异质性主体下市场波动异象的行为金融解释——基于计算金融的方法

胡志浩 刘倩

内容提要：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，我们验证了该模型对于异象观测的有效性；通过方差分析，我们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，我们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改变的影响机制存在差异，系统环境的改变能够引起极端值增加和市场尾部风险累积，而心理因素波动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

1. **引言**

实证研究发现，全球各大证券市场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。例如风险管理中常用的VaR模型基于有效市场和随机游走假设，而实际收益率分布的厚尾特征则会造成模型对于尾部风险估计不足。对VaR 模型的过度依赖是2008年美国市场量化投资普遍亏损的原因之一。有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模型族，但这只能反映市场波动率的基本特征，不能解释导致这些差异的原因，无法打破理性范式的窠臼。因此，就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，这不仅能丰富我们对定价及市场运行的理论思考，同时还有助于管理部门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。传统范式研究假设个体具有理性偏好并且市场交易没有摩擦，市场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总能将资产价格推回基本价值，此时市场是有效的。行为金融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。

基于传统范式的行为金融研究存在局限性。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，尚且未充分分析个体选择、后验信念、投资者心态等已经使得规范研究困难重重。投资者有限理性或者非理性的心态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，促进行为金融理论的发展。计算实验方法以ABM(Agent-Based Modelling)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，主体在微观层面的简单互动汇集在一起，导致宏观层面复杂现象的涌现，表现出真实金融市场价格序列中观察到的一系列典型特征，例如过度波动、集群波动、泡沫和崩溃等等。ABM允许我们隔离并控制一个变量以挖掘因果关系，无须依靠复杂的计量技术过滤掉其它变量的影响。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，然而其自下向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，探究包含异质投资者的市场中资产价格波动的影响因素。

我们结合前景理论和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，进而为我们资产市场制度建设和前瞻性防控提供量化的决策依据。模型中投资者的交易是跨期的，对此我们改进经典财富累积公式，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)利用方差分析，我们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，通过不同参数选取下价格序列收益率的横截面特征分析，我们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、市场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。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也会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程度，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。该结果为“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。

1. **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, Huang and Santos (2001)提出的BHS模型结合前景理论的价值函数和消费效用函数，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、股权溢价之谜。 Barberis & Shleifer (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, Mukherjee & Wang (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 , Jin &Wang (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22类异象进行了定量预测，发现模型与其中13类存在显著因果关系。Bekierman (2019)基于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，假设投资者根据历史收益数据形成预期并基于前景理论决策，这在一定程度上与真实市场中投资者的决策行为是一致的。最初前景理论(Kahneman & Tversky, 1979)只能应用于两个备选后果的简单情境中，随后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。本文中，考虑到需要决策的场景更具复杂度，因此我们结合累积前景理论，并根据Rieger (2008)提出的扩展方法规避了前景理论的排序依赖问题[[1]](#footnote-1)。

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(2005)从规范分析角度对比了期望效用理论和前景理论，并证明了遵循代数结合律时两者结论相同。张海峰(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(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)从前景理论的视角，基于中国股市交易数据发现，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,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;唐任伍,2020)。

一些研究尝试将行为特征与人工金融市场结合，以揭示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采用不同方式形成价格预期，并且具有对于外部环境的适应性，他们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, Foroni & Gardini (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自适应系统基本框架，构建了包含三类交易的价格动态系统。此外，同样结合前景理论建立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基于前景理论参考点的风险变化特征，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 ,Shimokawa &Misawa(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 (2019) 将前景理论中的参考点和损失厌恶特征融入ABS系统中，并通过计算实验探究了该类心理因素对动态系统稳定性的影响。Castro &Teodoro(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。前景理论包含诸多心理特征，上述文献大多是选取其中一种或者两种因素改进经典ABM模型，而本文模式则结合累积前景理论框架，涉及多类心理特征。

关于市场波动异象分析也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(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(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(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(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(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, 2017；张志强，2019)。复杂经济学和人工金融市场的研究发源地圣塔菲研究所设计建立了Swarm平台，该平台工具集完整，概念基础清晰，且能够集成地理信息系统，适用于自然资源环境、科学仿真等领域的复杂模型。此外，乔治梅森大学计算机科学和复杂社会研究中心使用Java编写了可视化工具 Mason，运行速度快，可进行复杂的逻辑推算，适合用于研究社会复杂性、人工智能学习、抽象模型、物理建模及自然科学等领域。芝加哥大学计算研究中心则创建了RePast，能够良好地支持并实施地理信息系统功能并有着较好的稳健性，适用于地理信息系统、生物和社会研究等领域。

本文结合累积前景理论和计算实验方法建立异质主体跨期人工金融市场，以挖掘市场波动异象的来源，进而探究投资者的心理特征对波动特征的影响机制。上述已有文献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。

1. **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，并以此为基础建立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新古典经济学中的期望效用理论，根据期望效用最大化原则进行决策；情绪模式则是基于累积前景理论框架，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。模型采用做市商制度，基于溢出需求形成风险资产价格。

模型基于一系列前提假设，我们将其总结为以下几点：

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.

我们将风险资产在 交易期的价格记为 ，资产价格和股息发放都是随机过程，本文以黑体强调随机变量。

1. 理性交易

在投资决策过程中，面对不确定性带来的风险，投资者可基于期望效用理论进行理性交易。该模式下投资者符合传统金融理论中“理性人”假设，相信市场是有效的，因此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。理性人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为转移。

我们类比Brock & Hommes (1998)和Dieci, Foroni & Gardini (2006)等文献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，则时刻的财富总量可以表示为

本文投资者在整个交易期有多个交易机会， 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为

财富的迭代公式(5)与(1)相比，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。尾项里不包括随机变量，因此并不影响期望效用的计算。我们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

其中是风险厌恶系数，对所有理性交易模式下的投资者都是相同的常数。时期理性模式的交易者根据期望效用大化原则对未来财富总量进行预测，等价于以下优化问题

其中是理性策略下使得预期财富总量最大的交易量，和表示理性策略下的交易者基于公共信息域 计算的条件期望和条件方差。记t+1时期风险资产相较于总收益率为R的无风险资产，超额收益为

根据财富累积公式(5),由于t时刻财富总量以及往期交易量 ，俱为已知量，记

为风险资产的存量。将记号(8)和(9)代入(7)，则我们只需求解如下问题

此时风险资产交易量的最优解为

我们假设理性交易下投资者认为超额收益的条件方差是一个常数，即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：

其中 表示投资者朝着基本价值调整自己价格预期的幅度，表示风险资产在t交易期的基本价值。越大，则偏离基本价值影响越小。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；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。

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

此时风险资产基本价值完全由未来股息现金流贴现得出：

假设股息过程是独立同分布的，，则风险资产的基本价值为常数

将(12)和(15)式代入(11)式, 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为

1. 情绪交易

我们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，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。此外，理性交易下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。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，我们建立微观行为和宏观价格运动的内在逻辑脉络，剖析价格波动机制，有利于促进资源配置效率的提高和资本市场的长效健康发展。

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个亏损的后果和n个盈利后果 以及中立后果。假设后果 发生的概率为 且 在累积前景理论下，该行为选项可以表达为

其对应的前景值为

为价值函数， 为主观权重函数。

Rieger (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)，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 时，将划分为等长的n个区间 . 当 时，离散分布的直方图收敛到原始分布 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。因此我们采取SPT扩展方法进行计算，基于SPT消除原始理论不连续的影响。

考虑一项决策包含 n个后果, , SPT 前景值计算如下

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

价值函数 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,原点右端的收益部分是凸函数，在左端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。参数和分别描述了风险厌恶和风险偏好的水平，，(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，参数即描述了损失厌恶心理，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。

主观权重函数 为

参数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，而是客观概率经过权重函数的扭曲。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。沿用上文记号，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 ,则t+1交易期的财富总量 同样可由公式(5)给出。

类似 Barberis, Huang and Santos (2001), 我们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(5)式相对损益为

根据公式(21)，情绪策略下t交易期的资产需求量 和 是一一对应的；如果 确定，则风险资产价格波动以及股息决定了相对损益 ，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，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。风险资产价格 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，, 则相对损益可估计为

我们采取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， ，且相互独立.则概率密度函数 为

将(22)式代入(23)式得到 的概率密度公式

其中 表示从初始时刻到t-1交易期期间交易量之和，即t交易期风险资产的存量或者持有量。将(24)式带入主观权重函数(20)式，即可计算情绪策略下的决策权重。进一步根据SPTV公式(18)，计算价值函数()和主观权重函数的加权平均，得到风险资产交易量为时对应的前景值。

我们从前景理论的框架重述上面的过程。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[[2]](#footnote-2)为 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和股息估计 决定了，进一步决定了交易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，我们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(24)选取n个样本点 ,. 对每一个计算对应的主观概率 以及对应的价值函数()，根据公式(18)得到交易量为 时的离散前景值：

给定时间t后交易量 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. 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。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,则.由遍历样本点选取最大前景值对应的 ：

即得到本期采取情绪策略的交易者对风险资产的需求量。

1. 噪音交易

为了模拟真实金融市场中普遍存在的噪音交易，增加市场的波动性，我们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是完全是随机的，假设其在t交易期对于风险资产的需求量 服从均值为零，方差为的正态分布

1. 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 ,,.其中表示理性交易者的比例，表示情绪交易者的比例，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：

其中 ,表示交易者向收益表现较好模式转变的敏感度； 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 , 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。表示h 类模式下投资者在t-1到t时期风险资产价格变化导致的财富变动情况

1. 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，做市商制度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为

其中为理性交易者在t交易期对风险资产的需求量，由公式(16)给出； 为情绪交易者在t交易期对风险资产的需求量，由公式(26)给出； 表示噪音交易者在t交易期对风险资产的需求量，由公式(27)给出； 表示t交易期三类交易在市场中分别占的比例，，由公式(28)给出。每个交易期末，做市商根据市场上的溢出需求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, 则价格上涨；, 则价格下跌，价格形成机制为

其中表示价格受溢出需求影响的敏感度，； 表示一个随机扰动, 。需求敏感度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，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。至此我们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。综合上文我们给出不同决策思维下动态资产价格形成系统：

每个交易期 t， 市场中对风险资产的总需求 由不同交易模式下行为主体的订单 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 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 和对风险资产的总需求调整价格 。

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。

1. **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的影响进行深入分析，我们需要观察模型是否能够较好地反映出实际的市场特征，本章对模型（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类似的典型特征。

上证50ETF是境内首支交易型开放式指数基金，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，在给定时期内股票日收益率以相邻两交易日收盘价格对数的一阶差分表示，即

此外，我们还计算了绝对收益以及平方收益.

计算实验中采用的参数取值在表1中给出。实验过程中我们令无风险资产的日度收益率 .

表1 计算实验的参数选取

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 市场 | | | 理性交易 | | | | 情绪交易 | | | | | | | 噪音 |
|  |  |  |  |  | a |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 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 |

下面说明 表1各项参数选取依据。市场部分，表示交易者向收益表现较好的模式转变的敏感度， He & Li (2015) 基于 DAX 30 数据给出了切换机制下 估计值为，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 取值对市场波动特征产生的影响。 表示价格受溢出需求影响的敏感度，。在相同规模订单冲击下， 的取值对市场波动性具有直接而显著的影响。这里我们经过多次实验，选取作为基准值。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。

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[[3]](#footnote-3)。例如理性交易中的股息过程分布的均值和方差 ， 情绪交易中价格预期分布的均值 和方差 , 股息预期方差 ，以及噪音交易下订单产生的方差 。这里基于多次实验结果选定如上取值作为计算实验的基准值。

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 。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 。

在表1参数选取下我们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，每次实验运行个交易期。上证50ETF 样本中包含3901个日度交易数据，因此我们选取近似的 动态资产价格形成系统(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[[4]](#footnote-4)。我们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[[5]](#footnote-5)。

1. 格式化特征

1.正态性

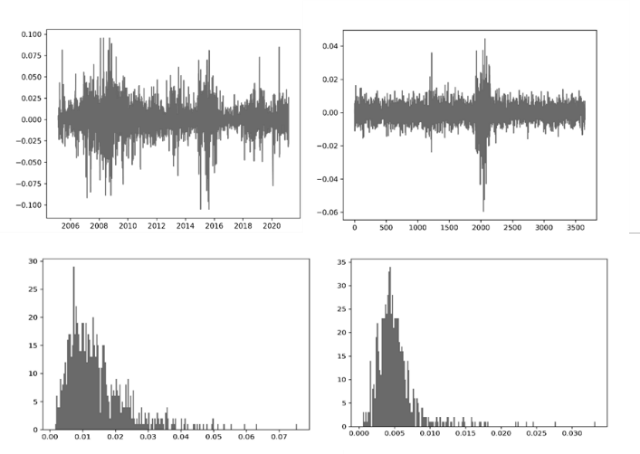


图1 收益率序列和波动率分布直方图

注：左列为上证50ETF数据，右列为计算实验模拟数据结果。

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。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。我们对收益率和波动率进行了统计特征分析，结果如表2所示。

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\*\* |
| 50ET波动率 | 0.0145 | 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\*\* |

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。我们将两者进行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。此外，两者的波动率统计分析与图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。

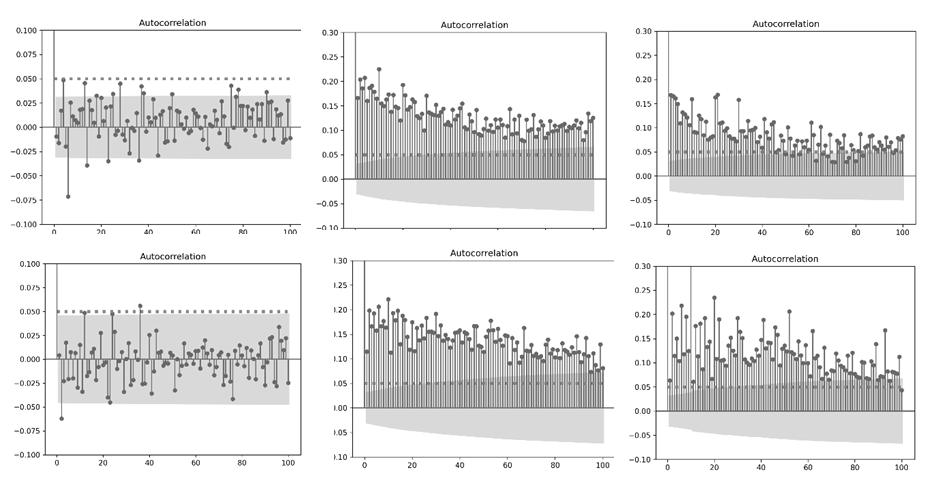


图2 收益(左列)、绝对收益(中列)和平方收益 (右列) 自相关图

注：上一行为上证50ETF的数据，下一行为模型数据

我们考虑滞后阶数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。图2表明自相关系数从滞后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。而绝对收益和平方收益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。

本小节我们将上证50ETF和动态系统(30)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。

这表明我们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，以该人工市场探讨市场典型特征形成机制具备合理性。下面我们通过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。

1. 波动机制分析

从价格形成动态系统(32)中观察到，投资者在市场中的切换机制、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，噪音交易 ，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系统(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。因此我们在同一组参数下重复实验100次，并且以收益率的分布为目标变量，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，我们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影响。宏观层面包括市场环境、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。根据本文的模型构建过程，结合市场实际，我们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 和价格形成过程中的需求敏感度 .本文投资者根据切换机制(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。心理特征因素方面，我们结合前景理论选取体现主观概率扭曲的决策权重 ，损失厌恶心理的参数 以及亏损状态下的风险系数 .

为了将参数影响从诸多复杂因素中剥离出来，我们采取控制变量法，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。此处我们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，我们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 的取值对市场波动性具有直接而显著的影响。这里我们围绕基准值，以步长0.001选取 进行对比实验。 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 , 决策权重 ; 损失厌恶系数 ；亏损状态下的风险系数 .

参数检验之前我们首先对不同参数水平下产生的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，因此我们采取Shapiro-Wilk正态性检验。经检验除外，各组数据产生的样本均满足正态性和方差齐性假设，检验结果见附表1和附表2。

表3 不同参数水平的方差分析表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 项 | 误差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F-value | p-value | 偏Eta方 |
|  | 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 |  |  |  |  |
|  | 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 |  |  |  |  |
|  | 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 |  |  |  |  |
|  | 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，，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 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，因此这里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 取值下收益率分布方差本身的分布特征， 结果如 图3 所示。

图表

描述已自动生成

图3 参数 不同取值下收益率方差的的KDE密度分布图

我们以不同深度的色块表明 时实验样本的密度分布。图3 表明，随着 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, 参数的不同取值对价格波动指标存在显著差异。我们在接下来的波动特征分析中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，我们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。本文市场根据切换机制(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刻画。我们令市场中其余参数选取同表1，在不同取值下运行100轮模型，每轮包含1250个时序值。通过计算平均，我们得出日度收益率 统计量分析如表3所示。表4说明随着 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 下模拟数据收益率分布的统计量

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 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 |

价格形成机制(31)式中需求敏感度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，敏感度越大，价格波动幅度越大。因此可以模拟需求量对价格冲击的规模。在完全切换机制下，令=0.745，保持其余参数如表1不变，令取值逐步增加，同样运行100轮模型取平均，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 下模拟数据收益率分布的统计量

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 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 |

令切换机制强度=0.745，价格需求敏感度 ，其余参数选取如表1，我们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，表现投资者对于同等规模损失更加敏感的损失厌恶系数,以及亏损状态下投资者的风险态度系数。 同样运行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-表8所示。

表6 不同 下模拟数据收益率分布的统计量

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 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 |

主观概率扭曲函数(20)中的指数表示情绪交易下投资者决策权重的扭曲程度。当时表示决策权重相较于主观权重并没有发生扭曲；随着数值变小，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。计算实验结果表明，随着扭曲系数 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7 不同 下模拟数据收益率分布的统计量

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 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 |

参数描述的是投资者相较于收益，同等规模的损失带来更多负面效用的损失厌恶心理， 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。 通过模拟实验我们发现，随着取值增加，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8 不同 下模拟数据收益率分布的统计量

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 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 |

参数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 根据累积前景理论建立的情绪策略的风险态度是二维变化的，在收益状态时是凸函数，对应风险厌恶；损失状态下是凹函数，对应风险偏好。模拟结果表明，随着 取值增加，损失状态下风险偏好程度增加，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。

1. **基于计算试验的进一步分析**

通过计算实验方法，我们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，探究某些心理因素对市场价格异象的影响。在每轮实验中，我们对实验产生的收益率序列计算包括均值、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。从上节分析结果中（表4-表8）可以看出，系统环境参数（和）与心理行为特征相关的参数（和）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，我们用箱型图描述上节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-图8 所示。

图表, 箱线图

描述已自动生成

图4 参数 不同取值下收益率序列统计量数据的箱型图

首先，我们观察系统环境参数（和）改变时，市场价格波动特征数据的变化情况。 图4 表明随着切换强度 取值变大，收益率均值的离群点显著增多，方差、峰度和偏度箱体高度增加，说明数据点的分布愈加离散，每轮实验产生的价格序列波动特征的变化增强。图5表明随着需求敏感度 取值增大，每轮实验的收益率分布的方差数据离散程度显著增大，且峰度和偏度的离群值数量增多，变动幅度相应增大。因此随着取值增加，价格形成过程中对订单需求敏感度增加，市场流动性降低，此时每轮实验产生的价格序列波动幅度增大。

箱线图

描述已自动生成

图5 参数 不同取值下收益率序列统计量数据的箱型图

图表, 箱线图

描述已自动生成

图6 参数 不同取值下收益率序列统计量数据的箱型图

图表, 箱线图

描述已自动生成

图7 参数 不同取值下收益率序列统计量数据的箱型图

其次，我们观察心理行为特征相关的参数（和）改变时，对应收益率统计量数据的分布的变化情况。图6-8反映的分布变化具有相同趋势。图6表明数值变小，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，此时方差数据中位数上移，峰度、偏度数据分布的上下边界收窄，分布趋向集中。 图7表明随着取值增加，损失厌恶带来的负面效用等比例增加，方差中位数存在升高趋势，峰度和偏度数据箱型高度收窄，表明数据分布的聚集性增强。类似地，图8表明，随着 取值增加，损失状态下风险偏好程度增加，投资者更倾向于进行冒险的投资行为。此时收益率分布统计量数据的变化特征与 类似，方差数据的中位数上移，峰度和偏度数据分布趋向集中。

图表, 箱线图

描述已自动生成

图8 参数 不同取值下收益率序列统计量数据的箱型图

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。本节参数选取和实验数据与第四节相同，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和表5说明随着市场切换强度和价格需求敏感度增强，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。因此表明和对于人工金融市场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。图4和图5展示系统环境参数变化下收益率序列统计量数据的箱型分布图，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6-8实验结果表明，随着扭曲系数 、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6-8，随着心理特征参数取值增加，方差数据整体上移的同时峰度、偏度数据上下边界距离收窄，且峰度上限降低，偏度下限升高，整体分布的离散性是减弱的。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增大了。

该研究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了，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(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。

我们通过结合前景理论和ABM方法，构建了市场价格的内生行程动态系统模型，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。本文的研究结果表明，资本市场系统环境对市场波动影响巨大。市场交易制度不完善、缺乏流动性和市场投资结构或者风格频繁变换会导致波动加剧，极端事件发生概率提高，尾部风险累积。因此围绕后疫情时代全球经济金融形势，完善资本市场基础制度建设，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。与此同时，市场化法制化改革应该在优化放管结合和改进服务上持续发力，在建立资本市场有效约束的基础上坚决放权，积极引导投资者建立合理投资观念，有效发挥市场在资源配置中的决定性作用。

1. **总结与展望**

本文在 Brock & Hommes ABS自适应信念系统的基础上，基于累积前景理论量化投资者对风险资产的心理评估，并据此建立了包含三种交易模式的动态资产价格形成系统。模型中投资者的交易是跨期的，因此我们改进了经典ABM模型中财富累积方式，考虑了交易过程中风险资产存量对于财富变化造成的影响，并且为后续研究打下基础。因为跨期模型可以探讨参照依赖对投资者决策的影响；而单期的前景理论模型无法考虑投资者之前的收益或者损失。通过与上证50 ETF交易数据的对比，我们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，我们建立微观行为和宏观价格运动的内在逻辑脉络。

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。因此监管主体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。此外，系统推进资本市场基础制度改革，对应当前投资者结构和市场发展趋势，增强市场交易制度的稳定性、平衡性和协同性。另一方面，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，因此政府部门需要充分利用“看不见的手”，帮助市场逐步建立自恢复和自适应机制。此外，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。

我国证券市场波动性高，市场内部存在结构性缺陷，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我们重点关注的工作之一。本文模型中参数繁多，并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，模型中一些关键变量，例如风险资产的基本价值等是不能观测的，也无法通过传统统计方法进行估计，围绕参数校准的系列问题需要进一步研究。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，我们衡量“偏好”或者“效用”更深地受到他人的影响，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探讨。

参考文献：

Grossman, S. J. & R. J. Shiller (1981), “The determinants of the variability of stock market prices”, *The American Economic Review* 71(2):222-227.

Kahneman, D. & A. Tversky (1979), “Prospect theory: An analysis of decision under risk”, *Econometrica* 47(2):263-291.

Tversky, A.& D. Kahneman (1992), “Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty”, Journal of Risk and Uncertainty 5(4):27-323.

Arthur, W. B. (1999), “Complexity and the economy”,*Science* 284(5411):107-109.

Barberis, N., A. Mukherjee & B. Wang. (2016). “Prospect theory and stock returns: An empirical test”, *The Review of Financial Studies* *29*(11):3068-3107.

Barberis, N., L.J. Jin& B. Wang( (2020), “Prospect theory and stock market anomalies”, National Bureau of Economic Research Working Paper，No.27155.

Barberis, N., A. Shleifer & R. Vishny (1998), “A Model of Investor Sentiment”, *Journal of Financial Economics* 49(3): 307-343.

Barberis, N., M. Huang & T. Santos. (2001), “Prospect theory and asset prices”, *The Quarterly Journal of Economics* 116(1):1-53.

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.

Bekierman, J. (2019), “Asset volatility with prospect theory investors”, *Quantitative Finance* *19*(4):33-543.

Brock, W. A., & C. H. Hommes (1997), “A rational route to randomness“,  *Econometrica: Journal of the Econometric Society* 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.

Dieci, R.,I. Foroni, L. Gardini, et al (2006) , “ Market mood, adaptive beliefs and asset price dynamics” , *Chaos, Solitons & Fractals* 29(3): 520-534.

He, X. & Y. Li (2007), “ Power-law behaviour, heterogeneity, and trend chasing” , *Journal of Economic Dynamics & Control* 31(10)：3396-3426.

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.

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.

Rieger, M. O. & M. Wang (2008),“Prospect theory for continuous distributions”, *Journal of Risk and Uncertainty 36*(1)：83-102.

Polach, J. & J. Kukacka (2019) ,“Prospect theory in the heterogeneous agent model”, *Journal of Economic Interaction and Coordination* *14*(1):147-174.

Castro, P. A. L., A. R. B Teodoro, L.I. Castro, et al. (2016), “Expected utility or prospect theory: Which better fits agent-based modeling of markets?”, *Journal of Computational Science* (*17)*: 97-102.

Suzuki, K. T. Shimokawa & T. Misawa (2009),“Agent-based approach to option pricing anomalies”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* *13*(5): 959-972.

Kahneman, D.(2003) ,“Maps of bounded rationality: Psychology for behavioral economics”, *American Economic Review* *93*(5): 1449-1475.

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.

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，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28卷第3期.

张海峰，张维，邹高峰等，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21卷第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 8卷第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5卷第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，薛冰等，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：《涨跌停、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，熊熊等，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，李心丹等，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13卷第9期.

英文题目与摘要：

**Behavioral Financial Analysis for Market Anomalies under Heterogeneous**

**Agents**

**——Based on Computational Finance Approach**

HU Zhihao LIU Qian

**Abstract:**  Behavioral finance incorporate the heterogeneity and psychological factors into traditional paradigm, which describes the decision-marking process under risk and uncertainty. The price formation is studied under the guidance of investor behavior. This paper combines Cumulative Prospect Theory to establish an intertemporal heterogeneous agent model, with which exploring the fluctuation source of market anomalies. The artificial financial market constructed by agent-based model includes three types of trading patterns —the rational pattern, the emotional pattern and the noisy pattern. Investor under emotional pattern make decisions based on the cumulative prospect theory framework, whose preferences include different risk attitude switching, reference point effects, and distortion caused by probability weighting function. Compared with the stylized facts of Shangzheng 50ETF, the artificial market is proven to be effective. By analyzing the distribution of return rate under different parameters, we find that the system environment and investor psychological factors affect the market fluctuation in different way. 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 return 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. 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.

附表1 不同参数水平下收益率方差的Shapiro-Wilktest正态性检验

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 参数水平 | 统计量 | p-value | 参数水平 | 统计量 | p-value |
| 0.5 | 0.9589 | 0.3688 |  | 0.9931 | 0.8913 |
| 0.6 | 0.9835 | 0.4982 |  | 0.9854 | 0.3538 |
| 0.7 | 0.9805 | 0.1448 |  | 0.9843 | 0.2808 |
| 0.8 | 0.9884 | 0.5347 |  | 0.9791 | 0.1208 |
| 0.9 | 0.9789 | 0.1085 |  | 0.9846 | 0.2975 |
|  | 0.9878 | 0.4902 |  | 0.9835 | 0.2467 |
|  | 0.9743 | 0.3851 |  | 0.9803 | 0.1394 |
|  | 0.9879 | 0.5153 |  | 0.9878 | 0.4902 |
|  | 0.9815 | 0.1728 |  | 0.9814 | 0.1706 |
|  | 0.9765 | 0.3886 |  | 0.9780 | 0.0920 |
|  | 0.9878 | 0.4902 |  |  |  |
|  | 0.4196 | 4.5824e-18 |  |  |  |
|  | 0.6188 | 9.9390e-15 |  |  |  |
|  | 0.8518 | 1.3857e-08 |  |  |  |
|  | 0.8965 | 9.6725e-07 |  |  |  |

附表2 各组参数影响下收益率方差的Levene齐性检验

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 项 | 统计量 | p-value | 方差齐性 |
|  | 0.6877 | 0.5345 | True |
|  | 82.4169 | 1.3663e-53 | False |
|  | 0.4519 | 0.7710 | True |
|  | 0.8858 | 0.4722 | True |
|  | 0.3842 | 0.8200 | True |

1. 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 Kanehman 和 Tversky 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) 探讨排序依赖假设的合理性。我们的文章中规避了这一点，主观权重函数不依赖于排序。 [↑](#footnote-ref-1)
2. 表示买入； 表示卖出。 [↑](#footnote-ref-2)
3. 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))。 [↑](#footnote-ref-3)
4. 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。 [↑](#footnote-ref-4)
5. 我们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，我们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、噪声的剥离等等，直接采用模型产生的风险资产的价格序列进行分析。 [↑](#footnote-ref-5)