

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221609

# 考虑后悔理论与灰色关联分析的水利工程 多属性群决策方法

陈千庆, 孙开畅

(三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 针对水利工程中运用后悔理论解决多属性群决策问题时出现的后悔值非线性问题, 提出一种结合灰色关联分析的多属性群决策方法。首先利用后悔理论得到决策者对每个方案的感知效用并确定后悔决策矩阵; 其次针对后悔值之间的非线性问题, 运用灰色关联分析确定属性权重并得出各方案的综合后悔值, 然后依据综合后悔值的排序选出最佳方案; 最后通过水利工程事故案例分析, 验证了该方法的可行性。结果表明该方法可以解决后悔理论中的非线性特性及权重问题, 使决策结果在考虑心理因素情况下更具合理性。

**关键词:** 多属性群决策; 后悔理论; 灰色关联分析; 方案排序

**中图分类号:** TV513

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)06-0154-04

## 1 引言

目前水利工程安全事故虽总体受控但时有发生, 通过科学、准确的决策能控制和减弱事故后果<sup>[1]</sup>, 因此做出科学有效的决策尤为关键。在复杂的决策环境下, 决策者不可能保持绝对理性, 其心理行为和风险偏好在决策过程中会存在主观上的差异, 且这种差异会对决策结果产生重大影响<sup>[2]</sup>。对此, OZEROL G 等<sup>[3]</sup>提出了一种基于后悔理论的方法, 用以解决信息不完全的多属性决策问题; 张晓等<sup>[4]</sup>针对决策者后悔心理的问题, 提出了一种基于后悔理论的风险型多属性决策方法。在水利工程应急决策领域中, 姜绿圃<sup>[5]</sup>运用后悔理论来降低决策者的后悔规避心理对决策的影响, 解决了在引水工程突发事件风险决策中的专家心理问题。在已有研究中, 使用后悔理论进行决策时, 虽然考虑了心理行为对决策结果的影响, 但对后悔理论中后悔值的非线性评价特性及不同决策行为对后悔值的评价权重的改变会影响决策的合理性<sup>[6]</sup>。鉴此, 本文使用灰色关联分析法解决后悔理论中后悔值的非线性特性及权重问题, 提出一种多属性群决策方法; 该方法通过后悔

理论得到后悔决策矩阵, 使用灰色关联分析法计算后悔值的属性权重, 依据综合后悔值进行排序, 得出最优决策方案。

## 2 基于后悔理论和灰色关联分析的决策模型

在已有研究中, 大多数决策模型是建立在决策者完全理性的前提下, 但对导致决策产生偏差的现象无法给出科学的合理解释。在后悔理论<sup>[7]</sup>的基础上, QUIGGIN J<sup>[8]</sup>将最初的只能在两个方案之间进行选择扩展到能够对多个方案进行择优。

灰色关联分析通过“部分”已知信息的描述、分析、综合, 来实现对问题的确切描述和认识<sup>[9]</sup>。使用灰色关联分析法对使用后悔理论的各参数进行属性权重计算, 可以解决后悔理论中的后悔值具有非线性评价特性及不同专家的决策行为导致相同后悔值的评价权重不同的问题。

### 2.1 问题描述

$A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  表示可能出现的情景集合, 其中  $i$  代表第  $i$  个突发事件可能引起的情景,  $i \in M, M = \{1, 2, \dots, m\}$ 。

$S = \{S_1, S_2, \dots, S_h\}$  表示专家集合, 其中  $t$  代

收稿日期: 2022-08-04, 修回日期: 2022-09-07

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0805100)

作者简介: 陈千庆(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水利工程施工风险, E-mail: 2805172973@qq.com

通讯作者: 孙开畅(1970-), 女, 教授, 研究方向为水利工程施工技术及施工作业安全风险, E-mail: sunkaichang@ctgu.edu.cn

表第  $t$  位专家,  $t \in H, H = \{1, 2, \dots, h\}$ 。

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  表示  $n$  个属性的集合, 其中  $j$  表示第  $j$  个属性,  $j \in N, N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。

$q = (q_1, q_2, \dots, q_t)$  表示专家权重向量, 其中  $q_t$  为专家  $t$  的权重或重要程度权重, 且  $q = (q_1,$

$q_2, \dots, q_t)$  满足  $\sum_{t=1}^h q_t = 1, 0 \leq q_1, q_2, \dots, q_t \leq 1$ 。

$w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  表示属性权重向量, 其中  $w_j$  为属性  $C_j$  的权重, 且  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$

满足  $\sum_{j=1}^n w_j = 1, 0 \leq w_1, w_2, \dots, w_n \leq 1$ 。

$D = [\bar{d}_{ij}^t]_{m \times n \times t}$ ,  $D$  表示风险决策矩阵, 其中  $\bar{d}_{ij}^t$  表示专家  $S_t$  在方案  $A_i$  针对属性  $C_j$  的结果,  $\bar{d}_{ij}^t$  为区间数, 即  $\bar{d}_{ij}^t = [\bar{d}_{ij}^{tu}, \bar{d}_{ij}^{tl}]$ , 满足  $\bar{d}_{ij}^{tu} \leq \bar{d}_{ij}^{tl}$ ,  $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, t = 1, 2, \dots, h$ 。

### 2.2 后悔决策矩阵

运用后悔理论对决策者的决策矩阵内的参数进行调整得到后悔感知矩阵  $U = [u_{ij}^t]_{m \times n \times h}$ 。其计算公式为:

$$u_i = v(x_i) + R(v(x_i) - v(x^*)) \quad (1)$$

#### 2.2.1 决策矩阵规范化

为了消除决策矩阵中各指标值量纲与尺度的差异, 需要将决策矩阵  $D = [\bar{d}_{ij}^t]_{m \times n \times t}$  规范化为  $B = [\bar{b}_{ij}^t]_{m \times n \times t}$ , 以消除不同物理量纲对决策结果产生的影响, 其规范化公式为:

$$b_{ij}^{tu} \begin{cases} (d_{ij}^{tu} - g_j^t) / (q_j^t - g_j^t) \\ (q_j^t - d_{ij}^{tu}) / (q_j^t - g_j^t) \end{cases} \quad (2)$$

$$b_{ij}^{tl} \begin{cases} (d_{ij}^{tl} - g_j^t) / (q_j^t - g_j^t) \\ (q_j^t - d_{ij}^{tl}) / (q_j^t - g_j^t) \end{cases} \quad (3)$$

其中  $g_j^t = \min\{d_{ij}^{tu} \mid i \in M\}$  (4)

$$q_j^t = \max\{d_{ij}^{tu} \mid i \in M\} \quad (5)$$

#### 2.2.2 建立理想点

在运用后悔理论进行计算前需要构筑针对不同专家的理想点  $I = (I_1^+, I_2^+, \dots, I_h^+)$ 。令  $I_i^+ = (\bar{b}_1^{i*}, \bar{b}_2^{i*}, \dots, \bar{b}_n^{i*})$  表示针对专家  $S_i$  的理想点  $t \in H$ , 其中  $\bar{b}_j^{i*} = [b_j^{iu*}, b_j^{il*}]$ , 则  $b_j^{iu*}, b_j^{il*}$  的计算公式为:

$$b_j^{iu*} = b_j^{il*} = \max\{b_{ij}^{tu} \mid i \in M\} \quad (6)$$

#### 2.2.3 后悔感知效用矩阵

后悔理论的效用函数通常由价值函数  $v(x)$  和后悔—欣喜函数  $R(\Delta v)$  两部分组成, 前者表示决策者选择当前方案所获得的效用值, 后者表示决策者是否会对选择该方案而产生后悔情绪。

$u_{ij}^t$  表示在专家  $S_t$  眼中针对属性  $C_j$  相对于方案  $A_i$  的感知效用, 其计算公式为:

$$u_{ij}^t = v_{ij}^t + R_{ij}^t \quad (7)$$

由于决策者常对风险持有规避心理, 故  $v(x)$  为单调递增的凹函数, 满足  $v'(x) > 0$  且  $v''(x) < 0$ 。采用幂函数作为属性值的效用函数<sup>[10]</sup>, 即:

$$v(x) = x^\alpha \quad (8)$$

式中,  $\alpha$  为风险规避系数,  $0 < \alpha < 1$ , 随着  $\alpha$  越小, 决策者的风险规避态度越明显, 依据文献[11], 取  $\alpha = 0.88$ 。

在计算决策者能从不同属性值中获得属性值  $\bar{b}_{ij}^t$  的效用值  $v_{ij}^t$  时, 实际的属性值  $x$  在区间  $[b_j^{tu}, b_j^{tl}]$  上服从某种分布<sup>[11]</sup>。设概率密度函数为  $f_{ij}^t(x)$ , 则属性值  $\bar{b}_{ij}^t$  的效用值  $v_{ij}^t$  为:

$$v_{ij}^t = \int_{b_j^{tu}}^{b_j^{tl}} v(x) f_{ij}^t(x) dx \quad (9)$$

当  $x$  服从正态分布  $N(\mu_{ij}^t, (\sigma_{ij}^t)^2)$  时, 依据正态分布中的  $3\sigma$  原则, 则  $x$  概率密度函数为:

$$f_{ij}^t(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{ij}^t} \exp[-(x - \mu_{ij}^t)^2 / 2(\sigma_{ij}^t)^2] \quad (10)$$

当  $x$  服从均匀分布时, 概率密度函数为:

$$f_{ij}^t(x) = \begin{cases} \frac{1}{b_{ij}^{tu} - b_{ij}^{tl}} & b_{ij}^{tu} \leq x \leq b_{ij}^{tl} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

后悔—欣喜函数  $R(\Delta v)$  满足  $R'(\Delta v) > 0$  且  $R''(\Delta v) < 0$ 。根据文献[7],  $R(\Delta v)$  可表示为:

$$R(\Delta v) = 1 - \exp(-\delta \Delta v) \quad (12)$$

式中,  $\delta$  为后悔规避系数, 且  $\delta$  越大, 决策者的后悔规避态度越明显, 依据现有文献[4]取  $\delta = 0.3$ 。

计算专家  $S_t$  眼中方案  $A_i$  针对属性  $C_j$  相对于理想点  $I_t$  的后悔值, 其计算公式为:

$$R_{ij}^t = 1 - \exp[-\delta(v_{ij}^t - v_{ij}^{t*})] \quad (13)$$

其中  $v_{ij}^{t*} = \int_{b_j^{tu}}^{b_j^{tl}} v(x) f_{ij}^{t*}(x) dx = (b_j^{tu})^\alpha$  (14)

### 2.3 属性权重

灰色关联分析根据各因素变化的曲线几何形状相似度及各数列之间的关联度作为衡量尺度<sup>[11]</sup>。灰色系统小样本一般用来处理参数数量较少的模型, 因为一般的决策问题所涉及方案和参数数量较少, 故可利用灰色关联分析来确定属性的权重。文献[12]中设  $X_j = (x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(s)) (j = 0, 1, \dots, n)$  为系统行为序列, 其中  $X_0$  为特征序列,  $X_j (j = 0, 1, \dots, n)$  为因素序列。记:

$$r(x_0(i), x_j(i)) =$$

$$\min_{1 \leq j \leq n} \min_{1 \leq i \leq s} |x_j(i) - x_0(i)| + \rho \max_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq s} |x_j(i) - x_0(i)|$$

$$\frac{|x_j(i) - x_0(i)| + \rho \max_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq s} |x_j(i) - x_0(i)|}{\max_{1 \leq j \leq n} \max_{1 \leq i \leq s} |x_j(i) - x_0(i)|} \quad (15)$$

式中,  $r(x_0(i), x_j(i))$  均为特征序列  $X_0$  与因素序列  $X_j$  的  $i$  点灰色关联系数, 简记为  $r_{0j}(i)$ , 可部分表征因素之间的相似程度, 其中  $\rho \in (0, 1)$  称为分辨系数;  $|x_j(i) - x_0(i)|$  为  $x_j(i)$  与  $x_0(i)$  之间的差值信息;  $r_{ij}$  为  $x_j(i)$  与  $x_0(i)$  之间的灰色关联度;  $\rho$  为分辨系数, 一般取  $\rho = 0.5$ 。

在决策者的后悔决策矩阵  $U = [u'_{ij}]_{m \times n \times h}$  中, 计算专家  $S_i$  眼中方案  $A_i$  的后悔平均值。计算公式为:

$$\bar{u}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_{ij} \quad (16)$$

在此基础上计算感知效用  $u_{ij}$  与后悔平均值  $\bar{u}_i$  之间的差值  $\Delta u_{ij}$ , 构建差值矩阵  $\Delta U = (\Delta u_{ij})_{m \times n \times h}$ 。计算公式为:

$$\Delta u_{ij} = |u_{ij} - \bar{u}_i| \quad i \in M; j \in N \quad (17)$$

在构建灰色关联矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times n \times h}$  时灰色关联度  $r_{ij}$  计算公式<sup>[9]</sup>为:

$$r_{ij} = \frac{\min_i \Delta u_{ij} + \rho \max_i \Delta u_{ij}}{\Delta u_{ij} + \rho \max_i \Delta u_{ij}} \quad (18)$$

对不同专家  $S_i$  眼中方案  $A_i$  针对参数  $C_j$  的权重  $w_j$  进行计算。计算公式<sup>[9]</sup>为:

$$w_j = \frac{1 - \frac{1}{m} \left[ \sum_{i=1}^m (r_{ij})^\varphi \right]^{1/\varphi}}{n - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{i=1}^m (r_{ij})^\varphi \right]^{1/\varphi}} \quad (19)$$

其中, 根据文献[13], 取  $\varphi = 2$ 。

### 2.4 综合后悔值

综合后悔值是根据不同的专家权重及属性权重与不同专家眼中针对不同属性相对于不同方案的感知效用相乘后累加的结果。根据得出的专家权重、属性权重及后悔感知效用可以得出不同方案的综合后悔值  $P(A_i)$ , 并利用其大小对备选方案进行排序, 即可得到符合决策者后悔规避心理的方案排序。计算公式为:

$$P(A_i) = \sum_{j=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^h q_i w_j u_{ij} \quad (20)$$

### 2.5 决策步骤

**步骤 1** 采用式(2)~(5)将决策矩阵  $D = [d'_{ij}]_{m \times n \times t}$  规范化为  $B = [b'_{ij}]_{m \times n \times t}$ 。

**步骤 2** 采用式(6)构筑理想点  $I = (I_1^+, I_2^+, \dots, I_h^+)$ 。

**步骤 3** 采用式(7)~(14)建立决策者的后悔决策矩阵  $U = [u'_{ij}]_{m \times n \times h}$ 。

**步骤 4** 采用式(16)计算后悔平均值  $\bar{u}_i$ 。

**步骤 5** 采用式(17)计算  $u_{ij}$  和  $\bar{u}_i$  之间的差值  $\Delta u_{ij}$ , 构建差值矩阵  $\Delta U = (\Delta u_{ij})_{m \times n \times h}$ 。

**步骤 6** 采用式(18)计算  $u_{ij}$  和  $\bar{u}_i$  之间的灰色关联度  $r_{ij}$ , 构建灰色关联矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times n \times h}$ 。

**步骤 7** 采用式(19)计算参数  $C_j$  的权重  $w_j$ 。

**步骤 8** 采用式(20)计算方案的综合后悔值  $P(A_i)$ , 并依据其大小对各个方案进行排序, 确定最佳方案。

## 3 案例分析

某水电站在进行右岸二道坝下游至尾水洞出口段收仓时, 上游侧面模板发生爆模, 导致该混凝土仓面靠下游的正面模板被冲垮, 造成混凝土坍塌事故。经初步判断制定了 4 套应急救援方案  $A_1, A_2, A_3, A_4$ , 现应用所提出的决策模型对应急救援方案进行决策分析。引用文献[14]中的水利工程应急层次结构(图 1), 考虑的属性值有救援时效性  $C_1$ 、灾害现场控制  $C_2$ 、灾害现场影响  $C_3$ 、经济代价  $C_4$ 、善后处理  $C_5$ 、机械设备利用  $C_6$ , 并且六种属性的权重向量  $w = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6)$  未知。其中  $C_1, C_3, C_4$  为成本型属性,  $C_2, C_5, C_6$  为效益型属性。假设成本型属性值服从正态分布, 效益型属性值服从均匀分布。4 位行业内的决策专家  $S_1, S_2, S_3, S_4$  对评价指标进行判断, 假设 4 位专家的权重为  $q = (0.15, 0.20, 0.30, 0.35)^T$ , 给出风险决策矩阵见表 1。

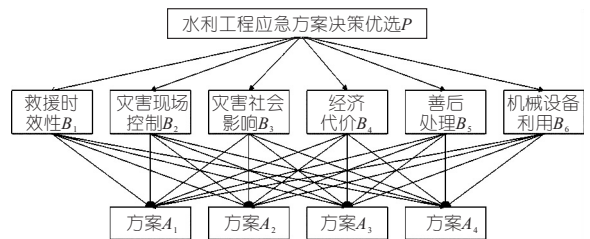


图 1 水利工程应急层次结构

Fig. 1 Emergency hierarchy structure of hydraulic engineering

依据式(1)~(14)建立专家的感知效用矩阵, 采用式(15)~(20)构建专家的灰色关联矩阵, 据此计算各方案后悔值及其属性权重, 见表 2。

采用式(19)计算方案的综合后悔值, 可得:  $P(A_1) = 0.6056, P(A_2) = 0.4577, P(A_3) = 0.6004, P(A_4) = 0.4730$ , 根据综合后悔值由大到小排序即:  $P(A_1) > P(A_3) > P(A_4) > P(A_2)$ , 故本次安全事故, 综合考虑专家的意见后, 最优解决方案为方案 1。

表 1 专家  $S_1, S_2, S_3, S_4$  决策矩阵

Tab.1 Expert  $S_1, S_2, S_3, S_4$  decision matrix

方案	属性值	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
$S_1$	$C_1$	[4,5]	[6,7]	[7,8]	[6,7]
	$C_2$	[4,6]	[5,6]	[3,5]	[6,7]
	$C_3$	[5,8]	[7,8]	[8,10]	[8,9]
	$C_4$	[1,3]	[3,5]	[4,6]	[3,5]
	$C_5$	[1,3]	[2,3]	[3,4]	[2,3]
	$C_6$	[4,7]	[5,6]	[4,6]	[6,8]
$S_2$	$C_1$	[5,8]	[6,7]	[4,5]	[5,7]
	$C_2$	[6,8]	[8,10]	[6,7]	[7,8]
	$C_3$	[8,9]	[7,9]	[7,8]	[6,8]
	$C_4$	[6,8]	[5,7]	[5,6]	[6,7]
	$C_5$	[3,5]	[1,4]	[3,4]	[2,4]
	$C_6$	[7,10]	[7,8]	[7,9]	[8,9]
$S_3$	$C_1$	[4,6]	[5,6]	[4,5]	[5,7]
	$C_2$	[7,8]	[6,8]	[5,6]	[5,6]
	$C_3$	[6,7]	[7,10]	[7,8]	[6,7]
	$C_4$	[5,8]	[6,7]	[5,8]	[7,9]
	$C_5$	[1,4]	[2,5]	[3,5]	[3,6]
	$C_6$	[8,10]	[8,9]	[6,8]	[7,9]
$S_4$	$C_1$	[3,5]	[4,6]	[5,6]	[4,7]
	$C_2$	[4,6]	[5,6]	[5,7]	[6,7]
	$C_3$	[5,8]	[6,8]	[6,7]	[7,9]
	$C_4$	[6,8]	[7,9]	[8,9]	[6,8]
	$C_5$	[2,5]	[3,4]	[1,4]	[2,4]
	$C_6$	[6,9]	[9,10]	[7,8]	[8,9]

表 2 各专家的后悔值属性权重矩阵

Tab.2 The regret value attribute weight matrix of each expert

专家	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
$S_1$	0.169 5	0.188 1	0.138 9	0.164 1	0.154 6	0.184 7
$S_2$	0.164 7	0.181 5	0.175 1	0.160 3	0.158 9	0.159 5
$S_3$	0.151 9	0.189 0	0.177 7	0.155 7	0.175 7	0.150 0
$S_4$	0.156 5	0.173 4	0.161 7	0.177 6	0.174 6	0.156 3

依据文献[9]所提方法、采用基于期望值的决策方法及使用后悔理论的方法对表 1 中的数据进行求解,得到方案排序结果见表 3。

表 3 不同方法的方案排序

Tab.3 The solution ranking of different methods

方法	方案排序
本文方法	$P(A_1) > P(A_3) > P(A_4) > P(A_2)$
文献[14]方法	$P_1(A_4) > P_1(A_3) > P_1(A_2) > P_1(A_1)$
期望理论的方法	$P_2(A_2) > P_2(A_4) > P_2(A_1) > P_2(A_3)$
后悔理论的方法	$P_3(A_1) > P_3(A_3) > P_3(A_4) > P_3(A_2)$

本文方法与只使用后悔理论的方法所得方案排序结果一致,说明本文方法得出的结果具有可信度。同时将本文方法与文献[9]中的方法及基于期望值的决策方法相比较,所得方案排序不同,因为基于期望值决策方法得出的结果为理想中的最优解;文献[9]中使用的前景理论更侧重于损失规避,即决策者对损失的印象比那些对收益的印象更加深刻;本文使用的后悔理论侧重于后悔规避,即决策者对后悔心理感觉更深刻;3 种方法由于考虑决策者心理因素的侧重点不同,所以导致

最终的排序方案产生差异。由于后悔理论具有不需要给出参照点、涉及参数较少、计算简单的优点,涉及的方案和参数数量较少,同时符合灰色系统小样本的条件,使用灰色关联分析法处理后悔理论中存在的问题更为合适,故所提方法相较于其他方法在合理性的基础上更具简便性的特点。

## 4 结论

根据水利工程安全事故的特点并充分考虑决策者“有限理性”的心理特征,针对使用后悔理论进行决策时,未考虑后悔值之间的非线性特性及不同决策行为对决策结果产生的影响,引入灰色关联分析对后悔值进行属性权重计算,相较于其他方法,本文方法更具科学性和有效性,弥补了使用后悔理论进行决策时存在的缺陷。

### 参考文献:

- [1] 李权. 水利工程安全事故应急资源调度模型研究[D]. 宜昌:三峡大学,2018.
- [2] 邹强,张利升,李文俊. 基于累积前景理论和最大熵理论的水库多目标防洪调度决策方法[J]. 水电能源科学,2018,36(1):57-60,56.
- [3] OZEROL G, KARASAKAL E. A parallel between regret theory and outranking methods for multicriteria decision making under imprecise information[J]. Theory and decision, 2008,65(1):45-70.
- [4] 张晓,樊治平,陈发动. 基于后悔理论的风险型多属性决策方法[J]. 系统工程理论与实践,2013. 33(9): 2313-2320.
- [5] 姜绿圃,基于后悔理论及犹豫模糊集的长距离引水工程突发事件风险应急响应决策研究[D]. 郑州:华北水利水电大学,2020.
- [6] 李宴,崔玲,胡劲松. 基于心理账户和后悔理论的报童问题研究[J]. 物流科技,2014,37(12):4-7.
- [7] DAVIDE. BELL. Regretin decision making under uncertainty[J]. Operations research,1982,30(5):961-981.
- [8] JOHN QUIGGIN. Regret theory with general choice sets[J]. Journal of risk and uncertainty,1994,8(2): 153-165.
- [9] 苏欣. 基于前景理论和灰色关联分析的决策方法[D]. 南宁:广西民族大学,2016.
- [10] AMOS TVERSKY, DANIEL KAHNEMAN. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty[J]. Journal of risk and uncertainty,1992,5(4):297-323.
- [11] 张全,樊治平,潘德惠. 不确定性多属性决策中区间数的一种排序方法[J]. 系统工程理论与实践,1999(5):130-134.

为严重。

c. 基于所构建的模型,以管网溢流节点数和最大淹没面积为评价指标,对比分析了扩大管径和增大下渗率两种“海绵化”改造方案,确定扩大管径方案更有利于研究区管网排水能力的提升,研究结果可为该类型区域防洪排涝建设提供借鉴。

参考文献:

[1] 王峰. 福州市主城区内涝后的反思[J]. 水利科技, 2006(3):4-5.

[2] 张立洪,武永新. 沿海城市潮、雨遭遇下内涝模型及应用[J]. 水电能源科学,2017,35(6):42-46.

[3] 宋瑞宁,任梦瑶,刘强,等. 基于 InfoWorks ICM 模型的内涝预警降雨量阈值研究[J]. 水电能源科学, 2021,39(2):5-8,73.

[4] 陈嘉雷,陈文杰,黄国如. 基于情景模拟与多源数据的城市内涝风险评估[J]. 水电能源科学,2021,39(6):55-59.

[5] 刘俊,郭亮辉,张建涛,等. 基于 SWMM 模拟上海

市区排水及地面淹水过程[J]. 中国给水排水,2006(21):64-66,70.

[6] 黄国如,王欣,黄维. 基于 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝模拟[J]. 水电能源科学,2017,35(2):66-70,60.

[7] 王盼,何洋,杜志水. 基于水动力数值计算的城市设计洪水模拟研究[J]. 西安理工大学学报,2020,36(3):362-366.

[8] 黄维. 城市排水管网水力模拟及内涝风险评估[D]. 广州:华南理工大学,2016.

[9] SIDEK L M, JAAFAR A S, MAJID W H A W A, et al. High-resolution hydrological-hydraulic modeling of urban floods using InfoWorks ICM[J]. Sustainability, 2021,13(18):10259.

[10] 张大伟,赵冬泉,陈吉宁,等. 芝加哥降雨过程线模型在排水系统模拟中的应用[J]. 给水排水,2008,44(增刊1):354-357.

[11] 孙翀,王春婷,张泽玉,等. 芝加哥降雨过程线模型的改进[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022,53(1):157-162.

### Analysis of Rainstorm Waterlogging in Coastal Cities Based on Infoworks ICM Model

FENG Tian-yu<sup>1a,1b</sup>, LEI Xiao-hui<sup>1a,2</sup>, WANG Jia-biao<sup>3</sup>, ZHANG Yu-bin<sup>1a,1b</sup>

(1a. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power;

1b. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of urban waterlogging caused by heavy rainstorms in coastal cities, this paper takes Fuzhou City as an example and constructs a fined coupling model of urban one-dimensional drainage network and two-dimensional land surface hydrodynamics based on Infoworks ICM. The model was applied to the analysis of rainstorm waterlogging in Gutian Road area of Fuzhou during Typhoon "Lubi" in August 2021, which verified the high simulation accuracy of the model. Based on this model, the rainstorm waterlogging process in Gutian area under different recurrence periods was analyzed, and two "sponge" reconstruction schemes were proposed. It is found that increasing the pipe diameter is more conducive to improving the waterlogging situation in the study area. The study can be used to accurately calculate the process of urban underground drainage and land area water in Fuzhou City, which provide technical support for the real-time decision of flood control and drainage in coastal cities.

**Key words:** Infoworks ICM; urban waterlogging; refined modeling; causal analysis; sponge measures



(上接第 157 页)

[12] 孙晓东. 基于灰色关联分析的几种决策方法及其应用[D]. 青岛大学,2006.

[13] 刘思峰,党耀国,方志耕. 灰色系统理论及其应

[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[14] 孙开畅,马文俊,李权. 基于 IAHP-直觉模糊集的水利工程应急救援方案决策[J]. 水利水电技术,2018,49(6):135-140.

### Multi-attribute Group Decision Making Method for Hydraulic Engineering Considering Regret Theory and Grey Relational Analysis

CHEN Qian-qing, SUN Kai-chang

(School of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Aiming at the nonlinear problem of regret value when regret theory is used to solve multi-attribute group decision making problems in hydraulic engineering, a multi-attribute group decision making method combined with grey correlation analysis method is proposed. Firstly, the regret theory was used to obtain the decision maker's perceived utility for each option and determine the regret decision matrix. Secondly, according to the nonlinear problem between regret values, the weight of attributes and the comprehensive regret value of each scheme were calculated by grey correlation analysis, and then the best scheme was obtained according to the ranking of the comprehensive regret value. Finally, the feasibility of the method was verified by case analysis. The results show that this method can solve the nonlinear characteristics and weight problems in regret theory, and make decision-making more reasonable when considering psychological factors.

**Key words:** multi-attribute group decision making; regret theory; grey correlation analysis; scenario sorting