

中长期时空增益综合预测模型 及其初步应用^{*}

王晓青 傅征祥 张立人 粟生平 丁 香

(中国北京 100036 中国地震局分析预报中心)

摘要 阐述了中长期地震时空增益综合预测模型的基本原理和单项预测方法的信度评价方法, 给出了概率增益与预测效能评分 R 值的关系, 并对 R 值评分法进行了推广。以华北地区为试点, 研究了不同地震活动期与活动幕的时间概率增益、活断层的空间概率增益和以垂直形变为为代表的时空联合的概率增益, 并采用中长期地震时空增益综合预测模型, 对华北北部地区的综合概率增益进行了示例性预测。

关键词 概率增益 中长期地震综合预测 信度评价 R 值

引言

强震时空综合概率增益模型是专门为中长期地震动态预测系统设计的。该模型是在与地震相关的各种背景性和前兆性物理量的观测与研究基础上, 运用概率统计原理而建立的。综合预测的效果依赖于对各种单项预测指标效能的全面而客观的评价。因此, 有必要建立完整的指标体系和信度评价体系, 充分利用现有的和不断增加的各种观测研究资料, 实现中长期尺度下地震危险性的动态预测。

概率增益模型最早是为了综合各种前兆异常提出来的。从概率论的基本原理可以推断, 如果同时观测到几项相互独立的前兆异常, 地震发生的概率将比只有单个异常时高。Utsu(1977, 1983)导出了一个多元前兆异常的概率计算公式; Aki(1981)采用 Bayes 理论导出了同样的公式, 并提出“概率增益”的概念。类似于概率增益的模型还有 Vere-Jones (1978)的“危险性增强因子”、Kagan 和 Knopoff(1977)的“预报比”(predictive ratio)等。国内外学者采用概率增益法对某些地区进行了地震危险性预测(Utsu, 1979, 1984; Aki, 1984; Kenji et al., 1990; 金学申等, 1997)。梅世蓉等(1993)也曾对这一方法作了简要的介绍。目前概率增益法一般用于时间域预测。事实上, 概率增益法不仅仅适用于前兆异常指标, 其它预测指标如果满足概率增益法的前提条件, 也同样适用。如时间上的地震“活跃期幕”、空间上的活动断层, 等等。因此, 本文将其推广, 建立多目标、多手段, 以时空概率增益为基础的综合预测模型。采用此模型对华北地区进行了示例性预测。

* 中国地震局“九五”重点研究项目(95-04-07-04-01)和中希合作项目的研究成果。

1999-02-14 收到初稿, 1999-10-09 收到修改稿, 1999-12-10 决定采用。

1 中长期地震时空综合概率增益预测模型

设某一时空域(T, R)内, 地震($M | M \in (m_1, m_2)$)发生的长期平稳概率为 $P(M)$. 则地震不发生的概率为 $P(\bar{M}) = 1 - P(M)$. 又设存在 N 种相互独立的异常, 第 i 种异常 A_i 在同一时空域发生的概率为 $P(A_i)$, ($i = \overline{1, N}$), 不发生概率为 $P(\bar{A}_i) = 1 - P(A_i)$.

分析异常 A_i 与地震 M 发生的相互关系, 可得到地震发生与否与异常 A_i 出现的条件概率: $P(A_i | M)$, $P(A_i | \bar{M})$. 则依据 Bayes 原理, 异常 A_i 出现的情况下地震发生的后验概率为

$$P(M | A_i) = \frac{P(A_i | M)P(M)}{P(A_i | M)P(M) + P(A_i | \bar{M})P(\bar{M})} \quad (1)$$

异常 A_1, A_2, \dots, A_N 同时出现时, 发生地震的概率为

$$\begin{aligned} P(M | A_1, A_2, \dots, A_N) &= \frac{P(A_1, A_2, \dots, A_N | M)P(M)}{P(A_1, A_2, \dots, A_N | M)P(M) + P(A_1, A_2, \dots, A_N | \bar{M})P(\bar{M})} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{P(A_1, A_2, \dots, A_N | \bar{M})}{P(A_1, A_2, \dots, A_N | M)} \cdot \frac{P(\bar{M})}{P(M)}} \end{aligned}$$

依据 A_i ($i = \overline{1, N}$)相互独立假设, 有

$$\begin{aligned} P(A_1, A_2, \dots, A_N | M) &= P(A_1 | M)P(A_2 | M)\cdots P(A_N | M) \\ P(A_1, A_2, \dots, A_N | \bar{M}) &= P(A_1 | \bar{M})P(A_2 | \bar{M})\cdots P(A_N | \bar{M}) \end{aligned}$$

则

$$P(M | A_1, A_2, \dots, A_N) = \frac{1}{1 + \frac{P(A_1 | \bar{M})}{P(A_1 | M)} \cdot \frac{P(A_2 | \bar{M})}{P(A_2 | M)} \cdots \frac{P(A_N | \bar{M})}{P(A_N | M)} \cdot \frac{P(\bar{M})}{P(M)}}$$

又依据式(1)

$$\begin{aligned} P(M | A_1, A_2, \dots, A_N) &= \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{P(M | A_1)} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{P(M | A_2)} - 1 \right) \cdots \left(\frac{1}{P(M | A_N)} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{P(M)} - 1 \right)} \quad (2) \\ &= \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{P(M | A_1)} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{P(M | A_2)} - 1 \right) \cdots \left(\frac{1}{P(M | A_N)} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{P(M)} - 1 \right)} \end{aligned}$$

当 $0 < P(M | A_i) << 1$ ($i = 1, 2, \dots, N$), $0 < P(M) << 1$, 且

$$0 < P(M) \cdot \frac{P(M | A_1)}{P(M)} \cdots \frac{P(M | A_N)}{P(M)} << 1 \text{ 时, 上式简化为}$$

$$P(M | A_1, A_2, \dots, A_N) = P(M) \cdot \frac{P(M | A_1)}{P(M)} \cdot \frac{P(M | A_2)}{P(M)} \cdots \frac{P(M | A_N)}{P(M)} \quad (3)$$

或

$$P(M | A_1, A_2, \dots, A_N) = P(M)K(M | A_1) \cdot K(M | A_2) \cdots K(M | A_N) \quad (4)$$

其中, $P(M)$ 为地震 M 发生的无条件概率, $K(M | A_i)$ 为当异常 A_i 出现时地震 M 发生的条件概率与无条件概率之比, 称为异常 A_i 发生时, 发生地震 M 的概率增益.

式(4)即为多个相互独立的异常存在时, 地震发生的综合概率模型. 它的应用前提是:

- (1) 已知研究时空域地震发生的长期平稳概率 $P(M)$;
- (2) 异常 A_i ($i = \overline{1, N}$)之间相互独立;

(3) 异常 A_i 出现时, 地震发生的条件概率 $P(M|A_i)$;

(4) $0 < P(M) << 1$, 且 $0 < P(M) \cdot \frac{P(M|A_1)}{P(M)} \cdot \frac{P(M|A_2)}{P(M)} \cdots \frac{P(M|A_N)}{P(M)} << 1$, 且 $0 < P(M|A_i) << 1$.

在实际情况下, 上述假定前提并不能完全满足, 实际可利用的资料或信息也仅仅限于前兆或时间域, 因此, 需要对概率增益模型进行改进.

1.1 地震发生的时间非平稳性

实践证明地震发生的时间过程是非平稳的, 具有阶段性活动的特点, 如地震“活跃期”和“平静期”、地震“活跃幕”与“平静幕”; “地震轮回”等等. 因此, 一旦明确了地震所处的活动阶段, 就能依据历史地震资料确定这一“阶段”条件下地震发生的条件概率, 从而采用概率增益模型对地震发生的平稳概率进行修正

$$K(M | T_i) = \frac{P(M | T_i)}{P(M)} \quad i = \overline{1, N_I} \quad (5)$$

其中, $P(M)$ 为地震发生的长期平稳概率, $P(M|T_i)$ 为方法 T 处于时间上某一阶段 i 时, 地震发生的条件概率, $K(M|T_i)$ 为相应的概率增益值. 注意如有多种方法, 各方法之间需满足相互独立性假设.

1.2 地震空间分布的非均匀性

上述的多前兆概率增益模型隐含着地震与前兆异常空间分布的均匀性假设, 实际情况并非如此. 地震分布于特定的地震构造和地球物理场部位, 表现为成带性、成丛性空间非均匀性特点. 这种地震在空间一定部位的发生概率相对于空间均匀发生概率的增长, 也可采用概率增益模型来表述

$$K(M | S_j) = \frac{P(M | S_j)}{P(M)} \quad j = \overline{1, N_J} \quad (6)$$

其中, $P(M)$ 的意义同前, $P(M|S_j)$ 为某一空间域中, 某一因素 S_j 存在的条件下, 地震发生的条件概率. $K(M|S_j)$ 为相应的空间概率增益. 同样, 各空间因素之间需满足相互独立性假设.

1.3 地震时空联合分布的非均匀性

地震活动性及其异常往往同时存在时间和空间上的密切联系, 如大震前震源区及其周围地区表现各种中短期异常等. 因此, 同样也可采用概率增益模型来表述为 $K(M|A_k)$, 即某一时空域异常 A_k 出现时发生地震 M 的条件概率 $P(M|A_k)$ 与地震发生的长期平稳概率 $P(M)$ 之比.

由此, 我们将基于多前兆的地震发生概率增益模型扩展为如下的形式:

$$P(M | T, S, A) = P(M) \cdot \prod_{i=1}^{N_I} \frac{P(M | T_i)}{P(M)} \cdot \prod_{j=1}^{N_J} \frac{P(M | S_j)}{P(M)} \cdot \prod_{k=1}^{N_K} \frac{P(M | A_k)}{P(M)} \quad (7)$$

或

$P(M | T, S, A) = P(M) \cdot K(M | T) \cdot K(M | S) \cdot K(M | A) = P(M) \cdot K(M | T, S, A)$

式中, $K(M|T, S, A)$ 和 $P(M|T, S, A)$ 分别为预测时空域地震发生的总增益值和发生概率; $K(M|T)$ 为与地震活动时间非平稳性有关的指标的总概率增益值; $K(M|S)$ 为与地震活动空间非平稳性有关的指标的总概率增益值; $K(M|A)$ 为在中长期尺度下, 同时存在时间和空间非均匀性的各种指标的总概率增益值.

2 地震预测指标的效能评价

2.1 单一状态预测指标的效能评价

地震预测指标的效能主要依据单项预测指标实际预测地震的报准率、时空占有率进行评价。如果假定某一指标出现异常时，对应着地震的发生，则有震报准率 c 为

$$c = P(A | M) = \frac{P(M | A)P(A)}{P(M)}$$

时空占有率 b 为

$$b = P(A)$$

式中， $P(A | M)$ 为地震发生的情况下，出现异常的条件概率， $P(A)$ 为异常出现的概率， $P(M)$ 为地震发生的平稳概率。因而， R 值评分为（许绍燮，1973，1989）

$$R = c - b$$

$$\text{即 } R = \frac{P(M | A)P(A)}{P(M)} - P(A) = \left(\frac{P(M | A)}{P(M)} - 1 \right) P(A) = (K(M | A) - 1)P(A)$$

式中， $K(M | A)$ 为该指标的概率增益。该式给出了预测效能 R 值与异常指标出现概率和地震概率增益之间的关系。当 R 一定时，较少的异常时空占有率($P(A)$)将对应较高的概率增益值 $K(M | A)$ (较好的预测效果)。张立人(1998)给出了部分中长期预测方法的 R 值评分及概率增益。

2.2 多状态预测指标的效能评价

依据概率理论，设异常 B 可分为 n 个互不相交的异常 B_i ($i=1, n$)，则 B_i 的发生概率具有如下关系式：

$$P(B_i) = P(B_i | B)P(B)$$

又

$$P(M | B) = \sum_{i=1}^n P(M | B_i)P(B_i | B)$$

因此，对某一异常状态 B_i ，其 R 值评分为

$$R_i = c_i - b_i = \frac{P(M | B_i)P(B_i)}{P(M)} - P(B_i)$$

则异常 B 的 R 值评分为

$$\begin{aligned} R &= \frac{P(M | B)P(B)}{P(M)} - P(B) = \frac{\sum_{i=1}^n [P(M | B_i)P(B_i | B)]P(B)}{P(M)} - \sum_{i=1}^n P(B_i) \\ &= \sum_{i=1}^n \left[\frac{P(M | B_i)P(B_i)}{P(M)} - P(B_i) \right] = \sum_{i=1}^n R_i \end{aligned}$$

因此，我们得到一个非常重要的结论：当异常 B 可划分为 n 个互不相交的异常状态时， B 的 R 值评分为各异常状态 R 值评分的和。这时，对预测手段 B 的效能评价不能依据某一状态的 R 值进行，而必须依据各状态 R 值的总和进行。多个异常状态的划分在实际预测中非常普遍，因此，该结果具有重要的实用价值。

3 华北地区中长期地震时空综合概率增益研究

作为示例，下面对 3 种类型的单项预测方法和时空综合概率增益进行研究。

3.1 华北地区地震活动时间非平稳性及其概率增益

华北地区地震活动的时间非均匀性已为许多学者研究(梅世蓉, 1960; 时振梁等, 1974; 李钦祖, 于新昌, 1980; 马宗晋等, 1983; 张国民, 傅征祥, 1985; 傅征祥, 1991; 蒋铭等, 1993). 泊松检验表明, 1369年以来6级以上地震活动, 在5和10年时间尺度上表现为平稳分布, 20年时间尺度上则呈现非均匀性(傅征祥, 1991), 为10~20年左右的活跃与几十至百年左右的平静, 分别称为活跃幕与平静幕. 从更大的尺度看, 华北地震区还表现为约300年左右的地震期, 自1369年以来经历了第Ⅲ和第Ⅳ地震期. 两个地震期表现了类似的活跃幕与平静幕的交替, 反映了地震旋回的特点. 因此, 研究不同地震活动阶段的概率增益, 对中长期地震预测具有实际意义.

傅征祥(1991)按照华北地区(北纬 $34^{\circ}00' \sim 41^{\circ}59'$, 东经 $107^{\circ}30'$ 以东)1369~1979年 $M \geq 6$ 地震活动速率的变化划分了地震活跃与平静时段. 本文以此为依据, 补充近年的地震资料, 对华北地区 $M \geq 6$ 地震的时间概率增益进行了研究, 结果如表1所示. 其中, 时间概率增益为地震活跃幕(或平静幕)地震年发生概率与整个地震活跃期地震年发生概率之比. 地震活跃幕(或平静幕)的出现概率为该幕持续时间与整个地震期的时间之比.

表1中, K 值很好地反映了同一地震活跃期地震活动总体上增强的情况. 如果分别将同一地震期各地震活跃幕与平静幕归并考虑, 则 K 值分别为: 第Ⅲ地震期活跃幕为3.06, 平静幕为0.51, R 值为0.4, 与各地震活跃幕的 R 值的和相等; 第Ⅳ地震期活跃幕为4.40、平静幕为0.23, R 值为0.6. 地震活跃期的 R 值与各活跃幕 R 值之和相等.

表1 华北地区地震活动时间非平稳性及其概率增益(107.5°E , $34^{\circ} \sim 42^{\circ}\text{N}$, $M_s \geq 6$)

地震期	序号	时间段	持续时间 /年	地震数 N	地震发生概率 $P(M T)$	时间占有率 $P(T)$	时间概率增益 $K(M T)$	R 值
第Ⅲ地震期	1	1369~1483年	115	0	0.0000	0.3177	0.00	-0.32
	2	1484~1502年	19	4	0.2105	0.0525	2.82	0.10
	3	1503~1613年	111	8	0.0721	0.3066	0.97	-0.01
	4	1614~1626年	13	6	0.4615	0.0359	6.19	0.19
	5	1627~1657年	31	1	0.0323	0.0856	0.43	-0.05
	6	1658~1695年	38	6	0.1579	0.1050	2.12	0.12
	7	1696~1730年	35	2	0.0571	0.0967	0.77	-0.02
		1369~1730年	362	27	0.0746			
		所有平静幕	292	11	0.0377	0.8066	0.51	-0.40
		所有活跃幕	70	16	0.2286	0.1934	3.06	0.40
第Ⅳ地震期	8	1731~1814年	84	0	0.0000	0.3134	0.00	-0.31
	9	1815~1830年	16	4	0.2500	0.0597	2.39	0.08
	10	1831~1928年	98	5	0.0510	0.3657	0.49	-0.19
	11	1929~1948年	20	7	0.3500	0.0746	3.35	0.18
	12	1949~1965年	17	0	0.0000	0.0634	0.00	-0.06
	13	1966~1979年	14	7	0.5000	0.0522	4.79	0.20
	14	1980~1988年	9	0	0.0000	0.0336	0.00	-0.03
	15	1989~1998年	10	5	0.5000	0.0373	4.79	0.14
		1731~1998年	268	28	0.3636			
		所有平静幕	208	5	0.1045	0.7761	0.23	-0.60
整个时段		所有活跃幕	50	23	0.0240	0.1866	4.40	0.63
		1369~1998年	630	55	0.0873			
		所有平静幕	500	16	0.0320	0.7937	0.37	-0.50
		所有活跃幕	120	39	0.3250	0.1905	3.72	0.52

第Ⅲ地震活跃期按活跃幕预报地震, 报对次数 16 次, 漏报次数 11 次, 97.5% 置信水平的 R 值为, $R(16, 11)=0.177$, $R>R(16, 11)$; 同理, 第Ⅳ地震活跃期: $R(23, 5)=0.191$, $R>R(23, 5)$. 因此, 采用活跃幕进行地震中长期预测, 具有较高的信度值.

3.2 华北地区地震空间非均匀性及其概率增益

强震活动与地质构造, 特别是活动断层的关系十分密切. 强震沿活动断层上重复发生的特征表明, 地震在空间上的分布具有其特定的规律性. 因此, 不考虑地震的时间序列过程, 研究地震在空间上的不均匀性分布, 并给出其概率增益值, 对地震中长期预测具有重要意义.

图 1 给出了华北地区(北纬 $34^{\circ} \sim 42^{\circ}$, 东经 $108^{\circ} \sim 120^{\circ}$)活动断层与历史强震($1500 \sim 1998$ 年, $M_s \geq 6$)的分布图. 设断层的作用宽度为 20 km, 以 0.25 度为间隔将断层网格化, 确定有断层和无断层网格. 然后统计地震与断层的相关性, 计算断层的空间概率增益值和信度值. 依据断层的活动时代计算的结果如表 2 所示. K 值大小表明 Q_4 断层与地震的关系更密切.

表 2 华北地区($108^{\circ} \sim 124^{\circ}$ E, $34^{\circ} \sim 42^{\circ}$ N)活动断层概率增益表($M_s \geq 6$)

序号	断层	断层空间分布概率	有震报准率	活断层空间概率增益 K	非活断层空间概率增益 K'	对应 K 值的 R 值*
1	Q_1 以来活动的断层	0.396 3	0.765 6	1.93	0.39	0.37
2	Q_3 以来活动的断层	0.294 4	0.671 9	2.28	0.47	0.38
3	Q_1 以来活动的断层	0.228 9	0.578 1	2.53	0.55	0.35

* 空间上无活动断层处地震概率增益(K')对应的 R 值符号相反.

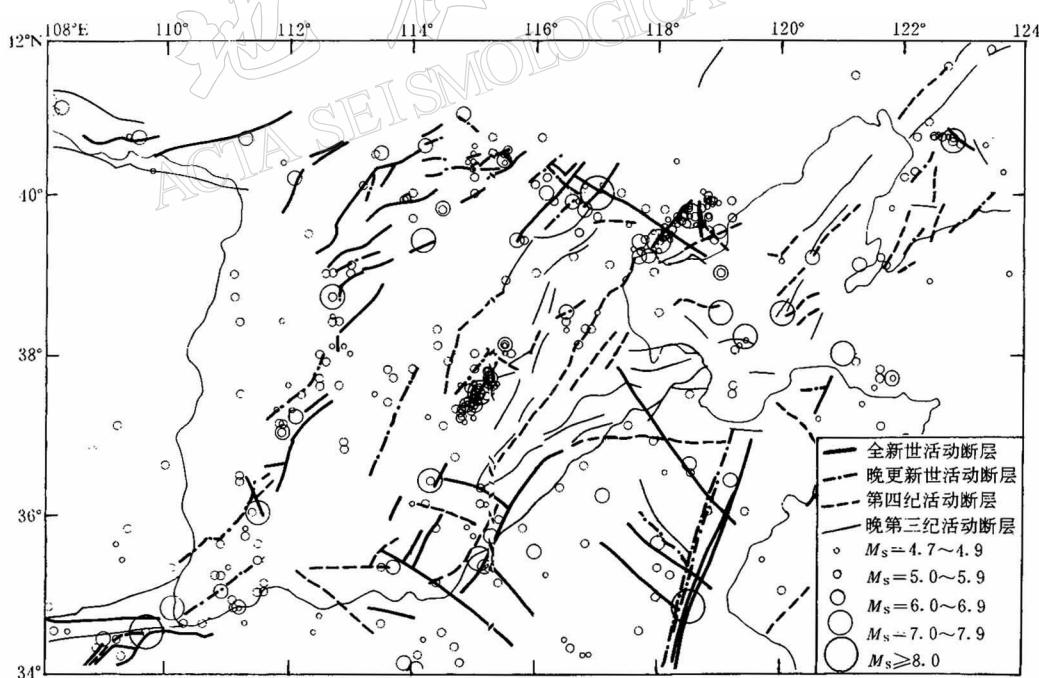


图 1 华北地区活动断层与地震震中分布图($1500 \sim 1998$ 年, $M_s > 4.7$)

3.3 华北地区地震活动与垂直形变关系及其概率增益

地震活动是地壳构造运动的表现之一。地壳构造运动可通过大地形变反映出来。板缘地区的地壳形变与地震的关系很早引起了人们的注意。虽然实际情况还非常复杂，地形变作为板内地震的一个有希望的前兆，已经进行了大量的研究。本文只是作为概率增益模型的一种示例，对地形变与地震的关系进行初步的研究。

华北地区自50年代以来，进行了多次大面积的地形变测量，其中1983~1988和1988~1992年两期测量结果资料相对较好。图2a和b所示的垂直形变速率图显示了地壳垂直形变随时间和空间的变化情况，可将其作为时空同时变化的“前兆”类因子。研究表明，地壳垂直形变速率剧烈变化的地方（即高梯度带）与强震的活动较为密切。为便于统计，将垂直形变速率图转化为垂直形变速率水平梯度图。转换方法见张郢珍等（1992）文章。

通过1983~1988年垂直形变速率水平梯度与1983年以来同一地区5.8级以上地震

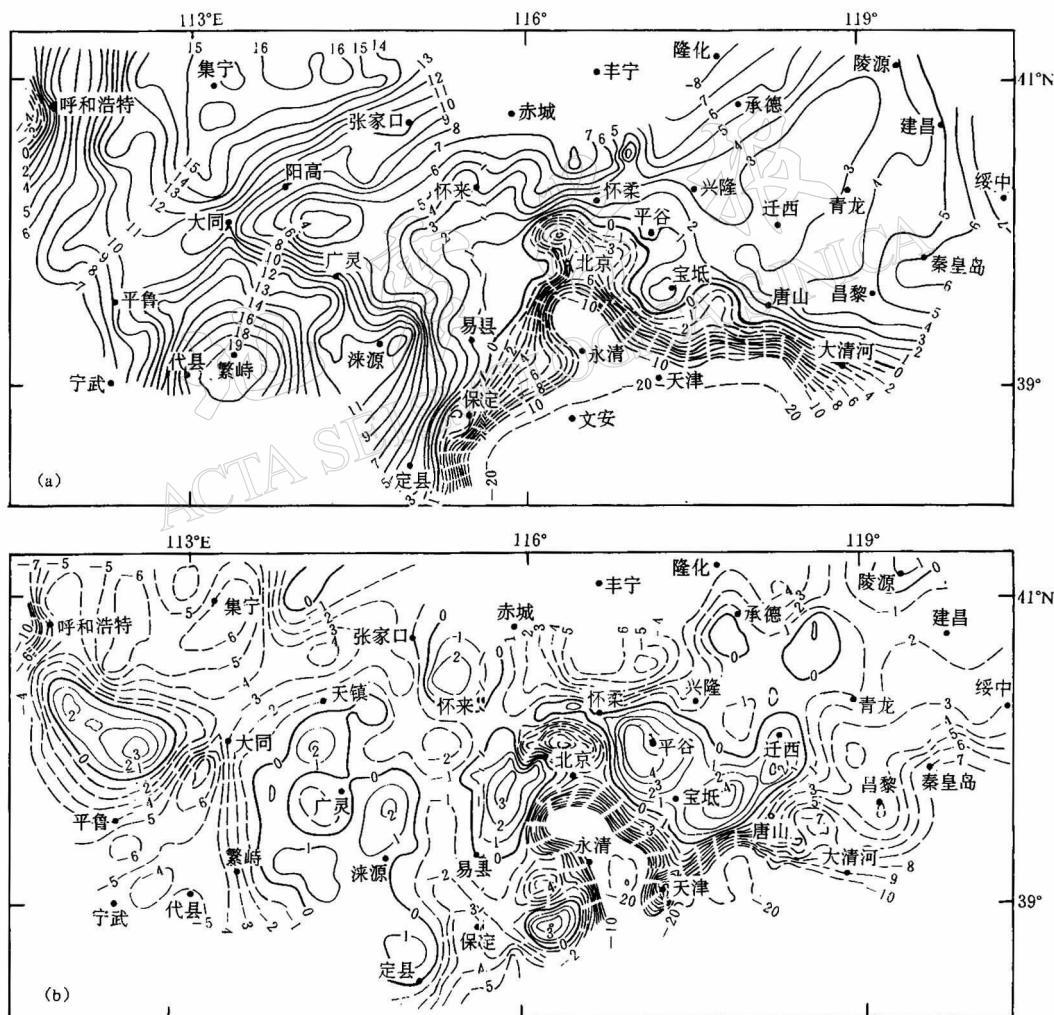


图2 华北地区地壳运动垂直形变速率图(mm/a)

(a) 1983~1988年; (b) 1988~1992年

的相关性分析, 得到垂直形变速率水平梯度异常的概率增益, 结果如表 3 所示。其中选取水平梯度值大于 $0.23 \text{ mm/a} \cdot \text{km}^{-1}$ 的区域作为异常区域。

表 3 华北北部地区($38^{\circ} \sim 41^{\circ} \text{ N}$, $112^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{ E}$) 垂直形变异常概率增益($M_s \geq 5.9$)

形变测量时间	异常发生率	有震报准率	垂直形变异常 概率增益 K	非垂直形变异常 概率增益 K'	对应 K 值的 R 值*
1983~1988 年	0.316 3	1.000 0	3.16	0	0.68

* 空间上无异常处地震概率增益(K' 值)对应的 R 值符号相反。

3.4 华北地区地震中长期概率增益预测结果与讨论

上述反映时间非平稳性的概率增益具有与空间的无关性, 因此在概率增益综合时, 时间概率增益将作用于每一个预测单元; 反映空间非均匀性的活断层概率增益具有与时间的无关性。因此, 那些存在有活断层的预测单元, 按活断层空间概率增益进行综合; 预测空间域的其它预测单元, 按非活断层空间概率增益进行综合。地壳垂直形变速率水平梯度随时间和空间不断变化, 因此地壳垂直形变速率水平梯度概率增益的综合, 应当以异常在新的时间和空间域分布为依据。为此, 以图 2b 中 1988~1992 年华北地壳垂直形变速率计算的梯度值作为圈定形变异常的依据, 对形变异常进行了概率增益综合, 结果见图 3。

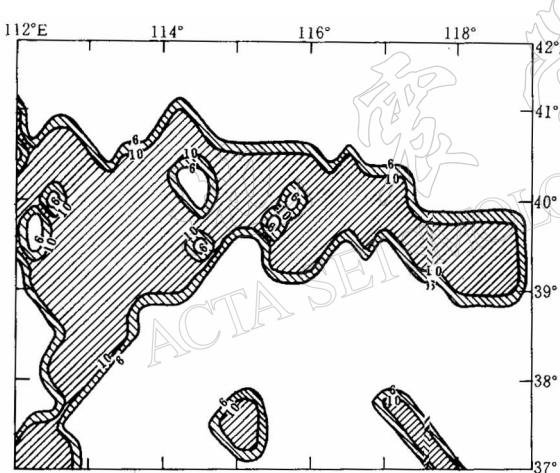


图 3 华北北部地区中长期地震
($M \geq 6$) 综合概率增益分布

从单项概率增益的分析看, “异常”发生的概率较高。虽然有较高的 R 值, 但虚报率也将增高。同时, 较高的“异常”发生概率也将对概率增益综合结果的精度产生一定的影响。这说明所选择的方法与强震还缺乏较明显的相关性, 或还不能给出十分明确和合适的“异常”判定条件。这在某种程度上反映了目前地震预报的实际水平。

图 3 给出的华北未来 10~20 年尺度 6 级以上强震发生的综合概率增益是依据有限的信息得到的, 为示意性的预测结果, 目的是为了说明概率增益计算及其综合的方法。按照 Aki

(1981) 等人的研究, 总概率增益每达到 30 左右, 地震预报将向前推进一个阶段。如长期向中期、中期向短期或短期向临震预报的过渡。因此, 如果假设图 3 结果为实际预测结果, 则该区域地震仍然处在中长期活动阶段。但如果加入其它单项手段的预测结果, 结论则有可能与此不同。

本文给出了当某一预测方法存在多个互不相交的“异常”状态时, 各“异常”状态概率增益的计算方法, 并推导了在这种情况下 R 值评分的方法及相互关系, 对如何正确评价预测方法的效能将有所帮助。所建立的方法是以地震的中长期预测为目的的。实际上, 该方法并不限于地震中长期预测, 而是适用于长、中、短、临各种时间尺度的预测, 并且可以作为

跨越不同时间尺度的一体化的综合预测方法。这是该综合方法的价值所在。

本文所用活断层资料为中国地震局“85-05”课题成果；地形变资料由薄万举和杨国华提供，特此致谢。

参 考 文 献

- 傅征祥. 1991. 中国大陆东部强震活动时间过程的不均匀性研究. 中国地震, 7(2): 1~11
- 蒋铭, 王晓青, 姜秀娥. 1993. 中国大陆东部地震活动的时间层次结构. 地震, 13(1): 16~20
- 金学申, 戴英华, 马桂华. 1997. 一种应用于地震长期预报中的概率增益模型(摘要). 见: 国家地震局科技发展司编. 中国大陆 2000 年前强震危险性预测研究. 北京: 地震出版社, 321
- 李钦祖, 于新昌. 1980. 华北地区大地震的成组活动特性. 地震科学, (1): 1~8
- 马宗晋, 傅征祥, 张郢珍, 等. 1983. 1966~1976 年中国九大地震. 北京: 地震出版社, 216
- 梅世蓉. 1960. 中国的地震活动性. 地球物理学报, 9(1): 1~19
- 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 1993. 中国地震预报概论. 北京: 地震出版社, 498
- 时振梁, 环文林, 曹新玲, 等. 1974. 中国地震活动的某些特征. 地球物理学报, 17(1): 1~13
- 许绍燮. 1973. 震兆分析一例. 见:《地震战线》编辑部编. 地震技术资料汇编. 北京: 科学出版社, 20~23
- 许绍燮. 1989. 地震预报能力评分. 见: 国家地震局科技监测司(编). 地震预报方法实用化文集: 地震学专辑. 北京: 学术书刊出版社, 586~590
- 张国民, 傅征祥. 1985. 华北强震的时间分布及物理解释. 地球物理学报, 28(6): 569~578
- 张立人. 1998. 中-长期预测方法概率增益的评估. 地震, 18(4): 331~336
- 张郢珍, 张立人, 粟生平, 等. 1992. 中国大陆垂直形变速率梯度与强震危险区. 地震地质, 14(3): 237~244
- Aki K. 1981. A probabilistic synthesis of precursory phenomena. In: Simpson D W, Richards P G eds. *Earthquake Prediction —— An International Review*. Washington D C: A G U, 566~574
- Aki K. 1984. The use of physical model of fault mechanics for earthquake prediction. In: The Organizing Committee of ISCESP ed. *A Collection of Papers of International Symposium on Continental Seismicity and Earthquake Prediction*. Beijing: Seismological Press, 653~659
- Kagan Y, Knopoff L. 1977. Earthquake risk prediction as a stochastic process. *Phys Earth Planet Inter*, 14: 97~108
- Kenji M, Akio Y. 1990. A probabilistic estimation of earthquake occurrence on the basis of the appearance times of multiple precursory phenomena. *J Phys Earth*, 38: 431~444
- Utsu T. 1977. Probabilities in earthquake prediction. *Zisin Ser*, 30(2): 179~185
- Utsu T. 1979. Calculation of the probability of success of an earthquake prediction (in the case of Lzu-Oshima-Kinkai earthquake of 1978). *Rep Coord Cpmom Earthq Predict*, 21: 164~166
- Utsu T. 1983. Probabilities associated with earthquake prediction and their relationships. *Earthq Predict Res*, 2: 105~144
- Utsu T. 1984. Long-and short-term seismic risk estimation from seismicity and precursors. In: The Organizing Committee of ISCESP ed. *A Collection of Papers of International Symposium on Continental Seismicity and Earthquake Prediction*. Beijing: Seismological Press, 818~827
- Vere-Jones D. 1978. Earthquake prediction —— a statistician view. *J Phys Earth*, 26: 129~146