

2003年民乐—山丹6.1级地震震情预警检验研究^{*}

刘小凤, 张辉

(甘肃省地震局, 兰州 730000)

摘要: 2003年民乐—山丹6.1级地震前, 甘肃省地震局于9月20日提出了祁连山中东段地区6级左右地震短期预报意见, 并采取了多种行之有效的短临跟踪措施, 得到了中国地震局、甘肃省委、省政府的高度评价和表彰奖励。根据本次成功震例预报实践中积累的不同阶段预报指标体系, 利用层次分析法, 确定了祁连山地震带震情指标预警模型。依据预警模型及震情预警指标分层结果, 将各类定量和定性指标转化为无量纲的以1~4表示的指标值, 按成对比较法比较下层各指标两两之间对上层某指标的重要程度, 计算权重向量, 并对模型的整体层次进行一致性检验。研究结果表明, 该地震前祁连山地震带震情预警值为3.1389, 依据预警等级判定标准, 震情预警级别为红色。

关键词: 民乐—山丹6.1级地震; 预警模型; 指标; 预警检验

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2010)02-0131-07

0 引言

预警就是事先发出警告, 以便采取有效措施, 将各种损失降到最低(柏立新, 2003; 张红兵, 2006)。地震预警的含义主要指依据地震自然属性的预测结果, 充分考虑地震预测本身的不确定性, 以及发布地震预报后可能造成的社会影响、建(构)筑物和生命线工程的抗震能力等复杂因素, 考虑地震预测的风险而进行的预警, 同时针对预警级别提出相关措施(张晓东等, 2008; 杨马陵等, 2004)。震情指标预警模型的基本思路是基于地震预测的特点, 选取与地震孕育发展过程相关的指标, 结合不同预测时间尺度的预报效能评价, 建立地震预警指标体系, 在此基础上利用层次分析法建立区域地震震情指标预警模型。由于短期阶段判定地点和强度的指标相对较少, 震情指标预警模型只考虑震级和地点已确定的时间预警模型。

本文在区域活动构造定量数据和地震活动基本特征研究基础上, 结合祁连山地震带地震活动

和前兆中短期预测指标效能评估及中短期预测方案研究成果, 利用层次分析法, 建立了震情指标时间预警模型, 定量计算出2003年民乐—山丹6.1级地震震情预警值, 确定了震情预警级别。

1 区域构造背景

2003年民乐—山丹6.1级地震发生在祁连山中段大黄山隆起区南缘的民乐—永昌断裂及西缘的童子坝河断裂带上, 其中民乐—永昌隐伏断裂西段的民乐—大马营段为主要发震断裂, 童子坝河隐伏断裂为主要参与者, 是大黄山隆起向南西方向推挤, 前缘断裂发生逆冲, 造成推覆体局部上拱引发的地震(郑文俊等, 2005)。本区中强以上地震十分活跃, 曾发生公元180年高台7.5级、1927年古浪8.0级、1954年山丹7.3级、1986年门源6.4级地震和多次5级地震(图1)。本次地震前存在比较明显的地震活动性和前兆异常, 甘肃省地震局据此提出了预报意见(杨立明, 王兰民, 2004), 取得了较好的短期预报效果。

^{*} 收稿日期: 2009-04-15.

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划子专题(2006BAC01B03-04-02)项目资助.

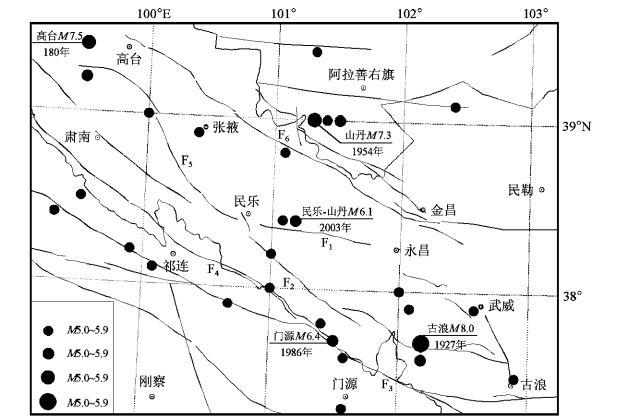


图1 祁连山中东段地震构造图

F_1 : 民乐—永昌断裂; F_2 : 祁连山北缘断裂; F_3 : 冷龙岭断裂;
 F_4 : 肃南祁连断裂; F_5 : 榆木山断裂; F_6 : 龙首山断裂

Fig. 1 Tectonic features and distribution of earthquakes with $M_s \geq 5$ in Qilianshan active region

2 祁连山地震带时间判定指标及效能评价

笔者通过 1970 年以来祁连山地震带发生的 22 次 5 级以上地震的震例总结研究, 提取出了中强以上地震前中短期阶段的时间预测指标, 并对各种预测指标的效能进行了评价。为了科学而客观地评价各项预测指标的实际映震能力, 笔者采用许绍燮在预报效能评价中提出的 R 值计算标准及综合评分方法 (陆远忠等, 1989)。其中, 地震活动性预测指标的效能评价采用地震对应率来评估, 前兆异常指标效能评价采用 R 值评分方法。

2.1 长期预报指标及效能评价

笔者根据不同阶段地震预测指标研究结果, 确定了祁连山地震带长期预测指标及效能 (表 1)。其中, 活动构造定量研究结果主要考虑了不同断层段的活动习性 & 大震离逝时间, 震源机制解用

表 1 长期预报指标效能评价				
Tab. 1 Long-term prediction index efficiency evaluation				
序号	异常项目	判定指标		效能评价
		时间/a	区域	
1	活动构造定量数据	1~10	断层闭锁段	0.5
2	震源机制解	1~3	应力状态转变区域	0.1
3	历史地震活动特征	1~3	强震集中丛集活动区	0.6
4	迁移与呼应	1~10	自东向西再折返向东	0.4
5	GPS 形变观测	1~3	剪应变速率增强区	0.3

于确定区域应力状态, 历史地震活动特征指不同演化阶段强震主体活动地区, 迁移与呼应以祁连山地震带几年至十几年时间尺度上强震自东向西再折返向东迁移或东西向迁移特征为主, GPS 形变观测主要侧重于 1~10 年尺度在时间和地点判定上的预报能力, 跨断层形变观测为几年时间尺度上继承或反继承性运动状态及尖点突跳等异常特征。

2.2 中期预报指标及效能评价

笔者依据本区 22 次 5 级以上地震的震例总结研究结果, 获得了地震活动性和前兆异常指标及效能评价 (表 2)。其中, 孕震空区是该地区中强以上地震前较普遍的中短期异常, 具有较高的映震效能; 该区 5 级以上地震存在成组活动的特征, 成组地震时间间隔一般在 3 个月内, 空间上距离首发地震 200 km 内; RTL 方法以急剧上升或下降为主, 异常时间主要集中在 10~37 个月; 跨断层形变观测异常特征主要表现为多个测点同时出现显著异常变化, 或单个测点出现大幅度的突变或阶变异常, 如窝子滩形变一般在震前 3~4 个月出现趋势加速—转折异常形态。

表 2 中期预报指标效能评价				
Tab. 2 Medium-term prediction index efficiency evaluation				
序号	异常项目	判定指标 $5 \leq M \leq 6$		效能评价
		时间/a	区域	
1	进入活跃期	1~2	祁连山地震带	0.6
2	背景空区	0.5~3	空区内部或边缘	0.5
3	中强震成组活动	0.5~1.5	震源及附近地区	0.5
4	RTL 方法	1~3	震源区或近源区	0.4
5	跨断层形变观测	1~3	≤ 300 km	0.3

2.3 短期预报指标及效能评价

笔者根据 1970 年以来祁连山地震带发生的 22 次 5 级以上地震前出现的地震空区、条带、小震活动持续或突发增强、前兆地震、地震窗口、地震频度等地震图像和参数异常来确定地震活动性异常各项指标的对应率 (刘小凤, 杨立明, 2004; 刘小凤, 2003)。前兆异常以嘉峪关气氦、山丹电阻率、武威电阻率、刘家峡应力和窝子滩形变等重点前兆异常的出现为主 (表 3)。在作短临预报效能评价时, 由于部分映震效果较好的台站停测或“十五”数字化改造, 所获取资料与过去资料不连续, 因而无法继续跟踪对比分析, 因而没有纳入预测指标效能评估。

表 3 短期预报指标效能评价

Tab. 3 Short-term prediction index efficiency evaluation

序号	异常项目	判定指标 $5 \leq M \leq 6.4$		效能评价 /R	
		时间	区域		
1	地震空区	几个月 ~ 几年	孕震空区边缘或内部	0.73	
2	地震条带	1 ~ 6 个月	条带内部、端部或交汇处	0.41	
3	地震窗	1 ~ 6 个月	≤ 500 km	0.37	
4	小震活动持续或突发增强	3 ~ 5 个月	≤ 300 km	0.20	
5	显著地震	几天 ~ 1.5 个月	≤ 180 km	0.5	
6	频度	1 ~ 6 个月	增强区附近	0.33	
7	<i>b</i> 值	1 ~ 6 个月	异常区附近	0.37	
8	前兆异常准同步性变化	0.5 ~ 2 年	≤ 300 km	0.4	
9	重点前兆	嘉峪关气氛	1 ~ 6 个月	≤ 300 km	0.25
		山丹电阻率	小于 6 个月	≤ 300 km	0.09
		武威电阻率	10 余天 ~ 2 个月	≤ 300 km	0.42
		刘家峡应力	2 ~ 3 个月	≤ 600 km	0.36
10	重力和形变观测	3 ~ 4 个月	≤ 500 km	0.23	
11	数字地震	地震频谱特征	几天 ~ 十几天	≤ 100 km	0.15
		应力降	几天 ~ 1 个月	≤ 200 km	0.15
		震源机制解	1 ~ 3 个月	≤ 300 km	0.2
12	数字前兆	流体	几小时 ~ 几天	≤ 500 km	0.15
		钻孔应变	几小时 ~ 几天	≤ 500 km	0.3

3 2003 年民乐—山丹 6.1 级地震时间预报过程回顾

2003 年民乐—山丹 6.1 级地震取得了较成功的短临预报（杨立明，王兰民，2004），现将中短期阶段预测依据汇总如下：

3.1 中期预测依据

(1) 活跃期内地震丛集活动

祁连山地震带中强以上地震存在活跃—平静交替活动特征。2001 年昆仑山口西 8.0 级地震后，区域地震活动丛集现象突出，分别发生了 2002 年玉门 5.9 级和 2003 年德令哈 6.6 级地震。这种特征有利于对该区地震的研究，从而为民乐—山丹 6.1 级地震的预报提供了中短期依据。

(2) 地震活动迁移和呼应

祁连山南缘及柴达木地块发生 6 级以上地震后，祁连山中东段地区发生 5 级以上迁移地震的可能性较大，迁移的时间基本集中在 1 年以内，优势时段为震后 5~10 个月。2003 年德令哈 6.6 级地震的发生可能会诱使该地区发生 5 级以上地震。

3.2 短期预测依据

依据祁连山地震带 5 级以上地震前短期阶段异常表现的共性特征提炼出了 2003 年民乐—山丹 6.1 级地震前短期阶段的地震活动及前兆异常指标及判据。

(1) 局部地区地震活动增强或有序迁移

地震活动增强是本区较为普遍的一种地震活动现象，短期阶段地震活动增强具有两种表现形式。一种为局部地区的地震活动增强，且存在增强—转折发震和增强发震等形态，其中地震活动的加速增强或转折是进入短期乃至临震的标志。另一种增强活动方式是多个应力集中区相继出现地震活动的活跃，表现出组合活动及有序迁移的态势，具有快速、有序的迁移图像，是孕震系统进入短期阶段的标志。

(2) 大范围群体前兆的成组同步异常

区域前兆异常在强震前通常表现为群体前兆变化的成组同步活动。这种现象的出现是本区强震前短期阶段的标志。1995 年永登 5.8 级、2000 年景泰 5.9 级、2001 年肃南 5.3 级和 2003 年德令哈 6.6 级地震前短期阶段均出现过大范围群体前兆的成组同步异常现象。2003 年 8 月前后，区域前

兆台网观测到大范围的相对同步活动的前兆异常变化,意味着祁连山地震带短期阶段存在发生中强以上地震的可能。

(3) 显著的地震事件或具有较高映震效能的前兆异常出现

强震前出现显著的地震事件或显著的前兆异常,是祁连山地震带地震前的一种较为普遍的现象。这里的显著地震事件指 4 级左右的地震,对该区的地震短期预报具有指示意义,而映震能力较高的前兆异常是指多次地震前出现的具有较高映震能力的前兆异常,如武威地电、刘家峡应力等。

4 地震预警模型及方案

笔者依据 2003 年民乐—山丹 6.1 级地震预报实践中积累的不同阶段预报指标体系,利用层次分析法,建立具有区域特征的震情预警指标模型,提取出了地震震情预警指标,确定了震情时间预警级别,并对震前的预报过程进行了预警检验。

4.1 建立层次预警模型

根据地震预测的特点,选取与地震孕育发展过程相关的指标,考虑不同的预测时间尺度和预测效能,利用层次分析法,建立区域地震震情指标预警模型。预测内容包括地震发生的时间、地点和强度,而且各方面的评价指标又具有层次结构,这就得采用多层次单目标的决策方法^①。由于短期阶段判定地点和强度的指标相对较少,震情指标预警模型只考虑震级和地点已确定的时间预警模型。具体将预测指标分为三个层次:目标层 A、准则层 B、指标层 C。指标层 B 可再分为长期 B1、中期 B2、短期 B3 等,指标层 C 主要选取目前对地震时间预测有一定效果的预测方法的对应率,也可分为长期 C1、中期 C2、短期 C3 等(表 4)。

4.2 判定预警级别

4.2.1 建立比较矩阵逐层计算权重

采用 1~5 为量度对各个指标数字化,按成对比较法比较下层各指标两两之间对上层某指标的重要程度,1 表示两个元素相比,具有相同重要性,2 表示两个元素相比,前者比后者稍重要,3 表示两个元素相比,前者比后者明显重要,4 表示两个元素相比,前者比后者强烈重要,5 表示两个

表 4 民乐—山丹 6.1 级地震前时间判定指标分层及无量纲化统计表

Tab. 4 Time decision index layer and statistics of non-dimension before Minle-Shandan 6.1 earthquake

指标分层	指标值 x_{ij}	
	时间尺度指标	代号
长期判别指标	构造格架	C11
	地震活动场	C12
	GPS 形变观测	C13
	前兆场	C14
中期判定指标	活跃期中强震成组活动	C21
	迁移与呼应	C22
	背景空区	C23
	跨断层形变观测	C24
短期判定指标	空区和条带	C31
	古浪地震窗	C32
	地震增强	C33
	显著地震	C34
	中等地震有序迁移	C35
	频度和 b 值	C36
	前兆异常同步变化	C37
	重点前兆	C38
	前兆转折或突变	C39

元素相比,前者比后者极端重要,据此建立比较矩阵,计算权重向量。

(1) B 层对 A 层

在确定预警等级(目标 A)方面,中长期指标 B2 比长期指标 B1 重要,中短期指标 B3 比中长期指标 B2 更重要,用和法计算权重(表 5),计算结果通过了一致性检验。

表 5 长、中、短期预报指标权重

Tab. 5 Index weight of long, medium and short term prediction

A	长 B1	中 B2	短 B3	权重 W
长 B1	1	1/2	1/4	0.137
中 B2	2	1	1/3	0.24
短 B3	4	3	1	0.623

(2) C 层对 B 层

根据表 1 中的长期阶段预报指标及效能评价,采用 1~5 的量度将各个指标对 B1 指标的重要性进行比较,建立比较矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}, n = 4$, 计算出各项指标的权重结果(表 6)。

根据表 2 中的中期阶段预报指标及效能评价,

① 杨马陵、沈繁奎. 2009. “基于层次分析法的地震预警评价模型”。

采用 1~5 的量度将各个指标对 B2 指标的重要性进行比较，建立比较矩阵 $A = (a)_{n \times n}, n = 4$ ，计算出各项指标的权重结果（表 7）。

表 6 长期预报指标权重

Tab. 6 Index weight of long-term prediction					
B	C1	C2	C3	C4	权重 W
C1	1	1/3	1/2	1	0.020 5
C2	3	1	2	2	0.058 4
C3	2	1/2	1	1	0.031 7
C4	1	1/2	1	1	0.026 8

表 7 中期预报指标权重

Tab. 7 Index weight of medium-term prediction					
B	C1	C2	C3	C4	权重 W
C1	1	2	4	5	0.121 8
C2	1/2	1	3	2	0.064 2
C3	1/4	1/3	1	1	0.026 2
C4	1/5	1/2	1	1	0.027 3

根据表 3 中的长期阶段预报指标及效能评价，采用 1~5 的量度将各个指标对 B3 指标的重要性进行比较，建立比较矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}, n = 9$ 。对总层次的一致性检验，由高层到低层逐层进行。指标层 C 对目标层 A 的层次结构通过了一致性检验，并得到了各指标的权重计算结果（表 8）。

表 8 短期预报指标权重

Tab. 8 Index weight of short-term prediction										
C	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	权重 W
C1	1	1	1/3	1/5	1/4	3	1/2	1/4	1/3	0.030 2
C2	1	1	1/4	1/5	1/3	4	1/2	1/3	1/2	0.034 1
C3	3	4	1	1	2	5	2	1	2	0.113 1
C4	5	5	1	1	2	4	2	1	2	0.120 1
C5	4	3	1/2	1/2	1	5	2	1/2	1	0.078 7
C6	1/3	1/4	1/5	1/4	1/5	1	1/3	1/4	1/3	0.018 9
C7	2	2	1/2	1/2	1/2	3	1	1/2	1	0.055 4
C8	4	3	1	1	2	4	2	1	2	0.110 6
C9	3	2	1/2	1/2	1	3	1	1/2	1	0.062 1

(3) 计算组合权向量

利用公式 (1-1) 计算组合权向量：

$$P_{ij} = w_i^{(k)} w_{ij}^{(k-1)}.$$

(1)

这里 $w_i^{(k)}$ 代表上一层的权重， $w_{ij}^{(k-1)}$ 代表下一层的

权重， P_{ij} 代表指标层对目标层的权重。结果见表 9。

表 9 指标层 C 对目标层 A 的权重

Tab. 9 The index weight of layer C to target layer A					
指标层	B1	B2	B3	指标层对目标层的权重	指标赋值
	0.137	0.24	0.623		
C11	0.020 5			0.002 8	1
C12	0.058 4			0.008 0	2
C13	0.031 7			0.004 3	1
C14	0.026 8			0.003 7	1
C21		0.121 8		0.029 2	4
C22		0.064 2		0.015 4	3
C23		0.026 2		0.006 3	2
C24		0.027 3		0.006 6	2
C31			0.030 2	0.018 8	3
C32			0.034 1	0.021 2	3
C33			0.113 1	0.070 5	4
C34			0.120 1	0.074 8	4
C35			0.078 7	0.049 0	3
C36			0.018 9	0.011 8	0
C37			0.055 4	0.034 5	3
C38			0.110 6	0.068 9	4
C39			0.062 1	0.038 7	3

4.2.2 预警值 Y 计算

将最低层（指标层 C）的各类定量和定性指标赋予整数表示的指标值（表 9）。即以无量纲的 1~4 表示，数值越高，表示发生预期地震的可能性越大。1~4 分别对应发震可能性较低、一般、较高和高 4 种内涵。

预警值 Y 由线性加权模型①：

$$Y_{\max} = \sum_{i=1}^m Y_{i\max} w_i,$$

(2)

$$Y_{\max} = \sum_{i=1}^m w_i \sum_{n=1}^n x_{ij} w_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} x_{ij}, n = n_1, n_2, \cdots n_n$$

(3)

计算得到。其中， $Y_{i\max} = 4 \sum_{j=1}^n w_{ij}$ ， $p_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_i w_{ij}$ 。

将预警等级分为红、橙、黄、蓝 4 个等级，分别对应的预警目标值范围见表 10。

按照公式 (2) 和 (3)，计算预警值为 3.138 9。依据预警等级划分标准，2003 年民乐—山丹 6.1 级地震前，震情预警等级为红色。

① 杨马陵、沈繁奎. 2009. “基于层次分析法的地震预警评价模型”。

表 10 预警值划分范围
Tab. 10 Scope of early warning

等级颜色	蓝	黄	橙	红
数值范围	$y < (1/4)y_{\max}$	$1/4y_{\max} \leq y < (2/4)y_{\max}$	$(2/4)y_{\max} \leq y < (3/4)y_{\max}$	$y \geq (3/4)y_{\max}$

5 结论和讨论

(1) 2003 年民乐—山丹 6.1 级地震前做出了较成功的短临地震预报。根据本次成功震例预报实践中积累的不同阶段预报指标体系,利用层次分析法,确定了祁连山地震带震情指标预警模型,获得了长、中、短临阶段时间预警指标,计算预警值为 3.138 9,依据预警等级判定标准,2003 年民乐—山丹 6.1 级地震前,震情预警级别为红色。

(2) 在研究过程中依据祁连山地震带中短期预测指标体系建立的震情指标预警模型,主要选取具有一定预测效能或重现性较好的预测指标,而本区震例研究结果显示,并非所有的震情预测指标在某一次地震前同时出现,因此在实际震情短临跟踪过程中要做出橙色或红色预警仍有一定的困难。

(3) 各种预测指标的效能评价及震情指标的量化仍属于经验性的,包含了一定的人为因素,进一步的研究可侧重于完善短期—短临震情指标的提取,使预测指标的效能评估更趋于科学合理。

本文中引用了沈繁奎和杨马陵“区域强震预测预警技术研究”课题中关于预警模型及定量计算预警值的部分研究结果,在此表示感谢!

参考文献:

柏立新. 2003. 农业有害生物灾变风险预警技术的探讨[J]. 防灾减灾工程学报,23(1):84-89.

刘小凤,杨立明. 2004. 青藏高原北部地区弱震空间图像特征与中短期地震预测方法[J]. 地震研究,27(2):209-215.

刘小凤. 2003. 青藏高原北部地区地震窗口特征及其预报意义[J]. 西北地震学报,25(4):359-364.

陆远忠,朱传镇,刘正荣,等. 1989. 地震预报方法实用化研究文集(地震学专集)[M]. 北京:学术书刊出版社.

杨立明,王兰民. 2004. 2003 年民乐—山丹 6.1 级地震短期预报的科学总结[J]. 西北地震学报,26(1):1-9.

杨马陵,沈繁奎,王正尚. 2004. 预警等级预报——一种新的地震预报发布形式和对策的思考[J]. 国际地震动态,(8):1-12.

张红兵. 2006. 云南省地质灾害预报预警模型方法[J]. 中国地质灾害与防治学报,17(1):40-42.

张晓东,蒋海昆,黎明晓. 2008. 地震预测与预警探讨[J]. 中国地震,24(1):67-76.

郑文俊,何文贵,赵广坤,等. 2005. 2003 年甘肃民乐—山丹 6.1、5.8 级地震发震构造及发震机制探讨[J]. 地震研究,28(2):133-140.

Study on the Early Warning Verification of Seismic Situation of the Minle-Shandan 6.1 Earthquake in 2003

LIU Xiao-feng, ZHANG Hui

(*Earthquake Administration of GanSu Province, Lanzhou 730000 GanSu, China*)

Abstract

Before Minle-Shandan $M6.1$ earthquake in 2003, short term earthquake prediction was put forward by Earthquake Administration of GanSu province on Sept. 20 that about $M6.1$ earthquake would be occurred in middle-eastern segment of Qilian Shan Mountain, then some effective short-impending tracked measures were adopted, which gained highly appraised and commended encouragement by China Earthquake Administration, GanSu Provincial Party Committee and GanSu Provincial Government. Based on successful case predicted practice, we get various phases of prediction index system, use hierarchy analysis, ascertain early warning index system model of seismic situation in Qilian Mountain Fault. By the results of delamination of early warning model and seismic situation early warning index, we translate qualitative and quantitative objects into non-dimensional parameters of 1 – 4, get importance of comparing substrate two adjacent targets to a upper layer target using paired comparison, calculate cell weight vector, and check up the coherence of model's whole hierarchy. Results of this research show that the early warning value of Qilian Shan Mountain Fault before this earthquake is 3.1389; by classification standards of early warning scale, early warning lever of seismic situation is red.

Key words: Minle-Shandan 6.1 earthquake, early warning model, index, early warning verification