

刘朝峰, 杜金泽, 张嘉鑫, 等. 基于 RAGA-PP 模型的城市应急避难场所适宜性分析[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 80-84.
[LIU Chaofeng, DU Jinze, ZHANG Jiaxin, et al. Analysis of the Suitability of Urban Emergency Shelter Based on RAGA-PP Model [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 80-84. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.02.016.]

基于 RAGA-PP 模型的城市应急避难场所适宜性分析*

刘朝峰¹, 杜金泽¹, 张嘉鑫¹, 王志涛²

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 北京工业大学 抗震减灾研究所, 北京 100124)

摘 要: 为定量评价城市应急避难场所的防灾适宜性, 从有效性、可达性、安全性 3 个方面构建避难场所适宜性评价指标体系, 针对服务有效性指标进行距离非线性衰减变换处理, 并采用实数编码加速遗传算法(RAGA)优化投影寻踪(PP)模型, 分析不同地震影响下应急避难场所的适宜性。结果表明: 不同地震烈度下, 避难场所的适宜性投影值降低, 划分到不同适宜性等级的避难场所数量变化不大; 1、19#避难场所为极适宜场所, 26、33、34#避难场所为不适宜场所; 对于该城市的避难场所, 场地地形坡度、步行可达性、可容纳人数、淹没深度对其适宜性的影响较大。

关键词: 应急避难场所; 适宜性评估; 可达性; 地震烈度; 投影寻踪

中图分类号: TU984.11; P315; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)02-0080-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.02.016

城市应急避难场所作为灾民安置与救助的重要载体, 是组成城市防灾减灾功能结构的重要元素, 其科学合理的规划建设是城市综合防灾减灾的重要措施之一^[1]。目前, 我国多数城市已建设了大量的应急避难场所, 它们在避震减灾方面发挥着重大的作用。然而, 在城市快速发展的背景下, 城市人口分布持续变化, 基础设施不断更新, 各类灾害危险急剧增加, 使得既有的或规划的应急避难场所不能适应各类灾害下应急疏散需求^[2]。因此, 急需从综合防灾适宜性角度对现有应急避难所的合理性、有效性及避难所本身安全问题等进行综合评价。

应急避难场所适宜性评价主要涉及评价指标体系和评价方法两方面。国内外学者主要从场所有效性、安全性、可达性等方面进行适宜性分析, 主要涉及场所内部服务能力指标^[3-4]、周边危险源环境指标^[3, 5]、与应急保障设施关联指标^[5-6]等某一方面的研究, 缺乏考虑多种灾害、较系统的评价指标体系, 但这些方面的研究可为评价指标体系构建提供基础依据。在适宜性评价方法方面主要集中于运用模糊集值^[7]、物元可拓模型^[3]、层次分析法^[8]、灰色关联分析^[5]、TOPSIS^[9]及 ArcGIS 空间分析^[5]等进行应急避难场所的静态综合评

价, 较少考虑灾害强度对可达性指标随距离非线性衰减的影响, 这些方法都需先确定评估指标权重, 指标权重不随指标数据结构而变化。因此, 本文在总结和分析已有研究成果的基础上, 从综合防灾适宜性角度构建应急避难场所适宜性评价指标体系, 考虑不同灾害强度下可达性指标随距离的衰减效应, 运用加速遗传优化投影寻踪方法对城市应急避难场所的适宜性进行评价分析, 为应急避难场所的布局、改造规划提供科学依据。

1 适宜性评价指标选取与量化

根据国内外相关文献及标准^[3-11], 应急避难场所评估包括有效性、安全性、可达性 3 方面准则。有效性反映应急避难场所的区位供给服务能力; 安全性反映潜在威胁对场所或避难人员的影响; 可达性反映避难场所与应急指挥、保障设施及避难需求点的便捷性。在已有研究的基础上, 以安全性、有效性、可达性为准则, 构建应急避难场所适宜性评价的指标体系(表 1), 并结合避难场所、人口、地形、设施分布等数据, 用 ArcGIS 空间分析获取指标的量化值。

* 收稿日期: 2019-08-12 修回日期: 2019-09-30

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2019EEEVL0501); 国家自然科学基金项目(51678017, 51908025); 河北省自然科学基金项目(E2019202470); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2018094)

第一作者简介: 刘朝峰(1984-), 男, 河北晋州人, 博士, 副教授, 主要从事城市与基础设施防灾减灾方面研究。

E-mail: liucf8403@hebut.edu.cn

通讯作者: 王志涛(1980-), 男, 河北任丘人, 博士, 副教授, 主要从事城市避震疏散规划方面研究。E-mail: ieeewzt@163.com

表 1 适宜性评价指标及说明

准则层	指标层	指标解释	类别
有效性 A	可容纳人数 A1/人	有效避难面积/人均需求面积	正
	开放空间比 A2	有效避难面积/场所占地面积	正
可达性 B	与最近医院距离 B1/km	到最近二级以上医院的路径	负
	与消防站最近距离 B2/km	到最近消防站的路径	负
	与最近安全水源距离 B3/km	到最近江河、水库等的路径	负
	与最近指挥机构距离 B4/km	到最近公安局、派出所的路径	负
	与最近商业服务区距离 B5/km	到大型超市、购物中心的路径	负
安全性 C	步行可达性 B6/人	服务范围内覆盖人口数	正
	与易燃易爆仓储点距离 C1/km	与最近易燃易爆仓储点的路径	正
	场地坡度 C2/(°)	场所所在的地形坡度	负
	洪水淹没深度 C3/mm	100 年一遇洪涝淹没深度模拟值	负

表 2 部分应急避难场所适宜性评价指标数据

编号	有效性 A		可达性 B						安全性 C		
	A1/人	A2	B1/km	B2/km	B3/km	B4/km	B5/km	B6/人	C1/km	C2/(°)	C3/mm
1	47300	0.853	0.705	0.635	0.949	0.936	0.558	468816	0.132	0.1	0.1
2	65700	0.986	0.744	0.107	1.789	0.516	0.712	665580	0.484	4.0014	0.1
3	27440	0.699	1.691	2.348	0.342	0.669	1.04	175545	0.552	0.1	0.1
...
34	1280	0.149	3.655	6.77	3.527	1.403	1.813	13605	0.372	2.0488	19.81
35	20120	0.389	2.881	3.759	1.209	1.991	0.93	94749	0.525	5.2113	0.1
36	1200	0.059	1.47	1.139	0.465	1.95	2.447	81477	2.136	4.7055	0.1

另外, 随着地震烈度增大, 空间距离指标(与医院、消防、水源、指挥机构、商业服务区的距离等)服务的有效性随距离呈非线性衰减特征^[5], 幂律形式的空间衰减函数能够刻画其特征^[12], 距离变换公式如下:

$$f(d) = d^{-\beta}, d' = d/f(d). \quad (1)$$

式中: d 为距离, d' 为变换后的距离, β 为距离衰减系数, 取值在 1.0~2.0 之间^[13], 值越大衰减效应越强。设定 VII 度地震烈度对应的衰减系数为 1.0, VIII 度地震烈度对应的衰减系数为 1.5, IX 度地震烈度对应的衰减系数为 2.0。

2 加速遗传优化投影寻踪模型

投影寻踪法是基于样本数据驱动的, 处理非线性、非正态等高维数据的方法, 能将高维数据投影到低维子空间, 并基于最大化投影目标函数确定最佳投影方向, 获得高维数据的结构特征^[14]。应用投影寻踪方法对应急避难场所适宜性进行评估, 建立基于投影寻踪的应急避难场所适宜性评估模型, 具体建模过程如下。

Step1: 评估指标无量纲化。设评估指标集为 $\{x^*(i, j) | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m\}$, 其中 $x^*(i, j)$ 为第 i 个避难场所的第 j 个指标值, n 和 m 分别为待评价避难场所的个数和评估指标的数目。为消除各指标值的量纲差异和统一各指标

值的变化范围, 对各指标进行归一化处理:

对于越大越优的指标:

$$x(i, j) = \frac{x^*(i, j)}{x_{\max}^*(j)}. \quad (2)$$

对于越小越优的指标:

$$x(i, j) = \frac{x_{\min}^*(j)}{x^*(i, j)}. \quad (3)$$

式中: x_{\max}^* , x_{\min}^* 分别为第 j 个指标的最大和最小值, $x(i, j)$ 为评估指标归一化值。

Step2: 构造投影指标函数。将避难场所的指标投影到一维空间, 得到反映避难场所适宜性的投影值, 该投影值可认为是其适宜性的量化值。在投影时, 投影值散布为局部投影点尽可能密集, 凝聚成若干个团, 各个团间尽可能散开。将 m 维数据 $\{x(i, j) | j=1, 2, \dots, m\}$ 以 $a = \{a(1), a(2), \dots, a(m)\}$ 为投影方向的一维投影值 $z(i)$ 为:

$$z(i) = \sum_{j=1}^m a(j)x(i, j). \quad (4)$$

设 $S(a)$ 为投影值的标准差, $D(a)$ 为投影值的局部密度, 则投影指标函数为:

$$Q(a) = S(a) \cdot D(a); \quad (5)$$

$$S(a) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z(i) - E(z)]^2}{n-1}}; \quad (6)$$

$$D(a) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (R - r_{ik})f(R - r_{ik}). \quad (7)$$

式中: $E(z)$ 为投影值 $\{z(i) | i=1, 2, \dots, n\}$ 的均

值; R 为局部密度的窗口半径, 通常取 $0.1S(a)$; $r_{ik} = |z(i) - z(k)|$, $k=1, 2, \dots, n$, 表示样本之间的距离; $f(R - r_{ik})$ 为: 单位阶跃函数, 当 $R - r_{ik} \geq 0$ 时, 值为 1, $R - r_{ik} < 0$ 时, 值为 0。

Step3: 优化投影指标函数, 确定最优投影方向。 $Q(a)$ 与投影方向 a 有关, 当 $Q(a)$ 取最大时的 a 方向是最能反映多维数据结构特征的方向。因此, 搜寻最佳投影方向转化为非线性最优求解问题, 即:

$$\begin{cases} \max Q(a); \\ \text{s. t. } \| a \| = 1. \end{cases} \quad (8)$$

采用实数编码的加速遗传算法 (RAGA) 进行高维全局寻优^[15], 获得最佳投影方向。

Step4: 得到最佳投影方向后, 带入式(4)计算无量化处理的待评价避难场所的投影特征值 $z(i)$ 。根据投影值 $z(i)$ 的大小进行避难场所适宜性分析与分级。

3 实证研究

3.1 研究区概况及数据提取

以某沿海城市的中心城区为研究区域, 该市城市规模巨大, 人口分布密集, 常年受海洋和陆地多种灾害威胁, 主要包括风灾、暴雨、内涝、地震、火灾、化学事故等多种灾害事故。该市中心城区的抗震设防烈度为 VII 度。对已建 36 处避难场所进行适宜性评估, 以检验应急避难场所的防灾适宜性状况, 指导城市应急避难场所优化布局或改造。根据城市应急避难场所适宜性评估指标体系及其量化方法, 获取 36 处应急避难场所适宜性指标的基础数据(表 2)。

3.2 不同地震烈度下避难场所适宜性分析

(1) 不考虑距离衰减的避难场所适宜性分析

将表 1 中数据带入式(2)和式(3)进行无量化处理, 并带入式(4)~式(7), 得到投影指标函数, 采用实数编码加速遗传算法优化求解式(8), 得到最佳投影方向向量 a , 如图 1 所示。将 a 带入式(4)可得到各应急避难场所的投影值 $z(i)$, 如图 2 所示。

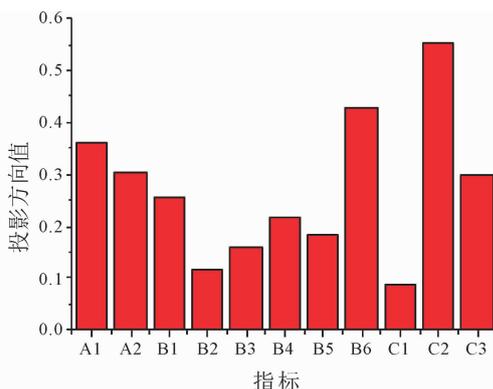


图 1 各评价指标的投影方向

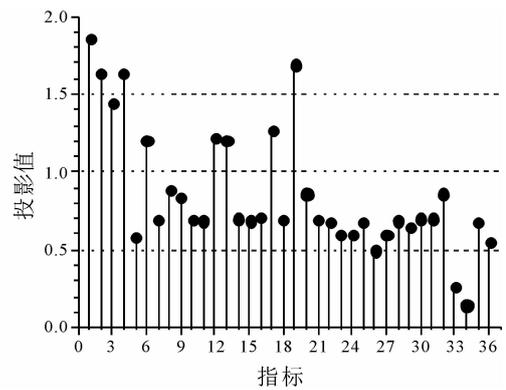


图 2 避难场所的投影值

最佳投影方向向量实质上反映了各评价指标对避难场所适宜性的影响程度, 其值越大, 影响越大。从图 1 可以看出, 指标 $C2$ 、 $B6$ 、 $A1$ 对避难场所的适宜性影响较大, 指标 $C1$ 、 $B2$ 对避难场所适宜性影响较小。根据避难场所投影值 $z(i)$ 大小排序特征, 将避难场所适宜性等级划分为四级: 极适宜($z(i) > 1.5$)、适宜($1.5 \geq z(i) > 1.0$)、较适宜($1.0 \geq z(i) > 0.5$)、不适宜($z(i) \leq 0.5$)。由图 2 可知, 1、2、4、19#避难场所为极适宜, 3、6、12、13、17#避难场所为适宜, 26、33、34#避难场所为不适宜, 其他避难场所为较适宜。为分析 33、34#不适宜避难场所的影响因素, 绘制 33、34#避难场所适宜性指标无量纲雷达图(图 3 和图 4)。

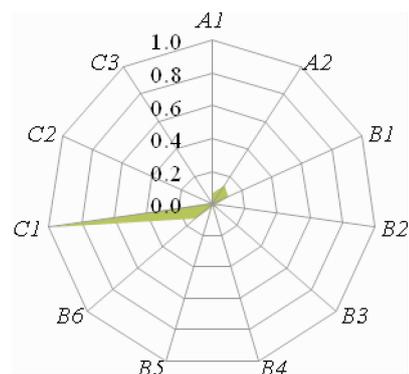


图 3 33#避难场所适宜性因子雷达图

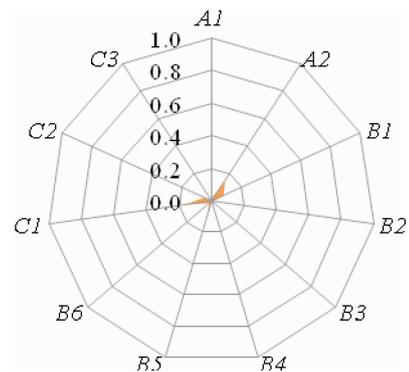


图 4 34#避难场所适宜性因子雷达图

图 3 显示 33#避难场所的 C1 防灾适宜性较好, 其他指标的防灾适宜性较小; 应全面改造该避难场所及其周边环境, 以提升该避难场所的综合适宜性。图 4 显示 34#避难场所的所有指标的防灾适宜性都较小, 改造避难场所及周边环境、设施布局等以提升该避难场所的综合适宜性; 或者另选其周边条件较好的场所作为固定避难场所。

(2) 考虑距离衰减的避难场所适宜性分析

当地震影响烈度为 VII 度时, 距离衰减系数 $\beta = 1.0$, 将表 1 中数据带入式 (1) 进行距离变换, 然后带入式 (2) 和式 (3) 进行无量化处理, 通过式 (4) ~ 式 (7) 得到投影指标函数, 采用实数编码加速遗传算法优化求解式 (8), 得到最佳投影方向向量 a , 如图 5 所示。将 a 带入式 (4) 得到应急避难场所的投影值 $z(i)$, 如图 6。

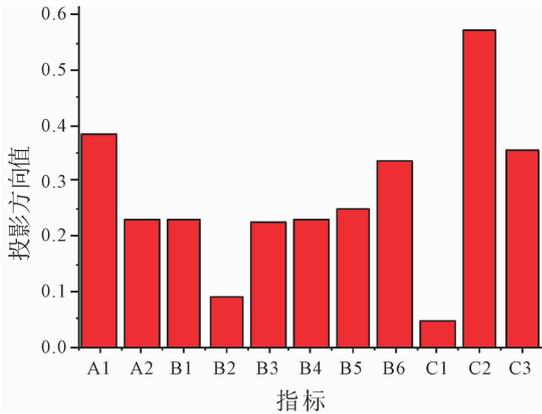


图 5 各评价指标的投影方向 (VII 度)

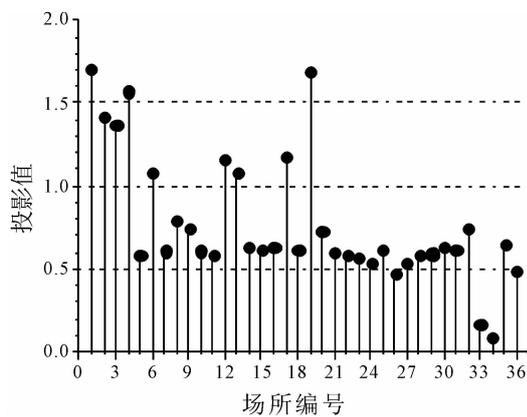


图 6 避难场所的投影值 (VII 度)

对比图 1 和图 5, 各指标的投影方向发生了变化, 指标 C2、A1、C3、B6 对适宜性影响较大, 指标 C1、B2 对适宜性影响较小。图 6 显示, 1、4、19#避难场所为极适宜, 2、3、6、12、13、17#避难场所为适宜, 26、33、34、36#避难场所为不适宜, 其他场所为较适宜。

当地震影响烈度为 VIII 度时, 距离衰减系数 $\beta = 1.5$, 根据上述过程, 可计算得到 VIII 度的指标最佳投影方向向量和各避难场所的投影值, (图 7 和图 8)。

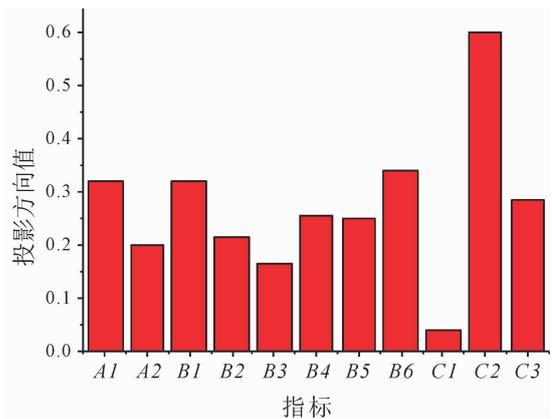


图 7 各评价指标的投影方向 (VIII 度)

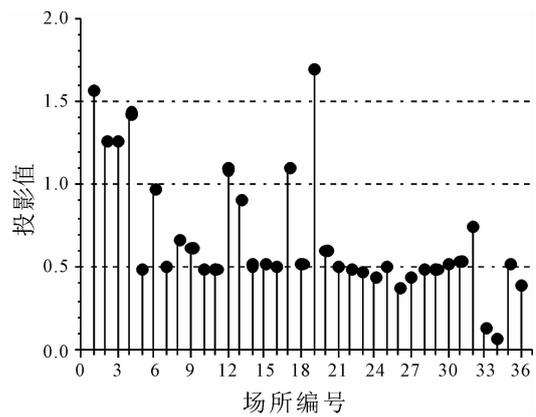


图 8 避难场所的投影值 (VIII 度)

图 5 和图 7 显示, 避难场所防灾适宜性指标中, 指标 C2 影响最大, 指标 C1 影响最小; 不同烈度下, 评估指标的影响发生较小的变化。图 8 显示, 1、19#避难场所为极适宜, 2、3、4、12、17#避难场所为适宜, 22、23、24、26、27、28、29、33、34、36#避难场所为不适宜, 其他场所为较适宜。鉴于上述情景分析, 比较常态下、VII 度地震影响、VIII 度地震影响三种情景的避难场所适宜性等级划分情况: 随着地震烈度增加, 极适宜避难场所个数逐渐减小, 不适宜避难场所逐渐增加 (图 9)。

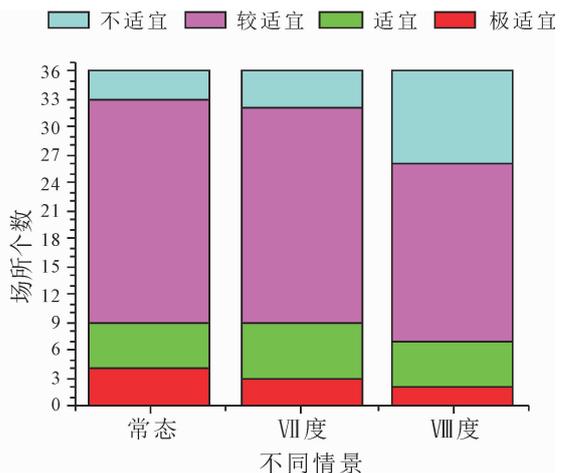


图 9 不同情境下避难场所适宜性分级

综上所述可知,随着地震烈度增加,城市应急避难场所的防灾适宜性逐渐降低,而避难场所的适宜性分级变化不大;在适宜性影响因子中,场地地形坡度(C2)、步行可达性(B6)、可容纳人数(A1)、淹没深度(C3)的影响较大。

4 结论

(1)以安全性、有效性、可达性为准则构建应急避难场所适宜性评价的指标体系,考虑服务有效性随距离衰减进行距离相关指标变换,建立城市应急避难场所适宜性评价的加速遗传优化投影寻踪模型。

(2)不同地震烈度影响下,城市应急避难场所的适宜性投影值降低,划分到不同适宜性等级的避难场所数量变化不大;1、19#避难场所为极适宜场所,26、33、34#避难场所为不适宜场所,应进行优化改造或者重新选址。利用最佳投影方向向量分析指标影响程度,场地地形坡度(C2)、步行可达性(B6)、可容纳人数(A1)、淹没深度(C3)的影响较大。

(3)下一步研究中将细化指标体系,将居民选择、疏散行为因素纳入指标体系,并且量化其不同地震影响下其避难需求、步行可达性等影响规律,精细化分析避难场所的防灾适宜性。

参考文献

[1] 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.

- [2] 乔鹏,马东辉,刘朝峰,等.灾变环境下的自适应城市避难疏散体系规划[J].建筑科学,2013,29(3): 91-98.
- [3] 陈鹏,张继权,张立峰,等.城市地震应急避难所适宜性综合评判物元可拓模型及实证研究[J].环境工程,2016,34(s1): 1132-1136.
- [4] 刘少丽,陆玉麒,顾小平,等.城市应急避难场所空间布局合理性研究[J].城市发展研究,2012,19(3): 113-117.
- [5] 周玉科,刘建文,梁娟珠.基于改进灰色关联的福州市避难所适宜性综合评价[J].地理与地理信息科学,2018,34(6): 63-70.
- [6] 黄雍华.基于GIS的上海市都市功能优化区应急避难场所适宜性评价与分析[D].上海:上海师范大学,2018.
- [7] 吴宗之,黄典剑,蔡嗣经,等.基于模糊集值理论的城市应急避难所应急适应能力评价方法研究[J].安全与环境学报,2005,5(6): 100-103.
- [8] 朱依蕊,黄达,游蕾晓,等.高校应急避难空间适宜性评价及优化研究——以福建农林大学为例[J].中国城市林业,2018,16(4): 58-62.
- [9] CHU J, SU Y. The application of TOPSIS method in selecting fixed seismic shelter for evacuation in cities [J]. Systems Engineering Procedia, 2012, (3): 391-397.
- [10] 周洪建,郭桂祯.台风灾害避难所服务区优化研究——以海南省万宁市为例[J].灾害学,2017,32(3): 40-44.
- [11] 防灾避难场所设计规范(GB 51143-2015)[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [12] 刘瑜,龚俐,童庆禧.空间交互作用中的距离影响及定量分析[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(3): 526-534.
- [13] KANG C, MA X, TONG D, et al. Intra-urban human mobility patterns: an urban morphology perspective [J]. Physica A Statistical Mechanics & Its Applications, 2012, 391(4): 1702-1717.
- [14] 付强,赵小勇.投影寻踪模型原理及其应用[M].北京:科学出版社,2006.
- [15] Sawyer B A, Adewumia O, Alim M. Real-coded genetic algorithm with uniform random local search [J]. Applied Mathematics & Computation, 2014, 228(228): 589-597.

Analysis of the Suitability of Urban Emergency Shelter Based on RAGA-PP Model

LIU Chaofeng¹, DU Jinze¹, ZHANG Jiixin¹ and WANG Zhitao²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Institute of Earthquake Resistances and Disaster Reduction, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: For quantitatively evaluating the suitability of urban emergency shelters, the suitability evaluation index system of urban emergency shelters is constructed from three aspects: effectiveness, accessibility and safety. The distance nonlinear attenuation transform is applied to service effectiveness index. Real coded accelerated genetic algorithm (RAGA) is used to optimize the projection pursuit (PP) model, and the suitability of emergency shelters under different earthquake effects is analyzed. The results indicated that the projection value of suitability of shelters decreased under different seismic intensification. There is little change in the number of shelters classified into different suitability levels. The suitability of Shelter 1 and 19 are the highest, while the suitability of Shelter 26, 33 and 34 are the lowest. The terrain slope, walking accessibility, number of people and submerged depth have a great impact on the suitability of shelters.

Key words: emergency shelter; suitability evaluation; accessibility; seismic intensity; projection pursuit