

文章编号: 2095-2163(2021)12-0097-07

中图分类号: O221;C934

文献标志码: A

灾害事件中三支决策的鲁棒选址优化研究

贾哲¹, 赵敬华¹, 纪颖²

(1 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2 上海大学 管理学院, 上海 200444)

摘要: 近年来全球自然灾害频发, 由于其突发性和持续性, 选址优化问题变得越来越复杂。因为存在诸多不确定因素, 使得选址优化开始与决策评价相结合, 成为选址研究的热点。对选址优化的研究进行决策评估, 会直接影响灾害救援效率。首先, 构建一个以总需求差最小化为目标的确定性整数规划模型; 然后, 考虑不确定性救援需求, 构建多面体不确定集合, 刻画救援需求的不确定性, 同时构建鲁棒线性优化模型, 并对模型进行选址优化; 最后, 通过三支决策考虑主观属性, 解决灾后决策固有的不精确性, 为备选中心进行评估与分类。算例结果表明, 多面体不确定集合配置模型总需求差最小, 鲁棒性较好。对比实验验证了三支决策的优势, 可以自动获得优先紧急的选址分类。

关键词: 设施选址; 三支决策; 鲁棒优化; 直觉模糊多属性决策

Research on robust location optimization for three-way decision in disaster events

JIA Zhe¹, ZHAO Jinghua¹, JI Ying²

(1 Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093 China;

2 School of Management, Shanghai University 200444, China)

[Abstract] In recent years, global natural disasters have occurred frequently. Due to its abruptness and persistence, location optimization issues have become increasingly complex. There are so many uncertain factors that make location optimization begin to be combined with decision-making evaluation. The evaluation of location optimization will directly affect the rescue efficiency. In the first place, we construct a deterministic integer programming model minimizing the total demand difference. Then considering uncertain demand, a polyhedron-uncertain set is introduced to characterize the uncertainty of rescue demand. In the meantime, a robust linear optimization model is established to obtain the location-allocation solution. Finally, it employs a three-way decision that considers multiple subjective attributes to address the impreciseness inherent in post-disaster decision making. Numerical results show that the robust location model with polyhedron uncertainty set has the minimum total demand difference. The decision-maker can assist the government to opt for uncertainty levels according to their risk preference. The comparison experiments verify the advantages of the three-way decision and can obtain priority location classification.

[Key words] facility location; three-way decision making; robust optimization; intuitionistic fuzzy multiple attribute decision making

0 引言

新冠疫情的爆发对人民的生命安全造成了极大的威胁, 防疫物资需要在灾害发生后立即发放。临时转运中心可以短期内将紧急救援物资存储、分类、整合和分发到灾害需求场所。因此, 转运中心的选址问题成为灾害救援的一个重要研究方向。

在选址决策中, 传统的网络模型考虑了定量因素, 旨在最小化成本或者最大化覆盖范围。但非量化标准, 如交通状况、劳动力可用性、地理特征等因素, 在决定位置时也很重要。此外, Montibeller 和 Yoshizaki 指出无形因素可以改变数学模型产生的

网络配置^[1]。针对灾害事件中决策情况的复杂性、不确定性、环境混乱以及信息时间有限性等特点, 虽然选址优化方法可以评估定量因素, 但这种对定性因素的评估往往伴随着模糊性和不明确性^[2]。在此情况下, 决策者在应对紧急情况时, 必须做出无数的反应性操作决策, 来解决几乎没有信息的复杂困境。

模糊多属性决策方法, 以其在评价不精确属性方面的实用性而著称, 其利用模糊集理论来处理决策中的模糊性和不精确性。如: 文献[3]中提出一种直觉模糊多属性决策的威胁评估方法, 为防空目标威胁进行排序; 文献[4]针对投资决策中模糊偏

作者简介: 贾哲(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 供应链管理与优化; 赵敬华(1984-)女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 电子商务、互动创新; 纪颖(1981-)女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 大数据技术与应用、优化与决策。

通讯作者: 赵敬华 Email: sunnyjlove@163.com

收稿日期: 2021-09-14

好信息,对决策方案排序,解决投资决策中的冲突问题,形成偏好一致的决策方案;文献[5]构建 AHP-模糊 TOPSIS 模型,对电子商务环境的仓储应急管理进行综合评价;文献[6]对城市办事服务的便捷度评价,建立指标评价体系,采用熵权 TOPSIS 法进行评价研究;文献[7]为克服指标难定量问题,提出三参数区间灰数,对物流供应商评价等。在此基础上,本文弥补了多属性决策的二选一决策结果,为转运中心进行排序与分类。

三支决策的出现,为设施中心提供了一种三分行动框架,同时也为政府提供客观优选目标。对三支决策的研究中,文献[8]提出模糊三支算子及逆算子处理模糊环境难题;文献[9]在模糊形式下,结合模糊集合理论,将对象与属性的关系用隶属度表示,解释模糊三支概念在实际生活中的应用;文献[10]为了适应复杂动态任务环境的问题,提出了基于 VIKOR 和三支决策的多目标威胁评估方法。

因人道主义救援守则规定,必须将减轻人类痛苦放在首位,所以本文的首要目标是最大限度地减少未满足需求差的值,这与 Lin 等^[11]最小化成本研究相反。Rennemo 等^[12]最大化效用,考虑一个灾难响应的三阶段混合整数随机规划,但也只使用了基于选址优化的纯定量方法。本文使用鲁棒优化与三支决策方法,解决设施选址问题。对鲁棒优化的研究中,文献[13]提出了一个线性优化模型来构造所有属于凸集数据的可行解。但此模型为了保证鲁棒性,放弃了太多标称问题的最优性,产生的解太过保守。文献[14]Tal 考虑具有椭球形式数据不确定性,求解以锥二次问题形式出现的标称问题的鲁棒对应。这种方法的缺点是产生的模型尽管是凸的但却是非线性的,在计算方面有更高的要求。

典型的选址问题包括:确定开放设施的数量、空间位置和需求分配。然而在灾害救援期间,建设转运中心还需要确定材料有限时,设施建立的顺序。因为材料需要具备可组装性、可拆卸性、可移动性、阻燃性、防水性、防腐性和防紫外线等特点,而很多发展中国家材料数量有限。如 2015 年尼泊尔地震救援初期,由于可用移动材料有限,导致救援物资堆积在机场,有效建立转运中心面临困难^[15]。

针对上述情况,本文提出的多面体集鲁棒优化是一种具有线性结构且易于控制不确定度的鲁棒构架,同时降低了保守度。为了响应受灾地区紧急需求,并使稀缺材料能够得到有效利用,本文提出了三

支决策中的接受正区域、拒绝否定区域和不承诺边界理念,将每个备选设施进行排序并分类为:优先建设类别、非优先建设类别、是否优先建设类别。实验结果表明,优化的稳定性有了较大提高,可以处理不确定需求,并自动为政府提供优选方案。

1 鲁棒优化模型

在选址优化中,考虑灾害需求的不确定性,采用鲁棒优化,以未满足需求最小化为目标,同时均衡考虑分配设施数量约束和最大容量约束,确定应急临时中心的位置和临时中心与需求点之间网络配置的拓扑结构。

1.1 不确定集合

不确定集合的大小与含有不确定系数约束成立的概率有密切关系。模型中约束条件不成立的概率越小,鲁棒性越好。研究鲁棒问题,首先需考虑一般线性规划问题: $\max c^T x$ s.t. $Ax \leq b, l \leq x \leq u$ 。

假设系数矩阵 A 的第 i 行元素仅 \tilde{a}_{ij} 不确定,令 $\tilde{a}_{ij} = a_{ij} + \hat{a}_{ij}\xi_{ij}$, \tilde{a}_{ij} 表示系数的实际值, a_{ij} , \hat{a}_{ij} 分别表示参数名义值和波动, ξ_{ij} 为不确定因素,属于一个不确定集 E , 并且可以取集合中的任意值。因此,约束可以重新表示为:

$$\sum_j a_{ij}x_j + \max_{\xi \in E} \sum_j \hat{a}_{ij}\xi_{ij}x_j \leq b_i$$

多面体集不确定集合是根据 1 范数 (l_1) 定义的: $E^p = E_1 = \{\xi: \|\xi\|_1 \leq \Gamma\} = \{\xi: \sum |\xi_{ij}| \leq \Gamma_i\}$

其中, Γ_i 为可调整的不确定水平参数,表示不确定集合的不确定水平,代表优化模型的风险偏好程度。

基于上述条件,建立应急物资需求不确定性的鲁棒线性整数优化模型前,给出基于确定性需求整数规划模型。

1.2 定义符号与变量

假设:需求点位置已知;所有候选应急临时中心的位置已知,且有容量限制;供应仓库必须将救援物资运输至临时物流中心,而不是直接运输到需求点。

符号定义如下:

I : 灾害需求点集合, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$

J : 候选临时物流中心集合, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$

K : 候选供应仓库集合, $k \in \{1, 2, \dots, h\}$

M : 一个很大的数

d_i : 需求点 i 的需求

p : 临时物流中心总数量

t_i : 分配给需求点 i 的临时中心数量
 q_{ji} : 从临时中心 j 运输至需求点 i 的数量
 r_{kj} : 从供应仓库 k 运输至临时中心 j 的数量
 Qs_k : 供应仓库 k 可提供的最大数量
 Qh_j : 临时中心 j 可提供的最大数量
 变量参数设定:

$$y_j = \begin{cases} 1, & j \text{ 处设施为选为临时中心} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$z_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{临时中心 } j \text{ 为需求点 } i \text{ 服务} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

1.3 确定性优化模型

在大型灾害事件发生之后, 应急部门会对受灾地区进行初步规划, 确定候选设施的集合。本文的目标是最大限度地减少未满足需求差的值, 约束保证候选设施的容量限制能力, 其模型如下:

$$\min \sum_{i=1}^m d_i - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m q_{ji} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^m q_{ji} = \sum_{k=1}^h r_{kj}, \forall j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n r_{kj} \leq Qs_k, \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^h r_{kj} \leq Qh_j, \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m q_{ji} \leq Qh_j, \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n y_j \leq p \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n q_{ji} \leq d_i, \forall i \in I \quad (7)$$

$$z_{ji} \leq y_j, \forall j \in J \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n z_{ji} \leq t_i, \forall i \in I \quad (9)$$

$$q_{ji} \leq M * z_{ji}, \forall j \in J \quad (10)$$

$$r_{kj} \geq 0, \forall k \in K, j \in J \quad (11)$$

$$q_{ji} \geq 0, \forall j \in J, i \in I \quad (12)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \forall j \in J \quad (13)$$

$$z_{ji} \in \{0, 1\}, \forall j \in J, i \in I \quad (14)$$

1.4 多面体集鲁棒模型

在实际疫情中, 各救助点的需求无法准确获取, 在此假设需求点的需求 \tilde{d} 为随机变量, $\tilde{d} = d + \xi \hat{d}$ (\hat{d} 为扰动量)。根据定义可得不确定集合:

$$E^p = E_1 = \{\xi: \|\xi\|_1 \leq \Gamma\} = \{\xi: \sum |\xi_{ij}| \leq \Gamma_i\}$$

根据定理 1 可获得鲁棒模型。

定理 1:

约束: $\sum_j a_{ij}x_j + \max_{\xi \in E} \sum_j \hat{a}_{ij}\xi_{ij}x_j \leq b_i$ 等价于

$$\sum_j a_{ij}x_j + \Gamma_i p_i \leq b_i, p_i \geq \hat{a}_{ij} | x_j |。$$

证明 定义 $P_1 = [I_{L \times L}; O_{I \times L}]$, $p_1 = [O_{L \times I}, \Gamma]$, $K_1 = \{[\theta_{L \times 1}; t]: \|\theta\|_1 \leq t\}$, L 为不确定数据的个数。所以约束中最大化可重新表示为:

$$\max_{\xi \in E^p} \left\{ \sum_j \hat{a}_{ij}x_j\xi_{ij}: P_1\xi + p_1 \in K_1 \right\}$$

同样定义对偶变量 w_i, λ_i 。根据对偶锥的性质, $K_1^* = \{[\theta_{L \times 1}; t]: \|\theta\|_{\infty} \leq t\}$

$$\text{所以, } \max_{\xi \in E^p} \left\{ \sum_j \hat{a}_{ij}x_j\xi_{ij}: P_1\xi + p_1 \in K_1 \right\} =$$

$$\min_{w, \lambda} \left\{ \Gamma \lambda_i: w_{ij} = \hat{a}_{ij}x_j, \|w_i\|_{\infty} \leq \lambda_i \right\}$$

$$\min_w \left\{ \Gamma \max_j |w_{ij}|: w_i = \hat{a}_{ij}x_j \right\} = \Gamma p_i, p_i \geq \hat{a}_{ij} | x_j |$$

由此可得: 当数据不确定时, 且不确定需求 \tilde{d} 集合为多面体集, 可得鲁棒配置模型。

其中, Γ_u 为目标函数不确定需求水平参数; Γ'_u 为约束中不确定需求的参数; θ_u, θ'_u 分别为其对应的对偶变量。

$$\min z_b \quad (15)$$

$$\text{s.t. } (2) \sim (6) \quad (8) \sim (14)$$

$$\sum_{i=1}^m d_i + \Gamma_u \theta_u - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m q_{ji} \leq z_b \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^n q_{ji} \leq d_i + \Gamma'_u \theta'_u, \forall i \in I \quad (17)$$

$$\theta'_u \geq \hat{d}_i, \theta_u, \theta'_u \geq 0, \forall i \in I \quad (18)$$

2 直觉模糊多属性与三支决策

专家根据所选评估的属性, 对临时中心进行评估。首先给出直觉模糊集的概念、性质以及直觉模糊 Topsis 法的步骤, 然后计算每个备选中心的条件概率进行排序; 根据对每个设施的属性整体进行评估, 对每个属性进行构造目标损失函数; 最后通过聚合多属性损失函数得到决策阈值, 对选中设施进行分类。

2.1 基本概念与性质

直觉模糊集定义 1:

$\tilde{A} = \{ \langle x, U_{\tilde{A}}(x), V_{\tilde{A}}(x), \rangle | x \in X \}$ 为直觉模糊集。其中, $U_{\tilde{A}}(x), V_{\tilde{A}}(x)$ 为隶属函数与非隶属函数。为了简单表示, 把 $\tilde{A} = (U_{\tilde{A}}, V_{\tilde{A}})$ 命为直觉模糊数。其中, $0 \leq U_{\tilde{A}}, V_{\tilde{A}} \leq 1$, 并且 $0 \leq U_{\tilde{A}} + V_{\tilde{A}} \leq 1$ 。

性质 1 对于任意两个直觉模糊数 $\tilde{A} = (U_{\tilde{A}},$

$V_{\tilde{A}})$ 、 $\tilde{B} = (U_{\tilde{B}}, V_{\tilde{B}})$ ，以及实数 λ ，两者之间有如下运算：

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = (U_{\tilde{A}} + U_{\tilde{B}} - U_{\tilde{A}} * U_{\tilde{B}}, V_{\tilde{A}} * V_{\tilde{B}})$$

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} = (U_{\tilde{A}} * U_{\tilde{B}}, 1 - (1 - V_{\tilde{A}})(1 - V_{\tilde{B}}))$$

$$\lambda \tilde{A} = (1 - (1 - U_{\tilde{A}})^\lambda, V_{\tilde{A}}^\lambda)$$

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = 0.5(|U_{\tilde{A}} - U_{\tilde{B}}| + |V_{\tilde{A}} - V_{\tilde{B}}| + |U_{\tilde{B}} - V_{\tilde{B}} - U_{\tilde{A}} - V_{\tilde{A}}|)$$

2.2 直觉模糊 Topsis 法

基于理想解的直觉模糊多属性决策，是通过将集中备选方案与理想解的距离进行比较，对集中备选方案按优劣顺序进行排定的决策方法。

假设 评估方案集 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_u\}$ 由 u 个评估对象组成，评价每个方案的属性集 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_v\}$ 由 v 个属性组成。

$w = (w_1, w_2, \dots, w_v)$ 为属性的权重向量，属性的权重之和为 1。评估矩阵可以表示为 $Z = (z_{xy})_{uv}$ ， $x \in \{1, 2, \dots, u\}$ ， $y \in \{1, 2, \dots, v\}$ 。其中， z_{xy} 是方案 T_x 属性 A_y 的评估值。在本研究中，评估属性值 z_{xy} 由直觉模糊数表示，即 $z_{xy} = (U_{\tilde{A}}, V_{\tilde{A}})$ 。

基于直觉模糊 Topsis 多属性决策方法实现步骤如下：

步骤 1 确定多属性决策评价集和属性集，获得决策问题中对方案关于属性的直觉模糊数，构建直觉模糊决策矩阵。

在实际复杂的决策问题中，专家给出的评价信息可能是直觉模糊语言评价或者为区间数，因此需要对区间数决策值进行归一化处理。

对于评价值为区间型 $[z_{xy}^-, z_{xy}^+]$ ，归一化处理为：

若第 y 个属性评价指标为效益型区间指标：

$$c_{xy}^- = z_{xy}^- / \max(z_{xy}^+), c_{xy}^+ = z_{xy}^+ / \min(z_{xy}^+), 1 \leq x \leq u$$

若第 y 个属性评价指标为成本型区间指标：

$$c_{xy}^- = z_{xy}^- / \min(z_{xy}^+), c_{xy}^+ = z_{xy}^+ / \max(z_{xy}^+), 1 \leq x \leq u$$

再将标准化后的区间数 $[c_{xy}^-, c_{xy}^+]$ 转化为直觉模糊数： $c_{xy} = (c_{xy}^-, 1 - c_{xy}^+)$ 。最终得到标准化直觉模糊决策矩阵： $C = (c_{xy})_{uv}$ 。

步骤 2 根据文献[3]的方法，确定正理想方案与负理想方案。

$$Z^+ = ((U_1^+, V_1^+), (U_2^+, V_2^+), \dots, (U_v^+, V_v^+)) \quad (19)$$

$$Z^- = ((U_1^-, V_1^-), (U_2^-, V_2^-), \dots, (U_v^-, V_v^-)) \quad (20)$$

其中，

$$U_y^+ = \max_{1 \leq x \leq u} \{U_{xy}\}, V_y^+ = \min_{1 \leq x \leq u} \{V_{xy}\}$$

$$U_y^- = \min_{1 \leq x \leq u} \{U_{xy}\}, V_y^- = \max_{1 \leq x \leq u} \{V_{xy}\}$$

步骤 3 求方案与正、负理想方案的直觉模糊相似度。

方案 T_x 与正理想方案的相似度计算如下：

$$D(T_x, Z^+) = \sum_{y=1}^v w_y d(z_{xy}, Z_y^+) \quad (21)$$

方案 T_x 与负理想方案的相似度计算如下：

$$D(T_x, Z^-) = \sum_{y=1}^v w_y d(z_{xy}, Z_y^-) \quad (22)$$

步骤 4 方案排序

$D(T_x, Z^+)$ 越大，表明方案 T_x 与理想方案越接近； $D(T_x, Z^-)$ 越小，说明方案 T_x 与负理想解越远。根据 Topsis 法计算每个方案的相对贴近度：

$$RC_{(T_x)} = \frac{D(T_x, Z^-)}{D(T_x, Z^-) + D(T_x, Z^+)} \quad (23)$$

2.3 三支决策

三支决策是以决策理论的粗糙集为依据，假设 U 是一个有限且非空的集合， $R \subseteq U \times U$ 是等价关系， U 可以被 R 分开，形式为 $U/R = \{[x] \mid x \in U\}$ ，且阈值需满足 $0 \leq \beta < \alpha \leq 1$ 。因此，集合 U 可以被阈值分为 3 个区域，分别表示为：

$$NEG(A) = \{x \in U \mid \Pr(A \mid [x]) < \beta\}$$

$$BND(A) = \{x \in U \mid \beta < \Pr(A \mid [x]) < \alpha\}$$

$$POS(A) = \{x \in U \mid \Pr(A \mid [x]) \geq \alpha\}$$

Yao^[16] 深入对阈值和 3 个区域的语义做出补充解释，利用最小风险贝叶斯理论提出了由 2 个状态和 3 个行动组成的决策理论粗糙集。 $\Omega = \{A, \neg A\}$ 为设施的状态集，对于 $\forall A \subseteq U, \Pr(A \mid [x]) = | [x] \cap A | / |x|$ ，其表示条件概率，是 x 可能处于状态 A 的可能性，而相对贴近度表示的是方案 T_x 处于状态 A 的可能性。因此，用 $RC_{(T_x)}$ 来估计设施中心的条件概率 $\Pr(A \mid T_x)$ 。 $AA = \{a_p, a_B, a_N\}$ 为行动集，其中， a_p, a_B, a_N 分别表示 $x \in POS(A), x \in BND(A), x \in NEG(A)$ 。不同行动风险的损失函数 λ 见表 1。

表 1 损失函数

Tab. 1 Loss function

	A	$\neg A$
a_p	λ_{PP}	λ_{PN}
a_B	λ_{BP}	λ_{BN}
a_N	λ_{NP}	λ_{NN}

根据贝叶斯理论，将 3 个区域即三支决策规则和对应该阈值表示如下：

如果 $\Pr(A \mid [x]) \geq \alpha, x \in POS(A)$ ；

$$\beta < Pr(A | [x]) < a, x \in BND(A);$$

$$Pr(A | [x]) \leq \beta, x \in NEG(A);$$

则阈值定义为:

$$\alpha = \frac{(\lambda_{PN} - \lambda_{BN})}{(\lambda_{PN} - \lambda_{BN}) + (\lambda_{BP} - \lambda_{PP})} \quad (24)$$

$$\beta = \frac{(\lambda_{BN} - \lambda_{NN})}{(\lambda_{BN} - \lambda_{NN}) + (\lambda_{NP} - \lambda_{BP})} \quad (25)$$

决策阈值是通过专家对设施的属性评估计算的,其步骤如下:

(1) 对每个评估属性构造损失函数矩阵。本文评价属性是用直觉模糊数 $z_{xy} = (U_A, V_A)$ 表示。Jia 等人^[17]指出需为每个属性确定最大值与最小值,效益型属性形式为: $z_{\max} = (1, 0)$ 、 $z_{\min} = (0, 1)$, 成本型属性形式为 $z_{\max} = (0, 1)$ 、 $z_{\min} = (1, 0)$ 。然后构造每个选中设施中每个属性的损失函数矩阵如下:

$$\lambda(z_{xy}) = \begin{matrix} \begin{matrix} \mathfrak{a} & \mathfrak{c} & \mathfrak{e} \\ \mathfrak{c} & \mathfrak{c} & \mathfrak{c} \\ \mathfrak{e} & \mathfrak{c} & \mathfrak{e} \end{matrix} \begin{matrix} \lambda_{PN}^{xy} \\ \lambda_{BP}^{xy} \\ \lambda_{NP}^{xy} \end{matrix} \begin{matrix} \mathfrak{o} \\ \mathfrak{d} \\ \mathfrak{o} \end{matrix} \begin{matrix} \mathfrak{a} & 0 & d(z_{xy}, z_{\max}^y) \\ \mathfrak{c} & \sigma d(z_{xy}, z_{\min}^y) & \sigma d(z_{xy}, z_{\max}^y) \\ \mathfrak{e} & d(z_{xy}, z_{\min}^y) & 0 \end{matrix} \begin{matrix} \mathfrak{o} \\ \mathfrak{d} \\ \mathfrak{o} \end{matrix} \end{matrix} \quad (26)$$

其中,风险规避系数 $0 \leq \sigma < 0.5$, 突发灾害事件下收集的信息越多 σ 越大。为了方便计算,在不同的属性评估下, σ 取值相同。 z_{\max}^y 、 z_{\min}^y 分别表示第 y 个属性最大和最小评估值。

(2) 综合多属性损失函数,将第 x 个设施的多个属性聚集,得到损失函数矩阵为:

$$\lambda_x = \begin{matrix} \mathfrak{a} \sum_y w_y \lambda_{PP}^{xy} & \sum_y w_y \lambda_{PN}^{xy} \\ \mathfrak{c} \sum_y w_y \lambda_{BP}^{xy} & \sum_y w_y \lambda_{BN}^{xy} \\ \mathfrak{e} \sum_y w_y \lambda_{NP}^{xy} & \sum_y w_y \lambda_{NN}^{xy} \end{matrix} \begin{matrix} \mathfrak{o} \\ \mathfrak{d} \\ \mathfrak{o} \end{matrix} \quad (27)$$

(3) 计算决策阈值。对综合的损失函数矩阵,可以获得每个设施中心的决策阈值,表示为:

$$\alpha_x = \frac{(1 - \sigma) \sum_y w_y d(z_{xy}, z_{\max}^y)}{(1 - \sigma) \sum_y w_y d(z_{xy}, z_{\max}^y) + \sum_y \sigma w_y d(z_{xy}, z_{\min}^y)}$$

$$\beta_x = \frac{\sum_y \sigma w_y d(z_{xy}, z_{\max}^y)}{\sum_y \sigma w_y d(z_{xy}, z_{\max}^y) + (1 - \sigma) \sum_y w_y d(z_{xy}, z_{\min}^y)}$$

依据阈值可以得出三支决策规则:

如果 $Pr(A | T_x) \geq \alpha_x, T_x \in POS(A)$, 说明设施中心首先需要进行建设;如果 $\beta_x < Pr(A | T_x) < \alpha_x, T_x \in BND(A)$, 表明设施中心为第二梯度,需要更多的信息进行建设分析;如果 $Pr(A | T_x) \leq \beta_x, T_x \in NEG(A)$, 意味着设施作为第三梯度,无需先进行建设。

3 算例分析

为了验证所构建模型及决策的可行性,本文通过新冠疫情数据进行优化与决策分析,确定最优选址方案和评估顺序方案,确定建立的应急临时中心选址布局的拓扑结构。

3.1 参数设置

以 2020 年湖北武汉新冠疫情救援为例,截止 2020 年 11 月,在该疫情中全国已有 92 476 人感染新冠病毒,导致多人死亡,给国家和人民带来了巨大灾难。其中湖北武汉的灾害最为严重,灾害期间的救助意义非凡。为了协调防护物资的高效便捷快速发放,以医院作为需求点(武汉市的 16 个大型医院),而临时中心的位置需要交通顺畅,靠近需求医院。根据条件,筛选了 8 个符合条件的设施中心,仓库需要能够大量存储救助物资,采用租赁 3 个物流园区作为供应点。供应点、备选设施中心、需求点的地理位置关系及序号如图 1 所示。



图 1 需求点与备选点地理位置示意图

Fig. 1 Geographic location diagram of demand points and alternative points

根据各医院的救助数量、疫情严重程度,并结合各医院请求的数据,预估各医院的名义需求数量,即确定性模型数量 d , 16 个医院需求点需求 d_i 。

8 个备选临时中心的服务能力 Qh_j 和 3 个候选供应仓库的服务能力 Qs_k 见表 2。运用 CPLEX 编程分支-切割算法,求解确定性模型与多面体不确定需求集的鲁棒模型,具体结果见表 2。

表 2 模型数据
Tab. 2 Model data

编号	Qs_k	Qh_j	d_i
1	67	70	12
2	70	72.5	10
3	63	50	11
4		67.5	9
5		97.5	13
6		45	12
7		52.5	8
8		48.75	10
9			12
10			10
11			15
12			14
13			13
14			13
15			9
16			10

3.2 结果分析

通过 CPLEX 对优化模型求解,确定性模型最优解见表 3。在受到扰动时显得无能为力,其优化解也往往偏离实际情况,对模型的质量和可行性有着巨大影响,不能满足优化过程中所面临的风险和不确定性环境。

表 3 确定性优化方案
Tab. 3 Deterministic optimization scheme

Γ_u	z_b	临时中心
0	0	1,5,6,7,8

多面体集鲁棒优化解随着不确定水平参数 Γ_u 的变化,建立的临时中心见表 4。随着 Γ_u 的增加,需求差发生明显的变化,且开放的临时中心数目也有增加。当 $3 > \Gamma_u \geq 0$ 时,模型的需求差为 0,所选的临时中心可以满足需求点需求;当 $\Gamma_u > 3$ 时,虽然需求差值为 0,但还需要增加临时中心数量来满足需求波动;当不确定水平大于 5 时,需求差值显著增加,说明不确定程度越大,医院的需求越难以满足,扰动比例越小,模型的鲁棒性越强。

本文对 $\Gamma_u = 8$ 时的方案进行评估,对优化的备选方案进行排序。通过救灾文献调查以及专家讨论,确定了土地可用性、货车可达性、飞机可达性、安全性、基础设施供应性、劳动力供应性、位置可选性、感染数量等 8 个属性。依据文献[16]的研究,将专家的原始直觉模糊语言评价价值转化为直觉模糊数,将数量区间值标准化,再将标准化的区间值转化为直觉模糊数,得到直觉模糊决策矩阵。可从决策规则和表 5 中进一步获得三支决策分类结果。

表 4 多面体集的最优方案

Tab. 4 The optimal scheme for polyhedron set

Γ_u	z_b	临时中心
1	0	2,3,6,7,8
2	0	2,3,6,7,8
3	0	1,3,6,7,8
4	0	1,3,4,6,7,8
5	0	1,3,4,6,7,8
6	27 200	1,3,4,6,7,8
7	63 400	1,3,4,6,7,8
8	99 600	1,2,3,6,7,8
9	135 800	1,2,3,6,7,8
10	172 000	1,2,3,6,7,8
11	208 200	1,2,3,6,7,8
12	244 400	1,2,3,6,7,8
13	280 600	1,2,3,6,7,8
14	316 800	2,3,4,6,7,8
15	353 000	2,3,4,6,7,8
16	389 200	2,3,4,6,7,8

表 5 $\sigma=0.4$ 的条件概率和决策阈值

Tab. 5 Conditional probabilities and decision thresholds $\sigma=0.4$

$\sigma = 0.4$	T_1	T_2	T_3	T_6	T_7	T_8
α_x	0.47	0.53	0.37	0.53	0.76	0.58
β_x	0.28	0.33	0.21	0.33	0.58	0.39
$Pr(A T_x)$	0.65	0.59	0.81	0.49	0.11	0.38

分类结果 $POS(A) = \{T_3, T_1, T_2\}$, $BND(A) = \{T_6\}$, $NEG(A) = \{T_8, T_7\}$ 。结果表明,应该首先建设转运中心 T_3, T_1, T_2 ; 需要更多的信息对 T_6 进行是否首先建设分析; T_8, T_7 设施作为第三梯度,无需先进行建设。优化的设施中心-分配服务网络的拓扑结构如图 2 所示。

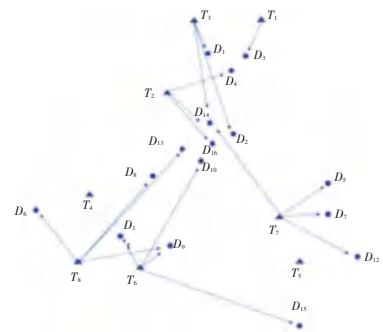


图 2 $\Gamma=8$ 时选址-分配网络的拓扑结构

Fig. 2 Location-distribution network topolog when $\Gamma=8$

本文对文献[11]中直觉模糊信息下基于 VIKOR 的目标评估方法做了对比分析。以设施选址评估为例,验证本文的有效性。两种目标评估方法在相应参数设置下的评估结果如图 3 所示。

可以看出,本文评估得到的目标排序结果与 VIKOR 算法得到的排序结果完全一致,在不同决策机制系数下的一致性较好。 T_1, T_2, T_3 都是紧急的方案,说明本文方法的合理性,但 VIKOR 算法无法自

动给出目标的客观分类结果。本文在得到目标排序的基础上,可以进一步得到客观的分类结果,无需主观划分等级和人为选择优先方案数量,更加适应于复杂多变的灾害疫情态势。

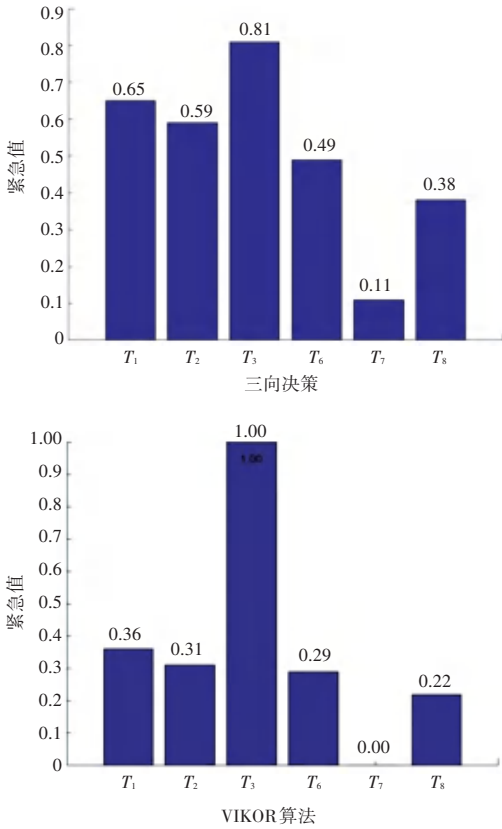


图 3 评估结果
Fig. 3 Evaluation results

4 结束语

本文为应急设施选址的决策提供了鲁棒优化模型和求解方法,相比于确定性模型,鲁棒模型符合实际,可以满足不确定性,优化最差情形的解。本文首先以总需求差最小化为目标,均衡多重约束条件建立鲁棒整数规划模型后,运用直觉模糊 Topsis 法对设施中心进行评价,并利用三支决策对设施中心进行分类;最后以武汉临时转运中心选址为例,对不同的安全参数进行灵敏度分析,分别获得设施选址集,给出应急设施-分配的拓扑结构。验证了鲁棒优化和三支决策的可行性,突出三支决策的优势,为决策者提供不同风险偏好的优先方案。

参考文献

- [1] MONTIBELLER G, YOSHIZAKI H. A framework for locating logistical facilities with multicriteria decision analysis [J]. Proceedings of the 6th International Conference on Evolutionary, 2011, 6576:505-519.
- [2] ONUT S, EFENDIGIL T, KARA S S. A combined fuzzy MCDM approach for selecting shopping center site: an example from Istanbul, Turkey [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(3): 1973-1980.
- [3] 陈德江, 王君, 张浩为. 基于直觉多属性决策的动态威胁评估模型 [J]. 计算机科学, 2019 (4): 183-188.
- [4] 徐选华, 夏玥. 面向冲突的区间模糊多准则群体决策方法及在投资决策中的应用 [J]. 电子科技大学学报(社科版), 2021 (3): 24-30.
- [5] 张其春, 林亚珊. 电子商务环境下仓储应急管理评价研究 [J]. 电子科技大学学报(社科版), 2018 (4): 19-26.
- [6] 张会平, 王思懿, 宋晔琴, 等. 政务营商环境的办事服务便捷度评价研究——以 GDP Top100 的城市为例 [J]. 电子科技大学学报(社科版), 2021 (3): 65-74.
- [7] 陈可嘉, 陈萍. “互联网+”环境下基于 T-PIGN-TOPSIS 的电子商务物流供应商评价 [J]. 电子科技大学学报(社科版), 2018 (4): 107-112.
- [8] 徐伟华, 杨蕾, 张晓燕. 模糊三支形式概念分析与概念认知学习 [J]. 西北大学学报, 2020 (4): 516-528.
- [9] 龙柄翰, 徐伟华. 模糊三支概念分析与模糊三支概念格 [J]. 南京大学学报, 2019 (4): 537-545.
- [10] 高杨, 黄仰超, 程国兵, 等. 直觉模糊信息下基于 VIKOR 和三支决策的多目标威胁评估方 [J]. 电子学报, 2021 (3): 542-549.
- [11] LIN Y H, BATT A R, ROGERSON, P A, et al. Location of temporary depots to facilitate relief operations after an earthquake [J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2012, 46 (2): 112-123.
- [12] RENNEMO S J, RØ K.F, HVATTUM L M, et al. A three-stage stochastic facility routing model for disaster response planning [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 62:116-135.
- [13] SOYSTER A L. Convex programming with set-inclusive constraints and application to inexact linear programming [J]. Operations Research, 1973, 21(6):1154-1157.
- [14] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. Robust convex optimization [J]. Mathematics of Operations Research, 1998, 23 (4): 769-805.
- [15] The Nepal Earthquake [EB/OL]. [2015-5-4]. www.drj.com/articles/online-exclusive/the-nepal-earthquake.html
- [16] BORAN F E, BORAN K, MENLIK T. The Evaluation of Renewable Energy Technologies for Electricity Generation in Turkey Using Intuitionistic Fuzzy TOPSIS [J]. Energy Sources Part B-Economics Planning And Policy, 2012, 7(1):81-90.