

中文引用格式:倪慧荟,姚晓晖,初玉,等.集成“能力-时效-决策”的应急处置效果预评估模型[J].中国安全科学学报,2020,30(12):148-156.

英文引用格式:NI Huihui, YAO Xiaohui, CHU Yu, et al. A capacity-efficiency-decision integrated pre-assessment model for effectiveness of emergency plans[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(12): 148-156.

集成“能力-时效-决策”的应急处置 效果预评估模型^{*}

倪慧荟¹ 副研究员, 姚晓晖¹ 副研究员, 初玉² 高级工程师, 石彪^{**3} 副研究员

(1 北京市劳动保护科学研究所 安全与应急管理研究室 北京 100054;

2 中国科学院 科技创新发展中心 北京 100190; 3 中国科学院 科技战略咨询研究院 北京 100190)

中图分类号: X928.9

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn 1003-3033.2020.12.021

基金项目: 国家自然科学基金资助(L1724043); 国家重点研发计划子课题(2018YFK0822805)。

【摘要】 为帮助应急指挥官优化任务调度和资源配置, 首先, 分析应急处置的基本模式, 并定义包括行动目标、行动模块、应急资源、指挥者等基本元素在内的应急处置关系结构模型; 其次, 利用时效性评估、广义优先关系(GPRs)、C2组织架构(C2OS)等理论, 建立能力满足度、时效性、决策质量等单项评估函数; 然后, 组合得到集成“能力-时效-决策”的应急处置效果预评估模型; 最后, 结合算例对不同处置方案进行预评估和比较分析, 并验证该模型的有效性。结果表明: 集成“能力-时效-决策”的评估模型可满足通用的应急处置效果预评估需求; 存在诸多途径可以增强应急处置预期效果, 包括改良资源配置及赋能效率、优化处置行动及其GPRs结构、完善指挥层级架构等。

【关键词】 能力-时效-决策; 应急处置; 效果预评估; 广义优先关系(GPRs); 决策质量

A capacity-efficiency-decision integrated pre-assessment model for effectiveness of emergency plans

NI Huihui¹, YAO Xiaohui¹, CHU Yu², SHI Biao³

(1 Lab of Safety and Emergency Management, Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100054, China; 2 Science and Technology Innovation and Development Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3 Institute of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to optimize task scheduling and resource allocation, firstly, basic pattern of emergency disposal was analyzed, and a structural model of emergency disposal with fundamental elements like objects, action modules, resources, decision-makers was defined. Secondly, single assessment functions, including capacity satisfaction, action efficiency and decision quality were constructed successively by incorporating theories of efficiency evaluation, GPRs and command & control organizational

* 文章编号: 1003-3033(2020)12-0148-09; 收稿日期: 2020-09-09; 修稿日期: 2020-11-16

** 通信作者: 石彪(1982—), 男, 甘肃渭源人, 博士, 副研究员, 主要从事风险管理、应急管理、科技安全等方面的研究。E-mail: shibiao@casisd.cn。

structure (C2OS). Then, a capacity-efficiency-decision integrated pre-assessment model for effectiveness of emergency plans was established. Finally, different disposal plans were assessed and compared through case studies, and effectiveness of the model was verified. The results show that the integrated model can be applied to pre-assess expected effectiveness of emergency plans which can be improved by various measures, such as improving allocation and empowerment effectiveness of resources, optimizing selection and GPRs network of action modules, and refining hierarchy of decision-makers.

Keywords: capacity-efficiency-decision; emergency disposal; integrated pre-assessment; generalized precedence relations (GPRs); decision quality

0 引言

评估问题广泛存在于各类管理工作中。科学的评估对于合理决策、提升管理效能具有重要的作用。应急管理领域的评估按照适用的时段,通常可分为事前评价、事中评价、事后评价 3 大类^[1]。其中,事中评价主要服务于事件发生后的应急处置决策,包括评价事件演化态势(如可减缓性^[2])、评价承灾体状态(如可救援性^[3])等。在众多事中评价问题中,应急处置效果的预评估是指在实施具体应急处置行动之前预判可能的效果,从而帮助应急指挥官更合理地进行任务调度。因此,应急处置效果预评估在应急处置决策中具有非常重要的地位^[4]。

在现有应急效果评估研究中,部分学者面向具体的应急管理工作尝试建立效果或能力评估模型。如冯园等^[5]基于柯氏模型和二元语义建立了应急预案培训效果综合评估方法;曾跃辉等^[6]基于突变理论构建了应急救援能力评价方法。部分学者针对不同类型的突发事件,探索构建应急处置效果评估模型。如王震宇等^[7]基于灰色层次分析法,建立了高速公路重大交通事件应急处置效果评估模型;潘静静等^[8]采用德尔菲法和层次分析法,初步构建了一个能体现传染病暴发事件应急处置效果的评价模型;王博等^[9]结合自然灾害类事件的特点,建立了“主+辅”相结合的指标体系,在此基础上构建了应急处置效果评估模型。还有部分学者在应急物流领域尝试应用运筹学探索了应急效果评估问题。如 ÖZDAMAR^[10]从交货时间、OH^[11]从调度费用、JI Guojun^[12]和吕伟^[13]等从资源满足度等角度分别构建了评估模型。总体而言,前期的研究成果或主要作用于事前阶段,难以应用到事中决策;或因为采用多层级指标体系综合打分作为评估机制而导致其主观性及实施难度较大;或定义的问题过于微观,应用范围具有明显的局限性。

鉴于此,笔者拟考虑应急处置关系结构,完成对

应急目标、应急行动、应急资源等元素及其相互关系的定义,构建一种集成“能力-时效-决策”等核心表现要素的应急处置效果预评估模型,以期能为不同类型突发事件的应急处置效果预判问题提供新的解决方案,克服主观赋分机制的缺陷,实现多因素全面评估。

1 应急处置的基本模式

现实中的应急处置可以被归纳为如图 1 所示的一般化模式(图 1 中的 x, y, z 表示不同目标和阶段的序号):①总指挥接收与事件相关的信息,分析得到应急处置总目标,并结合应急预案将总目标分解为分阶段分任务的子目标。②每个子目标进一步分解为基本独立的应急行动模块,各个应急行动模块之间具有次序关系,每个应急行动需要一定的工期才能完成。③每个应急行动模块会被分配给对应的指挥者及处置资源,从而在一定程度上满足应急目标的能力要求。其中,指挥者负责信息处理、上下级通信以及具体的决策指挥,处置资源通常是指应急装备和应急物资。

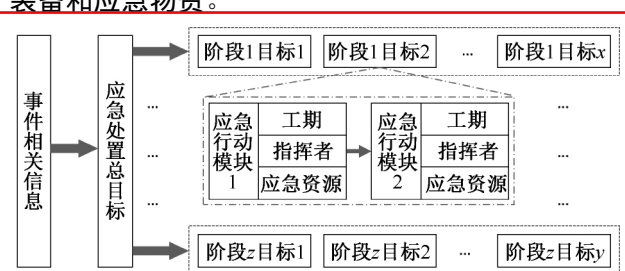


图 1 应急处置通用模式示例

Fig.1 Example of general pattern of emergency disposal

如果暂且忽略具体的应急处置操作动作,应急处置过程主要涉及到对行动目标的分解,对行动模块的安排,对资源以及行动指挥者的配置。因此,从实质表现的角度来看,影响应急处置效果好坏的主要因素包括:①应急处置行动目标与行动模块的关系;②行动模块与资源之间的关系;③行动模块的时

间关系,包括模块之间的次序关系、模块的开始时间以及工期;④**应急行动的指挥管理负载**,包括**指挥者与行动模块之间的关系和不同指挥者之间的层级关系**。因此,研究问题被归纳为:在事中处置阶段,得到应急目标需求信息、行动模块信息、应急资源信息以及指挥者信息的情况下,如何构造出整个应急处置流程效果的预评估模型。

2 应急处置的关系结构

2.1 应急处置基本元素

根据第1节的分析,一般的应急处置过程中主要涉及**应急行动目标、行动模块、资源、行动指挥者**4大类元素。参考C2组织架构(Command & Control Organizational Structure, C2OS)的相关原理^[14],对这些基本元素进行建模。

1) 应急行动目标。这是一种相对宏观的指导信息的集合,它通过分析突发事件基本情况,提出对于应急能力(此处所指的应急能力与引言部分提及的基于多层级指标体系叠加专家打分机制而定义的能力不同,是指通过应急行动以及应急资源达成某项功能的水平,如扑灭小范围初起火灾的能力可能由使用灭火器这一行动以及灭火器这一资源的配备情况所决定)、应急行动模块、应急处置时间窗等需求。对于*i*阶段以及该阶段内的行动目标*j*,其涉及的主要属性包括:①行动目标能力需求 E_{ijc} ,表示*i*阶段的目标*j*需要类型为*c*的能力的大小,其中 $c \in C$, C 为能力类型集;②行动模块集 M_{ij} ,根据行动目标筛选出的待执行的行动模块集合;③各行动模块之间的次序关系,考虑到应急处置中行动模块之间的复杂性,采用广义优先关系(Generalized Precedence Relations, GPRs)网络^[15]表示;④全部处置流程完成的时间窗,可表示为区间数 $[t_l, t_h]$,2个端点值分别代表了最早和最晚的完成时间。

2) 行动模块。假设每个行动模块上配有默认的资源,并具有默认的能力,则对于行动模块*m*而言,涉及如下主要属性:①模块可提供的默认能力 S_{mc} ;②模块初始资源配置量 K_{mk} ,其中*k*为资源种类;③模块工期 G_m ,部分模块工期固定,有些模块的工期则与其关键资源 k^* 的量 N_{k^*} 有关,此处将之简化处理为分段线性函数关系 $G_m = g_{mk^*}(N_{k^*})$,当 N_{k^*} 较低时,工期较长;当 N_{k^*} 突破上限后,工期将压缩至极小值;④模块开始时间 t_{ijm}^s 以及结束时间 t_{ijm}^e ,

满足关系 $t_{ijm}^e = t_{ijm}^s + G_m$ 。

3) 应急资源。每种资源涉及的主要属性就是资源的能力。可供配置的资源数量越多,资源对应可提供能力就越强。随着资源量达到饱和,能力也会达到上限。因此,资源能力 $C_{kc} = f_{kc}(N_k)$ 同样可近似处理为分段线性函数。资源工期与资源能力的曲线如图2所示。

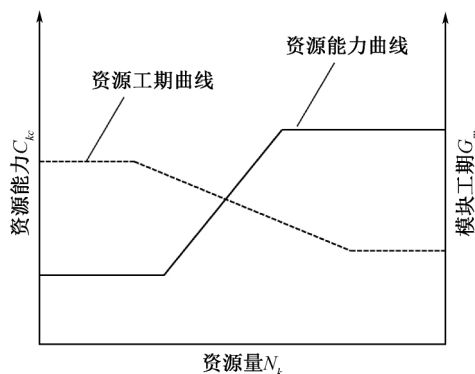


图2 资源工期与资源能力曲线

Fig.2 Resource-period & resource-capacity curves

4) 指挥者。指挥者通常被分配至不同模块,担负信息沟通和资源调度的基本职责,既有内部的指挥,也有外部的协调。不同指挥者之间还可能存在上下层级关系。指挥者*d*涉及的主要属性是决策负载范围 L_d ,决策负载是指指挥者为了完成参与的行动模块需要承担的决策工作量。决策负载范围是一个区间数,表示为 $[l_l, l_h]$,2个端点值分别代表指挥者能承受的决策负载的下限和上限。

2.2 应急处置元素关系

应急行动目标、行动模块、资源、指挥者在应急处置全流程中相互关联,建模中这些关联可以用如下变量表示(其中行动模块与资源之间表现为数量关系,其余则是0-1变量)。

1) 行动目标与模块的关系 x_{ijm} :

$$x_{ijm} = \begin{cases} 1 & \text{阶段 } i \text{ 的行动目标 } j \text{ 选择行动模块 } m \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

2) 行动模块与资源的关系 y_{ijmk} :

$y_{ijmk} = N_k$,是指阶段*i*的行动目标*j*对应的模块*m*配置的资源*k*的数量。

3) 指挥者与行动模块的关系 e_{md} :

$$e_{md} = \begin{cases} 1 & \text{指挥者 } d \text{ 与行动模块 } m \text{ 存在指挥关系} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

4) 不同指挥者之间的关系 $h_{d_1 d_2}$:

$$h_{d_1 d_2} = \begin{cases} 1 & \text{指挥者 } d_1 \text{ 与 } d_2 \text{ 存在有向链接} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

3 预评估模型构建

3.1 模型构建思路

不考虑具体操作细节的情况下,应急处置全过程主要受应急行动目标、行动模块、资源和指挥者的影响。因此,为了衡量应急处置的效果,可以从 3 个方面定量研究。一是应急行动目标提出的能力需求是否得到了较好的满足;二是应急处置的时效性是否能达到预期的时间窗要求;三是指挥决策的负载和质量是否理想(暂不考虑应急处置经济成本的因素,假定应急处置具有充分的经济投入支撑)。

从上述 3 个维度出发,考虑分别使用能力满足度、时效性、C2 组织架构等相关理论,先构造能力、时效、决策维度的单项效果预评估函数,在此基础上最后整合得到集成的应急处置效果预评估模型。

3.2 应急能力的满足度

应急行动目标会提出能力需求,而选择的行动模块以及模块上配置的资源则决定了实际能提供的能力水平。比较实际能力与目标需求可以从能力角度刻画应急处置的预期效果。考虑到归一化处理的要求,应急能力满足度采用比值法进行计算。

假设 N_M 是阶段 i 的行动目标 j 对应的行动模块总数,则该目标可获得类型为 c 的能力大小 C_{ijc} 为:

$$C_{ijc} = \sum_{m=1}^{N_M} x_{ijm} \cdot [\max(f_{kc}(y_{ijmk}), S_{mc})] \quad (1)$$

根据比值法,某项能力的满足度就是其实际输出值与所需目标值之间的比值,取值范围 $[0, 1]$ 。于是,对于上述行动目标而言,类型为 c 的能力的满足度 R_{ijc} 为:

$$R_{ijc} = \begin{cases} 1, & C_{ijc} \geq E_{ijc} \\ \frac{C_{ijc}}{E_{ijc}}, & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

单个行动目标的能力满足度应是所有类型能力的满足度的均值。于是,对于整个行动目标 j 而言,其整体能力满足度 R_{ij} 可表示为:

$$R_{ij} = \frac{\sum_{c \in A_{ij}} R_{ijc}}{|A_{ij}|}$$

其中 $A_{ij} = \{c \mid E_{ijc} > 0\}$ (3)

式中 A_{ij} 为行动目标 j 所需能力类型的集合,故 $|A_{ij}|$ 为上述能力类型的总数。再进一步推广至全部行动

目标时,整个应急处置的能力满足度 R 就是全过程中所有应急行动目标的能力满足度的均值。于是,可得到以下计算式:

$$R = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} R_{ij}}{|A|} \quad (4)$$

式中 $|A|$ 为应急处置完整流程中所有应急行动目标的个数。由此可知:应急能力满足度 R 是关于 x_{ijm} 、 y_{ijmk} 的函数。

3.3 应急处置的时效性

应急处置所消耗的时间是评估应急处置效果的一个非常重要的因素。应急处置的整个过程是由不同阶段的应急目标所对应的应急行动模块组成。每个模块完成得越快,应急处置整体进程就越短。整个应急处置的完成时间受到每个模块所用工期以及所有模块的 GPRs 网络结构的影响。

李加莲等^[16]论证了利用 Sigmoid 函数刻画整个应急处置流程的时效性与完成时间关系的可行性。当应急处置的时间窗为 $[t_l, t_h]$ 时,二者之间满足下式关系:

$$u = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{2\ln\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)}{t_h - t_l} \left(t - \frac{t_l + t_h}{2}\right)\right)}, \quad t \geq 0 \quad (5)$$

式中: u 为时效性; t 为应急处置的最终完成时间。当 $t = t_h$ 时 $\mu = \varepsilon$ (ε 是一个接近于 0 的足够小的数); 当 $t = t_l$ 时 μ 取值逼近 1。可见:时效性函数随时间 t 单调递减,取值区间为 $[0, 1]$,值越大说明时效性越强。超出时间窗范围的,要么时效性达到顶峰,要么归 0。图 3 给出了应急处置时效性函数曲线的一个具体示例。

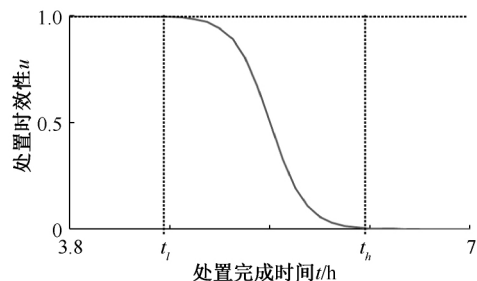


图 3 时效性函数曲线示例

Fig.3 Example of efficiency function curve

考虑到整个应急处置由模块的 GPRs 网络构成,因此,处置完成时间满足下式

$$t = \max_{x_{ijm} \neq 0} t_{ijm}^f = \max_{x_{ijm} \neq 0} [t_{ijm}^s + g_{mk^*}(y_{ijmk^*})] \quad (6)$$

由此可知: 应急处置时效性 u 是关于 x_{ijm} 、 y_{ijmk} 以及 t_{ijm}^s 的函数。当给定整个应急处置的时间窗口时, 若前序行动模块出现延误, 就可能需要缩短后序行动模块的工期, 否则整个应急处置的时效性将受到影响。

3.4 应急行动的决策质量

应急行动的顺利完成需要指挥者良好的决策。因此, 应急处置的效果好坏还与指挥者能否有效完成决策工作息息相关。笔者提出将决策质量作为应急处置效果评估的一个重要维度。

决策质量是以决策负载为变量的函数。决策负载是内部负载(源于内部指挥)和外部负载(可进一步分为同级协调的直接外部负载和被上级指挥的间接外部负载)的总和。每一种类型的决策负载基本均由应急行动模块的决策负载强度(即每个参与该模块的指挥者在单位时间内的平均决策负载)以及模块工期决定。

假设 w_I 、 w_E 、 w_A 分别为内部负载、直接外部负载、间接外部负载的权重系数, F_m 为行动模块 m 的决策负载强度, N_D 为模块 m 内所有指挥者的总数, 则可得到如下定义式:

1) 指挥者 d 对行动模块 m 的内部负载 I_{dm} 为:

$$I_{dm} = w_I \cdot G_m \cdot F_m \cdot e_{md} \quad (7)$$

2) 指挥者 d 对行动模块 m 的直接外部负载 E_{dm} 为:

$$E_{dm} = w_E \cdot F_m \cdot \sum_{d_1=1}^{N_D} D_{dd_1m} \quad (8)$$

$$\text{其中 } D_{dd_1m} = e_{md} \cdot e_{md_1} \cdot G_m$$

式中: d_1 与 d 为共同被分配于行动模块 m 中的处于同一层级的指挥者; e_{md_1} 为 d_1 与模块 m 之间的关系形式与 e_{md} 的定义一致。

3) 指挥者 d 对模块 m 的间接外部负载 A_{dm} 为:

$$A_{dm} = w_A \cdot F_m \cdot r_{dm} \cdot \sum_{d_2=1}^{N_D} e_{md_2} \quad (9)$$

式中: d_2 为 d 的上级指挥人员, d 需要接受该上级指挥人员的决策指挥才能完成 m ; r_{dm} 表示指挥者 d 在行动模块 m 内的总体指挥关系。假设 D_m 为参与行动模块 m 的指挥者集合, P_{dd_2} 为根据指挥者层级关系 $h_{d_1d_2}$ 得出的有向连通判断矩阵, 则有:

$$r_{dm} = \begin{cases} 1, & \text{满足 } \prod_{d_2 \in D_m} P_{dd_2} = 1 \text{ 且} \\ & \forall d' \in \{d' \mid \prod_{d_2 \in D_m} P_{dd_2} = 1 \cap d' \neq d\}, \\ & \text{满足 } P_{d'd_2} = 0 \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$\text{其中 } P_{dd_2} = \begin{cases} 1, & \text{当指挥者 } d \text{ 到 } d_2 \text{ 存在有向链接} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (10)$$

4) 指挥者 d 对模块 m 的决策负载 W_{dm} 为:

$$W_{dm} = I_{dm} + E_{dm} + A_{dm} \quad (11)$$

5) 行动模块 m 的决策负载 W_m 为:

$$W_m = \sum_{d \in D_m} W_{dm} = \sum_{d \in D_m} (I_{dm} + E_{dm} + A_{dm}) \quad (12)$$

结合第 2.1 节给出的决策负载范围的定义, 指挥者 d 在应急行动模块 m 中的决策质量 q_{dm} 为其决策负载与决策负载范围的函数。考虑到指挥者决策负载范围随等级不同而变化, 假定指挥者分为 1、2、3 共 3 个层级, 其 L_d 分别为 [1, 2]、[3, 5]、[4, 6], 则 q_{dm} 可简化处理为以下 3 种分段函数。其函数示例如图 4 所示。

$$q_{dm}^1 = \begin{cases} 1 & W_{dm} \leq 1 \\ -W_{dm} + 2 & 1 < W_{dm} \leq 2 \\ 0 & 2 < W_{dm} \end{cases} \quad (13)$$

$$q_{dm}^2 = \begin{cases} 1 & W_{dm} \leq 3 \\ -0.5W_{dm} + 2.5 & 3 < W_{dm} \leq 5 \\ 0 & 5 < W_{dm} \end{cases} \quad (14)$$

$$q_{dm}^3 = \begin{cases} 1 & W_{dm} \leq 4 \\ -0.5W_{dm} + 3 & 4 < W_{dm} \leq 6 \\ 0 & 6 < W_{dm} \end{cases} \quad (15)$$

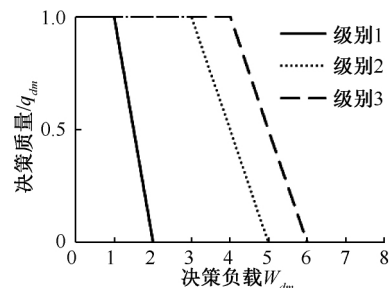


图 4 不同层级指挥者决策质量函数曲线

Fig.4 Decision quality function curves of emergency commanders at different levels

于是, 应急行动 m 的决策质量 Q_m 可表示为参与该模块的所有指挥者的决策质量均值, 即

$$Q_m = \frac{\sum_{d \in D_m} q_{dm}}{N_D} \quad (16)$$

整个应急处置的决策质量 Q 就是所有应急行动模块的决策质量的均值,即

$$Q = \frac{\sum_{m \in M} Q_m}{|M|} \quad (17)$$

式中: M 为完整应急处置中所有行动模块的集合; $|M|$ 为该集合中包含的行动模块个数。由此可知: Q 为关于 $x_{ijm}、y_{ijmk}、e_{md}、h_{d1d2}$ 的函数。

3.5 预评估模型

将能力满足度、时效性、决策质量等单项效果预评估函数组合即可得到集成的应急处置效果预评估模型。考虑到 3.2 至 3.4 节构建的 3 个单项函数环环相扣且都在 $[0, 1]$ 取值,因此采用加权乘积的形式来构建预评估模型。假设 $w_R、w_u、w_Q$ 分别表示能力满足度、时效性、决策质量的权重系数,则应急处置的最终效果 V 的预评估函数为:

$$V = R^{w_R} \cdot u^{w_u} \cdot Q^{w_Q} \quad (18)$$

其中 $w_R + w_u + w_Q = 1$

4 算 例

4.1 案例基本信息

假设某一项应急处置需要通过 2 阶段共计 5 项行动目标实现,所有目标共涉及 11 种能力。阶段、目标与能力需求的关系见表 1。其中,部分目标存在 GPRs,目标 4 要在目标 3 开始后 0.5 个时间单位才能开始;目标 5 要在目标 2 开始后 0.5 个时间单位才能开始。可供选择的应急行动模块有 6 种,所有模块共涉及 9 种资源。行动模块默认的能力与资源配置见表 2。关键资源量会影响到能力输出与模块工期,表现为线性函数关系(类似图 2),当 2 个端点值确定时该类函数形式即被确定。各类型资源量与模块工期之间的关系见表 3。各类型资源量与所能提供能力之间的关系见表 4。

表 1 行动目标与能力需求关系

Tab.1 Relationship between action objects and capacity demands

目标编号 j	能力需求 E_{ije}											所属阶段 i
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	—	1.2	2	—	—	—	—	—	—	—	—	1
2	8	—	—	2.5	4.5	4.5	3	4	—	—	—	2
3/4	5	—	—	—	—	—	—	—	7.5	4	2.5	2
5	5	—	—	—	—	—	—	—	7.5	4.8	3	2

表 2 行动模块默认的能力与资源配置

Tab.2 Default capacity and resource deployment of action modules

模块编号	默认能力配置 S_{mc}											默认资源配置 K_{mk}								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—
3	3	—	—	2	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	3	—	—	—	30
4	2	—	—	—	—	—	3	4	—	—	—	—	—	—	20	—	20	—	—	20
5	3	—	—	—	—	3	—	—	—	—	—	—	—	—	30	—	—	—	—	20
6	4	—	—	—	—	—	—	—	6	2	2	—	—	—	40	—	—	3	4	40

表 3 各行动模块的资源量与工期关系

Tab.3 Relationship between resource amount and action periods

模块编号	关键资源	端点值(资源量,工期)
1	无	工期固定为 2 个时间单位
2	无	工期固定为 2 个时间单位
3/5	9	(20, 0.6) (40, 0.4)
4	4	(20, 1.1) (40, 0.9)
6	9	(40, 1.8) (60, 1.4)

假设共有 6 个指挥者。指挥者 d_1 为等级最高的级别 3;指挥者 $d_2、d_3、d_4$ 属于级别 2;指挥者 d_5 和 d_6 属于等级最低的级别 1。各级别的决策质量曲线满足图 3 情况。假定决策负载强度均为 1,现已知处置完毕的时间窗为 $[4.8, 6]$ 。

4.2 应急处置方案信息

假设现有 2 个具体的处置方案。

1) 方案 1。本方案中各目标与行动模块的

表4 各行动模块的资源量与能力关系

Tab.4 Relationship between resource amount and capacity

资源编号	能力编号	端点值(资源量,能力值)
1	2	(1, 0.4)
2	2	(1, 0.6)
3	3	(1, 1)
4	1	(1, 0.1)
5	4	(1, 0.5)
6	8	(1, 0.2)
7	10	(1, 0.8)
8	11	(1, 0.5)
9	5/6/7/9	(1, 1.5)

关系 x_{ijm} 见表5。每个行动模块上的资源采用默认配置(假定资源量随时补给,始终保持配置水平)。

若按照表5选取的行动模块按照从左到右、从

上到下编号,可得到8个工序,再结合案例基本信息中的GPRs,可其网络结构如图5所示。本方案中全部启用6名指挥者。其与各行动模块之间的分派关系 e_{md} 见表6。同时,各指挥者之间建立的层级关系如图6所示。

表5 各行动目标与行动模块的关系

Tab.5 Action modules with corresponding objects

阶段编号	目标编号	行动模块编号					
		1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	—	—	—	—
2	2	—	—	1	1	1	—
2	3	—	—	—	—	—	1
2	4	—	—	—	—	—	1
2	5	—	—	—	—	—	1

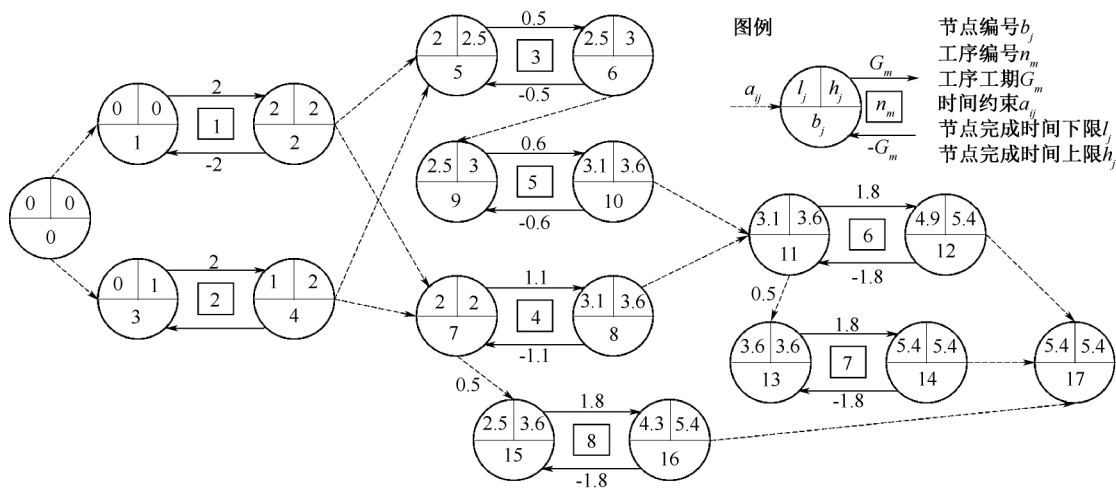


图5 行动模块的GPRs网络

Fig.5 GPRs network of emergency action modules

表6 各指挥者与行动模块的关系

Tab.6 Decision-makers with corresponding action modules

阶段编号	目标编号	模块编号	指挥者编号					
			1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	—	1	—	—
1	1	2	—	—	—	—	1	—
2	2	3	—	—	1	—	—	—
2	2	4	—	—	—	—	—	1
2	2	5	—	—	1	—	—	—
2	3	6	—	1	—	—	—	—
2	4	6	—	—	1	—	—	—
2	5	6	—	—	—	1	—	—

2) 方案2。为方便与方案1比较,方案2仅改变行动模块中的资源量,更改后的模块资源配置见表7,不再使用默认配置。表中用*号标注了与表2不同的行动模块。

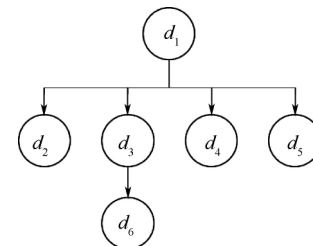


图6 指挥者的层级结构

Fig.6 Hierarchy of decision-makers

方案2中的行动模块筛选结果、模块之间的广义优先关系、指挥者分派及其层级结构等要素则与方案1完全一致。

4.3 结果分析

为便于计算,假设3个单项评估函数的权重

分别为0.4、0.4、0.2(该设定仅为举例)

不具有普适性,有关权重设置的问题可参阅其他相关研究^[17-18]),则应用第 3.5 节中的预评估模型,得到结果见表 8。数据显示,方案 2 无论在能力满足度还是时效性方面均优于方案 1,最终评估效果得分也优于方案 1。

表 7 更改后的模块资源配置

Tab.7 Modified resource deployment of action modules

阶段 编号	目标 编号	模块 编号	更改资源配置(方案二)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1*	3	—	—	—	—	—	—	—	—
1	1	2*	—	—	2	—	—	—	—	—	—
2	2	3	—	—	—	30	3	—	—	—	30
2	2	4	—	—	—	20	—	20	—	—	20
2	2	5	—	—	—	30	—	—	—	—	20
2	3	6	—	—	—	40	—	—	3	4	40
2	4	6*	—	—	—	40	—	—	3	4	45
2	5	6	—	—	—	40	—	—	3	4	40

表 8 2 个方案的模型评估结果

Tab.8 Model assessment results of 2 plans

方案	能力满足度	时效性	决策质量	最终效果
1	0.73	0.5	0.98	0.69
2	0.81	0.66	0.98	0.78

探究原因可知:在保持其他要素不变的情况下,方案 2 在行动模块(1,1,1)、(1,1,2)以及(2,4,6)上(表 7 中已用* 号标示)提高了配置的资源量,从而使得模块能力提升,进而提高了整体能力满足度。另一方面,模块(2,4,6)的关键资源量提升,亦带来了工期的缩短,由于该模块处在整个 GPRs 网络的关键路径上,故整体时效性也提高了,从而方案整体效果得以提升。由此可知:提升资源配置的力度和精度可以有效增强应急处置的预期效果。

为验证模型有效性,对 35 名应急管理行业人员(其中 10 名专家、25 名实践从业者)进行了匿名问卷调查,要求其根据案例信息对 2 个方案的处置效果进行经验评判,结果见表 9(表中数字表示选择对应选项的人数比例)。可见,被调查者对于方案 2 优于方案 1 的观点基本趋同,这与文中预评估模型计算结果基本一致。

表 9 2 个方案的经验评判结果

Tab.9 Empirical evaluation results of 2 plans %

比较维度	方案 2 相对于方案 1				
	显著 优于	略微 优于	几乎 等同	略微 逊色	显著 逊色
资源配置	77.14	22.86	0	0	0
处置效率	91.43	8.57	0	0	0
总体效果	85.71	14.29	0	0	0

5 结 论

1) 基于能力满足度、时效性、决策质量等函数,建立集成“能力-时效-决策”的评估模型,所有变量输入数据由应急处置行动本身特征决定,克服主观赋分机制的缺陷,可满足通用的应急处置效果预评估需求。

2) 预评估模型提供了一种分析框架,据此可知:强化资源配置,优化行动模块的选择及其 GPRs 网络结构、提升资源赋能效率、改善指挥者分派及其层级架构等措施能从不同维度达到提升应急处置总体效果的目标。

3) 文中模型构建过程附带了一些简化处理的假设,后续研究应进一步关注如何放宽相关假设,扩展得到更一般化的结论。

参 考 文 献

[1] 陈安,等. 综合风险分析和应急评价[M]. 北京: 科学出版社,2020: 14-17.

[2] 迟菲,陈安. 突发事件的可减缓性评价模型的研究[J]. 自然灾害学报,2014,23(5): 1-10.

CHI Fei, CHEN An. Mitigability assessment model in emergency [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(5): 1-10.

[3] 上官艳秋,陈安,倪慧荟. 突发事件应急管理中的“可挽救性”度量评价模型研究[J]. 中国软科学,2009(9): 165-173.

SHANGGUAN Yanqiu, CHEN An, NI Huihui. Research on the assessment model for salvability in emergency management [J]. China Soft Science, 2009(9): 165-173.

[4] 马建华. 应急评价: 对突发事件的评估与判断[J]. 高科技与产业化,2011(3): 39-42.

[5] 冯园,赵江平. 基于柯氏模型和二元语义的应急预案培训效果评估[J]. 中国安全科学学报,2016,26(2): 168-174.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

- FENG Yuan , ZHAO Jiangping. Study on evaluation of emergency plan training effectiveness based on Kirkpatrick model and 2-tuple linguistic information [J]. China Safety Science Journal , 2016 , 26(2) : 168-174.
- [6] 曾跃辉,姚安林,吴瑶晗,等. 基于突变理论的油库事故应急救援能力评价方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2016 , 26(4) : 84-89.
- ZENG Yuehui , YAO Anlin , WU Yaohan , et al. Study on based catastrophe theory method of assessing emergency rescue capability for oil depot accidents [J]. China Safety Science Journal , 2016 , 26(4) : 84-89.
- [7] 王震宇,张兰芳. 基于灰色层次分析法的高速公路重大交通事件应急处置效果评估[J]. 交通科技, 2016(4) : 141-144.
- WANG Zhenyu , ZHANG Lanfang. Evaluation of severe traffic accidents emergency management effectiveness on freeway based on grey clustering and AHP [J]. Transportation Science & Technology , 2016 (4) : 141-144.
- [8] 潘静静,王若琳,尤爱国,等. 传染病暴发事件应急处置效果评价体系研究[J]. 现代预防医学, 2020 , 47(2) : 330-335.
- PAN Jingjing , WANG Ruolin , YOU Aiguo , et al. Evaluation system of emergency disposal effect for outbreak of infectious diseases [J]. Modern Preventive Medicine , 2020 , 47(2) : 330-335.
- [9] 王博,刘樑,何婧,等. 自然灾害类非常规突发事件应急方案效果评估指标体系初建[J]. 电子科技大学学报: 社会科学版, 2011 , 13(3) : 29-31 51.
- WANG Bo , LIU Liang , HE Jing , et al. The initial stage of the evaluation system on contingency to natural-disaster emergency [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China: Social Sciences Edition , 2011 , 13(3) : 29-31 51.
- [10] ÖZDAMAR L , DEMİR O. A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief logistics planning [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review , 2012 , 48(3) : 591-602.
- [11] OH S C , HAGHANI A. Testing and evaluation of a multi-commodity multi-modal network flow model for disaster relief management [J]. Journal of Advanced Transportation , 1997 , 31(3) : 249-282.
- [12] JI Guojun , ZHU Caihong. A study on emergency supply chain and risk based on urgent relief service in disasters [J]. Systems Engineering Procedia , 2012 (5) : 313-325.
- [13] 吕伟,李志红,冯满满,等. 考虑资源和时间窗约束的应急物资调配模型[J]. 中国安全科学学报, 2019 , 29(12) : 137-143.
- LYU Wei , LI Zhihong , FENG Manman , et al. Emergency material allocation in consideration of resource and time window constraints [J]. China Safety Science Journal , 2019 , 29(12) : 137-143.
- [14] LEVCHUK M G , LEVCHUK Y , LUO Jie , et al. Normative design of organizations. II. organizational structure [J]. IEEE Transactions on Systems , Man , and Cybernetics-Part A: Systems and Humans , 2002 , 32(3) : 360-375.
- [15] ELMAGHRABY E S , KAMBUROWSKI J. The analysis of activity networks under generalized precedence relations (GPRs) [J]. Management Science , 1992 , 38(9) : 1 245-1 263.
- [16] 李加莲,池宏,石彪,等. 应急响应的时效性评估问题研究[J]. 运筹与管理, 2014 , 23(6) : 176-185.
- LI Jialian , CHI Hong , SHI Biao , et al. Research on the evaluation of emergency response efficiency [J]. Operations Research and Management Science , 2014 , 23(6) : 176-185.
- [17] 秦寿康,等. 综合评价原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 5-7.
- [18] 杨宇. 多指标综合评价中赋权方法评析[J]. 统计与决策, 2006 (7) : 17-19.

作者简介: 倪慧荟 (1982—),男,江苏昆山人,硕士,副研究员,主要从事公共安全、应急管理、风险评估等方面的研究。E-mail: nihuihui@kingehs.com。

