

云南鲁甸地震灾害应急救援环境分析与影响快速评估

匡文慧^{1,2}, 迟文峰^{1,2,3}, 高成凤⁴, 杜国明⁵, 潘涛⁵, 杨天荣^{1,2,3}, 刘爱琳^{1,2,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 西南科技大学, 四川 绵阳 621010; 5. 东北农业大学, 哈尔滨 150030)

摘要:2014年8月3日16时30分, 云南省昭通市鲁甸县发生6.5级地震, 此次地震危害性较大。在快速收集震区地震烈度分布、地形状况、土地利用/覆盖现状、乡镇人口、居民点分布、房屋建筑物以及高分辨率遥感图像等信息的基础上, 应用GIS空间分析和定量评估模型, 对重灾区自然环境状况, 受灾人口、房屋建筑物及道路交通等敏感受体影响, 牛栏江沿岸次生地质灾害风险等级, 坡耕地退耕及水土流失防治4个方面进行了快速评估, 并针对震区人员救助、地质次生灾害防治以及灾后重建生态治理提出了科学的对策建议。

关键词:鲁甸地震; 灾害影响评估; 对策建议; 云南昭通

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.09.002

中图分类号: F293.35

文献标识码: A

1 引言

2014年8月3日16点30分, 云南昭通鲁甸县(27.1°N, 103.3°E)发生6.5级地震, 震源深度12 km, 属震级高的浅源地震, 地表震动强烈, 破坏力强, 最大地震烈度为Ⅸ度。距震中40 km范围内均受较大影响, 包括鲁甸县、巧家县、会泽县和昭阳区共三县一区, 涉及39个乡镇及874个居民点(主要是行政村和自然村), 受灾人口108.85万。其中受影响严重的Ⅸ度、Ⅷ度和Ⅶ度覆盖区, 为此次地震的重灾区, 涉及鲁甸县龙头山镇、火德红乡、乐红乡、水磨镇和巧家县包谷埡乡、新店乡、老店镇以及会泽县纸厂乡、迤车镇等20个乡镇, 覆盖面积1958.36 km², 均位于距离震中15~35 km范围内, 其中, 处于震中5 km范围内的龙头山镇为受灾最重乡镇。

鲁甸地震是2000年以来云南省境内发生的最大地震, 地震灾害损失严重, 同时震区为云南省人口稠密区域且属国家级贫困区, 建筑物抗震能力较差, 加之重灾区地形崎岖, 地质构造复杂, 地层破碎, 又恰逢雨季, 滚石、滑坡、泥石流、堰塞湖等次生灾害易发。目前地震已经造成重大人员伤亡、堵塞

交通、高危堰塞湖、滑坡等灾害, 尤其在地震烈度Ⅸ度、Ⅷ度和Ⅶ度覆盖范围内极易发生地震次生灾害, 次生灾害造成的破坏通常大于地震本身的破坏。作好地震破坏情况的快速评估有利于次生灾害的预防, 尤其是震区内的重大工程设施与生命线工程现状的快速评估具有重要意义(高原等, 1997; 许强等, 2010; 许冲, 2012)。为避免进一步的人员伤亡和财产损失, 中国科学院地理科学与资源研究所及中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室在震后快速收集地震灾区地形、土地利用/覆盖状况、乡镇人口、居民点及建筑物分布、牛栏江沿江区域地质及降雨资料, 结合国家地震局发布的地震烈度空间分布图(<http://www.cea.gov.cn>), 获取最新遥感影像资料, 应用GIS空间分析和定量评估模型, 快速分析了重灾区自然环境状况, 受灾人口、房屋建筑物及道路交通受损情况, 牛栏江沿岸滑坡次生灾害发生的高风险区域及坡耕地退耕、水土流失防治等情况, 为黄金救援期内识别地震灾区救援外部环境和营救目标提出针对性救援措施, 为震后次生灾害预防与应急提供空间信息支持, 并为灾后重建、救助及村民安置提供参考。在中国科学院地理

收稿日期: 2014-08; 修订日期: 2014-09。

基金项目: 中国科学院重点战略部署课题(KSZD-EW-Z-021-02); 国家自然科学基金项目(41371408); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB950900, 2014CB954302)。

作者简介: 匡文慧(1978-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 副研究员, 主要从事土地利用/覆盖变化、城市生态环境研究,

E-mail: kuangwh1978@sina.com。

科学与资源研究所统一组织下,第一时间向国家提交了《中科院专家关于鲁甸地震灾区自然环境状况分析并提出救援对策》、《中科院专家关于鲁甸地震受灾人口与房屋受损评估及安置对策建议》、《中科院专家关于鲁甸地震灾后重建防治水土流失和坡地退耕的建议》和《中科院专家关于鲁甸地震牛栏江沿岸次生灾害影响评价及应对策略》4份咨询报告,服务于地震灾后救援与重建规划。

2 数据与方法

数据包括2010年第六次人口普查数据、乡镇界线、交通道路基础地理信息数据,2010年中国科学院土地利用/覆盖现状1:10万数据集(数据精度在97%以上)(Liu et al, 2010, 2014),分辨率为30 m的DEM数据,居住建筑分布数据,以及资源三号卫星和Landsat TM影像信息。在GIS支持下,应用人机交互方法对比高分辨率影像的色彩、纹理、形态等信息,识别震前和震后居住建筑及牛栏江流域遥感影像信息。首先基于土地利用/覆盖数据库以及高分辨率遥感图像提取地震重灾区居民点及建筑物分布数据,然后与地震烈度图进行空间叠加分析,统计重灾区居民点及建筑物的分布情况(Kuang et al, 2013);通过建立基于地形、高程与震中距离的影响程度评估模型,分析评估地震重灾区居民点与建筑物受影响的范围及损失程度(Guo et al, 2011);采用空间插值法进行人口数据空间化处理(杨小唤等, 2006; 匡文慧, 2011),并与地震烈度图进行空间叠加分析,统计重灾区受灾人口数量及分布情况,应用灾后高分辨率影像进行了评估结果抽样验证。基于灾区耕地分布与坡度数据,统计分析评价了重灾区坡耕地分布。

地震滑坡次生灾害评价以震中为中心,将牛栏江两岸两侧宽20 km,沿江长90 km的区域作为研究区,对鲁甸地震牛栏江沿岸滑坡开展完整、详细、精确的目视解译工作,研究地震滑坡次生灾害的空间分布规律。地震诱发型地质灾害的主要影响因素包括地形因素、地质环境因素(工程地质岩性、断裂构造、水系条件)、地表覆盖因素(植被)及地震活动因素(Dai et al, 2011)。陈玉等(2013)研究表明,地震诱发地质灾害评价因子中,与构造距离(350 m之内)对地质灾害影响最大,其次为较陡的坡度(40°以上)及距主干河道较近区域。许冲等(2011)对玉树

地震滑坡研究发现,滑坡受震中距离、地表破裂程度、高程、坡度,以及与水体和公路距离等多个地震滑坡控制变量影响。本文选择高程、坡度、坡向、坡位、岩性、植被覆盖、与震中距离、与河流距离、地震烈度、历史灾害、降雨等地震滑坡影响因子,构建牛栏江滑坡危险性评价指标体系,结合高分辨率遥感图像、土地利用/覆盖数据和重灾区人口密度空间分布数据,通过专家权重与因素叠加方法,利用GIS平台和多指标综合定量评估模型,计算地震灾害危险性指数,对所得的地震灾害危险性指数进行分层设色方式表示,得到多因子控制下的牛栏江重灾区段次生灾害发生的风险等级分布图(邵全琴等, 2010; 陈玉等, 2013; 兰恒星等, 2013; 张铎等, 2013)。

3 灾害影响分析评估

3.1 鲁甸地震外部救援环境分析

基于地形高程数据、坡度状况分布、土地利用现状,开展地震外围救援环境特征分析(图1-2)。

鲁甸地震震中位于云南省昭通市鲁甸县,受影响严重的Ⅸ度区域,涉及鲁甸县龙头山镇、火德红乡、水磨镇和巧家县包谷埡乡共4个乡镇,位于距离震中东侧3~15 km范围内,覆盖面积86.67 km²;Ⅷ度区域涉及鲁甸县乐红乡、龙头山镇、火德红乡、水磨镇和巧家县新店乡、包谷埡乡、老店镇以及会泽县纸厂乡等8个乡镇,均位于距离震中2~20 km范围内,覆盖面积290.76 km²;Ⅶ度区域涉及鲁甸县、巧家县和会泽县共18个乡镇,覆盖面积1580.94 km²,均位于距离震中15~35 km范围内。采用DEM数据对鲁甸地震重灾区海拔高程和地形起伏度分布特点进行分析,发现总体上是沿牛栏江东西两侧高,中间低平,海拔高度介于600~3500 m之间,地面起伏较大。其中,海拔1500 m以上区域面积占70.47%,海拔3000 m以上区域面积占28.24%。在烈度为Ⅸ度和Ⅷ度的覆盖区域中,76%以上的区域面积坡度>15°,其中46%的区域面积坡度>25°,大部分分布于牛栏江沿岸两侧山区。在烈度为Ⅶ度的覆盖区域中,69%的区域面积坡度>15°,其中37%的区域面积坡度大于25°。地震重灾区分布最多的土地利用类型为林地,占区域面积47.88%,依次是草地和耕地,分别占31.53%和20.48%。

重灾区为喀斯特岩溶地貌,坡度15°以上高山

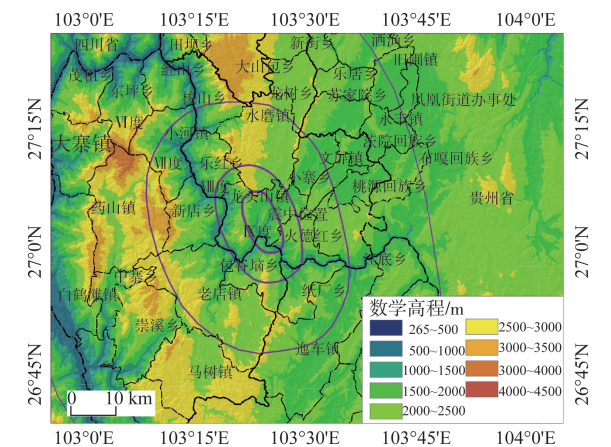


图1 地震区域地形高程分布

Fig.1 Elevation of the Ludian Earthquake area

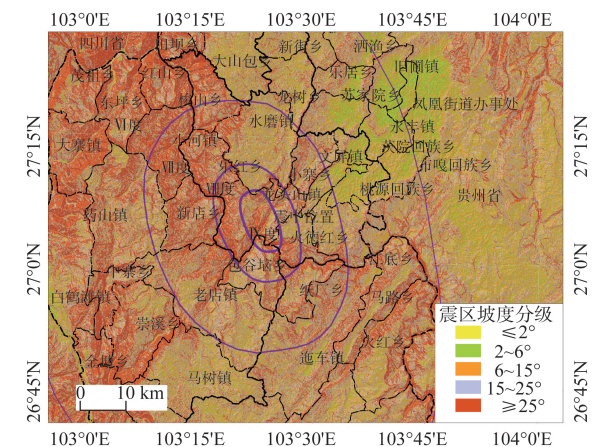


图2 地震区域坡度状况分布

Fig.2 Distribution of slope in the Ludian Earthquake area

峡谷地形,持续降雨及地震导致泥石流次生灾害频发,交通严重受阻,错综复杂的自然环境条件使重灾区的外部救援艰难。

3.2 重灾区各乡镇居民点和房屋建筑状况评价

重灾区居民点主要分布于鲁甸县、巧家县和会泽县的16个乡镇,共涉及368个居民点,居民点总面积20.8 km²。其中,Ⅸ度区域共涉及18个居民点,总面积1.35 km²,分布在鲁甸县龙头山镇、火德红乡和巧家县包谷埡乡,其中88%分布在龙头山镇;Ⅷ度区域共涉及61个居民点,总面积2.51 km²,分布较多的乡镇为鲁甸县龙头山镇、火德红乡、乐红乡、水磨镇和巧家县包谷埡乡及会泽县纸厂乡;Ⅶ度区域共涉及289个居民点,总面积16.93 km²,波及范围较广,在16个乡镇中均有分布,其中鲁甸县乐红乡、水磨镇、梭山乡、小寨乡和巧家县老店

镇、小河镇和新店乡分布较多。通过居民点与烈度和坡度分布的叠置分析,发现重灾区各乡镇位于山区(坡度>15°)居民点数量为220个,占全部居民点数量的60%。其中,Ⅸ度区域内山区居民点共9个,占该区居民点数量的50%;Ⅷ度区域内山区居民点共41个,占该区居民点数量的67%;Ⅶ度区域内山区居民点共170个,占该区居民点数量的59%(图3)。地震区人口密度相对较高,平均为256人/km²,为全省平均值的2倍。其中,Ⅸ度和Ⅷ度区域影响人口约5.89万,人口密度为156人/km²;Ⅶ度区域,影响人口约25.9万,人口密度为164人/km²(图4)。

地震区域房屋建筑受损程度取决于外在和内在多种因素。鲁甸地震灾区房屋多以砖混和土木结构为主,普遍未经抗震设防,绝大部分房屋建筑物抗震性能差,除强烈地震本身破坏房屋建筑物

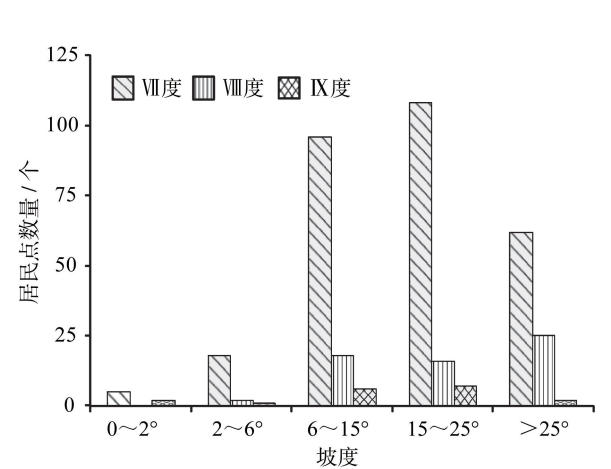


图3 重灾区不同坡度居民点统计

Fig.3 Settlements by slope in the harder-hit area

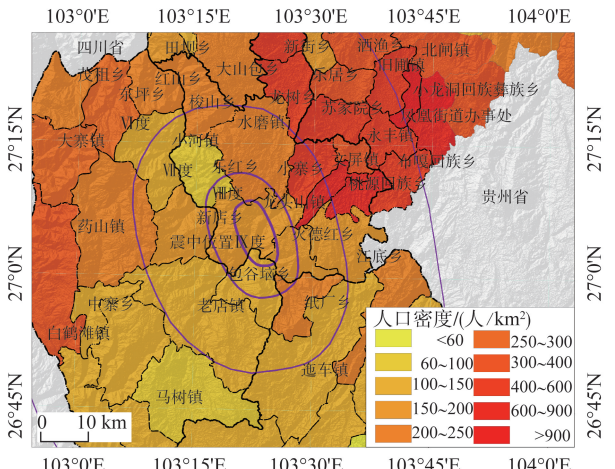


图4 地震区域人口密度分布

Fig.4 Population density in the earthquake area

外,叠加因山区复杂的地形地貌及地震造成的滑坡、崩塌、泥石流等因素对房屋建筑物的破坏,造成此次地震重灾区房屋建筑倒塌和破损严重,致使大量人员伤亡。经评估,距离震中40 km范围内有房屋建筑物面积230.15万m²,损毁建筑面积66.41万m²,平均损毁率29%,尤以鲁甸县和巧家县受损严重(图5)。其中,Ⅸ度区域房屋建筑物面积5.94万m²,损毁建筑面积4.64万m²,平均损毁率约78%,尤以鲁甸县龙头山镇损毁房屋建筑物最多且最严重;Ⅷ度区域房屋建筑面积9.85万m²,损毁建筑面积6万m²,平均损毁率61%,损毁严重乡镇主要分布在鲁甸县龙头山镇、火德红乡、乐红乡和巧家县包谷垭乡,其中龙头山镇损毁最多;Ⅶ度区域房屋建筑物面积82.10万m²,损毁建筑面积23.31万m²,平均损毁率28%,损毁最多的是老店镇,依次是新店乡、水磨镇、小河镇、小寨乡、纸厂乡、梭山乡、迤车镇和江底乡等(图6)。

通过评估,地震重灾区属人口密集区域,有一半以上居民点位于地形坡度>15°,平均海拔在2000 m的山区,该区域内的绝大部分居民点房屋建筑无抗震性能,在重灾区尤其是Ⅸ度和Ⅷ度区域内房屋倒塌及受损严重。同时,地震重灾区大多属于贫困地区,特别是牛栏江两侧的鲁甸县与巧家县山区,农民人均收入水平较低。此次地震对于重灾区村民的生计造成极大影响,建议在灾后重建中必须考虑重灾区居民的生计问题,给予妥善安置。

3.3 鲁甸地震牛栏江沿岸次生灾害风险等级评估

牛栏江沿岸次生灾害受震中距离、地表破裂程度、高程、坡度、与水体距离等多个地震滑坡控制变

量影响。牛栏江重灾区段次生灾害大致沿牛栏江两侧分布,在地震烈度为Ⅸ度、Ⅷ度和Ⅶ度覆盖区域内,共涉及沿江的17个乡镇,总面积1512 km²,主要分布在鲁甸县和巧家县,可分为极高危险区、高度危险区、中度危险区、低度危险区、微度危险区5个风险等级区域(图7)。极高危险区位于龙头山镇、新店乡和乐红乡三镇交界处,地处震源5 km范围内,面积6 km²,且已形成危险性较大的红石岩堰塞湖;高度危险区集聚分布在新店乡和龙头山镇及沿江两侧0.7 km范围内,面积131 km²;中度危险区和低度危险区主要分布在沿江两侧0.7~9 km范围内,面积分别为373 km²和712 km²;微度危险区位于区域边缘地带,面积290 km²。牛栏江滑坡次生灾害区域地形复杂,地震破坏新老滑坡体的稳定性,而且山坡植被被破坏,外加持续降雨天气,极易诱发牛栏江两侧山体滑坡,极有可能对区域内人口、建筑和道路等造成严重影响,尤其是极高和高度危险区的危害性更大。

牛栏江滑坡次生灾害区内以乡村级道路为主,多在峡谷内,山区小路居多,震后存在大量的崩塌和滑坡阻断。极高危险区内地震次生灾害风险性大,道路一旦受阻,抢险及施工难度极大;高度危险区内通往龙头山镇和新店乡的道路靠近震源,极易受滑坡地震次生灾害影响;中度危险区路网基本沿牛栏江铺设,受滑坡影响较大,易造成道路堵塞及破坏;低度与微度危险区,地势相对平坦,路网密度较大。

牛栏江滑坡危险区域内居民点总面积16.32 km²,人口19.33万,均为山区居民点,坡度基本大于15°;

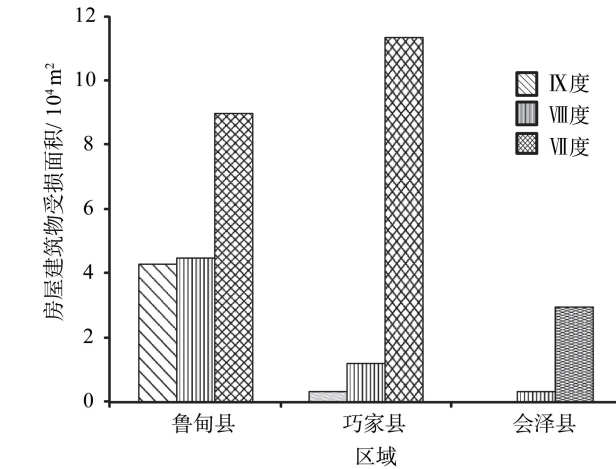


图5 重灾区房屋建筑受损面积统计

Fig.5 Damaged building area in the harder-hit area

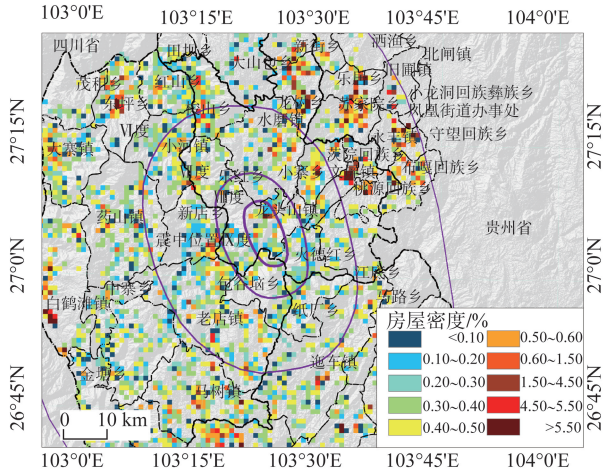


图6 地震区域建筑物分布

Fig.6 Density of buildings in the earthquake area

极高危险区居民点总面积0.84 km²,人口约0.9万,村庄房屋建筑受损严重;高度危险区居民点总面积1.24 km²,人口约1.5万,区域内房屋受损较重;中度危险区居民点总面积4.69 km²,人口约5.6万,村庄距离震源至少在5 km以上,村庄受损相对较小,但木制房屋抗冲击力较弱,部分地区灾情不容忽视;低度和微度危险区居民点总面积为9.5 km²,人口约11.3万(表1)。

3.4 灾后重建坡地退耕和水土流失防治分析

基于行政区划、耕地、坡度数据等,结合地震灾区地理背景要素,利用地理信息空间分析模型,对灾后重建坡地退耕和水土流失状况进行分析。

鲁甸地震灾区地处云贵高原西北部,滇东北高原南部。地势东西两侧高,中间低平,地貌错综复杂,有深切中山、中切中山、岩溶高原、混合丘陵、高原湖积盆地、断陷河谷坝。海拔高度介于600~3500 m之间,地面起伏较大。该区域属低纬山地季风气候,四季温差不大,冬无严寒,夏无酷暑,立体

气候特点突出。年平均气温12.1℃,年平均降雨量923.5 mm。该区域土壤类型主要为红壤、黄壤、黄棕壤。

震中半径30 km范围内,地面起伏较大、坡度相对较大。其中坡度<2°的平地仅占总面积的1.11%,坡度介于2~6°的平地占总面积的7.51%,坡度介于6~15°的缓坡占总面积的25.83%,坡度介于15~25°的缓坡占总面积的28.20%,坡度>25°的陡坡占总面积的37.35%。该范围内土地垦殖率为8.64%,耕地面积为565.92 km²。其中,<2°的平地耕地仅占总面积的1.19%,坡度介于2~6°的平地耕地占总面积的8.56%,坡度介于6~15°的缓坡耕地占总面积的36.58%,坡度介于15~25°的缓坡耕地占总面积的32.94%,坡度>25°的陡坡耕地占总面积的20.74%。这些耕地分布于鲁甸县、巧家县和昭阳区的26个乡镇。在坡耕地上,因耕作层土壤疏松,坡度大,水土流失严重,尤其是在陡坡耕地上更为严重,很多地方已经石漠化。

由于地震之后岩体不稳、土壤松动,容易发生滑坡、泥石流等次生灾害。特别是在耕地灌溉、大型机械碾压与振动等情况下,更容易诱发这些次生灾害,给灾区造成更严重损失。因此,建议对于地面坡度≤2°的耕地可继续按照原有方式耕种;对于地面坡度处于2~6°的耕地,应适当采取水土保持措施;对于地面坡度处于6~15°的缓坡耕地,应采取修筑梯田、等高种植等措施,加强水土保持,并在近两年内尽量避免农机耕作,减少外力对耕地地面的冲击和振动;对于地面坡度处于15~25°的缓坡耕地,必须采取工程、生物等综合措施防治水土流失。对于面积狭小、零散的地块,应尽可能退耕;对于地面坡度>25°的陡坡耕地,应立即退耕,并采取植树种草等生物措施,加强水土保持。同时,重视建立健全灾害失地和退耕失地农民的生计转移及社会保障问题,将耕地保护、退耕还林还草作为重要内容列入地震灾区重建规划。

4 对策建议

(1) 地震灾区的重要任务为灾区村民住房安置,乡村校舍、医疗卫生、道路等基础设施恢复重建。鉴于重灾区复杂的自然环境条件,建议对损毁严重的鲁甸县龙头山镇、火德红乡、乐红乡、水磨镇和巧家县包谷埡乡、新店乡和老店镇等7个乡镇的

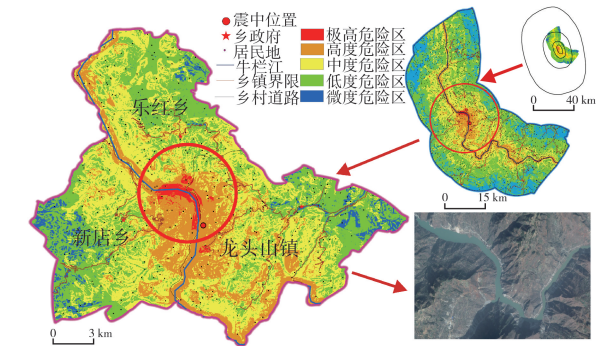


图7 牛栏江重灾区段次生灾害危险区域分布
Fig.7 Landslide disaster risk assessment in the Niulan River harder-hit section

表1 牛栏江重灾区段次生灾害危险性评价
分区面积、居民点和人口统计

分区	分区面积 /km ²	居民点面积 /km ²	影响人口 /万人
极高危险区	6	0.84	0.9
高度危险区	131	1.24	1.5
中度危险区	373	4.69	5.6
低度危险区	712	7.25	8.6
微度危险区	290	2.25	2.7
合计	1512	16.32	19.3

山区部分自然村迁离震中位置,通过科学选址集中安置,其中安置转移范围较大的是龙头山镇,对重灾区其他乡镇可以考虑就地安置。同时,要妥善解决灾区居民的生计问题。地震灾区地处贫困地区,居民生活水平较低,此次地震将严重影响灾区居民生产和生活,建议加强对居民日常生活物资供应和受灾人口的安置救助水平;按受灾人口数量和房屋实际损毁程度、受损面积考虑灾害重建费用补助;综合研究重灾区灾后重建条件和居民经济状况的差异,以调整补贴费用标准。具体重点安置村庄和人口已收录于数据库。

(2) 云南省为中国地震多发地区,也是地震灾害人口危险性 & 风险高的区域(刘欢等, 2012),建议加强对山区农村建设选址的规划研究,评估地震带建房的适宜性及地震可能诱发地质灾害地段的风险性,在未来建设中有意识地避开不适宜和地质灾害多发区域。另外,通过必要的措施,如提高建筑物的抗震等级来降低风险性,将震灾损失降至最小限度。

(3) 牛栏江滑坡次生灾害区域地质灾害点多面广,防治难度大,需要开展地质灾害综合防治体系建设。首先,震区次生灾害风险防范应作为救灾中的重大任务之一,在抢险救灾过程中,必须时刻监控次生灾害发生的动向,将次生灾害风险防范当作救灾抢险的重要内容,最大程度降低灾害风险。其次,明确地震次生灾害的重点防控对象。根据次生灾害风险评估结果,基于地形状况、地表植被覆盖和当前气象条件,牛栏江段堰塞湖是本次次生灾害的高风险地点,最有可能发生滑坡、泥石流、崩塌等次生灾害,威胁到沿岸约 19 万人的生命与财产安全,应重点监控并合理排险,有组织地进行人员撤退、安置计划;鲁甸县龙头山镇、乐红乡和巧家县新店乡等次生灾害高危区,为滑坡、泥石流、崩塌等次生灾害发生最危险区域,应进行重点监控。最后,应用高新技术配合部门协作防控次生灾害风险。灾区余震多发,山地坡地陡峭,土质松动,气象条件变化多端,加上交通受阻,在次生危害风险防范中,需应用包括航空拍摄高分辨率图像,辅以高分一号卫星数据、气象卫星资料,中高分辨率遥感等高新技术手段,及时获取必要的信息,提供决策支持。此外,需要地方政府、民政、公安武警、消防、军队、交通通信、供水供电、地质、卫生等不同部门互相配合,实施救援,组织群策群防,最大程度保障生命和

财产安全。吸取芦山地震教训,合理规划救灾重建方案。项目组已经编制了次生灾害发生的风险等级电子地图,为震后次生灾害预防与应急提供空间信息支持和对策建议,已收录于空间数据库。

参考文献(References)

- 陈玉, 郭华东, 王钦军. 2013. 基于 RS 与 GIS 的芦山地震地质灾害敏感性评价. 科学通报, 58(36): 3859-3866. [Chen Y, Guo H D, Wang Q J. 2013. Geological disaster susceptibility assessment of the Lushan earthquake based on RS and GIS. Chinese Science Bulletin, 58(36): 3859-3866.]
- 高原, 姜卉芝, 周惠兰. 1997. 减灾与救灾—地震灾害的快速评估及其综合决策. 中国科学院研究生院学报, 14(2): 183-187. [Gao Y, Jiang H Z, Zhou H L. 1997. Disaster reduction and relief: rapid evaluation of earthquake disasters and its comprehensive decision. Journal of Graduate School, Academia of Sinica, 14(2): 183-187.]
- 匡文慧, 杜国明. 2011. 北京城市人口空间分布特征的 GIS 分析. 地球信息科学学报, 13(4): 506-512. [Kuang W H, Du G M. 2011. Analyzing urban population spatial distribution in Beijing proper. Journal of Geo-information Science, 13(4): 506-512.]
- 兰恒星, 周成虎, 高星, 等. 2013. 四川雅安芦山地震灾区次生地质灾害评估及对策建议. 地理科学进展, 32(4): 499-504. [Lan H X, Zhou C H, Gao X, et al. 2013. Secondary geological hazard assessment and hazard mitigation countermeasures in Lushan, Ya'an Earthquake, Sichuan Province. Progress in Geography, 32(4): 499-504.]
- 刘欢, 徐中春, 吴绍洪, 等. 2012. 基于 GIS 的中国地震灾害人口风险性分析. 地理科学进展, 31(3): 368-374. [Liu H, Xu Z C, Wu S H, et al. 2012. GIS-based analysis of earthquake disaster population risk in China. Progress in Geography, 31(3): 368-374.]
- 许冲. 2012. 汶川地震滑坡分布规律与危险性评价. 岩石力学与工程学报, 31(2): 432. [Xu C. 2012. Distribution law and risk assessment for Wenchuan earthquake-triggered landslides. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(2): 432.]
- 许冲, 徐锡伟, 戴福初, 等. 2011. 2010 年 4 月 14 日玉树地震滑坡空间分布与控制变量分析. 工程地质学报, 19(4): 505-510. [Xu C, Xu X W, Dai F C, et al. 2011. Analysis of spatial distribution and controlling parameters of landslides triggered by the April 14, 2010 Yushu Earthquake. Journal of Engineering Geology, 19(4): 505-510.]
- 许强, 李为乐. 2010. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究. 工程地质学报, 18(6): 818-826. [Xu Q, Li W L. 2010. Distribution of large-scale landslides induced by the Wen-

- chuan Earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 18 (6): 818-826.]
- 邵全琴, 樊江文, 匡文慧, 等. 2010. 玉树地震区域生态环境图集. 北京: 科学出版社. [Shao Q Q, Fan J W, Kuang W H, et al. 2010. The atlas of ecological environment in Yushu Earthquake zone. Beijing, China: Science Press.]
- 杨小唤, 刘业森, 江东, 等. 2006. 一种改进人口数据空间化的方法: 农村居住地重分类. *地理科学进展*, 2013, 25 (3): 62-69. [Yang X H, Liu Y S, Jang D, et al. 2006. An enhanced method for spatial distributing census data: re-classifying of rural residential. *Progress in Geography*, 25 (3): 62-69.]
- 张铎, 吴中海, 李家存, 等. 2013. 国内外地震滑坡研究综述. *地质力学学报*, 19(3): 225-241 [Zhang Z, Wu Z H, Li J C, et al. 2013. An overview on earthquake-induced landslide research. *Journal of Geomechanics*, 19(3): 225-241.]
- Dai F C, Xu C, Yao X, et al. 2011. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan Earthquake, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4): 883-895.
- Guo H D, Chen Y, Feng Q, et al. 2011. Assessment of damage to buildings and farms during the 2011 M 9.0 earthquake and tsunami in Japan from remote sensing data. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(20): 2138-2144.
- Kuang W H, Liu J Y, Zhang Z X, et al. 2013. Spatiotemporal dynamics of impervious surface areas across China during the early 21st century. *Chinese Science Bulletin*, 58 (14): 1691-1701.
- Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. 2014. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s. *Journal of Geographical Sciences*, 24(2): 195-210.
- Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. 2010. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century. *Journal of Geographical Sciences*, 20(4): 483-494.

Environmental conditions for rescue and earthquake impact rapid assessment in Ludian Earthquake area, Yunnan Province

KUANG Wenhui^{1,2}, CHI Wenfeng^{1,2,3}, GAO Chengfeng⁴, DU Guoming⁵, PAN Tao⁵,
YANG Tianrong^{1,2,3}, LIU Ailin^{1,2,3}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
2. Key Laboratory of Land Surface Patterns and Simulation, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China; 5. Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: A magnitude 6.5 earthquake struck Ludian County, Zhaotong City, Yunnan Province at 16:30 on 3 August 2014, which caused severe damages on residential life and assets. In order to conduct a rapid earthquake impact assessment, we collected data on seismic intensity, topography, land use/land cover, population, residential area distribution, and buildings of the earthquake area and high-resolution remote sensing images. Spatial analysis in GIS and a quantitative evaluation model were employed for the assessment, which focused on the following aspects of the disaster area including natural environmental conditions of the severe impact area, impact on the affected population, buildings, roads and traffic, and other sensitive exposure units, and risk of secondary geological hazards along the Niulan River; and restoring from slope cropland to forest and preventing soil erosion. Based on the assessment results, this article provides the some suggestions for the earthquake relief effort, geological hazard prevention, and post-disaster reconstruction and ecological recovery of the Ludian seismic area.

Key words: Ludian Earthquake; disaster impact; countermeasure and suggestion; Zhaotong of Yunnan