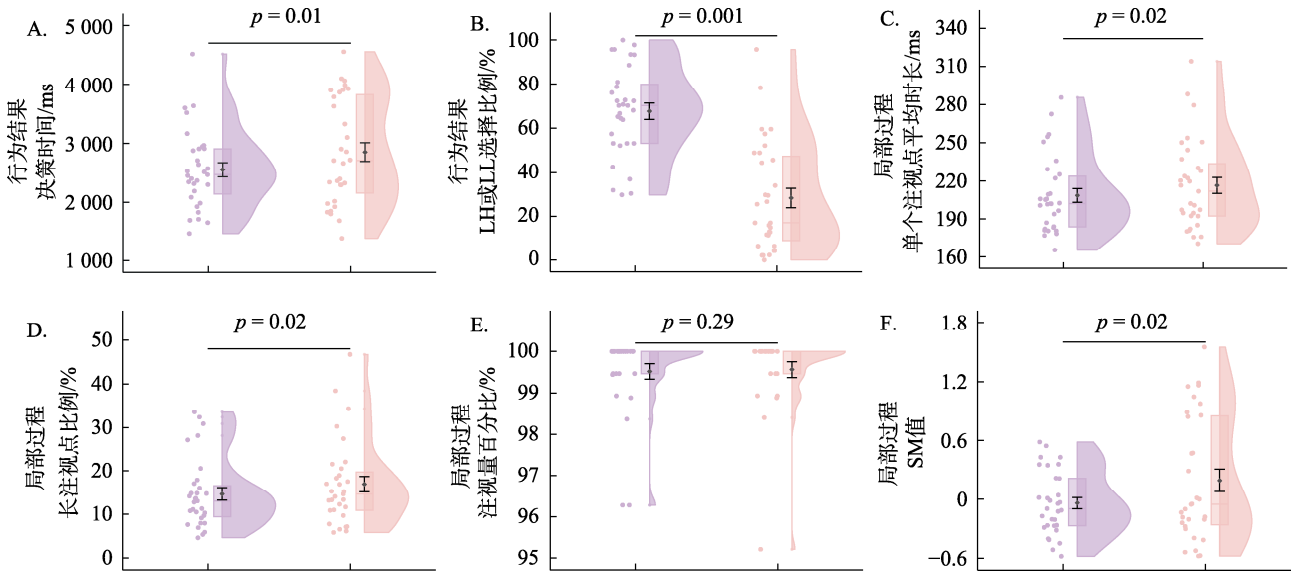


图 4 研究 1 风险与跨期决策任务的行为和局部过程层面比较

注: A. 决策时间; B. 选择偏好; C. 加工复杂程度, 指标: 单个注视点平均时长; D. 加工复杂程度, 指标: 长注视点比例; E. 加工深度; F. 加工方向。图中每组组合图自左至右分别代表风险决策和跨期决策。彩图见电子版。

表 1 研究 1 风险与跨期决策中选择偏好的分层贝叶斯模型拟合

模型类别	拟合模型	风险决策			跨期决策		
		elpd (SE)	elpd-diff(SE)	预测准确率	elpd (SE)	elpd-diff(SE)	预测准确率
折扣模型	指数模型	-1253.6 (31.2)	-602.3 (59.2)	69.98%	-903.8 (56.2)	-237.5 (37.7)	70.31%
	双曲线模型	-1439.9 (10.1)	-788.5 (72.6)	72.54%	-824.8 (55.4)	-158.5 (28.5)	71.18%
非折扣模型	ITCH 启发式模型	-651.4 (68.4)	0 (0)	86.83%	-666.3 (43.1)	0 (0)	81.75%

注: elpd 用于评估模型在数据上的预测能力, 数值越大表明模型拟合与预测越好; elpd-diff 表示两个模型在预测能力上的差异, 正值说明目标模型具有更优的预测性能, 负值则表示预测能力较弱; SE 为标准误。

点比例低于跨期决策(图 4D), $M_{\text{风险}} = 14.67\%$, $SE = 1.44\%$; $M_{\text{跨期}} = 16.94\%$, $SE = 1.75\%$; $t(30) = -2.42$, $p = 0.02$, Cohen's $d = -0.43$ 。但两类任务中均不包含复杂的加工过程, 其长注视点比例均低于 50%, $t_{\text{风险}}(30) = -24.53$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -4.41$; $t_{\text{跨期}}(30) = -18.84$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -3.38$ 。

但两类任务中被试的加工深度(注视量百分比)不存在差异(图 4E): $M_{\text{风险}} = 98.91\%$, $SE = 0.47\%$; $M_{\text{跨期}} = 97.92\%$, $SE = 0.92\%$; $t(30) = 1.08$, $p = 0.29$, 贝叶斯因子 $BF_{10} = 0.33$, 较弱的证据支持接受零假设; 且两类任务中注视量百分比均低于 100%, $t_{\text{风险}}(30) = -2.33$, $p = 0.01$, Cohen's $d = -0.42$; $t_{\text{跨期}}(30) = -2.25$, $p = 0.02$, Cohen's $d = -0.40$, 说明两类决策的任务过程均更符合非补偿性规则加工。

为检验基于维度加工规则, 对两类任务中的加工方向进行比较。配对样本 t 检验发现, 风险任务中的 SM 值低于跨期任务(图 4F), $M_{\text{风险}} = -0.04$, $SE = 0.06$; $M_{\text{跨期}} = 0.19$, $SE = 0.11$; $t(30) = -2.48$, $p = 0.02$, Cohen's $d = -0.44$; 但两类任务的 SM 值与 0 均无显著差异: $t_{\text{风险}}(30) = -0.69$, $p = 0.25$, $BF_{10} = 0.24$; $t_{\text{跨期}}(30) = 1.68$, $p = 0.10$, $BF_{10} = 0.67$, 说明有中等至较弱的证据支持零假设: 在基于维度/选项的眼跳模式上, 两类任务均没有占优势模式。

上述结果说明, 等量转换后的风险和跨期决策任务在局部过程层面较为相似: 均更遵循非补偿性规则加工, 且在基于维度规则上没有表现出占优的规则。但二者在部分指标上存在差异: 在加工复杂程度上, 人们对跨期决策加工的审慎程度高于风险决策。对注视转换的频率与模式(Fixation Position Distribution; Su et al., 2013)的补充分析得到了类似结果, 详见补充材料 8。

此外, 由于实验包含两个阶段, 被试流失率偏

高, 导致最终有效样本量略低于估计最小样本量。为弥补此不足, 我们基于贝叶斯因子敏感性分析讨论研究的统计功效, 采用 Cauchy ($r = 0.707$)、Normal (0, 0.5) 和 Normal (0, 1) 三类先验分布, 分别计算了主要行为结果指标(如决策时间、选择比例)以及关键眼动过程指标(如单个注视点平均时长、长注视点比例、决策前注视量比例和 SM 值等)的贝叶斯因子(结果详见补充材料 9 表 S10)。结果显示, 在不同先验分布的设定下, 除单个注视点平均时长的贝叶斯因子证据强度存在中等或较强两种不同证据等级, 其余所有指标的贝叶斯因子均指向同一假设方向, 且证据等级保持一致。说明本研究的结果具有稳健性。

(3) 整体过程层面

对两个任务中整体动态眼动过程的比较发现, 在眼动轨迹相似性上(图 5A), 风险和跨期决策任务内的相似性均高于任务间, $M_{\text{任务间}} = 0.49$, $SE_{\text{任务间}} = 0.007$; $M_{\text{风险任务内}} = 0.53$, $SE_{\text{风险任务内}} = 0.007$; $M_{\text{跨期任务内}} = 0.50$, $SE_{\text{跨期任务内}} = 0.006$, $F(1, 30) = 24.07$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.99$; 观察两个任务中的典型试次眼动轨迹(图 5B)可见, 风险和跨期决策任务中, 被试都展示了较为简单的整体搜索模式: 眼跳的次数相对较少, 且基于维度或基于选项的搜索方式并未在整体眼动模式上体现出差异。

最后, 我们检验了两类任务中预测决策结果的整体过程机制。广义线性模型结果显示(见表 2): 风险决策中, SM 值可负向预测选择 LH 选项的概率 ($b = -0.21$, $SE = 0.07$, $z = -3.06$), 即越基于维度加工, 人们越可能选择高风险高收益选项。而在跨期决策中, 预测决策偏好的关键因子是决策时间、注视时长。决策时间可正向预测选择 LL 选项的概率 ($b = 0.20$, $SE = 0.08$, $z = 2.37$), 即随着决策时间的增

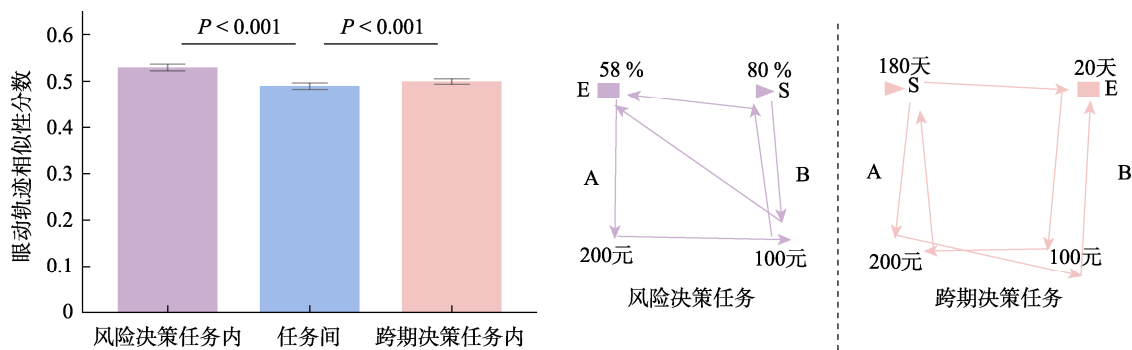


图 5 研究 1 风险与跨期决策任务在整体过程层面的比较

注: A. 眼动轨迹相似性分数; B. 典型试次眼动轨迹, S 代表起始位置, 箭头代表眼动轨迹的方向, E 代表终止位置。图中每组柱状图自左至右分别代表风险决策任务内、任务间、跨期决策任务内。彩图见电子版。

表 2 研究 1 基于广义线性模型预测风险与跨期决策任务中的选择偏好

因变量	自变量	<i>b</i>	<i>SE</i>	<i>z</i>	<i>p</i>	95% CI
风险决策: 选择 LH 选项的比例	截距	0.97	0.22	4.33	< 0.001	[0.53, 1.41]
	决策时间	0.02	0.08	0.31	0.760	[-0.13, 0.18]
	单个注视点平均时长	0.12	0.12	0.96	0.339	[-0.12, 0.35]
	长注视点比例	-0.06	0.11	-0.59	0.556	[-0.28, 0.15]
	SM 值	-0.21	0.07	-3.06	0.002	[-0.35, -0.08]
	注视量百分比	0.12	0.07	1.85	0.064	[-0.01, 0.25]
跨期决策: 选择 LL 选项的比例	截距	-1.32	0.29	-4.57	< 0.001	[-1.89, -0.76]
	决策时间	0.20	0.08	2.37	0.018	[0.04, 0.37]
	单个注视点平均时长	0.03	0.13	0.25	0.802	[-0.22, 0.28]
	长注视点比例	-0.25	0.13	-2.02	0.044	[-0.50, -0.01]
	SM 值	-0.04	0.09	-0.44	0.658	[-0.22, 0.14]
	注视量百分比	-0.06	0.10	-0.65	0.516	[-0.25, 0.12]

加, 个体更倾向选择长延迟高收益的选项。此外, 长注视点比例可负向预测选择 LL 选项的概率($b = -0.25$, $SE = 0.13$, $z = -2.03$), 随着长注视点比例的增加, 个体更可能选择低延迟低收益的选项。这些结果说明, 两类决策中能够预测行为结果的眼动过程指标不一致。

2.4 讨论与小结

研究 1 基于自适应设计优化, 构建了概率-时间等量转换任务新范式, 用于测量每个被试在风险和跨期选项中的个性化概率与时间等量转换点, 有效排除了因实验参数差异和个体差异对结果的干扰, 并系统比较了风险和跨期决策的行为偏好和决策过程。

基于这一范式, 研究 1 结果支持了理论假设 1, 说明风险决策中的概率与跨期决策中的时间具有等量转换点。值得注意的是, 概率和时间的等量转换值存在较大的个体差异, 且受结果金额大小的影响。经过等量转换后, 研究 1 的结果支持了理论假设 4, 说明风险和跨期决策的核心加工规则一致, 均遵循非补偿性、基于维度的加工规则; 从行为特征来看, 两类决策都更好地被非折扣模型拟合; 二者的局部和整体过程特征均更符合非补偿性、基于维度的加工规则。

但研究 1 结果仅部分支持理论假设 2, 经过等量转换后, 风险和跨期决策在选择偏好和诸如加工复杂程度、加工方向以及眼动轨迹等过程指标上表现出差异, 说明两类决策行为和过程特征存在特异性。这可能导致研究 1 的结果并不支持理论假设 3, 两类决策中预测选择结果的行为过程机制存在特异性。

但研究 1 仍存在一些问题。从任务范式上看, 阶段一的等量转换任务固定了跨期选项中的时间属性, 要求被试通过调整风险选项中的概率来找到无差异点。但概率与时间的取值范围不同, 可能导致二者的调整精度存在差异, 这一范式是否具有稳健性, 尤其在固定风险调整时间参数时, 有待进一步检验。此外, 研究 1 使用了单结果决策任务。从对加工方向和眼动轨迹的分析来看, 由于单结果决策的任务情境相对简单, 被试整体眼跳次数较少, 难以呈现稳定的注视模式。且已有研究表明, 当决策由单结果转向双结果时, 选择偏好可能随之发生变化。例如, 近期一项风险决策研究显示, 与模糊痕迹理论(FTT)预测一致, 单结果情境中风险选项与“零结果”形成鲜明的“全得/全不得”对比, 从而更易引发风险寻求; 而在双结果情境中, 该零结果参照被削弱, 对比分化减弱, 选择则更趋于风险规避(DeKay & Dou, 2024)。类似地, 跨期决策中的代币效应揭示, 在单结果情境下个体更偏好 SS 选项, 而在双结果情境中为两类选项加入共同的早期收益后, 该共同成分会削弱对延迟差异的主观感知, 从而提升 LL 选项的选择概率(Read & Scholten, 2012)。因此, 有必要在更复杂、包含双结果的任务中进一步比较不同决策情境下的行为与加工差异, 从而检验当任务难度与信息结构发生变化时, 个体决策机制的转变规律。

3 研究 2: 双结果的风险和跨期决策过程比较

研究 2 旨在检验风险和跨期决策中概率-时间等量转换任务范式的稳健性, 并基于双结果的风险

和跨期决策眼动任务, 系统比较两类决策在复杂任务中的行为和眼动过程特征。

3.1 研究设计

3.1.1 阶段一: 风险和跨期选项中概率与时间的等量转换任务: 行为实验

(1)被试

按照研究 1 的方法, 估算出眼动实验最小样本量为 34 人, 共招募来自北京市多所高校大学生 37 名($M_{\text{年龄}} = 26.31$ 岁; $N_{\text{女性}} = 18$), 被试特征、实验流程及实验报酬与研究 1 一致。

(2)实验材料和流程

任务目的及设计与研究 1 类似, 不同的是, 风险决策选项为本次实验参数的基线。Green 等人 (2014) 的综述指出, 概率折扣通常需在多个概率水平上估计主观价值, 以便捕捉主观价值随概率下降的非线性特征。因此, 在实验中设置覆盖高、中、低等概率段的若干概率点, 有助于提高函数拟合的稳定性并比较个体间的折扣差异。参考既有文献的常用参数 (Escobar et al., 2023; Green et al., 1999; Green & Myerson, 2004; Konstantinidis et al., 2020; Mok et al., 2020; Vanderveldt et al., 2015), 本研究中风险决策选项的概率属性设置了 5 组参数 (20%, 30%, 70%, 80%, 90%), 覆盖了小概率和大概率区间。5 个选项结果的金额参数与研究 1 一致 (20~500 元), 二者组合形成 25 个风险决策选项参数组块 (block)。

与研究 1 类似, 固定风险选项的概率和结果,

根据被试的选择调整跨期选项中的时间, 获得概率和时间的等量转换值。各组块的首个试次中, 跨期选项的时间设为 1 个月, 最大时间设定为 48 个月, 随后每试次中时间值按照 90% (范围: 1~48 个月) 的梯度, 根据被试在上一试次中的选择变化 (见图 6A), 直至两个连续试次中跨期选项的时间之差小于 0.4 个月。实验程序将判定此时找到该被试在该组块内风险和跨期选项的等量转换无差异点, 组块任务结束。该无差异点中的时间取值为最后两轮跨期选项中时间值的均值。

最后, 被试填写与研究 1 类似的任务评估问卷。

3.1.2 阶段二: 等量转换后的风险和跨期决策比较: 眼动实验

(1)被试

同研究 1, 未能进行第二阶段的被试 5 人, 其阶段一不合逻辑选项超过 35%, 参加眼动研究的有效被试共 32 名 ($M_{\text{年龄}} = 25.16$ 岁; $N_{\text{女性}} = 15$), 报酬发放金额和规则同研究 1。

(2)仪器

同研究 1。

(3)实验材料和流程

眼动实验流程与研究 1 一致。实验材料与研究 1 不同; 两个决策任务均包含 48 个正式试次和 24 个填充试次。考虑到竖版与横版刺激呈现可能引发的空间注意偏差, 在实验操作中引入了被试内随机平衡机制以控制该潜在影响: 每个风险和跨期任务均分为两个组块, 分别以横版和竖版两种方式呈现

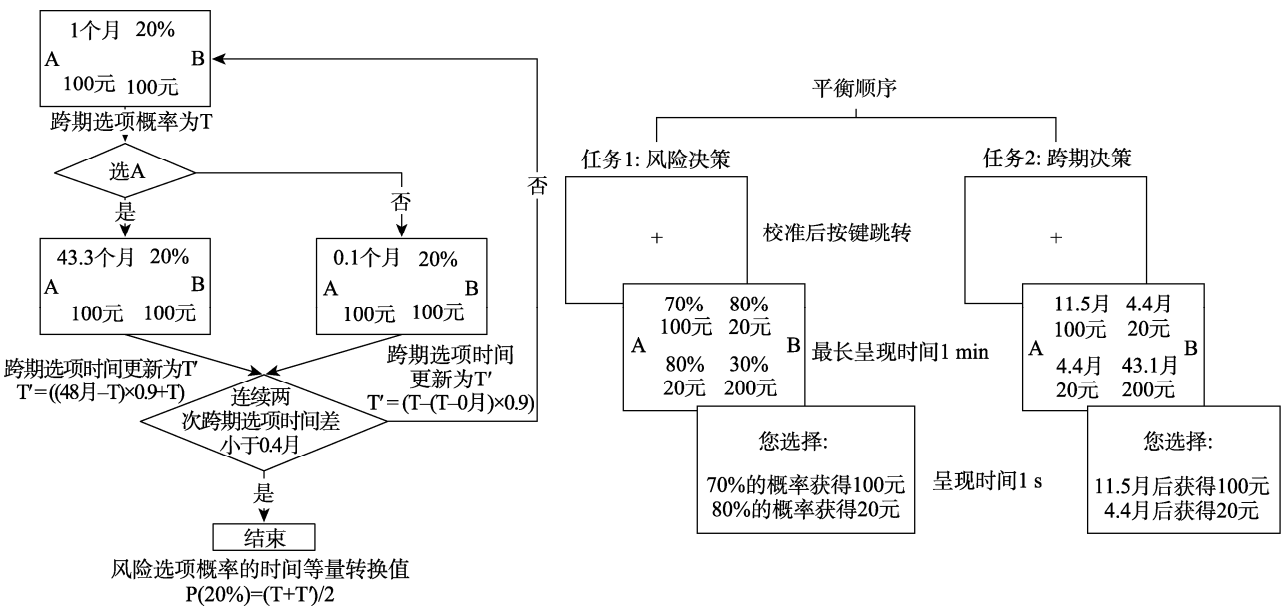


图 6 研究 2 实验流程图

注: A. 阶段一: 概率和时间等量转换实验; B. 阶段二: 双结果风险和跨期决策比较眼动实验。

所有选项(示意图见补充材料 6 图 S3)。首先, 任务的整体呈现顺序在被试间进行平衡(一半被试先进行风险任务, 另一半先进行跨期任务)。其次, 在每个任务中, 横版与竖版版式的呈现顺序在被试间进行平衡。此外, 所有试次均按照随机顺序呈现。

在任务设计层面, 按照如下原则在两类任务中分别配置选项组合。其中, 跨期决策任务为基线任务, 所有被试的实验材料参数一致。参考 Read 等人使用的范式(Read & Scholten, 2012)构建了跨期决策的双结果任务: 即在单结果任务的 SS 和 LL 选项上增加一个共同选项 A', 从而构成具有双结果任务的选项对。例如, “A. 10 个月后获得 500 元, 0.4 个月后获得 50 元; B. 0.4 个月后获得 50 元, 1 个月后获得 100 元”(图 6B)。风险决策任务中, 各被试的任务参数由阶段一测得的等量转换参数构成。按照该逻辑, 为每个被试在两类决策任务中各配置出 24 对选项, 参数示例详见补充材料 3 表 S4。

实验结束后, 被试将完成包括人口统计学信息的简短问卷。

3.2 数据分析

数据分析采用的软件和方法、眼动指标定义及预处理方法等与研究 1 相同。

眼动研究的刺激材料分为 8 个面积均等(170 × 165 像素)的矩形兴趣区, 覆盖了所有选项的 8 个属性(示意图见补充材料 6 图 S3)。研究 2 共有 3328 个正式试次, 剔除 54 个试次(占 1.62%, 2 个试次眼动追踪错误, 52 个试次反应时 < 200 ms 或大于平均反应时 3 个标准差), 有效试次 3274 个。同时为检验结果的稳健性, 我们对比了包含与不包含剔除试次的两种条件下的分析结果, 二者一致, 详见补充材料 7 表 S9。在眼动轨迹分析中, 共采集了 48401 个注视点, 其中 4194 个注视点低于 50 ms 或位于兴趣区以外(约 8.67%)被剔除, 最终有效注视点数为 44207 个。

3.3 结果

3.3.1 阶段一: 时间和概率的等量转换

所有被试的概率和时间等量转换点的分布如图 7 所示。与研究 1 类似, 两因素重复测量方差分析结果表明, 概率水平和金额条件的主效应均显著, $F_{\text{概率}}(4, 124) = 29.26, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.15$; $F_{\text{金额}}(4, 124) = 47.97, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.20$ 。与研究 1 发现一致, 在双结果条件下, 概率和时间的等量转换点受到决策结果大小和个体差异的影响: 如图 7 所示, 随着概率水平和金额水平的增加, 与其对应的延迟

天数等量转换值逐渐减小; 且同一概率条件下, 得到的时间等量转换值分布的标准误较大。对等量转换无差异点的吸引力评分的分析(单样本 t 检验)显示, 无差异点选项的吸引力($M = 4.02, SE = 0.08$)显著大于 3.5 ($t = 7.87, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.39$)。说明固定概率变换时间的范式, 也可测得概率和时间的等量转换值, 支持 H_1 , 并验证了范式的稳健性。

再者, 我们基于个体差异问卷对等量转换值的探索性分析发现, 冲动性人格对等量转换值存在显著影响($F = 4.85, p = 0.036$), 且这种作用在高金额情境下尤为突出($p = 0.007$)。即在相同概率水平下, 低冲动个体相对于高冲动个体的等量延迟时间显著更长。在后续研究中, 均基于个性化的实验参数进行眼动研究, 以规避个体差异对研究结果带来的混淆。

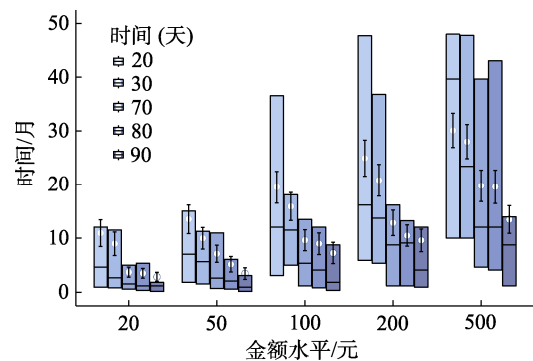


图 7 研究 2 中概率与时间等量转换点的参数分布
注: 箱线图的横线自上而下分别为上四分位数、中位数、下四分位数, 白色圆点为均值 M , 误差线为标准误 SE 。图中每组柱状图自左至右分别代表概率 20%/30%/70%/80%/90%。彩图见电子版。

3.3.2 阶段二: 等量转换后的风险和跨期决策比较

(1) 行为层面

通过配对样本 t 检验, 分析风险和跨期决策任务中行为层面各变量。结果显示, 与研究 1 不同的是, 在双结果任务中, 被试在两类决策中的决策时间无显著差异($M_{\text{风险}} = 4.47, SE = 0.23; M_{\text{跨期}} = 4.40, SE = 0.26; t(31) = 0.34, p = 0.74$) (图 8A), $BF_{10} = 0.20$, 中等强度证据支持零假设。且与研究 1 相反, 被试在风险决策中选择 LH 选项的比例, 显著低于其在跨期决策中选择 LL 选项的比例($M_{\text{风险}} = 35.81\%, SE = 4.82\%; M_{\text{跨期}} = 56.26\%, SE = 4.88\%; t(31) = -3.19, p = 0.003, \text{Cohen's } d = -0.56$) (图 8B)。

以上结果说明, 经过等量转换后, 与单结果任务不同, 随着决策情境难度的增加, 风险和跨期决策双结果任务中个体的决策时间差异消失, 并在风

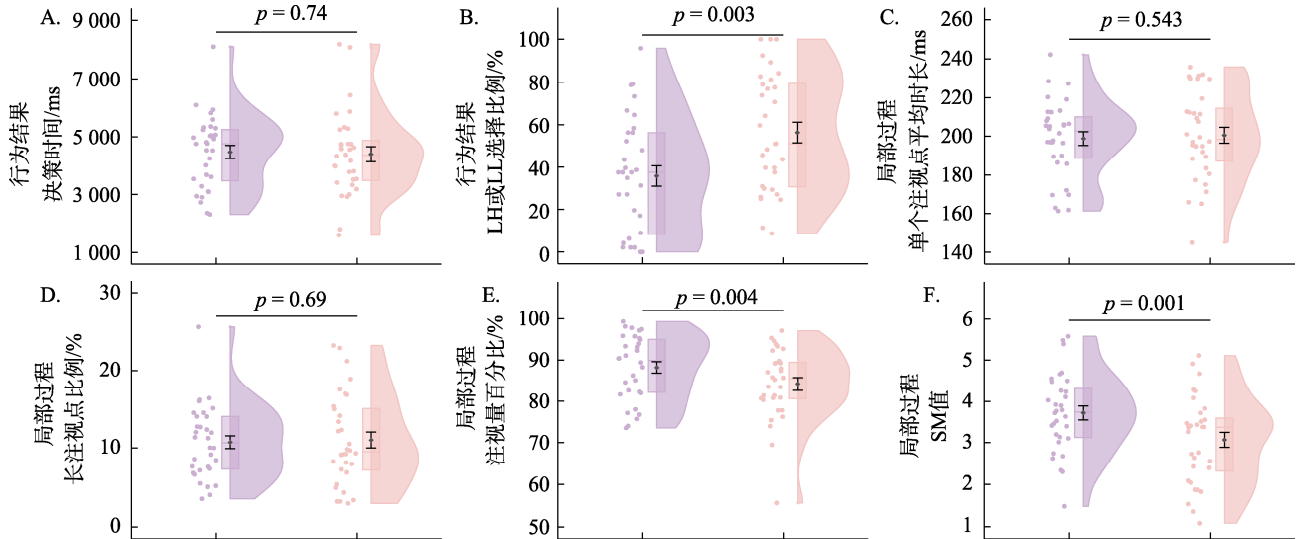


图 8 研究 2 风险与跨期决策任务的行为和局部过程比较结果

注: A. 决策时间; B. 选择偏好; C. 加工复杂程度, 指标: 单个注视点平均时长; D. 加工复杂程度, 指标: 长注视点比例; E. 加工深度; F. 加工方向。图中每组组合图自左至右分别代表风险决策和跨期决策。彩图见电子版。

险决策中偏好低风险低收益选项, 而在跨期决策中偏好长远的高收益选项。与研究 1 类似, 以上行为偏好亦可由冲动性程度解释, 即风险规避与跨期远视均可能受低冲动性程度驱使。

此外, 研究 1 与研究 2 表明, 两类决策行为偏好随任务结构发生系统性变化: 风险决策由更风险寻求(单结果)转为更风险规避(双结果), 跨期决策由更短视(单结果)转为更耐心(双结果)。这一分离现象可分别从风险决策的模糊痕迹理论与跨期决策中代币效应进行解释, 并共同指向一致的机制性结论。相关机制将在讨论 4.2 部分进一步展开。

(2) 局部过程层面

与研究 1 相似, 使用配对样本 t 检验对加工复杂程度和加工深度两个特征进行比较, 以检验两种决策是否遵循补偿性规则。

结果与研究 1 部分一致: 在双结果任务中, 风险和跨期决策任务中被试的加工复杂程度无差异, 但两任务中均不包含复杂的加工过程。两类决策单个注视点平均时长无显著差异($M_{\text{风险}} = 198.84, SE = 3.55; M_{\text{跨期}} = 200.60, SE = 4.08; t(31) = -0.61, p = 0.543$) (图 8C), $BF_{10} = 0.22$, 中等强度证据支持零假设。长注视点比例也无显著差异($M_{\text{风险}} = 10.72\%, SE = 0.83\%; M_{\text{跨期}} = 11.01\%, SE = 1.03\%; t(31) = -0.40, p = 0.69$) (图 8D), $BF_{10} = 0.20$, 中等强度证据支持零假设。但两任务中长注视点比例均低于 50%, $t_{\text{风险}}(31) = -47.58, p < 0.001, Cohen's d = -8.41; t_{\text{跨期}}(31) = -37.79, p < 0.001, Cohen's d = -6.68$ 。

同样, 在双结果任务中, 风险决策和跨期决策任务中被试的加工深度存在差异, 但均更符合非补偿性加工的规则。风险决策中决策前注视量百分比显著高于跨期决策中, $M_{\text{风险}} = 88.17\%, SE = 1.39\%; M_{\text{跨期}} = 84.20\%, SE = 1.52\%; t(31) = 3.15, p = 0.004, Cohen's d = 0.56$ (图 8E)。但两类决策中, 被试决策前均无需加工所有选项, 注视量百分比均低于 100%, $t_{\text{风险}}(31) = -8.53, p = 0.001, Cohen's d = -1.51; t_{\text{跨期}}(31) = -10.41, p < 0.001, Cohen's d = -1.84$ 。

为检验基于维度加工规则, 对二者的加工方向进行比较, 发现结果与研究 1 不同。风险任务中的 SM 值高于跨期任务(图 8F), $M_{\text{风险}} = 3.72, SE = 0.17; M_{\text{跨期}} = 3.07, SE = 0.18; t(31) = 4.28, p < 0.001, Cohen's d = 0.76$ 。相对而言, 风险决策表现出更多基于选项的眼跳, 而跨期决策呈现出更多基于维度的眼跳。但两任务中的 SM 值均显著大于 0, 均表现出基于选项的占优势眼跳模式, $t_{\text{风险}}(31) = 22.16, p < 0.001, Cohen's d = 3.92; t_{\text{跨期}}(31) = 16.69, p < 0.001, Cohen's d = 2.95$ 。

以上结果说明, 等量转换后的风险与跨期决策任务在局部过程层面有较多相似: 与单结果任务一致, 人们在双结果的风险和跨期决策任务中均采用非补偿性的加工方式; 且从单结果到双结果, 随着任务难度增加, 人们对两类决策的加工复杂程度不再有差异。与单结果任务不同, 在双结果任务中, 风险和跨期决策占优的加工模式均体现出基于选项的加工规则, 但相较于风险决策, 跨期决策基于

维度加工模式更为凸显。

参照研究 1 的方法, 我们基于贝叶斯因子敏感性分析讨论研究的统计功效, 采用 Cauchy ($r = 0.707$)、Normal (0, 0.5)和 Normal (0, 1)三类先验分布, 分别计算了行为结果和眼动过程指标的贝叶斯因子(结果详见补充材料 9 表 S11)。结果显示, 不论基于何种先验分布, 本研究的假设检验指标与贝叶斯因子得到的结论一致, 说明本研究结果具有稳健性。

(3)整体过程层面

对两个任务中整体动态眼动过程的比较发现, 在眼动轨迹相似性上(图 9A), 风险和跨期决策任务内的相似性均高于任务间, $M_{\text{任务间}} = 0.40, SE = 0.01$; $M_{\text{风险任务内}} = 0.44, SE = 0.008$; $M_{\text{跨期任务内}} = 0.45, SE = 0.01, F(1, 31) = 17.76, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.99$; 通过对典型试次的观察(图 9B), 可以发现: 无论是横版还

是竖版, 在风险任务中, 典型的搜索模式均发生在选项内部; 在跨期任务中, 观察到较多基于维度比较的眼动模式。说明从整体的眼动轨迹来看, 跨期决策更符合基于维度加工规则。

最后, 我们使用广义线性模型检验了预测决策结果的整体过程机制。结果显示(表 3): 与研究 1 一致, 能够预测两类决策行为结果的眼动过程指标不同。在风险决策任务中, 注视量百分比可负向预测选择 LH 选项的概率($b = -0.276, SE = 0.128, z = -2.155$), 表明随着注视量百分比的增加, 个体倾向于选择低风险低收益的选项; 而在跨期决策任务中, 现有指标无法有效预测个体的选择偏好。

3.4 讨论与小结

研究 2 设计了概率与时间等量转换范式的变式, 并引入双结果风险和跨期决策任务, 进一步全面比较两类决策的行为和过程特征。

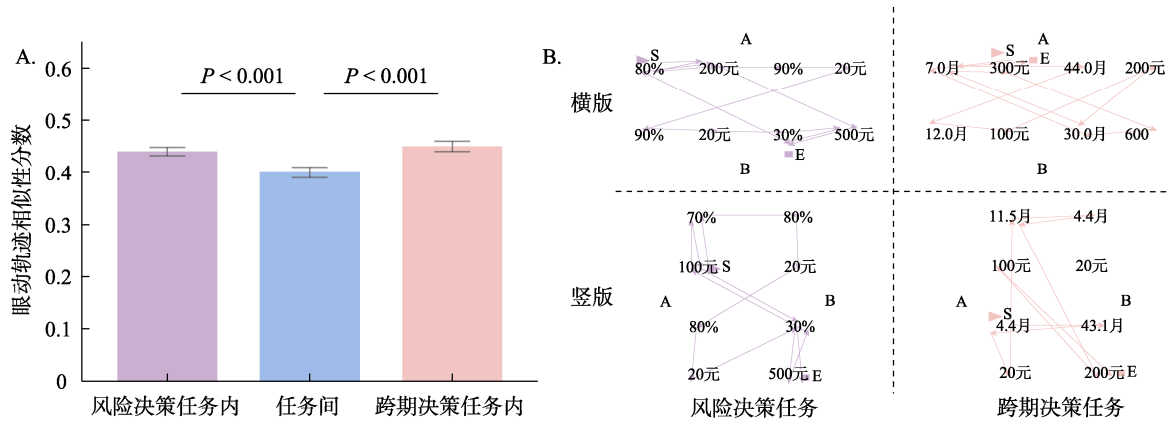


图 9 研究 2 风险与跨期决策任务的整体过程层面的比较

注: A. 眼动轨迹相似性分数; B. 典型试次眼动轨迹, S 代表起始位置, 箭头代表眼动轨迹的方向, E 代表终止位置。图中每组柱状图自左至右分别代表风险决策任务内、任务间、跨期决策任务内。彩图见电子版。

表 3 研究 2 基于广义线性模型预测风险与跨期决策任务中的选择偏好

因变量	自变量	<i>b</i>	<i>SE</i>	<i>z</i>	<i>p</i>	95% CI
风险决策: LH 选项	截距	-1.57	0.61	-2.55	0.011	[-2.77, -0.36]
	决策时间	-0.10	0.15	-0.69	0.492	[-0.40, 0.19]
	单个注视点平均时长	-0.24	0.16	-1.46	0.143	[-0.56, 0.08]
	长注视点比例	0.05	0.15	0.33	0.740	[-0.24, 0.34]
	SM 值	-0.18	0.14	-1.27	0.205	[-0.45, 0.10]
	注视量百分比	-0.28	0.13	-2.16	0.031	[-0.53, -0.03]
跨期决策: LL 选项	截距	0.49	0.43	1.14	0.256	[-0.36, 1.34]
	决策时间	-0.16	0.13	-1.25	0.212	[-0.40, 0.09]
	单个注视点平均时长	-0.25	0.14	-1.81	0.071	[-0.52, 0.02]
	长注视点比例	0.11	0.13	0.89	0.375	[-0.13, 0.36]
	SM 值	0.11	0.11	0.99	0.322	[-0.11, 0.33]
	注视量百分比	-0.04	0.10	-0.43	0.670	[-0.24, 0.15]

与研究 1 一致, 研究 2 证实, 通过固定概率来变换时间的等量转换范式亦有效, 支持理论假设 1。研究 2 复现了研究 1 的核心发现, 在局部和整体过程特征层面, 两类决策大多数情况更符合非补偿性和基于维度的加工规则, 支持理论假设 4。有趣的是, 对加工复杂程度的检验结果显示, 双结果任务中具有更短的注视时长和较少的长注视点比例, 因而可能诱导了更平行和自动化的加工过程。说明虽然任务难度加大, 但个体在决策时更可能倾向于采用启发式模型所假设的自动化和平行加工策略, 间接支持了理论假设 4。

同时, 在研究 2 中发现两类决策过程在更多指标上表现出相似性, 说明随着任务难度增加, 两类决策在过程上的相似程度越来越大, 有更多的证据支持理论假设 2。

4 讨论

本文设计了自适应设计优化的概率-时间等量转换任务新范式, 兼顾参数与个体差异, 通过两个眼动实验, 在单结果与双结果条件下综合比较两类决策的行为与过程。两个研究一致地发现: 该任务范式有效, 风险决策中的概率和跨期决策中的时间具有等量转换点, 且受结果大小与个体差异影响; 两类决策在核心规则上均遵循非补偿性/基于维度的规则, 更支持非折扣模型的普适性假设, 但在行为偏好、过程特征及预测机制上仍存在特异性。研

究结果总结见表 4。

4.1 风险决策与跨期决策的共同机制

本研究首先通过自适应设计优化范式, 实现了两类决策在个体层面的参数对齐, 并基于“补偿性/非补偿性”和“基于选项/基于维度”规则检验两类决策的共同过程机制。总体而言, 两类决策核心过程均符合非补偿性/基于维度加工规则。

首先, 两个研究中的过程特征结果一致表明, 两类决策更倾向于非补偿性规则。加工复杂程度和加工深度的结果表明, 两类决策均不包含复杂计算, 而基于部分信息进行选择。这一结果与前人 (Su et al., 2013; Zhou et al., 2021) 发现均一致。

其次, 研究 1 的贝叶斯模型拟合、加工方向、眼动轨迹及注视位置分布分析的结果一致说明, 在单结果任务中, 两类决策的过程中均具有基于维度加工特征。在双结果任务中, 跨期决策的过程(眼动轨迹、注视位置分布)仍表现为基于维度加工。这些发现与近年相关研究一致 (Amasino et al., 2019; Chen et al., 2024; Cheng & González-Vallejo, 2016; Zhang et al., 2022)。

值得注意的是, 从单结果到双结果任务, 随任务难度增加, 两类决策的过程相似性增大, 并可能采用更平行化、简化的决策策略。具体地, 在双结果任务中, 平均注视时长更短且长注视点比例减少, 表明随着任务复杂度增加, 人们更可能遵循非补偿性规则的加工过程, 从而支持启发式模型假设的简

表 4 研究结果总结

检验层级	决策结果/过程	分析指标	结果	
			差异性	检验规则
行为结果	决策时间	决策时间	R < I	—
			R = I	
	选择偏好	选择 LL/LH 选项的比例	R > I	—
			R < I	
		分层贝叶斯模型拟合(研究 1)	R = I	基于维度
局部过程	加工复杂程度	单个注视点平均时长	R < I	非补偿
			R = I	非补偿
	加工深度	注视量百分比	R = I	非补偿
			R > I	非补偿
	加工方向	SM 值	R < I	无占优规则
			R > I	基于选项
整体过程	整体动态眼动过程	眼动轨迹	R ≠ I	无占优规则 基于选项(R), 基于维度(I)
			所有局部过程指标	广义线性混合模型

注: R 表示风险决策, I 表示跨期决策。结果部分, 第一行为研究 1/2 中的一致结果或研究 1 的结果, 第二行为研究 1/2 不一致时, 研究 2 的结果。

单、平行的加工过程(Brandstätter et al., 2006; Hertwig et al., 2004; Hertwig & Erev, 2009)。此外, 尽管双结果任务中加工深度存在差异, 但两类决策均支持非补偿性规则, 表明该差异会随任务难度变化而增加, 但并无本质区别。但在基于维度的规则上, 两类决策对难度的反应不同: 任务难度增加时, 风险决策倾向于由无占优规则转向基于选项的规则, 而跨期决策则更依赖基于维度的规则(眼动轨迹)。

综上, 风险和跨期决策在认知层面上的重要相似性在于其核心规则均遵循非补偿性、基于维度的加工特征。任务难度增加不影响两类决策对非补偿性规则的依赖, 但可能增加使用基于选项/基于维度规则的倾向。传统决策理论中假设的加权求和(或折扣计算)在实际风险和跨期决策过程中并不适用。

4.2 风险决策和跨期决策过程的特异性

本研究发现两类决策在行为和过程特征上的特异性。

从行为特征看, 两类决策在单/双结果情境中的选择偏好存在相反方向: 在单结果任务中, 风险决策表现为更高的风险寻求(偏好高风险大结果), 跨期决策则表现为更强的冲动短视(偏好近期小结果); 在双结果任务中, 风险决策反而更趋于风险规避, 而跨期决策则更为耐心远视。这一结果与前人研究一致。根据模糊痕迹理论(Fuzzy-Trace Theory), 风险决策中当风险选项由单结果转为双结果时, 零结果的参照对比效应减弱, 从而降低风险寻求、增强风险规避(DeKay & Dou, 2024; Reyna et al., 2023)。在跨期决策中, 代币效应(token effect)指出, 共同早期收益(token)的引入可通过延迟调整(delay adjustment)机制降低对 LL 选项的心理等待感知, 进而提升耐心程度(Read & Scholten, 2012)。同时, 上述行为差异亦可由冲动性(impulsivity)程度解释: 风险寻求与短视的跨期偏好均受冲动性驱使。这与 Huang 等(2024)的研究结果一致, 其表明冲动性是稳定、可测量且具有预测力的心理特质, 包括 1 个一般因子和 6 个特定因子。因此人们在两类决策可能共同受一般冲动因子影响。然而, 本研究发现单结果任务中被试冲动性更高、选择更冒险和短视, 提示风险与跨期决策中的冲动性可能关联于不同的特定因子, 说明两类决策中的冲动性并非同一心理维度。

从眼动过程特征看, 两类决策在加工方向及整

体动态特征上存在差异。如 SM 值和眼动轨迹分析显示, 风险决策比跨期决策基于选项加工程度更高。此发现和黄元娜等(2023)以及 Scholten 等(2014)研究一致。该结果可能源于两类决策模型成熟度的差异: 黄元娜等(2023)指出, 风险决策建模起步最早、体系更“完备”, 而跨期决策建模相对较晚, 因此风险决策提供了更明确的基于选项策略, 如“加权求和”。此外, 广义线性模型显示两类决策的过程机制不同。如加工方向和加工复杂程度分别是预测风险和跨期决策的关键过程机制。本文的发现与 He, Zhao 和 Bhatia (2022)对 89 个风险与跨期决策模型的系统分析结果相呼应: 两类决策虽具相似核心规则, 但在心理机制等层面存在特异性, 例如, 折扣模型所假设的主观结果转换 (payoff transformation) 是风险决策重要的心理机制(He, Analytis, & Bhatia, 2022), 而注意加工则是跨期决策策略的重要预测因子(He et al., 2023)。

总结而言, 宏观上两类决策的核心加工规则相似, 但微观上二者的行为、过程特征与机制均存在特异性。

4.3 风险和跨期决策比较的新范式: 概率与时间等量转换范式

本文首次采用自适应设计优化的概率与时间等量转换范式, 为被试设置了个性化的等值风险与跨期选项, 为眼动研究提供精确参数, 并为两类决策的比较提供更可靠的工具。

两项研究一致显示, 等量转换后的题目吸引力相似, 范式可有效区分不同金额、概率与时间水平, 并适用于单/双结果任务范式。此外, 无论是固定时间还是概率, 均可有效推导另一属性的等量转换点, 证明其有效性与可靠性。

与已有研究相比, 该范式具备以下创新: 相对于固定序列呈现, 动态呈现选项可减少答题数量, 降低疲劳效应; 交错的设计可以对不同的条件激发不同的无差异点, 避免条件间错误一致性并减少锚定效应。因此, 未来进行风险与跨期决策的比较研究, 可以将该范式作为一个更为精准有效的研究工具。

但结果也提示若干使用注意事项。两项研究均发现概率与时间的等量转换点具有较大个体差异, 意味着同一风险决策题目下, 被试的等价延迟点不同。此外, 转换点存在量级效应, 即无差异点随结果水平动态变化。因此, 在决策比较研究中不宜采用统一题目集, 而应考虑个体差异与量级效应, 以

更准确理解和预测实际决策行为。

4.4 研究贡献

本研究采用概率与时间的等量转换范式, 综合比较两类决策在行为、过程特征与机制及认知模型层面的异同。

理论贡献在于: 首先, 本研究基于参数颗粒度对齐原则, 对决策理论进行了整合与边界厘定。通过等量转换范式实现风险与跨期决策参数对齐, 以更高精度的尺度统一方式比较二者的认知过程, 克服参数异质性带来的偏差, 为两类决策机制的对比提供更严谨的量化基础。研究结果揭示了两类决策的共同核心过程机制, 有助于构建共同理论框架并简化模型; 此外, 基于参数对齐的系统比较, 揭示了二者在行为、过程特征和机制的特异性, 有助于明确两类决策共适理论的边界并提升模型预测力。未来研究可考虑非折扣模型建立二者共同理论框架。

其次, 以上发现为人工智能(AI)领域提出的“减算力、减能耗”发展战略提供了重要理论支撑。通过共同框架实现对不同决策任务的降维处理, 将风险与时间两维简化为统一维度, 可避免基于任务专属模型训练造成的能源浪费, 并提升计算效率。

此外, 本研究对两类决策的眼动过程进行了从局部到整体特征的深入剖析, 也为基于视觉模型的AI发展提供思路。眼动追踪是多模态系统中视觉模态的核心, 能够实时捕捉视觉信息并推断认知加工方式(Han et al., 2023; Hsiao, 2024; Smith & Peters, 2022; Ting & Gluth, 2024)。本研究为AI基于人类视觉认知理解决策提供了新路径。

在方法上, 本文综合行为、眼动过程和模型参数估计的汇聚证据, 回答了“两类决策的共同过程机制及特异性”问题, 有助于细化决策模型参数的心理学解释(Zilker & Pachur, 2022, 2023)。可参考本文以及 He, Zhao 和 Bhatia (2022)的方法, 运用行为和过程的系统比较或基于模型空间, 构建两类决策相似与特异性的认知体系。

4.5 研究不足及展望

本研究存在以下几方面不足。在模型拟合层面, 研究选取了已有的三个可共同适用于风险和跨期决策的代表性理论模型进行检验, 但本研究并未基于研究结果提出并直接建立二者的共适性模型; 且由于模型拟合方法的局限性, 未能对双结果的决策任务结果进行拟合。因此, 本文结果只能说明所选择的启发式模型优于经典的折扣模型, 并不能说明

该模型是描述风险和跨期决策共同认知过程的最优模型。未来研究应进一步扩大模型的选择范围, 例如混合策略模型(Dai et al., 2018)或基于动态决策的模型(Diederich & Zhao, 2019; Konstantinidis et al., 2020)等, 进一步揭示两类决策异同, 并在等量转换的基础上, 建立二者的共适性模型。

此外, 本研究仅在获益情境中考察了风险与跨期决策, 未能揭示其在损失及混合得失情境下的共同机制与特异性。实际生活中普遍存在非获益领域的风险与跨期决策, 且得失情境常表现出不对称性。损失领域中两类决策的关系可能与获益情境存在差异, 值得进一步探究。

同时, 部分指标结果与以往研究不完全一致。如, 本文两个研究中的SM指标未能直接证实基于维度加工的眼动过程。SM值反映了个体在决策过程中是否倾向于基于选项或维度进行信息搜寻(Böckenholt & Hynan, 1994), 但由于信息搜索过程受任务复杂性、认知负荷和个体偏好的影响, 其在决策规则上的指示作用有限(Zhang et al., 2022)。此外, 尽管本文在特征分析中将“基于选项”与“基于维度”加工进行对比比较, 但在实际决策过程中, 个体可能根据任务复杂度、认知资源限制等因素灵活调整策略, 在两种加工策略之间动态转换。因此, 未来可综合SM和其他指标来共同检验基于选项/基于维度规则, 并揭示在不同任务情境下的适用性与动态转换机制。

再者, 本研究为被试设置了个性化的等值风险与跨期决策选项以控制个体差异。然而本研究未充分考察个体差异变量对等量转换值的直接影响。因此, 研究基于已有数据探索了性别、年龄等人口统计学变量, 以及风险倾向和冲动性人格及认知反思风格和计算能力, 四类分别与风险和跨期决策相关的个体差异变量对等量转换值的影响, 并在研究1和研究2中分别发现性别和冲动性人格可影响人们的等量转换值。具体而言, 在相同延迟条件下, 女性的等量转换概率水平显著高于男性; 在相同概率水平下, 低冲动个体相对于高冲动个体的等量延迟时间显著更长。未来研究可进一步系统探索影响等量转换的个体差异变量并揭示其内部机制。

5 结论

本文研究发现, 1) 自适应设计优化的概率与时间等量转换范式有效, 风险决策中的概率和跨期决策中的时间具有等量转换点; 2) 两类决策的核

心加工过程相似: 均不符合补偿性、基于选项规则, 而是更遵循非补偿性和基于维度规则; 3) 两类决策在行为偏好、过程特征及过程机制层面存在特异性, 如加工复杂程度、整体动态的眼动过程等。

参 考 文 献

- Ahn, W. Y., Haines, N., & Zhang, L. (2017). Revealing neurocomputational mechanisms of reinforcement learning and decision-making with the hBayesDM package. *Computational Psychiatry, 1*, 24–57. https://doi.org/10.1162/CPSY_a_00002
- Ainslie, G. (1975). Specious reward: A behavioral theory of impulsiveness and impulse control. *Psychological Bulletin, 82*(4), 463–496. <https://doi.org/10.1037/h0076860>
- Allais, M. (1953). Le comportement de l'homme rationnel devant le risque: Critique des postulats et axiomes de l'école américaine. *Econometrica, 21*(4), 503–546. <https://doi.org/10.2307/1907921>
- Amasino, D. R., Sullivan, N. J., Kranton, R. E., & Huettel, S. A. (2019). Amount and time exert independent influences on intertemporal choice. *Nature Human Behaviour, 3*(4), 383–392. <https://doi.org/10.1038/s41562-019-0537-2>
- Anderson, C. J. (2003). The psychology of doing nothing: Forms of decision avoidance result from reason and emotion. *Psychological Bulletin, 129*(1), 139–167. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.129.1.139>
- Anderson, M. A. B., Cox, D. J., & Dallery, J. (2023). Effects of economic context and reward amount on delay and probability discounting. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior, 120*(2), 204–213. <https://doi.org/10.1002/jeab.868>
- Anderson, N. H., & Shanteau, J. C. (1970). Information integration in risky decision making. *Journal of Experimental Psychology, 84*(3), 441–451. <https://doi.org/10.1037/h0029300>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software, 67*(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Benzion, U., Rapoport, A., & Yagil, J. (1989). Discount rates inferred from decisions: An experimental study. *Management Science, 35*(3), 270–284. <https://doi.org/10.1287/mnsc.35.3.270>
- Bhatnagar, R., & Orquin, J. L. (2022). A meta-analysis on the effect of visual attention on choice. *Journal of Experimental Psychology: General, 151*(10), 2265–2283. <https://doi.org/10.1037/xge0001204>
- Białaszek, W., Ostaszewski, P., Green, L., & Myerson, J. (2019). On four types of devaluation of outcomes due to their costs: Delay, probability, effort, and social discounting. *The Psychological Record, 69*(3), 415–424. <https://doi.org/10.1007/s40732-019-00340-x>
- Böckenholt, U., & Hynan, L. S. (1994). Caveats on a process - tracing measure and a remedy. *Journal of Behavioral Decision Making, 7*(2), 103–117. <https://doi.org/10.1002/bdm.3960070203>
- Brandstätter, E., Gigerenzer, G., & Hertwig, R. (2006). The priority heuristic: Making choices without trade-offs. *Psychological Review, 113*(2), 409–432. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.113.2.409>
- Brysbaert, M., & Stevens, M. (2018). Power analysis and effect size in mixed effects models: A tutorial. *Journal of Cognition, 1*(1), 9. <https://doi.org/10.5334/joc.10>
- Chen, F., Zheng, J., Wang, L., & Krajbich, I. (2024). Attribute latencies causally shape intertemporal decisions. *Nature Communications, 15*(1), 2948. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46657-2>
- Cheng, J., & González-Vallejo, C. (2016). Attribute-wise vs. alternative-wise mechanism in intertemporal choice: Testing the proportional difference, trade-off, and hyperbolic models. *Decision, 3*(3), 190–215. <https://doi.org/10.1037/dec0000046>
- Coronel, J. C., Bullock, O. M., Shulman, H. C., Sweitzer, M. D., Bond, R. M., & Poulsen, S. (2021). Eye movements predict large-scale voting decisions. *Psychological Science, 32*(6), 836–848. <https://doi.org/10.1177/0956797621991142>
- Cristino, F., Mathôt, S., Theeuwes, J., & Gilchrist, I. D. (2010). ScanMatch: A novel method for comparing fixation sequences. *Behavior Research Methods, 42*, 692–700. <https://doi.org/10.3758/BRM.42.3.692>
- Dai, J., & Busemeyer, J. R. (2014). A probabilistic, dynamic, and attribute-wise model of intertemporal choice. *Journal of Experimental Psychology: General, 143*(4), 1489–1514. <https://doi.org/10.1037/a0035976>
- Dai, J., Pleskac, T. J., & Pachur, T. (2018). Dynamic cognitive models of intertemporal choice. *Cognitive Psychology, 104*, 29–56. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2018.03.001>
- DeKay, M. L., & Dou, S. (2024). Risky-choice framing effects result partly from mismatched option descriptions in gains and losses. *Psychological Science, 35*(8), 918–932. <https://doi.org/10.1177/09567976241249183>
- Diederich, A., & Zhao, W. J. (2019). A dynamic dual process model of intertemporal choice. *The Spanish Journal of Psychology, 22*, E54. <https://doi.org/10.1017/sjp.2019.53>
- Escobar, G. G., Morales-Chainé, S., Haynes, J. M., Santoyo, C., & Mitchell, S. H. (2023). Moderate stability among delay, probability, and effort discounting in humans. *The Psychological Record, 73*(2), 149–162. <https://doi.org/10.1007/s40732-023-00537-1>
- Fidanoski, F., Dixit, V., & Ortmann, A. (2023). Can a single model account for both risky choices and inter-temporal choices? Testing the assumptions underlying models of risky-intertemporal choice: A conceptual replication [Preprint]. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4393036>
- Fisher, G. (2021). Intertemporal choices are causally influenced by fluctuations in visual attention. *Management Science, 67*(8), 4961–4981. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2020.3732>
- Franco - Watkins, A. M., Mattson, R. E., & Jackson, M. D. (2016). Now or later? Attentional processing and intertemporal choice. *Journal of Behavioral Decision Making, 29*(2–3), 206–217. <https://doi.org/10.1002/bdm.1895>
- Frederick, S. (2005). Cognitive reflection and decision making. *Journal of Economic Perspectives, 19*(4), 25–42. <https://doi.org/10.1257/089533005775196732>
- Frederick, S., & Loewenstein, G. (2002). Time discounting and time preference: A critical review. *Journal of Economic Literature, 40*(2), 351–401. <https://doi.org/10.1257/002205102320161311>
- Freeman, J. B., & Ambady, N. (2010). MouseTracker: Software for studying real-time mental processing using a computer mouse-tracking method. *Behavior Research Methods, 42*(1), 226–241. <https://doi.org/10.3758/BRM.42.1.226>
- Gerretsen, P., Kim, J., Caravaggio, F., Quilty, L., Sanches, M., Wells, S., ... Graff-Guerrero, A. (2021). Individual determinants of COVID-19 vaccine hesitancy. *PLoS One, 16*(11), e0258462. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258462>
- 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. <https://doi.org/10.1002/bdm.684>

- Goldstein, D. G., & Gigerenzer, G. (2002). Models of ecological rationality: The recognition heuristic. *Psychological Review*, 109(1), 75–90. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.109.1.75>
- Green, L., & Myerson, J. (2004). A discounting framework for choice with delayed and probabilistic rewards. *Psychological Bulletin*, 130(5), 769–792. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/0033-2909.130.5.769>
- Green, L., & Myerson, J. (2013). How many impulsivities? A discounting perspective. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 99(1), 3–13. <https://doi.org/10.1002/jeab.1>
- Green, L., Myerson, J., & Ostraszewski, P. (1999). Amount of reward has opposite effects on the discounting of delayed and probabilistic outcomes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25(2), 418–427. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/0278-7393.25.2.418>
- Green, L., Myerson, J., & Vanderveldt, A. (2014). Delay and probability discounting. In F. K. McSweeney & E. S. Murphy (Eds.), *The Wiley-Blackwell handbook of operant and classical conditioning* (pp. 307–337). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9781118468135.ch13>
- Guo, M., Ikink, I., Roelofs, K., & Figner, B. (2025). Ambiguity preferences in intertemporal and risky choice: A large-scale study using drift-diffusion modelling. *Psychonomic Bulletin & Review*, 32(6), 2939–2956. <https://doi.org/10.3758/s13423-025-02709-2>
- Han, X., Wang, Y. T., Feng, J. L., Deng, C., Chen, Z. H., Huang, Y. A., ... Hu, P. W. (2023). A survey of transformer-based multimodal pre-trained models. *Neurocomputing*, 515, 89–106. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.09.136>
- Hardisty, D. J., & Weber, E. U. (2009). Discounting future green: Money versus the environment. *Journal of Experimental Psychology: General*, 138(3), 329–340. <https://doi.org/10.1037/a0016433>
- He, L., Analytis, P. P., & Bhatia, S. (2022). The wisdom of model crowds. *Management Science*, 68(5), 3635–3659. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2021.4090>
- He, L., Wall, D., Reeck, C., & Bhatia, S. (2023). Information acquisition and decision strategies in intertemporal choice. *Cognitive Psychology*, 142, 101562. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2023.101562>
- He, L., Zhao, W. J., & Bhatia, S. (2022). An ontology of decision models. *Psychological Review*, 129(1), 49–72. <https://doi.org/10.1037/rev0000231>
- Hertwig, R., Barron, G., Weber, E. U., & Erev, I. (2004). Decisions from experience and the effect of rare events in risky choice. *Psychological Science*, 15(8), 534–539. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00715.x>
- Hertwig, R., & Erev, I. (2009). The description-experience gap in risky choice. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(12), 517–523. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.09.004>
- Hinves, N. S., & Anderson, I. M. (2010). The effects of real versus hypothetical reward on delay and probability discounting. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(6), 1072–1084. <https://doi.org/10.1080/17470210903276350>
- Hoffmann, T., Hofman, A., & Wagenmakers, E. J. (2022). Bayesian tests of two proportions: A tutorial with R and JASP. *Methodology*, 18(4), 239–277. <https://doi.org/10.5964/meth.9263>
- Horstmann, N., Ahlgrimm, A., & Glöckner, A. (2009). How distinct are intuition and deliberation? An eye-tracking analysis of instruction-induced decision modes. *Judgment and Decision Making*, 4(5), 335–354. <https://doi.org/10.1017/S1930297500001182>
- Hsiao, J. H. (2024). Understanding human cognition through computational modeling. *Topics in Cognitive Science*, 16(3), 349–376. <https://doi.org/10.1111/tops.12737>
- Hu, M., Chang, R., Sui, X., & Gao, M. (2024). Attention biases the process of risky decision-making: Evidence from eye-tracking. *PsyCh Journal*, 13(2), 157–165. <https://doi.org/10.1002/pchj.724>
- Huang, Y., Luan, S., Wu, B., Li, Y., Wu, J., Chen, W., & Hertwig, R. (2024). Impulsivity is a stable, measurable, and predictive psychological trait. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(24), e2321758121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2321758121>
- Huang, Y. N., Jiang, C. M., Liu, H. Z., & Li, S. (2023). Toward a coherent understanding of risky, intertemporal, and spatial choices: Evidence from eye-tracking and subjective evaluation. *Acta Psychologica Sinica*, 55(6), 994–1015. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2023.00994>
- [黄元娜, 江程铭, 刘洪志, 李纾. (2023). 风险、跨期和空间决策的决策策略共享: 眼动和主观判断的证据. *心理学报*, 55(6), 994–1015. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2023.00994>]
- Jenke, L., Bansak, K., Hainmueller, J., & Hangartner, D. (2021). Using eye-tracking to understand decision-making in conjoint experiments. *Political Analysis*, 29(1), 75–101. <https://doi.org/10.1017/pan.2020.11>
- Jiang, J., & Dai, J. (2021). Time and risk perceptions mediate the causal impact of objective delay on delay discounting: An experimental examination of the implicit-risk hypothesis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 28(4), 1399–1412. <https://doi.org/10.3758/s13423-021-01890-4>
- Johnson, K. L., Bixter, M. T., & Luhmann, C. C. (2020). Delay discounting and risky choice: Meta-analytic evidence regarding single-process theories. *Judgment and Decision Making*, 15(3), 381–400. <https://doi.org/10.1017/S193029750000718X>
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, 47(2), 263. https://doi.org/10.1142/9789814417358_0006
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1984). Choices, values, and frames. *American Psychologist*, 39(4), 341–350. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.39.4.341>
- Kalenscher, T., Ohmann, T., & Güntürkün, O. (2006). The neuroscience of impulsive and self-controlled decisions. *International Journal of Psychophysiology*, 62(2), 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2006.05.010>
- Kaplan, B. A., Amlung, M., Reed, D. D., Jarmolowicz, D. P., McKerchar, T. L., & Lemley, S. M. (2016). Automating scoring of delay discounting for the 21- and 27-item Monetary Choice Questionnaires. *The Behavior Analyst*, 39(2), 293–304. <https://doi.org/10.1007/s40614-016-0070-9>
- Killeen, P. R. (2023). Variations on a theme by Rachlin: Probability discounting. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 119(1), 140–155. <https://doi.org/10.1002/jeab.817>
- Kirby, K. N., & Maraković, N. N. (1996). Delay-discounting probabilistic rewards: Rates decrease as amounts increase. *Psychonomic Bulletin & Review*, 3(1), 100–104. <https://doi.org/10.3758/BF03210748>
- Kirby, K. N. (1997). Bidding on the future: Evidence against normative discounting of delayed rewards. *Journal of Experimental Psychology: General*, 126(1), 54–70. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.126.1.54>
- Kirby, K. N., & Herrnstein, R. J. (1995). Preference reversals due to myopic discounting of delayed reward. *Psychological Science*, 6(2), 83–89. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1995.tb00311.x>
- Kononov, A., & Krajbich, I. (2020). Mouse tracking reveals structure knowledge in the absence of model-based choice.

- Nature Communications*, 11(1), 1893. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15696-w>
- Konstantinidis, E., Van Ravenzwaaij, D., Güney, Ş., & Newell, B. R. (2020). Now for sure or later with a risk? Modeling risky intertemporal choice as accumulated preference. *Decision*, 7(2), 91–120. <https://doi.org/10.1037/dec0000103>
- Krajbich, I., & Rangel, A. (2011). Multialternative drift-diffusion model predicts the relationship between visual fixations and choice in value-based decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(33), 13852–13857. <https://doi.org/10.1073/pnas.1101328108>
- Leland, J. W. (2002). Similarity judgments and anomalies in intertemporal choice. *Economic Inquiry*, 40(4), 574–581. <https://doi.org/10.1093/ei/40.4.574>
- Li, S. (2004). A behavioral choice model when computational ability matters. *Applied Intelligence*, 20(2), 147–163. <https://doi.org/10.1023/b:apin.0000013337.01711.c7>
- Li, S., Su, Y., & Sun, Y. (2010). The effect of pseudo - immediacy on intertemporal choices. *Journal of Risk Research*, 13(6), 781–787. <https://doi.org/10.1080/13669870903551704>
- Liang, Z. Y., Xu, L. J., Rao, L. L., Jiang, T. Z., & Li, S. (2012). “20% probability to gain a cake” = “gain 20% of the cake”? Testing the expectation rule of risky decision making. *Chinese Science Bulletin*, 57(35), 3421–3433. <http://doi.org/10.1360/972012-691>
- [梁竹苑, 徐丽娟, 饶俪琳, 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. <http://doi.org/10.1360/972012-691>]
- Lin, J. M., Li, A. M., Zhou, Y. R., He, J. H., & Zhou, L. (2022). The prospect of gaze manipulation technology in decision-making research: Altering decision-making. *Advances in Psychological Science*, 30(8), 1794–1803. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2022.01794>
- [林澆敏, 李爱梅, 周雅然, 何军红, 周蕾. (2022). 眼动操纵技术在决策研究中的应用前景: 改变决策行为. *心理科学进展*, 30(8), 1794–1803. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2022.01794>]
- Liu, H. Z., Lyu, X. K., Wei, Z. H., Mo, W. L., Luo, J. R., & Su, X. Y. (2021). Exploiting the dynamics of eye gaze to bias intertemporal choice. *Journal of Behavioral Decision Making*, 34(3), 419–431. <https://doi.org/10.1002/bdm.2219>
- Luckman, A., Donkin, C., & Newell, B. R. (2018). Can a single model account for both risky choices and inter-temporal choices? Testing the assumptions underlying models of risky inter-temporal choice. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25(2), 785–792. <https://doi.org/10.3758/s13423-017-1330-8>
- Luckman, A., Donkin, C., & Newell, B. R. (2020). An evaluation and comparison of models of risky intertemporal choice. *Psychological Review*, 127(6), 1097–1138. <https://doi.org/10.1037/rev0000223>
- Ludwig, J., Jaudas, A., & Achtziger, A. (2024). The zero effect: An eye-tracking study of affect and motivation in risky choices. *Journal of Behavioral Decision Making*, 37(3), e2400. <https://doi.org/10.1002/bdm.2400>
- Marzilli Ericson, K. M., White, J. M., Laibson, D., & Cohen, J. D. (2015). Money earlier or later? Simple heuristics explain intertemporal choices better than delay discounting does. *Psychological Science*, 26(6), 826–833. <https://doi.org/10.1177/0956797615572232>
- Mazur, J. E. (1987). An adjusting procedure for studying delayed reinforcement. In M. L. Commons, J. E. Mazur, J. A. Nevin, & H. Rachlin (Eds.), *The effect of delay and of intervening events on reinforcement value* (pp. 55–73). Erlbaum.
- Meertens, R. M., & Lion, R. (2008). Measuring an individual's tendency to take risks: The Risk Propensity Scale. *Journal of Applied Social Psychology*, 38(6), 1506–1520. <https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.2008.00357.x>
- Meissner, T., Gassmann, X., Faure, C., & Schleich, J. (2023). Individual characteristics associated with risk and time preferences: A multi-country representative survey. *Journal of Risk and Uncertainty*, 66, 77–107. <https://doi.org/10.1007/s11166-022-09383-y>
- Mok, J. N. Y., Kwan, D., Green, L., Myerson, J., Craver, C. F., & Rosenbaum, R. S. (2020). Is it time? Episodic imagining and the discounting of delayed and probabilistic rewards in young and older adults. *Cognition*, 199, 104222. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104222>
- Noton, D., & Stark, L. (1971). Scanpaths in eye movements during pattern perception. *Science*, 171(3968), 308–311. <https://doi.org/10.1126/science.171.3968.308>
- Ohmura, Y., Takahashi, T., & Kitamura, N. (2016). Discounting delayed and probabilistic monetary gains and losses by smokers of cigarettes. In S. Ikeda, H. K. Kato, F. Ohtake, & Y. Tsutsui (Eds.), *Behavioral economics of preferences, choices, and happiness* (pp. 179–196). Springer.
- Orquin, J. L., Ashby, N. J. S., & Clarke, A. D. F. (2016). Areas of interest as a signal detection problem in behavioral eye-tracking research. *Journal of Behavioral Decision Making*, 29(2–3), 103–115. <https://doi.org/10.1002/bdm.1867>
- Orquin, J. L., & Holmqvist, K. (2018). Threats to the validity of eye-movement research in psychology. *Behavior Research Methods*, 50(4), 1645–1656. <https://doi.org/10.3758/s13428-017-0998-z>
- Orquin, J. L., Lahm, E. S., & Stojić, H. (2021). The visual environment and attention in decision making. *Psychological Bulletin*, 147(6), 597–617. <https://doi.org/10.1037/bul0000328>
- Pascal, B. (1670/2018). *Pensées* (W. F. Trotter, Trans.). Fordham University Sourcebooks. <https://sourcebooks.fordham.edu/mod/1660pascal-pensees.asp>
- Patton, J. H., Stanford, M. S., & Barratt, E. S. (1995). Factor structure of the Barratt Impulsiveness Scale. *Journal of Clinical Psychology*, 51(6), 768–774. [https://doi.org/10.1002/1097-4679\(199511\)51:6<768::AID-JCLP2270510607>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1097-4679(199511)51:6<768::AID-JCLP2270510607>3.0.CO;2-1)
- Payne, J. W., Bettman, J. R., & Johnson, E. J. (1993). *The adaptive decision maker*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139173933.002>
- Payne, J. W., Braunstein, M. L., & Carroll, J. S. (1978). Exploring predecisional behavior: An alternative approach to decision research. *Organizational Behavior and Human Performance*, 22(1), 17–44. [https://doi.org/10.1016/0030-5073\(78\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0030-5073(78)90003-X)
- Peters, E., Västfjäll, D., Slovic, P., Mertz, C. K., Mazzocco, K., & Dickert, S. (2006). Numeracy and decision making. *Psychological Science*, 17(5), 407–413. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01720.x>
- Peters, J., & Büchel, C. (2009). Overlapping and distinct neural systems code for subjective value during intertemporal and risky decision making. *The Journal of Neuroscience*, 29(50), 15727–15734. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3489-09.2009>
- Peters, J., & Büchel, C. (2011). The neural mechanisms of inter-temporal decision-making: Understanding variability. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(5), 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.03.002>
- Rachlin, H., Logue, A. W., Gibbon, J., & Frankel, M. (1986). Cognition and behavior in studies of choice. *Psychological Review*, 93(1), 33–45. <https://doi.org/10.1037/0033-295x>

- 93.1.33
- Rao, L. L., & Li, S. (2011). New paradoxes in intertemporal choice. *Judgment and Decision Making*, 6(2), 122–129. <https://doi.org/10.1017/s193029750000406x>
- Rayner, K. (Ed.). (2012). *Eye movements and visual cognition: Scene perception and reading*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2852-3>
- Read, D., & Scholten, M. (2012). Tradeoffs between sequences: Weighing accumulated outcomes against outcome-adjusted delays. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 38(6), 1675–1688. <https://doi.org/10.1037/a0028216>
- 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. <https://doi.org/10.1037/a0017327>
- Reyna, V. F., Müller, S. M., & Edelson, S. M. (2023). Critical tests of fuzzy trace theory in brain and behavior: Uncertainty across time, probability, and development. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 23(3), 746–772. <https://doi.org/10.3758/s13415-022-01058-0>
- Samuelson, P. A. (1937). A note on measurement of utility. *The Review of Economic Studies*, 4(2), 155–161. <https://doi.org/10.2307/2967612>
- Scholten, M., & Read, D. (2010). The psychology of intertemporal tradeoffs. *Psychological Review*, 117(3), 925–944. <https://doi.org/10.1037/a0019619>
- Scholten, M., Read, D., & Sanborn, A. (2014). Weighing outcomes by time or against time? Evaluation rules in intertemporal choice. *Cognitive Science*, 38(3), 399–438. <https://doi.org/10.1111/cogs.12104>
- Scholten, M., Walters, D. J., Fox, C. R., & Read, D. (2024). The unified tradeoff model. *Psychological Review*, 131(4), 1007–1044. <https://doi.org/10.1037/rev0000458>
- Schulte-Mecklenbeck, M., Johnson, J. G., Böckenholt, U., Goldstein, D. G., Russo, J. E., Sullivan, N. J., & Willemsen, M. C. (2017). Process-tracing methods in decision making: On growing up in the 70s. *Current Directions in Psychological Science*, 26(5), 442–450. <https://doi.org/10.1177/0963721417708229>
- Sivula, T., Magnusson, M., Matamoros, A. A., & Vehtari, A. (2020). Uncertainty in Bayesian leave-one-out cross-validation based model comparison. *arXiv*. <https://doi.org/10.1214/25-ba1569>
- Smith, E., & Peters, J. (2022). Motor response vigour and visual fixation patterns reflect subjective valuation during intertemporal choice. *PLoS Computational Biology*, 18(6), e1010096. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1010096>
- Stevenson, M. K., Busemeyer, J. R., & Naylor, J. C. (1990). Judgment and decision-making theory. In M. D. Dunnette & L. M. Hough (Eds.), *Handbook of industrial and organizational psychology* (2nd ed., pp. 283–374). Consulting Psychologists Press.
- Stewart, N., Hermens, F., & Matthews, W. J. (2016). Eye movements in risky choice. *Journal of Behavioral Decision Making*, 29(2–3), 116–136. <https://doi.org/10.1002/bdm.1854>
- Stillman, P. E., Shen, X., & Ferguson, M. J. (2018). How mouse-tracking can advance social cognitive theory. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(6), 531–543. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.03.012>
- 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. <https://doi.org/10.1037/a0032861>
- Sui, X. Y., Liu, H. Z., & Rao, L. L. (2020). The timing of gaze-contingent decision prompts influences risky choice. *Cognition*, 195, 104077. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.104077>
- Thorngate, W. (1980). Efficient decision heuristics. *Behavioral Science*, 25(3), 219–225. <https://doi.org/10.1002/bs.3830250306>
- Ting, C. C., & Gluth, S. (2024). Unraveling information processes of decision-making with eye-tracking data. *Frontiers in Behavioral Economics*, 3, 1384713. <https://doi.org/10.3389/frbhe.2024.1384713>
- Trinh, K. A. (2025). Big Five personality traits, poverty, and environmental shocks in shaping farmers' risk and time preferences: Experimental evidence from Vietnam. *Economics*, 19(1), 1–21. <https://doi.org/10.1515/econ-2025-0172>
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1992). Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty. *Journal of Risk and Uncertainty*, 5(4), 297–323. <https://doi.org/10.1007/BF00122574>
- Vanderveldt, A., Green, L., & Myerson, J. (2015). Discounting of monetary rewards that are both delayed and probabilistic: Delay and probability combine multiplicatively, not additively. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 41(1), 148–162. <https://doi.org/10.1037/xlm0000029>
- Vehtari, A., Gelman, A., & Gabry, J. (2017). Practical Bayesian model evaluation using leave-one-out cross-validation and WAIC. *Statistics and Computing*, 27(5), 1413–1432. <https://doi.org/10.1007/s11222-016-9696-4>
- von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1944). *Theory of games and economic behavior*. Princeton University Press.
- Wang, P., Wang, X. T., Gao, J., Li, X., & Xu, J. (2019). Adaptive time management: The effects of death awareness on time perception and intertemporal choice. *Acta Psychologica Sinica*, 51(12), 1341–1350. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2019.01341>
- [王鹏, 王晓田, 高娟, 黎夏岚, 徐静. (2019). 适应性时间管理: 死亡意识对时间知觉和跨期决策的影响. *心理学报*, 51(12), 1341–1350. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2019.01341>]
- Wang, S., Jiang, Z., Noland, R. B., & Mondschein, A. S. (2020). Attitudes towards privately-owned and shared autonomous vehicles. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 72, 297–306. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.05.014>
- Wang, Z. J., & Li, S. (2012). Tests of the integrative model and priority heuristic model from the point of view of choice process: Evidence from an eye-tracking study. *Acta Psychologica Sinica*, 44(2), 179–198. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1041.2012.00179>
- [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. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1041.2012.00179>]
- Weber, B. J., & Huettel, S. A. (2008). The neural substrates of probabilistic and intertemporal decision making. *Brain Research*, 1234, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.07.105>
- Wei, Z. H., & Li, X. S. (2015). Decision process tracing: Evidence from eye-movement data. *Advances in Psychological Science*, 23(12), 2029–2041. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2015.02029>
- [魏子晗, 李兴珊. (2015). 决策过程的追踪: 基于眼动的证据. *心理科学进展*, 23(12), 2029–2041. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2015.02029>]
- Wismans, A., Thurik, R., Baptista, R., Dejardin, M., Janssen, F., &

- Franken, I. (2021). Psychological characteristics and the mediating role of the 5C model in explaining students' COVID-19 vaccination intention. *PLoS One*, *16*(8), e0255382. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255382>
- Yang, X., & Krajbich, I. (2023). A dynamic computational model of gaze and choice in multi-attribute decisions. *Psychological Review*, *130*(1), 52–70. <https://doi.org/10.1037/rev0000350>
- Yang, X. L., Chen, S. T., & Liu, H. Z. (2022). The effect of incentives on intertemporal choice: Choice, confidence, and eye movements. *Frontiers in Psychology*, *13*, 989511. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.989511>
- Zhang, X., Aimone, J. A., Alsharawy, A., Li, F., Ball, S., & Smith, A. (2024). The effects of task difficulty and presentation format on eye movements in risky choice. *Frontiers in Behavioral Economics*, *3*, 1321301. <https://doi.org/10.3389/frbhe.2024.1321301>
- Zhang, Y. Y., Rao, L. L., Liang, Z. Y., Zhou, Y., & Li, S. (2014). Process test of risky decision making: New understanding, new evidence pitting non-compensatory against compensatory models. *Advances in Psychological Science*, *22*(2), 205–219. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2014.00205>
- [张阳阳, 饶俐琳, 梁竹苑, 周媛, 李纾. (2014). 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. *心理学进展*, *22*(2), 205–219. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2014.00205>]
- Zhang, Y. Y., Zhou, L., Li, S., & Liang, Z. Y. (2022). Computation of subjective value does not always elicit alternative-based information searching in intertemporal choice. *Journal of Behavioral Decision Making*, *35*(4), Article e2274. <https://doi.org/10.1002/bdm.2274>
- Zhou, L., Li, A. M., Zhang, L., Li, S., & Liang, Z. Y. (2019). Similarity in processes of risky choice and intertemporal choice: The case of certainty effect and immediacy effect. *Acta Psychologica Sinica*, *51*(3), 337–352. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2019.00337>
- [周蕾, 李爱梅, 张磊, 李纾, 梁竹苑. (2019). 风险决策和跨期决策的过程比较: 以确定效应和即刻效应为例. *心理学报*, *51*(3), 337–352. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2019.00337>]
- Zhou, L., Xiao, S. Y., He, X. Y., Li, J., & Liu, H. M. (2006). Reliability and validity of Chinese version of Barratt Impulsiveness Scale-11. *Chinese Journal of Clinical Psychology*, *14*(4), 343–344. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-3611.2006.04.005>
- [周亮, 肖水源, 何晓燕, 厉洁, 刘慧铭. (2006). BIS-11 中文版的信度与效度检验. *中国临床心理学杂志*, *14*(4), 343–344. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-3611.2006.04.005>]
- Zhou, L., Zhang, Y. Y., Li, S., & Liang, Z. Y. (2018). New paradigms for the old question: Challenging the expectation rule held by risky decision-making theories. *Journal of Pacific Rim Psychology*, *12*, e17. <https://doi.org/10.1017/prp.2018.4>
- Zhou, L., Zhang, Y. Y., Wang, Z. J., Rao, L. L., Wang, W., Li, S., Li, X. S., & Liang, Z. Y. (2016). A scanpath analysis of the risky decision-making process. *Journal of Behavioral Decision Making*, *29*(2-3), 169–182. <https://doi.org/10.1002/bdm.1943>
- Zhou, Y. B., Li, Q., & Liu, H. Z. (2021). Visual attention and time preference reversals. *Judgment and Decision Making*, *16*(4), 1010–1038. <https://doi.org/10.1017/S1930297500008068>
- Zhou, Y. B., Ruan, S. J., Zhang, K., Bao, Q., & Liu, H. Z. (2024). Time pressure effects on decision-making in intertemporal loss scenarios: An eye-tracking study. *Frontiers in Psychology*, *15*, 1451674. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1451674>
- Zilker, V., & Pachur, T. (2022). Nonlinear probability weighting can reflect attentional biases in sequential sampling. *Psychological Review*, *129*(5), 949–975. <https://doi.org/10.31234/osf.io/dqexn>
- Zilker, V., & Pachur, T. (2023). Attribute attention and option attention in risky choice. *Cognition*, *236*, 105441. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2023.105441>

Comparison of risky and intertemporal choice processes: An equivalent conversion paradigm of probability and time

ZHOU Lei¹, LI Litong¹, LIANG Zhuyuan^{2,3}, LI Shu⁴, HUI Qingshan¹, ZHANG Lei^{5,6,7,8}

(¹ School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China) (² State Key Laboratory of Cognitive Science and Mental Health, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China) (³ Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China) (⁴ Department of Applied Psychology, School of Humanities and Social Sciences, Fuzhou University, Fuzhou, 350108, China) (⁵ School of Psychology, University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, UK) (⁶ Institute for Mental Health, University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, UK) (⁷ Centre for Human Brain Health, University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, UK) (⁸ Centre for Developmental Sciences, University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, UK)

Abstract

Risky choice (RC) and intertemporal choice (IC) are two fundamental decision-making categories essential to people's daily life. The former involves selecting among outcomes with varying probabilities, whereas the latter requires making decisions across different time points. These domains share similarities regarding theoretical developments, behavioral effects, and neural bases. A critical challenge persists because, although previous studies have revealed that RC and IC involve similar cognitive processes, findings remain inconsistent

regarding their precise underlying mechanisms. Examining the similarities and differences between RC and IC from a decision process perspective contributes to the development of a generalized decision-making framework and clarifies the boundaries of its applicability. However, existing studies lack direct comparisons and converging process evidence between these two decision types. Given that probability and time parameters influence decision preferences and processes, ensuring their comparability is essential when comparing RC and IC. Previous research has often used fixed parameters, neglecting the conversion between probability and time, as well as individual differences; such an approach potentially introduces biases in experimental results due to parameter effects and individual variability.

To address these limitations, the present study initially developed a novel paradigm that subjectively equates probability to time and generates a unique set of parameters for each participant. Then, by incorporating eye-tracking technology, the research systematically investigated the cognitive mechanisms underlying RC and IC during single-outcome (Study 1) and dual-outcome (Study 2) tasks. Each study consisted of two phases. In Study 1 ($N = 41$, $M_{\text{age}} = 27.14$), each participant first generated pairs of approximately equivalent RC and IC options. Following the adaptive design optimization method, participants made choices between an RC and IC option possessing similar payoffs. The IC option was fixed, whereas the probability of the RC option was adjusted according to user responses until reaching an indifference point. Second, the study used these equivalent options to construct single-outcome RC and IC tasks and examined their underlying processes via eye-tracking technology. In Study 2 ($N = 37$, $M_{\text{age}} = 26.31$), the equivalent conversion paradigm operated in the opposite manner. That is, the RC option remained fixed, whereas the time parameter of the IC option was adjusted. The research then extended these findings by constructing dual-outcome options, focusing on *compensatory versus noncompensatory* and *alternative-based versus attribute-based* rules. By integrating eye-tracking and hierarchical Bayesian modeling, the analysis examined local and holistic decision processes.

The entire set of analyses aimed to (1) determine whether the decision processes of RC and IC are similar and (2) identify the computational model most suitable for both decisions. Regarding the first aim, results indicated that RC and IC share equivalent conversion points and comparable local decision processes, which reflect *noncompensatory* and *attribute-based* rules. However, RC and IC differ in holistic process characteristics, as IC undergoes a relatively more deliberate and deeper fashion than RC. Furthermore, as task complexity increased from single-outcome to dual-outcome scenarios, the process similarity between RC and IC increased, suggesting the adoption of more parallelized and simplified decision strategies. Regarding the second aim, computational modeling of process characteristics suggests that both types of decisions are consistent with nondiscounting models. Altogether, these results reveal that participants more likely follow the *noncompensatory, attribute-based* rules rather than the *compensatory, alternative-based* rules when deciding for RC and IC.

To conclude, the present study demonstrates several key findings. (1) The equivalent conversion paradigm confirmed the existence of subjective equivalent options between probability and time. (2) After equivalent conversion, despite process-level differences, RC and IC exhibited consistency in core cognitive mechanisms. In both decision types, and contrary to classic discounting models, individuals seem not to follow *compensatory, alternative-based* rules, which undergo a “weighting and summing” or “time discounting” process. Instead, they more likely use simple heuristic rules hypothesized by nondiscounting models. (3) RC and IC demonstrated distinct behavioral preferences, process characteristics, and underlying mechanisms, such as differences in processing complexity and overall eye-movement dynamics. Overall, the research provides new perspectives on theoretical and methodological comparisons across different decision-making tasks and offers empirical support for the development of a more unified decision-making theory.

Keywords risky choice, intertemporal choice, equivalent conversion, eye-tracking, hierarchical Bayesian modeling

补充材料 1

表 S1 风险决策和跨期决策的理论模型

决策规则	决策类型	核心假设	代表性模型	参考文献
补偿性/ 基于选项	风险决策	基于数学期望 (mathematical expectation), 遵循“加权求和”期望法则, 假设人们通过各选项发生概率对结果加权求和得出期望值, 并选择最大期望值的选项。	期望价值理论(expected value, EV); 期望效用理论(expected utility, EU); 预期理论(prospect theory, PT); 累计预期理论(cumulative prospect theory, CPT)	Pascal, 1670; von Neumann & Morgenstern, 1944; Kahneman & Tversky, 1979; Tversky & Kahneman, 1992
	跨期决策	遵循“折扣求和计算”的规则, 假设人们按时间折扣率(discounting rate)对未来各时间点的效用进行折扣求和, 并选择总效用最大的选项。	效用模型 (discounted utility model, DU); 双曲线模型 (hyperbolic discounting model)	Samuelson, 1937; Ainslie, 1975
非补偿性/ 基于维度	风险决策	决策者仅关注部分关键维度(如“最坏结果”、“最坏结果概率”、“最好结果”等), 并在选项间比较这些维度以做出决策。	极大极小启发式模型(minimax heuristic model); 齐当别模型 (equate-to-differentiate model, ETD); 占优启发式模型(priority heuristic model)	Thorngate, 1980; Li, 2004; Brandstätter, Gigerenzer, & Hertwig, 2006
	跨期决策	决策者时间间隔和结果差异的权衡, 并依据差异更大的维度进行决策。	相似性判断模型(similarity judgments model); 权衡模型(tradeoff model); 跨期决策启发式模型 (intertemporal choice heuristics model, ITCH)	Leland, 2002; Scholten & Read, 2010; Scholten et al., 2024; Marzilli Ericson et al., 2015

表 S2 研究对各检验指标的操作假设

维度	决策属性	分析指标	研究假设	
			H ₂ : 两类决策过程相似	H ₄ : 两类决策过程更遵循非补偿性/基于维度的规则
行为特征		决策时间	H _{2a} : 决策时间无差异	
		LL/LH 选项选择比例	H _{2b} : 选择偏好无差异	
		分层贝叶斯模型拟合	H _{2c} : 二者可被同类决策模型拟合	H _{4a} : 相较于折扣模型, 二者能够更好地被非折扣模型拟合
局部 过程特征	加工复杂程度	单个注视点平均时长	H _{2d} : 单个注视点平均时长无差异	
		长注视点比例	H _{2e} : 长注视点比例无差异	H _{4b} : 长注视点比例显著小于 50%, 符合非补偿性规则
	加工深度	决策前注视量百分比	H _{2f} : 二者在决策前的注视信息量百分比无差异	H _{4c} : 在决策前无需注视所有选项特征, 符合非补偿性规则
	加工方向	SM 值	H _{2g} : 二者基于选项的眼跳和基于维度的眼跳的频数分布无差异	H _{4d} : 采用基于维度的策略进行决策, 即在反映决策信息搜索方向的 SM 值指标上均小于零, 符合基于维度加工规则
整体 过程特征	整体动态眼 动过程	眼动轨迹	H _{2h} : 眼动轨迹无差异	H _{4e} : 根据典型试次定性观察到更多基于维度加工模式, 符合基于维度加工规则

补充材料 2

为检验低起点设置(风险任务概率 1%、跨期任务延迟 1 个月)是否会引发初始试次偏差,我们对研究 1 与研究 2 各组块首个试次的选择结果进行了分析。结果显示(见图

S1、S2), 在全部 25 个时间 × 金额条件下, 被试的首次选择未呈现系统性偏向。具体而言, 研究 1 中有 21 个组别的风险选项选择比例低于 20%, 研究 2 中有 13 个组别的跨期选项选择比例低于 20%。结果表明, 低概率/短延迟起点未导致显著初始偏差, 验证了自适应范式的稳健性。

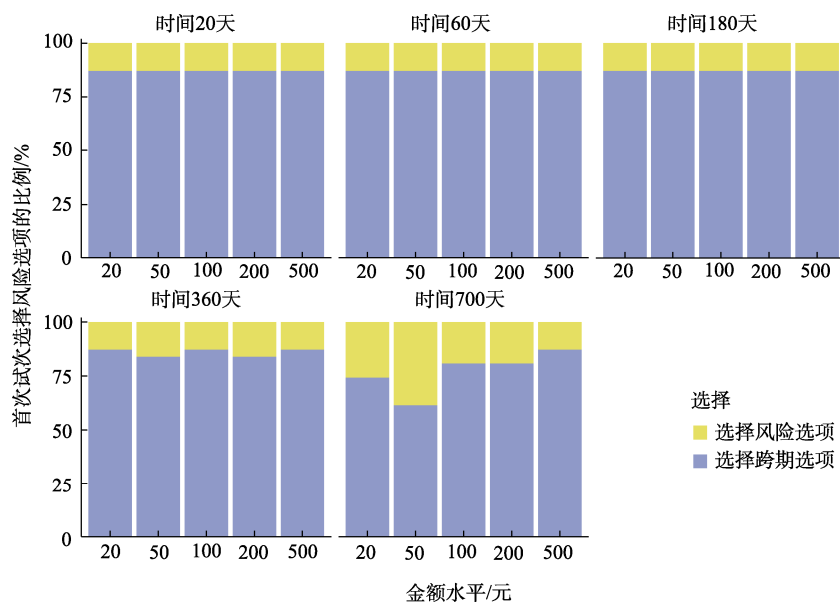


图 S1 研究 1 中阶段一被试的首次试次选择风险选项的比例(%)

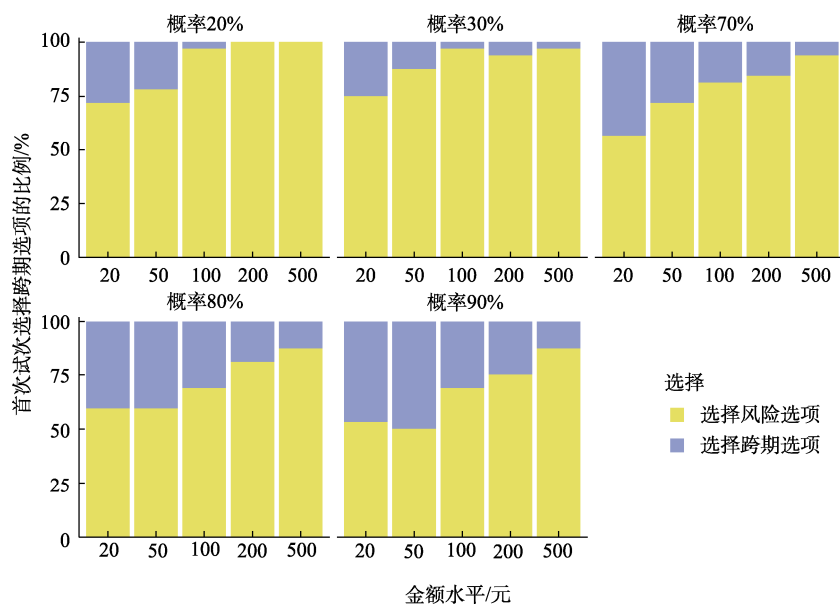


图 S2 研究 2 中阶段一被试的首次试次选择跨期选项的比例(%)

补充材料 3

表 S3 研究 1 阶段二实验材料(被试 A)

风险任务				跨期任务			
选项 A		选项 B		选项 A		选项 B	
概率(%)	金额(元)	概率(%)	金额(元)	时间(天)	金额(元)	时间(天)	金额(元)
78	500	90	200	180	200	60	100
24	100	74	50	700	500	20	20
60	500	90	200	700	50	20	20
78	500	82	50	700	500	20	200
82	500	90	200	700	50	360	20
53	100	82	50	360	100	20	50
10	50	30	20	360	500	20	50
60	50	76	20	700	50	60	20
53	100	76	20	360	100	60	50
60	500	76	20	700	500	20	100
26	200	82	50	180	200	20	50
26	200	82	100	700	500	20	50
60	500	84	200	360	200	180	100
26	50	60	20	360	500	20	100
10	50	49	20	700	200	20	50
53	100	60	20	700	500	60	100
60	50	60	20	180	100	20	20
80	200	82	50	700	100	20	20
76	20	10	50	700	200	60	100
82	100	82	200	700	500	60	200
82	100	60	500	700	200	20	20
76	20	80	200	360	100	60	20
82	100	82	500	700	100	20	50
53	100	26	200	700	200	20	100
84	200	78	500	180	50	60	20
69	100	80	200	20	100	180	200
74	50	26	200	20	100	180	500
60	20	10	50	360	100	700	200
74	50	53	100	20	20	360	200
69	100	82	200	20	20	360	100
58	100	26	200	20	100	360	200
82	100	80	200	60	50	700	100
69	100	26	200	60	50	700	200
76	20	26	50	60	200	360	500
82	50	24	100	20	200	360	500
82	50	58	100	60	100	360	200
82	100	78	500	180	100	700	200
74	50	80	200	20	200	180	500
58	100	80	200	20	20	180	50
69	100	60	500	60	50	360	200
60	20	24	100	60	20	700	200
76	20	58	100	60	20	700	100
82	50	82	200	60	20	360	50
76	20	26	200	180	20	700	50
76	20	24	100	20	50	360	200
82	50	60	500	20	50	180	100
30	20	26	200	20	20	360	50

表 S4 研究 2 阶段二实验材料(被试 B)

风险任务								跨期任务							
选项 A				选项 B				选项 A				选项 B			
结果 1		结果 2		结果 1		结果 2		结果 1		结果 2		结果 1		结果 2	
概率 (%)	金额 (元)	概率 (%)	金额 (元)	概率 (%)	金额 (元)	概率 (%)	金额 (元)	时间 (月)	金额 (元)	时间 (月)	金额 (元)	时间 (月)	金额 (元)	时间 (月)	金额 (元)
20	200	80	20	80	20	70	100	8.75	200	0.05	20	0.05	20	1.2	100
70	100	80	50	80	50	20	200	1.2	100	0.15	50	0.15	50	8.75	200
20	500	80	20	80	20	70	200	11.7	500	0.05	20	0.05	20	0.25	200
70	200	80	50	80	50	20	500	0.25	200	0.15	50	0.15	50	11.7	500
20	500	80	20	80	20	70	100	11.7	500	0.05	20	0.05	20	1.2	100
70	100	80	50	80	50	20	500	1.2	100	0.15	50	0.15	50	11.7	500
30	200	80	20	80	20	70	100	5	200	0.05	20	0.05	20	1.2	100
70	100	80	50	80	50	30	200	1.2	100	0.15	50	0.15	50	5	200
30	500	80	20	80	20	70	200	12.05	500	0.05	20	0.05	20	0.25	200
70	200	80	50	80	50	30	500	0.25	200	0.15	50	0.15	50	12.05	500
30	500	80	20	80	20	70	100	12.05	500	0.05	20	0.05	20	1.2	100
70	100	80	50	80	50	30	500	1.2	100	0.15	50	0.15	50	12.05	500
20	200	90	20	90	20	80	100	8.75	200	0.05	20	0.05	20	0.25	100
80	100	90	50	90	50	20	200	0.25	100	0.05	50	0.05	50	8.75	200
20	500	90	20	90	20	80	200	11.7	500	0.05	20	0.05	20	0.95	200
80	200	90	50	90	50	20	500	0.95	200	0.05	50	0.05	50	11.7	500
20	500	90	20	90	20	80	100	11.7	500	0.05	20	0.05	20	0.25	100
80	100	90	50	90	50	20	500	0.25	100	0.05	50	0.05	50	11.7	500
30	200	90	20	90	20	80	100	5	200	0.05	20	0.05	20	0.25	100
80	100	90	50	90	50	30	200	0.25	100	0.05	50	0.05	50	5	200
30	500	90	20	90	20	80	200	12.05	500	0.05	20	0.05	20	0.95	200
80	200	90	50	90	50	30	500	0.95	200	0.05	50	0.05	50	12.05	500
30	500	90	20	90	20	80	100	12.05	500	0.05	20	0.05	20	0.25	100
80	100	90	50	90	50	30	500	0.25	100	0.05	50	0.05	50	12.05	500

补充材料 4

研究 1 和研究 2 的眼动实验结束后, 被试将完成包括人口统计学信息的简短问卷, 并填写了四类个体差异问卷, 具体内容如下:

(1) 风险倾向(Risk Propensity, RP): 使用风险倾向量表(Risk Propensity Scale; Meertens & Lion, 2008), 该量表评估个体对风险的总体态度, 即风险是被视为获取收益的机会还是潜在损失的威胁。风险倾向不仅影响经济情境下的选择, 还与公共健康行为(如疫苗接种决策; Gerretsen et al., 2021; Wismans et al., 2021)和新兴技术接受度(如自动驾驶汽车; Wang et al., 2020)密切相关。

(2) 冲动性(Impulsivity): 采用 Barratt 冲动性量表中文版(Barratt Impulsiveness Scale, BIS-11; Patton et al., 1995; 周亮 等, 2006)评估个体在自我控制和延迟满足的差异。研究显示, 高冲动性的个体往往表现出更高的

时间折扣率(Kalenscher et al., 2006; Peters & Büchel, 2011)。

(3) 计算能力(Numeracy): 采用计算力量表(Numeracy Scale, NS; Peters et al., 2006)测量个体理解、处理与应用概率、比率及统计信息的能力。研究表明, 计算能力水平直接影响个体对风险的理解与医疗决策质量: 低计算能力常导致风险判断偏差, 更易受信息框架和情绪干扰; 而计算能力水平较高的个体在风险决策中更能依循概率原则(Peters et al., 2006; Reyna et al., 2009)。

(4) 认知反思风格(Cognitive Reflection Style): 通过认知反思测验(Cognitive Reflection Test, CRT; Frederick, 2005)评估个体在决策中更倾向于依赖审慎反思型加工(Type 2)还是直觉启发式加工(Type 1)。既有研究表明, 依赖直觉加工的个体更可能表现出短视和缺乏耐心, 从而具有更高的时间折扣率(Frederick, 2005; Hardisty & Weber, 2009)。

基于已有的数据,我们检验了以上变量对等量转换值的影响,如下:

研究 1 ($N = 31$): 有效样本为 23 名。我们以概率-时间的等量转换值为因变量,金额和时间为被试内因素,人口学变量与认知能力指标为被试间因素,分别进行了混合设计的重复测量方差分析。结果显示,除性别与时间的交互作用显著($F = 4.24, p = 0.033$)外,年龄、性别、专业、学历与收入($F_s < 3.3, p_s > 0.08$),及其他个体差异变量(CRT、BIS、RP、NS) ($F_s < 2.2, p_s > 0.10$)均未显示显著主效应或与金额/时间的交互作用(详见表 S5)。

简单效应分析发现,在短期至中期延迟条件下(20-360 天),性别可以影响等量转换值:随着延迟时间的增加,女性相较于男性的风险规避程度逐渐减弱,并在超长期延迟下趋于一致。即,在相同延迟条件下,女性需要更小的风险水平才能与跨期选项实现等值,表现出更强的风险规避倾向(delay20: $b = 24.49, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.82$; delay60: $b = 21.70, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.73$; delay180: $b = 21.44, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.72$; delay360: $b = 14.07, p = 0.013, \text{Cohen's } d = 0.47$)。然而,在长期延迟条件(700 天)下,这一性别差异不显著($p = 0.159$)。

表 S5 研究 1 中年龄、性别、专业、学历与收入对等量转换值的重复测量方差分析结果

变异来源	$F(df_1, df_2)$	p	η_p^2
年龄	$F(9, 13) = 0.48$	0.863	0.25
金额	$F(2.28, 29.61) = 12.67$	< 0.001	0.494
时间	$F(1.22, 15.88) = 41.01$	< 0.001	0.759
年龄*金额	$F(20.50, 29.61) = 0.69$	0.806	0.324
年龄*时间	$F(11.00, 15.88) = 0.52$	0.863	0.264
金额*时间	$F(16, 208) = 3.59$	< 0.001	0.216
年龄*金额*时间	$F(144, 208) = 1.05$	0.371	0.421
性别	$F(1, 21) = 3.25$	0.086	0.134
金额	$F(2.57, 54.04) = 23.00$	< 0.001	0.523
时间	$F(1.51, 31.61) = 86.05$	< 0.001	0.804
性别*金额	$F(2.57, 54.04) = 0.56$	0.62	0.026
性别*时间	$F(1.51, 31.61) = 4.24$	0.033	0.168
金额*时间	$F(5.76, 120.91) = 5.77$	< 0.001	0.216
性别*金额*时间	$F(5.76, 120.91) = 0.79$	0.574	0.036
专业	$F(4, 18) = 1.09$	0.392	0.195
金额	$F(2.47, 44.41) = 11.99$	< 0.001	0.4
时间	$F(1.48, 26.61) = 27.31$	< 0.001	0.603
专业*金额	$F(9.87, 44.41) = 1.19$	0.325	0.209
专业*时间	$F(5.91, 26.61) = 0.74$	0.623	0.141
金额*时间	$F(5.33, 96.02) = 1.85$	0.106	0.093
专业*金额*时间	$F(21.34, 96.02) = 0.95$	0.535	0.174
学历	$F(2, 20) = 0.26$	0.777	0.025
金额	$F(2.51, 50.26) = 6.82$	< 0.001	0.254
时间	$F(1.41, 28.25) = 22.64$	< 0.001	0.531
学历*金额	$F(5.03, 50.26) = 0.83$	0.533	0.077
学历*时间	$F(2.82, 28.25) = 0.22$	0.872	0.021
金额*时间	$F(5.61, 112.27) = 2.88$	0.014	0.126
学历*金额*时间	$F(11.23, 112.27) = 1.01$	0.443	0.092
收入	$F(3, 19) = 0.99$	0.419	0.135
金额	$F(2.40, 45.59) = 9.68$	< 0.001	0.337
时间	$F(1.37, 26.09) = 30.20$	< 0.001	0.614
收入*金额	$F(7.20, 45.59) = 0.62$	0.737	0.09
收入*时间	$F(4.12, 26.09) = 0.18$	0.952	0.027
金额*时间	$F(5.47, 103.94) = 2.59$	0.026	0.12
收入*金额*时间	$F(16.41, 103.94) = 0.81$	0.669	0.114

注: 人口学变量的编码方式如下: 性别(男 = 0, 女 = 1); 专业(社会科学类 = 1, 人文类 = 2, 自然科学类 = 3, 工程类 = 4, 艺术类 = 5, 其他 = 6); 学历(大学专科以下 = 1, 大学专科 = 2, 大学本科 = 3, 硕士 = 4, 博士 = 5); 收入(1 = 1000 元以下, 2 = 1000-2000 元, 3 = 2000-3000 元, 4 = 3000-4000 元, 5 = 4000-6000 元, 6 = 6000-8000 元, 7 = 8000 元以上)。

研究 1 中风险倾向(RP)、冲动性(BIS)、计算能力(NS)与认知反思(CRT)对等量转换值的重复测量方差分析结果见表 S6。

研究 2 ($N = 32$): 全部被试均完成了认知能力测评, 但性别、年龄、专业、学历与收入的人口学信息缺失。因此, 我们以概率-时间的等量转换值为因变量, 金额和概率为被试内因素, RP、BIS、NS、CRT 四项指标为被试间因素, 分别进行了混合设计的重复测量方差分析。结果显示, 除 BIS 的主效应($F = 4.85, p = 0.036$)及其与金额水平的交互作用($F = 7.31, p = 0.002$)达到显著水平外, 其余指标均未显示显著效应($F_s < 2.2, p_s > 0.10$) (详见表 S7)。

进一步的简单效应分析检验了不同金额条件下低

冲动组(Low BIS)与高冲动组(High BIS)在等量转换值上的差异。结果显示, 在小金额条件(20 元、50 元)下, 两组差异均不显著($p_s > 0.18$); 在中等金额条件(100 元)下, 低冲动组的等量转换值显著高于高冲动组($b = 6.30, p = 0.041$); 在金额水平为 200 元时差异达到边缘显著($b = 7.58, p = 0.056$); 而在大金额条件(500 元)下, 两组差异最为显著, 低冲动组的等量转换值显著高于高冲动组($b = 14.16, p = 0.007$)。这一结果表明, 冲动性水平对个体的等量转换值具有调节作用, 且该作用在高金额情境下更突出: 在相同概率水平下, 低冲动个体对应的等量延迟时间更长, 而高冲动个体等量延迟时间更短。

上述研究说明, 个体的冲动性程度对等量转换值存在影响。

表 S6 研究 1 中风险倾向(RP)、冲动性(BIS)、计算能力(NS)与认知反思(CRT)对等量转换值的重复测量方差分析结果

变异来源	$F(df_1, df_2)$	p	η^2
RP	$F(1, 21) = 0.60$	0.445	0.028
金额	$F(2.70, 56.66) = 9.50$	< 0.001	0.311
时间	$F(1.43, 30.09) = 44.96$	< 0.001	0.682
RP*金额	$F(2.70, 56.66) = 1.19$	0.32	0.054
RP*时间	$F(1.43, 30.09) = 0.39$	0.613	0.018
金额*时间	$F(5.71, 119.82) = 2.48$	0.029	0.106
RP*金额*时间	$F(5.71, 119.82) = 1.67$	0.137	0.074
BIS	$F(1, 21) = 0.11$	0.742	0.005
金额	$F(2.35, 49.36) = 24.18$	< 0.001	0.535
时间	$F(1.46, 30.64) = 71.74$	< 0.001	0.774
BIS*金额	$F(2.35, 49.36) = 2.17$	0.117	0.094
BIS*时间	$F(1.46, 30.64) = 0.70$	0.462	0.032
金额*时间	$F(5.83, 122.37) = 5.47$	< 0.001	0.207
BIS*金额*时间	$F(5.83, 122.37) = 0.68$	0.665	0.031
NS	$F(1, 21) = 0.60$	0.445	0.028
金额	$F(2.70, 56.66) = 9.50$	< 0.001	0.311
时间	$F(1.43, 30.09) = 44.96$	< 0.001	0.682
NS*金额	$F(2.70, 56.66) = 1.19$	0.32	0.054
NS*时间	$F(1.43, 30.09) = 0.39$	0.613	0.018
金额*时间	$F(5.71, 119.82) = 2.48$	0.029	0.106
NS*金额*时间	$F(5.71, 119.82) = 1.67$	0.137	0.074
CRT	$F(1, 21) = 0.24$	0.629	0.011
金额	$F(2.74, 57.47) = 19.11$	< 0.001	0.476
时间	$F(1.43, 30.08) = 63.11$	< 0.001	0.75
CRT*金额	$F(2.74, 57.47) = 1.34$	0.271	0.06
CRT*时间	$F(1.43, 30.08) = 0.09$	0.853	0.004
金额*时间	$F(5.89, 123.74) = 4.60$	< 0.001	0.18
CRT*金额*时间	$F(5.89, 123.74) = 0.56$	0.755	0.026

表 S7 研究 2 中风险倾向(RP)、冲动性(BIS)、计算能力(NS)与认知反思(CRT)对等量转换值的重复测量方差分析

变异来源	$F(df_1, df_2)$	p	η_p^2
RP	$F(1, 30) = 0.04$	0.846	0.001
金额	$F(1.61, 48.43) = 47.52$	< 0.001	0.613
概率	$F(1.60, 48.08) = 28.48$	< 0.001	0.487
RP * 金额	$F(1.61, 48.43) = 0.49$	0.573	0.016
RP * 概率	$F(1.60, 48.08) = 0.15$	0.819	0.005
金额 * 概率	$F(6.97, 209.19) = 3.86$	< 0.001	0.114
RP * 金额 * 概率	$F(6.97, 209.19) = 0.87$	0.532	0.028
BIS	$F(1, 30) = 4.85$	0.036	0.139
金额	$F(1.79, 53.63) = 58.14$	< 0.001	0.660
概率	$F(1.58, 47.48) = 28.74$	< 0.001	0.489
BIS * 金额	$F(1.79, 53.63) = 7.31$	0.002	0.196
BIS * 概率	$F(1.58, 47.48) = 0.42$	0.611	0.014
金额 * 概率	$F(7.12, 213.59) = 3.97$	< 0.001	0.117
BIS * 金额 * 概率	$F(7.12, 213.59) = 1.78$	0.092	0.056
NS	$F(1, 30) = 1.86$	0.182	0.058
金额	$F(1.60, 48.07) = 11.62$	< 0.001	0.279
概率	$F(1.60, 48.06) = 9.69$	< 0.001	0.244
NS * 金额	$F(1.60, 48.07) = 1.14$	0.318	0.037
NS * 概率	$F(1.60, 48.06) = 0.11$	0.849	0.004
金额 * 概率	$F(7.09, 212.67) = 3.54$	0.001	0.106
NS * 金额 * 概率	$F(7.09, 212.67) = 1.33$	0.236	0.043
CRT	$F(1, 30) = 0.50$	0.485	0.016
金额	$F(1.59, 47.79) = 45.76$	< 0.001	0.593
概率	$F(1.64, 49.24) = 23.30$	< 0.001	0.437
CRT * 金额	$F(1.59, 47.79) = 0.30$	0.694	0.01
CRT * 概率	$F(1.64, 49.24) = 1.76$	0.188	0.055
金额 * 概率	$F(6.96, 208.72) = 3.29$	0.002	0.099
CRT * 金额 * 概率	$F(6.96, 208.72) = 0.85$	0.543	0.028

补充材料 5

各理论模型公式如下:

$$V = A * \left(\frac{1}{1+k} \right)^D \quad (\text{模型 1})$$

$$V = A / (1+kD) \quad (\text{模型 2})$$

$$p(LL) = L \left(\begin{matrix} \beta_I \\ \beta_{xA} \\ \beta_{xR} \\ \beta_{dA} \\ \beta_{dR} \end{matrix} \right) * \left(\begin{matrix} 1 \\ X_{LL} - X_{SS} \\ (X_{LL} - X_{SS}) / X^* \\ D_{LL} - D_{SS} \\ (D_{LL} - D_{SS}) / D^* \end{matrix} \right)$$

$$X^* = \frac{(X_{LL} + X_{SS})}{2} \quad D^* = \frac{(D_{LL} + D_{SS})}{2} \quad (\text{模型 3})$$

以跨期决策为例, 模型 1 和模型 2 中, V 代表个体对选项的主观效用(subjective utility), A 代表将来选项的结果, D 代表延迟时间, k 代表折扣率; 模型 3 中, X_{LL} 代表大而远

(LL)选项的结果, X_{SS} 代表小而近(SS)选项的结果, D_{LL} 代表大而远(LL)选项的时间, D_{SS} 代表小而近(SS)选项的时间, β 是一系列自由参数, 代表回归方程中所有项的权重。

为了同等地比较风险和跨期两个任务, 进行模型拟合时将风险决策中的概率转换为赔率(odds against, $\theta = \frac{1-p}{p}$), 使其与跨期决策中的延迟时间相对应, θ 值越大, 代表不确定性程度越大。

elpd (expected log pointwise predictive density)用于衡量模型在新数据集上的预测准确性。其数值越大, 说明模型预测结果越贴近真实数据生成过程, 预测性能越佳。公式中, y_i 表示未来(尚未观测到的)第 i 个观测值; $p_i(\tilde{y}_i)$ 为真实但通常未知的数据生成分布; $p(\tilde{y}_i | y)$ 则表示基于已有数据得到的后验预测分布(posterior predictive)。该指标能够在理论上反映模型对新数据的预测贴合度。

$$elpd = \sum_{i=1}^n \int p_i(\tilde{y}_i) \log p(\tilde{y}_i | y) d\tilde{y}_i$$

补充材料 6

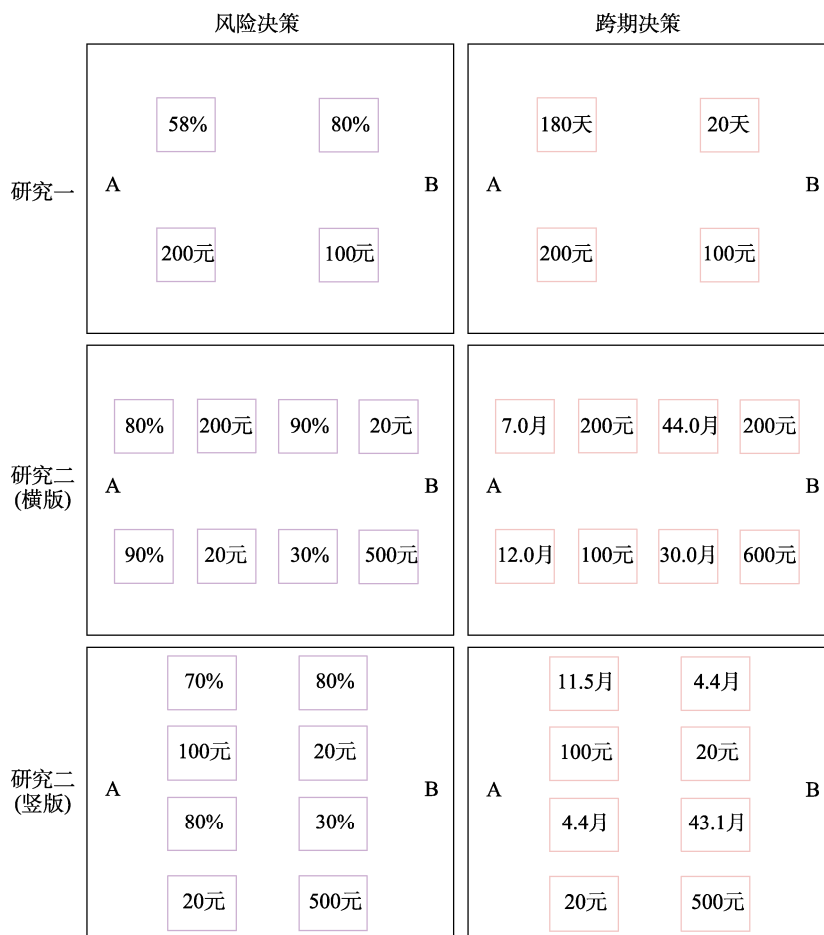


图 S3 研究 1 和研究 2 眼动实验材料示意图

注：图中矩形框表示兴趣区，覆盖了选项的所有属性，仅用于眼动数据分析，在实验过程中被试不可见。

补充材料 7

为检验数据处理的稳健性，我们对比了包含与不包含

剔除试次两种情形下的分析结果。结果显示，在研究 1 和研究 2 中，各指标的效应方向与显著性均一致，表明数据清理未对主要结论产生影响(详见表 S8、S9)。具体结果如下：

表 S8 剔除与未剔除数据条件下研究 1 的决策过程与眼动指标结果对比

决策结果/ 过程	分析指标	决策类型	M		SE		t(30)		p	
			剔除	不剔除	剔除	不剔除	剔除	不剔除	剔除	不剔除
决策时间	决策时间	RC	2.56	2.68	0.12	0.15	-2.80	-1.99	0.01	0.06
		IC	2.85	2.93	0.16	0.18				
选择偏好	选择 LL/LH 选项的比例	RC	67.68%	67.16%	3.66%	3.61%	8.97	9.08	< 0.001	< 0.001
		IC	28.32%	28.64%	4.46%	4.44%				
加工复杂程度	单个注视点平均时长	RC	208.64	210	5.39	5.44	-2.56	-2.20	0.02	0.04
		IC	216.53	216.93	6.35	6.33				
	长注视点比例	RC	14.67%	14.98%	1.44%	1.46%	-2.42	-2.06	0.02	0.05
		IC	16.94%	17.00%	1.75%	1.75%				
		RC 与 0.5 单尾 t 检验	/	/	/	/	-24.53	-24.03	< 0.001	< 0.001
IC 与 0.5 单尾 t 检验	/	/	/	/	-18.84	-18.87	< 0.001	< 0.001		

表 S8 剔除与未剔除数据条件下研究 1 的决策过程与眼动指标结果对比

决策结果/ 过程	分析指标	决策类型	M		SE		t(30)		p	
			剔除	不剔除	剔除	不剔除	剔除	不剔除	剔除	不剔除
加工深度	决策前注视量 比例	RC	98.91%	99.29%	0.47%	0.33%	1.08	1.06	0.29	0.3
		IC	97.92%	98.67%	0.92%	0.59%				
		RC 与 1 单 尾 t 检验	/	/	/	/	-2.33	-2.17	0.01	0.02
		IC 与 1 单 尾 t 检验	/	/	/	/	-2.25	-2.26	0.02	0.02
加工方向	SM 值	RC	-0.04	-0.04	0.06	0.06	-2.48	-2.48	0.02	0.02
		IC	0.19	0.19	0.11	0.11				
		RC 与 0 单 尾 t 检验	/	/	/	/	-0.69	-0.69	0.25	0.25
		IC 与 0 单 尾 t 检验	/	/	/	/	1.68	1.66	0.10	0.05

表 S9 剔除与未剔除数据条件下研究 2 的决策过程与眼动指标结果对比

决策结果/过程	分析指标	决策类型	M		SE		t(31)		p	
			剔除	不剔除	剔除	不剔除	剔除	不剔除	剔除	不剔除
决策时间	决策时间	RC	4.47	4.59	0.23	0.24	0.34	0.37	0.74	0.71
		IC	4.4	4.5	0.26	0.29				
选择偏好	选择 LL/LH 选 项的比例	RC	35.81%	36.00%	4.82%	4.84%	-3.19	-3.12	0.003	0.004
		IC	56.26%	56.18%	4.88%	4.88%				
加工复杂程度	单个注视点平 均时长	RC	198.84	199.25	3.55	3.52	-0.61	-0.54	0.54	0.60
		IC	200.6	200.84	4.08	4.13				
	长注视点比例	RC	10.72%	10.83%	0.83%	0.81%	-0.40	-0.30	0.69	0.77
		IC	11.01%	11.06%	1.03%	1.04%				
		RC 与 0.5 单尾 t 检验	/	/	/	/	-47.58	-48.35	< 0.001	< 0.001
		IC 与 0.5 单尾 t 检验	/	/	/	/	-37.79	-37.45	< 0.001	< 0.001
加工深度	决策前注视量 比例	RC	88.17%	88.48%	1.39%	1.35%	3.15	3.41	0.004	0.002
		IC	84.20%	84.23%	1.52%	1.52%				
		RC 与 1 单尾 t 检验	/	/	/	/	-8.53	-8.53	< 0.001	< 0.001
		IC 与 1 单尾 t 检验	/	/	/	/	-10.41	-10.38	< 0.001	< 0.001
加工方向	SM 值	RC	3.72	3.77	0.17	0.17	4.28	4.4	< 0.001	< 0.001
		IC	3.07	3.08	0.18	0.19				
		RC 与 0 单尾 t 检验	/	/	/	/	18.39	22.23	< 0.001	< 0.001
		IC 与 0 单尾 t 检验	/	/	/	/	16.69	16.46	< 0.001	< 0.001

补充材料 8

为检验被试在研究 1 与研究 2 中倾向于基于维度还是基于选项进行决策, 我们引入了注视位置分布指标 (Fixation Position Distribution; Su et al., 2013), 以反映注视转换的频率与模式。该指标通过比较四类关键兴趣区 (大概率/时间、小概率/时间、大收益、小收益) 的注视比例, 推断信息加工方式: 若注视分布较为均匀, 表明被试可能采用加权整合策略; 反之, 若特定维度 (如大概率信息) 占优, 则更可能反映启发式加工。我们计算每位被

试在风险与跨期任务中四类兴趣区的注视比例, 并进行了重复测量方差分析以检验差异。结果如下:

在研究 1 中, 2 (任务: 风险 vs. 跨期) \times 4 (兴趣区) 的重复测量方差分析显示, 任务和兴趣区具有交互作用, $F(1.88, 56.52) = 9.79, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.25$ 。简单效应分析表明, 在风险任务 (RC) 下, 四类要素的注视比例差异显著, $F(3, 30) = 18.02, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.64$; 在跨期任务 (IC) 下, 该差异也显著, $F(3, 30) = 3.20, p = 0.038, \eta_p^2 = 0.24$ 。事后比较进一步揭示: 在风险任务中, 概率信息获得的注视比例显著高于金额信息。且被试对大概率信息的注

视比例显著高于小概率及大小收益(均 $p_s < 0.001$), 而大小收益之间差异不显著($p = 0.081$)。相比之下, 在跨期任务中, 总体上时间信息较金额信息获得更多注视(部分比较 $p_s < 0.05$), 但较远时间与较近时间、大小收益之间差异均不显著($p_s > 0.05$)。

在**研究 2**中, 2 (任务) \times 4 (兴趣区)的重复测量方差分析结果同样显示, 任务和兴趣区交互作用显著, $F(2.31, 71.60) = 32.75, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.30$ 。进一步的简单效应分析发现, 在风险任务中不同兴趣区注视比例存在显著差异, $F(2.29, 70.97) = 92.18, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.75$; 在跨期任务中差异亦显著, $F(2.09, 64.70) = 8.44, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.21$ 。事后比较结果显示: 在风险任务中, 整体而言, 风险任务中的注视分布主要集中在小概率和小金额要素上。大金额信息的注视比例显著低于小概率($p < 0.001$)和小金额($p < 0.001$), 但与大金额差异不显著($p =$

0.091), 同时, 大金额的注视比例显著低于小概率与小金额(均 $p_s < 0.001$)。在跨期任务中, 时间信息的注视比例更高, 而较远时间信息的注视比例显著高于大金额($p = 0.001$)和小时间($p = 0.005$), 但与小金额无显著差异($p = 0.835$); 同时, 大金额的注视比例显著低于小金额($p = 0.001$)。

以上结果可在一定程度上支持基于维度的加工规则。

补充材料 9

针对研究 1 和研究 2, 采用 Cauchy ($r = 0.707$)、Normal (0, 0.5)和 Normal (0, 1)三类先验分布对主要指标的贝叶斯因子(BF10)进行计算。结果显示, 在不同先验分布设定下, 除了个别指标证据强度在中等与较强水平之间存在差异, 两项研究中各指标的贝叶斯因子均支持相同的假设方向, 且证据等级保持一致(详见表 S10、S11), 说明本文研究结果具有稳健性。具体数据结果如下:

表 S10 研究 1 中主要决策指标的贝叶斯因子敏感性分析

决策结果/过程	分析指标	分析类型	Cauchy ($r = 0.707$)	Normal (0, 0.5)	Normal (0, 1)
决策时间	决策时间	RC vs. IC	4.96	5.48	4.16
选择偏好	选择 LL/LH 选项的比例	RC vs. IC	> 100	> 100	> 100
加工复杂程度	单个注视点平均时长	RC vs. IC	3.03	3.43	2.49
		RC 结果维度 vs. IC 结果维度	20.15	20.84	17.79
		RC 概率维度 vs. IC 时间维度	0.45	0.57	0.34
	长注视点比例	RC vs. IC	2.31	2.66	1.88
		RC vs. 0.5	> 100	> 100	> 100
		IC vs. 0.5	> 100	> 100	> 100
加工深度	决策前注视量比例	RC vs. IC	0.33	0.41	0.23
		RC vs. 1	1.98	1.67	1.12
		IC vs. 1	1.69	1.93	1.32
加工方向	SM 值	RC vs. IC	2.58	2.95	2.1
		RC vs. 0	0.24	0.32	0.18
		IC vs. 0	0.67	0.83	0.52

注: 表中数值为不同先验设定下的贝叶斯因子(BF₁₀)估计结果

表 S11 研究 2 中主要决策指标的贝叶斯因子敏感性分析

决策结果/过程	分析指标	分析类型	Cauchy ($r = 0.707$)	Normal (0, 0.5)	Normal (0, 1)
决策时间	决策时间	RC vs. IC	0.20	0.27	0.14
选择偏好	选择 LL/LH 选项的比例	RC vs. IC	11.59	12.34	9.99
加工复杂程度	单个注视点平均时长	RC vs. IC	0.22	0.3	0.16
		RC 结果维度 vs. IC 结果维度	0.37	0.48	0.28
		RC 概率维度 vs. IC 时间维度	0.80	0.98	0.62
	长注视点比例	RC vs. IC	0.20	0.27	0.15
		RC vs. 0.5	> 100	> 100	> 100
		IC vs. 0.5	> 100	> 100	> 100
加工深度	决策前注视量比例	RC vs. IC	10.63	11.37	9.14
		RC vs. 1	> 100	> 100	> 100
		IC vs. 1	> 100	> 100	> 100
加工方向	SM 值	RC vs. IC	> 100	> 100	> 100
		RC vs. 0	> 100	> 100	> 100
		IC vs. 0	> 100	> 100	> 100
		IC vs. 0	> 100	> 100	> 100

注: 表中数值为不同先验设定下的贝叶斯因子(BF₁₀)估计结果