

汶川 8.0 级地震震害遥感定量化初步研究 ——以都江堰城区破坏为例^{*}

王晓青¹, 王 龙¹, 章熙海², 丁 香¹, 邱 虎³
董彦芳¹, 窦爱霞¹, 张飞宇¹, 刘在涛⁴

(1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 2. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014;
3. 天津市地震局, 天津 300201; 4. 中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要:随着遥感技术的飞速发展, 遥感在地震应急救援、灾害调查和损失评估中的作用越来越显著。然而由于缺乏系统的遥感震害定量研究, 使得遥感的实用性常常受到质疑。文中叙述了遥感震害定量研究的基本思路, 提出了遥感震害指数的概念与定量分析的基本模型, 并以 2008 年汶川 8.0 级地震造成的都江堰城区震害为例, 依据建筑物震害遥感解译结果和地面震害调查结果, 进行了都江堰城区部分街区的建筑物遥感震害指数和地面调查震害指数的统计分析, 并建立了两者之间的统计关系。初步研究结果表明, 依据高分辨率航空遥感影像和卫星雷达图像建立的建筑物遥感震害指数与地面调查震害指数及房屋倒塌率存在显著的对应性。因此, 通过遥感震害定量化研究, 将为地震震害调查、损失评估提供有力的方法和工具。

关键词:震害指数; 遥感; 汶川地震; 定量化

中图分类号: P315.17

文献标识码: A

文章编号: 1000-3274(2009)01-0174-08

引言

遥感信息的获取具有宏观性、不受灾区破坏的影响等特点。随着高分辨率卫星遥感和机载遥感技术的迅速发展, 破坏性地震发生后快速获取灾区震害图像的能力得到了实质性的提高, 并得到一定程度的应用^[1~9]。以 2008 年汶川 8.0 级大地震的应急遥感实践表明, 遥感方法在严重破坏性地震, 特别是造成重大损失的严重破坏性地震发生后, 是非常有效的快速获取灾区灾情信息的主要途径, 标志着我国利用遥感方法进行震害调查进入了实质性应用的阶段。

同时, 遥感方法具有的多源、多分辨率、多时相信息特点, 对震害表现出的宏观性和间接性, 使得遥感技术应用于地震应急震害调查的有效性常常受到质疑。只要建立信息获

^{*} 收稿日期: 2008-10-15; 修改回日期: 2008-10-23

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC01B02-01-01)

作者简介: 王晓青(1963-), 男, 湖北应城人, 研究员, 主要从事地震危险与灾害损失预测、遥感与 GIS 应用等研究。

参加野外调查或室内工作的人员还有王岩、郑友华、王米伊、王栋梁。

取的有效渠道和协同工作环境,遥感技术的迅速发展将保证灾后可快速得到灾区的遥感图像。相比较而言,如何定量地获取遥感震害信息,并且保证其结果与传统的地面调查结果具有可比性,以保证遥感在地震应急工作中的实用性,是主要的研究课题。本文在笔者前期研究的基础上,提出了遥感震害指数的震害定量化描述指标,并以汶川 8.0 级地震后获取的都江堰城区的遥感数据为基础,通过处理分析,结合震后地震现场遥感震害比科学考察,建立了遥感震害指数的计算模型及其与地面调查的震害指数的统计关系模型,并对结果进行了讨论。

1 遥感震害定量化研究的基本思路和模型

1.1 震害指数及其确定方法

遥感震害识别过程涉及震害遥感数据的预处理、图像增强、震害自动分类或人工解译等。单个地物(主要是建筑物)的震害识别程度,与遥感信息源类型、对象尺度、获取时的气象条件(对某些信息源)、地物受灾程度(又决定于地震动强度、地物抗灾能力、场地条件及地震断层等)以及受次生灾害的影响程度等多种因素有关。建筑物单体的倒塌判定结果对应应急救援具有重要意义,但未倒塌的建筑物其震害未必不严重。因此,如果通过可见的少数建筑物破坏(倒塌或局部倒塌)来判断地震灾害的严重程度,以提高地震灾害损失估计的准确性,具有重要意义。

实际震害表明,某一区域(通常为自然村或街区)地震造成的建筑物震害程度与地震作用强度(如用地震烈度表征)在统计上是相关的。因此,在传统的地面震害调查中,常采用震害指数来表征震害程度。房屋震害程度采用震害指数表示。震害指数的概念在 1970 年通海地震调查中提出来后^[1],已广泛应用于地震震害研究中。同一地震烈度下,不同结构类型建筑物的震害程度是不同的,可表示为与结构相关的震害指数。某一调查点结构类型 i 的平均震害指数由下式计算,即

$$\bar{d}_i = \frac{\sum_j d_{ij} n_{ij}}{n_{ij}} \quad (1)$$

式中, d_{ij} 表示 i 类房屋破坏等级为 j ($j = 1, 2, 3, 4, 5$) 的震害指数;震害指数为 1 表示全部毁坏,为 0 表示完好无损,中间可划分为若干等级。 n_{ij} 为 i 类房屋破坏等级为 j 的房屋幢数。

同一地震烈度下,不同类型建筑物抗震能力存在显著的差别。为了能够定量地确定某一地点的震害程度,通常选用砖混结构建筑物的平均震害指数 \bar{d}_b 作为标准,建立其他类型建筑物 i (如框架结构或土木结构等)的平均震害指数 \bar{d}_i 与 \bar{d}_b 的经验统计关系,将其折合为等效的砌体结构第 i 类房屋的平均震害指数 \bar{d}_{bi} 。这样,就可得到该地点的综合震害指数 DI^G , 即

$$DI^G = \frac{\sum_i \bar{d}_{bi} N_i}{N_i} \quad (2)$$

式中， N_i 为第 i 类房屋的幢数。

综合震害指数建立以后，通过综合震害指数与地震烈度的对应关系^[10]，就可以定量地确定该地点的地震烈度。

1.2 遥感震害指数及其确定方法

按照采用地面调查数据确定震害指数的思路，同样可以依据遥感方法确定的建筑物震害进行震害指数的计算。所不同的是，遥感方法判读震害程度的级别有限（一般分为倒塌，部分倒塌和未倒塌三级），判读结果受上述多种因素，特别是图像类型和空间分辨率的影响。因此，将采用遥感震害判读结果确定的震害指数称为遥感震害指数，作为遥感震害定量描述指标以区别于地面调查的震害指标。

按照上述思路，遥感震害指数 DI^{RS} 按如下公式计算：

$$DI^{RS} = \frac{\sum_i \bar{d}_{hi}^{RS} N_i^{RS}}{\sum_i N_i^{RS}} \tag{3}$$

式中， \bar{d}_{hi}^{RS} 为折合成等效的砌体结构的第 i 类房屋的遥感震害指数，计算方法参照式(1)； N_i^{RS} 为第 i 类房屋的遥感判读幢数。

遥感震害量化参数的提出，将有助于提高遥感震害描述的科学性与准确性，便于实际操作，并拓展遥感震害定量研究的范围。

2 都江堰城区地面震害调查与统计

在介绍遥感震害研究结果之前，先对地面调查资料进行统计分析。汶川 8.0 级地震发生后，作为中国地震局汶川地震科学考察工作的内容之一，笔者在灾区进行了约 40 天的详细野外震害调查，为遥感震害比对提供了实际资料。在都江堰市城区开展遥感震害调查工

作区的主要范围见图 1。工作区采集的房屋建筑样本 3400 多座，其中主要结构类型所占比例为：砖混结构（42 %）、底层框架（35 %）、框架结构（13 %）、砖木结构（4 %），余下类型（土木结构、厂房、老旧房屋等）不到 6 %。

以都江堰市城区地面调查的街区为单位，根据式(1)和式(2)，统计确定了主要结构类型的地面调查震害指数，如图 2 所示。其中，房屋震害等级分为 6 级，对应房屋震害指数 d_{ij} 分别取为：毁坏(倒塌) 1.0、毁坏(未倒塌) 0.9、严重破坏 0.7、中等破坏 0.4；轻微破坏 0.2、基本完好 0。

图 2 中横坐标为砖混结构的平均震害指数。结果表明，底层框架结构和框架结构的震害指数总体上比砖结构小，而砖柱

厂房、老旧房屋的震害指数总体上比砖混结构大；砖木结构房屋的震害指数总体与砖混结

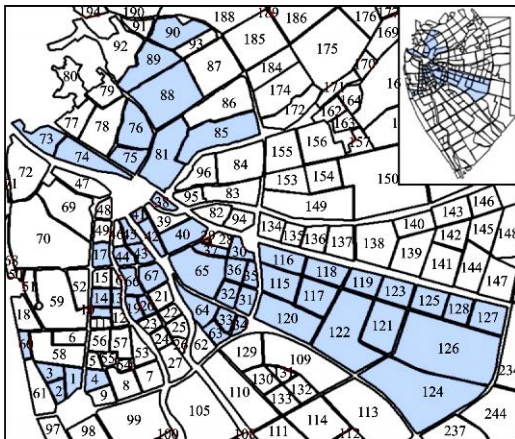


图 1 都江堰市城区街区分布与遥感震害调查工作区范围
(小图为都江堰市城区全区图，大图中数字为街区编号)

构比较接近。这些特点是与不同结构类型的抗震性能是一致的。同时，数据的离散性主要表现为是由影响震害程度的房屋建筑年代、设防水准、结构形式、楼层高度和地形以及局部场地条件等各种因素造成的。因而表现一定的随机性。

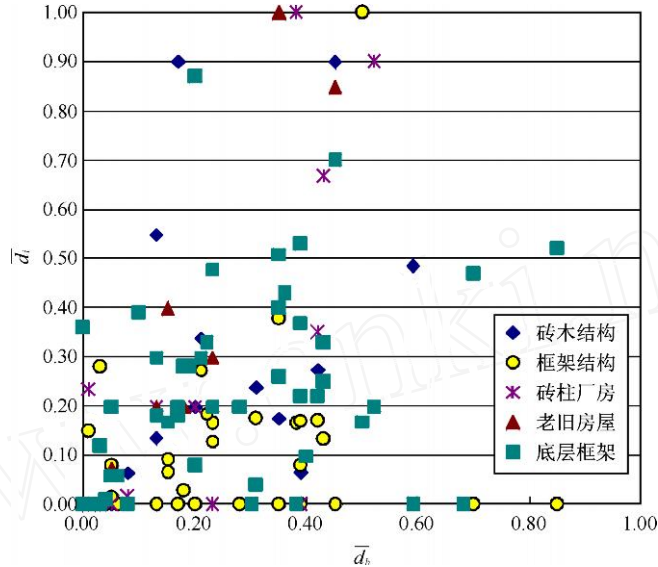


图 2 都江堰市部分城区主要结构类型的地面调查震害指数分布
(\bar{d}_b 为地面调查砖混结构平均震害指数; \bar{d}_i 为第 i 类建筑物平均震害指数)

3 都江堰城区遥感图像处理与建筑物震害提取

2008 年汶川 8.0 级大地震在都江堰城区造成了严重的地震灾害损失。震后快速获取了卫星和机载雷达图像以及可见光图像。本文选取了意大利 Cosmos Sky-Med 卫星影像(空间分辨率为 1 m)和中国科学院航拍彩色数字图像(空间分辨率为 0.5 m)。图 3 为不同类型遥感数据所反映的都江堰城区建筑物典型震害影像以及地面对应的震害照片。

对遥感影像进行了几何校正、图像增强处理,并选取了部分街区作为工作区,以 0.5 m 空间分辨率的机载彩色遥感图像为数据源,通过自动处理和人机交互方式^[12, 13],提取了工作区建筑物单体的结构类型和遥感震害级别(1 为倒塌,2 为部分倒塌,3 为未倒塌)。按照上述遥感震害指数统计方法,以街区为单位,统计确定了各街区的遥感震害指数,如图 4 所示。其中,房屋震害指数 d_{ij} 分别取为:倒塌 1.0;局部倒塌 0.5;未倒塌 0。

4 遥感震害与地面调查震害的定量关系

以上利用遥感震害指数对遥感方法提取的建筑物进行了震害量化计算。由于遥感影像传感器类型、图像空间分辨率等影响到遥感震害判读的识别率,因此上述遥感震害指数与实际震害是有区别的。可以想像,依据不同传感器和分辨率的遥感影像提取的建筑物震

王晓青等,地震遥感分析处理系统软件说明书(内部),2007 年。

王岩等,面向对象遥感分类方法在汶川地震震害提取中的应用,2008 年。

董彦芳等,高分辨率雷达遥感地震灾害信息提取,2008 年。

害计算的遥感震害指数是不一样的。因此，遥感震害指数不能直接用来对应地震烈度。需要结合地面实际震害调查结果，通过对比分析，建立遥感震害指数与依据地面实际调查资料确定的建筑物综合震害指数的统计关系，则将遥感震害指数转换为等效的地面震害指

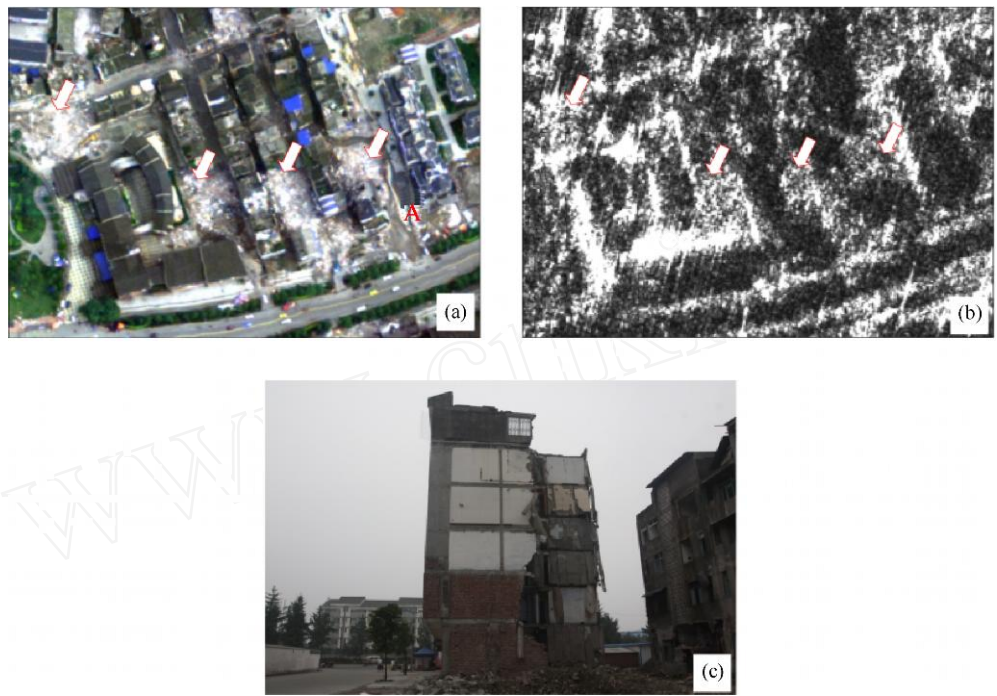


图 3 都江堰市城区建筑物典型震害影像

(a) 航空遥感图像(2008 年 5 月 15 日)；(b) Cosmo-SkyMed 雷达图像(2008 年 5 月 13 日)；(c) 照片显示框架结构房屋局部倒塌；(a) 和 (b) 中箭头所指部位为倒塌房屋位置；(c) 所示局部倒塌房屋的位置在 (a) 中的 A 处；照片前部为倒塌房屋的位置

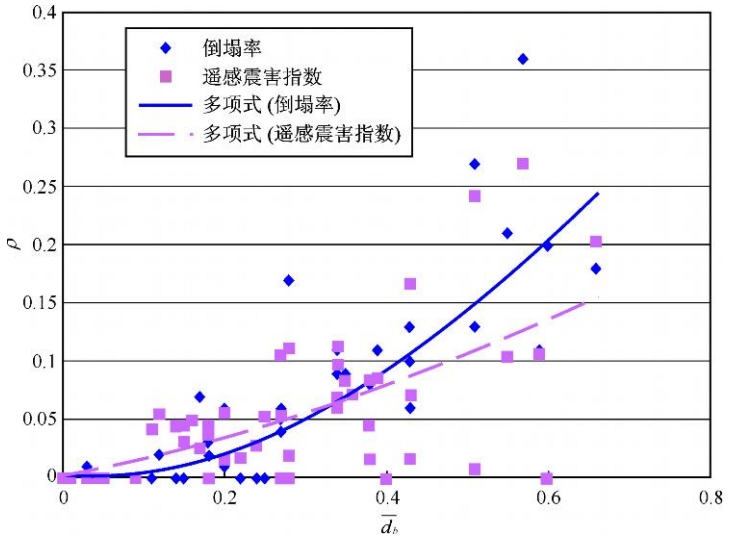


图 4 都江堰市部分城区遥感震害指数与地面调查震害关系曲线
(\bar{d}_b 为地面调查砖混结构平均震害指数； ρ 为房屋倒塌率)

数,利用等效地面震害指数,即可确定工作区的地震烈度值。

在图 4 遥感震害指数与地面调查震害指数的统计结果现实了两者之间的关系。其中,横坐标是以街区为统计单元的地面调查资料统计的建筑物平均震害指数,黑点为地面调查资料统计的建筑物倒塌率,即震害级别为毁坏(倒塌)的房屋所占的比例;方点为根据遥感解译的建筑物震害资料统计的遥感震害指数。由图 4 表明,房屋倒塌率 达到 0.79;遥感震害指数也与平均震害指数相关,相关系数稍小,为 0.65;房屋倒塌率与遥感震害指数变化趋势总体一致,在震害较轻(平均震害指数小于 0.35)的街区,遥感震害指数略高于平均震害指数,表明存在一定程度的加重误判;在震害较重(平均震害指数大于 0.35)的街区,遥感震害指数低于平均震害指数,主要是由于倒塌建筑物单体不易区分造成的。上述特点表明了遥感震害指数与实际震害具有明显的统计关系,同时也具有一定的不确定性。

采用多项式模型进行拟合统计,得到遥感震害指数 DI^{RS} 与地面调查震害指数 DI^G 的关系如下:

$$DI^{RS} = 0.1394 DI^{G2} + 0.1388 DI^G + 0.002 \quad (R = 0.65) \quad (4)$$

根据本文对遥感震害指数的定义和计算方法,遥感震害指数实际上是遥感解释的建筑物倒塌率。为此,进一步探讨遥感震害指数 DI^{RS} 与房屋倒塌率 的关系,如图 5 所示。同样采用多项式拟合方法,得到如下的关系式:

$$DI^{RS} = -0.2527 \rho^2 + 0.5282 \rho + 0.0239 \quad (R = 0.60) \quad (5)$$

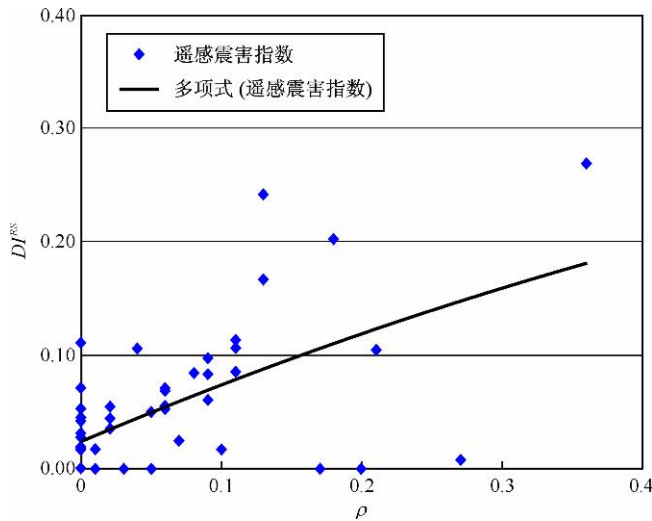


图 5 都江堰市部分城区遥感震害指数与房屋倒塌率的关系曲线
(ρ 为房屋倒塌率; DI^{RS} 为遥感震害指数)

5 结论与讨论

本文在介绍遥感震害指数及其统计模型的基础上,依据汶川 8.0 级地震造成的都江堰地区建筑物震害遥感解译结果和地面调查结果,初步建立了遥感震害的定量化分析模型与传统的地面调查确定的震害指数及房屋倒塌率之间的定量关系。表明建立遥感震害定量化的模型是可能的,这将显著提高遥感应用于地震应急灾情获取与分析的实用性。

笔者也注意到分析结果存在一定的不确定性,这主要是尚未考虑各种影响因素。通过大量实际震例的积累和进一步深入细致的分析,相信遥感震害定量分析结果的不确定性会得到显著减小。

汶川地震震后北京同天视地空间技术有限公司提供了 Cosmo-SkyMed 雷达数据,中国科学院对地观测与数字地球科学中心提供了航空遥感影像数据,野外科考过程中得到中国地震局汶川地震科学考察队指挥部的指导,以及得到四川省地震局、都江堰防震减灾局等单位的大力协助,在此深表谢意。

参考文献:

- [1] 陈鑫连. 地震灾害的航空遥感信息快速评估与救灾决策[M]. 北京:地震出版社,1992.
- [2] 王丹,丁军. 航空遥感影像上震害解译的结构模型与几何特征获取[J]. 灾害学,1997,12(1):1-6.
- [3] 王晓青,蒋铭,张德成. 航空影像震害自动识别的初步研究[A]. 庄逢甘. 中国地方遥感应用进展——全国地方遥感应用协会成立五周年论文集[C]. 北京:宇航出版社,1997. 152-156.
- [4] 王晓青,魏成阶,苗崇刚,等. 震害遥感快速提取研究——以2003年2月24日新疆巴楚-伽师6.8级地震为例[J]. 地学前缘,2003,8(增刊):285-291.
- [5] 王晓青,张景发,单新建,等. 震害遥感快速识别与损失评估系统的开发研究[A]. 庄逢甘,陈述蓬. 中国遥感应用协会文集[C]. 北京:宇航出版社,2003. 21-39.
- [6] 魏成阶,朱博勤,张宗科,等. 地震灾害航空遥感快速调查技术研究——以唐山地震区作模拟试验场[A]. 何建邦,田国良,王劲峰. 重大自然灾害遥感监测与评估研究进展[C]. 北京:科学出版社,1993. 12-23.
- [7] 杨喆,程家喻. 澜沧-耿马地震灾情的航空遥感调查[J]. 国土资源遥感,1993,5(1):17-23.
- [8] MITOMI Hajime, MATSUOKA Masashi, YAMAZAKI Fumio, et al. Determination of the areas with building damage due to the 1995 Kobe earthquake using airborne MSS images[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002 IEEE International, 2002(5):2871-2873.
- [9] Wang X Q, Ding X, Dou A X. Application of Remote Sensing and GIS to Extraction of Building Damage Caused by Earthquakes[M]. ACRS 2003 ISRS, Busan Korea, 2003.
- [10] 国家质量技术监督局. 中国地震烈度表(GB/T17742-1999)[S]. 北京:中国标准出版社,1999.
- [11] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,1988. 92.
- [12] 王晓青,王龙,王岩,等. 四川汶川8级大地震应急遥感震害评估研究[J]. 震灾防御技术,2008,3(3):251-258.

Primary Quantitative Study on Earthquake Damage Extracted from Remote Sensing Imagery ——A Case Study of Doujiangyan due to the Wenchuan M8.0 Earthquake

WANG Xiao-qing¹, WANG Long¹, ZHANG Xi-hai², DING Xiang¹, QIU Hu³,
DONG Yan-fang¹, DOU Ai-xia¹, ZHANG Fei-yu¹, LIU Zai-tao⁴

(1. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China;

2. Seismological Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China; 3. Seismological

Bureau of Tianjin, Tianjin 300201, China; 4. China Earthquake Network

Center, Beijing 100045, China)

Abstract : The fast developing remote sensing techniques play more and more important roles in earthquake emergency, disaster survey and losses estimation. Because of the lack of quantitative study on seismic damage based on remote sensing, the practicality of remote sensing in the seismic disaster management was usually questioned. The paper introduces the idea of essential quantitative study, the concept of remote sensing seismic damage index and analysis models, which are applied to the case of Doujiangyan City, Sichuan Province, destroyed by the 12 May 2008 Wenchuan M8.0 earthquake. The primary results show that there exists an obvious relation between the seismic damage index of buildings obtained from the high resolution satellite or aerial remote sensing imagery with the seismic damage index or the building collapse ratio obtained through ground survey, and that the quantitative study on seismic damage based on remote sensing will provide an effective means and tool for the seismic damage survey and losses estimation.

Key words : Seismic damage index; Remote sensing; Wenchuan earthquake; Quantitative Study