

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于综合评价的多指标情境化预测方法与应用

易平涛, 于海婷, 李伟伟, 惠文锋, 王露

引用本文:

易平涛, 于海婷, 李伟伟, 等. 基于综合评价的多指标情境化预测方法与应用[J]. *控制与决策*, 2025, 40(4): 1189–1197.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0282>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 丢包和量化约束下的不确定系统分布式滚动时域估计

Distributed moving horizon estimation for stochastic uncertain system with packet dropouts and quantized measurements  
*控制与决策*. 2021, 36(7): 1771–1778 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1603>

#### 基于局部信息增量与MPLS的质量相关故障检测方法

Quality-related fault detection method based on local information increment and MPLS  
*控制与决策*. 2021, 36(7): 1647–1654 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1402>

#### 基于前景优化和概率估计的显著性检测

Saliency detection based on foreground optimization and probability estimation  
*控制与决策*. 2021, 36(4): 917–924 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1101>

#### 测量数据丢失的随机不确定系统滚动时域估计

Moving horizon estimation for stochastic uncertain system with missing measurements  
*控制与决策*. 2021, 36(2): 450–456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0648>

#### 基于互信息操作变量曲线参数化的间歇过程批内修正优化

Intra-batch correction optimization of batch process with manipulated variable trajectory parameterization based on mutual information  
*控制与决策*. 2021, 36(1): 234–240 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0825>

# 基于综合评价的多指标情境化预测方法与应用

易平涛<sup>1,2</sup>, 于海婷<sup>1†</sup>, 李伟伟<sup>1,2</sup>, 惠文锋<sup>1</sup>, 王露<sup>2,3</sup>

(1. 东北大学工商管理学院, 沈阳 110167; 2. 东北评价中心, 沈阳 110167;  
3. 沈阳工业大学管理学院, 沈阳 110870)

**摘要:** 针对小到个体、组织, 大至地区、国家等复杂系统的未来发展进行的综合预判问题, 基于综合评价并结合被评价对象(系统)的历史发展对其未来进行多指标预测分析, 从而为其未来发展的综合预判提供数据支撑。由于被评价对象的未来发展往往充满一定的不确定性, 具体研究中将被评价对象的未来发展预期分为超乐观、乐观、平均、悲观和超悲观 5 种情境, 以此为基础分情境预测未来短期内被评价对象的发展空间, 并构建相应的预测性评价方法。在对指标进行赋权时, 从有利于系统未来整体发展的视角提出一种指标权重设计方法。在预测性评价结论方面, 考虑到未来发展的不确定性特征, 将随机聚合方法融合至预测模型的求解中, 采用带有概率特征的相对优劣排序方式来描述被评价对象未来可能的发展水平。最后, 将所提出方法应用于组织中中层管理人员未来发展潜力预测性评价中, 通过与已有方法的对比分析表明所提出方法特征的同时, 验证所提出方法的有效性。该研究可为复杂系统未来发展的综合预判问题提供方法支撑, 研究结论可为系统规划和资源分配提供基于历史数据支撑的有效参考。

**关键词:** 综合评价; 预测性评价; 情境分析; 发展空间; 随机聚合

**中图分类号:** C934 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2024.0282

**引用格式:** 易平涛, 于海婷, 李伟伟, 等. 基于综合评价的多指标情境化预测方法与应用 [J]. 控制与决策, 2025, 40(4): 1189-1197.

## Multi-indicator contextualized prediction method based on comprehensive evaluation and its application

YI Ping-tao<sup>1,2</sup>, YU Hai-ting<sup>1†</sup>, LI Wei-wei<sup>1,2</sup>, HUI Wen-feng<sup>1</sup>, WANG Lu<sup>2,3</sup>

(1. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110167, China; 2. Northeastern Evaluation Center, Shenyang 110167, China; 3. School of Management, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** Aiming at the comprehensive prediction of the future development of small entities, organizations, regions, countries, and other complex systems, this paper makes a multi-index prediction and analysis of the future of the evaluated object(system) based on comprehensive evaluation and the historical development, thus providing data support for the comprehensive prediction of its future development. Given the inherent uncertainty surrounding future developments, we categorize potential outcomes into five scenarios: super optimistic, optimistic, average, pessimistic, and super pessimistic. These scenarios serve as a foundation for predicting short-term developmental prospects and for constructing a corresponding evaluation method. To assign weights to the indicators, we propose a design methodology that prioritizes the overall future development of the system. Recognizing the uncertain nature of future developments, we integrate a stochastic aggregation method into the prediction model, utilizing a probabilistic ranking approach to characterize the potential future developmental levels of the evaluated entity. Finally, we apply this methodology to assess the future development potential of middle managers within organizations. The effectiveness of the approach is validated through comparative analysis with existing methods, highlighting the distinctive features of the proposed technique. This study offers methodological support for the comprehensive prediction of future developments in complex systems and provides actionable insights, grounded in historical data, for system planning and resource allocation.

**Keywords:** comprehensive evaluation; predictive evaluation; scenario analysis; developmental space; stochastic integration

收稿日期: 2024-03-19; 录用日期: 2024-09-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72171041, 72171040); 辽宁省自然科学基金优秀青年基金项目 (2024JH3/10200008).

†通信作者. E-mail: yuhaiting98@163.com.

## 0 引言

综合评价通常是指对多维信息描述的对象系统进行客观、公正、全面地评估<sup>[1]</sup>,该方法已广泛应用于经济、社会和工程等领域<sup>[2-4]</sup>.关于综合评价的研究大多集中在基于历史数据回溯已发生的事实并对系统作出总结性评价.如:杜书栋等<sup>[5]</sup>基于熵权法改进了综合污染指数并对白云湖水水质进行评价;查建平<sup>[6]</sup>选取2012~2018年黄河流域面板数据,从3个层面构建了评价指标体系,分析了黄河流域农业绿色发展水平;Yi等<sup>[7]</sup>基于历史数据衡量了中国15个副省级城市的可持续发展水平.

综合评价在总结性测度方面取得了丰硕的研究成果.然而,现实中不仅需要针对小到个人和组织,大到地区和国家的“历史现状”作出准确的总结测度,更需要对其“未来发展”进行综合预判.随着技术的发展,面向该问题发展出了智能预测方法,大大提高了预测的效率和精度.已有研究中的主要方法包括灰色预测法<sup>[8]</sup>、神经网络法等<sup>[9-10]</sup>.此外,也有学者将不同的预测方法进行适当组合,形成了组合预测方法<sup>[11]</sup>.如胡凌云等<sup>[12]</sup>针对区间数的预测问题建立了基于GIOWPA算子以及误差绝对值和的区间数组组合预测模型,并通过实例验证了该模型具有较高的预测精度.

学术界发展出种类繁多且应用领域广泛的预测方法,为本文的研究奠定了良好的理论基础.但是,现有的预测研究多为单指标预测,很少涉及多指标预测.多指标预测可更好地了解系统各层面、维度的发展情况,因此,基于综合评价的思想展开多指标预测并对系统发展进行综合预判,具有重要的现实意义.已有研究中多采用对综合评价值进行简单的趋势外推方式进行相关问题的综合预判.如李英杰等<sup>[13]</sup>基于熵值法测度了中国2010~2018年数字经济发展趋势,并建立了灰色预测模型对2019~2028年的数字经济发展走向进行了预测分析.基于综合评价的预测分析因其可操作性较好,在实践中被广泛采用,然而,被评价对象的发展行为通常直接体现在评价指标层面,因此,基于评价指标展开更加细腻化的预测分析十分必要,能够为被评价对象(系统)的未来发展提供更加直观的判断依据.为了区别于已有研究中依据综合评价值进行预测的研究,本文将基于多指标预测数据进行的综合预判过程界定为基于综合评价的多指标预测.

由于决策环境的复杂性,系统发展中充满诸多不确定性.在这一背景下,分情境进行预测分析成为学者经常采用的一种研究模式.如:马兆良等<sup>[14]</sup>在多

情境视角下,对中国中部6个省的碳排放达峰时间和峰值进行了预测;Zhou等<sup>[15]</sup>通过模型模拟了2015~2030年上海城市空间在两种不同情境下的演变.现实中,不同情境下的预测分析结果可为系统的发展提供多种角度、多种可能性的判断依据.

基于上述分析,本文以综合评价为基础,结合被评价对象的历史数据,分情境对其未来发展进行综合预判.首先,将预测分析落实到指标层面,按照“超乐观预期”“乐观预期”“平均预期”“悲观预期”和“超悲观预期”5种情境对被评价对象的指标发展空间进行预测;然后,以此为基础,从有利于系统未来整体发展的视角,结合TOPSIS方法和序关系分析法给出一种指标赋权方法;最后,将随机聚合的方法融合至预测性评价结论的求解过程中,采用带有概率特征的相对优劣排序方式来描述被评价对象未来可能的发展水平,该排序结论更加吻合被评价对象未来发展的不确定性特征.

本文的主要内容如下:1)有效融合综合评价与预测,将对被评价对象未来发展的预测分析落实到指标层面,使得预测过程中关于被评价对象发展行为的分析更加具体化和细腻化;2)对预测后的指标数据按照综合评价流程进行集成,融合随机聚合方法得到带有概率特征的可能性排序,使得对被评价对象未来发展的综合预判更加吻合不确定的现实情况;3)预测中,对被评价对象未来指标的发展空间分情境进行分析,充分考虑被评价对象未来发展的多种可能性,可为未来的综合预判提供更加丰富的参考依据;4)指标权重的设计不仅有利于系统未来的整体发展,且由于指标权重直接关联个体和系统的发展,能够对被评价对象的未来发展行为起到一定的引导作用.

## 1 问题描述

实践中,当被评价对象的未来发展目标值未知时,可通过其在过去一段时期内的综合表现对其未来的发展水平和趋势进行综合预判,预判结果可用于被评价对象未来发展潜力的预估分析,进而为系统未来发展战略的设计以及个体的职业规划等提供有效参考.现实中,被评价对象的发展潜力情况通常隐含于多阶段的动态指标数据中,因此,本文主要根据多阶段历史评价时期的指标数据对被评价对象未来短时期内可能的发展水平进行预测分析.不失一般性,设 $n$ 个被评价对象(用 $o_1, o_2, \dots, o_n$ 表示,  $n \geq 3$ )关于 $m$ 个评价指标(用 $d_1, d_2, \dots, d_m$ 表示,  $m \geq 3$ )在第 $k$ 个历史评价时期( $k = 1, 2, \dots, L$  ( $L \geq 3$ ))为评价

时期总数) 的取值矩阵为

$$\begin{bmatrix} x_{1,1}(t_k) & x_{1,2}(t_k) & \dots & x_{1,m}(t_k) \\ x_{2,1}(t_k) & x_{2,2}(t_k) & \dots & x_{2,m}(t_k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,1}(t_k) & x_{n,2}(t_k) & \dots & x_{n,m}(t_k) \end{bmatrix},$$

其中  $x_{i,j}(t_k)$  ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, L$ ) 为被评价对象  $o_i$  关于评价指标  $d_j$  在  $t_k$  评价时期的取值. 本文的目的主要是基于动态评价指标数据, 预测被评价对象在距现在较近时期的未来可能的发展水平, 从而为其发展规划提供参考. 面向该目标, 研究中需要解决以下 3 个关键问题.

**问题 1** 如何基于各被评价对象历史评价时期内的指标数据, 对未来短期内被评价对象在各评价指标上的发展空间进行预测分析, 从而为后续预测方法的构建提供数据支撑.

**问题 2** 如何基于被评价对象在各评价指标上的未来短期内的预测值, 构建相应的预测方法, 并在方法构建过程中尽可能提升预测结果对被评价对象未来发展的有效支撑作用.

**问题 3** 由于事物的未来发展充满了不确定性, 用绝对优劣排序结果预测被评价对象未来的发展水平与该事实存在一定的矛盾, 如何科学衡量被评价对象未来的发展水平来提高预测结果对问题解释的灵活性, 是本文研究中需要解决的又一关键问题.

## 2 情境化预测方法构建

针对问题 1, 本文采用情境化思路预测被评价对象关于各指标可能的发展空间, 首先结合被评价对象的历史表现界定 5 种常见的发展情境, 然后基于不同情境给出相应的指标未来短期内发展空间的预测方法; 针对问题 2, 提出一种利于系统整体发展的指标权重设计方法, 以期通过权重系数来实现对被评价对象未来发展行为的间接引导; 面向问题 3 中提升预测结果对问题解释灵活性的需求, 本文借鉴泛综合评价中的随机聚合求解方法<sup>[16-17]</sup>来构建相应的预测模型, 采用带有概率特征的优劣排序方式来描述被评价对象未来可能的发展水平.

在对被评价对象未来短期内的指标发展空间进行预测前, 首先, 将被评价对象关于指标在不同历史评价时期的取值进行统一的标准化处理, 以保留不同历史评价时期数据间的结构特征以及指标的发展趋势, 从而为未来时期的指标发展空间预测提供依据. 这里以功效系数法<sup>[1]</sup>为基础, 将其拓展至动态情形, 对不同历史评价时期的指标数据进行标准化处理, 具体如下所示:

$$x_{i,j}^*(t_k) = \begin{cases} a \frac{x_{i,j}(t_k) - \min_{i,k}\{x_{i,j}(t_k)\}}{\max_{i,k}\{x_{i,j}(t_k)\} - \min_{i,k}\{x_{i,j}(t_k)\}} + b, \\ x_{i,j}(t_k) \text{ 为效宜型指标;} \\ a \frac{\max_{i,k}\{x_{i,j}(t_k)\} - x_{i,j}(t_k)}{\max_{i,k}\{x_{i,j}(t_k)\} - \min_{i,k}\{x_{i,j}(t_k)\}} + b, \\ x_{i,j}(t_k) \text{ 为成本型指标.} \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\max_{i,k}\{x_{i,j}(t_k)\}$  和  $\min_{i,k}\{x_{i,j}(t_k)\}$  分别为所有被评价对象关于指标  $d_j$  在不同时刻的最大值和最小值;  $x_{i,j}^*(t_k)$  为标准化处理后的指标数据, 取值范围为  $[b, a+b]$ . 在本文中, 为了吻合人们日常及格到满分的判断习惯, 将  $a$  和  $b$  的取值分别设为 40、60. 需要说明的是,  $a$  和  $b$  的取值不影响判断结果, 原因是标准化处理后的不同指标数据取值范围一致 (均为  $[b, a+b]$ ), 从而保证了结果的可比性, 因此,  $a$  和  $b$  的取值不限于 40 和 60, 可根据需求取值.

### 2.1 指标值预测方法

在对被评价对象未来可能的指标发展空间进行预测前, 本文给出如下假设: 基于行为发展惯性, 被评价对象关于指标的发展趋势通常不会在短时间内出现骤变, 因此, 这里假设被评价对象在未来短期内的指标发展趋势会延续近期的历史趋势.

基于该假设前提, 可进一步结合被评价对象的指标数据增量对其未来短期内的指标发展空间分情境进行预测, 不同情境表示对于被评价对象未来短期内发展水平预期乐观程度的差异, 具体体现为如下 5 种预期情境: 情境 I 超悲观预期、情境 II 悲观预期、情境 III 平均预期、情境 IV 乐观预期、情境 V 超乐观预期. 在不同情境下, 被评价对象关于指标未来短期内的发展空间, 是基于历史评价时期期末的指标数据和不同时期的指标增长率确定的. 因此, 需要对被评价对象不同历史评价时期的指标增长率进行求解. 不失一般性, 记  $\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})$  为被评价对象  $o_i$  关于评价指标  $d_j$  在历史评价时期  $t_{k+1}$  的指标值相对于  $t_k$  时期指标值的增长率, 计算公式如下所示:

$$\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1}) = (x_{i,j}^*(t_{k+1}) - x_{i,j}^*(t_k)) / x_{i,j}^*(t_k), \quad (2)$$

其中  $\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})$  的取值范围为  $(-\infty, +\infty)$ . 基于不同历史评价时期增长率的取值, 可进一步确定被评价对象关于各评价指标在未来短期内的增长率空间. 具体而言, 超悲观和超乐观预期情境下, 被评价对象关于指标的增长率跌落或突破历史时期的最小或最大增长率, 其他情境下的指标增长率根据惯性延续历史时期的增长率. 基于该思想, 为简便起见,

记被评价对象 $o_i$ 关于评价指标 $d_j$ 在未来短期内可能的增长率空间为 $\tilde{\Phi}_{i,j}$ ,有

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\Phi}_{i,j} = [(1-\alpha)\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}, \\ \quad (1-\beta)\max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}], \\ \min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} < 0, \\ \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} < 0; \\ \tilde{\Phi}_{i,j} = [(1-\alpha)\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}, \\ \quad (1+\beta)\max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}], \\ \min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} < 0, \\ \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} \geq 0; \\ \tilde{\Phi}_{i,j} = [(1+\alpha)\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}, \\ \quad (1+\beta)\max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}], \\ \min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} \geq 0, \\ \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} \geq 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, L-1$ . 由式(3)可见, 被评价对象的指标增长率空间在历史发展水平的基础上, 考虑了小幅跌落或突破发展的情形, 具体体现在 $\alpha$ 和 $\beta$ 调整参数上, 分别为被评价对象 $o_i$ 关于评价指标 $d_j$ 跌落或突破历史时期最低和最高增长率的调整参数值, 不同情形下 $\alpha$ 与 $\beta$ 的取值应不尽相同, 使得增长率空间 $\tilde{\Phi}_{i,j}$ 更加符合现实情境. 关于 $\alpha$ 和 $\beta$ 取值的具体说明如下.

1) 当相邻时期增长率的差值存在负值时, 该被评价对象在不同时期关于该指标的发展趋势出现下降情形. 由于 $\alpha$ 为跌落历史最低增长率的调整参数, 为了全面兼顾所有时期的负增长情形, 令 $\alpha$ 取所有负增长率差值的最小值, 即 $\alpha = \min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_{k+1}, t_{t+2}) - \Delta_{i,j}(t_k, t_{t+1}) \mid \Delta_{i,j}(t_{k+1}, t_{t+2}) - \Delta_{i,j}(t_k, t_{t+1}) < 0\}$ .

2) 当相邻时期增长率的差值存在非负值时, 该被评价对象在不同时期关于该指标的发展趋势未出现下降情形, 此时令 $\alpha = 0$ , 意味着被评价对象关于该指标的未来发展延续其历史评价时期的增长情况, 不会出现下降的趋势.

3) 当相邻时期增长率的差值存在正值时, 该被评价对象在不同时期关于该指标的发展趋势出现上升情形. 由于 $\beta$ 为突破历史最高增长率的调整参数, 为了全面兼顾所有时期的正增长情形, 令 $\beta$ 取所有正增长率差值的最大值, 即 $\beta = \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_{k+1}, t_{t+2}) - \Delta_{i,j}(t_k, t_{t+1}) \mid \Delta_{i,j}(t_{k+1}, t_{t+2}) - \Delta_{i,j}(t_k, t_{t+1}) > 0\}$ .

4) 当相邻时期增长率的差值存在非正值时, 该

被评价对象在不同时期关于该指标的发展趋势未出现上升的情形, 此时令 $\beta = 0$ , 意味着被评价对象关于该指标的未来发展延续其历史评价时期的增长情况, 不会出现上升的趋势.

基于上述指标值未来短期内可能的增长率空间以及被评价对象关于各指标增量率的最大值、最小值和平均水平, 可确定未来短期内不同预期情境下被评价对象在不同指标上的具体增长率空间如下.

情境 I 超悲观预期. 该情境下, 预期被评价对象关于某指标在未来短期内的的发展水平不理想, 指标发展跌破历史评价时期的最小增长幅度, 此时的指标增长率空间如下.

1) 当 $\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{t+1})\} < 0$ 时, 有

$$\tilde{\Phi}_{i,j} = [(1-\alpha)\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{t+1})\}, \min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{t+1})\}], \quad (4)$$

其中

$$\alpha = \min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_{k+1}, t_{t+2}) - \Delta_{i,j}(t_k, t_{t+1}) \mid \Delta_{i,j}(t_{k+1}, t_{t+2}) - \Delta_{i,j}(t_k, t_{t+1}) < 0\};$$

2) 当 $\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{t+1})\} \geq 0$ 时, 有

$$\tilde{\Phi}_{i,j} = [\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{t+1})\}, (1+\alpha)\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{t+1})\}], \quad (5)$$

这里 $\alpha = 0$ .

情境 II 悲观预期. 该情境下, 预期被评价对象关于某指标在未来短期内的的发展水平较低, 指标发展介于历史最小增幅与平均增长幅度或最大和最小增幅中点值间, 此时的指标增长率空间如下.

1) 当 $\bar{\Delta}_{i,j} \leq (\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} + \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\})/2$ 时, 有

$$\tilde{\Phi}_{i,j} = [\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}, \bar{\Delta}_{i,j}]; \quad (6)$$

2) 当 $\bar{\Delta}_{i,j} > (\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} + \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\})/2$ 时, 有

$$\tilde{\Phi}_{i,j} = [\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}, (\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} + \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\})/2], \quad (7)$$

$$\text{其中 } \bar{\Delta}_{i,j} = \frac{1}{L-1} \sum_{k=1}^{L-1} \Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1}).$$

情境 III 平均预期. 该情境下, 预期被评价对象关于某指标未来的发展水平为历史时期的居中水平, 指标发展介于不同时期平均增长幅度与最大和最小增幅中点值间, 此时指标增长率空间如下.

1) 当 $\bar{\Delta}_{i,j} \leq (\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} + \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\})/2$ 时, 有

$t_{k+1})\})/2$ 时, 有

$$\tilde{\Phi}_{i,j} = [\bar{\Delta}_{i,j}, (\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} + \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\})/2]; \quad (8)$$

2) 当  $\bar{\Delta}_{i,j} > (\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} + \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\})/2$  时, 有

$$\tilde{\Phi}_{i,j} = [(\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} + \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\})/2, \bar{\Delta}_{i,j}]. \quad (9)$$

情境 IV 乐观预期. 该情境下, 预期被评价对象关于某指标在未来短期内的的发展水平比较乐观, 指标发展介于不同时期平均增长幅度与最大增幅间, 此时的指标增长率空间如下.

1) 当  $\bar{\Delta}_{i,j} \leq (\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} + \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\})/2$  时, 有

$$\tilde{\Phi}_{i,j} = [(\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} + \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\})/2, \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}]; \quad (10)$$

2) 当  $\bar{\Delta}_{i,j} > (\min_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} + \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\})/2$  时, 有

$$\tilde{\Phi}_{i,j} = [\bar{\Delta}_{i,j}, \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}]. \quad (11)$$

情境 V 超乐观预期. 该情境下, 预期被评价对象关于某指标在未来短期内的的发展水平非常理想, 指标发展突破历史评价时期的最大增长幅度, 对应的指标增长率空间如下.

1) 当  $\max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} \geq 0$  时, 有

$$\tilde{\Phi}_{i,j} = [\max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}, (1 + \beta) \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}], \quad (12)$$

其中

$$\beta = \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_{k+1}, t_{k+2}) - \Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1}) | \Delta_{i,j}(t_{k+1}, t_{k+2}) - \Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1}) > 0\};$$

2) 当  $\max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\} < 0$  时, 有

$$\tilde{\Phi}_{i,j} = [(1 - \beta) \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}, \max_{i,k}\{\Delta_{i,j}(t_k, t_{k+1})\}], \quad (13)$$

这里  $\beta = 0$ .

为简单起见, 本文仅粗略地列出了以上 5 种情境, 现实中可根据需要进一步细化预测情境, 但是, 上述情境中指标增长率空间的确定方法对不同预测情境具有普适的参考性, 仅需根据情境需求适当地调整  $\alpha$  和  $\beta$  的取值以及增长率区间的分割点即可.

在以上分析的基础上, 进一步求解得到不同情

境下未来短期内被评价对象  $o_i$  关于评价指标  $d_j$  的发展空间 (记为  $\tilde{z}_{i,j} = [z_{i,j}^L, z_{i,j}^U]$ ), 计算公式如下所示:

$$\tilde{z}_{i,j} = x_{i,j}^*(t_L) \times (1 + \tilde{\Phi}_{i,j}). \quad (14)$$

指标的未来发展空间是在历史评价末期的标准化指标数据  $x_{i,j}^*(t_L)$  的基础上进一步结合不同情境下指标的增长率空间求得, 故式 (14) 的求解基点为第  $L$  个评价时期 (历史评价末期) 的标准数据. 此外, 结合超乐观预期情境下的指标增长率空间可以看出, 由于指标的最大增长率有可能会超过 1, 未来短期内各指标的发展水平也可能会出现超过其现有指标发展水平最大值的情形.

### 2.2 指标赋权方法

结合得到的未来短期内指标的发展空间, 该部分从有利于系统未来整体发展的视角给出指标权重的确定方法, 具体思路如下: 在某指标上, 所有被评价对象未来短期内的综合发展水平越高, 越有利于组织的整体发展, 指标对应的权重系数也应越大. 鉴于此, 结合 TOPSIS 方法<sup>[18]</sup> 和序关系分析法<sup>[19]</sup> 给出一种客观确定指标权重的方法. 其中: TOPSIS 方法用于衡量所有被评价对象关于某指标的综合发展水平; 序关系分析法以综合发展水平为基础, 用于衡量指标的相对重要性并确定指标权重.

通过以上分析可知, 虽然未来短期内各指标的发展水平可能会出现超过其现有发展水平最大值的情形, 但是, 指标预期的发展空间是基于标准化处理后的指标值求解得到的, 不同指标的量纲和量级相同, 因此, 不同的指标数据间具有可比性. 从提升组织整体发展的视角出发, 这里选用所有指标未来短期发展空间右端点的最大值作为指标发展的正理想状态, 所有指标未来短期发展水平左端点的最小值作为指标发展的负理想状态. 不失一般性, 记所有指标的正、负理想状态分别为  $M^+$  和  $M^-$ , 则有

$$M^+ = \max\{z_{i,j}^U | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\}, \quad (15)$$

$$M^- = \min\{z_{i,j}^L | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\}. \quad (16)$$

借鉴 TOPSIS 方法, 求得各指标上所有被评价对象的综合发展水平如下所示:

$$\gamma_j = \frac{\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{i,j}^L - M^-)^2}}{\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (M^+ - z_{i,j}^U)^2} + \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{i,j}^L - M^-)^2}}. \quad (17)$$

其中:  $\gamma_j$  为被评价对象关于指标  $d_j$  的综合发展水平测度值,  $\gamma_j \in [0, 1]$ ;  $\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{i,j}^L - M^-)^2}$  为所有被评价对象未来短期指标取值空间的下限到负理想状态的平均距离;  $\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (M^+ - z_{i,j}^U)^2}$  为所有被评价对象未来短期指标取值空间的上限到正理想状态的平均距离。

进一步地, 以各指标的综合发展水平测度值为指标相对重要性的测算依据, 结合序关系分析法确定各指标的权重系数, 具体过程如下。

step 1: 指标重要性排序. 基于指标的综合发展水平测度值  $\gamma_j$  对各评价指标的相对重要性进行排序, 为叙述方便, 将排序后的评价指标仍然记为  $d_1, d_2, \dots, d_m$ .

step 2: 计算相邻指标重要性的比. 对排序后的指标  $d_1, d_2, \dots, d_m$ , 按照其对应的综合发展水平测度值  $\gamma_j$  计算相邻两个指标  $d_l$  与  $d_{l+1}$  ( $l = 1, 2, \dots, m-1$ ) 间重要性的比, 记为  $\rho_l$ , 有

$$\rho_l = \gamma_l / \gamma_{l+1}. \quad (18)$$

step 3: 求解各指标的权重系数. 设评价指标  $d_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) 的权重系数为  $w_j$ , 有

$$\begin{cases} w_m = \left(1 + \sum_{l=1}^m \prod_{j=1}^{m-1} \rho_j\right)^{-1}, \\ w_{j-1} = \rho_{j-1} w_j, \quad j = m, m-1, \dots, 2. \end{cases} \quad (19)$$

由式 (19) 可知, 相应指标的权重系数满足  $w_j \in [0, 1]$ ,

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1.$$

### 2.3 随机聚合预测方法

由式 (13) 可知, 被评价对象关于各指标未来短期内的发展空间为区间数, 若将其与通过式 (19) 求解得到的指标权重进行直接集成处理, 则将得到区间数形式的被评价对象未来短期内的的发展水平预测值. 在已有研究中, 诸多学者给出了许多可供参考的区间数排序方法<sup>[20-21]</sup>, 然而, 通过上述方法得到的被评价对象未来发展预测排序为绝对形式. 由上述分析可知, 该绝对形式的预测结论与被评价对象未来发展的不确定性相矛盾, 针对该问题, 这里将随机聚合方法融合至被评价对象发展水平预测结论的求解过程中, 给出了一种随机聚合预测方法, 即在大规模仿真的基础上对被评价对象未来发展水平的优劣关系进行统计分析, 在仿真充分的前提下, 能够得到被评价对象间稳定的优劣比较概率矩阵, 以此推导出体现被评价对象间相对优劣的预测排序结论. 求解

过程如下.

step 1: 设置模拟次数监控变量  $N$  (初始值为 1), 设置计数变量  $c_{i,j}$  和  $c'_{i,j}$ , 分别用于统计随机模拟过程中  $o_i$  优于和等于  $o_j$  的次数 (初始值均为 0).

step 2: 在各被评价对象未来短期的指标发展空间内按照均匀分布的方式随机提取数据 (记为  $z_{i,j}$ ,  $z_{i,j} \in [z_{i,j}^L, z_{i,j}^U]$ ), 并将其与指标权重系数进行线性合成, 得到被评价对象未来短期内的的发展水平综合预测值 (记为  $y_i$ ), 即

$$y_i = \sum_{j=1}^m w_j z_{i,j}. \quad (20)$$

step 3: 由式 (20) 求得的被评价对象未来短期内发展水平的综合预测值, 统计被评价对象间的优劣关系, 如对于任意两个被评价对象  $o_i$  和  $o_j$ , 若  $y_i \succ y_j$  (“ $\succ$ ” 表示 “优于”), 则令  $c_{i,j} = c_{i,j} + 1$ ; 若  $o_i \sim o_j$  (“ $\sim$ ” 表示 “两个被评价对象具有相同的表现”), 则令  $c'_{i,j} = c'_{i,j} + 1$ .

step 4: 计算任意两个被评价对象  $o_i$  与  $o_j$  间的优胜概率, 记为  $s_{i,j}$ , 有

$$s_{i,j} = (c_{i,j} + 0.5c'_{i,j}) / N. \quad (21)$$

step 5: 观察  $s_{i,j}$  的取值是否达到稳定, 可用前后两次模拟得到的  $s_{i,j}$  间的绝对偏差进行衡量, 若偏差小于事先给定的阈值 (参考已有研究, 该阈值通常取值为 0.001), 则意味着  $s_{i,j}$  的取值达到稳定, 可终止模拟过程; 否则, 令  $N = N + 1$ , 转至 step 2.

按照上述步骤, 可得到不同被评价对象未来短期内发展水平间的优胜度矩阵,  $S = [s_{i,j}]_{n \times n}$ . 其中:  $s_{i,j}$  为被评价对象  $o_i$  优于  $o_j$  的概率, 满足  $s_{i,j} \in [0, 1]$ ,  $s_{i,j} + s_{j,i} = 1$ ,  $i \neq j$ ;  $S$  对角线上的元素表示各被评价对象优于自身的概率, 满足  $s_{i,i} = 0.5$ .

基于优胜度矩阵, 可进一步采用文献 [22] 中统计优势数的方式来求得被评价对象未来短期内发展水平间的可能性排序, 具体如下.

$\text{count}(\cdot)$  为计数函数, 表示满足条件 “.” 元素的个数, 称  $g(o_i)$  为被评价对象  $o_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $S$  上第  $i$  行) 的优超数, 有

$$\begin{aligned} g_i &= g(o_i) = \\ &= \text{count}(s_{i,j} > 0.5) + 0.5 \text{count}(s_{i,j} = 0.5), \\ & \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad j \neq i. \end{aligned} \quad (22)$$

对于被评价对象  $o_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 按照其对应的优超数由大到小的顺序重新排序, 可得到各被评价对象间的最终排序. 特殊地, 若  $g_i = g_j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$ ), 则可按照  $s_{i,j}$  对  $o_i$  和  $o_j$  进行排序, 即若  $s_{i,j} < 0.5$ , 则  $o_i \prec o_j$ ; 若  $s_{i,j} > 0.5$ , 则  $o_i \succ o_j$ ; 若

$s_{i,j} = 0.5$ , 则  $o_i \sim o_j$ .

得到被评价对象间的排序后, 对被评价对象未来短期内的的发展水平进行探讨分析. 综上所述, 可将预测方法的构建过程归纳总结如图 1 所示.

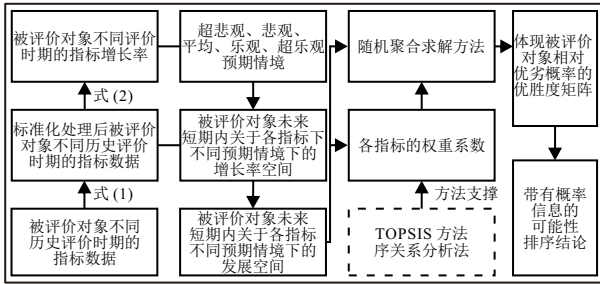


图1 基于综合评价的多指标预测方法的构建过程

### 3 应用算例

某公司需要对生产运营部门的 5 位中层管理人员 (记为  $o_1, o_2, \dots, o_5$ ) 的潜力进行综合预判. 具体而言, 需要结合 5 位中层管理人员在安全绩效 ( $d_1$ )、运营绩效 ( $d_2$ )、工作能力 ( $d_3$ )、工作态度 ( $d_4$ ) 以及综合素质 ( $d_5$ ) 5 个指标近 10 年的发展数据展开未来发展潜力的预测分析. 中层管理人员近 10 年的指标数据由公司 13 位专家打分的平均值计算得到, 限于篇幅, 各专家的打分数据未详细列出.

1) 计算结果. 首先, 对收集的数据进行标准化处理 (令  $a$  和  $b$  的取值分别为 40、60), 计算被评价对象不同时期的指标增长率; 然后, 基于指标增长率确定未来短期内不同情境下被评价对象在不同指标上的增长空间, 并求解各指标在不同情境下的权重系数; 最后, 根据随机聚合方法进行求解, 得到不同情境下 5 位中层管理者间的可能性排序, 结果如表 1 所示.

表1 不同情境下中层管理者带有概率信息的可能性排序

情境	带有概率信息的可能性排序				
超悲观	$o_4 \succ_{0.7108} o_1 \succ_{0.6830} o_3 \succ_{0.6261} o_2 \succ_{0.5765} o_5$				
悲观	$o_4 \succ_{0.6023} o_1 \succ_{0.5761} o_3 \succ_{0.6291} o_2 \succ_{0.5585} o_5$				
平均	$o_4 \succ_{0.6582} o_1 \succ_{0.7465} o_3 \succ_{0.6756} o_2 \succ_{0.7116} o_5$				
乐观	$o_4 \succ_{0.7180} o_1 \succ_{0.7002} o_3 \succ_{0.6576} o_2 \succ_{0.8323} o_5$				
超乐观	$o_4 \succ_{0.7347} o_1 \succ_{0.6597} o_3 \succ_{0.7092} o_2 \succ_{0.8615} o_5$				

由表 1 可见, 5 种情境下 5 位中层管理者的排序保持一致:  $o_4$  领先, 其次是  $o_1$ 、 $o_3$ 、 $o_2$ 、 $o_5$  居末. 但是在不同情境下, 相邻中层管理者间的相对优劣概率有所不同, 总体而言, 随着中层管理者未来发展预期乐观程度的增加, 相邻中层管理者的相对优劣概率也逐步提升. 结合优胜概率得到如下预判结论: 在未来的发展中, 应引导各中层管理者在不同指标上的增长空间应尽可能达到平均预期以上, 才能充分识别出发展潜力较好的人员, 原因是此时相邻两个中

层管理者间的优胜概率均超过 0.6, 排序靠前的中层管理者的相对优势更加明显, 从而保障对于中层管理者潜力的识别更具说服力.

2) 比较分析. 从权重和排序的对比分析层面表明所提出方法的特点, 通过与传统预测方法的对比分析, 进一步表明所提出方法与传统预测方法的区别. 首先, 将所提出方法与平均权重法以及绝对排序方法进行对比分析, 平均权重法采用平均权重作为指标权重, 然后通过本文的随机模拟方式求解得到不同情境下的被评价对象间相对优劣排序. 绝对排序法采用文献 [23] 中给出的区间数排序方法, 对不同情境下被评价对象的发展水平进行绝对排序. 3 种方法在不同情境下的排序结果如表 2 所示.

表2 平均权重法和文献 [23] 方法结果分析

情境	方法	排序结果
超悲观	平均权重	$o_4 \succ_{0.6574} o_1 \succ_{0.6149} o_3 \succ_{0.6379} o_2 \succ_{0.6882} o_5$
	文献[23]	$o_4 \succ o_1 \succ o_3 \succ o_2 \succ o_5$
悲观	平均权重	$o_4 \succ_{0.5731} o_1 \succ_{0.6026} o_3 \succ_{0.6035} o_2 \succ_{0.5674} o_5$
	文献[23]	$o_4 \succ o_1 \succ o_3 \succ o_2 \succ o_5$
平均	平均权重	$o_4 \succ_{0.6866} o_1 \succ_{0.7258} o_3 \succ_{0.6608} o_2 \succ_{0.7058} o_5$
	文献[23]	$o_4 \succ o_1 \succ o_3 \succ o_2 \succ o_5$
乐观	平均权重	$o_4 \succ_{0.7225} o_1 \succ_{0.6708} o_3 \succ_{0.6703} o_2 \succ_{0.8410} o_5$
	文献[23]	$o_4 \succ o_1 \succ o_3 \succ o_2 \succ o_5$
超乐观	平均权重	$o_4 \succ_{0.7310} o_1 \succ_{0.6882} o_3 \succ_{0.6816} o_2 \succ_{0.8550} o_5$
	文献[23]	$o_4 \succ o_1 \succ o_3 \succ o_2 \succ o_5$

结合表 1 和表 2 的结果可以看出, 3 种方法得到的被评价对象间的排序位置一致. 文献 [23] 方法中指标的预测空间采用的是所提出方法, 差别仅体现在排序方法上, 得到了相同的排序位置, 间接验证了所提出方法的稳健性. 但是, 结合被评价对象在不同指标上的增长空间可知, 不同管理者在各指标的未来发展空间上有一定的交叉, 因此, 相比于文献 [23] 中的绝对排序, 本文给出的相对优劣排序更加合理. 进一步地, 比较不同情境下中层管理者的概率排序可以看出, 所提出方法中随着未来发展预期乐观程度的增加, 中层管理者的发展潜力优势提升得更加明显, 这意味着相比于平均权重方法, 所提出赋权方法更有利于公司整体发展潜力的提升, 验证了所提出方法与其构建思想的吻合性.

接下来, 将所提出方法与灰色预测模型以及一次指数平滑法进行对比分析, 采用上述两种方法得到的中层管理者各项指标数据, 指标权重采用平均权重, 计算得到综合评价值. 采用灰色预测模型得到综合评价值为 9.17、8.88、8.91、8.92、8.75. 当  $\alpha=0.5$  时, 采用一次指数平滑法得到的综合评价值为 8.94、

8.90、8.96、8.97、8.82. 当 $\alpha = 0.7$ 时, 综合评价值为9.00、9.03、8.81、8.96、8.86. 当 $\alpha = 0.9$ 时, 综合评价值为9.00、9.04、8.83、9.00、8.87(其中 $\alpha$ 为平滑系数, 其取值范围通常在 $0 \sim 1$ 之间.  $\alpha$ 的值越大, 近期数据对预测结果的影响越大). 根据综合评价值得到灰色预测模型和一次指数平滑法的结果如表3所示.

表3 灰色预测模型以及一次指数平滑法的结果分析

方法	情境/参数值	排序结果
灰色预测模型	—	$o_1 > o_4 > o_3 > o_2 > o_5$
	$\alpha = 0.5$	$o_4 > o_3 > o_1 > o_2 > o_5$
一次指数平滑法	$\alpha = 0.7$	$o_2 > o_1 > o_4 > o_5 > o_3$
	$\alpha = 0.9$	$o_2 > o_1 > o_4 > o_5 > o_3$

比较指标预测值, 所提出方法与传统预测方法的主要差别在于: 1) 所提出方法给出的指标预测值为区间数, 相比于绝对形式的预测数据, 更加吻合未来发展的不确定性特征; 2) 所提出方法主要是基于无量纲化处理后的数据展开, 而传统的预测方法主要是基于原始数据展开, 因此, 两者预测到的指标取值范围不同; 3) 所提出方法在预测指标值时, 未对其上、下限进行限制, 因此, 其取值上限有超过100的情形, 而按照传统的预测方法得到指标值后, 若不同指标的取值量纲不同, 则按照式(1)对不同指标的预测值进行无量纲化处理, 指标取值的上限不会超过100, 两者对比, 可以看出所提出方法更吻合被评价对象未来可能出现突破性发展的现实情境.

此外, 两种传统的预测方法与所提出方法得到的预测结果存在较大差异, 主要体现在以下方面: 1) 所提出方法以概率形式给出被评价对象的优劣排序, 而传统的预测方法给出的排序为绝对形式, 相比而言, 概率形式的排序对未来的不确定性描述更加细腻, 也更易为被评价对象所接受; 2) 所提出方法与灰色预测法的排序比较接近, 与一次指数平滑法的排序差异相对较大, 主要原因是该方法对不同时间的历史数据通过平滑系数分配了不同的比重, 从而对指标值的预测结果产生了较大的影响, 进而影响了排序结果; 3) 相比于传统预测方法, 所提出方法实现了预测情境的细分, 丰富的预测结论可为决策者的未来决策提供更加详细的参考建议.

## 4 结论

本文面向复杂系统未来发展的综合预判问题, 基于多指标多阶段历史数据并结合综合评价思想构建了情境化预测方法. 具体研究中, 重点探讨了3个方面的主要问题: 不同情境下被评价对象关于各指标未来可能的发展空间的确定方法; 从利于系统整体发展视角出发的指标权重的设计方法; 融合随机聚合的相对优劣预测结论的求解方法. 相比于已有

方法, 所提出方法的主要特色体现在以下3个方面: 1) 本文给出的带有概率特征的相对优劣预测结论更加吻合系统未来发展的不确定性特征, 对复杂问题的解释也更具灵活性; 2) 所提出情境化预测方法以未来多种发展可能的预判为主要目标, 以期通过事先的预判性评价为被评价对象未来发展行为的选择提供基于数据分析的参考依据; 3) 本文将预测分析落实到指标层面, 能够使得被评价对象对未来发展行为选择的感知更加直观, 指标权重的设计更有利于系统未来的整体发展.

所提出方法适用于复杂系统未来发展的综合预判问题, 进一步拓展了综合评价的预判管理能力, 可为组织人员发展规划、资源配置等问题提供理论和方法支撑. 需要说明的是, 限于篇幅, 本文只对被评价对象关于指标未来短期内的的发展水平进行了综合预测, 未来研究中将深入探讨指标在未来不同时期内的细腻化发展空间, 并据此构建相应的预测方法. 此外, 评价对象未来处于不同情境的可能性或概率以及未来发展路径的选择将是进一步研究中需要深入探讨的问题.

## 参考文献 (References)

- [1] 易平涛, 李伟伟, 郭亚军. 综合评价理论与方法[M]. 第2版. 北京: 经济管理出版社, 2019.  
(Yi P T, Li W W, Guo Y J. Comprehensive evaluation theory and methods[M]. The 2nd edition. Beijing: Economy & Management Publishing House, 2019.)
- [2] Gao C, Zhang B Y, Shao S B, et al. Risk assessment and zoning of flood disaster in Wuchengxiyu region, China[J]. *Urban Climate*, 2023, 49: 101562.
- [3] 徐泽水, 钱渝, 李铭, 等. 基于语言偏好序的多属性群决策方法及其在废旧物资循环利用中的应用[J]. 控制与决策, 2024, 39(7): 2363-2374.  
(Xu Z S, Qian Y, Li M, et al. Multi-attribute group decision-making method based on linguistic preference ordering and its application in waste material recycling[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(7): 2363-2374.)
- [4] 罗世华, 刘俊. 拓展区间 Fermatean 模糊前景理论综合评价方法[J]. 中国管理科学, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0663.  
(Luo S H, Liu J. A comprehensive evaluation method based on extended interval-valued fermatean fuzzy prospect theory[J]. *Chinese Journal of Management Science*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0663.)
- [5] 杜书栋, 关亚楠, 李欣, 等. 基于熵权法改进的综合污染指数的水质评价——以白云湖为例[J]. 环境科学学报, 2022, 42(1): 205-212.  
(Du S D, Guan Y N, Li X, et al. Water quality evaluation with improved comprehensive pollution index based on entropy weight method: A case study of Baiyun Lake[J].

- Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(1): 205-212.)
- [6] 查建平, 周霞, 周玉玺. 黄河流域农业绿色发展水平综合评价分析[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(1): 18-28.  
(Zha J P, Zhou X, Zhou Y X. Evaluation of agricultural green development level in the Yellow River[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(1): 18-28.)
- [7] Yi P T, Dong Q K, Li W W, et al. Measurement of city sustainability based on the grey relational analysis: The case of 15 sub-provincial cities in China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 73: 103143.
- [8] 许泽东, 党耀国, 杨德岭. 含分数阶多项式的离散灰色预测模型及其应用[J]. 控制与决策, 2023, 38(12): 3578-3584.  
(Xu Z D, Dang Y G, Yang D L. Discrete grey forecasting model with fractional order polynomial and its application[J]. Control and Decision, 2023, 38(12): 3578-3584.)
- [9] 谢良旭, 李峰, 谢建平, 等. 基于融合神经网络模型的药物分子性质预测[J]. 计算机科学, 2021, 48(9): 251-256.  
(Xie L X, Li F, Xie J P, et al. Predicting drug molecular properties based on ensembling neural networks models[J]. Computer Science, 2021, 48(9): 251-256.)
- [10] 涂歆, 严洪森. 基于具有自适应分段损失函数支持向量机的产品销售预测模型[J]. 控制与决策, 2015, 30(10): 1803-1809.  
(Tu X, Yan H S. Product sale forecasting method based on support vector machine with adaptive segmented loss function[J]. Control and Decision, 2015, 30(10): 1803-1809.)
- [11] Kapetanios G, Labhard V, Price S. Forecast combination and the Bank of England's suite of statistical forecasting models[J]. *Economic Modelling*, 2008, 25(4): 772-792.
- [12] 胡凌云, 杨威, 王恒娜. 一种新型高精度的区间数组合预测方法[J]. 统计与决策, 2021, 37(24): 5-10.  
(Hu L Y, Yang W, Wang H N. A new interval number combination forecasting method with high accuracy[J]. Statistics & Decision, 2021, 37(24): 5-10.)
- [13] 李英杰, 韩平. 中国数字经济发展综合评价与预测[J]. 统计与决策, 2022, 38(2): 90-94.  
(Li Y J, Han P. Comprehensive evaluation and prediction on China's digital economy development[J]. Statistics & Decision, 2022, 38(2): 90-94.)
- [14] 马兆良, 梅加兰. 多情境视角下中国中部六省碳达峰预测[J]. 科技管理研究, 2022, 42(13): 216-222.  
(Ma Z L, Mei J L. Research on carbon peak prediction in six provinces in central China from a multi-situation perspective[J]. Science and Technology Management Research, 2022, 42(13): 216-222.)
- [15] Zhou L, Dang X W, Sun Q K, et al. Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102045.
- [16] 王露, 易平涛, 李伟伟. 多源不确定信息的随机模拟聚合评价方法及应用[J]. 中国管理科学, 2024, 32(5): 103-112.  
(Wang L, Yi P T, Li W W. Stochastic simulation integrated method for multi-source uncertain information and its application[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(5): 103-112.)
- [17] 易平涛, 李伟伟, 郭亚军. 混合评价信息的随机转化方法和应用[J]. 控制与决策, 2014, 29(4): 753-758.  
(Yi P T, Li W W, Guo Y J. Blended evaluation information random transformation method and its application[J]. Control and Decision, 2014, 29(4): 753-758.)
- [18] Mohammed A. Towards a sustainable assessment of suppliers: An integrated fuzzy TOPSIS-possibilistic multi-objective approach[J]. *Annals of Operations Research*, 2020, 293(2): 639-668.
- [19] 宫诚举, 李伟伟, 郭亚军. 群体评价中的序关系分析法[J]. 运筹与管理, 2020, 29(11): 152-156.  
(Gong C J, Li W W, Guo Y J. Rank correlation analysis method in group evaluation[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(11): 152-156.)
- [20] 龚日朝, 李诗音, 谭可星. 带分布区间数的可能度计算模型及其排序[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(9): 2428-2446.  
(Gong R Z, Li S Y, Tan K X. Possibility calculation model of symmetric distribution interval number and its ranking method[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2021, 41(9): 2428-2446.)
- [21] 高德宝, 于辉. 一种新的区间数的比较与排序方法[J]. 统计与决策, 2017(17): 39-42.  
(Gao D B, Yu H. New comparison and ranking method of interval numbers[J]. Statistics & Decision, 2017(17): 39-42.)
- [22] 易平涛, 张丹宁, 郭亚军. 综合评价的随机模拟求解算法及应用[J]. 运筹与管理, 2009, 18(5): 97-106.  
(Yi P T, Zhang D N, Guo Y J. The study on a stochastic simulation solution method of comprehensive evaluation and application[J]. Operations Research and Management Science, 2009, 18(5): 97-106.)
- [23] 徐泽水, 达庆利. 区间数的排序方法研究[J]. 系统工程, 2001, 19(6): 94-96.  
(Xu Z S, Da Q L. Research on method for ranking interval numbers[J]. Systems Engineering, 2001, 19(6): 94-96.)

## 作者简介

易平涛 (1981-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为系统评价、指数理论, E-mail: [ptyi@mail.neu.edu.cn](mailto:ptyi@mail.neu.edu.cn);

于海婷 (1998-), 女, 博士生, 主要研究方向为综合评价, E-mail: [yuhaiting98@163.com](mailto:yuhaiting98@163.com);

李伟伟 (1986-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为综合评价、复杂系统测度, E-mail: [liww@mail.neu.edu.cn](mailto:liww@mail.neu.edu.cn);

惠文锋 (1993-), 男, 硕士生, 主要研究方向为综合评价, E-mail: [18863371626@163.com](mailto:18863371626@163.com);

王露 (1992-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为数据挖掘、综合评价, E-mail: [wanglu1993531@163.com](mailto:wanglu1993531@163.com).