

# 基于组合赋权法的疫苗供应链流程风险评估<sup>△</sup>

杨满意\*,牛莉霞<sup>#</sup>(辽宁工程技术大学工商管理学院,辽宁葫芦岛 125105)

中图分类号 R954;F272.3 文献标志码 A 文章编号 1001-0408(2022)13-1548-06

DOI 10.6039/j.issn.1001-0408.2022.13.03



**摘要** 目的 识别和评估疫苗供应链运作流程中的风险因素,明确各流程风险在疫苗供应链整体风险中的重要程度,为疫苗供应链中利益相关方制定风险管控策略提供参考。方法 通过供应链运作参考模型识别疫苗供应链运作过程中存在的风险因素,构建疫苗供应链风险评价指标体系。运用最优最劣法、熵权法确定指标的主观和客观权重,并利用Lagrange乘子法求解出指标的最优组合权重。结果与结论 建立了含18个指标的疫苗供应链风险评价指标体系,仅用67%的指标反映了85%的疫苗供应链风险信息量,该体系的构建具有合理性。生产流程风险组合权重为0.607,在疫苗供应链整体风险中所占权重最高,其余依次为采购(0.234)、配送(0.102)、计划(0.053)、退货(0.004)流程风险。在对风险进行管控时,企业应高度重视疫苗生产环节的风险因素;同时,也应重点关注产品用物料不合格、物料混淆使用等其他风险。

**关键词** 疫苗;供应链;最优最劣法;熵权法;组合赋权法;风险评估

## Process risk assessment of vaccine supply chain based on combination weighting method

YANG Manyi, NIU Lixia (School of Business Administration, Liaoning Technical University, Liaoning Huludao 125105, China)

**ABSTRACT** **OBJECTIVE** To identify and evaluate the risk factors in the operation process of the vaccine supply chain, clarify the importance of each process risk in the overall risk of the vaccine supply chain, and provide reference for stakeholders in the vaccine supply chain to formulate risk management and control strategies. **METHODS** In the supply chain operation reference model, the risk factors existing in the operation of vaccine supply chain were identified, and the vaccine supply chain risk evaluation index system was constructed. The best-worst method and entropy weight method were used to determine the subjective and objective weight of the index, and the Lagrange multiplier method was used to solve the optimal combination weight value of the index. **RESULTS & CONCLUSIONS** A vaccine supply chain risk evaluation index system with 18 indexes was established. Only 67% of the indexes reflected 85% of the vaccine supply chain risk information. The construction of the system was reasonable. The results showed that the risk weight of production process was 0.607, which accounts for the highest weight in the overall risk of vaccine supply chain, followed by procurement (0.234), distribution (0.102), planning (0.053) and return (0.004) process risk. When managing and controlling risks, enterprises should attach great importance to the risk factors in vaccine production; at the same time, enterprises should also focus on other risks such as unqualified materials for products, mixed use of materials and so on.

**KEYWORDS** vaccine; supply chain; best-worst method; entropy weight method; combination weighting method; risk assessment

现阶段,全球疫苗需求数量庞大,这不仅给疫苗生产带来了巨大压力,也使冷链运输面临巨大挑战。与其他供应链相比,疫苗供应链具有质量要求高、时效性强、损失代价大的特性。相关研究表明,运输是疫苗冷链中最薄弱的环节,容易发生疫苗超温等风险<sup>[1]</sup>。2016年“山东疫苗事件”中,涉案疫苗未经严格冷链运输存储,导致疫苗超温,在全国范围内引起了群众的疫苗恐慌情绪。数据显示,“山东疫苗事件”后,家长拒绝让儿童接种疫苗的比例高达50%<sup>[2]</sup>。疫苗供应链风险一旦发生,极易

造成疫苗供应不及时、疫苗疗效减弱甚至失效等后果,危及群众的生命安全。因此,对疫苗供应链运作流程中的风险因素进行识别和评估,明确各流程风险对疫苗供应链整体风险的重要程度,有助于疫苗供应链中的利益相关主体分级分层制定风险治理策略,做到重点、精准管控。

目前,国内外学者关于疫苗风险评估的研究主要聚焦于2个方面:一是疫苗药品生产或运输环节的风险评估,常用方法包括失效模式及后果分析(failure mode and effect analysis)、故障树分析(fault tree analysis)等;二是疫苗供应链风险的评估,常用方法包括以决策实验室法为基础的网络层次分析法(decision-making-trial and evaluation-laboratory-based analytic network process)、模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process)

<sup>△</sup> 基金项目 国家自然科学基金资助项目(No.52174184, No.51504126);辽宁省社会科学规划基金资助项目(No.L20BGL030)

\* 第一作者 硕士研究生。研究方向:疫苗供应链风险管理。E-mail:2585510677@qq.com

<sup>#</sup> 通信作者 副教授,博士生导师,博士。研究方向:人因工程、风险管理等。E-mail:327334231@qq.com

等。但通过综述现有研究发现,在对疫苗供应链风险进行评估时,基于供应链全过程视角的研究相对较少。即使基于供应链全过程,风险评估时所用数据也主要依赖于专家打分结果,并未与客观数据相结合。因此,将主客观方法进行组合运用到疫苗供应链风险评估中仍待进一步开展。李刚等<sup>[9]</sup>结合案例证明了主客观组合赋权法的可行性。与单一赋权法相比,组合赋权法有效避免了单独使用某一种赋权方法的缺点,并且能够充分利用专家的经验 and 数据本身的信息,使得赋权结果更加客观<sup>[4]</sup>。因此,本文采用最优最劣法(best-worst method, BWM)确定指标主观权重,采用熵权法确定指标客观权重,并运用Lagrange乘子法求解出指标的最优组合权重,以得到更加客观的评估结果,为疫苗供应链中利益相关方制定风险管控策略提供参考。

## 1 疫苗供应链风险因素初始集的构建

### 1.1 风险评价指标体系构建原理

结合供应链的定义<sup>[5]</sup>,本文将疫苗供应链定义为:围绕疫苗这一核心产品,从疫苗用物料采购开始,由疫苗生产企业制造出成品,经配送网络运至疫苗接种点,最终完成人员接种,将疫苗用物料供应商、疫苗生产企业、各级疾控中心和防疫部门、被接种人员连接为一体的功能型网络。从定义来看,疫苗供应链的结构模式非常清晰——以疫苗生产企业为核心,上一级为疫苗用物料供应商,下一级为各级疾控中心和防疫部门,物流运输通常为企业自营物流或第三方物流企业。但与其他供应链相比,疫苗供应链具有其特殊性,主要表现在产品特性、时效性及损失代价等方面。也正是由于疫苗供应链自身特殊性的存在,使得风险损失和风险管控难度大大增加。

风险评价指标体系的最终构建需经过多个步骤,如风险因素初始集的确立、灰色关联分析的筛选、秩相关分析的筛选、指标体系合理性检验等。风险因素初始集作为风险评价指标体系整个构建过程的基础,其确立尤为重要。而依据上述疫苗供应链的定义,本文选取由国际供应链协会(Supply Chain Council)提出的供应链运作参考(supply chain operations reference, SCOR)模型作为风险诊断工具<sup>[6]</sup>,同时也将其作为风险评价指标体系构建的理论基础。SCOR模型不仅能清晰地将疫苗供应链结构组成描述出来,还能系统地识别出疫苗供应链中的潜在风险因素。此外,为使结果更加全面,在对疫苗生产企业的生产流程风险进行识别时,本文引入全面质量管理理论,从“人、机、料、法、环”,即疫苗生产人员、设备、原料、方法、环境5个角度确定生产流程中的风险因素。

### 1.2 风险因素初始集确立

为有效避免风险因素的确立受到主观随意性的影

响,本文在风险因素初始集确立时,遵循科学性、显著性、可操作性等原则<sup>[7]</sup>,围绕疫苗供应链内部运作流程,从计划、采购、生产、配送及退货流程角度出发,将SCOR模型中所包含的具体活动与疫苗生产企业自身特点相结合<sup>[8]</sup>,并参考国内外文献中出现频率较高的疫苗风险因素<sup>[9-13]</sup>,科学、合理地分析疫苗供应链中存在的风险,从而构建出如表1所示的疫苗供应链风险因素初始集。

表1 疫苗供应链风险因素初始集一级、二级指标

一级指标	二级指标
计划流程风险	供需预测准确率
	供应链结构设计合理性
	产品衰退期管理水平
采购流程风险	风险意识水平
	采购价格水平
	供应商选择能力
	质量稳定性
	供应准时性
	原料核准水平
生产流程风险	交付完好度
	仓储管理水平
	产品微粒和微生物污染
	生产操作规范性
	交叉感染
	设备使用规范性
	产品用物料不合格
	物料混淆使用
	流程方法准确性
	变更研究充分性
配送流程风险	产品环境污染
	消毒方式及频率
	产成品管控水平
	配送方式决策
	设备运行状况
退货流程风险	人力资源水平
	产品质量
	疫苗配送满意度

## 2 风险评价指标筛选与体系构建

### 2.1 指标筛选

以问卷调查的形式邀请5位疫苗供应链领域的专家,从“系统性、科学性、可操作性、显著性、简明性”5个维度对本文构建的风险因素初始集进行打分,各维度满分为20分,最终以专家对各维度打分之和作为初始数据结果。结合初始数据,按照图1所示的构建思路对表1中的指标进行筛选。将灰色关联分析与秩相关分析2种方法相结合对风险指标体系进行定量筛选,既能精简风险指标的数量,又能保证筛选出的指标间不存在信息重复和最大程度替代初始集指标的信息含量,使得指标筛选结果更具合理性、科学性与客观性<sup>[14]</sup>。

2.1.1 灰色关联分析筛选指标 采用极差法对初始数据进行标准化,根据标准化数据计算比较序列与母序列的绝对差值。从计算出的绝对差值中找出两级最大差和两级最小差,并运用关联系数求解公式计算出关联系数 $\zeta(k)$ ,最后计算出关联度。在对风险因素初始集进行

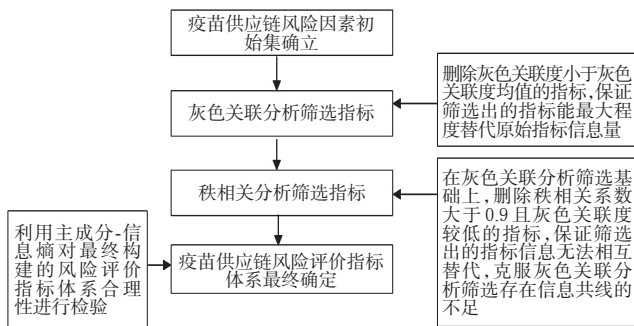


图1 疫苗供应链风险评价指标体系构建思路

第1次筛选时,将界定阈值设定为各指标的灰色关联度均值,并据此进行筛选。剔除小于均值的指标,反之则保留。具体计算结果见表2,其中将原料核准水平、仓储管理水平、交叉感染、流程方法准确性、变更研究充分性、消毒方式及频率、产成品管控水平7个指标删除。

表2 灰色关联度计算结果

指标	灰色关联度 <sup>a</sup>	关联度排序
产品用物料不合格	0.809 5	1
交付完好度	0.790 3	2
风险意识水平	0.749 9	3
供需预测准确率	0.693 8	4
采购价格水平	0.680 0	5
产品质量	0.676 2	6
配送方式决策	0.658 4	7
生产操作规范性	0.656 4	8
设备使用规范性	0.654 0	9
供应商选择能力	0.650 8	10
产品衰退期管理水平	0.650 4	11
供应准时性	0.648 9	12
疫苗配送满意度	0.647 5	13
设备运行状况	0.643 4	14
产品微粒和微生物污染	0.636 7	15
产品环境污染	0.631 0	16
人力资源水平	0.628 3	17
物料混淆使用	0.626 7	18
供应链结构设计合理性	0.624 0	19
质量稳定性	0.624 0	20
交叉感染	0.476 3	21
消毒方式及频率	0.475 4	22
流程方法准确性	0.473 0	23
变更研究充分性	0.472 9	24
仓储管理水平	0.471 5	25
原料核准水平	0.469 9	26
产成品管控水平	0.466 7	27

a: 灰色关联度均值为0.618 0

2.1.2 秩相关分析筛选指标 经过第1轮灰色关联分析筛选后,对得以保留的20个指标的数据使用SPSS 26软件处理,得到各指标间的Spearman相关系数。依据秩相关分析筛选原则,将疫苗供应链风险指标之间相关系数大于0.9的指标挑选出来,用字母*i*和*j*对存在信息共线的指标进行编号,并删除灰色关联度较低的指标。根据第2次秩相关分析的计算结果如表3所示,其中将产品

微粒和微生物污染、设备使用规范性2个指标删除,保留产品环境污染与生产操作规范性指标。

表3 秩相关分析结果

序号	系数大于0.9的指标评价对数		秩相关系数	删除指标
	相关指标 <i>i</i>	相关指标 <i>j</i>		
1	产品微粒和微生物污染	产品环境污染	0.975	产品微粒和微生物污染
2	设备使用规范性	生产操作规范性	1.000	设备使用规范性

2.1.3 风险评价指标体系合理性判定 基于主成分-信息熵的方法<sup>[15]</sup>,运用信息贡献测算模型对表2和风险因素初始集中指标的标准化数据进行处理,计算得到最终构建的疫苗供应链风险评价指标体系与风险因素初始集的信息贡献比值为85%,大于合理性判定标准的临界值80%,且仅用了67%的指标反映了85%的疫苗供应链风险信息量,表明最终构建的疫苗供应链风险评价指标体系具有合理性。

## 2.2 风险评价指标体系的最终确定

运用灰色关联分析和秩相关分析2种方法对风险因素初始集进行双重筛选,将无法高度替代原始信息量及存在信息共线的指标予以删除,从而确立最终的疫苗供应链风险评价指标体系,详见表4。

表4 疫苗供应链风险评价指标体系一级、二级指标

一级指标	二级指标
计划流程风险	供需预测准确率
	供应链结构设计合理性
	产品衰退期管理水平
	风险意识水平
采购流程风险	采购价格水平
	供应商选择能力
	质量稳定性
生产流程风险	供应准时性
	交付完好度
	生产操作规范性
	产品用物料不合格
配送流程风险	物料混淆使用
	产品环境污染
	配送方式决策
退货流程风险	设备运行状况
	人力资源水平
	产品质量
	疫苗配送满意度

## 3 疫苗供应链风险评价指标权重确定

风险评价指标体系构建完成后,需确定各风险指标的权重。在多准则决策问题中,指标权重的确定直接影响评价指数的准确程度。评估结果的合理性也取决于权重设置是否具有科学性。因此,选择科学合理的赋权方法对于指标权重的确定至关重要。主观和客观赋权法作为目前常用的指标权重确定方法,各有其弊端。使用主观赋权法时决策主观随意性大,容易造成评估结果不稳定;而客观赋权法又不能直接反映指标本身的重要性。

为有效克服单一使用主客观赋权法的弊端,本文在对所构建的疫苗供应链风险评价指标权重进行确定时,采用主客观组合赋权的方式。选取BWM和熵权法作为指标赋权的主观和客观方法。此外,为使最终评估结果更客观,更好地为决策提供参考,本文采用Lagrange乘子法进行组合赋权,求解出最优组合权重,得到疫苗供应量风险评价指标的评估结果。

### 3.1 BWM确定指标权重

BWM是由Rezaei<sup>[16]</sup>于2015年提出的一种新的多准则决策方法。该方法基于指标两两比较的思想,先由决策者从评价指标中集中选取最优、最劣指标,再与其他指标比较,从而构造出最优和最劣指标的比较向量<sup>[17]</sup>。相较于传统的层次分析法,BWM只需进行(2n-3)次比较,降低了比较次数,简化了复杂的比较过程,能够有效降低因评价过程繁琐带来的逻辑混乱和失误风险,有助于提高一致性检验通过效率,使赋权结果更为可靠。

BWM确定指标权重具体步骤如下:

- (1)确定评价指标集  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。
- (2)确定最优和最劣指标,分别用  $C_B$ 、 $C_W$  表示。
- (3)将  $C_B$  与其他指标两两比较,构建比较向量  $A_B = (\alpha_{B1}, \alpha_{B2}, \dots, \alpha_{Bj})$ 。
- (4)将其他指标与  $C_W$  两两比较,构建比较向量  $A_W = (\alpha_{1W}, \alpha_{2W}, \dots, \alpha_{jW})^T$ 。
- (5)得到最优权重值。构造非线性规划模型,求出指标最优权重  $\omega_j^* = (\omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_n^*)$  和最优目标值  $\zeta^*$ 。

需要特别说明的是,对指标进行两两比较时,用数字1~9来表示指标间的相对重要程度。其中  $A_B$  中每个数值表示的是最优指标与其他指标比较时的偏好值,而  $A_W$  中每个数值表示的是其他指标与最劣指标比较时的偏好值。

根据下列公式求得指标最优权重  $\omega_j^*$  及最优目标值  $\zeta^*$ :

$$\text{Min } \zeta \text{ s. t. } \begin{cases} \left| \frac{\omega_B}{\omega_j} - \alpha_{Bj} \right| \leq \zeta, \\ \left| \frac{\omega_j}{\omega_W} - \alpha_{jW} \right| \leq \zeta, \\ \sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \\ \omega_j \geq 0, j = 1, 2, 3, 4, 5, \dots \end{cases}$$

其中,  $\omega_B$  为  $C_B$  的权重;  $\alpha_j$  为准则向量,  $\omega_j$  为  $\alpha_j$  的权重,即指标实际权重;  $\omega_W$  为  $C_W$  的权重。

得到  $\omega_j^*$  和  $\zeta^*$  值后,再判断比较向量的一致性。可通过公式  $CR = \frac{\zeta^*}{CI}$  计算出一致性比率,其中一致性指标  $CI$

取值为:当  $\alpha_{BW} = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$  时,  $CI$  值分别为 0.00, 0.44, 1.00, 1.63, 2.30,  $\dots$ 。当  $CR$  小于 0.10 时,表明一致性检验通过;反之则未通过。

### 3.2 熵权法确定指标权重

判断一个指标的离散程度通常使用熵值。指标的重要程度和离散程度与熵值大小成反比。熵值越小,指标的重要程度和离散程度就越高;如果指标熵值相等,则说明指标的重要性相同<sup>[17]</sup>。因此,在确定指标权重时,熵权法被广泛采用,为多准则评价提供了依据。

熵权法确定指标权重步骤如下:

- (1)假设有  $m$  个分析对象,  $n$  个指标,初始决策矩阵为  $X = (x_{ij})_{m \times n}$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

式中  $x_{ij}$  为第  $i$  个分析对象的第  $j$  个指标的原始数据值。

- (2)对数据进行无量纲化时运用极值处理法<sup>[18]</sup>:

正向指标标准化处理:

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \dots \dots \dots \text{式(2)}$$

负向指标标准化处理:

$$b_{ij} = \frac{\max(x_i) - x_{ij}}{\max(x_i) - \min(x_i)} \dots \dots \dots \text{式(3)}$$

- (3)计算第  $j$  项指标下第  $i$  个方法所占的比重:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \dots \dots \dots \text{式(4)}$$

- (4)第  $j$  个指标的熵值:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \dots \dots \dots \text{式(5)}$$

- (5)求解指标  $j$  的熵权  $\omega_j$ :

$$\omega_j^s = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{i=1}^m e_j}, j = 1, 2, \dots, m \dots \dots \dots \text{式(6)}$$

### 3.3 Lagrange乘子法求解最优组合权重

运用Lagrange乘子法对最优组合权重进行求解,方法如下<sup>[19]</sup>:

根据最小鉴别信息原理,可使  $\omega_j$  与  $\omega_j^*$ 、 $\omega_j^s$  相接近,需建立下列函数:

$$\min F = \sum_{j=1}^n \omega_j (\ln \frac{\omega_j}{\omega_j^*}) + \sum_{j=1}^n \omega_j (\ln \frac{\omega_j}{\omega_j^s}) \dots \dots \dots \text{式(7)}$$

其中  $\omega_j (j = 1, 2, \dots, m)$  表示最优组合权重。

通过Lagrange乘子法求解,得到最优组合权重:

$$\omega_j = \frac{\omega_j^* \omega_j^s}{\sum_{j=1}^n \omega_j^* \omega_j^s} \dots\dots\dots \text{式(8)}$$

#### 4 算例分析

依据上述疫苗供应链风险评价指标权重确定过程, 本文以国内5家生产相同疫苗产品的企业数据为初始样本(其中难以获取的初始数据,以问卷调查形式邀请供应链领域的专家打分),并运用式(1)~(3)对原始数据进行标准化处理,得到疫苗供应链风险评估评价矩阵  $p$ :

$$p = \begin{bmatrix} 0.263 & 0.097 & 0.136 & 0.187 & 0.199 \\ 0.202 & 0.199 & 0.176 & 0.183 & 0.184 \\ 0.214 & 0.169 & 0.199 & 0.204 & 0.185 \\ 0.217 & 0.226 & 0.190 & 0.168 & 0.120 \\ 0.206 & 0.186 & 0.192 & 0.150 & 0.174 \\ 0.196 & 0.186 & 0.177 & 0.200 & 0.186 \\ 0.185 & 0.165 & 0.146 & 0.156 & 0.105 \\ 0.214 & 0.127 & 0.198 & 0.114 & 0.177 \\ 0.199 & 0.204 & 0.131 & 0.143 & 0.168 \\ 0.166 & 0.154 & 0.164 & 0.183 & 0.180 \\ 0.170 & 0.099 & 0.185 & 0.124 & 0.150 \\ 0.177 & 0.127 & 0.107 & 0.153 & 0.183 \\ 0.194 & 0.114 & 0.146 & 0.145 & 0.188 \\ 0.214 & 0.194 & 0.187 & 0.177 & 0.187 \\ 0.162 & 0.186 & 0.156 & 0.147 & 0.188 \\ 0.184 & 0.168 & 0.165 & 0.182 & 0.175 \\ 0.196 & 0.186 & 0.190 & 0.199 & 0.207 \\ 0.194 & 0.198 & 0.207 & 0.179 & 0.212 \end{bmatrix}^T$$

运用式(4)、(5)对各级指标熵值进行求解,结果见表5。再依据式(6)求解出各级指标权重,结果见表6第③、④列。

表5 指标熵值及重要性排序

一级指标	二级指标	二级指标熵值	二级指标重要性排序	一级指标熵值	一级指标重要性排序
计划流程风险	供需预测准确率	0.921	1	0.960	4
	供应链结构设计合理性	0.977	3		
	产品衰退期管理水平	0.986	4		
	风险意识水平	0.955	2		
采购流程风险	采购价格水平	0.960	4	0.931	2
	供应商选择能力	0.977	5		
	质量稳定性	0.880	1		
	供应准时性	0.911	2		
生产流程风险	交付完好度	0.926	3	0.890	1
	生产操作规范性	0.933	4		
	产品用物料不合格	0.861	1		
	物料混用使用	0.873	2		
配送流程风险	产品环境污染	0.895	3	0.952	3
	配送方式决策	0.982	3		
	设备运行状况	0.928	1		
	人力资源水平	0.947	2		
退货流程风险	产品质量	0.991	1	0.993	5
	疫苗配送满意度	0.995	2		

表6 熵权法、BWM和组合赋权法下各级指标权重

一级指标①	二级指标②	熵权法二级指标权重③	熵权法一级指标权重④	BWM二级指标权重⑤	BWM一级指标权重⑥	二级指标组合权重⑦	一级指标组合权重⑧
计划流程风险	供需预测准确率	0.492	0.146	0.489	0.103	0.689	0.053
	供应链结构设计合理性	0.142		0.170		0.069	
	产品衰退期管理水平	0.085		0.059		0.014	
	风险意识水平	0.281		0.281		0.227	
采购流程风险	采购价格水平	0.116	0.253	0.121	0.260	0.053	0.234
	供应商选择能力	0.065		0.046		0.011	
	质量稳定性	0.346		0.435		0.573	
	供应准时性	0.257		0.231		0.226	
生产流程风险	交付完好度	0.215		0.167		0.136	
	生产操作规范性	0.152	0.400	0.067	0.427	0.036	0.607
	产品用物料不合格	0.318		0.487		0.543	
	物料混用使用	0.290		0.266		0.270	
配送流程风险	产品环境污染	0.240		0.180		0.152	
	配送方式决策	0.124	0.175	0.063	0.164	0.018	0.102
	设备运行状况	0.505		0.584		0.680	
	人力资源水平	0.372		0.353		0.302	
退货流程风险	产品质量	0.641	0.026	0.667	0.046	0.781	0.004
	疫苗配送满意度	0.359		0.333		0.219	

利用熵权法求出各一级指标和二级指标的熵值,并依据计算结果,进行指标的重要性排序,从而选出最优和最劣指标。以一级指标为例,选取生产流程风险为最优指标,退货流程风险为最劣指标,并将生产流程风险和其他指标,以及其他指标与退货流程风险进行两两比较,得到最优和最劣比较向量,分别为  $A_3=(4,2,1,3,9)$  和  $A_5=(3,6,9,4,1)^T$ 。

根据上述公式得到如下计算过程:

$$\text{Min} \zeta \text{ s. t. } \begin{cases} \left| \frac{\omega_3}{\omega_1} - 4 \right| \leq \zeta, \left| \frac{\omega_3}{\omega_2} - 2 \right| \leq \zeta, \\ \left| \frac{\omega_3}{\omega_4} - 3 \right| \leq \zeta, \left| \frac{\omega_3}{\omega_5} - 9 \right| \leq \zeta, \\ \left| \frac{\omega_1}{\omega_5} - 3 \right| \leq \zeta, \left| \frac{\omega_2}{\omega_5} - 6 \right| \leq \zeta, \\ \left| \frac{\omega_4}{\omega_5} - 4 \right| \leq \zeta, \\ \sum_{j=1}^5 \omega_j = 1, \\ \omega_j \geq 0, j=1,2,3,4,5 \end{cases}$$

通过MATLAB软件求解一级指标权重如表6第⑥列所示。其中  $\zeta=0.394$ ,求得CR值为0.08,小于0.1,表明通过一致性检验。同理,运用BWM确定各二级指标的权重,并将计算结果汇总,见表6第⑤、⑥列。同时,根据  $\zeta$  值对CR求解,结果显示CR值均小于0.1,表明各判断矩阵均通过了一致性检验。

根据上述BWM和熵权法指标赋权结果,利用Lagrange乘法子法进行组合赋权,得到最优组合权重,结果见表6第⑦、⑧列。

评估结果显示,生产流程风险组合权重为0.607,在疫苗供应链整体风险中所占权重最高,其余依次为采购(0.234)、配送(0.102)、计划(0.053)、退货(0.004)流程风险。这表明在各流程风险中,生产流程风险与疫苗供应链的整体风险关联性最大,重要程度最高,该流程风险的管控对整个疫苗供应链的有效运行影响最大。因此,在对风险进行管控时,企业应高度重视疫苗生产环节的风险因素。而其他流程风险,虽然权重占比较低,但仍不可忽视。此外,还应对各流程中具体的风险因素进行治理,重点关注权重排名前2位的风险因素,如产品用物料不合格、物料混淆使用、质量稳定性、供应准时性、设备运行状况、人力资源水平、供需预测准确率、风险意识水平、产品质量等。将有限的资源与精力投入到最重要、最亟待解决的风险问题中,这也是对疫苗供应链风险进行评估的目的和价值所在。

## 5 结论

本文基于SCOR模型和全面质量管理理论,对疫苗供应链流程运行中的风险进行了分析,识别出27个风险因素。采用灰色关联分析和秩相关分析2种方法对风险因素初始集进行筛选,共删除9个指标,得到筛选后的疫苗供应链风险评价指标体系。运用主成分-信息熵方法对所构建的风险指标评价体系合理性进行检验,结果显示仅用67%的指标反映了85%的疫苗供应链风险信息量,表明疫苗供应链风险指标体系的构建具有合理性。相较于现有研究,本文采用定性与定量相结合的方法,克服了仅运用定性方法而导致的指标间信息重复或冗余的问题。

同时,本研究基于BWM-熵权法-Lagrange乘子法模型对疫苗供应链风险进行评估,结果显示生产流程风险组合权重为0.607,在疫苗供应链整体风险中所占权重最高,其余依次为采购、配送、计划、退货流程风险。依据风险评估结果,可更好地指导疫苗供应链风险治理对策的制定与实施。但本文主要集中于疫苗供应链流程风险评估,并未对流程风险的相关治理进行充分研究,存在一定的局限性。在今后的研究中,可根据本文相关结论,对疫苗供应链风险治理对策做进一步探讨,以建立一条安全的疫苗供应链。

## 参考文献

[1] 徐应颖,刘琼,张明胜,等.我国疫苗冷链管理现状及发展展望[J].中国现代应用药学,2020,37(5):636-640.  
[2] 国家卫生健康委员会.关于“免疫规划40周年”有关问题的回应[EB/OL].(2018-07-13)[2022-05-21]. <http://www.nhc.gov.cn/wjw/hyggq/201807/d0bdd9166876482fafd446-25eef5615e.shtml>.

[3] 李刚,李建平,孙晓蕾,等.主客观权重的组合方式及其合理性研究[J].管理评论,2017,29(12):17-26,61.  
[4] 黄鑫沛,宋斐,樊林玉,等.基于组合赋权法的海外基建环境综合评估研究[J].工业工程与管理,2021,26(3):24-31.  
[5] 宋华,于亢亢.物流与供应链管理[M].3版.北京:中国人民大学出版社,2017:17-26.  
[6] 马向国,阿明·施瓦金.基于SCOR模型的跨国制造企业供应链风险识别[J].供应链管理,2020,1(11):69-78.  
[7] 岳悦.冷链供应链风险管理相关问题研究[D].大连:大连交通大学,2014.  
[8] 马晓慧.基于SCOR模型的BC公司供应链优化研究[D].南京:东南大学,2018.  
[9] 宋敏,黄泰康.疫苗生产中的风险监管策略研究[J].中国药房,2013,24(5):385-387.  
[10] 郭莹,罗静,范宇,等.基于产品生命周期的疫苗质量风险管理研究[J].中国药事,2019,33(12):1406-1410.  
[11] 马康婧.基于SCOR模型的制造企业供应链合作伙伴风险评价研究及应用[D].重庆:重庆大学,2019.  
[12] MOKTADIR M A, ALI S M, MANGLA S K, et al. Decision modeling of risks in pharmaceutical supply chains[J]. Ind Manag Data Syst, 2018, 118(7):1388-1412.  
[13] VISHWAKARMA V, PRAKASH C, BARUA M K. A fuzzy-based multi criteria decision making approach for supply chain risk assessment in Indian pharmaceutical industry[J]. Int J Logist Syst Manag, 2016, 25(2):245.  
[14] 石震,李战江,刘丹.基于灰关联-秩相关的绿色经济评价指标体系构建[J].统计与决策,2018,34(11):28-32.  
[15] 迟国泰,李战江.基于主成分-熵的评价指标体系信息贡献模型[J].科研管理,2014,35(12):137-144.  
[16] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method [J]. Omega, 2015, 53:49-57.  
[17] 曹一哲,杨玉中.基于熵值修正BWM的煤炭企业绿色供应商选择评价模型及应用[J].河南理工大学学报(社会科学版),2020,21(4):34-40.  
[18] 朱喜安,魏国栋.熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J].统计与决策,2015(2):12-15.  
[19] 艾欣,秦珺晗,胡寰宇,等.基于最优最劣法-熵权-逼近理想解排序法的电网安全与效益综合评价[J].现代电力,2021,38(1):60-68.

(收稿日期:2022-02-22 修回日期:2022-05-05)

(编辑:刘明伟)