

# 控制与决策

Control and Decision

## 考虑附加情绪的两阶段投资组合前景决策模型

王励文, 吴和成, 万里洋

引用本文:

王励文, 吴和成, 万里洋. 考虑附加情绪的两阶段投资组合前景决策模型[J]. *控制与决策*, 2021, 36(3): 724–732.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0565>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 模糊环境下考虑零售商风险偏好的绿色供应链博弈模型

Modeling green supply chain games considering retailer's risk preference in fuzzy environment

*控制与决策*. 2021, 36(3): 711–723 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0646>

### 一种要素双模糊的限制交流结构合作博弈方法及应用

An allocation model of limited communication structure cooperative game with dual fuzzy elements

*控制与决策*. 2021, 36(2): 475–482 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1048>

### 考虑时间序列的动态大群体应急决策方法

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

*控制与决策*. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

### 基于前景理论和模糊理论的在线多属性采购拍卖 供应商选择决策

Decision method of supplier selection for online multi-attribute procurement auction based on prospect theory and fuzzy theory

*控制与决策*. 2020, 35(11): 2637–2645 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1768>

### 库存水平影响需求下变质品订购、定价和保鲜技术投资的联合决策

Ordering, pricing and preservation technology investment decision for perishable items with inventory-level-dependent demand

*控制与决策*. 2020, 35(11): 2578–2588 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0195>

# 考虑附加情绪的两阶段投资组合前景决策模型

王励文<sup>†</sup>, 吴和成, 万里洋

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

**摘要:** 针对前景模型在投资情绪偏好决策的不足, 基于 BW 理论从偏好角度对投资者情绪的定义, 建立附加情绪的投资决策模型. 首先根据从众心理与收益追踪对投资者的影响, 定义情绪转变的概率分布; 然后构建附加二元非线性参数的价值函数, 对可选投资项目进行偏好排序; 最后根据偏好决策及风险差异将收益约束下的最大信息熵作为风险规避者的目标函数, 将熵约束下的最大均值收益率作为风险偏好者的目标函数, 分别进行迭代计算求得投资比例. 仿真与算例分析结果表明: 收益波动超过临界值后, 持悲观态度的投资者占比更大; 乐观投资者的初始占比一定程度上会改变个体偏好决策; 风险偏好者愿意对高收益高风险的项目给予更大的投资权重; 经济市场有序化有利于投资者作出投资决策.

**关键词:** 前景理论; 损益敏感度; 情绪转变; 熵优化; 风险偏好

中图分类号: F832.48

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0565

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 王励文, 吴和成, 万里洋. 考虑附加情绪的两阶段投资组合前景决策模型[J]. 控制与决策, 2021, 36(3): 724-732.

## Two-stage portfolio prospect decision model considering additional emotion

WANG Li-wen<sup>†</sup>, WU He-cheng, WAN Li-yang

(School of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Aiming at covering the weaknesses of prospect models in investment sentiment and preference decision-making, we propose the investment decision model with sentiment attribute based on the definition of investor sentiment in perspective of preference got from the BW (Baker and Wurgler) theory. We firstly define a probability distribution of emotional transition based on the influence of herd mentality and income tracking on investors. Then, we construct a value function of the additional binary nonlinear parameters to sort the preference of the optional investment items. Finally, the maximum information entropy under the income constraint is formalized as the objective function of the risk aversion and the maximum mean rate of return under the entropy constraint is formalized as the objective function of the risk appetite respectively according to the preference decision and the heterogeneous risk, acquiring the investment ratio through iteratively calculate. The simulation results show that the two-stage decision model can better fit the local optimal decision-making scheme chosen by irrational investors. The result of simulation and illustrative example show that: The proportion of pessimistic investors will increase when returns fluctuate beyond the critical value; The initial proportion of optimistic investors will change individual preference decisions to some extent; The risk seekers prefer to assign greater investment weight on high-risk projects; The well-organized economic market is helpful for investors to make investment decisions.

**Keywords:** prospect theory; profit and loss sensitivity; emotional transformation; entropy optimization; risk preference

## 0 引言

为扩大供给侧结构性改革空间,我国在发展中  
对经济增速下行的压力给予了更高的容忍度,也给  
经济环境带来了更大的不确定性.自2018年中央

政治局会议确定稳投资政策以来,行业投资成为拉  
动整体投资的主导力量,投资主体在刺激行业发展的  
的同时更注重投资决策的有效性.面对多种内外部  
因素,投资人有时会作出非理性的决策,学者们就个

收稿日期: 2019-04-29; 修回日期: 2019-09-04.

基金项目: 国家社科基金项目(16BGL033).

责任编委: 唐万生.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: wlw0991@nuaa.edu.cn.

体投资决策问题进行了大量的研究,其中投资者情绪对决策的影响是被重点关注的问题之一. 投资者情绪的研究属于行为金融学范畴,历史文献对投资者情绪尚未形成统一的定义,最初DeLong等<sup>[1]</sup>认为投资者情绪可视为未被事实证明的对未来现金流与投资风险的信念,随后衍生出多种不同的解释. Baker等<sup>[2]</sup>认为投资者情绪是个体对投资价值的错误估计. Han<sup>[3]</sup>将投资者情绪作为投资信念样本与总体间的误差. Barberis等<sup>[4]</sup>认为投资者情绪是对预期收益的信念偏差. Baker等<sup>[5]</sup>在其理论中(简称BW理论)分别从“偏好”和“信念”的视角将其定义为投资者的乐观/悲观预期及对投资市场的套利猜测. 相比过度波动的解释,学者们更倾向于将投资者情绪定义为投资行为中对理性预期或理性偏好的偏离.

就投资情绪如何影响决策学者们存在不同的见解. Stambaugh等<sup>[6]</sup>认为当投资者情绪普遍高涨带动市场异象时,短线策略更有利可图. Alimov等<sup>[7]</sup>发现正向投资情绪对年轻公司的影响更为明显. 凌志明等<sup>[8]</sup>运用非参数方法筛选合适的Copula模型,将变点前后尾部相关系数变化量作为情绪传染与否的判断依据,并证实随着被传染国市场的完善情绪传染会相应减弱,投资者决策也会更加理性. 吴静杰等<sup>[9]</sup>通过情绪诱导实验发现负面情绪会约束决策能力. 张信东等<sup>[10]</sup>在构建情绪指数时发现投资者情绪可促进成长机会对无形资产投资的效果.

根据BW理论对投资情绪的定义,研究成果大多从“信念”角度分析情绪的影响,忽略了情绪对投资偏好的作用. 事实上已有不少文献从偏好角度对决策进行了讨论,其中以Kahneman等<sup>[11]</sup>的前景理论为基础的偏好决策受到学者们广泛认同,并由此产生了大量研究成果. Klein等<sup>[12]</sup>使用前景理论中损失厌恶的概念揭示了投资偏好取决于盈利能力及其相对现状的变化. Erner等<sup>[13]</sup>利用前景参数判断个体对金融产品的偏好. Dichtl等<sup>[14]</sup>验证了前景理论在评估投资者偏好方面的有效性. 莫国莉等<sup>[15]</sup>提出了四参照点前景决策方法进而求得应急投资方案偏好,用于解决股市投资的突发事件. 张惠琴等<sup>[16]</sup>基于前景理论构建决策效用模型,发现一定收入区间内投资者倾向于选择低收益低风险方案.

前景理论的投资决策研究大多体现在为个体风险偏好对投资选择的影响,缺乏与投资情绪相关的偏好研究. 基于前景理论模型在投资情绪方面的研究不足,本文决定在前景模型中构建情绪参数,使其进一步完善. 权衡不同前景模型在决策中的适用性,选

择以改进前景模型作为基础理论模型,在此基础上进行构建.

现有文献从不同角度对传统前景模型作出了改进. Tversky等<sup>[17]</sup>在原理论基础上构建了累积前景理论,引入容量的概念,并将风险偏好按照损益概率进行四分区域划分. Schmidt等<sup>[18]</sup>在序依赖指定权重的前提下实现了参考点设置的不确定性. Stott<sup>[19]</sup>构建随机选择函数以阐述个体权衡时可能出现的随机选择现象. 经比较,高建伟等<sup>[20-22]</sup>构建的改进前景决策模型更加贴合本文的研究动机,其前景决策罕有地将个体对损益敏感因素纳入到价值函数中,并认同情绪对主观价值的影响,但对敏感系数的表达形式及取值范围缺乏具体解读.

结合文献,本文将情绪传染因素纳入损益敏感系数,借助情绪转变概率构建系数表达式,借鉴Arrow<sup>[23]</sup>对风险偏好的划分,得到附加情绪的投资偏好. 将投资者按风险偏好进行分类,构建异质化目标函数及约束条件,得到最终的投资方案.

## 1 经典前景理论模型

### 1.1 基本表述

投资者在前景不确定条件下,根据收益特征及感知判断项目是否具备投资价值,并得出项目投资偏好排序. 在多项偏好决策中,投资者根据投资目标确定相应投资比例,完成资源配置过程.

投资环境中存在 $n$ 个可行投资项目 $B_1, B_2, \dots, B_n$ . 设状态集 $L = l_1, l_2, \dots, l_k, \dots, l_m$ ,第 $l_j$ 种状态发生的概率为 $p_j$ ,且满足 $0 \leq p_j \leq 1, \sum_{j=1}^m (p_j) = 1$ . 在状态 $l_j$ ,项目 $B_i$ 的损益结果为 $d_{ij}$ ,由此得到 $m$ 个状态下的损益矩阵 $A = (d_{ij})_{m \times n}$ . 投资的决策权重向量 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n), \sum_{k=1}^n (W_k) = 1$ .

### 1.2 前景理论基础模型

前景理论认为,投资决策者通常是非理性的. 在非理性人假设下,大多数投资者在面临收益时会具备风险规避意识,在面临失败时会表现出风险倾向,对损失比对收益要更敏感.

根据传统前景理论,投资者绝对收益即为最低参考点值为0的收益. 投资者对项目 $i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的期望价值取决于两个因素:项目损益状态的价值函数和决策权重函数. 价值函数根据个体感知“收益”或“损失”而得,前景的期望价值表示为

$$V_i = \sum_{j=1}^m \vartheta(d_{ij})W(p_j). \quad (1)$$

为了在传统前景理论上对不同收益或损失的风险态度给予更细致的划分,价值函数可表示为

$$v(d) = \begin{cases} d^\alpha, & d \geq 0; \\ -\lambda(-d)^\beta, & d < 0. \end{cases} \quad (2)$$

前景理论中投资价值取决于投资者的感知损益。 $\alpha, \beta \in (0, 1)$ ,二者分别代表价值幂函数在感知“收益”区域和感知“损失”区域的凹凸程度,其数值越大,投资者越趋向于风险偏好。 $\lambda$ 表示损失规避系数,其数值变化会影响价值函数的斜率。当 $\lambda$ 大于1时,投资者对损失的敏感度相较于收益的敏感度更高。

前景理论的权重函数是投资者根据客观概率对损益进行判断,得出的决策权重值,具体可表示为

$$W(p) = \begin{cases} W^+(p) = \frac{p^\gamma}{[p^\gamma + (1-p)^\gamma]^{\frac{1}{\gamma}}}, \\ W^-(p) = \frac{p^\delta}{[p^\delta + (1-p)^\delta]^{\frac{1}{\delta}}}. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $W^+(p)$ 为投资者感知“收益”时的决策权重, $W^-(p)$ 为感知“损失”时的决策权重。权重函数实质是个体对项目赋予的主观权重,既基于客观概率,又受自身对损益风险态度的影响,Kahneman等<sup>[11]</sup>认为主观决策权重会给予小概率事件过高的权重,而低估大概率事件的权重。决策函数的风险态度用参数表示为 $\gamma$ 和 $\delta$ ,根据Kahneman的实验, $\gamma = 0.61, \delta = 0.69$ 时与实际情况较为吻合。

### 1.3 改进前景理论模型

高建伟等<sup>[20-22]</sup>在前景理论模型基础上提出改进的前景理论决策模型,认为原理论对投资者损益敏感程度的反应缺乏对称性,需要进一步完善。改进后的价值函数表示为

$$v(\Delta d) = \begin{cases} \xi \Delta d^\alpha, & \Delta d \geq 0; \\ -\theta(-\Delta d)^\beta, & \Delta d < 0. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\Delta d = d - d_0, d_0 \geq 0$ ,为最低收益参考点。参数 $\xi$ 和 $\theta$ 分别表示决策者对收益和损失的敏感程度。如果投资者对收益更敏感,则 $\theta$ 取值为1, $\xi > 1$ ;如果投资者对损失比对收益敏感,则 $\xi$ 取值为1, $\theta > 1$ 。 $\alpha, \beta$ 与传统理论的设定相同,反映决策者对风险的偏好程度,但是在取值上存在差异。在 $\alpha, \beta > 0$ 的条件下,允许存在 $\alpha, \beta = 1$ 或者 $\alpha, \beta > 1$ 的取值。 $\alpha, \beta > 1$ ,为保守型投资者; $\alpha, \beta = 1$ ,投资者倾向于风险中立; $0 < \alpha, \beta < 1$ ,为风险偏好者。改进前景决策模型将个体对损益的敏感因素纳入到价值函数中,但并未给出敏感系数的表达形式,本文将在下节就此问题进行进一步研究。

## 2 两阶段投资模型构建

投资模型分两阶段完成决策。首先以情绪传染效应作为参数设置的出发点,表述外部环境干扰对投资者决策带来的影响;然后根据投资者风险偏好分别构建优化函数,求解最优投资配置。

### 2.1 第1阶段:附加情绪效应的投资偏好决策

传统前景理论的投资者在感知“损益”的基础上得到项目前景值,以此作为决策依据。投资决策环境存在情绪传染效应时,外部环境将存在多位投资者对若干项目作出决策。投资者人数为 $N, N > 0$ 。投资人按初始投资态度进行分组,乐观型投资人数记为 $N_+$ ,悲观型投资人数记为 $N_-, N_+ + N_- = N$ 。投资人受到外部决策干扰,决策情绪在乐观与悲观之间发生转换。投资人因外部作用从乐观型向悲观型转变的概率为

$$\text{trans}_{+-} = \frac{k}{2}(1 + \tan J(U)); \quad (5)$$

从悲观型向乐观型转变的概率为

$$\text{trans}_{-+} = \frac{k}{2}(1 + \tan J(-U)). \quad (6)$$

其中

$$\tan J(U) = \frac{e^U - e^{-U}}{e^U + e^{-U}}, U = aX + b\frac{z}{k}.$$

行为转变概率与函数的构建,源于金融市场的不完全信息效率导致的技术决策收益与预期结果之间存在的巨大偏差。正如Leroy<sup>[24]</sup>所言,非理性决策者在不完全效率市场上企图通过相互排斥的异质期望获取额外收益,因此与期望的完全理性形成相矛盾,处理这种异质性的方法之一就是使用行为的概率进行描述。

转变概率分布参考了Lux等<sup>[25-26]</sup>的多主体演化模型关于交易员的态度转变概率分布。该模型与Delong具有相似的观点,认为错误的交易情绪产生于人际干扰。转变概率的构建结合了物理统计学幂律定律的原理,这些由经济主体相互作用产生的幂律属性在模拟中得到了证实,初始转变概率表示为

$$\text{trans}_{+-}^{\text{Initial}} = k \cdot \exp(U) (\text{trans}_{-+}^{\text{Initial}} = k \cdot \exp(-U)),$$

其中: $k$ 为重新评估的频率, $U$ 为情绪函数。孙有发等<sup>[27]</sup>发现转变概率分布虽存在经济意义,但不满足数学意义上的概率范围。介于Sigmoid函数在拟合大脑运转方面的优良性质,采用正切Sigmoid函数的变换形式对原分布形式进行处理。保存原分布信息的同时,将输入 $(-\infty, +\infty)$ 映射到输出 $(0, 1)$ ,经过模拟实验,此分布确实能够更好地拟合真实数据。

情绪函数 $U$ 中,包含羊群效应与趋势追踪因素对

情绪转变的影响. 羊群效应对交易态度的影响可参考Shiller<sup>[28]</sup>在1992年的观点. 其调查研究发现,1987年股市崩溃后投资者的投资动机反映了对价格下跌的恐惧和受其他投资者情绪的影响,而非新信息本身,因此提出了投机市场社会动力学理论,并强调投资者的社会互动. 此外,Andreassen<sup>[29]</sup>的心理学实验表明,在没有其他刺激的前提下,被赋予预测金融价格任务的代理人有作出回归预测的倾向,但如果释放财经信息刺激则可使其行为转变为更外推的预测. 羊群效应与趋势追踪因素组合构成了控制情绪变化的 $U$ 函数,其组合被视为出现转变的主导趋势.

在 $U$ 的表达式中: $a$ 表示多数投资者意见对单个投资者( $i \in N$ )的重要性; $b$ 表示收益率变化对调整感知损益的重要性; $X = (N_+ - N_-)/N$ 表示多数投资者的态度,多数投资者持乐观态度时, $X > 0$ ,反之 $X < 0$ ; $z = v\sigma$ 表示项目收益率的变化趋势, $v$ 为系统风险系数, $\sigma$ 为项目的波动率; $k$ 表示投资者情绪改变的频率( $k \in (0, 1)$ ); $z/k$ 表示投资者感知损益的观点在调整期间上项目的平均收益率趋势. 参考10年内不同指数的最高收益率( $r_{上证} = 7.25\%$ ,  $r_{NASDAQ} = 11.8\%$ ,  $r_{标普} = 11.5\%$ ),  $z/k \in (0, 1)$ . 投资人情绪转变概率可具体地刻画投资人除个人感知外受到从众心理和项目收益趋势的影响,  $trans \in (0, 1)$ . 结合上述表述,构建附加情绪的投资偏好决策模型,投资决策者针对单个项目的价值函数可表示为

$$\vartheta(\Delta d) = \begin{cases} \xi^* \Delta d^\alpha, & \Delta d \geq 0; \\ -\theta^* (-\Delta d)^\beta, & \Delta d < 0. \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\xi^*$ 为收益敏感系数,  $\xi^* = \xi_0 + \xi_1 \rho$ ; 截距项 $\xi_0$ 为个体收益敏感度,与投资者对项目的了解程度有关,  $\xi_0$ 为常数且 $\xi_0 \in (0, 1)$ . 考虑投资者在价值感知中对投资群体的依赖,价值函数将乐观投资者的动态占比作为群体收益敏感系数,记为 $\rho$ ,有

$$\rho = x(1 - trans_{+-}) + (1 - x)trans_{-+}.$$

损失敏感系数 $\theta^* = \theta_0 + \theta_1 \epsilon$ ,  $\theta_0 \in (0, 1)$ 为个体损失敏感度. 持悲观态度的投资群体动态占比作为群体损失敏感系数,记为 $\epsilon$ ,有

$$\epsilon = xtrans_{+-} + (1 - x)(1 - trans_{-+}).$$

其中: $\xi_1$ 、 $\theta_1$ 为投资人对群体感知的依赖程度; $x = N_+/N$ ,为乐观投资群体的初始占比; $\rho + \epsilon = 1$ ,即损益敏感度之间存在互补关系,投资者对损益的一方过于敏感会导致其对另一变动的相对钝感; $\rho, \epsilon \in (0, 1)$ ,表示感知损益在预期损益范围内波动, $\rho$ (或 $\epsilon$ )的取值越趋近于1,投资者对收益(或损失)的敏感程

度越高,当 $0 < \rho < \epsilon < 1$ 时,投资者对损失的敏感度要比收益高,反之亦然;风险偏好参数 $\alpha$ 与 $\beta$ 的取值认同原改进模型.

由式(5)和(6)及 $U$ 的表达式,群体损益敏感系数可简化为

$$\rho(x, k) = x(1 - k) + k \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{-2U}} \right), \quad (8)$$

$$\epsilon(x, k) = (k - 1)x + 1 + k \left( \frac{1}{1 + e^{-2U}} - 1 \right), \quad (9)$$

$$U(x, k) = a(2x - 1) + b \frac{z}{k}. \quad (10)$$

**命题1** 已知自变量 $x, k \in (0, 1)$ ,函数 $\rho(x, k)$ 与 $\epsilon(x, k)$ 的取值在 $0 \sim 1$ 范围内.

**证明** 令 $U(x, k) \in (-\infty, +\infty)$ ,因为

$$\lim_{U \rightarrow -\infty} \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{-2U}} \right) = 1,$$

$$\lim_{U \rightarrow +\infty} \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{-2U}} \right) = 0,$$

$U$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 连续,所以 $\left( 1 - \frac{1}{1 + e^{-2U}} \right) \in (0, 1)$ .

已知 $x, k \in (0, 1)$ ,可推导出 $k \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{-2U}} \right) \in (0, k)$ ,

$x(1 - k) \in (0, 1 - k)$ ,所以 $x(1 - k) + k \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{-2U}} \right) \in (0, 1)$ ,即 $\rho(x, k) \in (0, 1)$ . 同理,由上述推导可知

$\left( \frac{1}{1 + e^{-2U}} - 1 \right) \in (-1, 0)$ . 当自变量 $x, k \in (0, 1)$ 时,

$k \left( \frac{1}{1 + e^{-2U}} - 1 \right) \in (-k, 0)$ ,同时 $(k - 1) \in (-1, 0)$ ,

则有 $(k - 1)x \in (k - 1, 0)$ ,所以 $(k - 1)x + 1 + k \left( \frac{1}{1 + e^{-2U}} - 1 \right) \in (0, 1)$ .  $\square$

对上述损益敏感系数的构建存在以下表述:

1) 群体敏感系数的设定存在一个隐含前提,即投资人将自身情绪转变概率作为群体转变概率进行判断,投资者会根据自身可获得信息完成决策,这既考虑到“非理性人”假设,也是在信息不完全下进行评估的方式之一.

2) 根据参数条件易得出 $\xi^*、\theta^* > 0$ ,符合改进模型对敏感系数经济意义的假定. 由表达式(7)可知,  $\xi^*$ 与 $\theta^*$ 在 $(0, +\infty)$ 取值越大,函数曲线越靠近纵轴,  $\vartheta(\Delta d)$ 对 $\Delta d$ 的变化越敏感. 由此可知,当 $\xi^*、\theta^* \in (0, 1)$ 时,投资者对损益的变化弱敏感;当 $\xi^*、\theta^* = 1$ 时,投资者对损益的变化保持中立;当 $\xi^*、\theta^* > 1$ 时,投资者对损益变化敏感度较强.  $\theta^* > \xi^* > 0$ 表示个体对损失敏感度大于对收益敏感度.

3) 当 $\xi_1、\theta_1 \in (0, 1)$ 时,可参考相关模型<sup>[30]</sup>计算.

概率权重函数的设定参考前景理论,记为

$$W(p) = \begin{cases} W^+(p) = \frac{p^\gamma}{[p^\gamma + (1 - p)^\gamma]^{\frac{1}{\gamma}}}, \\ W^-(p) = \frac{p^\delta}{[p^\delta + (1 - p)^\delta]^{\frac{1}{\delta}}}. \end{cases} \quad (11)$$

投资者对项目*i*的前景值可表示为

$$V_i = \sum_{j=1}^m W(p_j) \vartheta(\Delta d_{ij}). \quad (12)$$

投资者得出项目的前景值并按降序排列即可根据附加情绪的前景值完成多项目偏好决策,偏好不仅取决于个体感知损益,还包含外部环境对感知损益敏感程度的影响.

## 2.2 第2阶段:项目组合投资权重的确定

第1阶段得到投资项目偏好  $V_1 \succ V_2 \succ \dots \succ V_n$ , 基于投资者分散风险的意图,通常选择以组合方式进行投资,因此需在第2阶段对备选项目的投资权重进行确定. 权重决策模型参考 Popkov<sup>[31]</sup> 的投资组合熵模型,其认为相较均值方差决策,信息熵能更好地表征风险的不确定性. 同时 Popkov 对熵优化决策也作了分类:一类以投资期间维持最低收益下界为条件,即“收入最低约束人群”;一类以收益最大化为目标,即“收入最大人群”,并以先验概率根据熵最大化/收益最大化建立模型. 李华等<sup>[32-34]</sup> 认为,方差度量风险效果不理想是因为方差可正可负,实际上投资者并不拒绝正向的收益波动,而熵的取值非正且满足收益不确定的性质,更具有动态意义,并验证了投资组合熵模型在决策中的适用性. 基于上述文献,结合风险偏好人群差异建立以下模型.

投资者选择投资  $M$  个项目 ( $0 < M < n$ ), 周期为  $T$ . 考虑项目不同时期的收益差异,将周期分为  $S$  个时段,  $\varphi_t$  为  $t$  时段收益占周期总收益的比重,  $\varphi_t = R_t/R_T$ .  $r_{it}$  为项目  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) 在  $t$  时段的收益率,  $r_{it} = R_{it}/R_t$ . 项目  $i$  的期望收益率可表示为

$$\bar{r}_i = \sum_{t=1}^S \varphi_t r_{it}, \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (13)$$

项目的投资比例为  $\kappa_i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ), 根据单个项目的期望收益,可求得投资者的收益率均值为

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^M \kappa_i \bar{r}_i = \sum_{t=1}^S \varphi_t R_t, \quad (14)$$

其中  $R_t$  为投资者在  $t$  时段的收益,  $R_t = \sum_{i=1}^M \kappa_i r_{it}$ .

定义  $t$  时段项目收益的概率为

$$P_t = \frac{\varphi_t R_t}{\bar{r}}, \quad (15)$$

项目收益的信息熵记为

$$\text{Entropy} = - \sum_{t=1}^S P_t \cdot \ln P_t. \quad (16)$$

投资者对风险的偏好根据理论文献可分为风险偏好型与风险规避型. 风险偏好投资者对波动收益

的偏好要胜于稳定收益,风险规避者则更倾向于稳定收益,投资决策模型将根据投资者风险偏好差异分别构建优化目标函数.

1) 熵值最大化-风险规避投资者为

$$\begin{aligned} \max \text{ entropy} &= - \sum_{t=1}^S P_t \cdot \ln P_t; \\ \text{s.t. } \bar{r} &= \sum_{t=1}^S \varphi_t R_t = c, \quad c \text{ 为常数}. \end{aligned} \quad (17)$$

在  $\bar{r}$  不变的约束下,以熵值最大化为目标函数实质是模拟不确定性最大时的选择,即最坏条件下维持稳定收益,符合风险规避者的投资动机. 由于

$$\begin{aligned} \text{entropy} &= - \sum_{t=1}^S P_t \cdot \ln P_t = \\ &= \ln \bar{r} - \frac{1}{\bar{r}} \cdot \sum_{t=1}^S \varphi_t R_t \ln(\varphi_t R_t), \end{aligned} \quad (18)$$

根据约束条件,  $\bar{r}$  为常数,目标函数可简化为

$$\begin{aligned} \max \widehat{\text{entropy}} &= - \sum_{t=1}^S \varphi_t R_t \ln(\varphi_t R_t). \\ \text{s.t. } \sum_{t=1}^S \varphi_t R_t &= c, \quad c \text{ 为常数}; \\ \sum_{i=1}^M \kappa_i &= 1. \end{aligned} \quad (19)$$

求得简化目标函数的最大化即可得到最大化熵目标函数的最优解.

2) 收益最大化-风险偏好投资者相较而言,风险偏好者更倾向于收益最大化,不惜放宽对风险的包容度. 其目标函数是在不确定性约束下,实现收益率均值最大化,具体表示为

$$\begin{aligned} \max \bar{r}(\kappa_1, \dots, \kappa_M, t) &= \sum_{t=1}^S \varphi_t R_t. \\ \text{s.t. } - \sum_{t=1}^S P_t \cdot \ln P_t &\geq w, \quad w \text{ 为常数且 } w > 0; \\ \sum_{i=1}^M \kappa_i &= 1. \end{aligned} \quad (20)$$

其中不等式约束用来描述市场稳定水平存在合理下界的情况. 目标函数同理可简化为

$$\begin{aligned} \max \sum_{t=1}^S \sum_{i=1}^M \varphi_t r_{it} \kappa_i. \\ \text{s.t. } \sum_{t=1}^S [\varphi_t R_t \ln(\varphi_t R_t)] &\leq w_1, \quad w_1 \text{ 为常数}; \\ \sum_{i=1}^M \kappa_i &= 1. \end{aligned} \quad (21)$$

投资风险偏好不同使得优化具有差异性. 函数(17)以最低收益为约束条件,适用于愿牺牲部分机会换取稳定收益的风险规避者. 函数(20)在熵下界约束条件下追求收益最大化,适合在风险中追求高回报的风险偏好者.

### 3 仿真与算例分析

设置实验参数  $a = 0.2, b = 0.18, v = 0.1, \gamma = 0.61, \delta = 0.69, \alpha = 1.21, \beta = 1.02^{[35]}$ .

#### 3.1 收益波动对投资情绪的影响

乐观投资者的初始占比对偏好决策的影响如图1所示. 由图1可见,收益率波动在20%以内时,投资者大多处于乐观态度,情绪波动较小. 收益率波动20%~50%,曲线波动幅度较大,个体的投资态度有较大起伏. 收益率波动超过50%时,投资者的情绪波动放缓,持悲观态度的概率要大于乐观概率.

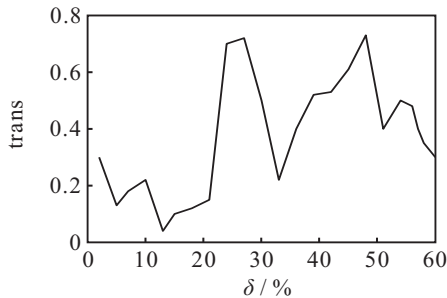


图1 乐观投资者的初始占比对偏好决策的影响

#### 3.2 项目偏好算例分析

投资者A处于100个投资者的环境中,面临50个项目方案( $S_1 \sim S_{50}$ ),从中选择5个项目进行投资.  $k = 0.2$ ,收益率服从稳定分布 $^{[36]}DS(1.4, 0.89, 1, 0.05)$ . 期末收益分配率作客观概率 $P$ ,根据项目前景值得偏好决策,以此讨论乐观投资者初始占比 $x$ 对项目偏好的影响. 当 $x = 0.8$ 时,前景值记为 $V_1(S \cdot)$ ,当 $x = 0.1$ 时,记为 $V_2(S \cdot)$ ,依前景值对两组偏好进行比较.  $V_1(S \cdot)$ 与 $V_2(S \cdot)$ 虽数值不同,偏好结果却相同,为 $S_{48} \succ S_{30} \succ S_{19} \succ S_{40} \succ S_{50}$ . 但此结果潜在假定各项目初始乐观占比均相等,若初始乐观占比存在差异,偏好决策是否会不同?

图2以 $S_{19}$ 在 $x = 0.4$ 的前景值 $V(S_{19}, 0.4)$ 作为参考,将 $S_{48}, S_{30}, S_{40}, S_{50}$ 在不同初始乐观占比的前景值与之对比. 由图2可见,前景值随 $x$ 增大呈正向变动. 对收益远高于 $S_{19}$ 的 $S_{48}$ 与 $S_{30}$ ,无论 $x$ 取何值,其前景值都大于 $V(S_{19}, 0.4)$ . 而对收益与 $S_{19}$ 十分接近的 $S_{40}$ 和 $S_{50}$ ,原偏好为 $S_{19} \succ S_{40} \succ S_{50}$ ,若 $x$ 值超过临界,偏好则发生变动. 如 $x = 0.6, V(S_{40}, 0.6) > V(S_{19}, 0.4), S_{40} \succ S_{19}; x = 0.8, V(S_{50}, 0.8) > V(S_{19}, 0.4), S_{50} \succ S_{19}$ . 因而 $x$ 取值不同偏好可能存

在异性.

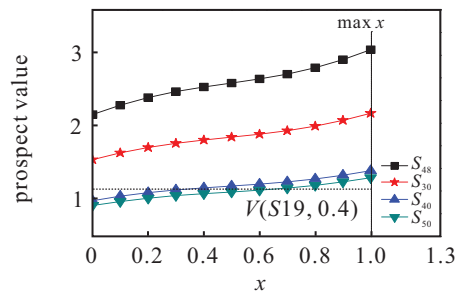


图2 乐观投资者的初始占比对偏好决策的影响

#### 3.3 优化决策案例

由偏好排序选择 $S_{48}, S_{30}, S_{19}$ 进行投资,预期收益率为0.419、0.332、0.249,其差值包含风险溢价. 项目运营期分3段记为 $t_1, t_2, t_3$ . 投资人期望在 $t_2$ 期末收回60%的收益,  $\varphi_t = (0.3, 0.3, 0.2), w_1 = 0.2, c = 0.2$ . 对约束条件下的非线性优化函数求解,经过25次迭代,结果如表1所示.

表1 异质风险偏好优化决策结果

type	investment ratio			max $\bar{r}$	max entropy
	$S_{48}$	$S_{30}$	$S_{19}$		
investor <sub>AP</sub>	0.659	0.146	0.195	0.373	—
investor <sub>AV</sub>	0.477	0.261	0.261	—	0.199

表1为风险偏好投资者(investor<sub>AP</sub>)与风险规避投资者(investor<sub>AV</sub>)在不同优化目标下的投资决策. 风险偏好者在熵约束下追求加权平均收益最大化,风险规避者选择在最大不确定性下持有稳定收益. 相比风险规避者,偏好风险的投资者愿意给予高收益高风险的项目更高的投资比例.

#### 3.4 信息熵下界变化对目标收益的影响

在以最大均值收益率作为目标函数的优化模型中,信息熵可作为系统有序化程度的度量标准之一. 信息熵低意味着系统的有序,反之则表示系统趋于混乱无序 $^{[37]}$ . 图3根据优化模型计算出不同低位熵值对应的优化函数,借助软件拟合出关系曲线. 伴随着信息熵界值 $w$ 的增加,最大收益率均值不断降低,当 $w$ 超过0.355时优化模型将不再存在期望收益的最优解.

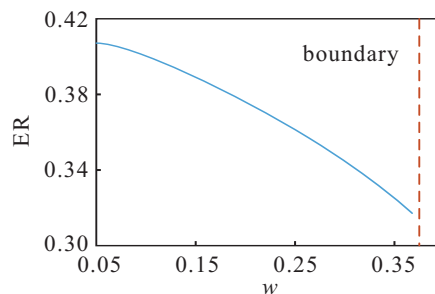


图3 信息熵低点与最大收益率均值的关系

事实上,针对投资收益最优解的边界问题在学术界已有共识.早在1952年Markowitz<sup>[38]</sup>的证券投资理论中就提到投资行为至少应满足其中一个投资特征,即“风险约束下的期望收益最大化”与“收益约束下的风险收益最小化”,据此构成的有效投资组合,应该对应于期望收益-风险平面上的一条有效边界.此外,近年来许多学者(Yu等<sup>[39]</sup>、李英华等<sup>[40]</sup>)也从不同角度论证了信息熵度量风险的可行性,当风险超出投资组合有效边界,将不存在最优解,在此基础上拟合结果具备一定的合理性.风险规避者的优化模型是收益约束下求最大信息熵,即最不稳定的环境下保证稳定收益.但此方法仅针对离散收益分布,投资个体(除垄断型个体)收益的连续变化与系统的不确定性无法构成实质的因果关系,故投资个体收益与最大熵之间的关系曲线不存在.

3.5 参数设定分析

实验参数 $\gamma$ 、 $\delta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 的设定,主要参考曾建敏<sup>[35]</sup>采用CE范式实验测得的结果,更贴合国内人群的风险偏好.参数 $a$ 、 $b$ 、 $v$ 、 $k$ 、 $x$ 的设定的敏感性分析主要从两个角度进行,第一参数 $k$ 、 $x$ 的变动是否会改变损益敏感系数 $\rho$ 、 $\epsilon$ 的意义,第二参数 $a$ 、 $b$ 、 $v$ 、 $k$ 的取值变动是否会改变情绪转变概率的取值意义.就第1个问题本文已在第3.1节给出了具体的证明,在此不做赘述.针对第2个问题,根据相关公式进行如下推导.

**证明** 已知 $U = aX + b\frac{z}{k}$ ,  $a, b, v, k, z/k \in (0, 1)$ , 由 $X = \frac{N_+ - N_-}{N}$  推得 $X \in [-1, 1]$ , 故 $U$ 的广义取值范围为 $(-1, 2)$ . 又知 $\tan J(U) = \frac{e^U - e^{-U}}{e^U + e^{-U}}$ , 则 $1 + \tan J(U) = \frac{2}{1 + e^{-2U}}$ ,  $k/2 > 0$ , 故 $\text{trans}_{+-}$ 在 $U \in (-1, 2)$ 时单调递增.  $1 + \tan J(-U) = \frac{2}{1 + e^{2U}}$ ,  $k/2 > 0$ , 故 $\text{trans}_{-+}$ 在 $U \in (-1, 2)$ 时单调递减. 基于以上性质, 参数对情绪转变概率的因素敏感性分析可选择用绝对测定法进行, 即将 $U$ 的极限值代入求得情绪转变概率的极端值, 如果极端值仍满足 $\text{trans} \in [0, 1]$ , 则可知参数的设定不会影响转变概率的取值意义, 有

$$\lim_{U \rightarrow -1} \text{trans}_{+-} = \frac{k}{2} \cdot \frac{2}{1 + e^{-2U}} = \frac{k}{1 + e^2} \in (0, 0.1192),$$

$$\lim_{U \rightarrow 2} \text{trans}_{+-} = \frac{k}{1 + e^{-4}} \in (0, 0.9820).$$

同理, 有

$$\lim_{U \rightarrow -1} \text{trans}_{-+} = \frac{k}{2} \cdot \frac{2}{1 + e^{2U}} = \frac{k}{1 + e^{-2}} \in (0, 0.8808),$$

$$\lim_{U \rightarrow 2} \text{trans}_{-+} = \frac{k}{1 + e^4} \in (0, 0.0180).$$

$U$ 取极限值所得的转变概率值均在可行域内, 因此, 参数在域内的变动不会改变情绪转变概率的取值意义. □

3.6 参照模型算例比较

本节将陈业华等<sup>[41]</sup>的决策模型作为参照组, 与 $x = 0.8$ 和 $x = 0.2$ 的决策结果进行比较, 检验模型的模拟效果. 为避免结果失真, 前景值将基于参照组的参数和数据进行计算. 由表2可知, 单个项目在不同模型设定下计算的前景值有差异. 针对同一项目,  $x = 0.8$ 时的前景值 $V_2$ 要大于参照组的前景值 $V_1$ , 而 $x = 0.1$ 时的前景值 $V_3$ 虽比参照组小, 却非常近似. 这意味着非理性人没被情绪感染时对项目的预期可能更接近于悲观情绪感染的前景值, 对项目前景的判断更为保守. 被乐观情绪感染的投资者则倾向于对未来给予更宽容的预期. 表3根据不同模型求得投资组合的权重, 并计算投资组合的综合前景值. 通过比较, 参照模型的前景值要低于乐观情绪传染后的前景值, 但比悲观情绪传染后的前景值略高. 当 $x$ 相同时, 风险偏好者较风险规避者对项目前景的判断更乐观.

表2 单个项目前景值比较结果

项目	$V_1$	$V_2$	$V_3$	组间排序
$S_1$ . 贵州茅台	-0.0119	0.0446	-0.012	$V_1 > V_2 > V_3$
$S_2$ . 招商银行	-0.016	0.0369	-0.0184	
$S_3$ . 上汽集团	-0.0256	0.0281	-0.0258	
$S_4$ . 中国石化	-0.0213	0.0367	-0.0230	
$S_5$ . 民生银行	-0.0210	0.0156	-0.0262	
$S_6$ . 海螺水泥	-0.0362	0.0136	-0.0374	

表3 投资组合前景值比较结果

项目	$w_1$	$x = 0.8$		$x = 0.1$	
		$w_2$	$w_2$	$w_3$	$w_3$
$S_1$ . 贵州茅台	0.0266	0.2746	0.2432	0.2003	0.1554
$S_2$ . 招商银行	0.2308	0.2006	0.1958	0.2172	0.3223
$S_3$ . 上汽集团	0.4590	0.1553	0.1357	0.1275	0.0477
$S_4$ . 中国石化	0.1271	0.2565	0.2231	0.2154	0.3139
$S_5$ . 民生银行	0.2154	0.0748	0.1150	0.1494	0.1333
$S_6$ . 海螺水泥	0.0823	0.0381	0.0874	0.0902	0.0273
组合前景值	-0.026	0.0351	0.0331	-0.0219	-0.0208

经比较可知, 非理性投资者在不同社会情绪下作出的决策是差异化的, 无情绪感染下的非理性决策更

贴于低风险低收益的投资决策,这与张惠琴等<sup>[16]</sup>的结论不谋而合. 如果不考虑情绪因素对投资者决策的影响,则其测算结果极可能是有偏的.

## 4 结论

本文在改进前景模型基础上构建了附加情绪传染效应的非线性敏感函数,根据所得投资偏好建立风险异质化的优化模型,得到具有收益导向和从众心理约束的局部最优解. 通过模型计算与仿真检验得到以下结果:

1) 收益波动超过临界值后,对项目持悲观态度的投资者占比更大;

2) 乐观投资者在投资者中的初始占比在一定程度上会改变个体偏好决策;

3) 偏好风险的投资者愿意对高收益高风险的项目给予更大的投资权重,在高收益驱使下,风险偏好者对风险的包容度更大;

4) 经济市场有序化有利于投资者作出投资决策,系统的有序化程度越高,投资者越容易在投资中找到规律获取高额收益,当信息熵超过临界点,系统处于混乱状态,不再存在投资的最优收益.

## 参考文献(References)

- [1] DeLong J B, Shleifer A, Summers L H. Noise trader risk in financial markets[J]. *Journal of Political Economy*, 1990, 98(4): 703-738.
- [2] Baker M, Stein J C. Market liquidity as a sentiment indicator[J]. *Journal of Financial Markets*, 2004, 7(3): 271-299.
- [3] Han B. Investor sentiment and option prices[J]. *Review of Financial Studies*, 2008, 21(1): 387-414.
- [4] Barberis N, Shleifer A, Vishny R. A model of investor sentiment[J]. *Journal of Financial Economics*, 1998, 49(3): 307-343.
- [5] Baker M, Wurgler J. Investor sentiment in the stock market[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 2007, 21(2): 129-151.
- [6] Stambaugh R F, Yu J F, Yuan Y. The short of it: Investor sentiment and anomalies[J]. *Journal of Financial Economics*, 2012, 104(2): 288-302.
- [7] Alimov A, Mikkelsen W. Does favorable investor sentiment lead to costly decisions to go public?[J]. *Journal of Corporate Finance*, 2012, 18(3): 519-540.
- [8] 凌志明, 王景乐. 基于Copula模型变点检测的投资者情绪传染分析[J]. *统计与决策*, 2018(7): 171-174.  
(Ling Z M, Wang J L. Investor sentiment contagion analysis based on Copula model point detection[J]. *Statistics and Decision*, 2018(7): 171-174.)
- [9] 吴静杰, 杨乃定, 封超, 等. 突发事件下情绪对决策者风险偏好和框架效应的影响[J]. *管理学报*, 2016, 13(6): 906-912.  
(Wu J J, Yang N D, Feng C, et al. The effects of emotion on risk preference and framing effect under emergency[J]. *Chinese Journal of Management*, 2016, 13(6): 906-912.)
- [10] 张信东, 于静. 企业投资主导要素研究[J]. *科研管理*, 2018, 39(2): 125-134.  
(Zhang X D, Yu J. Discussion on the first driving factor for enterprises' investment[J]. *Science Research Management*, 2018, 39(2): 125-134.)
- [11] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk[J]. *Econometrica*, 1979, 47(2): 263-292.
- [12] Klein M, Deissenroth M. When do households invest in solar photovoltaics? An application of prospect theory[J]. *Energy Policy*, 2017, 109: 270-278.
- [13] Erner C, Klos A, Langer T. Can prospect theory be used to predict an investor's willingness to pay[J]. *Journal of Banking & Finance*, 2013, 37(6): 1960-1973.
- [14] Dichtl H, Drobetz W. Portfolio insurance and prospect theory investors: Popularity and optimal design of capital protected financial products[J]. *Journal of Banking & Finance*, 2011, 35(7): 1683-1697.
- [15] 莫国莉, 张卫国, 刘芳, 等. 基于四参照点前景理论的股市投资应急决策方法[J]. *控制与决策*, 2018, 33(10): 1851-1860.  
(Mo G L, Zhang W G, Liu F, et al. Emergency decision-making method for stock investment based on forecast theory with four reference points[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(10): 1851-1860.)
- [16] 张惠琴, 王金春, 陶虹琳. 基于前景理论的PPP项目投资决策行为研究[J]. *软科学*, 2018, 32(8): 129-133.  
(Zhang H Q, Wang J C, Tao H L. Research the decision-making behavior of investors based on prospect theory in the PPP project[J]. *Soft Science*, 2018, 32(8): 129-133.)
- [17] Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty[J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4): 297-323.
- [18] Schmidt U, Starmer C, Sugden R. Third-generation prospect theory[J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 2008, 36(3): 203-223.
- [19] Stott H P. Cumulative prospect theory's functional menagerie[J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 2006, 32(2): 101-130.
- [20] 高建伟, 郭奉佳. 基于改进前景理论的直觉模糊随机多准则决策方法[J]. *控制与决策*, 2019, 34(2): 317-324.  
(Gao J W, Guo F J. Intuitionistic fuzzy stochastic multi-criteria decision-making method based on modified prospect theory[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(2): 317-324.)
- [21] 靳留乾, 徐扬. 基于证据推理和第3代前景理论的不确定性多属性决策方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(1): 105-113.  
(Jin L Q, Xu Y. Method for uncertain multi-attribute decision making based on evidential reasoning

- and third-generation prospect theory[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(1): 105-113.)
- [22] 马健, 孙秀霞. 基于效用曲线改进的前景理论价值函数[J]. *信息与控制*, 2011, 40(4): 501-506.  
(Ma J, Sun X X. Modified value function in prospect theory based on utility curve[J]. *Information and Control*, 2011, 40(4): 501-506.)
- [23] Arrow K J. Alternative approaches to the theory of choice in risk-taking situations[J]. *Econometrica*, 1951, 19(4): 404-437.
- [24] Leroy S F. Efficient capital markets and martingales[J]. *Journal of Economic Literature*, 1989, 27(4): 1583-1621.
- [25] Lux T. Time variation of second moments from a noise trader/infection model[J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 1997, 22(1): 1-38.
- [26] Lux T, Marchesi M. Scaling and criticality in a stochastic multi-agent model of a financial market[J]. *Nature*, 1998, 397(6719): 498-500.
- [27] 孙有发, 颜学湘. 基于情绪传染的自适应主体股市演化[J]. *系统管理学报*, 2011, 20(3): 327-334.  
(Sun Y F, Yan X X. Stock market evolution with adaptive multi-agents and sentiment contagion[J]. *Journal of Systems and Management*, 2011, 20(3): 327-334.)
- [28] Shiller R J. *Market volatility*[M]. Cambridge: MIT-Press, 1992: 1-478.
- [29] Andreassen P B. On the social psychology of the stock market: Aggregate attributional effects and the regressiveness of prediction[J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1987, 53(3): 490-496.
- [30] 姚禄仕, 吴宁宁. 基于LSV模型的机构与个人羊群行为研究[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(7): 55-62.  
(Yao L S, Wu N N. A study on herding behavior of institution and individual investors based on LSV model[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(7): 55-62.)
- [31] Popkov A Y. Entropy model of the investment portfolio[J]. *Control in Social Economic Systems*, 2006, 67(9): 179-190.
- [32] 李华, 何东华. 熵-证券投资组合风险的一种新的度量方法[J]. *数学的实践与认识*, 2003, 33(6): 16-21.  
(Li H, He D H. Entropy, a new measurement method for investment portfolio risk[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2003, 33(6): 16-21.)
- [33] 张鹏, 张卫国. 具有熵约束的多阶段均值-绝对偏差模糊投资组合决策[J]. *运筹与管理*, 2016, 25(2): 71-77.  
(Zhang P, Zhang W G. Multi-period mean-absolute deviation fuzzy portfolio selection model with entropy constraints[J]. *Operations Research and Management Science*, 2016, 25(2): 71-77.)
- [34] 崔海波, 赵希男, 张利兵. 一种证券投资风险度量方法的应用研究[J]. *系统工程*, 2004, 22(3): 88-91.  
(Cui H B, Zhao X N, Zhang L B. On the application of a method of measuring security investment risks[J]. *Systems Engineering*, 2004, 22(3): 88-91.)
- [35] 曾建敏. 实验检验累积前景理论[J]. *暨南大学学报: 自然科学版*, 2007, 28(1): 44-47.  
(Zeng J M. An experimental test on cumulative prospect theory[J]. *Journal of Jinan University: Natural Science Edition*, 2007, 28(1): 44-47.)
- [36] 徐绪松, 侯成琪. 非正态稳定分布条件下的投资组合模型: 均值-尺度参数模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(9): 1-9.  
(Xu X S, Hou C Q. A portfolio selection model conditional on non-normal stable distributions: Mean-scale parameter model[J]. *Systems Engineering—Theory and Practice*, 2006, 26(9): 1-9.)
- [37] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *Bell System Technical Journal*, 1948, 27(4): 623-656.
- [38] Markowitz H M. Portfolio selection[J]. *Journal of Finance*, 1952, 7(1): 77-91.
- [39] Yu J, Chiou W P, Lee W, et al. Does entropy model with return forecasting enhance portfolio performance[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 114: 175-182.
- [40] 李英华, 李兴斯. 信息熵度量风险的研究[J]. *运筹与管理*, 2007, 16(5): 111-116.  
(Li Y H, Li X S. Study on information entropy as a solution to measure risk in financial market[J]. *Operations Research and Management Science*, 2007, 16(5): 111-116.)
- [41] 陈业华, 李兴源. 基于投资者心理的证券投资组合熵决策及应用研究[J]. *数学的实践与认识*, 2018, 48(4): 49-57.  
(Chen Y H, Li X Y. Research on portfolio entropy decision making and its application based on investor's psychological behavior[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2018, 48(4): 49-57.)

### 作者简介

王励文(1990—), 女, 博士生, 从事风险管理与投资决策的研究, E-mail: wlv0991@nuaa.edu.cn;

吴和成(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事数量经济与技术经济等研究, E-mail: hcwu@nuaa.edu.cn;

万里洋(1990—), 男, 博士生, 从事评价理论与应用的研究, E-mail: 396721653@qq.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)