

基于二型模糊集理论的应急设施选址方法

杨广映¹, 门金坤², 蒋鹏^{*2}, 郑松², 孔亚广², 沈刚³, 赵烨⁴, 苏楠⁵

- (1. 台州学院 电子与信息工程学院(大数据学院), 浙江 台州 318000;
2. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310000;
3. 浙江中天氟硅材料有限公司, 浙江 衢州 324000;
4. 衢州市特种设备检验中心, 浙江 衢州 324000;
5. 杭州市西湖区保障性住房管理服务中心, 浙江 杭州 310000)

摘要: 为了研究应急管理中的应急设施选址问题, 在传统选址方法基础上, 提出了一种基于二型模糊集理论的应急设施选址方法, 以区域人口密度量化应急资源需求程度, 构建选址集最大覆盖模型. 由于人口的流动性, 采用二型模糊变量描述人口密度信息, 二型模糊变量可提供不确定性建模额外的自由度. 在置信度理论框架下, 将原模糊模型转化为其等价确定性模型. 针对模型中大规模复杂高维的空间地理数据, 设计了一种基于网格空间表示法的矩阵编码策略与遗传算法耦合进行模型求解. 研究表明: 矩阵编码策略可以有效避免维数灾难, 并且能够显著提升求解效率, 所提方法可以提供合理的应急设施选址决策, 以提升突发事件应急管理水平.

关键词: 应急管理; 应急设施选址; 二型模糊集理论; 遗传算法

中图分类号: TP3-05

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202006014

0 引言

应急设施作为突发事件应急管理系统的组成部分, 其布局直接影响事故的预防、准备、响应和善后工作. 合理的应急设施选址决策一方面可以提高应急管理的效率和有效性, 另一方面可以降低建立这些设施和开展应急救援行动的固定成本和可变成本. 研究应急设施选址方法, 对于提升突发事件应急管理水平意义重大.

应急设施选址问题(emergency facility location problem, EFLP)本质上是一种设施选址问题(facility location problem, FLP), 也称为选址分析^[1]. 最初的FLP被称为韦伯问题(Weber problem, WP), 其目的是为了确定单个仓库的位置, 从而最小化仓库与客户之间的总距离. 此后, 对选址问题的研究产生了许多经典框架来解决各种FLP^[2-7]. 优化目标是区分选址模型的重要依据. 根据模型的优化目标, EFLP的相关研究可分

为3类^[8]: p -中值问题(p -median problem)^[9]、 p -中心问题(p -center problem)^[10]和覆盖问题(covering problem, CP)^[11].

Hakimi^[12]首次提出了 p -中值问题的概念, 定义为: 规划 p 个设施的位置, 以最小化受灾点和设施点之间的平均(总)距离. Carbone^[13]针对医疗中心的选址问题, 提出了一个确定性 p -中值模型, 目的是使多个用户到医疗中心的距离最小化. 由于每个需求节点上的用户数量是不确定的, 进一步将确定性 p -中值模型扩展到机会约束模型, 该模型寻求最大化阈值, 同时确保总行程距离低于阈值的概率小于指定置信度水平 α . Abareshi等^[14]研究了一个双层模型来探索最小信息方法下的 p -中值问题, 在满足客户需求的同时, 确定最可能的分配方案, 采用了拉格朗日对偶方法将带负载约束的双层 p -中值模型简化为单层问题, 并引入了混合整数线性规划方法来提升问题求解

收稿日期: 2019-10-25; 修回日期: 2020-09-28.

基金项目: 浙江省科技厅省重点研发计划项目(2017C03019); 科技部国家重点研发计划专项项目(2016YFC0201400); 浙江省“万人计划”科技创新领军人才资助项目(2016YFC0201400).

作者简介: 杨广映(1980-), 男, 硕士, E-mail: ygy@tzc.edu.cn; 蒋鹏*(1975-), 男, 博士, 教授, E-mail: pjiang@hdu.edu.cn.

效率。Herrán 等^[15]提出了求解汉密尔顿 p -中值问题的 VNS 元启发式方法。Herda^[16]为近似求解带负载约束的 p -中值问题,提出了一种基于高性能计算集群的遗传算法。与专注于优化应急系统整体性能的 p -中值问题相反, p -中心问题试图最小化每个需求点与其最近设施之间的最大距离,因此 p -中心问题也被称为 Minimax 模型。 p -中心问题认为需求点总是由其最近的设施提供服务,从而实现了需求点的全覆盖,因此 p -中心问题特别关注最差的服务情况。在过去的几十年里, p -中心问题及其扩展^[8,17-18]已经被广泛应用于应急中心、医院、消防站和其他公共设施的选址规划中。Du 等^[19]针对 EFLP 构建了两阶段鲁棒优化框架下的可靠性 p -中心模型,关注每个客户的可靠性,提出了本构方程的求解方法,包括双切削平面法和约束生成法。Mladenović 等^[20]在无三角不等式的情况下提出了基于变邻域搜索和两个禁忌搜索启发式的 p -中心问题求解方法,展示了如何更有效地利用邻域结构求解 p -中心问题。针对大规模自然灾害事故,Xi 等^[4]提出了一个改进的 p -中值问题,该问题在访问需求点所需最长时间的约束下,使总距离和应急设施的数量都最小化。CP 是 EFLP 最常见的形式之一^[21],其目标是为需求点提供覆盖,此类问题易于理解,模型构造简单,因此在现实生活的适用性很强,如派出所、图书馆、医院和废物处理站等设施的选址问题都可以表述为 CP。一般来说,只有在设施可在预定义的距离限制内服务某需求点时,才认为设施可为该需求点提供有效覆盖,此预定义的距离限制被称为覆盖距离或覆盖半径。Li 等^[22]提出了设施服务能力与服务距离之间的衰减关系函数。针对灾难性连锁化工事故,Men 等^[23]提出了一种基于多米诺效应风险的应急设施选址多目标优化方法。Zhang 等^[24]针对不确定性条件下的 EFLP,构建了基于不确定理论的 LSCP 模型,利用逆不确定性分布,将不确定环境下的 LSCP 模型转化为等价的确定性位置模型进行求解。

鉴于 EFLP 的地理性质,大多数研究将时间和距离视为应急设施选址决策的关键因素。目标函数通常侧重于满足预定义的受灾地点(需求点)。传统的空间优化模型^[5,25-29]通常并不会对这些预定义的需求点加以区分。然而,不同需求点对应急资源的需求程度往往与区域内人口密度密切相关^[30]。选址准则不仅应考虑应急设施的空间特

征,还应考虑选址区域内的人口分布。此外,由于人口的流动性,实际应用中通常难以获得精确的人口密度数据。在确定性环境下所得的应急设施选址决策可能难以满足突发事件风险管理的实际需求。

综上,本文分析选址决策的人口因素和地理因素,建立一个选址集最大覆盖模型,以区域人口密度量化每个需求点对应急资源的需求程度,期望在资源有限的情况下寻求给定数量应急设施的最大覆盖程度,并且尽可能侧重于满足人口密度较高区域的应急需求。由于人口的流动性,将人口密度定义为一个梯形区间二型模糊变量。根据梯形区间二型模糊变量的上/下边界隶属度函数,结合置信度理论与机会约束规划方法将原模糊模型转化为其等价确定性模型。为了处理模型中大规模复杂高维的空间地理数据,采用一种基于网格空间表示法的矩阵编码策略与遗传算法耦合进行模型求解,以避免维数灾难,提升 EFLP 的求解效率,并通过仿真对比试验验证方法的有效性。

1 模糊集理论

模糊集理论建立了自然语言与定量描述之间的桥梁和纽带,是分析定性和定量之间相互转化的认知模型,模糊集理论作为非概率性不确定性信息描述工具被广泛应用于解决不确定性决策的相关问题^[31]。

1.1 模糊集定义

实际生活中的许多事件本身是无法采用精确定义来描述的。为了弥补确定性理论在描述事件复杂性和可能性上的不足,Zadeh^[32]提出了模糊集(fuzzy set,FS)的概念。论域 U 上的 FS 可由其隶属度函数定义,式(1)~(3)给出了 A 的 3 种常见表达形式^[33]:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) : \forall x \in U\} \quad (1)$$

$$A = \begin{cases} \sum_{x \in U} \frac{\mu_A(x)}{x}; & U \text{ 是有限集} \\ \int_{x \in U} \frac{\mu_A(x)}{x}; & U \text{ 是无限集} \end{cases} \quad (2)$$

$$A = \{\mu_A(x) : \forall x \in U\} \quad (3)$$

式中: $\mu_A(x)$ 是 A 的隶属度函数; U 是论域; $\sum$ 和 $\int$ 代表所有可接受 x 的并集。当 $\mu_A(x) \in \{0, 1\}$ 时, A 为确定性集合, $\mu_A(x)$ 转化为确定性集合的特征函数。

1.2 模糊变量定义

假设 Θ 为一个非空集合, θ 是 Θ 的幂集, Pos 是可能性度量, $\mathbf{R}$ 为一个表示模糊事件的实数集, (Θ, θ, Pos) 为概率空间, 则模糊变量 (fuzzy variable, FV) 可被定义为一个由概率空间到实数集的函数^[34]: $\xi: (\Theta, \theta, Pos) \rightarrow \mathbf{R}$. 如图 1(a) 所示, ξ 为一个由 (a, b, c, d, w) , $a < b \leq c < d$, $0 < w \leq 1$ 所定义的梯形 FV, 其隶属度函数如下:

$$\mu_{\xi}(x)=\begin{cases} \frac{w(x-a)}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ w; & b < x \leq c \\ \frac{w(d-x)}{d-c}; & c < x \leq d \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: w 是 ξ 的高, 若 $w=1$, $\sup_{x \in \mathbf{R}} \mu_{\xi}(x)=1$, 则称 ξ 为标准化的 FV. 当 $b=c$ 时, ξ 为图 1(b) 所示的三角模糊变量.

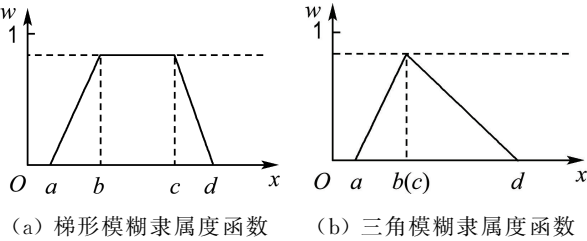


图 1 模糊变量 ξ 的隶属度函数示例
Fig. 1 A membership function illustration of the fuzzy variable ξ

1.3 置信度理论

对于任意模糊事件 $\{\xi \in B\}$, $B \subset \mathbf{R}$, 其可能性度量 $Pos\{\xi \in B\}$ 的计算方法如式(5)所示, 其必要性度量 $Nec\{\xi \in B\}$ 的计算方法如式(6)所示^[35].

$$Pos\{\xi \in B\} = \sup_{x \in B} \mu_{\xi}(x) \quad (5)$$

$$Nec\{\xi \in B\} = 1 - \sup_{x \in B^c} \mu_{\xi}(x) \quad (6)$$

式中: $Pos\{\xi \in B\}$ 为非负数, 且 $Pos\{\Theta\}=1$, $Pos\{\emptyset\}=0$; $\sup_{x \in B} \mu_{\xi}(x)$ 为 $\mu_{\xi}(x)$ 的上确界.

对于任意模糊事件 $\{\xi \in B\}$, $B \subset \mathbf{R}$, 其置信度量 $Cr\{\xi \in B\}$ 的计算方法如下:

$$Cr\{\xi \in B\} = \left(\sup_{x \in \mathbf{R}} \mu_{\xi}(x) + \sup_{x \in B} \mu_{\xi}(x) - \sup_{x \in B^c} \mu_{\xi}(x) \right) / 2 \quad (7)$$

与可能性度量 $Pos\{\xi \in B\}$ 和必要性度量 $Nec\{\xi \in B\}$ 相比, 置信度量 $Cr\{\xi \in B\}$ 具有自偶性. 若 $Cr\{\xi \in B\}=1$, 则表示模糊事件 $\{\xi \in B\}$,

$B \subset \mathbf{R}$ 必定会发生; 若 $Cr\{\xi \in B\}=0$, 则表示模糊事件 $\{\xi \in B\}$, $B \subset \mathbf{R}$ 必定不会发生.

结合上述置信度量方法与 FV 的定义, 可将式(7)推广至模糊变量的置信度量方法. 令 ξ 为一个由 (a, b, c, d, w) , $a < b \leq c < d$, $0 < w \leq 1$ 定义的 FV, 其置信度量 $Cr\{\xi \leq x\}$ 计算方法如式(8)、(9)所示.

$$Cr\{\xi \leq x\} = \left(w + \sup_{r \leq x} \mu_{\xi}(r) - \sup_{r > x} \mu_{\xi}(r) \right) / 2 \quad (8)$$

$$Cr\{\xi \leq x\} = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{w(x-a)}{2(b-a)}; & a < x \leq b \\ \frac{w}{2}; & b < x \leq c \\ \frac{w(x+d-2c)}{2(d-c)}; & c < x \leq d \\ w; & x > d \end{cases} \quad (9)$$

针对梯形模糊变量 $\xi=(a, b, c, d, w)$, $a < b \leq c < d$, $0 < w \leq 1$, 给出预定义的置信度水平 $0 < \alpha \leq 1$ 可得式(10)、(11)^[33].

$$\begin{aligned} Cr\{\xi \leq x\} \geq \alpha &\Rightarrow \\ \begin{cases} \frac{(w-2\alpha)a+2ab}{w} \leq x; & \alpha \leq \frac{w}{2} \\ \frac{2(w-\alpha)c+(2\alpha-w)d}{w} \leq x; & \alpha > \frac{w}{2} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Cr\{\xi > x\} \geq \alpha &\Rightarrow \\ \begin{cases} \frac{(w-2\alpha)d+2ac}{w} \geq x; & \alpha \leq \frac{w}{2} \\ \frac{2(w-\alpha)b+(2\alpha-w)a}{w} \geq x; & \alpha > \frac{w}{2} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

1.4 二型模糊集理论

1975 年, Zadeh 在常规模糊集理论上提出了二型模糊集合 (type-2 fuzzy set, T2-FS) 的概念, 论域 U 上的二型模糊集合 $\tilde{A}$ 由其模糊的隶属度函数定义, 式(12)~(14)给出了二型模糊集合 $\tilde{A}$ 的 3 种常见表达形式:

$$\tilde{A} = \{ ((x, \varphi), \mu_{\tilde{A}}(x, \varphi)) : \forall x \in U, \forall \varphi \in J_x \subset [0, 1] \} \quad (12)$$

$$\tilde{A} = \begin{cases} \sum_{x \in U} \sum_{\varphi \in J_x} \frac{\mu_{\tilde{A}}(x, \varphi)}{(x, \varphi)}; & U \text{ 是有限集} \\ \iint \frac{\mu_{\tilde{A}}(x, \varphi)}{(x, \varphi)}; & U \text{ 是无限集} \end{cases} \quad (13)$$

$$\tilde{A} = \{ \mu_{\tilde{A}}(x, \varphi) : \forall x \in U, \forall \varphi \in J_x \subset [0, 1] \} \quad (14)$$

式中： J_x 为 $x \in U$ 的主要隶属度； $\mu_{\tilde{A}}(x, \varphi) \in [0, 1]$ 是 $\tilde{A}$ 的隶属度函数. 对于论域上的元素 $x \in U$ ，其次要隶属度函数 $\tilde{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ 如下：

$$\tilde{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \frac{\int_{\varphi \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, \varphi)}{\varphi} \quad (15)$$

其中 $x \in U$ 的主要隶属度 J_x 是 $\tilde{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ 的定义域. 若 $\forall (x, \varphi), \exists \mu_{\tilde{A}}(x, \varphi) = 1$ ，则二型模糊集合 $\tilde{A}$ 为区间二型模糊集 (interval type-2 fuzzy set, IT2-FS)^[36]. IT2-FS 可由其不确定覆盖域 (footprint of uncertainty, FOU) 表述, 定义如下：

$$FOU(\tilde{A}) = \bigcup_{x \in U} J_x \quad (16)$$

其中 FOU 为上、下边界隶属度函数围成的区域. IT2-FS 可以写为 $\tilde{A} = (\tilde{A}^u, \tilde{A}^l)$, $\tilde{A}^u$ 和 $\tilde{A}^l$ 是由上、下边界隶属度函数确定的两个常规模糊集合.

2 模型构建

2.1 区域网格化

为了减少计算负载和协调选址模型, 采用相同大小的网格将整个区域划分为如图 2 所示笛卡尔坐标系 ($n \times m$) 中的二维空间. 示例点 1 和 2 可以分别用坐标 (2, 5) 和 (5, 9) 表示. 如果每个网格的长度为 100 m, 则图 2 中任意两个网格之间的距离可以用它们的坐标表示如下：

$$d_{ij} = 100 \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}; \quad \forall i, j \leq n \times m \quad (17)$$

其中 d_{ij} 为网格 i 到网格 j 之间的距离; x_* 和 y_* 为网格 $*$ 的坐标.

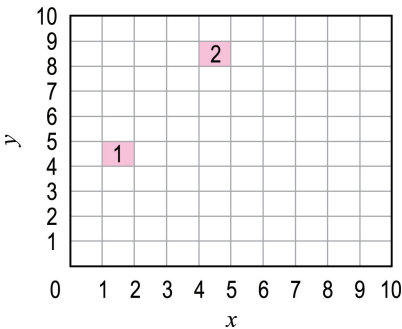


图 2 网格化的选址区域

Fig. 2 Mesh-based location area

2.2 选址集最大覆盖模型

基于上述网格化的选址区域, 综合分析选址决策的人口因素和地理因素, 建立一个选址集最

大覆盖模型. 模型假设如下：

(1) 选址区域内的所有网格都视为选址模型中的需求点.

(2) 不可放置应急设施的网格是已知的.

(3) 应急设施的覆盖半径无限制, 但其应急能力会随着应急距离的增加而降低^[22]. 令 i 为设施放置点, j 为需求点, d_{ij} 为设施点 i 到需求点 j 的距离, k 为衰减系数, 则设施应急能力和应急距离之间的衰减关系可表示为 $e^{-kd_{ij}}$.

(4) 每个被选中的应急设施放置点会被分配同样数量和类型的应急设施.

(5) 可建立的应急设施放置点个数为 p .

模型的决策变量如下：

$$X_i = \begin{cases} 1; & \text{网格 } i \text{ 被选为应急设施放置点;} \\ 0; & \text{其他} \end{cases}; \quad \forall i \leq n \times m \quad (18)$$

模型的优化目标如下：

$$\max Z = \sum_{i=1}^{n \times m} \sum_{j=1}^{n \times m} X_i \rho_j e^{-kd_{ij}} \quad (19)$$

优化目标最大化应急设施需求加权覆盖程度, 以区域人口密度量化每个需求点对应急资源的需求, 在资源有限的情况下尽可能侧重于满足人口密度较高区域的应急需求, ρ_j 为网格 j 处的人口密度. 由于人口的流动性, 将人口密度定义为一个梯形区间二型模糊变量, 任意网格处的人口密度 ρ_i 由式 (20) 定义.

$$\rho_i = (\rho_i^u, \rho_i^l) = \left(\begin{matrix} \rho_{i,1}^u & \rho_{i,2}^u & \rho_{i,3}^u & \rho_{i,4}^u & w_i^u \\ \rho_{i,1}^l & \rho_{i,2}^l & \rho_{i,3}^l & \rho_{i,4}^l & w_i^l \end{matrix} \right); \quad \forall i \leq n \times m \quad (20)$$

其中 ρ_i^u 与 ρ_i^l 为两个梯形区间一型模糊变量, ρ_i 的隶属度函数 w_i 如图 3 所示.

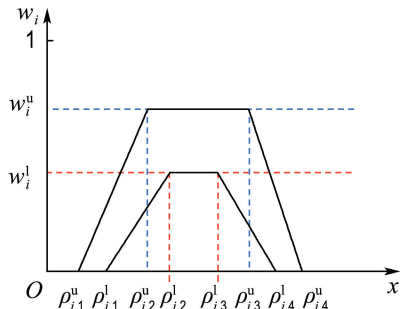


图 3 ρ_i 的隶属度函数示例

Fig. 3 A membership function illustration of ρ_i

根据 ρ_i 的边界隶属度函数, 采用置信度理论和机会约束规划方法处理带模糊参数的目标函数 Z .

对于上层隶属度函数,其机会约束规划如下:

max Z^u

s. t. $Cr\left\{\sum_{i=1}^{n\times m}\sum_{j=1}^{n\times m}X_i\rho_j^ue^{-kd_{ij}}\leq Z^u\right\}\geq \alpha^u$

(21)

对于下层隶属度函数,其机会约束规划如下:

max Z^l

s. t. $Cr\left\{\sum_{i=1}^{n\times m}\sum_{j=1}^{n\times m}X_i\rho_j^le^{-kd_{ij}}\leq Z^l\right\}\geq \alpha^l$

(22)

式(21)、(22)中, α^u 和 α^l 为预定义的置信度水平,根据式(10)、(11),模型等价约束如下:

$Cr\left\{\sum_{i=1}^{n\times m}\sum_{j=1}^{n\times m}X_i\rho_j^{l(u)}e^{-kd_{ij}}\leq Z^{l(u)}\right\}\geq \alpha^{l(u)}\Rightarrow$

$\sum_{i=1}^{n\times m}\sum_{j=1}^{n\times m}X_ie^{-kd_{ij}}H_i^{l(u)}\leq Z^{l(u)}$

(23)

综上所述,原带模糊参数的目标函数 Z 被转化为其等价确定性目标函数(24)、(25).

max $Z^u=\sum_{i=1}^{n\times m}\sum_{j=1}^{n\times m}X_ie^{-kd_{ij}}H_i^u$

(24)

max $Z^l=\sum_{i=1}^{n\times m}\sum_{j=1}^{n\times m}X_ie^{-kd_{ij}}H_i^l$

(25)

最终,采用线性加权技术将目标函数 Z 重定义为

max $Z_r=(Z^u+Z^l)/2$

(26)

选址集最大覆盖模型的等价确定性模型如下:

min Z^*

s. t. $\sum_{i=1}^{n\times m}X_i=p$

$\sum_{i\in B}X_i=0$

(27)

式中: $Z^*=1/Z_r$; $\sum_{i=1}^{n\times m}X_i=p$ 表示可建立的应急设施放置点数量为 p ; B 为不可放置应急设施的网格集.

3 模型求解

选址问题是一类典型的 NP-hard 问题,分支定界法、割平面法以及 PILP 等精确算法往往难以在可接受时间范围内得到最优解. 进化算法是一类基于种群智能的全局优化启发式算法,此类算法鲁棒性较高,适用性强,不要求目标函数可微或可导,在机器智能领域得到了广泛的关注.

以进化算法为基础的遗传算法 (genetic algorithm, GA) 已经被广泛应用于求解 NP-hard

问题. GA 自初始种群 P_{set} 开始,然后对当前种群 P_{set} 执行进化操作,进化操作一般按照选择、交叉以及变异 3 种算子顺序执行^[37]. 选择算子从 P_{set} 中选择适应度高的个体放入交配集;交叉算子每次从交配集随机选取个体执行交叉操作产生新个体;在交叉操作的基础上,引入变异操作可以有效避免算法早熟. 重复上述进化操作直至产生预定规模的子代种群 R_{set} . 为避免丢失优质个体,以子代种群 R_{set} 和当前种群 P_{set} 的并集为联合解集 U_{set} . 最终,判断算法是否满足停止迭代条件,若满足,则输出当前最优解;若不满足,则根据精英策略更新下一代种群,并重复上述迭代过程. GA 的迭代过程是最优解不断逼近真实最优解的过程.

当采用 GA 解决特定问题时,从问题空间到编码空间的映射称为编码. 进化算法中,常见的编码策略为二进制字符串、实数、序列编码、随机序列和树编码^[8,38-39]. 然而,由于应急设施选址问题涉及的空间数据量和解空间庞大,上述编码策略往往难以保证产生可行的子代种群,这对算法收敛性造成了极大的影响. 为了提升算法性能,采用了一种基于网格空间表示法的矩阵编码策略. 如图 4 所示,采用矩阵表示笛卡儿坐标系中的二维空间,结合二进制编码的特点,将应急设施放置点对应的矩阵元素设置为 1. 矩阵编码策略在保持了二进制编码便于操作特点的同时,减少了问题维度的规模.

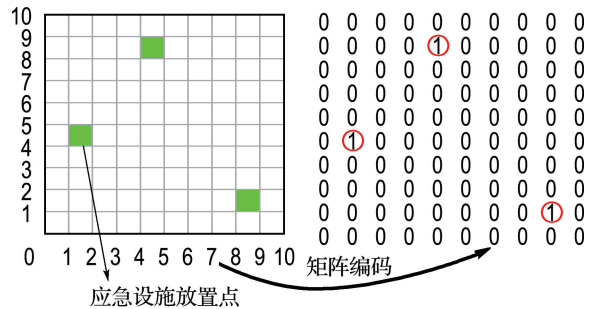


图 4 基于网格空间表示法的矩阵编码策略示例
Fig. 4 An illustration of matrix coding strategy based on mesh space representation

4 仿真算例

以 30×30 网格化选址区域为例进行方法验证. 可建立的应急设施放置点 $p=10$. 假设每个网格都可以放置应急设施,即不可放置应急设施的网格集 $B=\varnothing$. 通过一定次数的测试运行,将最大

迭代次数设为 200,种群规模设为 100,交叉概率设为 0.8,变异概率设为 0.08.

任意 $\rho_i^u, \forall i \leq n \times m, \rho_{i,1}^u, \rho_{i,2}^u, \rho_{i,3}^u, \rho_{i,4}^u$ 以及 w_i^u 分别从区间 $[65, 93]$ 、 $[87, 108]$ 、 $[137, 153]$ 、 $[152, 166]$ 和 $[0, 1]$ 上随机取值. 任意 $\rho_i^l, \forall i \leq n \times m, \rho_{i,1}^l, \rho_{i,2}^l, \rho_{i,3}^l, \rho_{i,4}^l$ 以及 w_i^l 分别从区间 $[86, 91]$ 、 $[108, 115]$ 、 $[118, 128]$ 、 $[131, 143]$ 和 $[0, 1]$ 上随机取值. 预定义的置信度水平 α^u 和 α^l 均设为 0.95, 即 $\alpha^u = \alpha^l = 0.95$.

4.1 算法性能分析

为了测试编码策略的性能,将采用矩阵编码得到的最优解与采用整数向量编码^[8]以及采用二进制编码^[1]得到的最优解进行比较.

所有算法都运行在一台配置为 Intel (R) Core (TM) i7-7700 CPU @ 3.60 GHz, 32.0 GB RAM 的计算机上,算例实现的软件环境均为 Matlab 2016a. 由于进化算法的随机性,在评估算法性能时,需要执行多次独立运行. 在不失一般性的前提下,进行 10 次独立运行,从最优解的平均质量与最优质量两个方面比较算法性能.

3 种编码策略最优收敛曲线如图 5 所示, GA-A 为采用整数向量编码策略所得最优收敛曲

线,GA-B 为采用二进制编码策略所得最优收敛曲线,GA-M 为采用矩阵编码策略所得最优收敛曲线. 仿真结果表明,采用矩阵编码与遗传算法耦合进行模型求解时的收敛性最好,采用二进制编码和整数向量编码与遗传算法耦合进行模型求解时陷入了局部最优解. 表 1 比较 3 种编码策略 10 次独立运行后所得最优解目标函数值以及算法运行时间. 矩阵编码所得最优解的平均质量与最优质量是最好的,整数向量编码次之,二进制编码最

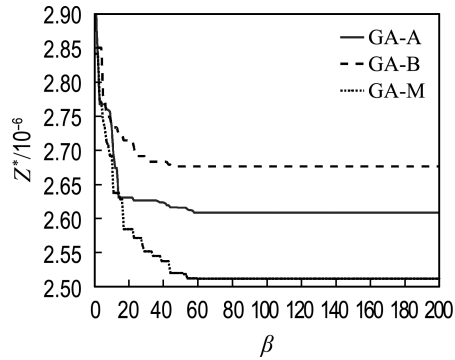


图 5 3 种编码策略最优收敛曲线 ($p=10$)
Fig. 5 Optimal convergence curves of three coding strategies ($p=10$)

表 1 算法性能比较
Tab. 1 Comparison of the algorithms performance

		矩阵编码		整数向量编码		二进制编码	
		$Z^*/10^{-6}$	t/s	$Z^*/10^{-6}$	t/s	$Z^*/10^{-6}$	t/s
测试次数	1	2.511	219.290	2.668	266.727	2.778	328.146
	2	2.547	201.381	2.608	288.126	2.831	325.648
	3	2.524	239.186	2.631	251.716	3.156	294.137
	4	2.547	227.182	2.668	290.635	2.982	335.781
	5	2.511	199.342	2.608	270.032	2.676	336.168
	6	2.547	220.783	2.608	295.823	2.682	277.861
	7	2.517	191.132	2.631	258.798	2.785	315.153
	8	2.511	208.358	2.676	265.881	2.982	346.246
	9	2.511	220.168	2.785	278.268	2.831	335.617
	10	2.547	200.153	2.697	268.561	3.026	289.861
平均质量		2.527	212.698	2.658	273.457	2.873	318.462
最优质量		2.511	191.132	2.608	251.716	2.676	277.861

差. 由于高维复杂的空间地理数据以及庞大的解空间,二进制编码会严重影响算法性能^[40]. 通过进一步分析可以发现,二进制编码与整数向量编码的平均运行时间要远比矩阵编码的运行时间长. 这表明所提出的矩阵编码策略在保持了二进

制编码便于操作特点的同时,减少了问题维度的规模,可有效避免维数灾难.

4.2 敏感性分析

等价确定性模型中,目标函数会随着预定义的置信度水平 α^u 和 α^l 而改变,同一个解在不同置

信度水平 α 下的目标函数值是不同的. 因此, 以置信度水平为敏感参数进行敏感性分析. 通过敏感性分析, 验证所得最优选址决策的可靠性.

如图 6 所示, 该最优选址决策的目标函数值 Z^* 会随预定义的置信度水平 α 的增长而降低. 实际上, 当预定义的置信度水平 $\alpha \in [0.5, 1.0]$ 时, 该最优选址决策的运输风险值与 α 呈线性关系. 对于 $\forall i, j \in N, \exists w_i^u, w_i^l \in [0, 1]$, 则 $\alpha^u, \alpha^l > 0.5$ 时, H_i^u 和 H_i^l 是固定的, 如式(28)、(29)所示.

$$H_i^u = \frac{2(w_i^u - 2\alpha^u)\rho_{i,3}^u + (2\alpha^u - w_i^u)\rho_{i,4}^u}{w_i^u} \tag{28}$$

$$H_i^l = \frac{2(w_i^l - 2\alpha^l)\rho_{i,3}^l + (2\alpha^l - w_i^l)\rho_{i,4}^l}{w_i^l} \tag{29}$$

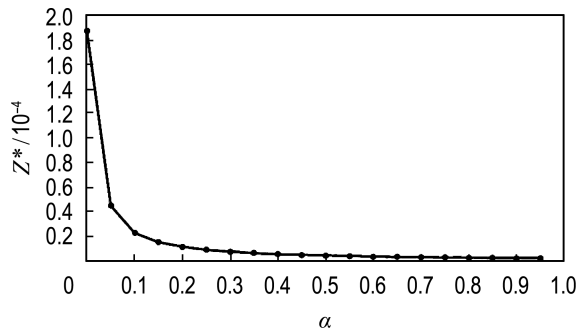


图 6 不同置信度水平下最优决策目标函数值
Fig. 6 The optimal decision objective function values at different confidence levels

在实际应用中, 为了应急设施选址决策可靠性, 预定义的置信度水平应该设置为 $0.5 \sim 1.0$, 即 $\alpha^u, \alpha^l \in [0.5, 1.0]$.

5 结 语

本文研究了突发事件应急管理中的应急设施选址问题. 在传统选址集最大覆盖模型的基础上, 充分考虑了选址决策的人口因素和地理因素, 以区域人口密度量化应急资源需求程度. 在模型求解时, 设计了一种新颖的基于网格空间表示法的矩阵编码策略. 与其他常见编码策略相比, 所提出的矩阵编码策略可以成功地与遗传算法耦合, 实现在全局范围内快速地搜索最优解, 有效避免维数灾难, 显著提升了算法性能. 最后, 以置信度水平为敏感参数进行了敏感性分析. 通过敏感性分析, 验证了所得最优选址决策的可靠性. 所提算法不限于求解不确定条件下的 EFLP, 对于许多具有不确定属性的决策问题也有一定的适用性.

参考文献:

[1] LAPORTE G, NICKEL S, DA GAMA F S. **Location Science** [M]. Berlin: Springer, 2015: 1-644.

[2] LI Xueping, ZHAO Zhaoxia, ZHU Xiaoyan, *et al.* Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: A review [J]. **Mathematical Methods of Operations Research**, 2011, **74**(3): 281-310.

[3] DREZNER T. A review of competitive facility location in the plane [J]. **Logistics Research**, 2014, **7**(144): 1-12.

[4] XI Menghao, YE Feng, YAO Zhong, *et al.* A modified p -median model for the emergency facilities location problem and its variable neighbourhood search-based algorithm [J]. **Journal of Applied Mathematics**, 2013, **2013**(1): 1-10.

[5] XU Yicheng, XU Dachuan, DU Donglei, *et al.* Approximation algorithm for squared metric facility location problem with nonuniform capacities [J]. **Discrete Applied Mathematics**, 2019, **264**: 208-217.

[6] OWEN S H, DASKIN M S. Strategic facility location: A review [J]. **European Journal of Operational Research**, 1998, **111**(3): 423-447.

[7] 施宏伟, 马 超, 魏 莉. 基于随机需求的服务节点截流选址下限约束模型 [J]. **工业工程**, 2011, **14**(5): 79-83, 124.

SHI Hongwei, MA Chao, WEI Li. An interception flow location model with lower demand bound constraint under stochastic demands [J]. **Industrial Engineering Journal**, 2011, **14**(5): 79-83, 124. (in Chinese)

[8] JIA Hongzhong, ORDÓÑEZ F, DESSOUKY M. A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies [J]. **IIE Transactions**, 2007, **39**(1): 41-55.

[9] ROSING K E, HILLSMAN E L, ROSING-VOGELAAR H. The robustness of two common heuristics for the p -median problem [J]. **Environment and Planning A**, 1979, **11**(4): 373-380.

[10] CHEN R, HANDLERG Y. The conditional p -center problem in the plane [J]. **Naval Research Logistics**, 1993, **40**(1): 117-127.

[11] CHUNG C H. Recent applications of the maximal covering location planning (MCLP) model [J]. **Journal of the Operational Research Society**, 1986,

- 37: 735-746.
- [12] HAKIMI S L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph [J]. **Operations Research**, 1964, **12**(3): 450-459.
- [13] CARBONE R. Public facilities location under stochastic demand [J]. **INFOR**, 1974, **12**(2): 261-270.
- [14] ABARESHI M, ZAFERANIEH M. A bi-level capacitated p -median facility location problem with the most likely allocation solution [J]. **Transportation Research Part B: Methodological**, 2019, **123**: 1-20.
- [15] HERRÁN A, COLMENAR J M, DUARTE A. A variable neighborhood search approach for the Hamiltonian p -median problem [J]. **Applied Soft Computing Journal**, 2019, **80**: 603-616.
- [16] HERDA M. Parallel genetic algorithm for capacitated p -median problem [J]. **Procedia Engineering**, 2017, **192**: 313-317.
- [17] AVERBAKH I, BERMAN O. Minimax regret p -center location on a network with demand uncertainty [J]. **Location Science**, 1997, **5**(4): 247-254.
- [18] HUANG Rongbing, KIM S, MENEZES M C. Facility location for large-scale emergencies [J]. **Annals of Operations Research**, 2010, **181**: 271-286.
- [19] DU Bo, ZHOU Hong, LEUS R. A two-stage robust model for a reliable p -center facility location problem [J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2020, **77**: 99-114.
- [20] MLADENović N, LABBÉ M, HANSEN P. Solving the p -center problem with Tabu search and variable neighborhood search [J]. **Networks**, 2003, **42**: 48-64.
- [21] CHERKESLY M, LANDETE M, LAPORTE G. Median and covering location problems with interconnected facilities [J]. **Computers and Operations Research**, 2019, **107**: 1-18.
- [22] LI Xia, YE H A G O. Integration of genetic algorithms and GIS for optimal location search [J]. **International Journal of Geographical Information Science**, 2005, **19**(5): 581-601.
- [23] MEN Jinkun, JIANG Peng, ZHENG Song, *et al.* A multi-objective emergency rescue facilities location model for catastrophic interlocking chemical accidents in chemical parks [J]. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, 2019: 1-13.
- [24] ZHANG Bo, PENG Jin, LI Shengguo. Covering location problem of emergency service facilities in an uncertain environment [J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2017, **51**: 429-447.
- [25] FARAHANI R Z, STEADIESEIFI M, ASGARI N. Multiple criteria facility location problems: A survey [J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2010, **34**(7): 1689-1709.
- [26] DAVOODI M. k -Balanced center location problem: A new multi-objective facility location problem [J]. **Computers and Operations Research**, 2019, **105**: 68-84.
- [27] JYOTIRMOY D, HALIT Ü. Combining worst case and average case considerations in an integrated emergency response network design problem [J]. **Transportation Science**, 2018, **52**(1): 171-188.
- [28] ZHANG Jianghua, SUN Xiaoqing, ZHU Rui, *et al.* Solving an emergency rescue materials problem under the joint reserves mode of government and framework agreement suppliers [J]. **PLoS One**, 2017, **12**(10): e0186747.
- [29] 瞿红梅, 李焕良, 许汉刚, 等. 基于灰色预测理论的应急救援物资储备模型 [J]. **华南地震**, 2015, **35**(2): 24-27.
- QU Hongmei, LI Huanliang, XU Hangang, *et al.* Reserve model of emergency rescue materials based on grey theory [J]. **South China Journal of Seismology**, 2015, **35**(2): 24-27. (in Chinese)
- [30] MEN Jinkun, JIANG Peng, XU Huan, *et al.* Robust multi-objective vehicle routing problem with time windows for hazardous materials transportation [J]. **IET Intelligent Transport Systems**, 2020, **14**(3): 154-163.
- [31] 王飞跃, 莫红, 赵亮, 等. 二型模糊集合与逻辑 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- WANG Feiyue, MO Hong, ZHAO Liang, *et al.* **Type II Fuzzy Sets and Logic** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018. (in Chinese)
- [32] ZADEH L A. Fuzzy logic = computing with words [J]. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, 1996, **4**(2): 103-111.
- [33] MEN Jinkun, JIANG Peng, XU Huan. A chance constrained programming approach for HazMat capacitated vehicle routing problem in type-2 fuzzy environment [J]. **Journal of Cleaner Production**, 2019, **237**: 117754.
- [34] NAHMIAS S. Fuzzy variable [J]. **Fuzzy Sets and**

- Systems**, 1978, **1**(2): 97-110.
- [35] LI Xiang. **Credibilistic Programming — An Introduction to Models and Applications** [M]. Berlin: Springer, 2013.
- [36] KUNDU P, MAJUMDER S, KAR S, *et al.* A method to solve linear programming problem with interval type-2 fuzzy parameters [J]. **Fuzzy Optimization and Decision Making**, 2019, **18**(1): 103-130.
- [37] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社有限公司, 1996.
CHEN Guoliang, WANG Xufa, ZHUANG Zhenquan, *et al.* **Genetic Algorithm and Its Application** [M]. Beijing: Posts & Telecom Press Co., LTD, 1996.
- [38] TONG Daoqin, MURRAY A, XIAO Ningchuan. Heuristics in spatial analysis: A genetic algorithm for coverage maximization [J]. **Annals of the Association of American Geographers**, 2009, **99**(4): 698-711.
- [39] XIAO Ningchuan. A unified conceptual framework for geographical optimization using evolutionary algorithms [J]. **Annals of the Association of American Geographers**, 2008, **98**(4): 795-817.
- [40] ZHAO Ming, CHEN Qiuwen. Risk-based optimization of emergency rescue facilities locations for large-scale environmental accidents to improve urban public safety [J]. **Natural Hazards**, 2015, **75**: 163-189.

Emergency facility location method based on type-2 fuzzy set theory

YANG Guangying¹, MEN Jinkun², JIANG Peng^{*2}, ZHENG Song²,
KONG Yaguang², SHEN Gang³, ZHAO Ye⁴, SU Nan⁵

- (1. School of Electronics & Information Engineering (School of Big Data Science), Taizhou University, Taizhou 318000, China;
2. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310000, China;
3. Zhejiang Zhongtian Fluorosilicone Material Co., LTD, Quzhou 324000, China;
4. Quzhou Special Equipment Inspection Center, Quzhou 324000, China;
5. Hangzhou Xihu District Affordable Housing Management Service Center, Hangzhou 310000, China)

Abstract: To study the emergency facility location problem in emergency management, based on the traditional location method, an emergency facility location method based on type-2 fuzzy set theory is proposed, and the maximum coverage location model is constructed by quantifying the emergency resource demand degree with the regional population density. Due to the population mobility, the type-2 fuzzy variable is used to describe the uncertain population density, which provides additional degrees of freedom for modeling uncertainty. Under the framework of confidence measure, the original fuzzy model is transformed into its equivalent deterministic model. To cope with the large-scale and high-dimensional spatial data, a matrix encoding scheme incorporating mesh-based spatial representation is coupled with genetic algorithm for model solving. Experimental results indicate that the proposed encoding scheme can effectively avoid dimension disaster, and can significantly improve the efficiency of solving the geographic optimization problems. The proposed method can provide reasonable location decisions, which has the potential to improve the efficiency and effectiveness of emergency management.

Key words: emergency management; emergency facility location; type-2 fuzzy set theory; genetic algorithm