引文格式：孙克, 刘刚, 何敬. 顾及道路风险的应急疏散路径规划方法[J]. 地理空间信息, 2023, 21(4): 19–22 . doi:10. 3969/j.issn. 1672–4623.2023.04.005

顾及道路风险的应急疏散路径规划方法

孙　克[1]，刘　刚[1,2*]，何　敬[1]
（1. 成都理工大学地球科学学院，四川 成都 610059；
2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室（成都理工大学），四川 成都 610059）

摘　要：突发自然灾害下的道路网络存在安全隐患，安全性成为应急疏散中首先要考虑的因素。当前对应急疏散的研究主要集中在疏散效率方面，对疏散的安全性、道路风险的考虑仍然存在不足。针对这一问题，从路径的可靠性角度考虑道路风险因素，建立了基于时间和道路风险的路径可靠性度量模型，进而提出了顾及道路风险的应急疏散路径规划方法。为检验方法的有效性，选择位于地质灾害多发区的四川茂县为研究区进行实验分析。结果表明，该方法得到的受灾点人员与应急避难场所之间的分配关系合理，所规划路径有效地避开了风险较高的道路，该方法稳定、可靠，可以为城市的应急疏散体系建设提供科学参考。

关键词：应急疏散；道路风险；GIS；路径规划
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672−4623（2023）04−0019−04

Emergency Evacuation Path Planning Method Considering Road Risks

SUN Ke[1], LIU Gang[1,2], HE Jing[1]

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and GeoenvironmentalProtection
(Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, China)

Abstract: The road network under sudden natural disasters has hidden safety hazards, and safety has become the first factor to be considered in emergency evacuation. The current research on emergency evacuation mainly focuses on evacuation efficiency, and the consideration of evacuation safety and road risk is still insufficient. For this problem, we considered road risk factors from the perspective of path reliability, established a path reliability measurement model based on time and road risk, and then proposed an emergency evacuation route planning method that taking road risks into account. In order to test the effectiveness of this method, we selected Mao County, Sichuan Province, located in an area prone to geological disasters, as the research area for experimental analysis. The results show that the distribution relationship between the disaster-affected people and emergency shelters obtained by this method is reasonable, the planning path effectively avoids the higher-risk roads, and the method is stable and reliable,which can provide scientific reference for the construction of urban emergency evacuation system.

Key words: emergency evacuation, road risk, GIS, path planning

应急疏散路径规划是突发性灾害下应急救援的重要工作。特别是面对地质灾害事件，如何快速转移受灾点人员是应急管理、地理信息系统、交通等领域研究的热点问题[1]。目前，国内外学者对此进行了大量的研究[2–5]，基于对已有研究的分析，本文采用GIS方法构建研究区域的疏散网络拓扑模型，模拟灾害点和风险区，评估各弧段的风险系数，充分考虑灾害条件下网络中各弧段所受的影响，以经典最优路径算法进行求解，并将该方法与基于时间最短路径算法和距离最短路径算法的疏散路径规划结果进行比较，验证了该模型的有效性。

1　研究区概况及数据说明

1.1　研究区概况

茂县位于四川省西北部、阿坝藏族羌族自治州东南部的青藏高原东南边缘，东西长 116.62 km，南北宽 93.73 km，面积 3 903.28 km^2，常住人口 95 361 人。茂县境内自然地质环境复杂多样，地质构造特殊，各

收稿日期：2021−11−09；修回日期：2022−02−17。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41871303）；四川省科技厅重点研发项目（2021YFG0365）；地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室项目（SKLGP2018Z010）；四川省自然资源厅资助项目（kj−2021−3）。
第一作者简介：孙克（1996—），硕士研究生，主要从事应急路径规划、GIS网络分析等方面研究，E−mail："skmdna"<skmdna@163.com>。
通信作者：刘刚（1986—），博士，博士生导师，教授，主要从事GIS理论与方法、空间网络、动态交通诱导等方面研究，E−mail：liuganggis@sina.com。

种泥石流、滑坡等地质灾害频繁发生。

1.2 数据说明

研究数据包括：①茂县基础地理信息。②茂县主城区人口统计数据。③道路网络数据。④已建成避难场所数据。其中，数据①、②来源于茂县统计年鉴2017和Google Earth影像，数据③由四川省及茂县测绘部门提供，数据④来源于阿坝州政府信息公开工作办公室。

2 模型构建

采用GIS方法将道路交叉口、居民点以及应急避难场所转化为结点，道路抽象为弧段，构建起应急疏散的网络模型，用$N=(C, S, V, E)$表示。其中C和S分别为居民点和避难场所；V为道路结点集合；E为弧段集合。疏散网络中的主要要素及其属性信息如表1所示。考虑到部分居民点和避难场所与道路在拓扑上没有完全连通，采用最短的直线弧段将其与道路网络连接[6-7]。构建模型如图1所示。

表1 应急疏散网络要素

要素	数量
居民点/个	42
避难点/个	9
道路结点/个	463
弧段/条	659
需疏散人数/人	13 250
避难点容量/人	39 150

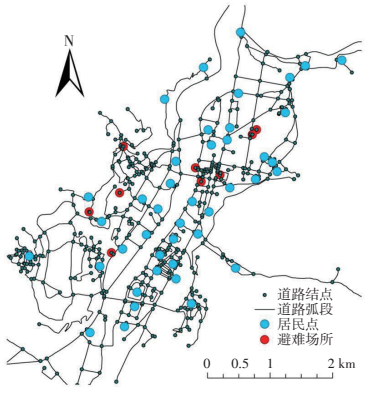


图1 应急疏散网络

3 顾及道路风险的应急疏散路径规划方法

3.1 分组疏散策略

利用GIS应急疏散网络模型，通过Dijkstra算法求解最优路径。考虑到受灾人群集中分布在一定空间内，对于一个受灾居民点而言，其附近的避难场所不一定能够一次性安置所有受灾的居民[8]，避难场所的容量有限，集体疏散容易造成避难场所的冗余，疏散效率低下。若居民点人数未超出避难点容量，则该居民点就是一个疏散组。当居民点人数超出了避难点的容量时，则对居民点进行拆分[9-10]，拆分的疏散组等于该避难点的剩余容量。顾及到拆分的疏散组数量太多不利于疏散过程中的管理，因此定义最小疏散组人数（MinPop），限制疏散组的拆分次数，从而使受灾点拆分次数比较合理。这里模拟疏散过程中设定MinPop=50。

3.2 基于道路风险的疏散目的地分配模型

路阻函数也就是道路阻抗函数，它是把道路阻抗定量化的数学表达式。路阻函数能够对行驶时间和交通条件（如交通速度、流量、密度等构成）以及道路条件（如道路宽度、道路几何形状、道路类型等）之间的相互关系进行综合反映[11-12]。本文构建的路阻函数表达式为：

$$\min F = T_{ij} H_{ij} \tag{1}$$

$$T_{ij} = \sum_{k=1}^{E} t_k \tag{2}$$

$$H_{ij} = \sum_{K=1}^{E} \delta_k l_k \tag{3}$$

式中，F为道路阻力，它反映了道路的风险程度；i为疏散组的编号；j为避难点的编号；T_{ij}为从i到j的疏散时间；E为道路弧段数量；t_k为疏散组通过每一弧段所用时间；k为其编号；H_{ij}为从i到j的道路风险；δ_k为各弧段的风险系数；l_k为弧段的长度。

在疏散过程中，首先按照时间最优原则依次确定每个受灾居民点对应的3个候选避难场所，按时间由小到大分为一级、二级、三级避难点，由于避难点的数量明显少于居民点的数量，故很容易出现多个居民点人口疏散到同一避难点的情况。此时，若居民点总人数小于一级避难点容量，则将所有居民全部分配到该避难点；若居民点总人数大于一级避难点容量，则需要考虑哪些居民优先分配到一级避难点，哪些居民分配到二级或三级避难点。为了解决这一分配问题，本文构建了考虑道路风险的路阻函数，当居民点总人数大于一级避难点容量时，通过比较路阻函数的大小，决定每个疏散组居民相对应的各等级的避难点。该过程通过ArcGIS Engine编程语言实现。

4 案例研究

4.1 道路风险系数的确定

以四川省阿坝州茂县主城区为例，对前续提出的算法和模型进行案例分析。综合考虑道路宽度、地形、地貌、坡度等因素，邀请专家对各道路弧段的风险系数进行打分。数值越大，风险越高，其中风险系

数0~3为低风险路段，4~7为中风险路段，8~10为高风险路段。

4.2　灾害仿真模拟

假设当地受连日强降水影响，气象局发布地质灾害气象风险橙色预警，茂县主城区局部地区发生突发性地质灾害风险高，应立即启动地质灾害应急预案，组织抢险队伍，转移危险地带居民。灾害风险区及受影响的20个居民点处于灾害风险区内，标注为C1~C20，需要对这20个居民点的居民（共计13 250人）进行紧急疏散转移。

4.3　应急疏散路径规划结果

4.3.1　局部区域应急疏散路径规划结果

本文以疏散时间较短和风险最低为优化目标。为了验证模型的有效性，采用经典Dijkstra最短路径算法[13]，同时求解在分组疏散策略下的时间最优路径和距离最优路径[14]，在进行疏散目的地分配时，分别考虑道路阻力、时间和距离这3个因素；最后又求解了集体疏散策略下的时间最短路径，在进行疏散目的地分配时，考虑道路阻力。这样就形成了分组疏散的时间最优路径算法、距离最优路径算法、顾及道路风险的时间最优路径算法以及集体疏散策略下的顾及道路风险的时间最优路径算法4种疏散路径规划结果。

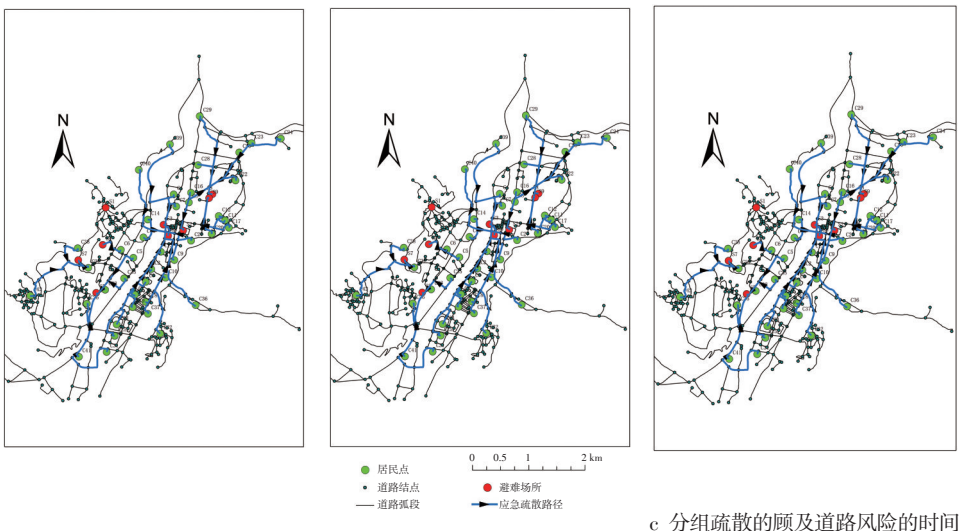
根据路径规划结果可知，按照时间最优路径算法，共有21个疏散组，平均疏散长度为935.20 m，平均疏散时间为95.35 s，平均道路风险为2 175.41；通过距离最优路径算法进行疏散时，疏散组数量为21个，平均疏散长度为906.72 m，平均疏散时间为98.38 s，平均道路风险为2 183.07；采用本文提出的顾及道路风险的时间最优路径算法，共有22个疏散组，平均疏散长度为922.70 m，平均疏散时间为94.48 s，平均道路风险为2 130.58；按照集体疏散的顾及道路风险的时间最优路径算法，疏散组就是20个居民点，平均疏散长度为943.95 m，平均疏散时间为95.64 s，平均道路风险为2 215.49。。

综合数据可知，在突发自然灾害背景下的应急疏散，按照传统的时间最优和距离最优最短路径算法，虽然疏散距离和疏散时间较短，但2种方法的道路风险都比较高，在安全性方面难以满足应急疏散的要求。以基于路阻函数的道路风险和疏散时间最优的疏散路径对应的道路风险最低，疏散时间也最短，在疏散效率和安全性方面都有比较好的效果。

在同时采用考虑道路风险的疏散时间最优算法的情况下，分别以分组疏散和集体疏散策略进行路径规划[15]，结果显示，两者在疏散时间上都比较短，有一定时间优势。但是在平均疏散距离和平均道路风险方面，分组疏散策略优势明显，安全性更高，而且采用分组疏散策略能够使避难场所容量及应急救援物资得到充分的利用。

4.3.2　全域应急疏散路径规划结果

假设研究区域突发性地质灾害风险很高，需要对区域内的全部居民（42个居民点）进行紧急疏散转移，这种模拟情况可进一步验证模型的有效性，并且能够分析现有避难场所能否满足所有居民应急避难的需求[16]。同样，采用经典Dijkstra最短路径算法，同时求解在分组疏散策略下的时间最优路径和距离最优路径，在进行疏散目的地分配时，分别考虑道路阻力、时间和距离这3个因素，将分组疏散的时间最优路径算法、距离最优路径算法、顾及道路风险的时间最优路径算法等3种疏散路径规划结果进行对比。路径规划结果如上图（图2）所示。



a 分组疏散的时间最优路径算法　b 分组疏散的距离最优路径算法　c 分组疏散的顾及道路风险的时间最优路径算法

图2　全域应急疏散路径规划结果

根据路径规划结果可知，按照时间最优路径算法，共有43个疏散组，平均疏散长度为1 170.69 m，平均疏散时间为117.79 s，平均道路风险为3 165.12；通过距离最优路径算法进行疏散时，疏散组数量为43个，平均疏散长度为1 143.95 m，平均疏散时间为121.99 s，平均道路风险为2 731.01；采用本文提出的顾及道路风险的时间最优路径算法，共有44个疏散组，平均疏散长度为1 148.43 m，平均疏散时间为115.99 s，平均道路风险为2 631.89。通过3种疏散路径规划结果的对比可知，在区域内所有居民点都受灾的情况下，本文提出的顾及道路风险的时间最优路径算法依旧体现出了良好的可靠性，用时短、安全性高。采用这种算法，区域内民众能够安全迅速地转移到最优的避难场所，现有避难场所基本能够满足所有居民应急避难的需求。

5 结 论

本文对突发自然灾害条件下的应急疏散方法进行了研究，模拟了局部居民点受灾和全域所有居民点受灾的2种应急疏散场景，将该模型与时间最优和距离最优的路径规划结果进行对比，验证了模型的有效性。本文提出的路径规划方法得到的受灾点人员与应急避难场所之间的分配关系合理，所规划路径有效地避开了风险较高的道路，方法稳定、有效，可以为城市的应急疏散体系建设提供科学的参考。

参考文献

[1] Southworth F. Regional Evacuation Modeling: A State-of-the-art Review[J]. Oak Ridge National Labs, 1991, 11(5): 511-521

[2] Yamada T. A Network of Approach to a City Emergency Evacuation Planning[J]. International Journal of Systems Science,1996,27(10):931-936

[3] Campos V B G, Dasilva P A L, Netto P O B. Evacuation Transportation Planning: A Method of Identifying Optimal Independent Routes[C]//Surcharov L J. Proceedings of Urban Transport V: Urban Transport and the Environment for the 21st Century. WIT Press,Southampton,2000:555-564

[4] Dunn C E,Newton D. Optimal Routes in GIS and Emergency Planning Applications[J]. Area,1992,24(3):259-267

[5] 袁媛,汪定伟. 灾害扩散实时影响下的应急疏散路径选择模型[J]. 系统仿真学报,2008,20(6):1 563-1 566

[6] 翁敏,毋河海,杜清运,等. 基于道路网络知识的启发式层次路径寻找算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2006,31(4):360-363

[7] 钱颂迪,甘应爱,田丰,等. 运筹学[M]. 北京:清华大学出版社,1990

[8] Yi W,Qzdamr L. A Dynamic Logistics Coordination Model for Evacuation and Support in Disaster Response Activities[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 179(3):1 177-1 193

[9] 沈航,李梦雅,王军. 风暴洪水灾害应急疏散方法研究:以浙江省玉环县为例[J]. 地理与地理信息学科,2016,32(1):122-127

[10] 刘春年,邓青菁. 应急决策信息系统最优路径研究:基于路阻函数理论及Dijkstra算法[J]. 灾害学,2014,29(3):18-23

[11] 任伟建,左方晨,黄丽杰. 基于GIS的Dijkstra算法改进研究[J]. 控制工程,2018,25(2):188-191

[12] Xiang L,Qiu P L,Christophe G. A Time-extended Network Model for Staged Evacuation Planning [J]. Safety Scince, 2018,108:225-236

[13] 李梦雅,王军,沈航. 洪灾应急疏散路径规划算法优化[J]. 地球信息科学学报,2016,18(3):362-368

[14] 康顺旺,刘刚. 考虑毒性负荷及路径长度的应急疏散路径规划[J]. 测绘科学技术学报,2020,37(6):652-658

[15] 姜文,秦其明. 基于GIS的路网应急疏散脆弱性研究[J]. 国土资源遥感,2019,31(1):277-282

[16] 刘小明,胡红. 应急疏散研究现状与展望[J]. 交通运输工程学报,2008,8(3):108-121

（上接第4页）

[6] 陈忆群,曹瑾音. 一种均衡代价的网格简化方法[J]. 计算机工程与应用, 2011,47(5):75-79

[7] 刘盛恩,陈向宁. 基于质心Voronoi图重构的UDSM边折叠简化[J]. 应用光学,2020,41(1):127-133

[8] 李少卿,霍亮. 顾及角度误差的三维建筑模型边折叠简化算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021,46(8):1 209-1 215

[9] 范豪,刘峻. GPU并行加速的边折叠简化算法[J]. 计算机工程与设计,2016,37(11):3 051-3 057

[10] 张玉,付昕乐. 基于GPU的网格模型简化算法研究[J]. 测绘,2016,39(2):90-93

[11] 陆凤,陈莉. 基于Memoryless算法的河道水下地形模型简化研究[J]. 地理空间信息,2018,16(11):113-117