

中文引用格式:国汉君,张跃兵,周爱桃. 事故灾难应急救援系统情景结构化表征研究:以煤矿事故救援为例[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(2): 172-179.

英文引用格式:GUO Hanjun, ZHANG Yuebing, ZHOU Aitao. Research on scenario structured representation of accident disaster emergency rescue system: taking coal mine accident rescue as an example [J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 172-179.

事故灾难应急救援系统情景结构化表征研究: 以煤矿事故救援为例*

国汉君¹研究员, 张跃兵^{**2,3}副教授, 周爱桃⁴教授

(1 中国神华能源股份有限公司, 北京 100011; 2 华北科技学院 安全工程学院, 北京 101601; 3 有毒有害气体监测预警应急管理部重点实验室, 北京 101601;
4 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

中图分类号:X928.04

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.1614

【摘要】 为规范事故灾难应急救援系统情景表征,提高应急救援过程中信息传递效率和决策科学化水平,应用文献研究和案例分析的方法,整合现有理论成果,从系统结构组成、组成部分间交互作用及时序演化过程3个维度,提取事故灾难应急救援系统的情景要素,明确各要素的内涵、外延、结构及功能,并构建数学模型,论证由当前状态和交互作用关系预测下一时刻状态的可行性。结果表明:所提出的情景要素体系与知识元理论框架相契合,能够系统化表征事故灾难应急救援系统的动态演化特征。

【关键词】 事故灾难; 应急救援系统; 情景表征; 情景要素; 救援决策

Research on scenario structured representation of accident disaster emergency rescue system: taking coal mine accident rescue as an example

GUO Hanjun¹, ZHANG Yuebing^{2,3}, ZHOU Aitao⁴

(1 China Shenhua Energy Company Limited, Beijing 100011, China; 2 School of Safety Engineering, North China Institute of Science & Technology, Beijing 101601, China;

3 Key Laboratory of Toxic and Harmful Gas Monitoring and Early Warning, Ministry of Emergency Management, Beijing 101601, China; 4 School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To standardize the scenario representation of accident disaster emergency rescue systems, improve the efficiency of information transmission and the level of scientific decision-making in the emergency rescue process, literature research and case analysis methods were applied to integrate existing theoretical achievements. The scenario elements of the accident disaster emergency rescue system were extracted from three dimensions: system structure composition, interaction between components, and temporal evolution process. The connotation, extension, structure, and function of each element were clarified. A mathematical model was constructed to demonstrate the feasibility of predicting the next state

* 文章编号:1003-3033(2026)02-0172-09; 收稿日期:2025-10-20; 修稿日期:2025-12-25

** 通信作者:张跃兵(1973—),男,安徽无为,人,博士,副教授,主要从事安全管理、应急救援方面的研究。E-mail:zyb@ncist.edu.cn。

based on the current state and interaction relationship. The results indicate that the proposed scenario element system is consistent with the knowledge element theory framework, and the dynamic evolution characteristics of the accident disaster emergency rescue system can be systematically characterized.

Keywords: accidents disasters; emergency rescue system; scenario representation; scenario elements; rescue decision-making

0 引言

事故灾难应急救援是一项复杂的动态系统工程^[1],其决策效率依赖情景信息的结构化表征与精准传递。受限于人类认知与语言表达的局限性,事故灾难应急救援系统情景总是难以被完整表述,需提取系统本质要素实现情景简化表达,即结构化表征。突发事件情景的科学结构化表征不仅为实时决策提供依据^[2],还为应急预案编制与演练中虚拟情景构建奠定基础,已成为应急救援领域的研究重点。

情景概念最早由 HERMAN 等^[3]提出,在计划、规划、战略等研究领域,用于描述未来发展的潜在路径与态势。在非常规突发事件应急管理中,因传统“预测-应对”模式失效,“情景-应对”范式逐渐成为主流^[4]。情景被用在所有突发事件的现状描述和未来场景构建和推演上^[5]。

现有研究对突发事件情景要素的界定尚未统一,不同学者根据自身研究需要和认知提出不同的情景要素模型。如吴倩^[6]提出灾害体、受灾体、孕灾环境、抗灾体 4 要素;姜卉等^[7]将情景要素简化为灾害体、受灾体、抗灾体三维框架;仲秋雁等^[8]则强调事件本体与环境要素的交互作用。李建伟等^[9]认为情景可以划分为事件、载体、活动和规则 4 部

分。盛勇等^[10]研究致灾因子、承灾载体、应急决策等 3 个要素以及三者之间存在的复杂联系与相互作用。王红卫^[11]等将情景要素分为情景事件、承灾体、应急组织、应急资源、应急环境和处置行动;李小平等^[2]认为铁路突发事件的情景要素不仅包括致灾因子、承灾体、孕灾环境等结构性要素,还包括情景发展的驱动要素及发展态势等,美国重大突发事件情景构建基于情景概要、任务、后果 3 个维度^[12]。综上,要素命名的异构性与结构模糊性制约了情景描述的标准化进程。

鉴于此,笔者拟以事故灾难应急救援系统为研究对象,通过逻辑分析、文献研究和案例验证,提出更加科学、合理、精炼的事故灾难应急救援系统情景要素,更加清晰地界定各要素内涵与外延,进一步构建事故灾难应急救援系统情景结构化表征数学模型,以期 of 事故灾难应急救援系统情景结构化表征的规范化与动态演化分析提供理论支撑。

1 应急教授系统情景要素分析

从哲学角度来看,任何事物的描述包含 3 个方面:结构组成、要素交互作用关系及时序演化过程(状态)。现有情景要素研究同样可以归结为这 3 个方面,见表 1。

表 1 情景构成要素文献研究
Table 1 Literature research on elements of scenario composition

作者	情景构成要素		
	结构组成	交互作用关系	时序演化过程
吴倩等 ^[6]	灾害体、受灾体、孕灾环境、抗灾体	—	—
姜卉 ^[7]	灾害体、受灾体、抗灾体	—	—
付磊等 ^[13]	致灾情景、救灾情景、承载情景	—	—
仲秋雁等 ^[8]	事件本身,引发事件要素,影响事件发展的要素,事件作用对象要素(承灾体)	—	—
李建伟等 ^[9]	事件、载体	活动、规则	—
盛勇等 ^[10]	致灾因子、承灾载体	应急决策、联系与作用方式	—
王红卫等 ^[11]	情景事件、承灾体、应急组织、应急资源、应急环境	处置行动	—
李小平等 ^[2]	致灾因子、承灾体、孕灾环境	情景驱动要素	情景发展态势

1.1 事故灾难应急救援系统结构组成

既有研究对事故灾难应急救援系统的实体结构分析多呈现局部化与碎片化特征,或聚焦于事故灾难系统的动力学机制^[14-15],或局限于应急救援子系统的功能架构和机理^[16-17]。黄弘等^[18]提出公共安全三角形理论模型(突发事件、承灾载体、应急管理),该模型虽为系统性研究提供了理论框架,但其本质属于公共安全科技发展的研究方向,而非实体结构的本体论界定,其中,承灾载体属于实体,突发事件和应急管理属于包含实体的行为。然而,王旭坪等^[19]、张青松等^[20]受三角形理论影响,直接将情景要素分为突发事件、承灾载体和应急管理3方面。史培军^[21]从结构上将自然灾害系统分为致灾因子、承灾体、孕灾环境等3个要素。王旭坪等^[22]从结构上将自然灾害应急救援系统表示为自然灾害环境子系统、承灾载体子系统和应急管理子系统。

文中通过本体论重构提出事故灾难应急救援系统的四元结构模型,该模型由事故体 A (Accident)、承灾体 B (Bearings)、抗灾体 R (Resistances) 和孕灾环境 E (Environments) 组成,其理论创新性体现于能量与信息作用机制的系统建模与实体功能边界的形式化定义。

1) A 。 A 是指在事故中导致能量意外释放和破坏的能量体总和。为与其他类型的突发事件区分,文中将事故灾难应急救援系统中的灾害体称为 A 。 A 有其独特的组成结构,由各种危险源(能量)组成,包括初始触发危险源到各级触发危险源,再到直接危险源^[13],危险源相继触发,最终造成直接危险源能量意外释放,初始触发危险源一般是人、动物或其他自然能量(如风、雨、雷、地震等)。如煤矿井下瓦斯爆炸 A 就包括人、火花、瓦斯等,如图1所示。该模型变传统致灾因子单维认知^[2,10]为动态能量网络特征。

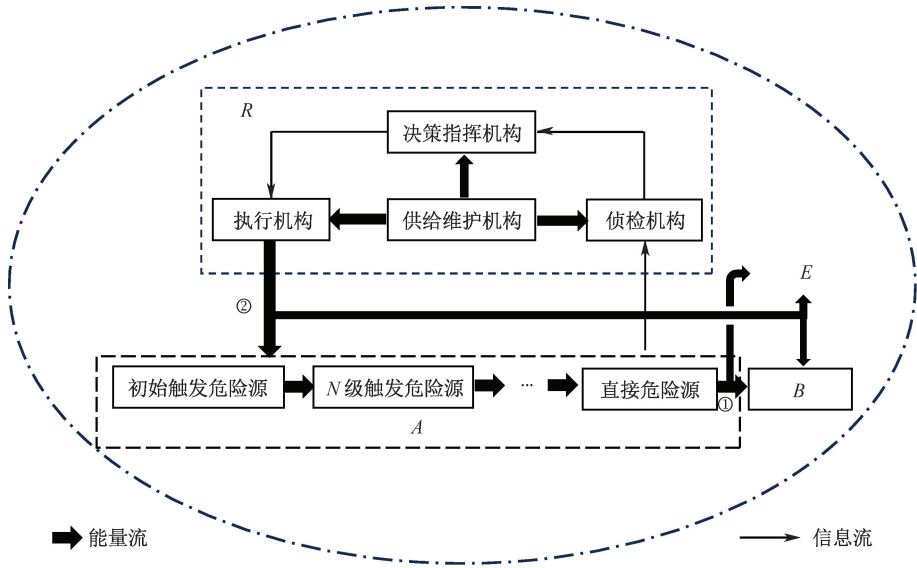


图1 事故灾难应急救援系统结构模型

Fig.1 Structural model of accident disaster emergency rescue system

2) B 。 B 定义为事故能量作用域内受保护对象的集合 $B = \{O_k | V(O_k) < \tau\}$, 其中, $V(\cdot)$ 为脆弱性函数, τ 为系统安全阈值。其数学表征可扩展为: $V(O_k) = f(S_k, E_k, M_k)$, 其中, S_k 为对象结构强度, E_k 为能量吸收系数, M_k 为防护措施效能。区别于受灾体^[5]的被动属性, B 强调通过韧性设计提升 $V(\cdot)$ 函数的鲁棒性, 如在巷道支护中采用高强度、高韧性锚杆以增强 S_k 参数。

3) R 。 R 在系统论视角下被界定为具有能动干预能力的实体集合, 其通过信息获取与能量调控手段作用于事故演化进程。该实体系统包含人因要素(救援组织)、物质要素(物资、装备、设施、建筑等),

其中, R 中最能动的因素是人(组织), 人是 R 的核心, 其他物资和装备只有在人的精心设计和利用下才能发挥其抗灾作用。构建功能导向的四元闭环控制体系(图1): ①侦检机构。在应急管理系统设计初期, 应基于对事故触发因素、演变路径及影响范围的科学分析, 依托多源信息融合技术, 预先界定支撑事故态势感知能力构建所需的关键监测参数与信息源。②决策指挥机构。运用动态博弈论构建多目标体系(控制危险源、抢救人员和财产等)优化决策模型。③执行机构。在接收并精准解析决策指令后, 需进行任务分解与资源协同, 明确界定执行主体、响应时限及具体行动规程, 通过隔离(屏障或空间)、

抑制等技术改变 E 阻碍事故触发链条,抢救人员和财产等。④供给维护机构。为反馈控制系统运行提供能量和维护保养。与王红卫等^[11]基于实体属性的“组织-资源”二元分类法不同,采用功能系统论方法构建控制论视角下的功能完备性评价模型,强调功能完整性对抗灾安全、可靠的重要性。需特别指出的是, R 与 B 是一体两面。

4) E 。 E 在理论层面上被定义为独立于 A 、 B 与 R 之外的所有地理实体空间集合,但实际上,一起事故直接影响范围是有限的,所以实践中将 E 确定为事故可能影响的实体空间范围。 E 不属于 A 能量系统,也不属于 R ,尽管 E 是 A 能量作用对象,但通常不是被保护对象,因此,也不是 B 。从系统功能视角分析, E 通过信息、能量传递通道重构效应与物质输运阻抗效应影响物质、能量和信息的时空分布,进而影响 A 演化和 B 破坏进程。如瓦斯爆炸在巷道的拐角处会产生冲击波超压的叠加,致使巷道拐角附近的人员或设施受伤和破坏严重;采煤工作面的上隅角容易发生瓦斯集聚;独头巷道的火更容易被扑灭;有毒气体在风流作用下扩散;巷道内受困人员逃生困难等,均因为 E 影响了物质、能量和信息的迁移和传递。

事故灾难应急救援系统内的四元结构实体之间相互作用,物质、信息和能量在四者之间流动,角色会发生转换,如作为初始触发危险源的人属于 A ,但当事故发生后人又会成为 R 和 B ,而财产属于 B ,但当财产没有被保护好,其能量被触发后就会使财产变为 A 等。

1.2 事故灾难应急救援系统组成部分间交互作用

基于系统动力学原理,四元结构实体间作用关系呈现非线性耦合特征。根据笛卡尔积理论, n 元系统本应具有 $C(n, 2) = n(n-1)/2$ 种双向作用路径,1.1 节所述四元结构应有 6 种双向作用,即 12 种作用关系,但由于 B 与 R 是“一体两面”,因此, A 对 R 的作用 f_{AR} 由 A 对 B 的作用 f_{AB} 来代替,同样, B 对 A 、 R 及 E 的作用 f_{BA} 、 f_{BR} 、 f_{BE} 分别由 f_{RA} 、 f_{RB} 、 f_{RE} 来代替,ABRE 模型实际形成 8 种主导性交互模式,其作用矩阵可表述为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & f_{AB} & f_{AR} & f_{AE} \\ f_{BA} & 0 & f_{BR} & f_{BE} \\ f_{RA} & f_{RB} & 0 & f_{RE} \\ f_{EA} & f_{EB} & f_{ER} & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & f_{AB} & \emptyset & f_{AE} \\ \emptyset & 0 & \emptyset & \emptyset \\ f_{RA} & f_{RB} & 0 & f_{RE} \\ f_{EA} & f_{EB} & f_{ER} & 0 \end{bmatrix}$$

(1)

式中 $\emptyset$ 为由于 B 与 R 的一体两面导致的路径湮灭。

1) A 对 B 和 E 的作用(f_{AB} 、 f_{AE}) (图 1 中①作用通道)。 f_{AB} 主要与事故类型有关,在事故情景中一般直接用 A 类型来表征。煤矿事故报告时一般要求报告事故类型和影响范围,即 A 对 B 产生什么样的作用,作用的强度多大。 f_{AE} 主要是造成能量、物质和信息运移路线受阻,如煤矿突水井口被淹。

2) R 对 A 、 B 和 E 的作用(f_{RA} 、 f_{RB} 、 f_{RE}) (图 1 中②作用通道)。在用于决策的情景描述中,通常只将 A 、 B 、 R 和 E 作为情景来描述,而将 f_{RA} 、 f_{RB} 常被描述为活动^[9]、应急决策^[10]、情景驱动要素^[2]、任务^[5,23]、处置行动^[22]、救灾情景^[13]、应急措施^[24]等。 f_{RA} 能影响和改变事故发展进程,是应急救援过程中最活跃和能动的作用关系,因此,也是很多学者研究的重点。 f_{RA} 主要通过隔离或抑制来控制 A 能量释放的速率和方向; f_{RB} 主要是让 B 远离和避开 A 能量释放路径; R 能够设计和改变 E 。煤矿事故报告时一般要求报告已经采取的急救方案、措施及事故进展情况等,即 R 对 A 、 B 和 E 采取哪些行动。

3) E 对 A 、 R 和 B 的作用(f_{EA} 、 f_{ER} 、 f_{EB}) (上述①和②对 E 作用的反作用)。该作用主要表现为对 A 、 R 与 B 物质、能量与信息流动的影响,进而造成 A 能量集中、救援通道中断、资源配置失效等系统性障碍。因此,在事故情景描述中,必须系统表征 E 对物质、能量和信息的调控效应。

1.3 组成部分的时序演化过程(状态)

事故灾难应急救援系统组成部分间的动态交互作用,驱动系统状态随时间的推移而持续演化,形成不同时序节点的特定情景状态。核心要素包括:

1) 初始条件与时间基准。情景描述的核心功能在于支撑应急信息传递与救援决策制定。依据西蒙的决策理论框架,决策者受组织管理约束,需基于对当前状态的认知、自身知识储备及过往经验,生成可行的备选方案,预判方案结果,并依据其价值偏好进行方案抉择^[25]。由此可见:有效的救援决策不仅要求掌握系统当前的结构组成及其交互作用强度,更需明晰系统演化的初始输入,即事故肇因与起始时间点。这一初始状态是推断未来演化趋势(预期)的关键基础。如李小平等^[2]提出的情景要素致灾因子、仲秋雁等^[8]强调的引发事件,其核心内涵均指向系统演化的时间起点与初始诱因。需特别指出,即便当前表象状态相似,若初始诱因或起始时间点存在差异,其后续演化轨迹亦可能显著不同。

2) 情景状态动态演变。该要素聚焦于 A 、 B 、 R 、 E 等关键实体状态随时间 t 的变化过程(状态)。此处强调情景状态动态演变旨在客观刻画情景的历史演变轨迹,而非情景发展态势^[2]的主观表述。根据文献^[5],态指代突发事件在特定时间点(通常为当前)的状态表征,它是事件自身发展特征与既往人为干预共同作用于历史时段所形成的结果;势则指在当前态的基础上,事件在未来时段的发展趋向,由未来可能的状态序列构成。因此,态势隐含着对未来趋势的主观预测。然而,此类预测不可避免地受到个体知识水平和经验差异的影响,导致判断结果具有主观性和不确定性。在应急救援现场,决策权威链条明确^[25],客观、可验证的情景历史状态描述对于保障信息的一致性和决策的科学性至关重要,应优先于蕴含主观判断的态势描述。

进一步,该事故灾难应急救援系统的各层级组成部分,均可递归地运用结构组成、组成部分间交互作用及时序演化过程 3 个核心维度进行刻画与解析,直至分解至人类认知体系中最基础的思维构筑单元——概念^[26]。概念的运用极大地提升了信息交流效率,例如救护小队这一概念即高效地聚合了人员规模、组织架构、能力素质、装备配置等关键属性信息。

2 事故情景结构化表征的新三元组数学模型

前述分析从系统结构组成、组成部分间交互作用关系与时序演化过程 3 个维度构建了事故灾难情景的描述框架,该框架与王延章等^[27]提出的知识元理论在非常规突发事件情景建模中的核心思想比较契合。该理论被形式化定义为:对特定模型 m ($m \in M$),那么对应模型描述的共性知识可表示成 1 个三元组 $K_m = (N_m, S_m, C_m) \forall m \in M$,其中, N_m 为对应事物的概念及属性名称, S_m 为对应事物的属性状态集, C_m 为 $S_m \times S_m$ 上的映射关系集,描述属性状态变化及相互作用关系。据此,冯天威^[28]将应急信息资源分为:概念属性、状态以及映射关系 3 个方面。

2.1 新三元组模型构建

基于上述研究,提出事故灾难应急救援系统的新三元组模型,即事故灾难应急救援系统情景 $S(t)$ 的表征函数为:

$$S(t) = (ABRE, F(t), CS(t)) \quad (2)$$

式中: $ABRE$ 为四元结构组成参数变量,具体含义见

1.1 节; $F(t)$ 为四元结构组成部分间交互作用关系函数; $CS(t)$ 为四元结构组成部分的状态函数。

若已知系统各组成部分的初始状态 $CS(t_0)$:

$$CS(t_0) = (A(t_0), B(t_0), R(t_0), E(t_0)) \quad (3)$$

要素间交互作用关系函数:

$$F(t) = (f_{AB}(t), f_{AE}(t), f_{RA}(t), f_{RB}(t), f_{RE}(t), f_{EA}(t), f_{EB}(t), f_{ER}(t)) \quad (4)$$

式中 $f_{XY}(t)$ 为组成部分 X 对组成部分 Y 的作用强度函数($X, Y \in (A, B, R, E)$)。

则系统在任意时刻 t_n 的四元结构状态 $CS(t_n)$ 可表述为以下动态演化方程组:

$$CS(t_n) = (A(t_n), B(t_n), R(t_n), E(t_n)) = CS(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} F(t) dt \quad (5)$$

$$\begin{cases} A(t_n) = A(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [f_{RA}(t) + f_{EA}(t)] dt \\ B(t_n) = B(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [f_{AB}(t) + f_{RB}(t) + f_{EB}(t)] dt \\ R(t_n) = R(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} f_{ER}(t) dt \\ E(t_n) = E(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} [f_{RE}(t) + f_{AE}(t)] dt \end{cases} \quad (6)$$

救援决策机制可形式化表述为:在决策时刻 t_n , 若已知初始状态 $CS(t_0)$ (式 3)、交互关系函数 $F(t)$ (式 4) 及事故起始时间 t_0 , 即可通过式(5)或式(6)推演出 t_n 时刻的组成部分的状态 $CS(t_n)$ 。决策者基于价值偏好调整交互作用函数中的救援行动分量(如增强 $f_{RA}(t)$), 即可优化系统演化轨迹, 实现损失最小化的救援目标。当初始状态 $CS(t_0)$ 未知时, 可采用最近邻历史状态 $CS(t_{n-})$ 作为替代初始条件进行状态推演。

与知识元三元组静态知识表示框架模型相比, 事故灾难应急救援系统的新三元组模型为动态情景演化模型, 前者无时间变量, 后者时间为核心变量, 前者为用于知识表达的集合论, 后者为支持决策的、实现连续状态推演的微分方程。

2.2 新三元组模型证明

在事故灾难应急救援系统 $ABRE$ 模型中, 任一结构组成部分 (A 、 B 、 R 、 E) 受到其他组成部分的作用, 当经历 dt 时间后, 其状态由 $CS(t_0)$ 变为 $CS(t_n)$, 那么:

$$CS(t_n) = CS(t_0 + dt) = CS(t_0) + d(CS(t)) \quad (7)$$

两边求积分移项得:

$$CS(t_n) = CS(t_0) + \int_{t_0}^{t_n} \frac{d(CS(t))}{dt} dt \tag{8}$$

令

$$\frac{d(CS(t))}{dt} = F(t) \tag{9}$$

即得式(5)。式中 $F(t)$ 为 t 时刻结构组成部分状态变化快慢的表征,而结构组成部分状态变化快慢与受到的作用强度正相关,同时也与结构组成部分的“惯性”有关,而结构组成部分的“惯性”为常量,因此, $F(t)$ 即可以表征为受到其他组成部分作用的向量和。

该数学框架严格证明:给定系统结构组成 (A 、 B 、 R 、 E)、组成部分间交互作用关系向量 $F(t)$ 及初始状态向量 $CS(t_0)$,可构建完备的情景演化模型,为救援决策提供状态推演与干预效果预判的科学依据。

3 煤矿事故案例验证

3.1 煤矿火灾事故救援案例

根据《重庆能投渝新能源有限公司松藻煤矿“9·27”重大火灾事故调查报告》^[29],2020 年 9 月 27 日 0 时 20 分,重庆能投渝新能源有限公司松藻煤矿井下 2 号大倾角输送带运煤上山,运煤输送带回程托辊被卡死、磨穿形成破口,内部沉积粉煤被摩擦点燃,引燃输送带起火。事故地点位于二号大倾角输送带运煤上山,该上山斜长 919 m、倾角 28°、断面 12.032 m²。该输送带为钢丝绳芯阻燃花纹输送带。驱动滚筒下风侧 10 m 处安设有烟雾传感器,驱动滚筒、改向滚筒及盘式制动器安设有温度传感器,驱动滚筒上方安设有电动阀洒水装置,驱动滚筒附近安设有速度传感器,+5 m 煤仓受煤点处安设有撕裂保护,机尾张紧小车上方安设有张紧力下降限位保护。火灾造成附近的进风风门被烧毁,附近各种传感器、摄像头和洒水装置被烧毁,事故区域有压风自救系统及压缩氧自救器。事故死亡人员主要为 2324-1 采煤工作面作业人员,该面当班 18 人。该面倾斜长度平均 138 m,煤层倾角平均 34°。该工作面具有独立的通风系统,全负压 U 型通风,安设有 CH₄ 和 CO 传感器,在进风巷安设有 6 组压风自救器,回风巷剩余 65 m、运输巷剩余 42 m。松藻矿山救护大队 3 个救护小队 23 名指战员于 1:30 入井侦查搜救,松藻、南桐矿山救护大队共 15 个小队分 3 批先后入井,从下往上开展灭火搜救。13:51,救护

队将遇难的 16 名矿工全部运送出井,救援工作结束。当班井下 374 人,共搜救和组织撤离遇险人员 86 名,搜救遇难人员 16 名。

3.2 基于新三元组理论的事故灾难应急救援表征

按照新三元组理论,救援决策中需要的情景表征见表 2。

事故灾难应急救援情景表征要抓住其本质特征(要素),而事故灾难本质特征(要素)由问题或应用类型决定,如果将情景表征应用于救援决策中,那么,所有影响救援决策的主要因素都是本质特征(要素)。因此,结构组成要描述其性能、位置和数量,交互作用关系要素要描述作用内容、作用性质及作用强度,状态要素要描述各结构组成部分被作用后随时间变化产生的后果。

表 2 事故情景表征

Table 2 Accident scenario characterization	
情景要素	情景表征
结构组成	A (传送带与回程托辊摩擦导致托辊内积存粉煤着火引燃不阻燃胶带,胶带数量、性质、燃烧产物毒性,燃烧地点为井下 2 号大倾角输送带运煤上山), B (被困人员数量、位置分布、年龄情况,被困人员防护装备;风门等通风设施位置及特性), R (监测装备,决策人员知识水平和经验,被困人员自救,救护队救援,灭火等相关装备,压风自救器、氧气呼吸器等供给维护情况), E (巷道截面积、长度、形状,巷道壁岩体性质,风速风量)
交互作用关系	f_{AB} (人员中毒、高温灼伤、巷道顶板冒落、火风压), f_{AE} (高温和浓烟造成逃生和救援困难), f_{RA} (灭火、排烟), f_{RB} (搜救、顶板加固), f_{RE} (打通救援通道、提高能见度、降低环境温度、提供新鲜风流等), f_{EA} (风提供氧气、风带走烟气和热量、热量沿巷道岩体传播), f_{EB} 和 f_{ER} (只能通过巷道进入灾害中心、高温无法靠近,浓烟阻挡视线等)
过程要素(状态)	着火时间:2020 年 9 月 27 日 0 时 20 分; A 状态:燃烧程度、火势变化情况、其他可燃物情况; B 状态:被困人员伤亡状况、巷道顶板围岩稳定性; R 状态:救援队集结、受阻等随时间变化情况; E 状态:温度分布及随时间变化情况,能见度及变化情况等

上述 3 个方面的描述能够抓住事故救援系统情景的主要方面,情景表征更加简明扼要,可为救援决策形势预判及将来的情景构建提供完备的信息。

4 结 论

1) 在事故应急救援过程中,准确表征事故情景是救援决策的核心任务。不同事故的关键特征要素

存在差异,但其表征均可构建于一个统一的三元组特征框架;系统结构组成、组成部分间交互关系、时序演化过程。

2) 文中构建的情景表征数学模型,在限定条件下表征核心救援信息具有完备性。且该模型框架具

有开放性,其具体要素与参数可随认知深化与实践经验积累而迭代完善,但其核心三元组特征框架预期具有较高的稳定性。

3) B 与 E 的内部结构及其交互关系的精细化建模,是后续研究需重点深化的方向。

参 考 文 献

[1] 李用祥,杨周,夏扬. 华北平原系统应急救援体系的构建和实践[J]. 水利水电技术: 中英文, 2024, 55(增 2): 821-825.
LI Yongxiang, YANG Zhou, XIA Yang. The construction and practice of the emergency rescue system in the North China plain[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(S2): 821- 825.

[2] 李小平,徐家梁. 铁路突发事件应急救援群体决策情景冲突协调方法研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(6): 32-39.
LI Xiaoping, XU Jialiang. Research on coordination method of scenario conflict in railway emergency rescue group decision-making[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(6): 32-39.

[3] HERMAN K, ANTHONY J W. The year 2000: a framework for speculation on the next thirty-three years. [J]. American Journal of Sociology, 1968, 74(2): 663-665.

[4] NI Weijian, SHEN Quanle, LIU Tong, et al. Generating textual emergency plans for unconventional emergencies: a natural language processing approach[J]. Safety Science, 2023, 160: DOI: 10. 1016/j. ssci. 2022. 106047.

[5] 刘艺,李茂源,王欣芝,等. 大型活动踩踏事故“态-势”情景构建与组合推演方法[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9): 183-190.
LIU Yi, LI Maoyuan, WANG Xinzhi, et al. Research on ‘status and trends’ scenario construction and combination deduction method of stampede accident in large-scale activities[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 183-190.

[6] 吴倩. 灾害情景下运输机场运行脆弱性分析框架[J]. 中国应急管理科学, 2022(11): 75-85.
WU Qian. A framework for operational vulnerability analysis of transport airports under disaster events[J]. Journal of China Emergency Management Science, 2022(11): 75-85.

[7] 姜卉,黄钧. 罕见重大突发事件应急实时决策中的情景演变[J]. 华中科技大学学报: 社会科学版, 2009, 23(1): 104-108.
JIANG Hui, HUANG Jun. The study on the issues of scenario evolvement in real-time decision making of infrequent fatal emergencies[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Social Sciences Edition, 2009, 23(1): 104-108.

[8] 仲秋雁,郭艳敏,王宁,等. 基于知识元的非常规突发事件情景模型研究[J]. 情报科学, 2012, 30(1): 115-120.
ZHONG Qiuyan, GUO Yanmin, WANG Ning, et al. Research on unconventional emergency scenario model based on knowledge element[J]. Information Science, 2012, 30(1): 115-120.

[9] 李建伟. 基于知识元的突发事件情景研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
LI Jianwei. Emergency scenario research based on knowledge element[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

[10] 盛勇,孙庆云,王永明. 突发事件情景演化及关键要素提取方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(1): 17-21.
SHENG Yong, SUN Qingyun, WANG Yongming. Emergency scenario evolution and extraction method of key elements[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(1): 17-21.

[11] 王红卫,冯余佳,祁超. 基于知识元模型的应急情景构建研究[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2017, 39(4): 381-385, 421.
WANG Hongwei, FENG Yujia, QI Chao. Research on emergency scenario construction based on knowledge element model[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2017, 39(4): 381-385, 421.

[12] Department of Homeland Security. National planning frameworks [EB/OL]. [2024-05-07]. <https://www.fema.gov/emergency-managers/national-preparedness/frameworks>.

[13] 付磊. 突发重大传染病事件情景构建及其应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
FU Lei. Scenario construction and application toward major epidemic outbreak[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.

[14] 张跃兵,王凯,王志亮. 危险源理论研究及在事故预防中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(6): 10-16.
ZHANG Yuebing, WANG Kai, WANG Zhiliang. Theoretical research on hazards and its application in accident prevention[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(6): 10-16.

[15] 薛凯隆,崔欣超,祁云,等. 基于 DBO-SVM 的采空区煤自燃危险性预测[J]. 沈阳理工大学学报, 2024, 43(6):

85-90.

XUE Kailong, CUI Xinchao, QI Yun, et al. Prediction of spontaneous combustion fire in goaf based on DBO-SVM[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2024,43(6):85-90.

- [16] 张军波. 煤矿瓦斯爆炸应急救援组织管理研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2013.
ZHANG Junbo. Research on emergency rescue organization of mine gas explosion[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2013.
- [17] 颜玮祎,李飞雪,罗婷瑜. 承灾体视角下的城市自然灾害风险演化情景模拟:以常州中心城区为例[J]. 灾害学, 2025,40(2):211-218.
YAN Weiyi, LI Feixue, LUO Tingyu. Scenario simulation of urban natural hazard risk evolution under the perspective of elements at risk: a case study of changzhou central area[J]. Journal of Catastrophology, 2025, 40(2):211-218.
- [18] 黄弘,范维澄. 构建“安全韧性城市”:概念、理论与实施路径[J]. 北京行政学院学报,2024(2):1-9.
HUANG Hong, FAN Weicheng. Building "safe and resilient cities": concepts, theories, and implementation approaches[J]. Journal of Beijing Administrative College, 2024(2):1-9.
- [19] 王旭坪,杨相英,樊双蛟,等. 非常规突发事件情景构建与推演方法体系研究[J]. 电子科技大学学报:社科版, 2013,15(1):22-27.
WANG Xuping, YANG Xiangying, FAN Shuangjiao, et al. A methodology of scenario construction and deduction of unconventional emergency[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology: Social Sciences Edition, 2013,15(1):22-27.
- [20] 张青松,张秋月,罗星娜. 基于公共安全三角形的危险品航空运输情景构建[J]. 综合运输,2023,45(2):120-125, 171.
ZHANG Qingsong, ZHANG Qiuyue, LUO Xingna. Construction of dangerous goods air transport scenario based on public safety triangle[J]. China Transportation Review, 2023,45(2):120-125,171.
- [21] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报,1996,5(4):8-19.
SHI Peijun. Further discussion the theory and practice of disaster research[J]. Journal of Natural Disasters, 1996,5(4):8-19.
- [22] 王旭坪,樊双蛟,阮俊虎. 基于情景的自然灾害应急管理系统框架[J]. 电子科技大学学报:社科版,2013,15(3):17-21.
WANG Xuping, FAN Shuangjiao, RUAN Junhu. System framework of natural disaster emergency management based on scenario[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology: Social Sciences Edition, 2013,15(3):17-21.
- [23] 盛伟,关城,张苏,等. 基于情景相似的电网企业台风灾害应急决策[J]. 中国安全科学学报,2023,33(11):174-180.
SHENG Wei, GUAN Cheng, ZHANG Su, et al. Research on typhoon disaster emergency decision-making of power grid enterprises based on similar scenarios[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(11):174-180.
- [24] 于超,邬开俊,张梦媛,等. 非常规突发事件的情景构建与演化分析[J]. 兰州交通大学学报,2020,39(3):39-46.
YU Chao, WU Kaijun, ZHANG Mengyuan, et al. Scenario construction and evolution analysis of unconventional emergencies[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2020,39(3):39-46.
- [25] 赫伯特·西蒙. 管理行为[M]. 北京:机械工业出版社,2013:71.
- [26] 彭漪涟,马钦荣. 逻辑学大辞典(修订本)[M]. 上海:上海辞书出版社,2010:282-283.
- [27] 王延章. 模型管理的知识及其表示方法[J]. 系统工程学报,2011,26(6):850-856.
WANG Yanzhang. Knowledge and representation of model management[J]. Journal of Systems Engineering, 2011, 26(6):850-856.
- [28] 冯天威. 应急信息资源元数据管理模型及其应用[D]. 大连:大连理工大学,2009.
FENG Tianwei. Emergency information resources metadata management model and its applications[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [29] 重庆煤矿安全监察局. 重庆能投渝新能源有限公司松藻煤矿“9·27”重大火灾事故调查报告及处理情况[EB/OL] (2021-03-26) https://jjc.cq.gov.cn/web/article/2021/03/26/1280964203237416960/web/content_1280964203237416960.htm.



作者简介: 国汉君 (1965—),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士,研究员,主要从事安全生产与应急救援等方面的工作。E-mail: harryguozz@ 163.com。