

马运佳, 赵秀娟, 秦连杰, 等. 地震应急避难所选址单目标与层次模型对比研究——以山东省荣成市为例[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 189–194. [MA Yunjia, ZHAO Xiujuan, QIN Lianjie, et al. A Comparison of Single-objective and Bi-level Location-allocation Model for Earthquake Emergency Shelters with the Case of Rongcheng in Shandong[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 189–194. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.032.]

地震应急避难所选址单目标与层次模型对比研究 ——以山东省荣成市为例*

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: 以最小化总疏散距离为目标, 在同时满足距离约束和容量约束的条件下, 建立了地震灾害应急避难所选址单目标模型和考虑人口分流的层次模型。层次模型中, 上层考虑将行政村/社区居民疏散到距其最近的避难所, 下层考虑将溢出人口分配至有容量剩余的避难所。以山东省荣成市为例, 用改进的粒子群算法对构建的模型进行解算, 并进行了对比分析。结果表明: 单目标模型针对大区域的高维复杂问题, 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尚不能解决的难题。而层次模型可以降低高维复杂选址问题的维度和复杂度。

关键词: 地震应急; 灾害避难所; 高维复杂选址分配问题; 多约束; 单目标模型; 层次模型; 荣成市

中图分类号: X43; TU984; P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)04-0189-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.032

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]。国内外学者越来越倾向于从数学规划的角度去进行设施选址模型的建立与解算, 并结合灾害避难所选址问题的特点构建区位选择模型。按照目标类型, 灾害避难所的区位选择模型可分为单目标模型、层次模型和多目标模型^[4]。单目标模型分为 P-中值, P-中心和覆盖模型三大类。黄河潮等^[5], 用 P-中值法规划灾害避难所区位, 并设计遗传算法对其求解, 在理论上说明了它的可行性, 但没有考虑灾害避难所的容量限制, 且缺乏实例应用。周晓猛等^[6]考虑距离、疏散道路情况等因素, 建立了改进的城市避难所容量中值模型。潘安平^[7]综合考虑了乡村人口分布、人口密度、建筑物密度的特点, 结合乡村居民在应急疏散时的要求, 以 P-中值模型为基础, 建立乡村台风避难所选址模型并应用遗传算法进行解算。赵来军等^[8]建立容量中值模型,

考虑了人口随时间的变化及昼夜间的波动, 并将其应用于上海市黄浦区地震灾害避难所研究中。Sherali 等^[9]以最小化总疏散时间为目标建立飓风/洪水避难所 P-中值模型及道路疏散模型, 并用启发式算法求解, 确定了避难所最优区位及最优疏散路径。Bayram 等^[10]以最小化总疏散时间为目标构建 P-中值模型, 研究了 Istanbul 地震避难所布局及道路疏散问题, 并分析了避难所开放数量以及是否有容量约束等因素对结果的影响。

覆盖模型又可分为最大覆盖和集合覆盖模型。周天颖和简普仁^[11]在最大覆盖模型中加入第二距离, 建立备选区位选派模式, 以期为难民者在指定避难所无法使用时, 为难民人员提供其他选择, 并将其应用于台中市避难所布局研究中。Dalal 等^[12]选取容量约束和距离约束条件, 以最小化能够覆盖全部村庄的避难所数量为目标, 建立了基于乡村台风灾害的应急避难所集合覆盖模型, 并

* 收稿日期: 2017-03-01 修回日期: 2017-04-25

基金项目: 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); 国家科技支撑计划课题(2013BAK05B02)

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

采用聚类分析的方法进行了求解。Pan 等^[13]基于最大覆盖模型,增加容量约束并将其应用于台风灾害避难所选址研究中。Ye 等^[14]分析了上海浦东区陆家嘴街道地震避难所的容量及分配情况,以最大覆盖需求人口为目标重新确定各个避难所服务范围。

随着研究的深入,开始出现了层次避难所选址模型。目前层次模型主要有两种形态,一种是典型的双层模型,通常上层模型确定避难所区位,下层模型确定疏散路线。双层模型主要应用在飓风、洪水等灾害来临前的应急疏散,与交通模型相结合^[15-17]。如 Kongsomsaksakul 等^[15]模拟 strackelberg 博弈建立洪水灾前双层级模型,上层模型当权者确定避难所区位,下层模型避难人员选择避难所及避难路线。Ng 等^[18]提出了一个混合双行模型,用以平衡整个系统的总疏散时间最小化和个体疏散时间最小化的双重目标。Li 等^[17]提出一个基于情景的双层模型,上层模型是一个两阶段随机模型,第一阶段选择避难所区位,第二阶段根据飓风情景,确定需要开放的避难所;下层模型中,避难人员根据上层避难所开放结果做出反应,选择避难路线。初建宇等^[19]给出了一种基于改进集合覆盖问题和 P-中值问题的双层模型,以最小化避难所数量来确定避难所的数量及其区位,通过求取总疏散距离最小来划分选定场所的责任区范围。另一种层次模型通常根据避难所的服务等级进行分层,在各层中应用不同的模型选择避难所区位。陈志芬等^[20-21]研究了应急避难场所的层次结构在空间上表现出的单一流、嵌套和非空间一致性的特点,并建立了城市应急避难场所的三级层次选址模型;Widener 等^[22]按救济点提供物资的不同将其分为不同层次,认为最低层次救济点提供基础物资,最高层次救济点提供更多特殊物资,以最小化所有类型需求点到设施点距离为目标,以飓风灾害为例建立了层次容量中值模型,并将其应用于美国佛罗里达州飓风灾后救济点的区位分布。Li 等^[23]建立了包括准备阶段和响应阶段的双阶段随机模型,利用 L-型算法进行求解,并将其应用于美国墨西哥岸区的飓风灾害避难所布局研究中。此外,层次模型,尤其是双层模型及其变式还被应用到高维问题中,并体现了较大的优势^[17, 24]。为研究大规模突发事件的响应,Paul 等^[24]扩展了最大覆盖问题,建立了多目标层次模型,以期最大化人口覆盖同时最小化对现有设施的改造。

目前,大多数灾害避难所选址模型,多针对小区域简单问题运行调试,而针对大区域的

相互制约的复杂问题,居民在选择距其最近的避难所进行疏散时会有较多避难所内的避难人员溢出其容量限制,此时在满足严格的约束条件下的解算难度会大大提高,单目标模型易陷入局部优解,这是目前的优化算法不能攻克的难题^[17]。考虑人口分流的层次模型既符合居民的实际避难行为,又可以避免上述问题,具有较好的发展空间。

1 单目标模型

在应急疏散过程中,居民往往采取用户最优原则,选择距其最近或者熟悉的避难所。因此,在同时满足距离约束和容量约束的条件下,建立以最小化总疏散距离为目标的灾害避难所选址单目标模型。该模型假设同一行政村/社区的居民作为一个整体进行疏散,不能拆分为不同的家庭、小组或者个人。

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

Subject to

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

$$d_{ji} B_{ji} - D_j \leq 0, \forall i = 1, 2, \dots, N; \forall j = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N B_{ji} Y_i = 1, \forall j = 1, 2, \dots, M. \quad (4)$$

$$Y_i = \begin{cases} 1, & \text{候选场址 } i \text{ 被选为避难场;} \\ 0, & \text{候选场址 } i \text{ 未被选为避难场所。} \end{cases} \quad (5)$$

$$B_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{居民区 } j \text{ 选择候选场址 } i; \\ 0, & \text{居民区 } j \text{ 不选择候选场址 } i. \end{cases} \quad (6)$$

式中: I 是政府指定的避难场所的集合, $I = (1, 2, \dots, i, \dots, N)$, N 是避难所数量; J 是行政村/社区居民点的集合, $J = (1, 2, \dots, j, \dots, M)$, M 是行政村/社区居民点的数量; 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 , 即最小化总疏散距离。公式(2)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(3)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都小于最大疏散距离。公式(4)确保每个行政村/社区有且只能选择一个避难所。公式(5)和公式(6)为决策变量,只能取 0 和 1。

2 层次模型

在现实的疏散避难中,行政村/社区居民遵循用户最优原则,往往会选择距其最近或者熟悉的避难所,这势必导致部分避难所由于容量限制不能满足所有人口。为此,管理者必须将溢出避难所容量限制的避难人口(溢出人口)进行二次分流至仍有剩余容量的避难所。据此,构建避难所选址的层次模型。考虑到居民在现实避难活动中的行为,上层模型以最小化总疏散距离为目标,满足公式(3)所示的距离约束而无公式(2)所示的容量约束,得到行政村/社区居民到距其最近避难所的分配方案。下层模型目标仍为总距离最小,将上层模型解算出的超出容量限制的避难所作为待分配的居民点,居民点的避难需求人口即为溢出人口。下层模型同时满足公式(2)和公式(3)中的容量约束和距离约束。最终目标函数要使得居民点到各层避难所的总疏散距离最小。

$$f = \min \sum_{x=a}^b d_{ji}^x B_{ji}^x, \forall i = 1, 2, \dots, N^x; \forall j = 1, 2, \dots, M^x. \quad (7)$$

$$x = \begin{cases} a, & \text{上层;} \\ b, & \text{下层。} \end{cases} \quad (8)$$

其他变量和参数的设置与单目标模型相同。

3 研究区与数据

3.1 研究区

山东省荣成市隶属于威海市的县级市,位于山东半岛最东端,地处 37°10'N、122°29'E,三面环海,海岸线长达 500 km,与韩国、日本隔海相望(图 1)。陆地面积 1 526 km²,辖 12 个镇、10 个街道,826 个行政村,125 个居民委员会。2012 年末荣成市共有户数 242 195 户,户籍总人口约 67 万人^[25]。山东省民政厅统计,荣成市总人口达到 72.38 万人,截至 2016 年底全市已规划建设 215 个地震应急避难场所,面积 194.98 万 m²,可容纳 71.65 万人。

3.2 数据

将自然行政村/区的整体作为进行避难疏散的个体,并假设每个自然行政村/区的人口集中于其几何中心处。大部分地震灾害的案例表明,灾民的避难率基本为 30%^[8],为此本文中的避难需求人口设定为每个行政村/区总人口的 30%。

根据山东省荣成市民政局提供的数据,荣成

市灾害候选应急避难所共有 215 座,其中政府办公型 74 座,学校型 54 座,医院型 19 座,行政村/社区型 37 座,广场型 10 座,体育场 2 座,敬老院 4 座以及其他 15 座。荣成市的灾害避难所种类全数量多,容量从 41 人到 28 223 人不等,普遍偏小,85% 的避难所容量均在 1 000 m² 以下。

荣成市辖有 1 条国道,全长 9 480 m;省道 15 条,全长 28.08 万 m;县乡级道路 88 条,全长 33.59 万 m。并有二级街道 33 条,全长 8.44 万 m;三级街道 37 条,全长 7.30 万 m;四级街道 99 条,全长 11.80 万 m;小路 78 条,全长 23.32 万 m。荣成市灾害避难所及疏散道路空间分布,如图 2 所示。

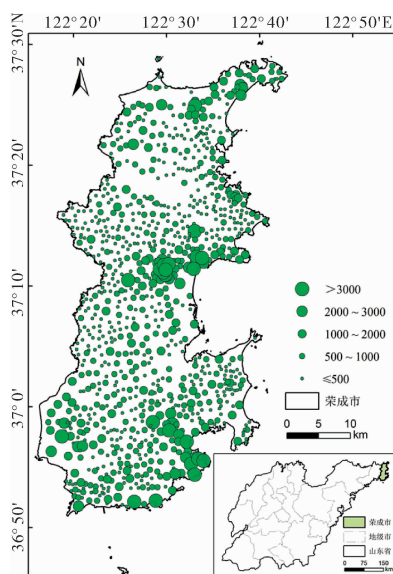


图 1 荣成市地理位置及人口分布

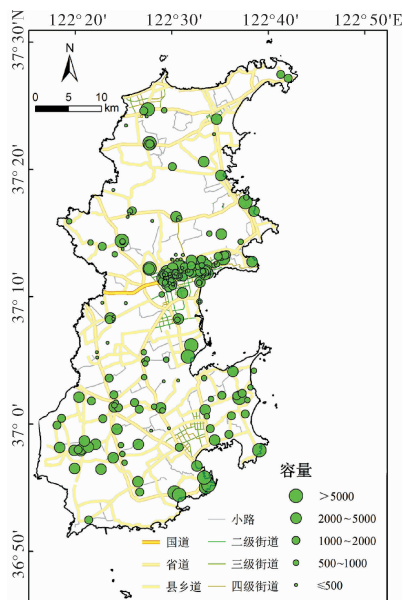


图 2 灾害避难所及疏散道路空间分布

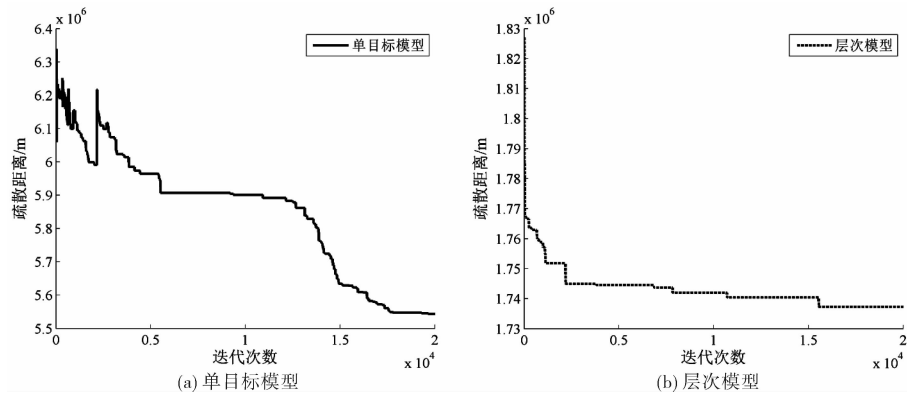


图3 目标函数值随迭代次数的变化

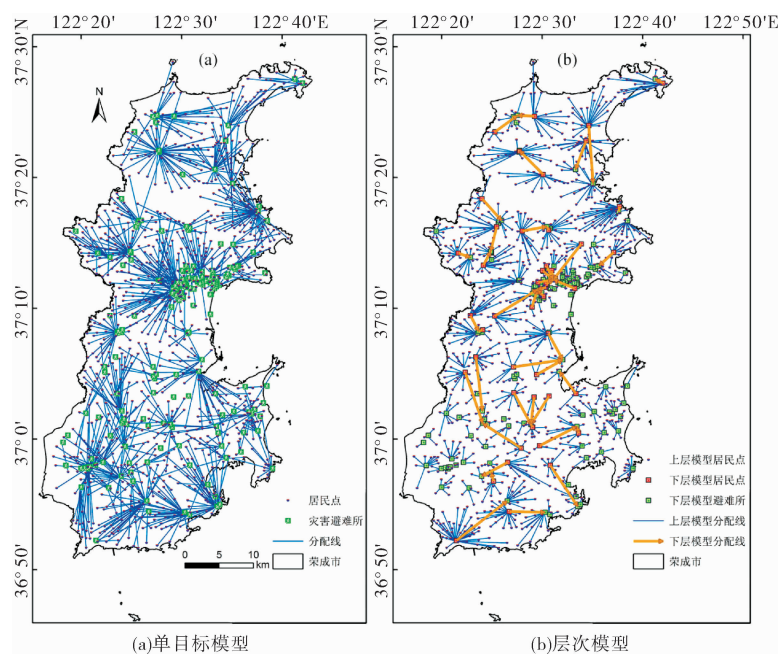


图4 荣成市灾害避难所分配方案

4 两种模型优化结果的对比

针对本文构建的灾害避难所选址优化的单目标模型和层次模型,使用赵秀娟等^[26]提出的改进粒子群算法对荣成市的灾害避难所进行优化选址分析。探究单目标模型和层次模型基于同一优化算法在高维复杂的实际问题中的空间搜索能力。

图3展示了目标函数值随迭代次数的变化。分别图示了单目标模型(图3a)和层次模型(图3b)中总疏散距离随迭代次数的变化。针对本文荣成市实际案例的高维复杂问题,取迭代次数为2万次。尽管使用了加入了模拟退火的改进优化算法,单目标模型仍旧收敛速度缓慢,很难收敛到一个平衡状态,且仍有继续收敛的趋势。因此,获得的解的质量较差。相比之下,层次模型的收敛结果(图3b)和空间分配结果(图4b)明显优于单目标模

型。不仅收敛速度快,收敛结果更优。相对于单目标模型,层次模型的总疏散距离降低至30%。

图4a和图4b分别为单目标模型和层次模型总疏散距离最短的空间分配方案结果。荣成市居民点众多,多数灾害避难所面积较小,有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。而在单目标模型严格的约束条件下居民点的调整又相互制约,最终导致解算耗时长、且陷入局部优解的问题。因此单目标模型在解决荣成市的复杂分配选址问题时,获得的解明显非最优解,在空间分配图上表现为大量的相互交叉线。

从图4b中可以看出,上层模型中,所有居民点疏散到最近的避难所。因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(蓝色分配线),但导致47个避难所在上层模型中发生人口溢出,需要在下层模型中将溢出人口分配至仍有容量剩余的其他避难所。下层模型的空间

分配图也未发生交叉(橘色分配线)。

灾害避难所单目标模型和层次模型总疏散距离最短的区位优势结果参数,如表1所示。层次模型在选择相对更少的避难所总面积和避难所总数下,行政村/社区平均疏散距离缩短为单目标模型的三分之一。单个避难所所需服务的平均行政村/社区数量也仅增加了0.37个。

表1 荣成灾害避难所单目标模型的区位优势结果

参数名称	单目标模型	层次模型
行政村/社区平均疏散距离/m	5737.2	1790.5
避难所总面积/m ²	583590	458640
被选中的避难所总数/个	198	184
单个避难所平均服务的行政村/社区数量/个	4.86	5.23

5 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为目标,在满足距离约束和容量约束的条件下,建立了灾害避难所选址单目标模型和层次模型,并采用改进的粒子群算法求解两种模型。以山东省荣成市为例进行了实证分析,通过对比分析发现:单目标模型在解决大区域的高维复杂问题时,出现了解算难度大、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。而本文构建的考虑人口分流的层次模型,显著降低了选址问题的维度和复杂度,提高了解算效率和准确度。

国内在灾害避难所的建设中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,因此,实际的避难所选址优化问题多表现为维度高且复杂。在此背景下,优化算法的空间搜索能力将面临极大的挑战,改进灾害避难所分配选址模型成为未来需要努力的方向。本文初步构建的考虑人口分流的层次模型,还不是很完善,在以后的研究中,可考虑将居民点拆分为不同的小组、家庭或者个人。同时,考虑灾害发生的不确定性、居民的避难意愿和避难行为、避难需求人口的时空动态性等,也将对进一步完善模型起着至关重要的作用。再者,构建兼顾管理者和社区居民利益诉求的双层多目标模型也将是未来方向之一。

致谢:感谢山东省民政厅提供荣成市灾害避难所、行政村/社区点位和人口等相关资料。

参考文献:

[1] Toregas C, Swain R, Revelle C, et al. The location of emergency

service facilities[J]. *Operations Research*, 1971, 19(2): 93-95.

- [2] 郑通彦,陈通,董曼.基于三维软件平台的地震应急桌面演练应用研究[J].*灾害学*,2015,30(3):176-182.
- [3] 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.
- [4] 徐伟,胡馥好,明晓东,等.自然灾害避难所区位布局研究进展[J].*灾害学*,2013,28(4):143-151.
- [5] 黄河潮,林鹏,卢兆明.p-中位数法在城市应急避难所规划中的应用[C]//中国灾害防御协会——风险分析专业委员会第一届年会论文集,北京,2004.
- [6] 周晓猛,刘茂,王阳.紧急避难场所优化布局理论研究[J].*安全与环境学报*,2006,6(7):118-121.
- [7] 潘安平.沿海农村台风灾害区“避难所”优化布局理论与实践研究:以浙江为例[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Bayram V, Tansel B, Yaman H. Compromising system and user interests in shelter location and evacuation planning[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2015, 72: 146-163.
- [11] 周天颖,简甫任.紧急避难场所区位决策支持系统建立之研究[J].*水土保持研究*,2001,8(1):17-24.
- [12] 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.
- [13] PAN A. The applications of maximal covering model in typhoon emergency shelter location problem[R]. *IEEE*, 2010.
- [14] 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.
- [15] Kongsomsaksakul S, YANG C, CHEN A. Shelter location-allocation model for flood evacuation planning[J]. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 2005, 6: 4237-4252.
- [16] CHANG M S, TSENG Y L, CHEN J W. A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty[J]. *Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review*, 2007, 43(6): 737-754.
- [17] 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.
- [18] Ng M W, Park J, Waller S T. A Hybrid Bilevel model for the optimal shelter assignment in emergency evacuations[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2010, 25(8): 547-556.
- [19] 初建宇,梁建文,苏幼坡,等.防灾避难场所布局优化与责任区划分方法[J].*世界地震工程*,2015,31(001):89-96.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Widener M J, Horner M W. A hierarchical approach to modeling hurricane disaster relief goods distribution[J]. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(4): 821–828.
- [23] LI L, JIN M, ZHANG L. Sheltering network planning and management with a case in the Gulf Coast region[J]. *International Journal of Production Economics*, 2011, 131(2): 431–440.
- [24] Paul N R, Lunday B J, Nurre S G. A multiobjective, maximal conditional covering location problem applied to the relocation of hierarchical emergency response facilities[J]. *Omega*, 2017, 66: 147–158.
- [25] 公安部. 中华人民共和国全国分县市人口统计资料[R]. 北京: 群众出版社, 2012.
- [26] 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): 1–16.

A Comparison of Single-objective and Bi-level Location-allocation Model for Earthquake Emergency Shelters with the Case of Rongcheng in Shandong

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: In this study, an single-objective and a bi-level models were developed and compared for the allocation of residents to earthquake shelters with the case of Rongcheng of Shandong province, China. The objective of the two models was to minimize the total evacuation distance with the constraints of shelter capacity and service radius. The upper level model used to allocate the evacuee to their nearest shelters; the lower level model used to re-allocate the evacuee whose shelter had exceeded the capacity. The modified particle swarm optimization algorithm was used to solve the two models. And the comparison of solutions in these models was carried out. The results showed that the optimization algorithm has difficulty coping with a complex, high-dimensional problem, and it is time-consuming and tends to become trapped in local suboptimal solutions when applied to the single-objective model. By contrast, the bilevel model shows more desirable performance because it significantly reduces the dimensionality of the location-allocation problem based on a two-step-to-reach approach.

Key words: earthquake emergency shelters; location-allocation; single-objective model; hierarchical model; Rongcheng