

赵红蕊, 王涛, 石丽梅, 等. 芦山 7.0 级地震震后道路损毁风险评估方法研究[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 33-37.  
[Zhao Hongrui, Wang Tao, Shi Limei, et al. Seismic Risk Assessment for Road Damage in Lushan M7.0 Earthquake[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 33-37.]

## 芦山 7.0 级地震震后道路损毁风险评估方法研究<sup>\*</sup>

赵红蕊<sup>1</sup>, 王涛<sup>1,2</sup>, 石丽梅<sup>1</sup>, 傅罡<sup>1</sup>, 李聪<sup>1</sup>

(1. 清华大学 土木工程系地球空间信息研究所, 北京 100084; 2. 河北联合大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063009)

**摘 要:** 芦山 7.0 级地震发生后, 地震及其次生地质灾害严重损毁了灾区的道路交通系统, 中断了灾区救援的交通生命线。为了满足震后灾区道路损毁风险评估的需要, 有必要建立将次生地质灾害考虑在内的灾后道路损毁评估模型。在震后数据资源有限的情况下, 以震前道路基础地理信息、次生地质灾害危险性评价数据为主要数据源, 建立道路损毁风险评估模型, 模型综合考虑了道路震害因子(如地震烈度、设防烈度)以及次生地质灾害对道路损毁的影响。将该模型应用于雅安地区芦山县、宝兴县、雨城区以及天全县四个区县的道路损毁风险评估中, 评估结果与报告第一时间报送民政部国家减灾中心。评估结果与四川省测绘地理信息中心和天地图联合开发的芦山 7.0 级地震地理信息发布平台发布的地震灾区道路损毁数据进行对比分析, 评估结果与实际情况基本一致。可以为震后长期恢复及次生地质灾害防治提供参考。

**关键词:** 芦山 7.0 级地震; 道路损毁; 风险评估; 次生地质灾害

**中图分类号:** X43    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-811X(2014)02-0033-05

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.02.008

2013 年 4 月 20 日 08:02, 在四川省雅安市芦山县(30.3°N, 103.0°E)发生 7.0 级地震, 震源深度约 13 km。震中距离雅安市约 35 km, 距成都市约 110 km。雅安地处于山区, 地形条件复杂, 地震及其次生地质灾害的发生会导致城市交通生命线的不畅并阻碍应急救援工作的展开。作为交通生命线核心的道路, 其损毁风险的预测, 将为应急救援和管理提供辅助决策支持。

目前, 针对地震引发的道路损毁风险评估方面的研究可分为两部分, 2000 年以前, 地震工作者从震前预测角度出发, 专注于地震对道路本身的破坏预测方法研究, 这方面的代表性成果有, 1977 年, 日本学者 Masaru Hoshiya 根据日本地震的实际情况, 提出公路震害预测方法<sup>[1]</sup>; 1993 年, 陈一平等结合中国地震国情提出公路路基路面的震害预测的评估方法<sup>[1]</sup>; 1995 年, Stuart D. Werner 就利用地理信息系统技术建立公路系统地震易损性评估系统<sup>[2]</sup>; 1999 年, 美国学者 Stephanie E. Chang 和日本学者 Nobuoto Nojima 针对日本神户地震提出了灾后交通系统整体功能的评估方法<sup>[3]</sup>。这些震害预测方法多从本国地震实际情况出发,

给出预测方法。2000 年以后, 随着空间信息技术的快速发展, 国内外学者开始将遥感技术应用于道路损毁评估中<sup>[4]</sup>, 提出利用高分辨率遥感图像及 GIS 技术进行道路损毁评估的方法和模型, 这方面的代表性成果有, 2003 年, Adams B J, Huyck C K, 利用高分辨率卫星影像进行地震引发的损失评估(包括道路)<sup>[5]</sup>; 2008 年, 陈世荣介绍了利用高分辨率遥感图像进行汶川地震道路损毁评估的方法<sup>[6]</sup>; 2009 年, D. Ehrlich 等利用高分辨率遥感影像进行 2008 年汶川地震损失评估的方法<sup>[7]</sup>; 2010 年, 秦军提出汶川地震灾区道路损毁度的遥感评估模型<sup>[8]</sup>; 2013 年, 靳彩娇提出一种基于遥感图像的道路损毁评估方法<sup>[9]</sup>。这些方法多是根据遥感影像解译道路损毁情况从而对受灾情况进行评估。

利用高分辨率遥感影像进行灾后道路损毁程度评估的定性或定量方法, 受限于解译分析的流程和效率以及遥感信息利用率的限制, 很难满足灾后第一时间给出道路损毁风险预测的需求。而单纯利用道路震害预测模型, 亦不能适应像芦山 7.0 级地震这样受次生地质灾害影响严重地区的

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-09-09    修改日期: 2013-10-28

基金项目: 国家“八六三”重大工程地质灾害快速监测与评估项目(2012AA121303)

作者简介: 赵红蕊(1969-), 女, 河北乐亭人, 教授, 博士生导师, 主要从事定量遥感与应用、3S 集成、测绘等教学与科研工作。

E-mail: zhr@tsinghua.edu.cn.

道路损毁风险评估。本文拟参考陈一平、陈欣提出的公路路基路面震害预测模型<sup>[1]</sup>,该模型所采用的判别方法中所选择的条件和参数适合中国国情;但该模型需要大量复杂的积分运算过程,不便应用于区域大量道路评估的要求。为此,本文将对模型进行简化,同时考虑地震引发的次生地质灾害对道路损毁风险的影响。最终构建道路震害因子(如地震烈度、设防烈度)以及次生地质灾害对道路损毁的影响因子的道路损毁风险评估模型,并将其应用于雅安地区芦山县、宝兴县、雨城区以及天全县四个区县的应急道路损毁风险评估中。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 研究区域

道路损毁风险研究区域为四川省雅安地震灾区4个县(区)图1所示,基本处于山地,地形条件复杂,地震引发的路旁山体滑坡、崩塌等次生地质灾害对道路损毁影响严重,且随着震后降雨增加,较长时间处于次生灾害风险中。



图1 研究区域分布图

### 1.2 实验数据

道路损毁风险评估采用的数据包括:震前基础地理信息数据(包括道路、县级行政区划、居民点位等要素,数据符合《GB/T 20267-2006 车载导航电子地图产品规范》<sup>[10]</sup>),次生地质灾害危险性评价专题图(由中国地质大学(武汉)根据致灾因子:坡度、坡向、斜坡结构、工程岩性、土地利用、水系缓冲距离和公路缓冲距离分析出来的结果)。

用于评估结果验证的数据包括:震前 DEM (30 m 分辨率),四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震烈度图<sup>[11]</sup>,震后地质灾害点空间分布专题图(民政部减灾中心根据震后航拍影像解译)。

## 2 道路损毁风险评估模型与方法

### 2.1 评估模型

中国建筑科学研究院工程抗震研究所陈一平等提出的震害预测模型<sup>[1]</sup>假设震害为一正态分布曲线。

$$\mu_i(ind) = e^{\frac{(ind - \overline{ind}_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (1)$$

式中: $\overline{ind}_i$  为第  $i$  条道路的平均震害指数,可由公式(2)计算。

$$\overline{ind}_i = 0.2 \times \left[ \prod_{j=1}^7 X_{ij} \right] - 0.1, \quad (2)$$

式中: $X_{ij}$  为第  $i$  条道路第  $j$  个震害因素所对应的量化值。对于每条道路而言,道路震害因子主要有:地震烈度、设防烈度、路基土、场地类别、地基失效与否、路基类型、路基高差,式中的  $\sigma_i$  是各烈度下震害离散系数,获得以上参数  $\overline{ind}_i$  和  $\sigma_i$ ,就可以建立震害正态分布曲线。

通过落影定理和贝叶斯函数求得不同破坏等级得隶属函数,即道路不同破坏等级的概率。该方法需要大量复杂的积分运算过程,不便于大区域大量道路快速评估。为此,对该模型进行简化,以满足快速评估的要求。这里的“快速”是指对陈一平、陈欣提出的震害预测模型计算的简化,避免了大量的积分运算,从而提高计算速度。清华大学防灾减灾研究所通过对 1976 年唐山地震实测数据的研究,发现平均震害指数和可以通行的概率( $\nu$ ) 基本满足线性关系<sup>[12-13]</sup>,如式(3)。这使得利用统计学方法直接预测震后道路损毁成为可能。

$$\nu = \begin{cases} 100\%, & \overline{ind}_i \leq 0.09; \\ 0.96 - (\overline{ind}_i - 0.12) * 1.31579, & 0.09 < \overline{ind}_i < 0.6; \\ 32.84\%, & 0.6 \leq \overline{ind}_i. \end{cases} \quad (3)$$

根据唐山地区地震实测数据所构建的道路损毁风险评估模型,可以实现震后道路损毁风险快速评估,以满足应急管理需要。然而该模型未考虑震后次生地质灾害对道路损毁的影响,对于受次生地质灾害影响较弱的平原地区比较适合,而对于象雅安这样的山区,其道路损毁风险很大因素上受到震后次生地质灾害的影响,因此,对上述简化模型进行修正,式(4)为新构建的将次生地质灾害影响

考虑在内的道路损毁风险评估模型,次生地质灾害危险性评价数据是利用了文献[14-15]中的方法评价得出的结果,结果由该文献所著单位提供,次生地质灾害的量化参考了他们对次生地质灾害的等级划分。

$$\overline{ind_i'} = 0.2 \times \left[ \prod_{j=1}^7 X_{ij} \right] \times Y_i - 0.1, \quad (4)$$

式中: $\overline{ind_i'}$ 表示考虑次生地质灾害因素时第*i*条道路的平均震害指数。 $X_{ij}$ 为第*i*条道路第*j*个震害因子所对应的量化值; $Y_i$ 表示第*i*条道路受次生地质灾害因素影响所对应的量化值。

次生地质灾害风险评估等级分为四级:低危险区、中危险区、较高危险区、高危险区。根据道路所处的次生地质灾害对应区域,将次生地质灾害相应道路损毁的影响量化,其取值标准和道路震害因子(地震烈度、设防烈度)量化取值见表1。道路其他5个震害因子则采取陈一平等提出的震害预测模型中震害因子量化值取平均的方式简化计算。如果能获取道路的路基土、场地类别、地基失效与否、路基类型、路基高差的实测数据,可以对这5个震害因子量化值进行修正,使量化值更加贴近实际<sup>[16]</sup>。

## 2.2 评估过程

根据上述评估模型,震后道路损毁风险评估

表1 道路损毁风险评估模型量化因子说明及取值标准

量化因子	参数意义	取值标准	
		地震烈度等级 $\alpha$	量化值
地震烈度	在评估路段中,所处的地震烈度值,反映出路段所受地震强弱程度,其值直接影响道路通行情况。	$\leq \text{VI}$	0.2
		(VI, VII]	$0.2 + 0.8(\alpha - 6.0)$
		(VII, VIII]	$1.0 + 0.05(\alpha - 7.0)$
		(VIII, IX]	$1.05 + 0.1(\alpha - 8.0)$
		(IX, X]	$1.15 + 0.05(\alpha - 9)$
		$> \text{X}$	1.2
设防烈度	反映道路本身抗震强度,与地震烈度相反,等级越高抗震强度越高。	设防烈度等级 $\beta$	量化值
		$\leq \text{VI}$	1.0
		(VI, VII]	$0.9 + 0.1(7 - \beta)$
		(VII, VIII]	$0.8 + 0.1(8 - \beta)$
次生地质灾害	次生地质灾害造成的破坏和影响往往大于地震直接带来的破坏,是震后抗震救灾的关键,震后次生地质灾害对道路损毁风险的影响因子。	次生地质灾害等级 $\chi$	量化值
		高危区4	1.8
		较高危区(3, 4]	$1.5 + 0.3(\chi - 3)$
		中危险区(2, 3]	$0.8 + 0.7(\chi - 2)$
		低危险区[1, 2]	$0.5 + 0.3(\chi - 1)$

表2 道路损毁风险评估标准

状态参数(通行率)	[0.3, 0.5]	(0.50, 0.60]	(0.60, 0.90]	(0.90, 1.0]
道路损毁风险评估	基本不通行, 高风险等级	基本通行, 中风险等级	通行, 一般风险等级	完全通行, 低风险等级

的过程主要包括数据预处理和道路损毁风险评估。

数据预处理主要包括:①根据我国对城镇抗震设防烈度分组<sup>[17-18]</sup>查到研究区四个区县的设防烈度,并结合震区县矢量数据以及道路矢量数据,为不同区县的道路建立设防烈度因子属性字段并赋值;②将中国地震局发布的四川省芦山“4·20”7.0级强烈地震烈度图<sup>[11]</sup>数据与道路矢量数据配准叠加,并根据道路所属的地震烈度的不同等级区域,为道路建立地震烈度因子属性字段并赋值;③将震后次生地质灾害危险性评价专题图数据与道路矢量数据配准叠加,并根据道路所属的次生地质灾害风险的不同等级区域,为道路建立次生地质灾害因子并赋值;通过数据预处理,可以得到震后道路风险评估模型所需要的相关输入参数。为了便于衡量道路损毁风险大小,采用通行率作为道路损毁风险的量化指标。通行率是指地震发生时,道路设施不被地震灾害破坏(或较小破坏而在短时间内能够抢通)而能使车辆保持通行的可能性。将与道路本身相关的震害因子以及次生地质灾害因子作为输入参数输入到震后道路损毁评估模型中,可以得到道路的通行率( $\nu$ )。根据通行率( $\nu$ )对道路损毁风险进行了划分,其评价标准如表2所示,据此,绘制雅安震区道路损毁风险评估专题图。

3 评估结果

应用上述震后道路损毁风险评估模型，对四川省雅安地区芦山县、宝兴县、雨城区以及天全县四个区县进行了道路损毁风险评估，得到芦山 7.0 级震区道路损毁风险评估专题图，并对雅安震区道路损毁风险评估结果进行了定量统计分析，其统计结果见表 3 和表 4。

表 3 雅安震区道路损毁风险统计表  
(按道路级别)

道路级别	道路损毁风险(按长度)			
	高/m	中/m	一般/m	低/m
高速公路	267	64 549	50 170	55 931
一级公路	620	26 412	25 658	10 309
二级公路	24 231	11 611	45 234	104 177
三级公路	493	28 989	21 846	15 998
四级公路	143 023	210 057	326 435	292 708

从表 3 可以看出，相对于其他级别公路，雅安震区四级公路(乡镇道路)受损风险较高，这与四级公路抗震后抗次生地质灾害的风险相对脆弱有关。

表 4 雅安震区道路损毁风险统计表  
(按道路名，仅列举部分道路)

路名	道路损毁风险(按长度)			
	高/m	中/m	一般/m	低/m
G108	0	20 245	20 429	9 191
G318	267	25 125	31 572	46 523
S210	24 217	8 457	36 730	95 990
S305	0	0	2 910	7 884
X073	18 077	536	5 674	2 520
X171	0	6 380	7 675	5 075
成渝环线高速公路	0	17 390	9 373	5 313
京昆高速公路	0	22 049	8 715	3 751
芦邛路	22 803	4 088	10 803	7 457
两永线	367	1 964	12 601	13 364
雅碧路	1 479	1 907	4 920	1 610
雅上路	7 646	0	4 672	962
雅赵路	0	18 128	10 865	18 544

从表 4 可以看出雅安震区 G318、S210、X073、芦邛路道路损毁风险高，这与道路受次生地质灾害风险影响高是一致的。

为了进一步验证模型的正确性，将雅安震区道路损毁风险评估图和震区灾害点数据进行叠加，并结合四川省测绘地理信息中心和天地图联合开发的芦山 7.0 级地震地理信息发布平台的灾区域道路损毁点数据，随机选点并目视对比，结果基本一致。

以宝盛乡区域芦邛公路为例，其对比结果如图 2 和图 3 所示，图 2 为四川省测绘地理信息中心和天地图联合开发的芦山 7.0 级地震地理信息发布

平台发布的灾区数据，图 3 为通过道路损毁风险评估后此区域专题截图。图框为任意选取的检验子区域，在图 2 和图 3 所表示子区域位置完全一致。对比图 2 和图 3 可以发现：图 2 子区域 1、子区域 2、子区域 3 和子区域 4 显示在公路附近已发生崩塌区域，相应子区域在图 3 中为评估的道路高损毁风险区域；黑框所标示子区域 5 和子区域 6 在图 2 中显示未发生崩塌，这两个子区域在图 3 恰为评估的低损毁风险区域。说明了评估结果的可信性。

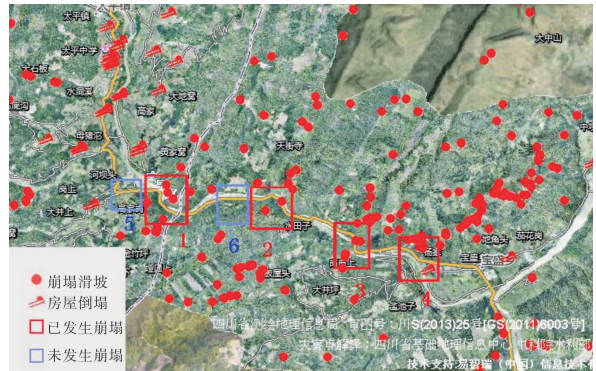


图 2 芦山 7.0 级地震地理信息发布平台截图

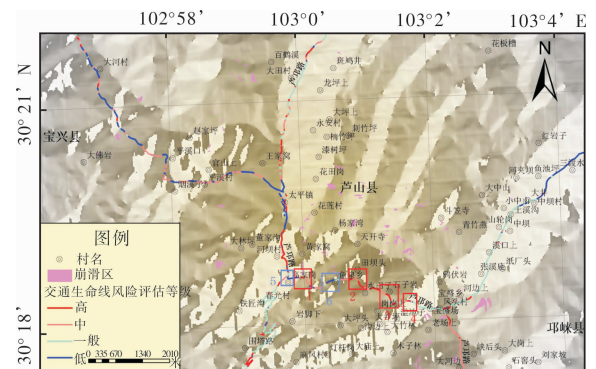


图 3 道路损毁风险评估专题图

4 结论与展望

地震发生后次生灾害将延续相当一段时间，震后应急救援工作及灾后重建工作均需要进行交通生命线损毁风险评估，在数据比较有限的情况下，本文以震前道路基础地理信息、次生地质灾害危险性评价数据为主要数据源，构建了道路损毁风险评估模型，模型综合考虑地震、道路以及次生灾害对交通生命线的影 响，评估结果与实际基本一致。

文中所提出的道路损毁风险评估模型可以在假设地震烈度的情况下，用于震前道路损毁风险预评估；也可以在地震发生后，已知地震烈度的情况下，用于道路损毁风险预评估；如果已知震后更多的道路实测数据，可扩展该模型，以达到更好的评估效果。虽然评估结果显示该方法适合受震后次生地质灾害严重的地区(多为山区)的道



路损毁风险评估, 但显然存在受制于数据源的问题。随着交通生命线其他设施(桥梁、隧道)等相关数据资料的增加, 未来将建立起更为完善的交通生命线网络损毁风险评估模型, 从而为震后应急救援管理工作提供更全面的决策支持。在此, 也呼吁进一步加强应急数据的共享工作, 同时重视日常本底数据的规范性管理。

**致谢** 感谢国家高技术研究发展计划(863 计划)课题“重大工程地质灾害快速监测与评估”(2012AA121303)支持, 感谢民政部国家减灾中心、中国地质大学(武汉)提供数据支持, 感谢清华大学防灾减灾研究所提供的支持, 感谢清华大学 3S 研究中心未署名的同学和老师辛苦的数据处理工作。

## 参考文献:

- [1] 陈一平, 陈欣. 公路路基路面的震害预测[J]. 工程抗震, 1993 (3): 40-45.
- [2] Werner S D, Jernigan J B, Taylor C E, et al. Seismic vulnerability assessment of highway systems[J]. NCEER Bulletin, 1995, 9 (4): 1-11.
- [3] Chang S E, Nojima N. Measuring post-disaster transportation system performance: the 1995 Kobe earthquake in comparative perspective[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2001, 35(6): 475-494.
- [4] Yamazaki F. Applications of remote sensing and GIS for damage assessment[J]. Structural Safety and Reliability, 2001: 1-12.
- [5] Adams B J, Huyck C K, Mansouri B, et al. Application of high-resolution optical satellite imagery for post-earthquake damage assessment: The 2003 boumerdes (algeria) and bam (iran) earthquakes[J]. Research Progress and Accomplishments 2003 - 2004, Buffalo: MCEER, 2004: 173-186.
- [6] 陈世荣, 马海建, 范一大, 等. 基于高分辨率遥感影像的汶川地震道路损毁评估[J]. 遥感学报, 2008, 12(6): 949-955.
- [7] Ehrlich D, Guo H D, Molch K, et al. Identifying damage caused by the 2008 Wenchuan earthquake from VHR remote sensing data[J]. International Journal of Digital Earth, 2009, 2(4): 309-326.
- [8] 秦军, 曹云刚, 耿娟. 汶川地震灾区道路损毁度遥感评估模型[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(5): 768-774.
- [9] 靳彩娇, 张永生, 张宇驰, 等. 一种基于遥感影像的道路损毁评估方法[J]. 影像技术, 2013 (1): 39-41.
- [10] 曹晓航, 张亚非, 肖学年. GB/T 20267-2006 车载导航电子地图产品规范[S]. 北京: 中国标准化出版社, 2006.
- [11] 中国地震局. 四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震烈度图[EB/OL]. (2013-04-25) [2013-04-26]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100343/20130426185439708116314/index.html>.
- [12] 清华大学. 突发公共事件预测预警与智能决策技术研究(2006BAK01A02-09)子课题4 台风、地震、滑坡等重大自然灾害耦合及其引发建筑和工程设施破坏的综合预测预警与智能决策技术[R]. 北京: 清华大学, 2009.
- [13] 石京, 谭金华. 道路风险分析与评估管理系统研究初探[J]. 公路工程, 2011, 36(4): 85-88.
- [14] 彭令, 牛瑞卿, 赵艳南, 等. 区域滑坡灾害风险评估——以长江三峡库区秭归县为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(3): 891-901.
- [15] 彭令, 牛瑞卿, 陈丽霞. GIS 支持下三峡库区秭归县滑坡灾害空间预测[J]. 地理研究, 2010, 29(10): 1889-1898.
- [16] 吴凡, 汪明, 刘宁. 美国地震风险评估中灾害模型的探讨[J]. 灾害学, 2012, 27(2): 109-113.
- [17] 江见鲸, 徐志胜. 防灾减灾工程学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 375-390.
- [18] 崔光耀, 王明年, 于丽, 等. 基于汶川地震隧道震害特点的抗震设防标准评价及建议[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 20-24.

## Seismic Risk Assessment for Road Damage in Lushan M7.0 Earthquake

Zhao Hongrui<sup>1</sup>, Wang Tao<sup>1,2</sup>, Shi Limei<sup>1</sup>, Fu Gang<sup>1</sup> and Li Cong<sup>1</sup>

(1. Institute of Geomatics, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. College of Mining Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China)

**Abstract:** Lushan M7.0 Earthquake and its secondary geological hazards seriously damaged the traffic system and interrupted the rescue traffic lifeline. In order to meet the need of seismic risk assessment for road damage rapidly, it is necessary to establish the model of seismic risk assessment for road damage which takes into consideration of the secondary geological disaster factor. In the condition of limited seismic data, using road geographical information before earthquake, the secondary geological disaster risk assessment thematic map after earthquake as data source, a model of seismic risk assessment for road damage is constructed which considers the seismic damage factors associated with road (seismic intensity and fortification intensity) and the secondary geological disaster factor. This model is applied to road damage risk assessment after Ya'an earthquake. The seismic risk assessment of road damage in Ya'an is generated and submitted to the National Disaster Reduction Center of China. Compared the assessment result with the road damage point data, which was published on the Lushan county M7.0 earthquake geography information publishing platform developed jointly by Tianditu Company and Sichuan Bureau of Surveying, Mapping and Geographic information, it was basically in accord with the case might be. It can be concluded that the proposed method could be regarded as a reference for the secondary disaster prevention and control and long-term recovery and after the earthquake.

**Key words:** Lushan M7.0 earthquake; road damage; risk assessment; secondary geological hazard