

中文引用格式:姜福川,金凤春,张晓晓,等. 基于 Choquet 模糊积分的煤矿安全投入经济效益评价[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(2):76-82.

英文引用格式:JIANG Fuchuan, JIN Fengchun, ZHANG Xiaoxiao, et al. Economic benefit evaluation of coal mine safety input based on Choquet fuzzy integral [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(2):76-82.

# 基于 Choquet 模糊积分的煤矿安全投入 经济效益评价\*

姜福川<sup>1,2</sup>副教授, 金凤春<sup>1</sup>, 张晓晓<sup>1</sup>, 杨浩<sup>1</sup>, 王昊<sup>1</sup>, 盛兵旺<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)

中图分类号: X915.4

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.02.0577

基金项目: 国家自然科学基金资助(51674127)。

**【摘要】** 为提高煤矿企业的经济效益, 合理安排各项安全投入, 构建一种解决指标间相关性的模型。首先, 剖析基于安全投入的经济效益的影响因素, 在此基础上构建一套较为科学合理的结构指标体系; 其次, 利用熵权法确定各个指标的权重; 然后, 针对指标之间存在的相关性, 基于安全投入结构, 引入熵权-基于 2-可加模糊测度的 Choquet 模糊积分模型, 计算经济效益评价价值; 最后, 选取某煤矿进行实证分析, 验证所构建模型的可行性和有效性。结果表明: 所构建的模型比逼近理想解排序(TOPSIS)法更具有可靠性; 该模型考虑指标之间相互影响、相互关联情况, 能够得到较为准确、科学的评价结果。

**【关键词】** Choquet 模糊积分; 煤矿; 安全投入; 经济效益; 2-可加模糊测度

## Economic benefit evaluation of coal mine safety input based on Choquet fuzzy integral

JIANG Fuchuan<sup>1,2</sup>, JIN Fengchun<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoxiao<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>1</sup>,  
WANG HAO<sup>1</sup>, SHENG Bingwang<sup>1</sup>

(1 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technology University, Huludao Liaoning 125105, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control Ministry of Education, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China)

**Abstract:** In order to improve the economic benefits of coal mining enterprises and reasonable arrangement of various safety inputs, a model to solve the correlation between indicators was constructed. Firstly, the influencing factors of economic benefits based on safety investment were analyzed, and a set of scientific and reasonable structural index systems was constructed on this basis. Secondly, the entropy weight method was used to determine the weight of each index. Then, in view of the correlation between indicators, based on the safety input structure, the entropy weight-Choquet fuzzy integral model based on a 2-additive fuzzy measure was introduced to calculate the economic benefit evaluation value. Finally, a coal mine was selected for empirical analysis to verify the feasibility and effectiveness of the constructed model. The results show that the constructed model is more reliable than technique for order preference by

similarity to an ideal solution (TOPSIS) method. This model can take into account the mutual influence and correlation between indicators and obtain more accurate and scientific evaluation results.

**Keywords:** choquet fuzzy integral; coal mine; safety input; economic benefits; 2-additive fuzzy measure

## 0 引言

煤矿安全投入在改善安全生产条件,实现安全生产等方面皆具有重要作用与现实意义,在此基础上企业才能实现可持续发展。近几年,随着我国煤矿产量的不断增大,煤矿事故也时有发生,百万吨受伤率与世界其他发达国家相比较为严重<sup>[1]</sup>。但是,煤矿企业生产系统是动态多因素复杂系统,它在时空上由许多因素三维多重重叠而成,因此,其事故的发生也常是随机的、动态的、不确定性的。如何合理确定安全投入结构是尚未解决的难题<sup>[2-4]</sup>。因此,有必要评价煤矿企业的安全投入,在此基础上制定合理的投入决策,以减少安全事故的发生。

学者们对此开展了研究,任海芝等<sup>[3]</sup>采用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 和灰色关联分析法 (Grey Relational Analysis, GRA),建立了煤矿企业安全投入优化模型,以寻求最优的安全投入结构;赵宝福等<sup>[4]</sup>建立了一种直觉三角模糊数 (Triangular Intuitionistic Fuzzy Numbers, TIFNs) 与 AHP 相结合的安全投入结构确定新方法;姜福川等<sup>[5]</sup>通过逼近理想解排序 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS) 法实现方案的优选。但 AHP 和 TOPSIS 法都要求两两指标完全独立,而这与实际情况很可能不符合,实际上,基于安全投入的煤矿经济效益评价指标之间也是相互影响、相互关联的。

鉴于此,笔者拟基于安全投入的煤矿经济效益,构建指标体系;利用熵权法确定各个指标的权重;针对指标之间存在相关性,基于安全投入的结构引入熵权-基于2-可加模糊测度的 Choquet 模糊积分模型,评价煤矿经济效益;并以某煤矿 2009—2019 年的安全投入与安全产出数据为例,进行评价分析。以期为基于安全投入的煤矿经济效益评价提供借鉴,为企业合理安排各项安全投入提供依据,也可为评价方法的选择提供参考。

## 1 构建指标体系

### 1.1 安全投入指标

目前,我国学者基于不同角度,对安全投入指标

作了分类。陈全君等<sup>[6]</sup>从安全监督管理的角度,把安全投入分为人流、物流、信息流;李树刚等<sup>[7]</sup>从人、科学技术、管理方面构建煤矿安全投入指标;樊占文等<sup>[8]</sup>为使安全系统理论体系更加完善,在系统安全视角下,从系统安全研究视角分析安全系统的信息、人、机(物)、环境4个子系统。为更直观、清晰地展现安全投入体系脉络,根据安全投入的特征,并结合相关学者对安全投入指标的分类,将煤矿企业安全投入按功能划分为安全工程  $x_1$ 、安全教育  $x_2$ 、安全设施  $x_3$ 、安全技术  $x_4$ 、安全管理  $x_5$  和卫生  $x_6$  这6个指标。

### 1.2 安全产出指标

安全产出指标分为减损指标和增益指标。由于在研究煤矿企业安全投入产出效率过程中很难合理选取相应的增益指标,且增值产出表现在多个方面,大多是难以量化的,所以,只选取原煤产量  $x_8$  作为增值产出的评价指标。选取事故直接损失  $x_7$  作为减损产出的评价指标。基于煤矿安全投入结构的评价指标体系如图1所示。

## 2 构建安全投入经济效益评价模型

### 2.1 基于熵权法确定指标权重

熵权法确定权重的具体步骤<sup>[9]</sup>如下:

1) 建立初始决策矩阵  $O = (a_{ij})_{d \times e}$ 。其中,  $a_{ij}$  为第  $i$  个方案的第  $j$  个指标值 ( $i=1, 2, \dots, d; j=1, 2, \dots, e$ )。

2) 标准化处理初始决策矩阵,得到标准化矩阵  $R = (r_{ij})_{d \times e}$ 。其中,属性值越大越好的指标为:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_j a_{ij}}{\max_j a_{ij} - \min_j a_{ij}} \quad (1)$$

属性值越小越好的指标为:

$$r_{ij} = \frac{\max_j a_{ij} - a_{ij}}{\max_j a_{ij} - \min_j a_{ij}} \quad (2)$$

3) 计算各指标的熵值  $Q_j$ 。

$$Q_j = \frac{1}{\ln d} \sum_{i=1}^d f_{ij} \ln f_{ij} \quad (3)$$

式中  $f_{ij}$  为归一化处理标准化矩阵,  $f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^d r_{ij}}$

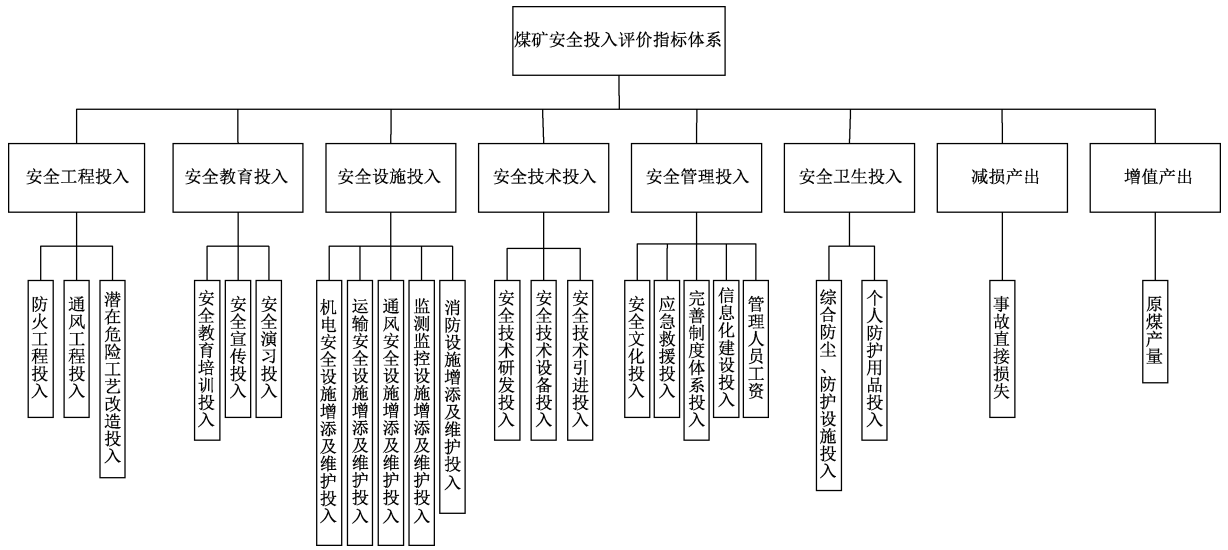


图1 基于煤矿安全投入结构的评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system based on coal mine safety input structure

若  $f_{ij}=0$ , 则  $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

4) 确定各指标的熵权  $\omega_j$ 。

$$\omega_j = \frac{1 - Q_j}{e - \sum_{j=1}^e Q_j} \quad (4)$$

其中,  $0 \leq \omega_j \leq 1, \sum_{j=1}^e \omega_j = 1$ 。

### 2.2 2-可加模糊测度与 Choquet 模糊积分

定义1: 设  $X$  为有限集合,  $Z(X)$  为  $X$  所有子集组成的集合, 集函数  $\mu: Z(X) \rightarrow [0, 1]$  满足以下条件: ①  $\mu(\emptyset) = 0, \mu(X) = 1$ ; ②  $S \subseteq T, T \in Z(X), S \subseteq T$ , 则  $\mu(S) \leq \mu(T)$ 。  $\mu$  为定义在  $Z(X)$  上的模糊测度<sup>[10]</sup>。

1996年, 基于伪布尔函数和默比乌斯变换, GRABISCH 定义了  $k$ -可加模糊测度。在模糊测度的复杂性和表示能力方面,  $k$ -可加模糊测度作了折中,  $k$  值越大, 其表示能力就越强, 但同时也越复杂。结合现实情况, 从实用的角度来看, 2-可加模糊测度更实用, 由此在  $k$ -可加模糊测度的基础上定义 2-可加模糊测度。2-可加模糊测度之所以能解决复杂性与精度之间的矛盾<sup>[11-12]</sup>, 是因为 2-可加模糊测度中用于衡量交互作用的重要指标包括交互因子和重要因子。2-可加模糊测度  $\mu(K)$  计算公式如下<sup>[10]</sup>:

$$\mu(K) = \sum_{i \in K} m_i + \sum_{\{i, j\} \subset K} m_{ij} \quad (5)$$

式中:  $K$  为集合;  $m_i$  为属性  $x_i$  的默比乌斯变换系数, 是一种全局重要程度指标;  $m_{ij}$  为属性  $\{x_i, x_j\}$  的默比

乌斯变换系数, 表示属性  $x_i$  和  $x_j$  之间的交互程度。

定义2: 设  $X$  为属性集,  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ ;  $W$  为属性集  $X$  的权重集,  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_i\}$ 。其中,  $i, j = 1, 2, \dots, n$  为属性。属性集  $x_i$  和属性集  $\{x_i, x_j\}$  的默比乌斯变换系数<sup>[10]</sup>分别为:

$$m_i = \frac{\omega_i}{P} \quad (6)$$

$$m_{ij} = \frac{\xi_{ij} \omega_i \omega_j}{P} \quad (7)$$

$$P = \sum_i \omega_i + \sum_{\{i, j\}} \xi_{ij} \omega_i \omega_j \quad (8)$$

式中:  $P$  为属性  $x_i$  和属性  $\{x_i, x_j\}$  的重要程度之和;  $\xi_{ij}$  为属性  $x_i$  和  $x_j$  的交互度,  $\xi_{ij} \in [-1, 1]$ 。

定义3: 设  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,  $\mu$  是定义在  $X$  上的模糊测度,  $v$  是定义在  $X$  上的集函数  $v: X \rightarrow [0, 1]$ , 则  $v$  关于  $\mu$  的 Choquet 模糊积分<sup>[10]</sup>:

$$(c) = \int v d\mu = \sum_{i=1}^n [v(x_{i-1}) - v(x_i)] \mu(A_{i-1}) \quad (9)$$

式中:  $\mu(A_i)$  为同时考虑指标  $x_1, x_2, \dots, x_n$  时的重要程度,  $A_i = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_n\}$ , 不失一般性, 要求  $v(x_1) \geq v(x_2) \geq \dots \geq v(x_n)$ , 否则可重新排列使其满足该关系式; (c) 为总的评价值。

### 2.3 基于 Choquet 模糊积分的安全投入经济效益评价

采用 Choquet 模糊积分法评价安全投入经济效益的步骤如下:

步骤1: 基于安全投入的经济效益评价指标体系, 采用熵权法确定每个指标的权重。

步骤2: 确定两两指标的交互关系和交互度。根

据专家经验和认知成对分析指标,若交互度  $\xi_{ij} > 0$ , 则  $x_i$  和  $x_j$  是积极合作的(或互补),且互补性越强  $\xi_{ij}$  越大;若交互度  $\xi_{ij} < 0$ , 则  $x_i$  和  $x_j$  是消极合作的(或冗余),且冗余性越强  $\xi_{ij}$  越小;若交互度  $\xi_{ij} = 0^{[10]}$ ,  $x_i$  和  $x_j$  是相互独立的,交互度打分标准见表 1<sup>[14]</sup>。

表 1 两两指标间的交互度打分标准

Tab. 1 Scoring standard of interaction degree between the two indicators

项目	模糊等级	打分标准
重复性	极强	-0.90
	非常强	-0.70
	强	-0.50
独立性	较强	-0.30
	独立	0.00
	较弱	0.30
互补性	强	0.50
	非常强	0.70
	极强	0.90

步骤 3:根据式(6)一式(8)计算指标的默比乌斯变换系数  $m_i, m_{ij}$ ,再根据式(5)计算指标的 2-可加模糊测度值。

步骤 4:将所得 2-可加模糊测度值与各指标实际表现值代入式(11),即可得煤矿 2009—2019 年的经济效益的评价值。

步骤 5:综合排序和分析选取煤矿企业的基于安全投入的经济效益情况。

### 3 实例分析

以某大型国有煤矿为例,验证熵权-基于 2-可加模糊测度的 Choquet 模糊积分模型的合理性和可行性。该煤矿 2009—2019 年各项数据情况见表 2<sup>[15]</sup>。运用熵权-基于 2-可加模糊测度的 Choquet 模糊积分模型分析评价该矿安全投入方案。

1) 用式(1)、式(2)对指标数据进行标准化处理。

2) 根据式(3)、式(4)计算出各评价指标的熵权值分别为:  $w_1 = 0.145 2, w_2 = 0.115 5, w_3 = 0.088 3, w_4 = 0.102 2, w_5 = 0.100 2, w_6 = 0.107 5, w_7 = 0.192 2, w_8 = 0.148 7$ 。

3) 将表 2 数据运用极差法进行无量纲化和归一化处理,结果见表 3。

表 2 某煤矿 2009—2019 年内各项指标数值

Tab. 2 Each index value of a coal mine from 2009 to 2019

指标	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
$x_1$ /万元	1 530.42	1 610.96	1 770.29	3 218.70	4 951.85	6 602.47	7 767.61	6 214.09	3 403.90	3 169.55	3 328.03
$x_2$ /万元	50.01	52.64	57.85	74.17	95.09	121.91	156.30	127.05	97.80	109.70	115.19
$x_3$ /万元	660.94	695.72	764.53	745.85	783.22	708.48	857.96	558.99	260.02	311.20	326.76
$x_4$ /万元	304.17	320.18	351.85	370.37	389.86	410.38	431.98	411.41	467.51	531.26	557.82
$x_5$ /万元	1 096.53	1 154.24	1 268.40	1 441.36	1 637.91	1 861.26	2 115.07	1 823.34	2 025.93	2 127.23	2 233.59
$x_6$ /万元	84.33	86.05	86.92	93.47	100.50	108.07	116.20	105.32	100.53	108.51	113.94
$x_7$ /万元	214.16	225.43	247.73	260.77	283.44	314.94	316.84	320.04	313.76	307.61	322.91
$x_8$ /万 t	67.41	70.95	77.97	74.97	83.71	150.51	163.36	172.16	157.05	151.56	161.03

表 3 某煤矿 2009—2019 年内各项指标数值无量纲化后数值

Tab. 3 Non-dimensional values of each index value of a coal mine from 2009 to 2019

年份	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$
2009	0.000	0.0000	0.6705	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2010	0.0129	0.0247	0.7287	0.0631	0.0508	0.0540	0.0338	0.8964
2011	0.0385	0.0738	0.8437	0.1880	0.1512	0.0813	0.1008	0.6913
2012	0.2707	0.2273	0.8125	0.2610	0.3033	0.2868	0.0722	0.5714
2013	0.5486	0.4241	0.8750	0.3378	0.4761	0.5074	0.1556	0.3629
2014	0.8132	0.6765	0.7500	0.4187	0.6726	0.7449	0.7933	0.0733
2015	1.0000	1.0000	1.0000	0.5039	0.8958	1.0000	0.9160	0.0558
2016	0.7509	0.7248	0.5000	0.4228	0.6392	0.6586	1.0000	0.0264
2017	0.3004	0.4496	0.0000	0.6440	0.8174	0.5083	0.8558	0.0841
2018	0.2628	0.5616	0.0856	0.8953	0.9065	0.7587	0.8033	0.1407
2019	0.2882	0.6132	0.1116	1.0000	1.0000	0.9291	0.8937	0.0000

4) 确定指标之间的交互关系和交互度。结合表 1, 经过与相关专家反复讨论确认, 得到指标间的交互关系和交互度, 见表 4。

表 4 指标间的交互关系和交互度

Tab. 4 Interactive relationship and degree of interaction among indicators

交互指标	交互关系	交互度	交互指标	交互关系	交互度	交互指标	交互关系	交互度	交互指标	交互关系	交互度
{A,B}	互补	0.2	{B,C}	互补	0.1	{C,E}	互补	0.2	{D,H}	互补	0.4
{A,C}	互补	0.1	{B,D}	互补	0.1	{C,F}	互补	0.1	{E,F}	互补	0.1
{A,D}	互补	0.4	{B,E}	互补	0.2	{C,G}	重复	-0.4	{E,G}	重复	-0.4
{A,E}	互补	0.1	{B,F}	互补	0.1	{C,H}	互补	0.4	{E,H}	互补	0.4
{A,F}	互补	0.1	{B,G}	重复	-0.4	{D,E}	互补	0.2	{F,G}	重复	-0.4
{A,G}	重复	-0.4	{B,H}	互补	0.4	{D,F}	互补	0.1	{F,H}	互补	0.4
{A,H}	互补	0.4	{C,D}	互补	0.2	{D,G}	重复	-0.4	{G,H}	重复	-0.5

5) 将指标权重和所得交互度结合式(6)一式(8)分别计算安全工程 A、安全教育 B、安全设施 C、安全技术 D、安全管理 E、安全卫生 F、事故直接损失 G、原煤产量 H 的默比乌斯交互系数, 见表 5。

6) 由表 4 的数据和默比乌斯系数计算得到 2-可加模糊测度, 见表 6。将其代入式(9), 计算该煤矿 2009—2019 年效益的 Choquet 模糊积分值, 见表 7。

表 5 默比乌斯交互系数

Tab. 5 Mobius interaction coefficient

系数	数值	系数	数值	系数	数值	系数	数值	系数	数值
$m_A$	0.144 9	$m_{AB}$	0.003 3	$m_{BD}$	0.001 2	$m_{CG}$	-0.006 8	$m_{EH}$	0.005 9
$m_B$	0.115 3	$m_{AC}$	0.001 3	$m_{BE}$	0.002 3	$m_{CH}$	0.005 2	$m_{FG}$	-0.008 2
$m_C$	0.088 1	$m_{AD}$	0.005 9	$m_{BF}$	0.001 2	$m_{DE}$	0.002 0	$m_{FH}$	0.006 4
$m_D$	0.102 0	$m_{AE}$	0.001 5	$m_{BG}$	-0.008 9	$m_{DF}$	0.001 1	$m_{GH}$	-0.014 3
$m_E$	0.100 0	$m_{AF}$	0.001 6	$m_{BH}$	0.006 9	$m_{DG}$	-0.007 8		
$m_F$	0.107 3	$m_{AG}$	-0.011 1	$m_{CD}$	0.001 8	$m_{DH}$	0.006 1		
$m_G$	0.191 8	$m_{AH}$	0.008 6	$m_{CE}$	0.001 8	$m_{EF}$	0.001 1		
$m_H$	0.148 4	$m_{BC}$	0.001 0	$m_{CF}$	0.000 9	$m_{EG}$	-0.007 7		

表 6 2-可加模糊测度

Tab. 6 2-Additive fuzzy measures

K	$\mu(K)$	K	$\mu(K)$	K	$\mu(K)$
$\emptyset$	0.000 0	{A,H}	0.301 9	{D,H}	0.256 5
{A}	0.144 9	{B,C}	0.204 4	{E,F}	0.208 4
{B}	0.115 3	{B,D}	0.218 5	{E,G}	0.84 1
{C}	0.088 1	{B,E}	0.217 6	{E,H}	0.254 3
{D}	0.102 0	{B,F}	0.223 8	{F,G}	0.290 9
{E}	0.100 0	{B,G}	0.298 2	{F,H}	0.262 1
{F}	0.107 3	{B,H}	0.270 6	{G,H}	0.325 9
{G}	0.191 8	{C,D}	0.191 9	{A,B,C}	0.353 9
{H}	0.148 4	{C,E}	0.189 9	{A,B,C}	0.353 9
{A,B}	0.263 5	{C,F}	0.196 3	{A,B,C,D}	0.464 8
{A,C}	0.234 3	{C,G}	0.273 1	{A,B,C,D,E}	0.568 8
{A,D}	0.252 8	{C,H}	0.241 7	{A,B,C,D,E,F}	0.685 6
{A,E}	0.246 4	{D,E}	0.204 0	{A,B,C,D,E,F,G}	0.826 9
{A,F}	0.253 5	{D,F}	0.210 4	{A,B,C,D,E,E,F,G,H}	1.000 1
{A,G}	0.325 6	{D,G}	0.286 0		

表7 该煤矿 2009—2019 年的经济效益评价价值  
Tab.7 Economic benefit evaluation value of the coal mine from 2009 to 2019

年份	经济效益评价价值 $c$	排序结果
2009	0.060 6	11
2010	0.249 3	10
2011	0.270 7	9
2012	0.342 8	8
2013	0.439 9	7
2014	0.594 0	2
2015	0.758 8	1
2016	0.576 1	3
2017	0.448 2	6
2018	0.532 3	5
2019	0.574 3	4

由表7可知:2015年,该煤矿基于安全投入的经济效益情况表现最好,2014年次之。

与TOPSIS法<sup>[14]</sup>进行对比,结果见表8。

表8 Choquet 模糊积分模型与 TOPSIS 法的评价结果比较  
Tab.8 Comparison of evaluation knot between Choquet fuzzy integral model and TOPSIS method

年份	Choquet 模糊积分		TOPSIS	
	得分	排序	得分	排序
2009	0.060 6	11	0.402	8
2010	0.249 3	10	0.390	9
2011	0.270 7	9	0.360	11
2012	0.342 8	8	0.375	10
2013	0.439 9	7	0.422	7
2014	0.594 0	2	0.529	2
2015	0.758 8	1	0.604	1
2016	0.576 1	3	0.522	3
2017	0.448 2	6	0.437	6
2018	0.532 3	5	0.485	5
2019	0.574 3	4	0.498	4

从表8可以看出,该煤矿在 Choquet 模糊积分模型和 TOPSIS 法下的评价排序整体一致,但在个别年份略有不同。

1) 从得分差距的明显程度来看,Choquet 模糊积分模型下的各项得分差距相比 TOPSIS 法更明

显。而 TOPSIS 方法下的排名则差异不大。

2) 从数值上来看,相比于 TOPSIS 法,Choquet 模糊积分模型的各项名次之间的差距更加明显,即 Choquet 模糊积分模型排名区分度更高。

3) Choquet 模糊积分模型从整体、系统上进行分析。TOPSIS 法假设了理想解和负理想解是唯一的、固定的,然而,在实际决策过程中,理想解和负理想解往往不是静态的,可能发生变化;且 TOPSIS 法没有考虑到评价目标之间的相关性,而 Choquet 模糊积分模型分析并解决了指标间存在交互性和各个指标对目标的影响,因此,Choquet 模糊积分模型比 TOPSIS 法更具有可靠性。

综上所述:虽然两者的排序有些不同,但基本相同。Choquet 模糊积分模型和 TOPSIS 法的数值结果在分布特点上存在差异。TOPSIS 法没有考虑指标之间的相互影响、相互关联的情况,所以在分布特点上数值结果存在差异,而 TOPSIS 法只是简单假设指标之间是没有关联的,这夸大了重复性指标集的作用,也弱化互补性指标集的作用,从而最终评价存在差异。基于 2-可加模糊测度的 Choquet 模糊积分模型逐对分析了指标之间的交互关系和交互程度,使各指标集的重要程度更加精准,从而决策结果更加科学、合理。

## 4 结 论

1) 煤矿企业应正确理解安全投入指标,构建科学的安全投入指标体系,科学合理的安全投入才能实现企业经济效益最佳。

2) 熵权-基于 2-可加模糊测度的 Choquet 模糊积分模型可评价基于煤矿安全投入的经济效益,为企业合理安排各项安全投入和煤矿企业安全投入决策提供可靠的依据。

3) 基于考虑指标之间相互影响,目前关于煤矿安全投入经济效益量化的研究较少,随着进一步研究,可优化安全投入结构,寻找其实现经济效益最佳的方案。

## 参 考 文 献

- [1] 徐青云,赵耀江,李永明.我国煤矿事故统计分析及今后预防措施[J].煤炭工程,2015,47(3):80-82.  
XU Qingyun, ZHAO Yaojiang, LI Yongming. Statistical analysis and precautions of coal mine accidents in China[J]. Coal Engineering, 2015,47(3):80-82.
- [2] 赵宝福,张超,贾宝山,等.煤企安全投入评价的 G-IFNs-MCGDM 方法及应用[J].中国安全科学学报,2017,

- 27(2):139-144.  
ZHAO Baofu, ZHANG Chao, JIA Baoshan, et al. G-IFNs-MCGDM method for evaluating safety input in coal enterprises and its application [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(2):139-144.
- [3] 任海芝, 陈玉琴, 程恋军. 煤炭企业安全投入规模与投入结构优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(8):3-8.  
REN Haizhi, CHEN Yuqin, CHENG Lianjun. Study on optimizing both size and structure of safety investment in coal enterprises [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(8):3-8.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 陈全君. 企业安全投入及其指标体系的构建研究[J]. 中国煤炭, 2005, 31(9):77-79, 81.  
CHEN Quanjun. Research for the building of enterprise's safety input and its index system [J]. China Coal, 2005, 31(9):77-79, 81.
- [7] 李树刚, 成连平, 景兴鹏, 等. 煤矿安全投入评价指标体系构建方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(5):93-96.  
LI Shugang, CHENG Lianping, JING Xingpeng, et al. Study on construction method of evaluation index system for safety input of coal mine [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(5):93-96.
- [8] 樊占文, 张书豪, 钟基超. 安全信息在事故致因模型中的应用与研究[J]. 化工安全与环境, 2022, 35(42):6-11.
- [9] 冯银虎, 王世铎, 纪祥勋. 基于熵权-TOPSIS 模型的煤炭上市企业技术创新能力评价研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(11):43-49.  
FENG Yinhu, WANG Shiduo, JI Xiangxun. Research on evaluation of technical innovation ability of coal listed enterprises based on the entropy weight-TOPSIS model [J]. China Mining Industry, 2020, 29(11):43-49.
- [10] 张钦, 陈纬. 废旧汽车发动机再制造过程绿色经济效益评价[J]. 现代制造工程, 2021(12):132-142.  
ZHANG Qin, CHEN Wei. Evaluation of green economy performance in the remanufacturing process of used automobile engine [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(12):132-142.
- [11] 武建章, 张强. 基于 2-可加模糊测度的多准则决策方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7):1 229-1 237.  
WU Jianzhang, ZHANG Qiang. Multicriteria decision making method based on 2-order additive fuzzy measures [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(7):1 229-1 237.
- [12] 张忠, 方可, 杨明. 基于 2-可加模糊测度的仿真可信度评估方法[J]. 控制与决策, 2013, 28(1):147-151.  
ZHANG Zhong, FANG Ke, YANG Ming. Method for simulation credibility evaluation based on 2-additive fuzzy measures [J]. Control and Decision, 2013, 28(1):147-151.
- [13] 章玲, 周德群. 基于  $\kappa$ -可加模糊测度的多属性决策分析[J]. 管理科学学报, 2008, 11(6):18-24.  
ZHANG Ling, ZHOU Dequn. Multiple attributes decision making based on  $\kappa$ -additive fuzzy measures [J]. Journal of Management Science, 2008, 11(6):18-24.
- [14] 常志朋, 程龙生. 灰模糊积分关联度决策模型[J]. 中国管理科学, 2015, 23(11):105-111.  
CHANG Zhipeng, CHENG Longsheng. Grey fuzzy integral correlation degree decision model [J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(11):105-111.
- [15] 叶文涛, 成连华. 高质量发展下煤矿企业安全投入产出效率评价[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(4):700-707.  
YE Wentao, CHENG Lianhua. Safety input-output efficiency evaluation of coal mining enterprises under high quality development [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(4):700-707.

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。