

齐玉妍、孙丽娜、金学申等,2015,基于最大似然法的亚洲地震人口损失预测,中国地震,31(3),510~517。

基于最大似然法的亚洲地震人口损失预测

齐玉妍¹⁾ 孙丽娜¹⁾ 金学申¹⁾ 傅征祥²⁾

1) 河北省地震局,石家庄市槐中路 262 号 050021

2) 中国地震局地震预测研究所,北京 100036

摘要 亚洲是全球地震活动,特别是浅源地震活动最活跃的地区之一,由于亚洲大多数国家属于发展中国家,抗御地震的能力偏低,导致地震灾害十分严重。本文采用最大似然法,据亚洲 9 个国家历史上因各次地震死亡的人口资料,计算得到了各国不同时期因地震造成不同死亡度的概率曲线;另外,由各国每 10 年的人口统计资料,拟合得到各国人口的增长曲线。将历史上因各次强震的死亡人数归一到 2010 年人口的死亡数字,并以此数据给出了各国在考虑了人口增长情况下的因震人口损失预测结果。

关键词: 最大似然法 亚洲 地震 人口损失预测

[文章编号] 1001-4683(2015)03-0510-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震灾害损失预测研究是地震预测研究的重要组成部分,该研究可归结为预测未来地震对自然环境和人工建造环境破坏的程度、特征和机制,最终要求用社会经济损失的货币价值和人员伤亡数字去描述损失水平(傅征祥,1993;李晓杰等,2012;张维佳等,2013)。在一些人口密度较高地区,已积累了不少因地震造成的人口死亡资料,特别是每一次地震中的总死亡人数。在因地震造成的人员伤亡记录中,居民死亡人数比较容易判别,在某些情况下,使用死亡人数作为破坏程度的标志比房屋毁坏数和财产损失价值更有说服力(金学申等,1997、1998;傅征祥等,2002、2011)。

环太平洋地震带和欧亚地震带均穿过亚洲,这样的地理位置和地质构造使其成为世界上地震频发地区之一。近年来,亚洲发生了一系列破坏性地震并造成了重大的经济损失和人员伤亡,如 2003 年伊朗巴姆地震、2008 年中国汶川地震和 2011 年日本关东大地震等。抗御地震灾害、减轻经济损失和人员伤亡已成为亚洲各国的共同行动(蔡晓光等,2011;李岩峰等,2011)。

金学申等(1997)提出了基于最大似然法预测地震生命损失的概率方法,并将其用于中国 4 个地震区带。由于震害资料一般跨越时间尺度较长,故社会、文化、自然环境及人口诸

[收稿日期] 2014-11-26; [修定日期] 2015-08-21

[项目类别] 河北省地震科技星火计划“空间光滑地震活动性模型在河北省的中长期预报和地震危险性评价中的应用”、国家科技支撑计划课题(2008BAC44B02-0301)联合资助

[作者简介] 齐玉妍,女,1981 年生,硕士,工程师,主要从事中长期地震活动预测研究。E-mail: 15383018383@163.com

方面的变迁,会使同样震级的地震造成的人口损失具有明显差异。所以,如何在震害预测中考虑这样的差异性并给予一定程度的修正,是进行人口伤亡预测需要考虑的问题。金学申等(1997)指出,对震害资料进行归一化处理时要考虑的因素有人口总数、人口密度、房屋建筑质量、强震震级和文献记载的死亡人数等 5 个方面,并且通过计算认为,人口总数这一因子对最终结果影响最大。本文将最大似然法的地震生命损失预测用于亚洲 9 个地震多发国家,通过对 1950 年以来震害资料的分析,计算得到了未来不同时期因地震造成不同死亡度的概率曲线,并据人口总数这一因子进行修正,对 1950 年以来每个国家的人口增长情况进行拟合,得到地震发生年的人口总数,将历史地震资料中记载的死亡人数归一到 2010 年人口状况下的死亡人数,因目前的社会及经济状态发生很大变化,所以对这种归一必然要作出修正,本文给出了修正后的人口损失概率预测结果。

1 人口损失预测的最大似然法原理简介

本文定义死亡度 L 为描述某次地震造成人员死亡程度的量, $L = \lg D$, 其中 D 为某次地震中的死亡人数。假如某次地震造成人员死亡数为 10 人,那么死亡度为 1,以此类推。

众所周知,大小地震的频次-震级关系满足 G-R 关系式,又由于地震的大小与其造成的人口损失大小密切相关,故假定某一区域在足够长的时间段内可能要遭受多次地震动袭击,其损失大的概率要小于损失小的概率。

如果地震人口死亡度 L 与相应的频次 N_L 满足下式

$$\lg N_L = H - SL \quad (1)$$

其中, H 与 S 是回归系数,那么如果造成经济损失的地震是互相独立的,则在 t 时间段内最大人口损失小于给定人口损失 L_0 的概率为

$$G(L/t) = P_r(L \leq L_0) = \exp \left[-\lambda t \left(\frac{A_2 - A(L)}{A_2 - A_{10}} \right) \right] \quad (2)$$

其中, $A_{10} = \exp(-SL_{\min})$, L_{\min} 为计算中的起始损失值; $A_2 = \exp(-SL_{\max})$, L_{\max} 为区域中遭受到的最大损失; $A(L) = \exp(-SL)$; λ 是起始损失值以上的平均发生率。

从某一区域的历史震害记录中,据 n 个连续的时间间隔 $T(t_1, t_2, \dots, t_n)$ 可得到经济损失序列数据 $L(l_1, l_2, \dots, l_n)$, 参数 $\theta = (S, \lambda)$ 的最大似然函数 $F(\theta | L, T)$ 则由下式给定

$$F(\theta | L, T) = \prod_{i=1}^n g(L_i, T_i) \quad (3)$$

其中, $g(L, T)$ 是密度函数,形式为

$$\ln g(L, T | \theta) = -\lambda t \left(\frac{A_2 - A(L)}{A_2 - A_1} \right) + \ln \frac{S\lambda T}{A_{10} - A_2} - SL \quad (4)$$

令 $\partial \ln F / \partial \lambda = 0$ 和 $\partial \ln F / \partial S = 0$, 便得到 λ 与 S 的最大似然估计为

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\langle T \rangle A_2 - \langle TA \rangle}{A_2 - A_1} \quad (5)$$

$$\frac{1}{S} = \langle L \rangle - \frac{\langle TAL \rangle - \langle T \rangle L_{\max} A_2}{\langle TA \rangle - \langle T \rangle A_2} \quad (6)$$

其中

$$\left\{ \begin{array}{l} \langle T \rangle = \sum_{i=1}^n t_i/n \\ \langle L \rangle = \sum_{i=1}^n L_i/n \\ \langle TA \rangle = \sum_{i=1}^n t_i A(L_i)/n \\ \langle TAL \rangle = \sum_{i=1}^n t_i L_i A(L_i)/n \end{array} \right.$$

由于式(6)未导入 L_{\max} 最大似然估计,为了得到 L_{\max} ,引入附加条件

$$L_{\max} = E(L_{\max}/Et_i) \quad (7)$$

$$E(L_{\max}/\sum t_i) = L_{\max} - \frac{E_1(\sum t_i Z_2) - E_1(\sum t_i Z_1)}{\text{Sexp}(-\sum t_i Z_2)} \quad (8)$$

$$E_1(Z) = \int_0^{\infty} \exp(-\xi)/\xi d\xi$$

$$Z_1 = \lambda_1 A_{10}, Z_2 = \lambda_1 A_2, \lambda_1 = \lambda/(A_2 - A_{10})$$

由式(5)~(8),通过迭代法可以得到最大似然估计。在开始迭代时,将历史最大损失代入式(5)、(6),求得 S ,并以 $E(L_{\max}/t_i)$ 为 L_{\max} 值,由式(8)得到新的 L_{\max} ,反复迭代便可求得 λ 、 S 与 L_{\max} 的最大似然估计,并可由此得到不同时间段的震害损失概率曲线。

2 基于最大似然法的亚洲 9 个国家人口损失概率预测

2.1 人口损失资料的选择

1950~2005 年地震造成的人口损失资料取自《亚洲地震概要》附录一的“亚洲国家(地区)重要地震目录”(中国地震局监测预报司,2007);2005~2010 年人口损失资料采用美国地质调查局官方网站数据(<http://www.usgs.gov>)。

2.2 没有考虑人口增长因素的人口损失概率预测结果

表 1 为据最大似然法得到的亚洲 9 个国家未来 1、10、20、50 年地震造成不同死亡度的部分概率预测结果,这里没有考虑人口增长的因素。

2.3 考虑人口增长因素的人口损失概率预测结果

2.3.1 人口损失归一化处理

由于人口增长,各时间段相同的死亡人数的含义是不一样的。为了在同样的灾害水平上进行计算,设法对计算涉及到的各国人口增长进行归一。依据 geohive 网站 1950~2050 年亚洲各国的人口资料(<http://www.geohive.com>),拟合了各国的人口增长近似曲线。通过分析这些数据发现,用高斯拟合较能体现数据的发展态势,所研究的 9 个国家中印度尼西亚、伊朗、巴基斯坦、土耳其、印度、阿富汗、菲律宾等 7 个国家在 1950~2050 年间人口是一直增长的,而中国和日本分别从 1950 年的增长到 2030 年和 2010 年的顶峰开始有回落趋势。用高斯分布近似模拟各国的人口增长趋势,图 1 给出了中国和印度尼西亚的人口拟合曲线。由拟合公式推断出历史上每次地震发生年所对应的全国总人数,将历史上各次强震的死亡人数归一到 2010 年人口情况的死亡数值。

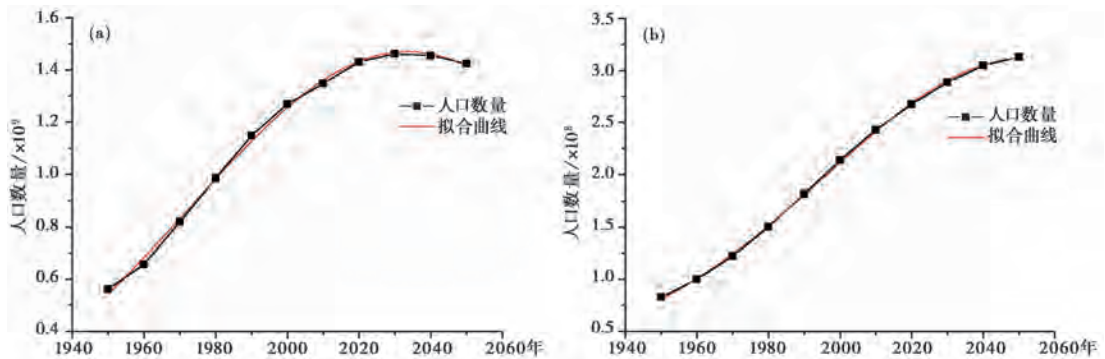


图1 1950~2050年中国(a)、印度尼西亚(b)的人口数量及拟合曲线

2.3.2 归一化处理后的地震人口损失概率预测结果

我们在进行归一化处理的基础上,得到了亚洲9个国家未来地震造成不同死亡度的概率预测结果,图2给出了考虑和不考虑人口增长因素的9个亚洲国家基于最大似然法的人口损失预测结果。

3 结论

(1)根据亚洲9个国家的震害资料,据最大似然法计算得到了未来1、10、20、50年因震灾造成不同死亡度的概率结果;考虑到各国研究时间段内人口增长的因素,不同历史时间死亡人数的含义是不一样的,故将人口损失进行归一化处理,得到了考虑人口增长情况下未来1、10、20、50年发生不同死亡度的概率结果(表1、表2和图2)。以未来20年发生人口损失10000人,即死亡度为4的情况进行比较,在不考虑人口增长的情况下,亚洲9个国家发生概率由大到小的排序(表1)为:印度尼西亚、巴基斯坦、伊朗、中国、印度、日本、土耳其、阿富汗、菲律宾;在考虑人口增长的情况下,亚洲9个国家发生概率由大到小的排序(表2)为:印度尼西亚、中国、日本、伊朗、巴基斯坦、印度、土耳其、阿富汗、菲律宾;考虑了人口增长因素后,所得的亚洲9个国家未来20年因地震发生人口损失10000人的概率由大到小的排序发生了变化,但印度尼西亚仍排在第一,中国由原来的第4位跃升到第2位,日本由原来的第6位跃升到第3位,而巴基斯坦由原来的第2位下降到第5位。

(2)根据李岩峰等(2011)的研究结果,2001~2010年亚洲发生万人以上死亡的地震事件有:2001年1月26日印度古吉拉特7.7级地震造成20023人死亡;2003年12月26日伊朗巴姆6.6级地震造成31000人死亡;2004年12月26日印度尼西亚苏门答腊9.1级地震造成227898人死亡;2005年10月8日巴基斯坦7.6级地震造成86000人死亡;2008年5月12日中国四川汶川8.0级地震造成87587人死亡。

利用上述国家在1950~2000年的震灾人员死亡数据,考虑人口损失归一化的最大似然概率计算,得到未来10年因震死亡万人以上的概率见表3。由表3可见,印度尼西亚、中国和伊朗在2001~2010年内发生死亡人数超万人的概率较高($P > 0.50$),而巴基斯坦和印度的概率较低。回顾性研究结果显示,本文的预测方法似乎具有一定的预测效能。

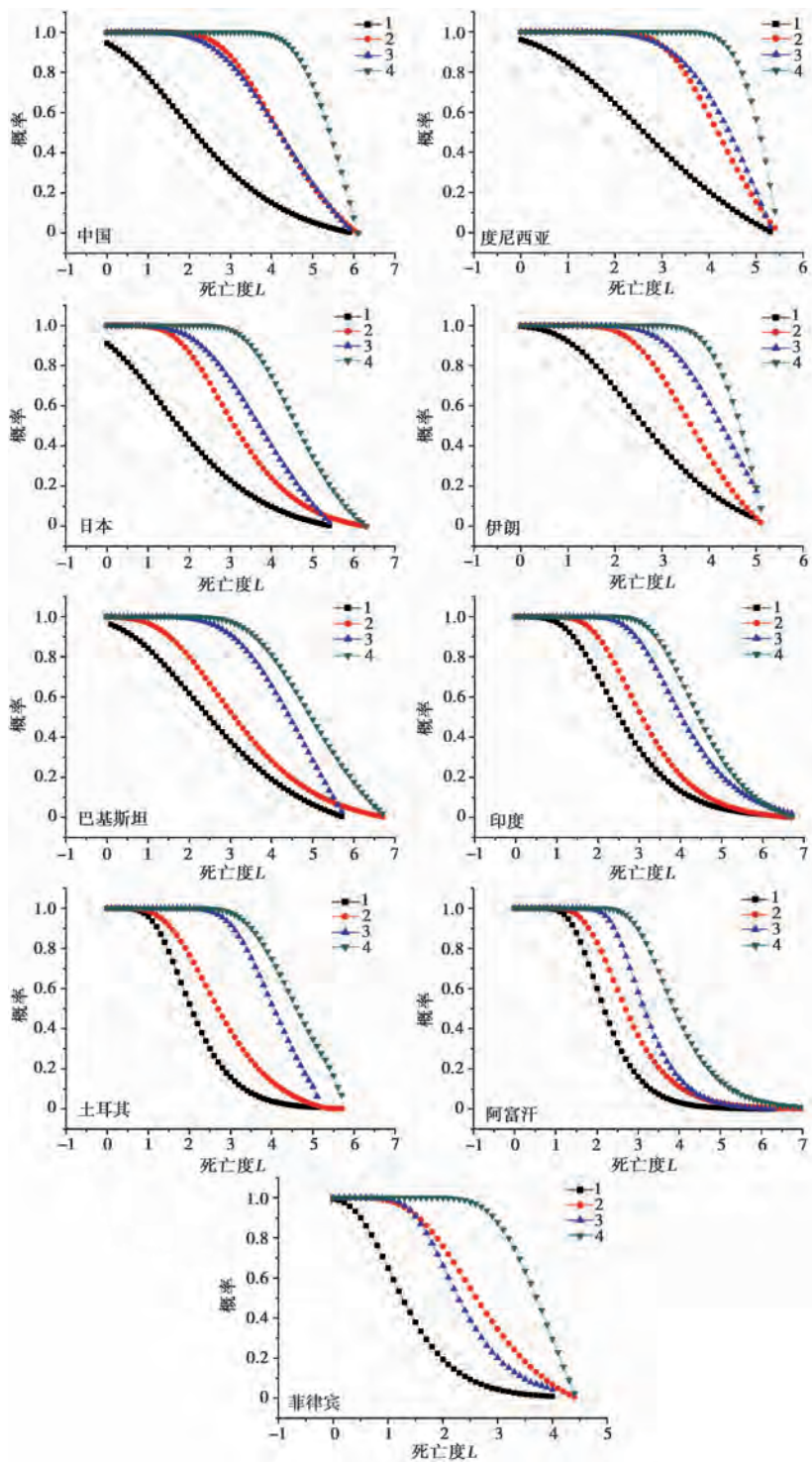


图2 不考虑和考虑人口增长条件下未来各国因地震导致的不同死亡度的概率结果

1. 不考虑人口增长情况未来10年发生概率; 2. 考虑人口增长情况未来10年发生概率;
3. 不考虑人口增长情况未来50年发生概率; 4. 考虑人口增长情况未来50年发生概率

表 1 不考虑人口增长因素的亚洲 9 个国家未来因地震死亡人数的预测结果

国名	死亡度 L	重复周期 /a	发生概率			
			1a	10a	20a	50a
中国	1	7.2	0.1392	0.7766	0.9501	0.9994
	2	13.7	0.0730	0.5314	0.7804	0.9774
	3	27.6	0.0362	0.3084	0.5217	0.8417
	4	61.3	0.0163	0.1515	0.2801	0.5603
印度尼西亚	1	5.9	0.1699	0.8447	0.9759	0.9999
	2	10.2	0.0981	0.6439	0.8732	0.9943
	3	19.3	0.0517	0.4119	0.6541	0.9296
	4	44.4	0.0225	0.2035	0.3656	0.6795
日本	1	8.8	0.1135	0.7002	0.9101	0.9976
	2	17.6	0.0567	0.4422	0.6888	0.9460
	3	38.0	0.0263	0.2340	0.4132	0.7362
	4	96.2	0.0104	0.0993	0.1887	0.4071
伊朗	1	4.5	0.2239	0.9207	0.9937	1.0000
	2	9.1	0.1098	0.6875	0.9023	0.9970
	3	20.3	0.0493	0.3968	0.6362	0.9202
	4	53.2	0.0188	0.1729	0.3159	0.6129
巴基斯坦	1	5.9	0.1681	0.8413	0.9748	0.9999
	2	10.9	0.0917	0.6178	0.8539	0.9918
	3	21.4	0.0467	0.3801	0.6158	0.9085
	4	47.4	0.0211	0.1921	0.3472	0.6557
印度	1	3.4	0.2963	0.9702	0.9991	1.0000
	2	8.7	0.1143	0.7029	0.9117	0.9977
	3	24.4	0.0409	0.3414	0.5662	0.8761
	4	70.9	0.0141	0.1324	0.2472	0.5084
土耳其	1	3.7	0.2724	0.9584	0.9983	1.0000
	2	14.0	0.0714	0.5233	0.7727	0.9754
	3	58.5	0.0171	0.1584	0.2917	0.5779
	4	250.0	0.0040	0.0393	0.0770	0.1816
阿富汗	1	2.6	0.3819	0.9919	0.9999	1.0000
	2	5.3	0.1877	0.8749	0.9844	1.0000
	3	57.8	0.0173	0.1601	0.2946	0.5821
	4	303.0	0.0033	0.0325	0.0640	0.1523
菲律宾	1	10.1	0.0995	0.6494	0.8771	0.9947
	2	46.7	0.0214	0.1945	0.3512	0.6610
	3	222.2	0.0045	0.0441	0.0863	0.2019
	4	1111.1	0.0009	0.0090	0.0178	0.0440

表 2 考虑人口增长因素的亚洲 9 个国家未来因地震死亡的预测结果

国家	死亡度 L	重复周期 /a	发生概率			
			1a	10a	20a	50a
中国	1	1.5	0.6860	1.0000	1.0000	1.0000
	2	2.5	0.3960	0.9935	1.0000	1.0000
	3	5.2	0.1923	0.8818	0.9860	1.0000
	4	12.3	0.0810	0.5703	0.8154	0.9854
印度尼西亚	1	1.2	0.8414	1.0000	1.0000	1.0000
	2	2.0	0.5106	0.9992	1.0000	1.0000
	3	4.3	0.2338	0.9303	0.9951	1.0000
	4	11.9	0.0841	0.5846	0.8274	0.9876
日本	1	17.6	0.0567	0.2227	0.6888	0.9460
	2	38.0	0.0263	0.0902	0.4132	0.7362
	3	96.2	0.0104	0.0330	0.1887	0.4071
	4	17.6	0.0567	0.2227	0.6888	0.9460
伊朗	1	1.7	0.5895	0.9999	1.0000	1.0000
	2	3.3	0.3013	0.9723	0.9992	1.0000
	3	7.9	0.1272	0.7435	0.9342	0.9989
	4	23.7	0.0422	0.3502	0.5778	0.8842
巴基斯坦	1	3.5	0.2880	0.9665	0.9989	1.0000
	2	6.7	0.1483	0.7992	0.9597	0.9997
	3	13.9	0.0718	0.5253	0.7747	0.9759
	4	30.6	0.0327	0.2828	0.4857	0.8103
印度	1	1.8	0.5419	0.9996	1.0000	1.0000
	2	4.4	0.2258	0.9226	0.9940	1.0000
	3	12.5	0.0800	0.5656	0.8113	0.9845
	4	38.0	0.0263	0.2340	0.4132	0.7362
土耳其	1	3.0	0.3380	0.9838	0.9997	1.0000
	2	7.4	0.1356	0.7671	0.9458	0.9993
	3	20.7	0.0483	0.3905	0.6285	0.9159
	4	68.0	0.0147	0.1376	0.2563	0.5231
阿富汗	1	2.0	0.4943	0.9989	1.0000	1.0000
	2	6.2	0.1619	0.8290	0.9708	0.9999
	3	22.4	0.0447	0.3670	0.5993	0.8984
	4	84.7	0.0118	0.1119	0.2113	0.4476
菲律宾	1	2.9	0.3449	0.9854	0.9998	1.0000
	2	7.6	0.1322	0.7578	0.9413	0.9992
	3	24.2	0.0414	0.3448	0.5707	0.8793
	4	142.9	0.0070	0.0678	0.1311	0.2962

表 3 2001~2010 年印度尼西亚、中国、伊朗、巴基斯坦、印度地震巨灾 ($D \geq 10000$) 预测回顾

国家	印度尼西亚	中国	伊朗	巴基斯坦	印度
P	0.68	0.65	0.51	0.47	0.42

(3) 由于人口损失资料受多种因素的影响, 本文考虑的人口总数只是其中之一。所以, 进一步分析与研究震害的因子并对资料进行标定是需要进一步研究的课题。

参考文献

- 蔡晓光、薄涛、薄景山等, 2011, 1950 年以来亚洲大地震及震害分析, 世界地震工程, **27**(3), 8~16。
- 傅征祥, 1993, 华北地区地震造成人员死亡的概率预测研究初探, 中国地震, **9**(2), 104~111。
- 傅征祥、刘桂萍、粟生平, 2002, 中国大陆地震死亡率的表度率及其在预测中的应用, 地震, **22**(2), 13~16。
- 傅征祥、孙丽娜、金学申, 2011, 亚洲国家地震生命损失的标度率及中长期预测研究, 地震, **31**(1), 52~57。
- 金学申、刘允清、刘志辉等, 1997, 人口损失的概率预测模型, 中国地震, **13**(3), 280~287。
- 金学申、张雷、刘允清等, 1998, 以死亡度为人口损失标志的概率预测模型, 华北地震科学, **16**(1), 10~16。
- 李晓杰、姜立新、杨天青, 2012, 强震人员损失回归预测方法, 西北地震学报, **34**(1), 44~49。
- 李岩峰、王广余, 2011, 2001~2010 年全球有人员死亡的灾害性地震综述, (11), 16~20。
- 张维佳、姜立新、李晓杰等, 2013, 汶川地震人员死亡率及经济易损性探讨, 自然灾害学报, **22**(2), 197~204。
- 中国地震局监测预报司, 2007, 亚洲地震概要 168~341, 北京: 地震出版社。

Life loss prediction in earthquakes based on maximum likelihood method in Asia

Qi Yuyan¹⁾ Sun Lina¹⁾ Jin Xueshen¹⁾ Fu Zhengxiang²⁾

1) Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract Asia is one of the most seismically active regions of the globe, especially the shallow earthquakes. Since most Asian countries are developing countries with low ability of earthquake resistance, leading to serious earthquake disasters. In this paper, the probability curves of mortality in the future of different periods have been obtained by the maximum likelihood method through the death database loss in earthquakes of 9 Asian countries. In addition, historical life death data is categorized into 2010 according to the population growth curves fitted by demographic data every ten years. The results of the life loss prediction considering the population increase have been obtained on this basis.

Key words: Maximum likelihood method Asia Earthquake Life loss prediction