

【工程勘测设计】

长距离引水工程突发事件应急响应决策方法研究

姜晓菁¹ 姜绿圃^{2,3} 王 博^{4,5} 聂相田^{4,5}

(1.河南省水利勘测设计研究院有限公司 河南 郑州 450016; 2.黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 郑州 450003; 3.水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹) 河南 郑州 450003; 4.华北水利水电大学 水利学院 河南 郑州 450046; 5.河南省水环境模拟与治理重点实验室 河南 郑州 450046)

摘要: 为提高长距离引水工程突发事件应急响应决策的有效性,提出一种基于后悔理论及犹豫模糊集的突发事件风险应急响应决策模型。该模型将决策信息用犹豫模糊数表示,以此应对突发事件中的不确定性和专家意见分歧的情况;在此基础上考虑到决策专家的有限理性可能影响决策,引入后悔理论,以减小决策专家的后悔规避心理对决策的影响;针对突发事件中可能发生的情景状态进行基于后悔理论及犹豫模糊集的决策研究,对突发事件应急方案进行排序。通过工程实例,对计算过程进行演示,提供该实例最终的决策方案。

关键词: 长距离引水工程; 应急决策; 犹豫模糊集; 后悔理论

中图分类号: TV512; TV67 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.12.021

引用格式: 姜晓菁, 姜绿圃, 王博, 等. 长距离引水工程突发事件应急响应决策方法研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(12): 109-114.

Study on Decision Method of Emergency Response for Long-Distance Diversion Project

JIANG Xiaojing¹, JIANG Lyupu^{2,3}, WANG Bo^{4,5}, NIE Xiangtian^{4,5}

(1.Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China; 2.Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 3.Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources (Preparation), Zhengzhou 450003, China; 4.School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 5.Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In order to improve the effectiveness of emergency response decision-making for emergencies in long-distance water diversion projects, this paper proposed a decision-making model for emergency response to emergencies based on regret theory and hesitation fuzzy sets. The model used hesitation fuzzy numbers to express decision-making information to deal with the uncertainty in emergencies and the divergence of expert opinions. On this basis, considering that the bounded rationality of decision-making experts might affect decision-making, the regret theory was introduced to reduce the influence of decision-making experts' regret and avoidance psychology on decision-making. Research on decision-making based on regret theory and hesitation fuzzy set for the situational states that might occur in emergencies and sort emergency plans for emergencies. It demonstrated the calculation process through an engineering example and provided a final decision-making plan for the example.

Key words: long-distance water diversion project; emergency decision-making; hesitant fuzzy set; regret theory

长距离引水工程的建设极大解决了我国水资源时空分布不均的问题,同时带来了工程运行管理方面的挑战。引水工程具有规模大、距离长、环境条件复杂等特点,一旦发生突发事件其影响难以预测,因此针对长距离引水工程突发事件应急响应的研究意义重大。我国应急管理工作开展较晚,发展较为缓慢。突发事件具有不确定性和风险性等特征,其处理决策往往具有紧迫性,决策者在突发事件发生后没有足够的时间对突发事件进行理性思考,科学决策难度较大。

近年来,国内学者对应急预案的评价研究涉及化工、铁路、水利等领域,并采用了多种评价方法,将定性研究转化为定量研究^[1]。安景文等^[1]将犹豫模糊集引入到应急决策中,对应急预案的优劣性进行了评价;

张英菊^[2]在建立危险化学品泄漏事故应急预案综合评价模型时,采用了灰色多级评价方法;常建鹏等^[3]采用前景理论和模糊测度理论方法对铁路应急预案进行评估;苟敏等^[4]为了对比各预案的优劣,引入一种基于 Vague 集和 TOPSIS 方法的铁路应急预案评价方法;樊自甫等^[5]建立了基于过程的通信保障应急计划

收稿日期: 2020-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51709116); 河南省高等学校重点科研计划项目(17B570003); 华北水利水电大学高层次人才科研启动项目(10030)

作者简介: 姜晓菁(1987—),女,河南郑州人,工程师,主要从事水利工程设计工作

通信作者: 姜绿圃(1993—),男,河南禹州人,硕士,主要从事水利工程设计工作

E-mail: 18039999882@163.com

2.2 效用函数

设 $h \in H$, h 的记分函数为 $s(h)$, 偏差函数为 $\nu(h)$, 则效用函数 $u(h)$ 为

$$u(h) = \frac{s(h)}{1 + \nu(h)} \alpha \quad (3)$$

式中: α 为参数 $0 < \alpha \leq 1$, 其值通常由决策者依据具体情况给定。

可以看出 $u(h)$ 为单调递增凹函数^[12]。式(3)中犹豫模糊决策信息的关联因素包含 $u(h)$ 、 $s(h)$ 、 $\nu(h)$ 以及 α 。 h 的整体水平通过记分函数 $s(h)$ 来反映, $s(h)$ 越大, 则效用函数 $u(h)$ 越大, 决策意见实施效果越好, 分歧程度越小。偏差函数 $\nu(h)$ 越大, 则 $u(h)$ 越小, 决策意见实施效果越差, 分歧程度大。若 $\alpha = 1$, 则效用函数 $u(h)$ 就退化成为群体满意度指数^[16]。

效用函数 $u(h)$ 的性质: 对于单值犹豫模糊数, 即 $h = \{\gamma\}$, 有 $u(h) = (\gamma) \alpha$; 对于空犹豫模糊数, 即 $h = \{0\}$, 有 $u(h) = 0$; 对于满犹豫模糊数, 即 $h = \{1\}$, 有 $u(h) = 1$ ^[17]。

3 后悔理论下的长距离引水工程突发事件风险应急响应决策方法

3.1 变量定义

(1) $S = \{S_1, S_2, \dots, S_l, \dots, S_l\}$ 为长距离引水工程突发事件发生后可能出现的 l 种情景的集合; p_i 为情景 S_i 出现的概率 $p_i \in [0, 1]$, 且有 $\sum_{i=1}^l p_i = 1$ 。在不同的突发事件应急方案实施之后, 有可能使该事故造成的损失产生变化, 也可能使该突发事件呈现出不同方向的发展演化^[18]。

(2) $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m\}$ 为应对长距离引水工程突发事件 m 项应急方案的集合。

(3) $D = \{D_1, D_2, D_3\}$ 为长距离引水工程突发事件发生之后需要考虑的属性的集合。需要考虑的属性有人员伤亡、经济损失和社会影响 3 项, 人员伤亡和经济损失属于成本型属性, 社会影响属于效益型属性(表示长距离引水工程突发事件发生后应急方案的实施所带来的正面社会影响)^[15]。

(4) h_{ij}^t 为在情景 S_i 下实施应急方案 A_j 后满足属性 D_j 的程度。长距离引水工程突发事件发生后往往存在不确定性因素较多和决策专家意见不一致的情形, 用犹豫模糊数 h_{ij}^t 表示:

$$h_{ij}^t = H\{\gamma_{ij}^{1(t)}, \gamma_{ij}^{2(t)}, \dots, \gamma_{ij}^{l_{ij}(t)}\} = H\{\gamma_{ij}^\lambda | \lambda = 1(t), 2(t), \dots, l_{ij}(t)\} \quad (4)$$

式中: $l_{ij}(t)$ 为犹豫模糊数 h_{ij}^t 中元素的个数, 即参与长距离引水工程突发事件应急方案选择决策的专家意见

数量; $\gamma_{ij}^\lambda \in [0, 1]$ 。

对所有的决策信息进行处理, 构造长距离引水工程突发事件应急决策的犹豫模糊风险决策矩阵 $H = [h_{ij}^t]_{m \times n}$ 。

(5) $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 为长距离引水工程突发事件发生后考虑属性的权重向量; w_j 为属性 D_j 的重要程度 $w_j \in [0, 1]$ 且 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。

3.2 方案排序流程

为解决长距离引水工程突发事件风险应急响应决策问题, 提出一种基于后悔理论及犹豫模糊集的决策方法, 方案排序流程见图 3。

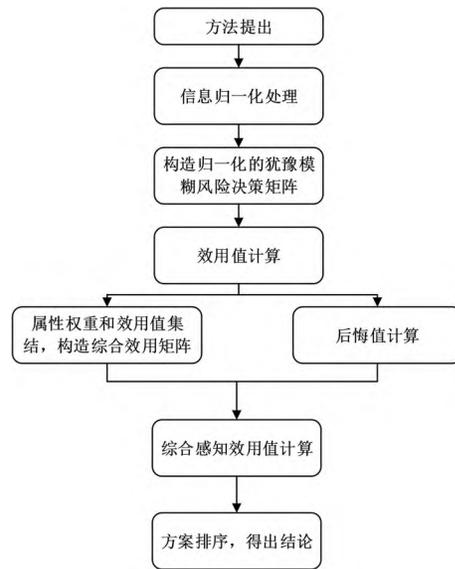


图3 方案排序流程

3.3 决策计算

(1) 综合效用值计算。为消除数据量纲不同对长距离引水工程突发事件应急响应决策结果产生的影响, 对数据进行归一化处理, 构造归一化风险决策矩阵

$$M = [\bar{h}_{ij}^t]_{m \times n}$$

对于成本型属性, 归一化处理后的属性 \bar{h}_{ij}^t ^[19] 为

$$\bar{h}_{ij}^t = H\{1 - \gamma_{ij}^{1(t)}, 1 - \gamma_{ij}^{2(t)}, \dots, 1 - \gamma_{ij}^{l_{ij}(t)}\} \quad (5)$$

对于效益型属性, 归一化处理后的属性 \bar{h}_{ij}^t 为

$$\bar{h}_{ij}^t = h_{ij}^t \quad (6)$$

在情景 S_i 下实施应急方案 A_j 对于属性 D_j 的效用值 u_{ij}^t 计算公式为

$$u_{ij}^t = \frac{s(\bar{h}_{ij}^t)}{1 + \nu(\bar{h}_{ij}^t)} \alpha \quad (7)$$

式中: $s(\bar{h}_{ij}^t)$ 和 $\nu(\bar{h}_{ij}^t)$ 分别为归一化处理后的属性 \bar{h}_{ij}^t 的记分函数和偏差函数。

已知属性权重 w_j 与效用值 u_{ij}^t 通过信息集结计算,得到在情景 S_i 下实施应急方案 A_i 对于属性 D_j 的综合效用值 U_{ij}^t :

$$U_{ij}^t = w_j u_{ij}^t \quad (8)$$

(2) 后悔值计算。长距离引水工程突发事件应急决策过程中,决策专家往往很难快速选择最为合适的应急方案,在面临多种方案可供选择的情况下,决策专家在方案选择之后可能出现对选择方案不满意、后悔的情况。为解决决策专家心理行为对方案选择所带来的影响,引入后悔理论。在该理论中,后悔表示未选出最佳方案,欣喜表示选择的方案最佳^[12]。决策专家心理表现为风险规避型,则后悔-欣喜函数 $R(\Delta u)$ 表示为

$$R(\Delta u) = 1 - \exp(-\delta \Delta u) \quad (9)$$

$$\Delta u = U_{ij}^t - U_j^{t*}, U_j^{t*} = \max\{U_{ij}^t | i=1, 2, \dots, m\} \quad (10)$$

式中: Δu 为方案的效用差; δ 为后悔规避系数, $\delta > 0$, δ 越大则决策者的后悔规避程度越大; U_j^{t*} 为在情景 S_i 下对于属性 D_j 实施效果最好的应急方案综合效用值。

依据式(9)和式(10),计算在情景 S_i 下实施应急方案 A_i 后对于属性 D_j 的后悔值 R_{ij}^t :

$$R_{ij}^t = 1 - \exp[-\delta(U_{ij}^t - U_j^{t*})] \quad (11)$$

3.4 应急方案排序

长距离引水工程突发事件情景 S_i 下实施应急方案 A_i 后对于属性 D_j 的感知效用 φ_{ij}^t 的计算公式为

$$\varphi_{ij}^t = U_{ij}^t + R_{ij}^t \quad (12)$$

综合长距离引水工程突发事件发生后可能出现多种情景和各项属性,实施应急方案 A_i 后的综合感知效用 $\varphi(A_i)$ 计算公式为

$$\varphi(A_i) = \sum_{t=1}^l \sum_{j=1}^n p_t \varphi_{ij}^t \quad (13)$$

计算出综合感知效用 $\varphi(A_i)$ 值后,依据其大小对应急方案进行排序, $\varphi(A_i)$ 值越大,表示实施应急方案 A_i 后的效果越好^[15]。

4 实例应用

长距离引水工程挖方渠道坡面发生泥石流属于工程事故类突发事件,若不及时采取措施,后果将非常严重。该突发事件发展演化有4种情景:①导致渠道水质污染(S_1);②造成下游临近渠段或渠道倒虹吸(或输水涵管)发生淤积,渠道输水能力大幅下降(S_2);③导致局部渠道边坡失稳,引发渠道滑坡(S_3);④导致临近填方渠道发生满溢或溃决(S_4)。其相应的发生概率分别为 $p_1=0.4$ 、 $p_2=0.3$ 、 $p_3=0.2$ 、 $p_4=0.1$ 。

设挖方渠道坡面发生泥石流后可供选择的应急方

案有4种:①及时组织撤离危险区域的人员,同时向上级相关单位和市(县)应急指挥机构报告,根据需要提出工程联动抢险救援请求(A_1);②在 A_1 的基础上,按调度要求,对渠段运行现状进行应急调度,持续监视险情变化(A_2);③在 A_2 的基础上,组织专家检查事故发生地周围存在的灾害隐患(A_3);④在 A_3 的基础上,协调当地政府有关部门,做好灾后恢复工作,对破坏渠道进行修复和除险(A_4)。

决策专家在应急方案选择时需要考虑的属性有:事故发生后24h内的人员伤亡、经济损失和社会影响。人员伤亡 D_1 和经济损失 D_2 属于成本型属性,社会影响 D_3 属于效益型属性,对应的属性权重向量为 $\omega = (0.6, 0.2, 0.2)$ 。决策专家针对应急方案 $\{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ 按属性 $\{D_1, D_2, D_3\}$ 在4种情景 $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ 下进行评价^[15]。

(1) 构造犹豫模糊风险型决策矩阵 $H = [h_{ij}^t]_{4 \times 4}$,见表1。

表1 犹豫模糊风险决策矩阵

p_i	D_j	h_{ij}^t			
		A_1	A_2	A_3	A_4
$p_1=0.4$	D_1	0.1	0.2, 0.3	0.3, 0.4	0.4, 0.5
	D_2	0.2	0.3, 0.4	0.4, 0.5	0.5, 0.7
	D_3	0.3, 0.4, 0.5	0.3, 0.5	0.5, 0.6	0.4, 0.7
$p_2=0.3$	D_1	0.3	0.2, 0.3	0.4, 0.5	0.4, 0.6
	D_2	0.4	0.4, 0.5	0.5, 0.6	0.5, 0.7
	D_3	0.4, 0.5, 0.6	0.3, 0.4, 0.6	0.4, 0.5, 0.7	0.4, 0.5, 0.6
$p_3=0.2$	D_1	0.4, 0.5	0.5, 0.6	0.5	0.5, 0.6
	D_2	0.6	0.4, 0.5	0.7	0.6, 0.7
	D_3	0.4, 0.5, 0.6	0.4, 0.5, 0.7	0.5, 0.6, 0.7	0.5, 0.7, 0.8
$p_4=0.1$	D_1	0.5, 0.6	0.5	0.7	0.7, 0.9
	D_2	0.5, 0.7	0.7	0.8	0.7, 0.8
	D_3	0.1, 0.2, 0.3	0.2, 0.3, 0.4	0.2, 0.4, 0.5	0.2, 0.3, 0.5

(2) 采用式(5)和式(6),对成本型属性和效益型属性进行数据归一化处理,构造犹豫模糊风险决策矩阵 $M = [h_{ij}^t]_{4 \times 4}$ ($t=1, 2, 3, 4$),见表2。

表2 归一化的犹豫模糊风险决策矩阵

p_i	D_j	h_{ij}^t			
		A_1	A_2	A_3	A_4
$p_1=0.4$	D_1	0.9	0.7, 0.8	0.6, 0.7	0.5, 0.6
	D_2	0.8	0.6, 0.7	0.5, 0.6	0.3, 0.5
	D_3	0.3, 0.4, 0.5	0.3, 0.5	0.4, 0.5	0.3, 0.6
$p_2=0.3$	D_1	0.7	0.7, 0.8	0.5, 0.6	0.4, 0.6
	D_2	0.6	0.5, 0.6	0.4, 0.5	0.3, 0.5
	D_3	0.4, 0.5, 0.6	0.3, 0.4, 0.6	0.4, 0.5, 0.7	0.4, 0.5, 0.6
$p_3=0.2$	D_1	0.5, 0.6	0.4, 0.5	0.5	0.4, 0.5
	D_2	0.4	0.5, 0.6	0.3	0.3, 0.4
	D_3	0.4, 0.5, 0.6	0.4, 0.5, 0.7	0.5, 0.6, 0.7	0.5, 0.7, 0.8
$p_4=0.1$	D_1	0.4, 0.5	0.5	0.3	0.1, 0.3
	D_2	0.3, 0.5	0.3	0.2	0.2, 0.3
	D_3	0.1, 0.2, 0.3	0.2, 0.3, 0.4	0.2, 0.4, 0.5	0.2, 0.3, 0.5

(3) 采用式(1)和式(2)计算归一化的犹豫模糊风险决策矩阵的记分函数值和偏差函数值,构建记分函数值和偏差函数值矩阵,分别见表3、表4。

表3 归一化的犹豫模糊风险决策矩阵的记分函数值矩阵

p_i	D_j	$s(h)$			
		A_1	A_2	A_3	A_4
$p_1=0.4$	D_1	0.90	0.75	0.65	0.55
	D_2	0.80	0.65	0.55	0.40
	D_3	0.40	0.4	0.55	0.55
$p_2=0.3$	D_1	0.70	0.75	0.55	0.50
	D_2	0.60	0.55	0.45	0.40
	D_3	0.50	0.43	0.53	0.50
$p_3=0.2$	D_1	0.55	0.45	0.50	0.45
	D_2	0.40	0.55	0.30	0.35
	D_3	0.50	0.43	0.60	0.67
$p_4=0.1$	D_1	0.45	0.50	0.30	0.20
	D_2	0.40	0.30	0.20	0.25
	D_3	0.20	0.30	0.37	0.33

表4 归一化的犹豫模糊风险决策矩阵的偏差函数值矩阵

p_i	D_j	$\nu(h)$			
		A_1	A_2	A_3	A_4
$p_1=0.4$	D_1	0	0.05	0.05	0.05
	D_2	0	0.05	0.05	0.10
	D_3	0.07	0.10	0.05	0.15
$p_2=0.3$	D_1	0	0.05	0.05	0.10
	D_2	0	0.05	0.05	0.10
	D_3	0.07	0.11	0.11	0.07
$p_3=0.2$	D_1	0.05	0.05	0	0.05
	D_2	0	0.05	0	0.05
	D_3	0.07	0.11	0.07	0.11
$p_4=0.1$	D_1	0.05	0	0	0.10
	D_2	0.10	0	0	0.05
	D_3	0.07	0.07	0.11	0.11

(4) 采用式(7)计算在情景 S_i 下实施应急方案 A_i 对于属性 D_j 的效用值 u_{ij}^t ,构建效用值矩阵,见表5。

表5 效用值矩阵

p_i	D_j	u_{ij}^t			
		A_1	A_2	A_3	A_4
$p_1=0.4$	D_1	0.919	0.764	0.684	0.596
	D_2	0.837	0.368	0.596	0.445
	D_3	0.456	0.445	0.596	0.554
$p_2=0.3$	D_1	0.758	0.764	0.596	0.532
	D_2	0.665	0.596	0.5078	0.445
	D_3	0.545	0.4701	0.556	0.545
$p_3=0.2$	D_1	0.596	0.508	0.574	0.508
	D_2	0.480	0.596	0.382	0.415
	D_3	0.545	0.556	0.631	0.665
$p_4=0.1$	D_1	0.508	0.574	0.382	0.256
	D_2	0.445	0.382	0.276	0.317
	D_3	0.262	0.363	0.412	0.382

(5) 根据属性权重与效用值,利用式(8)进行信息集结,得到综合效用值 U_{ij}^t ,构建综合效用值矩阵($\alpha=0.8$),见表6。

表6 综合效用值矩阵

p_i	D_j	U_{ij}^t			
		A_1	A_2	A_3	A_4
$p_1=0.4$	D_1	0.552	0.458	0.409	0.358
	D_2	0.167	0.136	0.119	0.089
	D_3	0.091	0.089	0.119	0.111
$p_2=0.3$	D_1	0.451	0.458	0.358	0.319
	D_2	0.133	0.119	0.102	0.089
	D_3	0.109	0.094	0.111	0.109
$p_3=0.2$	D_1	0.358	0.305	0.345	0.305
	D_2	0.096	0.119	0.076	0.083
	D_3	0.109	0.111	0.126	0.133
$p_4=0.1$	D_1	0.305	0.345	0.229	0.153
	D_2	0.089	0.076	0.055	0.063
	D_3	0.052	0.073	0.082	0.076

(6) 采用式(9)和式(10),计算在情景 S_i 下实施应急方案 A_i 对于属性 D_j 的后悔值 R_{ij}^t ,构建后悔值矩阵($\delta=0.3$),见表7。

表7 后悔值矩阵

p_i	D_j	R_{ij}^t			
		A_1	A_2	A_3	A_4
$p_1=0.4$	D_1	0.000	-0.028	-0.044	-0.060
	D_2	0.000	-0.009	-0.015	-0.024
	D_3	-0.008	-0.009	0.000	-0.003
$p_2=0.3$	D_1	-0.002	0.000	-0.031	-0.043
	D_2	0.000	-0.004	-0.010	-0.013
	D_3	-0.001	-0.005	0.000	-0.001
$p_3=0.2$	D_1	0.000	-0.016	-0.004	-0.016
	D_2	-0.007	0.000	-0.013	-0.011
	D_3	-0.007	-0.007	-0.002	0.000
$p_4=0.1$	D_1	-0.012	0.000	-0.035	-0.059
	D_2	0.000	-0.004	-0.010	-0.008
	D_3	-0.009	-0.003	0.000	-0.002

(7) 依据式(11)计算在情景 S_i 下实施应急方案 A_i 对于属性 D_j 的感知效用值 φ_{ij}^t ,构建感知效用值矩阵,见表8。

表8 感知效用值矩阵

p_i	D_j	φ_{ij}^t			
		A_1	A_2	A_3	A_4
$p_1=0.4$	D_1	0.552	0.430	0.365	0.298
	D_2	0.167	0.127	0.105	0.065
	D_3	0.083	0.080	0.119	0.108
$p_2=0.3$	D_1	0.449	0.458	0.327	0.277
	D_2	0.133	0.115	0.092	0.076
	D_3	0.109	0.089	0.111	0.109
$p_3=0.2$	D_1	0.358	0.289	0.341	0.289
	D_2	0.089	0.119	0.063	0.072
	D_3	0.102	0.105	0.124	0.133
$p_4=0.1$	D_1	0.293	0.345	0.194	0.094
	D_2	0.089	0.073	0.045	0.056
	D_3	0.043	0.070	0.082	0.075

(8) 采用式(13),计算实施应急方案 A_i 后的综合感知效用值: $\varphi(A_1)=0.680$, $\varphi(A_2)=0.605$, $\varphi(A_3)=0.532$, $\varphi(A_4)=0.448$ 。

根据综合感知效用值越大应急方案实施效果越好

的原则,确定应急方案的实施顺序。根据计算结果可知应急方案 A_1 的实施效果最好。因此,在挖方渠道坡面发生泥石流后,首先,要及时组织撤离危险区域的人员,同时向上级相关单位和市(县)应急指挥机构报告,根据需要提出工程联动抢险救援请求;其次,按调度要求,对渠段运行现状进行应急调度,持续监视险情变化;再次,组织专家检查事故发生地周围存在的灾害隐患;最后,协调当地政府有关部门做好灾后恢复工作,对破坏的渠道进行修复和除险。

5 结 语

本文阐述了基于犹豫模糊集和后悔理论的应急方案评价流程,利用综合效用值和后悔值的计算结果对应急方案进行排序,在处理决策信息模糊性的同时,考虑决策专家的心理行为对决策信息的影响,可保证决策信息的有效性,进而提高长距离引水工程突发事件风险应急响应决策的有效性。该方法可为有关部门加强水利工程重大事故应急能力建设提供参考依据和决策手段,使其尽可能得出工程突发事件发生后适用效果最好的应急方案,从而最大限度地减小突发事件所带来的危害。

参考文献:

[1] 安景文,安娴,王龙康,等.基于犹豫模糊集的生产安全事故应急预案评估研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(5):128-133.
 [2] 张英菊.基于灰色多层次评价方法的应急预案实施效果评价模型研究[J].计算机应用研究,2012,29(9):3312-3319.
 [3] 常建鹏,周国华,陈振颂,等.考虑专家行为偏好与指标关联的铁路应急预案评估研究[J].计算机集成制造系统,2016,22(5):1371-1385.
 [4] 苟敏,李夏苗,赵杰群.基于Vague集的铁路应急预案评价方法[J].中国安全生产科学技术,2016,12(1):75-79.
 [5] 樊自甫,王蕾.基于流程的通信保障应急预案有效性评估模型及应用[J].科技管理研究,2016,36(1):185-189.
 [6] 张士辰,龙智飞.水库突发事件应急预案可行性评价方法

再研究[J].水利水运工程学报,2016(2):83-88.

[7] DILLON R L, LIEBE R M, BESTAFKA T. Risk-Based Decision Making for Terrorism Applications [J]. Risk Analysis, 2009, 29(3): 321-335.
 [8] LIU Y, FAN Z P, YUAN Y, et al. A FTA-Based Method for Risk Decision Making in Emergency Response [J]. Computers & Operations Research, 2014, 42: 49-57.
 [9] TAMURA H, YAMAMOTO K, TOMIYAMA S, et al. Modeling and Analysis of Decision Making Problem for Mitigating Natural Disaster Risks [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 122(2): 461-468.
 [10] 陕振沛,宁宝权,张慧愿,等.基于三角形直觉模糊数TOPSIS群决策方法在应急预案有效性评估中的应用[J].数学认识与实践,2019,49(11):245-253.
 [11] 常建鹏,周国华,陈振颂,等.基于偏好信息的铁路应急预案多阶段群评估研究[J].铁道学报,2016,38(7):15-25.
 [12] BELL D E. Regret in Decision Making Under Uncertainty [J]. Operations Research, 1982, 30(5): 961-981.
 [13] TORRA V. Hesitant Fuzzy Sets [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2010, 25(6): 529-539.
 [14] XIA M M, XU Z S. Hesitant Fuzzy Information Aggregation in Decision Making [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2011, 52(3): 395-407.
 [15] 王娟,戴凤威,方博.煤矿事故应急响应的风险决策研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(6):21-26.
 [16] 刘小弟,朱建军,张世涛,等.基于后悔理论与群体满意度的犹豫模糊随机多属性决策方法[J].中国管理科学,2017,25(10):171-178.
 [17] ZHANG X L, XU Z S. The TODIM Analysis Approach Based on Novel Measured Functions Under Hesitant Fuzzy Environment [J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 61(2): 48-58.
 [18] 袁媛,刘洋,樊治平.考虑后悔规避的突发事件应急响应的风险决策方法[J].系统工程理论与实践,2015,35(10):2630-2636.
 [19] ZHU B, XU Z S. Hesitant Fuzzy Bonferroni Means for Multi-Criteria Decision Making [J]. Journal of the Operational Research Society, 2013, 64(12): 1831-1840.

【责任编辑 张华兴】

(上接第108页)

参考文献:

[1] 黄河勘测规划设计有限公司.黑河黄藏寺水利枢纽工程可行性研究报告[R].郑州:黄河勘测规划设计有限公司,2015:4.
 [2] 黄河勘测规划设计有限公司.黑河黄藏寺水利枢纽工程初步设计报告[R].郑州:黄河勘测规划设计有限公司,2016:4.
 [3] 中华人民共和国水利部.黑河流域近期治理规划[M].北京:中国水利水电出版社,2002:5-6.
 [4] 司建华,冯起,席海洋,等.黑河下游额济纳绿洲生态需水

关键期及需水量[J].中国沙漠,2013,33(2):560-567.

[5] 闫大鹏,王莉.黑河干流生态水量调度方案[J].人民黄河,2011,33(1):54-58.
 [6] 李福生,侯红雨,谢越韬.黑河中游地表水、地下水转化及水资源配置模型[J].人民黄河,2008,30(8):64-66.
 [7] 黄河水利委员会.黑河流域综合规划[R].郑州:黄河水利委员会,2018:80-81.
 [8] 叶守泽.水文水利计算[M].北京:中国水利水电出版社,1992:30-45.

【责任编辑 张华岩】