科学通报 2009 年 第 54 卷 第 16 期: 2431 ~ 2436
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

考虑危险源的城市应急交通疏散风险评价模型

李强[①], 陈翔[①], 陈晋[②*], 唐巧[③]

① 北京师范大学资源学院, 北京 100875;
② 北京师范大学减灾与应急管理研究院, 北京 100875;
③ 北京师范大学信息科学与技术学院, 北京 100875
* 联系人, E-mail: chenjin@ires.cn

2009-01-12 收稿, 2009-03-23 接受
科技部"十一五"科技支撑计划(编号: 2006BAJ10B03)和教育部留学回国人员科研启动基金(编号: 教外司留[2007]24)资助项目

摘要 临界簇模型用道路结构和紧急情况下需要疏散的人口数所决定的道路容量需求来表征区域疏散风险, 具有参数较少、方法简单、通过局部寻优而实现全局优化的特点, 为针对开放空间的应急交通疏散问题的解决提供了有力工具. 鉴于城市中的各种危险源已成为威胁城市安全水平的重要因素, 本文在临界簇模型的基础上, 引入事故风险影响因子和疏散方向, 建立了考虑危险源的城市应急交通疏散风险评价模型. 事故风险影响因子从根本上考虑了其与距离的负相关关系, 表达了危险源对应急交通疏散的影响; 疏散方向则体现了避难人群总是背离危险源疏散的基本原则, 通过疏散路径的可行解来确定. 本文还在GIS 的支持下, 对北京市的道路交通网进行了简单的模型应用.

关键词
城市公共安全
临界簇模型
危险源
交通疏散风险
地理信息系统

城市特有的生产要素的集聚性和空间流动性, 使得其公共安全问题具有明显的爆发性、连锁性、衍生性和交叉性[1], 极易造成巨大的生命和财产损失, 对地区乃至整个国家的经济发展与政治稳定构成严峻威胁. 根据发生的机理和过程, 城市公共安全涉及自然灾害、事故灾难、公共卫生和社会安全等方面[2]. 而无论遭遇何种类型的突发事件, 都需要对避难人群实施及时、快速、有效的紧急疏散, 因此, 研究应急疏散问题至关重要.

在过去的十几年中, 封闭空间内(大型建筑物、船、飞机等)的人员应急疏散研究得到广泛关注. 应用计算机仿真方法, 国外开发了许多疏散模拟模型, 比如: EXITT, EGRESS, SIMULEX, EXODUS等[3~6]. 国内在这方面的研究虽然处于探索阶段, 但也提出了一些代表性的模型, 比如: 网格模型、火灾逃生模型、多智能体人员疏散模型等[7~9]. 而针对开放空间的应急交通疏散问题的研究虽然起步相对较晚, 但在国际上也逐步得到重视. 开放空间的应急交通疏散问题的本质是如何在有限时间内, 最大限度地利用交通网络对避难人群实施有效的紧急疏散. 其研究方法主要通过将疏散空间抽象成网络, 利用网络优化模型, 研究道路网的疏散能力、疏散风险评价、交通网络瓶颈探测、最佳疏散路径选择等. 主要研究工作有: Fulkerson等人[10~12]通过对最小费用流问题的求解, 评价了在路网通行能力许可范围内的安全疏散能力; Cova等人[13]通过最小费用流和整数规划的方法, 研究了最佳疏散路径的选择; Cova和Church提出临界簇模型, 通过计算道路容量需求评价网络每个节点和道路的疏散风险程度[14,15]; Myung等人[16]应用针对无向网络k边易损度的评价算法, 得出灾难发生时风险最高的道路, 还有部分研究侧重于应用现代技术实现综合疏散管理[17,18].

引用格式: 李强, 陈翔, 陈晋, 等. 0B 考虑危险源的城市应急交通疏散风险评价模型. 科学通报, 2009, 54: 2431~2436
Li Q, Chen X, Chen J, et al. An evacuation risk assessment model for emergency traffic with consideration of urban hazard installations. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0187-2

在既有研究中, Cova 和 Church 提出的临界簇模型(critical cluster model, CCM)是一个具有较大应用潜力的模型, 它将需要疏散的人口与道路容量需求相结合, 通过建立网络中每一个节点的最大风险集合来确定各节点最困难的疏散条件, 进而得到对区域道路网络的疏散风险评价. CCM 引入参数较少且方法简单, 更重要的是其风险评价是一个在局部寻优的基础上进行全局优化的过程, 可以有效地克服一般风险评价中限制条件较多且评价结果具有较大不确定性等问题, 是应急交通疏散风险评价的很好的工具.

根据《中华人民共和国安全生产法》第九十六条规定, 重大危险源是指长期地或者临时地生产、搬运、使用或者贮存危险物品, 且危险物品的数量等于或者超过临界量的单元(包括场所和设施). 由于目前我国在城市规划和土地使用规划中关于安全规划的研究与应用的严重欠缺和不足[19], 重大危险源在选址、布局方面存在与民用设施安全距离不能保障等问题, 由此引发的事故会对其周边环境和居民造成严重后果[20,21]. 重大危险源因而成为影响城市安全水平的一个重要因素, 对其的规划与整治日益得到重视. CCM以网络中每一个节点为对象, 并不具体针对特定危险源, 所以该模型没有考虑危险源事故特征对应急交通疏散风险的影响, 也未将避难人群的疏散方向引入. 为此, 有必要以CCM为基础, 建立考虑危险源及其发生事故影响模式的城市应急交通疏散风险评价模型, 为制定城市重大危险源应急交通疏散规划, 同时也为遭遇危险源突发事件时有效地实施应急疏散提供科学依据. 这方面的研究目前在国内外尚处于空白状态.

1 临界簇模型(CCM)描述

CCM中的疏散风险指的是某区域内道路和节点在疏散过程中发生交通拥堵的潜在可能性, 以及布置应急响应的交通工具的难度[14], 主要取决于该区域的道路结构和紧急情况下需要疏散的人口分布, 用道路容量需求(bulk lane demand, BLD)表征:

$$\mathrm{BLD}=\frac{P}{C}, \tag{1}$$

式中 P 表示特定区域内需要疏散的总人口数, C 表示该区域通向外部的道路出口总数. BLD 值越高, 表示单位出口道路需要承载的被疏散人口越多, 区域内人口疏散越困难, 疏散风险越大.

将道路网抽象为无向带权图 $G<V, E, W>$, 用图中的边 E 表示道路区间路段, 节点 V 表示道路的交叉口和路段间的拐点, 节点 V 的权重 $W(v)(v\in V(G))$ 表示聚集在该节点的人口. CCM 的基本思路是: 对于任一锚节点 v_0(anchor node), 寻找一个 G 的子图 $G_0(v_0\in G_0)$, 使得 G_0 的 BLD 值达到最大, 并以此作为节点 v_0 的临界簇(critical cluster), 表示节点 v_0 最极端、最困难的疏散条件. 在具体计算中, 如果存在节点 v_1 邻接于 v_0, 则将 v_1 纳入到包含 v_0 的集合, 形成锚节点 v_0 的簇(cluster), 并根据(1)式计算相应的 BLD 值. 以此类推, 如果簇内存在节点 v_{n-1} 与簇外节点 v_n 相邻接, 则将 v_n 加入簇中, 并将新簇的 BLD 值与旧簇的相比较, 直到在一个簇搜寻阈值范围内找到 BLD 的最大值. 此时的簇即为锚节点 v_0 的临界簇, BLD 值即为锚节点 v_0 的疏散风险.

具体地, 以图 1 中的 A 为锚节点(图 1), 在各节点的人口权重假设为 1, 簇的搜寻阈值为 6 个节点的条件下, 按照(1)式分别计算了包含不同节点数的 BLD 值, 结果如图(b)所示. 由于包含 A, B, C, D 这 4 个节点的簇的 BLD 值最大, 该值即为 A 点的疏散风险, 此时的簇即为 A 点的临界簇, 如图 1(a)虚线部分所示.

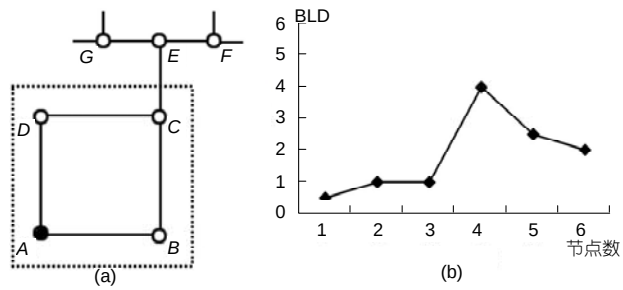


图 1 锚节点 A 的临界簇搜寻结果

2 应急交通疏散风险评价模型

对城市重大危险源的研究, 更多侧重对危险源的定性和定量辨识与评价, 通过分析易燃、易爆、有毒等危险源的常态及危险临界状态阈值, 给出安全等级; 也有侧重危险源区域风险评价和危险源安全规划的研究[19,20]; 但少有针对危险源的应急交通疏散风险评价.

如前所述, CCM 通过需要疏散的人口数所决定的道路容量需求 BLD 来评价应急交通疏散风险. 但

在危险源确定的情况下, 一方面由于不同危险源的影响范围和程度各不相同, 同一危险源在不同距离范围的影响也不相同, 需要考虑危险源事故对应急交通疏散风险的影响, 对 CCM 加以改进. 另一方面, 在 BLD 的计算中, 不仅要考虑道路出口数量, 还要依据避难人群背离危险源而疏散的基本原则, 将疏散方向引入 CCM.

2.1 事故风险影响因子

根据Turner提出的风险理论[22], 危险源事故风险评价主要基于事故发生概率统计和事故后果预测模型. 由于本文并不侧重讨论因危险源内外部环境及危险物类型而形成的危险源固有的风险差异, 因此, 可以在假定城市各危险源发生事故的概率是均等的前提下, 仅仅针对事故发生可能造成的后果进行交通疏散风险评价. 在危险源位置确定的区域道路网络中, 通过在(1)式中加入事故风险影响因子R来表示危险源对道路网中各节点疏散风险的影响, 如下式所示.

$$\mathrm{BLD}=\frac{R\cdot P}{C}. \tag{2}$$

R 取决于事故类型、时间、环境、扩散模式等众多不确定因素, 需要依靠物理和化学等相关学科的理论、积累的数据或者实验结果等来获得. 考虑到在大多数事故后果预测模型中, 距离常常被当作是影响危险源事故风险的重要因素, 这里假定在理想模型中, 危险源对道路网各节点造成的事故风险 R 与危险源到该点的空间欧式距离 D 呈负相关, 用(3)式表示. 将(3)式代入(2)式, 就得到(4)式的针对特定危险源的BLD 计算式.

$$R=\frac{1}{D}, \tag{3}$$

$$\mathrm{BLD}=\frac{P}{D\cdot C}. \tag{4}$$

2.2 疏散方向

在实际的应急响应过程中, 避难人群总是选择与危险源相背的方向进行疏散. 但在人群不充分熟悉区域道路网结构, 又缺乏有序引导的情况下, 不容易找到快捷而有效的疏散路径, 而盲目的路径选择还会导致道路网中局部路段的拥堵现象. 因此, 有必要在应急交通疏散风险评价模型中引入对疏散方向的定义. 疏散方向的确定包括方向判定和方向调整两个步骤, 首先根据背离危险源的方向为安全的疏散方向这一原则, 利用方向判定函数给出道路网中各路段的初始疏散方向; 然后针对道路网中因疏散方向相互抵触而不能形成通路的节点, 根据一定的原则进行方向调整.

(i) 疏散方向判定. 进行疏散方向判定之前, 需要根据危险源在城市中的布局, 定义应急规划区域(emergency planning zone, EPZ)[23], 即以特定危险源事故风险安全距离为边界的、需要制定长期应急疏散规划的区域. 疏散方向判定的原则是比较目标路段两端节点到危险源点的空间欧式距离大小. 在将EPZ的道路系统抽象为简单图$G=\langle V,E\rangle$之后, 放入XY坐标平面, 由此获得所有节点的坐标值. 若危险源为$v_0(x_0,\ y_0)\in V$, 且存在节点$v_1(x_1,\ y_1)\in V$和节点$v_2(x_2,\ y_2)\in V$, v_1邻接于v_2, 则对于路段$e_{12}=\langle v_1,\ v_2\rangle\in E$, 可以依据(5)式判定其初始疏散方向.

$$F(e_{12})=\frac{\sqrt{(x_1-x_0)^2+(y_1-y_0)^2}}{\sqrt{(x_2-x_0)^2+(y_2-y_0)^2}}, \tag{5}$$

(1) 若 $F(e_{12})<1$, 则 v_1 是 e_{12} 的始点, 即 e_{12} 的疏散方向为 $v_1\rightarrow v_2$;

(2) 若 $F(e_{12})>1$, 则 v_2 是 e_{12} 的始点, 即 e_{12} 的疏散方向为 $v_2\rightarrow v_1$;

(3) 若 $F(e_{12})=1$, 则 e_{12} 的疏散方向随机, 将在后续的方向调整中进一步判定.

(ii) 疏散方向调整. 疏散方向调整主要依据节点的出度, 即节点作为边的始点的次数之和, 记作$d^+(v)$[24]. 节点的出度越高, 表明通过该节点疏散到EPZ以外区域的可能性越大.

图 2 表示了疏散方向调整的过程(图 2). 图中的节点 v_0 为危险源, 灰色线条表示 EPZ 边界, 除节点 v_6 以外, 其余 5 个节点均位于 EPZ 之内. 图 2(a)表示的是根据(5)式得出的所有边的初始疏散方向. 在规定危险源 v_0 的出度为 0, $d^+(v_0)=0$; EPZ 以外节点 v 的出度为∞, $d^+(v)=\infty$的条件下, 按照以下步骤进行方向调整.

(1) 搜寻满足 $d^+(v_i)=0$ 的节点 $v_i(i=1,2,\cdots,n,\ v\in V$ 且 $v\neq v_0)$, 将其分别作为调整点. 例如在图 2(a)中, 因为 $d^+(v_2)=d^+(v_4)=0$, 所以将节点 v_2 和节点 v_4 作为调整点.

(2) 若调整点 v_i 有且仅有一个相邻节点, 则改变调整点与该节点之间边的方向. 因此, 对于图 2(a)中的调整点 v_4, 改变其与节点 v_3 之间的箭头 5 的方向, 如图 2(b)所示.

(3) 若调整点 v_i 存在一个以上的相邻节点, 则在这些节点中寻找出度 $d^+(v_m)$最大的节点, 并改变调整点 v_i 与相邻节点 v_m 之间边的方向. 若多个相邻节点的出度均为最大值, 则通过步骤(4)进一步调整. 对于图 2(a)中的调整点 v_2, 与节点 v_1 和节点 v_3 相邻, 但 $d^+(v_1)=d^+(v_3)=1$(此时箭头 5 已经调整), 因此不能通过步骤(3)完成调整.

(4) 若两个节点通过k条边连通, 则称k为两节点间通路的长度[24]. 与节点v_i连通且长度为k的节点j可以记作$v_{i,k,j}(j=0,1,2,\cdots,n)$. 因此, 进一步将步骤(3)扩展为: 若调整点$v_i$与多个节点$v_{i,k,j}(j=1,2,\cdots,n)$连通, 且 $d^+(v_{i,k,1})=d^+(v_{i,k,2})=\cdots=d^+(v_{i,k,n})$, 则在节点 $v_{i,k+1,j}$ $(j=1,2,\cdots,n)$中寻找出度$d+(v_{i,k+1,m})$最大的节点, 据此改变调整点v_i与节点$v_{i,1,m}$之间边的方向. 对于图 2(a)中的调整点v_2, 搜寻得到与其通过 2 条边连通的节点为v_0和v_5. 由于经过节点v_1而连通的节点v_0为危险源, $d^+(v_0)=0$; 而经过节点v_3连通的节点v_5的出度为 $d^+(v_5)=2$, 则改变箭头 3 的方向如图 2(b)所示.

(5) 若道路网中存在出度 $d^+(v_i)=0$ 的节点, 则需要重复步骤(2)进行多次调整, 直到除危险源以外的所有节点的出度均大于 0. 在图 2(b)中, 由于节点 v_3 的出度 $d^+(v_3)=0$, 则将节点 v_3 作为调整点, 继续进行新一轮的方向调整, 直到得出图 2(c)的结果为止.

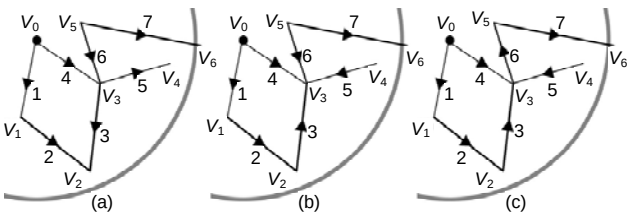


图 2 疏散方向的判定和调整

2.3 疏散风险评价

将危险源事故风险影响因子和疏散方向引入 CCM, 直接影响道路网中各节点的临界簇确定, 进而使得表征交通疏散风险的 BLD 值发生变化. 在图 1(a)中加入固定危险源 O, 仍然以 A 为锚节点, 在各节点的人口权重假设为 1, 簇的搜寻阈值为 6 个节点的条件下, 确定 A 点的临界簇, 并计算其疏散风险 BLD 值.

首先按照上文所述步骤, 确定图 3(a)中各条边的疏散方向(图 3(a)). 其次, 在簇搜寻过程中, 当且仅当某搜索节点与簇内节点连接的边的方向指向簇外时, 才将该节点纳入到锚节点的簇内; 同时, 在计算簇的道路出口数时, 也仅仅考虑方向指向簇外的出口. 如图 3(a)所示, 当考虑 A, B, C, D, E5 个节点时, 虽然存在与节点 E 相邻的两条边 EG 和 EF, 但由于 EG 的方向指向簇内, 不构成簇的疏散出口, 所以无法将节点 G 加入到簇内. 因此, 通过(6)式和(7)式可以计算得到包含 5 个节点和 6 个节点的簇的 BLD 值.

包含不同节点数的 BLD 值计算结果如图 3(b)所示. 将其与图 1(b)相比可以知道, 锚节点 A 的临界簇由包含 A, B, C, D 4 个节点变为图 3(a)中虚线所示的包含 A, B, C, D, E 5 个节点, A 点的疏散风险也由原来的 4 变为 5.

$$\mathrm{BLD}_{ABCDE}=\frac{P_{ABCDE}}{C_{ABCDE}}=\frac{5}{1}=5, \tag{6}$$

$$\mathrm{BLD}_{ABCDEF}=\frac{P_{ABCDEF}}{C_{ABCDEF}}=\frac{6}{2}=3. \tag{7}$$

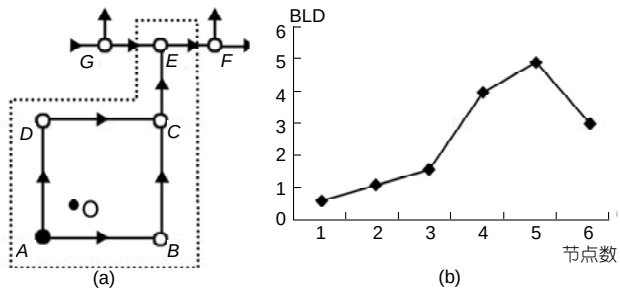


图 3 考虑疏散方向的锚节点 A 的临界簇搜寻结果

在实际的道路网疏散风险评价过程中, 通常利用(8)式把路段两端节点的疏散风险值加载到路段上, 形成整个道路网的疏散风险值空间分布.

$$\mathrm{BLD}_{\overline{AB}}=\frac{\mathrm{BLD}_A+\mathrm{BLD}_B}{2}. \tag{8}$$

3 应用实例

北京市作为首都, 公共安全保障的任务尤为艰巨. 近年来, 随着经济的快速发展和城市人口的持

续增长, 公共安全风险日益严峻. 本文尝试将上文提出的模型应用于北京市道路交通网的应急疏散风险评价.

3.1 数据处理

以 ArcGIS 为平台, 综合基于 Visual C++开发的计算模块来实现应急交通疏散风险评价. ArcGIS 的空间分析模块和内置的 VBA 二次开发语言可以完成道路网数据的拓扑关系建立、人口统计数据的空间分配等工作, 并实现对属性数据库的操作. 同时, 针对 ArcGIS 计算功能相对薄弱的事实, 采用 VC++提供快速有效的运算接口, 在将道路网中的拓扑和属性数据进行输出后, 利用模块完成疏散方向的判定和疏散风险的计算. 计算结果可以再次返回到 ArcGIS 中完成空间表达.

通过对公开发行的《北京城区图》进行扫描数字化, 完成主要道路分布的提取. 根据 2004 年北京市主城区各街道人口普查统计资料, 综合北京市城区建筑物密度分布图(通过同期QuickBird遥感影像解译得到)进行空间化处理, 获取人口密度空间分布信息[25]. 进而借助GIS平台, 按照如下的步骤, 完成人口密度数据在道路网中各节点的分配. 首先, 将城市道路图和人口密度分布图精确配准; 然后, 以道路网中的节点生成泰森多边形来进行区域划分[26]; 最后, 通过叠加人口密度分布图, 统计每个子区域的人口数, 并利用子区域与节点一一对应的关系, 将人口数分配到各节点上(图 4).

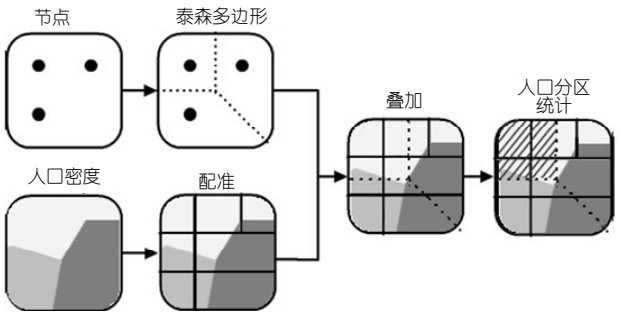


图 4 人口数据在各节点分配的示意图

3.2 风险评价结果

以北京市三环路以内作为 EPZ 区域, 并假设在人口稠密、道路交通流量大的城市中心商业区存在危险源 *O* 点. 应用应急交通疏散模型, 分别在只考虑事故风险影响因子、同时考虑事故风险影响因子和疏散方向的情景下进行疏散风险评价. 在模型应用中, 由于三环内道路密集, 结构复杂, 路网节点数超过 800 个, 所以选取 10 个节点作为临界簇的搜寻阈值.

不同情景下的疏散风险评价结果如图 5 和图 6 所示. 图 5 中疏散风险整体上呈现以危险源为中心向外逐步递减的特征, 这一结果表明, 在 CCM 中引入事故风险影响因子, 可以更加贴切地表现存在特定危险源条件下的交通疏散风险分布. 进一步对比图 5 和 6 可以看出, 由于考虑了疏散方向, 图 6 中一些区域的 BLD 值变小, 说明在 CCM 中引入疏散方向能够更好地调配道路利用, 可以在很大程度上达到减轻局部或全局交通疏散风险的目的.

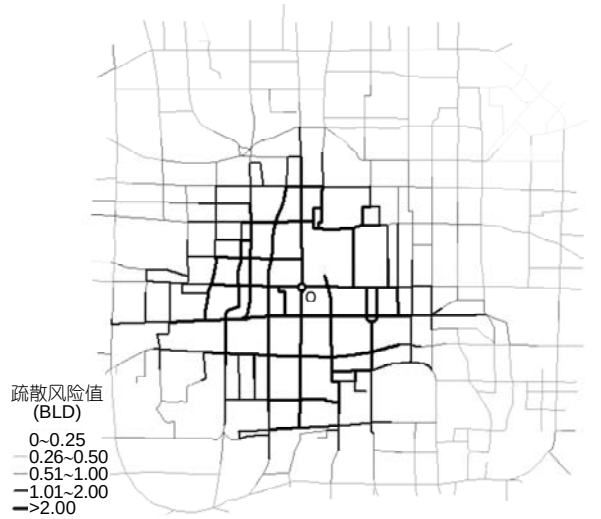


图 5 考虑事故风险影响因子的交通疏散风险评价结果

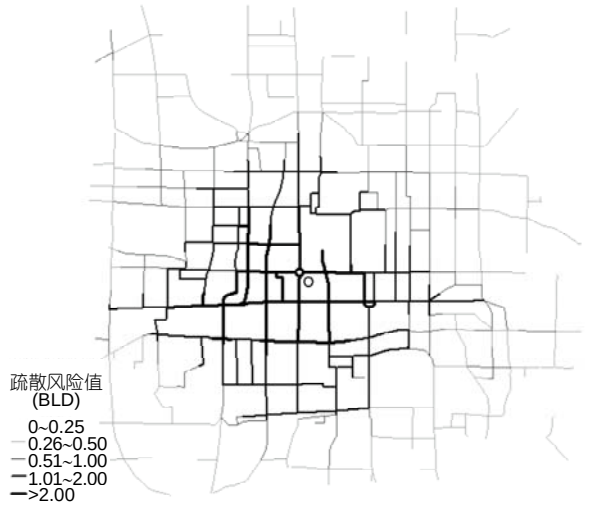


图 6 考虑事故风险影响因子和疏散方向的交通疏散风险评价结果

4 结论与讨论

鉴于应急交通疏散问题在保障城市公共安全方面的重要作用，考虑到与城市生产和生活密切相关的各种危险源已成为威胁城市安全水平的重要因素，本文在临界簇模型 CCM 的基础上，通过引入事故风险影响因子和疏散方向，建立了考虑危险源的城市应急交通疏散风险评价模型，并在 GIS 的支持下，以北京市的道路交通网为对象，进行了简单的模型应用.

在模型中考虑事故风险影响因子，可以更好地表达危险源在不同距离范围对应急交通疏散的影响，而引入疏散方向是为了体现避难人群总是背离危险源疏散的基本原则. 这些改进拓展了 CCM 在区域应急交通疏散风险评价方面的应用. 对于事故风险影响因子，模型中只是考虑了最根本的其与距离的负相关关系，但其具有的广适性为今后的深入研究奠定了基础，可以根据特定类型的危险源及其固有的风险差异，具体探讨事故风险影响因子的作用. 对于疏散方向的确定，目前模型中只是依据疏散路径的可行解而非最优解，需要进一步探讨在满足所有节点都能找到通路的前提下得到最优疏散路径的方法.

作为本文建模基础的临界簇模型 CCM，其特点在于用道路结构和需要疏散的人口数所决定的道路容量需求来表征静态的区域疏散风险，主要用于相关管理部门的道路改造和应急交通指挥. 同时，该模型在各节点临界簇的搜寻中体现了对疏散过程中发生交通拥堵潜在可能性的考虑. 而针对现实的应急交通疏散过程中存在的许多影响疏散效率的因素，如：避难人群的个体或群体行为特征、道路容量不足、道路受损、不合理的路径选择等而导致的局部路段或者交叉路口拥堵等，需要在更注重微观和动态条件的区域疏散风险动态模型中体现. 如何将已建立的城市应急交通疏散风险评价模型发展成为区域疏散风险动态模型将是今后工作的重点.

参考文献

1 曾宪云，李列平，邓曙光. 城市公共安全的现状及防灾减灾策略. 安全生产与监督, 2006, 1: 44—46
2 李彤. 论城市公共安全的风险管理. 中国安全科学学报, 2008, 18: 65—72
3 Kisko T M, Francis R L. EVACNET+: A computer program to determine optimal evacuation plans. Fire Saf J, 1985, 9: 211—220[DOI]
4 Ketchell N, Cole S S, Webber D M. The EGRESS code for human movement and behaviour in emergency evacuation. In: Smith R A, Dickie J F, eds. Engineering for Crowd Safety. New York: Elsevier, 1993. 361—370
5 Thompson P, Marchant E. A computer model for the evacuation of large building populations. Fire Saf J, 1995, 24: 131—148[DOI]
6 Owen M, Galea E R, Lawrence P J. The exodus evacuation model applied to building evacuation scenarios. J Fire Prot Eng, 1996, 8: 65—86[DOI]
7 方正，卢兆明. 建筑物避难疏散的网格模型. 中国安全科学学报, 2001, 11: 10—13
8 杨立中，方伟峰，黄锐，等. 基于元胞自动机的火灾中人员逃生的模型. 科学通报, 2002, 47: 1143—1147
9 崔喜红，李强，陈晋，等. 基于多智能体技术的公共场所人员疏散模型研究. 系统仿真学报, 2008, 20: 1006—1023
10 Fulkerson D R, Weinberger D B. Blocking pairs of polyhedra arising from network flows. J Comb Theory B, 1975, 18: 265—283[DOI]
11 Newton C, Mussa R N, Sadalla E K, et al. Evaluation of all alternative traffic light change anticipation system. Accident Anal Prev, 1997, 29: 201—209[DOI]
12 Hobeika A G, Changkyun K. Comparison of traffic assignments in evacuation modeling. Trans Power Syst, 1998, 45: 192—198
13 Cova T J, Johnson J P. A network flow model for lane-based evacuation routing. Transp Res Pt A, 2003, 37: 579—604
14 Cova T J, Church R L. Modelling community evacuation vulnerability using GIS. Int J Geogr Inf Sci, 1997, 11: 763—784[DOI]
15 Church R L, Cova T J. Mapping evacuation risk on transportation networks using a spatial optimization model. Transp Res Pt C, 2000, 8: 321—336[DOI]
16 Myung Y S, Kim H. A cutting plane algorithm for computing k-edge survivability of a network. Eur J Oper Res, 2004, 156: 579—589[DOI]
17 Wei Y, Linet Z. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. Eur J Oper Res, 2007, 179: 1177—1193[DOI]
18 Hamza-Lup G L, Hua K A, Peng R. Leveraging e-transportation in real-time traffic evacuation management. Electron Commer Res Appl, 2007, 6: 413—424[DOI]
19 吴宗之. 城市土地使用安全规划的方法与内容探讨. 安全与环境学报, 2004, 4: 86—90
20 翁韬，朱霁平，麻名更，等. 城市重大危险源区域风险评价研究. 中国工程科学, 2006, 8: 80—84
21 吴宗之，多英全，魏利军，等. 区域定量风险评价方法及其在城市重大危险源安全规划中的应用. 中国工程科学, 2006, 8: 46—49
22 Turner J R. The Hand Book of Project-based Management. Maiden Bead: McGraw-Hill Book Company, 1992
23 Sorensen J H, Vogt B M, Mileti D S. Evacuation: An Assessment of Planning and Research. Washington D C: Oak Ridge National Laboratory, 1987
24 耿素云，屈婉玲，张立昂. 离散数学. 第 3 版. 北京：清华大学出版社, 2004
25 卓莉，陈晋，史培军，等. 基于夜间灯光数据的中国人口密度模拟. 地理学报, 2005, 60: 266—276
26 Flowerdew R, Green M. Developments in the area interpolation methods and GIS. Ann Reg Sci, 1992, 26: 67—78[DOI]