

中国大陆大震临震预报概率计算

田少柏 张文冕 杨立明

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文应用大震前临震突变异常及其距发震时刻的时间间隔分布特征,研究了大震发震概率随时间的变化。结果表明,单项前兆的预报能力很低,多项前兆的综合预报概率较高,因此,能够对大震作出较好的临震预报。本文以唐山地震为例进行了验证。

关键词: 中国大陆; 临震预报; 预报概率; 大震

引 言

地震的发生伴随着许多的物理和化学前兆现象,深入研究这些前兆现象,尤其是研究临震突发性异常及其距发震时间间隔的分布规律,对大震临震预报有一定的理论和实用价值。

有关多项前兆对应地震的概率计算,国内外都有报道,Utsu 和 Aki 用不同的方法得出了在一定近似下的综合概率公式,并应用于日本的地震预报研究。在国内应用综合概率法的工作中,对单项前兆条件概率的估算一般都采用一段时间内的平均值,得出综合概率相应地具有预报时段内的平均意义。本文试图拟合出单项前兆条件概率随时间的分布,从而得到综合发震概率随时间的变化,考虑到有前兆出现而没有地震发生的情况,引入了权重的概念。

一、理论和方法

如果每一次前兆的出现都对应于一定频次的地震,那么不同前兆频次也一定对应于不同的发震频次。因此,不同前兆频次的归一化对应于发震的概率密度。实际上,并非每一突变前兆都对应地震,真正对应地震的突变并不多,所以在计算中,将采用施加权重的办法,对不同的前兆突变进行修正。

考虑到任何一种形式的函数关系都可以用多项式来近似,而多项式的拟合又有一般形式的多项式拟合和样条多项式拟合两种方法,通过对表1中归一化的概率密度分布的拟合比较,本文采用样条多项式来拟合发震的概率密度分布。

1. 样条多项式拟合

样条多项式拟合是一种带约束条件的分段多项式拟合法,要求根据实际情况,对观察数据采用在分点处具有连续性和可微的分段多项式形式的样条函数来拟合。

在多项式样条函数中, 以三次样条函数为主, 其一般形式为:

$$f(t) = \begin{cases} a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + a_4 t^3 & (b_0 < t \leq b_1) \\ a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + a_4 t^3 + a_5 (t - b_1)^3 & (b_1 < t \leq b_2) \\ \dots & \dots \\ a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + a_4 t^3 + a_5 (t - b_1)^3 + \dots + a_{r+3} (t - b_{r-1})^3 & (b_{r-1} < t \leq b_r) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{r+3}$ 为拟合参数; $b_1, b_2, \dots, b_{r-1}$ 为分点值; r 为分段数。

在拟合中, 分段数 r 及分点值根据实际情况决定, 参数 $b_1, b_2, \dots, b_{r+3}$ 由最小二乘法来辨识。

2. 发震概率分布的计算

在得出了多项式样条函数形式的概率密度后, 就可以对发震概率分布有进一步的分析。

若以发震时刻为时间零点, 某一前兆 i 出现时刻为 t_0 , 则

(1) 在 t_0 时刻出现的某一前兆随着时间 t 的变化, 其发震概率为

$$P_i(t_0, t) = 1 - \int_0^t f(x) dx, \quad (2)$$

不发震的概率为 $R_i(t_0, t) = 1 - P_i(t_0, t)$ 。

(2) 若前兆出现后在 $t_0 - t_1$ 之间不发震, 则 $t_1 - t(t_1 > t)$ 之间发震的条件概率为

$$p_i(t_1, t_2) = P_i(t_1, t_2) / [1 - P_i(t_0, t_1)] = 1 - \int_{t_1}^{t_2} f(x) dx - \int_0^{t_1} f(x) dx. \quad (3)$$

(3) 若考虑权重, 则以上各概率都得乘以权重 ω , 此时 (2)、(3) 式成为:

$$p'_i = P_i \omega_i, \quad (2')$$

$$p'_i = P_i \omega_i. \quad (3')$$

3. 多项前兆的综合概率分布

(1) 若 m 种相互独立的前兆 $A, B, C, \dots$ 同时出现, 分别对应地震的概率为 $P(m|A, P(m|B), P(m|C) \dots$ 则据 Keitt, Aki 的研究^[3], 当独立前兆同时出现时对应地震的综合概率为:

$$P(M|A, B, C, \dots) = 1 / [1 + \prod_{i=1}^m (\frac{1}{P_i} - 1) / (\frac{1}{P(m)} - 1)^{N-1}]. \quad (4)$$

其中 P_i 即是独立前兆 $A, B, C \dots$ 对应地震的概率, $P(m)$ 为发生 m 级以上地震的自然概率。证明过程从略。

(2) 若考虑权重, 此时 (4) 式成为

$$P(M|A, B, C, \dots) = 1 / [1 + \prod_{i=1}^m (\frac{1}{P_i \omega_i} - 1) / (\frac{1}{P(m)} - 1)^{N-1}],$$

代入 (2') 式成为

$$P(M|A, B, C, \dots) = 1 / [1 + \prod_{i=1}^m (\frac{1}{P'_i} - 1) / (\frac{1}{P(m)} - 1)^{N-1}]. \quad (5)$$

其中 ω_i ($i=1, 2, \dots, m$) 为各项前兆的权重。

一般来讲, 地震活动的不同阶段, 如活跃期和平静期, 其地震发生的概率不同。如果用一段时间内大于某级地震的平均发震概率代替自然发震概率, 仍需考虑权重, 在实用中, 可以采用等权的形式, 用一段时期内的平均发震概率近似代替自然发震概率。

如果在时间段 T 天内发生了 N 次 M 级以上的地震, 则其平均发震概率为 $P_0' = N/T$ (次/天), 考虑一个小的时段 Δt , 其内平均发震概率为:

$$P_0 = \Delta t P_0'.$$

二、我国大陆 $M_s \geq 7.0$ 级地震在多项前兆下的概率分布

通过对 1969 年以来我国大陆 11 次大地震的前兆临震突变异常的统计, 得出地形变、地球化学、地下水、地电、地磁、重力等项目临震突变频次与发震时间间隔对应情况, 如表 1 所示。

表 1 前兆临震突变频次与发震时间间隔对应表

项 目 \ 时 间 间 隔 (天)	1-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40
地形变	11	6	5	2	5	5	2	0
地球化学	3	10	7	4	1	2	1	0
地下水	10	9	3	4	0	1	0	
地电	13	3	3	2	0	1	1	
地磁	0	1	4	3	6	4	3	1
重力	2	6	2	1	1	1		

1. 概率密度函数的拟合

对时间采用中心插值法, 对归一化的地形变等前兆频次进行样条多项式的拟合, 拟合结果如表 2 所示。

表 2 前兆的样条多项式概率密度拟合

参 数 项 目	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	残差
地形变	0.4218	-0.518×10^{-1}	0.2731×10^{-3}	-0.4560×10^{-4}	0.2373×10^{-4}	0.4880×10^{-2}
地球化学	-0.1074	0.1109	-0.8516×10^{-2}	0.1721×10^{-3}	-0.3431×10^{-3}	0.4929×10^{-2}
地下水	0.3956	-0.2005×10^{-2}	-0.2011×10^{-2}	0.6313×10^{-4}	-0.1098×10^{-3}	0.0122
地电	0.8357	-0.1347	0.7675×10^{-2}	-0.1428×10^{-3}	0.3859×10^{-3}	0.01371
地磁	-0.2148×10^{-1}	0.5541×10^{-2}	0.9716×10^{-3}	-0.3237×10^{-4}	0.5924×10^{-4}	0.0089
重力	-0.0552	0.1147	-0.1014×10^{-1}	0.2293×10^{-3}	-0.7700×10^{-3}	0.02573

2. 不同前兆的权重确定和自然发震概率的选取

(1) 前兆的权重

在计算发震概率时, 由于前兆的信度不同, 因而相应的权重亦不同, 在 11 次大震中, 各项前兆出现的比率为:

前兆	地形变	地球化学	地下水	地电	地磁	重力
比率	100%	82%	91%	73%	82%	64%

同时, 参考总体报告的研究, 取各单项前兆的异常可信度为:

前兆	地形变	地球化学	地下水	地电	地磁	重力
信度	30%	32%	30%	20%	55%	30%

从而各项前兆计算发震概率时的权重分别取为:

前兆	地形变	地球化学	地下水	地电	地磁	重力
$\omega_{(i)}$	0.30	0.262	0.273	0.180	0.146	0.451

(2) 自然发震概率 P_0 的选取

由于从 1969-7-18-1990-04-16 共发生了 11 次大震, 故 7 级大震的自然发震概率为:

$$P_0 = 11 / (20.77 \times 365) = 0.001451 \text{ 次 / 天}。$$

若考虑为一段时间内的自然概率, 则为:

$$P_0 = \Delta t \times 1.415 \times 10^{-3}。$$

当取 $\Delta t = 10, 15, 20, 30, \dots$ (天), 相应的 P_0 为:

$$0.01451, 0.021765, 0.02902, 0.04353, \dots$$

3. 单项前兆概率随时间的分布。

按第一步的拟合结果, 根据公式 (2)、(2') 对应于各种前兆随时间变化的发震概率分布如图 1 所示。其中实线为未考虑权重的情况, 虚线为考虑权重后的情况。

可见考虑权重后由于除地磁以外, 其余前兆的权重都小于 0.3, 到了距发震只有 1 天的时间, 其计算出的发震概率仍小于 0.3, 因此单项前兆的预报能力是很低的。

4. 综合概率的计算

为了进行比较, 同时考虑到所研究前兆现象对发震贡献的层次性, 采用分层综合的办法, 研究其综合概率的变化。

(1) 对地形变和地球化学两项前兆进行综合, 得出其综合概率分布如图 2 所示。

(2) 对地形变、地球化学和地下水三项前兆进行综合, 其概率分布如图 3 所示。

(3) 所有 6 项前兆综合概率分布如图 4 所示。

5. 概率分布的分析

(1) 考虑权重时, 单项前兆的临震概率超不过 0.3, 因此, 单项前兆的预报能力很低。

由图 1 可以看出, 单项前兆的概率随时间向发震时刻的推移都是单调增加的, 其中, (2)、(5)、(6) 三种前兆的变化形式一致。(1)、(3)、(4) 三种前兆变化形式一致。

(2) 综合概率的分布特征

多项综合的概率呈现很快增加的趋势, 且综合项次越多, 概率越高。临震前概率接近

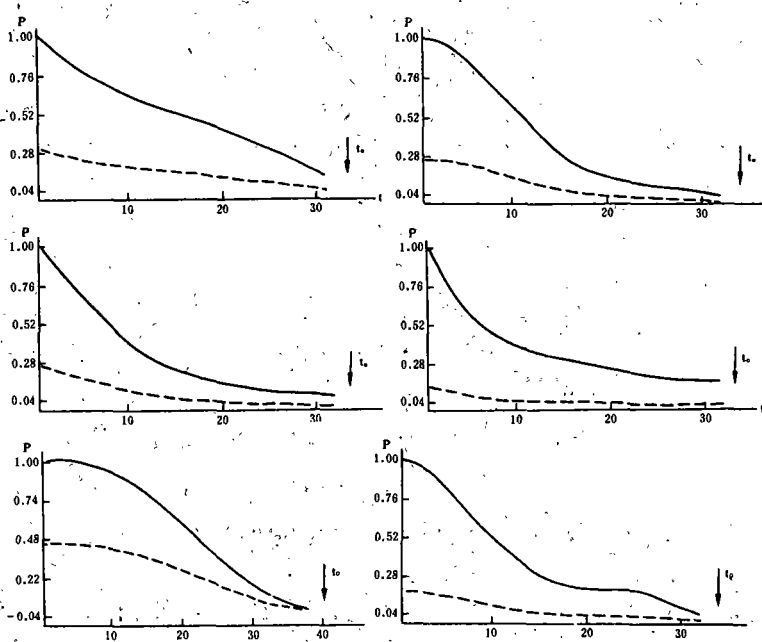


图1 发震概率随时间的分布图

1.地形变; 2.地球化学; 3.地下水; 4.地电; 5.地磁; 6.重力

Fig.1 Probability of earthquake occurrence with time

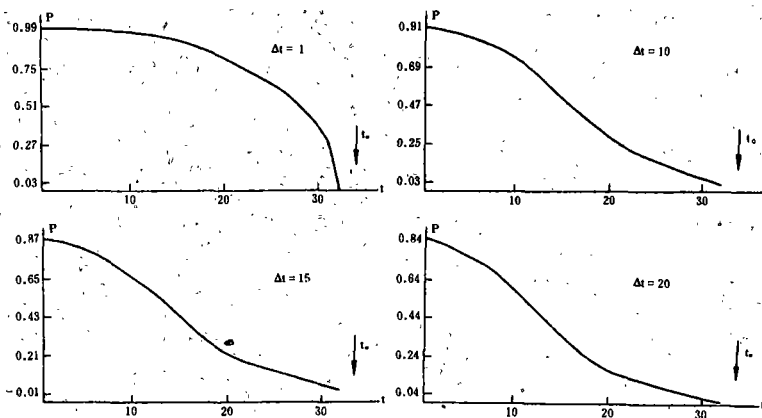


图2 地形变、地球化学两项前兆综合概率分布图。

(1) $\Delta t=1$; (2) $\Delta t=10$; (3) $\Delta t=15$; (4) $\Delta t=20$

Fig.2 Comprehensive probability for two item precursors

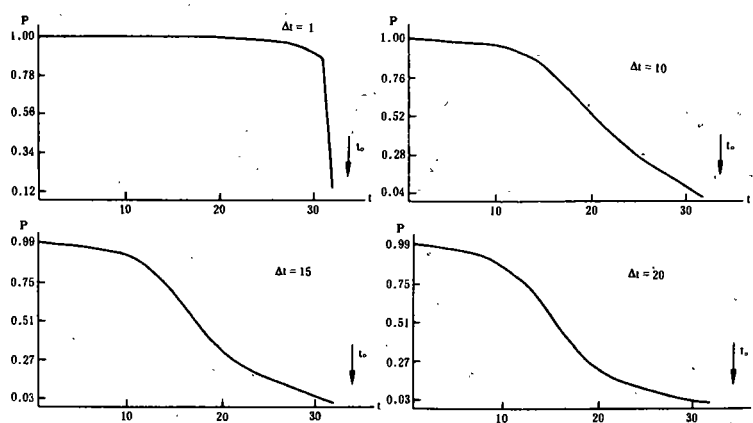


图 3 地形变、地球化学、地下水三项前兆综合概率分布图

(1) $\Delta t = 1$; (2) $\Delta t = 10$; (3) $\Delta t = 15$; (4) $\Delta t = 20$

Fig.3 Comprehensive probability for three item precursors

1.0。因此，多项前兆综合有一定的预报能力。

据力武常次的研究，随着前兆的逐次出现，综合概率会因临震前兆的出现而增加，也会因混入中长期前兆和噪音而下降，由图 2、图 3、图 4、可以看出，二项、三项前兆综合的结果基本是单调上升，说明这三项是临震前兆，这和本文的研究相一致，六项前兆综合概率分布不再单调上升，而有起伏变化，表明含有非临震因素。

随着 Δt 从大到小变化，前兆出现后进入高概率区的时间在缩短。

同一 Δt 时，综合项次越多，概率分布越复杂，进入高概率区的时间越短。

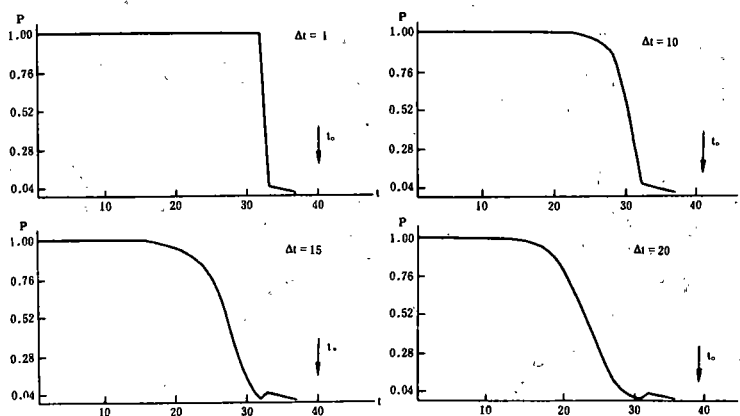


图 4 6 种前兆 Δt 天内发震综合概率分布图 ($M_s \geq 7.0$)

(1) $\Delta t = 1$; (2) $\Delta t = 10$; (3) $\Delta t = 15$; (4) $\Delta t = 20$

Fig.4 Comprehensive probability for all precursors

三、以唐山地震为例验证并探索综合概率法的应用

唐山地震是观察到前兆较多的一次大震, 经过分析取各项前兆的平均发生时间为:

前兆	地形变	地球化学	地下水	地电	地磁	重力
发生时间 (天)	13	13	3	9	20	6

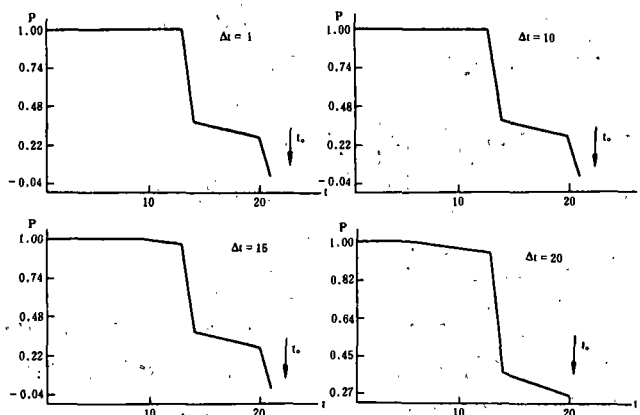


图5 唐山地震前发震综合概率图

(1) $\Delta t = 1$; (2) $\Delta t = 10$; (3) $\Delta t = 15$; (4) $\Delta t = 20$

Fig.4 Comprehensive probability for the Tangshan earthquake

从第一个临震前兆地磁起, 经过7天, 出现了地形变、地球化学等临震异常; 经过11天, 出现了地电临震异常; 经过14天, 出现了大气压和重力异常; 经过17天, 出现了地下水异常。按照这样的前兆出现的次序, 从地磁开始, 逐次地加入新的前兆, 求得其综合概率的分布如图5所示。在实际应用中, 可以适当的选择 Δt , 以预测未来发震的概率。

由图5可以看出, 发震综合概率很快地提高到距发震前10天左右, 发震概率已超过90%, 而且, 每增加新的前兆, 综合概率都要很快增加, 这和力武常次的结论相一致。

四、结束语

根据本文上述分析及实例验证, 可以得出如下几点认识:

- (1) 本文提出的对大震临震概率的计算方法, 对于实现有效数天内报震有一定的实用价值。
- (2) 由于本文所用资料来源于大震的统计结果, 所得概率密度分布对7级以上大震具有一定的适用性。
- (3) 单项前兆预报能力很低, 利用多项前兆的综合概率可以较好地大震作出临震预报。
- (4) 由于资料有限, 表1的统计样本少。同时, 对自然概率的近似性及对前兆独立性的假定等, 都需要随着资料的积累, 加深认识。

(本文1993年4月16日收到)

参考文献

- [1]中山大学数学力学系, 概率论与数理统计, 人民教育出版社, 1983.
- [2] Rikitake, T. Earthquake prediction: an empirical approach, Tectonophysics, Vol.148, No.3-4, 1988.
- [3] Keiti, Aki, 前兆现象的概率综合, 世界地震译丛, No.6, 1982.
- [4] 张文冕、田少柏, 中国大震临震突变异常总体特征和临震预报指标的研究, 西北地震学报, Vol.13, No.1, 1991.

CALCULATION OF IMMEDIATE PREDICTION PROBABILITY FOR LARGE EARTHQUAKE IN CHINA

Tian Shaobai, Zhang Wenmian, Yang Liming
(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, China)

Abstract

Using the immediate burst precursor of large shocks and the distributive character of their time interval, we have studied the variation with time of the probability of immediate earthquake occurrence. The results show that the predicative level of single precursor is very low, but for multiprecursor, the comprehensive probability is able to describe the change before earthquake and a better prediction can be made using it. The conclusions were verified taking the Tangshan earthquake as example.

Key Words: Impending Earthquake Prediction; Large Earthquake; Probability of Prediction

* * * * *

托来 6.0 级地震的预报

1993年10月26日在甘青交界的托来牧场发生了6.0级地震,震中位置为北纬 38.6° 、东经 98.7° 。该地震距嘉峪关断层气观测点120km。兰州地震研究所水化室气体组对这次地震作出过短期预报。

在1993年6月的年中会商及7月30日的月会商中,该研究组根据嘉峪关断层气出现的一年以上的高频次多阶段异常变化和断层气氢、氦、氡异常,两次提出:“近期在嘉峪关断裂及其附近有发生5.5级左右地震的可能。若地震发生在8月份以后,震级将在6级左右”的预报意见。

地震发生后,该研究组又核实和分析了上述异常。目前正密切注视资料的发展变化趋势。

(国家地震局兰州地震研究所 何跟巧 常秋君 宋玉兰)