

引用格式:詹庆明,杨爽.村镇应急公共设施选址布局优化研究[J].地球信息科学学报,2019,21(5):641-653. [Zhan Q M, Yang S. Optimization of emergency facilities layout in villages[J]. Journal of Geo-information Science, 2019,21(5):641-653.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180487

村镇应急公共设施选址布局优化研究

詹庆明*, 杨 爽

武汉大学城市设计学院, 武汉 430072

Optimization of Emergency Facilities Layout in Villages

ZHAN Qingming*, YANG Shuang

School of Urban Design, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: Emergency facilities play an important role in disaster prevention and mitigation. However, most of the relevant studies and practices usually focus on urban areas. Villages and towns in China are vast in territory and complex in environment. Because of the low level of economic development in the past and out-dated emergency facilities developed by traditional layout methods in China, these places become vulnerable to disaster. In this case, quantitative study on the layout evaluation and optimization of emergency facilities in villages is necessary. With the view of “the demand points distribution - identifying facilities alternative sites based on the suitability evaluation for emergency facilities - model construction and application- rationality evaluation of site selection schemes and planning proposals”, this paper concentrates on the construction of emergency facilities and attempts to establish a relatively reasonable method for emergency facilities layout in villages. The main contents of the article are as follows: (1) establishing suitability evaluation index system for emergency facilities from geographical conditions, traffic conditions, population distribution, and hazard sources distribution. In particular, safety issues are considered to avoid the constructions in areas with high incidence of geological disasters, floods, and other disasters; (2) building location model which consists of set cover model and maximum coverage model to analyze emergency facilities that only need to undertake emergency service and building location model which consists of set cover model and P-median model to analyze emergency facilities that need to undertake both emergency service and public service; and (3) taking response coverage and cross-response rate as the efficiency evaluation indicators, while the maximum response time and average response time from demand point to their nearest facilities are used as the fairness evaluation indicators. Both indicators are used to evaluate multi-schemes generated by the location models. In this paper, Songbai Town of Shennongjia in Hubei province is taken as the research area, fire stations and emergency medical centers are used as two typical types of emergency facilities for this research. The results show that: (1) the suitability evaluation index system can comprehensively reflect various factors synthetically; and (2) the model calculation results are superior to the original schemes in terms of efficiency and fairness indicator. However, the more optimized layout schemes need to be determined together with population distribution, local situation, and cost factors. Thus, the proposed method has good feasibility and reliability.

收稿日期:2018-09-22;修回日期:2019-02-27.

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAL05B07)。[**Foundation item:** National Science and Technology Support Program, No.2014BAL05B07.]

作者简介:詹庆明(1964-),男,福建永安人,博士生导师,研究方向为数字化城乡规划与管理。E-mail: qmzhan@whu.edu.cn

Key words: villages and towns; emergency facilities; location selection; rationality evaluation; Songbai Town of Shennongjia

***Corresponding author:** ZHAN Qingming, E-mail: qmzhan@whu.edu.cn

摘要:应急公共设施对防灾减灾具有重要作用,但相关研究和实践通常围绕城市展开,中国村镇地域广阔、环境复杂,传统方法规划的应急公共设施布局无法满足村镇的需求。因此,针对村镇进行更加精细化的应急公共设施布局优化十分必要。本文主要研究内容包括:①建立包括地理因素、交通条件、人口分布情况和危险源分布情况在内的应急设施适宜性用地指标体系,并避免在地质灾害、洪水等灾害高发区域建设;②对仅需要承担应急服务的设施,建立集合覆盖模型和最大化覆盖模型两级选址模型进行分析,对需要承担公共服务和应急服务双重任务的设施,建立集合覆盖模型和p-中值模型进行分析;③以响应覆盖率、交叉响应率作为效率性评价指标,最大响应时间、平均响应时间作为公平性评价指标,综合评价设施选址方案。本文以神农架林区松柏镇为研究区域,以消防设施和应急医疗救助中心分别作为两类典型应急公共设施进行布局,得到以下结论:①应急设施适宜性用地评价指标体系能够综合评价应急设施选址时需要考虑的各种因素,具有较强的实用性;②对多选址方案进行对比,模型计算结果在效率性和公平性指标方面优于原选址方案,同时结合人口分布、实际用地情况和成本因素能够确定更为优化的布局方案,验证了方法的可行性和科学性。

关键词:村镇;应急公共设施;选址;合理性评价;神农架松柏镇

1 引言

中国是一个遭受灾害种类繁多、灾情严重的国家,自然灾害的发生及其所造成的危害主要集中在广大村镇地区^[1]。随着村镇建设进程的加快、人类活动频率的增加,一方面带来人口和经济的集中,另一方面受社会经济历史等诸多条件影响,村镇地区仍然处于城乡防灾体系中的薄弱环节^[2],一旦发生重大灾害,在缺乏行之有效措施的情况下,也会增加灾害带来的损失。

综合防灾减灾规划是防灾宏观控制的主体^[3],被认为是应对灾害的有效手段之一,编制防灾减灾规划的重要性已然达成共识^[4]。但无论在城市或村镇,实际规划实践中的防灾减灾因素并没有得到足够的重视,防灾减灾规划也未能发挥其应有的作用。城乡规划的核心工作是用地布局,在城乡规划领域内,综合防灾减灾规划的落实必须与规划的核心工作相结合,使用地和空间设施布局成为综合防灾减灾规划工作的切入点^[5],反映在具体的空间需求中,即是各类对应急救援起重要作用的应急公共设施与场所的空间布局,具体包括应急避难场所、应急物资储备库等保障性设施和应急医疗救助中心、消防设施、应急治安设施等应急救灾设施。因此,合理的布局能够极大地提高灾害应急管理的效率,达到防灾减灾的目的。

国外应急公共设施选址研究较早,以解决现实应用为目的,开展了基础选址模型的相关研究。从设施公平性角度考虑,包括以各服务需求点最大距

离最小为目标,建立p-中心模型^[6],及以需求点到设施总加权距离最小化为目标,建立p-中值模型^[7];从提高设施效率角度考虑,在明确覆盖要求的条件下,以最少设施数目覆盖所有需求点为目标,建立集合覆盖模型^[8],以确定的设施数目覆盖更多需求点为目标的最大覆盖模型等^[9]。这些模型虽然均以单一目的为目标,往往不能满足现实要求,但为后续的研究提供了基础和方向。在多目标选址方面,Masood等^[10]同时考虑时间、距离、费用等因素,从多目标数学模型角度对消防站选址问题进行分析。徐志胜等^[11]结合时间、经济、社会、环境等定性和定量因素,建立消防站选址多目标模糊优选模型,提出了城市消防站选址优化的决策方法。

另外,有一些学者^[11-13]认为,应急公共设施的的特殊性决定了应急公共设施的建设必须同时考虑作为应急服务的服务效率要求和作为公共设施的服务均等化要求,应急服务设施应由不同等级的设施体系构成,从而发展出层次选址方法,尝试采用层次型设施布局模型以满足现实中布局高层次设施和低层次设施应对普通公共服务和应急服务的需求。Araz等^[12]针对这一问题讨论不同模型下一次覆盖和备用覆盖的适用情况。王峥等^[13]使用p-中心求解上海市低层设施布局以提升服务响应能力,使用p-重心模型求解高层次应急设施布局以降低设施服务成本,为层次型设施布局方法提供实践案例。陈志宗等^[14]根据设施等级关系,将应急公共设施分为高低级设施相对独立型和高低级设施相互从属型两类,并分别建立层次模型,使得设施能够遵照中国相应

法律法规,实现需求点全覆盖的目的。总体来说,应急公共设施选址问题已有了较为成熟的发展,从对单一因素的考量逐渐向多因素转变,并形成公平性和效率性结合的层级选址方法等体系。

为了衡量应急公共设施选址布局的合理性,普遍认为,需要重点考虑时效性要求^[15]。突发事件发生后的最初几分钟,是最为关键的时刻^[16],在这段时间内采取有效而迅速的应急行为,将对人民的生命和财产安全产生重要影响。因此表征应急公共设施服务效率的可达性指标成为许多研究衡量其选址合理性的首要选择。吴美文等^[17]将这类指标归类为覆盖指标,并进一步将其分为设施响应覆盖率和交叉响应覆盖率,分别用以评判设施服务的安全性能和增援性能。同时,作为公共设施的一种,对政府和规划部门而言,其布局的合理性也意味着公平性,而公平性程度往往通过社会群体的可达性差异来体现^[18],Chanta等^[19]从城乡紧急医疗服务的公平问题入手,建立3个双目标覆盖选址模型,对比了模型计算结果的覆盖区域面积、未覆盖区域到最近设施的最大距离、未覆盖区域到最邻近设施点的平均距离等指标,为决策者提供支持。陈昭等^[20]以消防站服务可达面积的覆盖率、重复覆盖率及人口覆盖率为主,从安全性、效率性及均衡性对杭州市消防站点规划方案进行分析。目前,应急设施选址的评价需考虑安全性、效率性和公平性已成为共识,并在设施方案选择与优化方面起到重要作用。

中国“城”和“乡”的经济社会发展水平和城市建设规模等级都存在很大的差别,这一点在防灾减灾领域也体现的非常明显。关于城市领域的防灾减灾研究不论从理论研究还是防灾设施的建设实践,都取得一定的成果和成效。但是对于村镇领域的防灾减灾研究明显处于劣势,应急公共设施选址相关定量分析方法应用到村镇规划过程的实践较少。钮英建等^[21]、周国强^[22]、任航等^[23]对中国农村防灾减灾存在的问题进行了分析和总结。在应急设施布局原则方面,冯凯等^[24]认为在农村应增加消防站保护半径,初步提出农村应以小型消防站为主建设消防设施体系的对策和建议。在具体布局策略方面,楚志勇等^[25]阐述了最短路径在乡镇消防站选址中的应用思路。崔刚等^[26]综合消防站自身的灭火能力和周边环境因素,采用熵权TOPSIS法建立乡村消防站布局方法。侯云先等^[27]以复杂地形乡镇地区为研究对象,重点考察交通状况影响下的应

急设施配置方法,为该类地区应急设施的选址提供了一种理论模型。总体来看,村镇层面从城乡规划角度出发,兼顾中国应急公共设施时效性和公共性的研究还较少,更多是关注理论层面模型的构建与优化,在实践层面少有涉及,对村镇防灾减灾工作的指导意义还不强。

应急公共设施布局在传统规划中有丰富的经验,但基于定量方式对村镇应急公共设施进行选址和方案评价尚有研究余地。本文将应急公共设施分为需要承担应急服务任务和需要承担公共服务及应急服务双重任务2类,根据其服务特点及要求分别构建选址模型,并以神农架松柏镇为例,选取应急消防设施和应急医疗救助中心作为2类设施的典型代表作为案例研究。首先通过用地适宜性评价对可利用设施场所进行初步筛选,以满足设施选址的交通、环境、社会、安全等要求;然后在筛选结果上对2类设施布局进行进一步计算;最后通过对公平性和效率性2方面指标的对比对比,对村镇应急公共设施选址与布局提出建议。

2 研究方法

设施选址所面临的最重要问题是确定需要建设多少设施点,以及将这些设施点布置在何处。具体选址过程如下:① 确定需求点。对区域内用地(排除道路及农用地等)按用地类型和人口密度进行划分,以中心点作为需求点;② 确定设施备选点。对村镇用地进行应急公共设施选址适宜性评价,选取适宜用地中可以作为新建设施的用地,及位于适宜用地的现有设施作为设施供应点;③ 模型构建与应用。构建村镇应急公共设施选址模型,对应急公共设施选址过程进行计算,得到选址方案;④ 对选址方案进行合理性评价,最终对应急公共设施选址布局提出建议。

2.1 基于多因素综合评价的设施用地适宜性评价

当前用于建设用地适宜性评价的方法中以多因素综合评价法为主。多因素综合评价法主要优点是综合考虑了影响土地的多种因素,评价的结果更能全面反映土地的性状,综合显示土地的质量。该法根据各地具体情况,选取不同的因素、因子体系,可以因地制宜灵活应用,具有简单易行,可操作性强的特点。

本文采用基于层次分析法的多因素综合评价方法,在对应急公共设施选址基本原则研究的基础上,建立评价指标体系,对村镇建设用地等用地中可以作为应急公共设施的用地进行评价,为用地选择提供基础保证。

2.1.1 多因素综合评价

多因素综合评价是指选择对各种不同类型用地有影响的因素,计算各因素作用分值,在整个评价范围内,划分评价单元,计算各影响因素对评价单元的影响分值,根据评价单元总分值及其统计频率,初步划分质量级别,验证质量级别,确定质量级别,其表达式为:

$$P_j = \sum_{i=1}^n F_{ji} w_i \quad (1)$$

式中: P_j 为第 j 个评价单元总分; n 为土地定级因素的总和; F_{ji} 为第 j 个评价单元第 i 个定级因素的分值; w_i 为第 i 个定级因素的权重。

2.1.2 适宜性评价指标选择

应急设施的选址,应具有战略眼光,既要保证设施的可达性,也要满足设施位置自身安全性要求,不仅要方便当时的应急需要,还要兼顾事后再利用,因此在进行区位选择与优化前,对所有可以作为应急公共设施的场所需要进行适宜性评价(表1),以筛选适宜场地进行建设,考虑以下4个原则:

(1)地理条件。应急公共设施应布局在地势平坦且地质条件良好的区域,尽量避免位于灾害的影响区域内。

(2)交通条件。便利的交通网络对于争取最短的时间抢救病人、重伤员的转移、运送物资有重要作用,山区村镇复杂的道路系统对设施的选址有重

要影响,应急公共设施应位于交通便捷区域。

(3)人口分布情况。设施分布要结合村镇人口分布情况进行调整。

(4)危险源分布情况。设施选址应尽量避免位于加油站等重大危险源的影响范围内。

结合以上选址原则,建立适宜性用地评价指标体系,通过层次分析法,确定指标权重,对应急设施选址用地进行适宜性评价,为设施区位调整提供支持。

需要指出的是,在评价因子中,地质灾害危险性和洪水灾害危险性既是评价因子又是约束条件,具体而言,本文省略了地质灾害危险性、洪水灾害危险性的评价过程,采用其评价结果作为数据来源之一,在整体危险性评价(包括低危险性、较低危险性、中危险性、较高危险性和高危险性5个等级)参与适宜性评价结果之后,将危险性高(较高、高)的部分作为约束条件,从适宜性评价结果中予以剔除。对于坡度因素,由于8°以上的用地已不适宜用于建设,因此将8°以上的坡度因子也作为约束条件,从适宜性评价结果中予以剔除,从而形成最终的用地适宜性评价结果。

2.2 村镇应急公共设施选址模型构建

应急公共设施选址作为一类特殊的选址问题,一直是选址问题研究的重要领域之一^[28]。如上文所述,集合覆盖模型、最大化覆盖模型、p-中值模型以及p-中心模型是应急设施选址问题中的主要应用模型,绝大多数应急设施选址问题都可以由这3类模型得到有效解决。其中,p-中值模型的计算结果表示,随着设施到需求点的平均距离增加,设施

表1 应急公共设施用地适宜性评价指标

Tab. 1 Suitability evaluation indicators for emergency facilities

准则层	权重	因子层	权重(消防/医疗)	描述
地理条件	0.674	坡度	0.073/0.079	坡度小于8°较适宜作为应急设施用地,便于展开救援、训练等活动
		地质灾害危险性	0.253/0.264	考虑山地村镇易发崩塌、滑坡等地质灾害,应考虑高危区不能应急设施建设
		洪水灾害危险性	0.317/0.331	洪水高发区不能作为应急设施用地
		距水源距离	0.034/0.000	距水源越近的区域越适宜消防设施建设
交通条件	0.086	距主干道距离	0.024/0.027	应急公共设施应建设在交通便捷的区域,距主干道越近,道路密度越高越适宜建设
		道路密度	0.062/0.062	
人口分布情况	0.061	人口密度	0.061/0.061	消防设施为便于消防车快速出动,其选址需要避开人口密集场所,应急医疗救助中心为了减少损失,应尽量布局在人口相对集中的区域
危险源分布情况	0.176	与危险源距离	0.176/0.176	生产和储存易燃易爆等危险品影响范围内不宜建设应急公共设施

的可达性降低,覆盖模型则表示,在服务时间或距离限制条件下,使设施能够满足的服务需求得到最大化,因此p-中值模型和覆盖模型较适宜应用于应急公共设施选址中^[33]。

本文根据相关行业标准,结合覆盖模型和p-中值模型,依托村镇道路网络,完成定量选址优化部分的分析。

2.2.1 应急公共设施选址模型构建对于只需承担应急服务任务的设施,

分别采用集合覆盖模型和最大化覆盖模型作为两级选址模型进行分析,其中集合覆盖模型可以计算出在时间/距离限制下,覆盖所有需求点所需的最小设施数及其分布,在此基础上可以为确定适宜的设施数量提供参考,最大化覆盖模型可在集合覆盖模型确定的设施数量基础上进行增减作为设施数量限制条件,以计算该条件下最大化覆盖需求点的设施布局。

对于需要承担公共服务和应急服务双重任务的应急设施,如应急医疗救助中心,不仅对于应急时间有要求,且在非灾时需要满足居民日常生活的需要,分别采用集合覆盖模型和p-中值模型作为两级选址模型进行分析,其中p-中值模型需要在设施数量的限制条件下使应急公共设施服务尽量均等化。

具体数学模型表示如下:

(1)集合覆盖数学模型

目标是确定所需服务设施的最少数目,并进行配置,使所有需求点都能被覆盖到。

设 $S = \{S_i | i = 1, 2, \dots, m\}$: 应急需求点集合;

$F = \{F_j | j = 1, 2, \dots, n\}$: 候选应急设施点集合;

d_{ij} : 从应急需求点 S_i 到应急设施 F_j 的距离(或时间);

D : 从应急需求点到候选应急设施的最大限定距离(或时间);

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{若候选设施 } F_j \text{ 被选中} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}。$$

$$\min z = \sum_{j=1}^n x_j \quad (2)$$

$$s.t \sum_{j=N_i} x_j \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$N_i = \{j | d_{ij} \leq D\} \quad (5)$$

式(2)表示约束应急设施数量最小化;式(3)使

每个应急需求点至少被一个应急设施覆盖;式(5)表示应急设施到应急需求点的距离(或时间)在应急设施的限定内。

(2)最大化覆盖数学模型

由于在实际的决策过程中,覆盖全部需求点或许会导致过高的财政支出,在资金的限制下,只能确定p设施以覆盖部分需求点。最大化覆盖模型的任务是选择p个设施的位置,使覆盖需求点的价值总和最大。

设 $S = \{S_i | i = 1, 2, \dots, m\}$: 应急需求点集合;

$F = \{F_j | j = 1, 2, \dots, n\}$: 候选应急设施点集合;

d_{ij} : 从应急需求点 S_i 到应急设施 F_j 的距离(或时间);

D : 从应急需求点到候选应急设施的最大限定距离(或时间);

p: 可以设置的应急设施数量($p \leq n$);

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{若候选设施 } F_j \text{ 被选中} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{若应急需求点 } S_i \text{ 被覆盖} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

则最大化覆盖数学模型表述为:

$$\max z = \sum_{i=1}^m y_i \quad (6)$$

$$s.t \sum_{j=N_i} x_j - y_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j = p \quad (8)$$

$$y_i, x_j \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$N_i = \{j | d_{ij} \leq D\} \quad (10)$$

式(6)表示在有限资源限制下使应急需求点总和最大;式(7)暴增选定过的应急设施能够覆盖应急需求点;式(8)保证被选择的应急设施数为p。

(3) p-中值问题的数学模型

解决需求点与设施点之间加权总距离最小的问题。

设 $S = \{S_i | i = 1, 2, \dots, m\}$: 应急需求点集合;

$F = \{F_j | j = 1, 2, \dots, n\}$: 候选应急设施点集合;

d_{ij} : 从应急需求点 S_i 到应急设施 F_j 的距离(或时间);

D : 从应急需求点到候选应急设施的最大限定距离(或时间);

p: 可以设置的应急设施数量($p \leq n$);

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{若候选设施 } F_j \text{ 被选中;} \\ 0 & \text{否则} \end{cases};$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{若应急需求点 } S_j \text{ 被候选服务设施 } F_j \text{ 覆盖;} \\ 0 & \text{否则} \end{cases};$$

其数学模型表述如下:

$$\min z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} y_{ij} \quad (11)$$

$$s.t. \sum_{j=1}^n y_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j = p \quad (14)$$

$$y_i, x_j \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

式(11)保证需求点到应急设施间的总距离最小;式(12)表示又一个应急设施为应急需求点服务,式(13)表示只有被选中的候选应急设施才能为应急需求点服务;式(14)保证选中的应急设施数目为 p 。

2.2.2 应急响应时间设定

根据《城市消防站建设标准(建标 152-2017)》^[33]、《乡镇消防队(GB/T 35547-2017)》^[35]等相关标准规范中的建议,大型镇区消防站的布局应按接到报警 5 min 内消防人员到达责任区边缘要求布局。而 5 min 中包括 1 min 接警时间,因此以 4 min 为限制条件,计算基于可达性的消防设施选址方案。

对于应急医疗救助中心的应急响应时间没有具体规定,一般为了保证紧急医学救援的时效性,对于救助中心响应时间提出诸如“白金 10 分钟”、“黄金 1 小时”、“抗休克 30 分钟”等急救时效性的要求。而在对紧急事故有生命威胁的医疗急救中,世界上广泛接受的标准响应时间是 8 min,因此确定以 8 min 作为应急医疗救助中心的时间限制。

2.2.3 道路通行速度设定

各应急公共设施服务范围的确定,主要由车辆在村镇道路上按照不同速度行驶所到达的范围决定。考虑到村镇道路状况较城市更为简单,行车速度相对较快的情况,以设计车速将松柏镇各级道路通行速度设定如表 2 所示。

2.3 合理性评价方法与指标

2.3.1 空间可达性评价

空间可达性通常用于衡量人们使用各种设施的便捷程度,从而评估设施区位选择、交通基础设施建设的合理性。基于应急公共设施对于防灾救

表 2 村镇道路通行速度

Tab. 2 Traffic speed in towns

道路等级		通行速度/(km/h)
城镇道路	省道	50
	县道	40
	村道	30
	主干道	50
	次干道	40
	支路	30

灾的时间紧迫性要求,本文将采用 ArcGIS 10.2 中的网络分析方法,以特定的应急公共设施服务响应时间为约束条件,在村镇道路网络的支撑下,从个体的角度出发,计算设施能够辐射的空间区域范围,作为评价应急公共设施服务能力的基础。

2.3.2 合理性评价指标

为了衡量应急公共设施服务能力,本文建立村镇应急公共设施布局合理性指标体系,一般认为以减小从需求点到设施点所造成的损失作为选择标准最为合适^[36],因此,应急公共设施布局的合理性应包含 2 个方面的内容,即服务在应急响应时间范围内能够覆盖的范围更广和提高服务的可达性,本文采用如下指标评价设施选址的合理性。

(1) 响应覆盖率

响应覆盖率是指某时间范围内应急设施服务范围所覆盖的建筑总面积(或覆盖人口数、覆盖路径长度)占研究区域建筑总面积(或人口总数、路径总长度)的比例,反映应急设施的空间服务能力,其值越大,表示设施提供应急服务的性能越高。

响应覆盖率 = 应急设施服务范围覆盖的建筑总面积(人口数、路径长度)/研究区域建筑总面积(人口总数、路径总长度) × 100%

(16)

(2) 交叉响应率

交叉响应率指每个应急设施指定行车时间段与其他设施服务范围内的建筑面积(人口数)的重叠部分占该应急设施指定行车时间段总服务范围内的建筑面积(人口数)的比例,反映应急设施空间布局的经济合理程度及相互增援性。一方面,交叉响应率其值越大,应急公共设施服务能力越强,因为一旦重复覆盖区域受灾,将有 2 个及以上公共设施进行增援;另一方面,也反映选址方案的合理性,因为交叉覆盖的同时表现重复建设带来的设施建设成本的增加,降低该指标值意味着尽量增加相邻

设施之间的距离以覆盖更多的区域。
交叉响应率=多个应急公共设施重复覆盖建筑面积
(人口数)/应急公共设施总覆盖建筑面
积(人口数)×100%

(17)

(3)需求点至最近设施的最大时间及平均时间
需求点至最近设施的最大时间和平均时间(简称:平均时间和最大时间)是衡量设施可达性的重要指标,即便设施在响应时间范围内无法到达需求点,但未覆盖需求点到距其最近设施的最大时间越小、平均时间越短,表明该区域能够在更短的时间内获得应急服务,从而提高设施选址的合理性。

3 研究区概况与数据来源

3.1 研究区概况

松柏镇地处神农架林区东北部,是神农架林区的政治、经济、文化中心,是以青杨河为主轴,东西延伸的中心城镇(图1)。在神农架规划中,松柏镇区主要配置旅游服务业和商贸服务业,形成林区综合服务核心。根据中国全国第六次人口普查数据,松柏镇镇区人口2.2万人,面积2.5 km²。地质灾害是松柏镇面临的主要灾害,2005–2015年松柏镇镇域共 发生地质灾害43起,其中镇区18起;除此之外,松柏镇还面临火灾的威胁,除参与森林火灾扑救行动外,2006–2015年神农架林区消防大队(松柏镇消防站)于松柏镇接处火警63起,由于山体滑坡出警2起。应急公共设施在松柏镇防灾减灾工作中扮演重要角色,对减小灾害带来的损失起到关键作用。

神农架林区松柏镇镇区现状消防任务由神农架林区公安消防大队承担,消防大队占地面积8168 m²,有16名消防战士,配备4台消防车。位于镇区中心,紧邻青杨河,其缓冲区1000 m范围内,消防站以北的主要用地包括居住用地、行政办公用地、商业用地、教育科研用地及医疗卫生用地,消防站以南主要为农林用地。

松柏镇内医疗卫生设施共4个,集中分布在镇区东部,中心城区附近,其中,能够开展应急医疗服务的有林区第一人民医院和林区妇幼保健院。由于松柏镇地形条件限制,现状多数自然村民点农民不能就近就医,医疗问题相对突出。

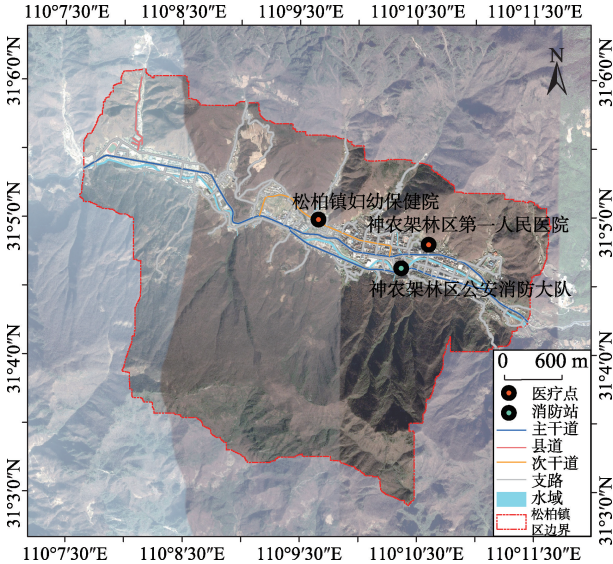


图1 松柏镇应急消防设施及应急医疗救助中心区位

Fig. 1 Fire stations and emergency medical centers of Songbai town

3.2 数据来源

详细精确的数据是进行应急公共设施布局的基础(表3)。根据神农架林区相关机构和部门收集的松柏镇基础数据,在 ArcGIS 10.2 平台上对相关图件和属性进行提取,建立神农架林区松柏镇应急公共设施和道路网络数据库,并结合 DOM 影像进行详细校对和处理。

表3 研究区数据类别、数据名称与数据类型表

Tab. 3 Data categories, data labels, and data types

类别	数据名称	数据类型
基础分析数据	建筑分布图	矢量数据
	土地利用分布图	矢量数据
	重大危险源分布图	矢量数据
	地质灾害风险分区图	栅格数据 1 m×1 m
	洪水灾害风险分区图	栅格数据 1 m×1 m
道路网络数据	坡度图	栅格数据 1 m×1 m
	道路图	矢量数据
人口分布数据	人口分布图	矢量数据
应急公共	现状消防站点	矢量数据
设施数据	现状医疗站点	矢量数据

4 结果及分析

4.1 山地村镇设施用地适宜性评价

松柏镇作为神农架林区政治经济中心,具有一定建设基础,在进行应急公共设施区位优化时应考

考虑现状用地功能与分布,现状建设条件良好的居住用地、道路与水域之间的狭长绿地等场所,改造成为应急公共设施将有较大难度,因此对松柏镇用地类型属性进行初步筛选,以发展备用地、公共设施用地、空地、三类居住用地、绿地等性质用地为主,得到较容易改造成为应急公共设施的场地作为初步设施备选用地。以此叠加消防设施用地适宜性评价图(图2)和应急医疗救助中心用地适宜性评价图(图3),筛选位于中适宜区、较高适宜区及高适宜区的用地,转换为点,得到消防设施候选点及应急医疗救助中心候选点。

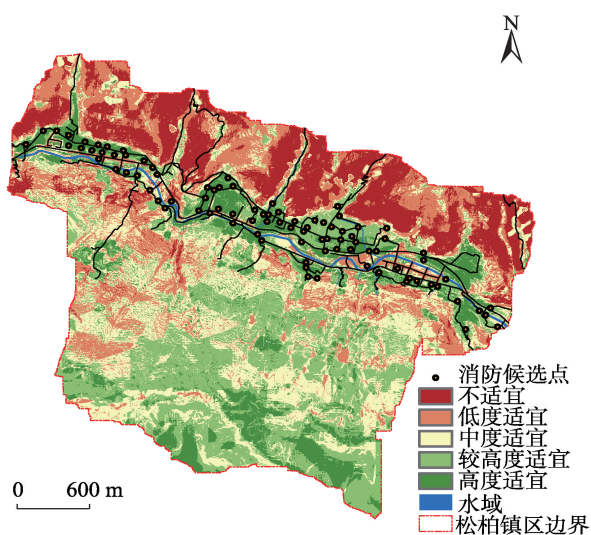


图2 松柏镇消防设施用地适宜性评价

Fig. 2 Suitability evaluation for fire stations

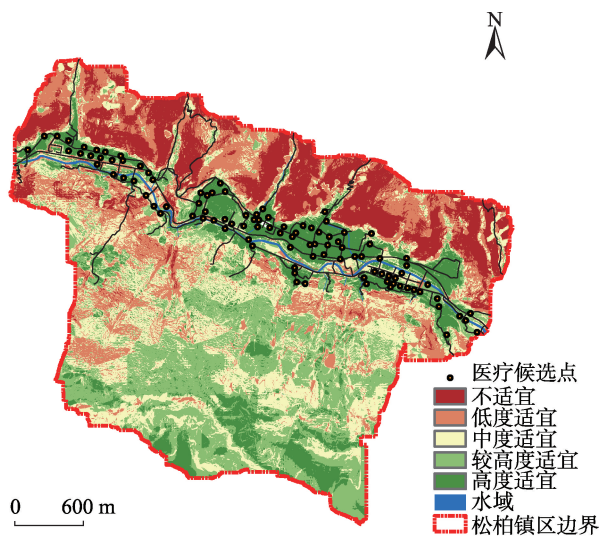


图3 松柏镇应急医疗救助中心用地适宜性评价

Fig. 3 Suitability evaluation for emergency medical centers

4.2 设施区位选择与优化

4.2.1 优化场景设置

对村镇而言,村镇建设运行缺少外部智力资源和公共财政支撑,应急公共设施建设基础普遍较为薄弱,存在建设数量不足、选址不合理、设备老旧等问题。选址模型需要对设施是否需要开放、是否需要关闭或是否需要新建进行评估^[37],因此在对设施备选点进行进一步量化优化时,可设定不同场景分别进行计算,对计算结果进行合理性评价,并结合实际情况调整选址方案。场景设置如下:①考虑建设成本问题,应急公共设施将在未来一定时间段内仍旧发挥作用,只对不能满足需求的区域配置设施。即必须保留现状设施点,在考虑现状设施空间位置的条件下增设新设施,以满足研究区的需求。在这一条件下可以使现状设施得到持续利用,从而减少重复建设带来的浪费;②不考虑成本问题,默认现状设施点设置不合理,现状设施应通过适当调整以满足村镇需求。在这一条件下,可能因重复建设造成浪费,从而增加成本。

应急公共设施是救灾的重要设施,在选址优化时应先分析应急设施的理想空间位置所需要的外部软硬件环境条件,明确在进行村镇应急设施选址布局时需要重点考虑的因素,主要包括以下4点:①服务质量因素。应急服务质量水平直接关系到人民的生命财产安全,主要体现在服务对象提出服务需求到需求得到满足的时间最小;②交通因素。应急设施的特点和应急管理特性,应急设施应设在有利于救援力量快速到达的交通便利地点;③经济因素。如何科学合理地根据已有的财政情况进行城市应急服务设施布局、管理和维护,是应急服务设施选址模型应考虑的主要问题之一;④安全性因素。应急设施在灾害发生时起到至关重要的作用,因此应满足安全的要求,一般包括周围环境的安全性和区域的交通安全等。

以本文构建的应急公共设施选址模型为基础,综合考虑服务质量因素、自然地理因素、经济因素以及安全性因素的原则,对应急消防设施和应急医疗救助中心进行配置,运算过程中消防设施设施点数目和覆盖的需求点数量及合理性评价指标统计结果见表4,应急医疗救助中心统计结果见表5。

4.2.2 应急消防设施选址优化结果

对消防设施,各选址方案与现状相比,在各个指标方面都有较大改善。

表4 消防设施选址方案合理性评价结果

Tab. 4 Comparison of fire station locations generated by the model

选址方案	设施数量	覆盖需求数	交叉覆盖率/%	最大时间/min	平均时间/min	覆盖人口占总人口比例/%	覆盖路径长度占总长度比例/%	覆盖建筑面积占总面积比例/%
选址方案1 (保留现状设施点)	2	210/215	70.6	4.3	1.6	97.1	95.4	96.9
选址方案2 (不保留现状设施点)	1	190/215	0	5.1	2.6	90.9	84.4	90.0
选址方案3 (不保留现状设施点)	2	215/215	74.3	4.9	1.5	96.9	95.4	96.7
现状	1	162/215	0	7.5	2.8	75.44	61.37	82.26

表5 应急医疗救助中心设施选址方案合理性评价结果

Tab. 5 Comparison of fire station locations generated by the model

选址方案	设施数量/个	覆盖需求数/个	交叉覆盖率/%	最大时间/min	平均时间/min	覆盖人口占总人口比例/%	覆盖道路长度占总长度比例/%	覆盖建筑面积占总面积比例/%
选址方案 (不保留现状设施点)	1	215/215	0	7.1	2.5	97.0	95.4	96.7
现状	2	215/215	97.2	6.6	2.3	97.0	96.2	96.9
妇幼保健院	1	215/215	0	6.6	2.5	96.9	96.0	95.7
第一人民医院	1	189/215	0	8.2	3.0	94.7	95.2	93.6

消防设施服务范围需覆盖整个镇区,根据现状消防站点评价结果,5 min 接警时间内覆盖人口比例75.4%,覆盖路径长度比例61.4%,覆盖建筑面积比例82.3%,难以满足消防需求。

根据模型的计算结果,无论是否保留现状设施,要满足所有需求点所需要的最小设施数均为2个,在设置1个消防设施的情况下,覆盖人口比例和覆盖建筑面积比例两项指标虽然在85%以上,但覆盖路径长度比例小于85%,而在最大时间、平均时间2项指标中,优化后的设施均优于现状设施,因此在设置1个消防设施时,优化后的消防设施能够更好地解决村镇火灾的消防需求。

设置2个消防设施时,对公平性指标来说,在保留现状设施的条件下,设施点到需求点的最大时间为4.3 min、平均时间为1.6 min,优于不保留现状设施的条件下最大时间4.9 min、平均时间1.5 min的结果。对于效率性指标来说,两种方案都有了大幅度提高,既表现出消防设施服务效率的提高,也显示出村镇安全性的增加,在不保留现状设施的条件下,覆盖人口比例为96.9%、覆盖道路比例为95.4%、覆盖建筑比例为96.7%,低于保留现状设施条件下覆盖人口比例97.1%、覆盖道路比例为95.4%、覆盖建筑比例为96.9%的情况。在各项指标说明就整体而言,保留现状设施条件下的优化效果更加明显。

在不保留现状设施的情况下,设置2个设施点无论在公平性指标还是效率性指标均优于1个设施点的方案。具体而言,设置2个设施点的方案中,覆盖路径比例为95.4%,比设置1个设施点84.4%的情况有较大提高,但在覆盖人口和覆盖建筑2项中,2个方案均在90%以上,差异不明显。对公平性指标,设置2个设施点时明显出现2个设施点交叉覆盖的情况,增加了服务的安全性,另一方面,需求点到最临近设施的最大时间为4.9 min,与1个设施点5.1 min相比相差不多,但平均时间为1.5 min,相比1个设施点的2.6 min有较大提高。因此,从指标方面反映,在不保留现状设施的条件下,设置2个设施点较为合理。

需要特别指出的是,消防设施的设置应当考虑其具体区位条件,既需要保证便捷的交通条件、便利的消防水源条件,也需要考虑其自身的安全,远离重大危险源,并结合经济性的原则,充分利用现有资源,因此,需要在模型计算结果的基础上,加以人工的判断,对选址方案进行进一步的优化和选择,结果如图4所示。

对保留现状设施条件下得到的场所(选址方案1)进行分析:

(1)设施点原用地类型为村庄建设用地,其服务范围主要为整个镇西区域,该区域主要以居住用地为主,包含少量工业用地,该设施点位于液化气

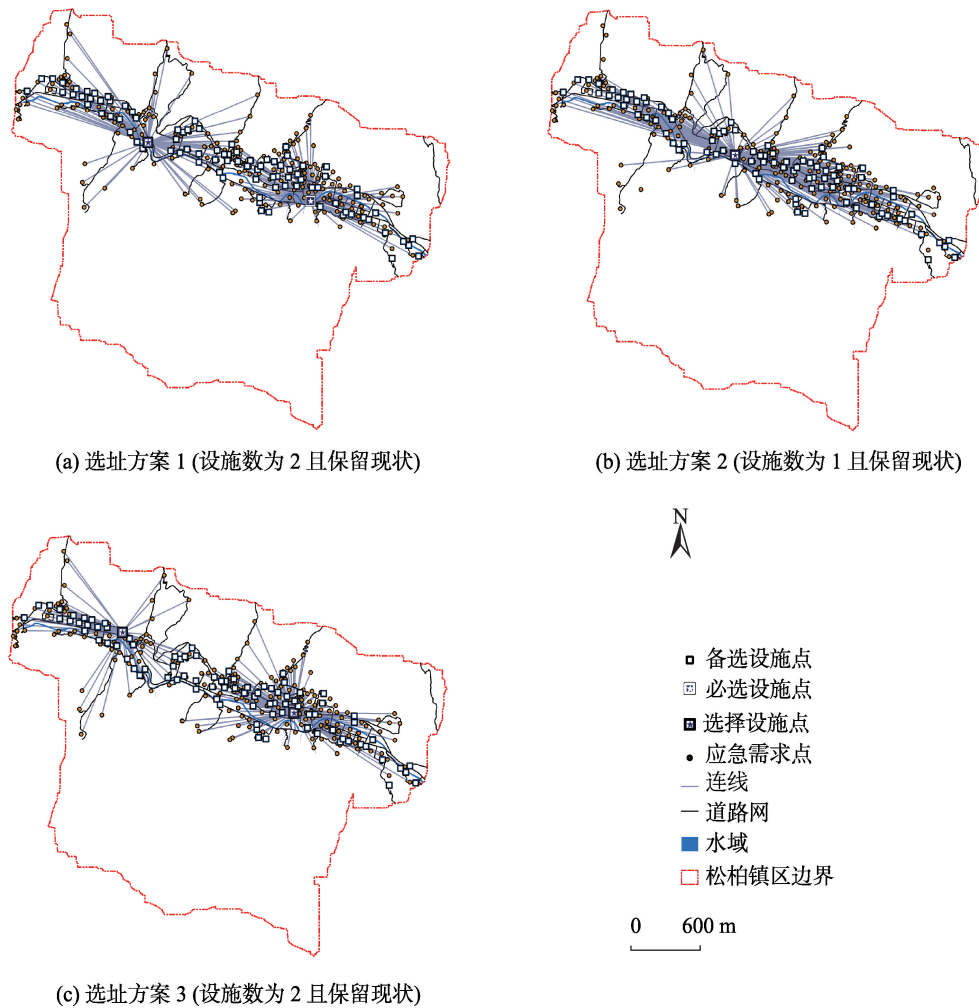


图4 松柏镇消防设施选址优化结果

Fig. 4 Comparison of fire station locations generated by the model

站、鞭炮工厂和加油站 3 个火灾危险源 300 m 辐射范围外,青杨河附近,周边仅与一条主干道相接,交通条件一般;

(2)设施点为现状消防站,服务范围为整个镇东区域,该区域是松柏镇经济行政中心,该设施点位于青杨河畔,可保留为消防设施用地。

对不保留现状设施条件下得到的场所(选址方案 3)进行分析:

(1)设施点原用地类型为发展备用地,其服务范围主要为整个镇西区域,该区域主要以居住用地为主,包含少量工业用地,该设施点位于液化气站、鞭炮工厂和加油站 3 个火灾危险源 300 m 辐射范围外,距离青杨河 100 m,交通条件良好,可作为消防设施用地之一;

(2)设施点原用地类型为行政办公用地,为神农架林区林业管理局,位于主次干道交叉口处,交通便利。

根据上述分析,保留现状设施条件下得到中的应急消防设施场所较为合理。

4.2.3 应急医疗救助中心选址优化结果

对应急医疗救助中心,现状两个可进行应急服务的设施已基本可以满足村镇的应急医疗服务需求,8 min 时间内覆盖人口占总人口比例、覆盖道路长度占总道路长度比例、覆盖建筑面积占总建筑面积比例均达到 95% 以上。

根据模型的计算结果,无论是否保留现状设施,要满足所有需求点所需要的最小设施数为 1 个,对保留现状设施的情况而言,即是从现状两个设施中选择一个重点配备应急医疗设施,以提高应急服务效率和质量。对现状两个设施分别进行分析,妇幼保健院在公平性指标及效率性中均优于松柏镇第一人民医院。公平性指标中,妇幼保健院设施点到需求点的最大时间为 6.6 min、平均时间为

2.5 min, 松柏镇第一人民医院到需求点最大时间为 8.2 min, 平均时间为 3.0 min, 也就是说, 松柏镇第一人民医院无法在 8 min 的应急响应时间内满足所有应急需求点的需求。效率性指标中, 妇幼保健院覆盖人口比例为 96.9%、覆盖道路比例为 96.0%、覆盖建筑比例为 95.7%, 略高于松柏镇第一人民医院的 94.7%、95.2% 和 93.6%。

对不保留现状设施的情况, 则是重新建设应急医疗救助中心。公平性指标中, 设施点到需求点的最大时间为 7.1 min、平均时间为 2.5 min, 均弱于保留现状设施的结果; 效率性指标中, 覆盖人口比例为 97.0%、覆盖道路比例为 95.4%、覆盖建筑比例为 96.7%。相比较而言, 在效率性指标相差不多的情况下, 保留现状设施得到的方案较为合适。对模型运算得到的场所进行分析, 结果如图 5 所示。

(1) 对神农架林区妇幼保健院, 位于镇区中部,

交通条件较好, 人口密度较高, 能在 8 min 应急响应时间内覆盖所有需求点, 就区位选择而言, 作为应急医疗救助中心较为合理。

(2) 对松柏镇第一人民医院, 位于镇区东部, 交通条件较好, 人口密度较高, 就区位而言, 相比妇幼保健院略差, 无法在 8 min 应急响应时间内覆盖所有需求点, 但其现实应急救援能力更强, 配备应急医疗救助设施成本更低效率更高, 综合而言, 作为应急医疗救助中心更为合理。

(3) 不保留现状设施条件下选取的应急医疗救助中心(选址方案)原为神农架林区农业局, 交通条件优于现状设施, 位于松柏镇行政中心, 需重新建设成为应急医疗救助中心。

因此, 考虑到经济性原则及现有医疗站点的分布, 可以将现有医疗点与应急医疗救助中心合并建设, 以现状松柏镇第一人民医院作为应急医疗救助

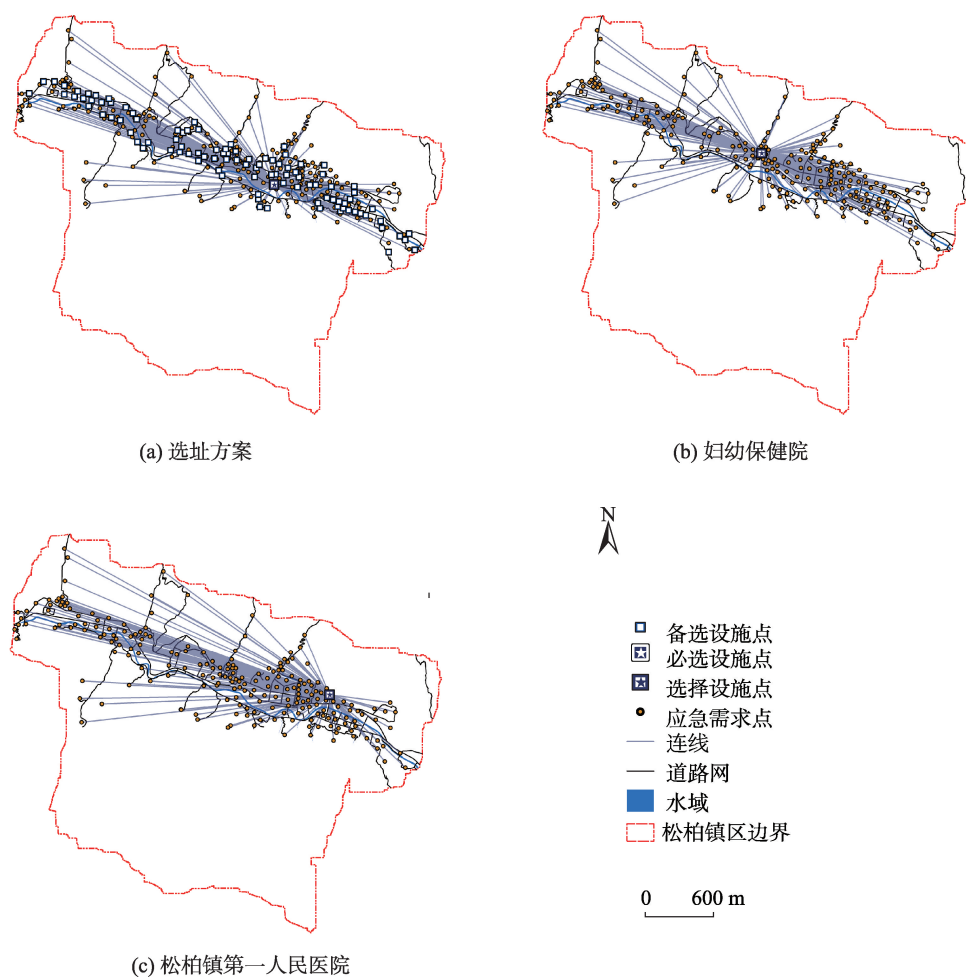


图5 松柏镇应急医疗救助中心设施选址优化结果

Fig. 5 Comparison of emergency medical center locations generated by the model

中心较为合理,但应疏通方案1周边交通条件以提高服务效率。

5 结论与讨论

本文根据应急公共设施需要承担的服务类型,分为需要承担应急服务和既需要承担应急服务又需要承担公共服务两类设施,分别建立选址模型,同时将模型应用于神农架林区松柏镇消防设施和应急医疗救助中心的布局研究,先对备用地按照进行用地适宜性评价进行初步筛选,然后基于ArcGIS平台进行进一步量化优化,最后将理论区位模型生成的多方案与原设施选址方案进行对比,结合人口分布和实际用地情况对得到的应急公共设施场所进行优化和调整,最终确定整个村镇应急避难场所的布局方案,验证了方法的可行性和科学性。研究方法和模型为山地村镇应急公共设施的区位选址研究提供了理论指导和模型参考。

在设施设备选点选取的过程中,以用地适宜性评价结果进行筛选,虽然能够筛选出综合条件较为符合应急公共设施建设要求的用地,但还应考虑到实际规划建设过程中设施布局的相关原则,例如,消防设施主体建筑应距离学校等公共建筑主入口50 m以上,并同时考虑与设施周边其他用地的协调。

在实际中,应急公共设施的布局受多种因素的影响,其中考虑的供给与需求之间的平衡是一个复杂的过程,每一类应急公共设施的需求都应进行详细分析,在实例研究中,本文以人口分布点作为应急消防设施和应急医疗救助中心的需求点,将村镇的消防需求和应急医疗需求简化,忽略实际火灾风险分布的差异和突发公共事件的医疗救援需求情况,这些问题有待在今后的研究中进一步深化。在供给方面,本文将所有设施备选点统一对待处理,而在实际建设中,还应考虑设施人力、物资等资源配置等级的不同和村镇财政资源的支持,区别对待。

在应急设施选址规划的决策中,通常要考虑包括经济性、效率性和环境等多种因素的影响,构成多层指标体系,对选址方案的综合评价,指导决策,本文以应急公共设施用地适宜性评价反映环境的影响,以合理性评价指标反映效率性影响因素,未来还应考虑关闭现有设施或重新择定应急公共设施的政策和经济可行性。

参考文献(References):

- [1] 葛学礼,朱立新,于文,等.山区村镇抗震、防洪建设与减灾对策[C].山地城镇可持续发展专家论坛,重庆,2012:213-219. [Ge X L, Zhu L X, Yu W, et al. Earthquake resistance, flood control construction and disaster reduction countermeasures for villages in Mountainous area[C]. Proceedings of the expert forum on sustainable development in mountainous cities and towns, Chongqing: 2012:213-219.]
- [2] 初建宇,苏幼坡.村镇应急避难场所规划技术指标的探讨[J].自然灾害学报,2012,21(5):23-27. [Chu J Y, Su Y P. Exploration of technical indexes for the planning of the emergency shelters in villages and small towns[J]. Journal of Natural Disasters, 2012,21(5):23-27.]
- [3] 葛学礼,李玉萍.村镇建设规划中综合防灾的宏观控制[J].中国减灾,1996(4):42-44. [Ge X L, Li Y P. Macro control of comprehensive disaster prevention in village and town construction planning[J]. Disaster Reduction in China, 1996(4):42-44.]
- [4] 张翰卿,戴慎志.美国的城市综合防灾规划及其启示[J].国际城市规划,2007,22(4):58-64. [Zhang H Q, Dai S Z. Urban comprehensive disaster prevention plan in America and its enlightenment[J]. Urban Planning International, 2007(4):58-64.]
- [5] 王江波,戴慎志,苟爱萍.试论城市综合防灾规划的困境与出路[J].城市规划,2012,36(11):39-44. [Wang J B, Dai S Z, Gou A P. Exploration on the problems and solutions of urban comprehensive disaster prevention planning[J]. Urban Planning, 2012,36(11):39-44.]
- [6] Hakimi S L. Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems[J]. Operations Research, 1965,13(3):462-475.
- [7] Revelle C S, Swain R W. Central facilities location[J]. Geographical Analysis, 1970,2(1):30-42.
- [8] Toregas C, Swain R, ReVelle C, et al. The location of emergency service facilities[J]. Operations Research, 1971,19(6):1363-1373.
- [9] L. Church R, R. VELLE C. The planar maximal covering location problem[J]. Papers in Regional Science, 2005,32(1):101-118.
- [10] Badri M A, Mortagy A K, Alsayed C A. A multi-objective model for locating fire stations[J]. European Journal of Operational Research, 1998,110(2):243-260.
- [11] 徐志胜,龚啸.基于多目标模糊优选理论的城市消防站选址研究[J].中国公共安全(学术版),2003,37(1):59-61. [Xu Z S, Gong X. Study on location selection of urban fire station based on multi-objective fuzzy optimization theory[J]. China Public Security (Academic Edition), 2007,3(1):59-61.]
- [12] Araz C, Selim H, Ozkarahan I. A fuzzy multi-objective covering-based vehicle location model for emergency services[J]. Computers & Operations Research, 2007,34(3):705-726.
- [13] 王铮,廖悲雨,隋文娟.层次型应急设施布局模型及其应

- 用[J].中国管理科学,2011,19(6):88-91. [Wang Z, Liao B Y, Sui W J. Hierarchical emergency facility location model and its application[J]. Chinese Journal of Management Science, 2011,19(6):88-91.]
- [14] 陈志宗,尤建新.城市防灾减灾设施的层级选址问题建模[J].自然灾害学报,2005,14(2):131-135. [Chen Z Z, You J X. A modeling approach to hierarchical location problem of urban disaster prevention and mitigation facilities[J]. Journal of Natural Disasters, 2005,14(2):131-135.]
- [15] Rawls C G, Turnquist M A. Pre-positioning of emergency supplies for disaster response[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010,44(4):521-534.
- [16] 徐志胜,冯凯,徐亮,等.基于GIS的城市公共安全应急决策支持系统的研究[J].安全与环境学报,2004,4(6):82-85. [Xu Z S, Feng K, Xu L, et al. A study on emergency decision support system of urban community safety based on GIS[J]. Journal of Safety and Environment, 2004,4(6): 82-85.]
- [17] 吴美文,吴军,胡传平.城市消防站布局评估指标量化分析[J].自然灾害学报,2006,15(5):162-167. [Wu M W, Wu J, Hu C P. Quantitative analysis of evaluation indexes about layout of fire station in a city[J]. Journal of Natural Disasters, 2006,15(5):162-167.]
- [18] 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. [Liu S L, Lu Y Q, Gu X P, et al. Reasonability of Spatial Distribution for Urban Emergency Shelter[J]. Urban Studies, 2012,19(3):113-117.]
- [19] Chanta S, Mayorga M E, McLay L A. Improving emergency service in rural areas: A bi-objective covering location model for EMS systems[J]. Annals of Operations Research, 2014,221(1):133-159.
- [20] 陈昭,陶满德,李志.基于GIS的消防站点规划方案综合性研究-以杭州市主城区为例[J].城乡规划:城市地理学术版,2016(3):39-44. [Chen Z, Tao M D, Li Z. Comprehensive research on fire station planning scheme based on GIS-a case study of Hangzhou downtown[J]. Urban and Rural Planning: Academic edition of Urban geography, 2016(3):39-44.]
- [21] 钮英建,杨玲.北京地区村镇建筑防火现状调查与分析[J].中国安全生产科学技术,2011,7(10):138-142. [Niu Y J, Yang L. Investigation and analysis on current situation of fire protection in rural areas of Beijing[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011,7(10):138-142.]
- [22] 周国强.农村减灾综合对策初探[J].中国减灾,2006(12):36-37. [Zhou G Q. Preliminary study on comprehensive strategies of rural disaster reduction[J]. Disaster Reduction In China, 2006(12):36-37.]
- [23] 任航,李宏男.我国村镇建筑防灾减灾问题与对策研究[J].工程管理学报,2010,24(5):508-512. [Ren H, Li H N. Research on problems and strategies of disaster prevention and mitigation for rural buildings in China[J]. Journal of Engineering Management, 2010,24(5):508-512.]
- [24] 冯凯,黄豪,徐志胜.农村消防安全规划的关键问题及对策研究[C].第十届中国科协年会,中国河南郑州,2008:298-301. [Feng K, Huang H, Xu Z S. Study on the key problems and strategies of rural Fire safety planning[C]. The Tenth Annual China Science and Science Association Conference, Zhengzhou, Henan, 2008:298-301.]
- [25] 楚志勇,侯遵泽.基于Dijkstra算法的乡镇消防站选址问题[J].中国安全生产科学技术,2011,7(2):115-118. [Chu Z Y, Hou Z Z. Site choice of township fire station based on Dijkstra algorithm[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011,7(2):115-118.]
- [26] 崔刚.农村消防站配置与布局分析[C].2014中国消防协会科学技术年会,中国北京,2014:117-121. [Cui G. Analysis on configuration and layout of rural fire station[C]. 2014 China Fire Association Science and Technology Annual conference, Beijing, 2014:117-121.]
- [27] 王飞飞,侯云先.复杂地形乡镇地区应急设施选址研究[J].中国安全科学学报,2016,26(2):164-167. [Wang F F, Hou Y X. Research on sitting of emergency facilities for rural area with complex topography[J]. China Safety Science Journal, 2016,26(2):164-167.]
- [28] Goldberg J B. Operations research models for the deployment of emergency services vehicles[J]. Ems Management Journal, 2004,1(1):20-39.
- [29] Church R, Reville C. The maximal covering location problem[J]. Papers of the Regional Science Association, 1974,32(1):101-118.
- [30] Roth R. Computer Solutions to Minimum-Cover Problems[J]. Operations Research, 1969,17(3):455-465.
- [31] Toregas C, Swain R, Reville C, et al. The location of emergency service facilities[J]. Operations Research, 1971,19(6):1363-1373.
- [32] Church R L, Reville C S. Theoretical and computational links between the p-median, location set-covering, and the maximal covering location problem[J]. Geographical Analysis, 1976,8(4):406-415.
- [33] Owen S H, Daskin M S. Strategic facility location: A review[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 111(3):423-447.
- [34] 住房和城乡建设部,国家发展改革委.建标152-2017城市消防站建设标准[S]. 2017-3-17.
- [35] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会. GB/T 35547-2017 乡镇消防队[S]. 2017-12-29.
- [36] Hogg J M. The siting of fire stations[J]. Journal of the Operational Research Society, 1968,19(3):275-287.
- [37] Kolli S S, Damodaran P S, Evans G W. Geographic information system based decision support systems for facility location, routing, and scheduling[J]. Computers & Industrial Engineering, 1993,25(1):369-372.