

文鑫涛,张萌,李晓丽,等. 2024. 地震致人死亡评估中常用模型的应用效果研究. 中国地震, 40(3):662~668.

# 地震致人死亡评估中常用模型的应用效果研究

文鑫涛<sup>1)</sup> 张萌<sup>2)</sup> 李晓丽<sup>1)</sup> 徐志双<sup>1)</sup>

1)中国地震台网中心,北京 100045

2)贵州省地震局,贵阳 550004

**摘要** 以2018—2022年发生在中国大陆具有显著影响的38个真实震例为对象,采用三种地震致人死亡评估模型对各地震事件的死亡人数进行评估,并与真实的地震死亡人数进行对比;评估模型包括基于两种烈度估算模型和一种震害矩阵类模型。结果表明:对于本研究选取的近5年的震例中,基于房屋破坏情况估算模型的准确性最高;单纯基于人口密度的估算模型准确性次之,其在未造成人员死亡的地震中,评估结果偏差较大。

**关键词:** 地震死亡人员评估 统计回归模型 震害矩阵模型

[文章编号] 1001-4683(2024)03-0662-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地震是群灾之首,据联合国国际减灾署统计,2000—2019年这20年间,全球因地震灾害造成的死亡人数达72万人<sup>①</sup>,而中国大陆在这20年里因地震死亡的人数高达73000余人<sup>②</sup>,地震给人民的生命财产安全造成了严重威胁。因此,尽可能地避免人员伤亡是防震减灾工作的重要组成部分。我国当前防震减灾工作中的一项重要内容即为地震灾害的快速评估,评估的内容包括人员伤亡、经济损失以及地震引发的地质灾害、交通中断和灾民心理创伤等次生灾害(林均岐等,2003;李永强,2009)。其中,传统的地震致死评估具有重要的现实意义,其要求在地震发生后的2h内快速计算出理论伤亡人数,结合专家经验为抗震救灾工作提供坚实的理论支撑(苗崇刚等,2004)。地震致死评估经过多年发展,积累了大量的理论和实践经验,评估所依据的数学模型总体遵循两种思路。

第一种思路,采用统计学方法得出地震致死人数与震级、烈度、断层距、人口密度、发震时间等相关因素之间的定量关系,该方法进一步可细分为经验公式法、概率预测法(可靠度预测法)、动态评估法(时间进程法)等方法。基于该思路衍生出的广义统计学模型较多,其中,肖光先(1991)经统计分析提出的人员死亡快速评估经验公式被广泛认可,并作为国家

[收稿日期] 2023-03-06 [修定日期] 2023-12-20

[项目类别] 地震应急青年重点任务(CEAEDM20240111)资助

[作者简介] 文鑫涛,男,1988年生,工程师,主要从事地震应急相关研究工作。E-mail: wxt@seis.ac.cn

① Emergency Events Database, 2021, <https://www.preventionweb.net/knowledge-base/hazards/earthquake>

② 国家统计局, 2021, <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>

标准指导震后灾情评估实践工作(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等,2014)。2000年之后,众多研究遵循这一思路,产生了诸如美国地质勘探局(USGS)发布的PAGER、神经网络分析、广义线性模型、FAMA和北京生命科学研究所(NIBS)发布的HAZUS损失评估系统等新方法(马玉宏等,2000;Kircher et al,2006;李晓杰等,2012;田鑫等,2012;宋平等,2016;聂高众等,2018;张维佳等,2021)。

第二种思路,从房屋倒塌致死的假设出发,根据房屋易损性相关参数或人员在室率、房屋结构等信息,结合震区房屋结构情况,计算地震致死人数。其中,尹之潜等人提出的以房屋毁坏比为主要参数的人员死亡评估方法被广泛采用(尹之潜等,1990;尹之潜,1991、1994、1996),并作为国家标准中推荐的人员伤亡快速评估方法(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等,2014)。2000年以前的模型大多使用唐山地震的人员伤亡和房屋数据作为建立和验证评估模型的基础(邹其嘉等,1995;程家喻等,1996)。此后,不断有研究考虑增加其他致死因素并提出新的改进方法,如考虑人员在室率因素后建立地震人员伤亡的易损性模型(邹其嘉等,1995),或结合区域特点对模型进行相应的修正(程家喻等,1996;马秀珍等,2000;杨天青等,2005;许建东等,2008),或考虑易损性不确定性的地震风险评估模型(王东明等,2019)。也有采用同样思路,利用各类建筑物的致死性水平(anti-lethal levels)和比例来获取区域的整体反致死水平,最后根据相应的矩阵进行伤亡快速评估的模型(Xia et al,2020、2022)。

遵循以上两种思路,GB/T 30352-2013《地震灾情应急评估》推荐使用的地震人员死亡评估模型被广泛用于地震应急快速评估实际工作中(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等,2014),但由于这些模型均在1991年前后提出,经过经济社会三十余年的飞速发展,人口分布和房屋抗震性能均发生了显著变化,这些模型是否仍适用于当前地震应急快速评估工作,是一个需要再验证和再讨论的问题。

此外,地震致死成因复杂,各种因素间交叉影响、互为因果的现象普遍,已有大量研究从定性和定量的角度分析各类地震致死因子,并且普遍认为要对小区域进行震害预测,必需考虑到各个地区的灾害发生机制(冯志泽等,1996;诸井孝文,1999;马玉宏等,2000;张俊玲等,2006;杨杰英等,2007;吴将丰等,2013)。一般来说,房屋破坏导致的人员死亡仍是最为显著的致死成因,如在汶川8.0级地震中与建筑物倒塌有关的死亡人数占70%以上(魏本勇等,2017;李金香等,2017)。由于地震致死的成因复杂,在讨论模型对真实地震的评估效果时,不同地震的致死原因可能存在较大差异,因此本研究在分析地震致人员快速评估模型的应用效果时,对真实震例的致死因素也给予相应考虑。

## 1 方法与数据

本研究采用传统的基于烈度估算模型和房屋震害矩阵估算模型两种方法,依据GB/T 30352-2013《地震灾情应急评估》标准中估算死亡人数的经验公式和房屋破坏情况估算死亡人数的经验公式。人口数据采用WorldPop Hub发布的2020年全球人口分布数据,数据地理精度为30s,经投影和误差转换后作为模型输入数据;房屋震害矩阵和建筑物分布数据分别来自地震行业科研专项项目《南北地震带大震极灾区速判及关键技术研究》和国家地震社会服务工程项目的成果数据。本研究模型计算基于地震现场调查所得的烈度分布数

据,最终获得 2018—2022 年 38 个显著地震的快速评估死亡人数。

基于地震烈度估算死亡人数的经验公式为

$$N_d = \sum_{j=6}^{I_{\max}} A_j \rho R_j \quad (1)$$

其中,  $N_d$  为死亡人数(人),  $j$  为破坏等级,  $I_j$  为  $j$  对应的烈度值,  $I_{\max}$  为极震区烈度,  $A_j$  为烈度  $I_j$  的影响场面积( $\text{km}^2$ ),  $\rho$  为人口密度(人/ $\text{km}^2$ ),  $R_j$  为烈度  $I_j(j \geq 6)$  所对应的死亡率,具体可通过以下两种方式获得

$$\ln R_j = -44.365 + 7.516 I_j - 0.329 I_j^2 \quad (2)$$

或

$$\ln R_j = -44.466 + 14.33 \ln I_j + 0.960 \ln \rho \quad (3)$$

基于房屋破坏情况估算死亡人数的经验公式为

$$N_d = RP \quad (4)$$

其中,  $R$  为死亡率,  $P$  为灾区总人口数(人)。

以 VI 烈度区及以上作为灾区范围,计算各烈度区内的死亡率,其与房屋倒塌率的关系为

$$\ln R = 12.479 C^{0.1} - 13.3 \quad (5)$$

其中,  $C$  为房屋倒塌率。

由于式(1)中的死亡率有 2 种计算方法,因此本研究针对每次地震死亡人数的评估有三种死亡率计算方法,分别作为模型一(式(2))、模型二(式(3))和模型三(式(5)),结合各烈度区内人口总数,计算得到死亡人数。

本研究选取 2018—2022 年造成显著影响的 38 个地震(其中 29 个地震人员零死亡,9 个地震有人员死亡),比较三种模型的评估效果。

## 2 计算结果

总体而言,模型三的计算结果与真实死亡人数偏离最小(表 1)。由于零死亡震例和有死亡震例的评估结果存在较大差异,故分别讨论 2 类地震的评估结果。

### 2.1 零死亡震例计算结果

对于本研究选取的 29 个零死亡震例,模型三的评估结果优于模型二,两种模型均显著优于模型一。模型三仅在四川兴文 5.7 级地震中的评估结果大于 1 人(7.75 人),其余均小于 1;模型二有 10 个震例的评估结果大于 1,最大值为青海门源 6.9 级地震的评估结果 404.45 人。而模型一的评估结果明显偏大,计算结果大于 1 人的震例有 19 个,该模型对青海门源 6.9 级和青海玛多 7.4 级地震的评估结果甚至超过 1 万人,参考价值较低。

造成这种结果可能的原因在于,模型一的死亡率估算过于依赖烈度值的大小,尤其是经过平方和指数计算的双重放大后,烈度会在很大程度上决定评估结果的数量级,因此在遇到实际烈度值较高、其他致死因素较弱的情况时,模型一将得出远高于实际死亡人数的估计结果;而模型二在死亡率的估算中适当压缩烈度影响,同时用人口密度部分代替地震烈度作为致死因素后,计算结果得到大幅修正,但现有人口密度数据并不能真实反应出震时的震区人口分布情况。因此,对于发生的烈度较大,而灾区人口稀疏、次生灾害轻微、防范较好的地震,模型一的评估结果存在明显偏大的可能。

模型三在计算过程中不仅考虑了房屋震害情况,而且考虑了影响场范围内的房屋分布

表 1 三种模型评估结果与真实死亡人数比较

序号	地震	模型一 评估结果	模型二 评估结果	模型三 评估结果	真实死亡人数
1	青海称多 5.3 级	5.20	0.01	0	0
2	吉林宁江 5.7 级	160.23	149.01	0	0
3	云南通海 5.0 级	6.84	5.73	0.03	0
4	新疆伽师 5.5 级	111.95	10.02	0	0
5	云南墨江 5.9 级	1692.38	74.77	0.01	0
6	四川西昌 5.1 级	1.42	0.28	0.08	0
7	四川兴文 5.7 级	5.65	0.31	7.75	0
8	四川珙县 5.3 级	0.97	0.09	0	0
9	四川荣县 4.9 级	1.64	0.94	0.15	2
10	西藏墨脱 6.3 级	445.84	8.92	0	0
11	吉林宁江 5.1 级	1.07	0.47	0	0
12	四川长宁 6.0 级	3729.28	259.41	93.88	13
13	四川威远 5.4 级	6.54	4.79	0.57	1
14	甘肃甘州 5.0 级	0.14	0	0	0
15	贵州沿河 4.9 级	0.17	0.02	0	0
16	广西北流 5.2 级	0.58	0.10	0	0
17	甘肃夏河 5.7 级	40.76	7.85	0	0
18	四川资中 5.2 级	2.56	0.53	0.22	0
19	湖北应城 4.9 级	0.75	0.14	0.04	0
20	新疆库车 5.6 级	0.09	0	0	0
21	新疆伽师 6.4 级	881.23	10.79	0.83	1
22	四川青白江 5.1 级	2.99	2.93	0.05	0
23	西藏改则 5.1 级	0.77	0	0	0
24	西藏定日 5.9 级	34.79	0.04	0	0
25	四川石渠 5.6 级	6.46	0.08	0	0
26	云南巧家 5.0 级	0.91	0.09	0	4
27	西藏比如 6.1 级	415.05	2.53	0	0
28	新疆拜城 5.4 级	0.53	0	0	3
29	云南漾濞 6.4 级	5323.11	790.72	3.71	3
30	青海玛多 7.4 级	12273.21	195.06	0.23	0
31	云南双柏 5.1 级	0.25	0	0	0
32	云南盈江 5.0 级	0.22	0.02	0	0
33	四川泸县 6.0 级	7622.41	1302.25	42.04	3
34	云南宁蒗 5.5 级	12.57	0.10	0.02	0
35	青海门源 6.9 级	14852.62	404.45	0	0
36	四川兴文 5.1 级	0.66	0.04	0.06	0
37	四川芦山 6.1 级	1678.78	61.82	0.65	4
38	四川马尔康 6.0 级	121.20	0.61	0.01	0

情况,在无人员死亡的震例中,房屋分布情况可以近似看作更为精细和真实的人口分布,因此对于零死亡地震的评估结果较为准确。

## 2.2 有死亡震例计算结果

对于本研究选取的9个有人员死亡的地震,三种模型的评估结果同样为模型三略优于模型二,两者均显著优于模型一(表2)。模型一有5次评估与真实死亡人数相差10倍以上,最高达2540余倍。

表 2 2018—2022 年有人员死亡地震的模型评估结果比较

时间 (年-月-日)	地震	真实死亡 人数	模型一 评估结果	模型二 评估结果	模型三 评估结果
2019-02-25	四川荣县 4.9 级	2	-0.36	-1.06	-1.85
2019-06-17	四川长宁 6.0 级	13	3716.28	246.41	80.88
2019-09-08	四川威远 5.4 级	1	5.54	3.79	-0.43
2020-01-19	新疆伽师 6.4 级	1	880.23	9.79	-0.17
2020-05-18	云南巧家 5.0 级	4	-3.09	-3.91	-4.00
2021-03-24	新疆拜城 5.4 级	3	-2.47	-3.00	-3.00
2021-05-21	云南漾濞 6.4 级	3	5320.11	787.72	0.71
2021-09-16	四川泸县 6.0 级	3	7619.42	1299.25	39.04
2022-06-01	四川芦山 6.1 级	4	1674.78	57.82	-3.35

与零死亡地震相比明显不同的是,如出现人员死亡的情况,模型二和模型三的评估结果会偶尔出现偏小的情况,模型二的评估结果中有3次偏小,模型三有6次偏小。总体而言,对本研究选取的震例(除四川长宁6.0级和四川泸县6.0级地震),模型二和模型三对于有人员死亡地震的评估结果在数量级上是基本准确的。

值得注意的是,模型三计算值偏小的情况更为严重,原因可能在于部分震例的人员死亡是由次生地质灾害或其他致死因素偶发导致的,而该模型在死亡人数的计算中偏重房屋埋压致死情况。该方法隐含的条件是地震人员伤亡主要是由于房屋倒塌引起的,该依据已经过大量实际震例检验,但在面对次生灾害(或其他致死因素)主导人员死亡的情况下可能存在评估理论值偏低的问题。因此,对于那些存在地质条件复杂、震时气象条件不利等其他明显致死因素的地震,应视条件适当增益模型三的评估结果。

据此,可以初步得出以下结论:①从地震致死因素的角度来说,模型一偏重真实地震烈度,模型三偏重房屋倒塌情况,在面对主导致死因素不同于此两种因素时,两类模型的评估误差可能较大,其中模型一很可能出现数量级偏差;②从计算所需数据和计算效率来说,模型一和模型二需求较少,模型实现的逻辑较为简单,仅需确保人口数据的准确性即可快速完成评估结果的输出,而模型三因涉及震害矩阵和房屋分布情况,基础资料的实时性、准确性和可获得性都存在较大难度,制约了该模型的实现基础;③本研究选取的三种模型虽已经过多年的实际应用检验,但现今模型一已经不具备实际应用价值,模型二和模型三在评估工作中仍具有一定的参考意义,而参考时却受到“是否有人伤亡”“何为致死因素”等先验条件的制约。

### 3 结语

地震发生第一时间,评估人员(模型)无法知晓是否已有人员死亡,这不利于模型的选择。如在震后尽快(2h 以内)获悉人员死亡信息,就可以作为可靠的先验条件选择适宜的评估依赖模型,进而在修正评估中给出更接近真实死亡人数的评估结果。因此,对于灾情复杂的地震,评估并非一蹴而就,在初步掌握关键灾情信息后的评估修正工作因其准确性更高也具有重要的意义。

地震致死过程是一个复杂系统,变量繁多,现有条件下难以通过穷举的方法刻画各变量间的作用过程,地震应急评估作为对这个复杂系统输出的估计,仅能从主要致死因素出发,对地震人员死亡做出大致的估计,在此过程中的“主要因素”应根据实际情况权宜取舍,这就需要进行更深入分析各类地震的致死因素,提升模型的适用性水平。同时,地震应急评估工作经过多年发展,已经形成了多种评估思路,积累了大量的数学模型(参数),如何科学有效地使用这些模型(参数),也是下一步工作的要点。

**致谢:** 本研究所使用的真实地震现场调查数据来源于四川省地震局、云南省地震局、新疆维吾尔自治区地震局、青海省地震局、西藏自治区地震局、甘肃省地震局、贵州省地震局、广西壮族自治区地震局、湖北省地震局、吉林省地震局等单位,在此一并表示感谢;本研究使用的人口和房屋数据分别来自 WorldPop Hub 的公开数据和地震行业科研专项项目《南北地震带大震极灾区速判及关键技术研究》和国家地震社会服务工程项目的成果数据,在此特别致谢。

### 参考文献

- 程家喻,杨喆. 1996. 评估地震人员伤亡的软件系统. 地震地质, **18**(4):462~470.
- 冯志泽,何钧,陈惠云. 1996. 地震人员伤亡预测研究——以鲁南地区为例. 地震学刊, (1):58~62.
- 李金香,常想德,赵朔,等. 2018. 新疆喀什库尔干塔吉克自治县地震极灾区地震烈度遥感快速评估研究. 中国地震, **34**(3):513~524.
- 李永强,. 2009. 云南人员震亡研究. 博士学位论文. 合肥:中国科学技术大学.
- 李晓杰. 2012. 强震人员损失回归预测方法. 西北地震学报, **34**(1):44~49.
- 林均岐,钟江荣. 2003. 地震间接经济损失研究综述. 世界地震工程, **19**(3):1~5.
- 马秀珍,谷平,甄宇同,等. 2000. 海城市南台镇地震经济损失预测与人员伤亡的估计. 东北地震研究, **16**(1):69~72.
- 马玉宏,谢礼立. 2000. 关于地震人员伤亡因素的探讨. 自然灾害学报, **9**(3):84~90.
- 苗崇刚,聂高众. 2004. 地震应急指挥模式探讨. 自然灾害学报, **13**(5):48~54.
- 聂高众,徐敬海. 2018. 基于震源深度的极震区烈度评估模型. 地震地质, **40**(3):611~621.
- 宋平,聂高众,邓砚,等. 2016. 基于现场调查的地震灾害损失预评估——以云南省德宏傣族景颇族自治州为例. 地震地质, **38**(4):1148~1159.
- 田鑫,朱冉冉. 2012. 基于主成分分析及 BP 神经网络分析的地震人员伤亡预测模型研究. 西北地震学报, **34**(4):365~368.
- 王东明,高永武. 2019. 城市建筑群概率地震灾害风险评估研究. 工程力学, **36**(7):165~173.
- 魏本勇,聂高众,苏桂武,等. 2017. 地震灾害埋压人员评估的研究进展. 灾害学, **32**(1):155~159.
- 吴将丰,王海霞. 2013. 基于 AMOS 的地震人员伤亡影响因素分析. 地震工程与工程振动, **33**(2):221~228.
- 肖光先. 1991. 震后灾害损失快速评估. 灾害学, **6**(4):12~17.
- 许建东,危福泉,张来泉,等. 2008. 地震人员伤亡与压埋人员评估方法的初步研究——以福建省漳州市区为例. 地震研究, **31**(4):382~387.
- 杨杰英,李永强,刘丽芳,等. 2007. 地震三要素对地震伤亡人数的影响分析. 地震研究, **30**(2):182~187.

- 杨天青,姜立新. 2005. 关于地震灾害快速评估系统的思考. 地震, **25**(3):123~128.
- 尹之潜. 1991. 地震灾害损失预测研究. 地震工程与工程振动, **11**(4):87~96.
- 尹之潜. 1994. 地震灾害损失预测的动态分析模型. 自然灾害学报, **3**(2):72~80.
- 尹之潜. 1996. 结构易损性分类和未来地震灾害估计. 中国地震, **12**(1):49~55.
- 尹之潜,李树桢,杨淑文,等. 1990. 震害与地震损失的估计方法. 地震工程与工程振动, **10**(1):99~108.
- 张俊玲,宋莉萍,钟心,等. 2006. 甘肃地震造成人员伤亡的要素分析. 高原地震, **18**(4):62~68.
- 张维佳,杨天青,白仙富,等. 2021. 基于地区差异修正因素的川滇地区地震人员伤亡动态评估方法研究. 中国地震, **37**(1):197~205.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 2014. GB/T 30352-2013 地震灾情应急评估. 北京: 中国标准出版社.
- 诸井孝文,宫村正光,许晏萍. 1999. 地震人员伤亡预测与研究现状. 国际地震动态, (3):25~30.
- 邹其嘉,毛国敏,孙振凯,等. 1995. 地震人员伤亡易损性研究. 自然灾害学报, **4**(3):60~68.
- Kircher C A, Whitman R V, Holmes W T. 2006. HAZUS earthquake loss estimation methods. Nat Hazards Rev, **7**(2):45~59.
- Xia C X, Nie G Z, Fan X W, et al. 2020. Research on the rapid assessment of earthquake casualties based on the anti-lethal levels of buildings. Geomatics, Nat Hazards Risk, **11**(1):377~398.
- Xia C X, Nie G Z, Li H Y, et al. 2022. Study on the seismic lethal level of buildings and seismic disaster risk in Guangzhou, China. Geomatics, Nat Hazards Risk, **13**(1):800~829.

## Application Effect of Commonly Used Models in Earthquake-induced Death Assessment

Wen Xintao<sup>1)</sup>, Zhang Meng<sup>2)</sup>, Li Xiaoli<sup>1)</sup>, Xu Zhishuang<sup>1)</sup>

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Guizhou Earthquake Agency, Guiyang 550004, China

**Abstract** This study examines 38 significant real-world earthquake events that occurred in the Chinese Mainland from 2018 to 2022, employing three distinct models to estimate the death toll associated with each event. These estimates are then compared against the actual fatalities to evaluate the models' accuracy. The models assessed include two intensity-based estimation models and one earthquake damage matrix model. The findings reveal that, among the cases reviewed, the earthquake damage matrix model demonstrates the highest precision in evaluating the number of deaths caused by earthquakes over the past five years. This underscores the importance of selecting the appropriate model based on the specific circumstances of an earthquake. Furthermore, the study highlights that the preconditions under which an earthquake results in fatalities are crucial for model selection. The post-earthquake evaluation is not a one-time task but an iterative process of refinement within a constrained timeframe. This continuous correction is essential for enhancing the accuracy and reliability of death toll assessments following earthquake events.

**Keywords:** Assessment of earthquake fatalities; Statistical regression model; Building damage matrix model