

中文引用格式:姜福川,张思宇,张国庆,等. 基于DS证据-后悔理论的煤矿安全投入案例决策研究[J]. 中国安全科学学报,2024,34(12):16-23.

英文引用格式:JIANG Fuchuan, ZHANG Siyu, ZHANG Guoqing, et al. Case decision study of coal mine safety input based on DS evidence-regret theory [J]. China Safety Science Journal,2024,34(12):16-23.

# 基于DS证据-后悔理论的煤矿安全投入案例 决策研究\*

姜福川<sup>1,2</sup>副教授,张思宇<sup>1</sup>,张国庆<sup>1,3</sup>工程师,牛悦<sup>1</sup>,李梦林<sup>1</sup>,刘培舜<sup>1</sup>

(1 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院,辽宁葫芦岛125105;2 辽宁工程技术大学矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室,辽宁葫芦岛125105;3 国家能源集团乌海市公乌素煤业有限责任公司,内蒙古乌海016030)

中图分类号:X915.4 文献标志码:A DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.12.0429

基金项目:国家自然科学基金资助(51674127)。

**【摘要】**为实现更全面有效的煤矿安全投入,针对决策者心理行为因素对安全投入决策的影响问题,建立后悔理论-案例决策理论(CBDT)安全投入决策模型;通过分析CBDT在煤矿安全投入中的适用性,从安全投入方案和安全产出2个方面建立安全投入决策指标体系,基于改进的DS证据理论,并融合专家评价,计算各指标的权重;在CBDT的视角下,基于后悔理论,计算得到各个方案的综合感知效用,依据综合感知效用大小排序,选择最优煤矿安全投入方案。结果表明:决策者在实施安全投入的过程中,更注重安全设施投入和安全技术投入,会尽量规避安全产出不理想的安全投入方案;该模型以历史安全投入案例为依据,并结合决策者的主观心理,有助于选择出最优安全投入方案,使安全投入决策更加客观科学。

**【关键词】** DS证据理论; 后悔理论; 煤矿安全投入; 案例决策理论(CBDT); 决策者

## Case decision study of coal mine safety input based on DS evidence-regret theory

JIANG Fuchuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Siyu<sup>1</sup>, ZHANG Guoqing<sup>1,3</sup>, NIU Yue<sup>1</sup>, LI Menglin<sup>1</sup>, LIU Peishun<sup>1</sup>

(1 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disaster and Control Ministry of Education, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China; 3 Wuhai Gongwusu Coal Industry Limited Liability Company, National Energy Group, Wuhai Inner Mongolia 016030, China)

**Abstract:** In order to achieve a more comprehensive and effective investment in coal mine safety, aiming at the influence of psychological and behavioral factors of decision makers on safety input decisions, a regret theory-CBDT safety input decision model was established. By analyzing the applicability of CBDT in coal mine safety input, safety input decision-making index system was established from two aspects of safety input and safety output, based on improved DS evidence theory and the evaluation of experts, and the weights of each indicator were calculated. In the CBDT perspective, based on regret theory, the

comprehensive perceived utility of each scheme was calculated, and the optimal safety investment scheme was selected according to the comprehensive perceived utility. The result shows that in the process of safety input, policymakers pay more attention to safety facilities and safety technology input, and policymakers will try to avoid safety input schemes with unsatisfactory safety output. The model is based on historical safety investment cases and combines the subjective psychology of decision-makers, it helps select the optimal safety input scheme, makes safety investment decision-making more objective and scientific.

**Keywords:** Dempster-Shafer(DS) evidence theory; regret theory; coal mine safety input; case-based decision theory(CBDT); policymaker

## 0 引言

近年来,国家为推进煤矿安全生产做了很多工作并取得积极进展,但是,煤矿安全生产仍然处于爬坡过坎阶段。据统计,2023 年煤矿百万吨死亡率为 0.094,较去年上升 23.7%,煤矿的安全生产面临着异常严峻复杂的形势<sup>[1]</sup>。目前,安全投入在个别煤矿安全生产中的作用没有达到最优化,原因主要在于安全投入的结构不合理和评价体系不健全。因此,寻找最优的煤矿安全投入方案,对保障煤矿的安全生产具有重要意义。

学者们针对安全投入领域作了诸多研究,许梦国等<sup>[2]</sup>引入云模型理论,构建层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)-云模型,确定评价指标的权重向量,计算分析了各指标的重要程度;赵宝福等<sup>[3]</sup>采用直觉三角模糊语言数-AHP 计算指标权重,并按重要性排序;姜福川等<sup>[4]</sup>基于熵权-逼近理想解排序法 Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 建立评价模型,利用熵权法确定指标权重,采用 TOPSIS 计算每个方案的相对贴进度,来优选方案;史恭龙等<sup>[5]</sup>针对安全投入结构将安全成本分为保证性成本和损失性成本,基于突变级数法构建评价模型,提供了新的安全投入评价方法。以上研究多采用 AHP 和熵权法进行运算分析,适用范围广,但没有考虑在煤矿安全投入决策的过程中存在不确定性、模糊性以及决策者心理行为因素对决策产生的影响。

因此,笔者拟基于案例决策理论(Cased-Based Decision Theory, CBDT)构建多属性决策体系;运用 DS(Dempster-Shafer)证据理论,并融合多位专家的经验,计算指标权重;与后悔理论相融合,将决策者的认知局限性以及心理行为因素包含在 CBDT 的框架中,将客观的数据与决策者的主观感受相结合,以为煤矿安全投入方案的选择提供一种新思路。

## 1 煤矿安全投入决策模型

BELL<sup>[6]</sup>、LOOMES<sup>[7]</sup>等各自独立提出了后悔理论。决策者在决策的过程中受 2 个主观因素的影响:①对决策产生的结果感到后悔或者欣喜;②规避感到后悔的方案。

GIBOA 等<sup>[8]</sup>提出了 CBDT。CBDT 具有一般性,能使决策者在信息极少、不确定性高的环境下获得比较满意的决策结果<sup>[9]</sup>。CBDT 理论是根据过去已经完成的相似决策事件作为参照,据此来进行新的决策,缺乏对决策者主观心理因素的考虑。将决策者后悔规避心理与 CBDT 相融合,能够更加真实地反映决策者实际决策过程中的综合感知效用<sup>[10]</sup>。

基于上述原理,提出一种基于后悔理论-CBDT 的煤矿安全投入案例决策方法。首先,基于 CBDT 建立安全投入决策指标体系,采用 DS 证据理论融合信息区间并计算各指标权重;采用 CBDT 计算和集结指标(值),得到目标案例与历史安全投入案例的综合相似度,据此筛选近似案例集;然后,融合后悔理论计算感知效用;最后,根据目标案例与历史安全投入案例的相似度对感知效用进行加权求和,计算出备选方案的综合感知效用,据此进行方案优选,方法如图 1 所示。

### 1.1 建立安全投入决策指标体系

建立一个科学系统的安全投入决策指标体系是安全投入决策成功的前提<sup>[11]</sup>。CBDT 在实际应用的过程中将数据分为方案和结果 2 个层面,煤矿安全投入方案作为方案层面,安全产出作为结果层面,两者互为因果,安全投入方案影响安全产出,安全产出反映安全投入方案的实施效果。因此,煤矿安全投入决策指标体系的构建可从安全投入方案和安全产出 2 方面分析。

安全投入决策指标体系可以划分为很多形式。

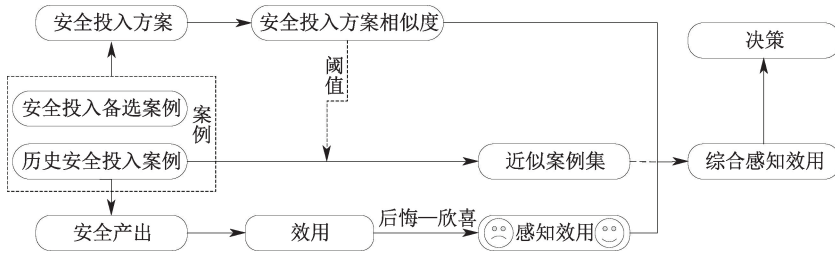


图1 基于后悔理论-CBDT 安全投入决策方法

Fig.1 Based on regret theory-CBDT safety input decision method

田涛<sup>[12]</sup>将安全投入划分为人员系统、基础设施、安全技术和安全管理4个部分;姜福川等<sup>[4]</sup>按照各项投入的功能划分,分为安全管理、安全教育培训、安全工程、安全设备和安全科技5个部分,安全产出方面分为增值产出和减损产出2个部分;王海涛<sup>[13]</sup>围绕人-机-环事故致因理论划分,安全投入方面分为人员系统、安全技术、安全管理和基础设施4个部分,安全产出方面分为安全生产情况和安全事故情

况2个部分。分析已有的安全投入指标体系研究,以《企业安全生产费用提取和使用管理方法》为依据,整理划分煤矿安全投入指标。将安全投入方案划分为安全管理投入、安全技术投入、安全教育投入和安全设施投入4个部分,安全产出划分为生产情况和事故情况2个部分,考虑到数据的获取和处理,选取事故经济损失作为事故情况指标,煤炭产量作为生产情况指标,具体如图2所示。

基于CBDT的煤矿安全投入决策指标体系



图2 煤矿安全投入决策指标体系

Fig.2 Coal mine safety input decision-making index system

### 1.2 基于改进 DS 证据理论计算指标权重

DS 证据理论最早由 DEMPSTER<sup>[14]</sup> 提出, SHAFER<sup>[15]</sup> 进一步发展。DS 证据理论为不确定性推理理论,可将概率赋给多个对象组合的集合,直接表示不确定性<sup>[16]</sup>。张军等<sup>[17]</sup> 采用加权平均改进 DS 证据理论,使其更加具有广泛性。改进的 DS 证据理论利用欧氏距离计算各个证据到平均证据的距离,确定专家证据的可信度(权重),从而重新进行概率分配,有效解决了证据可信度和证据高度冲突

而产生的问题。由专家给出的证据体组成的集合  $\Theta$  是 DS 证据理论的识别框架,运用改进 DS 证据理论求取各个指标权重,步骤如下:

1) 确定平均证据  $\bar{m}$ 。邀请  $n$  位专家针对评价体系给出证据体  $m_k, k=1, 2, \dots, n$ , 计算平均证据  $\bar{m}$ 。

$$\bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n} \quad (1)$$

式中:  $k=1, 2, \dots, n$ , 为每一个证据体;  $n$  为证据体个数。

2) 确定每个证据到平均证据的距离  $l_k$ 。

$$l_k = \|m_k - \bar{m}\| = \sqrt{(m_k(a) - \bar{m}(a))^2 + \dots}, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中  $a$  为整个识别框架  $\Theta$  的任意子集。

3) 确定每个证据的似真度  $S_k$ 。

$$S_k = 1 - l_k, k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

4) 确定每个证据的可信度(权重)  $c_k$ 。

$$c_k = \frac{S_k}{\sum_{k=1}^n S_k}, k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

5) 依据  $c_k$  确定证据的加权平均  $M$ 。

$$M = c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots + c_k m_k = \sum_{k=1}^n c_k m_k \quad (5)$$

$$\bar{m}(a) = \sum_{i=1}^n w_i m_i(a), \forall a \subseteq \Omega \quad (6)$$

6) 用 DS 法则合成迭代  $k-1$  次, 最终结果  $m^*$ 。

$$m^* = [\dots [\bar{m}_1 \oplus \bar{m}_2] \oplus \dots \oplus \bar{m}_k] \quad (7)$$

DS 组合规则可融合 2 组及以上的不同证据, 设 1 个识别框架  $\Theta$  上 2 个证据体分别为  $m_1$  和  $m_2$ , 焦点分别是  $Y_p$  和  $G_j$ , 合成后函数为  $m$ :

$$m(a) = m_1(Y_p) \oplus m_2(G_j) =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{1-v} \sum_{Y_p \cap G_j = A} m_1(Y_p) m_2(G_j), \forall A \subset \Theta, a \neq \emptyset \\ 0, a = \emptyset \end{cases} \quad (8)$$

$$v = \sum_{Y_p \cap G_j = \emptyset} m_1(Y_p) m_2(G_j) \quad (9)$$

式中:  $1/(1-v)$  为归一化因子;  $v$  为冲突系数。

### 1.3 基于后悔理论-CBDT 的安全投入决策计算

从历史案例中寻找与目标安全投入案例相似的案例作为安全投入决策的依据。一个历史案例  $T$  往往包括安全投入方案  $A$  与安全产出  $Q$  等 2 部分, 记为  $T_r = (A_r, Q_r), r \in N, N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。目标案例  $T_0^i$  的结果未知, 但有多个备选方案, 目标案例为  $T_0^i = (A_0^i), i \in M, M = \{1, 2, \dots, m\}$ 。

安全投入方案  $A$  由多个属性描述, 其属性集为  $\{C_1^A, C_2^A, \dots, C_h^A, \dots, C_j^A\}, h \in J, J = \{1, 2, \dots, j\}$ ; 权重集  $\{\omega_1^A, \omega_2^A, \dots, \omega_h^A, \dots, \omega_j^A\}, \sum_{h=1}^j \omega_h^A = 1$ ; 历史安全投入方案属性值向量  $(b_{r1}, b_{r2}, \dots, b_{rh}, \dots, b_{rj})$ ,  $b_{rh}$  为  $C_h^A$  上的属性值; 目标案例  $T_0^i$  属性值向量  $(b_{01}^i, b_{02}^i, \dots, b_{0h}^i, \dots, b_{0j}^i), i \in M, M = \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $b_{0h}^i$  为  $C_h^A$  上的属性值。

安全产出由多个属性组成, 属性集为  $\{C_1^Q, C_2^Q,$

$\dots, C_g^Q, \dots, C_f^Q\}, g \in F, F = \{1, 2, \dots, f\}$ ; 权重集  $\{\omega_1^Q, \omega_2^Q, \dots, \omega_g^Q, \dots, \omega_f^Q\}, \sum_{g=1}^f \omega_g^Q = 1$ ; 历史安全投入项目案例中安全产出的属性值向量为  $(d_{r1}, d_{r2}, \dots, d_{rg}, \dots, d_{rf}), d_{rg}$  为  $C_g^Q$  上的属性值。

1) 计算目标方案与历史方案的相似度:

$$\Delta_{rh}^A = \frac{|b_{0h} - b_{rh}|}{\Delta_{*h}^A}, r \in N, h \in J \quad (10)$$

其中,

$$\Delta_{*h}^A = \max\{|b_{0h} - b_{rh}| | r \in N\}$$

则

$$\text{sim}_h(A_0^i, A_r) = \frac{\exp(1 - \Delta_{rh}^A) - 1}{\exp(1) - 1} \quad (11)$$

$$\text{sim}(A_0^i, A_r) = \sum_{h=1}^j \omega_h^A \cdot \text{Sim}_h(A_0^i, A_r), i \in M, r \in N, h \in J \quad (12)$$

2) 筛选近似案例。与备选案例相似度越高的历史案例, 越具有参考性, 因此, 需要设置一个阈值筛选历史案例, 提取相似度不小于该阈值的历史案例组成相似案例集。采用平均数法来确定阈值:

$$\xi = \frac{\sum_{r=1}^n \sum_{i=1}^m \text{sim}(A_0^i, A_r)}{n \times m}, r \in N, i \in M \quad (13)$$

当  $\text{sim}(A_0^i, A_r) \geq \xi$  时, 历史案例  $T_r$  选入方案  $T_0^i$  的近似案例集:

$$T^{*i} = \{(A_r, R_r) | \text{sim}(A_0^i, A_r) \geq \xi, r \in N\} \quad (14)$$

$$\text{并有 } N^{*i} = \{r | \text{sim}(A_0^i, A_r) \geq \xi, r \in N\} \quad (15)$$

3) 计算感知效用。对安全产出指标值进行标准化处理, 得到和效用值正相关的数值  $d'_{rg}, r \in N, g \in F$ ; 然后计算历史案例的结果效用:

$$u_r = \sum_{g=1}^f \omega_g^Q \cdot d'_{rg}, r \in N, g \in F \quad (16)$$

感知效用:

$$U_r^i = u_r + R(u_r - u^*), r \in N^{*i} \quad (17)$$

其中,  $u^* = \max\{u_r | r \in N^{*i}\}$ 。  $R(x)$  表示“后悔-欣喜”函数, 且  $R'(x) > 0, R''(x) < 0, R(0) = 0$ 。  $R(x)$  的表达式如下:

$$R(x) = 1 - \exp(-\varphi x), \varphi > 0 \quad (18)$$

式中  $\varphi$  为决策者的后悔规避系数, 值越大表示决策者后悔规避行为越强, 值越小表示决策者后悔规避行为越不明显<sup>[18]</sup>。

4) 备选安全投入方案综合评价:

$$\tilde{V}(T_0^i) = \frac{\sum_{r \in N^{*i}} \text{sim}(A_0^i, A_r) \cdot U_r^i}{\sum_{r \in N^{*i}} \text{sim}(A_0^i, A_r)}, r \in N^{*i}, i \in M \quad (19)$$

根据  $\tilde{V}(T_0^i)$  的大小对备选方案进行排序选择最优方案。

## 2 煤矿安全投入案实例分析

辽宁省某煤矿企业为了保障煤矿的安全生产,需要确定合理有效的安全投入方案。由安全技术专

家、采矿工程专家、应急救援专家等 10 位专家及煤矿企业各部门的工作人员组成煤矿安全投入决策小组。安全投入决策小组为提高煤矿的安全生产水平,采用综合安全评估方法 (Formal Safety Assessment, FSA) 在对该煤矿进行危险识别和风险评估基础上,以过去 12 年安全投入数据为参考,并结合煤矿安全投入决策指标体系,提出 4 个备选煤矿安全投入比例方案,见表 1。安全投入比例是指各项安全投入要素的费用占全部费用的比例,具体见表 1。安全投入决策小组收集了该煤矿企业安全投入项目的历史案例,见表 2<sup>[19]</sup>。

表 1 煤矿安全投入备选方案

Table 1 Mine safety input alternatives

备选方案	安全管理投入比例	安全技术投入比例	安全教育投入比例	安全设施投入比例
1( $T_0^1$ )	0.156 0	0.452 6	0.098 3	0.293 1
2( $T_0^2$ )	0.131 1	0.558 7	0.091 0	0.219 2
3( $T_0^3$ )	0.120 8	0.526 4	0.109 9	0.242 9
4( $T_0^4$ )	0.145 8	0.479 6	0.106 2	0.268 4

表 2 历史安全投入比例及安全产出指标信息

Table 2 Historical safety input ratios schemes and safety output indicator information

年份	安全管理投入比例	安全技术投入比例	安全教育投入比例	安全设施投入比例	事故经济损失/万元	煤炭产量/万 t
2012( $T_1$ )	0.109 9	0.480 2	0.092 1	0.317 8	285.3	140
2013( $T_2$ )	0.129 7	0.509 3	0.096 1	0.264 9	266.4	157
2014( $T_3$ )	0.123 8	0.567 2	0.091 8	0.217 2	316.5	143
2015( $T_4$ )	0.151 1	0.413 3	0.112 7	0.322 9	352.3	145
2016( $T_5$ )	0.142 1	0.458 2	0.115 5	0.284 2	275.2	130
2017( $T_6$ )	0.154 0	0.447 8	0.097 3	0.301 0	223.4	142
2018( $T_7$ )	0.135 2	0.480 6	0.095 9	0.288 3	324.0	120
2019( $T_8$ )	0.132 2	0.487 2	0.103 6	0.277 7	213.0	100
2020( $T_9$ )	0.113 3	0.541 2	0.099 3	0.246 2	384.4	110
2021( $T_{10}$ )	0.123 2	0.390 0	0.125 5	0.361 3	303	125
2022( $T_{11}$ )	0.131 5	0.450 2	0.098 3	0.320 1	251	130
2023( $T_{12}$ )	0.118 0	0.525 1	0.089 6	0.267 4	306.4	125

### 2.1 基于改进 DS 证据理论确定指标权重

首先,10 位专家结合知识和经验依据安全投入决策指标体系评估安全投入方案中每个三级指标,评价集和对应的模糊评价价值见表 3,评价结果见表 4。

表 3 评价集及模糊评价价值

Table 3 Evaluation set and fuzzy evaluation values

评价集	高	较高	中	较低	低
符号	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_5$
评价价值	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1

表 4 安全投入三级指标评价结果

Table 4 Evaluation results of third-level indicators of safety input

属性	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
$C_{11}$	$\{H_3\}0.8; \{H_4\}0.2$	$\{H_3\}, 1$	$\{H_3\}0.5; \{H_4\}0.5$	$\{H_3\}, 0.6; \{H_4\}, 0.4$	$\{H_2\}, 0.2; \{H_3\}0.8$
$C_{12}$	$\{H_4\}0.5; \{H_5\}0.5$	$\{H_4\}, 0.6; \{H_5\}0.4$	$\{H_4\}0.6; \{H_5\}0.4$	$\{H_4\}0.4; \{H_5\}0.6$	$\{H_5\}1.0$
$C_{13}$	$\{H_3\}0.2; \{H_4\}0.8$	$\{H_3\}0.5; \{H_4\}0.5$	$\{H_4\}1.0$	$\{H_3\}0.3; \{H_4\}0.7$	$\{H_4\}0.5; \{H_5\}0.5$
$C_{14}$	$\{H_3\}0.5; \{H_4\}0.5$	$\{H_3\}1.0$	$\{H_3\}0.3; \{H_4\}0.7$	$\{H_3\}0.4; \{H_4\}0.6$	$\{H_3\}0.6; \{H_4\}0.4$
$C_{15}$	$\{H_4\}0.8; \{H_5\}0.2$	$\{H_4\}0.4; \{H_5\}0.6$	$\{H_4\}0.7; \{H_5\}0.3$	$\{H_4\}1.0$	$\{H_4\}0.5; \{H_5\}0.5$
$C_{21}$	$\{H_3\}0.7; \{H_4\}0.3$	$\{H_4\}1.0$	$\{H_3\}0.5; \{H_4\}0.5$	$\{H_3\}0.8; \{H_4\}0.2$	$\{H_3\}0.6; \{H_4\}0.4$

续表 4

属性	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5
$C_{22}$	$\{H_2\}0.6; \{H_3\}0.4$	$\{H_2\}0.3; \{H_3\}0.7$	$\{H_3\}1.0$	$\{H_3\}0.8; \{H_4\}0.2$	$\{H_2\}0.2; \{H_3\}0.8$
$C_{23}$	$\{H_2\}, 1.0$	$\{H_2\}0.8; \{H_3\}0.2$	$\{H_2\}0.5; \{H_3\}0.5$	$\{H_2\}0.6; \{H_3\}0.4$	$\{H_2\}0.6; \{H_3\}0.4$
$C_{24}$	$\{H_3\}0.3; \{H_4\}0.7$	$\{H_3\}0.5; \{H_4\}0.5$	$\{H_3\}0.6; \{H_4\}0.4$	$\{H_3\}0.2; \{H_4\}0.8$	$\{H_4\}1.0$
$C_{25}$	$\{H_2\}0.5; \{H_3\}0.5$	$\{H_2\}0.6; \{H_3\}0.4$	$\{H_2\}0.4; \{H_3\}0.6$	$\{H_3\}1.0$	$\{H_2\}0.3; \{H_3\}0.7$
$C_{31}$	$\{H_3\}0.2; \{H_4\}0.8$	$\{H_3\}0.4; \{H_4\}0.6$	$\{H_3\}0.6; \{H_4\}0.4$	$\{H_3\}0.5; \{H_4\}0.5$	$\{H_4\}1.0$
$C_{32}$	$\{H_3\}0.5; \{H_4\}0.5$	$\{H_3\}0.8; \{H_4\}0.2$	$\{H_3\}1.0$	$\{H_2\}0.1; \{H_3\}0.9$	$\{H_3\}0.6; \{H_4\}0.4$
$C_{33}$	$\{H_4\}0.7; \{H_5\}0.3$	$\{H_4\}1.0$	$\{H_4\}0.6; \{H_5\}0.4$	$\{H_4\}0.8; \{H_5\}0.2$	$\{H_4\}0.5; \{H_5\}0.5$
$C_{34}$	$\{H_4\}0.6; \{H_5\}0.4$	$\{H_4\}0.5; \{H_5\}0.5$	$\{H_5\}1.0$	$\{H_4\}0.2; \{H_5\}0.8$	$\{H_4\}0.3; \{H_5\}0.7$
$C_{41}$	$\{H_2\}0.5; \{H_3\}0.5$	$\{H_2\}0.4; \{H_3\}0.6$	$\{H_3\}1.0$	$\{H_2\}0.7; \{H_3\}0.3$	$\{H_2\}0.6; \{H_3\}0.4$
$C_{42}$	$\{H_1\}0.2; \{H_2\}0.8$	$\{H_2\}1.0$	$\{H_1\}0.5; \{H_2\}0.5$	$\{H_1\}0.4; \{H_2\}0.6$	$\{H_1\}0.3; \{H_2\}0.7$
$C_{43}$	$\{H_2\}0.6; \{H_3\}0.4$	$\{H_2\}1.0$	$\{H_2\}0.5; \{H_3\}0.5$	$\{H_2\}0.7; \{H_3\}0.3$	$\{H_2\}0.4; \{H_3\}0.6$
$C_{44}$	$\{H_1\}1.0$	$\{H_1\}0.7; \{H_2\}0.3$	$\{H_1\}0.8; \{H_2\}0.2$	$\{H_1\}0.5; \{H_2\}0.5$	$\{H_1\}0.4; \{H_2\}0.6$
$C_{45}$	$\{H_2\}0.3; \{H_3\}0.7$	$\{H_2\}0.5; \{H_3\}0.5$	$\{H_3\}1.0$	$\{H_3\}0.8; \{H_4\}0.2$	$\{H_2\}0.2; \{H_3\}0.8$
属性	专家 6	专家 7	专家 8	专家 9	专家 10
$C_{11}$	$\{H_2\}0.3; \{H_3\}0.7$	$\{H_3\}0.7; \{H_4\}0.3$	$\{H_3\}0.5; \{H_4\}0.5$	$\{H_3\}0.7; \{H_4\}0.3$	$\{H_3\}0.8; \{H_4\}0.2$
$C_{12}$	$\{H_4\}0.3; \{H_5\}0.7$	$\{H_4\}0.2; \{H_5\}0.8$	$\{H_4\}0.4; \{H_5\}0.6$	$\{H_4\}0.5; \{H_5\}0.5$	$\{H_4\}0.7; \{H_5\}0.3$
$C_{13}$	$\{H_4\}0.7; \{H_5\}0.3$	$\{H_3\}0.4; \{H_4\}0.6$	$\{H_3\}0.6; \{H_4\}0.4$	$\{H_4\}0.8; \{H_5\}0.2$	$\{H_4\}0.8; \{H_5\}0.2$
$C_{14}$	$\{H_3\}0.7; \{H_4\}0.3$	$\{H_3\}0.4; \{H_4\}0.6$	$\{H_3\}0.6; \{H_4\}0.4$	$\{H_3\}0.4; \{H_4\}0.6$	$\{H_3\}0.8; \{H_4\}0.2$
$C_{15}$	$\{H_4\}0.6; \{H_5\}0.4$	$\{H_4\}0.8; \{H_5\}0.2$	$\{H_4\}0.8; \{H_5\}0.2$	$\{H_4\}0.7; \{H_5\}0.3$	$\{H_4\}0.5; \{H_5\}0.5$
$C_{21}$	$\{H_3\}0.7; \{H_4\}0.3$	$\{H_3\}0.6; \{H_4\}0.4$	$\{H_3\}0.4; \{H_4\}0.6$	$\{H_3\}0.3; \{H_4\}0.7$	$\{H_3\}0.5; \{H_4\}0.5$
$C_{22}$	$\{H_2\}0.3; \{H_3\}0.7$	$\{H_2\}0.2; \{H_3\}0.8$	$\{H_2\}0.4; \{H_3\}0.6$	$\{H_3\}0.8; \{H_4\}0.2$	$\{H_2\}0.3; \{H_3\}0.7$
$C_{23}$	$\{H_2\}0.7; \{H_3\}0.3$	$\{H_2\}0.8; \{H_3\}0.2$	$\{H_2\}0.7; \{H_3\}0.3$	$\{H_2\}0.5; \{H_3\}0.5$	$\{H_2\}0.8; \{H_3\}0.2$
$C_{24}$	$\{H_3\}0.2; \{H_4\}0.8$	$\{H_3\}0.5; \{H_4\}0.5$	$\{H_3\}0.4; \{H_4\}0.6$	$\{H_3\}0.2; \{H_4\}0.8$	$\{H_3\}0.3; \{H_4\}0.7$
$C_{25}$	$\{H_2\}0.7; \{H_3\}0.3$	$\{H_2\}0.4; \{H_3\}0.6$	$\{H_2\}0.4; \{H_3\}0.6$	$\{H_2\}0.1; \{H_3\}0.9$	$\{H_2\}0.2; \{H_3\}0.8$
$C_{31}$	$\{H_3\}0.3; \{H_4\}0.7$	$\{H_3\}0.2; \{H_4\}0.8$	$\{H_3\}0.5; \{H_4\}0.5$	$\{H_3\}0.3; \{H_4\}0.7$	$\{H_3\}0.4; \{H_4\}0.6$
$C_{32}$	$\{H_2\}0.2; \{H_3\}0.8$	$\{H_3\}0.7; \{H_4\}0.3$	$\{H_2\}0.5; \{H_3\}0.5$	$\{H_2\}0.6; \{H_3\}0.4$	$\{H_2\}0.3; \{H_3\}0.7$
$C_{33}$	$\{H_4\}0.6; \{H_5\}0.4$	$\{H_4\}0.7; \{H_5\}0.3$	$\{H_4\}0.8; \{H_5\}0.2$	$\{H_4\}0.7; \{H_5\}0.3$	$\{H_4\}0.6; \{H_5\}0.4$
$C_{34}$	$\{H_4\}0.2; \{H_5\}0.8$	$\{H_4\}0.1; \{H_5\}0.9$	$\{H_4\}0.4; \{H_5\}0.6$	$\{H_4\}0.5; \{H_5\}0.5$	$\{H_4\}0.4; \{H_5\}0.6$
$C_{41}$	$\{H_2\}0.3; \{H_3\}0.7$	$\{H_2\}0.4; \{H_3\}0.6$	$\{H_2\}0.6; \{H_3\}0.4$	$\{H_2\}0.3; \{H_3\}0.7$	$\{H_2\}0.6; \{H_3\}0.4$
$C_{42}$	$\{H_1\}0.4; \{H_2\}0.6$	$\{H_1\}0.2; \{H_2\}0.8$	$\{H_1\}0.5; \{H_2\}0.5$	$\{H_1\}0.1; \{H_2\}0.9$	$\{H_1\}0.3; \{H_2\}0.7$
$C_{43}$	$\{H_2\}0.8; \{H_3\}0.2$	$\{H_2\}0.5; \{H_3\}0.5$	$\{H_2\}0.8; \{H_3\}0.2$	$\{H_2\}0.6; \{H_3\}0.4$	$\{H_2\}0.6; \{H_3\}0.4$
$C_{44}$	$\{H_1\}0.6; \{H_2\}0.4$	$\{H_1\}0.6; \{H_2\}0.4$	$\{H_1\}0.7; \{H_2\}0.3$	$\{H_1\}0.8; \{H_2\}0.2$	$\{H_1\}0.6; \{H_2\}0.4$
$C_{45}$	$\{H_2\}0.2; \{H_3\}0.8$	$\{H_2\}0.5; \{H_3\}0.5$	$\{H_2\}0.3; \{H_3\}0.7$	$\{H_3\}0.8; \{H_4\}0.2$	$\{H_2\}0.2; \{H_3\}0.8$

根据式(1)一式(4),计算每个信任结构的权重因子,根据式(5)一式(9)计算得到每个属性的融合评价。根据模糊评价量化专家的评估语言,计算

每个三级属性的最终评价结果和其对应的权重。同理,融合量化每个三级指标,得到每个二级指标的最终评估结果及其权重,见表 5。

表 5 安全投入二级指标评价融合结果及其权重

Table 5 Second-level indicators of safety input evaluated the fusion results and their weights

指标	融合评价	评估结果	权重
$B_1$	$\{H_3\}0.640\ 3; \{H_4\}0.359\ 6; \{H_5\}0.000\ 1$	0.428 0	0.213 1
$B_2$	$\{H_2\}0.052\ 0; \{H_3\}0.943\ 5; \{H_4\}0.004\ 5$	0.509 5	0.253 7
$B_3$	$\{H_3\}0.374\ 2; \{H_4\}0.625\ 1; \{H_5\}0.000\ 7$	0.374 7	0.186 5
$B_4$	$\{H_1\}0.051\ 6; \{H_2\}0.878\ 6; \{H_3\}0.069\ 8$	0.696 4	0.346 7

安全投入方案中安全管理投入、安全技术投入、安全教育投入和安全设施投入指标的权重  $\omega_g^A = (0.213\ 1, 0.253\ 7, 0.186\ 5, 0.346\ 7)$ 。同理,依据

上面步骤可以计算安全产出属性权重  $\omega_k^R = (0.532\ 0, 0.468\ 0)$ 。

## 2.2 基于后悔理论-CBDT 安全投入决策计算

根据表 2 和式(10)一式(12)计算得出历史安全投入案例与备选安全投入案例的方案相似度,具体见表 6。根据表 6 和式(13)采用平均数法计算出阈值为 0.48。排除方案相似度小于 0.48 的历史安全投入案例,保留方案相似度大于或等于 0.48 的历史安全投入案例,以此筛选出每个备选方案的近似案例集。方案 1 的近似案例集为  $\{T_1, T_2, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_{11}\}$ ;方案 2 的近似案例集为  $\{T_2, T_3, T_7, T_8, T_9, T_{12}\}$ ;方案 3 的近似案例集有  $\{T_2, T_3, T_8, T_9, T_{12}\}$ ;方案 4 的近似案例集为  $\{T_2, T_5, T_6,$

$T_7, T_8, T_{12}\}$ 。

根据表 2 和式(16)计算得到 2012—2023 年安全产出效用  $u_r = (0.636\ 0, 0.834\ 3, 0.563\ 8, 0.469\ 1, 0.585\ 3, 0.844\ 6, 0.351\ 7, 0.532\ 0, 0.082\ 1, 0.457\ 9, 0.660\ 4, 0.447\ 4)$ 。

根据安全产出效用,式(17)和式(18)计算出各个近似案例集的感知效用  $U_r^1, U_r^2, U_r^3$ 。其中,后悔规避系数数值越大表示后悔规避行为越强,考虑到煤矿生产的风险性、生产环境的复杂性以及煤矿安全投入的重要性,选择较大的风险规避系数  $\varphi = 0.8$ 。具体见表 7。

表 6 历史安全投入比例方案与备选方案相似度

Table 6 Similarity of historical safety input ratio scheme to the alternative

指标	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	$T_{11}$	$T_{12}$
$A_0^1$	0.488 7	0.504 4	0.168 3	0.549 8	0.694 1	0.904 2	0.733 6	0.603 4	0.316 9	0.147 7	0.688 1	0.384 7
$A_0^2$	0.363 5	0.687 2	0.873 7	0.150 0	0.340 1	0.304 4	0.544 8	0.571 5	0.621 4	0.115 4	0.468 0	0.611 3
$A_0^3$	0.361 0	0.635 2	0.585 6	0.264 1	0.449 5	0.261 9	0.445 5	0.585 4	0.756 3	0.217 3	0.344 0	0.679 7
$A_0^4$	0.405 3	0.625 2	0.208 6	0.416 3	0.682 1	0.540 3	0.682 2	0.774 7	0.394 8	0.055 6	0.443 6	0.483 0

表 7 安全产出结果感知效用

Table 7 Security output results perceived utility

指标	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{11}$	$T_{12}$
$U_r^1$	0.222 1	0.416 6	—	0.065 3	0.246 2	0.763 6	-0.096 6	0.149 6	—	0.345 2	—
$U_r^2$	—	0.573 3	0.281 5	—	—	—	-0.065 1	0.1477	-0.461 8	—	0.051 7
$U_r^3$	—	0.530 0	0.188 7	—	—	—	—	0.151 3	-0.562 0	—	0.057 5
$U_r^4$	—	0.516 4	—	—	0.242 0	0.456 3	-0.089 8	0.192 1	—	—	0.035 4

根据表 6、表 7 和式(19)计算 4 个备选安全投入方案的综合感知效用:  $\tilde{V}(T_0^1) = 0.408\ 8$ ,  $\tilde{V}(T_0^2) = 0.134\ 9$ ,  $\tilde{V}(T_0^3) = 0.112\ 7$ ,  $\tilde{V}(T_0^4) = 0.357\ 0$ 。由此得出 4 个备选安全投入方案的排序为  $T_0^1 > T_0^4 > T_0^2 > T_0^3$ 。方案  $T_0^1$  为最优安全投入方案,该公司可以按照  $T_0^1$  进行煤矿安全投入。从安全产出效用看出,2021 年安全产出最小,决策者会对 2021 年的安全投入方案产生后悔规避心理,在决策的过程中决策者会避免选择与 2021 年安全投入方案相似的方案,即决策者后悔规避心理行为因素对决策产生的影响。后悔理论-CBDT 安全投入决策模型考虑到了决策过程中决策者的心理行为对决策的影响,决策的过程更加贴合现实决策。

## 3 结 论

1) 基于 CBDT 从安全投入方案和安全产出

2 个层面,总结归纳出 2 个一级决策指标、6 个二级决策指标和 21 个三级决策指标。基于 10 位专家给出的评价,采用改进的 DS 证据理论,获得指标权重,判断指标重要度,决策时应更注重安全设施和安全技术投入。

2) 后悔理论-CBDT 决策模型将对决策者心理行为因素的考虑纳入到安全投入决策的过程中。决策者后悔规避等心理因素会对决策的过程和结果产生影响,客观的安全投入案例与决策者主观心理相结合,反映了决策者后悔规避和损失厌恶行为。

3) 采用后悔理论-CBDT 决策模型优选安全投入方案,得到  $T_0^1$  安全投入方案为最优方案。安全管理投入、安全技术投入、安全教育投入和安全设施投入比例为 0.156 0 : 0.452 7 : 0.098 3 : 0.293 1。验证了后悔理论-CBDT 决策模型解决安全投入决策问题的可行性。

## 参 考 文 献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2024-02-29). [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228\\_1947915.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html).
- [2] 许梦国, 闫曳婧, 王平, 等. 基于 AHP-C 的矿山企业安全投入评价研究[J]. 武汉科技大学学报, 2021, 44(4): 312-320.  
XU Mengguo, YAN Yejian, WANG Ping, et al. Safety investment evaluation of mining enterprises based on AHP-C [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2021, 44(4): 312-320.
- [3] 赵宝福, 张超, 贾宝山, 等. TIFNs-AHP 在煤炭企业安全投入中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(3): 145-150.  
ZHAO Baofu, ZHANG Chao, JIA Baoshan, et al. Research on application of TIFNs-AHP to safety investment in coal enterprises[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(3): 145-150.
- [4] 姜福川, 周师, 吴增彤, 等. 基于熵权-TOPSIS 法的煤矿安全投入决策分析[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(7): 24-29.  
JIANG Fuchuan, ZHOU Shi, WU Zengtong, et al. Analysis of coal mine safety investment decision based on entropy weight-TOPSIS method[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(7): 24-29.
- [5] 史恭龙, 张溢, 李红霞, 等. 基于突变级数法的煤炭企业安全投入评价[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 2 050-2 056.  
SHI Gonglong, ZHANG Yi, LI Hongxia, et al. Study on safety investment evaluation of coal enterprises based on catastrophe progression method[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(4): 2 050-2 056.
- [6] BELL D E. Regret in decision making under uncertainty[J]. Operations Research, 1982, 30(5): 961-981.
- [7] LOOMES G, SUGDEN R. Regret theory: an alternative theory of rational choice under uncertainty[J]. Economic Journal, 1982, 92(368): 805-824.
- [8] GILBOA I. Case-based decision theory[D]. Evanston: Northwestern University, 1992.
- [9] 彭新育, 霍致睿, 胡世业. 基于 CBDT 的风险投资决策方法研究[J]. 会计之友, 2020(10): 37-42.
- [10] 韩菁, 叶顺心, 柴建, 等. 基于后悔理论的混合型多属性案例决策方法[J]. 中国管理科学, 2016, 24(12): 108-116.  
HAN Jing, YE Shunxin, CHAI Jian, et al. Case-based decision analysis method based on regret theory for hybrid multiple attributes decision making [J]. Chinese Management Science, 2016, 24(12): 108-116.
- [11] 王书明. 基于层次分析法和熵权法的煤矿安全投入综合评价模型及其应用[J]. 金陵科技学院学报, 2011, 27(4): 8-16.  
WANG Shuming. The establishment and application of the comprehensive evaluation model for safety input of coal mines based on AHP and entropy weight [J]. Journal of Jinling University of Science and Technology, 2011, 27(4): 8-16.
- [12] 田涛. 我国煤矿安全投入机制研究及效率评价分析[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.  
TIAN Tao. Study on safety input mechanism and analysis on efficiency evaluation of coal mine in China [D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2013.
- [13] 王海涛. 煤矿安全投入影响因素系统分析及其效率评价研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.  
WANG Haitao. Influencing factors' systematic analysis and efficiency evaluation study on safety input of coal mine [D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2020.
- [14] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping [J]. Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38: 325-339.
- [15] SHAFER G A. Mathematical theory of evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976: 19-63.
- [16] 李金蓉, 杨玉中. DS 理论-贝叶斯网络下的煤矿通风系统风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 146-153.  
LI Jinrong, YANG Yuzhong. Risk assessment of ventilation system in coal mine based on DS theory and Bayesian network [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(8): 146-153.
- [17] 张军, 涂国平. 加权平均法解决证据理论中的失效问题[J]. 微计算机信息, 2007, 23(33): 202-203, 225.  
ZHANG Jun, TU Guoping. Weighted average approach to conflict evidence in D-S evidence theory [J]. Microcomputer Information, 2007, 23(33): 202-203, 225.
- [18] 范成伟, 明杏芬, 付小红, 等. 基于博弈论-后悔理论的装配式建筑施工安全风险评价模型研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1 132-1 139.  
FAN Chengwei, MING Xingfen, FU Xiaohong, et al. Research on safety risk assessment prefabricated building based on game theory-regret theory [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(3): 1 132-1 139.
- [19] 周师. 基于安全效益分析的煤矿安全投入决策研究[D]. 葫芦岛: 辽宁工程技术大学, 2022.  
ZHOU Shi. Research on coal mine safety input decision based on safety benefit analysis [D]. Huludao: Liaoning Technical University, 2022.

作者简介: 姜福川 (1966—), 男, 黑龙江双鸭山人, 博士, 副教授, 主要从事安全经济、安全管理等方面的研究。E-mail: 1047074832@qq.com。