

# 中小学最优避难疏散模型与选址应用

马 玥, 孙永华\*, 李小娟

(城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048; 民政部灾害评估与风险防范重点实验室,  
北京 100048; 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘要:** 本文以区位-配给模型理论为指导, 以路网疏散距离最短、场地服务容纳量最大为目标, 构建最优避难疏散模型, 以解决中小学避难场地选址问题。本文从保障学生避难疏散场地的安全性和适宜性角度出发, 通过建立环境制约因素模型, 对地形坡度、断裂带、河流湖泊、易燃易爆站点、高层建筑物倒塌范围和文物古迹保护范围6大因素进行空间叠加分析, 计算了实际的避难需求和供给容量。为减少利用直线距离直接作为疏散道路产生的误差, 本文通过对不受影响的路网信息进行网络分析, 计算最短疏散道路, 以获取实际的路网距离。本文将该方法应用于北京市西城区中小学避难场地选址的优化方案, 有效地解决了中小学避难场地选址问题。

**关键词:** GIS; 空间分析; 最优避难疏散模型; 避难需求; 场地供给; 环境制约因素模型

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2013.00512

## 1 引言

近年来, 各种自然灾害性事件频发, 给国家的稳定、社会的安康, 以及人们的生活, 带来了严峻的威胁<sup>[1]</sup>。面对这些灾害, 一定程度上, 反映出解决城市中应急避难场地的重要性。

由于校园安全在整个社会安全体系建设中具有特殊重要的地位<sup>[2]</sup>, 是整个社会的缩影, 处在未成年阶段的中小學生是社会中最弱势的群体, 中小學生理应受到社会的特别保护与关爱, 但现阶段的研究当中, 中小学的防灾避难功能很少被纳入城市避难体系<sup>[3]</sup>。因此, 开展针对中小學生的地震应急避难场地问题的研究, 具有深远意义。

目前, 国内外学者结合GIS技术, 从不同方面展开了相关分析: 周晓猛在确定了避难场地数量、容量的基础上, 对避难场地布局优化提出了网络优化模型, 并结合加权评分法, 最终确定布局选址位置<sup>[4]</sup>; 武文杰通过构建人口密度栅格, 对原有应急避难场地人口配置缺口进行分析, 从而利用Voronoi多边形算法, 对应急避难场地的空间进行优化和配置<sup>[5]</sup>; Mohammad Saadatseresht 研究避难疏散问题

时, 将安全地的容量作为建立疏散模型的重要因素之一, 从而为每一个建筑区选择最优的安全疏散场地<sup>[6]</sup>; 黄静以社区(街道)为主要研究尺度, 开展了有关应急疏散需求分布、疏散空间可达性、疏散优化归属3方面内容的研究, 以避难服务覆盖人数最大化为目标建立疏散区划模型, 确定避难场地的应急区划疏散方案<sup>[7]</sup>; 王芬利用GIS技术对避难场所空间需求和供应进行分析, 确定避难场所空间布局<sup>[8]</sup>; 陈鹏对避难场地的危险要素、人口要素、地形要素进行适宜性分析, 综合利用集合覆盖理论模型、最大覆盖理论模型, 建立城市避难地优化布局模型<sup>[9]</sup>。针对中小学的防灾避难研究, 日本学者很早便展开了研究, 如佐藤隆雄认为中小学校作为地震时的避难场所和活动据点这一功能取决于中小学校的地理条件, 必须从自身的安全性、所在地的安全性、到达学校的道路安全性3方面进行评价<sup>[10]</sup>; 建部謙治以小学生为研究对象, 研究学生在火灾发生时的逃生路线的选择趋势, 以及对学校空间的认知程度<sup>[11]</sup>; 在我国针对中小学在防灾减灾方面尚处于初步探索阶段, 李帆通过总结日本抗震及利用学校避难的经验, 分析了中小学作为避难场所的优势和条

收稿日期: 2013-03-01; 修回日期: 2013-04-01.

基金项目: 北京市教委专项“首都基础教育协调发展决策支持系统”。

作者简介: 马 玥(1988-), 女, 北京人, 硕士生, 主要从事遥感和地理信息系统技术在防灾减灾中的应用研究。

E-mail: mylovett0509@163.com

\*通讯作者: 孙永华(1982-), 男, 山东临沂人, 讲师, 主要从事遥感和GIS在生态水文中的应用研究。E-mail: syhua1982@163.com

件,从防灾角度对我国中小学建设提出建议<sup>[12]</sup>;黄猛以中学生在面对地震等灾害情况时的心理和行为规律的研究为基础,采用回归分析法建立应急疏散时间与各影响因素之间的回归模型<sup>[13-15]</sup>;上述研究很少结合GIS技术在地理空间上的防灾避难功能,也未对避难场地的内部容量,以及中小学生学习需求之间的关系进行考虑,尤其当学校内部容量不足,不能满足学生需求的情况,并未给出解决方案。

本文以区位-配给模型理论为指导,构建学校与避难场地之间的最优避难疏散模型,完成中小学避难疏散场地的选址工作。由于该模型的建立,主要是以路网疏散距离最短、场地服务容纳量最大作为优化决策目标,最终求解结果只是得出一种理想的避难疏散场地选址方案。但在实际研究过程中,必须对以下问题进行研究:

(1)只将避难需求方的人口数量和场地供给方的容纳数量,直接作为容量属性进行表达,忽略了在地震发生后环境等诸多因素的影响,因此,环境制约因素需加以考虑。

(2)仅直接利用直线距离作为疏散道路,连接避难需求方和场地供给方的方法,显然不符合实际情况,将会给研究带来误差,因此,需采用实际的路网距离来解决这一问题。

## 2 最优避难疏散模型的建立

本文采用最优避难疏散模型,进行中小学生学习场地的选址,旨在对学生与场地进行合理分配。鉴此,针对环境制约因素分析,优化实际的避难需求和供给容量,通过网络分析获取的最短疏散道

路,进行最优避难疏散模型的求解。

### 2.1 实际的避难需求和供给容量

#### (1)环境制约因素模型

对中小学地震避难场地选址,主要采用缓冲区、叠加分析等方法<sup>[16-17]</sup>,对坡度、断裂带、河流湖泊、易燃易爆站点、高层建筑物、文物古迹等6个环境制约因素进行分析(图1)。

根据中国地震局发布的中华人民共和国国家标准“地震应急避难场地场址及配套设施(GB21734—20080)”的限制因素,对以上6类环境影响因素进行分析,对于各因素避让范围距离进行总结,如表1。

通过表1得知,大于7°的场地不适宜建立地震应急避难场地,断裂带、河流湖泊、易燃易爆点等因素的缓冲区,应将避让范围设置为100m,高层建筑物的避让范围是按照高度的一半进行计算,国家级文物保护区的避让范围是50m。假设地震发生时,上述环境因素都会对地震避难的过程产生影响,按照标准限定的要求,通过建立环境制约因素模型进行深入分析,并将各环境制约因素分析结果进行综合分析,获得环境制约因素限制条件。

#### (2)学生的实际避难需求

在此基础上,通过引入微观经济学中需求与供给的基本概念,将中小学生学习需求、学校场地供给和环境制约因素的空间地理信息相结合后,详细了解中小学习生在校人数、操场避难容纳程度的空间分布状况,通过比较学校的需求量和场地容纳量的二者之间的关系,如图2所示。

在环境制约影响下,判断在校内部避难的实际学生数量,并将因操场容量有限而导致无法在校避

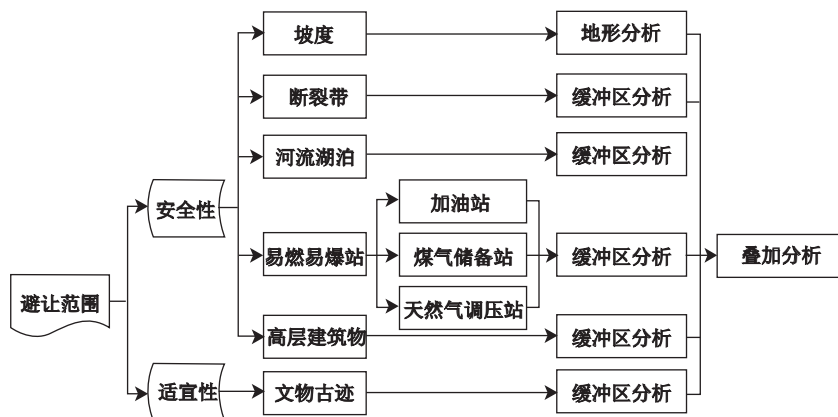


图1 影响避难场地的环境制约因素

Fig.1 The environmental constraints model

表1 环境制约因素避让范围详细列表

Tab.1 Statistics of environmental constraints factors and the influence ranges

影响因素	具体地点	避让范围	标准
安全性A	场地坡度 $A_1$	大于7°	应选择地势较为平坦空旷且地势略高,易于排水,适宜搭建帐篷的地形
	与断裂带距离 $A_2$	200m	应避开地震断裂带,洪涝、山体滑坡、泥石流等自然灾害易发生地段
	与河流湖泊距离 $A_3$	50m	——
	与易燃易爆点	加油站	100m
	距离 $A_4$	燃气储备站	100m
		天然气调压站	100m
适宜性B	与高层建筑物距离 $A_5$	1/2H	应选择在高层建筑物、高耸构筑物的垮塌范围距离之外,H为建筑物高度
	与国家级文物保护单位距离 $B_1$	50m	——

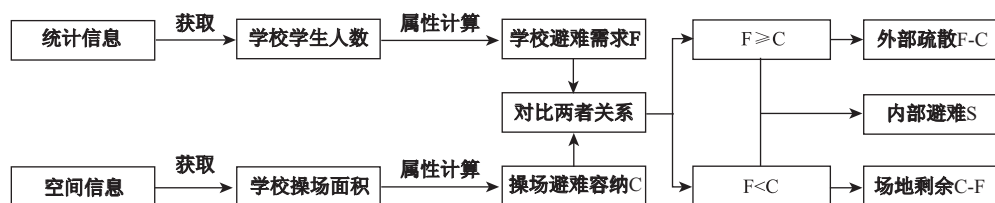


图2 避难需求和场地供给的容纳量计算流程图

Fig.2 Flowchart of capacity calculation of school demand and the site supply

难的学生数量,作为学生的实际避难需求,与此同时,获取操场仍能够提供的剩余容量。

### (3)场地的实际供给容量

选取现有的绿地、公园、停车场、广场等地作为备选场地的重要组成部分。因为这部分场地具有“平灾结合原则”,在不同时间能够发挥不同功效,因此,选择合适的备选场地作为学生避难场地具有重要意义。对这些场地与环境制约因素进行空间叠加后,可获得备选场地的实际容纳量及空间分布情况。

通过将仍能提供的场地剩余容量的学校操场和能够提供实际容量的备选场地,作为备选避难场地,并将这部分场地的容量,共同作为场地的实际供给容量。

## 2.2 基于网络分析的最短疏散道路

在避难场地选址研究过程中,以往研究通常以欧氏距离作为避难疏散可达性分析的主要参数,其结果对于强调路网分析的学校应急避难疏散研究不具适用性。因此,采用网络分析的方法,计算最短疏散道路<sup>[18]</sup>取代直线路径具有可行性和真实性,能够减少误差的产生。

在进行网络分析前,需针对现有路网数据处理,对修正后数据建立道路网络数据集,形成拓扑

结构,在道路相交处形成网络节点。并利用 Network Analysis 的 OD Matrix 方法,对学生实际避难需求和场地的实际供给容量进行处理,即建立出发点到目的地距离矩阵,计算道路网络上避难需求方和场地供给方之间的最短距离。由于中小学学生到达避难地点的范围受到学生步行速度、应急反应时间、道路服务设施等因素限制。因此,缓冲区的方式,按照缓冲区 500m 范围内,两地之间路网距离小于 1000m 的筛选条件,选择部分最短疏散道路,及所对应备选避难场地,用于建模。

## 2.3 最优避难疏散模型

根据避难疏散距离和避难疏散容量关系的特点,采用建立人员与场地分配模型,即最优避难疏散模型<sup>[19]</sup>,实现学生与场地合理有效的分配,使得这些备选避难场地能够在一定空间范围内,发挥最大功能效用,满足部分在校外避难中小学生的避难需求,从而完成中小学校避难场地的选址工作,该模型的计算表达方式如下:

目标公式:

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



约束条件:  $\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq a_i$ , 保证具有避难需求的学生

生必须全部疏散出去,  $\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq b_j$ , 保证场地能够提供最大容纳量,

式(1)中,  $m$  为避难需求学校数量;  $n$  为备选避难场地数量;  $d_{ij}$  表示从避难容量空缺的学校  $i$  到备选避难场地  $j$  的路网最短距离;  $x_{ij}$  表示从避难容量空缺的学校  $i$  到备选避难场地  $j$  的避难疏散人数;  $a_i$  表示从避难容量空缺的学校  $i$  到备选避难场地  $j$  的疏散人数;  $b_j$  表示备选避难场地能够容纳的人数。

### 3 避难场地选址的模型应用案例分析

#### (1) 数据处理

主要包括: 非空间数据和空间数据 2 大类。非空间数据, 主要是指根据部分统计资料, 获得的学校等方面基础信息数据。空间数据, 选择 2006 年北京(彩红外)航片为主要数据来源, 经过数据处理后, 重点提取行政区划、城市主要干道等信息, 其余相关空间数据信息, 通过矢量化手段获得; 其中, DEM 数据是 SRTM3 DEM 数据, 其分辨率是 90m, 对于北京这样地形较为平坦的平原地区, DEM 数据足以满足精度要求。

#### (2) 最优避难疏散模型求解

截止到 2011 年底, 北京市西城区共有 123 所中小学校, 根据北京市教育委员会公布的各级各类学校信息得知<sup>[20]</sup>, 西城区内 115 所中小学校的数据信息较为完整, 本文将针对这些信息较为完整的学校数据进行分析。

在环境制约因素的影响下, 为防止 115 所学校内部出现避难场地供给不足的现象, 针对各学校避难需求和操场服务供给之间的关系进行对比, 从而获取北京市西城区中小学生在避难的实际避难需求人数, 并且计算备选场地供给的实际供给容量。

为防止利用学校与场地之间直线距离带来的误差, 本文采用实际路网信息, 首先, 对城市道路进行修正; 然后, 对修正后道路建立道路网络数据集, 形成拓扑结构, 在道路相交处形成网络节点, 并对避难容量空缺中小学、避难容量剩余学校, 以及备选避难场地进行标号; 最后, 采用网络分析, 计算道路网络上 48 所避难容量空缺的中小学到达 17 所场地避难容量剩余的中小学和 426 个备选避难场地的

最短距离, 如图 3 所示。

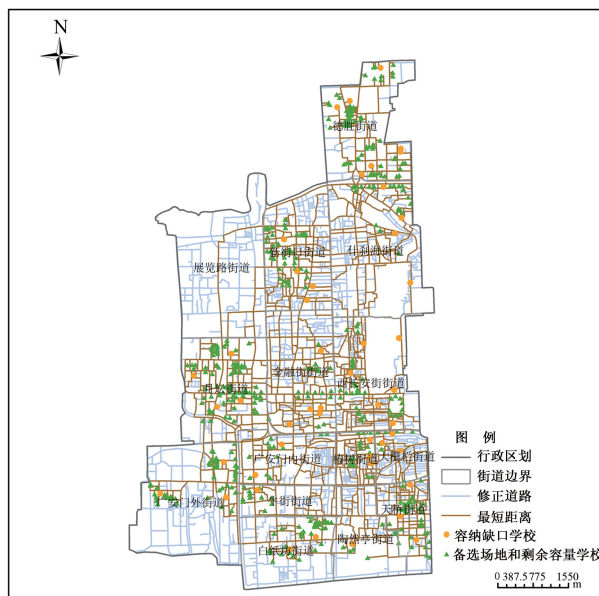


图 3 北京市西城区学校和场地之间的最短距离分布图

Fig.3 The shortest path between school and the site in Xicheng District, Beijing

鉴于地震发生时, 中小学生在最短时间内到达距其学校最短路网距离的地点进行避难, 因此, 分别以 48 所避难容量空缺学校为中心, 建立 500m 缓冲区, 且以这些学校为起点, 路网距离为 1000m 道路, 通过这两种方式进行共同筛选备选避难场地。

鉴此, 以 48 所中小学校作为避难需求方, 用筛选后的备选避难场地作为避难供给方, 在两者间建立最优避难疏散模型, 并通过借助 LINGO 软件编译程序, 解决关于学生避难疏散的人员分配问题。由于 LINGO 软件是一套专门用于求解最优化问题的有效工具, 被广泛应用于解决线性和非线性及整数规划、多目标规划等优化问题<sup>[21]</sup>。通过计算得到结果, 如表 2 所示。

本文以学校序号为  $S_9$  的学校为例进行详细说明, 该校内部共有 704 名学生需要到校外进行避难, 利用最优避难疏散模型数据处理分析得到, 距离学校路网最近的  $D_{311}$  场地, 其场地最大容纳人数为 321 人, 因此, 序号为  $S_9$  学校内部的 321 名学生, 可到达场地  $D_{311}$  进行避难, 剩余的 384 人, 到达路网距离相对较近的  $D_{318}$  场地, 该场地最大容纳人数 394, 可以满足序号为  $S_9$  学校的避难需求, 因此, 场地  $D_{311}$  和场地  $D_{318}$  作为序号为  $S_9$  学校的避难疏散场地。因此, 可以看出各避难容量空缺学校, 在合理规划的前提

表2 各避难场地能够容纳疏散人数结果表(部分)  
Tab.2 Part table of each evacuation shelter's capacity

学校 序号	学校疏 散人数	场地 序号	场地容 纳人数	路网最 短距离	实际疏 散人数
.....	.....	.....	.....	.....	.....
S <sub>9</sub>	704	D <sub>311</sub>	321	420	321
		D <sub>318</sub>	394	720	383
S <sub>10</sub>	989	D <sub>363</sub>	766	282	348
S <sub>11</sub>	900	D <sub>377</sub>	696	297	139
		D <sub>379</sub>	469	228	469
		D <sub>380</sub>	292	215	292
.....	.....	.....	.....	.....	.....

下,能进行有序地疏散避难,如图4所示。

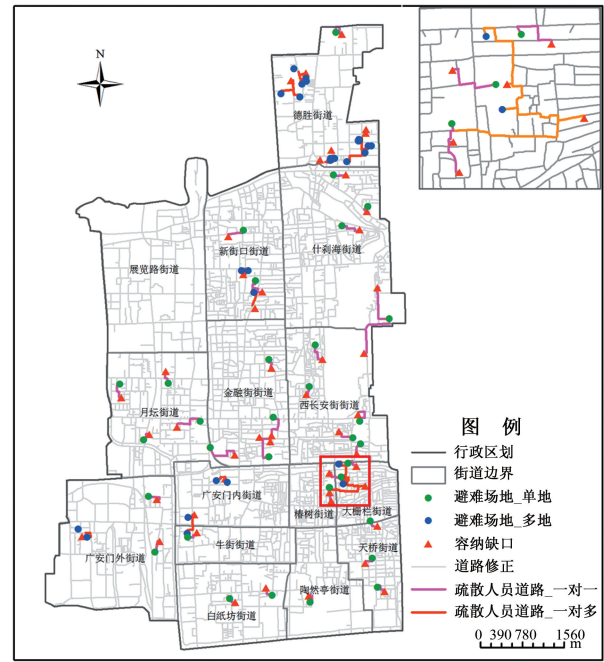


图4 北京市西城区中小学避难场地分布图(图中,红色三角代表避难容纳缺口学校)

Fig.4 School emergency shelter in Xicheng District, Beijing (Red triangle represents the school with an inadequate evacuation capacity)

由图4可见,各学校的避难疏散场地。本文通过建立最优避难疏散模型,对避难需求方的人口数量和场地供给方的容纳数量进行分析,将数量关系作为模型中重要因素,体现了该模型对于数量因素的重视;且文中对实际最短路网距离的计算,即筛选出即筛选出路网距离最近的避难疏散场地,又为学生提供有效地疏散路线。可见,该模型适用于中

小学避难疏散场地的选址分析。

4 结论

本文通过坡度、断裂带、河流湖泊、易燃易爆站点、高层建筑物、文物古迹6个环境制约因素,详细了解学生避难需求方和场地供给方受到的影响,计算避难需求和场地供给的实际有效容量。并用网络分析对路网最短距离进行计算,减少因直线距离作为疏散道路带来的误差。该方法在实际案例应用中,有效地解决了中小学避难场地选址问题。但该模型属于静态研究,故在环境制约因素的选取,需要根据具体研究对象的自然地理和人为地理环境条件进行调整。

参考文献:

[1] 施小斌.城市防灾空间效能分析及优化选址研究[D].西安:西安建筑科技大学,2006.

[2] 相悦丽,方芳,张述成.学校贯彻突发事件应对法初探[J].中国卫生事业管理,2008(11):755-758.

[3] 杨洋.校园针对地震灾害的防灾避难功能适宜性设计研究[D].四川省:西南交通大学,2009.

[4] 周晓猛,刘茂,王阳.紧急避难场地优化布局理论研究[J].安全与环境学报,2006(6):118-121.

[5] 武文杰,朱思源,张文忠.北京应急避难场地的区位优化配置分析[J].人文地理,2010(4):41-44.

[6] Saadatseresht M, Mansourian A, Taleai M. Evacuation planning using multiobjective evolutionary optimization approach[J]. European Journal of Operational Research, 2008(198):305-314.

[7] 黄静,叶明武,王军,等.基于GIS的社区居民避震疏散区划方法及应用研究[J].地理科学,2011,31(2):204-210.

[8] 王芬.应急避难场所专项规划的实施和评价研究——以深圳市为例[D].云南:云南财经大学,2010.

[9] Sorensen J H, Shumpert B L, Vogt B M. Planning for protective action decision making: Evacuate or shelter-in-place [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004(109):1-11.

[10] 佐藤隆雄,山田美由纪.学校の避難所利用における立地安全評価手法に関する研究 その1.学術講演梗概集 [J]. F-1, 都市計画, 建築経済・住宅問題,1995,357-358.

[11] 建部謙治,鈴木賢一.小学校の避難計画に関する基礎的研究:児童の空間認知と火災時の避難経路選択への影響[J].1学術講演梗概集. E-1,建築計画I,各種建物・地域施設,設計方法,構法計画,人間工学,計画基礎,1998, 887-888.

[12] 李帆,王晓敏.灾难中的安全家园——从日本东北地区地震

- 谈中小学校防灾设计[J].建筑与文化,2011(11):126-127.
- [13] 黄猛,张震,丰继林,等.震时中学应急疏散模型建立的探究[J].四川地震,2009(3):45-47.
- [14] 宋正娜,陈雯,袁丰,等.公共设施区位理论及其相关研究述评[J].地理科学进展.2010,29(12):1499-1508.
- [15] 陈志芬,李强,陈晋.城市应急变场所选址规划模型与应用[M].北京:气象出版社,2011,30-35.
- [16] 杨海军,邵全琴.GIS 空间分析技术在地理数据处理中的应用研究[J].地球信息科学,2007,9(5):70-75.
- [17] 戴晴.基于 GIS 的樱井避难场所适宜性评价——以深圳市地震应急避难场所为例[D].北京:中国地质大学,2010.
- [18] 田波.军事地理信息系统构想与空间决策分析[J].地球信息科学,2004,6(1):76-80.
- [19] 谢旭阳.基于 GIS 的重大事故应急疏散决策研究[J].中国安全生产科学技术,2007,3(2):32-35.
- [20] 北京市教育委员会.西城区小学校址信息·各级各类学校名录·政务信息公开.来自 <http://www.bjedu.gov.cn/publish/mainmain/1427/index.html>,2012-12-20 访问.
- [21] 方军,张秀明.基于 Lingo 软件的消防站布局优化[J].消防科学与技术,2006(6):809-819.

## A Location-allocation Model for School Emergency Evacuation

MA Yue, SUN Yonghua\* and LI Xiaojuan

(Base of the State Laboratory of Urban Environmental Processes and Digital Modeling, Beijing 100048; Key Laboratory of Ministry of Civil Affairs of Disaster Assessment and Risk Prevention, Capital Normal University, Beijing 100048; College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** In this paper we aim to develop a location-allocation model for the school emergency shelter selection by using GIS. Through the studies of emergency shelter in recently years, a location-allocation model for school emergency shelter selection is proposed. Based on location-allocation model theory, the optimal evacuation model for school emergency shelter selection is made with constrains of the largest site service capacity and the shortest network distance. In the process of the model construction, we take school emergency shelter's safety and suitability into full consideration. According to the characteristics of this model, the environmental constraints model is constructed to make spatial overlay analysis of six factors by using ArcGIS 9.3. The six factors are terrain slope, rivers and lakes, earthquake fault zone, flammable and explosive site, collapsed range of High-rise buildings, and protection range of cultural relics. The environmental constraints model respectively discusses the five factors influence range when the earthquake happens. And the actual capacity of the evacuation demand and site supply is calculated in this way. In order to reduce the error, the straight-line distance as the evacuation path is not chosen in this paper. Through the network analysis of the unaffected road, the shortest evacuation road is found. Considering the largest site service capacity and the shortest network distance, is the key to solve the problem. By introducing the location - allocation model theory, the solution of the optimal evacuation model is obtained to select the school emergency shelter. In this paper, school emergency shelter in Xicheng District of Beijing City is selected by using this technical method which can effectively solve the problem of school emergency shelter selection. This optimization method is an effective measure to prevent the school from disaster and provide safe site for the student. This academic technology is introduced as the references to relevant researchers on the school emergency shelter selection.

**Key words:** GIS; spatial analysis; optimal evacuation model; evacuation demand; site supply; environmental constraints model

\*Corresponding author: SUN Yonghua, E-mail: syhua1982@163.com