

范熙伟, 聂高众, 邓砚, 等, 2022. 基于实地调研的中国西南地区不同震级人员死亡数量研究. 中国地震, 38(3): 537~549.

基于实地调研的中国西南地区不同震级 人员死亡数量研究

范熙伟^{1,2)} 聂高众^{1,2)} 邓砚^{1,2)} 夏朝旭^{1,2)} 李华玥^{1,2,3)}

1) 中国地震局地震与火山灾害重点实验室, 北京 100029

2) 中国地震局地质研究所, 北京 100029

3) 中国地震台网中心, 北京 100045

摘要 地震是造成人员死亡最严重的自然灾害之一,震后对人员死亡等灾情的快速评估是地震应急响应和救援的关键。总结经验发现,在地震前进行预评估工作是提高震后灾情快速评估精度和时效性的有效手段。通过对 62 次发生在中国西南地区的历史震例分析后发现,当地震震级小于 4.5 级时,基本不会造成人员死亡情况。本研究利用我国云南和四川部分区县的实地调研数据,发现地震人员死亡数与震级存在指数函数关系,由此构建了针对各个区县的地震人员死亡人数指数函数估算模型,并计算了回归系数。基于该模型,获得了 5.0~8.0 级地震人员死亡数查找表(以 0.5 级为间隔),用于辅助震后快速评估工作。

关键词: 地震震级 地震死亡人数 震前评估

[文章编号] 1001-4683(2022)03-0537-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

作为重大自然灾害的一种特殊类型,地震相比台风、洪涝等自然灾害具有预警或准备时间短、无法准确预测预报和全季节发生等特点,因此也更容易造成巨大的人员死亡、经济损失和生态环境的破坏。有研究指出,在全球范围内由各种自然灾害导致的人员伤亡或经济损失事件中,仅有 12% 由地震引起 (EM-DAT, 2014),但其造成的人员伤亡和财产损失量均达到总数的 43% (Geiß et al, 2013)。由于地震的准确预报尚需时日,因此获得基于地震重灾区判定模型的灾情信息,用于指导 72h 黄金救援期内的救援行动,是目前减少震害损失中较为可行的方法之一 (Bartels et al, 2012; Schweier et al, 2006)。由于地震埋压人员的救援成活率与埋压时间成反比,因此破坏性地震发生后,高效准确的震后灾情快速评估结果是决策者进行地震应急响应和部署应急救援行动的依据 (肖光先, 1991; 帅向华等, 2006)。

为使地震快速评估结果与真实情况更加接近,需要在平时对评估模型进行分析和优化,并获取现势性较强的基础数据,因而需要预先进行实地调研工作,即在地震前,在不知道灾

[收稿日期] 2020-09-14 [修定日期] 2020-11-26

[项目类别] 中国地震局地质研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项“地震和次生地质灾害分区致死性评估技术研究”(IGCEA2106)资助

[作者简介] 范熙伟,男,1986 年生,副研究员,主要从事地震灾害与应急相关研究。E-mail: fanxiwei@ies.ac.cn

情的情况下,根据已有的基础资料,如地质构造、地理环境、人文经济、建筑特点、地震震级等信息评估地震灾害损失。震前评估的主要内容包括人员伤亡、经济损失、房屋破坏、道路破坏和次生灾害等,具体包括基于评估模型的灾情估算、实地调研、专家评估修正等几个方面。

目前,震前评估工作主要有两种方式,第一种是基于致死性水平的现场调查与模型评估计算;第二种是经过现场调查后,通过对基础数据和易损性矩阵的修正,给出评估结果。在现场调查中,一般是基于给定目标震级进行评估,根据预评估工作指南的要求,上下浮动 0.5 级,给出评估点的 3 个震级的评估结果。但是在实际应用中,会出现实际发生的震级不是这 3 个震级,甚至偏离较远的情况。震前评估结果对这种震级偏离的实际地震的辅助效果较差,或者起不到辅助作用和经验性评估作用。因此,通过对震前评估结果的分析,找寻不同震级下人员死亡的变化规律,进而推演出非目标震级下的人员死亡可能发生的范围或区间,对于震后快速评估的经验性修正十分重要。

1 资料与评估方法介绍

1.1 基于易损性的地震人员死亡评估方法简介

1.1.1 选取地震灾害损失评估点

根据研究区的空间分布和区内的活动构造,结合人口分布情况,按照调研区内每个县计算 2 个地震的原则选取并设定模拟地震。每个模拟地震均设定 3 个震级(震源深度设定为 10~15km),进行地震影响场生成与灾害损失评估(主要为地震人员伤亡评估)。针对本研究选取的研究区,考虑到其位于我国西南地区,历史上出现过较大震级的情况,这里按照 6.5、7.0 和 7.5 三个震级进行评估。

1.1.2 烈度衰减关系

为得到不同震级下的地震影响场,需要获得地震烈度衰减模型(肖亮,2011)。考虑到衰减模型与地域相关,本文采用了适用于我国西南地区(青藏高原东南缘、四川西部及云南北地区)的烈度衰减模型

$$\begin{aligned} I_a &= 2.795 + 1.690M - 1.637\ln(R_a + 28.497), \sigma^2 = 0.626 \\ I_b &= 1.331 + 1.450M - 1.173\ln(R_b + 7.390), \sigma^2 = 0.582 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, I_a 和 I_b 分别为长轴和短轴方向地震烈度, M 为震级, R_a 为烈度圈长轴长度, R_b 为烈度圈短轴长度, σ^2 为调整参数。

1.1.3 建筑物破坏评估模型

根据行政区建筑物统计表、建筑物震害矩阵等计算其在各种破坏等级下的建筑物面积和间数。将地震烈度信息和房屋数量及结构分布信息进行叠加计算,统计受灾分区在不同地震烈度下各类结构的房屋倒损率,通过房屋震害矩阵计算出各受灾区的倒损房屋面积。在近年来破坏性地震的基础上,对房屋震害矩阵进行了本地化处理。房屋结构类型由原来的高层、钢混、砖混、砌体、单层房屋和其他,修改为框剪、框架、轻钢、木结构、砖混、砌体、土木和其他。计算行政区各烈度条件下不同破坏类型建筑面积具体计算流程如下:

$$S_{ij} = \sum_{s=1}^8 S \times \frac{S_s}{100} \times \frac{L_{sij}}{100} \quad (2)$$

式中, S_{ij} 为行政区在烈度 i 下,破坏等级为 j 的建筑物面积, i 代表烈度, j 表示破坏等级,包

括:基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏,取值为 1~5 的整数; S 为行政区各类建筑物总面积; S_s 表示各种结构类型建筑物百分比,其中 s 代表建筑物类型,包含框剪、框架、轻钢、木结构、砖混、砌体、土木等,因而 s 取值为 1~8 的整数; L_{sij} 为烈度 i 下,破坏等级为 j 的 s 类建筑物百分比(建筑物震害矩阵)。

1.1.4 地震人员死亡评估

地震中的人员死亡主要由建筑物破坏造成(吴新燕等,2014),在本文研究区内,地质灾害也是造成人员死亡的主要风险因素之一。在进行震前人员死亡评估时,首先评估由建筑物破坏造成的人员死亡情况,再叠加由地质灾害造成的人员死亡数量,得到最终的人员死亡评估数量。

(1) 计算建筑物倒塌率

根据行政区在各烈度下的面积比和建筑物破坏情况明细,计算行政区在各烈度下的建筑物倒塌率

$$P_i = \frac{(S_{id} + 0.5S_{is})}{\sum_{j=1}^5 S_{ij}} \quad (3)$$

式中, P_i 为行政区在 i 烈度下的建筑物倒塌率, S_{id} 为行政区在烈度 i 下倒塌的建筑物面积, S_{is} 为行政区在 i 烈度下严重破坏的建筑物面积。

(2) 计算死亡率

$$\begin{aligned} d_i &= (0.000971 \times e^{\frac{1}{2}(i-7)}) P_i \quad (6:00:00 < t < 18:00:00) \\ d_i &= (0.0126 \times \frac{i - 4.76}{i + 0.25} e^{0.75(i-7)}) P_i \quad (18:00:00 \leq t \leq 6:00:00) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, d_i 为不同时间段地震人员死亡率, i 为地震烈度, d_i 为行政区在 i 烈度下的死亡率。

(3) 计算死亡人数

$$D = \sum_{i=6}^{11} d_i \times A_i \times P \quad (5)$$

式中, D 为某一行政区内的地震死亡人数, d_i 为该行政区在烈度 i 下的死亡率, A_i 为行政区在烈度 i 下的面积相比行政区面积百分比, P 为行政区总人数。计算死亡人数时,考虑了灾区人口时空变化特征并做了相应修正,主要考虑了外出务工人员比例及外出和回家规律、景点旺季游客规模和淡季游客规模等关键因素(马玉宏等,2000)。

根据上述公式,本研究采用“地震应急灾情快速评估与动态可视化”软件,以千米格网化数据作为计算的基础。

1.2 基于实地调研的建筑物数据的获取

选取位于中国西南部的四川东南和云南东北部部分县市作为研究区,主要包括四川省甘孜藏族自治州、凉山彝族自治州、雅安市、乐山市、眉山市、宜宾市和云南省昭通市 7 个地级市下属的部分县及县级市。图 1 为研究区示意图,2015—2019 年每年都对上述地区进行评估工作,因而部分区县内有多于 3 个的预评估点。

现场调查主要是为了将房屋建筑物的结构类型比例进行修正,更准确地得到建筑物的破损比。调查发现研究区内各县市房屋结构类型稍有差异,各类结构房屋的数量和所占比

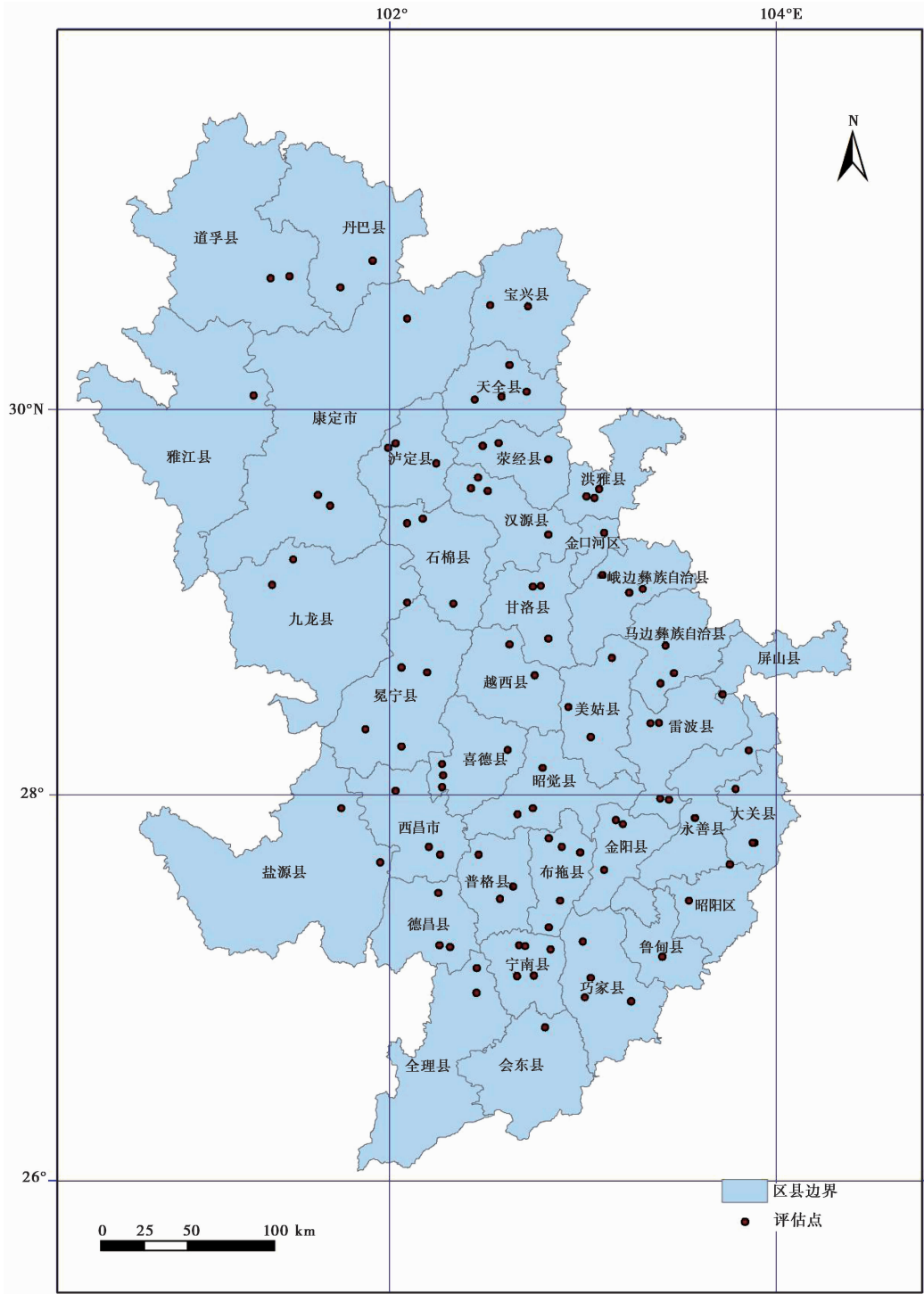


图1 研究区和现场调查点分布

重差异较大,房屋抗震能力水平差异较大。按照抗震能力由高到低的顺序,建筑物类型依次为:框剪结构、轻钢结构、框架结构、藏式木结构、设防砖混结构、穿斗木结构、不设防砖混结



构、砌体结构、藏式石木房屋和土木结构。其中藏式木结构房屋以穿斗木架为承重结构,片石或土墙做围护墙,楼板为木楼板,房顶为木板上覆盖生土或片石,整体承重结构的抗震性能好,若地震烈度较高,其围护墙会被破坏。部分调研县市农村建筑物结构比例统计见表1。

表1 部分调研县市农村建筑物结构比例统计

调研县市	框架结构	轻钢结构	砖混结构	砌体结构	土木结构	木结构	石木结构	藏式木结构
西昌市	10%	5%	28%	33%	22%	2%		
会理县	0.9%		33.5%	10.0%	55.4%	0.2%		
布拖县			30%	63%	7%			
金阳县	1.5%		63.5%	18.0%	17%			
盐源县			28%	13%	39%	20%		
木里县			12.5%	2.5%	22.5%	62.5%		
丹巴县	7%		73.5%				19.5%	
小金县	11.3%		21.3%	7%		1.3%	55.7%	
道孚县	3.5%	1.7%	2.50%					93.8%
昭通市	5%	20%	59%	5%	11%			
峨边县	7.7%		70.7%	21.7%				
洪雅县	9.6%		76.4%	13.4%	0.6%			

1.3 基于专家经验和历史地震的评估结果的修正

基于模型计算的评估结果可能与实际灾情存在较大差距,本文采用专家经验和历史地震相结合的方法对评估结果进行修正。其中,专家经验法是指模型评估计算完成后,组织相关的灾评专家、应急专家和结构专家,依据自身经验对评估结果逐一进行修正。历史震例类比法是指根据研究区内或邻近地区发生的历史地震,如果其社会经济、自然地理背景与研究区类似,则可基于该历史地震震例资料进行类比分析并修正模型评估值。

2 地震人员死亡与震级的相关性分析

2.1 西南地区地震无人员死亡震级下限的估算

当地震震级小于某一值后,其造成的人员死亡数量将很小或趋近于0。为研究地震人员死亡数量为0时的最小地震震级阈值,本研究从《1966—1989年中国大陆地震灾害损失资料汇编》、《中国大陆地震灾害损失汇编(1990~1995)》、《中国大陆地震灾害损失评估汇编(1996~2000)》、《2001—2005年中国大陆地震灾害损失评估汇编》、《2006—2010年中国大陆地震灾害损失评估汇编》等资料(中国地震局震灾应急救援司,2010、2015a、2015b;国家地震局等,1996;中国地震局监测预报司,2001)中获取了1966—2017年间发生在我国西南地区(主要为云南和四川)的有人员死亡的62次历史地震,具体信息见表2。

表2 中国西南地区造成人员死亡的62次历史地震

发震地点	纬度/(°N)	经度/(°E)	发震日期(年-月-日)	发震时间(时:分)	震级
四川安县	31.40	104.40	1999-11-30	16:24	5.0
四川巴塘	29.94	99.15	1989-04-16	04:34	6.7
四川白玉	30.60	99.50	1996-12-21	16:39	5.5

续表 2

发震地点	纬度/(°N)	经度/(°E)	发震日期(年-月-日)	发震时间(时:分)	震级
四川道孚	31.00	101.10	1981-01-24	05:13	6.9
四川甘孜	31.80	99.80	1982-06-16	07:24	6.0
四川九寨沟	33.20	103.82	2017-08-08	21:19	7.0
四川康定	30.30	101.70	2014-11-22	16:55	6.3
四川芦山	30.30	103.00	2013-04-20	17:11	7.0
四川炉霍	31.30	100.40	1973-02-06	18:37	7.6
四川马边	28.85	103.80	1971-08-16	12:57	5.9
四川攀枝花	26.20	101.90	2008-08-30	16:30	6.1
四川仁寿	30.05	104.01	1967-01-24	22:45	5.5
四川石棉	29.16	102.15	1989-06-09	22:46	5.3
四川遂宁	30.30	105.70	2010-01-31	05:36	5.0
四川汶川	31.00	103.40	2008-05-12	14:28	8.0
四川小金	31.33	102.23	1989-09-22	10:25	6.6
四川雅江	29.40	101.10	2001-02-23	08:09	6.0
四川盐源	27.25	101.25	1986-08-12	18:45	5.2
四川盐源	27.60	100.90	2001-05-24	05:10	5.8
四川盐源	27.50	101.01	1976-11-07	02:04	6.7
四川宜宾	29.04	104.41	1996-02-28	19:21	5.4
四川宜宾	29.01	104.56	2004-06-17	05:25	4.7
云南澄江	24.50	102.80	1999-11-25	00:40	5.2
云南大关	28.10	103.90	1974-05-11	03:25	7.1
云南大姚	26.00	101.30	2003-10-16	18:28	6.1
云南大姚	26.00	101.20	2003-07-21	23:16	6.2
云南东川	26.10	103.10	1966-02-05	23:12	6.5
云南富宁	23.43	105.52	1982-10-27	23:36	5.9
云南剑川	26.50	99.70	1982-07-03	16:13	5.3
云南景谷	23.40	100.50	2014-10-07	21:49	6.6
云南景谷	23.30	100.50	2014-12-06	02:43	5.8
云南澜沧耿马	22.80	99.60	1988-11-06	21:03	7.6
云南丽江	27.12	100.19	1996-09-25	03:24	5.7
云南丽江	26.9	100.06	1996-07-02	15:05	5.2
云南丽江	27.18	100.13	1996-02-03	19:14	7.0
云南龙陵	24.20	98.30	1976-05-29	20:23	7.3
云南鲁甸	27.20	103.60	2003-11-15	02:49	5.1
云南鲁甸	27.20	103.60	2004-08-10	18:26	5.6
云南鲁甸	27.10	103.30	2014-08-03	16:30	6.5
云南禄劝	25.51	102.49	1985-04-18	13:52	6.1
云南磨黑	23.08	101.15	1979-03-15	20:52	6.8
云南宁洱	23.00	101.10	2007-06-03	05:34	6.4
云南宁蒗	27.70	100.70	2012-06-24	15:59	5.7
云南宁蒗	27.30	100.90	1998-11-19	19:38	6.2
云南普洱	22.90	101.30	1981-09-19	14:50	6.0

续表 2

发震地点	纬度/(°N)	经度/(°E)	发震日期(年-月-日)	发震时间(时:分)	震级
云南施甸	24.80	99.10	2001-06-08	02:03	5.3
云南施甸	24.48	99.01	2001-04-10	11:13	5.9
云南双柏	24.70	101.50	2004-12-26	15:30	5.0
云南通海	24.06	102.35	1970-01-05	01:00	7.7
云南武定	25.80	102.20	2000-08-21	21:25	5.1
云南武定	25.83	102.32	1995-10-24	06:46	6.5
云南香格里拉	28.20	99.40	2013-08-31	08:04	5.9
云南盐津	28.00	104.20	2006-08-25	13:51	5.1
云南盐津	28.00	104.20	2006-07-22	09:10	5.1
云南姚安	25.60	101.10	2009-07-09	19:19	6.0
云南姚安	25.50	101.10	2000-01-15	07:37	6.5
云南彝良	27.50	104.00	2012-09-07	11:19	5.7
云南盈江	24.90	97.80	2008-08-21	20:24	5.9
云南盈江	24.70	97.90	2011-03-10	12:58	7.2
云南永胜	26.33	100.55	1992-12-18	19:21	5.4
云南永胜	26.20	100.60	2001-10-27	13:35	6.0
云南中甸	27.78	97.70	1993-07-17	17:46	5.6

图 2 为上述 62 次历史地震的地震频次和震级关系图。从图中可以看到在我国西南地区,造成人员死亡的地震,其震级主要集中在 4.7~8.0 级之间,其中发震频率最高的为 6.0 级地震,在近 50 年间共有 15 次。因此,获得 6.0 级左右地震的人员死亡情况对于震后应急响应和救援来说至关重要。此外,基于该数据统计,可以假设在我国西南地区,小于 4.5 级的地震一般不会造成人员死亡,个别小于 4.5 级地震造成人员死亡的多数是因偶发的滚石、装饰物的坠落造成的,不具有普遍性。

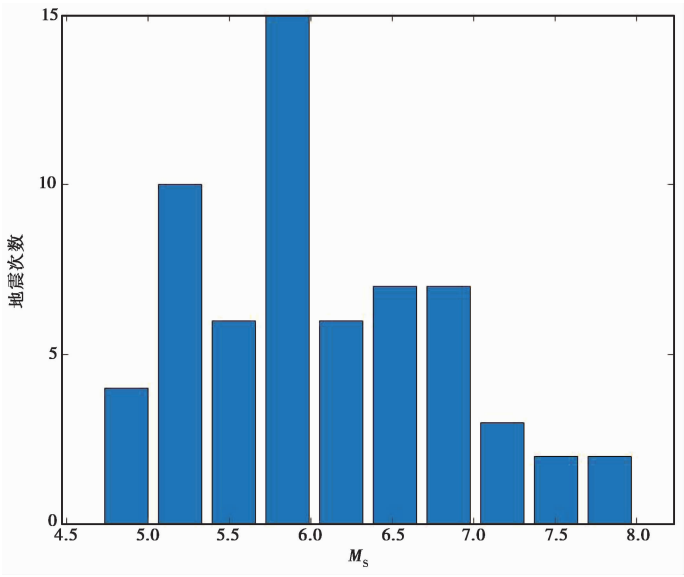


图 2 不同震级下地震频次分布

2.2 不同震级下人员死亡数量规律研究

对于本文所选的研究区,曾进行过若干次的实地调查与评估工作。参照该区域以往地震较多的实际情况,在调查中着重对 7.0 级左右地震可能造成的破坏情况进行估计。因此,在现场调研的基础上,按照 6.5、7.0、7.5 级三个震级进行了初步现场分析与评估工作,并对计算得到的评估结果进行了基于专家经验的修正。但在该区域的实际地震中,可能造成损失的地震震级可能是 4.5~8.0 级之间的任意一个数,如 4.6 级、6.0 级、6.8 级、7.8 级等,那么如何得到这些震级下可能的人员死亡数呢?

为此,需要对地震震级与人员死亡数量的关系进行深入研究,并进行统计分析。由于专家根据现场调查得到的评估数值一般为区间值,如可能死亡 100~300 人,在进行震级与人员死亡数量关系的研究中,我们在这个范围内取其平均值,进行统计分析。

具体步骤如下:

(1) 根据各评估点的上、下限值求其平均值,将各个评估点的数据统一为对应震级下的地震人员死亡数。

(2) 利用研究区县域多边形,计算落在某县各震级下所有评估点的平均值,获得每个县每个震级(以 0.5 级为间隔)下确定的地震死亡人数。首先从上述研究区中每个地级市选取一个县,共选取 7 个县或县级市;然后计算当震级分别为 4.5、6.5、7.0 和 7.5 级时的地震人员死亡数,其中震级为 6.5、7.0 和 7.5 的地震人员死亡数通过震前评估手段结合模型计算和专家经验法得到。图 3 为上述 7 个县的地震人员死亡数计算结果,可以看到地震人员死亡数量和地震震级间呈现指数函数关系,即可表达为以下函数形式

$$y = a \times \exp(b \times x) \quad (6)$$

其中, x 为震级, y 为某县 x 震级下的平均地震人员死亡数; a 和 b 为回归系数。基于上述 4 个震级和相应的人员死亡数,利用最小二乘法回归发现,其回归决定系数为 0.9967。说明地震造成的人员死亡数量和震级之间存在较好的指数关系,且可以利用已知震级下的人员死亡数计算其他震级下的人员死亡数。

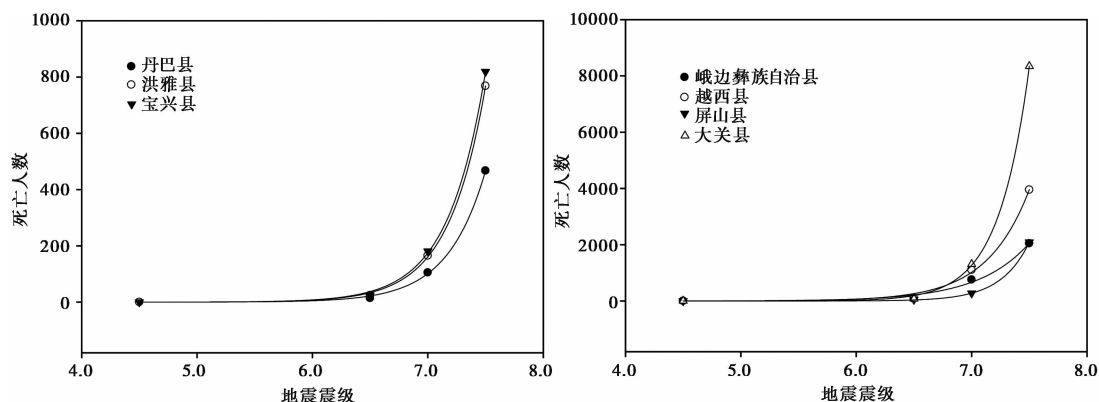


图3 基于震前评估的四川省凉山彝族自治州越西县地震人员死亡数和震级关系

(3) 基于研究区各个县在震级为 4.5、6.5、7.0 和 7.5 级的地震人员死亡数,以各自区县为研究单元,基于式(6)回归参数 a 和 b ,并计算震级为 5.0、5.5、6.0 和 8.0 级的人员死亡

数。表 3 为基于震前评估手段结合模型计算和专家经验计算的地震人员死亡数,利用最小二乘法计算出的各县回归系数值。

表 3 研究区县回归系数值

区县	系数 a	系数 b
四川省甘孜藏族自治州丹巴县	5.25E-08	3.054671
四川省甘孜藏族自治州九龙县	2.85E-07	2.882683
四川省乐山市峨边彝族自治县	9.31E-05	2.254986
四川省乐山市金口河区	2.47E-07	3.043524
四川省凉山彝族自治州布拖县	2.79E-06	2.760323
四川省凉山彝族自治州德昌县	6.91E-09	3.568373
四川省凉山彝族自治州甘洛县	8.22E-06	2.658879
四川省凉山彝族自治州会东县	2.46E-06	2.634478
四川省凉山彝族自治州金阳县	5.49E-08	3.522365
四川省凉山彝族自治州雷波县	5.49E-08	3.320995
四川省凉山彝族自治州冕宁县	8.15E-07	2.880996
四川省凉山彝族自治州宁南县	2.91E-08	3.377492
四川省凉山彝族自治州普格县	9.99E-06	2.634623
四川省凉山彝族自治州西昌市	9.13E-10	3.802841
四川省凉山彝族自治州越西县	5.71E-06	2.714424
四川省凉山彝族自治州昭觉县	5.07E-05	2.42597
四川省眉山市洪雅县	5.09E-08	3.124969
四川省雅安市宝兴县	7.32E-08	3.085236
四川省雅安市汉源县	1.14E-07	3.126764
四川省雅安市石棉县	5.69E-07	2.902522
四川省雅安市天全县	3.38E-08	3.147706
四川省雅安市荣经县	1.08E-07	3.098401
四川省宜宾市屏山县	1.99E-10	3.9971
云南省昭通市大关县	4.58E-09	3.764186
云南省昭通市鲁甸县	2.45E-09	3.971234
云南省昭通市巧家县	2.07E-08	3.562739
云南省昭通市永善县	1.07E-09	3.974139
云南省昭通市昭阳区	4.98E-08	3.48681
四川省凉山彝族自治州会理县	2.18E-07	3.053191
四川省甘孜藏族自治州雅江县	1.08E-08	3.301518
四川省凉山彝族自治州喜德县	1.55E-06	2.927856
四川省甘孜藏族自治州道孚县	1.67E-06	2.572396
四川省甘孜藏族自治州康定市	5.68E-09	3.31552
四川省甘孜藏族自治州泸定县	1.13E-06	2.73624
四川省凉山彝族自治州盐源县	3.28E-09	3.741783
四川省乐山市马边彝族自治县	3.45E-08	3.298578
四川省凉山彝族自治州美姑县	1.39E-05	2.609952

3 推演与讨论

基于式(6)和回归关系,计算得到研究区各个区县震级为 5.0、5.5、6.0 和 8.0 级时造成



地震人员死亡人数,见表4,其中 6.5~7.5 级的结果为实地调研评估得出的各县平均死亡人数。

表 4 西南地区震中位于不同区县时震级与人员死亡数统计评估表

震中所在区县	整个灾区可能的人员死亡统计评估数(取整)						
	5.0 级	5.5 级	6.0 级	6.5 级	7.0 级	7.5 级	8.0 级
四川省甘孜藏族自治州丹巴县	0	1	5	15	100	470	2100
四川省甘孜藏族自治州九龙县	0	2	10	25	175	700	3000
四川省乐山市峨边彝族自治县	7	23	70	80	750	2000	6400
四川省乐山市金口河区	1	5	21	55	460	2000	9300
四川省凉山彝族自治州布拖县	3	11	43	70	740	2800	10800
四川省凉山彝族自治州德昌县	0	2	14	90	500	2900	17300
四川省凉山彝族自治州甘洛县	5	18	70	130	1100	3750	14200
四川省凉山彝族自治州会东县	1	5	18	50	260	950	3500
四川省凉山彝族自治州金阳县	2	14	83	100	3000	16300	95000
四川省凉山彝族自治州雷波县	1	7	25	75	700	3600	19000
四川省凉山彝族自治州冕宁县	2	6	26	85	480	2000	8300
四川省凉山彝族自治州宁南县	1	3	18	50	550	2900	15800
四川省凉山彝族自治州普格县	5	20	73	120	1100	3800	14200
四川省凉山彝族自治州西昌市	0	1	8	100	320	2200	14600
四川省凉山彝族自治州越西县	4	17	68	100	1100	4000	15400
四川省凉山彝族自治州昭觉县	10	32	106	130	1340	4000	13600
四川省眉山市洪雅县	0	2	7	25	160	800	3700
四川省雅安市宝兴县	0	2	8	25	180	800	3800
四川省雅安市汉源县	1	3	16	65	370	1750	8300
四川省雅安市石棉县	1	5	21	60	390	1600	6900
四川省雅安市天全县	0	1	5	30	120	600	2900
四川省雅安市蒙经县	1	3	13	80	270	1400	6300
四川省宜宾市屏山县	0	1	6	50	275	2100	14000
云南省昭通市大关县	1	5	30	75	1300	8350	54800
云南省昭通市鲁甸县	1	6	44	140	2600	21200	171800
云南省昭通市巧家县	1	7	40	110	1450	8300	49400
云南省昭通市永善县	0	3	21	75	1100	9500	70000
云南省昭通市昭阳区	2	11	61	130	2100	11500	65000
四川省凉山彝族自治州会理县	1	4	20	70	400	1900	8800
四川省甘孜藏族自治州雅江县	0	1	4	15	120	600	3200
四川省凉山彝族自治州喜德县	4	15	66	160	1300	5300	23000
四川省甘孜藏族自治州道孚县	1	2	8	10	120	400	1500
四川省甘孜藏族自治州康定市	0	0	3	10	70	360	1900
四川省甘孜藏族自治州泸定县	1	4	15	20	250	900	3600
四川省凉山彝族自治州盐源县	0	3	18	130	780	5100	32800
四川省乐山市马边彝族自治县	1	3	14	70	370	1900	10000
四川省凉山彝族自治州美姑县	6	24	88	130	1300	4400	16300

本文假设研究区未来可能发生7.0级地震,在7.0级的基础上偏差 ± 0.5 级,即计算6.5、7.0和7.5级地震的人员死亡情况,基于这三个震级的数据和4.5级地震死亡人数为0的假设条件,估算了其他震级条件下的地震人员死亡数。对于其他地区,如判定为6.0级地震风险区,也可适用本研究提出的方法,可采用5.5、6.0和6.5级地震的震前评估结果和4.5级地震人员死亡数为0的条件,计算其他震级下的人员死亡情况。未来当上述研究区发生地震后,可根据震中位置所在区县,选取表4中对应区县和对应震级下的死亡人数,作为震后快速评估的参考。当震级(5.0~8.0级范围内)不是0.5的整数倍(如6.7级)时,可根据式(6)结合表3中的参数进行计算,也可根据表4中的数据进行线性内插,估算相应震级下的人员死亡情况。

需要指出的是,表4中的死亡数字,不是震中一个县的死亡人数,而是整个灾区的死亡人数,整个灾区范围可能会远大于震中区县的范围。本研究并未考虑地质灾害造成的影响,因而当研究数据用于山区等地质灾害严重的区域时,需要将结果乘以地质灾害系数,一般多山地区该系数在1.2~1.5之间变化。表4中给出的震后人员死亡数量为一个确定值,但是在实际应用时需要将其乘以一定的系数(一般下限为0.5,上限为1.5),变为一个区间值,以供应急响应时参考。

4 结论

震后快速评估地震造成的人员死亡情况,是做好地震应急响应、处置和开展救援行动的关键和前提条件。在震后地震灾情快速评估中,预评估工作启动之前主要采用的是基于基础数据进行模型计算的方法,即在震后根据地震速报三要素信息,利用人口、建筑物分布、活断层分布等基础数据,模拟地震影响场的展布状态,进而估算震害损失及其分布。按照我国地震应急响应的相关要求,对快速评估有两点要求,即“快”和“准”。“快”是指尽可能在15~30min内给出快速评估结果,而“准”是指快速评估结果与真实灾害损失的误差要争取小于50%。但是,由于基础数据的现势性和准确性不足,同时评估模型不一定适合灾区的实际情况,使得以往的评估结果准确性受到制约。

鉴于对震后快速评估结果准确性的要求和基于模型计算的评估结果误差较大的现实,自2011年盈江地震开始,采用多家单位的系统或模型计算结果与专家经验相结合的方式,来综合评估可能造成的地震人员死亡数量(即专家紧急会商方式),在多次地震中,专家会商方式给出的评估结果最接近实际死亡人数。但是,在2014年鲁甸和景谷地震中,发现当地震发生在专家缺乏直观了解的区域时,采用专家会商方法给出的人员死亡评估结果也会出现几十倍的误差。通过总结反思,我们认识到需要在平时前往存在地震风险的地区进行实地调研,了解可能发生地震的区域的实际情况,特别是建筑物的抗震能力和损毁后致死性水平、人口分布、道路交通情况、地形地貌、有无危险源、震后偶发性致死因素等情况,并根据调研获得的实际数据,利用适合灾区实地情况的模型算法给出未来地震可能造成的损失和应急需求,并将此结果应用到震后快速评估工作中,同时也为地震风险区各级政府部门震后应急响应和震前应急准备工作提供依据。这项工作就是通过震前实地调研,利用调研数据、专家分析、针对性模型和算法,事先给出不同震级下风险区中多个设定地震可能造成的地震人员死亡数和救援需求,用以提高震后快速评估结果的准确性,力争将评估结果产出时间控

制在政府部门要求的时限内,误差控制在实际地震人员死亡数的 $\pm 50\%$ 内。

经过多年的努力,目前在全国范围内获得了大量重要的调研和评估数据,即某一区域在某几个震级下可能的人员死亡数和经济损失等指标。但是,当未来地震震级不是前期调研评估的地震震级时,将给辅助震后快速评估工作带来一定不便。

为便于辅助震后的快速评估工作,本研究以我国西南云南和四川若干区县作为研究区,基于设定震级下的评估结果作为参考值,结合地震造成人员死亡数为 0 时的震级下限值,发现地震造成的人员死亡数量和震级呈现指数函数关系,并基于最小二乘法获得了相应的回归系数。基于该关系式,构建了研究区 5.0~8.0 级以 0.5 级为间隔的离散震级下地震人员死亡数查找表,为未来发生地震的震后灾情快速评估提供参考。

本研究以中国西南若干区县为例进行了研究,该方法不局限于该研究区,也可适用于我国其他地震风险区的地震人员死亡估算,同时,本研究提出的方法也可适用于震后人员受伤和经济损失等指标的估算。此外,需要指出的是,本研究利用我国西南地区数据,发现的地震造成的人员死亡数量和震级呈现指数函数关系,该结论是否适用于我国其他地区,还需进行进一步研究。

参考文献

- 国家地震局,国家统计局,1996. 中国大陆地震灾害损失评估汇编(1990~1995). 北京:地震出版社.
- 马玉宏,谢礼立,2000. 地震人员伤亡估算方法研究. 地震工程与工程振动, **20**(4):140~147.
- 帅向华,姜立新,李志强,等,2006. 国家地震应急快速响应信息系统建设——以首都圈地区为基础. 自然灾害学报, **15**(5):132~135.
- 吴新燕,吴昊昱,顾建华,2014. 1999 年以来地震生命损失评估研究新进展. 震灾防御技术, **9**(1):90~102.
- 肖光先,1991. 震后灾害损失快速评估. 灾害学, **6**(4):12~17.
- 肖亮,俞言祥,2011. 中国西部地区地震烈度衰减关系. 震灾防御技术, **6**(4):358~371.
- 中国地震局监测预报司,2001. 中国大陆地震灾害损失评估汇编(1996~2000). 北京:地震出版社.
- 中国地震局震灾应急救援司,2010. 2001—2005 年中国大陆地震灾害损失评估汇编. 北京:地震出版社.
- 中国地震局震灾应急救援司,2015a. 1966—1989 年中国地震灾害损失资料汇编. 北京:地震出版社.
- 中国地震局震灾应急救援司,2015b. 2006—2010 年中国大陆地震灾害损失评估汇编. 北京:地震出版社.
- Bartels S A, VanRooyen M J, 2012. Medical complications associated with earthquakes. *Lancet*, **379**(9817):748~757.
- EM-DAT, 2014. The international disaster database, <http://www.emdat.be/database>.
- Geiß C, Taubenböck H, 2013. Remote sensing contributing to assess earthquake risk: from a literature review towards a roadmap. *Nat Hazards*, **68**:7~48.
- Schweier C, Markus M, 2006. Classification of collapsed buildings for fast damage and loss assessment. *Bull Earthq Eng*, **4**(2):177~192.

Study of the Relationship between Fatality and Earthquake Magnitudes in Southwest China Based on Pre-earthquake Survey

Fan Xiwei^{1,2)}, Nie Gaozhong^{1,2)}, Deng Yan^{1,2)}, Xia Chaoxu^{1,2)}, Li Huayue^{1,2,3)}

1) Key Laboratory of Seismic and Volcanic Hazards, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract Earthquake is one of the most serious natural disasters that has caused great casualties in China. The rapid assessment of casualties after earthquake is the key to earthquake emergency response. The pre-assessment survey before earthquake is an effective means to improve the accuracy of post-earthquake rapid assessment. Through analysis of 62 historical earthquakes in the western region of China, we found that the earthquakes with magnitude less than 4.5 would not cause death. In this study we used the pre-evaluation data of some districts and counties in Yunnan and Sichuan Province to develop an exponential function relationship between the number of deaths and the magnitude of the earthquake, to construct the exponential function relationship for each district and county, and then to calculate the regression coefficient. Based on the above results, the relations of earthquake casualties with magnitude 5.0 to 8.0 have been obtained at intervals of magnitude 0.5, which can be used to assist the rapid assessment after the earthquake.

Keywords: Earthquake magnitude; Earthquake fatality; Pre-earthquake survey