

张克诚, 王晓青, 丁香. 2023. 基于遥感震害指数的尼泊尔地震综合烈度评估研究. 中国地震, 39(2): 367~376.

基于遥感震害指数的尼泊尔地震 综合烈度评估研究

张克诚^{1,2)} 王晓青¹⁾ 丁香¹⁾

1) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

2) 中国地震台网中心, 北京 100045

摘要 2015 年 4 月 25 日在尼泊尔廓尔喀县发生的 8.1 级地震及后续强烈余震, 造成尼泊尔北部严重的人员伤亡和财产损失, 灾区建筑物倒塌损失严重。本文利用现场震害调查资料和高分卫星遥感影像, 开展建筑物震害遥感解译, 得到各个遥感解译点的遥感震害指数, 结合现场调查点评估的烈度拟合了遥感震害指数-实际震害指数转换关系, 再根据遥感震害指数估计了全部解译点的震害指数及地震烈度。估计的烈度与现场调查结果对比显示出较好的一致性, 研究结果为该地区今后发生地震提供了可借鉴的遥感评估震害指数转换模型。

关键词: 遥感震害指数 实际震害指数 尼泊尔地震 烈度评估

[文章编号] 1001-4683(2023)02-0367-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

北京时间 2015 年 4 月 25 日 14 时 11 分 (尼泊尔时间 11 时 56 分), 尼泊尔加德满都西北约 80km 的廓尔喀县 (Gorkha) 发生 8.1 级地震, 震源深度 20km。主震后的 34min、24h 和 17 天后, 又分别发生 7.0 级、7.1 级和 7.5 级强余震。本次地震给尼泊尔及周边国家造成重大人员伤亡和财产损失。据尼泊尔有关部门 6 月 22 日统计, 主震造成 8660 人死亡, 21952 人受伤; 余震造成 172 人死亡, 3470 人受伤。此外, 地震还造成印度 130 人死亡, 孟加拉国 4 人死亡, 中国西藏自治区 27 人死亡。同时, 地震还使得抗震性能欠佳的尼泊尔城乡建筑损失惨重, 据新闻报道, 尼泊尔境内超过 500 万幢建筑物受损或倒塌。

强震发生后, 相较传统地面调查的灾情获取手段, 通过遥感技术快速实现建筑物震害灾情的获取, 对于应急救援决策十分重要 (缪恒等, 2022)。2008 年汶川 8.0 级、2010 年玉树 7.1 级和 2017 年九寨沟 7.0 级地震发生后, 专家学者给出了反映震害现场实地调查结果的

[收稿日期] 2022-07-05 [修定日期] 2022-09-29

[项目类别] “十三五”国家重点研发计划 (2017YFB0504104)、高分遥感地震监测与应急应用示范系统 (二期) 高分卫星遥感地震烈度评估与地震损失评估应用示范 (31-Y30B09-9001-13/15-06) 和中国地震台网中心青年科技基金 (QNJJ202213) 共同资助

[作者简介] 张克诚, 男, 1994 年生, 硕士, 工程师, 研究方向为遥感与地震灾害风险评估。E-mail: zhangkc@seis.ac.cn

王晓青, 通讯作者, 男, 1963 年生, 研究员, 主要从事地震风险评估、地震应急遥感评估等研究工作。

E-mail: wangxiaogang517@163.com

实际震害指数(D_G)与反映震害遥感解译结果的遥感震害指数(D_R)之间的转换关系(王晓青等,2009; 窦爱霞等,2012),或对重灾区进行典型解译,开展灾情定量评估(袁小祥等,2017)。尼泊尔 8.1 级地震发生后,王晓青等(2015)通过高分遥感影像解译,编制灾区震害等级分布图,宏观判断地震灾情分布情况;同时,我国也有专家学者赴灾区现场,考察建筑物震害情况(Sun 等,2015; 潘毅等,2017);尼泊尔本国和部分海外机构也组织前往灾区开展震害调查并给出报告(Gautam,2017; Ohsumi et al,2016)。然而,上述研究和调查结果均未给出用于烈度定量评估的震害指数转换模型。

目前,我国已经公开发表的震害指数转换模型大多服务于国内地震应急工作,涉及国外地震的仅有 2010 年海地地震的震害遥感解译结果(王龙等,2010)。考虑到中国经常参加国际救援,特别是尼泊尔这样的邻国发生强震本身已经波及我国,更有必要通过研究得出相关转换模型,以服务两国抗震救灾和国际救援。本文以尼泊尔 8.1 级地震前后的灾区遥感影像和地面考察资料为基础,开展基于遥感震害指数和实际震害指数的震害定量分析,通过建立二者的转换关系实现基于遥感判读的综合烈度评估,并验证烈度评估结果的精度。

1 研究方法和数据

1.1 研究方法

(1)首先根据尼泊尔的建筑特点和震害实际情况,建立尼泊尔地震建筑物震害解译标志。

(2)依照解译标志对遥感影像所覆盖的全部调查点进行建筑物震害遥感解译。按照 DB/T 75-2018《地震灾害遥感评估 建筑物破坏》地震行业标准(中国地震局,2018),将震区单体建筑物按照受损程度及其在遥感影像中的表现特征,划分为倒塌、局部倒塌、未倒塌 3 种破坏级别。

(3)设定遥感解译的倒塌建筑物、局部倒塌建筑物、未倒塌建筑物的平均震害指数分别为 1、0.5、0,则依据各调查点的建筑物震害等级遥感解译结果,可以计算得到该调查点的遥感震害指数 D_R ,即

$$D_R = \frac{\sum_i d_i n_i}{\sum_i n_i} \quad (1)$$

式中, d_i 表示破坏等级为 i 的房屋的平均震害指数, n_i 表示破坏等级为 i 的房屋数量或建筑面积,本文表示房屋数量。

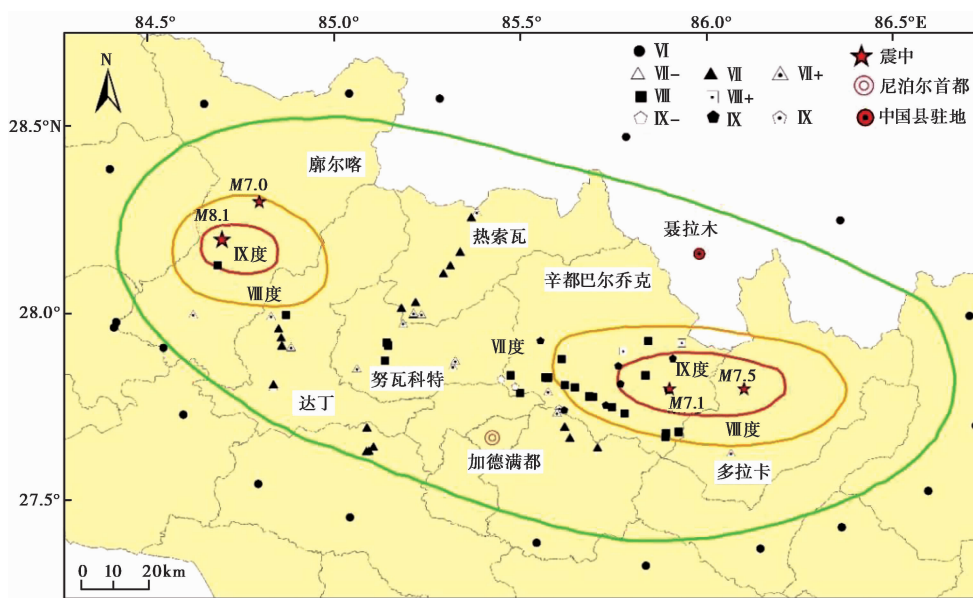
(4)根据 GB/T 17742-2020《中国地震烈度表》中的震害指数与地震烈度的关系(国家市场监督管理总局等,2020),将地面调查的地震烈度对应为实际震害指数 D_G 。依据同一调查点的实际震害指数 D_G 与遥感震害指数 D_R ,拟合出 D_G - D_R 关系。

(5)通过转换模型,将全部调查点的遥感震害指数转换为等效实际震害指数及烈度,并计算烈度评估值与实测值的 Kappa 系数,以验证遥感评估结果的一致性。

1.2 研究数据

本研究选取中国地震局组织的尼泊尔地震现场灾害调查与评估工作组 2015 年 6 月在尼泊尔开展现场调查获取的数据,包括 87 个调查点的经纬度、地名、烈度及其他附属信息,

以及现场调查期间拍摄的大量反映建筑物震害的照片。现场调查点分布情况及烈度图如图 1 所示,其中,在烈度Ⅶ度区外增加了部分调查点,并假设其地震烈度为Ⅵ度。现场调查期间,工作组以尼泊尔当地政府提供的灾情信息为参照,采取了重点调查策略,因此基本可以认为调查资料中的调查点边界大体上就是烈度Ⅶ度区边界。同时,对应这些调查点的居民区下载了美国 Digital Global 公司获取的多时相 Worldview 影像(分辨率 0.3m)。因 7.5 级余震对震区特别是东部地区造成了严重的二次破坏,考虑破坏的叠加效应,影像下载的时间节点为主震前(主要获取时间为 2013 年 1 月—2015 年 3 月)和 7.5 级余震后(主要获取时间为 2015 年 5 月 13—14 日)。因此,本文研究对象为主震和多次强余震共同作用造成的综合烈度。



注:图中等震线、调查点等要素依据现场工作组给出的烈度图和调查资料,下同。

图 1 尼泊尔地震地面调查点分布及烈度图(据 Sun 等(2015))

2 遥感解译标志建立




本研究需要对灾区大量房屋进行震害遥感解译,为保证解译的相对准确性,需要建立统一的遥感解译判读标志。通过分析尼泊尔震区建筑物及其震害在遥感影像上的表现特点,总结了震害遥感特征作为不同破坏等级的判读标志,如表 1 所示。

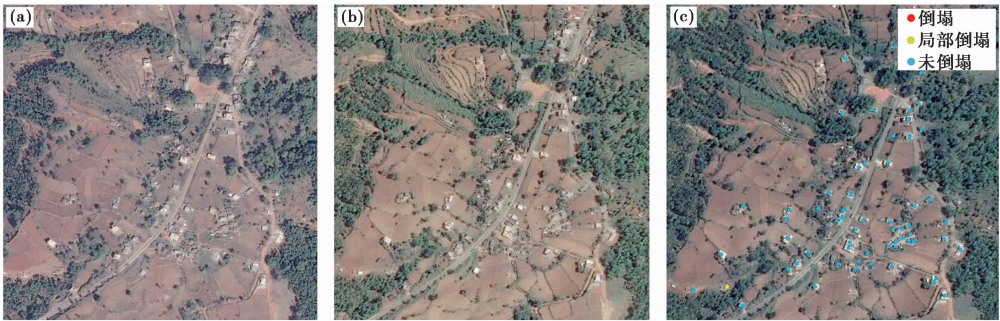
3 遥感震害解译

结合建筑物震害在遥感影像中的表现和现场调查获取的震害情况,对遥感影像的建筑物进行震害遥感解译。图 2~图 5 给出了不同烈度区的典型震害遥感影像及其建筑震害等级的目视判读结果,其中烈度值是依据地震现场实地调查确定的地震烈度。

87 个调查点共遥感解译 6472 栋建筑,其中未倒塌房屋 5504 栋(85.0%),局部倒塌房屋 654 栋(10.1%),倒塌房屋 314 栋(4.9%)。

表 1 尼泊尔地震建筑物震害遥感解译标志

破坏等级	破坏现象	解译特征	影像实例
倒塌	屋顶整体坍塌或部分坍塌,外墙倒塌成为废墟,房屋整体结构变形严重	轮廓不完整、不规则,屋脊不可见; 色调与地面差异较小或几乎无差异,难以分辨; 屋顶纹理杂乱; 地面呈散落废墟状; 地面无阴影或阴影尺寸极小、形状不规则	
局部倒塌	房屋部分垮塌,或虽未整体垮塌,但出现房顶部分塌陷或开裂、墙体部分倒塌、房屋结构部分变形、溜瓦现象严重	轮廓相对完整或部分可见; 色调整体上与地面有一定差异,但没有完好房屋明显; 屋顶纹理大部规则,部分出现裂缝; 房屋四周出现部分废墟状块体; 阴影尺寸与房屋高度基本匹配	
未倒塌	房屋结构保持完好,未出现明显垮塌,震害较轻,仅出现少量掉瓦、砖块脱落或房屋内部损伤等遥感手段不易捕捉的震害	轮廓完整规则,屋脊清晰可见; 色调与地面存在明显差异,能清晰分辨出建筑; 屋顶纹理整体比较规则; 房屋四周无或仅有少量杂物; 阴影尺寸与房屋高度匹配,阴影形状规则	



注:图(a)于2015年3月5日获取,图(b)于2015年5月13日获取。
图 2 VI度解译点震前(a)、震后(b)影像和解译结果(c)



注:图(a)于2013年11月10日获取,图(b)于2015年5月14日获取。
图 3 VII度解译点震前(a)、震后(b)影像和解译结果(c)



注:图(a)于2014年10月25日获取,图(b)于2015年5月14日获取。

图4 VIII度解译点震前(a)、震后(b)影像和解译结果(c)



注:图(a)于2014年10月25日获取,图(b)于2015年5月14日获取。

图5 IX度解译点震前(a)、震后(b)影像和解译结果(c)

在遥感解译基础上,根据式(1)统计确定了各调查点的遥感震害指数,如图6所示。

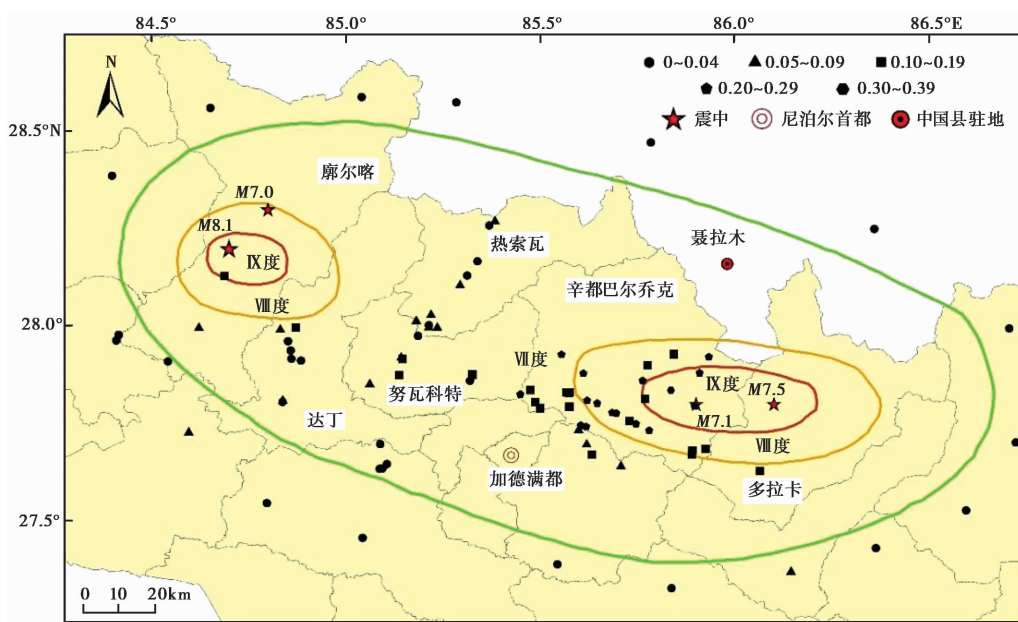


图6 尼泊尔地震遥感震害指数分布

4 结果

通过解译标志建立、震害遥感解译、震害指数转换等步骤,得到以下 3 个主要结果:

(1) 震害指数关系图及转换模型

以实际震害指数 D_G 为纵坐标,遥感震害指数 D_R 为横坐标,形成如图 7 所示的遥感震害指数-实际震害指数关系图。

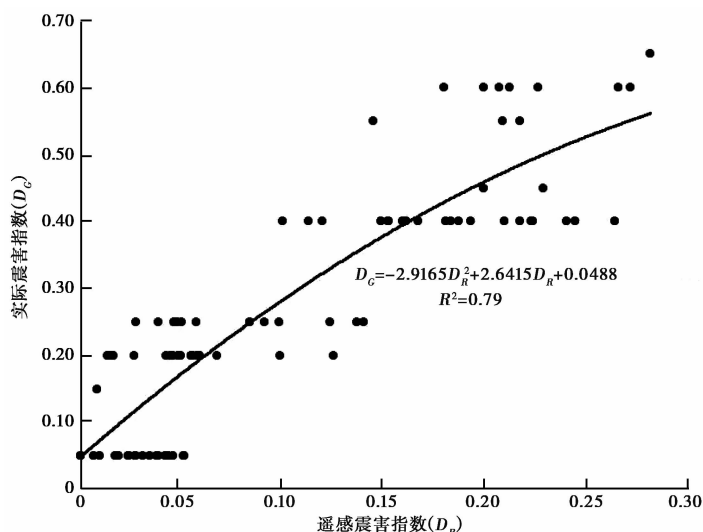


图 7 遥感震害指数-实际震害指数关系

通过实验可知二阶多项式为最优回归模型,决定系数 R^2 可达 0.79。得到的实际震害指数 D_G 与遥感震害指数 D_R 的关系表达式为

$$D_G = -2.9165D_R^2 + 2.6415D_R + 0.0488 \quad (2)$$

根据各调查点的遥感震害指数(图 6)和式(2)震害遥感定量转换模型,确定了各调查点转换后的等效实际震害指数(图 8),并对应得到相应的地震烈度,如图 9 所示。

(2) 烈度评估结果的一致性验证

以式(2)为转换模型,将全部调查点的遥感震害指数转换为与实际可比的震害指数及烈度。在此基础上,建立烈度评估值与现场评定值的混淆矩阵(表 2)。结果表明,地震烈度遥感评估结果的总体精度为 82%,Kappa 系数为 0.74。

(3) 无调查资料解译点烈度评估结果

在建立震害指数转换模型、实现调查点震害遥感评估的基础上,本文还选取 81 个无现场调查资料的居民点,与上述 87 个调查点共同组成 168 个解译点,在震害解译基础上,结合震害指数转换模型,转换得到了等效实际震害指数,并估计了对应的地震烈度(图 10)。结果显示,研究区内无现场调查资料解译点的烈度值分布特征与具备现场调查资料的解译点大体一致。

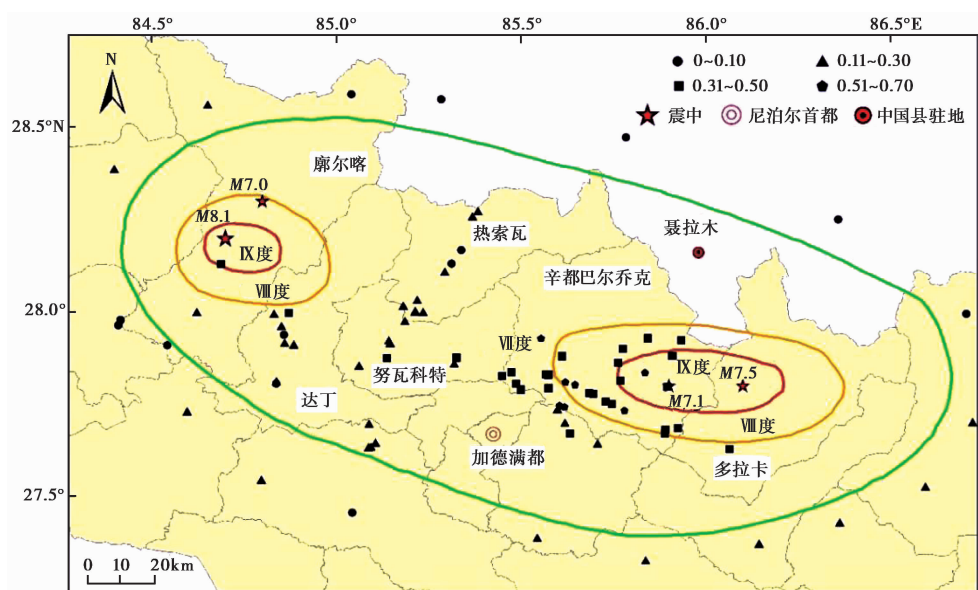


图8 尼泊尔地震转换后的震害指数分布

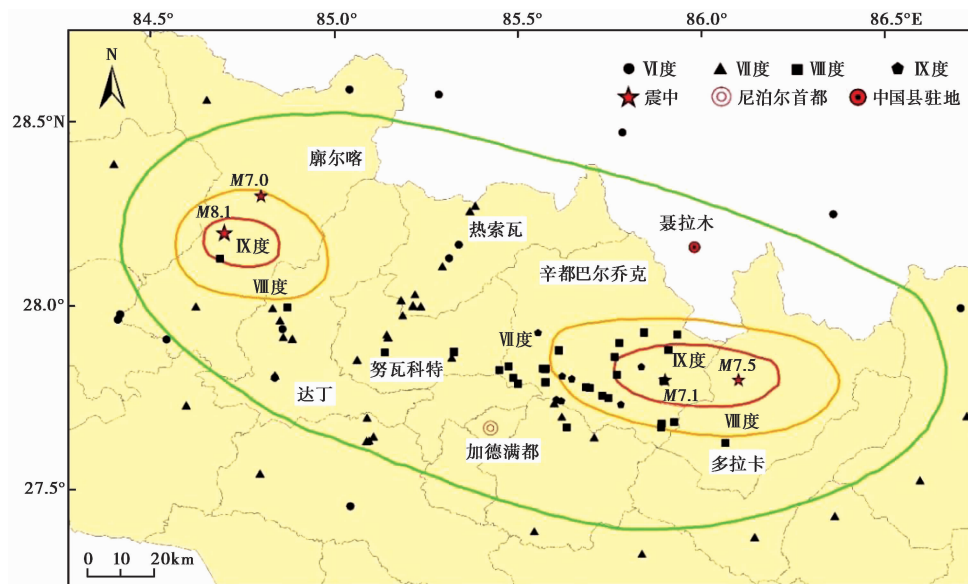


图9 尼泊尔地震遥感估计的地震烈度分布

6 结论与讨论

本文以 2015 年尼泊尔 8.1 级地震发生后获取的卫星遥感影像和实地调查资料为基础, 建立符合尼泊尔建筑的震害遥感解译标志, 开展了建筑物震害遥感解译并估计遥感震害指数。此外, 建立了遥感震害指数与实际震害指数的转换模型, 从而实现各调查点基于震害遥

表 2 尼泊尔地震烈度遥感评估结果混淆矩阵

遥感评估烈度	地面调查烈度				合计
	Ⅵ度	Ⅶ度	Ⅷ度	Ⅸ度	
Ⅵ度	9				9
Ⅶ度	12	31	1		44
Ⅷ度		1	22	2	25
Ⅸ度				9	9
合计	21	32	23	11	87

注：表中的阿拉伯数字表示相应情况的调查点数量。

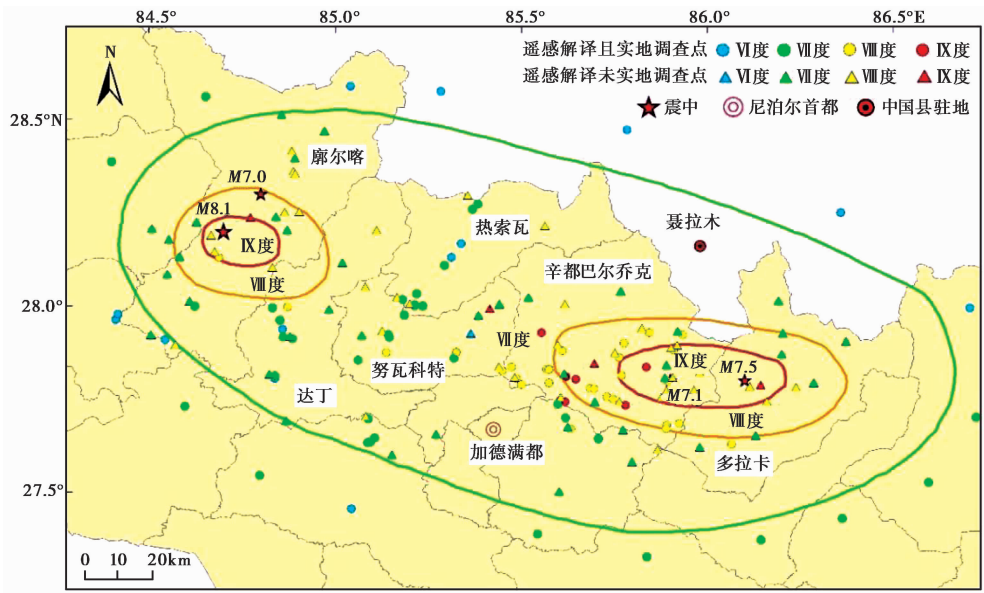


图 10 由 168 个解译点遥感估计的地震烈度分布

感解译的地震烈度评估。研究结果表明：

- (1) 实际震害指数普遍大于遥感震害指数,这是因为遥感解译只能捕捉到屋顶的震害以及墙体的倒塌,房屋的内损伤以及未显现出倒塌特征的破坏在解译时不易发现,造成解译结果偏轻,这也是建立实际震害指数与遥感震害指数转换关系的意义和必要性。
 - (2) 基于遥感震害解译产生的烈度值与实际调查的烈度值具有较好的一致性,87 个调查点中有 71 个烈度评估值与实际值一致,不一致的也基本与实际值相差 1 度,无过大偏差, Kappa 系数为 0.74,属于较高一致性,解译评估得到的结果能够反映震区的基本灾情,表明遥感震害评估方法及本文建立的震害指数转换模型适用于尼泊尔地震震后烈度快速评估。
 - (3) 基于大面积连续覆盖的遥感影像开展烈度评估、判断灾情,可以通过增加解译点来提高结果的空间分布精细程度,对于准确掌握灾情有所帮助。
- 需要说明的是:①现场实地调查和遥感解译的震害均包含了主震和余震的影响,因此,本文所得到的震害指数是主震和强余震综合作用所反映的震害程度,地震烈度是主震和余

震综合作用形成的综合地震烈度; ②本文受所采用的卫星遥感数据分辨率的影响, 无法准确区分抗震能力不同的建筑物类型, 因此, 依据遥感提取的震害等级得到的是遥感平均震害指数。现场震害调查中, 平均震害指数与地震烈度的对应关系存在一定的不确定性, 造成估计的偏差。本文通过建立遥感平均震害指数与实地调查震害指数之间的定量模型, 并在此基础上评估烈度, 可在一定程度上部分抵消这种不确定影响, 得到具有一定精度的地震烈度估计结果。在地震应急和缺少甚高分遥感影像的情况下, 提取遥感平均震害指数不失为一个可行的快速确定震害程度和地震烈度的方法。

致谢: 中国地震局尼泊尔 8.1 级地震现场灾害调查与评估工作组提供了大量现场震害调查与评估资料, 中国地震台网中心李志强研究员就灾区建筑物震害及现场调查情况为本研究提供了重要参考, 在此一并表示感谢。

参考文献

- 窦爱霞, 王晓青, 丁香, 等. 2012. 遥感震害快速定量评估方法及其在玉树地震中的应用. 灾害学, **27**(3): 75~80.
- 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 2020. GB/T 17742-2020 中国地震烈度表. 北京: 中国标准出版社.
- 缪恒, 王晓青, 丁玲, 等. 2022. 基于全极化 Radarsat-2 影像的建筑物震害评估. 中国地震, **38**(2): 338~347.
- 潘毅, 王忠凯, 时胜杰, 等. 2017. 尼泊尔 8.1 级地震加德满都-樟木沿线民居震害调查与分析. 湖南大学学报(自然科学版), **44**(3): 35~44.
- 王龙, 窦爱霞, 王晓青, 等. 2010. 2010 年海地 7.0 级地震应急遥感震害评估. 见: 第十七届中国遥感大会摘要集. 杭州: 杭州师范大学遥感与地球科学研究院.
- 王晓青, 王龙, 章熙海, 等. 2009. 汶川 8.0 级地震震害遥感量化初步研究——以都江堰城区破坏为例. 地震, **29**(1): 174~181.
- 王晓青, 黄树松, 丁香, 等. 2015. 尼泊尔 8.1 级地震建筑物震害遥感提取与分析. 震灾防御技术, **10**(3): 481~490.
- 袁小祥, 王晓青, 丁香, 等. 2017. 基于无人机影像的九寨沟地震建筑物震害定量评估. 中国地震, **33**(4): 582~589.
- 中国地震局. 2018. DB/T 75-2018 地震灾害遥感评估 建筑物破坏. 北京: 中国标准出版社.
- Gautam D. 2017. Unearthed lessons of 25 April 2015 Gorkha earthquake ($M_w 7.8$): geotechnical earthquake engineering perspectives. Geomat Nat Hazards Risk, **8**(2): 1358~1382.
- Ohsumi T, Mukai Y, Fujitani H. 2016. Investigation of damage in and around Kathmandu valley related to the 2015 Gorkha, Nepal earthquake and Beyond. Geotechn Geol Eng, **34**(4): 1223~1245.
- Sun B T, Yan P L. 2015. Damage characteristics and seismic capacity of buildings during Nepal $M_s 8.1$ earthquake. Earthq Eng Eng Vib, **14**(3): 571~578.

Comprehensive Intensity Assessment of Nepal Earthquake Based on Remote Sensing Earthquake Damage Index

Zhang Kecheng^{1,2)}, Wang Xiaoqing¹⁾, Ding Xiang¹⁾

1) Institute of Earthquake Forecasting, CEA, Beijing 100036, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract The earthquake with magnitude 8.1 occurred in Gorkha County, Nepal on April 25, 2015, following strong aftershocks, caused serious casualties and property losses in northern Nepal, with buildings in the disaster area severely damaged. In this paper, the seismic damage investigation data and satellite remote sensing image were used to conduct remote sensing interpretation, in order to get the remote sensing-based seismic damage index. Then by comparing site point intensity from investigation and assessment in the field with remote sensing seismic damage index, we obtain the fitting transformation relation between remote sensing seismic damage index and actual seismic damage index. Then we estimate the seismic damage index and seismic intensity of full interpretation. The estimated intensity is in good agreement with the field survey results. Our results provide a reference for the transformation model of seismic damage index that can be used for disaster evaluation by remote sensing for earthquakes in this area in future.

Keywords: Remote sensing earthquake damage index; Actual earthquake damage index; Nepal earthquake; Earthquake intensity assessment