

中国地震灾害中“伤亡比”指标的估算

吴绍洪^{1,2}, 靳 京^{1,2,3*}, 郑景云^{1,2}

(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)

摘 要:地震灾害中的“伤亡比”指标可以在一定程度上反映国家或地区地震灾害人口脆弱性的差异,还可用于地震受伤人数的估算,对地震应急救援具有重要参考意义。现有的研究多以一个固定的数值来代表所有地震中的伤亡比,但是数据分析显示,伤亡比在不同地震灾害中存在明显差异。因此,本文在对世界和中国地震灾害中人员伤亡数量的相关性分析基础上,利用1989年以来中国地震灾害的伤亡数据,通过回归分析构建了地震灾害人员受伤—死亡的回归曲线,并在曲线验证基础上,估算不同死亡量级上“伤亡比”。结果显示:①世界和中国地震灾害受伤—死亡人数间均存在显著正相关关系;②中国地震灾害人员伤亡数量之间较符合幂函数关系,死亡量级越大,伤亡比越小。本文构建的地震灾害伤亡回归曲线以及不同死亡量级下的伤亡比估算值可为地震中受伤人数的估算提供参考。

关键词:地震灾害;损失评估;伤亡比;回归分析;中国

1 引言

地震是给人类社会造成重大伤亡的主要自然灾害之一(马宗晋, 1990; 陈颙等, 2007; Sinvhal, 2010),也曾多次给中国造成重大的人员伤亡。近年来中国大陆地区强震频发,例如2008年的“5.12”汶川地震,2010年的青海玉树地震,2013年的四川芦山地震、甘肃定西地震,以及2014年发生在云南鲁甸的地震,都造成了不同程度的人员伤亡。根据中国《自然灾害救助条例》,在自然灾害的救助工作中,“以人为本”是首要遵循的原则(中华人民共和国国务院, 2010)。地震灾害中对伤亡比(受伤/死亡)指标的认识对于地震灾害生命脆弱性研究和地震应急救援具有重要的理论和现实意义(Wyss et al, 2011)。

一方面,地震伤亡比是反映震区生命脆弱性的重要指标。当地震灾害来临时,伤亡比小,说明死亡人数相对受伤人数较多,人口脆弱性较高;相反,伤亡比大,说明死亡人数相对受伤人数较少,该地区

对地震灾害有较好的抵御能力,人口脆弱性较低。

另一方面,伤亡比还经常用于地震中受伤人数的估算。地震发生后,在各方面人员伤亡信息尚未完全汇总的情况下,根据人员损失的预测模型估算伤亡的可能量级,可为救灾资源调度和救援人员分配指明方向,为应急决策指挥和抢险救灾争取宝贵时间,这无疑对地震灾害的紧急救援具有重要意义。但是由于统计口径、数据获取等方面的差异,死亡人数的估算往往比受伤人数估算具有更高的可靠性(Wyss et al, 2011)。因此,在现有的许多基于建筑物易损性或是基于地震动参数的人员损失估算模型中,大量数据参数用于死亡人数的估算与预测(马玉宏等, 2000; Weimin, 2002; Jaiswal, 2009),受伤人数多是在假设死亡人数预测能够达到预期精度的情况下,通过伤亡人数间的定量化关系得到(肖光先, 1991; 中国红十字会总会, 2010; 刘金龙等, 2012)。

虽然地震灾害中伤亡比指标对于地震灾害生命脆弱性研究和地震应急救援具有理论和现实意

收稿日期:2014-10;修订日期:2015-04。

基金项目:国家科技支撑计划课题(2013BAK05B04)。

作者简介:吴绍洪(1961-),男,广东潮州人,研究员,博导,主要研究方向为自然地理学综合研究,E-mail: wush@igsrr.ac.cn。

通讯作者:靳京(1980-),女,山西大同人,博士研究生,主要研究方向为自然灾害风险评估,E-mail: jinj@mail.las.ac.cn。

引用格式:吴绍洪,靳京,郑景云. 2015. 中国地震灾害中“伤亡比”指标的估算[J]. 地理科学进展, 34(7): 918-925. [Wu S H, Jin J, Zheng J Y. 2015. Estimation of the ratio of injured people to fatalities in earthquakes in China[J]. Progress in Geography, 34(7): 918-925.].
DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.07.013

义,但是对于该指标的认识还有待深入。本文以世界和中国的历史震害数据为基础,利用统计学方法,对世界和中国地震伤亡人数间的相关性进行分析,在此基础上构建了中国地震灾害人员受伤—死亡数量间的回归曲线,并在曲线验证的基础上,估算了中国地震灾害中不同死亡量级下的“伤亡比”。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

地震灾害中“伤亡比”指标估算的研究方法可分为以下4步:

(1) 在总结前人工作的基础上,对“伤亡比”指标的意义及其数据分布特征进行分析,并以世界1960-2012年和中国1989-2013年地震灾害数据为基础,分析地震灾害中人员伤亡数量间的相关性。

(2) 以1989-2013年中国地震灾害数据为基础,通过回归分析构建中国地震灾害人员受伤—死亡数量间的函数关系,并以未参加函数拟合的震例数据进行曲线比较。

(3) 考虑到近年来西部地区地震多发,本文以西部地区地震伤亡数据为基础,进行曲线拟合,并对不同尺度拟合函数的估算精度进行比较。

(4) 在对不同函数曲线进行比较的基础上,提出适用于中国地震灾害受伤人数估算的经验公式与“伤亡比”参考值。

2.2 数据来源

本文所需数据主要包括世界和中国地震灾害中的受伤和死亡人员数量,其中:

世界地震灾害的有关数据来源于美国国家地球物理数据中心(简称NGDC数据库)的自然灾害子库。NGDC数据库由美国国家地球物理数据中心维护,该数据库收录了公元前2150年至今的世界5813次地震事件,该数据库将符合下列标准之一的灾害事件列入统计:中等破坏(约100万美元或更多损失),10个或更多的死亡人数,最大震级为7.5及以上,震中烈度为10度及以上或者地震引发了海啸。统计项包括:地震发生时间,发生地点,震级,震源深度,死亡人数,受伤人数,经济损失等。

中国地震灾害的有关数据主要来源于《中国大陆地震灾害损失评估汇编》(中国地震局等,1996;中国地震局震灾应急救援司,2000,2010)、《全球和中国地震活动及灾害2010-2013》(中国地震信息网,

2011,2012,2013,2014)以及其他相关文献资料(张肇诚,2000;中国地震局震灾应急救援司,2007;米宏亮等,2008;郑通彦等,2010a,2010b,2011,2012),时间为1989-2013年,地震烈度区涉及全国21个省、直辖市和自治区。

3 对“伤亡比”指标的分析

已有研究中,伤亡比通常表示为:

$$R = Inj / Fat \quad (1)$$

式中: R 为伤亡比, Inj 为地震中的受伤人数, Fat 为地震中的死亡人数(Wyss et al, 2011)。

在微观层面上,伤亡比指标可以用来衡量地震中建筑物的抗震性能。在相似的地震烈度破坏情况下,当建筑物抗震性能比较差时,由于建筑物倒塌造成的死亡可能大于受伤人数,这时 $R < 1$;相反,当建筑物抗震性能很好时,没有或很少有建筑物倒塌, R 可能趋近于正无穷,即没有人员死亡,一定数量人员由于非结构性因素而受伤,如破碎的玻璃、物品掉落等。同理,在宏观层面上,一个较脆弱的社会经济系统,在地震灾害来临时,会有较多的死亡和较少的受伤, R 会比较小,甚至会小于1;而一个脆弱性较低的社会经济系统,对地震灾害会有较好的抵御能力,死亡人数相对较少,更多的是由于一些非结构性因素造成的伤害, R 会比较大,在死亡人数为0时趋近于正无穷。

Wyss等(2011)曾以1900-2008年世界主要国家和地区的年代地震伤亡数据为基础,对主要国家和地区 ≥ 6 级、伤亡人数 ≤ 40 人的地震灾害“伤亡比”时空变化特征进行了分析。认为随着社会经济不断发展,世界地震灾害伤亡比呈现上升趋势并存在国际差异。工业化国家在地震灾害中人口的脆弱性更低,其伤亡比约是发展中国家的2~3倍。Wyss等认为,中国地震灾害中人员的伤亡比也有明显上升的趋势,在1950-1969年间为2.5,到1986-2008年间上升为12.8(表1)。

伤亡比可以在一定程度上体现国家或地区地震灾害中人口脆弱性的差异,但是,由于不同地震灾害中伤亡比数值存在明显差异,选择震例样本不同,得到的结果差异巨大。与Wyss等(2011)的研究结果相比,中国红十字会总会组织编写的《灾害救援预防手册》中则认为,中国地震灾害的人员伤亡比平均为2.79,并以3作为预计参数(中国红十字会

总会, 2010)。

以中国 1989 年以来有人员伤亡的地震灾害数据为基础, 计算地震灾害中人员伤亡比, 得到的均值是 63.863。由图 1 可知, 1989-2013 年地震灾害人员伤亡比的标准差达到了 97 以上, 具有很大的离散性。在这种情况下, 如果仅以一个固定的数值来估算所有地震中的伤亡比, 其适用性必然会受到影响。因此, 本文以世界和中国地震灾害人员损失数据为基础, 利用统计学方法对受伤与死亡人数间关系进行探讨。

表 1 世界主要国家和地区的地震灾害伤亡比*
Tab.1 The ratio of injured to fatalities in earthquakes in selected countries, developing/industrialized countries, and the world

区域(国家)	500- 1899 年	1900- 1949 年	1950- 1969 年	1970- 1985 年	1986- 2008 年
世界	1.2(72)	2.8(121)	5.4(139)	4.3(104)	6.9(190)
发展中国家 (不包括中国)	—	—	3.0(45)	3.2(23)	4.8(53)
工业化国家	—	—	8.8(44)	—	11.2(20)
中国	—	—	2.5(35)	—	12.8(35)
日本	—	—	6.6(21)	—	47.5(6)
拉丁美洲	—	—	—	2.6(12)	8.0(11)
土耳其, 伊朗	—	—	2.6(19)	—	3.6(26)
希腊	—	—	18.6(9)	—	11.2(5)
意大利	—	—	3.9(8)	—	7.0(5)

注: 括号中数值为参与分析的样本量; *引自 Wyss et al, 2011。

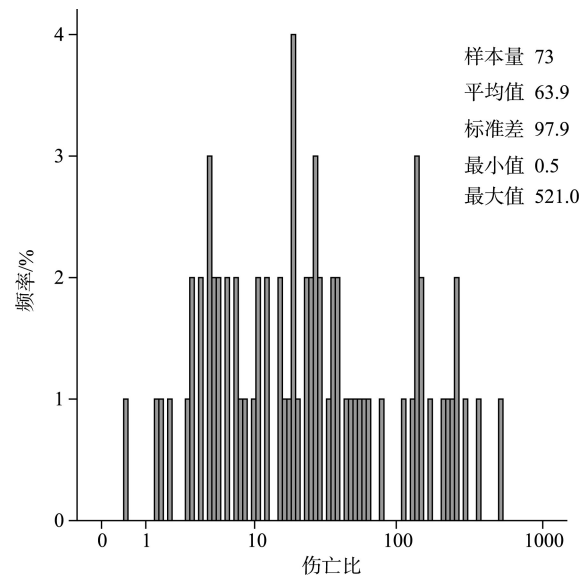


图 1 1989-2013 年中国地震灾害人员伤亡比值频率分布
Fig.1 Frequency distribution of the ratio of injured to fatalities in China, 1989-2013

基于 NGDC 数据库中 1960 年以来有伤亡记录的地震灾害数据以及中国 1989 年以来极震区烈度为 VI 度以上的有伤亡记录的地震灾害数据, 分别分析了世界和中国地震灾害中的受伤和死亡人数的相关性。

参与世界总体分析的震例共计 571 个, 覆盖 70 个国家。结果显示, 世界不同国家地震灾害中人员受伤和死亡间存在显著的正相关性, Pearson 相关系数为 0.935, 在 0.01 的水平上显著相关(图 2)。

参与中国地震灾害分析的震例共计 73 个, 涉及全国 21 个省、直辖市和自治区。结果显示(图 3), 中国地震灾害中人员受伤和死亡数量间同样存在显著的正相关性, Pearson 相关性系数略高于世界总

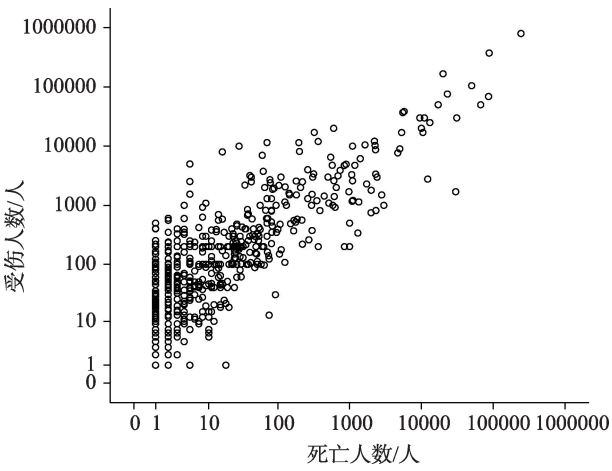


图 2 世界地震灾害人员伤亡数量散点图
Fig.2 Observed seismic fatalities and corresponding injured in the world

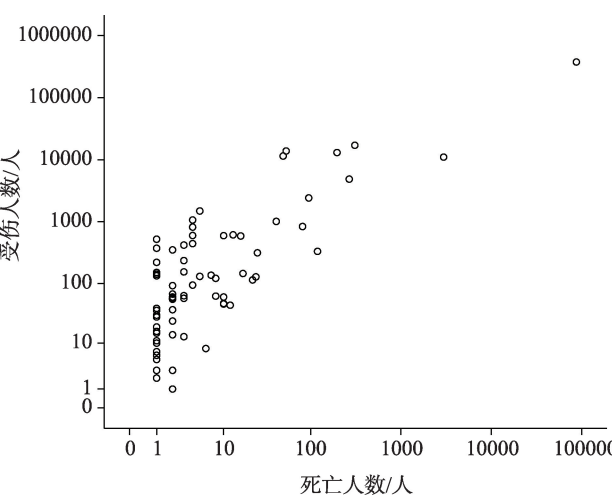


图 3 中国地震灾害人员伤亡数量散点图
Fig.3 Observed seismic fatalities and corresponding injured in China

体,为0.998,在0.01的水平上显著相关。

4 中国地震灾害伤亡关系的回归拟合与伤亡比估算

由以上分析可知,世界和中国地震灾害中受伤和死亡人数之间均存在显著的正相关关系。因此,本文利用回归分析的方法,在全国和地区尺度上分析受伤与死亡人数间的函数关系,并通过现实震例的验证,选择最能反映死亡—受伤关系的曲线函数。由于不同震例间数据存在多个数量级的差距,为便于分析,这里分别对受伤和死亡人数取自然对数,即 $y = \ln Inj$, $x = \ln Fat$ 。

4.1 对伤亡关系曲线可能形态的分析

通过对中国地震灾害人员伤亡数量关系(图3)的分析,假设伤亡关系曲线存在两种形态,即 y 随着 x 的增加呈线性增长(曲线a)和 y 随着 x 的增加呈非线性增长,其中,曲线b表示随着 x 的增加, y 的增长速率逐渐降低,曲线趋于平缓;曲线c表示随着 x 的增加, y 的增长速率逐渐增加(图4)。

4.2 全国尺度曲线的拟合

以中国1989-2013年极震区烈度为Ⅵ度以上的有伤亡记录的73个震例为基础,其中,1989-2005年的伤亡数据作为回归分析数据,2006-2013年的伤亡数据作为验证数据。由于高烈度震例较少,因此,将2008年的四川汶川地震和2010年的青海玉树地震也作为拟合数据。最终参与回归拟合的震例共计60个,参与验证的震例共计13个。选取形态较为接近假设曲线的线性函数、对数函数、复合

函数、幂函数、S形曲线、增长函数、指数函数和Logistic函数对数据进行拟合。结果显示,所选函数的显著性均低于0.05,其中,线性函数、对数函数的修正 $R^2 > 0.5$ (表2),本文选取修正 R^2 较大的线性函数、对数函数和幂函数进行分析(图5)。

基于全国尺度数据进行回归拟合所得的线性函数、对数函数和幂函数的表达式分别为:

线性函数: $y = 0.846x + 3.515$ (2)

对数函数: $y = 4.250 + 2.371 \ln x$ (3)

幂函数: $y = 4.019x^{0.410}$ (4)

式中: $y = \ln Inj$, $x = \ln Fat$ 。

这里选取2006-2013年发生在中国大陆的13个震例,并假设地震死亡人数为已知的情况下,对上述拟和曲线的估算效果进行比较(表3)。结果显示,三种曲线对于受伤人数估算的相对误差分别为0.571、0.906和0.629。

4.3 地区尺度曲线的拟合

考虑到2006年以来有人员伤亡的震例都来自

表2 不同曲线拟和的显著性和R²

Tab.2 Significance and <i>R</i> -squares of the fitted curves							
函数	<i>R</i> ²	修正 <i>R</i> ²	<i>Sig.</i>	函数	<i>R</i> ²	修正 <i>R</i> ²	<i>Sig.</i>
线性函数	0.643	0.632	0.000	指数函数	0.440	0.423	0.000
对数函数	0.580	0.567	0.000	Logistic 曲线	0.440	0.423	0.000
幂函数	0.482	0.465	0.000	复合函数	0.440	0.423	0.000
增长函数	0.440	0.423	0.000	S形曲线	0.417	0.399	0.000

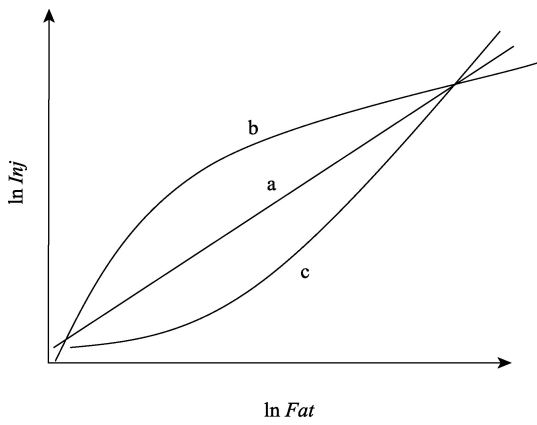


图4 地震灾害人员伤亡关系曲线的三种形态(示意图)
Fig.4 Three models of seismic fatalities and corresponding injured

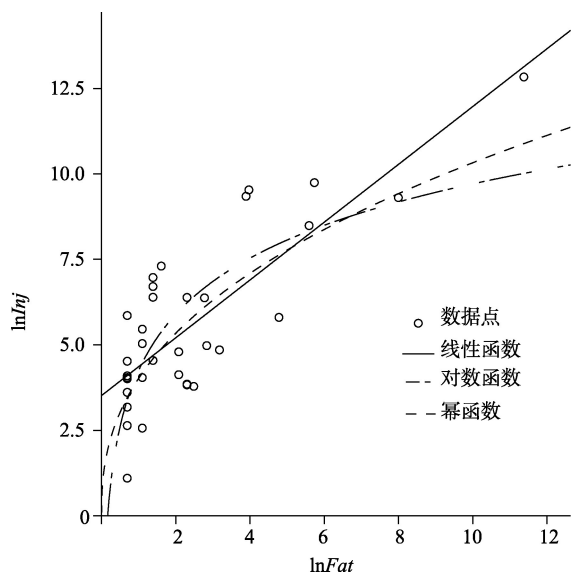


图5 线性函数、对数函数和幂函数曲线拟和图(全国尺度)
Fig.5 Fitting results of linear, logarithmic, and power functions (national)

表3 对伤亡回归曲线的比较(全国尺度)

Tab.3 Comparison of the estimation results of different models (national)

地震	震中烈度	实际受伤 人数/人	死亡人数/ 人	线性函数 估值/人	相对误差	对数函数 估值/人	相对误差	幂函数 估值/人	相对误差
20060621 甘肃文县	Ⅵ	19	1	34	0.769	0	1.000	1	0.947
20060825 云南盐津	Ⅵ	67	2	60	0.098	29	0.561	32	0.526
20070603 云南宁洱	Ⅷ	419	3	85	0.797	88	0.791	65	0.844
20080820 云南盈江	Ⅷ	130	5	131	0.009	217	0.667	132	0.018
20080830 四川仁和	Ⅷ	1010	41	778	0.230	1573	0.557	975	0.035
20090709 云南楚雄	Ⅷ	372	1	34	0.910	0	1.000	1	0.997
20100131 四川遂宁	Ⅶ	16	1	34	1.101	0	1.000	1	0.938
20110310 云南盈江	Ⅷ	314	25	512	0.630	1121	2.569	659	1.098
20120624 云南宁蒗	Ⅶ	442	4	109	0.754	152	0.656	99	0.776
20120907 云南彝良	Ⅷ	834	81	1384	0.659	2345	1.811	1594	0.911
20130420 四川芦山	Ⅸ	13019	196	2923	0.776	3620	0.722	2834	0.782
20130722 甘肃岷县	Ⅷ	2414	95	1584	0.344	2551	0.057	1777	0.264
20130831 云南香格里拉	Ⅷ	63	3	85	0.352	88	0.391	65	0.034
平均相对误差					0.571		0.906		0.629

注:表中的“相对误差”等于估算值与真实值差的绝对值除以真实值。由于高烈度震例较少,本文将2008年发生的四川汶川地震和2010年发生的青海玉树地震列入拟合数据,因此,这两次震例数据没有参与验证。

于西部地区,本文对西部地区的伤亡关系进行曲线拟合。通常所说的西部地区主要包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、四川省、重庆市、云南省、贵州省、西藏自治区、内蒙古自治区、广西壮族自治区12个省、市、自治区,均为中国经济水平较落后的地区。由于本文的有效数据主要集中在四川省、甘肃省、云南省、青海省、新疆维吾尔自治区、西藏自治区,因此本文中所指的西部地区主要包括这个6个省、自治区。在对这些省、自治区的数据取自然对数的基础上构建了地震伤亡关系的线性函数、对数函数和幂函数曲线(图6)。三种曲线的显著性均低于0.05,线性函数、对数函数和幂函数修正 R^2 分别为0.716,0.615和0.562。

基于西部地区数据进行回归拟合所得的线性函数、对数函数和幂函数的表达式分别为:

线性函数: $y = 0.807x + 3.54$ (5)

对数函数: $y = 4.504 + 2.084 \ln x$ (6)

幂函数: $y = 4.413x^{0.306}$ (7)

式中: $y = \ln Inj$, $x = \ln Fat$ 。

以2006年以来震例对西部地区的伤亡函数曲线进行验证(表4),可以看到,线性函数、对数函数和幂函数的相对误差分别为0.567,0.866和0.618。与全国尺度曲线估算效果相比,以西部数据为基础拟

合的曲线准确性提高并不明显。

4.4 “伤亡比”估算结果

以西部地区数据为基础的拟合曲线估算西部地区受伤人数,平均相对误差提高并不明显,说明这种曲线尚不能反映伤亡关系的区域差异性,因此本文选取在全国尺度上估算效果较好的线性函数(式2)为估算中国地震灾害人员伤亡关系的最佳模

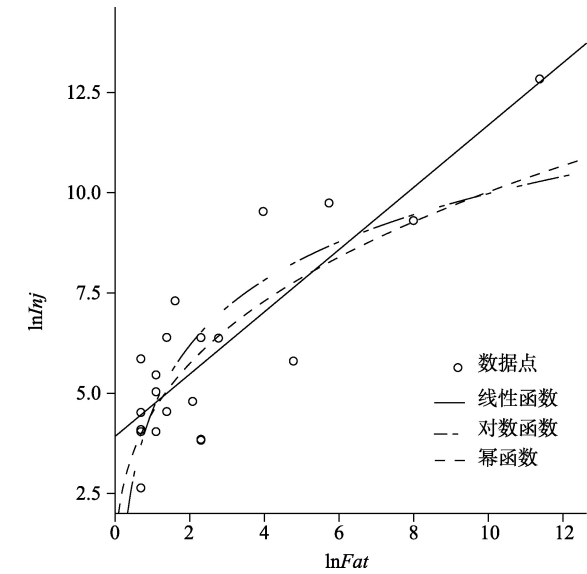


图6 线性函数、对数函数和幂函数曲线拟和图(西部)

Fig.6 Fitting results of linear, logarithmic, and power functions (western China)

表4 对伤亡回归曲线的比较(西部地区)

Tab.4 Comparison of the estimation results of different models (western China)

地震	震中烈度	实际受伤 人数/人	线性函数 估值/人	相对误差	对数函数 估值/人	相对误差	幂函数 估值/人	相对误差
20060621 甘肃文县	Ⅵ	19	34	0.814	0	1.000	1	0.947
20060825 云南盐津	Ⅵ	67	60	0.100	42	0.372	52	0.229
20070603 云南宁洱	Ⅷ	419	84	0.800	110	0.738	94	0.776
20080820 云南盈江	Ⅷ	130	126	0.028	244	0.874	165	0.268
20080830 四川仁和	Ⅷ	1010	690	0.317	1392	0.378	730	0.277
20090709 云南楚雄	Ⅷ	372	34	0.907	0	1.000	1	0.997
20100131 四川遂宁	Ⅶ	16	34	1.154	0	1.000	1	0.938
20110310 云南盈江	Ⅷ	314	463	0.474	1033	2.290	551	0.753
20120624 云南宁蒗	Ⅶ	442	106	0.761	179	0.596	131	0.703
20120907 云南彝良	Ⅷ	834	1196	0.433	1976	1.370	1034	0.240
20130420 四川芦山	Ⅸ	13019	2439	0.813	2895	0.778	1544	0.881
20130722 甘肃岷县	Ⅷ	2414	1360	0.437	2129	0.118	1116	0.538
20130831 云南香格里拉	Ⅷ	63	84	0.328	110	0.745	94	0.490
平均相对误差				0.567		0.866		0.618

型。由于在进行曲线拟合前对伤亡数据取自然对数,因此该线性函数也可以表示为:

$$Inj=33.616Fat^{0.846} \tag{8}$$

式中: Inj 为受伤人数, Fat 为死亡人数。该函数为幂函数,其特征是随着自变量(死亡人数)的增大,因变量(受伤人数)的增长率呈现下降趋势。将式(8)进行数学变换,伤亡比可以表示为:

$$R=33.616Fat^{-0.154} \tag{9}$$

式中: R 为伤亡比, Fat 为死亡人数。由此可知,伤亡比在不同死亡量级上的数值不同,随着死亡量级的增大,伤亡比在减小,同时,伤亡比的变化率也在减小(图7)。

本研究将死亡人数量级分为9个区间,分别为1~10、10~50、50~100、100~500、500~1000、1000~5000、5000~10000、10000~50000以及50000人以上(表5)。由于当死亡人数量级为50000人以上时,伤亡比变化率较小,并且地震灾害中,死亡人数为50000人以上的并不多见,因此,这里将死亡量级在50000人以上的归并到一个区间。

利用不同死亡量级区间对应的伤亡比中值近似代表该区间的伤亡比,进而得到各死亡量级区间

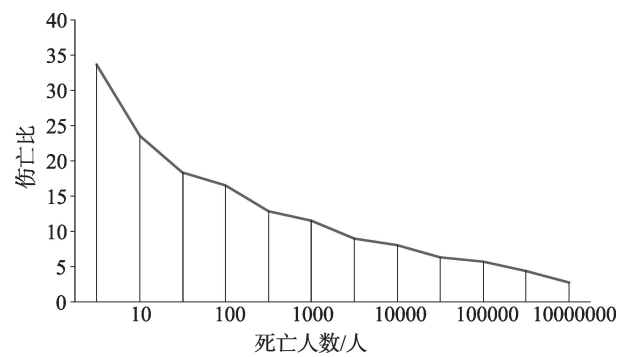


图7 不同死亡数量对应的伤亡比预测值变化趋势

Fig.7 Trend of predicted injured/fatalities ratio by different levels of fatalities

上伤亡比的参考值(表5)。

5 结论与讨论

本文在对世界和中国地震灾害人员伤亡相关分析基础上,构建了中国地震灾害人员受伤—死亡数量间的回归曲线,并估算了中国地震灾害中不同死亡量级对应的“伤亡比”。得到如下结论:

(1) 世界和中国地震灾害中受伤和死亡人数之

表5 中国地震灾害人员伤亡比的参考值

Tab.5 Estimated ratio of injured to fatalities in China by different levels of fatalities

死亡量级/人	1~10	10~50	50~100	100~500	500~1000	1000~5000	5000~10000	10000~50000	50000以上
伤亡比	28.6	21.0	17.5	14.7	12.3	10.3	8.6	7.2	3.6

间均存在显著的正相关关系。

(2) 中国地震灾害人员伤亡数量间符合幂函数关系。随着自变量(死亡人数)的增大,因变量(受伤人数)的增长率呈现下降趋势。对于不同死亡量级的地震,伤亡比存在明显差异,死亡量级越大,伤亡比越小。

(3) 本文选取的伤亡回归曲线的修正 R^2 达到0.632,可以较好反映地震灾害中受伤和死亡人数间的关系,不同死亡量级下的伤亡比估算值也可为中国地震受伤人数的估算提供参考。

(4) 模型存在的误差,一方面与受伤人数统计数据可靠性有关,由于统计口径的差异,受伤人数的可靠性往往不及死亡人数;另一方面,这种误差还可能与地震强度、地震发生时间和孕灾环境等因素有关。今后可以引入更多相关参数,以提高模型估算精度。

参考文献(References)

- 陈颢, 史培军. 2007. 自然灾害[M]. 北京: 北京师范大学出版社. [Chen Y, Shi P J. 2007. Natural disasters[M]. Beijing, China: Beijing Normal University Press]
- 刘金龙, 林均岐. 2012. 基于震中烈度的地震人员伤亡评估方法研究[J]. 自然灾害学报, 21(5): 113-119. [Liu J L, Lin J Q. 2012. Study on assessment method for earthquake casualty based on epicentral intensity[J]. Journal of Natural Disasters, 21(5): 113-119.]
- 马玉宏, 谢礼立. 2000. 地震人员伤亡估算方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 20(4): 140-147. [Ma Y H, Xie L L. 2000. Methodologies for assessment of earthquake casualty[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 20(4): 140-147.]
- 马宗晋. 1990. 自然灾害与减灾 600 问答[M]. 北京: 地震出版社. [Ma Z J. 1990. Ziran Zaihai Yu Jianzai 600 Wenda [M]. Beijing, China: Seismological Press.]
- 米宏亮, 李洋, 侯建盛. 2008. 2007 年中国大陆地震灾害损失述评[J]. 国际地震动态, (2): 41-45. [Mi H L, Li Y, Hou J S. 2008. Earthquake disasters in Chinesemainland in 2007 [J]. Recent Developments in World Seismology, (2): 41-45.]
- 肖光先. 1991. 震后损失快速评估[J]. 灾害学, 6(4): 12-17. [Xiao G X. 1991. Rapid assessment of disaster losses in post-earthquakes[J]. Journal of Catastrophology, 6(4): 12-17.]
- 张肇诚. 2000. 中国震例(1989-1991)[M]. 北京: 地震出版社. [Zhang Z C. 2000. Earthquake cases in China(1989-1991) [M]. Beijing, China: Seismological Press.]
- 郑通彦, 李洋, 侯建盛, 等. 2010a. 2008 年中国大陆地震灾害损失述评[J]. 灾害学, 25(2): 112-118. [Zheng T Y, Li Y, Hou J S, et al. 2010a. A review of earthquake disasters loss in mainland China in 2008[J]. Journal of Catastrophology, 25(2): 112-118.]
- 郑通彦, 李洋, 侯建盛, 等. 2010b. 2009 年中国大陆地震灾害损失述评[J]. 灾害学, 25(4): 96-101. [Zheng T Y, Li Y, Hou J S, Mi H L, et al. 2010b. A review of earthquake disasters loss in mainland China in 2009[J]. Journal of Catastrophology, 25(4): 96-101.]
- 郑通彦, 赵萍, 刘在涛. 2011. 2010 年中国大陆地震灾害损失述评[J]. 自然灾害学报, 20(4): 107-113. [Zheng T Y, Zhao P, Liu Z T. 2011. A review of earthquake disaster loss in Chinese mainland in 2010[J]. Journal of Natural Disasters, 20(4): 107-113.]
- 郑通彦, 郑毅. 2012. 2011 年中国大陆地震灾害损失述评[J]. 自然灾害学报, 21(5): 88-97. [Zheng T Y, Zheng Y. 2012. Review of earthquake damage losses in mainland China in 2011[J]. Journal of Natural Disasters, 21(5): 88-97.]
- 中国地震局, 中国统计局. 1996. 中国大陆地震灾害损失评估汇编(1990-1995 年)[M]. 北京: 地震出版社. [China Earthquake Administration, China Statistics Bureau. 1996. ZhongGuo Dalu Dizhen Zaihai Sunshi Pinggu Huibian(1990-1995) [M]. Beijing, China: Seismological Press.]
- 中国地震局震灾应急救援司. 2000. 中国大陆地震灾害损失评估汇编(1996-2000 年)[M]. 北京: 地震出版社. [Emergency Rescue Department of China Earthquake Administration. 2000. Zhongguo dalu dizhen zaihai sunshi pinggu huibian(1996-2000) [M]. Beijing, China: Seismological Press.]
- 中国地震局震灾应急救援司. 2007. 2006 年国内地震灾害特点[EB/OL]. 2007-02-06[2014-09-15]. http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/_history/08_06/30/1214801071062.html. [Emergency Rescue Department of China Earthquake Administration. 2007. 2006 nian guonei dizhen zaihai tedian[EB/OL]. 2007-02-06[2014-09-15]. http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/_history/08_06/30/1214801071062.html.]
- 中国地震局震灾应急救援司. 2010. 中国大陆地震灾害损失评估汇编(2001-2005 年)[M]. 北京: 地震出版社. [Emergency Rescue Department of China Earthquake Administration. 2010. Zhongguo dalu dizhen zaihai sunshi pinggu huibian(2001-2005) [M]. Beijing, China: Seismological Press.]
- 中国地震信息网. 2011. 2010 全球和中国地震活动及灾害[EB/OL]. 2011-02-15[2014-09-16]. <http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/dzzh/2010DiZhenZaiHai.html>. [China

- Seismic Information. 2011. 2010 全球和中国地震活动及灾害 [EB/OL]. 2011-02-15[2014-09-16]. <http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/dzzh/2010DiZhenZaiHai.html>.]
- 中国地震信息网. 2012. 2011 全球和中国地震活动及灾害 [EB/OL]. 2012-02-15[2014-09-16]. <http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/dzzh/2011DiZhenZaiHai.html>. [China Seismic Information. 2012. 2011 Quanguo he Zhongguo dizhen huodong ji zaihai[EB/OL]. 2012-02-15[2014-09-16]. <http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/dzzh/2011DiZhenZaiHai.html>.]
- 中国地震信息网. 2013. 2012 全球和中国地震活动及灾害 [EB/OL]. 2013-03-15[2014-09-16]. <http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/dzzh/2012DiZhenZaiHai.html>. [China Seismic Information. 2013. 2012 Quanguo he Zhongguo dizhen huodong ji zaihai[EB/OL]. 2013-03-15[2014-09-16]. <http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/dzzh/2012DiZhenZaiHai.html>.]
- 中国地震信息网. 2014. 2013 全球和中国地震活动及灾害 [EB/OL]. 2014-01-16[2014-09-16]. <http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/dzzh/2013DiZhenZaiHai.html>. [China Seismic Information. 2014. 2013 Quanguo he Zhongguo Dizhen huodong ji zaihai[EB/OL]. 2014-01-16[2014-09-16]. <http://www.csi.ac.cn/manage/eqDown/dzzh/2013DiZhenZaiHai.html>.]
- 中国红十字会总会. 2010. 灾害救援预防手册[M]. 北京: 社会科学文献出版社. [Red Cross Society of China. 2010. Zaihai Jiuyuan Yufang Shouce[M]. Beijing, China: Social Sciences Academic Press.]
- 中华人民共和国国务院. 2010. 自然灾害救助条例[M]. 北京: 人民出版社. [China State Council. 2010. Ziran Zaihai Jiuzhu Tiaoli[M]. Beijing, China: People's Publishing House.]
- Jaiswal K S, Wald D J, Hearne M. 2009. Estimating casualties for large earthquakes worldwide using an empirical approach[R/OL]. 2014-07-21[2014-09-16]. <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/4f4e4a0ce4b07f02db5fca0c>.
- Sinvhal A. 2010. Understanding earthquake disasters[M]. New Delhi, India: McGraw Hill.
- Weimin D. 2002. Earthquake models for catastrophe risk and their application to insurance[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1(1): 145-151.
- Wyss M, Trendafiloski G. 2011. Trends in the casualty ratio of injured to fatalities in earthquakes[M]//Robin S, Emily S, Charles S. Human casualties in earthquakes. New York: Springer: 267-274.

Estimation of the ratio of injured people to fatalities in earthquakes in China

WU Shaohong¹, JIN Jing^{1,2*}, ZHENG Jingyun¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The ratio of the number of injured people to fatalities in earthquakes not only reflects the vulnerability of countries or regions in earthquakes, but also is useful for the estimation of injured people, which is of great importance for emergency rescue. The ratio of injured people to fatalities is often represented by a fixed number in existing research, but disparity of these ratios from different earthquakes is clear. By analyzing the correlation between the number of injured people in earthquakes and fatalities, this study establishes regression models using the injured people and fatalities data in China since 1989. The models are tested and used to predict the ratio of injured people to fatalities in earthquakes with different levels of fatalities. The results show that: (1) There is a significant positive correlation between the number of injured people and fatalities in earthquakes, not only for China, but also worldwide. (2) Power function can better reflect the relationship between the number of injured people in earthquakes and fatalities in China. Large fatalities are always accompanied by low ratio of injured people to fatalities. The models and the calculated ratio of injured people to fatalities in this article provide an alternative method to estimate the number of injured people in earthquakes.

Key words: seismic disaster; loss assessment; the ratio of injured people to fatalities; regression analysis; China