

文章编号:1671-1637(2020)03-0129-10

# 重大疫情下铁路应急救援能力评估指标体系构建

陈钉均<sup>1,2,3</sup>, 孙运豪<sup>1</sup>, 李俊捷<sup>1</sup>, 倪少权<sup>1,2,3</sup>

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 综合  
交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031; 3. 西南交通大学  
综合交通大数据应用技术国家工程实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:**从铁路应急准备能力、铁路应急响应能力及铁路应急恢复能力3个方面,构建了重大疫情下铁路应急救援能力预选评估指标;为提高指标的科学性、可行性、独立性和可靠性,应用传递闭包法对指标进行筛选,构建了3个一级指标、15个二级指标、49个三级指标作为重大疫情下铁路应急救援能力评估指标体系,并通过基于三角模糊数的层次分析法计算体系内各指标权重。分析结果表明:一级指标中铁路应急准备能力、铁路应急响应能力、铁路应急恢复能力权重分别为0.26、0.53、0.21,铁路应急响应能力权重最大;在疫情期间应着重保障医护人员和物资的输送,采取有效措施防止疫情进一步扩散;铁路应急准备能力下属二级指标中,应急物资指标权重最大,为0.29,在准备阶段应防微杜渐,做好应急物资储备工作,提高应急物资经费占比,明确各应急机构权责,及时完善更新应急预案;运营恢复权重为0.47,在铁路应急恢复能力下属的二级指标中占比最大,在恢复阶段应着重提高运营列车数,及时公开运营列车信息,开行复工专列。该体系为提升重大疫情下铁路应急救援能力提供科学有效的参考。

**关键词:**铁路运输;重大疫情;应急救援;传递闭包法;评估指标体系

**中图分类号:**U298 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2020.03.012

## Construction of evaluation index system for emergency rescue capacity of rail transit under serious epidemic situation

CHEN Ding-jun<sup>1,2,3</sup>, SUN Yun-hao<sup>1</sup>, LI Jun-jie<sup>1</sup>, NI Shao-quan<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;  
2. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong  
University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 3. National Engineering Laboratory of Integrated  
Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University,  
Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** The pre-selection evaluation indicators of railway emergency rescue capability under serious epidemic situation were constructed from three aspects, including railway emergency preparation capability, railway emergency response capability and railway emergency recovery capability. In order to improve the scientificity, feasibility, independence and reliability of the indicators, the transitive closure method was used to select the indicators. The evaluation

收稿日期:2020-03-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0802208);国家自然科学基金项目(61703351);中国铁路总公司科技研究开发计划项目(K2018X012);成都市科技项目(2019-RK00-00019-ZF)

作者简介:陈钉均(1982-),男,四川南充人,西南交通大学副教授,工学博士,从事交通运输规划与管理研究。

通讯作者:倪少权(1967-),男,湖北汉川人,西南交通大学教授,工学博士。

引用格式:陈钉均,孙运豪,李俊捷,等. 重大疫情下铁路应急救援能力评估指标体系构建[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 129-138.

Citation: CHEN Ding-jun, SUN Yun-hao, LI Jun-jie, et al. Construction of evaluation index system for emergency rescue capacity of rail transit under serious epidemic situation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 129-138.

indicator system of railway emergency rescue capability under serious epidemic situation was established, including 3 first level indicators, 15 second level indicators and 49 third level indicators, and the indicator weights were calculated by analytic hierarchy process based on triangular fuzzy number. Analysis result shows that, in the first level indicators, the weights of railway emergency preparation capability, railway emergency response capability and railway emergency recovery capability are 0.26, 0.53 and 0.21, respectively, and the weight of railway emergency response capacity is the largest. During the epidemic period, the transportation of medical staff and materials should be guaranteed, and the effective measures are taken to prevent the further spread of the epidemic. Among the second level indicators of the railway emergency preparation capability, the weight of emergency materials indicator is the largest with the value of 0.29. In the preparation stage, it is necessary to prevent the situation from getting worse, do a good job in emergency materials storage, increase the proportion of emergency materials funds, clarify the right and responsibility of each emergency organization, and timely improve and update the emergency plan. The weight of operation recovery is 0.47, which accounts for the largest proportion in the second level indicators under the railway emergency recovery capacity. In the recovery stage, the number of operating trains should be increased, the information of operating trains should be open timely, and the resumption special train should be set up. The system provides a scientific and effective reference for improving the railway's emergency rescue capability under serious epidemic situations. 12 tabs, 2 figs, 30 refs.

**Key words:** railway transportation; serious epidemic; emergency rescue; transitive closure method; evaluation indicator system

**Author resumes:** CHEN Ding-jun(1982-), male, associated professor, PhD, chen-dingjun@163.com; NI Shao-quan(1967-), male, professor, PhD, shaoquanni@163.com.

**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China (2016YFC0802208); National Natural Science Foundation of China (61703351); Science and Technology Plan Research and Development Project of China Railway Corporation (K2018X012); Chengdu Science and Technology Project(2019-RK00-00019-ZF).

## 0 引 言

为打赢新冠肺炎疫情防控阻击战,铁路部门先后 5 次出台免费退票措施,在降低返程运输疫情传播风险的同时,为满足企业复工的需要,开设定制务工人员返程专列;铁路作为中国国民经济的命脉和交通运输的骨干网络,在这次新型冠状病毒肺炎重大疫情的应急救援工作中扮演了重要的角色。

对于应急管理的研究,美国和日本起步较早,且构建了较为完善的应急管理体系。美国联邦应急管理署于 1997 年构建出一套针对各地政府的应急准备能力评估系统,并于 2000 年对该系统进行了完善,形成了评估应急能力的三级指标体系。日本应急管理体系着重于防灾信息系统的建设与防灾教育,于 2002 年制定出地方防灾救援能力评估体系。尽管近年来中国应急管理工作进展迅速,但对于重大疫情下应急能力评估的研究较少,中国学者大多是

针对生产事故和自然灾害进行研究,马茂冬等<sup>[1]</sup>提出了建立应急能力评估体系的总体思路,基于模糊层次分析法对危险行业应急能力进行评估;胡月亭等<sup>[2]</sup>采用可拓评价对石油化工企业应急能力进行评估;伍蒙蒙<sup>[3]</sup>基于熵权法评估了储罐区应急救援能力;赵琳<sup>[4]</sup>运用德尔菲法确立了城市气象灾害应急救援评价指标体系;曲国胜<sup>[5]</sup>以地震救援为例,提出了应急准备能力评估框架。铁路具有运力大、速度快、全天候等特点<sup>[6]</sup>,为满足疫情期间物资和人员需求提供了坚实的保障,但目前缺乏重大疫情下铁路应急救援能力评估依据,相应的评估体系不健全,指标选取缺乏实质性的内容。为更好地发挥铁路在重大疫情下的应急救援能力,提高铁路内部的响应速度,增强各部门协调运作水平,从铁路的特点和疫情的传播与影响出发,初选重大疫情下铁路救援能力评估指标,利用传递闭包法对指标进行筛选,建立更为科学合理的评估指标体系,随后运用基于三角模糊数

的层次分析法评估现有救援能力差距,实现重大疫情下铁路部门快速有效响应和物资调度,提升中国对重大疫情的应对能力。

1 重大疫情下铁路应急救援能力的预选评估指标

建立重大疫情下铁路应急救援能力评估体系,对于提高铁路面对疫情的应急处置能力具有重要作用。由于重大疫情下铁路应急救援能力的评估指标体系涉及面广,内容多,评估指标选取考虑的因素复杂,从应急管理过程的预防预警、应急准备、应急响应、恢复 4 个方面<sup>[7]</sup>,借助目前研究成果,基于对重大疫情铁路运输需求的深入分析,按照评估指标体系科学性、可靠性、可行性、层次性、代表性、动态性、灵活性及实用性原则<sup>[8]</sup>,在对中国突发公共卫生事件应急处置政策变迁的研究<sup>[9-10]</sup>和重大疫情下铁路应急救援能力的综合分析研究的基础上,将重大疫情下铁路应急救援能力分为铁路应急准备能力、铁路应急响应能力及疫情结束后铁路应急恢复能力的预选评估指标(表 1~3)。

表 1 铁路应急准备能力预选评估指标

Tab. 1 Pre-selection evaluation indicators of railway emergency preparation capability

一级指标	二级指标	三级指标
铁路应急准备能力 $U_1$	交通运输法制基础 $u_{1,1}$	合理性 $u_{1,1,1}$
		内容完整性 $u_{1,1,2}$
	应急物资 $u_{1,2}$	物资储备的数量 $u_{1,2,1}$
		物资种类的完备性 $u_{1,2,2}$
		应急物资经费占正常开支的比例 $u_{1,2,3}$
	应急预案 $u_{1,3}$	应急工作流程的完整性 $u_{1,3,1}$
		应对疫情的针对性 $u_{1,3,2}$
		预案要素数量 $u_{1,3,3}$
		预案时效性 $u_{1,3,4}$
		措施实施有效性 $u_{1,3,5}$
	应急机构 $u_{1,4}$	应急工作明确性 $u_{1,4,1}$
		应对疫情措施合理性 $u_{1,4,2}$
		部门之间协调性 $u_{1,4,3}$
		参与部门完整性 $u_{1,4,4}$
	职工应急培训宣传 $u_{1,5}$	内容丰富性 $u_{1,5,1}$
		宣传培训的有效性 $u_{1,5,2}$
		宣传培训涉及人员范围 $u_{1,5,3}$
		日常演练频率 $u_{1,5,4}$
		培训的频率 $u_{1,5,5}$

表 2 铁路应急响应能力预选评估指标

Tab. 2 Pre-selection evaluation indicators of railway emergency response capability

一级指标	二级指标	三级指标
铁路应急响应能力 $U_2$	救援队伍 $u_{2,1}$	救援人员数量 $u_{2,1,1}$
		救援人员平均工龄 $u_{2,1,2}$
		赶赴现场平均速度 $u_{2,1,3}$
	职工健康防护 $u_{2,2}$	心理咨询服务频次 $u_{2,2,1}$
		防疫物品发放的及时性 $u_{2,2,2}$
		动态调整上岗人员数量 $u_{2,2,3}$
		公寓、职工食堂的日常消杀次数 $u_{2,2,4}$
		调度所、信息所等隔离封闭管理程度 $u_{2,2,5}$
		加强主要行车人员防护 $u_{2,2,6}$
	运力保障能力 $u_{2,3}$	运输医护人员数量 $u_{2,3,1}$
		运输物资的数量 $u_{2,3,2}$
		物资调配平均速度 $u_{2,3,3}$
		抗疫人员转移平均速度 $u_{2,3,4}$
		救援通道顺畅度 $u_{2,3,5}$
	信息公开 $u_{2,4}$	查询确诊人员乘坐列车信息的高效性 $u_{2,4,1}$
		查询旅客乘坐列车是否有确诊人员的准确性 $u_{2,4,2}$
		列车时刻表更新及时性 $u_{2,4,3}$
		退改签政策公示 $u_{2,4,4}$
	疫情管控能力 $u_{2,5}$	疫情响应时间 $u_{2,5,1}$
		防控措施的科学有效性 $u_{2,5,2}$
		疫情扩散速度 $u_{2,5,3}$
	行车组织 $u_{2,6}$	机车交路调整的及时性 $u_{2,6,1}$
		列车运行图调整的及时性 $u_{2,6,2}$
		运输组织方案精准程度 $u_{2,6,3}$
		开行方案的合理性 $u_{2,6,4}$
		调度安排合理性 $u_{2,6,5}$
		动车组、乘务交路调整合理性 $u_{2,6,6}$
	客运组织 $u_{2,7}$	票务工作保障(退改签、隔窗售票) $u_{2,7,1}$
		车站测温 and 消毒频次 $u_{2,7,2}$
		车站隔离区设置合理性 $u_{2,7,3}$
		医务人员转移速度 $u_{2,7,4}$
		乘车旅客间隔大小 $u_{2,7,5}$
		车上发热、感染病人处置的及时性 $u_{2,7,6}$
		车内空调和座椅的消毒频次 $u_{2,7,7}$
	货运组织 $u_{2,8}$	封存感染物品措施的规范性 $u_{2,8,1}$
		应急救援物资运输量 $u_{2,8,2}$
		应急救援物资快速性 $u_{2,8,3}$
		救援物资的完好性 $u_{2,8,4}$
		救援物资检疫消毒次数 $u_{2,8,5}$
		特种车的储备量 $u_{2,8,6}$

表 3 疫情结束后铁路应急恢复能力预选评估指标

Tab. 3 Pre-selection evaluation indicators of recovery capacity after epidemic

一级指标	二级指标	三级指标
铁路应急恢复能力 $U_3$	运营恢复 $u_{3,1}$	复工专列的开行数量 $u_{3,1,1}$
		国际班列恢复比例 $u_{3,1,2}$
		铁路工程项目复工比例 $u_{3,1,3}$
		疫情后大客流运力保障能力 $u_{3,1,4}$
		旅客满意度 $u_{3,1,5}$
		恢复运营列车数量 $u_{3,1,6}$
		列车信息公开准确性 $u_{3,1,7}$
		恢复运营列车信息公开及时性 $u_{3,1,8}$
	事故报告 $u_{3,2}$	内容完整性 $u_{3,2,1}$
		评估的准确性 $u_{3,2,2}$
		分析的客观性 $u_{3,2,3}$
		应急救援预案有无改善 $u_{3,2,4}$
	善后处置 $u_{3,3}$	职工心理疏导频次 $u_{3,3,1}$
		职工补助和抚恤 $u_{3,3,2}$

## 2 基于传递闭包法的重大疫情下铁路应急救援能力评估指标确定方法

科学的评估指标是评估模型准确性、可靠性的前提。本文的预选三级指标共有 73 个,指标较多,有交叉重复的现象且不易于之后指标权重的计算。在构建重大疫情下铁路应急救援能力的评估指标体系前应对预选指标进行筛选,目前较为常用的指标筛选方法有模糊聚类法<sup>[11-14]</sup>、主成分分析法<sup>[15]</sup>和粗糙集属性约简法<sup>[16]</sup>等。对表 1~3 中指标进一步考察发现,各指标对应急救援能力的反映程度不同,指标间区分度较低且具有模糊性,因此,本文采用模糊聚类法筛选预选指标。 $C$  均值模糊聚类法、谱方法、以及传递闭包法等<sup>[17-23]</sup>是较为主流的聚类方法,传递闭包法能够对大量不确定信息进行挖掘,且理论更为成熟。根据重大疫情下铁路应急救援能力评估的指标性质,本文采用传递闭包法进行模糊聚类筛选重要指标。在对关键指标进行提取后,计算各个指标的权重,为使权重结果更加科学严谨且消除德尔菲法的主观性,运用基于三角模糊数的层次分析法,将专家经验和数学原理的结合,使权重结果更加科学严谨且消除德尔菲法的主观性,具体方法见图 1。

步骤 1:构建评分矩阵。

重大疫情下铁路应急救援能力评估的指标以铁路应急准备能力、铁路应急响应能力及疫情结束后铁路应急恢复能力 3 个部分组成。设第  $o$  个一级指

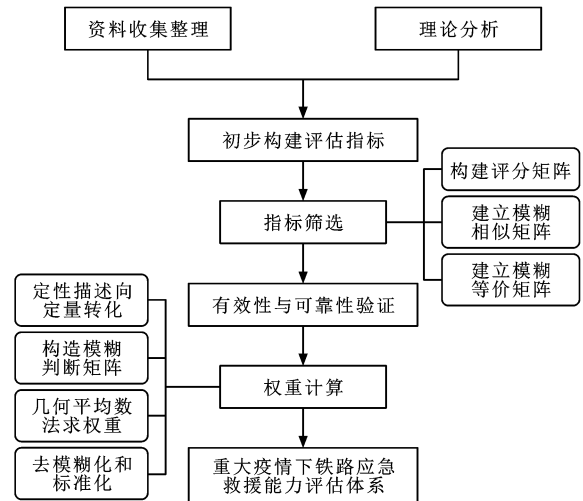


图 1 基于传递闭包法的评估指标确定方法

Fig. 1 Determination method of assessment indexes based on transitive closure method

标下的第  $p$  个二级指标表示为  $u_{o,p}$ ,  $u_{o,p}$  下属的第  $q$  个三级指标表示为  $u_{o,p,q}$ 。预选三级指标中每一个元素均有若干个指标作为分类的依据。选取铁路运输、疫情防控管理领域专家以及铁路应急管理部门人员等对三级指标从科学性、可行性、独立性以及可靠性 4 个维度进行打分得到原始评分矩阵。

步骤 2:建立模糊相似矩阵。

将原始评分矩阵得分归一化后乘以各维度的权重系数得到三级指标的最终评分。设任意 2 个指标分别为  $u_e, u_f$ , 建立模糊相似矩阵  $R = (r_{ef})$ , 用来表示指标间的模糊关系。本文采用海明距离法创建模糊相似矩阵,矩阵中的元素为

$$r_{ef} = 1 - 0.5 \sum_{\theta=1}^4 |z_{e\theta} - z_{f\theta}| \quad (1)$$

式中:  $z_{e\theta}, z_{f\theta}$  分别为第  $e, f$  个指标在第  $\theta$  个评分依据下归一化后的专家打分。

步骤 3:确定重大疫情下铁路应急救援能力评估指标。

求出模糊相似矩阵  $R$  的模糊等价矩阵  $\hat{R}$ , 并对  $\hat{R}$  进行聚类分析即可以得到指标之间的关联性, 最终筛选出较为合理和具有代表性的评估指标。根据传递闭包的定理, 采用平方法计算传递闭包,  $R \rightarrow R^2 \rightarrow R^4 \rightarrow \dots \rightarrow R^{2k} \rightarrow \dots$ , 当计算至  $k+1$  步, 使得  $\hat{R} = R^{2k} = R^{2k-1}$  时, 则  $\hat{R}$  为  $R$  的模糊等价矩阵。

步骤 4:指标体系有效性及可靠性检验。

为了验证运用传递闭包筛选出来的指标体系的合理性, 在进行指标筛选后运用应用统计学中的效度系数  $\alpha$  及可靠性系数  $\rho$  对筛选指标进行有效性及



可靠性的验证。

效度系数  $\alpha$  反映了不同专家认识的偏离程度,当  $\alpha$  小于 0.1 时,代表该指标体系有效性较高。可靠性系数  $\rho$  代表指标体系多次评估结果之间的差异度,当  $\rho$  大于 0.8 时,说明该指标体系具有较高的可靠性<sup>[24-30]</sup>。

选取  $s$  位专家对各指标进行打分,其中专家  $j$  对各指标的评分集为  $X_j = (x_{1j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{nj})$ ,  $Q_i$  为指标  $i$  的评语集中最优评分,  $x_{ij}$  表示专家  $j$  对第  $i$  个指标的评分,计算  $s$  位专家打分的平均值得到专家组评分的平均数据组  $Y = (y_1, \dots, y_i, \dots, y_n)$ ,其中  $y_i$  为第  $i$  个指标专家组打分的平均值,具体计算公式为

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i / n \quad (2)$$

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^s \sqrt{(y_i - x_{ij})^2} / s Q_i \quad (3)$$

$$y_i = \sum_{j=1}^s x_{ij} / s \quad (4)$$

$$\rho = \sum_{j=1}^s \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right] / s \quad (5)$$

$$\bar{x}_j = \sum_{i=1}^n x_{ij} / n \quad (6)$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i / n \quad (7)$$

步骤 5:在得到筛选后的评估指标后,运用基于三角模糊数的层次分析法<sup>[24-27]</sup>计算重大疫情下铁路应急救援能力各指标权重。

采用德尔菲法,通过问卷调查的方式,专家对重大疫情下铁路应急救援能力评估指标进行两两重要性比较,将得到的专家评估收集后按照表 4 以三角模糊数的形式进行转化,将定性描述定量化,  $A_{ef}$  代表指标  $u_e$  和  $u_f$  相比的重要程度,其中  $A_{ef} = (a_{ef}, b_{ef}, c_{ef})$ ,  $A_{fe} = (1/c_{ef}, 1/b_{ef}, 1/a_{ef})$ ,  $a_{ef}, b_{ef}, c_{ef}$  分别为三角模糊数上界值、中值和下界值,参考表 4 转化得到。

根据专家打分情况构造模糊判断矩阵  $M$ ,用所得的指标值建立各个层次的模糊判断矩阵  $M$ ,各指标相比后得到  $n$  阶矩阵,即

$$M = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix}$$

表 4 不同定性描述的三角模糊数

Tab. 4 Triangular fuzzy numbers with different qualitative descriptions

定性描述	三角模糊数表示
两个指标同样重要,对应急能力贡献相同	(1,1,2)
介于同样重要和略微重要之间	(1,2,3)
两个指标相比,前者略微重要	(2,3,4)
介于略微重要和比较重要之间	(3,4,5)
两个指标相比,前者比较重要	(4,5,6)
介于比较重要和明显重要之间	(5,6,7)
两个指标相比,前者明显重要	(6,7,8)
介于明显重要和绝对重要之间	(7,8,9)
两个指标相比,前者绝对重要	(8,9,9)

得到模糊判断矩阵后用几何平均数法求权重,计算公式如下

$$\bar{A}_e = (\bar{a}_e, \bar{b}_e, \bar{c}_e) = \left( \sqrt[n]{\prod_{f=1}^n a_{ef}}, \sqrt[n]{\prod_{f=1}^n b_{ef}}, \sqrt[n]{\prod_{f=1}^n c_{ef}} \right) \quad (8)$$

第  $e$  行指标权重  $W_e$  为

$$W_e = (a_e, b_e, c_e) = \left( \frac{\bar{a}_e}{\sum_{f=1}^n \bar{c}_f}, \frac{\bar{b}_e}{\sum_{f=1}^n \bar{b}_f}, \frac{\bar{c}_e}{\sum_{f=1}^n \bar{a}_f} \right) \quad (9)$$

去模糊化和标准化权重  $w_e$  为

$$w_e = \frac{a_e + 2b_e + c_e}{6} \quad (10)$$

标准化权重  $A_e$  为

$$A_e = \frac{w_e}{\sum_{f=1}^n w_f} \quad (11)$$

### 3 重大疫情下铁路应急救援能力评估体系构建

#### 3.1 构建评分矩阵

以铁路应急响应能力为例进行聚类分析,其余各指标同理得出相关重要指标。评估指标体系是重大疫情下铁路应急救援能力评估体系的评估工作的基石,唯有科学、可行、独立以及可靠的指标才能保证评估结果的准确性。本文将从合理,较合理,不合理 3 种程度对各个指标按照科学性、可行性、独立性

以及可靠性进行分别打分。各个维度的权重分别为 3、2 和 1。统计 20 位专家为行车组织下属三级指标 科学性、可行性、独立性以及可靠性的打分人数分布 见表 5,原始评分见表 6,各指标最终评分见表 7。

表 5 专家打分统计

Tab. 5 Statistics of expert scores

指标	科学性			可行性			独立性			可靠性		
	合理	较合理	不合理	合理	较合理	不合理	合理	较合理	不合理	合理	较合理	不合理
$u_{2,6,1}$	2	12	6	7	11	2	2	7	11	4	7	9
$u_{2,6,2}$	3	16	1	17	3	0	17	2	1	11	1	8
$u_{2,6,3}$	5	5	10	4	13	3	1	9	10	5	4	11
$u_{2,6,4}$	4	14	2	7	7	6	8	12	0	6	12	2
$u_{2,6,5}$	13	1	6	9	6	9	3	15	2	9	9	2
$u_{2,6,6}$	12	8	0	8	6	6	12	5	3	14	4	2

表 6 原始评分

Tab. 6 Original scores

指标	科学性	可行性	独立性	可靠性
$u_{2,6,1}$	36	45	31	35
$u_{2,6,2}$	42	57	56	43
$u_{2,6,3}$	35	41	31	34
$u_{2,6,4}$	42	41	48	44
$u_{2,6,5}$	47	48	41	47
$u_{2,6,6}$	52	42	49	52

表 7 最终评分

Tab. 7 Final scores

指标	$u_{2,6,1}$	$u_{2,6,2}$	$u_{2,6,3}$	$u_{2,6,4}$	$u_{2,6,5}$	$u_{2,6,6}$
得分	0.71	0.92	0.68	0.87	0.91	1.00

### 3.2 建立模糊相似矩阵

根据式(1)计算元素之间的相似度,并得到行车组织下属三级指标的模糊相似关系矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1.00 & 0.55 & 0.95 & 0.68 & 0.68 & 0.53 \\ 0.55 & 1.00 & 0.50 & 0.78 & 0.71 & 0.64 \\ 0.95 & 0.50 & 1.00 & 0.70 & 0.63 & 0.53 \\ 0.68 & 0.78 & 0.70 & 1.00 & 0.81 & 0.82 \\ 0.68 & 0.71 & 0.63 & 0.81 & 1.00 & 0.79 \\ 0.53 & 0.64 & 0.53 & 0.82 & 0.79 & 1.00 \end{bmatrix}$$

### 3.3 建立模糊等价矩阵

应用模糊传递闭包法对行车组织下属三级指标的模糊相似关系矩阵进行运算,得到模糊等价关系矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1.00 & 0.63 & 0.63 & 0.95 & 0.95 & 0.87 \\ 0.63 & 1.00 & 0.55 & 0.95 & 0.96 & 0.87 \\ 0.63 & 0.55 & 1.00 & 0.70 & 0.95 & 0.87 \\ 0.95 & 0.95 & 0.95 & 1.00 & 0.92 & 0.92 \\ 0.95 & 0.95 & 0.95 & 0.92 & 1.00 & 0.92 \\ 0.87 & 0.87 & 0.87 & 0.92 & 0.92 & 1.00 \end{bmatrix}$$

对模糊等价矩阵进行聚类分析,可以得到动态聚类谱如图 2 所示。

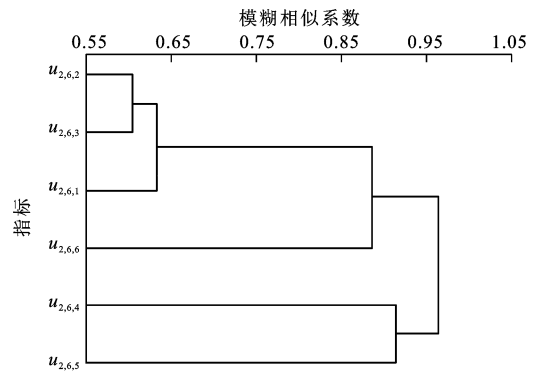


图 2 铁路应急救援能力评估指标动态聚类谱

Fig. 2 Dynamic clustering spectrum of railway emergency rescue capability assessment indicators

图 2 中横坐标为指标间模糊相似系数,由聚类谱可得出:机车交路调整的及时性、列车运行图调整的及时性以及运输组织方案精准程度 3 个指标之间相似性最高,将 3 个指标划分为一类,但由于在专家打分中列车运行图调整的及时性这一指标得分最高,因此,保留此指标,删除同一类中的其余 2 个指标,最终筛选出的指标为  $u_{2,6,2}$ 、 $u_{2,6,4}$ 、 $u_{2,6,5}$ 、 $u_{2,6,6}$ ,分类结果如表 8 所示。

表 8 筛选后的行车组织指标

Tab. 8 Indicators of driving organization after screening

二级指标	三级指标
行车组织 $u_{2,6}$	列车运行图调整的及时性 $u_{2,6,2}$
	开行方案的合理性 $u_{2,6,4}$
	调度安排合理性 $u_{2,6,5}$
	动车组、乘务交路调整合理性 $u_{2,6,6}$

### 3.4 指标体系有效性与可靠性检验及各指标权重计算

运用式(2)~(7)对评估指标体系进行有效性和可靠性验证,计算得整体效度系数  $\alpha=0.0963<1$ ,且可靠性系数  $\rho=0.940>0.8$ 。综上所述,经由传递闭包法筛选得到的指标体系有效性及可靠性良

好,具体计算结果如表 10~12 所示。

邀请 5 位来自铁路运输、疫情防控管理领域专家对两两指标之间的重要性程度进行比较。以行车

(1.00,1.00,1.00)	(0.90,1.13,1.80)	(1.45,2.07,2.90)	(1.60,2.40,3.41)
(1.05,1.67,2.10)	(1.00,1.00,1.00)	(1.32,1.97,2.70)	(2.40,3.40,4.40)
(0.65,1.00,1.30)	(0.75,1.20,1.70)	(1.00,1.00,1.00)	(1.40,2.00,3.00)
(0.32,0.50,0.70)	(0.23,0.30,0.43)	(0.37,0.63,0.80)	(1.00,1.00,1.00)

运用式(8)~(11)对得到的模糊判断矩阵进行处理,计算权重,得到行车组织下属的三级指标权重如表 9 所示。

同理,按照指标筛选和指标权重确定的原则和步骤,得到重大疫情下铁路应急救援能力评估指标体系如表 10~12 所示。

组织二级指标为例,各因素相比后得到原始数据,将原始数据采集后按照表 4 进行数据转化,得到模糊判断矩阵为

表 9 行车组织指标权重

Tab. 9 Indicator weights of driving organization

二级指标	三级指标	权重
行车组织	列车运行图调整的及时性 $u_{2,6,2}$	0.30
	开行方案的合理性 $u_{2,6,4}$	0.35
	调度安排合理性 $u_{2,6,5}$	0.24
	动车组、乘务交路调整合理性 $u_{2,6,6}$	0.11

表 10 铁路应急准备能力评估指标

Tab. 10 Evaluation indicators of railway emergency preparation capability

一级指标		二级指标		三级指标		
指标	权重	指标	权重	指标	权重	效度系数
铁路应急准备能力 $U_1$	0.26	应急物资 $u_{1,2}$	0.29	应急物资经费占正常开支的比例 $u_{1,2,3}$	1.00	0.11
		应急预案 $u_{1,3}$	0.24	应对疫情的针对性 $u_{1,3,2}$	0.47	0.08
				预案时效性 $u_{1,3,4}$	0.53	0.10
		应急机构 $u_{1,4}$	0.27	应急工作明确性 $u_{1,4,1}$	0.41	0.08
				应对疫情措施合理性 $u_{1,4,2}$	0.59	0.10
		职工应急培训宣传 $u_{1,5}$	0.20	宣传培训的有效性 $u_{1,5,2}$	0.36	0.16
				日常演练频率 $u_{1,5,4}$	0.64	0.06

4 结 语

(1)从铁路应急准备能力、铁路应急响应能力及疫情结束后铁路应急恢复能力 3 个方面对指标进行分析,结合基于传递闭包的模糊聚类法剔除不合理的指标,筛选出了 3 个一级指标、15 个二级指标、49 个三级指标。

(2)应用基于三角模糊数的层次分析法计算各指标权重,指标体系中准则层指标因素权重按所占比重大小排序为:铁路应急响应能力、铁路应急准备能力、疫情结束后铁路应急恢复能力。在铁路应急响应能力的子因素中,运力保障能力和疫情管控能力所占比重较大,疫情期间应保障医护人员和物资的输送,采取有效措施防止疫情进一步扩散。对于铁路的应急准备,应防微杜渐,及时更新应急预案,加强应急机构管理,保障应急物资的储备,在疫情结束后,应及时对预案进行完善修订,开行复工专列,降低疫情造成的损失和影响。

(3)本文运用基于传递闭包的模糊聚类法对重

大疫情下铁路应急救援能力指标进行完善,通过基于三角模糊数的层次分析法计算各指标权重,便于铁路部门采取及时有效的措施对重要因素进行排查和整改。

(4)文中构建了应急救援能力指标评估体系,但是否可行有效,还需要大量实践数据的验证。虽然本文中采用了三角模糊数对专家打分情况进行处理,但真实情况难免仍会受到个人经验、偏好等的影响,因此,后续需要加强数据采集方面的工作,对指标体系进行完善修改,以实现评估的客观量化。

参 考 文 献 :

References :

[1] 马茂冬,韩 尧,张 倩. 基于模糊层次分析法的应急能力评估方法探讨[J]. 中国安全生产科学技术,2009,5(2):98-102. MA Mao-dong, HAN Yao, ZHANG Qian. Evaluation method of emergency response capabilities based on FAHP[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2009, 5(2): 98-102. (in Chinese)

[2] 胡月亭,李彦涛. 基于可拓的石油化工企业应急能力评估研究[J]. 中国安全生产科学技术,2013,9(3):144-149.

表 11 铁路应急响应能力评估指标

Tab. 11 Evaluation indicators of railway emergency response capability

一级指标		二级指标		三级指标		
指标	权重	指标	权重	指标	权重	效度系数
铁路应急响应能力 $U_2$	0.53	救援队伍 $u_{2,1}$	0.07	救援人员数量 $u_{2,1,1}$	0.43	0.06
				救援人员平均工龄 $u_{2,1,2}$	0.26	0.11
				赶赴现场平均速度 $u_{2,1,3}$	0.31	0.16
		职工健康 防护 $u_{2,2}$	0.10	心理咨询服务频次 $u_{2,2,1}$	0.10	0.00
				防疫物品发放的及时性 $u_{2,2,2}$	0.22	0.10
				动态调整上岗人员数量 $u_{2,2,3}$	0.16	0.16
				公寓、职工食堂的日常消杀次数 $u_{2,2,4}$	0.11	0.16
				调度所、信息所等隔离封闭管理程度 $u_{2,2,5}$	0.17	0.11
				加强主要行车人员防护 $u_{2,2,6}$	0.24	0.06
		运力保障 能力 $u_{2,3}$	0.16	运输医护人员的数量 $u_{2,3,1}$	0.18	0.08
				运输物资的数量 $u_{2,3,2}$	0.19	0.12
				物资调配平均速度 $u_{2,3,3}$	0.25	0.10
				医护人员转移平均速度 $u_{2,3,4}$	0.25	0.10
				救援通道顺畅度 $u_{2,3,5}$	0.13	0.11
		信息公开 $u_{2,4}$	0.11	查询确诊人员乘坐列车信息的高效性 $u_{2,4,1}$	0.24	0.00
				查询旅客乘坐列车是否有确诊人员的准确性 $u_{2,4,2}$	0.28	0.10
				列车时刻表更新及时性 $u_{2,4,3}$	0.21	0.11
				退改签政策公示 $u_{2,4,4}$	0.27	0.06
		疫情管控 能力 $u_{2,5}$	0.15	疫情响应时间 $u_{2,5,1}$	0.29	0.11
				防控措施的科学有效性 $u_{2,5,2}$	0.24	0.16
				疫情扩散速度 $u_{2,5,3}$	0.47	0.06
		行车组织 $u_{2,6}$	0.14	列车运行图调整的及时性 $u_{2,6,2}$	0.30	0.12
				开行方案的合理性 $u_{2,6,4}$	0.35	0.00
				调度安排合理性 $u_{2,6,5}$	0.24	0.00
				动车组、乘务交路调整合理性 $u_{2,6,6}$	0.11	0.16
		客运组织 $u_{2,7}$	0.14	票务工作保障(退改签、隔窗售票) $u_{2,7,1}$	0.09	0.00
				车站测温和消毒频次 $u_{2,7,2}$	0.25	0.12
				乘车旅客间隔大小 $u_{2,7,5}$	0.13	0.16
				车上发热、感染病人处置的及时性 $u_{2,7,6}$	0.31	0.06
				车内空调和座椅的消毒频次 $u_{2,7,7}$	0.22	0.08
		货运组织 $u_{2,8}$	0.13	封存感染物品措施的规范性 $u_{2,8,1}$	0.14	0.16
				救援物资的完好性 $u_{2,8,4}$	0.32	0.10
				救援物资检疫消毒次数 $u_{2,8,5}$	0.20	0.16
				特种车的储备量 $u_{2,8,6}$	0.34	0.10

HU Yue-ting, LI Yan-tao. Study on evaluation of emergency response capabilities of petrochemical enterprises based on extension method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(3): 144-149. (in Chinese)

[3] 伍 蒙, 许 渊, 李 左, 等. 基于 AHP-熵权法的某 LPG 储罐区应急救援能力评估[J]. 山东化工, 2019, 48(20):

233-236.

WU Meng, XU Yuan, LI Zuo, et al. Evaluation on emergency response capability of LPG storage tank based on AHP-entropy weight method[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(20): 233-236. (in Chinese)

[4] 赵 琳. 城市气象灾害应急救援服务能力评估研究[D].



表 12 疫情结束后铁路恢复能力评估指标

Tab. 12 Evaluation indicators of railway recovery capacity after epidemic

一级指标		二级指标		三级指标		
指标	权重	指标	权重	指标	权重	效度系数
铁路应急恢复能力 $U_3$	0.21	运营恢复 $u_{3,1}$	0.47	复工专列的开行数量 $u_{3,1,1}$	0.27	0.12
				铁路工程项目复工比例 $u_{3,1,3}$	0.04	0.00
				恢复运营列车数量 $u_{3,1,6}$	0.39	0.10
				恢复运营列车信息公开及时性 $u_{3,1,8}$	0.30	0.12
		事故报告 $u_{3,2}$	0.29	内容完整性 $u_{3,2,1}$	0.23	0.11
				分析的客观性 $u_{3,2,3}$	0.15	0.16
				应急救援预案有无改善 $u_{3,2,4}$	0.62	0.10
		善后处置 $u_{3,3}$	0.24	职工补助和抚恤 $u_{3,3,2}$	1.00	0.11

南京:南京信息工程大学,2012.

ZHAO Lin. The evaluation of emergency rescue service ability for urban meteorological disasters [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2012. (in Chinese)

[5] 曲国胜. 基于风险和应急准备能力评估的应急救援能力建设[J]. 安全, 2019, 40(5): 1-6.

QU Guo-sheng. Emergency rescue capacity building based on risk and emergency preparedness capability assessment[J]. Safety and Security, 2019, 40(5): 1-6. (in Chinese)

[6] 赵国堂,周诗广. 我国市域铁路发展现状及未来展望[J]. 中国铁路, 2018(8): 1-10.

ZHAO Guo-tang, ZHOU Shi-guang. Today and future of suburban railway in China[J]. China Railway, 2018(8): 1-10. (in Chinese)

[7] 徐建光. 我国铁路突发事件应急管理体系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.

XU Jian-guang. The study of China railway emergency management system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)

[8] 詹美蓉,谢忠杭,蔡少健,等. 突发公共卫生事件应急预案评价指标体系构建初探[J]. 预防医学论坛, 2019, 25(3): 190-193.

ZHAN Mei-rong, XIE Zhong-hang, CAI Shao-jian, et al. Development of index system for comprehensive evaluation on public health emergency plan[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2019, 25(3): 190-193. (in Chinese)

[9] 孙梅,吴丹,施建华,等. 我国突发公共卫生事件应急处置政策变迁: 2003~2013年[J]. 中国卫生政策研究, 2014, 7(7): 24-29.

SUN Mei, WU Dan, SHI Jian-hua, et al. Policies change related to public health emergency disposal in China: from 2003 to 2013[J]. Chinese Journal of Health Policy, 2014, 7(7): 24-29. (in Chinese)

[10] 高小平. 中国特色应急管理体系建设的成就和发展[J]. 中国行政管理, 2008(11): 18-24.

GAO Xiao-ping. Achievement and development of emergency management system with Chinese characteristics[J]. Chinese Public Administration, 2008(11): 18-24. (in Chinese)

[11] 李俊捷,姚欣怡,陈钉均,等. 跨区域综合交通应急救援预案评估指标选取[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(增2): 185-190.

LI Jun-jie, YAO Xin-yi, CHEN Ding-jun, et al. Evaluation index selection of comprehensive inter-regional traffic emergency rescue plan[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(S2): 185-190. (in Chinese)

[12] 刘聚涛,高俊峰,姜加虎. 不同模糊评价方法在水环境质量评价中的应用比较[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(1): 20-25.

LIU Ju-tao, GAO Jun-feng, JIANG Jia-hu. Application of different fuzzy assessment methods of water quality assessment in Dianchi Lake[J]. Environmental Pollution and Control, 2010, 32(1): 20-25. (in Chinese)

[13] 郭蕴华,陈定方. 基于模糊聚类分析的客户分类算法研究[J]. 计算机应用研究, 2005(4): 52-53, 57.

GUO Yun-hua, CHEN Ding-fang. Research on algorithm of customer-classified based on fuzzy clustering analysis[J]. Application Research of Computers, 2005(4): 52-53, 57. (in Chinese)

[14] 郭梅,赵希男,陈洋洋,等. 模糊聚类在筛选本科生教育评定指标中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 452-456.

GUO Mei, ZHAO Xi-nan, CHEN Yang-yang, et al. Application of fuzzy clusters to screen undergraduate education assessment targets[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2011, 32(3): 452-456. (in Chinese)

[15] 迟国泰,曹婷婷,张昆. 基于相关-主成分分析的人的全面发展评价指标体系构建[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(1): 111-119.

CHI Guo-tai, CAO Ting-ting, ZHANG Kun. The establishment of human all-around development evaluation indicators system based on correlation-principle component analysis[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2012, 32(1): 111-119. (in Chinese)

[16] 张朝阳,赵涛,王春红. 基于粗糙集的属性约简方法在指标筛选中的应用[J]. 科技管理研究, 2009, 29(1): 78-79, 85.

ZAHNG Chao-yang, ZHAO Tao, WANG Chun-hong.

- Application of attribute reduction method based on rough set in index selection[J]. Science and Technology Management Research, 2009, 29(1): 78-79, 85. (in Chinese)
- [17] KUO R J, LIN T C, ZULVIA F E, et al. A hybrid metaheuristic and kernel intuitionistic fuzzy  $c$ -means algorithm for cluster analysis[J]. Applied Soft Computing, 2018, 67: 299-308.
- [18] YANG M S, NATALIANI Y. Robust-learning fuzzy  $c$ -means clustering algorithm with unknown number of clusters[J]. Pattern Recognition, 2017, 71: 45-59.
- [19] NAYAK J, NAIK B, BEHERA H S, et al. Hybrid chemical reaction based metaheuristic with fuzzy  $c$ -means algorithm for optimal cluster analysis[J]. Expert Systems with Applications, 2017, 79: 282-295.
- [20] TSENG M L, LIM M, WU K J, et al. A novel approach for enhancing green supply chain management using converged interval-valued triangular fuzzy numbers-grey relation analysis[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 128: 122-133.
- [21] KAHN JR C E. Transitive closure of subsumption and causal relations in a large ontology of radiological diagnosis[J]. Journal of Biomedical Informatics, 2016, 61: 27-33.
- [22] DHALMAHAPATRA K, SHINGADE R, MAHAJAN R, et al. Decision support system for safety improvement: an approach using multiple correspondence analysis,  $t$ -SNE algorithm and  $K$ -means clustering[J]. Computers and Industrial Engineering, 2019, 128: 277-289.
- [23] LEE H S. An optimal algorithm for computing the max-min transitive closure of a fuzzy similarity matrix[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 123: 129-136.
- [24] ZHANG Xi-xiang, MA Wei-min, CHEN Li-ping. New similarity of triangular fuzzy number and its application[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 1-7.
- [25] 张 涵. 城市铁路运营安全风险评价与指标体系研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2018.
- ZHANG Han. Research on operational safety risk assessment and index system of urban rail transit[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2018. (in Chinese)
- [26] 徐泽水. 三角模糊数互补判断矩阵的一种排序方法[J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(1): 47-50.
- XU Ze-shui. A method for priorities of triangular fuzzy number complementary judgement matrices[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2002, 16(1): 47-50. (in Chinese)
- [27] 徐泽水. 三角模糊数互补判断矩阵排序方法研究[J]. 系统工程学报, 2004, 19(1): 85-88.
- XU Ze-shui. One priority method of triangular fuzzy number complementary judgement matrix [J]. Journal of Systems Engineering, 2004, 19(1): 85-88. (in Chinese)
- [28] 高 勇. 电力通信网可靠性评估指标体系的设计与优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- GAO Yong. Design and optimization of reliability evaluation index system of electric power communication network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011. (in Chinese)
- [29] 云 俊, 李远远. 项目评价中指标体系选取的有效性及其优化[J]. 商业时代, 2009(9): 47-48.
- YUN Jun, LI Yuan-yuan. The validity and optimization of index system selection in project evaluation[J]. Commercial Times, 2009(9): 47-48. (in Chinese)
- [30] 游海燕. 评价指标体系的优化研究及实现[J]. 科技管理研究, 2009, 29(12): 128-129, 205.
- YOU Hai-yan. Research and implementation of optimization of evaluation index system[J]. Science and Technology Management Research, 2009, 29(12): 128-129, 205. (in Chinese)