

马运佳, 赵秀娟, 秦连杰, 等. 多约束多目标的灾害避难所选址优化研究——以海南省文昌市为例[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 218–224. [MA Yunjia, ZHAO Xiujuan, QIN Lianjie, et al. Multi-objective Location-allocation Model for Earthquake Emergency Shelters with Multiple Constraints: A Case Study in Wenchang of Hainan Province[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 218–224. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.01.038.]

多约束多目标的灾害避难所选址优化研究

——以海南省文昌市为例*

马运佳^{1,2,3}, 赵秀娟^{1,2,3}, 秦连杰^{1,2,3}, 梁埔君^{1,2,3}, 周洪建⁴,

袁 艺⁴, 徐 伟^{1,2,3}

(1. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 民政部—教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 4. 民政部国家减灾中心, 北京 100053)

摘 要: 地震灾害避难所优化选址是灾害管理的一个重要内容, 也是个难点。以最小化总疏散距离和最小化避难所总面积为目标, 同时在满足距离约束和容量约束的条件下, 建立地震灾害避难所选址多目标模型, 采用改进的粒子群算法对模型进行解算, 并以海南省文昌市为例进行实证分析。结果表明: 距离约束在多目标模型的空间分配结果中起主导作用, 容量约束则会显著影响多目标模型及其算法在高维复杂问题中的空间搜索能力和解的质量。优化结果可为灾害避难所区位的确定及疏散方案的制定提供科学依据, 为震后应急疏散提供决策支持。

关键词: 地震灾害避难所; 选址分配; 多约束; 多目标模型; 文昌市

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)01-0218-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.01.038

灾害避难所的选址和优化, 历来是城市规划工作中的重点与难点^[1-3]。其拥有严格的约束、离散的可行域和高维的解空间, 是一个极为复杂的地理空间优化问题^[4]。目前学者们大多通过建立单目标、多目标或层次选址模型^[5-6], 简化相关参数, 来解决避难所选址的优化问题。单目标模型较为简单, 研究趋于成熟^[7-10]。但其不能同时考虑其他重要目标, 因此, 多目标模型在近年来得到了更多学者的青睐。Huang 等^[11]建立了一个模糊多目标选址模型, 考虑到了线要素的最大覆盖和平衡每个需求点到服务点的距离, 结合 GIS 和蚁群算法进行求解。Alçada Almeida 等^[12]在 P 中值模型的基础上, 选取最小化总距离、最小化基础道路不能通信的风险, 最小化避难所火灾风险和最小化总时间为目标, 建立了避难所多目标模型, 并采取基于 GIS 网络决策支持系统的结构方法进行解算。Saadatseresht 等^[13]以最小化从居民区到避难所的最大距离和尽可能的满足避难所的容量约束

为目标, 并用多目标进化算法 NSGA-II 解算模型。Doerner 等^[14]以最小总距离和最大距离最小化加权平均、最小化飓风风险、总费用最小化为目标, 并在 NSGA-II 的基础上提出了一个启发式算法求解模型。Barzinpour 和 Esmaili^[15]基于简单最大覆盖模型建立了多目标混合整数线性规划模型, 以最大化人口累计覆盖、最小化设施建设成本和交通成本为目标, 利用分区虚拟方法进行模型改进, 将其应用到市区中, 达到了人道主义和经济的目标。基于情景设计, Rodríguez-Espíndola 和 Gaytán^[16]以最小化距离和费用为目标, 建立了选址优化模型, 并利用加权和方法进行解算。郭子雪等^[17]构建了区间数信息下应急物资储备库选址问题的模糊多目标决策模型, 提出了一种基于满意度的模型优化算法。Hu 等^[4,18]以最小化避难所数量和最小化疏散时间为目标, 建立地震灾害避难所布局模型, 并将其分别应用于广州市越秀区珠江街道和北京市朝阳区, 并分别应用粒子群算

* 收稿日期: 2017-06-28 修回日期: 2017-08-15

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFA0602404); 教育部-国家外国专家局高等学校创新引智计划项目(B08008); 国家自然科学基金青年基金项目(41201547)

第一作者简介: 马运佳(1990-), 女, 河北任丘人, 博士生, 主要从事自然灾害风险评估和社区减灾研究。

E-mail: mayj@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 徐伟(1979-), 男, 浙江诸暨人, 教授, 主要从事自然灾害风险评估研究。E-mail: xuwei@bnu.edu.cn

法和非劣排序遗传算法进行了解算。Zhao 等^[19]以最小化加权疏散时间和避难所面积为目标,建立地震灾害避难所布局模型,采用改进的粒子群算法进行了解算。

本文以最小化避难需求人口到避难所的总疏散距离和避难所总面积为目标,在满足安全约束、距离约束和容量约束的条件下,建立灾害避难所选址多目标模型,采用改进的粒子群算法求解模型。分析了是否有容量约束等因素对结果的影响。并以海南省文昌市为例进行实证分析,以期对灾害避难所区位的确定及疏散方案的制定提供科学依据,为震后应急疏散提供决策支持。

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

文昌市位于海南省东北部,108°21′~111°03′E,19°20′~20°10′N之间,三面临海,形似半月。土地总面积2 488 km²,占全省的7%。海域面积4 600 km²,有大小港湾40个。文昌市辖18个镇(图1),2012年末全市户籍总人口59.29万人,其中非农业人口11.98万人。海南省民政厅统计,截至2016年底文昌市已规划建设55个地震应急避难场所,可容纳21.60万人(表1),约为全市人口的30%。

文昌市为低丘台地平原,平均海拔42.55 m,地势从西南内陆向东北沿海倾斜,地势均较为平缓,坡度都在26°以下(图1)。文昌市除龙楼镇东部位于地震动峰值加速度0.1g~0.15g(VII度)区外,其他大部分区域都在0.2g(VIII度)及以上。

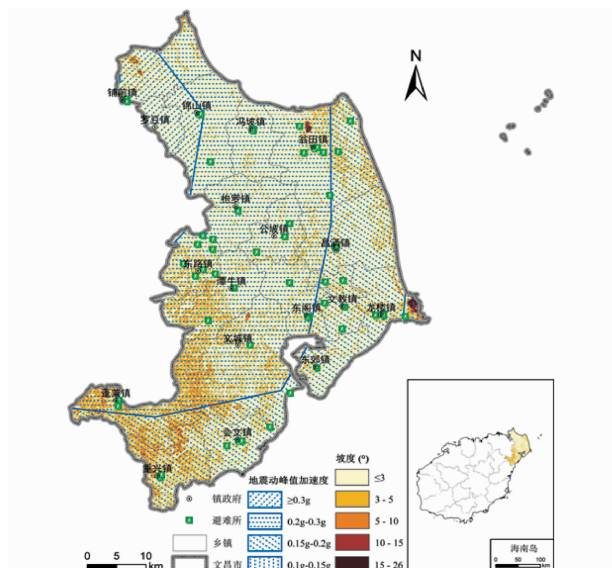


图1 文昌市地理位置、地震动峰值加速度及地形坡度

1.2 数据

(1) 避难需求点和避难需求人口

文昌市共有行政村243个(图2),总人口35.51万人。假设每个行政村的人口集中于其几何中心处。由于缺乏城镇社区人口等数据,本文只考虑243个行政村作为避难需求点,并假设灾害发生时,每个行政村的人口作为一个整体进行避难。大部分地震灾害的案例表明,灾民的避难率基本为30%^[20],为此本文中的避难需求人口也按照每个行政村总人口的30%计算。

(2) 灾害避难所

文昌市地震灾害应急避难所共有55个,其中政府办公型2个,社区居委会或村委会6个,其余均为学校型,总面积62.86万m²,能容纳21.60万人。文昌市的地震灾害避难所主要依托中小学空地或操场建设,且位于主要交通干线两侧,与疏散道路间的连通性较好。

(3) 疏散道路

文昌市辖有国道1条,南北向穿过市西南部,全长6 432 m;省道4条,全长211.0 km;县乡级道路43条,全长454.0 km。并有一级街道23条,全长39.1 km;二级街道18条,全长22.4 km;三级街道18条,全长15.9 km;四级街道33条,全长16.5 km;小路97条,全长425.1 km。道路分布如图2所示。假设在地震中,这些道路几乎没有受到影响,可用作候选避难路径。

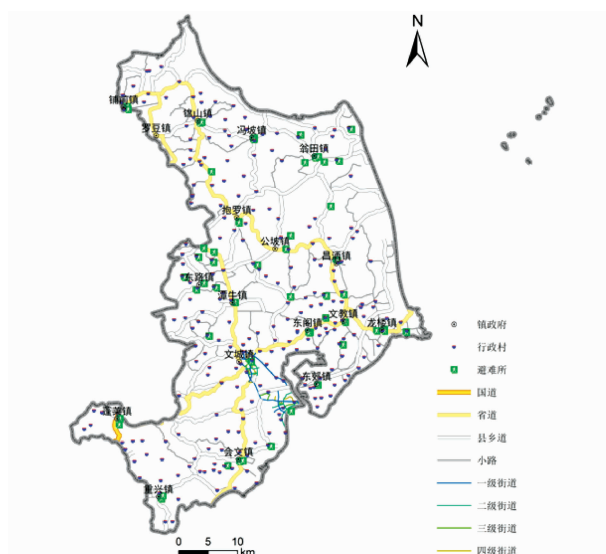


图2 文昌市行政村、灾害避难所及疏散道路空间分布

2 灾害避难所布局优化多目标模型

居民在应急疏散过程中,从个人角度会选择距其最近或者熟悉的避难所,而政府管理者会权衡

表 1 文昌市地震应急避难场所

序号	名称	所属乡镇	面积/m ²	容量/人	序号	名称	所属乡镇	面积/m ²	容量/人
1	文昌市公园	文城镇	20000	5000	29	葫芦村委会	东路镇	339	200
2	清澜白金海岸	文城镇	30000	6000	30	长征村委会	东路镇	160	100
3	琼文中学	会文镇	3000	3000	31	爱心学校	东路镇	1000	700
4	会文中心小学	会文镇	2500	2000	32	文西中学	潭牛镇	75000	5000
5	烟堆小学	会文镇	2500	2500	33	新桥办事处综合楼	潭牛镇	5000	800
6	白延小学	会文镇	2500	2500	34	龙楼镇中学	龙楼镇	18000	4000
7	冠南小学	会文镇	2200	2000	35	中心小学	龙楼镇	8000	1500
8	文南中学操场	重兴镇	4500	9000	36	航天小学	龙楼镇	10000	1800
9	中心小学操场	重兴镇	2500	5000	37	冯坡中学	冯坡镇	12000	4500
10	侠夫中学	东阁镇	64667	11000	38	冯坡中心小学	冯坡镇	9000	3000
11	东阁中学小学	东阁镇	26667	5622	39	中学操场	蓬莱镇	8000	4000
12	宝芳中心学校	东阁镇	73333	8865	40	中心小学操场	蓬莱镇	3000	2000
13	中心校	公坡镇	5000	1200	41	锦山中学操场	锦山镇	12000	17000
14	英敏小学	公坡镇	4000	1000	42	中心小学操场	锦山镇	10000	10000
15	水北小学	公坡镇	4000	1000	43	湖山中学操场	锦山镇	10000	11000
16	中心校	翁田镇	5000	1200	44	罗峰中学	抱罗镇	8000	8000
17	翁田中学	翁田镇	10000	3000	45	中心小学	抱罗镇	6000	6000
18	明月小学	翁田镇	4000	1000	46	东郊中学操场	东郊镇	17600	17000
19	茂山小学	翁田镇	2000	500	47	文北中学操场	铺前镇	16000	16000
20	第二小学	翁田镇	2000	500	48	中心小学操场	铺前镇	6000	6000
21	博文小学	翁田镇	2000	500	49	文东中学	昌洒镇	61065	10008
22	文苑小学	翁田镇	4000	1000	50	昌洒中心小学	昌洒镇	28172	5865
23	翁龙马中心校	翁田镇	4000	1000	51	文教镇联东中学	文教镇	10000	4000
24	红光村委会	东路镇	339	200	52	宋六小学	文教镇	3000	500
25	约亭社区居委会	东路镇	312	200	53	立新小学	文教镇	3000	500
26	东路村委会	东路镇	259	200	54	培龙小学	文教镇	3000	500
27	镇政府	东路镇	800	400	55	宝典小学	文教镇	3000	500
28	大坡村委会	东路镇	160	100	合计			628573	215960

全局多方面因素,控制建设成本较低。因此,在最小化避难距离目标的基础上,增加了最小化避难所面积的目标,同时在满足安全约束、距离约束和容量约束的条件下,建立灾害避难所选址多目标模型。该模型假设每个行政村的居民作为一个整体进行疏散,不能拆分为不同小组、家庭或者个人。

$$f_1 = \min \sum_{i=1}^N Y_i \times S_i, \forall j = 1, 2, \dots, M. \quad (1)$$

$$f_2 = \min \sum d_{ji} B_{ji}, \forall i = 1, 2, \dots, N, \forall j = 1, 2, \dots, M. \quad (2)$$

Subject to

$$\sum_{j=1}^M P_j B_{ji} - S_i Y_i \leq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

$$d_{ji} B_{ji} - D_j \leq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N, \forall j = 1, 2, \dots, M. \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N B_{ji} Y_i = 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, M. \quad (5)$$

$$Y_i = \begin{cases} 1, & \text{候选场址 } i \text{ 被选为避难场所;} \\ 0, & \text{候选场址 } i \text{ 未被选为避难场所。} \end{cases} \quad (6)$$

$$B_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{居民区 } j \text{ 选择候选场址 } i; \\ 0, & \text{居民区 } j \text{ 不选择候选场址 } i. \end{cases} \quad (7)$$

式中: I 是避难场所的集合, $I = (1, 2, \dots, i, \dots, N)$, N 是避难所数量; J 是行政村居民点的集合, $J = (1, 2, \dots, j, \dots, M)$, M 是行政村居民点的数量; S_i 是第 i 个避难所的容量; d_{ji} 是从居民点 j 到避难所 i 之间的最短距离; P_j 是居民点的避难需求人口; D_j 是居民点 j 的最大疏散距离。由于区域的特殊性,将其设置为居民点到避难所最短距离的最大值。

目标函数 f_1 , 即最小化避难场所的总面积, 目标函数 f_2 , 即最小化总疏散距离。公式(3)是容量约束, 以保证居民点的避难需求人口能够被所选择的避难所容纳, 公式(4)是距离约束, 以保证在所有分配方案下, 居民点到其选择的避难所的距离全部小于最大疏散距离。公式(5)确保每个行政村有且只能选择一个避难所。公式(6)和公式(7)表示决策变量 B_{ji} 和 Y_i 只能取 0 和 1。

3 多目标模型优化结果

国内在灾害避难所的建设上往往面临避难空间不足而避难需求过多的供需不平衡的状况, 以及避难所位置与容量的空间布局不合理的问题。因此, 在避难所布局优化问题的实际应用中, 多目标模型在高维复杂问题中的空间搜索能力面临着极大的挑战。具体体现为: 有较多行政村最近的避难所容量已满, 需要进行相对远距离调整。而在严格的约束条件下行政村重新分配路线又相互制约, 普通的优化算法极易使多目标模型陷入局部优解。故本文使用赵秀娟等^[19]提出的加入模

拟退火的改进粒子群算法对文昌市的灾害避难所进行布局优化分析。

图3和图4分别展示了多目标模型在有无容量约束条件下得到的全部非劣解方案及其目标函数结果的行政村平均值。图3中每一个圆圈都代表一个分配方案, 多目标模型在有无容量约束下共得到16个和40个非劣解选址分配方案, 在这些方案中, 随着所有行政村平均疏散距离的减少, 平均避难面积逐渐增加。如果资金充裕, 希望能最大程度提供避难条件时, 决策者应选择疏散距离最短的方案。此外, 受资金限制, 决策者可根据实际可管理的避难所面积情况, 找到图3中对应的方案。

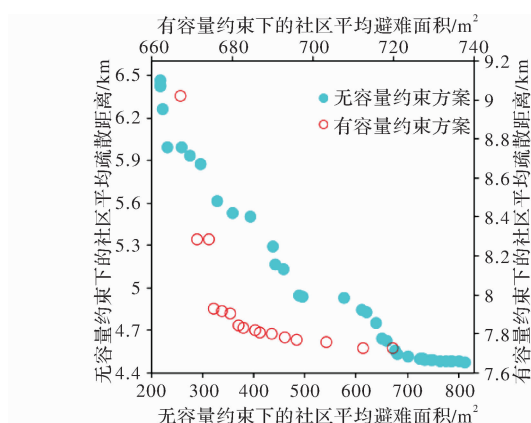


图3 多目标模型得到的所有非劣解方案

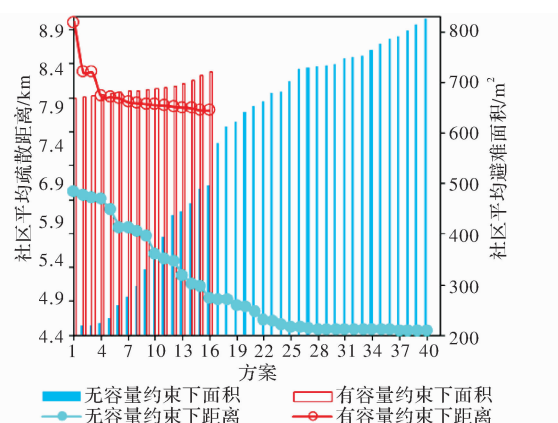


图4 多目标模型得到的所有非劣解方案的目标函数的平均值

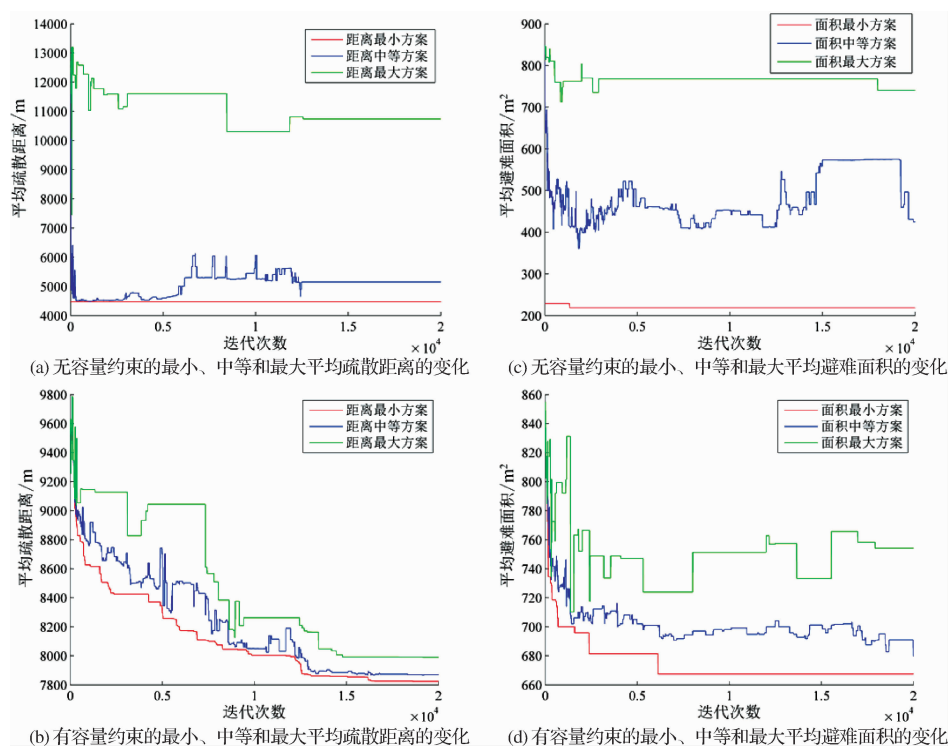


图5 多目标模型的平均疏散距离与平均避难面积随迭代次数的变化

表 2 文昌市灾害避难所多目标模型的区位优化结果

参数名称	距离最短方案			面积最小方案		
	无容量约束	有容量约束	增减情况	无容量约束	有容量约束	增减情况
每个行政村平均疏散距离/m	4468.77	7719.72	增加	9747.59	9014.28	减少
每个行政村平均避难所面积/m ²	826.58	720.14	减少	218.52	667.5	增加
被选中的避难所总数/个	49	30	减少	21	25	增加
单个避难所平均服务的行政村数量/个	4.94	8.1	增加	11.57	9.64	减少

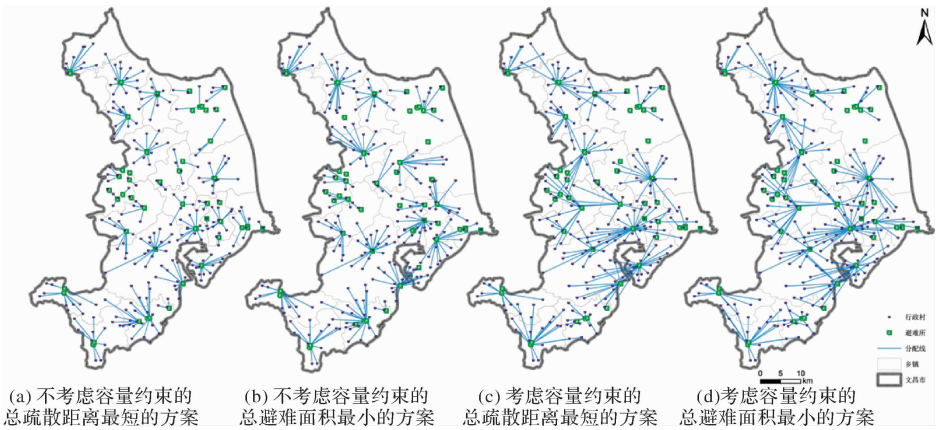


图 6 文昌市多目标空间分配结果

图 5 展示了多目标模型的两个目标函数值随迭代次数的变化。分别图示了无/有容量约束下疏散方案中最小、中等和最大的行政村平均疏散距离(图 5a 和图 5b)与行政村平均避难面积(图 5c 和图 5d)的变化。针对本文实际案例的高维复杂问题,算法在 2 万次左右收敛到优解。

表 2 为多目标模型的总疏散距离最短方案与总避难所面积最小方案在有无容量约束下的区位优化结果。距离和面积作为两个竞争性目标,在分配方案中表现为距离短则面积大。无容量约束时,行政村平均最短疏散距离为 4 468.77 m;最小避难所面积为 218.52 m²;243 个居民点分别被分配到 49 个和 21 个避难所中,单个避难所平均服务 4.94 个和 11.57 个居民点。有容量约束时,结果发生很大变化:对于距离最短的方案,每个行政村的平均疏散距离增加为无容量约束的 1.73 倍,对应的平均避难所面积降低了 12.88%,选中的避难所个数减少了 19 个,单个避难所平均服务的行政村数量增加了 1.64 倍;对于面积最小的方案,每个行政村的平均避难所面积增加为无容量约束下的 3.05 倍,对应的平均疏散距离降低了 7.52%,选中的避难所个数增加了 4 个,单个避难所平均服务的行政村数量减少了 16.68%。

图 6a 和图 6b 为多目标模型中不考虑容量约束的总疏散距离最短和总避难所面积最小方案的空间分配结果。图 6a 意味着所有居民点疏散到距其最近的避难所,不管其是否能够容纳下。其不受

容量约束和距离约束的影响,解算简单,空间分配图上无交叉。图 6b 为在最大疏散距离的约束下,寻找到的总避难所面积最小的解,最终选择了容量较小的 21 个避难所,平均每个行政村的避难面积仅为 218.52 m²,空间上呈现集中群簇状分配。可见,距离约束对结果起到了至关重要的宏观把控的作用。

图 6c 和图 6d 分别为考虑容量约束后的总疏散距离最短和总避难所面积最小的空间分配结果。文昌市居民点众多,多数应急避难场所面积较小,如表 1 中东路镇的 8 个避难所的平均容量仅为 262.5 m²。导致较多居民点最近的避难所容量已满,需要进行相对远距离调整。而在多目标模型严格的约束条件下居民点的调整又相互制约,最终导致解算耗时较长,且在空间分配图上出现了部分交叉。在发生交叉的这些区域以及需要跨镇避难的区域,应考虑扩大自身乡镇的避难所容量,保证最大程度的提供避难条件。与无容量约束距离最短的空间分配结果相比交叉较多。可见,容量约束严重影响着结果的局部调整,成为制约多目标模型及其算法在高维复杂问题中的空间搜索能力和提高解的质量的主要因素。

4 结论和讨论

本文以最小化避难需求人口到避难所的总疏散距离和避难所总面积为目标,在满足安全约束、

距离约束和容量约束的条件下,建立了地震灾害避难所选址多目标模型,并采用改进的粒子群算法求解模型。以海南省文昌市为例进行了实证分析,发现距离约束对结果起到了至关重要的宏观把控的作用,容量约束则会显著影响多目标模型及其算法在高维复杂问题中的空间搜索能力和解的质量。

文昌市居民点众多,多数应急避难场所面积较小且空间分布不均。较多居民点最近的避难所容量已满,需要进行相对远距离调整。而在多目标模型严格的容量约束下居民点的调整又相互制约,最终导致解算耗时较长,且在空间分配图上出现了部分交叉。在发生交叉的这些区域以及需要跨镇避难的区域,应考虑扩大自身乡镇的避难所容量,保证最大程度的提供避难条件。

国内在灾害避难所的建设上往往面临避难空间不足而避难需求过多的供需不平衡的状况,以及避难所位置与容量的空间布局不合理的问题。因此,在避难所布局优化问题的实际应用中,多目标模型及其算法在高维复杂问题中的空间搜索能力面临着极大的挑战。本文构建的多目标模型假设每个行政村的居民作为一个整体进行疏散,实际情况则较为复杂。在以后的研究中,可以考虑将居民点拆分为不同的小组、家庭或者个人。这种方法理论上可以明显改善解的质量,但无疑增加了选址问题的维度。而针对大区域的高维问题或者复杂问题时,会面临解算难度大、耗时长、易陷入局部优解等问题,这是目前的优化算法不能攻克的难题。其多基于小区域的说明性问题,导致现有的模型也缺乏对高维复杂问题的研究。因此,在优化算法攻克高维复杂问题受阻的背景下,改进灾害避难所选址优化模型为提高解算优度提供了另一条途径。如基于非合作博弈的双层模型等,旨在降低选址问题的维度和复杂度,提高解算效率和准确度。

参考文献:

- [1] Toregas C, Swain R, Reville C, et al. The location of emergency service facilities[J]. *Operations Research*, 1971, 19(2): 93-95.
- [2] 钱洪伟,尹香菊,金英淑.地震应急避难场所灾时运营中弱势群体救助管理技术体系研究[J]. *灾害学*, 2016, 31(2): 164-170.
- [3] 钱洪伟.城市应急避难场所灾时运营研究进展与展望[J]. *灾害学*, 2017, 32(1): 160-165.
- [4] HU F, XU W, Li X. A modified particle swarm optimization algorithm for optimal allocation of earthquake emergency shelters[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2012, 26(9): 1643-1666.
- [5] 陈志芬,顾林生,陈晋,等.城市应急避难场所层次布局研究(I)-层次性分析[J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(3): 151-155.
- [6] 陈志芬,李强,陈晋.城市应急避难场所层次布局研究(II)-三级层次选址模型[J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(5): 13-19.
- [7] Sherali H D, Carter T B, Hobeika A G. A location-allocation model and algorithm for evacuation planning under hurricane/flood conditions[J]. *Transportation Research Part B Methodological*, 1991, 25(6): 439-452.
- [8] Dalal J, Mohapatra P K, Mitra G C. Locating cyclone shelters: a case[J]. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 2007, 16(2): 235-244.
- [9] Pan A. The applications of maximal covering model in Typhoon Emergency shelter Location Problem[R]. *IEEE*, 2010.
- [10] YE M, WANG J, HUANG J, et al. Methodology and its application for community-scale evacuation planning against earthquake disaster[J]. *Natural hazards*, 2012, 61(3): 881-892.
- [11] HUANG B, LIU N, Chandramouli M. A GIS supported Ant algorithm for the linear feature covering problem with distance constraints[J]. *Decision Support Systems*, 2006, 42(2): 1063-1075.
- [12] Al? ada Almeida L, Tralhao L, Santos L, et al. A multiobjective approach to locate emergency shelters and identify evacuation routes in urban areas[J]. *Geographical analysis*, 2009, 41(1): 9-29.
- [13] Saadatseresht M, Mansourian A, Taleai M. Evacuation planning using multiobjective evolutionary optimization approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 198(1): 305-314.
- [14] Doerner K F, Gutjahr W J, Nolz P C. Multi-criteria location planning for public facilities in tsunami-prone coastal areas[J]. *Or Spectrum*, 2009, 31(3): 651-678.
- [15] Barzinpour F, Esmaili V. A multi-objective relief chain location distribution model for urban disaster management[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 70(5-8): 1291-1302.
- [16] Rodríguez-Espíndola O, Gaytán J. Scenario-based preparedness plan for floods[J]. *Natural Hazards*, 2015, 76(2): 1241-1262.
- [17] 郭子雪,王兰英,齐美然,等.基于区间数信息的区域应急物资储备库选址多目标决策模型[J]. *灾害学*, 2015, 30(2): 148-151.
- [18] HU F, YANG S, XU W. A non-dominated sorting genetic algorithm for the location and districting planning of earthquake shelters[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014, 28(7): 1482-1501.
- [19] ZHAO X, XU W, MA Y, et al. Scenario-Based Multi-Objective Optimum Allocation Model for Earthquake Emergency Shelters Using a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm: A Case Study in Chaoyang District, Beijing, China[J]. *PLOS ONE*, 2015, 10(12): e144455.
- [20] 赵来军,王珂,汪建.城市应急避难场所规划建设理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2014.

Multi-objective Location-allocation Model for Earthquake Emergency Shelters with Multiple Constraints: A Case Study in Wenchang of Hainan Province

MA Yunjia^{1, 2, 3}, ZHAO Xiujuan^{1, 2, 3}, QIN Lianjie^{1, 2, 3}, LIANG Pujun^{1, 2, 3},
ZHOU Hongjian⁴, YUAN Yi⁴ and XU Wei^{1, 2, 3}

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing 100875, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. National Disaster Reduction Center, Ministry of Civil Affairs, Beijing 100053, China)

Abstract: As an important task in urban planning and emergency management, the location-allocation planning of earthquake emergency shelters is a complicated geographic optimization problem that involves multiple sites, strict constraints, and a discrete feasible domain. A multi-objective model was developed for the allocation of residents to earthquake shelters using Wenchang of Hainan province, China as a case study. The two objectives of the multi-objective model were to minimize the total evacuation distance and to minimize the total area of all shelters with the constraints of shelter capacity and service radius. The modified particle swarm optimization algorithm was used to solve the model. The results showed that the distance constraint played a role of macro regulation and control in a multi-objective model; and the capacity constraint will significantly influence the space search ability and the solution quality of the target model and its algorithm in complex, high-dimensional problems. Schemes for optimizing location and residents' allocation to earthquake emergency shelters are proposed, which will provide support for emergency evacuation after disaster of Wenchang.

Key words: earthquake emergency shelters; location-allocation; multiple constraints; multi-objective model; Wenchang

(上接第 205 页)

Research on the Theory and Method of the Safety Culture Definition

WANG Bing and WU Chao

(School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: To have a clear comprehension about the theory and method of the safety culture definition, and a more appropriate and scientific safety culture definition is proposed, four elements model of the safety culture definition is constructed with grounded theory approach, as well as the logical expression and type numbers (120) of definition safety culture are concluded. Base on this, existing definitions safety culture are reasoned, and their disputes are explined. Meanwhile, the conceptual model of safety culture is constructed, and the new definition of safety culture is proposed under the guidance of safety culture. The results show that safety culture is the tangible and intangible safety outcomes about all kinds of relationships between human and nature, society or human in the process of human existence, that is created to maintain the safe (including healthy) survival and development of human.

Key words: safety culturology; safety culture definition; element; logical expression; conceptual model; new definition