

中文引用格式:宋英华,韩保帅,郭晨. 考虑洪涝灾害风险的县域应急避难场所选址模型[J]. 中国安全科学学报,2024,34(4):191-198.

英文引用格式:SONG Yinghua, HAN Baoshuai, GUO Chen. Location selection model of emergency shelter considering risk of flood disaster in county[J]. China Safety Science Journal,2024,34(4):191-198.

考虑洪涝灾害风险的县域应急避难场所选址模型*

宋英华^{1,2}教授, 韩保帅^{1,2}, 郭晨^{**1,2}副教授

(1 武汉理工大学 中国应急管理研究中心,湖北 武汉 430070;

2 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院,湖北 武汉 430070)

中图分类号:X915.5 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.6850

基金项目:国家社科基金重大项目资助(21&ZD127);国家文化和旅游部科技创新工程项目(20211g0085)。

【摘要】 为提升应急避难场所在灾害管理过程中的服务水平,从洪涝灾害的视角出发,选取致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承载体脆弱性、防灾减灾能力4个指标,采用层次分析法(AHP)-熵权法模型,识别出洪涝灾害风险的空间分布,并将其风险值作为权重引入最小化未覆盖风险,同时,结合最小化加权疏散距离、最小化可达性差异,从公平性、效率性、均衡性视角,构建多目标避难场所选址模型;采用改进的非支配排序遗传算法 II(NSGA-II)求解模型,并以莆田市仙游县现有避难场所布局为例,验证模型。结果表明:对比现有的避难场所布局,优化后的布局方案中总疏散距离、未覆盖风险值及可达性差异性系数分别平均降低35.90%、61.47%、33.62%。

【关键词】 洪涝灾害; 应急避难场所; 选址模型; 非支配排序遗传算法 II(NSGA-II); 层次分析法(AHP)-熵权法

Location selection model of emergency shelter considering risk of flood disaster in county

SONG Yinghua^{1,2}, HAN Baoshuai^{1,2}, GUO Chen^{1,2}

(1 China Research Center for Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China; 2 School of Safety Science and Emergency Management,

Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

Abstract: In order to improve the service level of emergency refuge in the process of disaster management, from the perspective of flood disaster, four indexes were selected: risk of disaster causing factor, sensitivity of disaster-bearing environment, vulnerability of carrier and ability of disaster prevention and reduction. The spatial distribution of flood risk was identified through the AHP-entropy weight method model. Its risk value was introduced as a weight to minimize uncovered risk. Combined with minimizing the weighted evacuation distance and minimizing the accessibility difference, a multi-target shelter location selection model was constructed from the perspective of fairness, efficiency and balance. The improved NSGA-II algorithm was used to solve the model, and the existing shelter layout in Xianyou County, Putian City was used as an example for model verification. The results show that compared with the existing

* 文章编号:1003-3033(2024)04-0191-08; 收稿日期:2023-12-11; 修稿日期:2024-01-23

** 通信作者:郭晨(1989—),女,湖北武汉人,博士,副教授,主要从事战略与风险管理方面的研究。E-mail:guochen2016@126.com。

shelter layout, the total evacuation distance, uncovered risk value and accessibility difference coefficient in the optimized layout scheme are reduced by 35.90%, 61.47% and 33.62% respectively.

Keywords: flood disaster; emergency shelters; location selection model; non-dominant sorting genetic algorithm II (NSGA-II); analytic hierarchy process (AHP)-entropy weight method

0 引言

洪涝灾害是我国最常见的自然灾害之一,近年来,由于全球气候的极端变化和城镇化进程加快,暴雨洪涝频发,造成了严重的经济损失与人员伤亡。《中国水旱灾害防御公报 2020》概要^[1]统计显示,仅在 2020 年,全国(不含港澳台地区)因洪涝共计 7 861.5 万人次受灾,525.7 万人次被迫转移。因此,提前规划应急避难场所选址,对洪涝发生时作出应急响应,具有重要意义。

应急避难场所的选址规划受约束严格、问题离散、高维解集条件影响,近年来受到诸多学者关注。杜浩国等^[2]采用 ArcGIS 与蚁群优化算法,结合求解避难场所选址问题,并用穷举法与实地调研验证云南红河县城区的应急避难场所。吕伟等^[3]结合熵权法与优劣解距离法,分析了避难场所适宜性评价与服务范围的空间关联性。宋英华等^[4]利用灰色综合关联度模型,计算应急避难场所的服务能力,同时,使用加权 Voronoi 图划分避难场所的服务范围。钟广淳等^[5]考虑高精度的昼夜避难需求,提出基于循环疏散分配的 2 阶段避难场所布局优化方法。陈鹏等^[6]将耦合居民的避难行动效率与避难场所的服务范围作了优化配置。刘刚等^[7]考虑不同用地类型下的疏散场所的不同需求变化,在选址模型中引入随时序变化的疏散场所吸引度与评价参数。ZHAO Xiujuan^[8]和 XU Wei^[9]等结合粒子群算法与模拟退火算法,对北京市应急避难场所进行选址分配。RAHMAN 等^[10]利用 GIS 与遥感技术,解决了紧急避难场所的优化设计问题。RIZEEI 等^[11]通过机器学习识别城市洪涝易发地区,将其作为权重引入城市避难场所的最大覆盖与最小阻抗的选址优化。

同时,选址均衡性问题通常体现在其他公共设施方面,如养老院、消防站、公园等。WANG Fahui 等^[12]利用二次规划方法,以可达性差异性最小化为目标,评估了医疗保健服务的分布情况。陆砚池等^[13]在均衡和效率双重视角下,优化了武汉市主城区公园绿地空间布局。李睿等^[14]进行了暴雨内涝

情景下的上海市中心城区的消防服务可达性精细化评估。

综上所述,现有研究多集中于地震、台风场景下的考虑最小成本、最大覆盖、最小疏散总距离的中心城区应急避难场所的选址规划问题,较少体现县域层面的选址规划。因此,笔者将在洪涝灾害背景下,利用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)-熵权法,计算洪涝灾害风险指数,并将其作为最小化未覆盖风险的权重,同时,结合最小化加权疏散距离、最小化可达性差异性来体现选址的效率性和均衡性,采用改进的非支配排序遗传算法 II (Non-Dominant Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II) 求解多目标模型,并以莆田市仙游县现有避难场所为例进行实例验证,以期为洪涝背景下的应急避难场所选址提供解决方案。

1 县域洪涝灾害风险评价

1.1 风险评价指标体系构建

县域洪涝灾害与当地的致灾因子、孕灾环境、承载体及防灾减灾能力密切相关。借鉴吴舒琪等^[15]的做法,从洪涝风险的危险性、敏感性、脆弱性、防灾减灾能力 4 个方面,构建县域洪涝灾害综合风险指数(Flood Disaster Risk Index, FDRI),计算公式如下:

$$FDRI = W_E E + W_S S + W_V V - W_Y Y \quad (1)$$

式中: E 、 S 、 V 、 Y 分别为敏感性、危险性、弱性及防灾减灾能力; W_E 、 W_S 、 W_V 、 W_Y 为 E 、 S 、 V 、 Y 相应的权重。

洪涝的发生与地区降雨及河流湖泊的分布紧密联系,选取地区月均降雨量和水体指数表示致灾因子危险性;孕灾环境敏感性主要取决于外部环境,选取高程、坡度、植被覆盖率表示孕灾环境敏感性;承载体脆弱性是一种社会要素,选取人口密度、地区脆弱人群比率作为承载体脆弱性;防灾减灾能力体现的是洪涝灾害来临前后的应急处置能力,选取区域疏散能力(道路距离)、灯光分布代替地均 GDP 来作为防灾减灾能力。

1.2 风险指标数据标准化

由于含义和量纲差异较大,无法直接比较,因

此,需要提前进行无量纲标准化处理,处理后的各项指标可反映出洪涝灾害的影响情况。月均降雨量、水体指数、人口密度、地区脆弱人群比率、区域疏散能力、灯光分布为正向指标,高程、坡度、植被覆盖率为负向指标。标准化处理如下:

正向指标:

$$B_{eh} = \frac{b_{eh} - \min(b_h)}{\max(b_h) - \min(b_h)} \quad (2)$$

负向指标:

$$B_{eh} = \frac{\max(b_h) - b_{eh}}{\max(b_h) - \min(b_h)} \quad (3)$$

式中: B_{eh} 为第 e 个区域第 h 个指标归一化后的值; b_{eh} 为其原值; $\max(b_h)$ 与 $\min(b_h)$ 为第 h 个指标的最大值与最小值。

1.3 AHP-熵权法洪涝灾害风险评价

AHP通过构建判断层两两对比矩阵得出权重,具有较强的主观性。而熵权法则是一种客观赋权方法,对于构建的指标体系,指标熵值越小,提供的信息量越大,对应的权重也越大。将这2种赋权方法结合,以实现主客观的内在统一,提高评价结果的可信度。假设研究区域在ArcGIS中的像元个数为 p ,指标个数为 q ,对应的指标矩阵为 $R = (r_{eh})_{p \times q}$ 。则第 h 个指标的熵值 H_h 为:

$$H_h = -\frac{1}{\ln p} \sum_{e=1}^p f_{eh} \ln f_{eh} \quad (4)$$

当 $f_{eh}=0$ 时,令 $f_{eh} \ln f_{eh}=0$; f_{eh} 定义为:

$$f_{eh} = -\frac{Z_{eh}}{\sum_{e=1}^p Z_{eh}} \quad (5)$$

式中 Z_{eh} 为第 h 个指标第 e 个对象经标准化处理的指标值。

第 h 个指标的熵权 W'_h 为:

$$W'_h = \frac{1 - H_h}{\sum_{h=1}^q (1 - H_h)} \quad (6)$$

满足 $0 \leq W'_h \leq 1$ 。

AHP中判断矩阵的数值根据指标体系采用1~9标度法给出,判断矩阵的一致性指标与同阶平均随机一致性指标的比值为判断矩阵的随机一致性比率,且当随机一致性比率小于0.1时,则判断矩阵的一致性较为合理,否则需要重新构建判断矩阵。其中,一致性指标及随机一致性比率的计算式如下:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - l}{l - 1} \quad (7)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

式中:CI(Consistency Index)为一致性指标; λ_{\max} 为最大特征根; l 为矩阵阶数;CR(Consistency Ratio)为随机一致性比率;RI为(Random Consistency Index)平均随机一致性指标。

洪涝灾害风险评估组合赋权参考刘媛媛等^[16]的方法。

2 选址模型构建与求解

2.1 应急避难场所选址模型构建

由于多种因素共同作用导致洪涝灾害的空间分布差异性较大,通过AHP-熵权法可评价地区的洪涝灾害风险空间分布情况,使用ArcGIS软件将洪涝风险值赋值给对应的需求点并将其作为权重,避难场所由于距离约束限制尽可能满足风险值较高的需求点,使未覆盖需求点风险值最小化。同时,在选址过程中需要兼顾需求点疏散的效率性和避难场所分布的均衡性原则,将最小化疏散总距离、最小化可达性差异化引入到多目标避难场所选址模型中。

模型参数包括: $I = \{i | i = 1, 2, \dots, m\}$ 为需求点集合; $J = \{j | j = 1, 2, \dots, n\}$ 为候选避难场所集合; ω_i 为需求点 i 的避难需求; Q_i 为需求点 i 的洪涝灾害风险值; C_j 为避难场所 j 的容纳人数上限; A_i 为需求点 i 的可达性值; a 为区域加权平均可达性; d_{ij} 为需求点 i 到候选避难场所 j 的实际距离; D 为最大距离限制; $\eta_j = \{i | d_{ij} \geq D\}$ 为分配给避难场所 j 且超过最大距离限制的需求点集合; k 为选中的避难场所数量; x_{ij} 为避难场所 j 是否服务需求点 i , $x_{ij}=1$ 表示避难场所 j 服务需求点 i ,反之则不然; x_j 为避难场所 j 是否被选中, $x_j=1$ 代表避难场所 j 被选中,反之则不然。

下式表示所有需求点到其分配的避难场所的加权总疏散距离最小化:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_i d_{ij} x_{ij} \quad (9)$$

所有超过距离约束的需求点的风险值总和最小化的表示如下:

$$\min f_2 = \sum_{i \in \eta_j} \sum_{i=1}^m Q_i x_{ij} x_j \quad (10)$$

需求点到避难场所的可达性差异最小化表示如下:

$$\min f_3 = \sqrt{\sum_{i=1}^m (A_i - a)^2 D_i / \sum_{i=1}^m D_i} \quad (11)$$

$$A_i = \sum_{j=1}^n \frac{C_j f(d_{ij})}{\sum_{i=1}^m \omega_j f(d_{ij})} x_j \quad (12)$$

$$f(d_{ij}) = \begin{cases} d_{ij}^{-\beta}, & d_{ij} \leq D \\ 0, & d_{ij} > D \end{cases} \quad (13)$$

$$a = \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i A_i}{\omega} = \frac{\sum_{j=1}^n C_j x_j}{\omega} \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j = k \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^m \omega_i x_{ij} \leq C_j \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (17)$$

$$x_{ij} \leq x_j, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (18)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, x_j \in \{0, 1\} \quad (19)$$

式(12)表示需求点*i*到选中的避难场所的可达性值;式(13)表示距离缩减函数;式(14)表示所有需求点到选中的避难场所的加权平均可达性;式(15)表示规划的避难场所的数量;式(16)表示分配给每个避难场所的需求点的总人数不能超过其容量上限;式(17)表示每个需求点只能被一个避难场所服务;式(18)表示只有当避难场所被选中时才能为需求点提供服务;式(19)表示决策变量 x_{ij} 、 x_j 为0~1整数约束。

2.2 选址算法设计

考虑到文中模型具有约束复杂、多目标、高维性等特点,改进传统的 NSGA-II,以适应选址模型的求解。具体流程如下:

1) 初始化种群。对*n*个候选避难场所编号,并从中随机选择*k*个编号不重复的避难场所作为一条染色体,即问题的解决方案,同时,所有需求点都会被分配到离其最近且满足容量约束的避难场所,若某一需求点离其最近的避难场所容量达到上限,则该需求点将会按照距离最近顺序原则被分配到下一个满足容量约束的避难场所,若所有需求点均满足且所有选中的避难场所均不超过容量限制则判定该方案合格,否则重新生成染色体。重复该操作使染色体数量为*N*。

2) 适应度计算。根据初始化种群及其需求点分配方案计算3个目标函数 f_1, f_2, f_3 ,即为一条染色体3个不同的适应度值。

3) 非支配排序。对初始化的种群进行快速非支配排序,确定帕累托等级 F_i 及其拥挤度 K_i 。

4) 模拟退火选择算子。传统的 NSGA-II 在选择操作中根据帕累托等级及其拥挤度来选取较优种群,易丢弃种群多样性而陷入局部最优。模拟退火算法是在迭代过程中以一定概率选择较差的解,有利于跳出局部最优,找到全局最优解。其规则依托于每个个体的帕累托前沿面和拥挤度,步骤如下:若 $F_i < F_j$,表明个体*i*的帕累托等级小于个体*j*的帕累托等级,则选择个体*i*进入下一代;若 $F_i > F_j$,表明个体*i*的帕累托等级大于个体*j*的帕累托等级,根据 Metropolis 准则选择且选择概率随时间逐渐下降;若 $F_i = F_j$,同理,对拥挤度进行模拟退火选择。其选择概率公式如下:

$$P(F_i, F_j) = \begin{cases} 1, & F_i < F_j \\ \exp \frac{-(F_j - F_i)}{T}, & F_i > F_j \end{cases} \quad (20)$$

5) 遗传操作。①基于概率变化的交叉变异方法。在算法迭代前期,染色体质量较差,需要较大的选择变异概率来寻求最优解,在算法后期,染色体代表的方案质量较好,趋于稳定,需要降低选择变异概率来保持染色体良好的结构。因此,采取选择变异概率线性下降的方法。②混合交叉。根据本文的染色体结构,设定参数 t_0 ,随机生成 $t(t \in [0, 1])$,若 $t < t_0$,采用单点交叉;若 $t \geq t_0$ 则采取双点交叉。同时,为保证交叉后的新个体不含有重复的候选避难场所编号,需要进一步处理交叉后产生的新个体。③混合变异。变异策略可以提高算法的搜索能力,根据染色体结构在迭代后期可增加变异点位来生成种群多样性。设迭代次数为*G*,在前*G*13代采取单点变异,在第*i*个个体上随机生成一个变异位点,从剩余避难场所中随机选取一个替换;在第*G*13代到第*G*代采取多点变异,变异规则与之同理。

6) 种群合并。将产生的子代种群进行需求点分配后重新计算适应度并与父代合并,形成规模为2*N*的总种群,对总种群进行非支配排序后,根据精英策略选取前*N*个作为新种群。

7) 算法迭代与中止。算法进入下一轮的选择、交叉、变异、非支配排序等,直至算法达到最高迭代次数,中止迭代并输出 Pareto 前沿面。

3 应急避难场所实例分析

3.1 数据来源

选取莆田市仙游县作为研究区域。仙游县地处福建东南沿海中部,境内地形复杂,多以丘陵为主。

仙游县常住人口约 90.5 万人,大部分居住在中部、南部及东南部的平原地带,属于亚热带海洋性气候,且常年受台风型暴雨的侵袭导致年均降雨量为 1 300~2 300 mm,易发生洪涝灾害。

仙游县近 20 年月均降雨量数据来自专业气象分析软件 WheatA,为 10 km 精度;人口密度分布来自人口数据空间化网站(worldpop);数字高程数据来源于地理空间数据云平台;植被覆盖率数据来自中国科学院资源环境数据中心;水系及路网数据来自全国地理信息资源目录服务系统;灯光数据来自珞珈一号;其他洪涝风险评估数据来自当地统计年鉴及官方网站。

需求点数据以行政村或社区为单位,共计 317 个;仙游县现有避难场所共计 22 处,其中一个

为体育馆,其他为学校。因此,在优化避难场所时,是以所有学校为基础,并保留该体育馆,学校数据通过高德地图开放平台调用获取,并筛选出坡度在 8° 以下且距离河流超过 500 m 的学校共计 190 个。

3.2 洪涝灾害风险分析

通过 AHP 与熵权法分别得出各项指标的主观权重和客观权重,最终的洪涝灾害风险组合权重见表 1。将 3.1 节的数据作归一化处理,利用 ArcGIS 软件进行加权叠加分析,得出仙游县洪涝灾害风险空间分布,如图 1 所示。可以看出,在仙游县的北部、西部及中部地区,由于月均降雨量高、河网众多且防灾减灾能力较弱导致洪涝灾害风险偏高,其中,西北都地区的西苑乡、莱溪乡、石苍乡风险值最高,应为暴雨多发期的重点监测区域。

表 1 仙游县洪涝灾害评价

Tab. 1 Flood disaster evaluation in Xianyou county

| 目标层 | 指标层指标 | 子指标层指标 | 权重 | | |
|---------------|---------|----------|---------|---------|---------|
| | | | AHP | 熵权法 | 组合权重 |
| 仙游县洪涝 风险评价 | 致灾因子危险性 | 月均降雨量 | 0.255 2 | 0.040 7 | 0.206 5 |
| | | 水体指数 | 0.127 6 | 0.014 8 | 0.102 0 |
| | 孕灾环境敏感性 | 坡度 | 0.052 7 | 0.016 5 | 0.044 5 |
| | | 数字高程 | 0.041 8 | 0.019 4 | 0.036 7 |
| | 承载体脆弱性 | 植被覆盖率 | 0.033 2 | 0.284 0 | 0.090 2 |
| | | 人口密度 | 0.260 6 | 0.354 9 | 0.282 0 |
| | 防灾减灾能力 | 地区脆弱人群比率 | 0.086 9 | 0.049 0 | 0.078 3 |
| | | 灯光 | 0.094 7 | 0.065 3 | 0.088 0 |
| | | 区域疏散能力 | 0.047 3 | 0.155 4 | 0.071 8 |

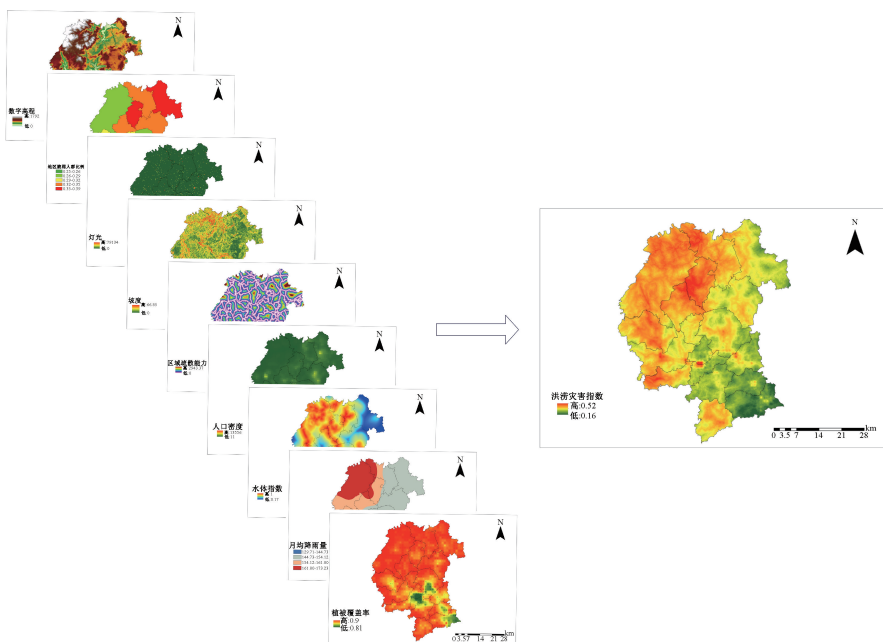


图 1 仙游县洪涝灾害风险分析

Fig. 1 Risk analysis of flood disaster in Xianyou County

3.3 应急避难场所选址优化

仙游县目前有 22 处避难场所,总容纳人数为 9.17 万人,约满足仙游县总人口的 10%,因此,取每个需求点人口的 10% 作为避难需求。由于仙游县不属于发达城区,其公共设施的服务范围及服务能力有限,较短的距离约束不能够覆盖大部分居民,通过 ArcGIS 软件基于 P-中值模型分别计算在现有避难场所与候选避难场所条件下 5、10 km 距离约束下分别满足 69.83%、93.92% 和 82.56%、96.61% 的需求。可以看出,需要调整目标函数 f_1, f_2 的距离约束来适应本文模型,根据实际情况,将距离约束 D 设为 10 km。

3.3.1 参数设置

设置种群规模 $N = 100$,最大迭代次数 $G = 600$, $k = 22$,初始温度 $T_0 = 1\ 000$,降温系数 0.98,交叉概率 $P_c = 0.9 \rightarrow 0.6$,变异概率 $P_m = 0.3 \rightarrow 0.1, t_0 = 0.5$ 。

3.3.2 结果分析

根据改进 NSGA-II 求解模型,并筛选出 3 个目标函数值均不高于现有避难场所的目标函数值,共计 94 个,最优解的 Pareto 前沿面如图 2 所示。

由图 2 可知:3 个目标函数为相互制约的关系,当过多关注最小化加权疏散距离与最小化未覆盖风险时,区域整体的可达性差异化就会提高。选取其中 3 个优化后的布局方案与现有避难场所对比分

析,优化结果如图 3 所示,其中,图 3a 为仙游县现有避难场所的位置分布情况,且鲤城街道与鲤南镇的避难场所分布集中,占据总数的 36.36%,

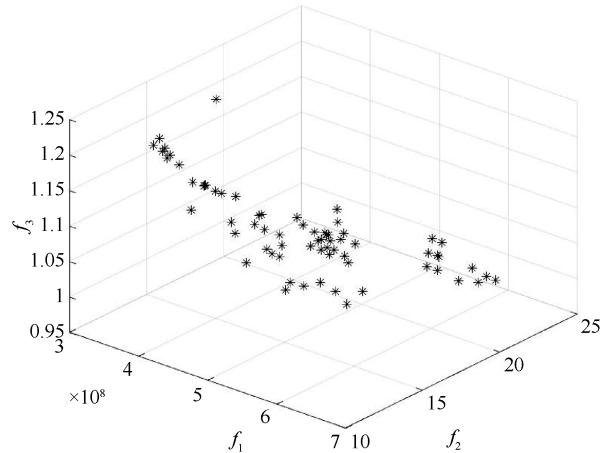


图 2 Pareto 前沿面

Fig.2 Pareto front

导致整个县域避难场所资源分配不合理,疏散成本较高。图 3 中方案 1~3 为 $k = 22$ 的避难场所优化与现有避难场所布局对比情况。同时,依据福建省地震局《仙游县开展地震应急避难场所选址设计工作》^[17] 的要求,将仙游县避难场所增加至 27 所,方案 4 和 5 为 $k = 22$ 的对比情况。

从图 3 方案 1—5 可以看出,整体布局较为分散,更加符合避难需求,方案对比数据见表 2。可以

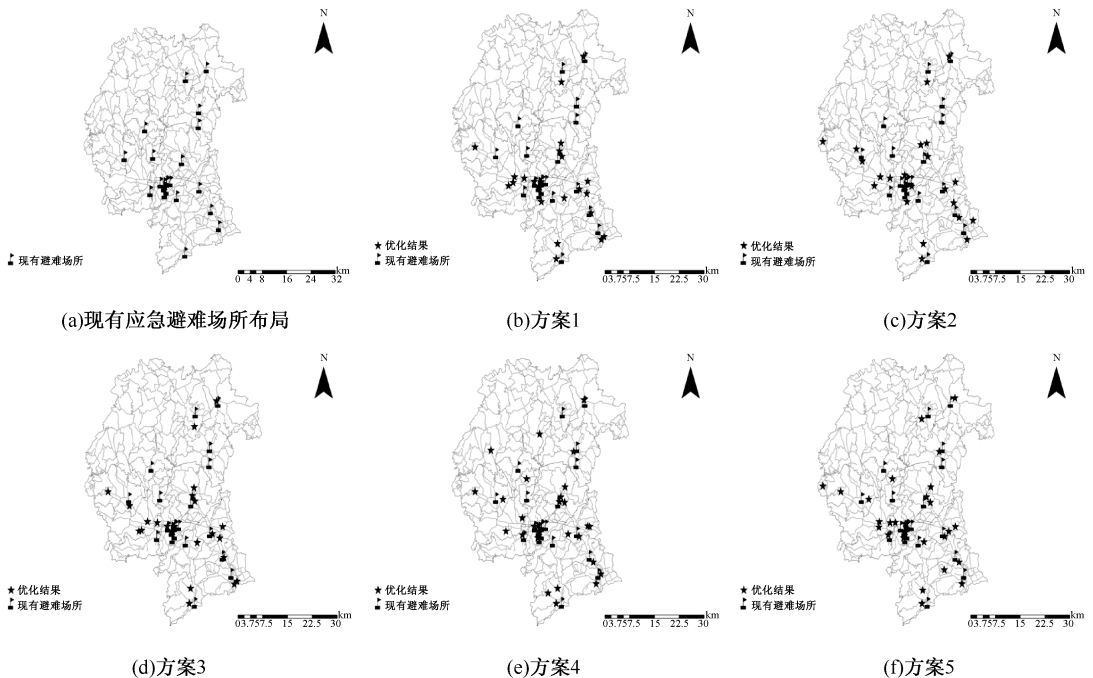


图 3 仙游县避难场所布局优化设计

Fig.3 Xianyou County shelter layout optimized design

看出,优化后的各个方案的目标函数值较现有设施均有所提升。在方案 1—5 中,居民的总加权疏散距离平均下降 35.90%,未覆盖风险值平均下降

61.47%,可达性差异性平均下降 33.62%。较以往追求效率、成本的选址模型中,该模型能够侧重高风险区域的选址服务需求及整体的均衡性。

表 2 选址优化对比

Tab. 2 Selection optimization comparison

| 目标函数 | 仙游县现有设施 | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 | 方案 4 | 方案 5 |
|-------|-------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| f_1 | 645 453 495 | 391 539 500 (↓ 39.34%) | 486 324 033 (↓ 24.65%) | 376 145 459 (↓ 41.72%) | 457 624 868 (↓ 29.10%) | 354 926 977 (↓ 45.01%) |
| f_2 | 38.252 8 | 14.626 8 (↓ 61.76%) | 18.802 7 (↓ 50.85%) | 12.410 9 (↓ 67.56%) | 11.775 3 (↓ 69.22%) | 16.083 4 (↓ 57.95%) |
| f_3 | 2.030 8 | 1.138 1 (↓ 43.96%) | 1.034 3 (↓ 49.07%) | 1.222 9 (↓ 39.78%) | 1.755 2 (↓ 13.57%) | 1.590 0 (↓ 21.71%) |

4 结 论

1) 从致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承载体脆弱性、防灾减灾能力 4 个角度构建洪涝灾害评价体系,采取 AHP—熵权法综合评价区域洪涝风险分布,研究结果可为地区防洪工作提供参考。

2) 引入了洪涝灾害风险指数、加权疏散距离及可达性差异性系数构建的多目标应急避难场所选址

模型,能够覆盖高风险区域需求且保证整体应急设施布局的均衡性,并以仙游县为案例验证了模型的有效性和适用性。

3) 县域中公共设施的可接受服务距离限制往往高于发达城区,文中的距离约束及对结果能够产生很大的影响。后续研究可以将不同地区的距离约束差异纳入研究过程,使选址结果更加贴合实际。

参 考 文 献

[1] 中国水旱灾害防御公报编写组.《中国水旱灾害防御公报 2020》概要[J]. 中国防汛抗旱, 2021,31(11):26-32.

[2] 杜浩国,林旭川,张方浩,等.基于蚁群优化算法的应急避难场所选址模型研究[J]. 自然灾害学报, 2021,30(2):89-101.

DU Haoguo, LIN Xuchuan, ZhANG Fanghao, et al. Study on emergency refuge site selection model based on ant colony optimization algorithm[J]. Journal of Natural Disaster, 2021,30(2): 89-101.

[3] 吕伟,韩业凡,周雯楠,等.避难场所适宜性评价及服务范围空间相关性分析[J]. 安全与环境学报, 2023,23(3):694-703.

LYU Wei, HAN Yefan, ZHOU Wennan, et al. Study on the spatial correlation between the suitability evaluation of emergency shelter and the service scope[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(3): 694-703.

[4] 宋英华,赵相成,吕伟,等.考虑多因素影响的避难场所服务范围划分方法[J]. 中国安全科学学报, 2019,29(5):138-144.

SONG Yinghua, ZHAO Xiangcheng, LYU Wei, et al. Method for service scope division of emergency shelters considering multi-factors [J]. China Safety Science Journal, 2019,29(5): 138-144.

[5] 钟光淳,翟国方,陈伟,等.基于循环疏散分配的避难场所布局优化研究:以南京新街口为例[J]. 灾害学,2022,37(2):204-211.

ZHONG Guangchun, ZHAI Guofang, CHEN Wei, et al. Optimization of shelter location in high-density urban area based on circular evacuation allocation: a case study in Xinjiekou district of Nanjing, China[J]. Journal of Catastrophology, 2022,37(2):204-211.

[6] 陈鹏,张硕,刘晓静,等.基于居民视角的应急避难所优化配置研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019,15(8):44-50.

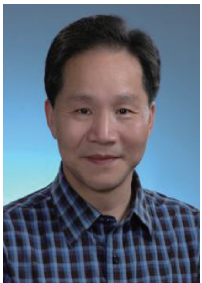
CHEN Peng, ZHANG Shuo, LIU Xiaojing, et al. Research on optimal allocation of emergency shelter based on residents perspective [J]. Journal Safety Science and Technology, 2019, 15(8): 44-50.

[7] 刘刚,王威,马东辉,等.考虑用地吸引度的避震疏散场所选择模型[J]. 中国安全科学学报, 2016,26(12):

169-174.

LIU Gang, WANG Wei, MA Donghui, et al. Model of of evacuation model considering land attraction [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26 (12): 169-174.

- [8] ZHAO Xiujuan, XU Wei, MA Yunjia, et al. Relationships between evacuation population size, earthquake emergency shelter capacity, and evacuation time[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2017, 8(4): 457-470.
- [9] XU Wei, ZHAO Xiujuan, MA Yunjia, et al. A multi-objective optimization based method for evaluating earthquake shelter location-allocation[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2018, 9(1): 662-677.
- [10] RAHMAN M, CHEN Ningsheng, ISLAM M, et al. Location-allocation modeling for emergency evacuation planning with GIS and remote sensing: a case study of Northeast Bangladesh[J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(3): 175-191.
- [11] RIZEEI H M, PRADHAN B, SAHARKHIZ M A, et al. Allocation of emergency response centres in response to pluvial flooding-prone demand points using integrated multiple layer perceptron and maximum coverage location problem models[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 38: DOI:10.1016/j.ijdr.2019.101205.
- [12] WANG Fahui, TANG Quan. Planning toward equal accessibility to services: a quadratic programming approach[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2013, 40(2):195-212.
- [13] 陆砚池, 方世明. 均衡和效率双重视角下武汉市主城区公园绿地空间布局优化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(1): 68-79.
LU Yanchi, FANG Shiming. Study on the spatian distribution optimization of park green spaces in the main city of Wuhan from the perspective of both equilibrium and efficiency[J]. Resources and Environment of the Yangtze River Basin, 2019, 28(1): 68-79.
- [14] 李睿, 王军, 李梦雅. 暴雨内涝情景下城市消防服务可达性的精细化评估[J]. 地理科学进展, 2022, 41(1): 143-156.
LI Rui, WANG Jun, LI Mengya. Fine-resolution evaluation of urban fire service accessibility under the impact of a 100-year pluvial flood[J]. Progress in Geography, 2022, 41(1): 143-156.
- [15] 吴舒祺, 赵文吉, 王志恒, 等. 基于 GIS 的洪涝灾害风险评估及区划:以浙江省为例[J]. 中国农村水利水电, 2020(6): 51-57.
WU Shuqi, ZHAO Wenji, WANG Zhiheng, et al. Risk assessment and zoning of flood disaster based on GIS: a case study of Zhejiang Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(6): 51-57.
- [16] 刘媛媛, 王绍强, 王小博, 等. 基于 AHP_熵权法的孟印地区洪水灾害风险评估[J]. 地理研究, 2020, 39(8): 1 892-1 906.
LIU Yuanyuan, WANG Shaoqiang, WANG Xiaobo, et al. Flood risk assessment in Bangladesh, India and Myanmar based on the AHP weight method and entropy weight method[J]. Geographic Research, 2020, 39(8): 1 892-1 906.
- [17] 福建省地震局. 仙游县开展地震应急避难场所选址设计工作[EB/OL]. (2018-04-11). <https://www.fjdj.gov.cn/ar/2018041114000003.htm>.



作者简介: 宋英华 (1962—),男,湖北武汉人,博士,教授,主要从事应急管理、项目管理研究。E-mail: song6688c@163.com。