

# 异质性主体下市场波动异象的行为金融学解释\*

——基于计算金融的方法

胡志浩 刘 倩

**摘要:**本文结合行为金融和计算实验方法建立包含三类交易模式的异质跨期人工金融市场,分别在期望效用和前景理论框架下描述投资者决策方式对资产价格波动特征的影响。其中,基于前景理论框架的情绪交易包含二维风险态度、参考点效应、主观概率扭曲等多种心理因素。通过与上证50ETF波动特征的对比,本文验证了该模型对于异象观测的有效性;通过方差分析,验证了模型中市场环境和心理参数是价格波动特征改变的决定性因素。进一步,本文对不同参数取值下价格形成系统进行收益率横截面分析,发现系统环境和投资者心理因素对市场波动特征的影响机制存在差异,系统环境的改变能够引起收益率极端值增加和市场尾部风险累积,而心理因素仅引发收益率围绕均值的波动增加。这表明投资者认知局限和决策偏好导致的有限理性对市场波动的影响较为间接和温和,维护市场稳定更重要的措施应着眼于市场环境的改善。

**关键词:**波动异象 行为金融 前景理论 计算实验

## 一、引言

全球各大证券市场普遍存在背离有效市场理论的“异象”,股票价格相对其基本价值存在持续性、规律性、系统性偏离,其波动具有一系列典型特征(stylized facts)(Grossman & Shiller, 1981),包括尖峰厚尾、波动率聚集、长记忆性和杠杆效应等。这类真实市场普遍存在的典型特征与传统模型中广泛采用的独立同方差正态分布假设存在偏差,最终影响了有效市场理论的应用价值。一些研究者沿传统范式从应用角度改进经典模型,例如针对波动聚集性的ARCH(自回归条件异方差)模型族,但这只能反映市场波动率的基本特征,不能解释特征成因,无法打破理性范式的窠臼。因此,对市场波动特征和价格形成机制进行深入挖掘具备十分重要的理论和现实意义,这不仅丰富关于定价及市场运行的理论思考,同时还有助于政府针对性地进行引导和监管,维持市场长效运行,深入推动资本市场高质量发展。

面对经典金融理论的困境,行为金融学将投资者行为、决策方式等方面的异质性特征(heterogeneity)纳入金融学的研究框架,从投资者的行为和心理出发研究资产价格形成机制,试图解释诸多市场异象。传统范式研究假设市场交易没有摩擦,非理性行为导致的价格偏离对应无风险套利机会,理性人通过无成本套利将资产价格推回基本价值,此时市场是有效的。行为金融学研究放宽个体理性的假设条件,认为资产价格的持续偏离可能源于非完全理性投资者决策和行为的异质性。深入了解市场中投资群体异质决策行为模式对市场价格的影响,并进一步探究这些影响的作用机制,有助于投资者建立合理的投资观念,规避非理性交易风险,优化投资策略。

\* 胡志浩,中国社会科学院金融研究所、国家金融与发展实验室,邮政编码:100710,电子邮箱:zhihao.hu@nifd.cn;刘倩(通讯作者),中国社会科学院金融研究所,邮政编码:100710,电子邮箱:lqifb@cass.org.cn。感谢匿名审稿专家的宝贵意见,文责自负。

传统范式下的行为金融研究学存在局限性。一方面,在宏观市场层面,实证研究大多采用事后研究法,无法合理刻画预期收益的演进过程,并且从不同角度出发的研究在数据采集和处理过程中难免有挖掘之嫌。另一方面,仅仅颠覆“理性人”假设,并没有充分分析个体选择、后验信念、投资者心态等就使得规范研究困难重重。投资者有限理性或者非理性的心理依托各类心理学研究,本身缺乏统一的理论框架,更难以定性乃至定量分析各类因素对市场均衡价格的影响。与行为金融学的思想不谋而合,计算实验方法同样从微观层面出发关注市场主体的行为方式和异质性,相较于一般均衡框架下的经典定价模型更能捕捉真实市场的交易特征和投资者心态。计算实验微观模型弥补了传统研究范式的不足,为行为金融研究提供了可扩展、深具潜力的研究框架,促进了行为金融理论的发展。计算实验方法以 ABM(agent-based modelling,基于主体的建模)为主要分析工具,将金融市场模拟为相互交流的有限理性异质主体形成的整体,从自下而上的角度探索经济运行过程的方方面面,包括资产定价、市场交易制度、系统稳定性、货币政策传导等问题,并逐渐形成一门新的学科——计算金融学。

ABM 模型中异质行为主体的决策行为通常是高度非线性的,主体在微观层面的行为汇集在一起,导致宏观层面复杂现象的涌现,表现出真实金融市场观察到的一系列典型特征,如过度波动、集群波动、泡沫和崩溃等等。ABM 允许隔离并控制一个变量以挖掘因果关系,无须研究者依靠复杂的计量技术过滤掉其他变量的影响。相较于运用市场数据和计量模型进行数据挖掘和因果关系分析,ABM 能够反映模型的动态属性并通过低成本实验测试结果与参数、假设的相关性,对于挖掘资产价格波动成因具有重要的参考意义。即便模型相较于真实市场时间序列分析并不具备更优越的预测能力,然而其自下而上构成的复杂系统对金融市场某些内生影响因素具有一定的解释力,为市场波动异象的研究提供了捕获关键行为心理特征并建立简约参数化模型的可能。因此,本文结合行为金融与计算实验方法研究市场异质性和投资者微观行为对市场宏观价格运动的影响。

本文结合前景理论和 ABM 方法,构建了资产价格的内生形成动态系统,利用计算实验对投资者心态和市场环境与资产价格波动特征之间的内在关联进行深入挖掘和分析,力求把握资产价格波动特征形成的内在机理,进而为资产市场制度建设和前瞻性防控提供量化的决策依据。本文模型中投资者的交易是跨期的,因而改进了经典财富累积公式,考虑了交易过程中风险资产存量对于财富的影响。本文的主要边际贡献在于:(1)基于前景理论的情绪交易模式将二维风险偏好、参考点效应、主观决策权重扭曲等多种心理因素置于统一框架中进行综合分析。(2)通过方差分析明确了系统环境和投资者心理因素的核心参数对资产价格波动特征改变产生决定性影响。进一步,通过不同参数下的收益率序列的横截面特征分析,本文发现系统环境和投资者心理因素对市场波动影响机制存在差异。系统环境对市场波动影响较大,市场交易制度不完善、投资结构或风格频繁变换会导致波动加剧,极端事件发生概率提高,市场尾部风险累积。同时,投资者在损失厌恶、二维风险态度和主观概率扭曲等心理特征下偏离理性人的最优决策,然而这种系统性偏离引起收益率变化大多仍处于正常值范围内,并未达到极端事件的水平。心理因素的改变客观上增加了整体市场的波动性,却并未累积尾部风险。对比投资者的心理因素和系统环境因素对市场波动特征的影响,心理因素的影响远逊于市场结构切换和价格形成方式的改变。本文研究结果为“建制度、不干预、零容忍”方针提供了理论支持,表明完善资本市场基础环境建设,增强市场交易制度的稳定性、平衡性和协同性对维持资本市场长效运行具有决定性作用。

## 二、文献综述

卡尼曼和特沃斯基(Kahneman & Tversky, 1979; Tversky & Kahneman, 1992)以实验心理学为基础,根据不确定性下的决策偏好提出前景理论,并进一步完善为累积前景理论,其认为人类在决策过程中风险态度并不贯彻始终,而是受到周围环境以及心理因素的影响。

前景理论揭示了人的心理因素和行为特征对决策偏好的影响,因此广泛应用于市场异象和行为

资产定价等研究中。Barberis et al (2001)结合前景理论的价值函数和消费效用函数提出 BHS 模型,体现了损失厌恶心理下资产波动幅度对投资者效用的非对称影响,一定程度上解释了过度波动和股权溢价之谜。Barberis et al (1998)建立包含行为偏差的市场模型,该模型下市场短期内会出现反应不足,长期会出现过度反应现象。Barberis et al (2016)根据累积前景理论构造的因子能较好地解释预期收益率的截面差异。研究结果显示,在控制了传统的风格因子和风险类因子之后,基于前景理论的因子仍然有效。Barberis et al (2021)结合累积前景理论和窄框架建立行为资产定价模型,并对美国市场 23 类异象进行了定量预测,发现模型与其中 14 类存在显著因果关系。Bekierman (2019)采用投资者根据历史收益数据预测未来概率分布的假设,研究符合累积前景理论决策框架的投资者行为对市场已实现波动率的影响。上述研究表明,投资者根据历史收益数据形成预期并基于前景理论决策的假设在一定程度上与真实市场中投资者的决策行为是一致的。最初的前景理论(Kahneman & Tversky, 1979)只能应用于两个备选后果的简单情境中,Tversky & Kahneman(1992)将其完善为累积前景理论,从而可以处理包含多个后果甚至连续后果的复杂前景问题。考虑到需要决策的场景更具复杂度,本文结合累积前景理论建立 ABM 模型,并根据 Rieger & Wang(2008)提出的扩展方法规避了前景理论的排序依赖问题<sup>①</sup>。

国内行为金融研究起步较晚,前景理论相关研究相对较少,且主要偏重于实证研究。何大安(2005)认为,前景理论包含理性选择向非理性选择转化的思想,并结合西蒙非理性理论提出过程理性学说。边慎和蔡志杰(2005)从规范分析角度对比了期望效用理论和前景理论,证明了遵循代数结合律时两者结论相同。张海峰等(2011)基于随机占优方法验证我国投资者整体决策偏好特征符合前景理论。邹高峰等(2013)基于前景理论和随机贴现因子理论,融和中国证券市场投资者的决策偏好和投资行为特征建立资产定价模型并进行了实证检验。张兵(2021)基于中国股市交易数据,从前景理论的视角发现,风险偏好偏差的非理性和套利限制共同作用导致市场特质波动率异象。上述研究验证了前景理论在真实市场中的有效性,对于本文基于前景理论建立情绪交易模式提供了事实支撑。

计算实验方法则为自下而上地探究市场运行内在逻辑提供了可能的路径,可以从微观层面模拟异质主体的行为特征和心理因素(李律成等,2017)。前述提到的行为资产定价分析大多是对理性人假说下的经典资产定价模型的改进,通过扩展投资者行为假设,将投资者的某些心理特征融合进传统模型当中,本质上仍然属于自上而下的一般均衡框架。然而,金融市场是一个典型的自下而上的复杂系统,其中微观层面不同类型的行为主体,包括银行、券商、企业和个体投资者,都会根据信息不断调整自己的购买决策,以此产生的所有市场行动汇集为宏观层面的市场预期(Arthur,1999;唐任伍等,2020)。

一些研究尝试将行为特征与人工金融市场结合,以揭示投资者的行为和心理因素对市场波动的影响。Brock & Hommes(1997,1998)提出自适应信念系统(adaptive belief system, ABS),市场中的异质交易者在不同方式下形成价格预期,并且具有对于外部环境的适应性,可以根据过去的投资表现在不同交易策略中灵活切换。基于 ABS 系统,Dieci et al(2006)提出了包含基本面型和技术型交易者的动态市场切分模型(market fraction model),研究表明该简化模型仍然能复刻现实金融市场展现出的波动率聚集和过度波动等异象。He & Li(2007)基于 MF 模型框架分析价格波动来源,利用系统混沌理论提出两类波动率聚集和长记忆性的动力学机制,一类基于霍普夫分叉,另一类基于不同尺寸的局部稳定吸引子。分析结果表明,当投资者不能转换或者过于频繁转换策略时,趋势跟随行为在市场中占主导作用。Hommes(2006)指出 ABM 模型中过多的参数和自由度使得波动来源的定位分析变得十分困难。在固定比例的 MF 模型下,He & Li(2007)通过极大似然估计系统选择参数,得到一个与 DAX 30 具有相似收益特征的 ABM 模型。本文基于 ABS 自适应系统基本框

<sup>①</sup>累积前景理论中基于排序依赖的主观权重函数存在争议。损失厌恶、二维风险态度等特点从 Kahneman & Tversky(1979)开始有一系列的心理学实验支撑,但是排序依赖没有实验支撑。Bernheim & Sprenger(2020)探讨了排序依赖假设的合理性。本文规避了这一点,主观权重函数不依赖于排序。

架,构建了包含三类交易的价格动态系统。此外,结合前景理论建立 ABM 模型,研究风险偏好和信念偏差如何影响波动异象的工作对本文启发很大。Park(2014)在技术交易者的模型中融合参考点的风险偏好变化特征,令交易者对于风险的态度根据相对损失和收益发生改变。研究发现,心理因素对于波动性聚集和不对称等具有决定性影响,包含动态风险特征的价格动态系统扩大了不同类型投资者市场占比的变化幅度,从而加剧价格波动。Suzuki et al(2009)建立了具有损失厌恶特征的 ABM 模型,其中损失厌恶交易者相较于期望效用理论下的理性交易者,其风险厌恶水平根据往期价格滑动平均形成的价格参考点而分段变化。类似地,Polach & Kukacka(2019)将前景理论中的参考点和损失厌恶特征融入 ABS 系统中,并通过计算实验分析了该类心理因素对动态系统稳定性的影响。Castro et al(2016)发现基于前景理论的 ABM 模型相较于基于期望效用理论的 ABM 模型更贴近真实市场特征。上述文献大多是选取一种或者两种心理因素改进经典 ABM 模型,而本文则涉及前景理论包含的多类心理特征。

市场波动异象分析是近年来国内研究的热点,其中不乏一些研究者采用 ABM 方法。陈莹等(2010)利用计算实验方法研究受协同约束的羊群行为是否引发市场波动。何诚颖等(2021)构建了非主力资金流向的买卖不平衡指标刻画投资者情绪,并揭示 A 股市场投资者情绪引发的波动异象与市场套利限制存在正相关。王朝阳和王振霞(2017)针对中国股市存在的“高波动之谜”,基于 AH 股数据论证了涨跌停制度是 A 股过度波动的重要原因。张维等(2009)从主流经济学、行为金融学和复杂系统科学三个角度梳理了资产价格泡沫与崩溃现象及其成因的国内外相关研究。董志强和李伟成(2019)利用 ABM 方法融合“偏好演化”和“个体选择”,建立了博弈下的人工社会,该模型可涌现出稳健的禀赋效应和自然产权现象,为禀赋效应的起源提供了理论支撑和计算模拟证据。

在计算金融学的研究中,研究者可通过计算机程序模拟市场和经济系统中的预期形成和行为主体的决策过程。本文通过 Python 实现包含异质主体的人工金融市场模型。近年来随着 MESA 等仿真框架的出现,利用 Python 进行 ABM 仿真的便捷性大大提高,且可兼顾 Python 在数据处理和统计分析方面的功能。基于主体建模常用计算平台还包括美国西北大学开发的 NetLogo 平台。NetLogo 具有安装简易、维护性良好、可以进行 3D 可视化等优点,但不能进行极端复杂的建模,适用于短期范式、主体局部互动、网格环境的模型,可以用于社会与自然科学、行程安排与计划、自然资源与环境等领域(李律成等,2017;董志强、李伟成,2019)。

本文结合前景理论和计算实验方法建立异质性主体跨期人工金融市场,挖掘市场波动异象的来源,研究投资者的心理特征对价格波动特征的影响机制。上述相关研究已经取得诸多有价值的结论,为本文提出了重要的研究基础和灵感。

### 三、模型构建

基于 ABS 自适应信念系统,本文将前景理论和 ABM 模型相结合,建立了包含市场切换机制的异质跨期人工金融市场,并给出了价格形成动态系统。该模型包含三类交易模式:理性模式下交易者遵循期望效用理论,根据期望效用最大化原则进行决策;情绪模式则基于前景理论框架,其决策过程受到二维风险偏好、参考点效应、主观概率扭曲等多种因素影响;噪音交易则是对市场结构完整性的补充。本文模型采用做市商制度,基于市场总体的溢出需求形成风险资产价格。

本文模型前提假设为以下几点:(1)无交易成本和税收,资产市场是无摩擦的,而且市场流动性是充分的;(2)不考虑背景风险、通货膨胀、人力成本、投资者负债等因素对于投资者财富的影响;(3)市场中供应两种资产:无风险资产和风险资产。无风险资产是完全弹性供应的,其日度收益率记为  $r$ ,总收益率  $R=1+r$ ;风险资产股息的发放服从随机过程  $\{d_t\}_{t=1}^{\infty}$ 。我们将风险资产在  $t$  交易期的价格记为  $p_t$ ,资产价格和股息发放都是随机过程。

#### (一)理性交易

理性交易模式下投资者符合“理性人”假设,相信市场是有效的,投资者认为资产价格会向着基

本价值回归,而基本价值由资产未来现金流的折现价值决定。理性交易下投资者的风险厌恶水平是固定的,并不以周围的环境或者财富的动态变化转移。

本文参照 Brock & Hommes(1998)和 Dieci et al(2006)中基本面交易者的行为模式刻画理性交易。假设某时刻市场随机选取部分投资者进行交易,交易者按照当下风险资产的价格及自身获得的信息进行资产配置,配置完成后即退出市场不再交易,则  $t+1$  时刻投资者的财富总量可以表示为:

$$W_{t+1} = RW_t + z_t(p_{t+1} + d_{t+1} - Rp_t) \quad (1)$$

本文投资者在整个交易阶段有多个交易机会,  $z_t$  为投资者在  $t$  交易期买卖风险资产的数量,则  $t+1$  期投资者的财富总量  $W_{t+1}$  为:

$$W_{t+1} = (z_0 + z_1 + \dots + z_t)(p_{t+1} + d_{t+1}) + R[W_t - (z_0 + z_1 + \dots + z_{t-1})(p_t + d_t) - z_t p_t] \quad (2)$$

$$= \sum_{i=0}^t z_i(p_{t+1} + d_{t+1}) + R\left[W_t - \sum_{i=0}^{t-1} z_i(p_t + d_t) - z_t p_t\right] \quad (3)$$

$$= RW_t + [p_{t+1} + d_{t+1} - (p_t + d_t)R] \sum_{i=0}^{t-1} z_i + (p_{t+1} + d_{t+1} - Rp_t)z_t \quad (4)$$

$$= RW_t + (p_{t+1} + d_{t+1} - Rp_t) \left( \sum_{i=0}^{t-1} z_i + z_t \right) - d_t R \sum_{i=0}^{t-1} z_i \quad (5)$$

与式(1)相比,式(5)中第二项包括风险资产存量在当前交易期的超额收益,尾项表示风险资产存量的股息对累积收益的影响,其不包括随机变量,因此并不影响期望效用的计算。本文采用常数绝对风险厌恶效用函数 CARA 衡量理性交易下的财富效用  $U(W)$  :

$$U(W) = -\exp(-aW) \quad (6)$$

其中,  $a > 0$  是风险厌恶系数,对所有理性交易模式下的投资者都是相同的常数。 $t$  时期理性模式的交易者根据期望效用最大化原则对未来财富总量  $W_{t+1}$  进行预测,等价于以下优化问题:

$$\max_{z_{r,t}} E_{r,t}[U(W_{t+1})] \Leftrightarrow \max_{z_{r,t}} E_{r,t}[W_{t+1}] - \frac{a}{2} V_{r,t}(W_{t+1}) \quad (7)$$

其中,  $z_{r,t}$  是理性策略下使得预期财富总量最大的交易量,  $E_{r,t}$  和  $V_{r,t}$  表示理性策略下的交易者基于公共信息域  $F_t = \{p_1, p_2, \dots, p_t; d_1, d_2, \dots, d_t\}$  计算的条件期望和条件方差。记  $t+1$  时期单一份额的风险资产相较于总收益率为  $R$  的无风险资产,超额收益  $R_{t+1}$  为:

$$R_{t+1} \triangleq p_{t+1} + d_{t+1} - Rp_t \quad (8)$$

根据财富累积公式(5),由于  $t$  时刻财富总量  $W_t$  以及往期交易量  $z_{r,i}$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, t-1$ ) 俱为已知量,因此得到式(9):

$$S_{r,t} \triangleq \sum_{i=0}^{t-1} z_{r,i} \quad (9)$$

上式为风险资产的存量,将式(8)和式(9)代入式(7),则期望效用最大化对应如下优化问题:

$$\max_{z_{r,t}} E_{r,t}[U(W_{t+1})] = \max_{z_{r,t}} (S_{r,t} + z_{r,t}) E_{r,t}[R_{t+1}] - \frac{a}{2} (S_{r,t} + z_{r,t})^2 V_{r,t}(R_{t+1}) \quad (10)$$

将式(10)等号右侧看作  $z_{r,t}$  的函数,关于  $z_{r,t}$  求导数取极值得到风险资产交易量的最优解  $z_{r,t}$  为:

$$z_{r,t} = \frac{E_{r,t}[R_{t+1}]}{aV_{r,t}(R_{t+1})} - S_{r,t} \quad (11)$$

为了给出式(11)的显示解,本文假设理性交易下投资者认为超额收益  $R_{t+1}$  的条件方差是一个常数,即  $V_{r,t}(R_{t+1}) = \sigma_r^2$ ,且投资者对于风险资产价格预期符合均值回归,即使短期内资产价格偏离了基本价值,长期来看仍具有收敛到基本价值的趋势,则投资者对下一期资产价格  $p_{t+1}$  的条件期望和条件方差可表示为:

$$\begin{aligned} E_{r,t}[p_{t+1}] &= p_t + (1 - \alpha)(E_{r,t}[p_t^*] - p_t) \\ V_{r,t}(p_{t+1}) &= \sigma_r^2 \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $\alpha \in [0, 1]$  表示投资者朝着基本价值调整自己价格预期的幅度,  $p_t^*$  表示风险资产在  $t$  交易期的基本价值。 $\alpha$  越大,则当前价格偏离基本价值影响越小。 $\alpha = 0$  时,投资者认为资产价格在下一个交易期立即收敛到基本价值;  $\alpha = 1$  时,投资者认为风险资产的基本价值完全没有任何有效信息,此时只依靠资产的当期价格预测未来价格  $p_{t+1}$ 。

当市场中只存在理性交易者并且风险资产没有外部供应时,由供需相等推出的均衡价格满足:

$$Rp_t = E[p_{t+1} + d_{t+1}] \quad (13)$$

此时,风险资产基本价值完全由风险资产未来股息现金流贴现得出,根据股息贴现模型计算如下:

$$p_{t+1}^* = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{E[d_{t+k}]}{(1+r)^k} \quad (14)$$

假设股息过程  $\{d_t\}_{t=1}^{\infty}$  是独立同分布的,  $d_t \sim N(d, \sigma_d^2)$ , 则由式(14)风险资产的基本价值为常数:

$$p^* = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{d}{(1+r)^k} = \frac{d}{r} \quad (15)$$

将式(8)和式(12)代入式(11),并结合式(15),可得到  $t$  时期投资者处于理性交易模式下的风险资产需求量  $z_{r,t}$  为:

$$z_{r,t} = \frac{(1 - \alpha)(p^* - p_t) + d - rp_t}{a(\sigma_r^2 + \sigma_d^2)} - S_{r,t} \quad (16)$$

## (二)情绪交易

投资者行为相对于“理性”假设的偏差广泛存在于各类资产市场的投资者行为中,并且投资者的微观行为和市场价格宏观运动之间存在千丝万缕的联系。通过基于主体的建模方法,结合前景理论,本文建立微观心理因素和宏观价格运动的内在逻辑脉络。本文基于前景理论模拟情绪交易下投资者的选择行为,其价值函数和主观权重的构造包含多种心理因素,包括决策过程中的参考点依赖、收益和损失状态下风险态度不同的反射效应、损失厌恶心理,以及主观权重扭曲导致的确定性效应。

在期望效用理论中,情绪因素是被屏蔽在决策过程之外的,理性交易的评估过程中只关注投资者最终财富状况的总体效用。而情绪交易下投资者关注财富总量相对参考点的收益和损失状况。此外,理性交易下投资者的风险厌恶水平是个常数;情绪交易下投资者对于风险的态度随相对损益改变,在获利时是风险厌恶的,在蒙受损失的时候是风险偏好的,其主观效用还受到决策权重扭曲的影响,高估小概率事件的发生概率,而低估大概率事件的可能性。需要强调的是,情绪交易相对于理性交易模式存在系统性偏差,但这并不表示其完全排斥理性,不能等同于毫无章法的噪音交易。

1. 模型概述。累积前景理论给出了前景值计算的解析表达。将买卖某数量风险资产的后果按照损益的不同划分为  $m$  个亏损的后果  $x_{-m}, x_{-m+1}, \dots, x_{-1}$  和  $n$  个盈利后果  $x_1, x_2, \dots, x_n$  以及中立后果  $x_0$ 。假设后果  $x_i$  发生的概率为  $P_i$  且  $\sum_{i=-m}^n P_i = 1$ 。在累积前景理论下,该行为选项可以表达为:

$$(x_{-m}, p_{-m}; x_{-m+1}, p_{-m+1}; \dots; x_0, p_0; x_1, p_1; \dots; x_n, p_n)$$

其对应的前景值计算公式为：

$$CPT = \sum_{i=-m}^n \pi(x_i) v(x_i) \quad (17)$$

其中， $v(\cdot)$  为价值函数， $\pi(\cdot)$  为主观权重函数。

Rieger & Wang(2008)将有限结果的前景理论推广到任意概率分布的光滑前景理论(smooth prospect theory, SPT),利用直方图对连续分布函数进行逼近,将连续情形的计算转化为离散情形。SPT 保证当连续后果分布  $x \in R$  时,将  $x$  划分为等长的  $n$  个区间  $[x_i, x_{i+1}]$ ,  $i \in [0, n]$ 。当  $n \rightarrow \infty$  时,离散分布的直方图收敛到原始分布  $x$ 。基于前景理论进行决策时,投资者需要估计风险资产价格,风险资产价格作为随机过程,具有连续分布函数。因此,本文采取 SPT 扩展方法计算前景值,消除原始理论不连续的影响。

考虑一项决策包含  $n$  个后果  $x_i$ ,  $x_i \in R$ , 则 SPT 前景值计算如下：

$$SPTV = \frac{\sum_{i=1}^n w(P_i) v(x_i)}{\sum_{i=1}^n w(P_i)} \quad (18)$$

相较于累积前景理论前景的计算公式(17),SPT 前景值式(18)进行了正则化处理。类似于 Tversky & Kahneman(1992),本文选取价值函数为：

$$v(X_{t+1}) = \begin{cases} X_{t+1}^\varphi, & X_{t+1} \geq 0 \\ -\lambda(-X_{t+1})^\beta, & X_{t+1} < 0 \end{cases} \quad (19)$$

其中,价值函数  $v(X_{t+1})$  反映了情绪交易下投资者的二维风险态度和损失厌恶特征。S 型价值函数在原点处不连续,原点右侧的收益部分是凸函数,在左侧损失部分则是凹函数,表明了投资者对于风险态度随相对损益变化,收益时是风险厌恶的,损失时是风险偏好的。参数  $\varphi$  和  $\beta$  分别描述了风险厌恶和风险偏好的水平,  $\varphi, \beta \in (0, 1)$ 。相较于同等的收益,投资者对于同等规模的损失更为敏感,参数  $\lambda$  即描述了损失厌恶心理,  $\lambda \geq 1$ 。“二维风险态度”和损失厌恶是现实投资者非常常见的心理活动。设定主观权重函数  $w(P)$  为：

$$w(P) = \frac{P^\eta}{[P^\eta + (1 - P)^\eta]^{1/\eta}} \quad (20)$$

其中,参数  $\eta$  反映了主观权重函数相对于真实概率分布的扭曲程度。权重函数表明投资者评估行为后果发生的概率并不是客观概率  $P$ , 而是客观概率  $P$  经过权重函数  $w(P)$  的扭曲。这种扭曲导致投资者明显高估小概率事件,低估确定性事件,造成对尾部风险和一些大概率事件不合理的估计,也称为确定性效应。

情绪交易下的决策框架主要分为三个阶段:首先,前景建立阶段,将投资者在不确定性下买卖风险资产的问题转化为前景理论框架下可以处理的问题,使个体任何一个可能采取的行为都可以计算对应的前景值。其次,前景估计阶段,计算投资者当下可选择的行为对应的前景值。最后,前景选择阶段,选择最大前景值对应的行为选项。

2. 前景建立。前景建立是指将投资者在不确定性下买卖风险资产的问题转化为前景理论框架下可以处理的问题,使个体任何一个可能采取的行为都可以计算对应的前景值。假设情绪交易模式下投资者在当前  $t$  交易期买卖风险资产的数量为  $z_{p,t}$ , 则  $t+1$  交易期的财富总量  $W_{t+1}$  同样可由式(5)给出。

类似 Barberis et al(2001),本文采取上个交易期无风险收益率下等额资产的现值作为参考点,则根据式(5)相对损益  $X_{t+1}$  为：

$$X_{t+1} = W_{t+1} - W_t R = (p_{t+1} + d_{t+1} - Rp_t) \left( \sum_{i=0}^{t-1} z_i + z_{p,t} \right) - d_t R \sum_{i=0}^{t-1} z_i \quad (21)$$

根据式(21),情绪交易下  $t$  时期的资产需求量  $z_{p,t}$  和  $X_{t+1}$  是一一对应的;如果  $z_{p,t}$  确定,则风险资产价格波动以及股息决定了相对损益  $X_{t+1}$ ,进一步决定了该行为选项的价值函数及前景值。个体通过计算选取前景值最高时对应的  $z_{p,t}$ ,决定自己采取何种行动,即买入或者卖出多少风险资产。

3. 前景估计。前景估计阶段需要计算投资者所有行为选项对应的前景值。其中,风险资产价格  $p_{t+1}$  是一个随机变量。假设情绪交易模式下的投资者预期  $t+1$  交易期的资产价格和股息分别为  $\hat{p}_{t+1}$ ,  $\hat{d}_{t+1}$ ,则根据式(21)投资者对相对损益  $X_{t+1}$  的估计值  $\hat{X}_{t+1}$  由式(22)给出:

$$\hat{X}_{t+1} = (\hat{p}_{t+1} + \hat{d}_{t+1} - Rp_t) \left( \sum_{i=0}^{t-1} z_{p,i} + z_{p,t} \right) - d_t R \sum_{i=0}^{t-1} z_{p,i} \quad (22)$$

本文采取 Markowitz 的假设,情绪交易模式下的投资者认为风险资产价格波动同样服从独立同分布的随机过程,  $\hat{p}_{t+1} \sim N(\mu, \sigma^2)$ ,  $\hat{d}_{t+1} \sim N(0, \sigma_1^2)$  且相互独立。则  $\hat{p}_{t+1} + \hat{d}_{t+1}$  概率密度函数  $P(x)$  为:

$$P(x) = \frac{\exp^{-\frac{(\hat{p}_{t+1} + \hat{d}_{t+1} - \mu)^2}{2(\sigma^2 + \sigma_1^2)}}}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma_1^2} \sqrt{2\pi}} \quad (23)$$

将式(22)代入式(23)得到  $\hat{X}_{t+1}$  的概率密度公式:

$$P(\hat{X}_{t+1}) = \frac{\exp^{-\frac{(\hat{X}_{t+1} + d_t R S_{t-1} + Rp_t - \mu)^2}{2(\sigma^2 + \sigma_1^2)}}}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma_1^2} \sqrt{2\pi}} \quad (24)$$

其中,  $S_{t-1}$  表示从初始时刻到  $t-1$  期间交易量之和,即  $t$  交易期风险资产的存量或者持有量。将式(24)代入主观权重函数式(20),即可计算情绪交易下投资者的决策权重  $\omega(P)$ 。进一步根据 SPTV 公式(18),计算价值函数  $v(X_{t+1})$  和主观权重函数  $\omega(P)$  的加权平均,得到风险资产交易量为  $z_{p,t}$  时对应的前景值。

下面沿着前景理论的框架梳理上面的过程。针对如何在风险资产和无风险资产之间进行合理配置以获得最大收益的问题,对应采取的行为选项为在当前交易期买(卖)份额<sup>①</sup>为  $z_{p,t}$  的风险资产。情绪交易模式下的投资者对于下一时期风险资产价格估计  $\hat{p}_{t+1}$  和股息估计  $\hat{d}_{t+1}$  决定了  $\hat{X}_{t+1}$ ,进一步决定了交易  $z_{p,t}$  份额的风险资产对应的前景值。

4. 前景选择。在前景选择阶段,情绪交易下的投资者选择最大前景值对应的行为选项,将上述连续非线性模型离散化并进行计算。按照概率分布式(24)选取  $n$  个样本点  $\hat{X}_{t+1}^i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,对每一个  $\hat{X}_{t+1}^i$  计算对应的主观概率  $\omega[P(\hat{X}_{t+1}^i)]$  以及对应的价值函数  $v(\hat{X}_{t+1}^i)$ ,根据式(18)计算交易量为  $z_{p,t}$  时的离散前景值:

$$SPTV(z_{p,t}) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega[P(\hat{X}_{t+1}^i)] v(\hat{X}_{t+1}^i)}{\omega[P(\hat{X}_{t+1}^i)]} \quad (25)$$

给定时期  $t$  后,交易量  $z_{p,t} \in [-M, N]$  的取值是有限的。具体来讲,风险资产可卖出的量不超过当前的持有量,即  $M \leq S_{t-1}$ 。而在不考虑融资融券的手段之下,能够买入资产量也以当前的资金规模能支撑的值为上限。结合市场实际,假设做市商规定下一期风险资产价格的波动以 10 个百分点为上限,即  $p_{t+1} \in [0.9p_t, 1.1p_t]$ ,则  $N = \frac{W_t}{0.9p_t} - S_{t-1}$ 。由遍历样本点选取最大前景值对应的  $z_{p,t}$ ,即得到本期采取情绪策略的交易者对风险资产的需求量  $z_{p,t}$ 。

<sup>①</sup>  $z_{p,t} > 0$  表示买入;  $z_{p,t} < 0$  表示卖出。



$$\max_{z_{p,t}} SPTV(z_{p,t}) \quad s. t. \quad -S_{t-1} \leq z_{p,t} \leq \frac{W_t}{0.9p_t} - S_{t-1} \quad (26)$$

(三) 噪音交易

为了模拟真实金融市场中普遍存在的噪音交易,本文假设市场总是存在部分噪音交易。噪音交易对资产的需求量完全是随机的,假设其在  $t$  交易期对于风险资产的需求量  $z_{n,t}$  服从均值为零、方差为  $\sigma_n^2$  的正态分布,  $z_{n,t}$  由式(27)给出:

$$z_{n,t}(p_t) = u_t, u_t \sim N(0, \sigma_n^2) \quad (27)$$

(四) 切换机制

本文市场上执行各类交易的投资者比例随着各类交易模式的盈利表现而变化。记  $t$  时期各类模式下的投资者在市场中所占的比例为  $q_{h,t}$ ,  $q_{h,t} \in [0, 1]$ ,  $h = \{1, 2, 3\}$ 。其中,  $q_{1,t}$  表示理性交易者的比例,  $q_{2,t}$  表示情绪交易者的比例,  $q_{3,t}$  表示噪音交易者的比例。市场运行过程中所有交易者都没有额外获取的私人信息,交易者可以在三种模式之间自由切换。切换规则如下:

$$P(q_{h,t}) = \frac{\exp(\omega U_{h,t-1})}{Z_t}, Z_t = \sum_{h=1}^3 \exp(\omega U_{h,t-1}) \quad (28)$$

其中  $\omega \geq 0$ , 表示交易者向收益表现较好模式转变的敏感度;  $\omega = 0$ , 则交易者以相同的概率随机处于某种模式制下; 另一种极端情况  $\omega = \infty$ , 则交易者全部倒向上一期收益表现最好的模式, 因此在这种切换机制下, 市场可以表现出羊群行为。  $U_{h,t-1}$  表示  $h$  类模式下投资者从  $t-1$  到  $t$  时期风险资产价格变化导致的财富变动情况:

$$U_{h,t-1} = W_{h,t} - RW_{h,t-1} \quad (29)$$

(五) 价格形成机制

本文假设存在做市商根据市场供需调整风险资产的价格, 相较于 Brock & Hommes(1998)采用的均衡价格下经典的市场出清方法, 该方式更加接近真实金融市场的交易制度, 为进一步研究不同流动性下价格的动态变化提供了可能。假设市场中风险资产不存在外部供应。沿用上文记号, 每个交易期市场对风险资产溢出需求量  $z_{e,t}$  为:

$$z_{e,t} = q_{1,t}z_{r,t} + q_{2,t}z_{p,t} + q_{3,t}z_{n,t} \quad (30)$$

其中,  $z_{r,t}$  为理性交易者在  $t$  交易期对风险资产的需求量, 由式(16)给出;  $z_{p,t}$  为情绪交易者在  $t$  交易期对风险资产的需求量, 由式(26)给出;  $z_{n,t}$  表示噪音交易者在  $t$  交易期对风险资产的需求量, 由式(27)给出;  $q_{h,t}$  表示  $t$  交易期三类交易在市场中分别占的比例,  $h = \{1, 2, 3\}$ , 由式(28)给出。每个交易期末, 做市商根据市场上的溢出需求  $z_{e,t}$  调整下一期风险资产的价格。因为本市场不存在外部供应, 所以  $z_{e,t} > 0$ , 则价格上涨;  $z_{e,t} < 0$ , 则价格下跌, 价格形成机制由下式表示:

$$p_{t+1} = p_t + \tau z_{e,t} + \hat{\delta} \quad (31)$$

其中,  $\tau$  表示价格受溢出需求影响的敏感度,  $\tau > 0$ ;  $\hat{\delta}$  表示一个随机扰动,  $\hat{\delta} \sim N(0, \hat{\sigma}^2)$ 。需求敏感度  $\tau$  可以近似解释为市场流动性的倒数, 在相同规模订单冲击下, 敏感度  $\tau$  越大, 市场流动性越差, 价格波动幅度大; 敏感度数值越小, 市场流动性充沛, 此时可以很快消化大量订单的影响, 价格波动幅度低。至此本文构建了一套根据不同决策方式进行交易的金融市场价格形成机制。综合上文不同决策思维下的动态资产价格形成系统表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{t+1} = p_t + \tau z_{e,t} + \hat{\delta} \\ z_{e,t} = q_{1,t}z_{r,t} + q_{2,t}z_{p,t} + q_{3,t}z_{n,t} \\ z_{r,t} = \frac{(1-\alpha)(p^* - p_t) + d - rp_t}{a(\sigma_r^2 + \sigma_d^2)} - S_{r,t} \\ z_{p,t} = \arg \max_{z_{p,t}} SPTV(z_{p,t}) \\ z_{n,t}(p_t) = u_t, u_t \sim N(0, \sigma_n^2) \end{array} \right. \quad (32)$$

在每个交易期  $t$ , 市场中对风险资产的总需求  $z_{e,t}$  由不同交易模式下行为主体的订单  $z_{r,t}, z_{p,t}, z_{n,t}$  汇集而成, 各类交易在市场中所占的比例根据切换机制随时间变化。在当前时期投资者根据不同方式形成对未来资产价格  $p_{t+1}$  的预期, 据此计算当前对风险资产的需求量并发送给做市商。市场中的做市商根据当前价格  $p_t$  和对风险资产的总需求  $z_{e,t}$  调整下一期价格  $p_{t+1}$ 。

需要强调的是, 在每期人工市场的运行中, 行为主体根据风险资产的现价和对未来价格的预期, 基于三类决策方式决定对风险资产的需求量, 而该需求量直接反映到价格形成过程中, 因此价格是内生的动态系统产生的, 模型中每个因素最终会在价格上有所体现。在每个交易期, 从市场微观结构上看三类不同策略之间的主体没有直接的沟通, 所有的影响都是通过价格的变动进行传导的。

#### 四、计算实验

为了验证模型有效性, 并对投资者心理特征及行为模式对市场价格波动特征的影响进行深入分析, 本文需要观察模型是否能够较好地反映出实际的市场波动特征。我们对式(32)生成的收益序列和市场真实数据进行统计检验对比, 验证模型产生的价格序列与真实金融市场表现出相似的典型特征。我们选取上证 50ETF 作为研究对象, 采用 2005 年 2 月 13 日到 2021 年 3 月 4 日共 3901 个日度数据研究股票价格波动特征, 数据来源于 Wind 数据库。研究上证 50ETF 波动率一般以日收益率作为考察变量, 股票日收益率  $\rho_t$  以相邻两交易日收盘价格对数的一阶差分表示, 即:

$$\rho_t = \ln \frac{p_t}{p_{t-1}} \quad (33)$$

我们还计算了绝对收益  $\rho_t$  以及平方收益  $\rho_t^2$ 。计算实验中采用的参数取值在表 1 中给出, 令无风险资产的日度收益率  $\rho = 0.001$ 。

表 1 计算实验的参数选取

市场交易			理性交易				情绪交易					噪音交易		
$\omega$	$\tau$	$\hat{\sigma}^2$	$d$	$\sigma_a^2$	$a$	$\alpha$	$\mu$	$\sigma^2$	$\sigma_i^2$	$\eta$	$\varphi$	$\beta$	$\lambda$	$\sigma_n^2$
0.745	0.001	0.01	0.25	1.6	2	0.01	20	16	1.6	0.65	0.88	0.88	2.25	0.1

接下来说明表 1 各项参数选取依据。在市场部分,  $\omega$  表示交易者向收益表现较好的模式转变的敏感度,  $\omega \geq 0$ 。He & Li (2015) 基于 DAX 30 数据给出了切换机制下  $\omega$  估计值为  $\omega = 0.745$ , 该结果极大降低了参数选取的自由度。我们沿用该值进行计算, 并在下文进一步分析了  $\omega$  取值对市场波动特征产生的影响。 $\tau$  表示价格受溢出需求影响的敏感度,  $\tau > 0$ 。在相同规模订单冲击下,  $\tau$  的取值对市场波动性具有直接而显著的影响。我们经过多次实验, 选取  $\tau = 0.001$  作为基准值。该值可理解为在市场出清阶段, 对风险资产每一千份额的溢出需求会使报价高出一个单位。

在交易模式部分, 随机分布的均值和方差选取范围较广, 自由度高, 并且难以在现实市场中找到对应的参考<sup>①</sup>。例如理性交易中的股息过程分布的均值和方差  $d$  和  $\sigma_a^2$ , 情绪交易中价格预期分布的均值  $\mu$  和方差  $\sigma^2$ , 股息预期方差  $\sigma_i^2$ , 以及噪音交易下订单产生的方差  $\sigma_n^2$ 。我们基于多次实验结果选定表 1 取值作为计算实验的基准值。

在心理特征方面, 理性交易者的风险厌恶系数  $a$  作为一个固定标量, 并不影响系统的波动性质。Tversky & Kahneman(1992)通过一系列心理学实验估计  $\varphi = \beta = 0.88$ 。 $\lambda \geq 1$  是损失厌恶系数, 数值越高表示同等规模的损失造成的负面效用越大, 即损失厌恶程度越高。Kahneman(2003)利用行为实验调查给出参考值  $\lambda \approx 2.25$ 。

在表 1 参数选取下, 本文建立起完全切换机制下包含三类交易的人工金融市场, 市场中有 100 个行为主体, 每次实验运行  $n$  个交易期。上证 50ETF 样本中包含 3901 个日度交易数据, 因此实验

<sup>①</sup>对计算实验建模一个非常广泛的批评是参数的设置和选取自由度过高。越贴近真实市场, 参数越多, 且部分参数难以在真实金融市场中找到对应(Hommes, 2006)。

选取近似的  $n = 3500$ 。动态资产价格形成系统(见式(32))中包含诸多随机变量和扰动,因此每次运行人工金融市场产生的价格序列并不是一成不变的<sup>①</sup>。本文在满足尖峰厚尾特征的仿真结果中随机选择一次运行结果进行深入分析<sup>②</sup>。

(一) 格式化特征

1. 正态性。图 1 对比展示了上证 50ETF 和计算模型产生的收益率和波动率的分布直方图,可以观察到收益率序列均呈现明显的集群效应,一段内大幅波动紧跟着大幅波动,平稳波动紧跟着相对平稳的波动。波动率分布具有明显的“尖峰厚尾”性,左尾部的概率分布密度远大于正态分布下左尾部的分布密度。本文对收益率和波动率进行了统计特征分析,结果如表 2 所示。

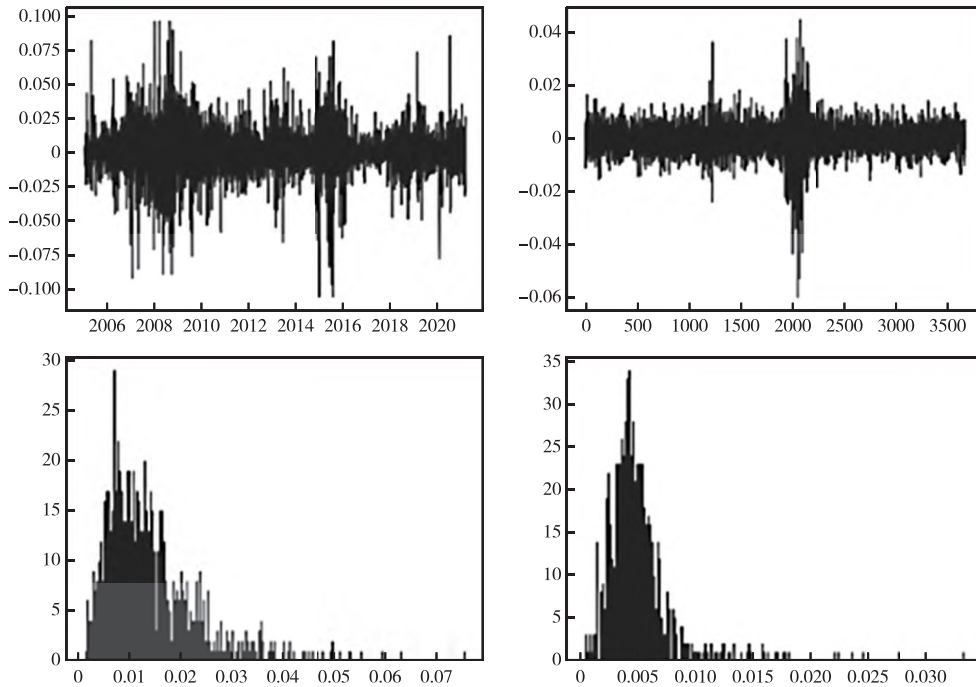


图 1 收益率序列  $R_t$  和波动率分布直方图

注:左列为上证 50ETF 数据,右列为计算实验模拟数据结果。

表 2 价格序列的统计特征

	均值	方差	峰度	偏度	Jarque-Bera	p-value
50ETF 收益率	0.00037	0.01725	4.92	-0.17	3946	0.000***
计算模型收益率	0.00047	0.00603	9.03	-0.37	3237	0.000***
50ETF 波动率	0.01450	0.00957	4.98	1.83	1244	0.000***
计算模型波动率	0.00523	0.00319	17.57	3.32	10710	0.000***

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别表示在 1%、5%、10% 的水平上显著。

表 2 表明,上证 50ETF 和模型收益序列分布密度峰度均大于 3,具有明显的尖峰特征。将两者进行 Jarque-Bera 检验,结果远大于 0,p-value 均为 0.000,表明收益率序列均显著偏离正态分布。此

①在运行 100 轮金融市场的结果中,其中具有尖峰特征收益序列有 68 轮,具有左偏态特征有 42 轮,同时尖峰左偏的结果有 35 轮。

②本文构造的人工金融市场不考虑经济周期、信息冲击等的影响,只探讨投资者在不同的交易信念及行为特征下做出的不同选择对风险资产价格的影响。相对于基于真实市场数据的实证检验和因果的显著性分析,本文从模型上已经对问题进行了降维,因此不考虑数据的预处理阶段,比如计算窗口的选取、噪声的剥离等,直接采用模型产生的风险资产的价格序列进行分析。

外,两者的波动率统计分析如图1吻合,长尾聚集于高波动的右侧。相较于50ETF,计算模型序列峰度值偏高,“尾部”更厚,可能由于模型相较于真实市场无论是参与者的行为或是复杂度都经过了简化,模拟过程中交易者的行为更容易趋同,因此波动率更容易出现极端值。

2. 相关性。首先对上证50ETF和计算实验结果的收益率序列进行平稳性检验。ADF单位根的检验结果p-value分别等于0.01和0.000。因此收益率序列均不存在单位根,是平稳序列。

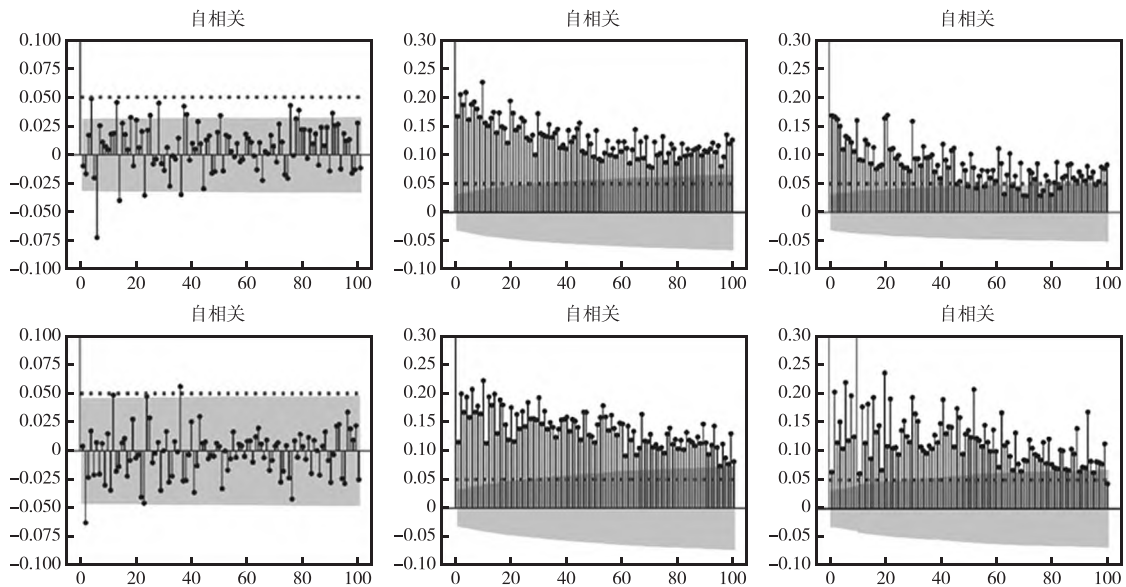


图2 收益  $\rho_t$  (左列)、绝对收益  $|\rho_t|$  (中列)和平方收益  $\rho_t^2$  (右列)自相关图

注:上一行为上证50ETF的数据,下一行为模型数据。

其次,考虑滞后阶数100以内的相关性检验,图2展示了上证50ETF和模型数据收益序列的自相关性,表明  $\rho_t$  自相关系数从滞后5阶开始均小于0.05,模型数据从滞后38阶开始均小于0.05,收益率分布自相关性较弱。而绝对收益  $|\rho_t|$  和平方收益  $\rho_t^2$  的序列相关系数均远大于0.05,衰减缓慢且绝对收益自相关系数大于平方收益自相关系数,该特征表明模型产生的时间序列波动具有和上证50ETF类似的长记忆性或者幂律行为特征。

再次,将上证50ETF和动态系统(见式(32))的价格序列的统计特征进行对比,市场数据和模型价格序列均表现出一系列典型特征:(1)市场收益率和波动率分布的“尖峰厚尾”和偏态。(2)波动率聚集。资产价格剧烈波动后跟着相对剧烈的波动,平稳波动会跟着相对平稳的波动。(3)收益率轻度自相关,资产的绝对收益和平方收益序列具有显著的自相关现象,表明价格序列存在长记忆性。这表明本文从前景理论出发构建的人工金融市场能够比较全面的贴近真实市场,模型能够从一定程度上反应市场的结构、演化等特征,以该模型探讨市场典型特征形成机制具备合理性。接下来对不同参数下模型产生的收益序列进行对比分析,从系统环境和投资者心理因素两方面探究价格波动的影响因素。

## (二)波动机制分析

从价格形成动态系统(见式(32))中观察到,投资者在市場中的切换机制、预期形成方式、市场的价格形成方式都对风险资产价格的波动产生影响。系统中包含诸多随机因素,例如价格形成过程中市场内部的随机扰动  $\delta$ ,噪音交易  $u_t$ ,投资者策略的随机切换以及预期形成的非线性等使得基于式(32)的实验具有天然的随机性和复杂性,同一组参数下多次实验的结果并非完全一致。因此本文在同一组参数下重复实验100次,并且以收益率的分布统计量为目标变量,通过计算其平均描述实验结果。

此外,由于计算实验过程中伴随的随机性,实验过程中价格序列同时受到多种因素影响。要单独观察某个参数和价格波动之间的关系,首先需要明确指定参数作为控制变量,是影响风险资产价格波动特征的主要因素。

1. 方差分析。导致证券市场异常波动的原因可分为宏观和微观因素两个方面。宏观层面因素包括市场环境、制度设施、信息不对称和价格机制失效等,微观层面因素包括投资者风险偏好、过度投机、认识不足和过度交易等等。根据模型构建过程,结合市场实际,本文从系统环境和投资者心理因素两方面选取五个核心参数。宏观层面的系统环境因素包括切换强度  $\omega$  和价格形成过程中的需求敏感度  $\tau$ 。本文投资者根据切换机制(见式(28))在不同交易模式之间切换,各类交易模式在市场中所占的比例随着收益表现而变化。因此切换机制作用是基于市场结构层面,而不是个体交易层面,这里归于系统环境因素。在心理特征因素方面,本文结合前景理论选取体现主观概率扭曲的决策权重  $\eta$ , 损失厌恶心理的参数  $\lambda$  以及亏损状态下的风险系数  $\beta$ 。

为了将参数影响从诸多复杂因素中剥离出来,本文采取控制变量法,除选定参数,令市场中其余参数选取同表 1。给出选定参数在合理范围内的一组值,各将人工金融市场运行 100 次,每次生成的价格序列包含 1250 个时序值。本文将每次实验产生价格序列的日度收益率的方差作为衡量波动性的指标,采用方差分析(ANOVA)方法,将目标参数选取作为自变量,收益率方差作为因变量,通过比较不同参数选取下实验得出的收益率方差样本,验证目标参数取值改变是价格波动性特征变化的决定性影响因素。

通过与上证 50ETF 对比复刻其波动的典型特征,上文利用格式化特征校准的方式给出表 1 参数取值,并验证了该组参数下计算实验模型的有效性。在下面实验过程中,由于各个参数是系统环境和心理因素的量化,各自定义域不同,量纲无法统一。不同实验参数仍围绕表 1,在尽可能接近真实市场的基础上于合理范围内变动。例如,在相同规模订单冲击下,敏感度  $\tau$  的取值对市场波动性具有直接而显著的影响。下面围绕基准值以步长 0.001 选取  $\tau \in \{0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005\}$  进行对比实验。 $\tau$  取值过大,会对价格形成过程起绝对主导作用,淹没其余因素,与真实市场相差巨大从而使实验结果失去意义。同理,选取切换强度  $\omega \in \{0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$ , 决策权重  $\eta \in \{0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75\}$ ; 损失厌恶系数  $\lambda \in \{1.75, 2.00, 2.25, 2.50, 2.75\}$ ; 亏损状态下的风险系数  $\beta \in \{0.80, 0.84, 0.88, 0.92, 0.96\}$ 。

在参数检验之前,本文首先对不同参数水平下产生的收益率方差数据组进行正态性和方差齐性检验。每组数据包含 100 个样本,样本量较少,因此采取 Shapiro-Wilk 正态性检验和 Levene 齐性检验。经检验除  $\tau \in \{0.002, 0.003, 0.004, 0.005\}$  外,各组数据产生的样本均满足正态性和方差齐性假设。

表 3 不同参数水平的方差分析表

参数	误差来源	平方和	自由度	均方	F-value	p-value	偏 $\eta^2$
$\omega$	组间	0.0004	4	9.7E-5	13.4426	0.000***	0.1039
	组内	0.0034	464	7.0E-6			
	总和	0.0038	468				
$\eta$	组间	0.0007	4	1.73E-4	24.9368	0.000***	0.1688
	组内	0.0034	491	7.0E-6			
	总和	0.0041	495				
$\lambda$	组间	0.0012	4	2.93E-4	37.4800	0.000***	0.2520
	组内	0.0035	445	8.0E-6			
	总和	0.0047	449				
$\beta$	组间	0.0046	4	1.1E-3	142.6707	0.000***	0.5355
	组内	0.0040	495	8.0E-6			
	总和	0.0086	499				

从表 3 呈现的方差分析结果发现,  $F > F_{\alpha}$ , 参数的不同水平对资产收益分布的方差存在显著差异。而敏感度参数  $\tau$  的四组对照实验不满足正态性和方差齐性假设,无法通过方差分析验证其影响。因此,此处通过非参数的核密度估计(kernel density estimation, KDE)方法研究方差的分布特征,直观观察不同  $\tau$  取值下收益率分布方差本身的分布特征,结果如图 3 所示。

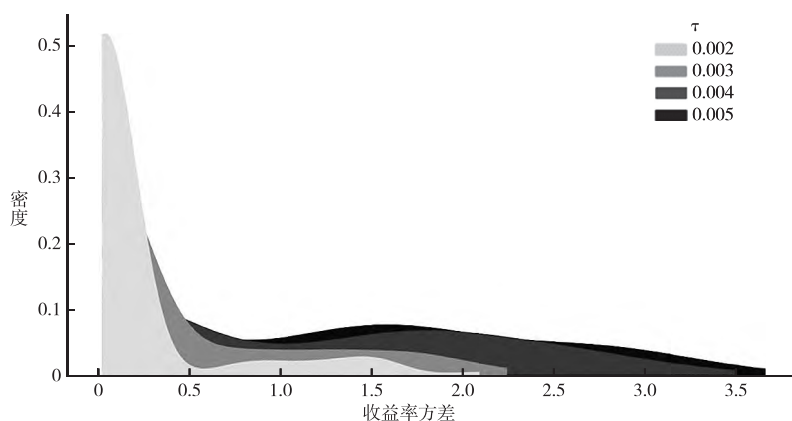


图3 参数 $\tau$ 不同取值下收益率方差的KDE密度分布图

图3以不同深度的色块表明 $\tau \in \{0.002, 0.003, 0.004, 0.005\}$ 时实验样本的密度分布。图3表明,随着 $\tau$ 取值不断增加,实验结果中波动方差尾部的离群值密度显著上升,且整体分布较正态分布偏离越大,参数 $\tau$ 的不同取值对价格波动指标存在显著差异。接下来进一步探讨各参数对价格波动的影响机制。

2. 波动特征分析。为了更好地了解系统环境和心理因素与价格波动特征之间的关系,本文在不同参数取值下进行多轮计算实验,模拟不同环境和投资者心态下市场收益率特征的表现。首先,本文中市场根据切换机制(见式(28))在不同交易模式之间进行切换,交易者向收益表现较好的模式转变的敏感度由参数 $\omega$ 刻画。令市场中其余参数选取同表1,在不同 $\omega$ 取值下运行100轮模型,每轮包含1250个时序值。通过计算平均得出日度收益率 $\rho_t$ 统计量分析如表4所示,结果表明随着 $\omega$ 取值增加,市场中对于上一期表现较好的策略倾向性增强,也可以理解为羊群效应增强,此时对应日度收益率的方差增大,峰度和左偏性也加大,市场波动性增加。

表4 不同 $\omega$ 下模拟数据收益率分布的统计量

$\omega$	均值	方差	峰度	偏度
0.5	-0.0002	0.0152	3.3903	-0.2124
0.6	-0.0002	0.0155	4.0897	-0.2371
0.7	-0.0003	0.0167	4.0012	-0.2540
0.8	-0.0003	0.0174	4.0604	-0.2889
0.9	-0.0003	0.0179	4.4480	-0.3586

其次,可以发现价格形成机制(见式(31))中需求敏感度 $\tau$ 对于价格波动影响幅度较大。在当前交易期,做市商根据市场投资者对风险资产溢出需求调整价格;在同等溢出需求下,敏感度 $\tau$ 越大,价格波动幅度越大。因此 $\tau$ 可以模拟风险资产需求量对价格冲击的规模。在完全切换机制下,令 $\omega=0.745$ ,保持其余参数如表1不变,令 $\tau$ 取值逐步增加,同样运行100次模型取平均,价格序列的波动情况如表5所示。结果表明,随着需求敏感度增加,方差增大,峰度大幅增长,偏度绝对值增大。

表5 不同 $\tau$ 下模拟数据收益率分布的统计量

$\tau$	均值	方差	峰度	偏度
0.001	-0.0003	0.0166	4.4574	-0.3194
0.002	-0.0006	0.1805	16.4467	-0.4686
0.003	-0.0007	0.3683	39.4976	-0.5645
0.004	-0.0010	1.0048	47.8945	-0.5150
0.005	-0.0017	1.4658	50.6016	-0.7236

再次,令切换机制强度  $\omega=0.745$ ,价格需求敏感度  $\tau=0.001$ ,其余参数选取如表 1,并对情绪交易中重要的心理特征参数在不同取值下进行市场模拟,分析投资者心理特征变化对于市场收益率分布的影响。其中,包括衡量投资者主观概率扭曲程度的扭曲系数  $\eta \in [0,1]$ ,投资者对于同等规模损失更加敏感的损失厌恶系数  $\lambda$ ,以及亏损状态下投资者的风险态度系数  $\beta$ 。同样,本文运行 100 轮人工金融市场,将其日度收益率取平均,价格序列的波动统计量如表 6 至表 8 所示。

参数  $\eta$  表示情绪交易下投资者决策权重的扭曲程度。当  $\eta=1$  时,表示决策权重相较于主观权重并没有发生扭曲;随着  $\eta$  数值变小,其扭曲效应越明显,具体表现为高估小概率事件和低估大概率事件程度都增大,确定性效应增强。表 6 的计算实验结果表明,随着扭曲系数  $\eta$  取值增加,决策权重相较于客观权重的扭曲程度减弱,对应资产收益率分布的均值减小,方差减小,峰度和偏度的绝对值增加。

表 6 不同  $\eta$  下模拟数据收益率分布的统计量

$\eta$	均值	方差	峰度	偏度
0.35	-0.0004	0.0195	3.5093	-0.2347
0.45	-0.0003	0.0182	3.8179	-0.2595
0.55	-0.0003	0.0176	4.1206	-0.3260
0.65	-0.0003	0.0167	4.1351	-0.2746
0.75	-0.0003	0.0161	4.7968	-0.3441

参数  $\lambda$  描述的是相较于收益而言,投资者同等规模的损失带来更多负面效用的损失厌恶心理, $\lambda$  取值越大,损失厌恶心理越强。Kahneman(2003)利用行为实验调查给出参考值  $\lambda \approx 2.25$ 。表 7 的模拟实验表明,随着  $\lambda$  取值增加,损失厌恶带来的负面效用等比例增加,对应资产收益率分布的均值增大、方差增加、峰度和偏度绝对值减小。

表 7 不同  $\lambda$  下模拟数据收益率分布的统计量

$\lambda$	均值	方差	峰度	偏度
1.75	-0.0002	0.0140	5.8313	-0.3798
2.00	-0.0002	0.0156	4.8899	-0.3433
2.25	-0.0003	0.0166	4.4574	-0.3194
2.50	-0.0003	0.0178	4.1422	-0.2793
2.75	-0.0004	0.0190	3.4609	-0.2196

参数  $\beta$  描述情绪策略下投资者处于亏损状态时的风险态度系数,收益状态时的风险态度系数  $\varphi=0.88$ 。根据累积前景理论建立的情绪策略的风险态度是变化的,在收益状态时是凸函数,对应风险厌恶;在损失状态下是凹函数,对应风险偏好。表 8 的模拟结果表明,随着  $\beta$  取值增加,损失状态下的风险偏好程度增加,投资者更倾向于进行冒险的投资行为,对应资产收益率分布的均值增大、方差增加、峰度和偏度绝对值减小。

表 8 不同  $\beta$  下模拟数据收益率分布的统计量

$\beta$	均值	方差	峰度	偏度
0.80	-0.0002	0.0124	7.1466	-0.5207
0.84	-0.0002	0.0146	5.6338	-0.3793
0.88	-0.0003	0.0166	4.4574	-0.3194
0.92	-0.0003	0.0191	3.1183	-0.2214
0.96	-0.0004	0.0209	2.9888	-0.1877

### 五、基于计算试验的进一步分析

通过计算实验方法,本文隔离并控制价格形成系统的一些参数,根据控制变量法挖掘参数和价

格波动机制之间的关系,研究心理因素对市场价格异象的影响。在每轮实验中,计算实验产生的收益率序列包括均值、方差、峰度、偏度在内的描述性统计量,以刻画该轮实验中资产价格波动的基本特征。根据上文分析结果(表4—表8),系统环境参数( $\omega$ 和 $\tau$ )与心理行为特征相关的参数( $\eta$ 、 $\lambda$ 和 $\beta$ )对市场的影响机制存在差异。为了更加全面直观地展示实验结果,本文用箱型图描述上节100轮实验产生的收益率特征统计量数据的离散分布情况,如图4和图5所示。

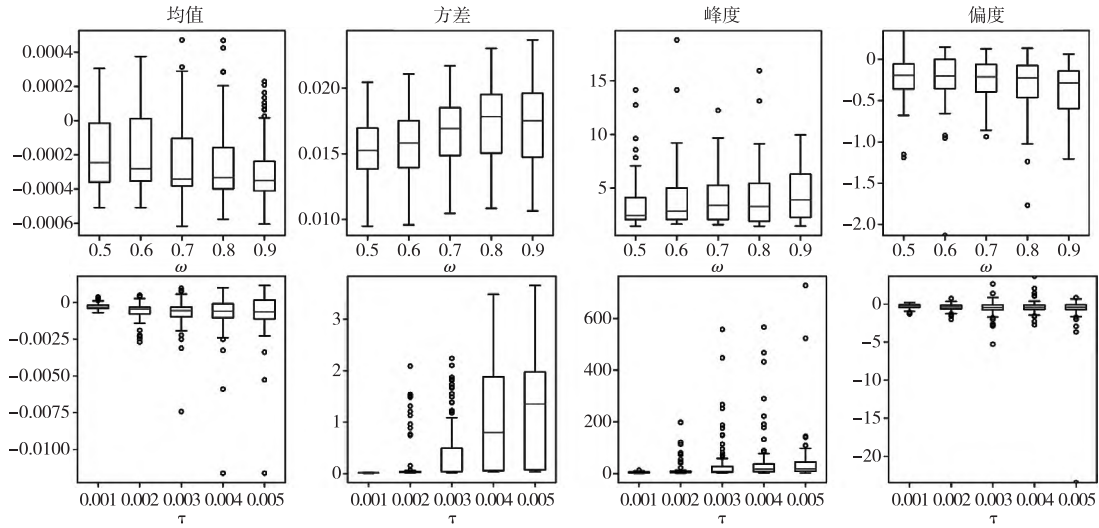


图4 系统环境参数 $\omega$ 、 $\tau$ 在不同取值下收益率序列统计量的箱型图

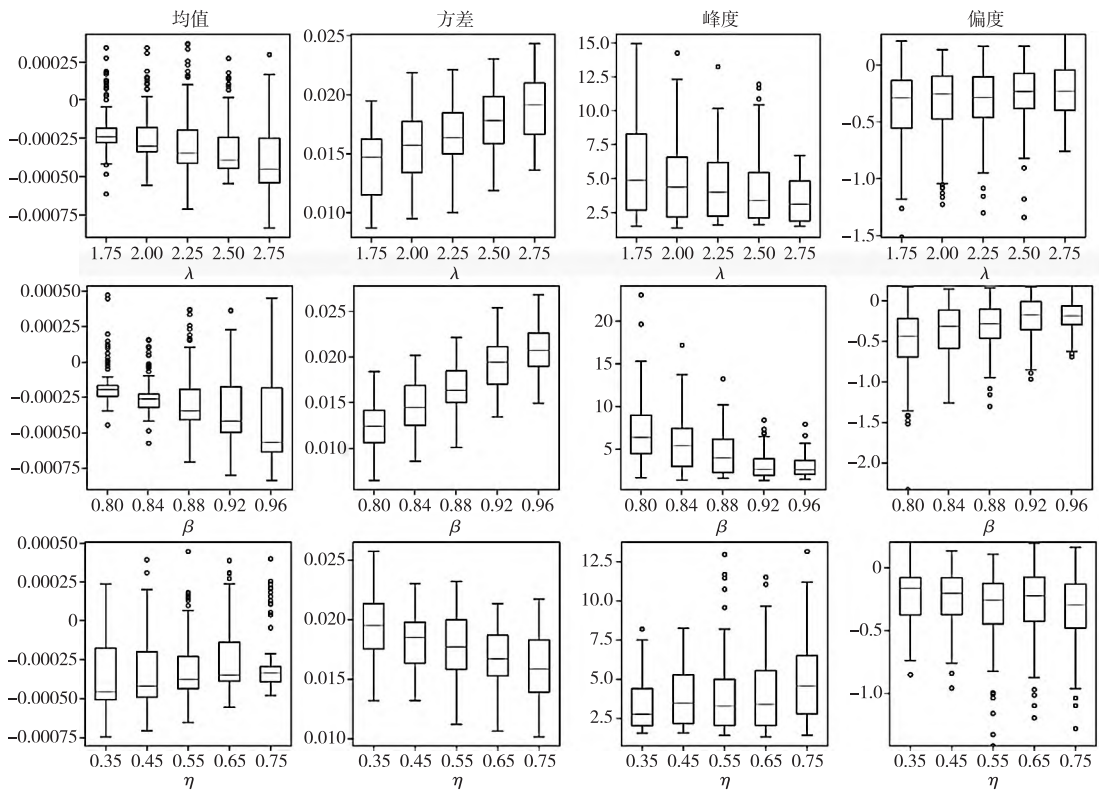


图5 心理特征参数 $\lambda$ 、 $\beta$ 和 $\eta$ 在不同取值下收益率序列统计量的箱型图

由于各个参数是系统环境和心理因素的量化,各自定义域不同,量纲无法统一。本文参数选取和实验数据与上文相同,仍围绕表1,在尽可能接近真实市场的基础上于合理范围内变动。表4至表



5 说明,随着市场切换强度  $\omega$  和价格需求敏感度  $\tau$  增强,市场中投资者交易模式更加依赖于短期内的表现,市场结构变动比较剧烈,此时方差增大,偏度绝对值和峰度同样增大。这说明方差的增加来源于偏离均值的极端值增加。不同参数下收益率分布偏度都小于零,表明收益率左偏,数据更倾向汇集在负的尾部,市场整体的尾部风险增加。因此,  $\omega$  和  $\tau$  对于价格波动特征的影响是更为直接且强烈的,切换强度和价格敏感度的提升使得市场整体层面上的极端差值出现的频率增加了。对应图 4 展示的系统环境参数(  $\omega$  和  $\tau$  )变化下收益率序列统计量数据的箱型分布图显示,随着参数取值增加,方差数据整体上移的同时峰度、偏度数据上下边界距离增加,整体分布的离散性增强,且峰度数据上限升高,偏度数据下限降低,表明实验结果中具有强尖峰厚尾特征的数据频次升高。

而投资者心理因素的影响相较而言就较为间接和温和。表 6 至表 8 结果表明,随着扭曲系数  $\eta$ 、损失厌恶系数  $\lambda$  和风险态度系数  $\beta$  表示的影响作用的增强,资产收益分布的方差波动性也有所增加。但不同的是,此时的峰度和偏度绝对值反而减小。对应图 5 心理特征参数在不同取值下收益率统计数据对应的箱型图反映出相同变化趋势。随着  $\eta$  数值变小,情绪交易下相对客观概率的扭曲效应越明显,投资者确定性效应增强;而随着  $\lambda$  取值增加,损失厌恶带来的负面效用等比例增加;随着  $\beta$  取值增加,损失状态下风险偏好程度也随之增加。图 5 表明,随着各种心理效应增强,方差数据整体上移的同时,峰度、偏度数据上下边界距离收窄,且峰度上限降低,偏度下限升高,整体分布的离散性减弱。这表明,方差增大的来源并不是极端值的增加,而是围绕中位数和平均收益的高频数据的差值上升了。

该结果表明,包含认知局限和决策偏好的有限理性投资者对资本市场波动的影响较为间接温和。投资者在心理因素影响下确实偏离了理性人的最优决策,然而这种系统性偏离未达到极端事件的水平,并不一定会导致资本市场尾部风险的累积。正如卡尼曼指出的,前景理论并没有完全背离传统理性范式,其承认个体偏离有效市场和期望效用理论所确定的理想行为准则时,行为是非理性的;但这并不表示其完全排斥理性,可以将其看作是一类次优选择。因此,情绪策略的心理因素对于市场波动的影响是温和的,可能使得价格波动偏离均值的程度增加,却远不到极端值和尾部的范围。

回顾本文异质主体下的价格形成系统(见式(32)),相较基于期望效用最大化的理性交易,情绪交易中包含的损失厌恶、二维风险态度和主观概率扭曲等心理特征客观上增加了整体市场的波动性,但却并未引起尾部风险的大幅累积。对比投资者的心理因素和系统环境因素对市场波动的影响,结果表明心理因素的影响远小于市场结构切换和价格形成方式的改变。仿真结论显示,行为经济学下的有限理性与完全非理性之间存在明显界限,心理因素导致的行为“偏误”可能并不存在那么多字面意义强调的“错误”,人类长久形成的思维方式自有其演化合理性,这也与卡尼曼的表述和演化经济学的理论不谋而合。

## 六、总结与展望

结合前景理论和 ABM 方法,本文构建了市场价格形成的内生动态系统,并利用计算实验方法对投资者心态以及市场环境及资产价格波动特征之间的内在关联进行深入分析,力求把握资产价格波动特征的内在机理,进而为资产市场制度建设和前瞻性防控提供量化的决策依据。通过与上证 50 ETF 交易数据的对比,本文得出的人工金融市场产生价格序列的收益率在波动性、偏度、峰度等方面与真实市场数据高度相似,两者都表现出尖峰厚尾、波动率聚集、长记忆性等典型特征。投资者行为相对于“理性”假设的偏差广泛存在于各类资产市场的投资者行为中,并且投资者的微观行为和市场价格宏观运动之间存在千丝万缕的联系。通过 ABM 模型,本文厘清了微观行为和宏观价格运动的内在逻辑脉络。

本文的计算实验结果表明,宏观市场结构不稳定和市场交易制度不完善会增加资产价格极端值的概率,累积尾部风险;虽然投资者心理波动也会增加市场波动性,但是对整体价格冲击有限,且并不引起尾部风险累积。因此,监管部门需要保持政策的连续性和稳健性,在充分了解市场的基础上出台前瞻性政策指引,有效引导市场预期和安抚市场心理,及时规避多种信息冲击引起的市场风格

切换。要系统推进资本市场基础制度改革,根据当前的投资者结构和市场发展趋势来增强市场交易制度的稳定性、平衡性和协同性。特别是,投资者基于思维特征出现的偏差引起的市场波动在合理范围内是可控的,因此,政府需要充分利用“看不见的手”,帮助市场逐步建立自恢复和自适应机制。同时,要以投资者需求为导向,真实准确完整地披露信息,加强投资者审慎投资教育,形成合理价格,尊重和维护证券市场自发秩序,更有效地发挥市场在资源配置中的决定性作用。

最后需要指出的是,我国证券市场波动性高,市场内部存在一定程度的结构性缺陷,贴合国内交易特征的 ABM 模型能以非常低廉的计算成本挖掘市场异常波动成因,因此对模型进行进一步优化和完善,使其更加贴合中国市场的波动特征是接下来重点关注的工作之一。具体而言,本文模型中参数较多,且模型中只有部分参数是具有实际背景参照且可辨识的。此外,模型中的一些关键变量,例如风险资产的基本价值等无法观测,也无法通过传统统计方法进行估计,因此围绕参数校准的系列问题需要进一步研究。而随着互联网和社交网络的兴起,人与人之间的联结越来越紧密,本文衡量的“偏好”或者“效用”更加容易受到他人的影响,因此也应当考虑投资者在群体中的相对财富水平和社交网络对个人参考点形成的影响。基于这样的动态参考点产生的行为投资组合模型对资产价格的影响也值得深入研究。

#### 参考文献:

- 何大安,2005:《理性选择向非理性选择转化的行为分析》,《经济研究》第 8 期。
- 邹高峰 张维 张海峰 熊熊,2013:《中国市场条件下的前景理论资本资产定价模型》,《系统工程学报》第 3 期。
- 张海峰 张维 邹高峰 熊熊,2011:《中国市场条件下前景理论的实证分析》,《西安电子科技大学学报(社会科学版)》第 3 期。
- 张兵,2021:《中国资本市场特质波动率异象研究:前景理论的视角》,《经济学报》第 1 期。
- 边慎 蔡志杰,2005:《期望效用理论与前景理论的一致性》,《经济学(季刊)》第 1 期。
- 唐任伍 刘洋 李楚翘,2020:《布莱恩·阿瑟对复杂经济学的贡献》,《经济学动态》第 3 期。
- 李律成 Petra Ahrweiler 熊航,2017:《新熊彼特主义视角下基于主体的计算经济学研究》,《经济学动态》第 7 期。
- 何诚颖 陈锐 薛冰 何牧原,2021:《投资者情绪、有限套利与股价异象》,《经济研究》第 1 期。
- 王朝阳 王振霞,2017:《涨停、融资融券与股价波动率——基于 AH 股的比较研究》,《经济研究》第 4 期。
- 张维 李根 熊熊 韦立坚 王雪莹,2009:《资产价格泡沫研究综述:基于行为金融和计算实验方法的视角》,《金融研究》第 8 期。
- 董志强 李伟成,2019:《禀赋效应和自然产权的演化:一个主体基模型》,《经济研究》第 1 期。
- 陈莹 袁建辉 李心丹 肖斌卿,2010:《基于计算实验的协同羊群行为与市场波动研究》,《管理科学学报》第 9 期。
- Arthur, W. B. (1999), “Complexity and the economy”, *Science* 284(5411):107–109.
- Barberis, N. et al(1998), “A model of investor sentiment”, *Journal of Financial Economics* 49(3):307–343.
- Barberis, N. et al(2001), “Prospect theory and asset prices”, *Quarterly Journal of Economics* 116(1):1–53.
- Barberis, N. et al(2016), “Prospect theory and stock returns: An empirical test”, *Review of Financial Studies* 29(11):3068–3107.
- Barberis, N. et al(2021), “Prospect theory and stock market anomalies”, *Journal of Finance* 76(5):2639–2687.
- Bekierman, J. (2019), “Asset volatility with prospect theory investors”, *Quantitative Finance* 19(4):33–543.
- Bernheim, B. D. & C. Sprenger(2020), “On the empirical validity of cumulative prospect theory: Experimental evidence of rank-independent probability weighting”, *Econometrica* 88(4):1363–1409.
- Brock, W. A. & C. H. Hommes(1997), “A rational route to randomness”, *Econometrica* 65(5):1059–1095.
- Brock, W. A. & C. H. Hommes(1998), “Heterogeneous beliefs and routes to chaos in a simple asset pricing model”, *Journal of Economic Dynamics & Control* 22(8–9):1235–1274.
- Castro, P. A. L. et al(2016), “Expected utility or prospect theory: Which better fits agent-based modeling of markets?”, *Journal of Computational Science* 17: 97–102.
- Dieci, R. et al(2006), “Market mood, adaptive beliefs and asset price dynamics”, *Chaos, Solitons & Fractals* 29(3):520–534.
- Grossman, S. J. & R. J. Shiller(1981), “The determinants of the variability of stock market prices”, *American Economic Review* 71(2):222–227.

- He, X. & Y. Li(2007), "Power-law behaviour, heterogeneity, and trend chasing", *Journal of Economic Dynamics & Control* 31(10):3396—3426.
- He, X. & Y. Li(2015), "Testing of a market fraction model and power-law behaviour in the DAX 30", *Journal of Empirical Finance* 31:1—17.
- Hommes, C. H. (2006), "Heterogeneous agent models in economics and finance", in: L. Tesfatsion & K. J. Judd (eds), *Handbook of Computational Economics*, Vol. 2, Elsevier.
- Kahneman, D. (2003), "Maps of bounded rationality: Psychology for behavioral economics", *American Economic Review* 93(5):1449—1475.
- Kahneman, D. & A. Tversky(1979), "Prospect theory: An analysis of decision under risk", *Econometrica* 47(2):263—291.
- Park, B. J. (2014), "Time-varying, heterogeneous risk aversion and dynamics of asset prices among boundedly rational agents", *Journal of Banking & Finance* 43:150—159.
- Polach, J. & J. Kukacka(2019), "Prospect theory in the heterogeneous agent model", *Journal of Economic Interaction and Coordination* 14(1):147—174.
- Rieger, M. O. & M. Wang(2008), "Prospect theory for continuous distributions", *Journal of Risk and Uncertainty* 36:83—102.
- Suzuki, K. et al(2009), "Agent-based approach to option pricing anomalies", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 13(5):959—972.
- Tversky, A. & D. Kahneman(1992), "Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty", *Journal of Risk and Uncertainty* 5(4):27—323.

### Behavioral Financial Analysis of Market Anomalies with Heterogeneous Agents

—Based on the Computational Finance Approach

HU Zhihao<sup>1,2</sup> LIU Qian<sup>1</sup>

(1. Chinese Academy of Social Sciences, Beijing, China;

2. National Institution for Finance and Development, Beijing, China)

**Abstract:** This paper investigates the effect of heterogeneity and bounded rationality on market anomalies in price formation. On the basis of the cumulative prospect theory, we construct an inter-temporal heterogeneous agent model in which asset price fluctuations are determined by the evolutionary dynamics embedded in the model. The artificial financial market constructed by the agent-based model includes three types of trading patterns — the rational pattern, the emotional pattern and the noisy pattern. Investors under the emotional pattern make decisions based on the cumulative prospect theory, whose preferences include different risk attitudes, reference point effects, and distortions caused by the probability weighting function. Compared with the stylized facts of SSE 50 Index, the artificial market is proven to be effective. Besides, we verified that market environment and psychological parameters are the decisive factors of price formation via ANOVA. By analyzing the distribution of return rates under different parameters, we find that the system environment and investor psychological factors affect the market fluctuation in different ways. Changes in the system environment can cause an increase in extreme values and accumulation of market tail risks, while psychological factors only trigger an increase in the volatility of returns around the mean. It means that the bounded rationality caused by investors' cognitive limitations and decision-making preferences has an indirect and mild impact on market price fluctuations, which also coincides with Kahneman's views. The results suggest that a more effective measure to maintain market stability should focus on the improvement of the market system environment.

**Keywords:** Market Anomalies; Behavioral Finance; Cumulative Prospect Theory; Agent-based Computational Experiments

(责任编辑:陈建青)

(校对:刘洪愧)