

2005年前中国大陆地震震级概率预测^{*}

王晓青 傅征祥 蒋 铭

(中国北京 100036 国家地震局分析预报中心)

摘要 采用以地震震级-频度关系和贝努利随机独立试验模型为基础建立的地震震级概率预测方法, 对2005年前中国大陆各地震带的地震危险性进行了预测。结果表明, 2005年前, 中国大陆东部各地震带发生5级地震的概率一般在0.7以上, 大部分在0.8以上; 各地震带发生6级地震的概率一般在0.5~0.7之间; 7级地震发生的概率也以山西地震带最高, 可达0.0858。2005年前中国大陆西部各地震带普遍具有发生6级地震的可能性(一般达0.9以上); 发生7级地震的可能性在青藏高原周缘各地震带和南天山地震带相对较高(0.7以上)。本文最后对预测结果的可信度、预测概率大小与未来地震的年发生率之间的关系进行了讨论。

主题词 地震危险性 震级 震级概率预测 贝努利随机独立试验

引言

地震活动的基本特征表现为空间上的成区、成带性, 时间上的序列性和大小地震成比例性(即古登堡-里克特的震级-频度关系)。对未来一定地震区(带)地震活动强度的估计应遵循地震的时间序列特征和震级-频度关系。目前所采用的方法有马尔科夫过程, 极值估计和缺震估计等。马尔科夫过程将地震分为大小两类, 并组成相应的时间序列。极值理论只考虑每一时间分段中的极大地震。缺震估计法在统计大小地震比例关系的基础上, 采用不同震级的地震年发生率外推统计起始时段至未来几十年或百年的理论发震数, 并与实际已发生的地震数相比较, 若存在“缺失”, “缺失”的地震将由未来的地震补足; 若存在“盈余”, 一般不予考虑(傅征祥, 王晓青, 1993)。实际上, 震级-频度的观察资料与其拟合的期望关系之间的频度差别(“缺失”或“盈余”), 反映了资料的离散分布, 包含着随机的性质。未来不同震级区间内的地震(不论是频度“缺失”或“盈余”), 都具有发生的可能性。其发生的概率将是时间的函数。本文在依据地震震级-频度关系和贝努利独立试验模型所建立的地震震级概率预测方法的基础上(傅征祥, 王晓青, 1993), 对2005年前中国大陆各地震带的地震形势进行了预测。

1 地震震级概率预测方法

1.1 n 重贝努利随机试验模型

假设: ① E 为一次 Bernoulli 随机试验, 它包含两个基本事件 A (成功)及 \bar{A} (失败), 令

* 国家地震局“八五”攻关项目(85-05-01-01)。

1995-03-30 收到初稿, 1995-08-08 收到修改稿并决定采用。

其发生的概率分别为 $p=p(A)$, $q=p(\bar{A})$, 其中 $0 \leq p \leq 1$, $0 \leq q \leq 1$, 且 $p+q=1$; ② 将 E 独立地重复 n 次, 令 A_i 表示第 i 次试验出现的事件 ($i=1, 2, \dots, n$), 则 A_1, A_2, \dots, A_n 相互独立. 称这一试验为 n 重贝努利独立试验. n 次试验中, 恰好有 k 次成功的概率为

$$p_n(k) = \binom{n}{k} p^k q^{n-k} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

1.2 地震活动的 n 重贝努利独立试验模型

从物理意义上讲, 一般在某一地震活动区域内, 可将地震活动的某一时间段等间隔地划分为若干小时间段. 如果将某一震级 M_0 以上的地震在某一时间段内的发生与否看作一次事件, 并且假设各小时间段之间地震的发生与否是相互独立的, 则 n 个小时时间段内地震事件发生的概率分布, 将满足 n 重贝努利独立试验模型.

根据 ΔT 年内历史地震的震级 M 与累计频度 $N(M)$, 利用最小二乘法, 求得系数 a 和 b , 以及 b 值的标准误差 db , 可得 $\lg N(M) = a + bM$, 即古登堡-里克特的震级-频度关系. 在不失一般性的前提下, 为了建立模型时描述方便, 引进起算震级 M_0 , M_0 的选择使得平均每年发生 $M \geq M_0$ 的地震数为 1, 即

$$\frac{10^{a+bM_0}}{\Delta T} = 1 \quad M_0 = \frac{\lg \Delta T - a}{b} \quad (2)$$

则每年发生震级 $M \geq M_0$ 地震的概率为

$$p_1(M \geq M_0) = \frac{N(M_0)/\Delta T}{N(M_0)/\Delta T} = 10^{b(M_0-M_0)} = 1 - F(M_0) \quad (3)$$

$F(M_0)$ 为 $M_0 \leq M < M_0$ 震级区间地震发生的概率.

震级 M 属于 $[M_i, M_{i+j}]$ 范围内地震的年发生概率为

$$p_1(M_i \leq M < M_{i+j}) = p_1(M \geq M_i) - p_1(M \geq M_{i+j}) = 10^{b(M_i-M_0)} - 10^{b(M_{i+j}-M_0)} \quad (4)$$

该震级区间地震的复发周期为

$$T_R = \frac{1}{[N(M \geq M_i) - N(M \geq M_{i+j})]/\Delta T} \quad (5)$$

如果把 $(M_i \leq M < M_{i+j})$ 和 $(M < M_i, M \geq M_{i+j})$ 看作二个基本地震活动事件状态, 每年的地震活动组成一次贝努利随机试验, 则自上一次 $M_i \leq M < M_{i+j}$ 地震发生以来 n 年内发生 k 次该震级区间地震事件的概率为

$$p_n(k \mid M_i \leq M < M_{i+j}) = \binom{n}{k} [p_1(M_i \leq M < M_{i+j})]^k \times [1 - p_1(M_i \leq M < M_{i+j})]^{n-k} \quad (6)$$

n 年内至少发生一次 $M_i \leq M < M_{i+j}$ 地震的概率为

$$p_n(k \geq 1 \mid M_i \leq M < M_{i+j}) = \sum_{k=1}^n p_n(k \mid M_i \leq M < M_{i+j}) = 1 - [1 - p_1(M_i \leq M < M_{i+j})]^n \quad (7)$$

如果只考虑震级-频度关系中 b 值的统计误差 db 对 p_n 的影响, 则可推导出计算 p_n 的误差的关系式

$$dp_n(k \geq 1 \mid M_i \leq M < M_{i+j}) = n \ln 10 \cdot [1 - p_1(M_i \leq M < M_{i+j})]^{n-1} \times$$

$$\{10^{b(M_i-M_0)}(M_i-M_0)-10^{b(M_{i+j}-M_0)}(M_{i+j}-M_0)\} \cdot db \quad (8)$$

2 资料选择和 b 值统计

幅员辽阔的中国,由于文化发展的差异,不同地区在不同时期内,不同强度地震的资料记载完整程度存在很大的不同.因此,地震资料的完整性将对预测结果的可信度产生较大的影响.本工作选用了“中国地震简目”,并利用黄玮琼等(1994)给出的中国地震资料不均匀性和完整性研究结果,确定各地震带地震统计的起始时间.统计时段的终止时间统一取为1990年1月1日.地震统计的空间域以各地震带(包括燕山地震带)为单位进行,如图1所示.

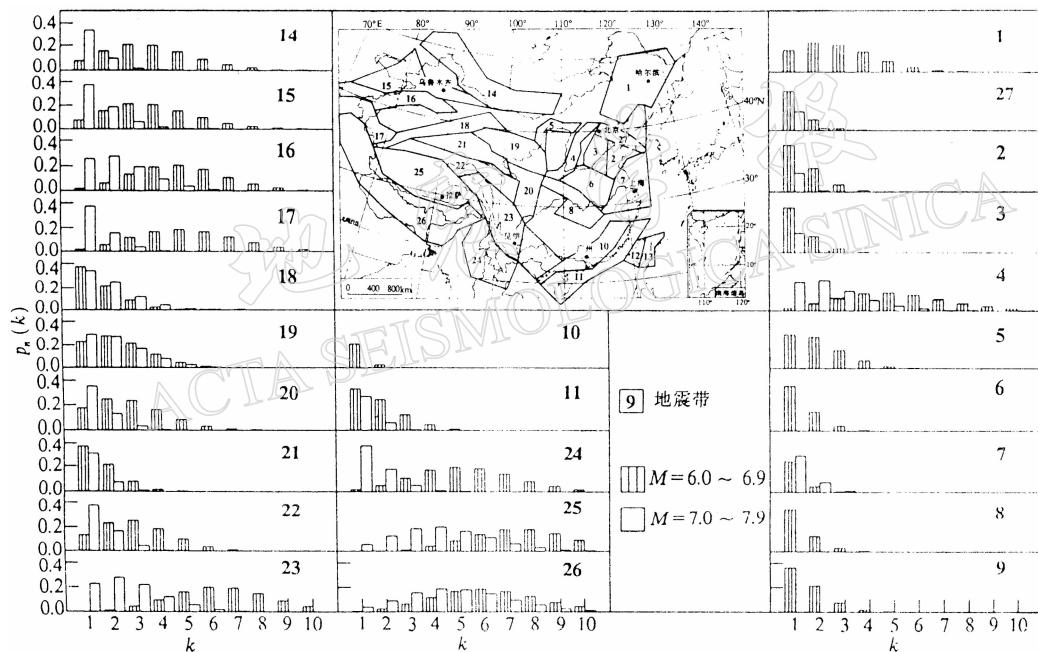


图1 中国大陆各地震带划分及2005年前各地震带发生 k 次地震的概率 $p_k(k)$

余震对统计结果也会产生影响,因此,在采用本方法进行统计预测时,已删除地震目录中的余震.各地震带地震震级-频度关系统计所选用的震级下限为5级.表1给出了中国大陆各地震带地震统计时段和 b 值统计结果.

3 震级概率预测结果

依据统计所得的 b 值和 M_0 值,采用上述地震震级概率预测方法,对2005年12月31日前中国大陆各地震带不同震级的地震发生的概率进行了计算,以中国东部和中国西部分别列于表2和表3.图2给出了各地震带的平均复发周期与2005年前至少发生一次6级(图2a)或7级(图2b)地震概率,其中 $p_{T/2}$, p_T 和 p_{2T} 分别表示具有复发周期 T 的地震带前次地震后 $T/2$, T 和 $2T$ 年内发生一定强度地震的概率曲线.该图十分形象地显示了地震

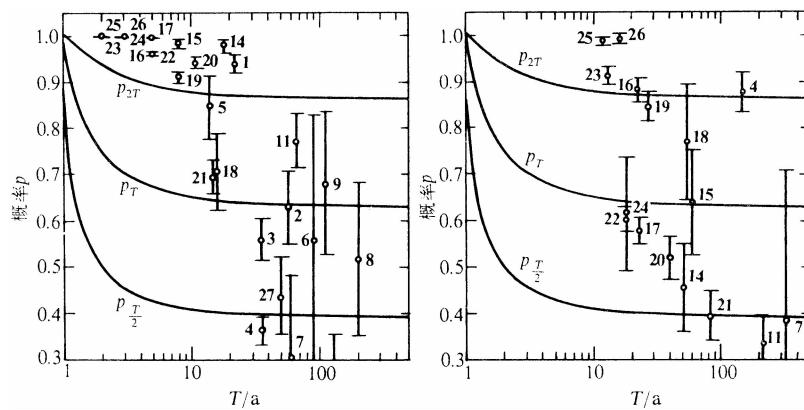


图 2 2005 年前中国大陆各地震带的地震震级概率图

(a) $M=6.0 \sim 6.9$; (b) $M=7.0 \sim 7.9$ 数字表示各地震带的序号, 空心圆表示预测概率值, “I”表示概率误差($\pm\sigma$)表 1 中国大陆各地震带的 b 值

地震带编号	地震带名称	起止时段/a	下限震级	地震数	b 值
1	东北地震区	1920~1990	5.0	18	0.653 ± 0.030
2	郯城—营口地震带	1500~1990	5.0	39	0.479 ± 0.032
3	河北平原地震带	1500~1990	5.0	65	0.582 ± 0.026
4	汾渭地震带	1500~1990	5.0	70	0.602 ± 0.029
5	河套—银川地震带	1960~1990	5.0	11	0.564 ± 0.070
6	河淮地震带	1500~1990	5.0	34	0.753 ± 0.143
7	长江下游—南黄海地震带	1500~1990	5.0	43	0.741 ± 0.153
8	汉水地震带	1500~1990	5.0	28	0.999 ± 0.095
9	右江地震带	1875~1990	5.0	16	1.204 ± 0.112
10	东南沿海内带	1500~1990	5.0	41	1.035 ± 0.123
11	东南沿海外带	1500~1990	5.0	40	0.505 ± 0.026
27	燕山地震带	1500~1990	5.0	40	0.492 ± 0.042
14	阿尔泰—戈壁阿尔泰地震带	1923~1990	5.0	20	0.449 ± 0.044
15	北天山地震带	1923~1990	5.0	63	0.860 ± 0.072
16	南天山地震带	1923~1990	6.0	21	0.820 ± 0.031
17	西昆仑地震带	1937~1990	5.0	66	0.664 ± 0.021
18	阿尔金地震带	1923~1990	5.0	26	0.541 ± 0.062
19	祁连山地震带	1923~1990	5.0	45	0.518 ± 0.023
20	龙门山地震带	1879~1990	5.0	42	0.534 ± 0.025
21	柴达木地震带	1923~1990	5.0	26	0.729 ± 0.034
22	巴颜喀拉山地震带	1937~1990	5.0	45	0.546 ± 0.019
23	金沙江地震带	1900~1990	6.0	51	0.741 ± 0.031
24	澜沧江—眉公河地震带	1930~1990	6.0	23	0.675 ± 0.097
25	唐古拉山地震带	1950~1990	6.0	23	0.705 ± 0.056
26	喜马拉雅山地震带	1950~1990	6.0	14	0.604 ± 0.092

表 2 2005 年前中国大陆东部地震危险性预测

地震带 编 号	地震带名称	至少发生一次以上地震的概率			
		$M=5.0 \sim 5.9$	$M=6.0 \sim 6.9$	$M=7.0 \sim 7.9$	$M=8.0 \sim 8.9$
1	东北地震区	0.984 ± 0.003	0.940 ± 0.019		
2	郯城—营口地震带	0.764 ± 0.047	0.630 ± 0.077	0.159 ± 0.041	0.475 ± 0.120
3	河北平原地震带	0.897 ± 0.016	0.562 ± 0.046	0.192 ± 0.032	0.466 ± 0.082
4	汾渭地震带	0.842 ± 0.022	0.358 ± 0.040	0.858 ± 0.057	0.536 ± 0.097
5	河套—银川地震带	0.993 ± 0.003	0.846 ± 0.069		
6	河淮地震带	0.815 ± 0.135	0.557 ± 0.271		
7	长江下游—南黄海地震带	0.828 ± 0.118	0.301 ± 0.182	0.386 ± 0.323	
8	汉水地震带	0.728 ± 0.091	0.519 ± 0.166		
9	右江地震带	0.969 ± 0.018	0.682 ± 0.153		
10	东南沿海内带	0.772 ± 0.090	0.242 ± 0.114		
11	东南沿海外带	0.800 ± 0.037	0.773 ± 0.058	0.334 ± 0.063	0.442 ± 0.095
27	燕山地震带	0.807 ± 0.053	0.439 ± 0.085	0.169 ± 0.055	0.487 ± 0.156

表 3 2005 年前中国大陆西部地震危险性预测

地震带 编 号	地震带名称	至少发生一次以上地震的概率		
		$M=6.0 \sim 6.9$	$M=7.0 \sim 7.9$	$M=8.0 \sim 8.9$
14	阿尔泰—戈壁阿尔泰地震带	0.980 ± 0.015	0.457 ± 0.095	0.403 ± 0.119
15	北天山地震带	0.983 ± 0.010	0.640 ± 0.112	
16	南天山地震带	0.997 ± 0.001	0.882 ± 0.026	
17	西昆仑地震带	0.997 ± 0.001	0.578 ± 0.029	
18	阿尔金地震带	0.707 ± 0.082	0.770 ± 0.124	
19	祁连山地震带	0.911 ± 0.013	0.848 ± 0.032	0.577 ± 0.060
20	龙门山地震带	0.943 ± 0.013	0.520 ± 0.047	0.603 ± 0.069
21	柴达木地震带	0.696 ± 0.037	0.396 ± 0.054	
22	巴颜喀拉山地震带	0.963 ± 0.004	0.604 ± 0.027	
23	金沙江地震带	1.000 ± 0.000	0.913 ± 0.019	
24	澜沧江—湄公河地震带	0.998 ± 0.001	0.614 ± 0.123	
25	唐古拉山地震带	1.000 ± 0.000	0.988 ± 0.009	0.573 ± 0.103
26	喜马拉雅山地震带	0.999 ± 0.001	0.993 ± 0.011	0.577 ± 0.190

危险程度与复发周期 T 和前次地震以来经历的时间段 n 之间的关系. 大致以 0.4, 0.7 和 0.9 的概率值为界, 可反映各地震带地震危险的程度.

3.1 2005 年前中国大陆东部地震危险性预测(表 2)

2005 年前中国大陆东部各地震带 5 级以上地震发生的概率, 具有如下特点:

(1) 中国大陆东部各地震带发生 5 级以上地震的可能性均较大. 发生一次以上 5 级地震的概率均在 0.7 以上, 绝大多数地震带大于 0.8, 显示在 10~15 年左右的时间尺度下, 各地震带均有发生 5 级以上地震的较大可能性.

(2) 中国东部发生 6 级地震的可能性较高的地震带主要包括东北地震区(0.940)、河套—银川地震带(0.848)和东南沿海地震带外带(0.773), 发生 6 级地震的可能性较大. 郊城—营口地震带、河北平原地震带、河淮地震带、汉水地震带和右江地震带都有可能发生 6 级地震. 中国东部各地震区、带 6 级地震的自然年发生率相对较小, 地震重复周期比预测时间尺度长, 未来预测时段内地震发生的概率主要取决于前次地震发生以来距未来预测时

刻的时间长短。

(3) 中国东部 2005 年前发生 7 级或 7 级以上地震可能性较大的地震带主要为山西地震带。这与山西地震带第四地震活动期相对平静、缺乏强震活动有关。依据中长期地震活动的趋势预测, 山西地震带未来百年的地震活动将有所增强, 但不会进入强震活跃的阶段。

3.2 2005 年前中国大陆西部地震危险性预测(表 3)

中国大陆西部是现代地壳构造运动总体水平较高的地区, 地震活动的强度和频度都明显地高于东部。各地震带所处现代地壳运动的部位不同, 地震活动水平也存在一定的差异, 并表现一定的规律性。依活动的差异性可分为三个分区:

(1) 新疆中北部地震活动分区。主要包括阿尔泰—戈壁阿尔泰地震带、北天山地震带和南天山地震带。其中南、北天山地震带地震活动频度高、强度大, 未来发生 6 级和 7 级地震的可能性都较高。阿尔泰—戈壁阿尔泰地震带(中国境内部分)地震活动频度相对低、强度大, 显示较低的 b 值。此带自 1936 年以来无 6 级地震发生, 预测未来发生 6 级地震的可能性很高。

(2) 青藏块体北部边缘和构造盆地地震活动分区。主要包括阿尔金地震带、祁连山地震带、龙门山地震带和柴达木地震带。这些地震带处于青藏块体内部地震活动分区与中国东部地震活动区和新疆中北部地震活动分区的过渡带, 具有特殊的地壳介质和动力环境, 其地震活动性处于过渡状态。其中三个边缘地震带的 b 值相对较低, 柴达木地震带的 b 值相对较高。各地震带均有发生 6 级地震的较高可能性(0.7 以上)。其中祁连山地震带发生 7 级地震的可能性亦较大。

(3) 青藏块体内部和南缘地震活动分区。该分区包括巴颜喀拉山地震带、金沙江地震带、澜沧江-湄公河地震带、唐古拉山地震带、喜马拉雅地震带以及西昆仑地震带。这些地震带处于青藏块体内部和南缘构造部位, 并分别向东南和西北延伸至青藏块体与印度板块碰撞而形成的两个多震的构造扭结点。地震活动一般表现为高 b 值特点。6 级地震的自然年发生率较高, 预测 2005 年前各地震带均有发生 6 级地震的较高可能性。发生 7 级地震的可能性也较高, 并具有一定的发生 8 级地震的可能性。

综上所述, 采用震级概率预测方法所得的 2005 年前中国大陆各地震带的地震危险性与各地震带的地震活动特征是一致的。

4 讨论

震级概率预测方法的适用性已通过回溯性检验(傅征祥, 王晓青, 1993)进行了论证, 证明在 1976 年唐山地震前燕山地震带确实具有发生 7.5~7.9 级地震的较高的概率(0.77 ± 0.14), 表明本方法具有一定的预测能力。

本方法预测的结果一般具有较高的信度。少数地震带由于地震统计样本量偏少, 预测结果的可信度相对较低。如河淮地震带、长江下游-南黄海地震带(7.0~7.9)、右江地震带(6.0~6.9)的预测结果可信度很低, 不宜采用。河套地震带(6.0~6.9)和汉水地震带的预测结果可信度较低, 仅供参考。

从震级概率预测方法原理中可知, 预测未来若干年内地震发生的概率与地震年发生率并不是简单的对应关系, 而是建立在 n 重贝努利独立试验模型基础上的。影响地震震级预

测概率的因素除 b 值外, 还与某一震级档地震的重复周期和上一次地震发生以来至未来预测时段的间隔时间长短有关. b 值的统计以地震活动整体性较强的地震区、带为单元; 由于各地震区、带地震资料的完整性的时间段长短不一, 难以给出每个统计单元的地震活动阶段划分并满足统计数量上的要求. 因此, 统计 b 值时, 没有考虑地震的活动阶段, 而是考虑长期平均的地震活动水平, 尽可能长地采用地震资料完整的时段. 因而, 本文结果也基本上是对未来地震的平均活动水平的预测.

地震的自然年发生率高, 则地震重复周期 T 短; 当预测时间较长时, 上次地震至未来预测时段 n (年)一般大于 T , 表明进行的试验次数较多, 则依据贝努利独立试验模型, 未来发生一次以上地震的概率 $p_n(k \geq 1)$ 较高, 如青藏块体内各地震带(参见图 2), 这反映了本方法的物理本质. 此时, 未来预测时段内发生若干次(n/T 次左右)地震的可能性较大(图 1). 当地震的自然年发生率并不高, 但 n 较大时, 同样, $p_n(k \geq 1)$ 也有可能较高. 但一般发生一次地震的概率较高, 因而估计未来该震级地震的年发生率并不高. 因此, 未来预测时段内地震年发生率, 应依据总的发震概率 $p_n(k \geq 1)$ 和地震发生概率 $p_n(k)$ 最大的发震次数 k 值(见式(7)、图 1)综合确定.

参 考 文 献

- 傅征祥, 王晓青, 1993. 未来地震震级概率预测方法探讨. 地震, (1): 5~9
黄玮琼, 李文香, 曹学锋, 1994. 中国大陆地震资料完整性研究之一: 以华北地区为例. 地震学报, 16(3): 273~280