

基于POI数据的巨型城市消防站空间优化 ——以北京市五环内区域为例

徐智邦^{1,2}, 周亮^{1,2,3*}, 蓝婷⁴, 王中辉^{1,2}, 孙立^{1,2}, 武荣伟⁵

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 兰州 730070;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
4. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 5. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要:消防站的空间布局事关城市发展与城市安全。本文以北京市五环内中心城区为研究区,使用44.34万条POI数据和道路网等相关数据,考虑易燃易爆、人群脆弱等不同特征的火灾风险因子,采用核密度分析、SAVEE模型等方法,识别出研究区内的火灾风险空间分布,进一步借助“位置—分配”模型和网络分析,并结合优化目标对研究区内消防站进行空间优化。主要研究结论为:①按照火灾风险从高到低排序,前10%的火灾风险区域主要集中在CBD—三里屯、北京古玩城—双井、王府井、南锣鼓巷—雍和宫等区域。②现有消防站对全部44.34万个POI请求点5分钟响应时间内的覆盖率为96.46%,总体覆盖效果较好,但在研究区西北和西南部的世纪城—闵庄一带覆盖不足。③综合考虑高火灾风险区、重要火灾风险因子、POI总体覆盖率和个体消防站覆盖面积相关标准等因素,经多次迭加运算分析得到最终需新增15个消防站点。优化后的各指标均有较大提升,可满足研究区的消防需求。

关键词:POI数据;城市安全;消防站;空间优化;北京

1 引言

城市快速扩张对城市公共服务设施配套和布局带来了新挑战。当前中国发达地区的城市化进程已经放缓,转而注重细节与质量(薛德升等, 2016)。城市公共安全正是城市发展质量的考量之一,关系到城市每一个居民的生命和财产安全,而消防安全又是城市安全的重点。近年来,国内外城市火灾频发,从2015年的天津滨海新区、2017年的北京大兴到2018年的俄罗斯西伯利亚克麦罗沃购物中心,惨痛的人员和财产损失凸显了城市消防任务的长期性、复杂性与艰巨性,作为消防安全的基础,城市消防站的空间布局研究至关重要。然而,城市快速扩张的背景下,对于主要城市尤其是人口

规模超过2000万且流动人口多的巨型城市而言,其火灾风险更为复杂,防范难度更大,消防站等基础设施的配套极易出现不足和滞后。此类城市的消防复杂性主要表现在:大量人口集聚(蜗居现象),易形成集生产、经营、住宿、仓储等功能于一身的“多合一”场所,而这类场所容易产生火灾隐患;高层或地下建筑较多,其火灾防控的任务较为艰巨;城市复杂的功能区分布造成了差异化的火灾风险态势,例如工业区、商业区、住宅区、医院和学校往往具有不同的消防要求,不同功能区相互交织混合而产生的火灾风险需要进一步定量分析。在此现状条件下,传统消防站选址中的以街区或区块模拟火灾发生点的方法和以责任区面积确定消防站的方法已无法满足实际要求,面对巨型城市消防站选址中出

收稿日期:2017-08-08;修订日期:2017-12-14。

基金项目:国家自然科学基金项目(41701173);资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金项目(201619);中国博士后基金项目(2016M600121) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41701173; Open Foundation of State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, No. 201619; China Postdoctoral Science Foundation, No.2016M600121]。

作者简介:徐智邦(1991-),男,山东淄博人,硕士研究生,主要从事GIS应用研究,Email:xuxugis@foxmail.com。

通讯作者:周亮(1983-),男,甘肃天水人,博士,副教授,主要从事城市与区域可持续发展研究,E-mail:zhougeo@126.com。

引用格式:徐智邦,周亮,蓝婷,等. 2018. 基于POI数据的巨型城市消防站空间优化:以北京市五环内区域为例[J]. 地理科学进展, 37(4): 535-546. [Xu Z B, Zhou L, Lan T, et al. 2018. Spatial optimization of mega-city fire station distribution based on Point of Interest data: A case study within the 5th Ring Road in Beijing[J]. Progress in Geography, 37(4): 535-546.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.04.009

现的这些问题,急需开拓思路进行创新研究。

在数据科学高速发展的“大数据”背景下,新的数据源与地理空间分析提供了解决问题的新思路。可采用POI(Point of Interest)位置数据结合相应的空间分析方法来进行新的尝试。POI数据是位置大数据中最有效和容易获取的一种,它是将真实的地理实体,如学校、工厂、超市等以空间位置点的形式来表示。每个POI点数据的属性包括表示地理实体的名称、经纬度坐标和街道地址信息等。POI数据的分布模式、分布密度在基础设施规划、城市空间、应急救援分析中具有重要的意义(Li et al, 2015; McKenzie et al, 2015)。POI数据具有数据量大、更新快、现势性强等特点,主要由Google、百度等互联网地图服务商提供。POI数据是当下城市空间研究领域中绝佳的选择,已被广泛应用于城市与城市群边界识别(许泽宁等, 2016)、城市功能区识别(陈蔚珊等, 2016; 池娇等, 2016; 杨帆等, 2016)、旅游规划(杜兰等, 2014)和城市服务业区位选择(沈体雁等, 2015; 索超等, 2015)等领域。然而,POI数据在城市安全领域的研究中尚鲜有使用,在城市消防站点布局方面的探索研究更少。纵观国内外的研究,对于消防站选址和空间优化问题,学者们所关注的一是选址的目标,如应急响应时间最小和对潜在需求点的最大程度可达(Helly, 1975; Reilly et al, 1985),有的还综合考虑了行车费用、政策等因素建立了多目标数学规划模型(Badri et al, 1998; Yang et al, 2007);二是关注选址的模型方法:如层次分析法(AHP)和GIS技术结合(Habibi et al, 2008; Erden et al, 2010),“位置—分配”模型等。对于后者,学者们又进行了不同的尝试,如LSCP(Location Set Covering Problem)(Plane et al, 1977), MCLP(Maximal Coverage Location Problem)(Chevalier et al, 2012; Murray, 2013)和P中位(P-median Problem)(Reilly et al, 1985)等。在国内,研究消防站选址和空间优化的文章还较少。传统的消防站选址和责任区划分采用服务半径法,即以5分钟消防响应时间内消防车达到的最远距离为半径构建圆形缓冲区并以此确定消防站服务区;陈驰等(2003)以平均消防行车距离最小为选址原则,将责任区抽象为多个“结点”,实现多个消防站的整体布局优化;俞艳等(2005)使用Voronoi图结合网络分析来对城市消防站进行渐进式优化;陈鸿(2007)使用“位置—分配”模型研究了消防站的空间布局问题;张刚(2016)从

城市的火灾发生风险与城市消防力量2个方面进行了评估研究。

综合以上的分析,本文试图解决巨型城市消防站布局优化中的3个问题:①使用POI数据完整概括高容积率建筑中的所有设施场所,从而克服以街区或区块模拟火灾发生点导致的数据不完整问题,使消防站选址更加精细化;②使用POI数据定量识别城市中不同类的火灾风险因子,从火灾的危险性、危害性与消防的抗灾性等方面考虑来区别分析不同区域的火灾风险情况,使消防站选址更具针对性;③在前两步的基础上,利用“位置—分配”模型,结合消防站空间分布现状展开定量分析与空间优化,使消防站选址满足城市消防安全的需求。考虑到研究数据和巨型城市复杂性的特点,本文选取北京市的中心城区(五环内)作为研究区,通过对北京市POI数据的深度挖掘,根据火灾的危险性、危害性等性质,首先采用核密度分析、SAVEE模型等手段识别研究区内的火灾风险空间分异,然后,进一步使用“位置—分配”模型和网络分析并结合现有消防站点的分布情况,对消防服务的薄弱区域展开消防站的空间优化。

2 研究区与研究方法

2.1 研究区

北京市是中国政治中心、文化中心、国际交往中心和科技创新中心;2015年末的常住人口2170.5万人,其中常住外来人口822.6万人;地区生产总值23015亿元。是世界上典型的巨型城市之一。北京面临着许多城市问题:特大暴雨灾害导致交通瘫痪、雾霾问题导致环境矛盾突出、大量外来人口的基本公共服务需求尚未满足等。对于北京市的消防安全来说,大量的流动人口和高层与地下建筑,以及拥堵的道路交通状况都给城市消防带来挑战。2015年北京市共发生火灾3769起,直接经济损失6104.0万元(北京市统计年鉴2016)。本文选取北京作为研究区,一方面,是因为北京市的城市体量巨大,巨型城市的“城市病”问题更为突出和典型;另一方面,北京作为国家首都和国际交往中心,社会地位重要,研究北京市的消防站点空间优化问题,具有重大的社会意义和示范效应。结合已获取的数据并考虑到数据的完整性,最终选定北京市中心城区五环以内的区域作为本文的研究区(图1),研

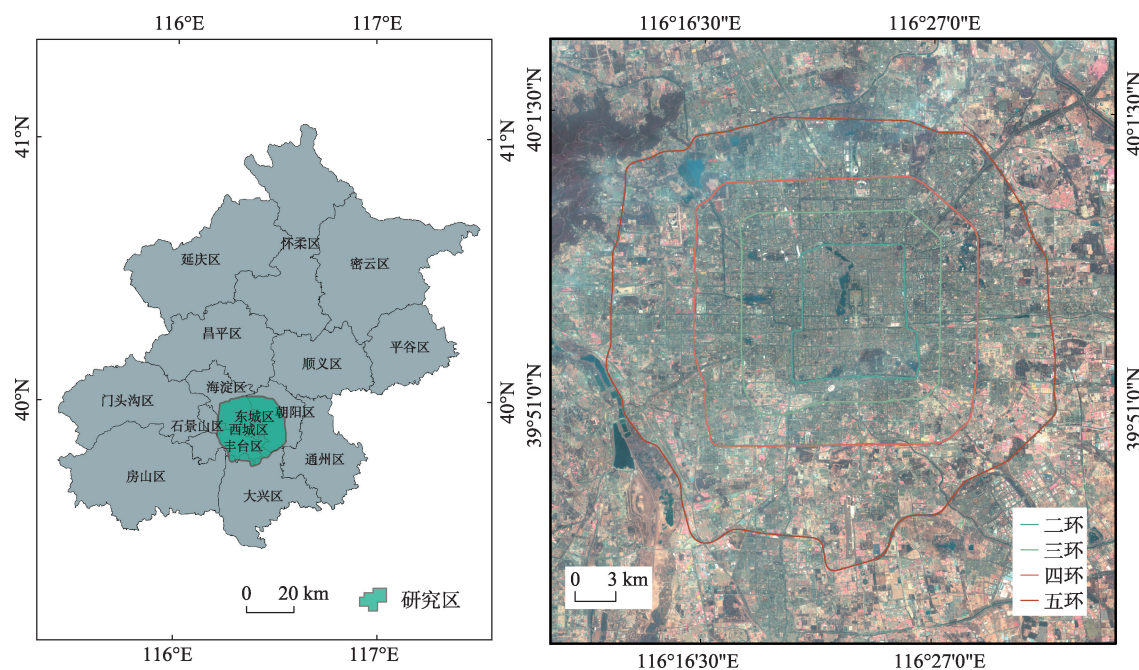


图1 研究区区位图

Fig.1 Location of the study area

究区包括全部的首都功能核心区以及大部分的城市功能拓展区,土地面积约668.4 km²。

2.2 数据来源

本文使用的数据主要有以下几部分:POI位置数据来源于在线地图服务平台高德地图(<http://lbs.amap.com/>),通过Python编程调用高德地图API在研究区范围内获取,获取时间为2016年8月,共包括如下14大类场所:餐饮、购物、生活服务、体育休闲、医疗保健、住宿、风景名胜、商务住宅、政府机构及社会团体、科教文化、交通设施、金融保险、公司企业、公共设施,获取的点数据经过数据清洗、坐标变换和整理后共包含有效数据443410个;消防站点位置数据来源于高德地图、百度地图和腾讯地图,爬取多源数据用于相互验证提高精度,经数据去重、合并和剔除社区消防工作室等低级别消防设施后,共获得消防站点位置数据56个;研究区的公路路网数据来源于免费开放的道路地图数据库Open-StreetMap网站(<http://www.openstreetmap.org/>);行政区划数据来源于国家基础地理信息数据库,统计数据来源于北京统计年鉴和北京统计信息网(<http://www.bjstats.gov.cn/>)等网站。

2.3 研究方法

本文使用的研究方法包括:SAVEE模型、核密度分析、“位置—分配”模型和网络分析等。首先使

用核密度分析来度量各类型POI的密度分布,其次使用SAVEE模型来对不同类型火灾风险因子的密度测算结果进行标准化处理,并使用专家打分法来划分不同火灾风险因子的权重,最后通过迭加运算识别出研究区的火灾风险空间分布。在消防站点的空间优化中,首先建立研究区的公路路网模型,之后使用“位置—分配”模型和网络分析对现有消防站的空间分布进行度量,继而针对消防服务的薄弱区域进行消防站模拟选址和空间优化。这里主要介绍SAVEE模型和“位置—分配”模型。

(1) SAVEE模型。该模型是美国德州农工大学STARR实验室开发的一种用于评价环境空间价值的计算方法。该方法能体现不同性质因子的影响,应用于多角度价值的综合评价(陈韶阳等, 2012),并已在资源规划、森林管理等领域得到较好的应用(Loh et al, 1994, 1998)。SAVEE算法针对不同因子的性质和影响过程提供了不同的标准化方程,对于积极因子来说,标准化方程为式(1),其中 $0 \leq V \leq 1$;对于消极因子来说,标准化方程为式(2),其中 $-1 \leq V \leq 0$;式(1)和(2)中的 V 为标准化价值, x 为自变量, A 为 x 的边界值, $x \leq |A|$, $V \propto X$ 表示自变量与价值量呈正相关, $V \propto 1/X$ 表示自变量与价值量呈负相关。使用标准化方程计算不同因子的标准化价值后,借助迭加方程(式(3))进行两两迭加运算,直到所有因子都参与运算为止。

$$V = \begin{cases} 1 - \left[e^{\frac{-(x+1)}{|A|}} \right]^5, & V \propto X \\ \left[e^{\frac{-(x+1)}{|A|}} \right]^5, & V \propto \frac{1}{X} \end{cases} \quad (1)$$

$$V = \begin{cases} - \left[e^{\frac{-(x+1)}{|A|}} \right]^5, & V \propto X \\ \left[e^{\frac{-(x+1)}{|A|}} \right]^5 - 1, & V \propto \frac{1}{X} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} I_{ab} = I_a + I_b - I_a \times I_b, & \text{当 } I_a > 0, I_b > 0 \\ I_{ab} = I_a + I_b + I_a \times I_b, & \text{当 } I_a < 0, I_b < 0 \\ I_{ab} = (I_a + I_b) / (1 - \min[|I_a|, |I_b|]), & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_a 和 I_b 分别代表因子 a 和因子 b 的标准化价值; I_{ab} 指因子 a 和因子 b 迭加后的标准化价值。

(2) 位置—分配模型(Location-Allocation Model, L-A 模型)。该模型是实现公共设施最适配置的有效方法之一(Cooper, 1963), 已在教育设施(Menezes et al, 2014)、医疗设施(Harper et al, 2005)、应急设施(Li et al, 2011)、消防站(Murray, 2013)等服务场所的选址中得到了良好的应用。“位置—分配”模型的基本原理为: 在给定请求点和已有设施点的情况下, 从指定的候选设施点中依据特定的优化算法挑选出一定个数的设施选址, 以实现算法设定的优化方式, 比如设施的可达性最高、服务范围最广或使用效率最高。目前“位置—分配”模型中常用的算法有多种, 本文主要使用了其中的3种: 最大化覆盖范围、最小化设施点数和最小化阻抗。最大化覆盖范围是定位设施点以使尽可能多的请求点被分配到所求解的设施点的阻抗中断内, 该算法能保证所定位出的消防站(设施点)在一定时间(阻抗)范围内覆盖最多的设施场所(请求点)。最小化设施点数是定位设施点以在设施点的阻抗中断内使尽可能多的请求点被分配到所求解的设施点, 此外还要使覆盖请求点的设施点的数量最小化, 也就是说该算法能保证消防站在一定时间范围内覆盖最多设施场所的同时, 使总的消防站数目最少, 此算法在最大化覆盖范围的基础上考虑了消防站的建设总成本问题。最小化阻抗算法也称P中位数问题, 它将设施点设置在适当的位置, 以使请求点与设施点的解之间的所有加权成本之和最小, 对于消防站而言, 该算法保证每个消防站对其覆盖区域内所有场所的总可达成本最低。

3 火灾风险区的空间识别

3.1 火灾风险区的分类与密度分析

对火灾风险区进行空间识别, 首先要确定最小分析单元。传统的消防站选址和优化中对各类火灾风险场所的确定往往不够精确, 常以街区、区块或单个建筑作为模拟火灾发生的最小单元, 但随着城市高速发展, 现实中高层建筑林立, 从地上空间延伸到地下, 同一栋建筑中可能同时含有餐饮、住宅等不同类型场所。基于此种现状, 本文使用POI数据作为最小分析单元, 用于精准、定量、快速地识别不同类型的场所。分析单元确定后, 便可根据火灾风险评估的相关理论和标准进行火灾风险区的识别。目前城市火灾风险评估应用较好的主要有美国的灭火分级制(FSRS)和“风险、危害、经济价值”评估方法, 其核心是对不同火灾风险因素进行分级。国内的城市火灾风险评估方法还处于探索阶段, 评估需要的基础数据缺乏或不完备, 已有的研究主要考虑目标对象可能面临的火灾风险、被保护对象的脆弱性、后果严重度、目标的经济和社会价值等方面(郑红梅等, 2008; 张刚, 2016)。本文结合《城市消防规划规范》(2015)、《北京市消防安全重点单位界定标准》和已有研究, 考虑不同类型场所的功能和活动人群性质, 依据火灾的危险性、危害性和消防的抗灾性将所有类型POI场所重新分类成6种火灾风险因子, 如表1所示。易燃易爆类因子指加油站、加气站、化工厂和仓库等易燃易爆的场所, 这类场所发生火灾往往易引起次生事故, 造成更危险的后果; 人群脆弱类因子指学校、医院等有大量脆弱人员的场所, 这类场所发生火灾后, 由于人员生理或其他方面的脆弱特征, 往往容易造成更大的人身伤亡; 人流密集类因子指人员大量聚集的商业经营场所和交通枢纽场站等, 这类场所流动人口多, 一旦发生火灾极易造成踩踏等伤亡事件; 重点保护类因子指政府机关、历史遗迹等保护价值较高的场所, 发生火灾将造成较大的财产损失和社会影响; 一般消防类因子是指除前面4类以外的区域, 包括住宅、写字楼等其他所有类型场所; 紧急避险类因子指紧急避难场所, 这类场所能在火灾发生时方便人群的疏散, 消防的抗灾性较好。

分类完成后, 使用ArcGIS软件对各类型火灾风险因子的点数据进行核密度分析, 采用自然间断点分级法将密度值分成6个等级区间, 结果如图2所示。

表1 火灾风险因子分类

Tab.1 Classification of fire risk factors

火灾风险因子	包含的POI类型
易燃易爆类	加油站、加气站、化工厂、工业园区、仓库仓储等
人群脆弱类	学校(幼儿园、小学、中学)、医院(诊所、疾病预防机构等)、婴儿服务场所等
人流密集类	商业经营场所(商场、商业街、娱乐场所等)、交通场站(机场、火车站、汽车站、地铁公交车站等)
重点保护类	政府机关(区县级及以上)、外国机构、公检法机构(除消防站)、科研机构、图书馆、博物馆、档案馆、历史遗迹等
一般消防类	住宅区、写字楼、公司企业(除化工厂和仓库)、产业园区(除工业园区)、各类餐厅、公共设施、银行、宾馆酒店、便利店、体育休闲服务场所、生活服务场所、物流速递(非仓储)、公园广场、政府机关(区县级以下)、高等院校、医药保健销售点等所有其他POI类型
紧急避险类	紧急避难场所

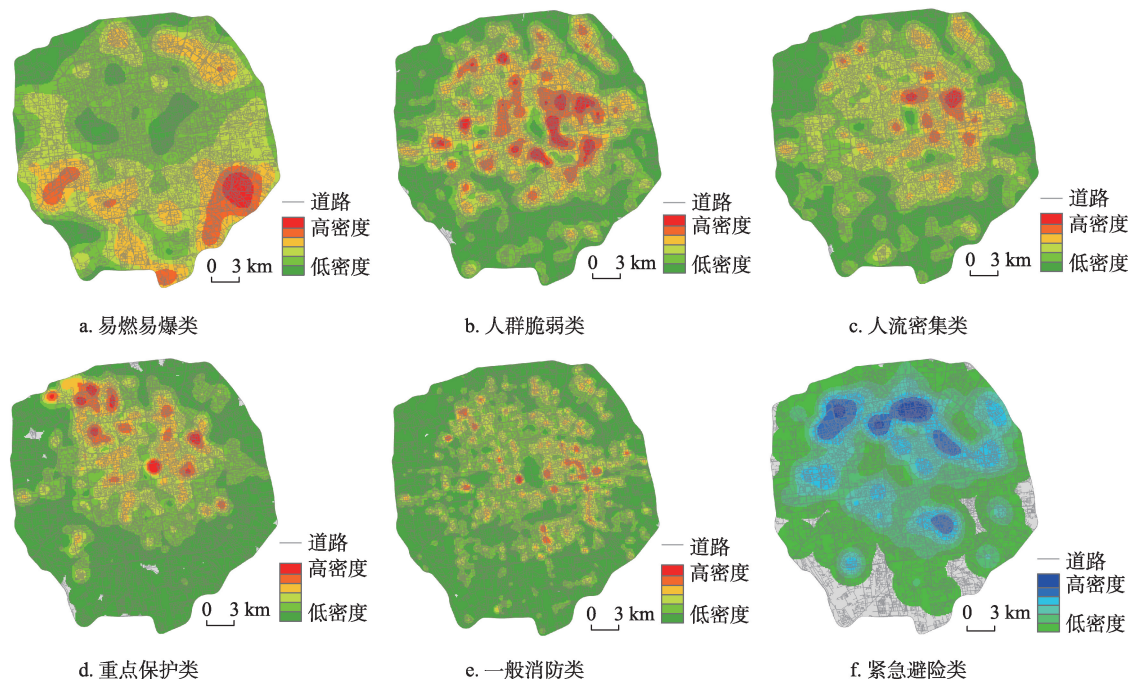


图2 各类火灾风险因子的核密度分布图

Fig.2 Kernel density distribution of all types of fire risk factors

3.2 城市火灾风险区的空间识别

完成密度分析后,由于不同类型火灾风险因子的密度值域不同,需要进一步利用标准化方程对其进行归一化处理。按照SAVEE算法的处理流程,依据不同火灾风险因子的性质及对火灾的影响而选择不同的标准化方程进行计算。具体分析各类火灾风险因子:对于易燃易爆类场所,易引起次生事故的场所的密度越高,火灾的风险越高,因此该类型为火灾风险的积极因子,且分布密度与危险程度呈正相关;对于人群脆弱类场所,区内主要为学生和病人等脆弱群体,该类场所密度越高,火灾的伤亡风险越高,因此该类型为火灾风险的积极因子,且分布密度与危险程度呈正相关;对于人流密

集类场所:主要包括商业经营场所和交通枢纽等人流流量大的区域,该类场所密度越高,火灾伤亡风险越高,故该类型也为火灾风险的积极因子,分布密度与危险程度呈正相关;对于重点保护类场所,其社会影响较大,保护价值较高,且场所分布的密度越高,火灾风险越高,该类型为火灾风险的积极因子,分布密度与危险程度正相关;一般消防类场所指其他所有场所,分布密度越高火灾风险越高,为火灾风险的积极因子;紧急避险类场所指紧急避难的场所,由于有利于人群的疏散,所以该场所分布密度越高火灾风险越低,为火灾风险的消极因子,分布密度与危险程度呈负相关。除进行密度标准化外,考虑到每种火灾风险因子对总的火灾风险影

响程度有差异,因此本文在最终运算时使用专家打分法对每种火灾风险因子的标准化结果增加权值,最终确定的易燃易爆区等6种火灾风险因子的权值分别为0.6、0.4、0.4、0.3、0.2、0.1。将加权后的不同类型的火灾风险因子的标准化价值依据SAVEE迭加方程两两进行迭加运算,最终计算得到北京市中心城区(五环内)火灾风险区的空间分布,将结果以相等间隔分级法分成10级,如图3所示。该图是以不同类型火灾风险场所的密度分布经运算叠加而得,用于表征火灾风险的分布情况,高风险区指该地面临的火灾风险大或者一旦发生火灾时后果严重度高,低风险区指该地面临的火灾风险相对较小或者发生火灾后的损失相对较低。

依据图3中的风险分级结果,按照火灾风险从高到低排序,分析前10%的区域可发现,火灾高风险区主要集中在CBD—三里屯、北京古玩城—双井、南锣鼓巷—雍和宫、和平里、北京站(火车站)、中关村、王府井等区域。此外,也小规模分布在西直门桥—北大人民医院、西单、建国路万达广场、五道口、亮马桥外交公寓、惠新西街北口、双榆树、鲁谷电话局等地。这些区域多为人流密集区、人群脆弱区和重点保护区,火灾危害性较高。不同分布区内的POI类型详细统计如图4所示。

4 消防站点的空间优化

火灾风险区识别完成后,便可结合现有的消防站点设施使用“位置—分配”模型进行设施优化布局分析。分析前需要进行数据的准备,包括道路网

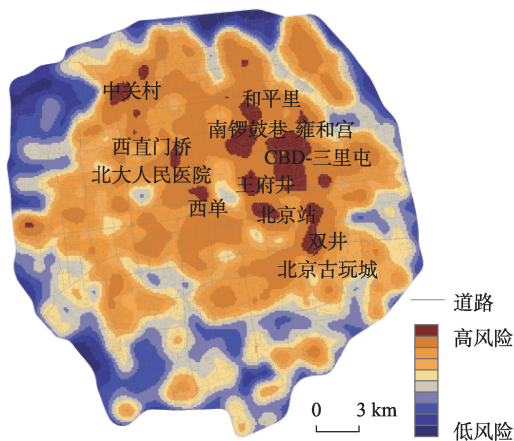


图3 北京市中心城区(五环内)火灾风险区的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of fire risk areas in the central urban area of Beijing (within the 5th Ring Road)

模型和消防站现势数据。需要指出的是,为尽可能确保现有消防站数据的准确性,选取了高德地图、百度地图、腾讯地图进行相互验证,并对3个数据库中的消防站点POI数据进行比对和去重操作,剔除“社区消防工作室”等社区消防设施点后,最终确定了56个有效消防站点用于进行后续的分析。对于路网的建模,本文利用ArcGIS使用公路道路网矢量数据建立网络数据集。考虑到消防车具有道路优先权,即不受“路口禁转”的限制也没有红灯等候时间和单行线的限制,因此在相应的路网参数设置时选择合适的设置。最后,使用ArcGIS建立“位置—分配模型”。将设施点指定为现有的56个消防站加上自行建立的消防站候选点集(在研究区内使用格网创建,共930个),请求点设置为全部443410个POI点,另外还有一个重要的参数,即道路的阻抗中断。根据《中华人民共和国消防法》(2016修订版)、《城市消防规划规范》(2015)中消防规划部分的要求,城市规划区内消防站的布局,应以接到出动指令后5分钟内消防队可到达责任区边缘为原则。在此标准下,采用POI数据获取时间(2016年8月)同期高德地图发布的《2016年第二季度中国主要城市交通分析报告》中的统计数据,根据北京在畅通情况下的平均车速(48.19 km/h)换算得到5分钟的行车路程为4016 m,考虑到出发准备工作需要一定时间,将4000 m设置为道路的阻抗中断。完成以上步骤之后,便可使用“最大化覆盖范围”模型分析现有消防站的覆盖情况;使用“最小化设施点数”模型计算理想状态下北京消防站的数量及分布;根据“最大化覆盖范围”模型的测算结合实际消防站分布情

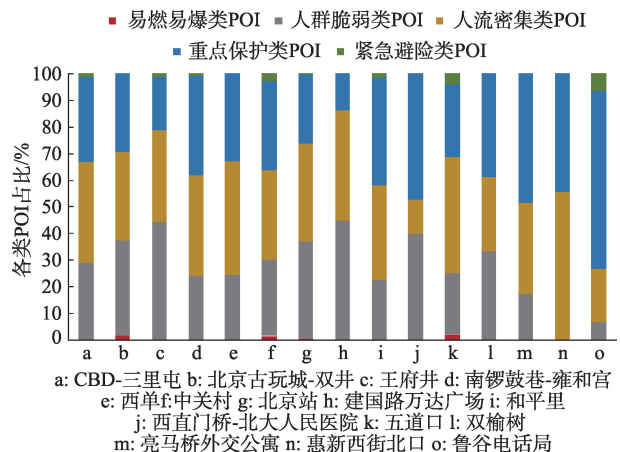


图4 前10%火灾高风险区内主要POI类型统计
Fig.4 Statistics of main types of point of interest (POI) in the top 10% high-risk areas of fire

况,并对比“最小化阻抗”的计算结果,提出针对现有消防站点的优化建议。

4.1 消防站覆盖现状分析

首先,对北京市五环区域内现有的56个消防站在5分钟响应时间内的最大化覆盖范围进行测定,结果如图5所示。从POI点的总体覆盖情况分析:在全部443410个POI点中,现有的消防站设施能够覆盖427709个,覆盖率达96.46%,覆盖效果较好;在覆盖范围分布上,研究区的西北、西南、南部部分地区的POI点未被覆盖,需要指出的是这些地区的POI密度与研究区其他地区相比相对较低。概括以上分析可知:北京市消防站的POI覆盖情况总体较好,消防站在城区中心(尤其是二环内)较密集,北部区域分布较均匀,南部地区相对较稀疏,尤其是在西北和西南四五环间的区域相对较少。从前文识别出的火灾风险区的覆盖情况(图6)分析:现有消防站对前10%火灾高风险区内的POI覆盖率达100%,对前25%火灾高风险区内的POI覆盖率为99.44%,对前50%火灾高风险区内的

POI覆盖率为98.78%;其中前25%火灾高风险区内的未覆盖POI主要集中在世纪城的世纪金源购物中心一带;此外,各类火灾风险因子的覆盖情况如表2所示。概括以上分析可知:现有消防站对火灾风险区的覆盖总体较好,但对一些重要场所特别是易燃易爆类POI并没能达到5分钟响应时间内的100%全覆盖。

具体到每个消防站点的尺度,本文统计了各个消防站在5分钟响应时间内所覆盖的POI点的数量规模,再根据这些覆盖的POI点计算它们的最小边界几何(凸包),将凸包视为消防站的责任区。继而得到每个消防站的覆盖点个数和覆盖区面积(km²)。从各消防站覆盖的POI点数量上分析:覆盖点个数前10名的站点,8个位于三环以内,1个位于三环四环之间,1个位于四环五环之间;这10个站点有8个位于研究区的中部,2个位于研究区的北部。从各消防站的覆盖区面积分析:覆盖区面积前

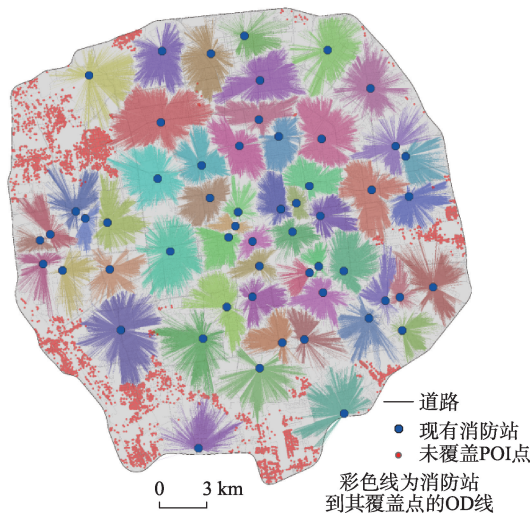


图5 现有消防站最大化覆盖范围分析
Fig.5 Maximal coverage analysis of existing fire stations

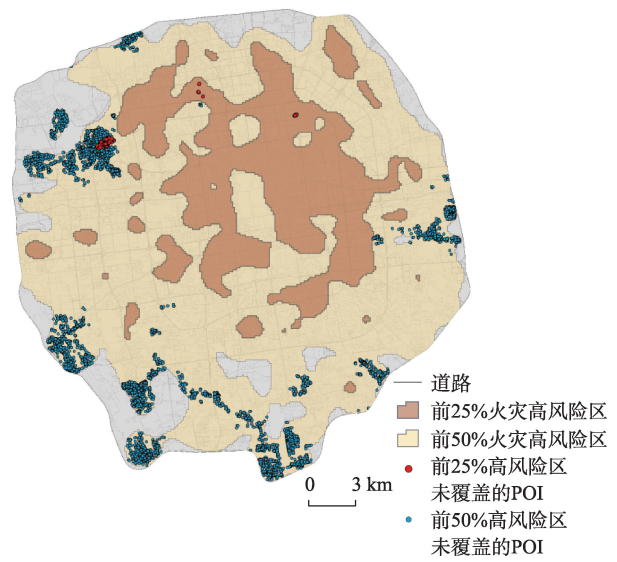


图6 火灾风险区内未覆盖POI分布
Fig.6 Distribution of non-covered point of interest (POI) in fire risk areas

表2 主要火灾风险因子的覆盖情况
Tab.2 Coverage by main fire risk factors

火灾风险因子	覆盖率/%	未覆盖区域
易燃易爆类	87.55	西五环的西山一带、南五环的金星乡区域
人群脆弱类	95.92	西四环的世纪城区域、西北四五环之间的区域、西五环的丰台西站一带、南五环的长丰园和金星乡区域、东五环广渠路立交到观音堂一带
人流密集类	95.32	西四环的世纪城区域、西北四五环之间的区域、西五环的丰台西站一带、南五环的长丰园和金星乡区域、东五环广渠路立交到观音堂一带、世界公园一带
重点保护类	97.09	西四环的世纪城区域、南四环的总部基地十一区和十二区一带

十名的站点,有9个位于三环以外(其中6个位于四环外),1个位于三环内;这10个站点又有4个位于研究区北部,1个位于中部,5个位于南部。此外,《城市消防站建设标准》中规定普通消防站责任区面积不宜大于 7 km^2 ,设在近郊区的普通消防站责任区面积不应大于 15 km^2 ,依此标准,56个消防站中只有13个消防站的覆盖区面积小于 7 km^2 ,这13个消防站中又有10个位于二环以内的老城区;56个消防站中有39个满足不大于 15 km^2 的建设标准,未满足标准的17个站点全部位于二环以外。概括以上分析可知,城市快速发展背景下的新城区消防站的建设仍有较大缺口,距离国家标准还有一定的距离。

综合现状消防站的总体覆盖和个体覆盖可发现:现有消防站对POI点的总体覆盖较好,但在研究区西北、西南等部分地区仍有不足,对于易燃易爆类POI点未能做到5分钟响应时间内的全覆盖;研究区二环以内老城区的消防站分布相对密集,能满足需求和相关建设标准,而三环以外的消防站多数覆盖面积过大且存在覆盖盲区,结合北京人口向郊区聚集的趋势,研究区需要进行一定的新站建设和站点优化。

4.2 消防站点的空间优化

(1) 理想化预测的情况。即在不考虑消防站责任区面积和人力物力等因素的限制下,对消防站点选址做出的一种最优化预测,使用的方法是“最小化设施点”模型。使用该模型使消防站在5分钟响应时间内尽可能多的覆盖POI点,同时还要使总消防站的数量最小化。本节通过2种方式进行最小化设施点的计算:①不添加现有消防站点,只使用消防站候选点预测模拟消防站点的分布及数量(图7a)。②添加现有56个消防站点,在此基础上预测模拟新增消防站点的分布及数量(图7b)。在实际情况中,前者可帮助确立满足研究区消防需求的最小站点数量,后者则可以用来确定在现有情况下新增消防站点的最大上限数量。经测算,第一种方式模拟出的消防站点共47个,第二种方式模拟出的消防站点共80个,而研究区现有的消防站点数量为56个,处于最大和最小值的区间之内,数量基本合理,但从空间分布上可发现在研究区中部和西部部分区域消防站分布较为密集。由于理想化模型是建立在不考虑消防站责任区面积和人力物力等因素的前提下,在实际情况中不仅要考虑以上因素,还要考虑研究区的火灾风险差异和土地利用情况。鉴于此,后文的分析中将不对已有消防站点进行更

改,而是重点放在新增消防站的数量与位置选择。

(2) 以提高高火灾风险区和重要火灾风险因子的覆盖为目标的优化。该目标目的是保证消防重点区域的全覆盖,此处的高火灾风险区定义为本文第3节识别出的火灾风险区(图3)的前25%,重要火灾风险因子选择的是“易燃易爆类”和“重点保护类”(详见表1)。结合研究区实际情况,具体的优化指标确定为使前25%火灾高风险区5分钟响应时间内的覆盖率提升至99.99%以上,使“易燃易爆类”和“重点保护类”POI点5分钟响应时间内的总覆盖率提升至98%以上。现状56个消防站对前25%火灾高风险区的覆盖盲区位于世纪城一带,使用“最大化覆盖范围”模型进行模拟计算:当在常青园路与杏石口路交叉口附近新增一个消防站点时,前25%火灾高风险区的覆盖率可上升到99.991%,满足优化目标。现状消防站对“易燃易爆类”和“重点保护类”POI点的总覆盖率为96.699%,覆盖盲区主要集中在西五环的西山一带、南五环的金星乡区域、西四环的世纪城区域、南四环的总部基地十一区和十二区一带,使用“最大化覆盖范围”模型在常青园路与杏石口路交叉口附近模拟新增一个消防站点后,这两类POI点的总覆盖率上升到了97.624%,在世界公园附近新增第二个消防站点时,两类POI点的总覆盖率上升到98.070%,可满足设定的优化目标。

(3) 以提高POI总体覆盖率和总体面积覆盖率为目标的优化。该目标目的是提高整个研究区整体的消防覆盖情况,此处的POI总体覆盖率即指5分钟响应时间内被覆盖的POI点数目占全部POI点总数的比重,总体面积覆盖率指5分钟响应时间内所有被覆盖POI点的最小几何边界(凸包)的面积除以研究区总面积(注:在计算面积覆盖率时,对不同凸包之间重叠的部分需要先进行合并)。结合研究区实际情况,具体的优化指标是使POI总体覆盖率提升至98%以上,总体面积覆盖率提升至90%以上。现有56个消防站POI总体覆盖率为96.46%,对研究区的西北、西南、南部等地区的覆盖不足。利用“最大化覆盖范围”模型进行模拟计算:当在常青园路与杏石口路交叉口附近新增一个消防站点时,POI总体覆盖率上升到了97.51%;当在世界公园附近新增一个消防站点时,所有消防站覆盖的POI点数达到了435026个,POI总体覆盖率达98.11%,满足了设定目标。对于总体面积覆盖,经计算,现有消防站点的总体面积覆盖率为85.82%。

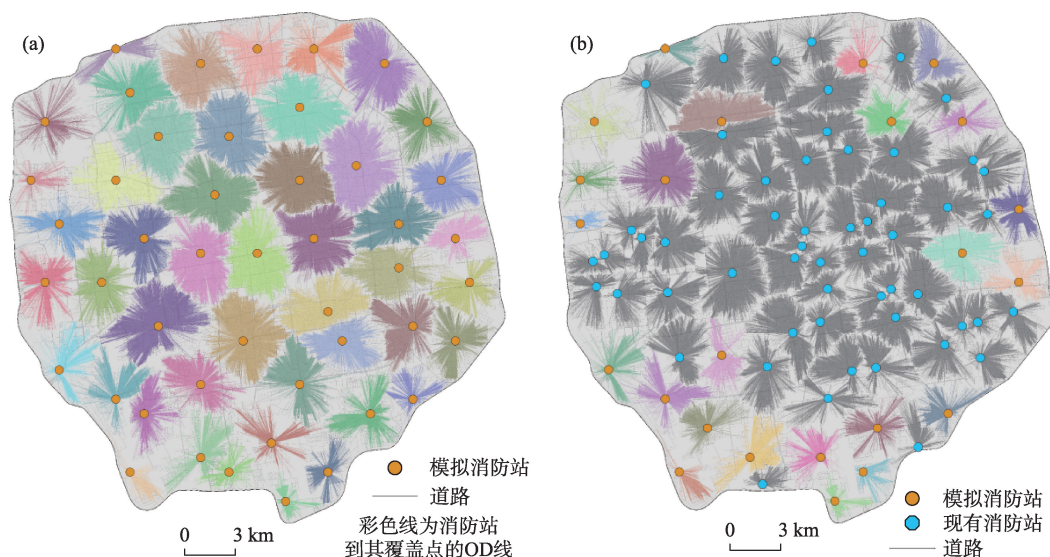


图7 “最小化设施点”模型预测的2种消防站布局

Fig.7 Two modeled layouts of fire stations by the minimalized facility sites model

使用“最大化覆盖范围”模型在常青园路与杏石口路交叉路口附近模拟新增一个消防站点时,总体面积覆盖率上升到87.52%;在世界公园附近新增第二个消防站点时,总体面积覆盖率上升到89.47%;当在南苑机场东南方向新增第3个消防站点时,总体面积覆盖率达90.60%,满足了设定的优化目标。

(4) 以调整个体消防站覆盖区面积为目标的优化。由上述消防站覆盖现状分析可发现,部分现状消防站的覆盖区面积远超《城市消防站建设标准》,因此,此部分优化的目的是使所有消防站点覆盖区面积满足标准。结合研究区的实际情况,具体的优化指标是使所有站点的“5分钟响应”覆盖面积不超过下限标准即15 km²。在经过(2)(3)步的优化之后,现状与新增共59个消防站中有17个不满足标准,在调整时采用的方法为:按照覆盖区域面积从大到小逐个使用“最小化阻抗”模型进行运算,运算时在区域内新增1~2个消防站点,完成后重新计算全部消防站点的“最大化覆盖范围”和每个消防站覆盖的凸包,之后迭代处理下一个面积最大的区域,直到所有消防站的覆盖面积都小于15 km²为止。需要注意的是,如果调整区域中的站点是已有消防点,考虑到重建迁移成本较大,则该站点保持不变;如果调整区域中的站点是前文(2)(3)步中新增的站点,则可删除该新增站点重新布局;此外在调整区域时,如区域周边有未覆盖的POI点则纳入调整区域一同参与计算。经过12次迭代计算后,最终确定在现状56个消防站基础上再增加15个消防站点,

去除重叠部分后的所有消防站点的覆盖区域都满足15 km²的下限标准,达到了预定的优化目标。

经过以上步骤,充分考虑高火灾风险区的覆盖、重要火灾风险因子的覆盖、POI总体覆盖率、总体面积覆盖率和个体消防站覆盖区面积等因素,使用最大化覆盖范围、最小化设施点和最小化阻抗3种“位置—分配”模型算法,得到研究区内消防站点的最终优化结果。在现有56个消防站的基础上,需新增15个消防站点,最终优化完成后的消防站点分布如图8所示。消防站增加到71个之后,所有消防站5分钟响应时间内能覆盖全部POI点的99.723%,

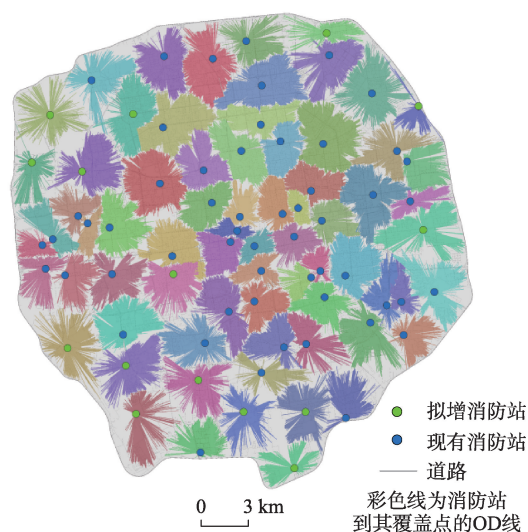


图8 优化完成后的消防站点分布图

Fig.8 Distribution of fire stations after optimization

覆盖全部研究区面积的96.617%,其中可覆盖99.99%的高火灾风险区,可覆盖99.424%的“易燃易爆类”和“重点保护类”POI点,所有消防站责任区面积均不超过《城市消防站建设标准》15 km²下限标准。各项指标相比优化前分别提升了3.26%、10.79%、0.55%、2.73%。经过优化后的消防站点,加上未纳入考虑的社区消防工作室和义务消防队等,能够满足研究区内的消防需求。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文针对北京市五环内的中心城区,首先将POI位置数据根据城市火灾风险评估的方法,结合已有的规范、标准和研究划分成不同的火灾风险因子类,进一步使用核密度分析计算得到不同火灾风险因子的空间分布,之后借助SAVEE模型和专家打分法对不同火灾风险类型数据进行标准化和权值划分,通过迭加运算识别出研究区内火灾风险区的空间分布。完成火灾风险区的识别后,结合消防站位置,使用道路网络数据,采用“位置—分配”模型和网络分析方法,通过考虑高火灾风险区的覆盖、重要火灾风险因子的覆盖、POI总体覆盖率、总体面积覆盖率和个体消防站覆盖区面积的国家标准,对研究区内的消防站进行空间优化。总体上,本文针对城市消防站布局优化中的问题,提出了解决思路,并得出了以下主要结论:

(1) 使用POI数据精细概括建筑中的所有设施场所,定量计算得到了研究区的火灾风险分布:按照风险从高到低排序,前10%的火灾风险区域主要集中在CBD—三里屯、北京古玩城—双井一带、王府井、南锣鼓巷—雍和宫一带、西单、中关村、北京站(火车站)等地,这些区域人口密集、有较多有保护价值的场所,部分区域有加油站等易燃易爆场所。该结果可使消防站选址更加精细化、更具针对性。

(2) 研究区内现有的56个消防站点在5分钟响应时间内对POI点的总体覆盖较好,POI点覆盖率达96.46%,但在以世纪城—闵庄一带,即研究区西北、西南等部分地区覆盖仍不足;在各类火灾风险因子的覆盖情况中,易燃易爆类的覆盖率为87.55%,人群脆弱类、人流密集类和重点保护类的覆盖率则均超过95%;在消防站的空间分布方面,研究区二环以内老城区的消防站分布相对密集,能

满足需求和相关建设标准,而三环以外的消防站多数覆盖面积过大且存在覆盖盲区,因此需对消防站点进行优化。

(3) 考虑高火灾风险区的覆盖、重要火灾风险因子的覆盖、POI总体覆盖率、总体面积覆盖率和个体消防站覆盖区面积等因素进行现状消防站的空间优化,最终算出需新增15个消防站点,优化后所有消防站5分钟响应时间内的POI总体覆盖率提高至99.723%,总体面积覆盖率提高至96.617%,高火灾风险区的覆盖率提高至99.99%,2种重要火灾风险因子的覆盖率提高至99.424%,覆盖区面积符合标准的站点比例提高至100%,加上本文未纳入分析的社区消防机构,完全可满足研究区消防需求。

5.2 讨论

消防安全是城市安全的重要组成部分,消防站的选址和空间优化又是消防安全的重要保障。对于北京这样体量巨大的巨型城市,借助POI位置数据能更加精确和定量的感知城市的消防安全态势,以此为依据进行分析,继而可应用于优化消防站空间布局、服务现状城市管理和远期城市规划。然而,巨型城市是一个复杂动态的巨系统,本文在研究过程中,仍存在诸多不足有待多学科交叉进一步共同解决:比如交通阻抗的设置需要更精细的模拟;人口的职住出行和密度分布也需要通过合适的模型加入到火灾风险的考虑中;POI作为点数据对于建筑物几何轮廓无法进行表达,一定程度上影响了消防责任区面积的精确度量;此外,火灾的强度、规模和频率等因素也需要进一步挖掘历史数据以更精细地纳入火灾风险的评估之中。未来随着浮动车大数据、出行大数据、物联网传感器等数据的获取,会有更多更有价值的信息等待发掘,笔者也将长期跟踪,通过多源多尺度数据融合展开智慧城市方面的后续研究。

参考文献(References)

- 陈驰, 任爱珠. 2003. 消防站布局优化的计算机方法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 43(10): 1390-1393. [Chen C, Ren A Z. 2003. Optimization of fire station locations using computer[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 43(10): 1390-1393.]
- 陈鸿. 2007. 城市消防站空间布局优化研究[D]. 上海: 同济大学. [Chen H. 2007. Study on optimization of the spatial distribution of urban fire station[D]. Shanghai, China: Tongji University.]

- 陈韶阳, 程镇燕, Loh D K. 2012. 基于SAVEE方法的海岛空间价值评价: 以南沙群岛为例[J]. 海洋环境科学, 31(1): 107-110. [Chen S Y, Cheng Z Y, Loh D K. 2012. Islands valuation of spatial appraisal based on SAVEE method: With the Nansha Islands as an example[J]. Marine Environmental Science, 31(1): 107-110.]
- 陈蔚珊, 柳林, 梁育填. 2016. 基于POI数据的广州零售商业中心热点识别与业态集聚特征分析[J]. 地理研究, 35(4): 703-716. [Chen W S, Liu L, Liang Y T. 2016. Retail center recognition and spatial aggregating feature analysis of retail formats in Guangzhou based on POI data[J]. Geographical Research, 35(4): 703-716.]
- 池娇, 焦利民, 董婷, 等. 2016. 基于POI数据的城市功能区定量识别及其可视化[J]. 测绘地理信息, 41(2): 68-73. [Chi J, Jiao L M, Dong T, et al. 2016. Quantitative identification and visualization of urban functional area based on POI data[J]. Journal of Geomatics, 41(2): 68-73.]
- 杜兰, 葛军莲, 王宏志, 等. 2014. 基于POI网络信息的景区最优游客接待中心选址研究: 以南京钟山景区智慧旅游为例[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 48(4): 613-619. [Du L, Ge J L, Wang H Z, et al. 2014. Study on scenic-oriented optimal site selection of tourist service center based on the POI network data: A case of intelligent tourism of Zhongshan Scenic, Nanjing[J]. Journal of Huazhong Normal University: Natural Sciences, 48(4): 613-619.]
- 沈体雁, 周麟, 王利伟, 等. 2015. 服务业区位选择的交通网络指向研究: 以北京城市中心区为例[J]. 地理科学进展, 34(8): 947-956. [Shen T Y, Zhou L, Wang L W, et al. 2015. Traffic network point of services location choice: A case study of the Central City Area of Beijing[J]. Progress in Geography, 34(8): 947-956.]
- 索超, 张浩. 2015. 高铁站点周边商务空间的影响因素与发展建议: 基于沪宁沿线POI数据的实证[J]. 城市规划, 39(7): 43-49. [Suo C, Zhang H. 2015. Influencing factors and development proposals of business space around HSR station: A case study of cities along Shanghai-Nanjing HSR with POI data[J]. City Planning Review, 39(7): 43-49.]
- 许泽宁, 高晓路. 2016. 基于电子地图兴趣点的城市建成区边界识别方法[J]. 地理学报, 71(6): 928-939. [Xu Z N, Gao X L. 2016. A novel method for identifying the boundary of urban built-up areas with POI data[J]. Acta Geographica Sinica, 71(6): 928-939.]
- 薛德升, 曾献君. 2016. 中国人口城镇化质量评价及省际差异分析[J]. 地理学报, 71(2): 194-204. [Xue D S, Zeng X J. 2016. Evaluation of China's urbanization quality and analysis of its spatial pattern transformation based on the modern life index[J]. Acta Geographica Sinica, 71(2): 194-204.]
- 杨帆, 徐建刚, 周亮. 2016. 基于DBSCAN空间聚类的广州市区餐饮集群识别及空间特征分析[J]. 经济地理, 36(10): 110-116. [Yang F, Xu J G, Zhou L. 2016. Cluster identification and spatial characteristics of catering in Guangzhou based on DBSCAN spatial clustering[J]. Economic Geography, 36(10): 110-116.]
- 俞艳, 郭庆胜, 何建华, 等. 2005. 顾及地理网络特征的城市消防站布局渐进优化[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 30(4): 333-336. [Yu Y, Guo Q S, He J H, et al. 2005. Gradual optimization of urban fire station location based on geographical network attribute[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 30(4): 333-336.]
- 张刚. 2016. 基于空间分析的城市火灾风险评估与应用: 以西安为例[J]. 城市规划, 40(8): 59-64. [Zhang G. 2016. Urban fire risk evaluation and its application based on spatial analysis: A case study of Xi'an[J]. City Planning Review, 40(8): 59-64.]
- 郑红梅, 陈国良, 王玮, 等. 2008. 火灾风险评估相关概念辨析[J]. 中国安全科学学报, 18(6): 75-79. [Zheng H-M, Chen G-L, Wang W, et al. 2008. Discussion on the difference and similarity of some terms related to fire risk assessment[J]. China Safety Science Journal, 18(6): 75-79.]
- Badri M A, Mortagy A K, Alsayed C A. 1998. A multi-objective model for locating fire stations[J]. European Journal of Operational Research, 110(2): 243-260.
- Chevalier P, Thomas I, Geraets D, et al. 2012. Locating fire stations: An integrated approach for Belgium[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 46(2): 173-182.
- Cooper L. 1963. Location-allocation problems[J]. Operations Research, 11(3): 331-343.
- Erden T, Coşkun M Z. 2010. Multi-criteria site selection for fire services: The interaction with analytic hierarchy process and geographic information systems[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10(10): 2127-2134.
- Habibi K, Lotfi S, Koohsari M J. 2008. Spatial analysis of urban fire station locations by integrating AHP model and IO logic using GIS (a case study of zone 6 of Tehran)[J]. Journal of Applied Sciences, 8(19): 3302-3315.
- Harper P R, Shahani A K, Gallagher J E, et al. 2005. Planning health services with explicit geographical considerations: A stochastic location-allocation approach[J]. Omega, 33(2): 141-152.
- Helly W. 1975. Urban systems models[M]. New York, NY: Academic Press.
- Li X, Xu G D, Chen E H, et al. 2015. Learning recency based comparative choice towards point-of-interest recommendation[J]. Expert Systems with Applications, 42(9): 4274-4283.
- Li X P, Zhao Z X, Zhu X Y, et al. 2011. Covering models and

- optimization techniques for emergency response facility location and planning: a review[J]. *Mathematical Methods of Operations Research*, 74(3): 281-310.
- Loh D K, Holtfrerich D R, Van Stipdonk S E P. 1998. Automated construction of rulebases for forest resource planning [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 21(2): 117-133.
- Loh D K, Hsieh Y T C, Choo Y K, et al. 1994. Integration of a rule-based expert system with GIS through a relational database management system for forest resource management [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 11(2-3): 215-228.
- McKenzie G, Janowicz K. 2015. Where is also about time: A location-distortion model to improve reverse geocoding using behavior-driven temporal semantic signatures[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 54: 1-13.
- Menezes R C, Pizzolato N D. 2014. locating public schools in fast expanding areas: Application of the capacitated p-median and maximal covering location models[J]. *Pesquisa Operacional*, 34(2): 301-317.
- Murray A T. 2013. Optimising the spatial location of urban fire stations[J]. *Fire Safety Journal*, 62: 64-71.
- Plane D R, Hendrick T E. 1977. Mathematical programming and the location of fire companies for the Denver fire department[J]. *Operations Research*, 25(4): 563-578.
- Reilly J M, Mirchandani P B. 1985. Development and application of a fire station placement model[J]. *Fire Technology*, 21(3): 181-198.
- Yang L L, Jones B F, Yang S-H. 2007. A fuzzy multi-objective programming for optimization of fire station locations through genetic algorithms[J]. *European Journal of Operational Research*, 181(2): 903-915.

Spatial optimization of mega-city fire station distribution based on Point of Interest data:

A case study within the 5th Ring Road in Beijing

XU Zhibang^{1,2}, ZHOU Liang^{1,2,3*}, LAN Ting⁴, WANG Zhonghui^{1,2}, SUN Li^{1,2}, WU Rongwei⁵

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. School of Geographical Science, Fujian Normal university, Fuzhou 350007, China; 5. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China)

Abstract: Sound spatial distribution of fire stations is important for urban development and for ensuring urban safety. Based on kernel density analysis and the SAVEE model, and taking into account different types of point of interest (POI) such as flammable and explosive and crowd fragility fire risk factors, 443410 POIs and road network were used to identify the fire risk zones in the downtown area of Beijing. Using the location-allocation fire station spatial optimization model, this study proposed adjustment plans. The main conclusions are as follows: (1) According to the fire risk ranking result, the top 10% fire risk areas are mainly concentrated in the CBD area Sanlitun, Beijing Antique Market Shuangjing, Wangfujing, and Nanluoguxiang-Yonghegong, among others. (2) The coverage rate (within 5 minute response) of the existing fire stations reached 96.46% for all 443, 410 POIs, and the overall coverage was good, while some fire risk factors were covered with insufficient response in the northwestern and southwestern parts of the study area (Century City-Minzhuang area), and some fire station coverage area was too large. (3) Considering high fire risk areas, important fire risk factors, POI overall coverage rate, and individual fire station coverage area standards, the analysis by multiple iterations results in the final need of adding 15 new fire stations. With these additions, every performance indicator can be significantly improved and the demand of fire protection in the study area can be fully met.

Key words: Point of Interest (POI) data; urban safety; fire station; spatial optimization; Beijing