

黄扬飞.基于微粒群算法对城乡应急避难场所规划的研究[J].地震工程学报,2020,42(1):236-241.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.236

HUANG Yangfei.Planning of Urban and Rural Emergency Shelters Based on Particle Swarm Algorithm[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(1):236-241.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.236

# 基于微粒群算法对城乡应急避难场所规划的研究

黄扬飞

(浙江科技学院 土木与建筑工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:**地震是具有毁坏性的自然灾害,对于震后严重受损的地区,设计合理的应急避难场所是非常必要的,为此提出基于微粒群算法对城乡应急避难场所规划的研究。将退火算法的微粒群理论与城乡地区应急避难场所规划相结合,在约束条件较多的情况下,将应急避难场所视为一个粒子,对应急避难场所规划创建目标函数,从而实现对城乡住区应急避难场所的规模规划设计;其次设计应急场所的内容与位置模型,集合城乡需求点布局的影响因素,修建不同的应急场所设施点,并以覆盖全部需求点为目标,实现应急避难场所的整体规划。通过仿真实验证明,所提微粒群算法具有较好的规划效率,可保证规划后的城乡住区在受到地震侵害后,受灾人群有即时的可避难场所,为人们的震后生活提供帮助。

**关键词:**地震灾害;城乡住区;应急避难场所;微粒群算法

**中图分类号:** P315.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2020)01-0236-06

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.236

## Planning of Urban and Rural Emergency Shelters Based on Particle Swarm Algorithm

HUANG Yangfei

(School of Civil and Architectural Engineering, Zhejiang Institute of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

**Abstract:** Earthquakes are devastating natural disasters that necessitate the design of reasonable emergency shelters for areas likely to be severely damaged by earthquake. In this paper, we describe our use of a particle swarm optimization algorithm to study urban and rural emergency shelter planning. We combined the particle swarm optimization theory of the annealing algorithm with the planning of emergency shelters in urban and rural residential areas. In the case of many constraints, the emergency shelter is regarded as a particle, and the objective function is to plan emergency shelters, i.e., the scale planning and design of emergency shelters in urban and rural residential areas. Next, we designed a model of the content and location of the emergency sites, and identified the factors influencing the layout of urban and rural demand points. We then built different emergency shelter facility points. On this basis, we achieved the overall planning of e-

**收稿日期:** 2019-03-29

**基金项目:** 浙江省社科规划项目(15NDJC187YB)

**第一作者简介:** 黄扬飞(1978—),女,浙江东阳人,硕士,讲师,研究方向:城市规划与城市社会问题。

E-mail: zhangmeng19870730@163.com.

emergency shelters that provided coverage of all the demand points. The simulation results show that the proposed particle swarm algorithm has a good planning efficiency and can ensure that after urban and rural residential areas are damaged by earthquake, victims will have access to immediate shelter.

**Keywords:** earthquake disaster; urban and rural residual area; emergency shelter; particle swarm algorithm

## 0 引言

破坏性地震在我国时有发生,如 2008 年四川汶川地震,对当时的人们生命和财产造成了很大的损失。这次大地震对人们生活环境的重建、社会应急系统等相关工作都提出了严峻的考验,在这些工作中,对灾区进行应急避难场所的规划,是一项巨大的工程,在相关领导的带领下,设计人员和施工人员将城乡重新规划和修建,取得了令世界瞩目的恢复效率和效果,同时积累了大量的规划经验<sup>[1]</sup>。

震后应急避难场所规划汇集了大量国内外相关学者的技术和智慧,并积累了大量的实践经验。但是由于实际要求,规划时间不充分、任务量大,重点集中在受害人群的居住环境和城镇的基础设备问题上,在城乡空间的协调、统筹等方面难免会有缺失<sup>[2]</sup>。为此提出震后城乡应急避难场所规划分析,总结符合中国国土地理条件的应急避难场所规划技术,为震后灾区的应急避难场所的规划提供基础依据。

## 1 震后城乡居住区域应急避难场所规划分析

### 1.1 震后城乡居住区域应急避难场所规模规划

本文采用模拟退火算法与微粒群协同理论相结合的方法,对震后城乡居住区域应急避难场所规模进行规划设计,针对存在数据较多的空间规划单元和多目标等约束条件的情况下,提出较为合理的规划方案。

在发生地震灾害后,提供应急避难场所可以有效解决受灾群众的安置问题,其中应急避难场所的规模极为重要,合理的规划确定应急避难场所规模,可以保证其服务能力并避免资源浪费<sup>[3]</sup>。整体而言,应急避难场所应根据所确定的需要避难人员确定用地面积,并参考避难者在应急避难场所的自主生存与生活能力。因此,考虑应急避难场所的需求量可以有效帮助确定规模,主要从两个方面进行考虑,分别为个人有效避难面积以及所需安置的避难人口数量。

地震灾害发生后,应急避难场所提供安置疏散居民的功能。科学合理地确定应急避难场所的规

模,是提高应急避难场所服务能力,保证人民生命财产安全的基础。避难场所的用地规模应满足城市级和责任区级重要应急功能的用地要求与根据避难容量所确定的人员避难用地需求之和,根据场所提供的救援功能以及避难者在其中生存和生活所需的活动空间和基本条件来决定。应急避难场所需求量分析是确定场所规模的基础,主要包括两个方面:确定灾后需安置人口数量和人均有效避难面积。

(1) 灾后需安置人口数量:由于不同烈度的地震造成的建筑物损坏程度不同,因此准确计算所需疏散安置的受灾人口数量具有一定的难度。由此,使用模拟退火算法确定多目标安置人口下,所需安置的受灾人口数量。主要方法如下:

在确定灾后需要安置人口的数学模型之前,将待规划的震后地区进行划分,令其变成  $O$  行、 $P$  列的网格单元,则有  $O \times P$  个空间土地单元<sup>[4]</sup>。假设一共存在  $K$  中土地使用类型, $k$  表示单元  $(ij)$ , $k'$  表示空间使用类型  $(i'j')$ ,其中  $i=1, \dots, O; j=1, \dots, P; k=1, \dots, K; k'=1, \dots, K$ 。单元  $(i'j')$  归属于单元  $(ij)$  相邻区域的单元。

由于所需安置的人口目标较多,要确定灾后需安置人口数量,其最小值  $Z_{\min O, P}$  和最大值  $Z_{\max O, P}$  的目标函数表示为:

$$\begin{cases} Z_{\min O, P} = \text{Min} \sum_{i=1}^O \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^K P_{ijk} X_{ijk} \\ Z_{\max O, P} = \text{Max} \sum_{i=1}^O \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{i'=1}^O \sum_{j'=1}^P \sum_{k'=1}^K U_{ij, i'j'} V_{k'k} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $X$  表示网格交点位置, $U$  和  $V$  分别表示避难单元所需经费和人口生存与生活经费。其中,目标函数可以满足以下条件<sup>[5]</sup>:

1) 每个空间使用类型的总数要达到事先设定好的结构比例,则:

$$\sum_{i=1}^O \sum_{j=1}^P X_{ijk} = X_k, \forall k \quad (2)$$

2) 空间使用单元与土地单元相对应,则:

$$\sum_{k=1}^K X_{ijk} = 1, \forall ij \quad (3)$$

3) 假设  $m_{i_1 j_1 k, i_2 j_2 k}$  表示空间类型为  $k$  的两个单

元 $(i_1, j_1)$  和 $(i_2, j_2)$  之间曼哈顿距离, 则:

$$m_{i_1 j_1 k, i_2 j_2 k} = 1 \tag{4}$$

通过上述多个空间和约束条件可以得出, 震后避难场所规模规划中安置人口数量的问题, 是一个较为复杂的多目标规划设计问题<sup>[6]</sup>。本文采用基于退火算法的微粒群理论将规模规划方案视为优化目标, 将其看作一个粒子群, 对原始粒子群进行适当的评价, 并经过不断地更新, 将其适应度达到最合适为止, 由此利用以上模型公式确定规模规划中需要安置人口的数量范围。

$$Z_{ijk} = \text{Min} \left( \alpha \sum_{i=1}^O \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^K P_{ijk} X_{ijk} - \beta \sum_{i=1}^O \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{i'=1}^O \sum_{j'=1}^P \sum_{k'=1}^K X_{ijk} - \gamma \sum_{i=1}^O \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^K h_{ijk} X_{ijk} + R_1 W_{\text{dis}} + R_w W_{\text{dir}} \right) \tag{5}$$

式中: $h_{ijk}$  表示单元 $(ij)$  的相邻区域内单元数量, $R_1$  和 $R_2$  均表示带入到目标函数的惩罚值, $W_{\text{dis}}$  和 $W_{\text{dir}}$  均表示对空间距离进行约束的次数。

由此, 依据所需安置人口数量以及人均有效避难面积, 实现应急避难场所规模的规划设计。

1.2 震后应急场所的内容规划设计

震后城乡的应急避难场所应具有一定的基础设

(2) 人均有效避难面积: 地震烈度、各个受灾城市自身条件以及经济发展状况均不相同, 因此无法将人均有效避难面积统一规划, 也需要进行动态的规划控制。我国不同省市对应急避难场所的规划也不尽相同<sup>[7]</sup>, 由此, 结合《城市抗震防灾规划编制标准》(GB50413-2007), 为节约使用资源, 最小化设计人均有效避难面积<sup>[8]</sup>。

考虑避难单元所需经费及空间规划等方面要素, 对震后应急避难场所规划中的人均有效面积进行函数模型规划为:

施, 故应设立一定的建设标准, 参考现有的国内外应急避难场所建设标准, 城乡避难场所的配套设施规划有如下几个方面的内容: 应急医疗救护设施、应急物质供应处、应急疏散保障设施、应急指挥中心, 以及为保证救助及时的应急停机坪等<sup>[9-10]</sup>。具体的应急设施也应有明显的标识, 设立在比较空旷且引人注目的位置。部分应急设施内容的示意如图 1 所示。



图 1 部分应急设施内容示意图  
Fig.1 Diagram of some emergency facilities

1.3 震后应急场所的位置规划设计

对于震后应该创建固定的应急场所,为居民提供帮助的功能。该场所的选位应该具有布局公平性,满足创建场所达到最小化,并要求所有需求点全部覆盖,以此为目的,提出创建固定应急点的选位模型。

模型创建可分为两个阶段:

第一阶段,创建集合覆盖模型,令待规划区域内的设施最小化,并且同时能够覆盖该区域内所有的需求点;

第二阶段,在满足实施数量最小化,需求点覆盖最大化的要求下,运用中值问题模型<sup>[11-12]</sup>,对距离进行设置,将固定应急点和需求点之间的总成本降到最低。运用数学模型对其进行表示,模型具体为:

模型条件:

(1) 在进行创建应急点之前,需要了解固定应急点和需求点的详细位置,每个需求点与震后应急场所设施点之间有一定距离。

(2) 通过(1)得知需求点和固定应急点之间的具体距离,固定应急点的位置与需求点之间的距离就是实际道路的路径。

(3) 固定应急点不能覆盖两个以上的需求点,必须满足固定应急点只为一个需求点服务。

假设应急需求点集合和备选应急设施点集合分别表示为:

$$D = \{D_i \mid i = 1, 2, \dots, n\} \tag{6}$$

$$F = \{F_j \mid j = 1, 2, \dots, m\} \tag{7}$$

式中: $i$ 表示第*i*个需求点, $j$ 表示第*j*个应急设施点。

需求点*i*的备选应急设施集合表示为:

$$V_i = \{j \mid d_{ij} \leq r\} \tag{8}$$

式中: $r$ 表示固定应急点和需求点之间的实际距离最大值,固定震后应急场所最大服务范围的半径距离为 3 000 m, $d_{ij}$ 表示需求点*D<sub>i</sub>*与备选震后应急设施点*F<sub>j</sub>*之间的实际距离。

假设候选点*F<sub>j</sub>*被选为固定应急服务设施点,则  $x_j=1$ ,反之  $x_j=0$ ,那么目标函数(LSCP)的数学模型可以由下式表示:

$$LSCP: \text{Min} z = \sum_{j \in F} x_j \tag{9}$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in V_i} x_j \geq 1, \forall i \in D \tag{10}$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \forall j \in F \tag{11}$$

$$0 \leq d_{ij} \leq 3\,000 \tag{12}$$

目标函数式(9)是为将震后应急设施数量定为最小化;式(10)所示的约束条件是为了确定需求点都在固定应急点的辐射范围内;式(11)所示的约束条件是保证  $x_j$  为整数;式(12)所示的约束是保证需求点*i*

到应急点*j*的之间的距离在 3 000 m 范围内。

对模型进行修正,得出:

$$\text{Min} z = \sum_{j \in F} d_{ij} x_j \tag{13}$$

目标函数在经过调整后,以原来函数为基础添加距离成本,考虑到需求点全部覆盖和设施数量最小,同时还需要将总成本降低,将固定应急点到需求点的距离降到最低。

2 震后城乡应急避难场所规划效能分析

2.1 实验环境

运用 ArcGIS 软件,模拟城乡研究区范围内总面积为 295 km<sup>2</sup>,常住人口数量为 182.77 万人,利用 ArcEngine 程序实现迭代计算,依据本文方法分析确定所需安置的人口总数为 182.77 万人,结合人均有效面积进行计算,确定发生强震后应急避难场所下人均有效避难面积为 1 m<sup>2</sup>/人,所需安置人口为 83.79 万人。依据常住人口数量,确定不同区域的空间使用率,设置不同区域分别为 A~G(不考虑无人口居住区域),具体对应总体占地面积如表 1 所列,将数据格式转换后导入 ArcGIS 地理数据库要素集中,进行拓扑检查后,建立网络数据集。

表 1 研究区域概况

| Table 1 General situation of the study area |                     |        |
|---------------------------------------------|---------------------|--------|
| 区域                                          | 总面积/km <sup>2</sup> | 总人口/万人 |
| A                                           | 22                  | 29.5   |
| B                                           | 16                  | 30.82  |
| C                                           | 31                  | 34.93  |
| D                                           | 67                  | 21.12  |
| E                                           | 76                  | 58.99  |
| F                                           | 65                  | 4.18   |
| G                                           | 18                  | 3.23   |
| 合计                                          | 295                 | 182.77 |

2.2 评价指标

以服务面积比( $Z_1$ ,反应避难场所的空间服务范围)、人口比( $Z_2$ ,反应避难场所人口容量)、容量比( $Z_3$ ,反应避难场所的服务效率)以及重叠率( $Z_4$ ,反应避难场所公共设施的布局重叠性)状况作为 4 个评价震后城乡应急避难场所规划合理性的指标。不同指标的计算公式为:

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{S_1}{S_2} \\ Z_2 = \frac{R_1}{R_2} \\ Z_3 = \frac{G_1}{G_2} \\ Z_4 = \frac{C_1}{C_2} \end{cases} \tag{14}$$

式中： $S_1$ 、 $S_2$  分别为城乡内避难场所的范围总面积与研究区域总面积； $R_1$ 、 $R_2$  分别为避难场所范围内的人口数量和研究区域的人口总量； $G_1$ 、 $G_2$  分别为避难场所所需容纳的总人口数量与所设计避难场所的可容纳人口容量； $C_1$ 、 $C_2$  分别为每个避难场所与其他公共服务设施覆盖重叠部分的面积和两者（所有避难场所和所有公共服务设施）之和的

总面积。其中， $Z_4$  的值越高，则说明避难场所与原有公共服务设施之间的互补性较强，但是经济性较差。

2.3 实验结果

将本文规划的避难场所布局与统一标准《地震应急避难场所》GB 21734-2008 的规划效果进行对比，得到两者的实验结果如表 2、表 3 所列。

表 2 《地震应急避难场所》GB 21734-2008 的规划效果

Table 2 Planning effect of Emergency Shelter for Earthquake Disasters Site and Its Facilities GB21734-2008

| 区域 | 服务总面积/km <sup>2</sup> | 服务总人口/万人 | $Z_1/\%$ | $Z_2/\%$ | $Z_3/\%$ | $Z_4/\%$ |
|----|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| A  | 5.124                 | 0.35     | 23.29    | 1.19     | 125.61   | 0        |
| B  | 6.571                 | 0.37     | 41.07    | 1.20     | 137.5    | 2.27     |
| C  | 12.812                | 2.92     | 41.33    | 8.36     | 171.2    | 31.45    |
| D  | 18.506                | 1.82     | 27.62    | 8.62     | 109.2    | 7.06     |
| E  | 17.451                | 3.01     | 22.96    | 5.10     | 107.7    | 20.87    |
| F  | 25.326                | 1.26     | 38.96    | 30.14    | 104.3    | 0        |
| G  | 10.524                | 0.61     | 58.47    | 18.89    | 108.5    | 0        |
| 合计 | 96.314                | 10.34    | 32.65    | 5.66     | 99.68    | 61.65    |

表 3 本文方法的规划效果

Table 3 Planning effect of this method

| 区域 | 服务总面积/km <sup>2</sup> | 服务总人口/万人 | $Z_1/\%$ | $Z_2/\%$ | $Z_3/\%$ | $Z_4/\%$ |
|----|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| A  | 13.25                 | 19.35    | 60.23    | 65.59    | 105.40   | 24.35    |
| B  | 10.17                 | 23.24    | 63.56    | 75.41    | 108.32   | 67.06    |
| C  | 16.89                 | 26.32    | 54.48    | 75.35    | 96.24    | 19.51    |
| D  | 65.32                 | 20.46    | 97.49    | 96.88    | 87.57    | 4.40     |
| E  | 63.13                 | 49.27    | 83.07    | 83.52    | 89.46    | 4.93     |
| F  | 24.17                 | 3.56     | 37.18    | 85.17    | 79.98    | 2.72     |
| G  | 9.4                   | 2.21     | 52.22    | 68.42    | 87.63    | 12.08    |
| 合计 | 202.33                | 144.41   | 68.59    | 79.01    | 93.51    | 19.29    |

由表 2、表 3 中的数据可以看出，总体上服务面积比与服务人口比两者差距加大，该数据说明使用标准方法（优化规划前）的地震应急避难场所数量太少，无法满足该城乡的避难需求，而在使用本文规划方法后，均有明显的改善。而对比服务重叠率发现，优化规划前服务重叠率较高，反应避难场所与原有公共服务设施之间的互补性较强，但结合服务面积比与服务人口比后发现，其设计不够合理，经济效益差。但使用本文规划方法后，结果与之相反，均衡了基础设施状况与使用效率，更具有合理性和实际操作性。

着重分析表 3 发现，从各个区域的单独数据也可以看出，人口密度较大、人口数量多的区域即便在优化规划设计后，避难场所的人口容量仍需进一步完善，具有一定压力。且 A 和 B 区域的  $Z_3$  比值超过了 1，说明了所设计的容量无法完全容纳所有的避难人口，C 区域的  $Z_3$  比值在 95% 以上，虽有盈余，但也接近饱和，因此这几个区域还需要进一步探

讨优化规划方法。从服务重叠率角度考虑，其平均值在可接受范围内，说明其具有一定的经济性且与基础设施互补性较好，规划布局较为合理。

综上，关于地震后城乡的应急避难所规划方法，不可仅考虑“标准”，而应该考虑该地区的实际状况。但本文方法仍有不足之处需进一步研究完善。

3 结束语

针对震后城乡的应急避难所规划问题，本文提出基于微粒群算法对城乡应急避难场所规划的研究。应用微粒群理论与城乡应急避难场所规划相结合，将应急避难场所视为一个粒子，从避难所规模和避难所内容及位置两个方面进行具体分析研究，实现对经过地震后的城乡进行规划，并安置应急场所，以供为受灾人群提供保障的目的。最后实验证明，本文的城乡规划设计可以很好地为震后灾区人们提供帮助，有一定的实际意义，为震后城乡住区的应急避难所规划提供初步参考，但服务容量

比与服务重叠率方面仍有不足之处有待继续研究解决。

## 参考文献(References)

- [1] 田立朝,姜静,马燕云.虚拟仪器在核技术实验教学中的应用探索[J].大学物理,2017,36(9):44-48.  
TIAN Lichao,JIANG Jing,MA Yanyun.Study of the Application of Virtual Instrument in Nuclear Technology Experiment Teaching[J].College Physics,2017,36(9):44-48.
- [2] 沈非凡,宋执环,葛志强.多变量轨迹分析的过程故障检测方法[J].西安交通大学学报,2017,51(3):122-128.  
SHEN Feifan,SONG Zhihuan,GE Zhiqiang.Fault Detection Based on Multivariate Trajectory Analysis[J].Journal of Xi'an Jiaotong University,2017,51(3):122-128.
- [3] 李志林,刘启亮,唐建波.尺度驱动的空间聚类理论[J].测绘学报,2017,46(10):1534-1548.  
LI Zhilin,LIU Qiliang,TANG Jianbo.Towards a Scale-driven Theory for Spatial Clustering[J].Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2017,46(10):1534-1548.
- [4] 张伟光,杨长德,王鹏.基于地震波法的底板破坏区域探测技术及应用[J].中国安全生产科学技术,2016,12(6):77-81.  
ZHANG Weiguang,YANG Changde,WANG Peng.Detection Technology of Floor Damage Area Based on Seismic Wave Method and Its Application[J].Journal of Safety Science and Technology,2016,12(6):77-81.
- [5] 陈祖刚,杨雅萍.耦合尺度的地理实体空间相关度算法的建立与应用[J].地球信息科学学报,2018,20(1):37-47.  
CHEN Zugang,YANG Yaping.A Case of Establishment and Application of Spatial Correlation Degree Algorithm for Geographic Entities Coupling Scales[J].Journal of Geo-Information Science,2018,20(1):37-47.
- [6] 邱建,曾帆,贾刘强.震后重建规划实践的系统辨析及思维模型[J].城市发展研究,2017,24(4):14-21.  
QIU Jian,ZENG Fan,JIA Liuqiang.The Systematic Discrimination and Thought Model of Post-earthquake Reconstruction Planning Practices[J].Urban Development Studies,2017,24(4):14-21.
- [7] 宋戈,王越.松嫩高平原土地利用格局空间尺度识别及其关联关系研究[J].中国土地科学,2017,31(1):88-96.  
SONG Ge,WANG Yue.Study on Spatial Scale Recognition and Its Relationships of Land Use Pattern in Songnen High Plain[J].China Land Science,2017,31(1):88-96.
- [8] 孟小伟,周锦强,夏靖,等.浅埋富水断层带大跨暗挖车站注浆技术研究[J].建筑结构,2018,48(S1):811-815.  
MENG Xiaowei,ZHOU Jinqiang,XIA Jing,et al.Study on Grouting Technique for Construction of Shallow Depth Bored Tunnel in High-pressure-water Fracture Zone[J].Building Structure,2018,48(S1):811-815.
- [9] 岳乌云高娃.地震后重建过程中的建筑最低成本分析[J].地震工程学报,2017,39(6):1150-1155.  
YUE Wuyungaowa.Lowest-cost Analysis of Buildings during Post-earthquake Reconstruction[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(6):1150-1155.
- [10] 熊沁,翁敏,孟社宁.基础地理信息库的小尺度城市地标提取[J].测绘科学,2018,43(6):161-166.  
XIONG Qin,WENG Min,MENG Sheninge.Urban Landmarks Extraction at Small Spatial Scale Based on Basic Geographic Information Database[J].Science of Surveying and Mapping,2018,43(6):161-166.
- [11] 田洋,李俊梅,赵宇航,等.逆向坡度隧道内羽流触顶区温度的研究[J].消防科学与技术,2017,36(1):41-43.  
TIAN Yang,LI Junmei,ZHAO Yuhang,et al.Study on the Temperature at Top Plume Region in the Slope Tunnel[J].Fire Science and Technology,2017,36(1):41-43.
- [12] 魏利军,王向阳,罗艾民,等.基于贝叶斯网络的化工园区地震次生灾害情景分析[J].中国安全生产科学技术,2017,13(12):73-78.  
WEI Lijun,WANG Xiangyang,LUO Aimin,et al.Scenario-Analysis on Secondary Disasters of Earthquake in Chemical Industry Park Based on Bayesian Network[J].Journal of Safety Science and Technology,2017,13(12):73-78.