引文格式:张广利,连晨晨,孔云峰,等.应用均等分区模型实现全员应急检测任务划片[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(3):596-602.DOI:10.13203/j.whugis20220222
Citation:ZHANG Guangli,LIAN Chenchen,KONG Yunfeng,et al.Equal Districting for Emergency Planning of Citywide Emergency Test[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(3):596-602.DOI:10.13203/j.whugis20220222

应用均等分区模型实现全员应急检测任务划片

张广利[1] 连晨晨[1] 孔云峰[1,2] 翟石艳[1,2] 郭 浩[1]
1 河南大学地理与环境学院,河南 开封,475004
2 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室,河南 开封,475000

摘 要:突发公共卫生事件中的全员应急检测是落实动态清零的关键环节,通常采用分片包干的形式组织实施。而全员应急检测具有任务繁重、时间紧急和专业人员短缺等特点,且存在人员聚集风险。因此,以医护人员工作量均等、居民方便参与、减少人员流动为目标,使用均等分区模型解决服务划片问题,为快速有效地完成应急检测任务提供保障。以中国河南省郑州市丰庆路街道和金水区两个尺度的区域为例,验证了基于均等分区模型进行服务划片的可行性和优势。结果表明,所提模型能够有效划定服务区域,且在责任区的平等性和服务空间可达性方面均优于现有规划。均等分区模型不需要遴选候选设施区位,根据人力资源确定分片数量,适合分片包干类型的应急服务规划,具有较高的实用价值。

关键词:突发公共卫生事件;应急规划;均等分区;全员应急检测
中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-10-12
DOI:10.13203/j.whugis20220222 **文章编号**:1671-8860(2025)03-0596-07

Equal Districting for Emergency Planning of Citywide Emergency Test

ZHANG Guangli[1] *LIAN Chenchen*[1] *KONG Yunfeng*[1,2] *ZHAI Shiyan*[1,2] *GUO Hao*[1]
1 College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China
2 Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions of Ministry of Education, Henan University, Kaifeng 475000, China

Abstract: **Objectives**: The citywide emergency test is widely used to identify all the infected persons, and thus contributes to realize "dynamic zero" during the public health emergency. Citywide emergency test is usually implemented by assigning nurses and material resources to the service areas. However, citywide emergency test is often characterized by the extremely heavy task covering millions of residents, the very limited time such as within one day or even 6 hours, and the shortage of nurses, laboratory professionals and equipment. It is also a possible risk factor that causes infectious disease. Therefore, the design of the service areas is crucial for successful citywide emergency test. **Methods**: This paper proposes the equal districting model to design the equal, compact and contiguous areas as service areas for emergency test. The proposed model is tested in two urban areas in different scales, which are Fengqing road subdistrict and Jinshui district in Zhengzhou, Henan Province, China. **Results**: The results show that the service areas can be effectively delineated, and are much better than the existing planning models in terms of the equality of responsibility districts and the spatial accessibility of service. **Conclusions**: Since the delineation of service areas does not depend on the candidate locations that used in classical location models, the proposed equal districting approach has application potentials in some scenarios of emergency planning.

Key words: public health emergency; emergency planning; equal districting; citywide emergency test

突发公共卫生事件中的全员应急检测是快 速实现动态清零的关键环节之一,要求在短时间

基金项目:国家自然科学基金(41871307)。
第一作者:张广利,博士,研究方向为空间优化。glzhang611@henu.edu.cn
通讯作者:孔云峰,博士,教授。yfkong@henu.edu.cn

内快速完成某个区域的筛查检测任务,往往具有任务繁重、时间紧急、医护人员短缺等特点,同时也存在着人员聚集的风险。全员应急检测采用分片包干的方式组织实施,虽具有实用性,但在应用中也存在一些挑战,如何划片能够保证检测人员任务均等、居民方便参与,以及减少人员流动等。

全员应急检测属于应急服务范畴。国内外学者自20世纪60年代就开始关注应急服务设施布局规划[1]。常见的应急服务设施选址包括应急避难所、紧急医疗救护站和消防站等的选址。应急避难所选址问题是在突发公共事件(自然、事故、公共卫生、社会安全等)时,在较短时间内将尽可能多的人撤离到较近相对安全的地方,通常需要考虑应急逃生距离(时间)、避难所的覆盖范围和避难所的人口容量等[2-5];紧急医疗救护站选址问题是伤病者在急病或意外发生时,救护站迅速做出响应,保证病人生命安全,通常考虑服务的人口数、响应的时间、救护站的建设成本等[6-8];消防站选址问题是在发生火灾或紧急情况时,消防队员能迅速做出反应,保障人民的生命和财产安全,应考虑消防站的覆盖范围、消防站距着火点或事故中心的距离或时间等[9-12]。

在诸多应急设施布局规划模型中,常用的模型有集合覆盖区位问题(set covering location problem,SCLP)[13]、最大覆盖区位问题(maximal covering location problem,MCLP)[14]、P中值问题(P-median problem,PMP)[15]、P中心问题(P-center problem,PCP)[16]、容量约束的设施区位问题(capacity facility location problem,CFLP)[17]等。SCLP是给定服务半径、寻求覆盖所有需求点的设施,目标是设施数量最少或成本最低;MCLP是给定服务半径、选择P个设施,目标是设施覆盖的需求量最大;PMP是设置P个设施,使需求点到设施点的总距离或成本最低;PCP是设置P个设施,最小化需求与设施间的最大距离;CFLP是不给定设施数量,寻求设施成本和距离成本最低的设施区位。应急服务设施布局规划模型的求解方法多种多样,大致分为精确算法(如分支定界、分支切割)[18-19]、基于局部搜索的启发式算法(如模拟退火、可变邻域搜索)[20-21]、基于群智能的启发式算法(如蚁群优化、粒子群优化)[22-23]、基于生物演化的启发式算法(如遗传算法、差分进化算法)[24-25],以及这些算法组合的混合算法[26]。在实际应用中,上述算法需要事先确定需求区位并估算需求量,遴选符合标准的候选设施,并通过灾害应急预案验证设施规划的可行性。全员应急检测时间要求往往比较紧急,而遴选候选区位工作量很大,使用这些模型难以快速完成采样服务规划。

均等分区是将特定地理空间划分为若干区域并要求分区单元空间连续、各个分区人口数量或任务量均等、几何形状紧凑。选区划分、销售区、警察巡逻区等问题均为常见的均等分区问题。选区划分问题是遵循法律要求,基于人口统计基本单元将一个区域划分为若干选区,在选区中进行选举活动[27];销售区划分问题是企业将其市场区域划分为若干分区,指派一个雇员或一个团队负责一个区域进行产品销售或客户服务,从而合理、高效地进行企业运作管理[28];类似地,警察巡逻区划分要求分区的巡逻任务量均等,并考虑分区紧凑和空间连续,从而提高巡逻效率[29]。

求解分区问题的主流算法包括精确算法和启发式算法[20]。因分区问题是NP-Hard(nondeterministic polynominal hard)问题[30],数学模型求解能力有限。因此,分区问题多采用元启发算法进行求解,如基于邻域搜索的贪婪、模拟退火、禁忌搜索和动态门槛算法[31],基于自然进化的遗传、演化、分散搜索、智能蜂群算法[32]。文献[33]提出了一个均等分区问题混合算法,求解质量高,能够高效求解大规模实例,但该均等分区模型适用于对区位条件要求不高的应急服务规划,没有提供实际的应用案例。本文尝试利用均等分区模型进行全员采样片区划分,为采样工作顺利实施提供保障。以郑州市区县和街道两个尺度的区域为例,将均等分区应用于实际案例,验证了模型的可用性。

1　均等划片原理与方法

根据全员应急检测组织实施指南,可将全员应急检测工作划分为划定检测范围、测算工作量、组织人力与物资、区域均等划片、片区现场采样和后续实验室检测等工作。主管部门根据辖区形势确定检测地理范围,根据检测范围内人口分布计算检测任务量,调配采样人员及所需物资,使得每个工作组承包一个区域进行采样。区域划片是分片包干的难点之一,要求每个片区工作量均等、尽可能连续,且方便居民参与采样。划片工作完成之后,根据片区情况,在片区内部设置一个或多个采样点。

综上,本文将全员应急检测服务区划片定义如下:根据突发公共卫生事件状况,确定全员应急检测区域范围,如市区、街道办、县域或某一边界明确的区域;根据任务量测算,将医护人员均等划分为P个小组,检测区域划分为P个任务均等区域,每个小组承包一个区域。分区的基本要求如下:(1)分区内工作量均等,即将检测任务均匀地划分为P份;(2)分区空间连续,即每个服务区域空间连续,便于发布通知、上门服务等,也保证检测区域无遗漏;(3)分区形状紧凑,一方面减少居民到达服务站的步行距离,另一方面减少人员流动,避免与居住较远的居民聚集在一起,降低聚集性感染的风险。

根据划片原理与定义,文献[33]均等分区模型可用于全员应急检测划片。令U表示空间单元集合,$U=\{1,2,\cdots,m\}$表示包含m个空间单元,p_i表示空间单元i的人口数量;c_{ij}、d_{ij}分别表示空间单元i和j是否邻接(有公共边)、单元之间的距离;集合N_i表示空间单元i的相邻单元,即$N_i=\{j,\forall j\in U,c_{ij}=1\}$。将$U$划分为$K$个子集(即$K$个分区单元),记为集合$T=\{t_1,t_2,\cdots,t_K\}$。决策变量$x_{ik}$表示单元$i$是否属于分区$k$,如果是则取值为1,否则为0;$y_k$表示单元$k$是否为分区中心,如果是则取值为1,否则为0;$f_{ijk}$表示分区$k$中单元$i$流向相邻单元$j$的流量。将紧凑度作为目标,约束条件为分区均等和空间连续,构建如下模型:

$$\text{Min.}\sum_{i\in U}\sum_{k\in U}p_i d_{ik}x_{ik}/\sum_{i\in U}p_i \tag{1}$$

$$\text{s.t.}\sum_{k\in U}x_{ik}=1,\forall i\in U \tag{2}$$

$$(1-\varepsilon)\bar{Q}y_k\leqslant\sum_{i\in U}p_i x_{ik}\leqslant(1+\varepsilon)\bar{Q}y_k,\forall k\in U \tag{3}$$

$$\sum_{k\in U}y_k=K \tag{4}$$

$$f_{ijk}\leqslant(m-K)x_{ik},\forall i\in U,j\in N_i,k\in U \tag{5}$$

$$f_{ijk}\leqslant(m-K)x_{jk},\forall i\in U,j\in N_i,k\in U \tag{6}$$

$$\sum_{j\in N_i}f_{ijk}-\sum_{j\in N_i}f_{jik}\geqslant x_{ik},\forall i\in U,k\in U,i\neq k \tag{7}$$

$$x_{ik}\in\{0,1\},\forall i\in U,k\in U \tag{8}$$

$$y_k\in\{0,1\},\forall k\in U \tag{9}$$

$$f_{ijk}\geqslant 0,\forall i\in U,j\in N_i,k\in U \tag{10}$$

模型中,式(1)为紧凑度目标函数,即区域内居民到达其分区中心的平均距离最小,分子部分表示所有单元与其分区中心的加权距离,分母部分表示地理区域内的总人口或总任务数量,商为平均距离;约束条件式(2)保证每个单元必需划分在一个分区中;约束条件式(3)要求分区的人口或任务量在一定误差内均等,其中$\bar{Q}=\sum_{i\in U}p_i/K$为人口或任务量平均值,$\varepsilon$为限差,根据实际需求取值,如5%、10%或其他值;约束条件式(4)要求分区数量为K;约束条件式(5)~式(7)是分区空间连续约束条件,其中式(5)和式(6)确保属于同一个分区的两个相邻单元间才可能产生流,式(5)~式(7)使每一个分区中的产流汇集到中心单元;约束条件式(8)~式(10)为定义决策变量。

本文采用基于迭代局部搜索(iterated local search,ILS)的混合算法[33]求解均等检测服务区划分问题。该算法是从一个初始解开始,迭代地进行当前扰动和局部搜索。为了提升优化性能,该算法对基本的ILS算法进行了扩展,将单解搜索改进为群解搜索,使用变邻域下降(variable neighborhood descent,VND)搜索取代简单的局部搜索,从已搜索分区中选择更优的分区[33]。具体步骤如下:

1)利用加权K-medoids算法生成一组初始解。随机选择K个空间单元作为分区中心,迭代进行加权指派和中心点更新,直到满足终止条件。检查分区是否保持空间连续,若不满足,需要修复确保其空间连续。

2)迭代地改进分区方案,包括从群解中选择一个解、对当前解进行扰动、变邻域下降搜索、更新分区中心点。在更新群解时,应维护一组具有差异度的精英解。另外,需要记录所有的分区方案,在局部搜索完成后,尝试使用集合划分方法从记录的分区中选择更优的分区方案。解扰动、邻域搜索操作均需要保持分区空间连续。步骤细节参见文献[33]。

所提算法的软件工具可从网页(https://github.com/yfkong/PDP)下载。软件工具使用步骤如下:在ArcGIS中准备研究区图层,图层包括基本面空间单元,属性包括人口;在图层中增加两个字段,计算空间单元的中心点坐标,存储在新字段中;导出图层属性数据,包括空间单元ID、人口数量和坐标;使用ArcGIS中的polygon neighbors工具确定每个空间单元的相邻单元,即模型中的集合N_i。算法使用单元数据和邻接关系数据文件进行分区,最终输出分区结果。

2 案例研究

2.1 研究区

本文选取中国河南省郑州市金水区为研究

区,面积为242 km^2,包含24个街道,其中丰庆路街道面积为12 km^2,研究区如图1所示。金水区和丰庆路街道分别代表两个不同尺度的区域,两个区域分别包含2 642个和201个居民区,人口数量差异很大,采用文献[34]所提方法估算居民人口数量,两个区域分别有200.32万人、22.04万人。

2022年1月上旬,郑州市完成了多轮全员应急检测,共投入3.3万余名采样人员,设置了6 184个采样点,要求在6 h内完成1 260万人的采样。本文利用高德地图地理编码确定采样位置,丰庆路街道采样点有38个(图1(a)),金水区采样点共有472个(图1(b))。从空间分布来看,丰庆路街道和金水区的采样点相对均匀,人口密集的区域采样点相对较多,人口稀疏的区域采样点相对较少。但也有部分地区存在人口分布较多而采样点少的情况,如丰庆路街道的北部和金水区的东北部和东南部。

本文在上述两个区域进行采样分区实验,并与郑州市公布的采样方案进行比较。首先,在ArcGIS中准备案例数据,包括居民区及其人口数量p_i、居民区邻接关系c_{ij}和距离d_{ij}(以空间单元中心点为基准)。然后,在PyPy7(https://www.pypy.org)中运行分区算法,计算环境为配置Intel Core I5-10500 CPU、16 GB RAM和Windows 10操作系统桌面计算机。最后,设置规划参数ε为10%,保证每个片区的人口规模与均值的差异不超过10%。

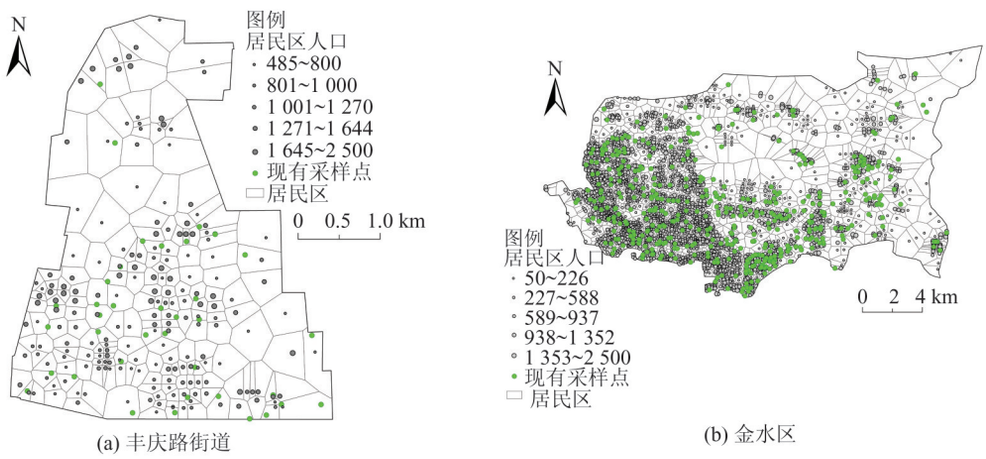


图1　研究区示意图

Fig. 1　Diagram of the Study Area

2.2　分区结果

当分区数量为15~40时,丰庆路街道均等分区结果见表1,部分分区示意图如图2所示。表1中列出了居民到达分区中心的平均距离、最小片区人口数、最大片区人口数、片区人口与均值的平均偏差及计算时间。由表1可以看出,分区大小均符合参数设计要求,片区人口与均值的平均偏差为3.94%~6.91%,各采样小组工作量相对均衡;居民到达分区中心的平均距离为147~232 m,表明居民可以快捷地到达采样点,且平均距离随着分区数量增加而不断减小;算法计算时间较短,1.76~5.05 s即可完成分区。

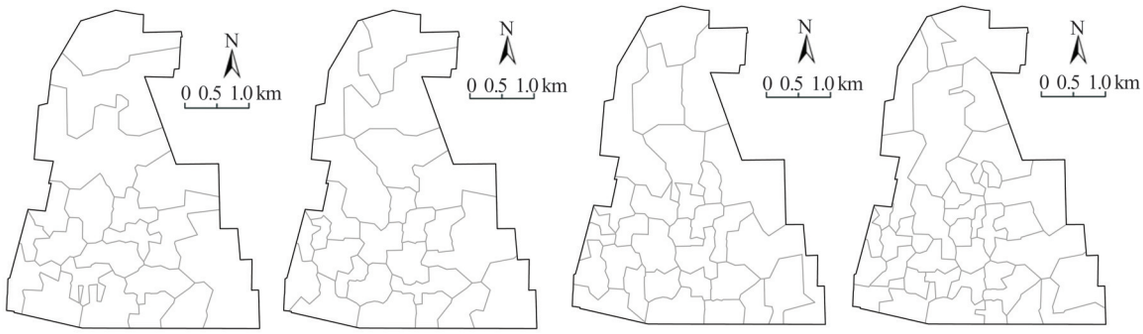
本文的丰庆路街道均等分区结果优于2022年1月上旬郑州市发布的采样方案。统计该方案中丰庆路街道所有居民按照就近原则到设置的38个采样点的相关数据,对比可知:采样点服务人口为537~24 884人,人口数量差异巨大;居民到最近采样点的平均距离为204.71 m,显著大于均等分区数量为38时的平均距离(162.61 m)。因此,采用均等划片可使采样人员的任务量较为均衡,且居民到采样点的平均距离显著降低。

表1　丰庆路街道均等分区结果

Table 1　Statistics of Solutions in Fengqing Road Subdistrict

分区数量	平均距离/m	最小片区人口数	最大片区人口数	平均偏差/%	计算时间/s
15	232.28	13 231	16 081	6.03	2.40
20	231.98	9 968	12 067	6.91	2.50
25	183.66	8 086	9 670	5.00	1.76
30	175.33	6 707	8 076	4.44	3.96
35	167.79	5 676	6 916	4.50	4.58
38	162.61	5 230	6 354	3.94	4.69
40	147.97	5 000	6 034	4.68	5.05

当分区数量在440~480时,金水区均等划片结果见表2,部分分区示意图如图3所示。由表2可知,分区大小均符合参数设计要求,平均偏差



(a) 分区数量为20 (b) 分区数量为25 (c) 分区数量为30 (d) 分区数量为38

图2 丰庆路街道均等分区部分示意图

Fig. 2 Equal Districting Results in Fengqing Road Subdistrict

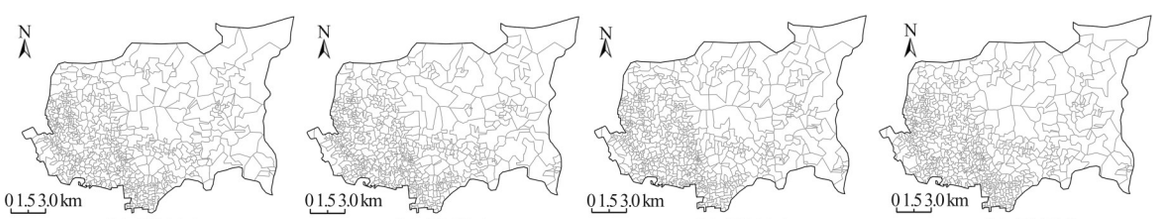
表2 金水区均等分区结果

Table 2 Statistics of Solutions in Jinshui District

分区数量	平均距离/m	最小片区人口数	最大片区人口数	平均偏差/%	计算时间/s
400	195.82	4 374	6 000	4.94	835.94
410	187.91	4 000	5 808	5.29	860.80
420	187.92	4 000	6 000	5.68	699.65
430	186.34	3 800	5 258	5.44	859.48
440	181.95	3 800	5 310	5.43	835.94
450	172.19	3 734	5 048	5.09	940.77
460	168.63	3 528	5 285	4.62	821.54
470	167.47	3 256	5 050	4.65	620.80
472	166.78	3 231	5 000	5.41	870.88
480	164.49	3 500	5 048	5.40	960.43

为4.62%～5.68%,各采样小组工作量相对均衡;居民到达分区中心的平均距离为164～195 m,表明居民可以快速到达采样点,且平均距离随着分区数量增加而不断减小;需要10～16 min完成分区,计算时间可以接受。

本文金水区均等分区结果优于郑州市发布的采样方案。统计该方案中金水区所有居民按照就近原则到设置的472个采样点的相关数据,对比可知:采样点服务人口为64～32 637,差异巨大;居民到最近采样点的平均距离为235.17 m,显著大于均等分区数量为472时的平均距离(166.78 m)。采用均等划片可使采样人员的任务量较为均衡,且居民到采样点的平均距离显著降低。



(a) 分区数量为400 (b) 分区数量为450 (c) 分区数量为472 (d) 分区数量为480

图3 金水区均等分区部分示意图

Fig. 3 Equal Districting Results in Jinshui District

实验结果表明,均等分区有利于全员采样分片包干政策的落实:(1)郑州市采样方案中公布了检测位置,但未明确其服务范围,而均等分区有明确的划片边界。(2)采样方案中公布的采样点,其采样人员的配置数量和工作量未知,而依据均等分区方案,各个采样点人员的工作量较为均匀,既有利于采样人员公平,也避免了个别区域检测时间过长。(3)均等分区能缩短居民到采样点的距离,方便居民参与采样,也相对地减少较远小区居民产生聚集的机会。(4)采样点对于场地要求不高,可以根据片区形状、人口、场地条件,在包干片区内设置1个或多个采样点,这种先划片、再定点的规划模式比传统的先定点、再划片模式更易于操作,特别适宜于紧急状态下的应急服务规划。

3 结 语

基于突发公共卫生事件中全员应急检测的实践经验,本文提出了先均等划片、再片内布点的应急管理方案。郑州市丰庆路街道、金水区两个案例区的实验结果表明:(1)均等分区模型能合理划分人口数量相对均匀的片区,从而使采样人员的工作量相对均等,有利于快速完成检测任

务;(2)所提模型的分区紧凑原则能够有效缩短居民到达采样点的步行距离,也有利于减少居民远距离流动,一定程度地降低人员聚集的风险;(3)均等分区模型空间连续,既保证检测区域全覆盖无遗漏,也便于认定责任区和采样实施。

与其他基于区位问题的应急管理方案相比,均等分区模型在全员应急检测管理中具有明显优势。首先,传统的应急服务规划需要遴选候选设施,确定P值和设施容量等,工作耗时耗力;而均等分区不需要事先遴选候选设施,分区完成后在片区内部选择1个或多个设施点,因采样点对场地要求不高,工作容易实现。其次,区位问题的计算复杂度很高,计算时间难以保证应急需求;均等分区算法相对高效,有利于快速完成服务布局规划。

本文方法为分片包干的传统智慧提供了技术解决方案,在应急管理、城市管理、社区管理等领域中具有应用潜力。除了选区划分、销售区、警察巡逻区等经典应用,还适用于突发公共卫生事件期间的药物配送和生活物资配送、城市管理中的责任区划分等。同时也应注意本案例有一定的局限性,因居民人口数据不准确,服务规划方案中的数据指标存在一定的误差,可能与实际情况不一致。在实际工作中,应当使用政府部门拥有的翔实可靠的人口、居住小区、社区等数据。

参 考 文 献

[1] YANIK S, BOZKAYA B. A Review of Districting Problems in Health Care[M]//International Series in Operations Research & Management Science. Cham: Springer, 2020: 31-55.

[2] 於家, 温家洪, 陈芸, 等. 基于应急疏散智能体模型模拟的城市避难所空间配置: 以上海市静安区为例[J]. 地理学报, 2017, 72(8): 1458-1475.
YU Jia, WEN Jiahong, CHEN Yun, et al. Spatial Configuration of Urban Shelters Based on Simulation Using Emergency Evacuation Agent-Based Model: A Case Study in Jing'an District, Shanghai[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1458-1475.

[3] TRIVEDI A, SINGH A. A Hybrid Multi-Objective Decision Model for Emergency Shelter Location-Relocation Projects Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Goal Programming Approach[J]. *International Journal of Project Management*, 2017, 35(5): 827-840.

[4] 卢永华, 李爽. 改进G2SFCA的深圳市室内应急避难场所空间可达性研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1391-1398.
LU Yonghua, LI Shuang. Spatial Accessibility of Indoor Emergency Shelters Based on Improved G2SFCA in Shenzhen City[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1391-1398.

[5] WEI L, LI W P, LI K L, et al. Decision Support for Urban Shelter Locations Based on Covering Model[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 43: 59-64.

[6] TASSONE J, CHOUDHURY S. A Comprehensive Survey on the Ambulance Routing and Location Problems[EB/OL]. [2020-05-28]. https://arxiv.org/abs/2001.05288v1.

[7] LEKNES H, AARTUN E S, ANDERSSON H, et al. Strategic Ambulance Location for Heterogeneous Regions[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 260(1): 122-133.

[8] SCHMID V, DOERNER K F. Ambulance Location and Relocation Problems with Time-Dependent Travel Times[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 207(3): 1293-1303.

[9] YAO J, ZHANG X X, MURRAY A T. Location Optimization of Urban Fire Stations: Access and Service Coverage[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 73: 184-190.

[10] YANG L L, JONES B F, YANG S H. A Fuzzy Multi-Objective Programming for Optimization of Fire Station Locations Through Genetic Algorithms[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 181(2): 903-915.

[11] SAVSAR M. Fire Station Location Analysis in a Metropolitan Area[J]. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2014, 16(3): 365.

[12] AKTAŞ E, ÖZAYDıN Ö, BOZKAYA B, et al. Optimizing Fire Station Locations for the Istanbul Metropolitan Municipality[J]. *Interfaces*, 2013, 43(3): 240-255.

[13] TOREGAS C, SWAIN R, REVELLE C, et al. The Location of Emergency Service Facilities[J]. *Operations Research*, 1971, 19(6): 1363-1373.

[14] CHURCH R, VELLE C R. The Maximal Covering Location Problem[J]. *Papers in Regional Science*, 1974, 32(1): 101-118.

[15] HAKIMI S L. Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph[J]. *Operations Research*, 1964, 12(3): 450-459.

[16] HAKIMI S L. Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Network and some Re-

lated Graph Theoretic Problems[J]. *Operations Research*, 1965, 13(3): 462-475.

[17] KONG Y F. A Matheuristic Algorithm for the Single-Source Capacitated Facility Location Problem and Its Variants[EB/OL]. [2021-11-02]. https://arxiv.org/abs/2112.12974v1.

[18] SITEPU R, PUSPITA F M, ROMELDA S, et al. Set Covering Models in Optimizing the Emergency Unit Location of Health Facility in Palembang [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1282(1): 012008.

[19] DENG X C. Location-Routing Problem of Emergency Facilities Under Uncertain Demand by Branch-Price and Cut[J]. *Journal of Mathematics*, 2021, 2021(1): 9152989.

[20] MOADI S, MOHAYMANY A S, BABAEI M. Application of Imperialist Competitive Algorithm to the Emergency Medical Services Location Problem [J]. *International Journal of Artificial Intelligence & Applications*, 2011, 2(4): 137-147.

[21] 张彤, 马帅, 沈宏. 面向公平分配的时变应急服务覆盖优化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(12): 1681-1687.
ZHANG Tong, MA Shuai, SHEN Hong. Equity-Oriented Time-Varying Emergency Management Service Coverage Optimization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(12): 1681-1687.

[22] HUANG B, LIU N, CHANDRAMOULI M. A GIS Supported Ant Algorithm for the Linear Feature Covering Problem with Distance Constraints[J]. *Decision Support Systems*, 2006, 42(2): 1063-1075.

[23] Fattahi P, Bagheri H, BabaeiMorad S. A Mathematical Model for Fire Station Locating with Maximal Covering Location and Multi Period Approach [J]. *Modern Research in Decision Making*, 2017, 2(3): 193-213.

[24] AYTUG H, SAYDAM C. Solving Large-Scale Maximum Expected Covering Location Problems by Genetic Algorithms: A Comparative Study[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 141(3): 480-494.

[25] LEE Y H, KEUM H J, HAN K Y, et al. A Hierarchical Flood Shelter Location Model for Walking Evacuation Planning[J]. *Environmental Hazards*, 2021, 20(4): 432-455.

[26] 王玉璟, 孔云峰. 设施服务分区问题的求解算法框架设计[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(5): 726-735.
WANG Yujing, KONG Yunfeng. An Algorithm Framework for Facility Service Districting Problem [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(5): 726-735.

[27] TASNÁDI A. The Political Districting Problem: A Survey[J]. *Society and Economy*, 2011, 33(3): 543-554.

[28] HESS S W, SAMUELS S A. Experiences with a Sales Districting Model: Criteria and Implementation [J]. *Management Science*, 1971, 18(4): 41-54.

[29] ZHANG Y, BROWN D E. Police Patrol Districting Method and Simulation Evaluation Using Agent-Based Model & GIS [J]. *Security Informatics*, 2013, 2(1): 7.

[30] KEANE M. The Size of the Region-Building Problem[J]. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 1975, 7(5): 575-577.

[31] d'AMICO S J, WANG S J, BATTA R, et al. A Simulated Annealing Approach to Police District Design[J]. *Computers & Operations Research*, 2002, 29(6): 667-684.

[32] BAÇÃO F, LOBO V, PAINHO M. Applying Genetic Algorithms to Zone Design[J]. *Soft Computing*, 2005, 9(5): 341-348.

[33] KONG Y F. A Hybrid Algorithm for the Equal Districting Problem [C]// Spatial Data and Intelligence. Cham: Springer International Publishing, 2021: 110-120.

[34] RONG P J, ZHENG Z C, KWAN M P, et al. Evaluation of the Spatial Equity of Medical Facilities Based on Improved Potential Model and Map Service API: A Case Study in Zhengzhou, China[J]. *Applied Geography*, 2020, 119: 102192.