

地震预报专家系统中的不精确推理*

庄昆元 王 炜 黄冰树 夏士华

(中国合肥 230031 安徽省地震局)

摘 要

本文指出了在地震预报中直接应用 MYCIN 不精确推理所存在的问题,介绍了在地震预报专家系统(ESEP/PC)中的不精确推理原理。针对地震预报中不同证据所给出的结论是在时、空、强三要素方面互不一致又部分重叠的连续区间这一特点,改进和发展了 MYCIN 不精确推理模型,提出了条件信度的概念及独立事件的信度分配律,使之完全适用于地震预报的实践。文中还介绍了系统对预报中常见的一些问题的处理办法。震例检验的结果表明,系统所采用的方法是科学的、合理的效果是好的。

关键词 专家系统;不精确推理;MYCIN;地震预报

一、引言

地震预报是一个令地震学家向往的课题,但是迄今为止全世界的地震专家仍然没有找到解决这一难题的办法。我国学者自 1966 年邢台地震以来,对这一领域开展了广泛的观测和研究,在这 30 余年中积累了丰富的经验和资料,为我们深入开展地震预报研究打下了坚实的基础。根据所积累的丰富的地震预报实践经验,我国地震工作者提出了由经验性地震预报向概率性预报过渡的方针。由于地震预报的样本个数太少,前兆现象的判定方面又存在着很强的不确定性,所以要实现数学意义上的概率性预报存在着许多困难。我们在研制地震预报专家系统的过程中,发现专家系统中的不精确推理方法可以很好地克服这一困难。于是,提出了如何在地震综合预报中应用不精确推理方法,以实现一定意义上的概率性预报问题。目前在专家系统中应用的不精确推理方法很多,但它们都不是很完善的,且各有各的特点。由于 MYCIN 模型比较符合人类专家完全依靠经验来进行推理的过程,使用时简单、有效;所以我们认为在地震综合预报中,利用 MYCIN 模型作不精确推理是合适的。庄昆元(1990)指出,现有的不精确推理模型,是针对推理目标为确定的离散事件的集合设计的,而地震预报中的推理目标是一个发生在时、空、强某一值域中的地震,不同的异常证据所推出的结论是在时、空、强方面互不一致而又有部分重叠的地震;显然,不加改变地直接引用现有的不精确推理模型是不合适的。在 1990 年庄昆元对 MYCIN 模型

* 1990 年 3 月 23 日收到本文初稿, 1991 年 3 月 7 日决定采用。

作了改进,它可以用于仅存在一个孕震区情况下的地震综合预报。当我们所研究的异常涉及到多个孕震区时,这一简单的改进模型就又出现了逻辑上的紊乱。为此,我们在1990年的基础上(庄昆元,1990)对MYCIN不精确推理模型从理论上再次作了改进,使之适用于地震预报的情况。本文之目的就在于介绍这一改进的MYCIN不精确推理模型及其原理。改进后的模型对推理目标为连续区间的情况具有普适性。

二、MYCIN 不精确推理模型

MYCIN是一个著名的计算机医疗专家系统,它用于为细菌感染的疾病患者提供治疗建议。该系统的不精确推理模型既简单又有效,完全符合专家凭藉经验进行推理判断的过程,因而常为后人所使用。在MYCIN模型中,(Shortliffe, 1976; 赵瑞清, 1986, 1987),规则的一般表示形式是:

$$\text{IF } E \text{ THEN } H \ CF(H, E) \quad (1)$$

其中, E 是证据,它可以是单个证据也可以是多个证据 $E_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的组合; H 是一个结论或多个结论 $H_i (i=1, 2, \dots, m)$ 的有限集合 $[H_1, H_2, \dots, H_m]$; $CF(H, E)$ 是可信度因子,说明当证据 E 存在时,结论 H 为真的程度,它是一个与概率有联系但又不等同于概率的量。当 H 为多个结论 H_i 的有限集合时, $CF(H, E)$ 相应地应表示为 $[CF(H_1, E), CF(H_2, E), \dots, CF(H_m, E)]$

在MYCIN中,可信度 CF 定义为

$$CF(H, E) = \begin{cases} \frac{P(H|E) - P(H)}{1 - P(H)} & P(H|E) > P(H) \\ 0 & P(H|E) = P(H) \\ \frac{P(H|E) - P(H)}{P(H)} & P(H|E) < P(H) \end{cases} \quad (2)$$

这里, $P(H)$ 为 H 的先验概率, $P(H|E)$ 表示 E 为真时 H 的条件概率。当 $CF=1$ 时,表明由于证据 E (异常)的存在使 H (某时段,某地区内发生中强以上地震)为真; $CF=-1$ 时,表明 E 的存在使 H 为假; $CF=0$ 表示 E 的存在对 H 无影响。

在地震预报领域,由于在某短时段,小范围内发生中强以上地震是小概率事件,于是 $P(H) \approx 0$,因而 $CF(H, E) \approx P(H|E)$ 。这样,我们就取异常对应地震的报准率作为规则的信度,很明显,对于这样的一些规则其信度是恒大于0的。

可信度在MYCIN不精确推理中的传播求值规定如下:

(1)由于证据 E 是不确定的,它以信度 $CF(E)$ 存在,于是在规划

$$\text{IF } E \text{ THEN } H \ CF(H, E)$$

被使用时,结论 H 的信度为

$$CF(H) = CF(H, E) \cdot CF(E) \quad (3)$$

当证据是多个证据 $E_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的“与”组合时,

$$\begin{aligned} CF(E) &= CF(E, \text{And } E_2, \dots, \text{And } E_n) \\ &= \min[CF(E_1), CF(E_2), \dots, CF(E_n)] \end{aligned} \quad (4)$$

当证据是多个证据的“或”组合时,

$$\begin{aligned} CF(E) &= CF(E_1 \text{ or } E_2 \text{ or } \dots, E_n) \\ &= \max[CF(E_1), CF(E_2), \dots, CF(E_n)] \end{aligned} \quad (5)$$

(2)若有两条规则具有相同的结论,它们的结论信度相应地为 $CF_1(H)$ 和 $CF_2(H)$,那么综合后结论 H 的信度为

$$CF_{12}(H) = \begin{cases} CF_1(H) + CF_2(H) - CF_1(H) \cdot CF_2(H) & CF_1(H) \text{ 和 } CF_2(H) \geq 0 \\ CF_1(H) + CF_2(H) + CF_1(H) \cdot CF_2(H) & CF_1(H) \text{ 和 } CF_2(H) \leq 0 \\ CF_1(H) + CF_2(H) & CF_1(H) \text{ 和 } CF_2(H) \text{ 反号} \end{cases} \quad (6.1)$$

$CF_{12}(H) = \begin{cases} CF_1(H) + CF_2(H) - CF_1(H) \cdot CF_2(H) & CF_1(H) \text{ 和 } CF_2(H) \geq 0 \\ CF_1(H) + CF_2(H) + CF_1(H) \cdot CF_2(H) & CF_1(H) \text{ 和 } CF_2(H) \leq 0 \\ CF_1(H) + CF_2(H) & CF_1(H) \text{ 和 } CF_2(H) \text{ 反号} \end{cases}$

当多条规则具有相同结论时,则应把具有相同符号规则信度的规则集中在一起分别按(6.1)及(6.2)式反复地进行综合,最后再按(6.3)式给出最终的综合信度.当结论 H 是有限个子结论 H_i 的集合时,可对各个 H_i 作上述的 MYCIN 综合.为方便计,我们以后称(6)式为 MYCIN 求和.在地震预报领域,我们的规则都具有正的信度,所以在地震预报中的 MYCIN 综合指的就是按(6.1)式进行综合,而 MYCIN 求和指的也就是用(6.1)作求和运算.

三、MYCIN 模型在地震预报专家系统中的应用与推广

正如我们在本文的开始时所指出的,现有的不精确推理方法,与地震预报系统在推理目标方面存在着明显的差异.在 MYCIN 中推理目标是离散的事件,所以对相同结论或目标可以用 MYCIN 综合的方法给出.在地震预报中,推理目标是在不同时段,不同区域内发生的不同震级范围的地震,所以不能直接套用 MYCIN 模型进行综合.为此,我们把 MYCIN 不精确推理模型进行改进,使之适用于地震预报的情况.

由于地震预报的推理目标是时、空、强三要素所构成的多维空间中的一个域集,为简单起见我们需对推理目标作降维处理.即把上述三要素分别单独处理,这与我们目前地震预报中的实际思路是一致的.

在实际预报过程中,不同预报知识或指标对三要素的预报意义是不同的,这样就产生了如何将规则信度分配给预报要素的问题.通常,当领域专家不认为某条规则,对不同要素的预报能力存在差异时,我们对各要素分配以与规则相等的信度.当对三要素的预报能力存在差异时,则对预报能力较弱的要素适当地分配以比规则信度要小的值,从而体现了规则在预报中对不同要素所起的作用.

经降维处理后,我们目标对象的空间域减少了,但它们都是实数集,与 MYCIN 推理模型中的有限离散集不一致.为此,我们要对这三个要素分别选取推理目标使之成为有限的离散集.根据目前地震预报的水平和能力,我们对震级这一要素选定三个推理目标: $\{M_s \geq 7, M_s = 6-6.9, M_s = 5-5.9\}$;对地震发生的时间则选取中期、短期和临震三个阶段,并进一步分解为若干子目标,从而构成子目标集如下:

中期阶段	短期阶段	临震阶段
{[≤ 2 年, ≤ 1 年]; [≤ 3 月]; [15-30 天, 7-15 天, 3-5 天, ≤ 3 天]}		

经这样划分后,便可方便地利用 MYCIN 不精确推理模型分别对震级、时间各目标进行推理而得到各目标的信度.对上述目标集中各目标的信度分配一般可根据专家经验确

定,但对某一要素中互不重叠目标的可信度 CF_i 之和,应与规则分配给该要素的信度 CF 相等*. 即

$$CF = \sum_{i=1}^n CF_i \quad (7)$$

对于空间要素(发震地点)的综合,由于各异常指标所预报的区域互不一致又部分重叠,情况远较上述二者复杂,使我们不能直接套用现有的 MYCIN 不精确推理模型. 为此,我们对它作了改进,使之能适合于地点预报中推理目标为互不一致,又部分重叠的连续区间的情况.

结论 I 结论 II				
1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20

图 1 对空间目标进行 MYCIN 综合示意图. 结论 I, II 所预报区域分别为粗线框所圈区域, n_1, n_2 中列出了所占单位矩形区的序号

假定在某地区发现二项地震活动性方面的异常,如 b 值异常和 c 值异常,其预报区域分别为图 1 中的 2 个阴影部分 A_1 及 A_2 . 不失一般性,为简单起见我们用 2 个有部分重叠的矩形域来表示. 由于这 2 个推理结果的目标区域不同,即推理结论互不一致,因此不能直接进行 MYCIN 综合. 通常,对 1 个地区而言中强以上地震的发生是个小概率事件,这样我们就有理由认为,在这 2 个目标区域 A_1, A_2 的范围内发生一个中强以上地震的信度,是这 2 个推理结果信度的 MYCIN 综合. 可是,从图 1 显然可见,重叠区内的发震信度应大于非重叠区的发震信度,于是就产生了如何求出在不同区域范围内发生地震的信度问题. 这样,我们必须设法把推理目标一致起来,使之能应用 MYCIN

不精确推理模型. 我们先把推理所得的目标区域 A_1 和 A_2 划分成许多如图 1 中所示的小区. 对于图中标号为 8, 13 等小区,它们是证据 I 与证据 II 共同预报的区域,而其余的则是证据 I 或证据 II 单独预报的区域,或者是二者都不预报的区域. 这就是说我们把由证据 I 和 II 推得的发震区域目标分解为许多子目标,定义子目标为依据证据所推得的地震被限制在某一小区内发生这样 1 个事件. 于是子目标的信度也就是把依据证据所推得的地震,限定在某一小区内发生的信度. 它与概率论中的条件概率类似,我们可称它为条件信度,而这个条件是相对于证据所推出的某预报范围而言的. 经如此定义之后,结论所述及的各个子目标就成了独立事件. 对于同 1 个推理子目标来说,若有两项异常证据同时涉及,则该子目标的综合信度,是这两项推理结论分配到该子目标的条件信度的 MYCIN 综合. 以后为方便计,我们对各子目标所说的信度指的就是它们各自的条件信度. 下面我们来考虑如何把规则的信度分配给各个子目标. 由上面的定义,在均匀性的假定下,我们认为由结论信度 CF 分配给子目标 i 的信度 cf_i ,应满足下面 4 个逻辑条件.

(1) 对 1 个结论(或推理目标)的所有子目标来说,对它们的信度 cf_i ,逐个作 MYCIN 综

* 由于地震预报中规则信度一般很低,且对时间与震级目标来说互不重叠的子目标数很少,因此可近似认为这一要求是合理和正确的.

合后其信度应与结论本身的信度 CF 一致, 即

$$\sum_i^{(M)} cf_i = CF \quad (8)$$

式中 $\sum_i^{(M)}$ 表示 MYCIN 求和.

(2)对于有多个结论作用的同一子目标而言, 设各结论分配到该子目标的信度为 cf_j^i , 则多个结论综合后的信度 CF_i 应是各结论对这一子目标信度 cf_j^i 的 MYCIN 综合, 即

$$CF_i = \sum_j^{(M)} cf_j^i \quad J = I, II, \dots, N \quad (9)$$

式中 J 是结论序号.

(3)对于 2 个子目标的逻辑“或”, 其信度是这 2 个子目标的 MYCIN 综合.

(4)由于 MYCIN 综合的最终信度与综合的顺序无关, 所以对所有子目标的逻辑“或”所构成的目标来说, 其信度就等于所有证据推理结果信度的 MYCIN 综合.

我们推得将规则所预报的区域划分为 n 个单位区域后, 那么对每一个小单元 i (子目标) 来说在均匀性的假定下其信度按下式

$$cf_i = 1 - (1 - CF)^{1/A} \quad (10)$$

或

$$cf_i = 1 - (1 - CF)^{\Delta A_i / A} \quad (10)$$

进行分配, 则上述逻辑条件可以完全被满足. 我们称(10)式为信度分配律. 这里 CF 为依据某证据而推得的结论总信度, cf_i 为由总信度分配给 i 个单位区域(子目标)的信度, A 为与总信度相应的预报区域的面积, ΔA_i 为第 i 个单位区域的面积. 容易看出

$$\sum_i^{(M)} cf_i = 1 - (1 - CF)^{[\sum_i^{(M)} \Delta A_i / A]} = CF \quad (11)$$

它满足条件(1)的要求. 同样, 分配律(10)也满足其它的逻辑条件. 现在我们把积分理解为无穷小量求和, 则可把上式改写为

$$\int_A^{(M)} df = 1 - (1 - CF) \int_A^{(M)} dA / A = CF \quad (12)$$

这里, 信度的求和指的是 MYCIN 求和, 所以积分亦应定义为 MYCIN 意义下的积分, 用积分号上的 (M) 表示之.

如果我们只对 A 中某一区域 A_0 求信度, 则

$$CF(A_0) = \int_{A_0}^{(M)} df = 1 - (1 - CF)^{A_0 / A} \quad (13)$$

就是规则分配给区域 A_0 的信度, 这时对单元是否为等面积划分无关.

根据逻辑条件(3), 我们可以把具有高信度(例如大于 $0.1/\text{平方度}$)的单元区域用逻辑“或”联合起来以得到在一定区域范围内的发震信度作为预报地点的信度. 由上述推理过程可知, 该方法的推理结果与小单元的划分方法及其面积的大小无关.

上面我们针对发震区域的信度问题, 提出了适合于地震预报的改进的 MYCIN 方法, 这一方法同样可用于时间和震级的预报.

四、地震预报三要素可信度的综合

在按上节方法推得时间、震级目标中的各子目标的信度,以及空间上的发震信度分布后,我们必须对时、空、强分别推理得到的结果作进一步的综合,以得到一个完整的预报意见。需指出的是我们在专家系统中所收集的预报经验,都是针对发生 $M_s \geq 5$ 级以上地震而言的。因此,所得到的时、空信度 $CF(T)$ 及 $CF(A)$ 都含有发生 $M_s \geq 5$ 级以上地震的意义。依据模糊数学的原则

$$CF(T, A, M_s \geq 5) = \min\{iCF(T), CF(A)\} \quad (14)$$

它表示某区域在某一时间段内发生 $M_s \geq 5$ 级以上地震的信度。但系统推得的震级目标的信度 $CF(M_s)$,主要是根据一些预报震级的知识或经验关系式求得的,在某区域发生某震级范围内地震的信度。实际预报知识中所隐含的发生 $M_s \geq 5$ 级地震的概念,在计算 $CF(M_s)$ 的过程中并没有起作用。所以其信度一般都小于时间或空间。为得到在某时段、某区域内发生在某震级范围内地震的信度,我们可按下式分配信度:

$$CF(T, A, M_s) = 1 - [1 - \min\{CF(T), CF(A)\}]^{\frac{CF(M_s)}{\sum_i CF(M_i)}} \quad (15)$$

显然, $CF(T, A, M_s \geq 5)$ 应等于各个 $CF(T, A, M_s)$ 按 MYCIN 综合后给出的结果。

在实际工作中,人们经常利用一些现有的经验关系来估计未来地震的震级或发震的时间。我们系统提供了利用这些经验关系的功能。若对某预报区域来说存在 n 个异常证据,相应地存在着 i 个 ($i \leq n$) 由经验关系式求得的震级值 m_1, m_2, \dots, m_i 及其信度 cf_1, cf_2, \dots, cf_i 。这时系统将根据

$$M = \sum_{i=1}^n m_i \times cf_i / \sum_{i=1}^n cf_i \quad (16)$$

计算未来可能的地震震级供用户参考。系统对发震时间的估计也作出同样的处理。

在预报实践中,短临异常出现的时间短,通常难以捕捉或识别。因此当中期信度较高时,即使系统推得的短、临信度较低,在预报中亦不应掉以轻心。反之,即使出现了较多的短、临异常并有较高的短、临信度,我们也难以认为有较大的把握进入短、临阶段。为体现预报专家在这方面的经验,我们系统按下式对推理结果的信度加以调整:

$$CF_A = \begin{cases} CF + 0.1 & x \geq 0.6 \\ CF + [(x - 0.4)/2] \exp[(x - 0.6)/0.2] & 0.4 \leq x < 0.6 \\ CF \cdot LXP[(x - 0.4)/2] & x < 0.4 \end{cases} \quad (17)$$

这里 x 为该区发生 $M_s \geq 5$ 地震的中期信度, CF 为由证据推得的短期或临震阶段的综合信度, CF_A 为经过调整后可以直接用作短、临预报的信度。

鉴于目前地震预报的水平,在实践中我们经常使用一些不确定性较强的语言来表达对未来地震的估计。为避免对这些预报语言的意义造成混乱,系统根据对震例检验的结果,考虑到震前发现的异常往往少于震后看到的异常及震前对异常难以肯定的事实,对信度及相应的预报语言作如下规定(表 1)。

表 1 发震信度及相应的预报语言

发震信度 CF	预报语言
0.8—1.0	发震可能性很大
0.6—0.8	发震可能性较大
0.4—0.6	有可能发震
0.2—0.4	发震可能性较小
0.0—0.2	发震可能性很小

四、应用实例

自 70 年代以来华北地区共发生 10 余次 $M_s \geq 5$ 地震, 我们利用“中国震例”(张肇诚, 1988) 中所总结的资料对 ESEP/PC 所采用的不精确推理方法进行检验, 取得了满意的效果。限于篇幅, 本文仅给出海城、唐山、固镇等几次地震的结果。

1. 1975 年 2 月 4 日海城 7.3 级地震

(1) 根据震前已发现的异常所得到的结果 震前已发现的异常有: 1974 年开始震中周围较大范围内地震频次增高, 并出现一些小震群活动; 前兆方面有金县短水准、大连地磁及渤海海平面升高等异常; 1974 年 11 月起又出现大范围的动物及地下水异常; 临震前出现明显的前震序列和其它宏观异常。

表 2 异常区域在不同时段发生不同震级地震的可信度

时段	$M_s \geq 5$	$M_s \geq 6$	$M_s \geq 7$
中期	0.637	0.599	0.480
$T \leq 2$ 月	0.613	0.575	0.458
$T < 1$ 年	0.419	0.387	0.296
短期	0.467	0.433	0.331
$T \leq 3$ 月	0.467	0.433	0.331
15—30 天	0.000	0.000	0.000
7—15 天	0.040	0.036	0.026
3—7 天	0.214	0.195	0.144
$T \leq 3$ 天	0.509	0.474	0.369

注: 以较大的可能性进行中期预报后, 当前极可能进入临震阶段; 未来地震的震级可能为 $M_s \geq 7.0$ 。

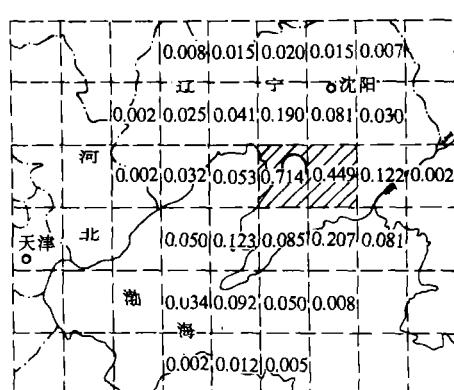


图 2 根据海城地震前已发现的异常得到的发生中强以上地震的可信度空间分布图

根据上述异常, 系统得到的三要素综合结果及预报意见见表 2(信度空间分布见图 2)。由发震信度的空间分布可见, 震中区附近信度最高(图中阴影区为信度 $CF \geq 0.4$ 的发震危险区), 而其它区域较低, 这对预报发震地点具有重要意义。综合三要素后的预报结果是, 该区域发生 5 级以上地震的中期信度为 0.64, 短期为 0.47, 临震为 0.63。给出的预报意见为: “以较大的可能性作出中期预报后, 目前已进入发生中强以上地震的临震阶段; 未来地震的震级可能为 $M_s \geq 7$ ”。可见所得到的信度及其预报结论是合理。系统还根据某些经验公式得到未来地震的震级为 7.1。

(2)根据震后总结的异常所得到的结果 由中国震例(张肇诚,1988)可知,海城震前共有约40次项异常,据此可得结果见表3(信度空间分布见图3).

表3 综合预报结果(异常区域在不同时段发生不同震级地震的可信度)

时 段	$M_s \geq 5$	$M_s \geq 6$	$M_s \geq 7$
中 期	0.951	0.929	0.787
$T \leq 2$ 年	0.941	0.916	0.764
$T \leq 1$ 年	0.864	0.826	0.639
短 期	0.679	0.631	0.411
$T \leq 3$ 月	0.581	0.531	0.359
15—30 天	0.161	0.112	0.086
7—15 天	0.150	0.133	0.080
3—7 天	0.285	0.255	0.157
$T \leq 3$ 天	0.542	0.496	0.329

注:以很大的可能性进行中期预报后,当前极可能进入临震阶段;未来地震的震级可能为 $M_s \geq 7$.

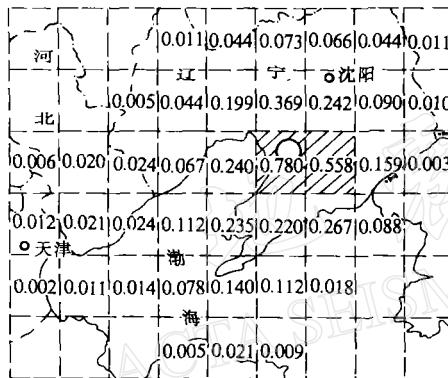


图3 海城地震前发生中强以上地震的
可信度空间分布图

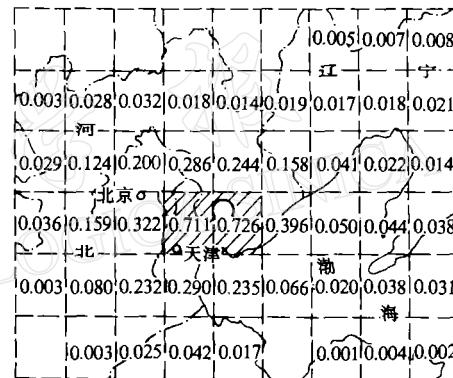


图4 唐山地震前发生中强以上地震的
可信度空间分布图

结果表明系统给出的结论是科学的,说明这一不精确推理方法完全符合地震预报领域的特点.

2. 1976年7月28日唐山7.8级地震

这次地震前共有70多项异常(张肇诚,1988),据此得到推理结果如表4(信度空间分布见图4).可见,预报的效果是好的.

表4 综合预报结果(异常区域在不同时段发生不同震级地震的可信度)

时 段	$M_s \geq 5$	$M_s \geq 6$	$M_s \geq 7$
中 期	0.986	0.982	0.897
$T \leq 2$ 年	0.982	0.976	0.880
$T \leq 1$ 年	0.922	0.908	0.741
短 期	0.932	0.919	0.758
$T \leq 3$ 月	0.747	0.723	0.516
15—30 天	0.274	0.259	0.156

时段	$M_s \geq 5$	$M_s \geq 6$	$M_s \geq 7$
7—15 天	0.198	0.187	0.110
3—7 天	0.304	0.287	0.174
$T \leq 3$ 天	0.507	0.484	0.312

注: 以很大的可能性进行中期预报后, 当前极可能进入临震阶段; 未来地震的震级可能为 $M_s \geq 7$.

3. 1979 年 3 月 2 日安徽固镇 5.0 级地震

表 5 综合预报结果(异常区域于不同时段发生不同震级地震的可信度)

时段	$M_s \geq 5$	$M_s \geq 6$	$M_s \geq 7$
中 期	0.745	0.414	0.000
$T \leq 2$ 年	0.694	0.371	0.000
$T \leq 1$ 年	0.443	0.205	0.000
短 期	0.070	0.028	0.000
$T \leq 3$ 月	0.035	0.014	0.000
15—30 天	0.000	0.000	0.000
7—15 天	0.000	0.000	0.000
3—7 天	0.000	0.000	0.000
$T \leq 3$ 天	0.000	0.000	0.000

注: 当前以较大的可能性进入中强以上地震的孕震中期阶段; 未来地震的震级可能为 $M_s = 5—5.9$.

根据我局在震后的总结, 震前仅存在 7 项地震学方法异常, 据此系统对整个区域给出综合结果见表 5(信度空间分布见图 5). 此次地震前我们曾根据 r_p/r_s 、空区和地震频次异常作出一定程度的中期预报. 震后通过认真总结发现了更多的地震学异常, 因此中期信度较高. 这一事实与一般认为, 对 5 级左右地震难以作出预报的看法相一致.

五、结语

本文改进和推广了现有专家系统中的 MYCIN 不精确推理方法, 使之适用于地震预报的实践. 提出了条件信度的概念及对独立事件的信度分配律. 用先降维、后合成的办法解决了地震预报中多维推理目标及其综合的问题. 这些都使我们在地震预报中科学地应用不精确推理方法成为可能, 为实现由经验性预报向概率性预报过渡进行了有益的尝试. 实际上, 本文所提出的方法可以应用于多维的和以连续集作为推理目标的领域. 我们的工作还很肤浅, 许多方面还有待于进一步完善, 尤其是需要经过更多的地震预报实践的检验.

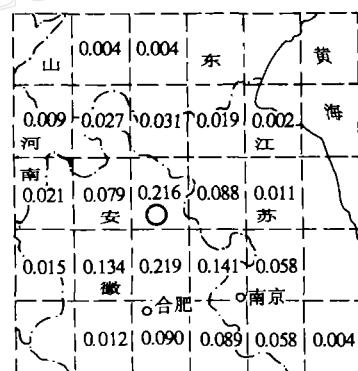


图 5 固镇地震前发生中强以上地震的
可信度空间分布图

参 考 文 献

- 赵瑞清, 1986. 专家系统初步. 气象出版社, 北京.
- 赵瑞清, 1987. 专家系统原理. 气象出版社, 北京.
- 庄昆元、王炜、黄冰树, 1990. 利用专家系统不精确推理方法确定未来地震危险区. 中国地震, 6, 2, 1—9.
- 张肇诚主编, 1988. 中国震例. 地震出版社, 北京.
- Shortliffe, E. H., 1976. *Computer-Based Medical Consultation: MCCV*. American Elsevier Publishing, Inc. New York, 98—188.

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA