

突发事件下城市供水系统需求的综合评价研究

——基于系统弹性的分析视角^{*1}

刘健¹ 倪麟²

(1. 上海交通大学 中美物流研究院, 上海 200240;

2. 中国纺织建设规划院, 北京 100742)

【摘要】: 为实现突发事件应急恢复的系统弹性, 有效度量和评价城市供水系统的需求重要度, 提出了考虑加权距离信息的初始直接需求度量模型, 给出了一个基于改进 DANP 模型和熵权法的考虑主客观权重的应急决策系统需求重要度综合评价方法, 并针对咸潮情景下供水系统需求重要度评价指标体系展开实证研究。研究结果表明, 改进的 DANP 模型能够克服以往研究的问题和不足, 反映了城市供水系统初始应急需求与总需求的客观化建模过程, 而且在影响关系判别过程中充分考虑了系统元素集的自我影响关系和影响性质, 保证了评价决策的排序方案更符合实际, 为城市供水系统应急恢复的需求重要度评价决策提供新思路。

【关键词】: 系统弹性; 加权距离信息; 影响性质; DEMATEL 方法

【中图分类号】: N945.16 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1671-4407(2017)07-127-07

城市关键基础设施系统保护与重要资源的供应保障和有序运转, 与维系服务地区的经济安全和社会稳定密切相关。城市供水系统既是城市关键基础设施保护计划的重要组成部分, 又是维持城市水系统安全供应的关键环节之一。城市供水系统一旦遭到破坏或供应中断, 将给社会经济的正常生产生活带来严重影响, 甚至会导致整个城市生命线系统的失效或崩溃。近年来, 城市供水系统面临的自然灾害, 生产事故以及蓄意攻击等突发事件威胁的可能性逐渐增加, 事件的影响后果和损失也在逐步扩大, 并超过了部分区域供水系统供应能力的设计水平。突发事件应急管理是一个动态的过程, 可分为减灾、准备、响应、恢复四个阶段。现实中, 应急响应和恢复也可以认为是应急恢复阶段的同一过程并各有侧重。应急恢复过程^[1] 既包括短期恢复活动(将生命线系统恢复到最低运行标准), 又包括长期恢复活动(使生活恢复到正常状态或更高水平)。因此, 在突发事件恢复阶段的应急决策过程中, 如何根据期望的供水系统弹性水平设定目标, 度量系统恢复的总需求(包括短期需求和长期需求), 并评价其重要度是实现城市供水系统应急物资调度优化配置的前提条件, 也是应急系统设计决策过程中设计方案制定和选择的重要步骤和关键环节之一, 具有重要理论实践意义。

目前, 针对应急恢复阶段实现城市供水系统弹性的总需求度量及其重要度的综合评价方法相对有限, 主要集中在基于数学模型的度量方法^[2-3]、模糊聚类法^[4]、AHP 熵权法^[5]、基于灰箱模型的多指标评价法^[6] 等方面; 另一方面, 针对突发事件应急决策

¹ **基金项目**: 教育部博士点基金项目“城市生命线系统的弹性防御策略研究”(20130073110040)

第一作者简介: 刘健(1983—), 男, 吉林松原人, 博士生, 主要研究方向为应急管理、决策理论与方法研究。E-mail: henrique21@163.com

的问题特点, 王炜^[7] 提出了基于 CBR 的应急资源需求预测方法, 可以有效针对资源的需求种类、数量和质量进行预测; 姚恩婷等^[8] 针对应急救援过程中的需求点重要度排序问题, 提出了一类基于 BP 神经网络的需求紧迫性分级模型; 舒其林^[9] 针对多灾害点应急需求优先权排序问题, 提出了一种基于改进证据推理模型的需求重要度评价方法。尽管以上研究方法取得了一系列富有借鉴价值的学术成果, 然而, 上述方法往往需要大量的历史数据或样本数据进行训练, 但是现实中供研究的可获得数据往往并不充分, 无法体现由突发事件产生的系统间接需求以及恢复系统正常状态 (长期恢复活动) 的其他潜在需求, 部分方法忽视了应急决策初始阶段信息不完备的问题特点。在突发事件发生初期, 常规的管理方式难以有效实施, 而获得的信息常常又是不完全、不确定的。实践中, 应急决策初期需要依据可获得的部分客观信息和专家经验来估计和推断事故的可能状态, 做出初步应急决策, 并依据后续事件的反馈信息进一步调整或变更应急决策方案。因此, 应急决策初期的决策者主观决策偏好对系统需求重要度综合评价的作用不容忽视。

相比较而言, 结合 ANP 模型和决策试验与实验评估法 (decision making trial and evaluation laboratory, DEMATEL) 优势的混合模型, 简称 DANP 模型, 不仅能够有机结合定性定量信息, 充分利用专家和决策者的经验和判断, 克服应急决策初期的决策信息缺乏问题, 而且能够利用 DEMATEL 法对供水系统总需求进行推理和预测, 并结合 ANP 方法有效展开系统需求度量及其重要度的综合评价工作。但是, DANP 模型难以对元素集内部的自我影响关系及其强度概念、来源和判断推理的形成过程做出清晰的机理解释, 其根源在于 DANP 方法未能对元素集自我影响关系的时间特征予以任何考察, 应从时间动态上分析元素集自依赖关系, 并在动态多准则决策环境下予以解决^[10]。事实上, 多指标评价决策问题中的指标影响区别于指标权重是更为客观的存在^[11]; 此外, 现有方法^[12] 在指标影响关系的判断过程中, 只判断指标影响强度而忽略指标影响性质的判断并不符合实际。此外, 在突发事件初始阶段的决策分析过程中, 不但需要考虑主观偏好信息进行指标主观赋权, 还需要结合客观信息展开指标客观赋权。因此, 突发事件恢复阶段应急决策过程中的指标需求影响度量方法和需求重要度综合评价方法亟待改进。鉴于此, 本文给出了一种基于改进 DANP 方法 (简称 RDANP 模型) 的应急决策初期供水系统总需求度量模型以及需求重要度的综合评价方法。

1 RDANP 模型的理论基础

1.1 DANP 模型

所谓 DANP 模型, 是指考虑了元素集间存在依赖关系, 具有层次性网络结构特征的 ANP 决策评价方法, 利用若干专家提供的专业知识和经验优势, 采用专家群决策的方式 (如 Delphi 法等) 对元素集间的影响关系展开判断和推理并构建直接影响关系矩阵, 使用总影响关系矩阵的计算结果形成网络影响关系图并修正 ANP 模型的网络结构, 并运用构造出的加权矩阵作为列随机矩阵来加权合成 ANP 模型中的未加权超矩阵。DEMATEL 方法的具体步骤如下:

(1) 确定直接影响矩阵。DEMATEL 方法将元素集间的依赖关系描述成有向网络图, 并做出依赖强度判断。假设存在 H 个专家和 n 个元素集的决策问题需要考虑, 每个专家均采用四级语言标度, 判断第 i 个元素集与第 j 个元素集的依赖关系并回答其依赖强度 (x_{ij}), 其中, 0, 1, 2, 3, 4 分别代表“无依赖”“低依赖”“一般依赖”“较高依赖”和“极高依赖”, 专家们

将给 $n \times n$ 非负矩阵的判断结果, $X_{ij}^k = [x_{ij}^k]_{n \times n}, 1 \leq k \leq H$, 矩阵的对角线部分均为零值, 采用专家群决策方法 (如 Delphi

法) 整合 H 个专家的意见, 利用式 (1) 求得平均矩阵 ($[e_{ij}]_{n \times n}$) 并作为初始直接依赖矩阵 ($E' = [e_{ij}]_{n \times n}$), 表示 H 个专家针对第 i 个元素集对第 j 个元素集依赖强度判断意见的群决策结果。如图 1 (a) 所示, 依赖关系图中的每个节点代表了元素集, 节点间的弧为元素集 C_i 对 C_j 的依赖关系以及依赖强度, 例如, $C_1 \rightarrow C_2$ 其依赖强度判断值为 1.41, 表示经专家群决策后认为二者之间具有较低的依赖关系。

$$\mathbf{E}' = [e_{ij}]_{n \times n} = \frac{1}{H} \sum_{k=1}^H [X_{ij}^k]_{n \times n} \quad (1)$$

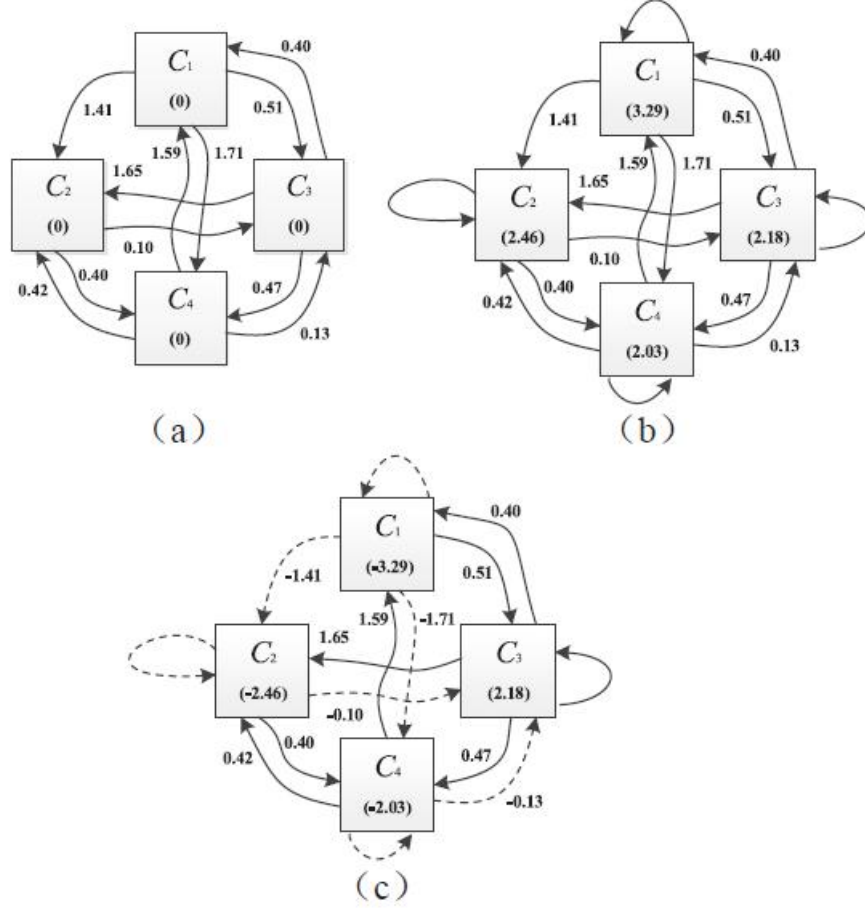


图1 元素集依赖关系示意图

(2) 计算规范化直接影响矩阵，由公式 (2) 和公式 (3) 求得，得到规范化后的直接影响矩阵 $\mathbf{E}$ 。

$$s = \max[\max(\sum_{j=1}^n e_{ij}), \max(\sum_{i=1}^n e_{ij})] \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{E}'}{s} \quad (3)$$

直接影响矩阵中的行和 $\sum_{j=1}^n e_{ij}$ 表示元素集 i 对其他各个元素集的总直接依赖程度，列和 $\sum_{i=1}^n e_{ij}$ 表示元素集 j 受到其他各元素集的总依赖程度，式 (3) 表示正标量 s 取二者中最大值作为比率因子。

(3) 确定间接影响矩阵和总影响矩阵 $\mathbf{T}$ 。考虑一个随着 (E) 阶数影响递减的间接影响，存在 $k-1$ 个过渡态的间接影响 (E^2 ,

$E^3, \dots, E^k$), 类似于吸收性马尔科夫链问题收敛到零矩阵: $\lim_{k \rightarrow \infty} E^k = [0]_{n \times n}$, 则总影响矩阵

$$T = \lim_{k \rightarrow \infty} (E + E^2 + E^3 + \dots + E^k)$$

可通过公式(4)获得。当不收敛到零矩阵时, 规范化后的直接依赖矩阵用公式(3)~

(5)求得^[13]。其中, 取极小的正数, 如 10^{-5} 。

$$T = \lim_{k \rightarrow \infty} (E + E^2 + E^3 + \dots + E^k) = E(1 - E)^{-1} \quad (4)$$

$$s = \max[\max(\sum_{j=1}^n e_{ij}), \varepsilon + \max(\sum_{i=1}^n e_{ij})] \quad (5)$$

包含直接影响和间接影响在内的总影响矩阵 $T = [t_{ij}]_{n \times n}$, 用公式(6)~(7)中 $n \times 1$ 维的 r_i (行和) 和 $1 \times n$ 维的 c_j (列和) 分别表示给定元素集 i 对其他元素集的总影响, 元素集 j 从其他元素集吸收到的总影响。当 $j=i$ 时, $r_i + c_j$ 代表了元素集 i 在系统中的重要程度, $r_i - c_j$ 代表元素集 i 在系统中的净影响。当 $r_i - c_j > 0$, 表示元素集 i 是源发性节点, 当 $r_i - c_j < 0$, 表示元素集 i 是接受性节点。

$$r = [r_i]_{n \times 1} = (\sum_{j=1}^n t_{ij}) \quad (6)$$

$$c = [c_j]_{1 \times n} = (\sum_{i=1}^n t_{ij})' \quad (7)$$

(4) 设置阈值 (α) 修正总影响矩阵, 获得修正后的总影响矩阵 T^α 。为了便于解释节点间的复杂关系, 使得系统的复杂性在可管理控制范围内, 设置阈值 (α) 过滤掉在总影响矩阵中可以忽略的部分, 阈值可以通过专家 (例如头脑风暴法) 进行确定。也就是说, 只保留矩阵 T 中 $t_{ij} \geq \alpha$ 的部分, 将过滤修正后的矩阵定义为 T^α , 则将修正后的总影响矩阵 T^α 作为 ANP 模型中的加权矩阵对未加权超矩阵进行加权。

本质上讲, DANP 模型是通过直接影响矩阵构造存在有限状态齐次马尔科夫性的, 具有可循环有向图结构的马尔科夫链网络决策分析模型, 该方法的网络图结构与直接影响矩阵具有一一对应的元素集依赖支配表达关系, 其加权矩阵向量计算结果高度依赖于直接影响矩阵的建模和构造过程^[14]。如图 1 (b) 所示, 基于 WINGS 的方法指出^[15], DANP 方法忽略了对元素集自我影响关系及其影响强度判断过程的考虑, 但是, 该方法仍然未充分考虑影响关系判别过程中的影响性质; 与之相对应, 图 1 (c) 中虚线表示了影响性质的负相关作用关系, 不仅考虑了影响关系建模过程中的自我影响关系及其判断过程, 而且考虑了影响关系性质。此外, 已有方法大多是从时间静态出发对 DANP 方法进行改进, 无法从根本上回答自我影响关系的来源, 解释其判断推理过程。

1.2 加权距离信息度量模型

针对上述方法缺陷和应急决策初期的问题特点, 为实现系统弹性, 度量并预测应急恢复决策的供水系统总需求, 本文增加了对元素集 (元素) 自我影响关系的考虑, 并在影响关系判别时对影响强度和影响性质进一步展开判断, 给出了基于加权距离信息的度量模型改进 DANP 模型的直接需求矩阵的构造过程, 并结合熵权法来解决应急决策过程中的元素集及元素需求重要度的综合评价问题。文中的加权距离信息, 是指突发事件下描述系统为实现系统弹性的需求信息度量, 即通过欧式距离衡量系统中各个元素集 (元素) 单元的需求距离, 并用距离比来表征元素集 (元素) 中该元素集 (元素) 单元出现的概率, 进而得到以概率形式表征的需求影响矩阵。问题描述如下:

突发事件中存在 n 个时间情景下的系统状态集合, $S = \{S_{t_0}, S_{t_1}, \dots, S_{t_i}, \dots, S_{t_n}\}$ 每个时间状态下的系统都有 m 个元

素集 n 个系统元素, 记为 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 其中, S_{t_0} 为系统处于正常状态, S_{t_i} 为突发事件发生后的系统初始状态, S_{t_i} 事件恢复至稳态结构, S_{t_n} 事件恢复至新的正常状态。将正常状态下 t_0 和突发事件初始阶段 t_1 时刻元素集和元素指标得到的专家群决策结果分别表示为:

$$\begin{aligned} C_{t_0} &= (c_{ij}^{t_0})_{m \times m} \begin{bmatrix} c_{11}^{t_0} & \dots & c_{1m}^{t_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1}^{t_0} & \dots & c_{mm}^{t_0} \end{bmatrix}, & A_{t_0} &= (a_{ij}^{t_0})_{n \times n} \begin{bmatrix} a_{11}^{t_0} & \dots & a_{1n}^{t_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}^{t_0} & \dots & a_{nn}^{t_0} \end{bmatrix} \\ C_{t_1} &= (c_{ij}^{t_1})_{m \times m} \begin{bmatrix} c_{11}^{t_1} & \dots & c_{1m}^{t_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1}^{t_1} & \dots & c_{mm}^{t_1} \end{bmatrix}, & A_{t_1} &= (a_{ij}^{t_1})_{n \times n} \begin{bmatrix} a_{11}^{t_1} & \dots & a_{1n}^{t_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}^{t_1} & \dots & a_{nn}^{t_1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $c_{ii}^{t_0}$ 、 $c_{ij}^{t_0}$ 和 $a_{ii}^{t_1}$ 、 $a_{ij}^{t_1}$ 分别代表第 t_0 和 t_1 时刻元素集自我影响和对其他元素集的影响强度的判断结果, 元素判断结果同理可得。定义 $E_{ij}(c)$ 、 $E_{ij}(a)$ 描述突发事件 t_1 时刻应急决策初期元素集和元素需求单元的欧式距离, $E_{ii}(c)$ 、 $E_{ii}(a)$ 同理可得。为实现系统弹性, 假定恢复至正常状态 t_0 时刻系统状态作为期望系统弹性目标, 则以此为基准值的欧式距离为:

$$E_{ij}(c) = \sqrt{\left(\sqrt{w_{ij}^{t_0}(c)} c_{ij}^{t_0} - \sqrt{w_{ij}^{t_1}(c)} c_{ij}^{t_1} \right)^2}, c_{ij}^{t_0} \neq c_{ij}^{t_1} \quad (9)$$

$$E_{ij}(a) = \sqrt{\left(\sqrt{w_{ij}^{t_0}(a)} a_{ij}^{t_0} - \sqrt{w_{ij}^{t_1}(a)} a_{ij}^{t_1} \right)^2}, a_{ij}^{t_0} \neq a_{ij}^{t_1} \quad (10)$$

其中: $c_{ij}^{t_0}$ 、 $a_{ij}^{t_0}$ 和 $c_{ij}^{t_1}$ 、 $a_{ij}^{t_1}$ 分别为由专家群决策得到的 t_0 和 t_1 时刻元素集和元素的影响强度判断值。显然, 应急决策过程中不同阶段元素集或元素指标的权重是不同的, 进一步考虑 t_0 和 t_1 时刻的每个评价元素集和元素对应的具体权重和, 和, 由于 t_1 时刻系统元素集和元素的权重是未知的, 可利用相似情景下历史案例权重信息近似估计, 通过公式 (11) ~ (12) 采用简单加权平均法进行估计, 其中, k 为历史案例的样本个数, $w_k(c)$ 、 $w_k(a)$ 分别为各案例样本元素集或元素指标的权重值。

$$w_{ij}^{t_1}(c)^* = \frac{\sum_{k=1}^n w_k(c)}{k} \quad (11)$$

$$w_{ij}^{t_1}(a)^* = \frac{\sum_{k=1}^n w_k(a)}{k} \quad (12)$$

因此，对公式（9）～（10）中的各元素集和元素的需求距离单元进一步修正，表示为：

$$E_{ij}(c) = \sqrt{\left(\sqrt{w_{ij}^{t_0}(c)}c_{ij}^{t_0} - \sqrt{w_{ij}^{t_1}(c)}c_{ij}^{t_1}\right)^2}, c_{ij}^{t_0} \neq c_{ij}^{t_1} \quad (13)$$

$$E_{ij}(a) = \sqrt{\left(\sqrt{w_{ij}^{t_0}(a)}a_{ij}^{t_0} - \sqrt{w_{ij}^{t_1}(a)}a_{ij}^{t_1}\right)^2}, a_{ij}^{t_0} \neq a_{ij}^{t_1} \quad (14)$$

考虑到系统元素集（元素）间的影响关系性质，分别用 $f_{E_{ij}(c)}$ ， $f_{E_{ij}(a)}$ 来表示。由公式（15）～（16）得到修正后的元素集（元素）需求距离单元 $E_{ij}^*(c)$ 和 $E_{ij}^*(a)$ ， $E_{ij}^*(c) \in [-4, 4]$ ， $E_{ij}^*(a) \in [-4, 4]$ ， $E_{ii}^*(a)$ ， $E_{ii}^*(c)$ 。同理构成了需求距离矩阵 $E'(C)$ 和 $E'(A)$ 。通过正规化，生成初始直接需求矩阵 $E(C)$ 、 $E(A)$ 。

$$E_{ij}^*(c) = f_{E_{ij}(c)} E_{ij}(c) \quad (15)$$

$$E_{ij}^*(a) = f_{E_{ij}(a)} E_{ij}(a) \quad (16)$$

在保证精度的前提下，进一步展开等价变换使得变换后的总需求指标在正实数域上， $T'(A) \geq 0$ ， $T'(C) \geq 0$ ，具体转换方法参考文献^[16]。根据加权距离信息的定义，计算系统元素集（元素）需求单元距离与元素集（元素）中所有距离和的比值，

将其作为 t_1 时刻各元素集（元素）信息单元出现的概率 $P_{ij}^1(c)$ 、 $P_{ij}^1(a)$ ，并由此得到以概率形式表征的需求影响矩阵 $P_{ij}(C)$ 、 $P_{ij}(A)$ 。将元素集加权矩阵 $P_{ij}(C)$ 记为 $W_{ij}(C)$ ；通过式（19）进一步分块计算元素综合需求影响矩阵，以矩阵 A 为例，对应它的元素超矩阵加权向量为 $W_{ij}(A)$ 。

$$P_{ij}^1(c) = \frac{T_{ij}(c)}{\sum_{i=1}^m T_{ij}(c)} \quad (17)$$

$$P_{ij}^1(a) = \frac{T_{ij}(a)}{\sum_{i=1}^n T_{ij}(a)} \quad (18)$$

$$W_{ij}(A) = \begin{bmatrix} w_{i1} & \cdots & w_{ij} & \cdots & w_{in} \\ \vdots & \cdots & w_{ij} & \cdots & w_{in} \\ w_{i1} & \cdots & w_{ij} & \cdots & w_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{n1} & \cdots & w_{nj} & \cdots & w_{nn} \end{bmatrix} = \begin{matrix} C_1 & C_k & C_m \\ C_1 \begin{bmatrix} p_{11}A_{11} & \cdots & p_{1j}A_{1j} & \cdots & p_{1n}A_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_k \begin{bmatrix} p_{i1}A_{i1} & \cdots & p_{ij}A_{ij} & \cdots & p_{in}A_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_m \begin{bmatrix} p_{n1}A_{n1} & \cdots & p_{nj}A_{nj} & \cdots & p_{nn}A_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix} \end{matrix} \quad (19)$$

综上所述，本文提出的应急恢复阶段的系统总需求度量方法，克服了传统 DANP 模型及其改进方法在元素集（元素）影响度的度量过程中仅考虑影响程度大小而忽视影响性质的缺陷，而且从时间动态上解决了系统自我影响关系的度量并使其具有明确的物理意义。因此，基于加权距离信息的系统需求度量模型明显更具合理性。

1.3 熵权法

在应急决策问题中，熵权法可用来测度决策矩阵各单元的信息量，熵值越小，则指标变异度越大，其信息量就越大，在应急决策中所起的作用就越大，权重就越高。不失一般性，令信息熵采用 e 为底数的自然对数。那么，稳定结构 i 时刻的第 j 个元素集或元素的熵值为：

$$M_j^i(A) = -K(n) \sum_{j=1}^n P_j^i(A) \cdot \ln P_j^i(A) \quad (20)$$

$$M_j^i(C) = -K(m) \sum_{j=1}^m P_j^i(C) \cdot \ln P_j^i(C) \quad (21)$$

公式 (20) ~ (21) 为第 j 个系统元素和元素集的指标需求熵值， $M_j^i(C) \geq 0$ 和 $M_j^i(A) \geq 0$ ，其中，常数 K 与评价指

标数有关，分别令 $K = \frac{1}{\ln m}$ 和 $K = \frac{1}{\ln n}$ ，熵权法的计算过程如下：

$$d_j = 1 - M_j^i \quad (22)$$

$$w_j^o = \frac{d_j}{1 - \sum_{j=1}^n d_j} \quad (23)$$

$$W_j = \frac{w_j^o w_j^s}{1 - \sum_{j=1}^n w_j^o w_j^s} \quad (24)$$

其中： d_j 表示第 j 个指标需求的差异性系数；n 表示指标个数； w_j^o ， w_j^s 分别表示第 j 个指标的客观性权重向量和主观性权重向量； W_j 表示应急恢复阶段第 j 个指标需求重要度的综合评价结果。

2 RDANP 模型的求解步骤

系统弹性是指系统具有这样一种能力，系统不论面临何种类型冲击，包括长期压力或短期冲击，都具有保护、抵御、削弱和适应变化环境，从冲击中承担并快速恢复的能力。通过上文的论述和分析，为实现系统弹性，总结基于 RDANP 方法具体步骤见图 2。

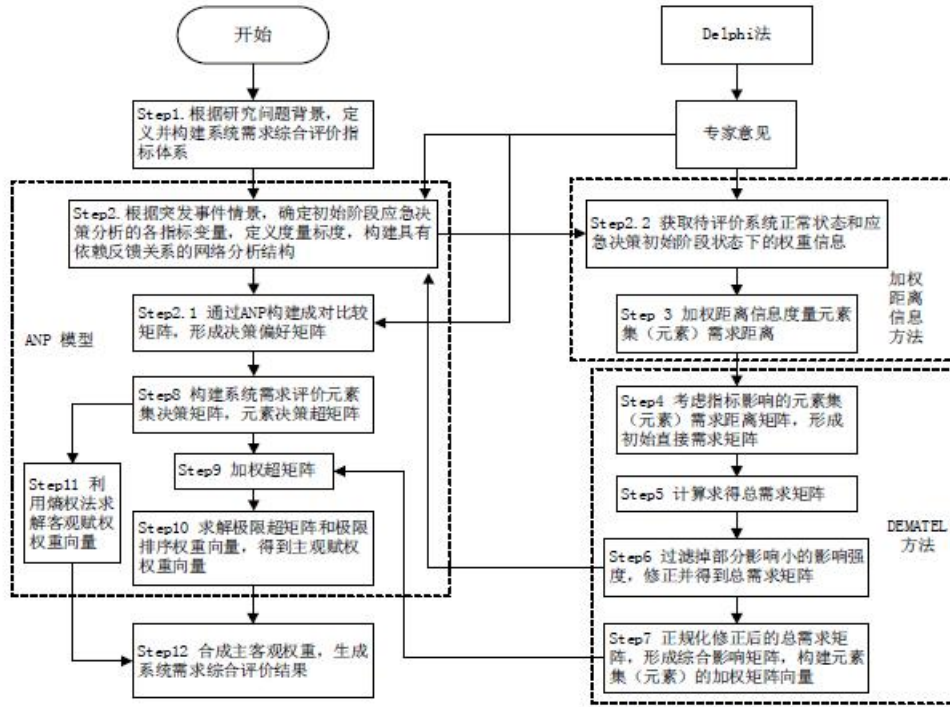


图2 基于RDANP模型的系统综合评价步骤

步骤 1：根据研究问题背景，定义并构建系统综合评价指标体系；

步骤 2：根据突发事件情景，应急决策分析的问题边界和评价对象，确定各指标变量，定义度量标度，明晰待评价系统元素集和元素的层级结构，构建具有依赖反馈关系的网络分析结构。通过 ANP 模型构建成为对比较矩阵，形成元素集和元素的决策偏好矩阵： $DP(C)$ 、 $DP(A)$ ；另一方面，根据公式 (11) ~ (12)，在历史案例库中获得相似情景下应急决策初始阶段的各元素

集和元素决策权重信息 $w_{ij}^{t1}(c)^*$ 和 $w_{ij}^{t1}(a)^*$ ；

步骤 3：根据公式 (8) ~ (14)，运用加权距离信息度量各元素集和元素的需求距离 $E_{ij}(a)$ 、 $E_{ij}(c)$ ；

步骤 4：根据公式 (15) ~ (16)，系统元素集和元素影响关系判别时需要考虑自我影响强度并判别影响性质，形成需求距离矩阵，将其作为元素集和元素的直接需求影响矩阵 $E(C)$ 和 $E(A)$ ；

步骤 5：根据公式 (1) ~ (7)，计算由突发事件初始直接需求产生系统总需求矩阵 $T(C)$ 和 $T(A)$ ，并进一步将其等价变换至 $T'(C)$ 和 $T'(A)$ ， $T'(C) \geq 0$ ， $T'(A) \geq 0$ ；

步骤 6：采用专家群决策方式，确定合理的阈值 α ，过滤掉部分影响小的需求，得到修正后的总需求矩阵 $T^{\alpha}(C)$ 和 $T^{\alpha}(A)$ ；

步骤 7：根据公式 (17) ~ (19)，正规化 $T^{\alpha}(C)$ 和 $T^{\alpha}(A)$ ，形成概率形式的元素集和元素总需求影响矩阵 $P_{ij}(C)$ 、 $P_{ij}(A)$ ，假定 t_i 时刻总需求预测结果作为 t_1 决策需求，由概率形式的总需求影响矩阵 $P_{ij}(C)$ 构造元素集的加权矩阵，记为 $W_{ij}(C)$ ，进一步分块加权计算综合需求影响矩阵作为元素超矩阵的加权矩阵，记为 $W_{ij}(A)$ ，分析并修正 ANP 模型的网络结构关系；

步骤 8：根据步骤 2，构建系统元素集和元素决策矩阵和决策超矩阵 $D(C)$ 和 $D(A)$ ；

步骤 9：结合步骤 7 ~ 8，加权决策矩阵计算并得到加权后的决策超矩阵 $D(A)^*$ ；

步骤 10：参考 ANP 模型步骤^[17]，求解极限超矩阵和极限排序权重向量，得到主观权重 w_j^s ；

步骤 11：根据公式 (20) ~ (23)，利用熵权法求解客观权重，得到客观权重 w_j^o ；

步骤 12：根据公式 (24)，综合考虑主客观赋权，合成确定突发事件应急决策的需求重要度评价结果 w_j 。

3 实例应用

本部分以咸潮情景下上海市某区域实现供水系统弹性为例，来说明上文所述突发事件系统需求重要度综合评价方法的潜在应用。本文中咸潮情景下的供水系统主要由供水水质 (C_1)、供水水量 (C_2)、供水水价 (C_3)、供水服务能力 (C_4) 为元素集 (上层评价指标)，以氯化物含量 (A_{11})、氨氮物含量 (A_{12})、菌落总数 (A_{13})、其他污染物含量 (A_{14})、获得安全饮用水的人口比例 (A_{21})、涉水企业停水率 (A_{22})、生态环境缺水率 (A_{23})、经济活动中的用水强度 (A_{24})、家庭水费可承受能力 (A_{31}) 和供水服务水平 (A_{41}) 等元素 (下层评价指标) 构成评价指标体系并展开评价。

根据 ANP 理论，该问题由元素集和元素组成且元素集内部相互影响，元素集和元素存在循环支配关系，形成供水系统网络层次结构 (图 3)。下面给出运用上文提出方法解决系统元素集和元素需求重要度综合评价问题的部分计算过程和结果。

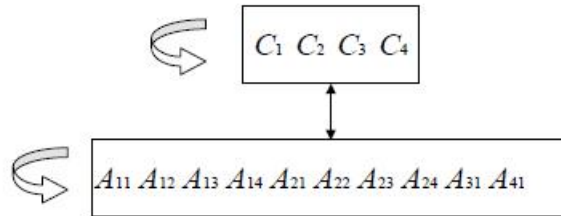


图3 某供水系统评价问题的ANP网络结构图

首先，按照 ANP 方法，专家对元素集和元素展开成对比较判断，根据专家群决策判断结果，给出如下反映上述问题的元素集和元素的决策偏好矩阵 $DP(A)$ 、 $DP(C)$ 。

$$DP(A) = \begin{bmatrix} 0.66 & 0.66 & 0.66 & 0.66 & 0.62 & 0.52 & 0.43 & 0.62 & 0.51 & 0.62 \\ 0.15 & 0.15 & 0.15 & 0.15 & 0.17 & 0.22 & 0.24 & 0.17 & 0.21 & 0.17 \\ 0.15 & 0.15 & 0.15 & 0.15 & 0.17 & 0.22 & 0.24 & 0.17 & 0.20 & 0.17 \\ 0.03 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.04 & 0.05 & 0.09 & 0.05 & 0.09 & 0.05 \\ 0.69 & 0.60 & 0.60 & 0.48 & 0.68 & 0.68 & 0.68 & 0.68 & 0.65 & 0.69 \\ 0.16 & 0.18 & 0.18 & 0.25 & 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.20 & 0.20 \\ 0.09 & 0.15 & 0.15 & 0.18 & 0.08 & 0.08 & 0.08 & 0.08 & 0.09 & 0.06 \\ 0.05 & 0.07 & 0.07 & 0.09 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.06 & 0.05 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

$$DP(C) = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 & 7.00 & 6.00 \\ 1.00 & 1.00 & 7.00 & 6.00 \\ 0.14 & 0.14 & 1.00 & 3.00 \\ 0.17 & 0.17 & 0.33 & 1.00 \end{bmatrix}$$

然后，根据公式（1）和公式（8），构建 t_0 和 t_1 时刻的元素集和元素的影响强度判断值， $c_{ii}^{t_0}$ 、 $c_{ij}^{t_0}$ 和 $a_{ii}^{t_1}$ 、 $a_{ij}^{t_1}$ 分别构成 t_0 和 t_1 时刻影响强度判断矩阵 C_{t_0} 、 A_{t_0} 和 C_{t_1} 、 A_{t_1} ，不失一般性，令 $w_{ij}^{t_0}(a) = [0.625, 0.625, 0.625, 0.625, 0.625, 0.625, 0.625, 0.625, 0.25, 0.25]^T$ ， $w_{ij}^{t_0}(c) = [0.5, 0.5, 0.5, 0.5]^T$ ，由公式（11）～（12），计算案例库中的历史决策权重信息， $w_{ij}^{t_1}(a)^* = w_{ij}^{t_0}(a)^* = [0.15, 0.08, 0.08, 0.04, 0.16, 0.07, 0.06, 0.06, 0.15, 0.08]^T$ ； $w_{ij}^{t_0}(c)^* = [0.4, 0.3, 0.2, 0.1]^T$ 。

$$C_{t_0} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 8 \\ 0 & 1 & 4.5 & 4.75 \\ 3 & 3 & 1 & 6 \\ 6 & 6 & 6 & 1 \end{bmatrix} \quad C_{t_1} = \begin{bmatrix} 6 & 5.3125 & 4.5 & 7.25 \\ 0 & 5.4 & 5.25 & 6.25 \\ 3 & 5.75 & 6 & 8 \\ 7.25 & 6.25 & 7 & 8 \end{bmatrix}$$

$$A_{t_0} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 6 & 3 & 3 & 6 \\ 3 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 6 \\ 3 & 3 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 6 \\ 3 & 3 & 3 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 6 & 3 & 6 & 6 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 1 & 3 & 6 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 2 & 1 & 3 & 6 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 6 & 6 & 1 & 3 & 4 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 1 & 6 \\ 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \end{bmatrix}$$

$$A_{t_1} = \begin{bmatrix} 8 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 8 & 4 & 6 & 8 \\ 3 & 6 & 3 & 3 & 5 & 4 & 3 & 3 & 4 & 7 \\ 3 & 3 & 6 & 4 & 5 & 4 & 3 & 3 & 4 & 7 \\ 3 & 3 & 3 & 6 & 5 & 4 & 3 & 3 & 4 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 8 & 3 & 6 & 8 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 6 & 3 & 7 & 3 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 3 & 6 & 5 & 7 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 7 & 7 & 4 & 3 & 4 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 8 & 6 & 5 & 4 & 6 & 8 \\ 8 & 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 6 & 7 & 8 \end{bmatrix}$$

接着，根据公式（9）～（16），计算各元素集和元素的需求距离 $E_{ij}(a)$ 、 $E_{ij}(c)$ ；形成需求距离矩阵作为直接需求影响矩阵 $E(C)$ 和 $E(A)$ 。

$$E(C) = \begin{bmatrix} -3.29 & -1.41 & 0.51 & -1.71 \\ 0.00 & -2.46 & -0.10 & 0.40 \\ 0.40 & 1.65 & 2.18 & 0.47 \\ 1.59 & 0.42 & -0.13 & -2.03 \end{bmatrix}$$

$$E(A) = \begin{bmatrix} 2.85 & 0.95 & 0.95 & 0.45 & -1.65 & 0.84 & 0.46 & -0.23 & 1.57 & -1.60 \\ 0.41 & 1.45 & 0.10 & 0.15 & -1.25 & 0.31 & 0.02 & -0.02 & 0.80 & -1.21 \\ 0.41 & 0.10 & 1.45 & 0.05 & -1.25 & 0.31 & 0.02 & -0.02 & 0.80 & -1.21 \\ 0.41 & 0.10 & 0.10 & 0.95 & -1.25 & 0.31 & 0.02 & -0.02 & 0.80 & -1.21 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -2.15 & -0.62 & -0.02 & -0.03 & -1.60 & -1.60 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -1.70 & 1.34 & -0.02 & -0.21 & 0.41 & -1.57 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -0.85 & 0.29 & 1.22 & -0.47 & 1.21 & -1.21 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -0.85 & 0.35 & 0.21 & -0.73 & 0.41 & -0.55 \\ -0.34 & -0.65 & -0.65 & -0.90 & 1.70 & -0.09 & -0.28 & 0.52 & 1.82 & 0.10 \\ -0.10 & -1.02 & -1.02 & -1.60 & 0.20 & -1.15 & -1.29 & -1.53 & -0.29 & -2.60 \end{bmatrix}$$

根据公式（1）～（7），计算总需求影响矩阵，变换生成总需求矩阵 $T'(C)$ 和 $T'(A)$ ，进一步过滤掉影响小的需求形成 $T^{\circ}(C)$ 和 $T^{\circ}(A)$ ，如图 4 所示，得到考虑元素集自我影响强度和影响性质的影响的元素集需求影响网络关系图。图 4 中的（a）、

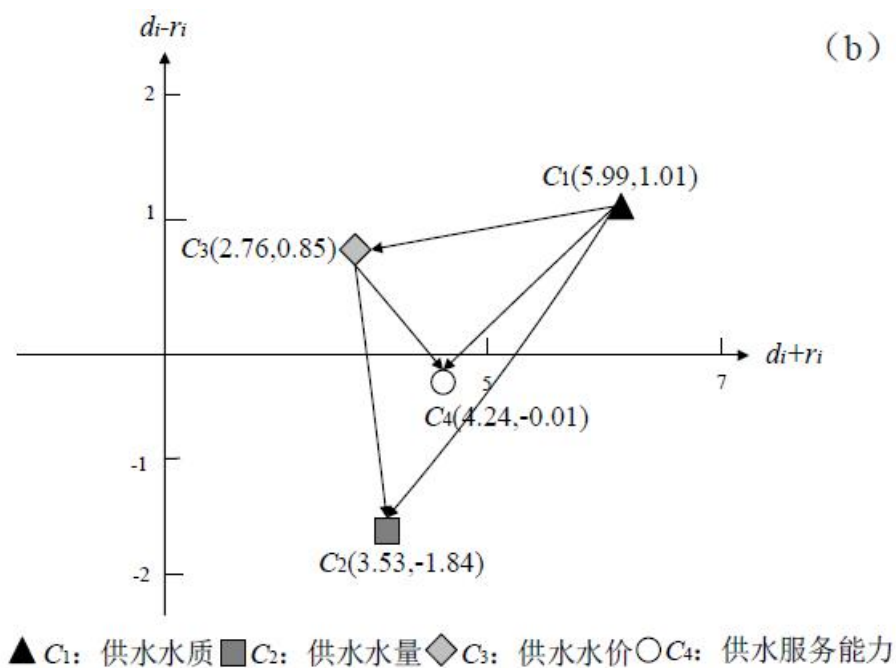
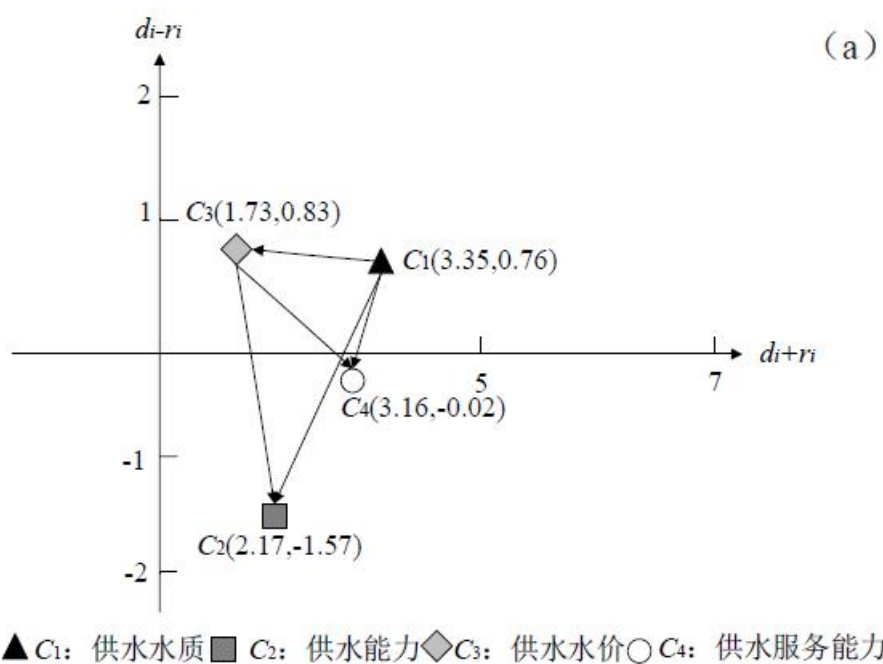
(b)、(c) 分别为 DANP 模型、WINGS 模型（为便于比较分析，文中仅将考虑自我影响关系的 DANP 模型称为 WINGS 模型）以及基于加权距离信息考虑了自我影响关系和影响性质的 RDANP 模型，得到元素集需求影响网络关系图。对比以上各图可知，DANP 模型的元素集需求重要度 (r_i+c_j) 总体略低于 WINGS 模型和 RDANP 模型，其原因在于其忽略了元素集的自我影响关系；DANP 模型和 WINGS 模型的净影响 $r_i+c_j < 0$ ，说明了短期内供水水量 (C_1) 和供水服务能力 (C_4) 均能够吸收咸潮灾害影响；在 RDANP 模型中，仅供水水价 (C_3) 小于零，说明了长期需求预测情况下各元素集间的收益损失具有互补性作用，其影响最终会作用于系统供水水价 (C_3) 上。

在此基础上，根据公式 (17) ~ (19)，计算元素集的需求影响矩阵并构造加权矩阵 $W_{ij}(C)$ 和 $W_{ij}(A)$ ，结合元素集和元素的偏好矩阵，构建元素集决策矩阵和决策超矩阵 $D(C)^*$ 和 $D(A)^*$ 。为了节省篇幅，这里仅给出 $D(C)^*$ 和 $D(A)^*$ 的计算结果：

$$D(C)^* = \begin{bmatrix} 0.37 & 0.37 & 2.21 & 1.75 \\ 0.14 & 0.37 & 2.82 & 1.00 \\ 0.02 & 0.02 & 0.12 & 0.44 \\ 0.06 & 0.02 & 0.06 & 0.40 \end{bmatrix}$$

$$D(A)^* = \begin{bmatrix} 0.0114 & 0.0127 & 0.0127 & 0.0171 & 0.0218 & 0.0103 & 0.0090 & 0.0134 & 0.0082 & 0.0099 \\ 0.0051 & 0.0029 & 0.0054 & 0.0014 & 0.0041 & 0.0070 & 0.0086 & 0.0042 & 0.0056 & 0.0044 \\ 0.0052 & 0.0055 & 0.0029 & 0.0014 & 0.0041 & 0.0071 & 0.0086 & 0.0042 & 0.0056 & 0.0044 \\ 0.0013 & 0.0014 & 0.0014 & 0.0010 & 0.0010 & 0.0016 & 0.0032 & 0.0013 & 0.0024 & 0.0013 \\ 0.0097 & 0.0074 & 0.0074 & 0.0017 & 0.0179 & 0.0286 & 0.0241 & 0.0258 & 0.0335 & 0.0115 \\ 0.0024 & 0.0026 & 0.0026 & 0.0009 & 0.0062 & 0.0052 & 0.0075 & 0.0073 & 0.0081 & 0.0032 \\ 0.0014 & 0.0023 & 0.0023 & 0.0046 & 0.0033 & 0.0029 & 0.0016 & 0.0039 & 0.0032 & 0.0011 \\ 0.0007 & 0.0011 & 0.0011 & 0.0024 & 0.0019 & 0.0017 & 0.0017 & 0.0026 & 0.0025 & 0.0010 \\ 0.0173 & 0.0192 & 0.0192 & 0.0258 & 0.0237 & 0.0183 & 0.0184 & 0.0094 & 0.0135 & 0.0218 \\ 0.0406 & 0.0483 & 0.0484 & 0.0676 & 0.0198 & 0.0199 & 0.0207 & 0.0217 & 0.0231 & 0.0413 \end{bmatrix}$$

最后，根据公式 (20) ~ (24)，通过 ANP 模型和熵权法，计算各元素集和元素的主观权重 w_j^o 和客观权重 w_j^s ，并合成确定应急决策元素集和元素需求重要度权重 $W_j(C_j)$ 和 $W_{ij}(A_{ij})$ 。相应的计算结果如图 5 所示。以 $W_j(C_j)$ 为例分析， $W_{ij}(A_{ij})$ 同理可得。研究结果表明：① WINGS 模型的计算结果过高估计了供水水质 (C_1) 的重要度，其原因是过于强调了咸潮灾害早期水质中氯化物存在扩散效应，也就是说，供水水质自我影响关系中的正反馈占主导作用，使得计算过程的收敛性差，显然无法反映供水系统长期需求预测的客观实际情况；②与 WINGS 模型不同，DANP 模型未考虑元素集的自我作用关系影响，其结果反映了元素集加权过程的作用结果。



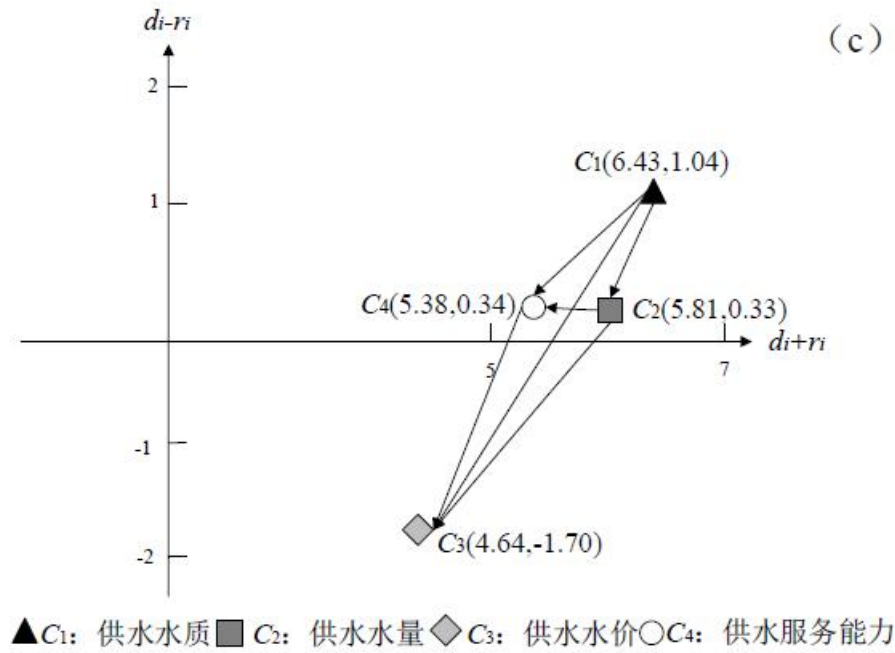


图4 元素集的需求影响网络关系图

由表 1 可知，相比较运用 ANP 方法得到的综合评价结果，DANP 模型更加突出了反映长期需求供水水价（C₃）和供水服务能力（C₄）的重要影响作用，并得到了与 WINGS 模型一致的元素集需求重要度排序评价结果；③虽然 WINGS 模型和 DANP 模型的需求重要度排序结果具有一致性，然而，上述模型忽视了元素集的自我影响关系以及影响性质的作用，或者过于突出了元素集自我影响关系的作用。研究表明，RDANP 模型不仅在短期影响过程中体现了供水水质（C₁）和供水水量（C₂）的重要作用，而且能够反映元素集自我影响关系以及元素集间影响关系的影响强度和性质，体现了以提高供水服务水平（A₁₁）代表的增强供水服务能力（C₄）的重要作用，均衡了系统长期影响过程中系统正反馈和负反馈作用下的需求重要度。因此，该方法更加符合应急决策初期供水系统总需求预测及其重要度综合评价的实际情况。

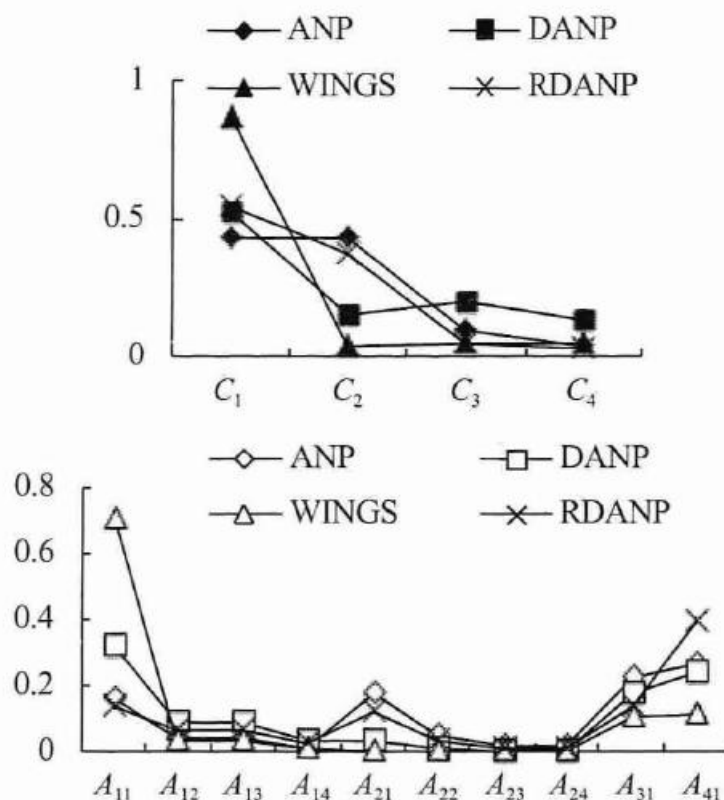


图5 采用不同方法得出的元素集/元素需求重要度综合评价结果

表1 采用不同方法得出的元素集需求重要度排序结果

	C_1	C_2	C_3	C_4	重要度排序结果
ANP 模型	0.43	0.43	0.10	0.04	$C_2 > C_1 > C_3 > C_4$
DANP 模型	0.52	0.15	0.20	0.13	$C_1 > C_3 > C_2 > C_4$
WINGS 模型	0.87	0.04	0.05	0.04	$C_1 > C_3 > C_2 > C_4$
RDANP 模型	0.55	0.37	0.05	0.03	$C_1 > C_2 > C_3 > C_4$

4 结论

本文给出了一种考虑突发事件应急恢复阶段供水系统总需求预测及其重要度的综合评价方法。该方法继承了 DANP 模型中线性推理方式和主观赋权法的优势，在考虑实现系统弹性目标的基础上，通过基于加权距离信息方法确定系统直接需求信息，完善了元素集和元素的自我影响强度和影响性质等影响关系的判别过程，结合 DANP 模型和熵权法得到了供水系统需求重要度的综合评价结果。与已有方法比较，所提出的方法更加全面地考虑了突发事件下城市供水系统应急决策过程中短期需求和长期需求影响的实际情况，更好地体现了应急决策分析过程中供水系统总需求的客观化建模过程，进一步完善了采用 ANP 模型构造加权超矩阵过程中的加权矩阵确定问题。在未来研究中，将进一步对供水系统需求的非线性推理预测，区间估计判断下的系统总需求度量及其重要度综合评价等方面问题展开深入研究。

参考文献:

-
- [1] 李湖生. 灾区恢复重建阶段更应完善应急准备体系[N]. 科学时报, 2010-10-18 (A4) .
- [2] Hashimoto T, Stedinger J R, Loucks D P. Reliability, resilience and vulnerability for water resources system performance evaluation[J]. Water Resources Research, 1982, 18(1): 14-20.
- [3] Moy W S, Cohon J L, Revelle C S. Programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir [J]. Water Resources Research, 1986, 22(4): 489-498.
- [4] Yu C, Hao Z. Resilience classification research of water resources system in changing environment [C]// 2008 2nd international conference on bioinformatics and biomedical engineering. Shanghai: IEEE, 2008: 3741-3744.
- [5] Zhang L, Chen X H, Qian H S. Diagnosis of resilience to flood hazard in lower reaches of the Beijing river [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(9): 1129-1134.
- [6] 许涛, 王春连, 洪敏. 基于灰箱模型的中国城市内涝弹性评价[J]. 城市问题, 2015 (4) : 2-11.
- [7] 王伟, 刘茂. 基于 CBR 的突发公共事件应急资源需求预测方法[J]. 安全与环境学报, 2010 (5) : 217-220.
- [8] 姚恩婷, 孟燕萍, 林国龙. 基于 BP 神经网络的受灾点的需求紧迫性分级方法[J]. 灾害学, 2016 (3) : 211-216.
- [9] 舒其林. “情景-应对”模式下非常规突发事件应急资源配置调度研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2012.
- [10] 李春好, 陈维峰, 苏航, 等. 尖锥网络分析法[J]. 管理科学学报, 2013 (10) : 11-24.
- [11] 郭赫曦, 张海涛, 王明哲. 基于指标影响的 ANP 内部依赖矩阵构造方法[J]. 系统工程, 2015 (6) : 152-157.
- [12] 孙永河, 段万春, 李春好, 等. 动态环境下的群组专家多准则变权决策方法[J]. 计算机工程与应用, 2015 (2) : 1-6.
- [13] Lee H S, Tzeng G H, Yeh W, et al. Revised DEMATEL: Resolving the infeasibility of DEMATEL [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(11): 6746-6757.
- [14] 刘奇志. 基于马尔科夫链的网络决策分析方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011 (S1) : 133-146.
- [15] Michnik J. Weighted Influence Non-linear Gauge System (WINGS) - An analysis method for the systems of interrelated components [J]. European Journal of Operational Research, 2013, 228(3): 536-544.
- [16] 于洋, 李一军. 基于多策略评价的绩效指标权重确定方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003 (8) : 8-15.
- [17] 王莲芬. 网络分析法 (ANP) 的理论与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001 (3) : 44-50.