

考虑居民选择行为的应急避难场所选址问题研究

陈刚¹, 付江月¹, 何美玲²

(1. 贵州大学 管理学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 突发事件发生后, 应急管理部门将面临选择启用哪些应急避难场所供居民避难的决策。与其它设施选址不同, 处于有限理性状态下的居民可选择是否去避难以及去哪个避难所避难。为使未被服务的居民数量最小化, 考虑居民的有限理性选择行为至关重要。为此, 考虑居民避难距离及避难所吸引力等因素, 基于竞争选址理论构建避难所对居民的效用函数。在此基础上, 运用多项 logit 模型刻画居民的有限理性选择行为, 建立基于有限理性选择行为的选址模型, 并与基于效用最优选择行为和基于系统最优原则的选址模型进行对比以验证模型的合理性。为了高效地求解模型, 设计了模拟退火算法和遗传算法两种启发式算法。算例分析结果验证了模型和算法的可行性和有效性, 并揭示了居民理性程度、选址个数及财政预算均对选址结果有重要影响。

关键词: 应急管理; 有限理性; P 中值选址; 整数非线性规划; 启发式算法

中图分类号: C931; O22 **文章标识码:** A **文章编号:** 1007-3221(2019)09-0006-09 **doi:** 10.12005/orms.2019.0193

Emergency Shelter Location Problem Considering Residents' Choice Behavior

CHEN Gang¹, FU Jiang-yue¹, HE Mei-ling²

(1. School of Management, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The emergency management department should decide which emergency shelters would be opened when emergency events occur. Unlike other facility location problems, residents with bounded rationality could choose whether to take refuge or not and which open shelter to go. In order to minimize the number of people who are not being served, it is important to consider the bounded rationality of the residents. To this end, a utility function is constructed based on the competition location theory considering the factors such as the refuge distance and the attraction of shelters. Under this circumstance, the multinomial logit model is used to describe the bounded rational choice behavior of residents, and an emergency shelter location model is established based on the bounded rational choice. Another two location models are proposed based on utility optimal choice and system optimal principle respectively to verify the reasonability of the bounded rational choice model. To solve the problems efficiently, two heuristic algorithms, simulated annealing algorithm and genetic algorithm are designed based on the characteristics of the model. The numerical results verify the feasibility and practicability of the model and algorithms, and show that residents' rational degree, the number of open shelters and the budget have a significant impact on the emergency shelter location decisions.

Key words: emergency management; bounded rationality; P-median location; integer nonlinear programming; heuristic algorithm

0 引言

随着我国城市化进程不断加快, 城市整体防灾

减灾应急管理水平滞后于城市现代化建设发展的
问题日益突出。特别是人口和建筑高度密集的大
城市, 一旦发生重大灾害事故, 将会严重威胁居民群
众的安全。应急避难场所(以下简称“避难所”)是

收稿日期: 2017-12-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71761006); 国家社会科学基金资助项目(17XGL013); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20160512)

作者简介: 陈刚(1987-), 男, 四川广安人, 副教授, 博士, 研究方向: 应急管理、物流系统优化; 付江月(1986-), 女, 重庆云阳人, 副教授, 博士, 研究方向: 物流网络演化与优化; 何美玲(1982-), 江苏扬州人, 副教授, 博士, 研究方向: 物流与供应链管理、最优化理论。

指在城市中人口集聚地附近,以应对地震、火灾、洪水、恐怖袭击等多种突发事件,用于接受受灾居民紧急疏散、确保避难居民安全,并可供政府组织开展救灾工作的场所,是提高城市综合防灾能力、应对突发性重大灾害事件的重要基础设施。其备选地址一般为具有一定规模的公园、广场、学校、体育馆等公共设施或建筑,并设有应急供水、应急供电、应急通信、应急物资供应处、应急卫生防疫站、应急厕所等配套设施^[1]。

事实上,早在2004年国家地震局就出台了《关于推进地震应急避难场所建设的意见》,各地政府也相继出台了避难所建设的技术标准和专项规划,我国的城市防灾体系日趋完善,绝大部分城市都已经建设或规划了避难所,因此,本文的研究不涉及战略层面上的选址。但当突发事件发生后,应急管理部门将面临选择启用哪些避难所供居民避难的决策,需根据突发事件的位置、类型、危害程度及财政预算等因素,制定相应对策,尽可能地疏散居民,因此,本文的研究属于战术层面上的选址问题,需在短时间内做出决策。

科学合理地确定避难所的选址方案,可以提高突发事件发生后人员疏散安置的效率,最大限度地减少人员伤亡和财产损失,受到国内外学者的广泛关注。选址模型按模型特征可大致归纳为P中值模型(P-median model)、最大覆盖模型(maximum coverage location model)、容量限制模型(capacity-constraint model)和竞争模型(competition model)四种类型。在避难所选址的研究中,学者们大多构建的是P中值模型或最大覆盖模型。例如Chen等^[2]以最小化居民的总避难距离为目标,考虑地震避难所具有短期、中期、长期三种不同层次,构建了避难所的最大覆盖选址模型;Li等^[3]在此基础上,研究了以避难所建设成本最小为上层模型,居民总避难距离最短为下层模型的双层选址-分配模型;Xu等^[4]构建了以居民总避难距离最短、避难所覆盖人口最多、避难所覆盖范围最大等为目标的多准则最大覆盖选址模型;Li等^[5]以交通系统最优为目标,研究了考虑疏散路径的飓风避难所P中值选址问题;而Bayram等^[6]则认为居民很有可能不会按照系统最优的路径疏散至避难所,需考虑居民对系统最优方案的接受程度,研究了考虑居民偏好的以疏散时间最小化为目标的避难所P中值选址问题;周洪建等^[7]构建了以最短距离为目标

的台风避难所最大覆盖选址模型;张培等^[8]研究了以距离最短为目标的城市社区避难所P中值选址问题;王威等^[9]研究了综合多准则决策的避震疏散场所优化方案的时间满意覆盖模型;倪冠群等^[10]研究了考虑道路通行能力的应急避难点P中值选址模型及算法;袁昀等^[11]引入准备度指标,研究了避难所选址最大覆盖模型及算法。

以上研究往往站在管理者的角度,按照系统最优原则进行优化,没有考虑受灾居民的个体行为。但事实上,实证研究和仿真实验已证实人是有限理性的^[12],导致人们在行为上并不总是追求“效用最大”,而是会根据对环境的认知和自己有限的思维做出“让自己满意的选择”。突发事件发生后,居民在避难所的选择上是否也同样存在有限理性行为?避难所的服务容量有限,居民不清楚到达所选择的避难所后是否能够得到服务,此外,应急环境下居民的恐慌心理容易导致决策偏差,增加了选择难度。对此,居民表现出有限理性行为,缺乏准确的计算能力去评估不同避难所的期望效用,导致居民的随机选择行为,即居民以一定的概率选择将要去去的避难所,选择概率与目标避难所提供的效用成比例。目前,考虑居民或顾客选择行为的选址模型已应用于应急物流^[13]、逆向物流^[14]、医疗服务^[15]、快递服务^[16]等领域,其中多项logit(multinomial logit, MNL)模型作为刻画有限理性选择行为的一种重要方法^[17],已被广泛应用于管理学和经济学领域,近年来也逐渐受到行为运筹学领域的关注,开始应用于设施选址问题上^[16,18],但在避难所选址问题上暂无人考虑居民选择行为对选址结果的影响。

综上所述,目前关于避难所选址的研究暂无人考虑居民的有限理性行为,且大都以居民总避难距离最短为目标,没有考虑避难所的服务能力、安全性、可达性等其他影响因素。因此,本文借鉴竞争选址理论,构建考虑避难距离与避难所吸引力的效用函数,用MNL模型刻画居民的有限理性,研究居民有限理性选择行为对避难所选址问题的影响,并针对模型特征设计模拟退火算法和遗传算法,为应急管理部门提供科学合理的决策依据。

1 避难所选址模型

1.1 问题描述与假设

突发事件发生后,应急管理部门将根据突发事

件的位置、类型、危害程度及财政预算等因素,选择启用部分避难所(例如遇到滑坡或海啸等灾害,位于山体或海岸边的避难所就不能启用),并以短信、广播、电视等通讯手段向突发事件影响范围内的居民发出避难警报,告知其哪些避难所可为其提供避难服务,居民根据自己的判断选择是否避难以及去哪个避难所避难。因此,本文构建的避难所选址模型描述如下:在给定的网络 $G(V, A)$ 中,考虑居民有限理性选择行为,依据应急管理部门需要启用的避难所个数 p ,在满足财政预算的约束条件下,从备选点集合中选择最优的 p 个点作为避难所,使得未被服务的居民数量最小化。此外,为了验证模型的合理性,分别构建了基于效用最优选择行为和基于系统最优原则的选址模型进行对比。

模型假设如下:(1) 避难所容纳能力有限,因此其服务的居民数量有限;(2) 居民选择避难所是一个复杂的决策过程,需考虑多种因素,这里假设居民选择避难所的唯一依据是避难所对居民的效用;(3) 虽然本文研究的是从已建好的避难所中选择若干个作为临时避难场所,但避难所中应急供水、应急供电、应急通信等设施的启用仍需一定成本,因此需考虑启用避难所的财政预算。

1.2 符号说明

I : 表示人口集聚小区的集合, $\forall i \in I$; J : 表示避难所备选点的集合, $\forall j \in J$; U_{ij} : 表示避难所 j 对小区 i 居民的效用; A_{ij} : 表示避难所 j 对小区 i 居民的吸引力; d_{ij} : 表示避难所 j 与小区 i 的距离; U_i : 表示虚拟避难所对小区 i 居民的效用; A_i : 表示虚拟避难所对小区 i 居民的吸引力; D : 表示虚拟避难所与小区的距离; p_{ij} : 表示小区 i 居民选择避难所 j 的概率; p_i : 表示小区 i 居民选择虚拟避难所的概率; γ : 表示居民的理性程度; α_i : 表示小区 i 的居住人口数量; β_j : 表示避难所 j 未被服务的居民数量; p : 表示启用避难所的个数; f_j : 表示避难所 j 的启用成本; F : 表示启用避难所的财政预算; y_j : 为 0-1 变量,取值为 1 表示启用备选点 j ,否则取值为 0。

1.3 效用函数

资源有限是应急管理的特征之一,居民对避难所的选择本质上就是对有限资源的竞争,因此,本研究借鉴了竞争选址^[19]的相关理论。Huff^[20]认为顾客对设施的需求与其为顾客提供的效用成比例,而效用与设施离顾客的距离有关,效用是距离的衰减函数。Drezner 等^[21]将该衰减函数定义为

$f(d) = e^{-\lambda d}$,其中 d 表示设施与顾客之间的距离, λ 表示衰减系数。然而,居民选择避难所的偏好由多种因素共同决定,距离只是其中影响因素之一,吸引力大的避难所在一定程度上可以让居民忽略对距离的影响,如规模较大的避难所一般服务能力强、安全性高,居民也愿意多走一段路程。因此,对 Drezner 等^[21]提出的效用函数进行修正,增加避难所的吸引力因子,故避难所 j 对小区 i 居民的效用函数为:

$$U_{ij} = A_{ij} e^{-\lambda d_{ij}} \quad (1)$$

其中 A_{ij} 表示避难所 j 对小区 i 居民的吸引力,需综合考虑多种因素计算得到,如突发事件的类型、危害程度及避难所的服务能力(场所规模)、安全性(避难所与危险源的距离、人口聚集区与危险源的距离等)、可达性(连通避难疏散道路数量)、便利性(与医疗机构距离、与消防站距离等)等。为便于计算,本文暂时只考虑避难所的服务能力和安全性,即 $A_{ij} = c_j s_j / d_i$, c_j 表示避难所 j 的服务能力,为使 c_j 无量纲化,令 $c_j = c_j / \max_{j \in J} (c_j)$,其中 c_j 表示避难所 j 的最大容纳人数; s_j 表示避难所 j 与危险源的距离, d_i 表示小区 i 与危险源的距离。此外,如果突发事件是地震等大规模自然灾害,无法判断危险源,则可令 $s_j / d = 1$ 。

值得一提的是,当居民认为避难所提供的效用非常小的时候,居民也可以选择不去避难,例如在 2011 年的东日本大地震中,尽管当地政府已经多次发出避难警报,但仍有很多居民没有选择避难^[22]。这里我们可以认为居民选择了一个虚拟的避难所,这个虚拟避难所对小区 i 居民的效用函数为:

$$U_i = A_i e^{-\lambda D} \quad (2)$$

其中 A_i 表示虚拟避难所对小区 i 居民的吸引力,由于虚拟避难所并不是真实存在,这里我们假设其吸引力等于所有避难所中最小的吸引力,即 $A_i = \min_{j \in J} A_{ij}$; D 表示虚拟避难所与小区的距离,这里可以理解为居民愿意付出的到避难所的最远距离,因为这个避难所是虚拟的,因此对于所有居民而言, D 都是相同的。

1.4 基于有限理性选择行为的选址模型

基于 MNL 模型,小区 i 居民到避难所 j 避难的概率为

$$p_{ij} = \frac{e^{\gamma U_{ij}} y_j}{\sum_{k \in J} e^{\gamma U_{ik}} y_k + e^{\gamma U_i}}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3)$$

同理,小区 i 居民选择不避难的概率为

$$p_i = \frac{e^{\gamma U_i}}{\sum_{k \in J} e^{\gamma U_{ik}} y_k + e^{\gamma U_i}}, \quad \forall i \in I \quad (4)$$

式(3)和式(4)中的 γ 表示居民的理性程度,当 $\gamma \rightarrow 0$ 时,表示居民处于非理性状态,无法辨别出各避难所对其的效用,按照相同的概率随机选择避难所(包括虚拟避难所);当 $\gamma \rightarrow \infty$ 时,居民选择完全理性下的选址分配方案。

基于居民有限理性选择行为的避难所选址模型如下:

$$\min Z = \sum_{i \in I} \alpha_i p_i + \sum_{j \in J} \beta_j \quad (5)$$

s. t. 式(1) ~ 式(4)

$$\beta_j = \max\{0, \sum_{i \in I} \alpha_i p_{ij} - c_j\}, \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} f_j y_j \leq F \quad (8)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J \quad (9)$$

式(5)为目标函数,表示最小化未被服务的居民数量,其中第一项表示选择不去避难的居民数量,第二项表示虽然去了避难所但是由于避难所服务能力有限而未能被服务的居民。式(6)为避难所 j 未被服务居民数量的表达式;式(7)表示启用避难所的个数;式(8)表示启用避难所的财政预算限制;式(9)为决策变量约束。

1.5 基于效用最优选择行为的选址模型

效用最优是指以个体最优为原则,居民都选择去对自己效用最优的避难所(包括虚拟避难所),为了方便描述,引入辅助变量 x_i 和 x_{ij} , x_i 表示居民选择是否去避难, x_{ij} 表示居民选择哪个避难所。基于居民效用最优选择行为的避难所选址模型 p_2 如下:

$$\min Z = \sum_{i \in I} \alpha_i x_i + \sum_{j \in J} \beta_j \quad (10)$$

s. t. 式(1) ~ 式(2)、式(7) ~ 式(9)

$$\beta_j = \max\{0, \sum_{i \in I} \alpha_i x_{ij} - c_j\}, \quad \forall j \in J \quad (11)$$

$$x_i = \begin{cases} 1, & U_i \geq \max_{j \in J} \{U_{ij} y_j\} \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad \forall i \in I \quad (12)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & U_{ij} = \max_{j \in J} \{U_{ij} y_j\} \& U_{ij} > U_i \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (13)$$

式(10)为目标函数,表示最小化未被服务的居民数量;式(11)为避难所 j 未被服务居民数量的表达式;式(12)表示当不去避难的效用不小于去

避难的效用时,居民选择不去避难,否则,选择去避难;式(13)表示当去避难的效用大于不去避难的效用时,居民选择去避难,且选择去对其效用最大的避难所。

1.6 基于系统最优原则的P中值选址模型

引入辅助变量 z_{ij} , z_{ij} 表示小区 i 被分配给备选点 j 的居民比例,基于系统最优原则的P中值选址模型 P_3 如下:

$$\min Z = \sum_{i \in I} \alpha_i - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \alpha_i z_{ij} \quad (14)$$

s. t. 式(7) ~ 式(9)

$$\sum_{j \in J} z_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} \alpha_i z_{ij} \leq c_j y_j, \quad \forall j \in J \quad (16)$$

$$z_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (17)$$

式(14)为目标函数,表示最小化未被服务的居民数量;式(15)表示小区 i 被分配的居民比例之和不大于一;式(16)表示被分配给备选点的居民数量不超过其服务能力,且当备选点未被选中时就没有居民分配给它;式(17)表示辅助变量 z_{ij} 为非负变量。

2 算法设计

本文构建的模型属于组合优化问题,模型解的数量会随着问题规模的增加呈指数增长。因此,模型虽然可用Lingo或GAMS等商业求解软件求解,但当问题规模较大时,求解时间较长,甚至无法求出最优解,需要设计启发式算法。选址问题中常用的启发式算法有变邻域搜索算法^[23]、禁忌搜索算法^[24]、模拟退火算法^[25]、遗传算法^[26]等,每种算法都有各自的优缺点。本文针对模型的特征,设计模拟退火算法和遗传算法,并分析两种算法的综合性能。

2.1 模拟退火算法

Step 1 初始状态生成

状态采用0-1编码,随机生成一个包含 p 个1、 $(n-p)$ 个0的一维数组,其中 p 表示选址的个数, n 表示备选点的个数,例如编码[1 0 1 0 0 0 1 1 0 1]表示从10个备选点中选择5个,选址结果为[1 3 7 8 10]。这种编码方式可以满足选址个数的约束(公式(7)),但不一定满足财政预算约束(公式(8)),因此还要进行可行解检验,将满足公式(8)的解作为初始状态,否则再重新随机生成一个

一维数组,直至满足公式(8)。

Step 2 参数初始化

根据 Step1,随机产生 10 个状态,利用经验公式 $t_{\max} = -(E_{\max} - E_{\min}) / \log(0.9)$ 计算初始温度,其中 E_{\max} 和 E_{\min} 分别表示这 10 个状态的最大能量和最小能量,状态的能量直接用目标函数值表示;设置结束温度 t_0 ,温度衰减参数 δ ,内循环次数 L 。

Step 3 新状态产生

采用逆序操作产生新状态,即在 $[1, n]$ 之间随机生成两个不同的数,将编码对应位置的两个点之间的数逆序排列,例如初始状态为 $[1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 1]$,随机生成两个数为 2 和 7,则新状态为 $[1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1]$,选址结果由 $[1, 3, 7, 8, 10]$ 变为 $[1, 2, 6, 8, 10]$ 。产生的新状态同样要进行可行性检验(与 Step1 中类似),将满足可行性检验的状态作为新状态,否则重复以上步骤直至生成满足条件的新状态。令计数器 $i = 1$ 。

Step 4 状态转移

如果新状态的能量小于旧状态的能量,即 $E(s') < E(s)$,则用新状态替换旧状态;否则以概率 $e^{-(E(s') - E(s))/t}$ 替换旧状态,其中 t 为当前温度。令计数器 $i = i + 1$,如果 $i \leq L$,则转入 Step3,否则转入 Step5。

Step 5 退温

记录目前为止的最佳状态 s^* ,如果新状态的能量小于最佳状态的能量,即 $E(s) < E(s^*)$,则更新最佳状态 $s^* = s$;更新温度 $t = \delta \times t$,如果 $t > t_0$,则转入 step3,否则,算法终止,输出结果。

2.2 遗传算法

Step 1 初始种群生成

染色体采用自然数编码,每个染色体有 p 个基因位,每个基因位为 $[1, n]$ 之间的整数,且基因位的值两两不等。这种编码方式既满足选址个数的约束,又比较直观,不用进行解码操作。采用该编码方式生成规模为 n 的初始种群。设置迭代次数 $gen = 1$ 。

Step 2 适应度计算

根据公式(18)计算种群染色体的适应度值,其中 Z 表示模型的目标函数, C 表示对超过财政预算的解给予惩罚, C 取一个较小的数。

$$A = \begin{cases} 1000/Z, & \sum_{j \in J} f_j y_j \leq F \\ C, & \sum_{j \in J} f_j y_j > F \end{cases} \quad (18)$$

Step 3 选择操作

根据适应度值,采用轮盘赌方法从种群中选择两个个体。

Step 4 交叉操作

以交叉概率 p_c 决定是否进行交叉操作。采用单点交叉,如果交叉后有重复的基因值,则将该基因值修正为本染色体相同基因值对应的另一条染色体同基因位的基因值,示例如图 1 所示。

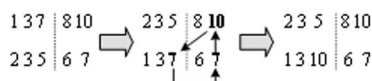


图 1 交叉操作示例

Step 5 变异操作

以变异概率 p_m 决定是否进行变异操作。采用单点变异,随机采用 $[1, n]$ 之间的整数替换变异的基因位,如果生成的整数与染色体的某个基因值相同,则重新生成整数,直至其与染色体上所有的基因值都不相同。

Step 6 新种群产生

重复 Step3 ~ Step5,直至产生规模 n 的新种群。迭代次数更新 $gen = gen + 1$ 。

Step 7 算法终止条件

采用精英保留策略,即保留当前为止找到的最优解;如果最优解连续 50 代不变,或 $gen \geq gen_{\max}$,则终止算法,输出结果,其中 gen_{\max} 为算法最大迭代次数;否则,转入 Step2。

3 算例分析

3.1 参数设置

为了验证模型的有效性,设计了一个中等规模的随机算例进行分析。假设在一个 $70\text{km} \times 80\text{km}$ 的区域内,随机分布了 30 个居住小区,10 个避难所备选点,危险源的坐标为 $(60, 10)\text{km}$,如图 2 所示,采用欧式距离计算各点之间的距离。人口聚集小区的坐标和居住人口如表 1 所示,备选点的坐标、容纳人数和启用成本如表 2 所示,其中启用成本与容纳人数成比例。此外,设置衰减系数 $\lambda = 0.05$,居民理性程度 $\gamma = 3$,居民愿意付出的最远距离 $D = 15\text{km}$,避难所启用个数 $p = 5$,财政预算 $F = 800$ 万元。

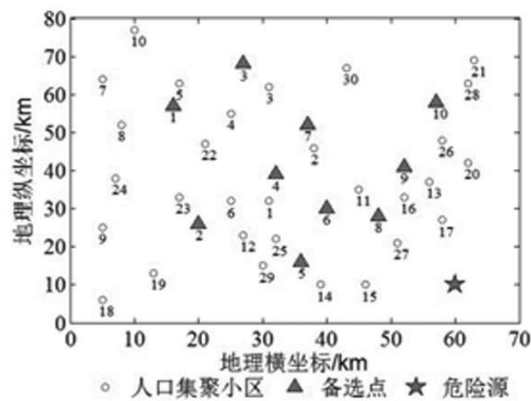


图 2 地理位置关系示意图

表 1 人口集聚小区的坐标和居住人口					
小区编号	坐标/km	人口/万人	小区编号	坐标/km	人口/万人
1	(31 32)	5.1	16	(52 33)	5.6
2	(38 46)	10.3	17	(58 27)	6.3
3	(31 62)	7.6	18	(5 6)	4.1
4	(25 55)	4.8	19	(13 13)	4.7
5	(17 63)	4.1	20	(62 42)	8.5
6	(25 32)	3.9	21	(63 69)	3.0
7	(5 64)	5.1	22	(21 47)	3.3
8	(8 52)	1.2	23	(17 33)	5.9
9	(5 25)	6.6	24	(7 38)	1.4
10	(10 77)	6.5	25	(32 22)	3.7
11	(45 35)	6.2	26	(58 48)	4.3
12	(27 23)	6.7	27	(51 21)	7.9
13	(56 37)	2.1	28	(62 63)	4.4
14	(39 10)	7.8	29	(30 15)	4.4
15	(46 10)	6.9	30	(43 67)	3.4

表 3 基于有限理性选择行为的选址模型计算结果(单位: 万人)

小区编号	选择的备选点编号					
	1	3	7	8	10	0*
1	0.710	1.024	1.691	0.679	0.540	0.457
2	0.822	1.836	5.756	0.664	0.722	0.501
3	0.734	3.989	1.516	0.438	0.509	0.414
4	0.750	1.832	1.182	0.344	0.371	0.320
5	0.772	1.673	0.626	0.339	0.357	0.334
6	0.628	0.819	1.100	0.509	0.443	0.400
7	1.032	1.375	0.833	0.614	0.627	0.618
8	0.276	0.302	0.213	0.137	0.138	0.134
9	1.190	1.247	1.248	0.995	0.957	0.963
10	1.104	1.932	1.028	0.800	0.826	0.811
11	0.584	1.045	2.547	0.983	0.631	0.411
12	1.046	1.281	1.705	1.060	0.835	0.773
13	0.206	0.356	0.718	0.344	0.309	0.167
14	1.068	1.308	1.854	1.657	0.989	0.925
15	0.780	1.062	1.806	1.809	0.769	0.672
16	0.504	0.882	1.989	1.183	0.656	0.387
17	0.546	0.921	1.962	1.652	0.767	0.452
18	0.695	0.712	0.730	0.667	0.640	0.657
19	0.800	0.845	0.901	0.754	0.696	0.704

表 2 备选点的坐标、容纳人数和启用成本

备选点编号	坐标/km	容纳人数/万人	启用成本/万元
1	(16 57)	19.6	98.0
2	(20 26)	13.7	68.5
3	(27 68)	45.8	229.0
4	(32 39)	8.6	43.0
5	(36 16)	14.5	72.5
6	(40 30)	3.4	17.0
7	(37 52)	46.4	232.0
8	(48 28)	29.7	148.5
9	(52 41)	38.2	191.0
10	(57 58)	18.2	91.0

3.2 结果分析

依据算例数据,运用模拟退火算法,采用 MATLAB R2013a 软件,在 Intel(R) Core(TM) i7-4720HQ CPU @ 2.60GHz 8.00GB 内存电脑上运行计算。经过多次试验,设置算法的最佳参数: 结束温度 $t_0=0.01$, 温度衰减参数 $\delta=0.9$, 内循环次数 $L=50$ 。 P_1 、 P_2 属于整数非线性规划(INLP) 模型,采用模拟退火算法求解; P_3 属于混合整数线性规划(MILP) 模型,直接采用 Lingo 求解(Lingo 的分枝定界算法在线性规划方面具有明显优势)。三个模型的具体计算结果如表 3~5 所示,其中模型 P_2 为全有全无分配,为表达方便,表 4 只给出了小区的分配结果,没有注明具体的人口数。

20	0.941	1.506	2.407	1.214	1.610	0.822
21	0.406	0.625	0.602	0.389	0.600	0.378
22	0.635	0.915	0.847	0.309	0.313	0.282
23	1.078	1.257	1.368	0.778	0.727	0.692
24	0.278	0.297	0.273	0.188	0.184	0.181
25	0.531	0.682	1.007	0.642	0.442	0.396
26	0.453	0.802	1.291	0.504	0.868	0.381
27	0.598	1.013	2.374	2.764	0.691	0.461
28	0.548	0.889	0.940	0.530	0.996	0.498
29	0.670	0.790	1.026	0.784	0.579	0.551
30	0.379	1.215	0.803	0.302	0.414	0.288
合计	20.764	34.430	42.342	24.031	19.207	15.026

* 注 “0”表示虚拟避难所,即选择不去避难。

表6给出模型 P_1 、 P_2 和 P_3 优化结果的对比,可见三个模型的选址结果和最优目标函数值都有所不同。基于有限理性选择行为的模型选址结果为[1 3 7 8 10],未被服务的居民数量为17.197万人,占总人口的11.04%;基于效用最优选择行为的模型选址结果为[2 3 6 7 9],未被服务的居民数量为20.6万人,占总人口的13.22%;基于系统最优原则的选址模型选址结果为[1 3 5 7 8],未被服务的居民数量为0。三种模型的优化结果之所以差距较大,在于受到居民选择行为的影响:模型考虑了居民的有限理性,认为居民不能精确计算各避难所的效用,以一定的概率进行选择(见表3),且分配结果与居民的理性程度有关,详细分析见表8。模型 P_2 认为居民能够精确计算各避难所的效用,并选择对自己效用最大的避难所(见表4),但个体最优并不能保证整个系统最优,例如避难所6由于规模太小,没有居民选择,而选择避难所2和7的居民又超过其最大容纳人数,且小区15和28的居民没有选择避难,这就造成了分配结果不如模型 P_1 。模型 P_3 是从系统最优的角度出发,对居民进行分配(见表5),没有考虑居民的个体行为,例如将小区27的居民分配给了距离其50.2km的避难所1,而距离小区27仅7.6km的避难所8也是开放的,正常情况下小区27的居民会到避难所8而不会到避难所1避难,造成实际情况与优化结果不符;再如将小区11的2万人分配给距离其37.6km的避难所3,将4.2万人分配给距离其21.0km的避难所5,容易导致居民的不公平心理。

表4 基于效用最优选择行为的选址模型计算结果

选择的备选点编号	小区编号
2	9 18 19
3	3 4 5 7 8 10 21 22 24 30
6	—
7	1 2 6 11 12 14 23 25 29
9	13 16 17 20 26 27
0	15 28

表5 基于系统最优原则的选址模型计算结果

选择的备选点编号	小区编号
1	1 4(0.3)* 8 19(2.1) 21 27
3	2 4(4.5) 6 7 11(2.0) 16 20 23
5	11(4.2) 17(3.2) 25 30
7	3 5 14 15 18 19(2.6) 26 28 29
8	9 10 12 13 17(3.1) 22 24

* 注:表示小区4有0.3万人分配给了备选点1。

表6 模型 P_1 、 P_2 和 P_3 最优解比较

模型	选址结果	目标函数值/万人	总人口比例/%
P_1	[1 3 7 8 10]	17.197	11.04
P_2	[2 3 6 7 9]	20.600	13.22
P_3	[1 3 5 7 8]	0.000	0.00

3.3 算法比较

为了进一步验证设计算法的有效性,以模型 P_1 为例,将模拟退火算法、遗传算法与Lingo的求解结果进行对比,设置遗传算法的种群规模 $N=50$,交叉概率 $p_c=0.9$,变异概率 $p_m=0.2$,最大迭代次数 $gen_{max}=500$ 。三种求解方法的结果对比如表7所示, P_1 属于INLP模型,Lingo需要调用全局求解器(Global Solver)求解,因此求解时间较长,但求解结果为模型的全局最优解。模拟退火算法与遗传算法本质上是随机搜索算法,每次的运行结果都有所差异,因此将算法分别运行20次,取其最好的解,可见两种算法都计算出了全局最优解,但模拟退火算法的计算时间要略优于遗传算法。

表7 三种求解方法的结果对比

求解方法	目标函数值/万人	迭代次数	计算时间/s
模拟退火算法	17.197	87	6.93
遗传算法	17.197	107	8.83
Lingo	17.197	286693	170

模拟退火算法与遗传算法的求解性能对比如图3所示,可见遗传算法的初始目标函数值要远低于模拟退火算法,这是由于遗传算法是从50个(种群规模)初始解开始搜索,而模拟退火算法只

是从一个初始解开始搜索; 遗传算法最优解的变化略少于模拟退火算法, 可知其容易陷入局部最优解, 而事实上, 在算法运行的 20 次中, 模拟退火算法每次都求出了全局最优解, 而遗传算法只有 14 次, 这也证明了遗传算法容易陷入局部最优解; 模拟退火算法在第 51 代找到全局最优解, 而遗传算法是在 57 代, 说明模拟退火算法的收敛性更强。

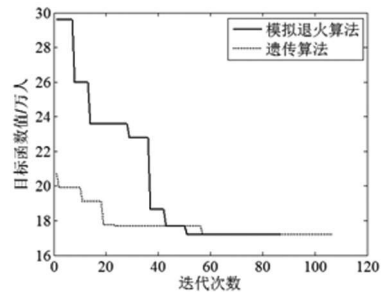


图 3 模拟退火算法与遗传算法的性能对比

3.4 参数分析

以模型 P_1 为例, 分析居民理性程度、选址个数及财政预算对优化结果的影响。同理可分析选址个数及财政预算对模型 P_2 和 P_3 优化结果的影响, 这里不再赘述。

(1) 理性程度的影响

在其他参数不变的情况下, 居民理性程度对模型 P_1 计算结果的影响如表 8 所示, 当 $\gamma = 0$ 时, 居民处于非理性状态, 以相同的概率选择避难所(包括虚拟避难所), 未被服务的居民数量为 40.1 万人, 占总人口的 25.74%; 随着居民理性程度的增大, 未被服务居民的数量逐渐减少, 选址结果也有所变化; 当 $\gamma \geq 6$ 时, 居民已近似处于完全理性状态, 目标函数值逐渐收敛。因此, 应急管理部门平时应注重调查居民的有限理性程度, 以便在突发事件发生后, 制定更加精准的选址方案。

表 8 理性程度对模型结果的影响

γ	选址结果	目标函数值/万人	总人口比例/%
0	[1 3 8 9 10]	40.100	25.74
1	[1 3 7 8 10]	32.523	20.88
2	[1 3 7 8 10]	24.712	15.86
3	[1 3 7 8 10]	17.197	11.04
4	[1 3 7 8 10]	13.580	8.72
5	[2 3 5 7 9]	11.068	7.10
6	[2 3 5 7 9]	10.184	6.54
7	[2 3 5 7 9]	10.181	6.53
8	[2 3 5 7 9]	10.171	6.53
9	[2 3 5 7 9]	10.159	6.52
10	[2 3 5 7 9]	10.105	6.49

(2) 选址个数的影响

在其他参数不变的情况下, 选址个数对模型

P_1 计算结果的影响如表 9 所示, 可以看出当 $p \leq 5$ 时, 未被服务的居民数量随着避难所个数的增加而减少; 当 $5 < p \leq 8$ 时, 未被服务的居民数量随着避难所个数的增加反而增加, 这是由于有财政预算限制, 要启用更多的避难所, 只有选择那些规模较小的备选点, 从而造成总规模不升反降, 此外, 小规模避难所对居民的吸引力也较低; 当 $p \geq 9$ 时, 模型 P_1 无可行解, 这是由于即使启用成本最小的 p 个避难所也不能满足财政预算的约束。因此, 在预算限制的条件下, 启用避难所的个数并不是越多越好, 要综合考虑备选点的规模、启用成本及位置等多种因素, 选择合适的选址方案。

表 9 选址个数对模型 P_1 结果的影响

p	选址结果	目标函数值/万人	总人口比例/%
1	[7]	109.400	70.22
2	[3 7]	63.600	40.82
3	[3 7 9]	27.274	17.51
4	[3 7 9 10]	19.357	12.42
5	[1 3 7 8 10]	17.197	11.04
6	[1 2 3 5 7 10]	19.636	12.60
7	[1 2 4 5 7 9 10]	21.207	13.61
8	[1 2 4 5 6 7 8 10]	27.404	17.59
9	—	—	—

(3) 财政预算的影响

在其他参数不变的情况下, 财政预算对模型 P_1 计算结果的影响如表 10 所示, 可以看出财政预算对选址结果影响较大。当 $F < 292.0$ 时, 模型 P_1 无可行解, 这是由于启用成本最小的 5 个备选点启用成本之和为 292 万元; 当 $292.0 \leq F < 898.5$ 时, 未被服务的居民数量随着财政预算的增加而减少; $F \geq 898.5$ 时, 计算结果不变, 这是由于启用成本最大的 5 个备选点启用成本之和为 898.5 万元, 超过这个数字相当于无财政预算约束。因此, 如果应急管理部门财政预算较充足, 可以考虑适当增加避难所的个数, 以便进一步减少未被服务的居民数量。

表 10 财政预算对模型 P_1 结果的影响

F /万元	选址结果	目标函数值/万人	总人口比例/%
291.9	—	—	—
292.0	[2 4 5 6 10]	97.400	62.52
300.0	[1 2 4 5 6]	96.000	61.62
400.0	[2 5 6 8 10]	76.300	48.97
500.0	[1 4 5 9 10]	56.700	36.39
600.0	[1 2 8 9 10]	38.757	24.88
700.0	[1 5 7 9 10]	25.415	16.31
800.0	[1 3 7 8 10]	17.197	11.04
898.5	[1 3 7 8 9]	14.073	9.03
900.0	[1 3 7 8 9]	14.073	9.03

4 结论

本文研究突发事件发生后,避难所战术层面上的选址问题,通过构造避难所的吸引力因子,对竞争选址理论的效用函数进行修正,并采用MNL模型刻画居民的有限理性,构建考虑居民有限理性选择行为的避难所选址模型,并与基于效用最优选择行为和基于系统最优原则的选址模型进行对比。三个模型均以最小化未被服务的居民为目标,且均考虑财政预算约束和避难所个数限制。由于模型属于NP问题,问题规模越大求解越困难,本文针对模型特征设计了模拟退火算法和遗传算法,算例分析结果显示:(1)不同模型的选址优化结果和目标函数值存在较大差异,基于系统最优原则的目标函数值要远优于考虑居民选择行为的目标函数值,但其过于理想化,与现实不符;在一定理性程度下,有限理性选择行为比效用最优选择行为的结果更优。(2)通过与商业求解软件(Lingo)对比,模拟退火算法与遗传算法均能在短时间内求解出模型的最优解,收敛效果较好,且模拟退火算法综合性能更优。(3)居民的理性程度影响选址结果和未被服务居民总量,因此,应急管理部门平时应充分调查辖区内居民的行为模式,需重点关注理性程度指标。(4)选址结果受选址个数与财政预算的双重约束,启用避难所的个数并不是越多越好,要综合考虑备选点的规模、启用成本及位置等多种因素;如果财政预算较充足,可以考虑适当增加避难所的个数。

地理信息系统(Geographical Information System, GIS)可同时提供多层地理参考信息,如突发事件地理定位、避难所定位与基础设施情况、疏散通道情况等。将模型和算法与GIS相结合,可使应急管理部门决策更加迅速、判断更加准确,是进一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/21734-2008,中华人民共和国国家标准 地震应急避难场所场址及配套设施[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [2] Chen Z, Chen X, Li Q, et al. The temporal hierarchy of shelters: a hierarchical location model for earthquake-shelter planning[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2013, 27(8): 1612-1630.
- [3] Li H, Zhao L, Huang R, et al. Hierarchical earthquake shelter planning in urban areas: a case for shanghai in china[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017, 22: 431-446.
- [4] Xu J, Yin X, Chen D, et al. Multi-criteria location model of earthquake evacuation shelters to aid in urban

- planning[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2016, 20: 51-62.
- [5] Li A C Y, Nozick L, Xu N, et al. Shelter location and transportation planning under hurricane conditions[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48(4): 715-729.
- [6] Bayram V, Tansel B C, Yaman H. Compromising system and user interests in shelter location and evacuation planning[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2015, 72: 146-163.
- [7] 周洪建,郭桂祯. 台风灾害避难所服务区优化研究[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 40-44.
- [8] 张培,张靖岩,王佳,等. 城市社区应急避难场所区位配置模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(6): 172-176.
- [9] 王威,苏经宇,马东辉,等. 城市避震疏散场所选址的时间满意覆盖模型[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(1): 154-158.
- [10] 倪冠群,徐寅峰,徐玖平. 考虑道路通行能力的应急避难点选址模型及算法[J]. 中国管理科学, 2015, 23(1): 82-89.
- [11] 袁昀,刘杨,朱思洪,等. 应急避难场所选址最大准备度覆盖模型及其算法[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(2): 8-14.
- [12] 牟博佼,李岩,朱岩. 基于有限理性假设的运营管理研究现状及发展趋势[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(2): 253-259.
- [13] Burkart C, Nolz P C, Gutjahr W J. Modelling beneficiaries' choice in disaster relief logistics[J]. Annals of Operations Research, 2017, 256(1): 1-61.
- [14] 何波,孟卫东. 考虑顾客选择行为的逆向物流网络设计问题研究[J]. 中国管理科学, 2009, 17(6): 104-108.
- [15] Zhang Y, Berman O, Verter V. The impact of client choice on preventive healthcare facility network design[J]. Or Spectrum, 2011, 34(2): 349-370.
- [16] 陈义友,张锦,罗建强. 顾客选择行为对自提点选址的影响研究[J]. 中国管理科学, 2017, 25(5): 135-144.
- [17] Mcfadden D. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior[A]. Zarembka P. Frontiers in Econometrics[C]. New York: Academic Press, 1974. 105-142.
- [18] Haase K, Müller S. A comparison of linear reformulations for multinomial logit choice probabilities in facility location models[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 232(3): 689-691.
- [19] Hotelling H. Stability in competition[J]. Economic Journal, 1929, 39(153): 41-57.
- [20] Huff D L. A programmed solution for approximating an optimum retail location[J]. Land Economics, 1966, 42(3): 293-303.
- [21] Drezner T, Drezner Z. Modelling lost demand in competitive facility location[J]. Journal of the Operational Research Society, 2012, 63(2): 201-206.
- [22] 田中重好,朱英双. 借鉴东日本大地震的经验教训实现防灾体系的调整[J]. 世界地震译丛, 2017, 48(3): 257-269.
- [23] Martínez-Merino L I, Albareda-Sambola M, Rodríguez-Chúa A M. The probabilistic p-center problem: Planning service for potential customers[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 262(2): 509-520.
- [24] Silva M R, Cunha C B. A tabu search heuristic for the uncapacitated single allocation p-hub maximal covering problem[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 262(3): 954-965.
- [25] Yu V F, Lin S W, Lee W, et al. A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(2): 288-299.
- [26] 陈志宗,关贤军. 灾害应急反应的枢纽集覆盖模型及枢纽最大覆盖模型[J]. 运筹与管理, 2016, 25(5): 15-20.