

## 服务能力受损情景下的应急设施选址模型

俞武扬

(杭州电子科技大学 a. 管理学院, b. 浙江省信息化与经济社会发展研究中心, 杭州 310018)

**摘要:** 考虑突发事件造成应急设施服务能力受损的情景, 通过最大、最小临界覆盖距离定义应急设施对需求点的应急服务质量, 在满足需求点最低服务质量和数量要求条件下, 以最大化加权服务质量期望值为目标建立应急设施选址模型. 设计了一种基于模拟退火的求解算法, 通过对临界覆盖距离、最低服务质量要求、设施服务能力等参数的数值实验, 表明了所提出模型与算法可为解决应急设施选址决策提供有益的参考.

**关键词:** 设施选址; 服务能力受损; 临界覆盖距离; 应急管理

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

## Emergency facility location model under service ability damage scenarios

YU Wu-yang

(a. Management School, b. The Research Center of Information Technology & Economic and Social Development, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China. E-mail: yu.wuyang@163.com)

**Abstract:** Considering the scenarios that emergencies damage the service abilities of some emergency facilities, service quantities are defined, among emergency facilities and demand points, by using the maximum and minimum critical coverage distance. An emergency facility location model is established within the objective to maximizing overall service quality expectation while ensuring the minimum service quality and quantity requirements. In order to solve this model, an efficient algorithm is designed based on the simulated annealing algorithm. Numerical experiments on the number of emergency facilities, the critical coverage range, the minimum service quality are conducted, these results show that the proposed model and algorithm can give a useful reference for the decision of emergency facility location.

**Keywords:** facility location; service ability damage; critical covering distance; emergency management

### 0 引言

应急服务设施选址研究始于20世纪70年代, 研究最为广泛的覆盖模型为集合覆盖模型(LSCP)<sup>[1]</sup>和最大覆盖模型(MCLP)<sup>[2]</sup>. 对覆盖模型最基本的描述是在限定的距离(时间)内, 选择应急服务设施为需求点提供服务.

Drezner<sup>[3]</sup>于1987年首次总结了服务设施可能失效的具体原因, 进而研究了基础设施可靠性模型. 突发事件环境是造成设施失效的重要原因, 为此, 学者们针对失效情景的应急设施选址问题进行了一定的研究:

1) 多层级(或多重)应急设施选址研究. Farahani等<sup>[4]</sup>在考虑不同层级设施失效概率情况下, 以最大化期望覆盖需求为目标研究了层级应急设施选址问题.

Jeong等<sup>[5]</sup>研究了一个容量限制多层级应急设施选址问题, 其中的设施存在一定概率因受损而关闭. 葛春景等<sup>[6]</sup>在阶梯形覆盖质量水平函数基础上建立了应急设施多重数量和质量覆盖模型.

2) 灾害相关性应急设施选址研究. Rawls等<sup>[7]</sup>在应对台风对设施、交通道路等可能造成影响的条件下建立了应急设施选址优化模型, 并提出了基于问题分解策略的算法. Akgun等<sup>[8]</sup>将需求点的风险作为遭受灾害的威胁、易损性(设施失效的概率)以及需求未能满足的惩罚值的共同作用来衡量, 建立了应急设施选址模型. Salman等<sup>[9]</sup>考虑道路网络受灾害影响而受损的情景, 构造了一个情景生成算法来表达灾害与道路受损之间的相关性, 提出了基于距离与道路易损性的应急设施选址模型.

收稿日期: 2015-09-15; 修回日期: 2015-12-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71373064); 浙江省高校人文社科重点研究基地“管理科学与工程”项目(ZD03-201502).

作者简介: 俞武扬(1974—), 男, 副教授, 博士, 从事应急管理、物流建模与优化计算等研究.

3) 多目标应急设施选址研究. Abounacer 等<sup>[10]</sup>利用  $\epsilon$  约束方法研究了多目标应急设施可靠性选址问题. 杨珺等<sup>[11]</sup>以最小化系统日常运作成本和紧急状态下运作成本的权重和为目标研究了最坏中断情景下的  $p$ -中值选址问题. 朱建明<sup>[12]</sup>考虑应急设施损毁情景下额外增加救援变更时间的鲁棒性, 结合时效性与均衡性 3 个目标提出了基于理想点的多目标扰动最小化模型. 4) 保护策略应急设施选址研究. Losada 等<sup>[13]</sup>从加速设施失效后恢复的角度, 提出了一个用来应对最坏情景的无容量限制库存设施混合整数规划保护模型. Medal 等<sup>[14]</sup>在假设应急设施失效数量给定的情形下, 同时考虑选址与保护两种措施, 研究了应急设施选址与保护决策问题. 万晓榆等<sup>[15]</sup>在假设不同设施存在不同失效概率条件下, 研究了应急设施保护选址模型, 并设计了求解模型的遗传算法.

当前的应急设施选址研究中大部分都是考虑应急设施完全失效的情景, 而在覆盖模型中又往往由单一临界覆盖距离来区分需求点是否被覆盖. 本文通过最小、最大临界覆盖距离来确定需求点被应急设施覆盖的服务质量, 避免单一临界覆盖距离造成的过分严格的覆盖条件, 利用情景分析方法研究应急设施服务能力受损情况下的应急设施选址模型, 可为设施部分失效情景下的应急设施选址决策提供一定的参考.

### 1 问题描述

突发事件造成的损失与事件持续时间成正相关关系, 应急服务到达时间越早则应急救援的效果越好, 即应急服务设施距离需求点越近, 应急服务越及时, 突发事件造成的损失越小. 而传统的应急服务设施选址问题中对于应急设施覆盖距离的要求过于严格, 无法体现出不同距离对于应急服务的水平差异. 因此, 本文借鉴葛春景等<sup>[6]</sup>引入最小临界距离  $D_L$  和最大临界距离  $D_U$  ( $D_L < D_U$ ) 的概念, 将不同覆盖距离转化为不同覆盖服务质量水平来度量应急服务设施对需求点的覆盖状况. 设需求点  $i$  与应急服务设施  $j$  之间的距离为  $D_{ij}$ , 本文采用如下线性形式定义覆盖水平函数:

$$F_{ij} = \begin{cases} 1, & D_{ij} \leq D_L; \\ \frac{D_U - D_{ij}}{D_U - D_L}, & D_L < D_{ij} < D_U; \\ 0, & D_{ij} \geq D_U. \end{cases} \quad (1)$$

**注 1** 本文定义的覆盖水平函数比文献 [6] 定义的覆盖水平函数更具一般性, 文献 [6] 中的覆盖水平函数本质上可视为式 (1) 的一种特殊加权形式.

不同等级的覆盖水平如图 1 所示. 需求点对应急服务的质量要求可用覆盖水平函数值表示, 而对应急

服务的数量要求则可用应急设施所能提供的服务能力表示. 本文在各需求点对应急服务具有最低的质量与数量要求条件下, 结合应急设施服务能力可能部分受损的情景, 研究当应急设施选址总数给定情况下如何确定应急设施的选址方案, 以及在各种可能情景下对需求点的服务能力最优分配问题.

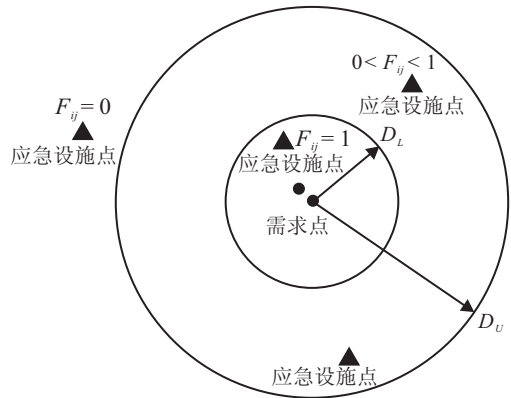


图 1 不同等级覆盖水平示意图

## 2 模型构建

### 2.1 参数与变量设置

$I$  为应急需求点集合, 指标为  $i \in I$ ;  $J$  为应急服务设施候选点集合, 指标为  $j \in J$ ;  $S$  为所有情景组成的情景集合, 指标为  $s \in S$ ;  $p$  为限定的应急服务设施数量;  $M_i$  为需求点  $i$  的人口数量;  $\alpha_i$  为需求点  $i$  对于应急服务质量的最低要求;  $C_j$  为应急设施候选点  $j$  所能提供的服务能力;  $D_{ij}$  为需求点  $i$  到应急服务设施候选点  $j$  的距离;  $\lambda_s$  为第  $s$  种情景所对应的概率;  $p_{sj}$  为在第  $s$  种情景下应急服务设施  $j$  遭受破坏后服务能力下降系数;  $e_{si}$  为在第  $i$  种情景下应急需求点  $i$  总人口受灾比例;  $x_j$  为 0-1 决策变量, 当候选点  $j$  选中为应急设施点时取 1, 否则取 0;  $x_{sij}$  为在第  $s$  种情景下应急设施点  $j$  分配给需求点  $i$  的服务能力比例系数的变量,  $0 \leq x_{sij} \leq 1$ .

### 2.2 数学模型

$$\max \sum_{s \in S} \lambda_s \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in E_i} F_{ij} C_j x_{sij} \right). \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j \in J} x_j = p; \\ \sum_{j \in J} C_j p_{sj} x_{sij} \geq M_i e_{si}, \quad s \in S, i \in I; \\ \sum_{i \in I} x_{sij} \leq 1, \quad s \in S, j \in J; \\ x_{sij} \leq x_j, \quad s \in S, i \in I, j \in J; \\ x_{sij} \geq 0, \quad x_j \in \{0, 1\}, \quad s \in S, i \in I, j \in J. \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$E_i = \{j | F_{ij} \geq \alpha_i, j \in J\}, \quad i \in I.$$

模型说明: 目标函数(2)是关于需求点在各种情景下的服务质量与数量加权指标的期望值; 约束条件(3)中第 1 个条件表示所建立的应急设施数量为给定的数值; 第 2 个条件表示每个需求点在各种情景下的应急需求量都应该被满足; 第 3 个条件表示每个应急设施点服务能力比例分配系数总和不超过 1; 第 4 个条件表示每个候选应急设施点关于应急设施服务能力比例系数的分配要受制于该点是否选中作为应急设施点; 最后 1 个条件表示应急服务能力的比例分配系数为非负数, 而决策变量  $x_j$  为 0-1 变量; 另外,  $E_i$  的定义表达了需求点对应急服务质量的最低要求。

**注 2** 本文模型相比文献 [6] 的模型有较大改变:

- 1) 目标函数从原来的纯服务质量指标变成了服务质量与数量的加权指标;
- 2) 增加了需求点最低服务质量约束;
- 3) 增加了应急设施服务能力分配决策;
- 4) 最为直观的区别就在于本文模型是一个 0-1 混合整数规划模型, 而文献 [6] 的模型是 0-1 整数规划模型。

### 3 算法设计

前文所构建的模型是一个混合整数规划模型, 其中  $x_j$  为 0-1 变量, 用于确定应急服务设施选址点位置, 一旦选址点位置确定后, 则通过确定各应急服务设施在各种情景下对于需求点的服务比例系数, 以最大化服务质量与数量综合指标的期望值。模拟退火算法是由 Kirkpatrick 等<sup>[16]</sup>在 1983 年类比最优化问题求解过程与固体物质退火过程之间的相似性提出的一种随机寻优算法, 该算法具有概率的全局优化性能并得到了广泛的应用。下面给出基于模拟退火思想的求解算法。

**Step 1:** 设置初始温度  $T_s$ , 终止温度  $T_{end}$ , 温度下降速率  $r$ , 内循环次数  $K$ , 对于每一个应急需求点  $i$  及候选应急服务设施点  $j$ , 通过应急覆盖服务质量函数(1)计算  $F_{ij}$ , 进而计算覆盖矩阵

$$E_{ij} = \begin{cases} 1, & F_{ij} \geq \alpha_i; \\ 0, & \text{否则。} \end{cases}$$

**Step 2:** 任取  $p$  个候选应急服务设施点, 记其点集为  $J_0$ , 判断其逻辑或运算是否包含所有的需求点, 即  $\bigvee_{j \in J_0} \{E_{ij}\}$  是否全为 1, 若是则转 Step 3, 否则返回 Step 2 重新选取。

**Step 3:** 令  $J_0$  为当前应急服务设施点集, 即令  $x_j^0 := 1, j \in J_0$ 。对于给定的  $x^0|_{j \in J_0}$ , 利用运输问题线性规划算法求解  $x_{sij}^0$ , 并将所得目标函数值作为  $x^0$  的适

值, 记为  $f^0$ 。令  $x_{best} := x^0, f_{best} := f^0$ , 内循环计数变量  $k := 1, J_{temp} = \emptyset$ 。

**Step 4:** 若  $J_0 \setminus J_{temp} = \emptyset$ , 则转 Step 8; 否则任取  $J_0 \setminus J_{temp}$  中一个应急设施点  $\hat{j}$ , 检查未被选中的候选点集  $J \setminus J_0$ , 找出其中所有使得  $\bigvee_{j \in J_0, j \neq \hat{j}} \{E_{ij}\} \bigvee \{E_{i\hat{j}}\}$  全为 1 的  $j'$ , 记其集合为  $J_j$ ;

**Step 5:** 若  $J_j \neq \emptyset$ , 则任取其中一点  $j'$  替代  $J_0$  中的  $\hat{j}$ , 记新的应急设施点集为  $J_1$ , 所对应的解为  $x^1$ 。利用运输问题线性规划算法求解  $x_{sij}^1$ , 计算对应的目标函数值, 记为  $f^1$ , 转 Step 6; 若  $J_j = \emptyset$ , 则令  $J_{temp} := J_{temp} \cup \{\hat{j}\}$ , 转 Step 4。

**Step 6:** 计算  $\Delta z = \exp[(f^1 - f^0)/T_s]$ , 产生随机数  $\xi \in U(0, 1)$ , 若  $\Delta z > \xi$ , 则令  $J_0 := J_1, x^0 := x^1, f^0 := f^1$ ; 若  $f_{best} < f^0$ , 则更新  $x_{best} := x^0, f_{best} := f^0$ , 否则不变。判断内循环计数变量  $k$  是否达到内循环次数  $K$ , 若  $k < K$ , 则令  $k := k + 1, J_{temp} := \emptyset$ , 转 Step 4。

**Step 7:** 更新  $T_s := T_s r$ , 若  $T_s > T_{end}$ , 则转 Step 4, 否则转 Step 8。

**Step 8:** 算法中止, 输出最优目标函数值为  $f_{best}$ , 最优选址方案为  $x_{best}$ 。

**注 3** 在算法 Step 2 中关于逻辑或运算是为了找到判断所选择的候选应急设施点是否能够覆盖所有的应急需求点, 而 Step 4 与 Step 5 所起的作用为改变应急设施选址点时, 能够保证在保持设施总数不变情况下新增的设施点与未改变的应急设施能覆盖所有需求点。将模型中的混合点整数规划通过嵌入运输问题线性规划算法的模拟退火算法进行分步求解, 以及设计 Step 2、Step 4 和 Step 5 限制可行解范围都是通过分析模型特点结合模拟退火算法所作的一些改进之处。

### 4 数值计算

**例 1** 某地区有 10 个社区 (1-10), 当地政府计划在 7 个候选设施地址 (A-G) 中选择 4 个应急服务设施点, 规定该地区的最小临界覆盖距离为  $D_L = 5 \text{ km}$ , 最大临界覆盖距离为  $D_U = 9 \text{ km}$ 。假定每个街区的需求都集中在社区中心, 10 个社区中心和 7 个候选设施的坐标如表 1 所示。

设突发事件的各种可能情景为 4 种, 各候选设施服务能力  $C_j$ 、每种情景模式所对应的概率  $\lambda_s$  以及各

表 1 社区与候选设施坐标

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
横坐标	15	17	11	13	13	14	12	16	11	5
纵坐标	6	9	12	12	10	10	19	5	2	16

No.	A	B	C	D	E	F	G
横坐标	15	12	18	5	19	13	17
纵坐标	5	11	9	12	18	14	7

种情景模式下候选应急设施点服务能力下降系数  $p_{sj}$  如表 2 所示。

表 2 各种情景下候选应急设施相关参数

$p_{sj}$	A	B	C	D	E	F	G	$\lambda_s$
情景 1	0.65	0.6	0.65	0.95	0.75	1.0	0.9	0.42
情景 2	1.0	1.0	0.95	0.8	0.55	1.0	0.7	0.15
情景 3	0.6	0.55	0.75	0.8	0.65	0.75	0.65	0.18
情景 4	0.95	0.9	1.0	0.6	0.6	0.75	0.75	0.25
$C_j$	150	200	130	170	160	120	190	

各社区的人口数量  $M_i$  以及每种情景对于社区的影响系数  $e_{si}$  如表 3 所示。

表 3 各种情景下社区相关参数

$e_{si}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
情景 1	0.1	0.6	0.2	0.7	0.3	0.7	0.4	0.4	0.2	0.7
情景 2	0.4	0.4	0.3	1.0	0.3	0.4	0.8	0.7	0.3	0.7
情景 3	0.6	0.2	0.5	0.3	0.7	1.0	0.5	0.2	0.1	0.7
情景 4	0.7	0.7	0.6	0.7	0.9	0.1	0.1	0.8	0.6	1.0
$M_i$	75	43	87	98	66	54	39	76	62	61

下面设各需求点关于应急服务质量的最低要求是  $\alpha_i$  相同, 记为  $\alpha$ , 以  $\alpha = 0.3$  为例对上述算例利用 Matlab R2010b 编程进行 10 次随机计算, 10 次均得到同样的最优选址方案, 表明了算法具有很好的稳定性(事实上, 对于后面进行的各种参数影响分析, 针对每个参数都进行了多次随机计算, 结果均保持一致)。最优选址方案即为在 A,B,D,F 四处建立应急服务设施, 最优目标函数值为 638.3072, 各种情景下应急设施点分配给各个需求点的最优服务能力比例系数  $x_{sij}^*$  如表 4 所示。

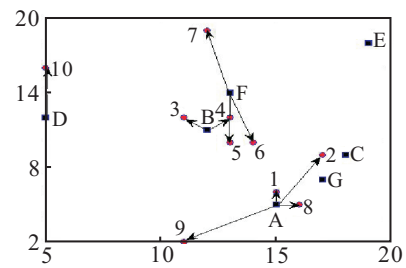
表 4 各种情景下设施服务能力最优分配比例

$x_{sij}^*$	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4
1	A 0.2964	A 0.4067	A 0.6667	(A 0.3123; B 0.0444)
2	A 0.2646	A 0.1147	A 0.0956	B 0.1672
3	B 0.4283	F 0.7400	B 0.3955	B 0.1672
4	B 0.5717	B 0.7930	B 0.3955	B 0.2900
5	F 0.5550	B 0.0990	F 0.5959	(B 0.0872; F 0.9567)
6	F 0.3150	B 0.1080	(B 0.3373; F 0.1878)	B 0.0300
7	F 0.1300	F 0.2600	F 0.2167	F 0.0433
8	A 0.3118	A 0.3547	A 0.1689	A 0.4267
9	A 0.1272	A 0.1240	A 0.0689	A 0.2611
10	D 1.0	D 1.0	D 1.0	D 1.0

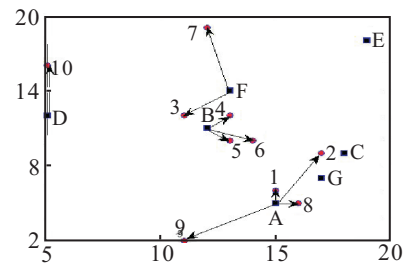
表 4 中第 1 列表示社区, 表中数值如社区 1 在情景 4 (Scenario 4) 时的值为 (A 0.3123; B 0.0444), 即表示社区 1 在情景 4 时的需求可由应急设施点 A 提供其服务能力的 0.3123 以及由 B 提供其服务能力的 0.0444 得以满足, 注意此时 A, B 的服务能力为该情景下受损后所余的服务能力。

由表 4 可以看出, 在各种情景下每个需求点的服务需求可以由在其最大临界覆盖范围内的多个应急设施提供服务, 每种情景下应急设施受损后的服务

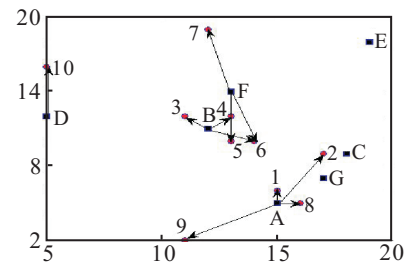
能力按比例系数协同满足需求点的应急服务需求。4 种情景下应急设施点与各需求点的服务对应关系如图 2 所示。



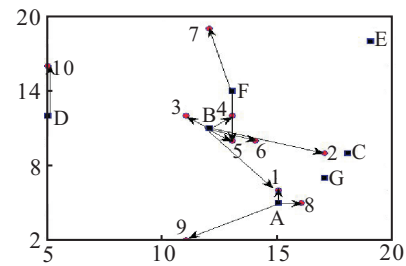
(a) 情景 1 下的服务方案



(b) 情景 2 下的服务方案



(c) 情景 3 下的服务方案



(d) 情景 4 下的服务方案

图 2 各种情景下的服务方案示意图

由图 2 可以看出, 应急设施对哪些需求点提供服务受其服务能力及需求点需求量两者的综合影响。若社区的应急需求数量不大时, 应急设施服务能力倾向于按服务质量(即就近原则)分配, 而当社区的应急需求数量增大时, 则应急设施服务能力分配优先考虑满足数量要求, 如情景 4 中由于社区 1、社区 2、社区 8、社区 9 需求数量较大, 导致除原来由设施 A 提供服务外, 还分配了设施 B 的部分服务能力。

1) 最低服务质量系数对选址方案的影响。

在其余参数保持不变条件下, 设每个需求点对于服务质量的最低要求都为  $\alpha$ , 令  $\alpha$  从 0 以 0.05 为步长增加到 1, 计算得到问题最优解  $x^*$  和最优目标函数

值  $z^*$ , 如表 5 所示.

表 5 最优解与最低服务质量要求系数关系表

$\alpha$	$\alpha = 0$	$0 < \alpha \leq 0.25$	$0.3 \leq \alpha \leq 0.75$	$\alpha \geq 0.8$
$x^*$	A, B, D, G	A, B, D, G	A, B, D, F	$\emptyset$
$z^*$	694.3932	692.7011	638.3072	$\emptyset$

由表 5 可知, 目标函数值随着需求点对服务质量的最低要求  $\alpha$  的增大而减小,  $\alpha$  在某个范围内的变化可能对应着不变的应急设施选址方案.

2) 最小、最大覆盖距离对目标函数值的影响.

分析在不同最低服务质量最低要求  $\alpha = 0, 0.1, 0.2, 0.3$  条件下, 最小、最大覆盖距离对目标函数的影响. 首先令最大覆盖距离  $D_U = 9$  保持不变, 然后让最小覆盖距离  $D_L$  以 0.5 为步长从 1 增加到 8, 所得结果如图 3 所示.

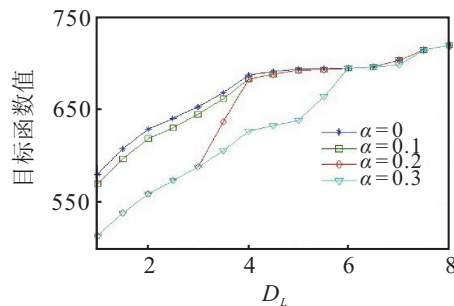


图 3 最小覆盖距离对目标函数值的影响

由图 3 可以看出, 给定最大覆盖距离的前提下, 当最小覆盖距离增大时, 需求点的服务质量加权和随之增大, 其增幅先大后小. 这是因为对于给定的  $D_{ij}$ , 当最大覆盖距离确定时, 若  $D_{ij} < D_U$ , 则由式 (1) 可知  $F_{ij}$  随着最小覆盖距离  $D_L$  的增大而增大; 若  $D_{ij} \geq D_U$ , 则  $F_{ij}$  不变, 因此所有需求点的服务质量加权和随着最小覆盖距离  $D_L$  的增大而增大. 而增幅先大后小是由于最小覆盖距离  $D_L$  从小到大的增加时, 一开始从基本覆盖转变为完全覆盖的需求点在  $D_L$  离  $D_U$  较远时较多, 而当  $D_L$  接近  $D_U$  时, 基本覆盖转变为完全覆盖的需求点相对变少, 造成服务质量系数  $F_{ij}$  的变化较为平缓.

令最小覆盖距离  $D_L = 5$  保持不变, 最大覆盖距离  $D_U$  以步长 0.5 从 7 增加到 14, 结果如图 4 所示.

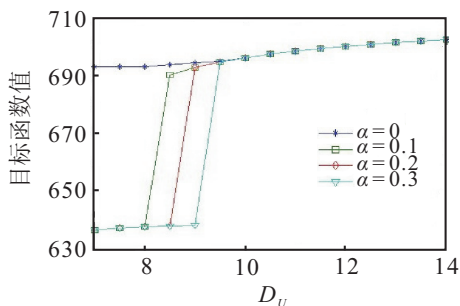


图 4 最大覆盖距离对目标函数值的影响

由图 4 可以看出, 当最小覆盖距离  $D_L$  不变时, 需求点服务质量加权和随着最大覆盖距离  $D_U$  的增大而增大. 另外, 除了  $\alpha = 0$  的情况, 不同的下限  $\alpha$  的取值会使得目标函数值关于  $D_U$  的曲线在不同的位置产生突跳, 这是由于随着  $D_U$  的增大, 对于确定的需求点会在某个时刻增加可行的应急设施候选点集, 从而使得目标函数值产生一个较大幅度的增大.

3) 设施服务能力对目标函数值的影响.

下面分析候选应急服务设施的服务能力对目标函数值的影响. 在其他参数不变的情况下, 令候选应急服务设施  $F$  的服务能力  $C_6$  以步长 5 从 100 增加到 200, 令  $\alpha$  以步长 0.1 从 0 增加到 0.3, 计算结果如图 5 所示.

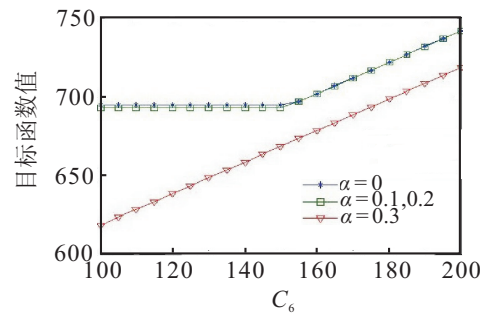


图 5 设施服务能力对目标函数值的影响

由图 5 可以看出: 当其他条件不变时, 目标函数值随着设施服务能力的增大保持不减; 从需求点对服务质量的最低要求  $\alpha$  来看, 值越小则意味着可选候选点集越大, 从而目标函数值相对越大. 当某个候选应急服务设施的服务能力增加到一定程度之后, 则可以满足该应急服务设施覆盖范围内所有需求点在各种情景下的应急需求, 此时选址方案保持不变, 包括该设施点, 因而目标函数值随着该设施点的服务能力增加而增加. 下面给出 3 种  $\alpha$  取值条件下的应急选址方案与  $C_6$  之间的具体关系, 如表 6 所示.

表 6 服务能力与选址方案关系

$\alpha = 0$	$\alpha = 0.1, 0.2$	$\alpha = 0.3$
$C_6 \leq 152$ : A, B, D, G	$C_6 \leq 151$ : A, B, D, G	A, B, D, F
$C_6 \geq 153$ : B, D, F, G	$C_6 \geq 152$ : B, D, F, G	A, B, D, F

由表 6 可以看出, 当需求点对于应急服务质量最低要求  $\alpha$  的值较小, 候选设施点  $F$  的服务能力较小时, 设施点  $D$  的服务能力相对较大, 因而被选中; 当  $\alpha = 0.3$  时, 候选设施  $G$  受最低服务质量要求未能对更多的需求点提供服务, 虽然候选设施点  $F$  的服务能力较小, 但仍然被选中作为应急设施点. 另外, 结合图 5 可知, 当  $C_6$  增大到一定程度后, 虽然目标函数值会增加, 但此时应急设施选址方案将不再变化.

总结上述各类参数的分析, 可得如下管理启示:

1) 应急设施选址方案的适当调整可以大幅提高需求点的最低服务质量要求;

2) 最小临界覆盖距离对于服务质量的影响大于最大临界覆盖距离的影响, 决策者在确定最小、最大临界距离时应特别注意最小临界距离的影响;

3) 增加设施的服务能力有助于提高应急设施选址的服务指标, 但当服务能力增加到一定程度时将不会影响选址方案.

## 5 结 论

本文在突发事件造成应急设施服务能力受损的前提下, 引入最小、最大覆盖距离定义服务质量系数, 以最大化应急服务质量与数量的综合指标为目标, 研究了需求点具有最低服务质量和数量要求下的应急设施选址问题. 设计了嵌入线性规划算法的模拟退火算法, 并通过数值实验得到了部分失效情景下应急设施选址决策的一些有用启示. 未来研究方向可以进一步考虑各种情景发生概率信息不确定的情况、投入资源进行设施保护以及多目标要求下的应急设施选址问题.

### 参考文献(References)

- [1] Toregas C, Swaim R, Reville C, et al. The location of emergency service facilities[J]. *Operation Research*, 1971, 19(6): 1363-1373.
- [2] Church R, Reville C. The maximal covering location problem[J]. *Papers of the Regional Science Association*, 1974, 32(1): 101-118.
- [3] Drezner Z. Heuristic solution methods for tow location problems with unreliable facilities[J]. *Transportation Science*, 1987, 38(6): 509-514.
- [4] Farahani R Z, Hassani A, Mousavi S M, et al. A hybrid artificial bee colony for disruption in a hierarchical maximal covering location problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 75: 129-141.
- [5] Jeong K Y, Hong J D, Xie Y. Design of emergency logistics networks, taking efficiency, risk and robustness into consideration[J]. *Int J Logistics: Research and Applications*. 2014, 17(1): 1-22.
- [6] 葛春景, 王霞, 关贤军. 重大突发事件应急设施多重覆盖选址模型及算法[J]. *运筹与管理*, 2011, 20(5): 50-56.  
(Ge C J, Wang X, Guan X J. A multi-covering model and its algorithm for facility location response for large-scale emergencies[J]. *Operations Research and Management Science*, 2011, 20(5): 50-56.)
- [7] Rawls C G, Turnquist M A. Pre-positioning of emergency supplies for disaster response[J]. *Transportation Research Part B*, 2010, 44(4): 521-534.
- [8] Akgün I, Gümüşbuga F, Tansel B. Risk based facility location by using fault tree analysis in disaster management[J]. *Omega*, 2015, 52: 168-179.
- [9] Salman F S, Yücel E. Emergency facility location under random network damage: Insights from the Istanbul case[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 62: 266-281.
- [10] Abounacer R, Rekik M, Renaud J. An exact solution approach for multi-objective location-transportation problem for disaster response[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 41: 83-93.
- [11] 杨珺, 刘舒佶, 王玲. 考虑最坏中断损失下的 p-中位设施选址问题的模型与算法研究[J]. *中国管理科学*, 2011, 19(4): 120-129.  
(Yang J, Liu S J, Wang L. A bi-level programming model and heuristics for p-median location problem with R-interdiction worst loss[J]. *Chinese J of Management Science*, 2011, 19(4): 120-129.)
- [12] 朱建明. 损毁情景下应急设施选址的多目标决策方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35 (3): 720-727.  
(Zhu J M. Methods of multi-objective decision-making for emergency facility location problem under failure scenario[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2015, 35(3): 720-727.)
- [13] Losada C, Scaparra M P, Ohanley J R. Optimizing system resilience: A facility protection model with recovery time[J]. *European J of Operational Research*, 2012, 217(3): 519-530.
- [14] Medal H R, Pohl E A, Rossetti M D. A multi-objective integrated facility location-hardening model: Analyzing the pre- and post-disruption tradeoff[J]. *European J of Operational Research*, 2014, 237(1): 257-270.
- [15] 万晓楠, 陈煜舟, 付德强. 中断情景下应急设施保护选址模型研究[J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(7): 98-103.  
(Wan X Y, Chen Y Z, Fu D Q. Study on location problem for protection of emergency facilities under interdiction scenario[J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(7): 98-103.)
- [16] Kirkpatrick S, Glatt, C D, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, 220(4598): 671-680.