

吴新燕, 顾建华, 吴昊昱. 2009. 地震报道死亡人数随时间变化的修正指数模型. 地震学报, 31(4): 457-463.  
Wu Xinyan, Gu jianhua, Wu Haoyu. 2009. A modified exponential model for reported casualties during earthquakes.  
*Acta Seismologica Sinica*, 31(4): 457-463.

# 地震报道死亡人数随时间变化 的修正指数模型<sup>\*</sup>

吴新燕 顾建华 吴昊昱

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 震后对地震死亡人数做出可靠的估计, 可以为现场抗震救灾指挥部的指挥部署和民政部门的救灾安排工作提供有益的参考, 能在一定程度上提高抗震救灾的效率. 作者收集了汶川地震各时刻的死亡人数, 采用修正指数曲线进行拟合, 并与指数函数进行了比较, 同时又用集集地震和阪神地震的数据进行了验证, 结果均表明修正指数曲线的拟合结果较好. 该拟合函数可能形成地震死亡人数的估计方法, 并为各级抗震救灾指挥部提供救灾决策的参考.

**关键词** 地震 报道死亡人数 修正指数曲线

文章编号: 0253-3782(2009)04-0457-07 中图分类号: P315. 9 文献标识码: A

## A modified exponential model for reported casualties during earthquakes

Wu Xinyan Gu jianhua Wu Haoyu

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Making reliable estimation of the casualties after an earthquake provides useful information for deploying and arranging relief work, and improves the efficiency of earthquake relief work to a certain extent. The authors have collected the casualties of 2008 Wenchuan earthquake, 1999 Jiji (Chi-Chi), earthquake and 1995 Kobe, Japan, earthquake, and fitted the data by using a modified exponential function. The result shows that the fitness of the modified exponential model is better than the previous. We may estimate final possible casualties of future great earthquakes using this corrected model.

**Key words:** earthquake; reported casualties; modified exponential model

## 引言

减轻人员伤亡是防震减灾工作的一项重要目标, 国内外许多专家学者都对地震死亡的规律进行了探索研究. Lomnitz(1970)研究了1570—1960年发生在智利的22次7—8级地

\* 基金项目 地震行业科研专项(200708052)资助. 中国地震局地球物理研究所论著 09AC1004.

收稿日期 2008-12-04 收到初稿, 2009-02-10 决定采用修改稿.

通讯作者 e-mail: jh.gu@263.net

震发震时刻与最终死亡人数的关系; Christokov 和 Samardjieva(1984)提出了死亡人数与震级和人口密度的关系式, Samardjieva 和 Oike(1992)对日本地震死亡人数、Wyss(2005)对喜马拉雅地区的地震死亡人数进行了统计, 并得出这两个地区的死亡人数与震级和人口密度的关系式。傅征祥和李革平(1993)也研究了地震人员死亡数与震级、地震发生时刻的关系, 但均未关注某一地震报道死亡人数随时刻变化的规律。从 1995 年开始, 国内开始对地震中报道死亡人数随时间变化的规律进行研究, 取得了可喜的进展。洪时中(1995)对日本兵库县南部地震伤亡人数和房屋破坏的特点做了分析和归纳; 王景来和杨子汉(1997)研究了日本阪神地震和云南丽江地震震害, 给出地震伤亡人数随时间变化, 并指出用时程曲线对救灾辅助决策的意义; 高建国和贾艳(2005)将几十次地震的报道死亡人数进行归一化, 用 4 次多项式来拟合报道死亡人数随时间的变化, 较好地拟合了地震死亡人数与震后时间的关系, 但该模型的物理意义不明确; 刘倬和吴忠良(2005)提出了用指数模型来描述地震死亡人数与震后时间的关系。

本文在跟踪收集了汶川大地震的死亡人数数据的基础上, 运用修正指数曲线研究了汶川地震震后报道死亡人数( $N$ )与时间( $t$ )的关系, 取得了较为满意的结果。利用该方法可快速估计大震后死亡人数随时间的变化, 可为今后指导抗震救灾工作、部署救援力量提供参考依据。

## 1 数据来源

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分 04 秒, 四川汶川县发生 8.0 级地震, 给四川省和周边省区造成了重大的人员伤亡和财产损失。地震发生后, 作者及时收集国家新闻办公室和国家抗震救灾指挥部联合发布的死亡人数据(表 1), 得到了 2008 年 5 月 12 日至 6 月 2 日报道死亡人数( $N$ )随时间( $t$ )变化曲线(图 1)。从图 1 可以看出, 震后  $N$  随  $t$  增加呈增长的趋势, 经过两周的时间达到最终报道数的 90%。至 6 月 2 日,  $N$  已经非常接近目前国家公布的最终数字(不包括失踪人数), 增速缓慢趋近于 0。

表 1 汶川地震后报道死亡人数据(2008 年 5 月 12 日至 6 月 2 日)

Table 1 Reported casualties after 2008 Wenchuan M8.0 earthquake up to June 2, 2008

序号	报到时间		震后时间 $t/h$	报道死亡 人数 $N$	序号	报到时间		震后时间 $t/h$	报道死亡 人数 $N$
	月-日	时:分				月-日	时:分		
1	5-12	16:00	1.5	4	15	5-21	12:00	213.5	41 353
2	5-12	18:00	3.5	107	16	5-22	10:00	235.5	51 151
3	5-12	21:00	6.5	157	17	5-22	19:00	244.5	55 239
4	5-12	22:00	7.5	592	18	5-23	12:00	261.5	55 740
5	5-12	22:50	8.3	8 533	19	5-24	12:00	285.5	60 560
6	5-13	17:00	26.5	11 921	20	5-25	12:00	309.5	62 664
7	5-13	19:00	28.5	12 012	21	5-26	12:00	333.5	65 080
8	5-14	14:00	47.5	14 866	22	5-27	12:00	357.5	67 183
9	5-15	16:00	73.5	19 500	23	5-28	12:00	381.5	68 109
10	5-16	14:00	95.5	22 069	24	5-29	12:00	405.5	68 516
11	5-17	14:00	119.5	28 881	25	5-30	12:00	429.5	68 858
12	5-18	14:00	143.5	32 477	26	5-31	12:00	453.5	68 977
13	5-19	16:00	169.5	34 073	27	6-01	12:00	477.5	69 016
14	5-20	18:00	195.5	40 075	28	6-02	12:00	501.5	69 019

## 2 方法

刘倬和吴忠良(2006)提出了用指数模型来描述地震死亡人数与震后时间的关系, 认为尚未发现的死亡人数越多, 就越容易发现死亡人数. 设  $N_0$  为最终死亡人数, 则  $N_0 - N$  是尚未发现的死亡人数. 如果救灾效率为衡定的常数  $\alpha$ , 则  $\alpha(N_0 - N)$  为单位时间内发现的死亡数  $\Delta N / \Delta t$ , 即

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \alpha(N_0 - N) \quad (1)$$

对上式求原函数, 得到  $N$  与  $t$  的关系

$$N = N_0(1 - e^{-\alpha t}) \quad (2)$$

由最近十几年来国内外 21 次地震死亡人数随时间变化的综合曲线(高建国, 贾艳, 2005)可知, 地震刚发生的数天内, 死亡人数呈快速增长趋势. 随着时间的推移和救援工作的深入, 发现生还者的可能性逐步减少, 死亡人数的增速逐渐缓慢, 直至趋于饱和值. 图 1 所显示的汶川地震各时刻死亡人数的变化曲线基本符合这个规律. 尽管相邻时刻的最大增速出现在 235.5 小时, 而不是出现在前几个点, 但对于特大罕遇地震来说也是可能的. 地震发生后, 道路和通讯中断, 地震造成的真实人员伤亡数字不可能在短时间内全部报送到上级部门, 地震前几天政府发布的官方数据可能是局部的破坏和损失, 直到大批的救灾部队进入重灾区开展全面救援后, 数据才得以完全呈现.

上述规律完全符合时间序列长期趋势预测模型中的修正指数曲线所描述的现象, 因此, 我们利用这个曲线就可以拟合出  $N$  与  $t$  的关系

$$N = N_0 + a \cdot b^t \quad (3)$$

式中,  $N_0$ ,  $a$  和  $b$  为未知常数,  $N_0 > 0$ ,  $a \neq 0$ ,  $0 < b \neq 1$ . 这里的  $N_0$  为最终可能死亡人数,  $b$  为死亡人数的平均发展速度.

式(2)实际上是式(3)的一种特殊形式, 式(3)则是式(2)的推广. 式(3)以待定常数  $b$  为底. 而式(2)以  $e^{-\alpha}$  为底. 在式(3)中, 3 个系数均为待定, 需要依靠数列本身的规律来确定. 显然, 式(3)比式(2)所确定的系数更贴近于实际情形.

由于  $N_0$ ,  $a$  和  $b$  均未知, 式(3)宜采用统计学中的三和法来估计参数(贾俊平, 2007). 所谓三和法就是将观测值等分成 3 段, 每段含有  $n$  个数据, 对各段求和, 然后解含有 3 个未知参数的 3 个方程组, 各参数的表达式由下式给出:

$$\begin{cases} b = \left( \frac{S_3 - S_2}{S_2 - S_1} \right)^{\frac{1}{n}} \\ a = (S_2 - S_1) \frac{b - 1}{b(b^n - 1)^2} \\ N_0 = \frac{1}{n} \left( S_1 - \frac{ab(b^n - 1)}{b - 1} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  分别为观察值的 3 段总和.

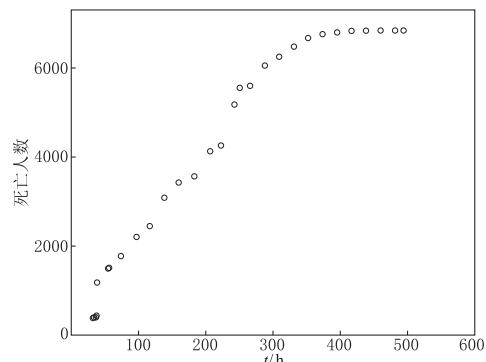
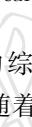


图 1 汶川地震后报道死亡人数随时间的变化

Fig. 1 Change of reported casualties after Wenchuan earthquake with time



下面我们用这两种方法分别对汶川地震的死亡人数进行拟合并比较.

### 3 结果

#### 3.1 指数函数的拟合结果

利用截至 6 月 2 日汶川地震死亡人数的数据, 我们用 SPSS15.0 统计软件计算, 得到指数模型为

$$N_{\text{汶川}} = N_0 (1 - e^{-at}) \quad (5)$$

其中,  $N_0$  和  $a$  及其在 95% 置信水平下的误差分别为  $88\ 877 \pm 11\ 557$  和  $0.004 \pm 0.000\ 5/\text{h}$ .

将  $t=717.5$  代入该模型, 得到 6 月 11 日 12 时的死亡人数预测值为 81 663 人, 实际为 69 146 人, 相对误差为 18%.

如果利用截至 5 月 21 日汶川地震死亡人数的数据, 则得到  $N_0$  和  $a$  及其在 95% 置信水平下的误差分别为  $51\ 993 \pm 17\ 447$  和  $0.007 \pm 0.004/\text{h}$ .

将  $t=717.5$  代入模型, 得到 6 月 11 日 12 时的死亡人数预测值为 51 651 人, 比实际值低了将近 2 万人, 相对误差为 25%.

#### 3.2 修正指数曲线的拟合结果

在使用修正指数曲线对汶川地震进行拟合时, 各死亡人数的时间点必须为等间距. 表 1 显示地震第二天以后大部分数据的时间间隔基本在 24 小时左右. 为保持截至时刻的一致性, 我们还对所使用的数据进行了线性插值处理, 且  $\Delta t=24$ . 将这 21 个数据平分为 3 段,  $n=7$ . 表 2 为经插值后的死亡数字与一阶差分环比.

表 2 汶川地震插值后死亡人数及分析表

Table 2 Interpolated casualties after the Wenchuan earthquake and associated analysis

序号	震后时间 $t/\text{h}$	插值后死亡 人数 $N$	一阶差分环比	序号	震后时间 $t/\text{h}$	插值后死亡 人数 $N$	一阶差分环比
1	21.5	11 149		12	285.5	60 560	1.309
2	45.5	14 565		13	309.5	62 664	0.437
3	69.5	18 638	1.192	14	333.5	65 080	1.148
4	93.5	21 856	0.790	$S_2$		376 331	
5	117.5	28 313	2.007	15	357.5	67 183	0.870
6	141.5	32 176	0.598	16	381.5	68 109	0.440
7	165.5	34 073	0.491	17	405.5	68 516	0.440
$S_1$		160 770		18	429.5	68 858	0.840
8	189.5	38 875	2.531	19	453.5	68 977	0.348
9	213.5	41 353	0.516	20	477.5	69 016	0.328
10	237.5	52 059	4.320	21	501.5	69 019	0.077
11	261.5	55 740	0.344	$S_3$		479 678	

通过计算各点死亡人数的一阶差分环比, 发现其总在一个常数上下范围内波动, 可以认为选用修正指数曲线模型是比较合理的.

将有关数据代入式(4)中, 得到

$$\begin{cases} b=0.900 \\ a=-88\ 085 \\ N_0=82\ 123 \end{cases} \quad (6)$$

由式(3)得汶川地震死亡人数的修正指数模型为

$$N = 82\,123 - 88\,085 \times 0.900^t \quad (7)$$

利用式(7)的模型计算各时间点的预测值和相对误差 $\epsilon_t$ , 求得平均绝对百分比误差 $\bar{\epsilon}$ , 来考察模型的预测效果

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{21} \sum_{t=1}^{21} \frac{|\epsilon_t|}{N_t} \times 100\% = 10\%$$

结果表明,  $\bar{\epsilon}$  为 10%. 可见预测模型有一定的精度, 可以用于趋势预测.

将  $t=30$  代入模型, 得到 6 月 11 日 12 时的死亡人数预测值为 78 389 人, 实际为 69 146 人, 相对误差为 13%.

在实际应用这种方法时, 我们还可以将更多的数据用于模型中, 以预测 3 周甚至一个月后可能的死亡人数. 以 2008 年 5 月 21 日之前的数据为例( $n=3$ ), 经过计算得出死亡人数的修正指数模型为

$$N = 94\,486 - 89\,348 \times 0.944^t \quad (8)$$

此时的 $\bar{\epsilon}$  为 8%, 也在可允许范围内.

将  $t=30$  代入模型, 得到 2008 年 6 月 11 日 12 时的死亡人数预测值为 78 628 人, 相对误差为 13.7%.

图 2 和图 3 分别为汶川地震死亡人数的指数函数及修正指数曲线拟合结果与实际值的比较. 从两种方法的拟合结果和相对误差可以看出, 拟合所利用的数据越少, 估计最终实际死亡数的相对误差越大; 利用的数据越多, 也就是截止时间越长, 估计值也就越逼近于最终实际数. 这与实际情况是相符的.

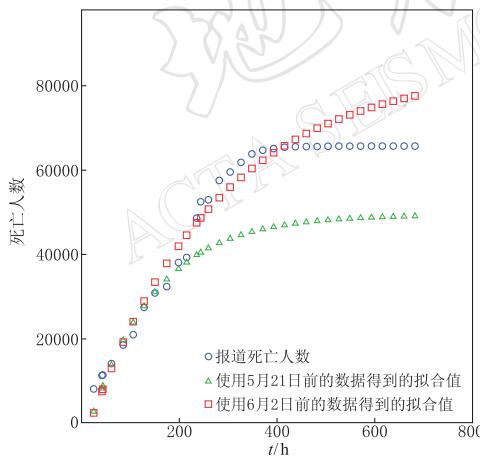


图 2 汶川地震死亡人数指数曲线  
拟合值和实际值

Fig. 2 Actual (circles) and fitted casualties (triangles and squares) in 2008 Wenchuan M8.0 earthquake. Actual data is fitted with an exponential function.

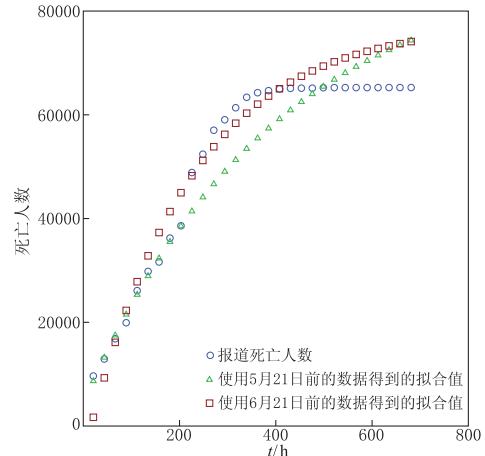


图 3 汶川地震死亡人数修正指数曲线  
拟合值与实际值

Fig. 3 Actual (circles) and fitted casualties (triangles and squares) in 2008 Wenchuan M8.0 earthquake. Actual data is fitted with a corrected exponential function.

## 4 集集地震和阪神地震的比较和分析

为了说明修正指数曲线和指数函数拟合方法的可行性, 我们还利用集集地震(石富元, 2006)和阪神地震(洪时中, 1995)的数据作为比较. 表 3 为 3 次地震的拟合结果和检验, 图 4 和图 5 分别为集集地震和阪神地震死亡人数的修正指数曲线的拟合结果与实际值的比较.

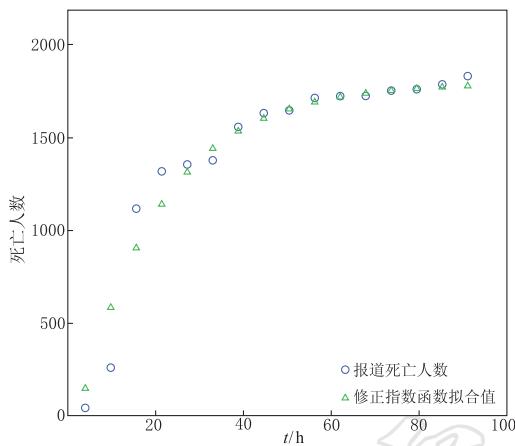


图 4 集集地震死亡人数拟合值和实际值

Fig. 4 Fitted and actual casualties in JiJi earthquake using modified exponential function

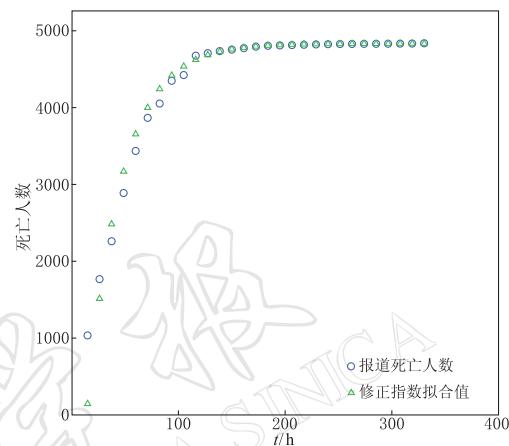


图 5 阪神地震死亡人数拟合值和实际值

Fig. 5 Fitted and actual casualties in Kobe earthquake using modified exponential function

表 3 使用两种函数对 3 次地震的拟合结果及检验

Tabel 3 Fitted casualties in Wenchuan earthquake, JiJi earthquake and Kobe earthquake using two kinds of function

震例	N	指数函数拟合参数及检验					修正指数曲线拟合参数及检验				
		$N_0$	$\alpha/h$	$\bar{\epsilon}$	$\epsilon_t$	$N_0$	$a$	$b$	$\bar{\epsilon}/$	$\epsilon_t/$	
汶川地震	69 146	$88\ 877 \pm 11\ 557$	$0.004 \pm 0.000\ 5$	12%	18%	82 123	-88 085	0.900	10%	13%	
集集地震	2 079	$2\ 040 \pm 74$	$0.059 \pm 0.009$	3.9%	-2.16%	2 055	-1 353	0.728	4.8%	-2.07%	
阪神地震	5 102	$5\ 209 \pm 137$	$0.019 \pm 0.001$	10.5%	2%	5 097	-7 078	0.708	5%	-0.078%	

注: 所使用的数据均截至 2008 年 6 月 2 日, 相对误差  $\epsilon_t$  为 6 月 2 日 12 时预测值与实际值的误差.

从 3 次地震估计死亡人数与实际值的相对误差来看, 修正指数曲线的拟合结果与实际值的相对误差显然都比指数函数的相对误差要小得多; 从平均绝对百分比误差  $\bar{\epsilon}$  也可以看出, 除集集地震以外, 其它两次地震的  $\bar{\epsilon}$  均比修正指数曲线高出不少. 这两点可以说明修正指数曲线比指数函数有更高的精度.

综合表 3 的数据以及图 4、图 5 的曲线来看, 修正指数曲线比指数函数更加适用于各种地震死亡人数的估计.

## 5 讨论与结论

修正指数曲线拟合方法适用于地震至少 3 天后已经获得较多数据时对最终死亡人数的

估计, 并且参与拟合的数据越多, 最终时刻的估计值也越接近实际值。从拟合值与实际值的相对误差来看, 修正指数曲线的拟合效果比指数函数更好一些。如果能够掌握更短的时间间隔(比如12小时甚至6小时)的连续报道死亡人数信息, 则可以在更短的时间内做出最终预测。

通过对集集地震、阪神地震以及汶川地震各时刻死亡人数的数值拟合结果, 可以看出修正指数曲线能够较好地描述地震死亡人数随时间变化的规律, 从而可为各级抗震救灾指挥部提供救灾决策的参考。

当然, 如果要对地震造成的最终死亡人数做出更为准确的估计, 则除了时间变化因素外, 还应对震级、烈度、房屋破坏状态、灾区地理环境、甚至居民的防灾能力等社会因素的复杂关系进行相关研究。

## 参 考 文 献

- 傅征祥, 李革平. 1993. 地震生命损失研究[M]. 北京: 地震出版社: 48.
- 高建国, 贾艳. 2005. 地震救援能力的一项指标: 地震灾害发布时间的研究[J]. 灾害学, **20**(1): 31-35.
- 洪时中. 1995. 对日本兵库县南部地震震灾统计时程曲线的初步分析[J]. 国际地震动态, (5): 10-14.
- 贾俊平. 2007. 统计学[M]. 北京: 中国人民大学出版社: 401-421.
- 刘倬, 吴忠良. 2005. 地震和地震海啸中报道死亡人数随时间变化的一个简单模型[J]. 中国地震, **21**(4): 72-75.
- 石富元. 2006. 灾难医疗救护队的省思与设计[EB/OL]. [2008-06-21] [http://www.etan.com.tw/ndmat/upload/disaster\\_handout/1\\_9.pdf](http://www.etan.com.tw/ndmat/upload/disaster_handout/1_9.pdf).
- 王景来, 杨子汉. 1997. 地震灾害时间进程法[J]. 地震研究, **20**(4): 424-430.
- Christoskov L, Samardjieva E. 1984. An approach for estimation of the possible number of casualties during strong earthquakes[J]. *Bulg Geophys*, **4**: 94-106.
- Lomnitz, C. 1970. Casualties and behavior of populations during earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **60**: 1309-1313.
- Samardjieva E, Oike K. 1992. Modelling the number of casualties from earthquakes[J]. *Journal of Natural Disaster Science*, **14**(1): 17-28.
- Wyss M. 2005. Human losses expected in Himalayan earthquakes[J]. *Natural Hazards*, **34**(3): 305-314.