

2011年腾冲5.2级双震前中短临异常特征*

杨 芬

(中国地震局 滇西地震预报实验场, 云南 大理 671000)

摘要: 2011年6月20日和8月9日腾冲5.2级双震前, 地震活动性、地下流体前兆和滇西实验场地震短临动态跟踪综合预测方案存在中短临异常现象。地震活动性存在云南 $M \geq 5$ 地震低频活动、 $M \geq 3$ 地震成条带活动和4级前兆震群活动的中短临异常, 地下流体前兆水氢、水汞、固体二氧化碳和流量存在短临异常; 滇西实验场地震短临动态跟踪综合预测方案存在中短临异常。在长、中、短、临渐进式预报思路的指导下, 综合分析各种中短临异常, 在时间上进行逐步逼近, 于2011年6月16日填写短临预测卡片, 对2011年6月20日和8月9日腾冲5.2级双震作出了准确的地震三要素短临预测。

关键词: 腾冲5.2级双震; 前兆异常; 短临预测

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)04-0433-10

0 前言

腾冲地区($24.6^{\circ} \sim 25.4^{\circ}\text{N}$, $98.5^{\circ} \sim 98.9^{\circ}\text{E}$)位于云南西部, 所属的腾冲—龙陵地震带是云南区域构造应力场分区的重要分区边界之一(皇甫岗, 姜朝松, 2000), 主要受到北北东—北东—北东东向的区域压应力场作用, 同时还受到东侧应力场分区的南南东—南东向压应力场的作用, 成为可能受到多组方向构造应力场作用的地区。腾冲地区地震的活动与印度板块和亚欧板块两个大陆板块俯冲、碰撞, 缅甸那加山、阿拉干山板块缝合线产生的斜俯冲和侧面挤压剪切作用密切相关(姜朝松等, 2000)。本区产生以南北构造为主, 辅以北西向、北东向配套构造的活动格架(皇甫岗, 姜朝松, 2000), 形成了近南北向腾冲断裂和怒江断裂, 以及北东向大盈江和龙陵—瑞丽断裂。区域地壳介质极不稳定, 岩浆活动频繁, 与火山活动相伴同, 地震频繁。

1 历史中强震活动

1512年以来, 腾冲地区共发生 $M \geq 5$ 地震15次(双震或震群计1次), 其中5.0~5.9级11次, 6.0~6.9级3次, 7.0~7.9级1次(图1)。 $M \geq 6$ 地震有1512年6.8级、1577年6.8级、1930年9

月26日6.0级和1976年7.4、7.3级双震。15次地震中双震有3组: 1961年5.8、5.6级双震、1976年7.4、7.3级双震和2011年两次5.2级双震。

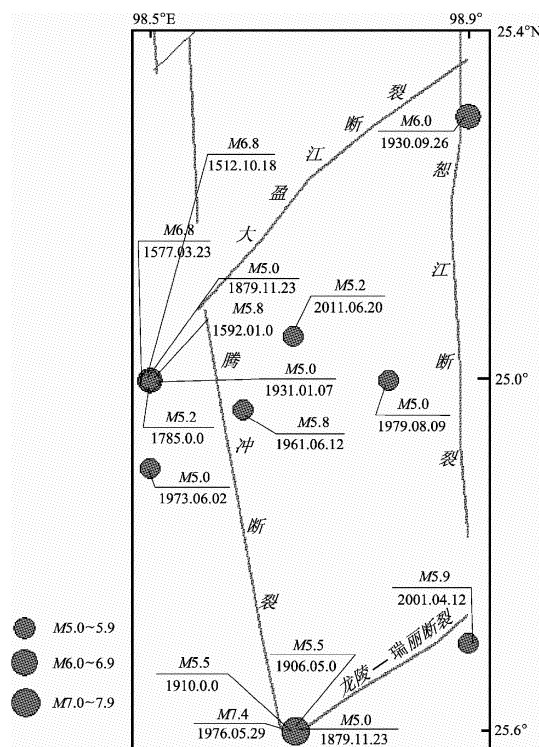


图1 1512年以来腾冲地区 $M \geq 5$ 地震分布图
Fig. 1 Distribution of $M \geq 5$ earthquakes since 1512 in Tengchong Area

* 收稿日期: 2013-09-17.

2 地震活动性异常

2.1 云南地区 $M \geq 5$ 地震平静异常

1965 年以来, 云南地区 $M \geq 5$ 地震年平均活动频次为 3~4 次。2010 年 2 月 25 日元谋 5.1 级地震后, 云南地区 $M \geq 5$ 地震平静时间长达 378 天, 直至 2011 年 3 月 10 日发生盈江 5.8 级地震。

某地区发生地震自然概率

$$P(x \geq M) = 1 - e^{-v\tau}. \quad (1)$$

式中, v 为研究区平均 $M_i \geq M$ 的地震发生率, 是复发周期的倒数, τ 为待预测时间。

按云南地区 $M \geq 5$ 地震年平均活动频次 3 次来统计, 实际平均复发周期 $T = 0.33$ a, 其倒数 $v = 3$ 。从 2011 年 3 月 10 日盈江 5.8 级地震至 2011 年 9 月 10 日待预测时间段 $\tau = 0.5$ 。将上述参数代入式 (1) (石绍先, 程万正, 2004), 得到云南地区发生 $M \geq 5$ 地震自然概率为 0.777, 因此云南地区存在发生 $M \geq 5$ 地震的危险性。

2.2 $M \geq 3$ 地震成条带活动

研究云南地区 2010 年 2 月 26 日至 2011 年 6 月 12 日 $M \geq 3$ 地震空间活动情况 (杨芬, 付虹, 2010) (图 2), 为避免 2010 年 2 月 25 日元谋 5.1 级地震和 2011 年 3 月 10 日盈江 5.8 级余震造成的干扰, 对这两次中强震余震进行了删除。云南地区 2010 年 2 月 26 日至 2011 年 6 月 12 日 $M \geq 3$ 地震活动成 2 个条带分布: (1) 滇西北地区的盈江—梁河—腾冲—保山—施甸—巍山—姚安—大姚一带; (2) 滇东北地区的东川—会泽—巧家—鲁甸—昭通—大关—盐津—水富一带。第 1 个地震条带, 带长 L 为 460 km, 宽 D 为 90 km, 内地震次数 $N_{\text{条}}$ 为 135 次, 条带外地震次数 $N_{\text{外}}$ 为 9 次。第 2 个地震条带, 带长 L 为 370 km, 条带宽 D 为 100 km, 条带内地震次数 $N_{\text{条}}$ 为 42 次, 条带外地震次数 $N_{\text{外}}$ 为 9 次。第 1 个地震条带符合: ① 组成条带地震次数 $N_{\text{条}} \geq 6$ 次; ② 条带长宽比 $L/D \geq 5$; ③ 条带空段不超过全长的 1/3; ④ 条带内外频度比条件: $N_{\text{条}}/(N_{\text{条}} + N_{\text{外}}) \geq 75\%$ 。初步分析认为第 1 个地震条带存在发生 5~6 级地震危险性。

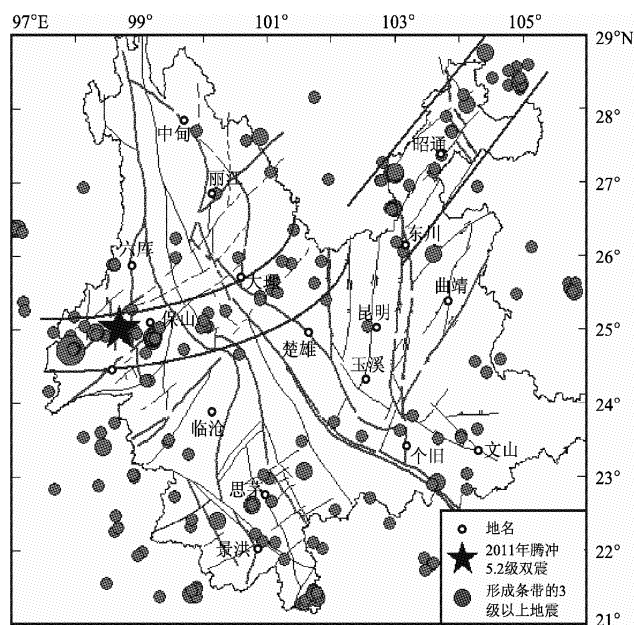


图 2 2010 年 2 月 26 日至 2011 年 6 月 12 日
 $M \geq 3$ 云南地区地震分布图

Fig. 2 Distribution of $M \geq 3$ earthquakes from Feb. 26, 2010 to Jun. 12, 2011 in Yunnan

2.3 腾冲 4.5~4.9 级震群窗

考虑到 1986 年以来云南测震台网监控能力较强, 选取 1986 年以来的测震资料进行系统地研究分析。腾冲 4.5~4.9 级震群窗范围为: 近南北向腾冲和怒江断裂、北东向大盈江和龙陵—瑞丽断裂 4 条活动断裂所围成的区域 (图 3c)。

1986 年以来, 腾冲 4.5~4.9 级震群窗共发生 3 组 4.5~4.9 级震群 (表 1), 其中 2 组震群发生后 10 个月内 150 km 范围内会发生 $M \geq 5$ 地震, 对应率为 0.67。4.5~4.9 级震群地震序列的选取原则: 以震群主震为参考点 15 km 范围内, 包括主震发生前后的所有地震, 且整个地震序列持续时间不超过 200 天。

研究 3 组 4.5~4.9 级震群地震序列 h 值的情况 (表 1), 发现震群地震序列 $h \leq 1.0$ 时, 为前兆震群, 其后 10 个月内 150 km 范围内会发生 $M \geq 5$ 地震; 而震群地震序列 $h > 1.0$ 时, 为非前兆震群, 其后本区及邻近地区不会发生 $M \geq 5$ 地震。因此, 腾冲发生 4.5~4.9 级震群, 且地震序列 $h \leq 1.0$ 时, 其后 10 个月内 150 km 范围内发生 $M \geq 5$ 地震的危险性为 $2/2 = 1.0$ 。

表 1 腾冲 4.5 ~ 4.9 级震群地震序列 h 值和映震效果统计表

Tab. 1 The h -value of $M4.5 \sim 4.9$ earthquake swarms series and their corresponding effects in Tengchong Area

序号	震群主震发震 时间/年-月-日	主震 震级	震群持续时段 /年-月-日	震群地震 总次数	地震序列 h 值	地震序列 类型	对应 $M \geq 5$ 地震	映震间隔 时间/月	映震距离 /km	地震序列 h 值 判定结果检验
1	1988-01-21	4.5	1987-12-03 ~ 1988-01-26	46	0.3	前兆震群	1988-11-06 澜沧 7.6、7.2	10	150	正确
2	1990-06-20	4.7	1990-04-01 ~ 1990-09-26	101	0.7	前兆震群	1991-01-27 中缅边界 5.4	7	140	正确
3	2005-01-07	4.8	2004-10-13 ~ 2005-04-29	54	1.2	主震型				正确
4	2011-05-31	4.7	2011-05-02 ~ 2011-06-12	342	1.0	前兆震群	2011-06-20 2011-08-09 腾冲 5.2、5.2	1	2	正确

2011 年 5 月 31 日腾冲发生 4.7 级震群，震后跟踪地震序列活动情况，至 2011 年 6 月 12 日，发现其地震序列衰减不正常， h 值等于 1.0，判断为前兆震群（图 3b）。笔者认为以腾冲为参考点，150 km 范围内存在发生 $M \geq 5$ 地震危险性。2011 年 5 月 31 日腾冲 4.7 级震群为预测 2011 年 6 月 20 日和 8 月 9 日腾冲 5.2 级双震地震三要素提供了很好的参考依据。

3 地下流体前兆异常情况

3.1 地震短临动态跟踪综合预测方案达到中短临异常指标

3.1.1 中期异常指标

利用式（2）和（3）对已通过 R 信度检验的 8 条单项前兆异常指标（表 2）进行综合计算处

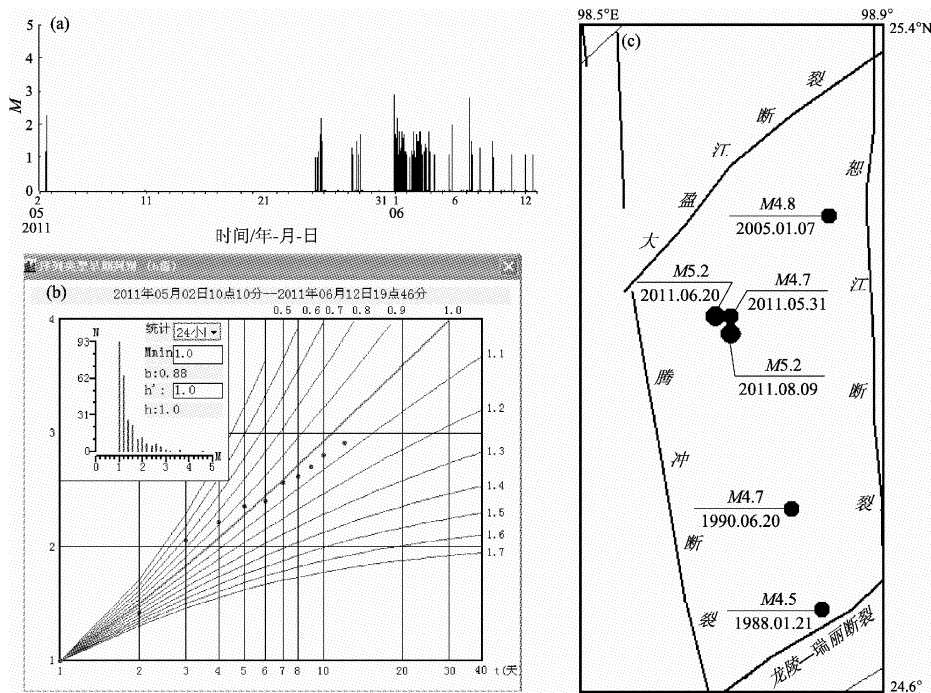


图 3 2011 年 5 月 31 日腾冲 4.7 级震群地震序列 M - t (a)、 h 值 (b)
和 1986 年以来 4.5 ~ 4.9 级地震窗空间分布图 (c)

Fig. 5 The M - t chart (a) and h -value (b) of Tengchong $M4.7$ earthquake swarm series on May 31, 2011,
and spatial distribution of seismic active windows of $M4.5 \sim 4.9$ earthquakes in Tengchong from 1986 (c)

理,形成滇西实验场区(24°~28°N,98°~102°E) $M \geq 5$ 地震危险性综合判定量化指标。选用通过 R 检验的 8 条单项前兆异常指标异常台项数(Y_i)作为基本参量,用相应权重(W_i)集成方法对其进行综合计算处理。综合概率为

$$P_m = \sum_{i=1}^n W_i Y_i.$$

(2) 式中, E_i 用地震虚报率和漏报率之和表示。

各参数的权重由对实际预报贡献大小决定:

$$W_i = \frac{\frac{1}{E_i}}{\sum_{i=1}^1 \frac{1}{E_i}}.$$

(3)

表 2 滇西实验场 $M \geq 5$ 地震危险性综合判定量化指标预报效能参数表

Tab. 2 Prediction efficiency parameters for seismic risk comprehensive judgment quantitative indexes of $M \geq 5$ earthquakes in the experimental site of the western Yunnan area

序号	单项异常指标	异常判别值	对应率	概括率	虚报率	漏报率	R 实际值	R 理论值	平均应震时间/月
1	下关水汞日均值变化速率	≥ 1.47 ng/L	17/24 = 0.71	17/19 = 0.89	7/24 = 0.29	2/19 = 0.11	0.60	0.23	3.9
2	20 号井水汞日均值	≥ 65 ng/L	12/15 = 0.80	12/19 = 0.63	3/15 = 0.20	7/19 = 0.37	0.39	0.25	4.6
3	下关水氡日均值	≥ 8.29 Bq/L	15/21 = 0.71	15/19 = 0.79	6/21 = 0.29	4/19 = 0.21	0.49	0.25	4.5
4	鹤庆化龙水氡日均值变化速率	≥ 0.18 Bq/L	11/20 = 0.55	11/19 = 0.58	9/20 = 0.45	8/19 = 0.42	0.35	0.24	4.7
5	南涧水氡日均值变化速率	≥ 0.16 Bq/L	13/16 = 0.81	13/19 = 0.68	3/16 = 0.19	6/19 = 0.32	0.43	0.25	4.4
6	宾川气压五日均值变化速率	≥ 0.006 Pa	16/23 = 0.70	16/19 = 0.84	7/23 = 0.30	3/19 = 0.16	0.55	0.24	4.1
7	鹤庆固体二氧化碳日均值一阶差分	≥ 55 ≤ -55 mg/L	12/17 = 0.71	12/19 = 0.63	5/17 = 0.29	7/19 = 0.37	0.41	0.25	4.2
8	下关固体二氧化碳五日均值一阶差分	≥ 18.84 ≤ -18.4 mg/L	15/21 = 0.71	15/19 = 0.79	6/21 = 0.29	4/19 = 0.21	0.56	0.25	3.5

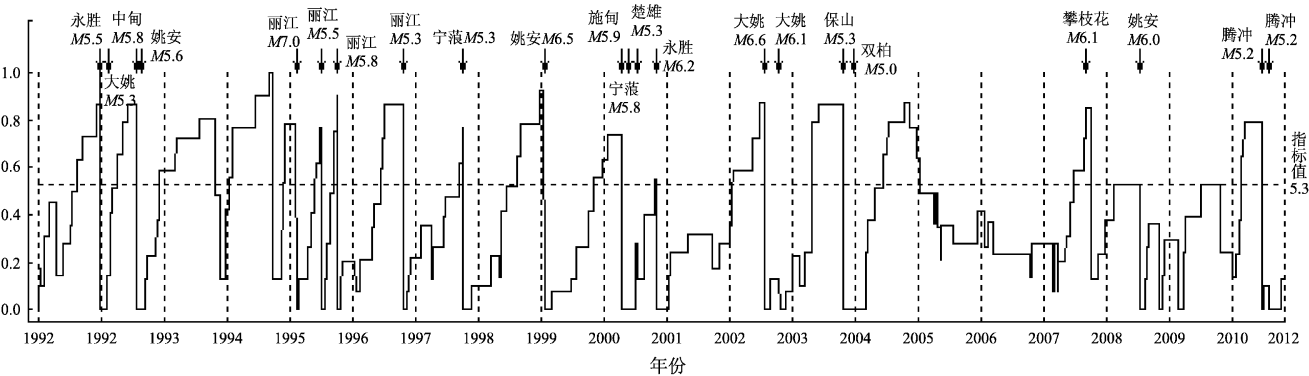


图 4 滇西实验场 $M \geq 5$ 地震综合判定量化指标概率值

Fig. 4 Probability value for comprehensive judgment quantitative indexes of $M \geq 5$ earthquake in the experimental site of the western Yunnan area

综合概率值达到预报阈值 0.53 时 (杨芬, 吴国华, 2012), 其后 6 个月左右滇西实验场区存在发生 $M \geq 5$ 地震的危险性 (图 4、表 3), 而且一般对应 2 次 $5 \leq M < 6$ 地震或 1 次 $M \geq 6$ 地震, 只有 1996、1997 年丽江余震例外。综合指标漏报 2001 年楚雄 5.1 级、2009 年宾川 5.0 级和 2010 年元谋 5.1 级地震。综合指标对应率 $15/19 = 0.79$, 概括率为 $15/17 = 0.88$, $R_{\text{实}} = 0.405$, $R_{\text{理}} = 0.247$, $R_{\text{实}}$

$$> R_{\text{理}} \circ$$

1992 年以来综合概率值对应 $M \geq 5$ 地震 15 次, 其中 6 次映震时间为 3 个月内, 8 次映震时间在 6 个月内, 1 次映震时间 6.2 个月。最短映震时间为 0.3 个月, 最长映震时间为 6.2 个月, 平均映震时间为 3.4 个月。滇西实验场 $M \geq 5$ 地震综合判定量化指标概率值对滇西实验场区 $M \geq 5$ 地震 6 个月内中短期预测有较好的指导意义。

表3 滇西实验场综合概率值和 $M \geq 5.0$ 地震相关性统计表

Tab. 3 Correlation statistic between comprehensive probabilities value and $M \geq 5.0$ earthquakes in the experimental site of the western Yunnan area

序号	地震时间 /年-月-日	震中参数			震级	最大概 率值	最大概率值出现时间 /年-月-日	达标概 率值	概率值达标时间 /年-月-日	间隔时间 /月	对应 情况
		φ_N	λ_E	地点							
01	1992-12-18	26°20′	100°33′	永胜	5.6	1.0	1992-12-16	0.631 1	1992-08-05	4.4	对应
	1993-02-01	25°51′	101°20′	大姚	5.3						
02	1993-07-17	27°49′	99°41′	中甸	5.8	1.0	1993-05-29	0.658 1	1993-03-28	3.6	对应
	1993-08-14	25°27′	101°15′	姚安	5.6						
03						0.801 8	1994-10-19	0.590 1	1993-12-03		虚报
04						1.0	1995-09-01	0.560 1	1995-01-10		虚报
05	1996-02-03	27°18′	100°13′	丽江	7.0	0.779 4	1995-12-03	0.531 3	1995-11-22	2.4	对应
06	1996-07-02	26°56′	100°05′	丽江	5.5	0.763 9	1996-06-20	0.619 6	1996-05-25	1.2	对应
07	1996-09-25	27°12′	100°18′	丽江	5.8	0.899 4	1996-09-25	0.619 6	1996-09-05	0.7	对应
08	1997-10-23	26°53′	100°18′	丽江	5.3	0.867 2	1997-06-30	0.592 7	1997-06-13	4.3	对应
09	1998-10-02	27°18′	101°05′	宁蒗	5.3	0.763 9	1998-09-30	0.619 6	1998-09-14	0.6	对应
	1998-11-19	27°14′	100°58′		6.2						
	1999-01-03	27°12′	101°03′		5.0						
10	2000-01-15	25°35′	101°07′	姚安	6.5	0.923 7	1999-12-25	0.646 6	1999-08-11	5.1	对应
11	2001-04-12	24°50′	99°01′	施甸	5.9	0.734 3	2001-01-20	0.557 4	2000-10-30	5.4	对应
	2001-05-24	27°38′	100°48′	宁蒗	5.8						
12	2001-07-10	26°14′	101°22′	楚雄	5.3	0.548 6	2001-10-19	0.548 6	2001-10-19	0.3	对应
	2001-10-27		100°33′	永胜	6.2						
13	2003-07-21	25°57′	101°13′	大姚	6.2	0.869 8	2003-06-21	0.586 8	2003-01-16	6.2	对应
	2003-10-16	25°55′	101°18′		6.1						
14	2004-10-19	25°06′	99°03′	保山	5.3	0.867 2	2004-06-06	0.643 4	2004-04-22	5.9	对应
	2004-12-26	24°43′	101°31′	双柏	5.0						
15						0.869 8	2005-10-16	0.658 0	2005-06-15		虚报
16	2008-08-30	26°00′	102°00′	攀枝花	6.1	0.852 5	2008-08-30	0.584 2	2008-06-25	2.2	对应
17	2009-07-09	25°33′	101°03′	姚安	6.0	0.525 2	2009-02-15	0.525 2	2009-02-15	4.8	对应
18	2009-11-02	25°57′	100°40′	宾川	5.0						漏报
	2010-02-25	25°25′	101°55′	元谋	5.1						
19						0.5252	2010-06-30	0.5252	2010-06-30		虚报
20	2011-06-20	25°03′	98°41′	腾冲	5.2	0.793 5	2011-06-20	0.646 0	2011-02-26	3.7	对应
	2011-08-09	25°02′	98°42′		5.2						

表 3 中最大概率值是指 8 项前兆指标中出现异常的所有指标概率值总和, 概率值总和出现时间为最大概率值出现时间; 达标概率值是指 8 项前兆指标中出现异常的指标概率值之和突破预报阈值 0.53 时的值, 综合概率值达到预报阈值 0.53 的时间为概率值达标时间。

2011 年 2 月 26 日综合概率值为 0.646 (表 3), 超过预报阈值 0.53, 预示未来 6 个月左右滇西实验场区存在发生 $M \geq 5$ 地震的危险性。

3.1.2 短临异常指标

综合概率值达指标 (首要条件), 同时 8 条指标异常中有一个水汞测项和一个固体二氧化碳测项达标 (必要条件), 滇西实验场区未来 3 个月内

存在发生 $M \geq 5.0$ 地震的危险性, 进入短临预测起报阶段, 同时满足以上条件的时间为起报时间。

1992 年以来同时满足以上条件共有 19 次, 其中 15 次对应 $M \geq 5$ 地震, 对应率 $15/19 = 0.79$, (表 4)。其中 5 次映震时间在 1 个月内, 5 次映震时间在 3 个月内, 5 次映震时间为 4 个多月, 平均映震时间为 2.3 个月。漏报 2001 年楚雄 5.1 级、2009 年宾川 5 级和 2010 年元谋 5.1 级地震, 概括率为 $15/17 = 0.88$, $R_{实} = 0.405$, $R_{理} = 0.247$, $R_{实} > R_{理}$ 。统计规定 4 个月内的地震视为一组地震。滇西实验场 $M \geq 5.0$ 地震综合判定量化方案对滇西实验场区 $M \geq 5.0$ 地震 3 个月内短临预测有较好的指导意义。

表 4 滇西实验场综合概率值、水汞和固态二氧化碳达标时间与 $M \geq 5$ 发震时间统计表

Tab. 4 Statistic of earthquake and the synthetic probabilities, value water mercury, solid carbon dioxide in the experimental site of the western Yunnan area

序号	综合概率值 /年-月-日	洱源 20 号 井水汞日均值 /年-月-日	下关水汞日均值 变化速率 /年-月-日	下关固体二氧化碳 五日均值一阶差分 /年-月-日	鹤庆固体二氧化碳 日均值一阶差分 /年-月-日	对应地震 时间 /年-月-日	间隔时间 /月	对应 情况
1	1992-08-05	1992-12-16	1992-04-10	1992-08-05	1992-09-06	1992-12-18 1993-02-01	4.4	对应
2	1993-03-28	1993-02-17	1993-03-28	1993-07-20	1993-07-15	1993-07-17 1993-08-14	0.1	对应
3	1993-12-03	1993-12-01	1993-11-13	1994-03-05	1994-02-04			虚报
4	1995-01-10	1995-01-10	1994-12-19	1995-01-30	1995-02-03			虚报
5	1995-11-22	1995-11-06	1995-11-27	1995-11-15	1995-12-03	1996-02-03	2.2	对应
6	1996-05-25		1996-04-30	1996-05-25		1996-07-02	1.2	对应
7	1996-09-05	1996-09-11	1996-07-26	1996-09-05		1996-09-25	0.7	对应
8	1997-06-13	1997-02-09	1997-06-13		1997-04-29	1997-10-23	4.3	对应
9	1998-09-14		1998-09-14	1999-01-05	1998-12-30	1998-10-02 1999-01-03	0.1	对应
10	1999-08-11	1999-05-01	1999-05-16	1999-11-05	1999-10-16	2000-01-15	3.0	对应
11	2000-10-30		2000-09-29	2001-02-25	2001-01-20	2001-04-12 2001-05-24	2.7	对应
12	2001-10-19	2001-09-02	2001-10-19	2001-07-10		2001-07-10 2001-10-27	0.3	对应
13	2003-01-16	2003-05-11	2003-06-21	2003-01-05	2003-01-16	2003-07-21 2003-10-16	2.3	对应
14	2004-04-22	2004-04-19	2004-04-24	2004-06-10	2004-07-03	2004-10-19 2004-12-26	4.3	对应
15	2005-06-15	2005-07-08	2005-06-15	2005-03-15	2005-03-03			虚报
16	2008-06-25	2008-08-23		2008-08-30	2008-08-02	2008-08-30	0.2	对应
17	2009-02-15		2008-12-25	2008-11-10	2008-11-12	2009-07-09	4.8	对应
18	2010-06-30	2011-01-03	2011-03-10	2010-06-30	2010-07-12			虚报
19	2011-02-26		2011-03-10	2011-01-25	2011-01-24	2011-06-20	3.3	对应

注: 黑色加粗标注为满足决策方案预测条件的固体二氧化碳和水汞测项。间隔时间是指首要条件和必要条件同时满足的时间至地震发生的时间间隔。

2011 年 2 月 26 日综合概率值为 0.646，首要条件满足。2011 年 1 月 24 日 8 条前兆指标中鹤庆固体二氧化碳日均值一阶差分达到跟踪指标预测阈值，2011 年 3 月 10 日下关水汞日均值变化速率达到跟踪指标预测阈值，必要条件也满足。此时已具备进行短临预测的条件，但考虑到 15 次震例中 5 次映震时间为 4 个多月，因此再综合结合地震

活动性情况和映震效果较好的单项前兆指标进行进一步地分析判定。

3.2 水汞异常指标

下关水汞日均值突破 200 ng/L 的高值时，云南地区存在发生 $M \geq 5$ 地震危险性，对应率 14/17 = 0.82（图 5）。2011 年 5 月 11 日和 13 日下关水汞分别出现 203 ng/L 和 240 ng/L 的高值异常。

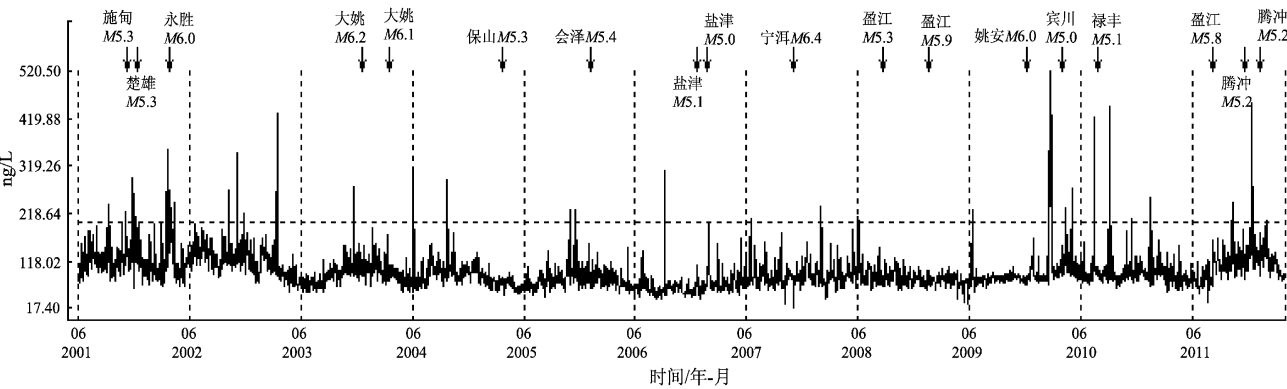


图 5 下关水汞日均值图

Fig. 5 Daily mean value of water mercury in Xiaguan hot spring

3.3 固体二氧化碳异常指标出现同步性异常

(1) 鹤庆固体二氧化碳日均值一阶差分突破 3 倍方差线时，云南地区存在发生 $M \geq 5$ 地震危险

性，对应率 15/18 = 0.83（图 6a）。2011 年 4 月 13 日、4 月 14 日、5 月 1 日和 5 月 3 日鹤庆固体二氧化碳日均值一阶差分都突破 3 倍方差线。

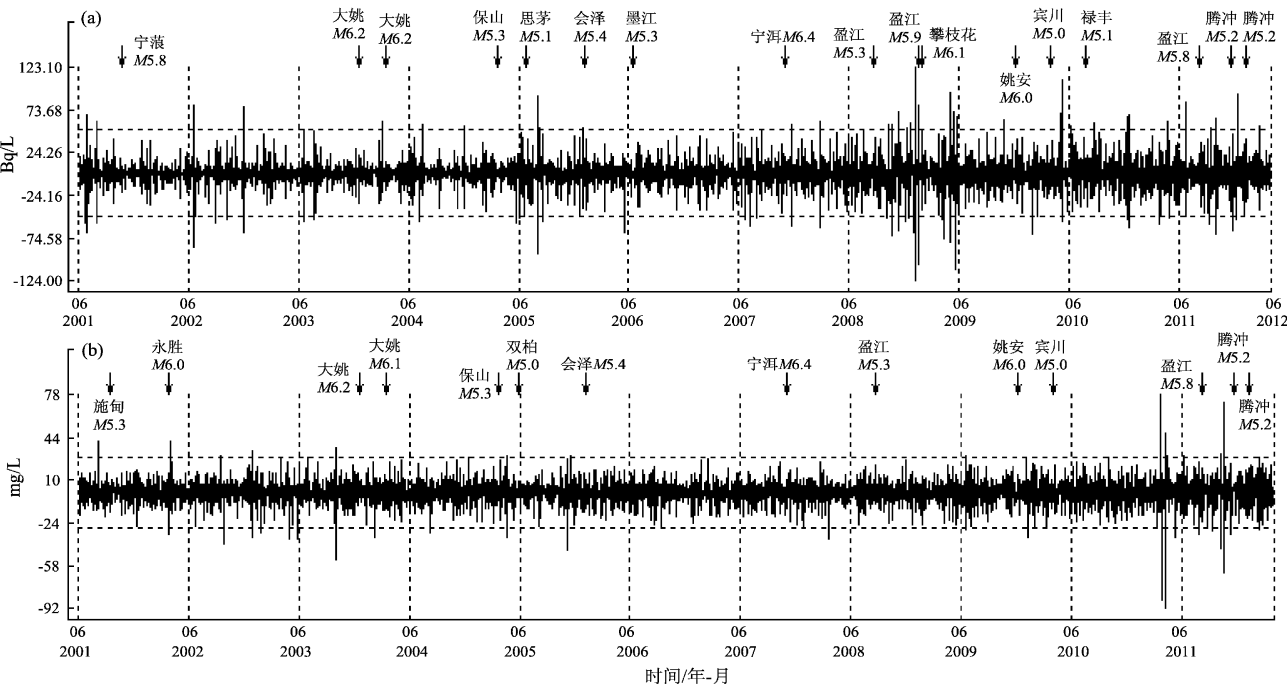


图 6 固体二氧化碳日均值一阶差分图

(a) 鹤庆; (b) 下关

Fig. 6 First order difference graph of daily mean of solid carbon dioxide

(a) Heqing hot spring water; (b) Xiaguan hot spring water

(2) 下关固体二氧化碳日均值一阶差分 ≥ 28 mg/L 或 ≤ -28 mg/L 时, 云南地区存在发生 $M \geq 5$ 地震危险性, 对应率 $13/16 = 0.81$ (图 6b)。2011 年 4 月 11 日、5 月 8 日、5 月 18 日、5 月 19 日、5 月 20 日下关固体二氧化碳日均值一阶差分分别突破指标值。

3.4 水氡异常指标

(1) 龙陵水氡日均值突破 500 Bq/L 时, 云南地区存在发生 $M \geq 5$ 地震危险性, 对应率 $4/5 = 0.80$ (图 7a)。2011 年 4 月 7~14 日龙陵水氡日均值多次出现突破 500 Bq/L 的高值异常。

(2) 保山二井水氡日均值突破 2 倍方差线时, 云南地区存在发生 $M \geq 5$ 地震危险性, 对应率 $10/12 = 0.83$ (图 7b)。2011 年 5 月 17 日、6 月 7

日和 6 月 11 日保山二井水氡日均值分别突破 2.0 倍方差线。

(3) 南涧水氡日均值突破 2 倍方差线时, 云南地区存在发生 $M \geq 5$ 地震危险性, 对应率 $12/14 = 0.86$ (图 7c)。2011 年 3 月 10 日盈江 5.8 级地震后南涧地办水氡日均值出现更大幅度的低值异常过程。

3.5 流量出现破年变现象

(1) 施甸流量日均值呈现突破 2.0 L/s 的高流量时, 其本区及邻区 150 km 范围内存在发生 $M \geq 5$ 地震危险性, 或云南地区存在发生 $M \geq 6$ 地震危险性 (图 8a)。2011 年施甸流量日均值呈现持续高值异常, 在 2011 年 3 月 10 日盈江 5.8 级地震后仍处于高值异常状态, 破年变状态清晰。

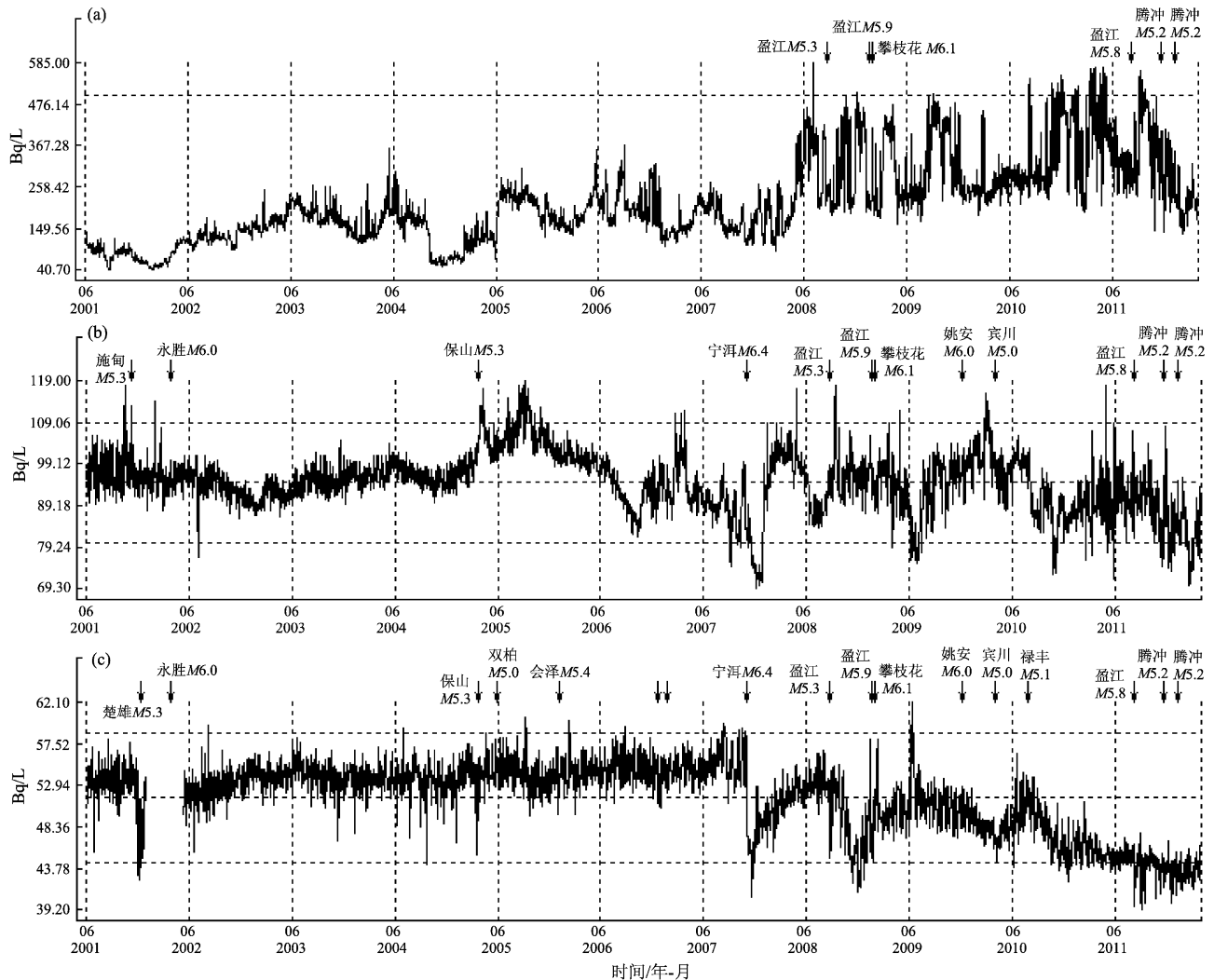


图 7 水氡日均值图

(a) 龙陵; (b) 保山二井; (c) 南涧地办

Fig. 7 Daily mean value of water radon

(a) Longling hot spring; (b) Baoshan No. 2 well (c) Nanjian Station

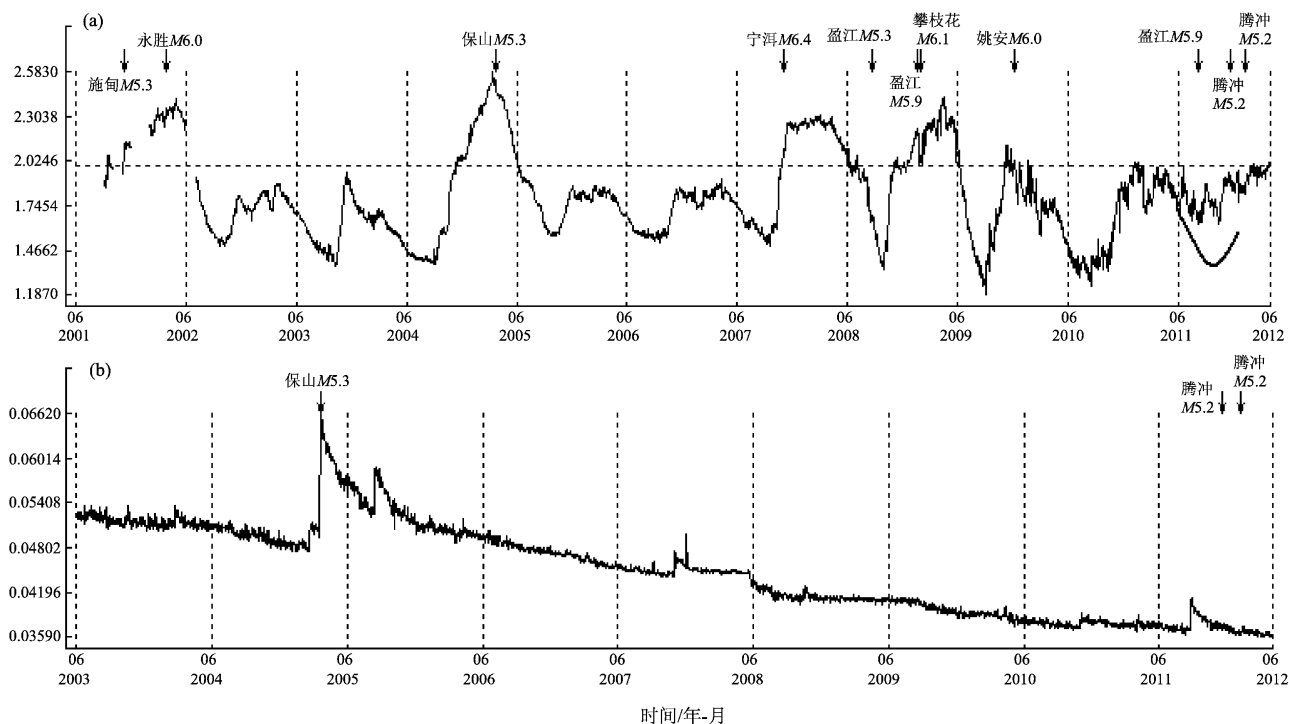


图8 流量日均值图

(a) 施甸; (b) 保山一井

Fig. 8 Daily mean value of water flow

(a) Shidian Station (b) Baoshan No. 1 well

(2) 保山一井流量日均值呈现持续性高流量状态时,其本区存在发生 $M \geq 5$ 地震危险性(图8b)。2011年3月25日保山一井、施甸流量日均值开始出现持续性高值异常过程。

4 结论和讨论

(1) 2011年6月20日和8月9日腾冲5.2级双震前,地震活动性、地下流体前兆和滇西实验场地震短临动态跟踪综合预测方案存在中短临异常现象。地震活动性存在云南 $M \geq 5$ 地震低频活动、 $M \geq 3$ 地震成条带活动和4级前兆震群活动的中短临异常;地下流体前兆水氦、水汞、固体二氧化碳和流量存在短临异常;滇西实验场地震短临动态跟踪综合预测方案存在中短临异常。

(2) 云南 $M \geq 5$ 地震低频活动和 $M \geq 3$ 地震成条带活动提供了地震活动性中期预测依据。滇西实验场地震短临动态跟踪综合预测方案2011年2月26日中期异常指标达标,2011年3月10日短临异常指标达标。2011年4~6月初地下流体前兆水氦、水汞、固体二氧化碳和流量不断出现指标

性短临异常。2011年5月31日腾冲发生4.7级震群,震后一直跟踪地震序列活动情况,至2011年6月12日,地震序列衰减不正常, h 值等于1.0,为前兆震群,此时预测时间进一步逼近,预测范围进一步缩小。

在长、中、短、临渐进式预报思路的指导下,综合分析以上几个方面的内容,在时间上进行逐步逼近,笔者于2011年6月16日填写短临预测卡片,预测卡片意见:2011年6月16日至9月15日,①以(24.87°N, 98.54°E)为参考点,半径75 km范围内存在发生5.0~5.9级地震危险性;②以(26.12°N, 100.50°E)为参考点,半径75 km范围内存在发生5.0~5.9级地震危险性。2011年6月20日和8月9日腾冲发生5.2级双震,地震三要素预测准确。

(3) 地震活动性时空活动异常指标、地下流体单项前兆异常指标为短临预测提供了定性的预测依据,滇西实验场地震短临动态跟踪综合预测方案为短临预测提供了定量的综合预测依据。定量和定性分析相结合提高了短临预测的准确率,定量预测是基础,再结合定性的预测依据作为

补充。

(4) 地震活动性异常指标和地下流体前兆异常指标同时为短临预测提供了重要的预测依据。

参考文献:

皇甫岗,姜朝松.2000. 腾冲火山研究[M]. 云南:科技出版社.
姜朝松,王绍晋,周瑞琦,等.2000. 腾冲火山活动构造动力学研究

[J]. 地震研究,23(2):179-187.

石绍先,程万正.2004. Anomalies of Precursory Group and the Grouped Strong Earthquakes in Sichuan-Yunnan Region[J]. 中国地震研究:英文版,18(4):348-356.

杨芬,付虹.2010. 滇西北东条带地震围空及条带与中强地震的时空关系[J]. 地震地磁观测与研究,31(5):7-12.

杨芬,吴国华.2012. 滇西实验场地震短临动态跟踪综合预测方案[J]. 国际地震动态,(12):8-15.

Medium-short-impending Term Anomaly Characteristic before Tengchong M5.2 Double Earthquakes in 2011

YANG Fen

(Western Yunnan Earthquake Prediction Study Area, CEA, Dali 671000, Yunnan, China)

Abstract

There existed medium, short, impending term anomaly in the seismic activity, underground fluid precursors and comprehensive prediction scheme for short-impending term earthquake dynamic tracking in the experimental site of the western Yunnan before Tengchong M5.2 double earthquakes on Jun. 20 and Aug. 9, 2011. Seismic activities which included low frequency activity of $M \geq 5.0$ earthquakes, seismic belt activity of $M \geq 3.0$ earthquakes and precursory earthquake swarm activity of $M \geq 4.0$ earthquakes have the medium, short, impending term anomalies in west Yunnan. Underground fluid precursors such as water Rn, water Hg, CO₂ and flow of water also appeared short-impending term anomaly, accordingly, there existed medium, short, impending term anomalies in the synthetic prediction scheme of short-impending dynamic tracking in the experimental site of the western Yunnan. Under the guidance of gradual prediction idea in long, medium, short, impending term, we comprehensively analyzed short-impending term anomaly approaching with time step by step, and filled in short-impending term prediction card on Jun. 16, 2011 to made an accurate short-term prediction (including three elements of earthquake) for Tengchong M5.2 double earthquakes on Jun. 20 and Aug. 9, 2011.

Key words: Tengchong M5.2 double earthquakes; precursory anomalies; short-impending term prediction