

# 西南山地多灾区域道路网络可靠性规律分析

黄勇<sup>1,2</sup>, 魏猛<sup>1,2</sup>, 万丹<sup>1,2</sup>, 蔡浩田<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400030; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:** 为揭示西南山地城乡道路系统在多灾情景下的损毁机制,提升多灾地区路网可靠性服务能力,选取典型西南灾害多发区大渡河流域康定段作为研究靶区,采用复杂网络以及计算机仿真分析方法,建立区域道路网络模型以及多灾干扰模拟机制。以整体连通性和高效连通性为指标体系,在多灾情景模拟干扰下探索道路网络可靠性动态响应规律。研究表明:西南山地多灾区域城乡道路网络的可靠性受关键路段及地质灾害点地理位置的影响,不同等级的关键路段呈现聚类分布,据此提出相关应对策略。

**关键词:** 西南山地多灾区域;道路网络;可靠性;干扰情景;规划应对

中图分类号: U419.2

文献标志码: A

## Analysis of Reliability of Road Network in Mountainous Disaster-Prone Areas in Southwest China

HUANG Yong<sup>1,2</sup>, WEI Meng<sup>1,2</sup>, WAN Dan<sup>1,2</sup>, CAI Haotian<sup>1,2</sup>

(1. School of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Key Laboratory of Mountain Construction and New Technology of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** This paper aims to reveal the damage mechanism of urban and rural road systems in the southwestern mountainous areas in China in multi-disaster scenarios, and attempts to improve the reliable services capacity of road network in the disaster-prone areas. By selecting the Kangding section of the Dadu River Basin in the typical southwest disaster-prone zone, and by applying the complex network and computer simulation analysis method, it establishes the regional road network model and the multi-disaster interference simulation mechanism, and considers the overall connectivity and high-efficiency connectivity as the index system. The multi-disaster scenario simulates the reliability dynamic

response law of road network in simulated disturbance. The empirical findings show that the reliability of urban and rural road network in the disaster-prone zone of southwestern mountainous areas is affected by the geographical location of critical road sections and geological disaster points, and the critical sections of different grades demonstrate the characteristics of cluster distribution. Based on these findings, this paper proposes some relevant countermeasures.

**Key words:** southwestern mountainous disaster-prone area; road network; reliability; interference scenario; planning response

中国山地区域面积辽阔,约占陆地总面积的69%<sup>[1]</sup>,约有16%的人口分布在西南山地区域。一般而言,山地区域生态环境脆弱,建设用地局促,道路等基础设施建设水平相对较低,路网脆弱性高<sup>[2]</sup>;同时,受特殊地形、地层岩性、地质构造等因素影响,地质灾害易发,造成山地区域道路系统部分路段功能失效,对路网可靠性造成重大影响。2008年5月12日,汶川地区8.0级地震,区域路网系统遭受严重损毁,严重阻碍了抗震救灾与灾后重建工作<sup>[3]</sup>。针对地质灾害多发区域道路网络开展可靠性研究,总结提炼多灾情景下路网系统的可靠性动态响应规律,对于开展交通运营管理和抗灾规划等各项工作,具有重要意义。

道路系统可靠性研究可分为静态和动态两个方面,静态可靠性主要关注路网系统在不受干扰情况下的运行表现,动态可靠性主要研究路网系统面对各种干扰时的响应规律。国内外道路系统静态可靠性研究主要集中在4个方面:连通可靠性、行程时间可靠性、容量可靠性和出行行为可靠性<sup>[4-6]</sup>。连通可靠性是指网络中节点保持连通的概率,主要研究方

收稿日期: 2018-12-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD1100804);重庆市研究生科研创新项目(CYS19015)

第一作者: 黄勇(1976—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为山地城乡规划与设计。

E-mail: hyong@cqu.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

法是图论、布尔代数或整数规划<sup>[7]</sup>,目前已扩展到交通系统因灾受损对社会经济的影响等方面<sup>[8-9]</sup>。行程时间可靠性是指出行者能够在规定的时间内顺利完成一个起讫点OD对出行的概率<sup>[10]</sup>,目前已形成较为成熟的TTR(travel-time reliability)模型<sup>[11-13]</sup>,并逐渐扩展到公共交通与交通数据实时监控等研究领域<sup>[14-17]</sup>。容量可靠性指道路网络在指定服务水平下能够容纳一定交通量的概率,有学者根据不同外部条件的变化来分析路网容量可靠性,也有学者将TTR和容量可靠性整合来评价路网运行状态。出行行为可靠性最早针对交通系统的随机波动导致出行者出行行为的不稳定性问题而提出<sup>[18-19]</sup>,根据出行者对风险的不同偏好,建立多类型风险偏好出行时间和路径选择模型<sup>[20]</sup>。近年来,各种原因导致的路网功能损毁事件频发<sup>[21-22]</sup>,使得对不同时刻调整路段通行能力的路网动态可靠性研究日渐受到重视<sup>[23]</sup>,国内外相关研究还不够成熟。

国外的研究主要在以下两个方面展开:

(1) 路网系统动态可靠性遭受攻击后复原力研究,如提出一种分配模型模拟进化网络性能,在给定扰动发生时,从扰动开始到整个系统恢复的交通网络弹性评估方法<sup>[24]</sup>;

(2) 最优路径选择问题的研究,如路网容量不确定性条件下最优疏散路线的分析<sup>[25]</sup>。

国内的研究主要在以下4个方面展开:

(1) 时变或日变网络的动态可靠性研究,如构建动态路网系统行程时间可靠度估计的框架模型,实现路网可靠度的实时估计<sup>[26]</sup>;

(2) 路网关键路段的可靠性识别研究,如识别道路网络中关键环节,以保证突发事件发生时整个道路网络的畅通有序运行<sup>[27]</sup>;

(3) 突发事件下的路网可靠性变化规律和潜在的运行态势,如构建突发灾害下路网可靠性知识表达系统,对路网可靠性运行态势的逻辑推理<sup>[28]</sup>;

(4) 最优路径选择问题的研究,如提高出行者的路径选择效率,从微观层面对随机动态路网条件下的单车路径选择问题进行深入研究<sup>[29]</sup>。

总体来看,当前对于道路网络可靠性研究对象方面,仍主要集中在城市领域,较少涉及到乡镇区域;研究内容方面,较多集中于对道路网络总体特征及静态可靠性结构规律的认识,或者是对随机或组合干扰模式下网络的脆弱性表现作一般性归纳,而较少研究道路网络可靠性的动态响应规律。本文所研究的角度为城乡建设防灾,所研究的动态

可靠性仅指道路物理网络的动态可靠性。因此,以现实灾害情景为研究背景,模拟现实地质灾害影响机制,对道路系统响应现实灾害的机制规律进行挖掘,增强对系统局部功能失效可能造成影响的后果预判能力,为西南山地多灾区域交通系统可靠性提升的规划策略提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究靶区与数据来源

中国西南山地区域是我国主要的地质灾害分布区,为了更好地探讨多灾情景下西南山地道路网络的规律性特征,应当选取具有西南山地道路、自然与经济条件特征的区域进行研究,大渡河康定段区域(见图1)处于灾害多发区且生态环境较为脆弱,道路建设多年来饱受泥石流、崩塌等自然灾害的侵害,如何减少突发灾害对路网可靠性服务能力的影响,成为该区域迫切需要解决的现实问题,因此该区域特征在西南山地多灾区域具有很强的代表性。文中主要研究数据来源于现场实地调研考察,据此构建区域交通网络。

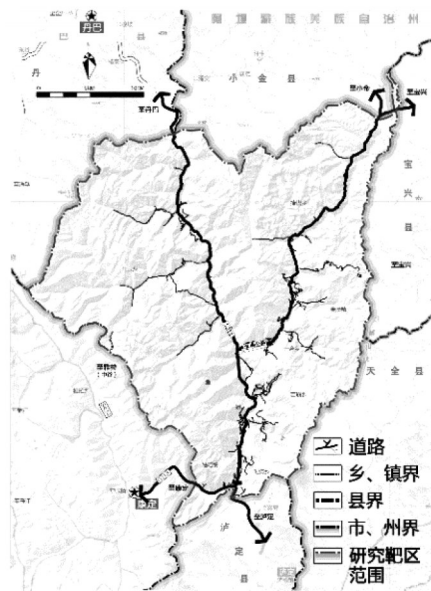


图1 大渡河流域康定段路网图

Fig.1 Road network map of Kangding section of Dadu River Basin

### 1.2 研究框架

整体研究框架如图2所示,将道路网络现实系统转换为网络模型,建立典型道路系统多灾干扰模拟机制及指标体系,在不同灾害干扰情景下,总结道

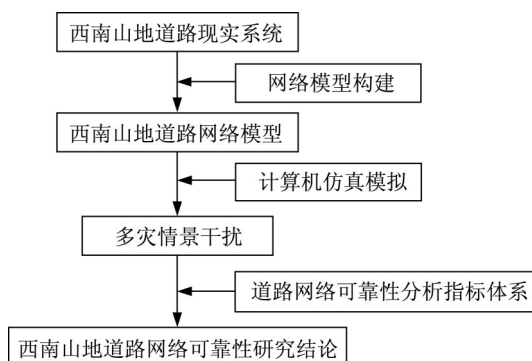


图2 整体研究框架

Fig.2 Overall research framework

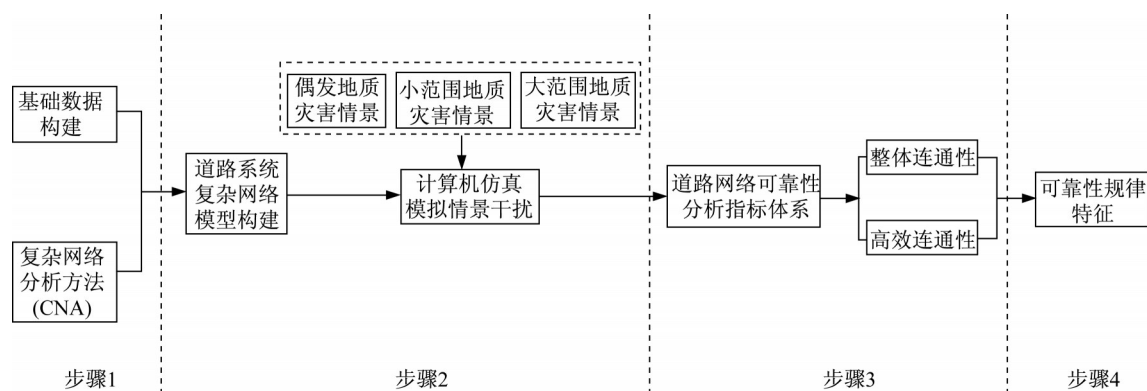


图3 研究流程

Fig.3 Flowchart of Research

## 2 路网模型、指标与情景构建

### 2.1 路网结构模型及评价指标体系构建

对道路现实系统进行路网结构模型构建,将相邻交叉口或镇村点之间的道路进行编号(以道路的边为编号,在复杂网络中道路的边便为其网络节点),道路段之间的交点为线,如图4所示。

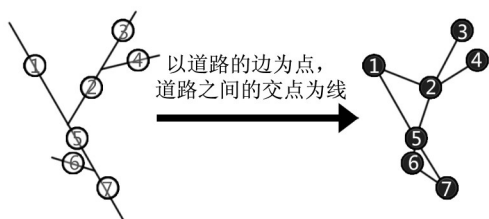


图4 路网结构模型构建示意图

Fig.4 Construction of road network structure model

图4中,左侧编号[1]为道路段,编号[1]的道路段与编号[2]和编号[5]的道路段相连,在复杂网络中构建道路段即为点,编号[1]的路段即为网络节点1,节点1与节点2、节点5相连。

路网络的可靠性规律特征,提出相应规划应对策略。

整体研究流程分为4个步骤(见图3):

步骤1 通过对研究靶区的调研分析,确定道路路段的地理空间位置及相关数据,在pajek网络平台上进行道路系统复杂网络模型构建;

步骤2 通过计算机仿真模拟构建多灾情景干扰模式;

步骤3 从网络整体连通性和网络高效连通性两个指标分析道路网络动态可靠性;

步骤4 通过数理分析发现可靠性规律特征,提出应对策略。

现实情景中,当道路遭遇干扰功能失效时,可能造成网络局部脱离主体结构形成多个独立子图(见图5),同时道路网络的连通效率也会降低(见图6)。因此,需要从动态响应分析层面,建立道路网络可靠性分析测度指标体系。考察整体连通性和高效连通性,对应的技术指标分别为最大连通子图规模和全网连通效率。最大连通子图的相对大小 $S$ 是指最大连通子图中的节点数与网络中所有节点数目的比值。最大连通子图用来分析节点影响网络整体连通性的能力。

最大连通子图 $S$ 计算公式为

$$S = N'/N \quad (1)$$

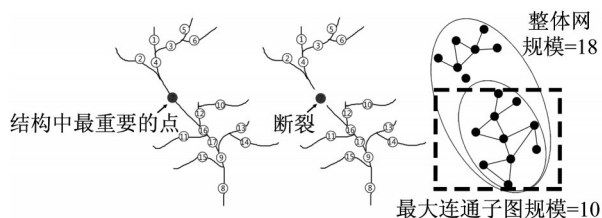


图5 整体连通性含义示意图

Fig.5 Meaning of overall connectivity



式中: $N'$ 表示网络遭到攻击后的最大连通子图的节点数; $N$ 表示未遭攻击时网络节点数。网络整体连通性是指网络处于干扰受损状态下,剩余结构仍然能够保持为一个连通整体的能力,最大连通子图规模越大,表明网络的整体连通性越好。

在复杂网络理论中,网络中任意两节点 $v_i$ 和 $v_j$ 之间的效率即它们之间距离 $d_{ij}$ 的倒数,可用 $\epsilon_{ij}$ 表示为

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (2)$$

全网效率是网络所有节点之间效率的平均值,全网效率越高,表明高效连通性越强,用 $E$ 表示全网效率

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \epsilon_{ij} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (3)$$

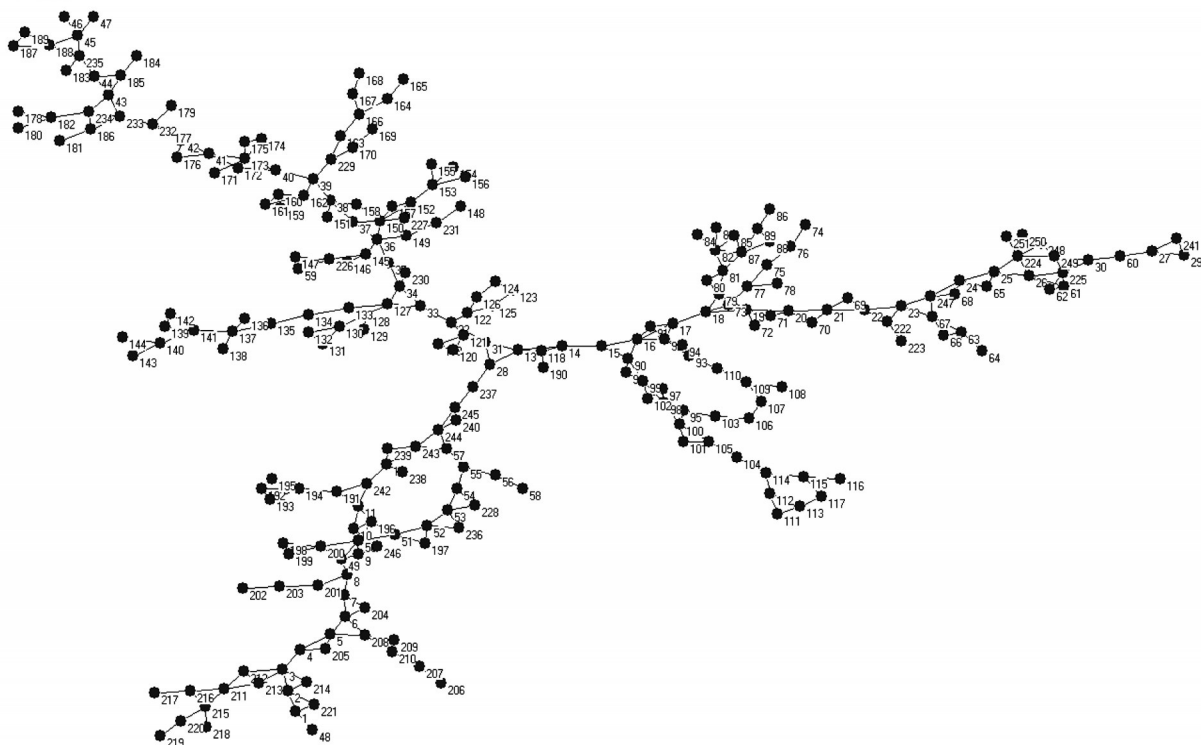


图7 西南灾害多发区域道路网络模型构建

Fig.7 Construction of road network model in disaster-prone areas in southwest China

多灾情景是指该区域的灾害多发,同时灾害会对路网产生不同类型的破坏方式。故本文在国内外已有研究的基础上<sup>[30]</sup>,根据地质灾害点历史资料及相关文献,获得地质灾害分布及影响范围、发生时间等数据,结合研究区位于山地地质灾害多发区等特征并综合考虑研究区资源环境条件和社会经济技术因素,将研究区灾害情景设置为3种情景(见图8),其中情景2和情景3数据来源于《甘孜州康定市2017

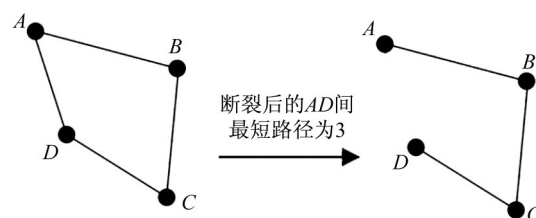


图6 高效连通性含义示意图

Fig.6 Meaning of efficient connectivity

式中: $n$ 为网络中节点数量。

## 2.2 网络模型及多灾情景干扰策略构建

在Pajek软件平台上(版本:2.05)构建现状路网复杂网络模型,该区域现实道路网络模型共有251个节点,360个边(见图7)。网络初始最大连通子图规模为251,网络初始效率为0.099 25。

年地质灾害隐患排查工作成果报告》。

情景1:偶发地质灾害情景。其特征是影响范围较小,带有较强的随机性,具有普适性。在路网模型中表现为单点单路段破坏,即某一个路段遭到破坏。

情景2:小范围地质灾害情景。其特征是影响范围较大,带有特定区域的高发性,数据来源于当地最新地质灾害普查报告,能够代表该区域的地质灾

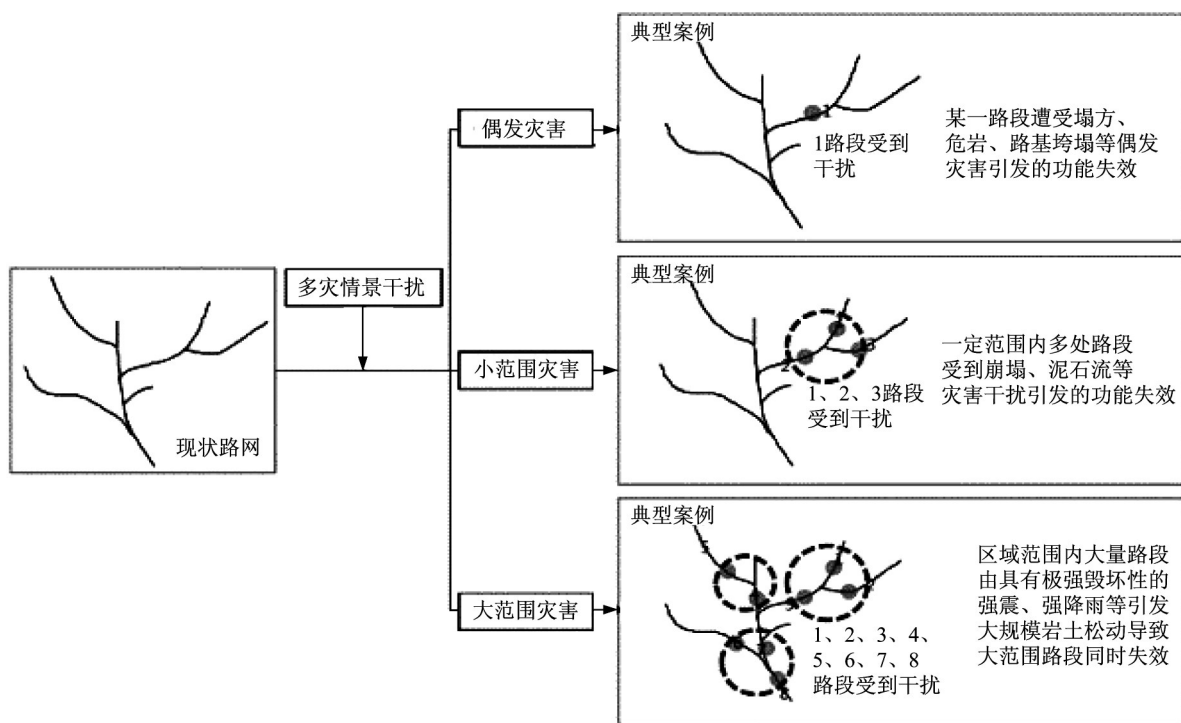


图8 多灾情景干扰机制构建示意图

Fig.8 Construction of multi-disaster scenario interference mechanism

害情景,具有研究价值。在路网模型中表现为单点多路段破坏,即同一个区域多个路段同时遭到破坏。

情景3:大范围地质灾害情景。其特征是影响范围极大,带有随机性,仿真模拟现实地震情景,具有代表性。在路网模型中表现为多点多路段破坏,即多个区域多个路段同时遭到破坏。

运用随机失效算法,模拟偶发地质灾害情景,失效节点对应不同道路节点,采用随机算法进行计算机仿真干扰;运用选择失效算法,模拟小范围和大范围地质灾害情景,失效节点对应现实灾害影响区域所对应的道路节点。两种算法均是从初始模型中删除失效节点后恢复,再进行下一次干扰,通过可靠性指标的前后变化对比,提炼路网系统动态可靠性响应规律。

### 3 计算分析与结果

#### 3.1 偶发地质灾害情景下影响效应分析

偶发地质灾害情景下,道路系统整体连通性响应规律如图9所示,特征值变化情况如表1所示;高效连通性响应规律如图10所示,特征值变化情况如表2所示。

采用随机算法对偶发灾害进行模拟,设定单个节点分别遭遇地质灾害发生功能失效。由计算可

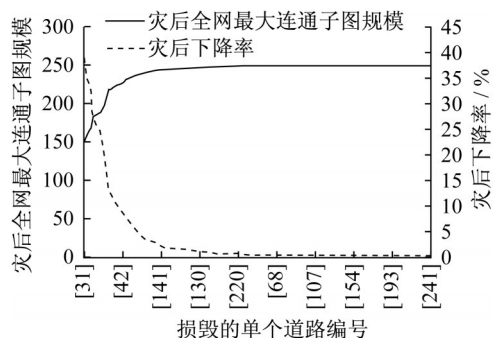


图9 偶发地质灾害情景下网络整体连通性变化示意图

Fig.9 Change of overall connectivity of network in the case of occasional geological disasters

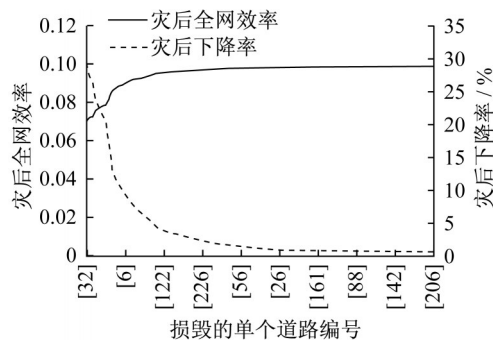


图10 偶发地质灾害情景下网络高效连通性变化示意图

Fig.10 Change of efficient connectivity of network in the case of occasional geological disasters

表 1 偶发地质灾害情景下节点失效网络整体连通性特征值变化情况(部分)

Tab.1 Numerical changes of overall connectivity of network in the case of occasional geological disasters

损毁的单个道路编号	灾后全网最大连通子图规模	下降率/%
[31]	153	39.04
[32]	157	37.45
[33]	163	35.06
[13]	164	34.66
[14]	167	33.47
⋮	⋮	⋮
[243]	250	0.40
[246]	250	0.40
[248]	250	0.40
[249]	250	0.40
[250]	250	0.40

表 2 偶发灾害情景下节点失效网络高效连通性特征值变化情况(部分)

Tab.2 Numerical changes of efficient connectivity of network in the case of occasional geological disasters

损毁的单个道路编号	灾后全网效率	下降率/%
[32]	0.069 862 524	29.61
[31]	0.070 897 540	28.57
[13]	0.072 244 939	27.21
[33]	0.072 265 786	27.19
[14]	0.072 906 392	26.55
⋮	⋮	⋮
[48]	0.098 731 244	0.53
[217]	0.098 745 935	0.51
[29]	0.098 765 362	0.49
[241]	0.098 765 362	0.49
[219]	0.098 778 854	0.48

知,对于西南地区道路网络而言,不同路段发生功能失效,对整体路网可靠性的影响差异较大。整体连通性、高效连通性灾后下降率大于10%的地质灾害点分别占总数的9.96%、10.76%,大于20%的分别占5.97%、5.98%。如编号[31]的路段(S211至大火地村金桐公路段)受灾损毁后,道路网络的整体连通性下降率达到39.04%,高效连通性下降率达到28.57%,即该路段发生功能失效后,会导致保持连通状态的路段数量仅占原有比例的60%左右,路网系统显著分裂为两个独立组团,同时,众多道路节点之间发生联系需要经历的路径变长。与之对比,编号[46](两河口村至小金县金桐公路段)道路受灾损毁后,道路网络整体连通性、高效连通性下降均小于1%,几乎无变化。当编号[32](金桐公路大火地村段)受灾损毁后,道路网络的整体连通性下降率为

37.45%,高效连通性下降率达到29.61%,对比编号[31]和[32]的路段可知,若想要保证路网的整体连通性,即路网遭受干扰后,剩余结构仍然能够保持为一个连通整体的能力,从而不至于形成很多个小型的交通孤岛,则需要重点保护编号[31]的路段;若想要保证路网的高效连通性,即路网遭受干扰后,仍然能够保持较高的全网连通效率,网络中每个点到另外一个点的平均路径较短,则需要对编号[32]的路段做较多的加强措施。

3.2 小范围地质灾害情景下影响效应分析

小范围地质灾害情景下,道路系统整体连通性响应规律如图 11 所示,特征值变化如表 3 所示。

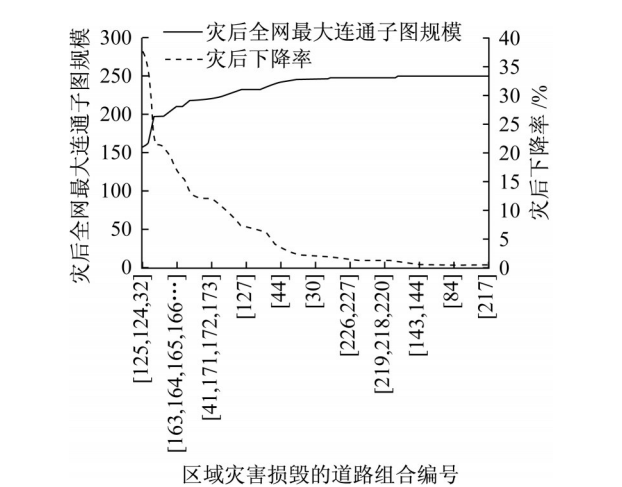


图 11 小范围地质灾害情景下网络整体连通性变化示意图  
Fig.11 Change of overall connectivity of network in a small scale geological hazard scenario

表 3 小范围地质灾害情景下节点失效网络整体连通性特征值变化情况(部分)

Tab.3 Numerical changes of overall connectivity of network in a small scale geological hazard scenario

损毁的多个道路编号	灾后全网最大连通子图规模	下降率/%
[125,124,32]	157	37.45
[127,34]	164	34.66
[151,158,152,37,38]	197	21.51
[151,158,152,153,155,154,156,37,38]	197	21.51
[77,73,76,18]	199	20.72
⋮	⋮	⋮
[206]	250	0.40
[214]	250	0.40
[217]	250	0.40
[139]	250	0.40
[37]	250	0.40

高效连通性响应规律如图 12 所示,特征值变化如表 4 所示。

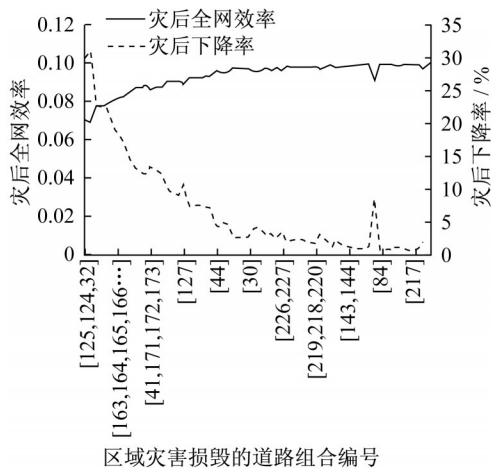


图 12 小范围地质灾害情景下网络高效连通性变化示意图  
Fig.12 Change of efficient connectivity of network in a small scale geological hazard scenario

依据地质灾害测评报告数据,划定 63 个地质灾害多发区域,模拟考察 1 个区域发生地质灾害后,多个道路节点受损的情况。通过小范围计算可知,整体连通性、高效连通性下降率大于 10% 的地质灾害点分别占总数的 23.81%、25.40%,大于 20% 的分别占 7.94%、7.94%,与偶发灾害干扰情境下的影响相类似,不同区域地质灾害导致多个路段发生功能失效,对整体路网可靠性的影响差异较大。如,三合乡庄房沟村后山危岩所影响的大火地村乡村道路段及所处金桐公路段,即道路路段编号为[125、124、

表 4 小范围地质灾害情景下节点失效网络高效连通性特征值变化情况(部分)

Tab.4 Numerical changes of efficient connectivity of network in a small scale geological hazard scenario

损毁的多个道路编号	灾后全网效率	下降率/%
[127,34]	0.068 489 835	31.00
[125,124,32]	0.069 655 352	29.82
[151,158,152,153,155,154,156,37,38]	0.076 672 040	22.75
[151,158,152,37,38]	0.076 815 466	22.61
[77,73,76,18]	0.077 575 064	21.84
.....	.....	.....
[214]	0.098 615 611	0.64
[117]	0.098 644 426	0.61
[116]	0.098 686 923	0.57
[206]	0.098 726 809	0.53
[217]	0.098 745 935	0.51

32]同时受到干扰后,最大连通子图规模下降率为 37.45%,全网连通效率下降率为 29.82%;三合乡赤绒村滑坡地质灾害区域,即道路路段编号[248]受到干扰后,路网系统整体连通性下降 0.40%,连通性下降 0.66%,几乎无变化。

### 3.3 大范围地质灾害情景下影响效应分析

选取研究靶区历史上曾经发生的具有代表型的大范围灾害情景进行仿真模拟,选取具有不同属性的案例为 2008 年 5 月 12 日汶川大地震、2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级地震、2014 年 11 月 22 日康定塔公乡 6.3 级地震。详细数据见表 5,测算出灾变前后全网连通效率和最大连通子图。

表 5 大范围地质灾害情景下节点失效网络整体连通性、高效连通性特征值变化情况

Tab.5 Numerical changes of overall connectivity and efficient connectivity of network in a wide range of geological hazard scenario

历史灾害	网络整体连通性		网络高效连通性		纬度/(°)	经度/(°)	大约距离/km
	最大连通子图规模	下降率/%	最大连通效率	下降率/%			
2008 年 5 月 12 日汶川特大地震	224	10.76	0.084 0	15.37	31.01	103.42	135
2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级地震	101	59.76	0.041 2	58.44	30.30	103.00	82
2014 年 11 月 22 日康定塔公乡 6.3 级地震	140	44.22	0.055 1	44.43	30.26	101.69	51

3 种现实地震情景下都对道路网络进行了大范围的干扰,整体连通性和高效连通性均有不同程度的下降,由此可见,因为地形、河流等的自然条件的影响,西南山地多灾区域道路网络呈现为带状树枝型网络,网络集中性较差,与城镇核心整体联系紧密度和完备度较低,不同位置的多个路段失效更易导致全网瘫痪。道路网络结构极为不稳定,在不同属性的大范围灾害干扰情景下均会形成不同规模的交通孤岛,网络最大

连通子图规模最低下降为 101,下降率为 59.76%,全网效率最低下降为 0.041 2,下降率为 58.44%,远高于偶发、小范围灾害干扰情景的影响程度。

## 4 讨论

### 4.1 多灾区域道路网络可靠性规律特征

#### 4.1.1 受关键路段及地质灾害点地理位置的影响

根据偶发、小范围地质灾害干扰情景下出现可



可靠性变化大和几乎无变化的两种情况的研究可以发现,西南山地地质灾害多发区域道路网络存在较多的关键路段,单点失效即造成网络分裂成两大连通子图,多点同时失效则会分裂为多个互不联系的连通子图(见图13)。

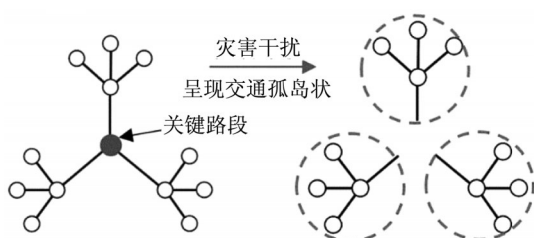


图13 干扰前后道路交通网络结构图

Fig.13 Road traffic network before and after interference

西南山地城乡道路网呈现出了典型的核心-边缘及等级圈层的复合结构,整个网络中具有绝对控制意义的交通轴线数量相对较少,城乡道路网的等级体系不够完善,网络结构相对脆弱,导致整个网络伺服效率和应对突发事件能力不强。

#### 4.1.2 不同等级关键路段呈现聚类分布

根据大范围地质灾害干扰情景研究,道路网络受到大范围灾害干扰后形成的交通孤岛形态较为相似,均会形成团、块、点状的类型。为探寻背后机理,将上述研究结论中道路系统分为关键路段(损毁后全网整体连通性、高效连通性下降率超过20%)和较为关键路段(损毁后全网整体连通性、高效连通性下降率在5%~20%)进行可视化分析,发现不同等级关键路段呈现聚类分布(见图14),若这些区域的道路段受到损毁后,即会对路网可靠性服务能力造成较大影响,并分裂成不同规模的交通孤岛。

### 4.2 基于可靠性规律的规划应对策略

#### 4.2.1 构建道路网络分级识别规划体系

当前应对路网可靠性提升策略主要为整体路网的连通度提升或是对关键路段的等级提升<sup>[31]</sup>,没有考虑到关键道路层级性与现实灾害情景的结合,实际指导效果较差。因此,依据道路网络灾害动态响应分析数据,结合地质灾害评估预测报告,建立西南山地多灾区域道路网络分级规划体系,可对关键路段、关键灾害点进行工程治理,增强道路网络的可靠性,同时可根据灾害干扰情景模拟后的分级数据库来确定重点防治区和一般防治区,进而指导区域道路工程的规划。具体来说,在以上的灾害干扰情景分析中,将道路路段根据重要性分为高危、中危和低

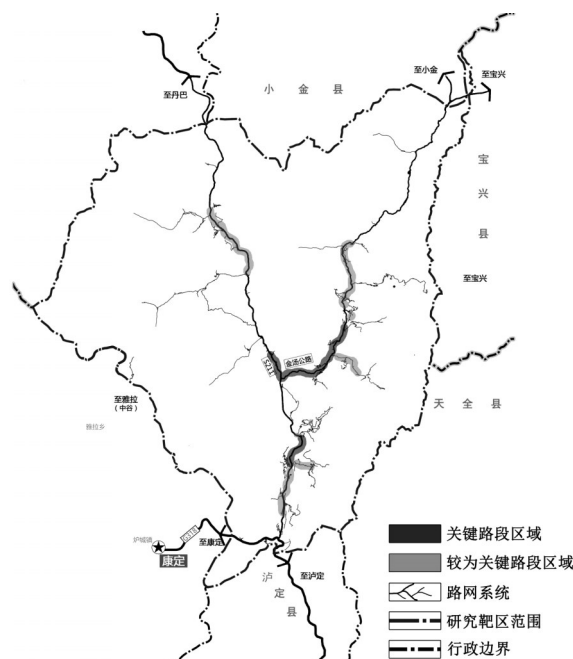


图14 路段聚类分布图

Fig.14 Section cluster distribution map

危3个等级。评价原则为:该路段或该地质灾害点影响范围内的路段遭受干扰后,全网高效连通性或整体连通性下降率 $\geq 20\%$ ,则该路段及地质灾害点影响范围内的路段评价为高危险路段;若遭受干扰后全网高效连通性或整体连通性下降率在5%~20%,则该路段及地质灾害点影响范围内的路段评价为中危险路段;其余则评价为低危险路段。根据现有地质灾害资料,将地质灾害点分为高易发、中易发和低易发3个等级。将两者叠加后得出基于易发性、危险性分级的道路分级规划数据库。

#### 4.2.2 根据聚类特征构建救灾避难体系

当前避难场所设置研究主要为依靠设施区位来进行避难所的选址<sup>[32]</sup>,较少依据灾区道路系统的可靠性规律特征来设置避难场所。

因此,根据前文分析,西南地区道路网络遭受具有不同属性的灾害干扰后形成的交通孤岛形态类型较为相似,孤岛内部无法和外部产生联系。由此可见,可模拟不同属性的灾害情景,测算出山地道路网络的关键路段聚类特征,从而在不同聚类区域增设不同等级的防灾避难设施等,以达到对灾害发生时的防治与灾后救援减少人员伤亡与物资损失的目的。具体可根据以下原则设置一级、二级、三级避难场所:①每一个关键路段聚类到一级避难场所的平均时间(距离)应当在一定限制之内;②所有的居民点都需要被至少一个避难场所覆盖;③避难场所覆



盖的人口数不超过其容量限制。一级避难场所为中心控制级,二级为确定协调控制级(多个区域),三级为路段控制级。不同等级相互协调,互相适应。不同控制级避难场所示意图如图15所示。

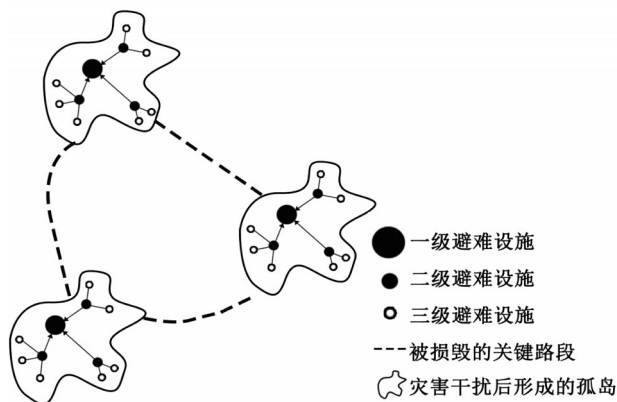


图15 不同控制级避难场所示意图

Fig.15 Shelters of different control levels

## 5 结论

本文选取了典型的西南灾害多发区大渡河流域康定段作为研究区域。通过采用复杂网络以及计算机仿真分析方法,在真实场景及数据基础上建立区域道路网络模型以及多灾干扰模拟机制,选取整体连通性和高效连通性为指标体系来探索道路网络可靠性规律。通过分析结果得到,西南山地多灾区域城乡道路网络的可靠性受关键路段及地质灾害点地理位置的影响,不同等级的关键路段呈现聚类分布的结论。据此提出基于可靠性规律来构建道路网络分级识别规划体系,以及根据聚类特征来构建救灾避难体系,从而提升多灾地区道路网络的可靠性服务能力。

### 参考文献:

- [1] 沈斌才,江仕琴. 山区铁路选线[M]. 北京:中国铁道出版社, 1987.  
SHEN Bincai, JIANG Shiqin. Selection of railways in mountainous areas [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1987.
- [2] ZOU Q, CUI P, ZHOU G G D, *et al.* A new approach to assessing vulnerability of mountain highways subject to debris flows in China[J]. Progress in Physical Geography, 2018, 42(3): 305.
- [3] 李斌,谢秉磊,徐键,等. 基于连通可靠性的自然灾害后应急阶段路网重建研究[J]. 交通与计算机, 2008(6): 108.

LI Bin, XIE Binglei, XU Jian, *et al.* Transportation network reconstruction for natural disasters in emergency phase based on connectivity reliability[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2008(6): 108.

- [4] FAX J A, MURRAY R M. Information flow and cooperative control of vehicle formations [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(1): 115.
- [5] HATEFI S M. Strategic planning of urban transportation system based on sustainable development dimensions using an integrated SWOT and fuzzy COPRAS approach [J]. Global Journal of Environmental Science and Management-Gjesm, 2018, 4(1): 99.
- [6] ARCHETTI C, SPERANZA M G, WEYLAND D. A simulation study of an on-demand transportation system [J]. International Transactions in Operational Research, 2018, 25(4): 1137.
- [7] WAKABAYASHI H, IIDA Y. Upper and lower bounds of terminal reliability of road networks: an efficient method with boolean algebra[J]. Journal of Natural Disaster Science, 1992, 14(1): 29.
- [8] DU Z P, NICHOLSON A. Degradable transportation systems: sensitivity and reliability analysis [J]. Transportation Research Part B Methodological, 1997, 31(3): 225.
- [9] NICHOLSON A, DU Z P. Degradable transportation systems: an integrated equilibrium model [J]. Transportation Research Part B Methodological, 2008, 31(3): 209.
- [10] 杨超,何树林. 用于交通需求组合模型的可达性指标[J]. 中国科学:信息科学, 2010(9): 1232.  
YANG Chao, HE Shulin. Accessibility index for traffic demand combination model [J]. Science China: Information Sciences, 2010(9): 1232.
- [11] CHEN C, SKABARDONIS A, VARAIYA P. Travel-time reliability as a measure of service [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2003, 1855(1): 74.
- [12] CHEN A, JI Z, RECKER W. Travel time reliability with risk-sensitive travelers [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2001, 1783(1): 27.
- [13] LIU H X, RECKER W, CHEN A. Uncovering the contribution of travel time reliability to dynamic route choice using real-time loop data [J]. Transportation Research Part A, 2004, 38(6): 435.
- [14] BELL M G H, SHIELD C M, BUSCH F, *et al.* A stochastic user equilibrium path flow estimator [J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 1997, 5(3/4): 197.
- [15] LAM W H K, XU G. A traffic flow simulator for network reliability assessment [J]. Journal of Advanced Transportation, 2010, 33(2): 159.
- [16] CLARK S, WATLING D. Modelling network travel time reliability under stochastic demand [J]. Transportation Research Part B, 2005, 39(2): 119.
- [17] 包丹文,顾佳羽,贾俊华. 基于可靠性的城市组团间运输通道

- 优化方法[J]. 中国公路学报, 2017(2): 128.
- BAO Danwen, GU Jiayu, JIA Junhua. Optimization method of urban agglomeration transportation corridor based on reliability [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017(2): 128.
- [18] ABDEL-ATY M A, KITAMURA R, JOVANIS P P. Investigating effect of travel time variability on route choice using repeated measurement stated preference data [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1995(1493): 39.
- [19] ABDEL-ATY M A, KITAMURA R, JOVANIS P P. Using stated preference data for studying the effect of advanced traffic information on drivers' route choice[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 1997, 5(1): 39.
- [20] CHEN A, ZHOU Z. The  $\alpha$ -reliable mean-excess traffic equilibrium model with stochastic travel times [J]. Transportation Research Part B, 2010, 44(4): 493.
- [21] 李彦瑾, 罗霞. 突发环境下城市道路网关键路段集识别[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018(2): 128.
- LI Yanjin, LUO Xia. Identification of urban road network's critical links set under emergency environment [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information, 2018 (2): 128.
- [22] ZHANG W, WANG N. Resilience-based risk mitigation for road networks[J]. Structural Safety, 2016, 62: 57.
- [23] 张勇, 屠宁雯, 陶骏杰. 道路交通网络脆弱性动态辨识方法 [J]. 交通运输工程学报, 2014(5): 74.
- ZHANG Yong, TU Ningwen, TAO Junjie. Identification method of dynamic road traffic network vulnerability [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014(5): 74.
- [24] NOGAL M, O'CONNOR A, CAULFIELD B, *et al.* Resilience of traffic networks: from perturbation to recovery via a dynamic restricted equilibrium model [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 156: 84.
- [25] LIM G J, RUNGTA M, BAHARNEMATI M R. Reliability analysis of evacuation routes under capacity uncertainty of road links[J]. IIE Transactions, 2015, 47: 50.
- [26] 陈玲娟, 王殿海, 刘玲丽. 交通事件影响下路网逐日出行动态可靠性[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(5): 97.
- CHEN Lingjuan, WANG Dianhai, LIU Lingli. Dynamic reliability of day-to-day network under incident [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information, 2017, 17 (5): 97.
- [27] 喻泽文. 突发事件下路网关键路段的容量可靠性研究[J]. 公路工程, 2014(1): 103.
- YU Zewen. Study on capacity reliability of critical sections of road network under emergency[J]. Highway Engineering, 2014 (1): 103.
- [28] 林赐云, 王琳虹, 龚勃文, 等. 突发灾害下城市路网交通流可靠性运行态势[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012(3): 581.
- LIN Ciyun, WANG Linhong, GONG Bowen, *et al.* Analysis of traffic flow reliability operation trend of urban road network under sudden disaster [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012(3): 581.
- [29] 智路平, 周溪召. 基于动态行程时间可靠性的单车辆路径选择算法研究[J]. 公路交通科技, 2018(9): 71.
- ZHI Luping, ZHOU Xizhao. Study on single vehicle routing algorithm based on dynamic travel time reliability [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018 (9): 71.
- [30] 徐继维, 张茂省, 范文. 地质灾害风险评估综述[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 130.
- XU Jiwei, ZHANG Maosheng, FAN Wen. An overview of geological disaster risk assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 130.
- [31] 崔杨, 曾俊伟, 钱勇生, 等. 基于复杂网络的西部地区公路网可靠性研究[J]. 公路工程, 2018(3): 46.
- CUI Yang, ZENG Junwei, QIAN Yongsheng, *et al.* Reliability research of highway network in northwest china based on complex network theory [J]. Highway Engineering, 2018(3): 46.
- [32] 但文羽, 肖映辉, 胡周灵, 等. 基于高斯两步移动搜寻法的村镇避难场所可达性研究[J]. 地球信息科学学报, 2018(10): 1412.
- DAN Wenyu, XIAO Yinghui, HU Zhouling, *et al.* Rural emergency shelter accessibility using gaussian based 2-step floating catchment area method [J]. Journal of Geo-Information Science, 2018(10): 1412.